中国质量协会
CHINA ASSOCIATION FOR QUALITY

中国质量协会六西格玛绿带
注册考试指定辅导教材

六西格玛绿带手册

Six Sigma Green Belt Handbook



中国人民大学出版社

中国质量协会六西格玛绿带
注册考试指定辅导教材

六西格玛绿带手册

中国人民大学出版社
·北京·

图书在版编目（CIP）数据

六西格玛绿带手册/何桢主编. —北京：中国人民大学出版社，2011.3
ISBN 978-7-300-13287-7

Ⅰ.①六… Ⅱ.①何… Ⅲ.①企业管理：质量管理-手册 Ⅳ.①F273.2-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 020265 号

中国质量协会六西格玛绿带注册考试指定辅导教材

六西格玛绿带手册

中国质量协会组织编写
何　桢　主编

Liuxigema Lüdai Shouce

出版发行	中国人民大学出版社		
社　　址	北京中关村大街 31 号	**邮政编码**	100080
电　　话	010－62511242（总编室）		010－62511398（质管部）
	010－82501766（邮购部）		010－62514148（门市部）
	010－62515195（发行公司）		010－62515275（盗版举报）
网　　址	http://www.crup.com.cn		
	http://www.ttrnet.com（人大教研网）		
经　　销	新华书店		
印　　刷	北京东君印刷有限公司		
规　　格	185 mm×260 mm　16 开本	**版　　次**	2011 年 3 月第 1 版
印　　张	25.75 插页 1	**印　　次**	2011 年 3 月第 1 次印刷
字　　数	569 000	**定　　价**	59.00 元

版权所有　侵权必究　　印装差错　负责调换

《六西格玛绿带手册》编委会

顾　问　陈邦柱　刘源张
主　任　弋　辉
主　编　何　桢
编　委　马逢时　杨跃进　赵光玮　马义中　张彦玲　龚晓明
　　孙　静　邵家骏　王金德　段一泓　李文成　王丽林

前　言

六西格玛管理经过20多年的发展与演化，已经成为国内外许多知名企业的持续改进经营战略，并为这些企业带来了显著的经济效益，同时培养了一大批企业管理精英和技术骨干，构建了真正意义上的学习型组织，提升了企业的竞争力。近年来，六西格玛管理的理念越来越多地得到社会的认可，六西格玛管理模式的实施从制造业拓展到服务业、医疗机构乃至政府管理机构，各界对六西格玛管理知识的需求也与日俱增。

众所周知，六西格玛管理的成果要通过成功实施六西格玛项目来体现，六西格玛黑带和绿带是六西格玛项目实施的主力军。相对于黑带而言，绿带不需要掌握过于复杂的六西格玛理论和工具，更容易吸引多数员工参与。由于绿带人数众多，且多处在生产和管理的一线，企业培养一支高素质的绿带队伍对于六西格玛理念自上而下的贯彻和持续推进起到关键的作用，而且，相当一部分企业实施六西格玛的初期是从培养绿带开始的。2004年以来，我国在六西格玛黑带的培养、知识结构、水平考试、资格认证等方面已经建立了比较完整的体系、制度和流程，得到广大企业的认可。随着六西格玛管理的逐步实施，多数企业认识到对绿带资格的认证缺乏规范，不同企业差别很大，迫切需要梳理六西格玛绿带知识体系，编写六西格玛绿带教材，为全国六西格玛绿带水平考试和资格认证奠定基础。本书的编写正是在这一背景下完成的。

本书是中国质量协会注册六西格玛黑带考试指定辅导教材《六西格玛管理》（第二版）（中国人民大学出版社，2007年）的姊妹篇，是在黑带教材的基础上，结合绿带的知识体系和六西格玛的最新发展编写而成的。本书的一个显著特点是将精益知识融入六西格玛的DMAIC流程，更方便绿带学员在实践中综合使用精益和六西格玛的工具解决问题。与黑带教材一样，本书不区分六西格玛与精益六西格玛，认为它们是同一种管理模式下的不同叫法；二是尽量减少了统计理论部分，增加了软件操作的一些指导；三是除在书中介绍MINITAB软件的使用外，考虑到有些企业使用JMP软件作为六西格玛统计分析工具，在附录部分提供了JMP统计软件使用简介。

本书由何桢主编，负责全书内容的整体设计和部分编写工作，参加编写工作的还有马逢时、马义中、杨跃进、赵光玮、张彦玲等。段一泓、李文成、王丽林、赵建坤参加了本

书的大纲讨论、编写和协调等大量工作，尹洁、徐雪梅等参加了部分书稿的校对工作。全书由何桢负责审校和定稿。

本书的编写得到了中国质量协会副会长、六西格玛管理推进工作委员会主任弋辉等领导的大力支持与帮助，六西格玛管理推进工作委员会的成员单位，如宝钢、太钢、中航工业等多家企业亦为绿带知识体系和本书的编写提供了大量建设性意见，在此表示衷心感谢。

最后，还要感谢中国人民大学出版社对本书给予的高度重视和支持。

由于时间和水平所限，书中难免存在疏漏和错误，恳请读者批评指正，具体意见可发送至 6sigma@caq.org.cn，在此向广大读者表示感谢。

《六西格玛绿带手册》编委会

中国质量协会六西格玛管理推进工作委员会

目　录

第 1 章　六西格玛管理概论 …… 1
1.1　六西格玛管理的发展 …… 1
1.2　六西格玛的概念和核心理念 …… 10
1.3　六西格玛管理的组织和推进 …… 19
1.4　六西格玛管理方法论 …… 33
1.5　精益六西格玛 …… 38

第 2 章　六西格玛项目管理 …… 45
2.1　改进机会确定 …… 45
2.2　过程绩效指标 …… 52
2.3　六西格玛项目选择 …… 56
2.4　六西格玛项目团队建设 …… 60
2.5　六西格玛项目监控与促进变革 …… 65
2.6　六西格玛项目管理工具 …… 66
2.7　六西格玛总结与成果评审 …… 79

第 3 章　项目界定 …… 84
3.1　六西格玛与过程管理 …… 84
3.2　六西格玛项目范围界定——SIPOC …… 86
3.3　六西格玛过程绩效度量指标 …… 88
3.4　项目目标的确定 …… 91
3.5　六西格玛项目效益的预估和风险分析 …… 92
3.6　六西格玛项目立项表和计划 …… 98

第 4 章　测量 …… 102
4.1　过程分析与文档 …… 102
4.2　概率与数理统计基础 …… 108
4.3　数据的收集和整理 …… 136
4.4　测量系统分析 …… 146
4.5　过程能力分析 …… 153

第 5 章　分析 …… 161
5.1　过程分析概述 …… 162
5.2　假设检验 …… 166
5.3　单因子方差分析 …… 182
5.4　列联表 …… 189
5.5　多变异分析 …… 193
5.6　相关分析与回归分析 …… 196
5.7　精益分析工具 …… 205

第 6 章　改进 …… 223
6.1　改进方法概述 …… 223
6.2　创造性思维方法 …… 224
6.3　试验设计基础 …… 226
6.4　全因子设计简介 …… 236
6.5　常用的精益改进工具 …… 254
6.6　方案的评价与实施 …… 262

第 7 章　控制 …… 266
7.1　控制阶段概述 …… 266
7.2　常规控制图 …… 269
7.3　精益控制工具 …… 289
7.4　六西格玛项目总结和成果评审 …… 293

第 8 章　六西格玛设计 …… 295
8.1　六西格玛设计概述 …… 295
8.2　质量功能展开 …… 303
8.3　故障模式与影响分析概述 …… 309

附表 …… 320
术语表 …… 335

参考文献 …… 347
中国质量协会注册六西格玛绿带知识大纲 …… 351
中国质量协会注册六西格玛绿带考试样题 …… 360
JMP 统计软件使用简介 …… 368

第1章

六西格玛管理概论

当今世界，经济、政治、技术、文化等社会各方面正在发生深刻的变化，信息技术使得地球上任何点对点间面对面的沟通成为可能。全球经济一体化趋势日益明显，竞争日益加剧，环境、资源、人口等约束对企业的发展提出了更加严峻的挑战。与此同时，应对全球竞争的管理理论也层出不穷，呈现出新的“管理丛林”。在众多的管理理论中，六西格玛管理日益受到制造业、服务业、非营利组织以及政府机构的青睐，学术界对六西格玛的研究也日益深入。在我国，很多企业实施六西格玛或精益六西格玛，取得了显著的效益，提升了竞争力。更多的企业或其他组织也正在准备实施六西格玛管理。到底什么是六西格玛？六西格玛和其他管理模式之间是什么关系？为什么要实施六西格玛？组织如何成功实施六西格玛？这些问题正是本书要回答的。

1.1 六西格玛管理的发展

1.1.1 六西格玛管理的起源

六西格玛作为一种先进的管理理念和管理模式，最早在1986年起源于美国摩托罗拉公司（Motorola），20世纪90年代在联合信号公司（Allied Signal）和通用电气公司（General Electric）等企业得到成功实施，六西格玛管理的理论和方法体系以及推进模式也得到进一步的发展。时至今日，六西格玛管理已经成为风靡全球的管理模式，不仅在制造业，而且在服务业、政府机构和非营利组织均有成功的应用案例。为了更好地认识、学习和应用六西格玛，需要对六西格玛的历史起源和发展有一个清楚的了解。

六西格玛的起源与质量管理的发展有着历史渊源。众所周知，20 世纪 40 年代，第二次世界大战结束后，日本的产品被视为“垃圾货”，日本为了改变其产品质量形象，提高竞争力，相继邀请美国著名质量管理大师戴明（E. Deming）、朱兰（Juran）等到日本讲学和咨询。在虚心学习美国先进的理论和经验的同时，在质量管理方面，日本人基于自己的民族文化，在费根堡姆（Feigenbaum）全面质量管理（TQC）概念和理论的引导下，摸索出了以全员参与为主要特征的全面质量管理模式。在现场管理方面，将美国的工业工程技术和日本生产实践相结合，以丰田公司为代表，提出了准时化（just in time，JIT）生产模式。在设备管理方面，中岛青一等提出全面生产性维护（total productive maintenance，TPM）。日本的管理模式在 20 世纪 70—80 年代得到验证，日本企业产品的质量显著提高，其家用电器、汽车等占领了大部分美国市场，而美国企业的产品则逐步失去了本国的市场，许多美国企业面临着生存问题。

摩托罗拉公司的前身是 1928 年由保罗·高尔文（Paul Galvin）创建的生产汽车收音机的公司。第二次世界大战期间，该公司通过生产无线对讲设备获得迅猛发展，产品范围扩展到电视机、通信产品等。20 世纪 70 年代初期，摩托罗拉同样面临着生存考验。时任首席执行官的鲍勃·高尔文（Bob Galvin）清醒地认识到，摩托罗拉生产的许多产品，如电视机等，在质量、成本和交货期等竞争要素方面与日本的竞争对手存在较大的差距。在困难面前，摩托罗拉开始调整业务，1974 年将电视机业务卖给了日本松下公司，1982 年又在日本竞争者面前失去了音响市场。进入 20 世纪 80 年代，摩托罗拉开始反思自己的问题，认识到质量问题是导致竞争失利的关键，而不重视质量和不关注顾客的需求是问题的关键。公司同时认识到，提高产品质量实质上会降低成本，并不是当时绝大部分美国公司所认为的提高质量会提高成本。于是摩托罗拉决定认真采取质量战略，开始了质量改进之路，进入了质量觉醒的时代。在鲍勃·高尔文的领导下，一个特别工作组开始为摩托罗拉的创新和业务增长制定计划。这项工作因阿特·萨恩德赖（Art Sundry）而得到快速发展，因为他得到了摩托罗拉通信产品顾客和用户的意见反馈，并大声疾呼：“我们的质量糟糕透了。”高尔文的工作组和萨恩德赖的研究使一个“四点计划”产生并于 1980 年实施，其目的在于确保摩托罗拉在全球的领导地位。

（1）全球竞争力。通过与竞争对手进行水平对比，设计面向全球市场的产品，确保优胜地位。

（2）参与式管理。吸取全面质量管理之精华，将质量管理小组（quality control circle，QCC）的原则和方法引入摩托罗拉的企业文化，在全公司广泛推进顾客完全满意（total customer satisfaction，TCS）小组活动。

（3）质量改进。将改进目标定为 5 年内改进 10 倍，将质量改进目标与所有管理人员的奖励计划挂钩——这个创意播下了六西格玛理念的火种。

（4）摩托罗拉培训与教育中心。1982 年建立了摩托罗拉大学，主要任务是通过培训使员工的能力满足质量流程与管理方式的巨大变化的需求。

20 世纪 80 年代中期，摩托罗拉的工程师比尔·史密斯（Bill Smith）（后来成为集团公司副总裁）提出六西格玛的概念。他提出，产品质量特性值一般服从正态

分布，其波动范围为均值（一般用 μ 表示）左右 3 倍的标准差（一般用 σ 表示，读作“西格玛”）之间。如果公差范围在均值的左右 6 倍标准差（即六西格玛）之间，即使考虑过程均值在生产过程中会出现漂移，并假定即使出现 1.5 倍标准差的漂移，根据正态分布的规律，此时出现缺陷的机会也只有百万分之 3.4。因此，他建议，摩托罗拉应该将质量目标设置为六西格玛，即达到只有百万分之 3.4 缺陷率的目标。比尔·史密斯的建议得到了鲍勃·高尔文的大力支持。摩托罗拉在 1987 年全面推行六西格玛，点燃了六西格玛管理的火种，六西格玛在全公司范围内得到了广泛施行、推广。由于成功实施六西格玛和质量改进活动，摩托罗拉取得了显著的收益。1987—1989 年质量水平提高 10 倍，1989—1991 年，两年内质量水平又提高 10 倍，并且于 1988 年获得首届美国马尔科姆·鲍德里奇国家质量奖。六西格玛产生的强大动力使得摩托罗拉制定了以前看上去几乎是不可能实现的目标：质量水平每 2 年改进 10 倍，运转周期每 5 年降低 10 倍。从开始实施的 1987—1997 年的 10 年间，销售额增长了 5 倍，利润每年增加 20%。通过实施六西格玛管理所带来的收益累计达 140 亿美元，股票价格平均每年上涨 21.3%，效果十分显著。

1.1.2　六西格玛管理的推广

不论走到哪里，高尔文总要提到六西格玛的目标和成功的故事。在他的听众中就有拉里·博西迪（Larry Bossidy），他是原通用电气公司副总裁，通用电气首席执行官杰克·韦尔奇（Jack Welch）的助手与最要好的朋友。1991 年，博西迪结束了他在通用电气的任职，接手了刚刚由若干个公司合并而成的联合信号公司，出任首席执行官。从通用电气这样一个“言出必践”的公司来到联合信号，博西迪吃惊地发现，表面上看起来，联合信号和通用电气有着相似的核心业务和管理流程，但在联合信号，这些流程大都只是一些空洞的形式，没有实际效果或效率很低。人们很少关注“提高生产力，扩大市场份额，提高产品质量”等具体问题。尽管有很多聪明和勤奋的员工，但是在计划和行动之间存在很大的差距。更糟糕的是，企业的人员、战略和运行都采用了各自为政的方式，每个业务部门都强调自己的文化，不肯融入联合信号之中。博西迪面临的最重要的问题是如何将联合信号真正集结成一个整体，并且快速地改变公司的“执行”能力和“执行”文化。听了摩托罗拉的故事，他马上意识到，六西格玛正是他想要的可以将联合信号塑造成他心目中企业的方法。

1992 年，博西迪将六西格玛引入联合信号公司。“我们不但要给人们提出目标，还要提供合适的工具和方法”，联合信号的管理层如是说。人们从各地赶来，学习六西格玛方法。然后，回到自己的岗位上，将所学的用于解决实际问题。事实上，对联合信号来说，不仅需要改进质量，更需要变革人们做事的方式。不论人们来自哪个公司，具有什么样的企业文化背景，在联合信号中都要形成统一的语言和文化。为了使六西格玛更适合联合信号的目的，在博西迪的带领下，许多被称为“软工具”的内容，被补充到六西格玛方法中。其中包括大量的关于组织变革、领导力提升和变革企业文化方面的内容。

博西迪成功了。六西格玛改变了联合信号的经营与运作方式。公司的业绩出现

了快速增长的势头，销售额和利润持续实现每年两位数的增长。公司的收益从1991年的3.42亿美元增长到1997年的11.7亿美元。在短短的6年内，几乎翻了两番。而且连续31个季度保持每股利润13%以上的增长，公司的股价增长了8倍。正是因为博西迪和联合信号，华尔街第一次听说了六西格玛。此后，得州仪器等一批公司相继引入六西格玛，同样取得了令人瞩目的成功。

美国通用电气公司在20世纪70—90年代制定的战略计划取得了成功，这使得通用电气适应了公司规模和经营多样化的发展，给公司带来了巨大利益。在这一时期，通用电气重点关注的是业务的高速增长、提高效率，而质量问题排在后面，产品质量在3～4个西格玛水平。随着业务的高速增长，质量日益成为一个不容乐观的问题。杰克·韦尔奇在其自传中回忆说：在1995年4月的通用电气内部员工调查中发现，质量问题已经为许多员工所担忧。

1995年夏，杰克·韦尔奇见到了他的朋友博西迪，他们谈到了联合信号成功的原因。这次谈话给韦尔奇留下了深刻的印象。自上任以来，韦尔奇已经对通用电气进行了一系列大刀阔斧的变革，使通用电气在其所有业务领域几乎都是“数一数二”的。但韦尔奇希望通用电气这个百年老店能够永远成功。韦尔奇意识到，把通用电气公司打造成六西格玛企业，将是他2001年退休时给通用电气留下的最宝贵遗产。

在韦尔奇的带领下，通用电气公司开始了它的六西格玛之旅。但是，在韦尔奇眼中，此时的六西格玛已经不是彼时的六西格玛。它已不仅仅是关于统计学的，尽管它需要统计技术；它也不仅仅是关于改进质量的，尽管它最终使质量大幅度提升。韦尔奇要将六西格玛提升到打造通用电气公司核心竞争力的战略层次。1996年1月，在通用电气高层会议上，他将六西格玛称为通用电气前所未有的最雄心勃勃的工作，他说：“质量可以真正地使通用电气从最了不起的公司之一这个位置，上升到全球商界绝对最了不起的公司。这个房间的所有人都必须抓质量，这个问题是没有投机可言的，摩托罗拉用10年时间办到的，我们必须在5年内实现——不是通过走捷径，而是通过学习他人。”

韦尔奇认为六西格玛的含义远远超出了质量和统计学，它通过提供对付难题的方法，驱使领导层把工作做得更好，六西格玛的核心是使一个公司彻底转变。在他看来，六西格玛是“通用电气公司从来没有经历过的最重要的发展战略”，被作为公司四大战略（全球化、服务、六西格玛和电子商务）之一来实施。在通用电气，六西格玛方法演变为一个管理系统。公司建立了从“倡导者”（champion）、“资深黑带”（master black belt，MBB）、“黑带”（black belt，BB）到“绿带”（green belt，GB）的六西格玛组织结构，六西格玛实施结果与管理人员晋升和奖金紧密结合。

1995年年底，随着200个六西格玛项目的实施，这种管理方法在通用电气大规模地开展起来。1997年，这样的项目超过了6 000个。根据通用电气2000年度的报告：1999年通用电气公司的利润为107亿美元，比1998年增长了15%。其中，实施六西格玛获得的收益就达到了15亿美元。到21世纪初，这个数字达到了50亿美元。而2000年，在通用电气中获得绿带认证的员工已达到90%以上，公司中

层以上的经理中有过六西格玛黑带经历的人员已达 15%。

与摩托罗拉实施的六西格玛相比，联合信号和通用电气在推行六西格玛方面更加强调高层管理的推动作用与管理层的参与。在通用电气，成为六西格玛黑带或绿带是职位晋升的必要条件。这一切，都要归功于韦尔奇强有力的自上而下的推动。韦尔奇希望通过六西格玛实现通用电气的文化变革，他认为，当一个组织内部的变革速度慢于组织外部的变革速度时，则组织的寿命行将结束，至于何时结束，只是具体的时间问题。

在韦尔奇领导通用电气公司的 20 年时间里，通用电气的股票市值增长了 30 多倍，达到了 4 500 亿美元，排名从世界第十位提升到了第二位，这个“百年老店”在他的带领下焕发了前所未有的青春活力。

在通用电气公司应用六西格玛取得巨大成功之后，六西格玛为全球企业，特别是许多《财富》世界 500 强企业所关注、认识并接受。很多企业发现六西格玛同样可以对自己产生深远而重大的影响，它们也开始大力推行六西格玛，包括福特、卡特彼勒、道化学、杜邦、ABB、3M、东芝、惠尔浦、三星、LG、西门子、爱立信、洛克西德-马丁、庞巴迪、花旗银行、JP 摩根、美国运通、英特尔、微软等跨国公司。今天，六西格玛的应用已经从摩托罗拉、通用电气走向了全世界，从西方走向了东方，从世界 500 强跨国公司走向了普通企业乃至中小企业，从电子、机械、化工、冶金等制造业走向了银行、保险、航空、电子商务等服务业。

六西格玛已经走过了 20 多年的发展历程，六西格玛的理论和方法体系也在不断地发展和完善。六西格玛已经由原来的质量目标发展成为一种管理模式；六西格玛的应用也由原来主要解决质量问题扩展为组织整体业务流程的优化设计和系统改进；六西格玛方法也由重视统计技术发展为与精益生产、平衡计分卡、并行工程等理论和方法的整合。

1.1.3　六西格玛管理的新发展

六西格玛诞生于全面质量管理蓬勃发展的 20 世纪 80 年代中期，是对全面质量管理特别是质量改进理论的继承和新发展。20 多年来，六西格玛已经走过了很长的发展路程。作为一种减少缺陷的方法，它在实践中得到了不断的充实和发展，六西格玛不再仅仅是一种质量改进方法，而是已经发展成为可以使企业保持持续改进、增强综合领导能力、不断提高顾客满意度及经营绩效并带来巨大利润的一整套管理理念和系统方法。2000 年后，摩托罗拉提出了“新六西格玛”方法——一种由沟通、培训、领导艺术、团队合作、度量和以顾客为中心等价值观驱动的变革方法，旨在提高企业竞争力和变革企业文化。

传统的六西格玛被广泛地运用于改进产品的质量，尤其适用于生产制造业，是以降低缺陷和减少变异为核心的。而新六西格玛是一个领导力管理程序，是关于总体业务改进的方法，它解决了管理人员所面临的两难问题：一方面，要通过快速的业务改进项目达到短期的财务目标；另一方面，要在关键人才和核心流程方面为未来的发展积蓄能力。

将平衡计分卡、业务流程再造、高效率团队、对核心业务流程进行持续不断的

监控等工具和六西格玛改善流程整合起来，六西格玛方法提供了一套实用的方法和切实可行的工具，以便管理人员在业务实施过程中达到平衡。表 1—1 中所列的是六西格玛方法的领导力原则。

表 1—1　　六西格玛方法的领导力原则

领导力原则	解释
整合（align）	● 用卓越绩效模式（以马尔科姆·鲍德里奇国家质量奖标准为依据），将顾客的需求与业务战略以及核心业务流程相结合。 ● 确定战略实施目标、制定具有挑战性的具体目标和恰当的衡量标准。目的是提供持续不断的、可衡量的、最基本的经营结果要求，以便推动经营总目标的实现。
调动（mobilize）	● 向团队授权，通过高层经理人员选择的项目、利用项目管理方法和六西格玛方法达到改进的目标。 ● 用项目立项表、成功准则和严格的评估等方法将团队组织起来。 ● 向团队提供及时的培训服务并鼓励他们将其付诸行动。
加速（accelerate）	● 采用学以致用（action learning）的方法，将系统的培训与实际的项目工作和指导结合起来，迅速消除由学习到实践的差距。让员工行动起来的激励性措施很容易失去效果，但是，为了及时达到项目的目标，激励性措施又是必不可少的。
控制（govern）	● 对绩效计分卡模型进行控制，促进战略的实施。系统的流程审核包括对结果控制卡（dashboard）的审核，以及在必要时要审核流程和项目的细节。当领导者分享最佳实践经验时，障碍就可以被消除。

六西格玛发展的另外一个重要特征是六西格玛与精益生产的融合——精益六西格玛。在这方面，已经有很多的理论研究成果，也有很多企业成功实施了精益六西格玛。我们认为，精益技术对于六西格玛绿带人员非常重要，企业中不少短平快的绿带项目需要采用精益的工具。因此除在本章 1.5 节专门介绍精益生产外，本书将精益的知识点融于六西格玛过程改进的各个阶段。在本书中，不再区分六西格玛和精益六西格玛，因为本书中所指的六西格玛已经融合了精益生产的内容。

1.1.4　六西格玛管理与质量大师的质量观

六西格玛管理是现代质量管理的新发展，其范畴已经超越了传统的质量管理。六西格玛管理的一些工具、方法和核心理念是建立在许多质量管理大师提出质量管理方法、质量观和理念的基础上的。在质量管理的发展历程中，许多质量大师，如美国的休哈特、戴明、朱兰、费根堡姆、克劳斯比，瑞典的桑德霍姆，日本的石川馨、田口玄一等，使人们对质量及质量管理有了进一步的认识，对质量管理的发展和进步起到了巨大的推动作用，了解他们所做的工作对于了解六西格玛也非常有帮助。这里简要介绍其中最重要的几位。

1. 休哈特

沃特·阿曼德·休哈特（1891—1967），出生于美国伊利诺伊州的新坎顿，1917 年获得加州大学伯克利分校的物理学博士学位，1918—1924 年在西方电气公

司（Western Electric）任工程师，1925—1956 年任贝尔实验室研究员，其间曾先后在伦敦大学、斯蒂文理工学院、美国农业部研究生院和印度讲学。

休哈特基于对西方电气公司所制造产品的特性变异的关注和对抽样结果的研究，创立了统计过程控制（SPC）理论。1924 年 5 月 16 日，他提出了世界上第一张控制图，1931 年他出版经典著作《制成品质量的经济控制》，并将控制图应用在西方电气公司霍桑工厂的保险丝、加热控制和电站装置的生产上。

休哈特在研究中观测到，自然界以及工业产品中的所有事物都会发生变异，研究这些变异并减少变异是质量改进的主要手段。虽然不存在完全相同的两件事物，但大量的观测会形成可预测的形态，他总结出两条重要的原理：（1）变异是不可避免的；（2）单一的观测几乎不能构成客观决策的依据。为了判断观测值的形态，可以将观测值以若干方式描绘出来，如将观测值绘制成直方图，这可以展示出观测值的分布情况；或按照观测值的顺序在图上打点，便形成线状图，这对于观察数据的趋势和周期非常有用。休哈特主张用链状图来观测数据，他进一步指出存在两类引起变异的原因：一是偶然原因，指只会引起数据的很小波动的那些偶然性因素，其影响较小，但会大量聚集呈现出某种形态，根据中心极限定理和观测经验推断，它们通常近似服从正态分布。二是系统性原因。系统性原因导致数据发生特殊变异。休哈特控制图基于偶然原因所形成的正态分布的 3σ 原则建立了一组控制界限，任何落在这些界限之外的或者呈某种异常趋势的观测值都表明可能存在系统性原因，由于观测数据是按所发生顺序描点，因此若存在趋势或异常形态很容易被观测到。所以，控制图是对过程所产生的统计量的变异的一种图示描述，运用控制图进行生产过程监控，可以及早发现不合格的萌芽，并采取措施予以预防和控制。

休哈特的 PDCA（计划—执行—检查—处置）循环的观点被戴明等人广泛应用，至今仍然是质量管理中最经典的持续改进管理模式和思维方式。

2. 戴明

威廉·爱德华兹·戴明（1900—1993），1921 年获得怀俄明大学工程学士学位，1925 年在科罗拉多大学获数学及物理学硕士学位，1928 年获耶鲁大学物理学博士学位。

1947 年开始，戴明应美国军方邀请到日本参加第二次世界大战后人口普查工作，但是后来在日本，戴明把质量管理的新理念带给了日本企业界。应日本科学技术联盟邀请，他多次访问日本，讲授质量管理课程。戴明帮助听众理解统计质量控制（SQC）在制造业的重要性，对统计质量控制在日本的发展和深化起了巨大的作用。他强调，引起效率低下和不良质量的原因中，有 85%在于企业的管理系统，而只有 15%是由员工造成的。戴明质量战略的核心就是使用统计质量控制来识别变异的特殊原因和偶然原因。为了促进日本质量管理的发展，纪念戴明对日本的友好和贡献，日本于 1951 年设立了戴明奖。戴明奖分为本奖和实施奖两类。戴明本奖旨在奖励在统计质量管理的理论研究和应用研究方面，或是在统计质量管理的理论普及方面做出突出贡献的个人。戴明实施奖则是为了奖励在开展统计质量管理方面取得显著成绩的企业。戴明本奖得主是由戴明奖本奖委员会推荐产生的。戴明实施奖

标准分享网　www.bzfxw.com　免费下载

则是由企业提出申请，经实施奖委员会审查通过后授予的。戴明奖对于日本质量振兴起到了重要的促进作用。但直到 1980 年 6 月，美国国家广播公司（NBC）作了题为“如果日本可以，为什么我们不能?”的报道之后，戴明才在美国名声大振。

戴明的主要思想体现在他提出的质量管理 14 要点中。

（1）制定改进产品和服务的目标和实施的计划，致力于超过竞争对手。

（2）采用新的质量管理思想。

（3）停止依靠大量检验来提高质量。

（4）不要仅凭价格选择供应商，要以总成本最低为目标。

（5）发现问题并致力于改进工作体制。

（6）采用现代的在岗培训方法。

（7）提升领导能力、采用新的领导方式。

（8）消除员工的畏惧感。

（9）打破部门封锁，倡导产品设计、销售、生产等部门团队合作。

（10）消除那些要求员工做到零缺陷及高生产力水准的口号、劝诫及目标，低质量和生产率是制度造成的而不是员工的问题。

（11）取消工作定额，代之以领导职能强化。

（12）消除各种影响员工为自己工作质量而自豪的障碍。

（13）设立生动活泼的教育和自我提高计划。

（14）建立使高层管理者能够推动每个员工按上述 13 条努力工作的机制。

3. 朱兰

约瑟夫·M·朱兰（1904—2008），1924 年获得明尼苏达大学电子工程专业学士学位，并就职于芝加哥西方电气公司霍桑工厂检验部。1926 年，一个来自贝尔实验室的团队（其中包括休哈特和道奇）参观了该工厂，并推行贝尔实验室开发的工具和方法。朱兰是被选中的 20 个受训者之一，且作为最终入选的两个工程师之一，到新创建的检验统计部工作。

1928 年，朱兰撰写了他的第一部关于质量的著作，一本名为《生产问题的统计方法应用》的小册子。1937 年，朱兰将帕累托原理概念化并应用于质量改进。1945 年，朱兰离开华盛顿和西方电气公司，作为独立的咨询师开展工作。1951 年，《朱兰质量手册》出版，为他赢得了国际威望。

他认为质量来源于顾客的要求，在他的《朱兰质量手册》（第 5 版）中对质量的定义是：

（1）“质量”意味着能够满足顾客的需要从而使顾客感到满意的那些产品特性；

（2）“质量”意味着免于不良，即没有那些需要重复工作（返工）以及会导致现场失效、顾客不满、顾客投诉等的差错。

朱兰认为要获得质量，最好从建立组织的愿景以及方针和目标开始，目标向成果的转化（使质量得以实现）是通过管理过程来进行的。他认为在质量管理活动中频繁应用的三个过程是：质量策划、质量控制和质量改进，即著名的朱兰质量管理三部曲。他将“人的因素”加入质量管理过程中，使质量管理超越了过去的统计学。

1954年，朱兰应日本科学技术联盟的邀请，到日本为中高层管理人员讲授质量管理课程。1979年，朱兰建立了朱兰学院，如今它已成为世界上领先的质量管理咨询公司。半个多世纪以来，朱兰的质量管理理念和方法对整个质量管理学界产生了巨大的影响。

特别要说明的是，朱兰提出的质量改进三部曲和质量改进的步骤与六西格玛改进活动是非常接近的。

4. 石川馨

石川馨（Kaoru Ishikawa，1915—1989），1939年毕业于东京大学工程系。1960年获工程博士学位。他的《质量控制》一书获戴明奖、日本Keizai新闻奖和工业标准化奖。1971年，其质量控制教育项目获美国质量协会格兰特奖章。1968年，石川馨出版了《质量控制指南》。他是因果图的发明者，质量管理小组（QCC）的奠基人之一，是将国外先进质量管理理论和方法与日本实践相结合的一位专家。

石川馨认为，全面质量管理（TQC）在日本就是全公司范围内的质量管理（CWQC），具体内容包括：

（1）所有部门都参加的质量管理，即企业所有部门的人员都学习、参与质量管理；

（2）全员参加的质量管理，即企业的经理、董事、部课长、职能人员、工班长、操作人员、推销人员等全体人员都参加，进而延伸到供应商、代理商；

（3）综合性质量管理，即以质量管理为中心，同时推进成本管理（利润、价格管理）、数量管理（产量、销量、存量）、交货期管理。

5. 田口玄一

田口玄一（Genichi Taguchi，1924—），是数理统计应用技术方面的著名学者，田口方法的创始人，戴明本奖的获得者。

田口方法包含四大技术：线外质量控制、线内质量控制、计量管理技术和试验设计技术。田口方法提出了质量损失函数（QLF）的概念，把质量和经济两个范畴的概念统一起来，为质量波动的定量统计分析奠定了基础。他还提出了信噪比（SNR）的概念，为试验设计技术充实了新的内容，为解决产品或生产过程的动态特性、稳健性以及测量误差等问题开辟了新途径。

田口方法提出了在新产品开发过程中进行三阶段设计的思想，即系统设计、参数设计、公差设计。分别指系统地考虑问题，选择参数间的最优水平组合，以及最恰当的公差。

田口方法既重视经济效益，又不等同于经济学；既运用数理统计方法，又不完全以统计观点来研究质量管理，以工程学和技术观点研究质量管理理论和方法，具有通用性和边缘性的特点，因此又称为质量工程学。田口方法在日本工业界得到了广泛的应用，并带来了巨大的经济效益，目前世界上有越来越多的国家使用田口方法。尽管田口试验设计方法本身存在一些不足之处，但这丝毫不影响他成为20世纪一位著名的质量管理专家。

标准分享网　www.bzfxw.com　免费下载

另外，田口的损失函数与六西格玛减少波动的理念是不谋而合的。

1.2 六西格玛的概念和核心理念

1.2.1 六西格玛的概念

六西格玛是一套系统的、集成的业务改进方法体系，是旨在持续改进企业业务流程，实现客户满意的管理方法。它通过系统地、集成地采用业务改进流程，实现无缺陷的过程设计——六西格玛设计（design for six sigma，DFSS），并对现有过程进行界定（define）、测量（measure）、分析（analyze）、改进（improve）、控制（control），简称 DMAIC 流程，消除过程缺陷和无价值作业，从而提高质量和服务水平，降低成本，缩短运转周期，达到客户完全满意，增强企业竞争力。

1. 六西格玛的统计含义

σ 是一个希腊字母，读作“西格玛”，在数理统计中表示“标准差”，是用来表征任意一组数据或过程输出结果的离散程度的指标，是一种评估产品和生产过程特性波动大小的参数。

西格玛质量水平（注意：不是指西格玛值的大小）则是将过程输出的平均值、标准差与质量要求的目标值、规格限联系起来进行比较，是对过程满足质量要求能力的一种度量，西格玛水平越高，过程满足质量要求的能力就越强；反之，西格玛水平越低，过程满足质量要求的能力就越低。如前所述，六西格玛质量水平意味着 100 万次出错机会中不超过 3.4 个缺陷。

在图 1—1 所示的正态分布中，μ 表示正态分布的均值，σ 表示标准差（有关正态分布及相关统计理论可参考本书第 3 章 3.2 节），当上下规格限之差为 12σ（$\mu \pm 6\sigma$），且过程无漂移，即实际分布中心与公差中心重合时，低于下规格限 *LSL* 和高于上规格限 *USL* 的面积（概率）均为 0.001ppm，总缺陷概率为 10 亿分之2（2PPB（part per billion））。图 1—1 中，*M* 为公差中心，与分布的中心，即均值 μ 重合。

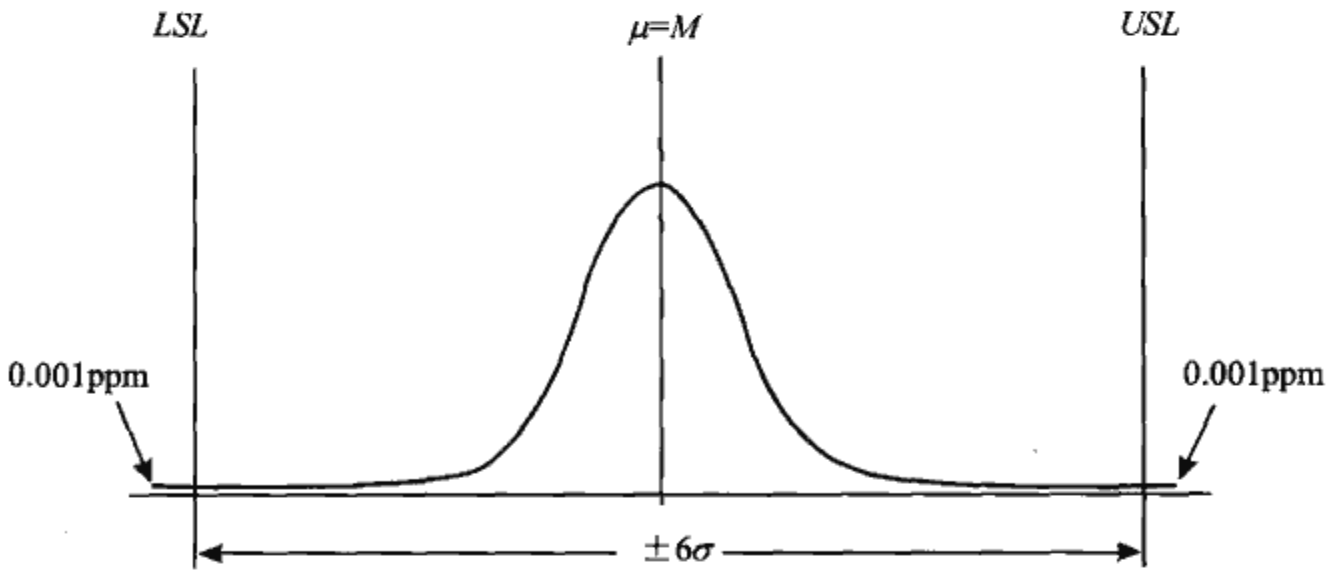


图 1—1 过程输出特性正态分布图（无漂移）

但实际上，过程输出质量特性的分布中心与公差中心重合的可能性是很小的，对于典型的制造过程，由于影响过程输出的基本质量因素（人、机、料、法、环、测）的动态变化，过程输出的均值出现漂移是正常的，如图 1—2 所示。在计算过程长期运行中出现缺陷的概率时，一般考虑将上述正态分布的中心向左或向右漂移 1.5σ（这只是一个合理的假设，从统计上来讲，即使过程采用统计过程控制技术，过程均值出现 1.5σ 也很难立刻被发现。但是一定要从理论上证明漂移量就是 1.5σ 是没有依据的），根据正态分布的特点，此时一侧出现缺陷的概率不足百万分之 3.4，另一侧因数量级极小可忽略不计，总缺陷概率近似为百万分之 3.4，即在给定 100 万次出错机会的条件下，平均出现缺陷的次数只有 3.4 次，也称 3.4DPMO（百万机会缺陷数（defects per million opportunities)），如图 1—3 所示。

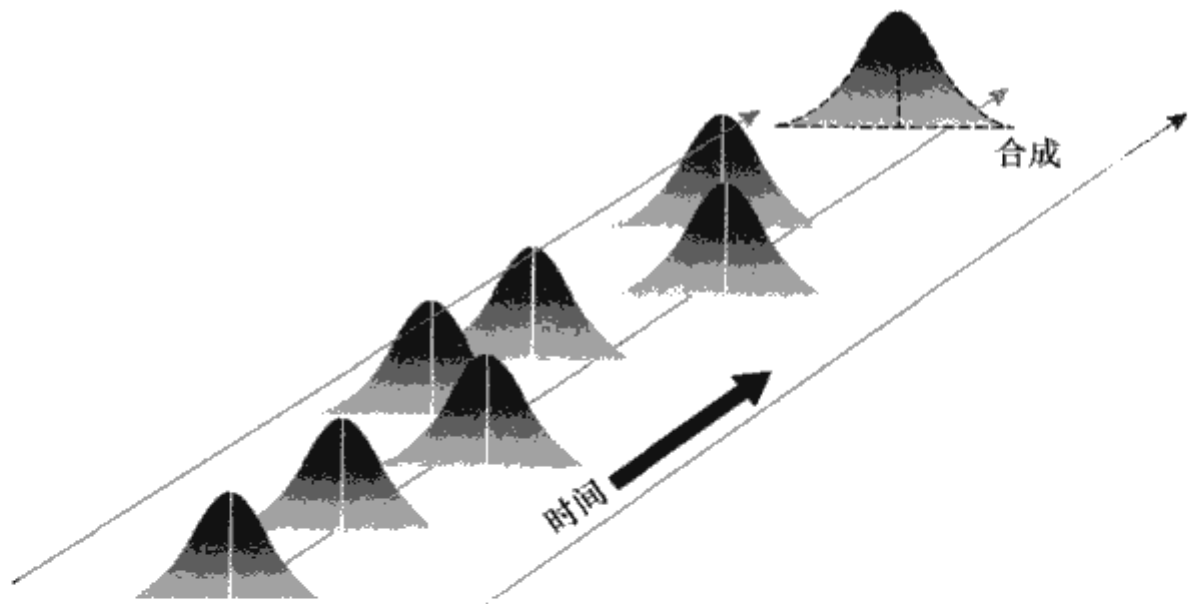


图 1—2　过程分布随时间的漂移图

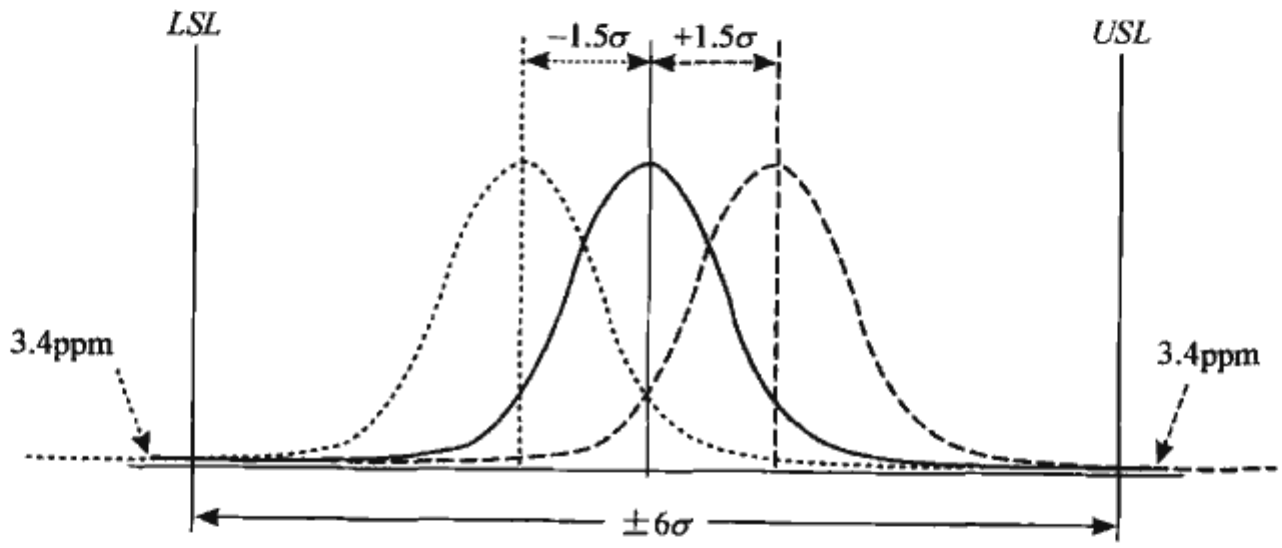


图 1—3　过程输出特性正态分布图（考虑±1.5σ 漂移）

因此通常所说的六西格玛质量水平代表 3.4DPMO，是考虑了过程在长期运行中，分布中心相对公差中心漂移±1.5σ 后出现缺陷的概率。表 1—2 显示了不同西格玛水平时的 DPMO。

标准分享网　www.bzfxw.com　免费下载

表 1—2　西格玛水平与百万机会缺陷数之间的关系（分布中心相对公差中心漂移±1.5σ）

西格玛水平（σ）	百万机会缺陷数（DPMO）
1	697 700
2	308 700
3	66 810
4	6 210
5	233
6	3.4

2. 六西格玛的管理含义

今天，六西格玛已经远远超出其统计含义，六西格玛已经成为一种客户驱动下的持续改进的管理模式，企业推行六西格玛，也不仅仅把六西格玛（3.4DPMO）作为一种目标或指标，六西格玛还有更为深刻的多重管理含义。

（1）获取竞争优势的战略：战略管理的目的是获取竞争优势或核心竞争力。许多世界级企业的成功经验表明，通过管理创新可以获得竞争对手难以复制的核心竞争优势。组织的高层领导要认识到，六西格玛的本质是通过管理创新和技术创新构建组织的核心竞争力。首先，六西格玛的推进不能仅仅停留在方法层面，必须与企业的战略相结合，使得六西格玛能够支撑企业战略目标的达成，提升企业战略执行力，促进组织完成其使命，实现其愿景和战略目标。其次，要从战略层面定位六西格玛，通过实施六西格玛，实现管理和技术创新，打造企业的核心竞争力。因此，组织要从战略层面推进六西格玛管理，制定六西格玛管理战略实施规划。通过实施六西格玛管理，实现管理创新、技术创新、人力资源开发和培养、企业文化建设。

（2）持续改进的活动：从过程方法角度来看，过程管理就是管控过程的输入要素和输出结果。六西格玛的本质就是要研究影响过程输出的关键因素，实现过程的输出趋于目标值或理想值并减少波动，追求零缺陷，追求完美。

实际上，实施六西格玛并不是一定要达到六西格玛水平的质量，而在于对过程进行突破性的改进和创新。图 1—4 显示了“飞镖”过程：精而不准——波动小，但均值漂移大造成了较多的缺陷；准而不精——均值漂移小，但波动大也造成了较多的缺陷；又精又准——波动和均值漂移均极小，趋于零缺陷。六西格玛目标就是“又精又准”：使过程趋于目标值并减少波动，追求零缺陷，追求完美。

（3）科学的问题解决方法体系：六西格玛在方法层面强调系统集成与创新，这里要特别指出，六西格玛绝非仅仅应用统计技术解决问题，它是一套系统的业务改进方法体系，其工具和方法包括现代质量管理技术、应用统计技术、工业工程和现代管理技术、信息技术等。

（4）六西格玛管理文化：企业文化是一个企业拥有的核心理念和价值观，是企业发展的软环境。再好的工具和方法，如果脱离了其赖以生存的环境和文化，也不可能产生任何效果。企业实施六西格玛，需要打造顾客导向、持续改进、勇于变革、数据说话的六西格玛管理文化，并与企业的具体特点相结合，形成独特的企业文化。

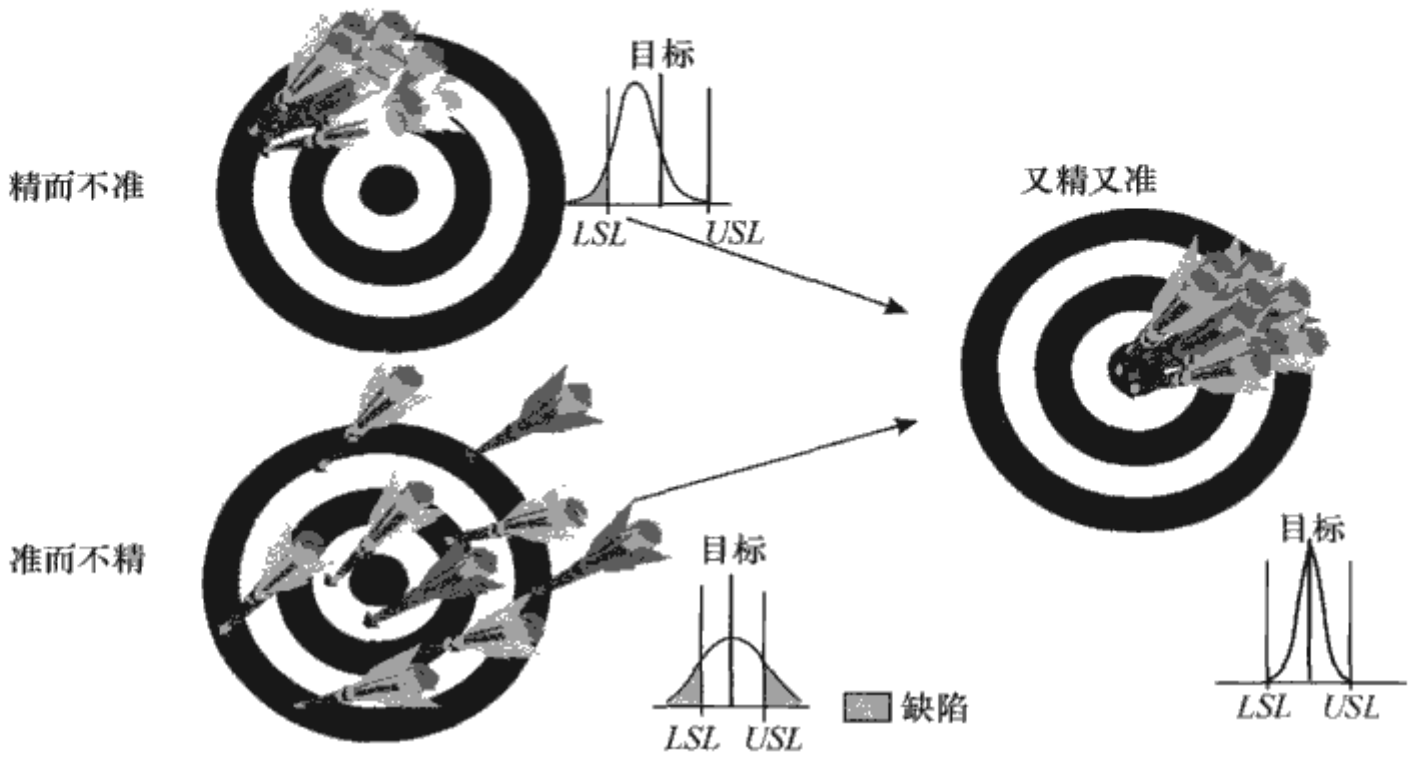


图 1—4　六西格玛目标：又精又准

1.2.2　六西格玛管理的作用

实施六西格玛是“一箭多雕”的、多赢的战略选择。实施六西格玛的好处多种多样，包括减少成本、提高生产力、增加市场份额、留住顾客、缩短运作周期时间、减少错误、改变组织文化、改进产品和服务等，这里将实施六西格玛的作用归纳为以下四个方面：

（1）问题解决和成本降低：解决困扰组织的重要而复杂的难题，降低不良质量成本。

（2）文化变革：建立持续改进和创新的组织文化，消除沟通壁垒。

（3）战略实施：全面提升组织的核心竞争力和经营管理成熟度。

（4）员工发展：培养下一代领导者，促进员工职业生涯发展。

1. 解决困扰公司的重要而复杂的难题，降低不良质量成本

一个有志于成功、追求卓越的组织首先要明确自己的定位、未来的发展愿景以及行为准则，即确立组织的使命、愿景和核心价值观；其次要基于使命、愿景和核心价值观，确定自己的战略目标和战略方案，要设立驱动战略目标实现、监测战略规划的关键绩效指标（KPI），并将关键绩效指标横向分解到相关职能部门和过程，纵向层层分解到团队和员工。

这些关键绩效指标对组织应对动态的竞争环境、取得长期的成功是至关重要的。然而，要达成关键绩效指标常常是富有挑战性的，有些还涉及困扰组织多年、导致外部及内部顾客不满意的复杂问题，包括：

- 产品和服务质量问题；
- 运营成本问题；
- 生产率、流程周期时间问题；
- 市场和顾客流失问题；

标准分享网　www.bzfxw.com　免费下载

● 环境和安全问题。

这些问题如果不彻底地加以解决，势必影响组织战略的实现。而要解决这些难题，必须由高层领导者自上而下地推进，必须由一些具有很强的问题解决能力和技巧的人员，通过科学的流程，应用精确的数理统计技术和其他管理工具来解决。

这些问题的解决，要花费更多的投入吗？当谈到六西格玛管理时，常常会听到人们这样说："要达到那么高的质量，企业是否要花费巨资？""我们的质量水平与六西格玛差得太多了。要实现六西格玛，公司就得花费大量资金来更新设备或改进技术，这样做企业是否划算？"其实，这是对六西格玛管理的一种误解。成功的六西格玛管理为企业带来的是实实在在的经济效益。这一点已为摩托罗拉、联合信号、通用电气等世界级企业的实践所证明了。

下面，我们从不良质量成本（cost of poor quality，COPQ）的角度谈谈为什么六西格玛管理能给企业带来如此显著的回报。大多数公司处于三至四西格玛水平，其不良质量成本可占到销售额的20%～40%，而六西格玛企业的不良质量成本仅占销售额的1%～5%。通用电气公司认为，公司从三至四西格玛水平提高到六西格玛水平，其减少的不良质量成本每年可达80亿～120亿美元。

这些成本损失来自哪里呢？不良质量成本可以分为直观的和隐含的两大类，就像冰山一样，露在水面上的是我们通常统计的那些由于产品或服务不良而造成的损失，也就是传统质量成本统计中通常作为内部与外部故障成本所统计的部分。对于大多数企业来说，这些成本损失占销售额的4%～5%。但冰山还有隐藏在水面下的部分，这是我们通常不去统计或不为人们所重视但又实实在在地存在于企业中的成本损失，这些"隐藏成本"损失要比露出的部分大得多，可高达销售额的16%～35%。这些直观的和隐藏的不良质量成本已经远远地超过了销售利润。根据美国著名管理咨询公司Imberman & Deforest 20世纪90年代初所作的调查，一般企业的平均利润水平仅占销售额的1%～4%。

六西格玛管理就是要通过业务过程的改进和优化，降低这些直观的和隐含的成本损失，把"冰山"变为"金山"，使"更高的质量、更低的成本、更短的开发与生产周期、更好地满足顾客的要求"变为现实。

通用电气公司将六西格玛管理应用于经营管理活动的各个方面，并取得了巨大的收益。比如：人力资源部用六西格玛管理方法改进人员的配置；财务部用其提高付款的及时性与准确性；工程部改进产品设计的可靠性和降低图纸缺陷；制造部降低制造缺陷并且缩短生产周期；服务部缩短服务响应时间和维修时间；信息部提高信息系统的效率，等等。其中，一个六西格玛项目小组完成了改进产品的交付周期的项目。该小组了解到，顾客希望其产品交付期不超过10天，而实际上他们的产品交付期平均为33天。通过运用六西格玛方法，该小组将交付期缩短为平均2.3天，仅此一个项目每年为企业创造直接的经济效益50万美元。通用电气通信部门通过六西格玛管理项目，将其拥有的12颗卫星的利用率从63%提高到97%，每年增加收入130万美元。在通用电气，这样的案例不胜枚举。这也是六西格玛为通用电气带来了如此高的收益和增长速度的一个重要原因。

美国质量协会指出："六西格玛方法要求在一个合理的时间内得到显著的回报"

是其成功的十大因素之一。

2. 建立持续改进和创新的组织文化，消除沟通壁垒

对组织文化完整的定义是：组织在长期的生存和发展中形成的，为本企业所特有的，且为企业多数成员共同遵循的宗旨（使命）、最高目标（愿景）、价值标准、基本信念和行为规范（价值观）等的总和及其在组织活动中的反映。

组织文化具有精神层、制度层和物质层三个层次的结构，如图 1—5 所示。

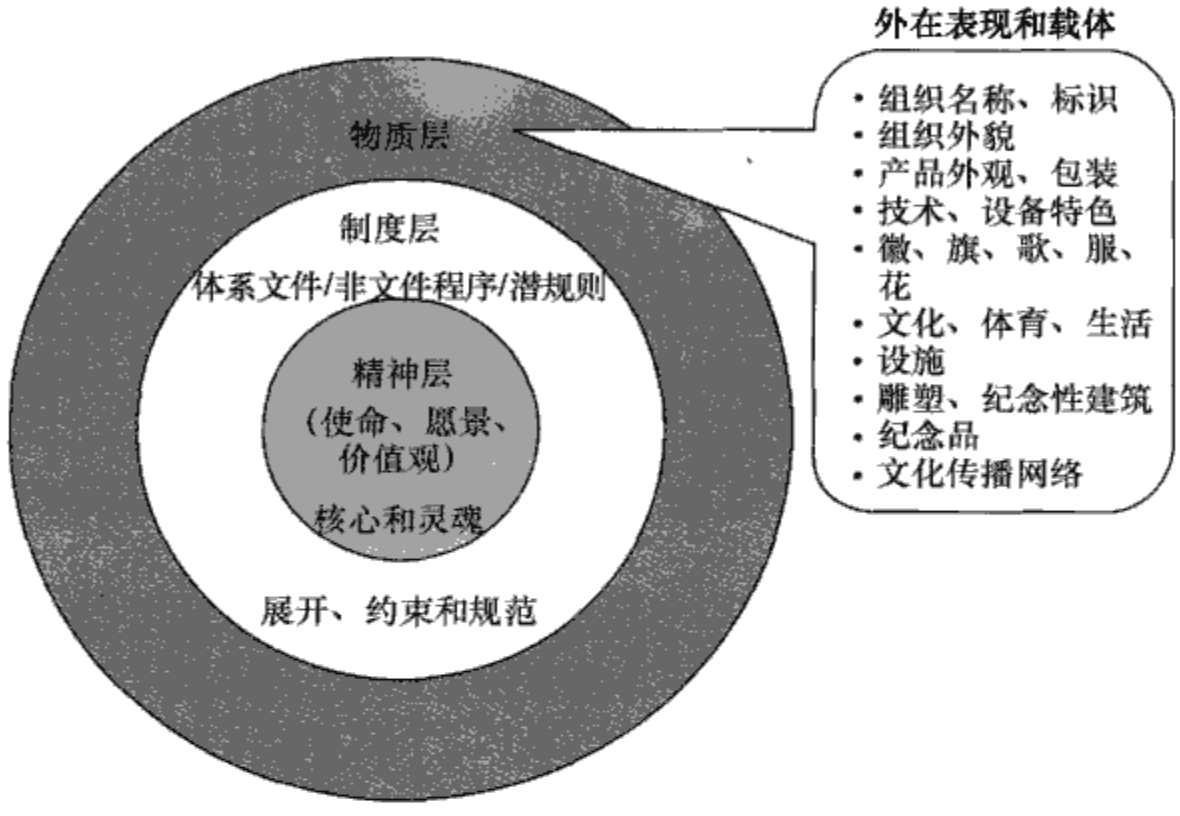


图 1—5　组织文化的三重结构

组织文化通俗地说是组织中独特的做事的方式方法。决定组织文化的主要因素是高层领导者。组织文化的建设就是组织的高层领导者将其理念和价值观灌输到其下属和员工身上，并通过其下属和员工的行为来展现的过程。不论组织领导者个人的言行举止有多好或多糟，都会被员工放大，形成整体的工作风气和行为准则。

六西格玛不仅是一个解决问题的技术方法，同时也是一种处世和处事的哲学，它的标准就是“完美”，在更广的意义上讲是一种文化，一种持续改进和创新的文化。它在不断地转变人们的工作方式。随着六西格玛的推进，组织文化也会得到不断的完善，会形成一种同心协力克服障碍，人人积极关注、参与改进和创新的文化氛围。

组织的核心业务流程就像是一条横向流淌的河，而现有的职能式组织结构犹如纵向的大坝，部门之间由于业务目标的差异导致了沟通壁垒，这种沟通壁垒又极大地影响了流程运行的效率和效果。实施六西格玛，有助于消除沟通壁垒，增进无边界合作的文化。六西格玛强调跨职能合作，消除部门间及上下级间的障碍，促进组织内部横向和纵向的沟通。六西格玛项目往往是跨职能的。在六西格玛跨职能团队中，团队成员有着共同的团队使命和目标，并且能意识到自己的职责与组织的使命、愿景、战略目标和关键绩效指标的关系，意识到业务流程各部分的相互依赖性，能够创造出一种能真正支持团队合作的管理结构和环境。而这种无边界合

标准分享网　www.bzfxw.com　免费下载

作的“纽带”正是有着强大使命感的六西格玛黑带和绿带，黑带和绿带要想成功就必须打破部门之间的障碍。

六西格玛的“无边界”文化是通用电气成功的秘诀之一。韦尔奇致力于消除部门横向间及上下级间的障碍，促进组织内部横向和纵向的合作，改善了过去仅仅是由于彼此间的隔阂和通用电气内部部门间的竞争而损失大量金钱的状况，这种做法改进了通用电气内部的合作，使通用电气获益匪浅。

3. 全面提升公司的核心竞争力和经营管理成熟度

六西格玛还可以是一种战略，一种全面提升组织竞争力和经营管理成熟度的战略。六西格玛作为组织战略，主要通过以下作用来实现组织的战略目标。

（1）提高顾客满意度，留住顾客，增加市场份额。随着各个行业竞争的日趋激烈以及顾客要求的不断提高，仅仅提供“好的”或“合格的”产品和服务已经不能保证组织的成功。六西格玛以顾客为真正的关注中心，这就意味着学会辨析哪些价值对顾客是有意义的及计划如何给顾客提供这些价值的同时又能盈利。顾客决定市场，作为顾客导向的持续改进的管理模式，六西格玛强调从顾客关注的焦点出发选择项目，提高顾客满意度，通过持续的顾客满意增加市场份额和提高组织的盈利能力。

（2）减少缺陷或错误，降低风险和成本。所有的缺陷或错误都包含了风险，六西格玛的目的在于通过降低缺陷或错误降低风险。六西格玛强调基于事实和数据的管理，通过数据分析寻找问题并分析原因，不仅降低了顾客购买产品或服务时要承担的风险，还降低了提供产品的组织的风险。六西格玛还通过有效的方法查找不良质量成本，消除“隐蔽工厂”，从而降低风险和成本。

（3）改进产品及服务，使企业获得持续的成功。六西格玛是能够给组织提供不断创新的技巧和文化的方法，通过不断地革新、开发新产品、开拓新市场及不断地改进组织结构，使得组织能够使价值最大化，提高顾客满意度，最终达到提高生产力、增加市场竞争力的目的，从而使组织得到持续的发展。

（4）加快改进的速度。摩托罗拉从 1987 年到 1991 年“4 年改进 100 倍”的成效归功于六西格玛的实施。顾客的需求是动态变化的，随着现代社会生活节奏的加快，人们对产品性能改进的需求越来越强烈，改进速度最快的组织将在竞争中得到持续发展。六西格玛通过借鉴其他学科的工具和思维，可以帮助组织在改进绩效的同时加速组织的改进流程。

4. 培养下一代领导者，促进员工职业生涯发展

通用电气公司将六西格玛管理与人力资源管理密切结合。1997 年 3 月 22 日，韦尔奇专门向通用电气全球的管理人员发送了一份传真，明确规定管理人员的提升将直接与六西格玛挂钩；1997 年 5 月 22 日，韦尔奇与两位副董事长联合签发了一条关于将六西格玛培训结果与晋升机会相联系的命令；1998 年 1 月 1 日，通用电气新版本的管理人员晋升制度正式生效：从即日起，基层管理人员必须事先通过六西格玛绿带或黑带的培训，才能够获得晋升中级管理职位或高级管理职位的资格。从

此，六西格玛管理成为通用电气未来领导人的摇篮，一大批训练有素、擅长基于数据与事实解决问题和进行决策的人员走上了通用电气各层次的管理岗位，为通用电气多年来的强劲发展奠定了良好的人力资源基础。

员工是组织获取竞争优势的根本，六西格玛管理的推行能够有效地提高员工的素质，促进员工的职业发展。“学习型组织”这个很多人感兴趣但很难付诸行动的概念产生于 20 世纪 90 年代，联合信号公司的领导层对此评价说：“每个人都在谈论学习，但很少有人能把它贯穿于大多数员工的日常生活中。”而六西格玛是一种可以在组织内增强和加速新思维的发展和分享的方法。

六西格玛带给员工的是解决问题的方法。员工不仅通过培训学到知识，而且要将所学知识应用到实践中，通过实践完全掌握解决问题的科学方法，为组织带来丰厚的回报，同时提高员工的个人能力。通过员工个人行为的改变，促进学习和相互指导，提高人员素质，进而改变企业整体的文化氛围，从而使企业成为一个学习型组织。

六西格玛管理为组织实施持续的突破性的改进和创新提供了所必需的管理工具和操作技巧，也为组织培养具备组织能力、激励能力、项目管理技术和数理统计诊断能力的领导者，这些人才是组织推进变革和竞争的核心力量。从而使组织降低质量缺陷和服务偏差并保持持久的效益，促进快速实现突破性绩效，帮助组织实现战略目标。

1.2.3　六西格玛管理的核心理念和价值观

六西格玛价值观是六西格玛的理念、哲学，是组织推进六西格玛管理的指导原则和行为准则。六西格玛管理评价准则建立在以下相互关联的价值观基础之上。

（1）高层领导的作用；

（2）顾客驱动与顾客满意；

（3）组织和员工的学习；

（4）基于数据和事实的管理；

（5）无边界合作与突破性过程改进；

（6）注重结果和价值创造。

1. 高层领导的作用

组织的高层领导应当具有远见卓识，建立面向未来的愿景和价值观并与员工沟通，营造组织文化，引领组织追求零缺陷、追求卓越。

六西格玛管理是一项自上而下的管理活动，组织高层领导的支持和参与程度直接决定六西格玛管理实施的成败。组织的高层领导团队对六西格玛管理应有统一的认识，将六西格玛价值观融入组织文化，建立鼓励创新和变革、容忍失败的文化环境；高层领导应从企业的战略和利益相关方的需求出发，制定与组织战略协调一致的六西格玛战略和战略目标并层层展开；高层领导应为六西格玛实施建立基础架构和提供资源保证，明确组织的改进机会，组织、鼓励员工参与六西格玛项目，定期参与六西格玛项目评审并对组织六西格玛实施的整体状况进行评估，协调六西格玛

标准分享网　www.bzfxw.com　免费下载

的整体推进和排除障碍。

高层领导对六西格玛管理的支持是通过其具体参与六西格玛管理活动体现的，高层领导通过营造氛围、制定规划、倡导项目和亲自参与六西格玛管理的实施，可以起到表率作用，并能积极推进六西格玛管理的实施。

2. 顾客驱动与顾客满意

“顾客驱动与顾客满意”是六西格玛管理最基本的价值观，也是现代组织管理理论和实践的基本原则。

组织依存于顾客，获得高的顾客满意度和忠诚度是组织所追求的主要目标。然而，顾客只有在其需求和期望得到充分理解并获得满足后，才会满意和忠诚。组织应当深入了解顾客当前和未来的需求和期望，并关注其动态变化，以此驱动质量改进，消除缺陷，为顾客解决问题，满足顾客需求并争取超越顾客期望，从而建立良好的顾客关系，不断增进顾客满意和忠诚。

在六西格玛管理中，以顾客（包括内部顾客）为中心是最优先的事情，强调“倾听顾客的声音”，倾听顾客的需求、期望和偏好，倾听顾客的满意和不满意。六西格玛管理从倾听顾客的声音开始，基于顾客需求选择项目、驱动改进并评价改进成果，即一切以顾客满意和为顾客创造价值为中心。

3. 组织和员工的学习

六西格玛管理能够有效地推进组织和员工的学习，是构建学习型组织的有效方式。六西格玛管理强调学以致用，将系统的培训体系和六西格玛改进项目结合起来，将员工学习、绩效改进和组织学习有效融合，通过六西格玛项目将学习活动和成果植根于组织的业务过程改进，六西格玛项目成果的共享平台进一步促进了六西格玛知识在组织内的传播和渗透。

实施六西格玛管理的组织应建立系统的、面向组织不同层次需求的培训体系，激励员工积极参与六西格玛项目，促进个人职业发展、能力提升和组织业务绩效指标改进。

4. 基于数据和事实的管理

“基于数据和事实的管理”是现代管理与传统经验管理的分水岭。

越来越多的组织开始重视信息系统建设和知识管理，但所作出的许多经营决策仍然是基于感觉和经验。六西格玛管理把“基于数据和事实的管理”的理念和实践提到了一个更高的层次。六西格玛管理建立于数据和信息管理的基础之上，其最大特点就是强调一切用数据和事实说话，一开始就界定和测量过程输出关键绩效指标及其基线值，然后应用统计方法进行数据的分析和探测，确定显著影响关键绩效指标的过程因素，并通过改进获得优化的结果。

5. 无边界合作与突破性过程改进

六西格玛管理提倡通过“无边界合作”，建立跨职能、跨层级乃至跨组织的项

目团队，实施突破性的过程改进。

六西格玛管理建立在无边界沟通和合作的基础之上，能够营造出一种真正支持团队合作的管理结构和环境。联结这种无边界合作的“纽带”就是那些有着强烈使命感的黑带，要想获得成功就必须由黑带率领他的团队打破沟通壁垒，通过“无边界合作”完成六西格玛项目。

六西格玛管理面向业务过程，聚焦于过程的突破性改进。组织向社会提供产品或服务是通过一系列的过程实现的，过程存在的波动、非增值作业导致质量下降、成本增加和运营周期延长等，影响顾客的满意度。通过六西格玛管理，对核心过程和关键支持过程进行设计或改进，使过程绩效取得突破性的提升，为顾客和相关方创造价值，建立竞争优势。

6. 注重结果和价值创造

六西格玛管理注重结果，包括顾客满意度成果、财务成果、人力资源成果、业务过程指标改进成果、供应链绩效改进成果和组织文化与管理变革成果。这些成果反映了组织通过实施六西格玛管理，为顾客、股东、员工、供方和合作伙伴以及社会等利益相关方创造的价值。这些价值应是平衡、和谐的，相互促进、良性循环的，体现了组织六西格玛管理对组织整体经营管理成熟度，即组织卓越绩效的贡献。

1.3　六西格玛管理的组织和推进

1.3.1　六西格玛管理领导力与战略

1. 六西格玛领导力

一个组织的成功与否固然需要全体成员的共同努力，但不可否认，高层领导是决定其兴衰成败的关键，古今中外概莫能外。如果把组织比作一艘船，高层领导就是舵手，要领导着组织驶向光辉的彼岸。高层领导最基本的职能定位和作用就是建立一个组织未来的发展方向和绩效期望，即确定组织的使命、愿景和核心价值观，在组织中营造一种氛围，一种促使人们为了实现目标而全力以赴的组织文化氛围。

使命（mission）是指组织的角色、任务或总体功能，反映了一个组织之所以存在的理由或价值，以及组织的灵魂所在。任何组织的存在都有其目的或使命，如工商企业的共同使命是向社会提供有经济价值的产品或服务。任何一个组织只有明确自己独特的使命，才能够着力于去“做正确的事”。具体组织的使命是对其存在的规定，应有其独特性，决定了它之所以是它而不是任何别的机构。惠普公司创始人之一戴维·帕卡德在 1960 年给惠普员工所作的演讲中指出，企业的使命触及的是一种除了赚钱之外的更深层次的公司存在理由，是做一些有价值的事。企业是为了包括股东、顾客、员工、供方和合作伙伴、社会在内的五大利益相关方而存在

标准分享网　www.bzfxw.com　免费下载

的，因此从宏观的角度讲，组织应当为所有的利益相关方创造平衡的价值。

愿景（vision）是指组织所渴望的未来图景和境界，是一个组织的整体发展方向和所要追求的目标。高层领导应当具备远见卓识，经过深思熟虑，周密制定一个现实、可信、诱人、远大的，需要花五年甚至十几年来实现的愿景目标，并向人们清晰明确地指出，这种目标建立在当前条件基础上，只要经过努力就会实现。一旦人们有效地确定和实施这种愿景，就会产生巨大动力，并通过凝聚各方技能、才干和资源而推动人们奔向未来。愿景应当是组织全体成员的共同心愿，也应反映各利益相关方对企业的绩效期望。

价值观（values）是指期望组织及其员工如何运作的指导原则和/或行为准则。价值观反映组织所渴望的文化。价值观以适当的方式支持和指引每一位员工作决定，帮助组织完成其使命，达成其愿景。价值观是一个组织所拥护和信奉的东西，是一个组织最重要和永恒的信条，是一小部分不随时间和环境的变化而改变的原则，应当经得住时间的考验，即便因拥有某一价值观而遭受失败也不会改变它。它有别于组织的经营战略和经营活动等随着经营环境的变化而改变的东西。价值观决定了组织对于好与坏、对与错、赞赏或是不屑等问题的判断。价值观不是一种功利性的选择，而是一个组织的信仰。价值观必须以高层领导的行动和行为作为支持，否则它的发布只会在组织中受到人们的冷嘲热讽。成功的价值观应当体现于组织全体员工的言行举止，融入组织的骨骼、血液和经络系统，成为组织成功的遗传基因密码，并通过价值链影响组织的相关方。

当高层领导确立了组织的使命、愿景和核心价值观，为组织的未来建立了发展方向和宏伟愿景之后，最重要的就是要通过战略规划，勾画出通往愿景的路径，将愿景转化为可行动的规划。

（1）高层领导在六西格玛推进过程中的承诺和关键角色。六西格玛不仅是一种改进方法，还是一种文化和战略。组织实施六西格玛，可以促进企业文化的变革和战略目标的实现，最终促进组织使命的实现和愿景的达成。领导在六西格玛管理中扮演着关键的角色。实施六西格玛的组织以及六西格玛专家经过多年的实践，在总结六西格玛成功实施的关键要素时，不约而同地把领导层的支持和参与作为成功的第一个关键要素。

成功推行六西格玛管理并获得丰硕成果的组织都拥有来自高层的高度重视与卓越领导，拥有一批精力充沛、直言不讳、知识丰富的管理者，更重要的是他们能参与到六西格玛管理中。他们的管理风格可能各有千秋，诸如通用电气公司杰克·韦尔奇的活力，联合信号公司拉里·博西迪的严谨，摩托罗拉公司鲍勃·高尔文的无所不在，但重要的是他们都认识到了支持和积极参与是六西格玛管理成功的关键。六西格玛管理是从上而下推行的，因此六西格玛的实施应始终取决于组织的最上层，因为六西格玛管理最终要变革组织的文化，因此，必须获得高层执行领导的认同。高层领导要指导制定六西格玛推行的计划，选择倡导者，分派资源，制定政策支持六西格玛行动，并把六西格玛管理与组织不断发展的战略目标相结合。

具体来讲，最高管理层的作用包括：

1）制定 2～5 年的六西格玛战略目标。这些目标必须是针对组织具体情况而制

定，并且应该由组织战略目标来驱动。六西格玛战略目标包括财务方面的、顾客和市场方面的、关键业务流程方面的以及员工成长方面的。关键是，这些目标必须通过实施六西格玛才能获得。

2）授权一个推进小组。六西格玛开始实施时会影响到组织的方方面面。领导层的介入就是承担以下责任：定义并管理六西格玛在组织中的形象，以及如何将其要求和利益传达给他人。在大多数情况下，最高管理者将这些责任授权给推进小组，而这个小组主要负责制定详细的实施计划并实施。

推进小组的一个重要工作是确定六西格玛推进的整体目标，编制预算，制定六西格玛推进政策和建立基础架构，确保与最高管理层的战略相吻合。根据组织规模大小和复杂程度，推进小组需要不断对计划进行修改，在2个星期到3个月之间，推进小组应该能够初步制定一个推进方案。

3）制定推进方案。推进小组由最高管理层负责管理（一般由倡导者担任组长），其职责包括：

- 确定组织现有绩效和预期绩效之间的差距；
- 判定如何实施六西格玛才能缩小这一差距；
- 为实施六西格玛制定一个方案。

最初的差距分析可以做得很复杂，也可以做得很简单，这取决于组织的需要。在分析之前应获得现有绩效的可靠数据，尽管得到可靠的数据要花费一些力气。预期绩效要从长期目标中得出。明确现有绩效与预期绩效之间的差别很重要，这使领导层有足够的勇气认识到进行变革的必要性。

一旦推进小组完成了差距分析，就要制定一个初步的方案，方案应该包括：

- 六西格玛组织结构和人员需求；
- 实施目标和计划（启动的时机、所需的人员数量和培训类型等）；
- 财务衡量标准及目标（成本和利润）。

项目的初步计划将确保高层领导理解六西格玛，以及它对组织产生的经营和财务利益。此时需要有足够深度的分析，从而使高层领导和董事会理解必要的投资和涉及的风险。

4）领导层亲身参与。六西格玛管理推行成功最关键的因素是领导重视。领导重视不仅体现在投入的资源上，还表现在其亲身参与上，如以各种行动带头营造六西格玛氛围，包括通过邮件、讲话、网络等各种方式表达自己对六西格玛的态度。在有些组织，高层领导作为倡导者亲自参与或指导六西格玛项目。

（2）六西格玛价值观的融入与组织文化变革。组织文化最核心的部分是其价值观。将六西格玛价值观融入组织原有的价值观中，就是一场组织文化的变革。

高层领导具有确立价值观，营造企业文化的职责。当组织推行六西格玛时，高层领导应当将六西格玛价值观融入组织原有的价值观，变革组织文化和基因密码，使员工的信念、态度和期望与六西格玛管理同步；高层领导要对六西格玛的实施高度负责，并将这种精神渗透到整个组织；高层领导要有一种紧迫感，必须意识到要解决那些影响组织战略目标达成、降低组织的盈利能力和顾客满意度的问题，就要与关键人员一起参与到执行六西格玛的活动中来；高层领导要将六西格玛方法的领

标准分享网　www.bzfxw.com　免费下载

导力原则（参见表 1—1）付诸实施，不断提升和优化组织六西格玛管理的领导力。

六西格玛价值观可以强化组织好的文化，变革不利于组织的风气。例如，六西格玛强调通过运用严谨的科学方法和工具，对数据和事实进行分析，为决策提供依据，而不是“拍脑袋”。当六西格玛成为组织一种通用的语言时，将从根本上消除组织会议和决策争论中产生的对人还是对事的矛盾。它要求不断地质疑企业的信条和传统的工作方式，勇于尝试，在追求完美的同时容忍失败，能够接受和处理偶然的挫折。

这种文化上的变革也是六西格玛管理取得成功所必需的。组织文化是一个组织长期以来形成并沉淀下来为大家所共识并遵循的“做事方式”。试想，没有做事方式的改变，哪来经营业绩的持久改进？当你试图改变人们的做事方式时，文化便显示出巨大的阻力。因为当战略与文化冲突时，文化恒胜；当组织文化与变革的精神不相容时，变革的努力将遭到失败。

六西格玛管理的根本目的是改善组织经营业绩，但业绩的改进要通过变革组织文化来实现。六西格玛为组织带来的不仅是工作过程或经营业绩的改善，更重要的是改变组织各个层面的工作方式——怎样确定它们的工作目标，怎样测量它们的工作业绩，它们的工作内容如何构成；如何处理组织内部的关系，怎样处理与顾客、供应商的关系，等等。这些变革涉及组织中的每一个人、每一个部门。组织要实施六西格玛管理，就意味着组织必须改变人们的工作方式，这就是组织面临的挑战：组织文化的变革。

2. 六西格玛战略

（1）企业战略的制定和部署。战略是指组织为适应未来环境的变化，追求长期生存和发展而进行的整体谋划和决策。战略是达成愿景、实现使命的手段，反映了组织自身能力同外界环境中所孕育的机会与威胁的一种现实的结合，确定了诸如价格、价值、技术、市场占有率和组织文化等关键的成功因素。它使竞争优势达到最大，竞争劣势减到最小。

战略制定一般采用 SWOT 分析，SWOT 是优势（strengths）、劣势（weaknesses）、机会（opportunities）、威胁（threats）的缩写，其中优势、劣势分析主要着眼于组织自身的实力及其与竞争对手的比较，而机会与威胁分析将注重于外部环境的变化及其对企业可能产生的影响。多年的实践证明，SWOT 分析是战略规划中使用最广泛、最持久的分析工具。SWOT 分析不仅要找出组织的核心竞争力，即找到所拥有的资源和能力以及运用它们的独到妙方，还要找出由于缺乏资源当前还不能利用的机会，以及对劣势和威胁的改进、规避或遏制方法。总之，要找到内部的优势、劣势与外部的机会、威胁之间的战略匹配。战略制定包括以下步骤：

1）评估当前绩效：

a. 用投资收益率、盈利性等评估当前绩效；

b. 评估组织当前战略态势，包括使命、愿景、战略、方针。

2）评价组织治理：评价组织高层领导（包括董事会和高层管理者）的绩效。

3）分析外部环境：寻找显示出机会（O）和威胁（T）的战略因素。

4）分析内部环境：寻找决定优势（S）与劣势（W）的战略因素。

5）确定战略目标。

6）进行 SWOT 战略因素综合分析，形成和确定战略方案。

“知己知彼，百战不殆。”组织在开始制定战略之时，要全方位、多方法地收集大量的内外部数据和信息，并通过对数据和信息的分析研究，分析外部环境以发现已有的和潜在的机会与威胁，分析内部环境以找到促进组织成长的优势和制约发展的劣势。

环境分析就是监测、评价、分析来自外部和内部环境的信息，发现所有可能对组织成败有强烈影响的关键战略因素，以使组织战略能够充分、周密考虑内外部的环境变化，确保在环境需求与组织供给、组织需求与环境供给之间具有良好的战略适配，形成竞争优势，避免战略意外，促进和谐发展，获取长期成功。图 1—6 显示了环境分析的主要方面和因素。

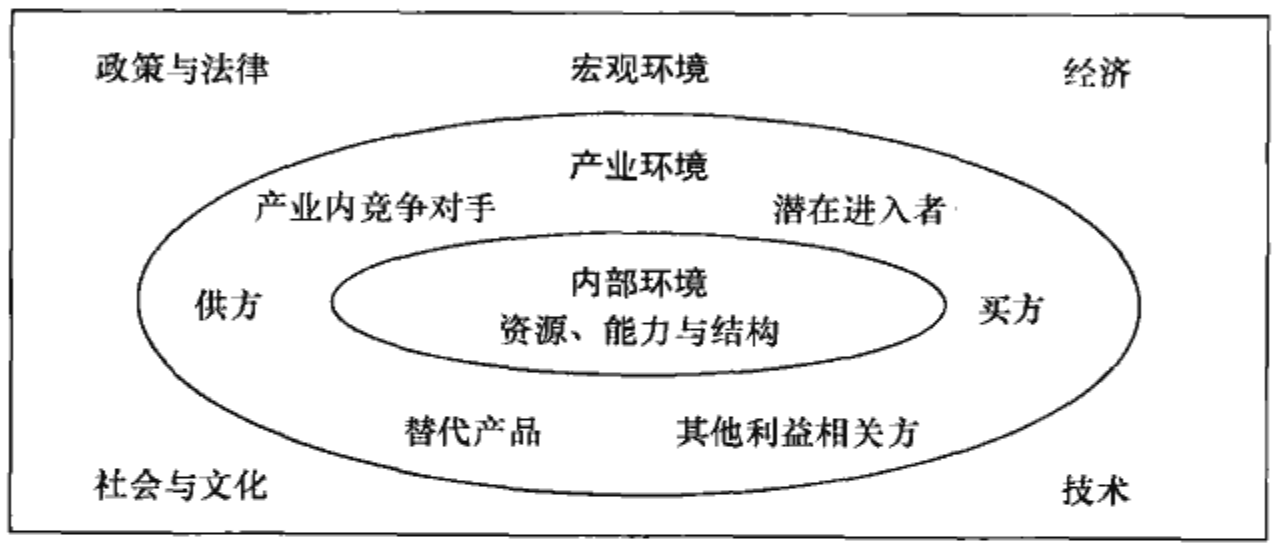


图 1—6　环境分析的主要方面和因素

在环境分析中，情景策划是一种用来设想将来可能会遇到的一系列问题的方法。为了确立将来的趋势和不确切的走向，通过情景策划，可构造一系列的情节和情景，包括好的未来、差的未来和不可预测的状况，使组织像“照镜子”一样，看到从未看到过的自己，有助于弥补决策过程中过度自信和视野狭窄的常见错误，制定应对的行动计划。

在完成了外部和内部两方面的环境分析后，可以使用 SWOT 方法，对外部、内部战略因素进行综合归纳，以确定战略目标、形成战略方案。

当组织的战略目标和战略方案制定后，最重要的就是战略部署，使战略方案具体化，制定在战略规划长短期内的各职能战略的详细规划，包括行动计划及关键绩效指标、预算和相关新程序等，沿管理层级、时间区间两个维度展开，并予以资源配置。

《孙子兵法》说：“上下同欲者胜。”组织要做到“上下同欲”，一是仰仗强有力的组织文化，二是有赖于以关键绩效指标系统为经络的战略部署过程。战略部署过程是一个复杂的系统工程，需要通过科学、系统而有序的方法，将组织的战略目标和战略方案落实到每一个层级、每一个过程和每一个时间段，确保组织上下左右的协调一致、融合互补。

标准分享网　www.bzfxw.com　免费下载

平衡计分卡（balanced scorecard）是战略部署的典型方法。

1992 年，美国哈佛商学院的罗伯特·卡普兰和复兴方案公司总裁戴维·诺顿在《哈佛商业评论》杂志上发表了一篇绩效管理系统的论文，其中提出了平衡计分卡的概念，认为任何单一的绩效指标都难以反映组织的绩效全貌，必须用一个平衡的指标体系来要求组织才能使之健康地发展。此后，平衡计分卡由“绩效考核阶段”发展到“战略考核和管理阶段”。今天，平衡计分卡作为一种战略执行和绩效管理工具，在全世界广泛应用。

如图 1—7 所示，这个平衡的指标体系包括四套指标：财务、顾客、内部过程和学习与成长，源自于组织的愿景和战略，力图平衡财务和非财务目标，平衡股东、顾客、员工等利益相关方的价值，平衡短期和长期目标，平衡领先性和滞后性指标，并层层展开，层层制定行动计划，形成各部门、团队和员工个人的平衡计分卡。

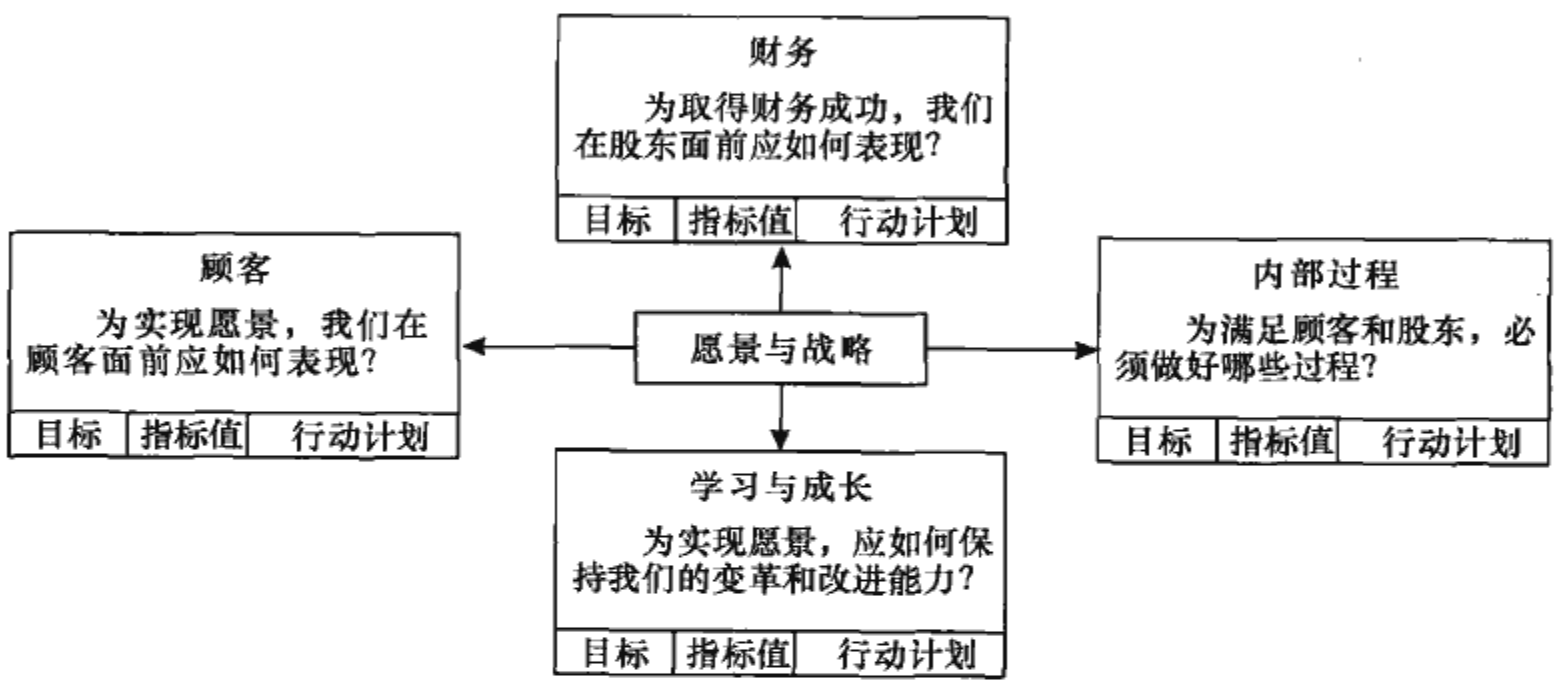


图 1—7　平衡计分卡示意图

其中，“学习与成长”维度指组织和员工两方面的学习与成长，主要涉及培养员工能力、优化组织文化以及改善信息获取环境等，包括人力资源、组织文化、信息和知识、管理体系以及创新与改进等方面的关键绩效指标。

一般，“学习与成长”维度的指标是战略基础和最领先的指标，驱动着“内部过程”指标；而“内部过程”指标又驱动着“顾客”维度指标；“顾客”维度指标驱动是最滞后的“财务”指标。领先性（驱动性）指标体现了组织获得未来成功的竞争能力。

平衡计分卡与传统的目标管理相比，更加强调“平衡”和“战略”，强调组织各职能的目标和行动都要平衡各相关方的利益、平衡长期和短期目标、平衡领先性和滞后性指标，都要置于组织总体愿景和战略的指导之下。

组织运用平衡计分卡方法进行层层分解的战略部署后，关键绩效指标就已经确定了。建立完善的关键绩效指标测量系统，有利于监测战略的部署，通过六西格玛等方法分析和改进战略绩效，对战略实施情况进行评估和控制。

完整的关键绩效测量系统应包括以下 5W1H 要素：

- 为什么测量（why），应是关键的指标，能够反映组织的核心竞争力。

● 测量什么（what），除了测量指标名称、指标值之外，还包括指标定义和计算公式，以避免出现歧义、争议。

● 如何测量（how），即测量方法，包括数据来源（来自现场、信息系统或其他统计渠道）、获取方法（如检验、统计、抽样调查、审核评价等）以及测量规程等。

● 何时测量（when），即测量时间或频次，如按周、月、季、半年或年测量。

● 在何处测量（where），即测量点所在地点、部门或过程。

● 谁测量、谁分析和改进（who），包括负责数据测量及整合、分析和改进的责任部门或责任人。

（2）六西格玛：作为一种企业战略。在过去的许多年里，六西格玛仅仅被视作一个统计学上的概念或是一种过程改进工具，用来帮助改进制造过程，减少产品缺陷。在通用电气公司，六西格玛已经演变为一种应对动态的竞争环境、提升企业竞争力、取得长期成功的企业战略，成为公司发展的四大战略之一。韦尔奇说："通过不断地升级和更新，我们已经大大地提高了通用电气产品和服务的质量。但是，我们做得仍然远远不够，我们也仍然远远不能够与那些拥有世界顶级产品质量的公司相提并论。这些公司已超越了与其他对手竞争的境界，而是自己向自己提出挑战，从而推动产品质量到达更新、更高的层次。"因此，他确信质量的改进将成为通用电气发展战略方面的新突破，动员整个公司全力以赴，并且使六西格玛战略与通用电气公司正在实施的其他战略相结合，同时借助六西格玛促进公司的"群策群力"和"无边界合作"。六西格玛管理终于像熊熊烈火燃烧着整个通用电气，使之成为富有竞争力的、敏捷灵活的卓越公司。

今天，组织面临着前所未有的经营压力，这种压力不仅来自降低成本的需要，也来自经营增长、加速创新和生产力持续提升的需要，来自市场竞争、全球化、信息技术以及经营变革步伐的加快。对组织而言，产品的高品质、对市场的快速反应、缩短周期、供应链运作的高效、建立持久的顾客关系等，已经成为竞争的关键，这不仅是为了组织的成功，更是为了生存。在巨大的压力面前，组织需要不断提高经营绩效，寻找改进经营业绩的机会。六西格玛作为一种突破性的组织战略的意义就在于，以其严格的科学方法和对经营绩效的突破性改进模式，将一个组织的所有组成要素紧密地连接起来，集中资源实现底线结果（波动、生产率、周期时间、成本等）和顶线结果（顾客满意、市场份额、营业收入等），帮助组织实现经营绩效的突破，并最终成为组织持久的绩效改进基因，提供一种战略方案，一个追求卓越和走向成功的阶梯。

（3）六西格玛：作为战略绩效改进的方法。六西格玛具有双重战略意义：作为一种企业战略和作为战略绩效改进的方法。

如果说将六西格玛作为一种战略是推行六西格玛管理的最有魅力的选择，那么，将六西格玛作为战略绩效改进方法，将六西格玛项目与组织目标密切联系，则是推行六西格玛管理所必需的。

六西格玛项目与组织目标的链接，意味着六西格玛项目来源于企业的关键绩效指标系统，以确保六西格玛能够支持组织战略的实现。通过关键绩效分析、评审，

标准分享网　www.bzfxw.com　免费下载

识别六西格玛的改进机会，以战略目标和关键绩效指标驱动六西格玛的实施。

关键绩效评审是在战略实施过程中，高层领导掌控组织战略实施和运作状况，寻找改进决策点的重要手段：基于绩效的分析和预测，评审组织的绩效和应变能力，包括组织的成就，与竞争对手和标杆绩效的比较，长短期目标的进展，明确组织的竞争地位，确定改进关键业务的优先次序，并识别创新的机会。可以从以下四个方面进行评审：

1）评审组织绩效的当前水平；

2）评审组织绩效的趋势；

3）竞争绩效和标杆绩效对比；

4）评审绩效结果是否达到了关键的绩效要求。

3. 六西格玛战略风险分析

风险的定义是：对目前所采取的行动，在未来没有达到预期结果（失败）的可能性。其大小可用失败的概率和失败的后果两个变量来标识。

六西格玛战略风险分析指对组织推行六西格玛战略的风险分析。组织可以通过情景策划，应用 SWOT 分析，对推行六西格玛战略的内部能力、资源和文化等方面的优势和劣势、外部环境的机会和威胁进行分析和归纳，并针对所识别的内部劣势、外部威胁等潜在风险，采取各种措施来加以缓解、规避或监控。

六西格玛管理战略的风险一般可包括：

（1）六西格玛战略与组织其他战略的协调性。六西格玛管理的实施必须与组织其他战略保持良好的协调性，有效地促进组织其他战略的达成。例如在通用电气，六西格玛战略与全球化、服务和电子商务战略的密切结合，使得四大战略齐头并进，相得益彰。

而如果六西格玛管理不能很好地与组织其他战略协调，所选择的六西格玛项目不能有效地支持战略目标的达成，就无法通过推行六西格玛管理提升组织的核心竞争力，也很难获得高层领导的整体认同和支持，使得六西格玛管理不能持续下去。

（2）六西格玛管理对组织文化带来的挑战。文化是水，战略是舟；水能载舟，亦能覆舟。六西格玛管理是对业务运作过程的变革，当组织文化与变革的精神不相容时，变革的努力将遭到失败。有些企业忽略了通过六西格玛创建持续改进的质量文化，没有高层领导的承诺和全体员工的共识，习惯于原来的做法而不愿意改变，相关部门之间不易协调，而仅仅是把六西格玛活动当作一场运动，轰轰烈烈推进了一阵子，便又恢复了从前的老样子。

（3）六西格玛管理在管理和技术方面的阻力。在管理方面的阻力包括：

- 缺乏科学合理的项目实施规划。有些企业推行六西格玛，认为只要选派几个人参加六西格玛学习班，拿到六西格玛黑带/绿带证书就可以了。离开六西格玛项目的实施，任何组织或咨询机构颁发的六西格玛黑带/绿带证书都是废纸一张。
- 机械模仿。有些曾在某些大公司获得黑带（甚至资深黑带）的人往往以六西

格玛专家自居，倾向于把大公司的做法强加于一些中小企业，不根据组织的具体实际机械地模仿。任何一种管理模式，其科学的理论和实践是可以学习借鉴的，但在具体应用上，要从组织自身实际出发，照抄照搬注定是要失败的。

● 错误地认为六西格玛管理仅仅是做项目，没有建立六西格玛组织结构，未能通过有效的培训形成包括六西格玛倡导者、资深黑带、黑带和绿带的关键群体，忽视团队建设，不能有效地传递六西格玛领导力和促进六西格玛在组织内的广泛实施。

● 没有建立包括项目选择、立项、跟踪和总结全过程的六西格玛管理程序，以及项目成果发布、分享、认可和奖励制度，激励力量不足；人力、时间、资金等方面的资源配置不当或不足；与现行管理模式冲突，管理系统、方法之间不能协调、整合。这些都将给六西格玛的有效实施带来风险。

在技术方面的阻力主要是缺乏对六西格玛管理的专业培训和咨询。有些人错误地认为六西格玛就是统计方法在组织中的应用。统计方法固然非常重要，但是要完成组织中的实际项目往往需要多种分析方法和工具。如果缺乏正确、有效的培训和咨询指导，生搬硬套地应用统计方法，其结果往往是统计方法的误用。

（4）六西格玛管理与组织实际情况的适应性。从原理上讲，六西格玛的管理模式适用于所有类型的组织，但是如果组织的基础管理薄弱，基础数据不完善，甚至是空白，这样的组织操之过急地推广六西格玛管理可能难以达到预期结果。

1.3.2　六西格玛管理的组织结构

组织实施六西格玛活动的首要关键任务是创建一个致力于流程改进的专家团队，并确定团队内的各种角色及其责任，形成六西格玛的组织体系。这是实施六西格玛管理的基本条件和必备的资源。以黑带团队为基础的六西格玛组织是实施六西格玛突破性改进的成功保证。图 1—8 为六西格玛管理组织结构示意图。

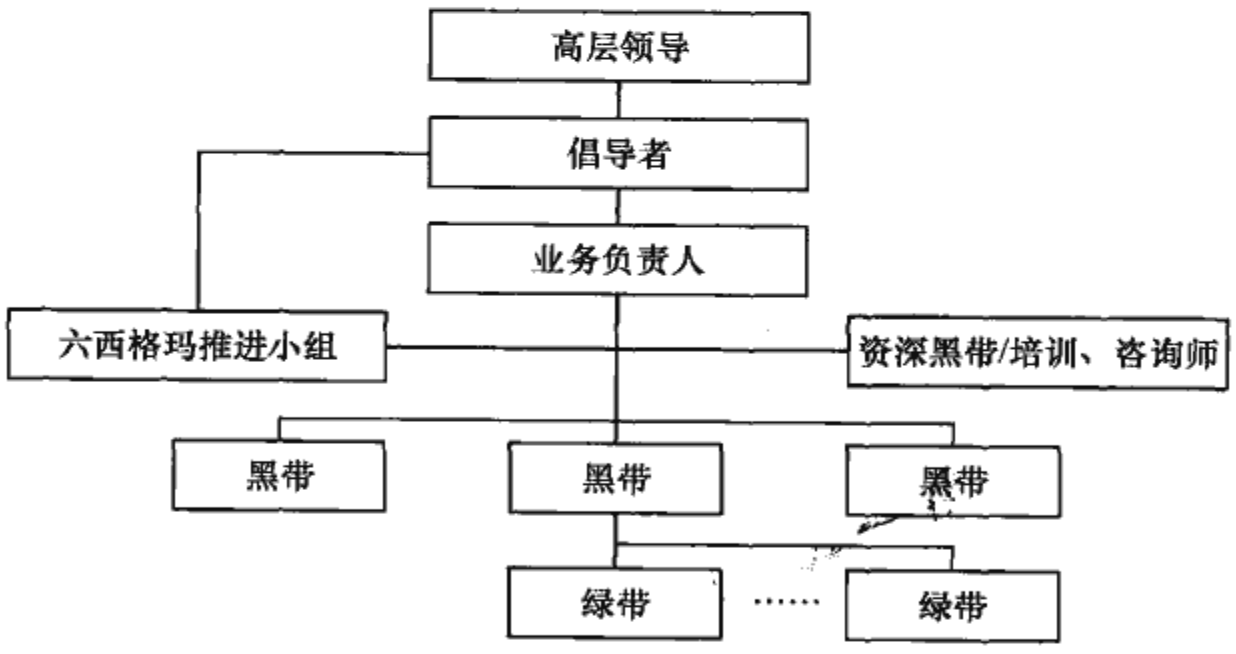


图 1—8　六西格玛管理组织结构示意图

六西格玛组织是由高层领导、倡导者、资深黑带、黑带、绿带、业务负责人等构成的。他们的职责与权限如下。

标准分享网　www.bzfxw.com　免费下载

1. 高层领导

高层领导是推行六西格玛管理获得成功的关键因素。成功推行六西格玛管理并获得丰硕成果的组织都拥有来自高层的高度认同、支持参与和卓越领导。

2. 倡导者

倡导者发起和支持黑带项目，是六西格玛管理的关键角色。倡导者通常是组织推行六西格玛领导小组的一员，或者是中层以上的管理人员，其工作通常是以战略视角，对六西格玛管理进行全面的战略部署、项目及目标确定、资源分配与过程监控，最终对六西格玛活动整体负责。其核心任务包括：

- 充分认识变革，为六西格玛确定前进方向；
- 确认和支持六西格玛管理全面推行，制定战略性的项目规划；
- 决定“该做什么”，确定任务的实施优先顺序；
- 合理分配资源，提供必要的支持；
- 消除障碍；
- 检查进度，确保按时、按质完成既定目标；
- 了解六西格玛管理工具和技术的应用；
- 管理及领导资深黑带和黑带。

倡导者在六西格玛组织中起着承上启下的作用，黑带应积极争取倡导者的支持。

3. 资深黑带

资深黑带的职责在不同的企业有不同的规定。例如，在通用电气公司，资深黑带更多地强调其管理和监督作用；在霍尼韦尔公司（Honeywell），资深黑带主要起协调作用，负责日程调整、项目领导和指导工具的运用；两者都很有效。

在一些组织中，资深黑带更多的是扮演企业变革的代言人角色，其工作更加具有管理性质，因为他们经常负责在组织整体或特定领域、部门开展六西格玛管理工作；他们是六西格玛管理的高参兼专家，是运用六西格玛管理工具的高手。六西格玛资深黑带的主要职责为：

- 担任高层领导和倡导者的六西格玛管理高级参谋，具体协调、推进六西格玛管理的开展，持续改进公司的运作绩效；
- 担任培训师，为黑带学员培训六西格玛管理及统计方面的知识；
- 帮助倡导者、管理者选择合适的人员，协助筛选最能获得潜在利润的项目；
- 为参加项目的黑带提供指导和咨询；
- 作为指导者，保证黑带及其团队保持在正确的轨道上，能够顺利地完成他们的工作；
- 具体指导和协助黑带及其团队在六西格玛改进过程中完成每个步骤的关键任务；
- 为团队在收集数据、进行统计分析、设计试验及与关键管理人员沟通等方面

提供意见和帮助。

4. 黑带

黑带是六西格玛管理中最为重要的一个角色，他们专职或兼职从事六西格玛改进项目，是成功完成六西格玛项目的技术骨干，是六西格玛组织的核心力量，他们的努力程度决定着六西格玛管理的成败。黑带的主要任务是：

- 领导：在倡导者及资深黑带的指导下，界定六西格玛项目，带领团队运用六西格玛方法完成项目；
- 策划：决定项目每一个步骤需要完成的任务，包括组织跨职能的工作；
- 培训：具有培训技能，为项目团队成员提供解决问题工具及技术应用的专门培训；
- 辅导：为组员提供一对一的支持，带领绿带队友快速有效地达到改进目标；
- 传递：在各种形式的培训、案例研究、工作座谈会和交流活动中，将六西格玛理念、工具方法传递给团队的其他成员；
- 发现：从内部或外部（例如：供应商和顾客等）发现新的改进机会，与资深黑带一起确定有价值的项目；
- 影响：拥有良好的人际关系和组织技巧，令团队始终保持高昂的士气与稳定的情绪；
- 沟通：包括与项目团队成员的沟通和项目完成后向最高管理层提供项目报告。

在六西格玛项目中，黑带组织、管理、激励、指导一支特定的六西格玛黑带项目团队开展工作，负责团队运作的启动、管理团队的进展，并最终使项目获得成功。在推行六西格玛管理的组织中，如果没有一些掌握六西格玛工具且不怕辛苦、具有优秀的管理和沟通能力的黑带，六西格玛黑带项目很难取得最佳效果。

除掌握一些六西格玛的专业知识外，作为一名黑带必须拥有以下多项软技能：

- 管理和领导能力。黑带必须能够运用权力和职责来指导项目的执行，要能够综合运用自己的管理能力和领导才能，并且能够熟练运用项目管理的方法和技巧。
- 决策制定。在六西格玛项目中，黑带可能要作多次决策。为制定可靠、及时的决策，黑带必须随时掌握和了解项目的各个方面，能够平衡成本、时间和效果。
- 沟通。将项目活动内容与结果及时与相关人员（团队成员、上层管理者、项目倡导者和组织的关键利益相关方等）沟通。
- 团队建设和谈判。黑带必须能够与不同的人建立持久的联系，如管理层、顾客、团队成员、项目倡导者及供应商等。一个优秀的黑带必须能够经常与上级领导沟通和谈判，获得领导对六西格玛项目的支持。
- 项目管理能力。与其他项目管理活动相同，六西格玛项目管理包括：目标建立、项目细化、绘制工作流程、任务调度、成本预算、协调团队、组员沟通等活动，黑带必须掌握项目管理能力，平衡项目规划和进度安排，这些是项目成功的关键。

标准分享网　www.bzfxw.com　免费下载

● 关注全局。一个成功的黑带要有系统的观念，从六西格玛项目整体推进角度处理各种复杂关系；对项目细节的过分专注，可能会失去对项目整体上的判断。

● 人际交往的能力。作为项目领导，黑带必须具有一定的人格魅力：诚实、有能力、可信赖、有包容心；与项目倡导者和组织的关键利益相关方建立良好的关系；将具有不同背景的人员组成一个统一的团队。

5. 绿带

绿带是黑带项目团队的成员或较小项目的团队负责人，他们接受的六西格玛技术培训与黑带类似，但内容所及层次略低。一些实施六西格玛的企业，很大比例的员工都接受过绿带培训，他们的作用是把六西格玛的概念和工具带到组织的日常活动中去。

在六西格玛管理中，绿带是人数最多也最基本的力量。他们的职责是：

● 提供相关过程的专业知识；
● 建立绿带项目团队，并与相关人员进行沟通；
● 促进团队观念转变；
● 把时间集中在项目上；
● 执行改进计划以降低成本；
● 与黑带讨论项目的执行情况及今后的项目；
● 保持高昂的士气。

当绿带作为项目团队负责人完成绿带项目时，也应具有黑带在项目团队负责人方面的职责、权限和技能。

6. 业务负责人

除了要选择培养好项目负责人——黑带之外，成功的六西格玛项目还需要相关业务部门负责人（过程管理者）的支持和配合，没有他们的协调和帮助，六西格玛项目很难取得丰硕的成果。业务负责人不需独立完成项目，他们在六西格玛管理中的职责是：

● 达成对六西格玛的共识；
● 协助选择黑带、绿带；
● 为黑带、绿带提供资源支持；
● 关注黑带、绿带的项目实施过程；
● 协调所管辖范围内的黑带、绿带项目，保持与业务方向的一致；
● 确保过程改进能够落实，保持改进成果。

六西格玛团队建设也是六西格玛组织工作的关键环节，具体内容详见第 2 章。

1.3.3 六西格玛管理的推进步骤

如图 1—9 所示，组织推行六西格玛一般可分四个阶段，即导入期、加速期、成长期和成熟期，可以用 4～5 年甚至更长的时间完成从导入期到成熟期的全过程。

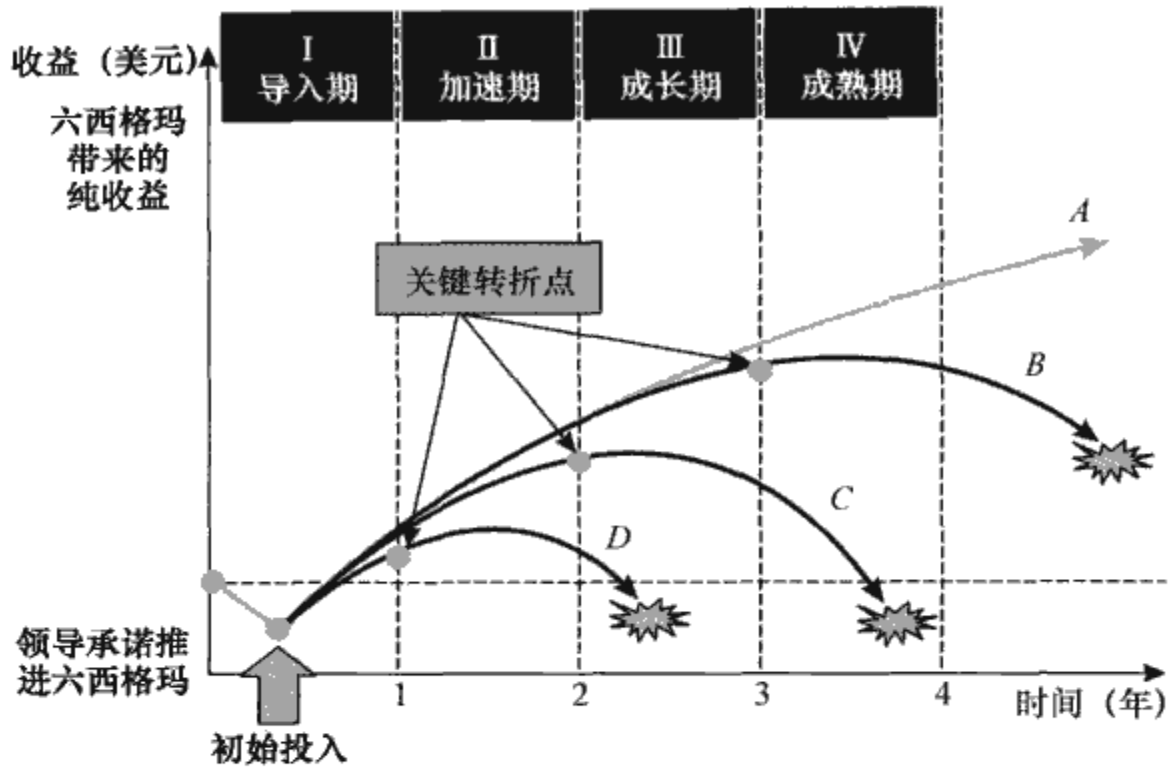


图 1—9 六西格玛管理的推进轨迹

资料来源：STRATEGIC SIX SIGMA Best Practices From The Executive Suite, Dick Smith and Jerry Blakeslee with Richard Koonce, Wiley, 2002。

在六西格玛推进的过程中，每一阶段都会遇到三类阻力：技术阻力（对方法的恐惧、技术力量的不足等）、管理阻力（部门间的沟通壁垒、激励机制和资源缺乏等）和文化阻力（观念上不认同、靠经验和感觉作决策、变革动力缺失等），当推进的动力难以抵御这三方面阻力的合力时，就会出现图 1—9 中所示的“关键转折点”。如果不能有效地增进动力、降低阻力，六西格玛管理就会在某一阶段“夭折”。而如果成功地越过这些转折点，六西格玛就能在组织内部深入、持久地开展下去，为组织创造越来越多的效益，创造越来越强劲的成功能力。

1. 导入期

导入期又可分为起步、培训与改进实践、坚持不懈与获得成功等步骤。

（1）起步。当组织决定要实施六西格玛时，会打破组织看似平静的现状。这时需要：

- 组织高层领导（首席执行官、总裁）支持六西格玛，是六西格玛的信仰者；
- 组织高层中的成员作为六西格玛倡导者，制定了实施六西格玛的规划和战略目标；
- 组织配备了必要的资源；
- 拟定首批项目和黑带或绿带学员，有了初期投入的财务预算。

（2）培训与改进实践。六西格玛管理的培训与项目实践是嵌套式的、融为一体的。一般是先培训第一批黑带学员，再由这些种子选手负责培训绿带、黄带，有的企业也可以先从培养绿带学员和选择绿带项目开始导入六西格玛。相关培训的内容和目的如表 1—3 所示，供参考。

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

表 1—3　　六西格玛管理培训

类别	内容	目的
高层领导	六西格玛理念	了解六西格玛的理念和作用，统一高层的思想
倡导者	六西格玛领导与推进、团队合作、项目选择	熟悉如何选择和确定六西格玛项目、如何推进六西格玛
黑带	系统的六西格玛课程	掌握实施六西格玛项目的方法和工具、技术
绿带	简版的六西格玛课程，包括各阶段常用工具和技术	熟悉实施六西格玛项目的常用方法和工具、技术
黄带	六西格玛基础知识和简单工具	了解六西格玛基础知识和简单工具
全体员工	六西格玛普及知识	了解六西格玛理念和基础知识

（3）坚持不懈与获得成功。六西格玛培训和项目工作是交叉并行的，在首批黑带培训或绿带培训完成后，也许有的项目已经完成，也会有一批项目正在进行中。在这一时段内，贵在持之以恒。只要坚持到底，就能够在年内收获一批成功的果实。只要初期投入不是太大，都能在年内收回所有投入并获得一定的回报。

当高层领导一时还未对六西格玛管理做出承诺，企业难以采用上述的全面导入方式时，可以采用局部驱动方式，即在一些部门、区域或产品上小范围推行，为将来的全面展开积累经验、做出示范，用其成果说服企业中的其他人。这种方式的特点是：容易起步，仅需要有限的管理层关注，所需投入的资源比较少，因此风险也较小，但是由于缺乏高层领导的有效支持，成功的概率不高。这种方式只是作为将六西格玛引入企业的一种切入方式，只有及时转向在全公司范围充分展开，六西格玛管理才能枝繁叶茂，硕果累累，并取得长期的成功。

2. 加速期

第一年导入期的成功之日，也正是新的转折之时。虽然经过第一轮项目工作，组织获得了初步的结果，也有了实施的热情和积极的参与者，一些冷眼旁观乃至反对的人也开始转变原有的观念。但这时是一个关键的转折点。如果没有下一步的正确部署，六西格玛就会是一个短期的流行而走向失败，而且一旦热情冷却，就犹如一盘“冷饭”，今后要再次“蒸热”的难度就会更大。在这一转折点上应当引入“加速实施过程”，使六西格玛从试验性实施向企业的一项长期管理活动过渡。

要实现这一转折，企业应当：

- 制定六西格玛财务预算、核算和审计办法，使财务人员介入六西格玛活动；
- 建立项目成果发布、分享、认可和奖励制度，激励六西格玛团队；
- 加大培训力度，形成六西格玛倡导者、资深黑带、黑带、绿带这一关键群体，以传递六西格玛领导力，促进六西格玛在公司的广泛实施；
- 建立六西格玛管理程序和制度，包括六西格玛组织结构，项目选择、立项、跟踪和总结的全过程管理程序。

3. 成长期

对一个导入了六西格玛管理并成功地实施了约两年工作后的组织，仍然会出现

六西格玛管理“断流”的趋势。多数实施六西格玛的组织都会遇到这样的困难，其中最重要的一个原因是经营环境总在不断变化，总有新技术、新方法和新政策等出现。为了获得持续发展，需要不断地将六西格玛工作拓展到组织的所有方面，包括用六西格玛促进新技术的应用，促进创新和新市场的开发。要成功地在这一点上实现转换，组织必须完善其支持基础。

- 完善六西格玛管理的组织结构，将其对六西格玛的管理职能充分展开，强化最高管理层对六西格玛管理的系统、定期评审，并使已关闭的项目持续产生效益；
- 拓展六西格玛的实施领域，如加大六西格玛管理方法在非制造领域的应用，用六西格玛设计促进创新和开发工作，将六西格玛管理沿供应链向供应商和顾客延伸等；
- 完善六西格玛培训体系，扩大培训范围，加大黑带、绿带占员工总数的比例；
- 使六西格玛管理与企业战略策划、部署和经营过程结合，强化六西格玛与顾客要求和市场发展趋势的结合。

4. 成熟期

最后一个转折也许是最困难的转折。将六西格玛融入企业，成为人们的一种工作和思维方式，确实是很难用时间表来预计其实现时间的。实际上，前面几个阶段的努力，都是在为这个阶段打基础。这个转折的关键是将六西格玛与组织其他管理活动有效地整合，进一步强化经营管理过程，建立完善的绩效改进体系，强化人们观念和行为方式的改变。要实现这一转折，公司应当：

- 使六西格玛价值观与公司的使命、愿景和核心价值观高度融合，强化人们观念和行为方式的改变；
- 将六西格玛与组织其他管理战略、管理体系和改进方法整合，建立高度整合的全面质量管理或卓越绩效管理体系，高度整合的持续改进、创新和知识分享体系；
- 使六西格玛成为日常工作的一部分。

1.4　六西格玛管理方法论

六西格玛作为解决问题的方法体系，自身也在不断地发展。根据问题对象的不同，可以分为六西格玛改进模式的方法体系和六西格玛设计模式的方法体系。需要指出的是，六西格玛的工具箱是开放式的，只要适用于六西格玛改进或设计的任何阶段的任何工具都可以融入六西格玛方法体系。但是限于本书篇幅，我们只介绍常用的六西格玛工具和技术。

1.4.1　六西格玛改进的模式——DMAIC

DMAIC 代表了六西格玛改进活动的五个阶段：

- 界定阶段（define）；
- 测量阶段（measure）；
- 分析阶段（analyze）；
- 改进阶段（improve）；
- 控制阶段（control）。

在六西格玛项目选定之后，团队成员一起合作，依照这个过程的五个步骤，可以有效地实现六西格玛突破性改进。团队工作从一个问题的陈述到执行解决方案，中间包括了许多活动，通过 DMAIC 流程的活动方式，团队成员可最有效地发挥作用，完成项目使命。

DMAIC 是一个逻辑严密的过程循环，它是在总结了全面质量管理几十年的发展及实践经验的基础上产生的，是由项目管理技术、统计分析技术、现代管理方法等方面综合而成的系统方法。DMAIC 的逻辑本质和 PDCA 循环是一致的。但是 DMAIC 提供了实现持续改进的技术路线和支撑工具。DMAIC 强调以顾客（外部和内部）为关注焦点，并将持续改进与顾客满意以及企业经营目标紧密地联系起来；它强调以数据的语言来描述产品或过程绩效，依据数据进行管理，并充分运用定量分析和统计思想；它追求的是打破旧有习惯、有真正变化的结果和带有创新的问题解决方案，以适应持续改进的需要；它强调面向过程，并通过减小过程的变异或缺陷实现降低风险、成本与缩短周期等目的。

1. DMAIC 流程活动

DMAIC 流程共分五个实施阶段，每个阶段的工作内容如下：

界定阶段：确认顾客的关键需求并识别需要改进的产品或流程，组成项目团队，制定项目计划，决定要进行测量、分析、改进和控制的关键质量特性（CTQ），确定项目所涉及的职能部门，将改进项目界定在合理的范围内。制定项目的目标，并估算达成目标后项目带来的预计收益。

测量阶段：通过对现有过程的测量和评估，基于顾客的关键需求、组织的战略目标或关键绩效衡量标准，识别影响过程输出（Y）的输入（X_S），并验证测量系统的有效性，分析过程的当前绩效水平，确定过程基准。

分析阶段：通过数据分析确定影响输出 Y 的关键 X_S，即确定过程的关键影响因素。

改进阶段：寻找最优改进方案，优化过程输出 Y，并消除或减小关键 X_S 对 Y 带来的波动，使过程的缺陷或变异降至最低。

控制阶段：对改进成果进行固化，通过修订文件等方法，使成功经验制度化，纳入现有的质量管理体系，通过有效的监测方法，维持过程改进的成果并寻求进一步提高改进效果的持续改进方法。

2. DMAIC 流程活动要点及其工具

各阶段使用的工具和技术如表 1—4 所示。

表 1—4　　DMAIC 流程活动要点及其工具和技术（供参考）

阶段	活动要点	常用工具和技术	
D（界定阶段）	明确问题 确定 Y（CTQ/CTP）	头脑风暴法 亲和图 树图 流程图 SIPOC 图 平衡计分卡	力场图 因果图 顾客需求分析 质量功能展开（QFD） 不良质量成本 项目管理
M（测量阶段）	确定基准 测量 Y，X_S	关系矩阵 树图 排列图 因果图 散点图 流程图 测量系统分析 故障模式与影响分析（FMEA）	不良质量成本 水平对比法 直方图 趋势图 检查表 抽样计划 价值流图 过程能力分析
A（分析阶段）	确定要因 确定 $Y=f(X)$	头脑风暴法 因果图 FMEA 水平对比（benchmarking） 方差分析 试验设计	抽样计划 假设检验 多变异分析 回归分析 过程分析 其他工业工程分析技术
I（改进阶段）	消除要因 优化 $Y=f(X)$	试验设计 响应曲面法 调优运算（EVOP）	FMEA 测量系统分析 精益改进技术
C（控制阶段）	保持成果 更新 $Y=f(X)$	控制图 统计过程控制 防差错措施	过程能力指数 标准操作程序（SOP） 过程文件控制

1.4.2　六西格玛设计的模式

DMAIC 流程对过程改进仍有局限性。众所周知，以实物产品为例，产品的质量、成本和周期都是由设计决定的。实践表明，至少 80%的产品质量是在早期设计阶段决定的，所以没有六西格玛设计，仅采用 DMAIC 流程来提高产品的质量，其成效是有限的。若想真正实现六西格玛的质量水准，就必须考虑六西格玛管理战略实施的另外一种途径——六西格玛设计（DFSS），DFSS 是一种实现无缺陷的产品和过程设计的方法。它基于并行工程和 DFX（design for x）的思想，面向组织系统或产品的全生命周期，采用系统的解决问题的方法，把关键顾客需求融入产品、过程设计中，从而确保产品的开发速度和质量，降低产品生命周期成本，为企业解决产品和过程设计问题提供有效的解决方法。

与六西格玛改进中的 DMAIC 流程一样，DFSS 也有自己的流程，但目前还没有统一的模式，迄今研究者已提出的 DFSS 流程有多种，如 DMADV 流程，即界定，测量，分析，设计，验证；DMADOV 流程，在 DMADV 流程的基础上增加了优化环节；IDDOV 流程，即识别、界定、开发、优化和验证；还有 DCCDI 流程，

指的是界定，识别顾客需求，概念设计，产品和过程设计，实现；DMEDI 流程，指的是界定，测量，调查，开发，实现；此外还有其他的六西格玛设计流程，如 DMCDOV，DOCV，DMADIC，RCI 等，虽然这些流程的表述不同，但内容大同小异，本书就不逐一介绍了。

下面重点以 DMADOV 流程为例简单介绍六西格玛设计的概要，表 1—5 给出了 DMADOV 各阶段的活动要点和常用的六西格玛设计相关的工具和技术。

表 1—5　　DMADOV 流程活动要点及其工具和技术（供参考）

阶段	活动要点	常用工具和技术（不含与产品/过程设计相关的专业技术）	
D（界定阶段）	界定设计的产品或过程	顾客需求分析 市场调查 问题/目标陈述 亲和图 KANO 分析 质量功能展开（QFD）	系统 FMEA 设计 FMEA 水平对比 项目管理 可行性分析
M（测量阶段）	识别和确定与产品/过程设计相关的基准和测量项	关系矩阵 树图 排列图 因果图 散点图 流程图 测量系统分析 FMEA	不良质量成本 水平对比 直方图 趋势图 检查表 抽样计划 价值流图 过程能力分析
A（分析阶段）	确定影响产品/过程关键特性的因素和影响关系	头脑风暴法 因果图 FMEA 水平对比 方差分析 试验设计	抽样计划 假设检验 多变异分析 回归分析 过程分析 其他工业工程分析技术
D（设计阶段）	设计新的产品/过程	TRIZ 公理化设计 反向工程	模拟技术 创造性思维工具 其他设计技术
O（优化阶段）	优化设计参数	试验设计 响应曲面模型 稳健性设计技术	田口方法 其他优化技术
V（验证阶段）	验证产品/过程设计方案的有效性	模拟技术 过程能力分析 假设检验 试验验证	

IDDOV 流程是由美国的质量管理专家乔杜里（S. Chowdhury）提出的，即识别（identify），界定（define），开发（develop），优化（optimize），验证（verify）。

（1）识别阶段：DFSS 在识别阶段的主要任务是收集和确定待开发产品的顾客需求，并论证即将开展的 DFSS 项目的可行性。DFSS 的特点之一在于在产品设计

之初就充分考虑顾客的需求，聆听顾客的声音，利用一些评价工具对顾客需求进行识别和优先级排序，以保证设计出的产品满足客户的需要。在此基础上系统地考虑外部环境、市场和企业内部满足此项目开发所需的资源等，如市场上的竞争对手的产品状况，企业的工艺水平、人员情况、开发费用等，以确定项目的可行性。这一阶段对整个 DFSS 项目是非常重要的，所谓差之毫厘，谬以千里。若此阶段不能充分收集和分析顾客的需求，客观评价项目的可行性，将给项目带来致命的打击。此阶段的成果一般包括：顾客的需求分析报告、项目的成本分析及可行性报告、产品的功能要求等资料。

（2）界定阶段：界定阶段是 DFSS 实施的核心过程，此阶段的任务是进一步细化展开“顾客的声音”（voice of customer，VOC），并将海量的、具有模糊和不确定性甚至矛盾的 VOC 利用一些模糊信息处理技术转化为准确 VOC，再通过质量功能展开将 VOC 逐层展开为设计要求、工艺要求、生产要求，并提炼出顾客的关键需求，准确地识别、量化顾客需求和期望并针对需求和期望进行产品设计，最后生成产品的设计方案和工艺要求说明书。

（3）开发阶段：在 DFSS 的开发阶段，所做的工作是对新产品进行详细的局部设计，在前期工作给定的解决方案框架以及关键质量特性（critical to quality，CTQ）和关键过程特性（critical to process，CTP）尺度之内进行新产品的设计。即可以把设计过程看作满足一定功能约束与设计约束的优化过程。本阶段结束后应完成样品的设计，并为采购、生产和售后服务提供一定的参考标准供后阶段讨论，如原材料和产品的验收准则，规定安全和正常使用所必需的产品特性以及初步的售后质保体系等。

（4）优化阶段：此阶段是对产品和过程设计参数的优化，其目标是在质量、成本和交付时间允许的基础上达到企业利益的最大化。首先，设计应该是稳健的，在 DFSS 中强调预防和稳健性；其次，设计应尽量消除产品或服务故障的潜在可能，通过故障模式与影响分析（failure mode and effects analysis，FMEA）来分析潜在的故障模式和功能变异性，从而在设计阶段就尽量减少产品和过程故障的可能。此阶段结束后应有详细的产品生产流程图，并对生产的各环节有相应的生产要求标准，有完善的售后质保体系。

（5）验证阶段：DFSS 验证阶段的任务是对产品设计是否满足顾客要求、是否达到期望的质量水平的确认过程。通过试生产等手段营造一个仿真的生产环境，测试设计的能力、稳健性和可靠性。最后提交设计的验证报告和 DFSS 项目的总报告。

以上是 DFSS 实施阶段的简要介绍，需要说明的是虽然 DFSS 有固定的流程可以遵循，但在实施的过程中也不可拘泥于流程或工具的运用，而要从 DFSS 的本质去把握其精髓，根据产品和流程的差异有选择地应用 DFSS 中的工具。此外，在产品设计的过程中还必须考虑并行的产品和过程设计，利用并行工程的思想并行设计产品和过程，每个阶段的工作都要充分考虑其后续阶段，在相邻的阶段之间需要有一定的交叉。有关 DFSS 的支撑工具将在第 7 章详细阐述。

1.5 精益六西格玛

精益生产（lean production）源于日本丰田汽车公司所创造的丰田生产方式，是继单件小批量和福特大批量流水线生产方式之后诞生的生产方式。它的基本理念是在产品设计、制造、销售以及零部件库存等各个环节消除一切不必要的浪费。它提出的准时化（just in time）和自働化（Jidoka）等思想改变了日本企业的经营方式，极大地促进了日本制造业的飞速发展，被称为“改变世界的机器”。

1.5.1 精益生产的产生及发展

精益生产起源于日本丰田汽车公司的丰田生产方式。第二次世界大战后，日本重新开始发展汽车，战后的日本经济萧条，缺少资金和外汇。怎样建立日本的汽车工业？是照搬美国的大量生产方式，还是按照日本的国情，另谋出路？丰田选择了后者，以大野耐一为代表的丰田人进行了一系列的探索和实验，根据日本的国情，经过 30 多年的努力，终于形成了完整的丰田生产方式，并使日本的汽车工业赶上并超过了美国。

为揭开日本汽车工业成功之谜，1985 年美国麻省理工学院制定了一个名为“国际汽车计划”的研究项目，组织 53 名专家、学者，历时 5 年对 14 个国家的近 90 个汽车制造厂进行了实际考察，并对西方的大量生产方式与日本的丰田生产方式进行分析对比，最后作为研究结果，于 1990 年出版了《改变世界的机器》一书，第一次把丰田生产方式称为 lean production，即精益生产方式。“lean”原意是“瘦”，因为与大量生产方式相比，该生产方式的一切投人都大为减少。精益生产概念的出现在世界范围内掀起了一股研究先进制造模式的浪潮。

20 世纪 90 年代美国进行了一系列针对精益生产的研究和实践。其中包括美国军方 1993 年出台的美国国防制造企业战略、精益航空计划（Lean Aerospace Initiative）等政府指令性的活动。除了汽车行业还有更多的美国企业，如波音、洛克希德马丁、普惠等投人到实施精益生产的实践中来。在这个过程中，日本人提供了基本的思考方法，用出色的实践证明了精益生产的强大生命力；实际应用和研究表明，精益思想反映了在现代竞争条件下企业对多品种、小批量、高质量、快交货、低成本要求下制造管理模式的先进理念，尽管它源于日本，但实际上反映的是几十年来人们对现代制造所面临的新环境所作的管理变革。精益制造在世界范围的广泛应用，则证明了精益思想在世界上的普遍意义，并升华为新一代的生产哲理。1996 年詹姆斯·沃迈克（James Womack）和丹尼尔·琼斯（Daniel Jones）所著的《精益思想》（Lean Thinking）一书问世，成为精益生产方式的里程碑。

在《精益思想》一书出版前后，精益思想跨出了它的诞生地——制造业，作为一种普遍的管理哲理在各个行业传播和应用，先后出现了精益建筑（lean construction）、精益服务（lean services）、精益物流（lean logistics）、精益医疗（lean healthcare）、精益编程（lean programming）和精益政府（lean government）等概

念，精益思想的应用取得了飞跃性的发展。

近年来，我国有越来越多的企业正在实施或准备实施精益生产，尤其是我国企业在面临消耗过大、资源短缺的情形下，精益思想日益得到社会的认可和接受。严格来讲，精益与六西格玛管理都是旨在实现持续改进的活动，都强调顾客满意和系统集成。六西格玛的出发点是减少变异，精益生产的核心是消除一切不必要的浪费，消除变异的过程本身也消除浪费。两者目标的一致性、工具的互补性、管理模式上的相互借鉴和补充使得精益和六西格玛的结合成为必然。

1.5.2　精益生产的核心理念

1. 以消除浪费为核心思想

精益生产和浪费（Muda）直接对立。浪费包括很多类型，如闲置的库存、不必要的工序、不必要的运输、超过需求的生产、人员的不必要动作、各种等待等，所有这些日常生产中很少为人们所注意但却大量存在的活动（在很多制造流程中甚至超过了 90%），不仅不能为企业创造价值，反而增加了成本，都是精益生产反对和致力消除的。从企业获取订单到生产过程，再到最后的销售，消除浪费的思想贯穿始终。

沃迈克和琼斯把企业内部的浪费分为两种：(1) 生产中不创造价值，但在现有技术与生产条件下不可避免的作业内容，称为Ⅰ型 Muda，如必要的在线检验、物料运输等。(2) 不创造价值且可以立即去掉的作业内容，称为Ⅱ型 Muda，如不必要的等待、多余的动作、不必要的审批等。精益生产审查生产特定产品的所有活动，首先努力消除Ⅱ型 Muda，降低成本，然后使产品在整个流程中流动起来。通过连续流动，进一步消灭Ⅰ型 Muda，优化流程，并且流动越快，所暴露出的浪费会越多，越有利于精简流程和降低成本。

2. 暴露问题，解决问题

精益生产也是一个企业实现业务流程持续改进的过程，与六西格玛实现持续改进类似，这个过程也需要发现企业在流程中存在的问题。在发现问题方面，精益思想特别强调暴露问题，找到引起该问题的根本原因，然后才能彻底地解决问题。如在很多企业里，过多的库存非常普遍，究其原因，可能是由于供应商供货不及时或时间不确定、机器需要较长时间的换模或换线、某台设备机器经常出故障等，为了保证整个生产表面上看起来顺畅，企业不得不增加大量的库存以备不测，即使采用统计分析或经济批量模型求得最佳的批量从而控制库存，也是治标不治本。从精益思想的角度看，库存是万恶之源，不仅是库存占用了资金和消耗的库存管理成本，更重要的是，库存掩盖了这些问题，从而使得这些问题成为企业的顽疾。因此，精益生产要求尽量减少库存，只有这样才能暴露出这些问题，然后调动团队，确定改进项目，找到根本原因，解决问题，保持持续改进。

1.5.3　精益思想的五项基本原则

沃迈克和琼斯在《精益思想》中，将由丰田开创的精益生产方式总结为五个基

本原则，成为所有踏上精益道路的组织不厌其烦地理解和实行的基本原则。这些原则如下。

1. 正确地确定价值

● 精益生产中经常使用“价值”的概念，这里的价值是从顾客的角度定义的，有价值的活动是能为顾客增加效用、顾客承认它的必要性并愿意为其付款的活动。正确地确定价值就是以顾客的观点来确定企业从设计到生产到交付的全部过程，实现顾客需求的最大满足。

● 以顾客的观点确定价值还必须将生产全过程的多余消耗减至最少，不将额外的花销转嫁给顾客。

● 精益价值观将生产方、顾客和供应商的利益统一起来，而不是过去那种对立的观点。

● 从以客户为中心的价值观来审视企业的产品设计、制造过程、服务项目就会发现有太多的浪费，从不满足客户需求到过多的功能和多余的非增值消耗。当然，消灭这些浪费的直接受益者既包括顾客也包括生产方。

2. 识别价值流

价值流是指从原材料转变为成品并给它赋予价值的全部活动。这些活动包括：从概念设计到产品设计、工艺设计，再到投产的技术过程，从订单处理、计划到送货的信息过程和从原材料到产品的物质转换过程，以及产品全生命周期的支持和服务过程。精益思想识别价值流的含义是在价值流中找到哪些是真正增值的活动、哪些是可以立即去掉的不增值活动。精益思想将所有业务过程中消耗了资源而不增值的活动叫做浪费。识别价值流就是发现浪费和消灭浪费。识别价值流的方法是“价值流图分析”（value stream map analysis）——首先按产品族为单位画出当前的价值流图，再从顾客的观点分析每一个活动的必要性。价值流图分析成为实施精益思想最重要的工具。

价值流并不是从自己组织的内部开始的，多数价值流都向前延伸到供应商，向后延伸到向客户交付的活动。按照最终用户的观点全面地考察价值流、寻求全过程的整体最佳。

3. 流动

如果说正确地确定价值是精益思想的基本观点、识别价值流是精益思想的准备和入门的话，“流动”（flow）和“拉动”（pull）则是精益思想实现价值的中坚。精益思想要求创造价值的各个活动（步骤）流动起来，强调的是不间断的“流动”。“价值流”本身的含义就是“动”的，但是由于根深蒂固的传统观念和做法，如部门的分工（部门间交接和转移时的等待）、大批量生产（机床旁边等待的在制品）等阻断了本应动起来的价值流。精益将所有的停滞作为企业的浪费，号召“所有的人都必须和部门化的、批量生产的思想作斗争”，用持续改进、准时化、单件流（one-piece flow）等方法在任何批量生产条件下创造价值的连续流动。

当然，使价值流流动起来，必须具备必要的环境条件。这些条件是：

● 过失、废品和返工都会造成过程的中断、回流。实现连续的流动要求每个过程和每个产品都是正确的。

● 环境、设备的完好性是流动的保证。3P（production，preparation，process）、5S、全面生产性维护（total productive maintenance，TPM）都是价值流动的前提条件。

● 系统地进行流程设计和能力规划，避免瓶颈造成的阻塞。

4. 拉动

“拉动”就是按客户的需求投入和产出，使用户精确地在他们需要的时间得到需要的东西。实行拉动以后，用户或制造环节的下游就如在超市可从货架上取到他们所需要的东西，而不是把用户不太想要的产品强行推给用户。拉动原则由于将生产和需求直接对应，消除了过早、过量的投入，从而减少了大量的库存和现场在制品，大量压缩了提前期。拉动原则更深远的意义在于企业具备了当用户一旦需要，就能立即进行设计、计划和制造出用户真正需要的产品的能力，最后实现抛开预测，直接按用户的实际需要进行生产。

实现拉动的方法是实行准时生产和顺畅生产。当然，准时生产和顺畅生产的实现最好采用单元布置，对原有的制造流程进行改造。应用实践表明，流动和拉动一般可以使产品开发时间减少 50%，订货周期缩短 75%，生产周期缩短 90%。

5. 尽善尽美

奇迹的出现是上述四个原则相互作用的结果。改进的结果必然是价值流动速度显著加快。这样就必须不断地用价值流图分析方法找出更隐藏的浪费，做进一步的改进。这样的良性循环成为趋于尽善尽美（perfection）的过程。近来沃迈克又反复地阐述了精益制造的目标：“通过尽善尽美的价值创造过程（包括设计、制造和对产品或服务整个生命周期的支持）为用户提供尽善尽美的价值。”

“尽善尽美”是难以达到的，但持续的对尽善尽美的追求，将造就一个永远充满活力、不断进步的企业。

1.5.4　精益生产的技术体系概述

企业追求精益的过程实质上就是一个持续改进的过程，而且是一个长期的过程，一场没有终点的比赛。改善过程需要综合应用现场管理、设施布置与优化、人因工程、作业研究、质量控制与保证、流程管理与控制、现代制造技术等一系列方法与工具，因此精益生产是一个包含了多种制造技术和管理技术的综合技术体系。实际上，精益生产就是工业工程技术在企业中的具体应用。图 1—10 表示了精益生产的体系构造，同时也表明了该体系的目标以及实现目标的各种技术、手段和方法及其相互间的关系。

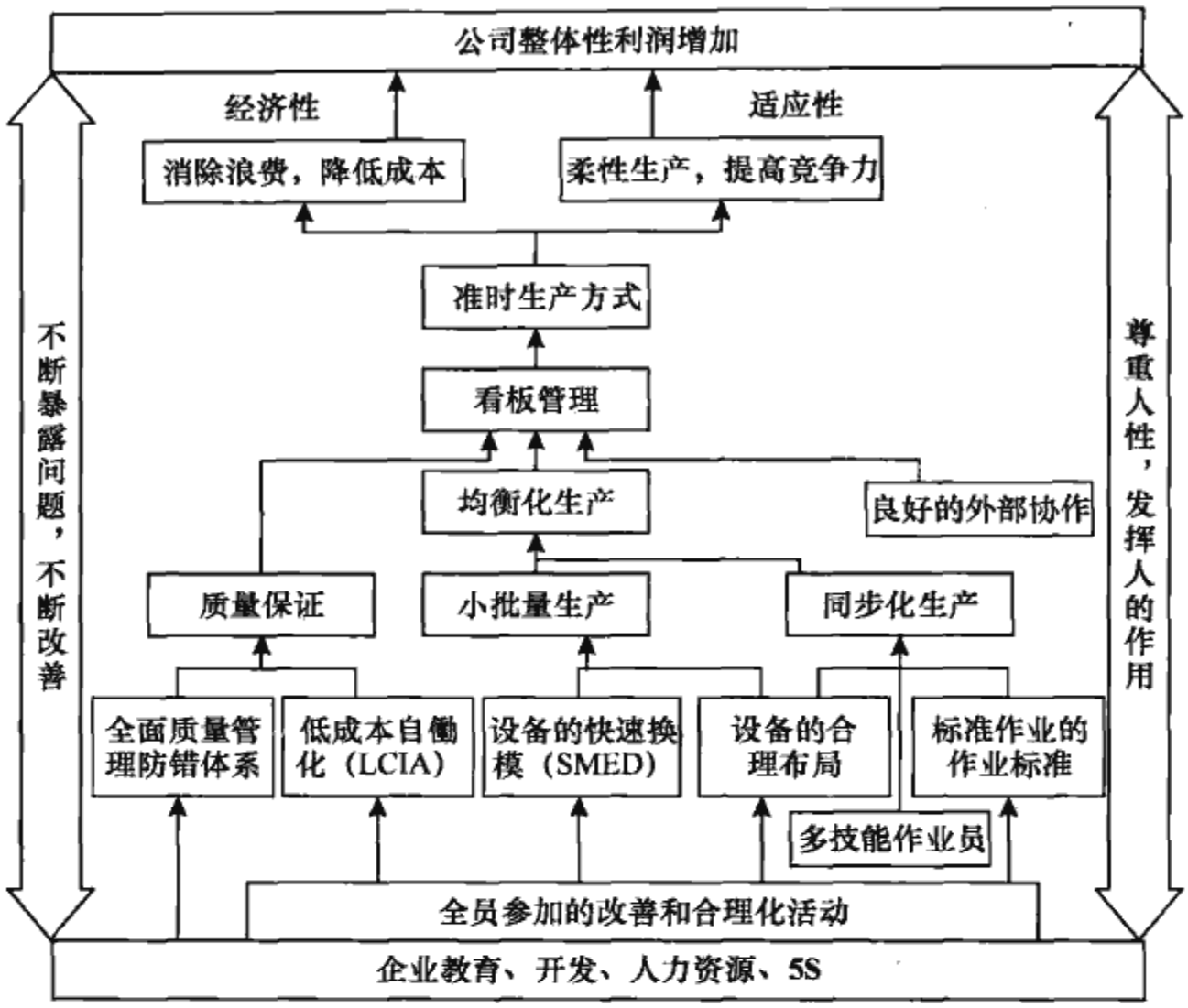


图 1—10　精益生产体系

要实现“消除浪费、增加利润”这一基本目标，就必须彻底杜绝过量生产以及由此而产生的在制品过量和人员过剩等各种直接浪费和间接浪费。如果生产系统能够具有足够的柔性，能够适应市场需求的不断变化，即实行准时生产，在必要的时刻生产必要数量的必要产品或零部件，创造出能够灵活地适应市场需求变化的生产系统，这种生产系统就能够从经济性和适应性两个方面保证公司整体性利润的不断增加。此外，这种生产系统具有一种内在的动态自我完善机制，即在准时生产的激发下，通过不断地缩小加工批量和减少在制品储备，使生产系统中的问题不断地暴露出来，使生产系统本身得到不断的完善，从而保证精益生产的顺利进行。

1.5.5　精益生产与六西格玛的融合

精益生产与六西格玛之间虽然起源不同，解决问题的方法也有一定的差异，但是从核心理念上，两者都强调基于顾客满意的持续改进，表 1—6 给出了两种方法的比较。

表 1—6　　六西格玛管理与精益生产的比较

名称	精益生产	六西格玛管理
假定	(1) 消除浪费可以改善绩效 (2) 大量的小改进更有利于组织成长	(1) 问题总是存在 (2) 测量是重要的 (3) 随着变异减少，系统产出得到改进
文化基础	东方以人为本的文化和管理思想	西方制度、工具化的文化和管理思想

续前表

名称	精益生产	六西格玛管理
直接目标	(1) 消除一切浪费，降低成本 (2) 缩短流程周期，增强响应能力 (3) 多品种小批量生产，增加柔性	(1) 消除变异，优化流程 (2) 提高质量，增加价值
关注焦点	价值流	问题
工具方法	5S 管理、准时生产、快速换模、Poka-Voke、看板、并行工程、视觉控制、自働化、平顺化、TPM、约束理论、持续改进、DFM/A(面向可制造性/可装配性设计)、价值工程和标准化作业等	分层法、散点图、排列图、因果图、关联图、系统图、亲和图、矩阵图、矩阵数据分析法、过程决策程序图、SIPOC 图、QFD、FMEA、DOE、SPC、水平对比、测量系统分析、方差分析、响应曲面方法和平衡计分卡等
实施步骤	(1) 正确地确定价值 (2) 识别价值流 (3) 流动 (4) 拉动 (5) 尽善尽美	(1) 界定 (2) 测量 (3) 分析 (4) 改进 (5) 控制
共同点	(1) 关注顾客满意，顾客驱动 (2) 关注财务成果 (3) 注重持续的系统整体改进 (4) 重视改变思想观念和行为方式（精益要求把“部门”和“成批排队”思想转换成“团队”和“连续流动”概念） (5) 全员参与，团队相互合作与协调 (6) 管理层的大力支持与参与 (7) 注重人、系统和技术集成	
特点	(1) 工具软性，但很有效 (2) 注重柔性，灵活性，迅速机动 (3) 强调节流	(1) 工具精良，功能强大 (2) 注重系统性、规范化 (3) 强调开源与节流
实施方式	自下而上推动	自上而下推动
主要效果	(1) 减少一切浪费（库存，缺陷等） (2) 优化流程，缩短交货期 (3) 提高生产率 (4) 降低成本，改善资本投入	(1) 减少变异，统一产出 (2) 消除缺陷，改进质量 (3) 增加顾客价值，提高利润 (4) 顾客满意与忠诚
优势	(1) 持续的全面创新和变革 (2) 强调连续流动和拉动 (3) 与相关利益主体全面合作关系 (4) 整体优化，追求尽善尽美 (5) 见效快	(1) 应用大量统计工具，精确界定问题 (2) 流程彻底改进和设计 (3) 追求完美和精益求精（持续改进）
不足	(1) 过多依赖经验管理，缺乏定量分析 (2) 对波动处理不力，难以“精益” (3) 疏于人才培训和系统方法整合 (4) 急功近利，出现“非精益化”反弹	(1) 缺乏流程增值性分析 (2) 过程强调量化与统计工具
精益六西格玛优势	通过持续快速改进，消除浪费与缺陷，低成本地快速满足顾客需求，获得竞争优势	

通过对六西格玛管理与精益生产的优势与不足的分析，可以看出，二者具有很强的互补性。六西格玛管理是解决问题的方法论，有一个非常好的解决问题的框

架。它以数据分析为基础，旨在通过消除过程变异、持续改进获得近乎完美的质量，进而获得顾客完全满意和顾客忠诚；六西格玛关注于质量和价值，其核心目的是增加价值，满足顾客。精益方法是一种消除浪费、优化流程、准时生产的方法。它可把任何地方作为改善起点，其最终目的是用尽善尽美的流程为顾客创造尽善尽美的价值。精益关注于成本和速度，其核心是降低成本、提高效率。如果能够把精益生产和六西格玛方法进行整合，就可以同时获得二者的优势，而摒弃它们的不足。

精益六西格玛，是精益生产与六西格玛管理的有机融合。作为一种先进管理模式，精益六西格玛不仅能通过六西格玛管理大幅度提升产品质量，增加顾客价值，同时能利用精益生产减少资本投人、提高效率和市场响应能力。实际上，目前许多组织在推进六西格玛的过程中已经将精益的一些思想和工具应用于六西格玛项目，不管名称是六西格玛还是精益六西格玛，精益和六西格玛的结合都是组织六西格玛管理应用于组织系统的业务流程改进的必然。企业中需要将精益和六西格玛的结合解决的项目很多，如：

- 减少原材料和零部件采购成本；
- 减少备品备件采购成本；
- 缩短新产品开发周期；
- 缩短产品线换型时间；
- 减少在制品占用；
- 提高设备利用率；
- 改善设备布局；
- 改善生产系统的物流。

另外需要指出，服务业在推进六西格玛的过程中，也特别注意引入精益的思想和方法，读者不难看出，与六西格玛一样，精益的思想在服务业也是大有作为的。

为了实现六西格玛与精益生产的有机融合，本书将精益工具融入六西格玛改进的 DMAIC 的各个阶段，有助于绿带读者在 DMAIC 的技术路线下，根据项目的需要，集成采用精益六西格玛工具解决问题。



本章小结

本章介绍了六西格玛管理的起源和发展，理解六西格玛的概念和作用，掌握六西格玛管理的实施方法，包括六西格玛管理的领导、文化和战略，六西格玛核心理念和价值观，六西格玛管理的组织和推进，以及六西格玛改进和设计模式，精益与六西格玛的整合等。组织实施六西格玛管理或精益六西格玛的实质是为了建立持续改进的业务模型，获得和保持持续的竞争优势。因此，六西格玛或精益六西格玛的实施要从企业的战略层面进行规划和部署，其中一个关键问题就是要让组织的高层领导真正了解六西格玛的核心内涵，这正是本章的初衷。

σ 第2章

六西格玛项目管理

实施六西格玛是一项复杂的系统工程，其实施成功的关键是对六西格玛项目的管理，而不是具体的六西格玛方法和技术。企业从战略角度出发选择改进机会并确定改进项目，保证六西格玛项目能够取得突破性改进。六西格玛项目要能够解决组织流程中的关键问题，要有跨职能的组织方式，要有可量化的预期成果，项目本身要有一定的复杂度，项目执行过程中要进行定期评审。由于六西格玛项目的选择对于六西格玛具有重要影响，项目选择要有管理层的参与。

2.1 改进机会确定

改进机会的识别和确定是六西格玛项目实施中非常关键的内容，也是界定阶段非常重要的工作。确定顾客的关键要求，是六西格玛项目工作中重要的一步。整个项目工作是在这个步骤的基础上展开的。因此，在六西格玛项目工作的界定阶段，需要特别关注这一点。顾客只有在其需求得到充分理解并获得满足后，才会满意和忠诚。如何准确地定义顾客的需求及其要求，是黑带、绿带及其团队的职责。当顾客的需求被正确理解并被恰当地转换为过程输出的关键质量特性（CTQ）时，项目才具备展开的基础。

2.1.1 顾客需求分析

过程输出的接受者是顾客。提高顾客满意度和降低经营成本是六西格玛管理所追求的目标，要提高顾客满意度首先应真正了解顾客要求，并且要真正把握顾客的关键要求，除顾客明示的要求外，还包括顾客的潜在要求。而且，企业要运用质量功能展开等工具把顾客的关键要求进行多层次演绎分析，转化为产品的技术特性、

设计要求等。这是目前世界先进企业的通用做法，也是六西格玛管理中最困难的一步，需要从以下几方面去实践。

1. 顾客的识别

顾客是指“接受产品的组织或个人”（ISO9000 定义），这是一个广义的定义，除了传统意义上的顾客外，过程输出（产品）的接受者还包括社区、股东、员工等其他利益相关方。

按照产品或服务的接受者的情况，顾客可以分为外部顾客和内部顾客两类。

（1）外部顾客：是指组织外部接受产品或服务的组织或个人，如消费者、最终使用者、委托人、零售商等。

（2）内部顾客：是指组织内部依次接受产品或服务的人员或部门。通常描述为过程输出的内部接受者。如在产品生产流水线上的装配工中，下道工序的操作者是上道工序的顾客，以此类推。

按照接受产品和服务的方式，顾客可以分为中间顾客和最终顾客两类。

（1）中间顾客：经销商、分销商或其他渠道伙伴。

（2）最终顾客：组织产品或服务的使用者。

按照接受产品和服务的时间顺序，可分为过去顾客、当前顾客和潜在顾客三类。

（1）过去顾客：已接受过组织产品或服务的顾客。

（2）当前顾客：正在接受组织产品或服务的顾客。

（3）潜在顾客：尚未接受过组织产品或服务，但有购买期望的顾客群或者是竞争者的顾客。

按照顾客层次、业务量、市场区域、产品特征等，顾客还可进行细分，如大、中、小型顾客，关键顾客和一般顾客，等等。

顾客要求是指顾客“明示的、通常隐含的或必须履行的需求和期望”（ISO9000 定义），是一种特定的要求，由明示的或者是不言而喻的惯例及一般做法所考虑的顾客需求或期望组成，其潜在的、动态变化的特点使得顾客要求越来越复杂而且多变。

细分顾客的根本目的在于：针对不同顾客群体采用不同的方法，倾听和了解不同顾客群的具体、差异化的要求，建立与之相适应的顾客关系，增进顾客满意和顾客忠诚。

对于一个六西格玛项目而言，项目产品的接受者也就是项目的顾客。

首先，应当识别特定项目的顾客，包括内部顾客和外部顾客，并根据项目实际和顾客要求的差异程度进行进一步的细分，从中确定出关键的细分顾客群。

其次，分析在该项目中各种顾客的需求是什么，有哪些影响因素，哪些是关键需求，如何将顾客的需求转化为项目目标，等等。

2. 顾客满意与顾客忠诚

顾客满意是指“顾客对其要求已被满足的程度的感受”（ISO9000 定义）。顾客

抱怨是一种满意程度低的最常见表达方式，但顾客不抱怨并不一定表明顾客满意。即使达到顾客规定的要求，也不一定确保顾客满意。

顾客满意的程度取决于顾客的价值观和期望值（认知质量）与所接受的产品或服务状况的比较。顾客的价值观决定了顾客的期望值，而组织提供的产品或服务（过程的输出）形成对顾客的感知效果（感知质量），两者对比的符合程度确定了顾客是否满意。

由于顾客满意是顾客通过对一个产品（或一项服务）的可感知的效果（感知质量）与他的期望（认知质量）相比较后所形成的感觉状态，因此，满意水平是感知的效果和期望值之间的差异函数。顾客可以经历三种不同感觉状态中的一种。如果效果低于期望，期望得不到满足，则顾客不满意；如果可感知效果与期望相匹配，期望得到满足，顾客就满意；如果可感知效果超过期望，顾客就会惊喜，超出期望，直至产生忠诚，如图 2—1 所示。

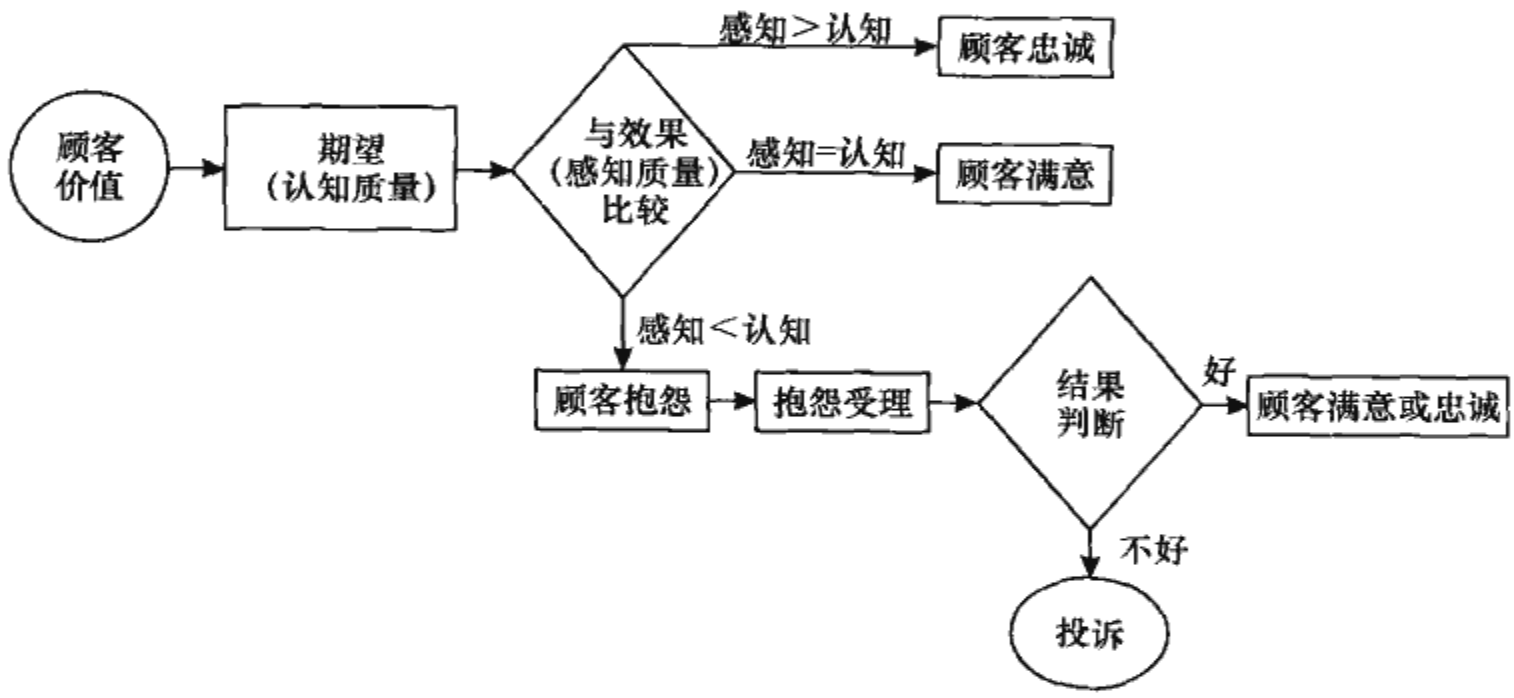


图 2—1　顾客满意示意图

一般来说，顾客的要求是变化的，这反映了产品的质量特性也会随着变化，组织不仅要考虑顾客当前的要求，还应考虑顾客未来的要求，以适应顾客不断变化的要求。顾客的要求必须包括明示的、通常隐含的或必须履行的三个方面，由于顾客是根据感受来理解产品或服务质量，因此很难提出准确的、量化的需求指标，需要组织主动了解顾客的期望，确定其真正的需求，以定义自己的产品或服务质量。

顾客忠诚是指顾客在对某一产品或服务的满意度不断提高的基础上，重复购买该产品或服务，以及积极向他人推荐该产品或服务的表现。忠诚的顾客对组织及其产品或服务有明显的情感倾向性，能承受组织有限的涨价和抵制竞争者的降价或倾销价。

市场营销调查研究表明，保留现有顾客的成本比赢得新顾客的成本要低得多（1 比 6）。顾客忠诚的程度越高，意味着销售成本越低、营业收入和利润越高，也就意味着能够给组织带来更好的财务绩效。提高顾客忠诚度对组织的稳定和发展有着重要的意义，主要体现于：

（1）忠诚顾客重复购买和推荐购买，能够带来更多的营业收入和利润。

（2）忠诚顾客能够更积极地参与企业的产品、服务和管理的改进，或提出建议。

（3）忠诚顾客会主动宣传企业的品牌和形象，有利于市场的拓展。

（4）借助于忠诚顾客的影响，有助于企业化解不满意顾客的投诉或抱怨。

3. 顾客数据的收集

要真正把握顾客要求，首先要建立顾客反馈系统，倾听和了解“顾客的声音”。这是了解顾客要求的关键一步，必须给予充分的重视。应注意“顾客的声音”中的“顾客”是一个广义的概念。除了产品使用者和潜在使用者，必要时还应包括分销商、产品维修人员等在产品生命周期内关系密切的外部及内部的组织和人员。对于大型复杂产品的开发，“顾客的声音”将来自更多的方面。另外，环境法规、安全标准等国家和行业的法令、法规和标准、规范，由于构成了产品开发的约束条件，也应列入顾客要求的范畴。从企业长远的利益考虑，还必须深入地分析研究和考虑顾客的潜在需求和产品的更新换代规划、企业的发展方向和发展战略等。

可以从不同的顾客那里收集反馈的数据和信息，包括：当前感到满意的顾客，当前感到不满意的顾客（包括那些抱怨和没有抱怨的顾客），流失的顾客，竞争对手的顾客，潜在的顾客，等等。用于收集“顾客的声音”的方法包括：

（1）顾客调查：通过调查表、顾客代表座谈会等形式了解和归纳顾客对未来产品的要求。

（2）顾客抱怨和投诉的处理：积极主动地收集顾客的抱怨和投诉，通过及时有效的处理，增进顾客满意和忠诚，改进产品、服务和管理，并了解顾客的真实要求。

（3）同类产品质量跟踪和售后服务信息分析：了解现有产品中令顾客满意或抱怨的质量特性，将其转化为以顾客要求的形式表述。

（4）政策法规约束分析：将有关的政策法规、环保要求等纳入顾客要求或作为产品开发的约束条件。

（5）战略展开：分析公司的战略和策略在产品开发中的贯彻方式，提炼出必要的顾客要求。

（6）产品发展现状与趋势分析：通过媒体及专业杂志等途径收集信息，进行分析处理，从全局上把握产品发展方向。

4. 顾客数据的分析

收集顾客数据只是第一步，还需要分析顾客数据。“顾客的声音”提供了原始的顾客需求，应加以规范化，进行分解、归并、筛选，并进行确认和分级，通过调查分析，确定各顾客要求的重要度。对顾客要求的表述是有一定要求的，这些要求是：

（1）用语简洁，无歧义。

（2）一项顾客需求只表达一个特定的意思。

（3）不把对应的工程技术解决方案纳入顾客需求。

（4）便于工程人员理解。

（5）同一级别的顾客需求彼此独立，内容无覆盖及交叉。

为便于工程人员理解，应对用语进行规范化处理，使工程人员可据此提出相应的解决方案。

为了建立顾客需求间的层次关系，亲和图法（详见本章2.6节）是有效的方法。应用亲和图法对顾客需求进行整理的步骤如下：

（1）把每项顾客需求分别填在一张小纸条上，去掉内容重复的纸条，再把所有纸条排列起来。

（2）把内容相近的纸条聚为一堆，起一个可以概括其内容的名字，作为高一级的顾客需求，写在另外的纸条上。

（3）将新写的纸条按内容相近程度聚堆、命名，作为更高一级的顾客要求，并写在另外的纸条上。

（4）如有必要，继续上一过程，直到顾客需求被系统而分层次地组织起来。

对于复杂一些的产品，为了深入细致地分析顾客对产品的要求，可能需要建立多级顾客需求，将它们填入需求质量展开表中（见表2—1）。

表2—1　　某无线电远距操纵装置的需求质量展开表

1次	2次
1. 操作方便	1.1　携带方便
	1.2　操作中不感觉疲劳
	1.3　对操作易于理解
	1.4　能轻松愉快地操作
	1.5　能处理复杂问题
⋮	⋮
5. 安全	5.1　无误动作
⋮	⋮

对收集、整理的顾客数据，可采用图表方法、统计方法、定性工具来分析和理解其中包含的顾客需求。

5. 关键顾客要求的转化

许多情况下，需要在顾客调查的基础上，对顾客需求进一步展开，以便将其转化为具体可测量的要求，并细化到团队可以把握的层次，便于项目工作的开展。图2—2所展示的是某服务过程顾客要求的树图展开，它是顾客需求展开的一个例子。

采用树图展开顾客需求的一个好处是为设计调查顾客满意度问卷提供框架，而且基于问卷结果的分析，可以发现哪些方面是急需改进的项目。

6. 顾客需求分类与KANO模型

获得顾客需求之后，根据KANO模型对顾客需求进行分类。KANO模型的目的是通过对顾客的不同需求进行区分处理，帮助组织找出提高顾客满意度的切入点。

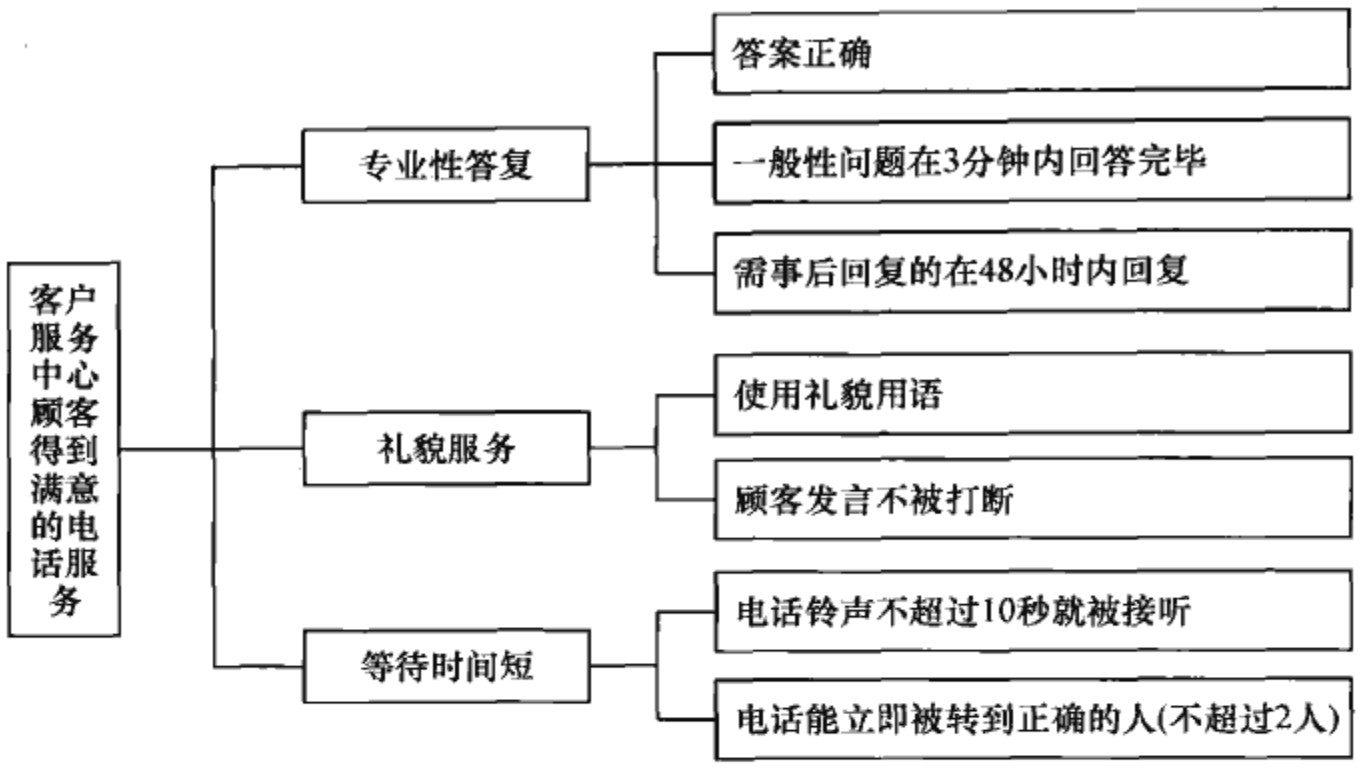


图 2—2　顾客要求的树图展开

模型中定义了三个层次的顾客需求：基本型需求、期望型需求和兴奋型需求，如图 2—3 所示。

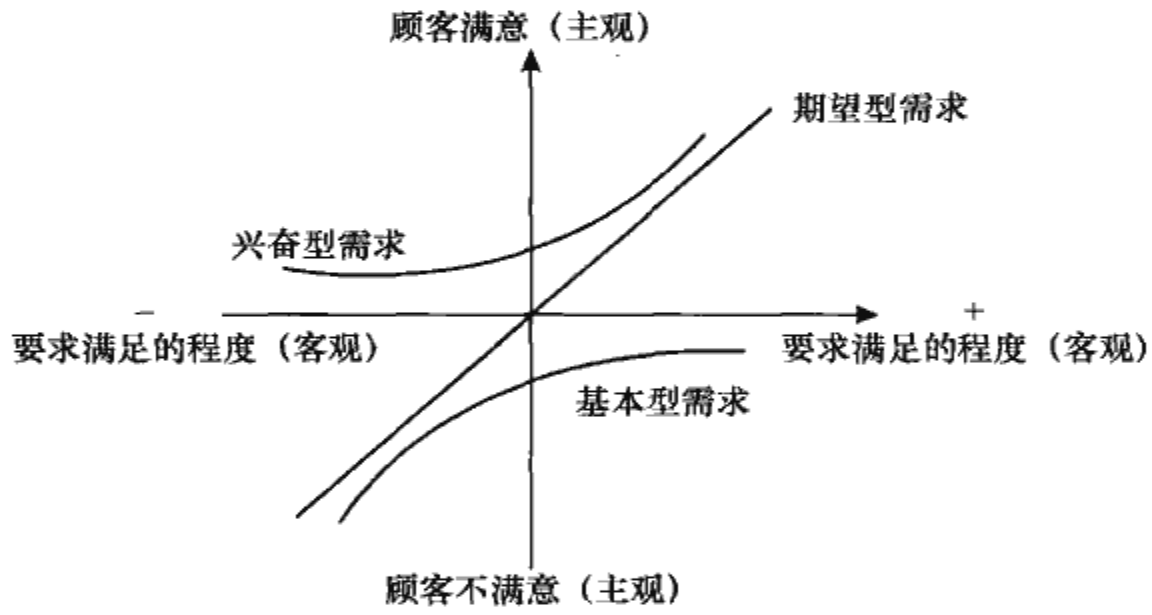


图 2—3　KANO 模型

基本型需求是顾客认为产品“必须有”的属性或功能。当其特性不充足（不满足顾客需求）时，顾客很不满意；当其特性充足（满足顾客需求）时，无所谓满意不满意，顾客充其量是没有抱怨。

期望型需求要求提供的产品或服务比较优秀，但并不是“必需”的产品属性或服务行为，有些期望型需求连顾客都不太清楚，但是他们希望得到的。在市场调查中，顾客谈论的通常是期望型需求，期望型需求在产品中实现得越多，顾客就越满意；当没有满足这些需求时，顾客就不满意。

兴奋型需求要求提供给顾客一些完全出乎意料的产品属性或服务行为，使顾客产生惊喜。当其特性不充足时，并且是无关紧要的特性，则顾客无所谓；当产品提供了这类需求中的服务时，顾客就会对产品非常满意，从而提高顾客的忠诚度。

KANO 模型是一个典型的定性分析模型，一般不直接用来测量顾客的满意度，

它常用于对绩效指标进行分类，帮助组织了解不同层次的顾客需求，找出顾客和组织的接触点，识别使顾客满意的至关重要的因素。

2.1.2　水平对比

水平对比就是人们通常说的标杆管理（benchmarking），是一个利用量化标准寻找行业内部或外部同类活动的最佳实践的探索活动，即将过程、产品和服务质量同公认的处于领先地位的过程、产品和服务质量进行比较，从而认清目标，并据此指引自己的改进以达到最佳绩效水平的系统化过程。

当今，技术和商业竞争已经十分激烈，没有组织能够以孤立、浪费成本的方式运作还能够获得利润。客户需要的是反应及时，高效率、高质量的产品和服务。行业内的竞争使得组织只有做到最好，才能长久生存与发展。事实已经证明，水平对比法的作用是寻找最佳水平，并与企业实际对照，找出差距，促进质量改进，使组织在竞争中立于不败之地，甚至成为同行之冠。水平对比是一种非常有效的提升企业竞争力的方法。施乐公司率先在美国运用水平对比，分析、学习和借鉴日本企业复印机的生产效率，大幅度地提升其绩效。在实施六西格玛的过程中，许多组织通过水平对比，发现自身存在的改进机会，为六西格玛项目确定方向。

水平对比已经超越了单纯竞争的含义，其目的不仅在于显示竞争地位本身，“比”完还得“学”，更重要的是去发现、探索最佳绩效背后的最佳实践，用以借鉴和学习，为重大的、“突破性”的改进和创新以及战略环境分析提供支持，最终实现“赶”和“超”的目的。应用水平对比可以获得以下益处：

（1）通过与先进企业的对比，明确改进机会。
（2）利用外部资源确立有效的行动目标。
（3）引入最好的行为方式。
（4）建立正确的绩效测量方法。
（5）激励和激发团队。
（6）减少变革的障碍。
（7）使组织变得更具竞争力。
（8）使组织可以更好地满足最终顾客的需求。

水平对比的一般模型和步骤如图 2—4 和图 2—5 所示。

我们	
1. 对比什么？	2. 我们是如何做的？
3. 谁是最好的？	4. 他们是如何做的？
他们	

图 2—4　水平对比的一般模型

应用水平对比可以帮助团队选出适当的六西格玛项目。六西格玛项目主要来源于企业的发展战略、顾客的需求、内部流程中存在的问题、竞争对手的比较等方面，因此，需要在行业内外以及组织内部进行水平对比，找出突出的问题，确立改进方向和具体的六西格玛项目。也可以运用水平对比帮助团队确定六西格玛项目的

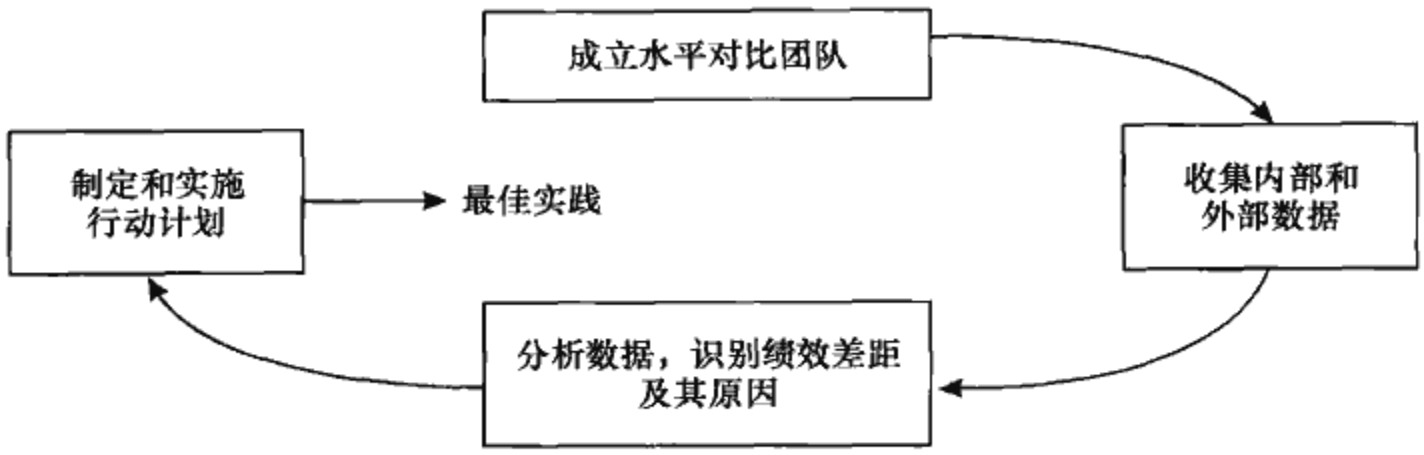


图 2—5　水平对比的一般步骤

目标。比如：帮助团队识别本项目目前可量化的绩效水平与本组织内部不同业务区域之间的差异，与业界的最佳水平之间的差异，并且基于上述分析确定六西格玛项目目标应定在什么水平上。

2.1.3　平衡计分卡与改进机会选择

平衡计分卡（参见本书第 1 章）是战略部署的典型方法。在六西格玛项目选择中应用平衡计分卡，四个维度中的每一个维度指标都可以作为项目选择的大方向，这就保证了六西格玛项目与组织的当期目标及未来的发展相一致。四个维度中较弱的维度指标应作为项目选择的大方向，这样就保证了企业的平衡发展。但需要注意的是，在确定项目具体指标时需考虑四个维度的平衡，避免一种指标的改进可能导致另外一种指标产生不良。

2.1.4　根据关键绩效指标确定改进机会

关键绩效指标（key performance indicator，KPI）是指衡量组织战略实施效果的关键指标。它是用于衡量工作人员工作绩效表现的量化指标，是绩效计划的重要组成部分。关键绩效指标是针对对组织目标起到增值作用的工作而设定的指标，基于关键绩效指标确定组织改进机会，可以保证真正对组织有益处的工作得到改善。

组织的绩效指标较多，而根据帕累托原则，20%的组织关键行为能产出 80%的组织经营效果，并不是所有的绩效指标都能对组织的战略形成支持。因此，我们往往需要从众多绩效指标中，提取出符合组织自身发展需要的关键绩效指标。通过关键绩效指标体现出的组织实际战略实施中的弱项，确定组织的改进机会。

2.2　过程绩效指标

过程绩效即过程输出的绩效，用来度量过程绩效的数据包括离散型数据（也称为计数值数据或属性值数据）和连续型数据（也称为计量值数据）。

2.2.1　离散型数据度量指标

六西格玛管理中的过程绩效离散型度量指标有很多，这里介绍几种常用的指

标：单位缺陷数、机会缺陷率和百万机会缺陷数等计点值指标；过程最终合格率、一次合格率、流通合格率等计件值指标。

这里，先介绍以下一些基本概念。

单位（unit）：过程加工过的对象，或传递给顾客的一个产品及一次服务。

缺陷（defect）：产品（或服务）没有满足顾客的要求或规格标准。

缺陷机会：单位产品上可能出现缺陷的位置或机会（缺陷机会与缺陷的度量应保持一致）。在确定缺陷机会数时一般可以分三步：列出可能出现缺陷类型的清单；判定哪一种缺陷是顾客特别关心的、真实发生的缺陷；用其他标准来复核产生缺陷机会的数目。

1. 单位缺陷数

单位缺陷数（defects per unit，DPU）是单位产品上平均的缺陷个数。它由以下公式计算：

$$DPU=\frac{\text{检测发现的缺陷数}}{\text{抽取的单位产品数}}$$

例 2—1　抽取 100 块电路板，检查出 5 个缺陷，则

$$DPU=\frac{5}{100}=0.05$$

2. 机会缺陷率

机会缺陷率（defects per opportunity，DPO）是每次机会中出现缺陷的比率，表示了样本中缺陷数占全部机会数的比例。它由下式计算：

$$DPO=\frac{\text{缺陷数}}{\text{产品数}\times\text{单位产品的平均缺陷机会数}}$$

例 2—2　假定这 100 块电路板中，每一个电路板都含有 100 个缺陷机会，若在制造这 100 个电路板时共发现 21 个缺陷，则

$$DPO=\frac{21}{100\times100}=0.002\,1=0.21\%$$

3. 百万机会缺陷数

DPO 常以百万机会的缺陷数表示，百万机会缺陷数（defects per million opportunities，DPMO）即 $DPMO=DPO\times10^6$。

例 2—3　例 2—2 中，0.002 1 *DPO* 即为 2 100 *DPMO*。

例 2—4　某物料清单（BOM）可能会发生四种错误，即四个机会，它们分别是：有多余项目；缺少项目；项目选错；参数写错。则

$$DPMO=\frac{\text{总的缺陷数}\times10^6}{4\times\text{BOM 的总数}}$$

假如在 1 376 张物料清单上发现 41 个缺陷，则其

$$DPMO=\frac{41}{1\,376\times4}\times10^6=7\,449$$

即每百万个机会中有 7 449 个缺陷。

4. 过程最终合格率

过程最终合格率（process final yield，PFY），通常是指通过检验的最终合格单位数占过程全部投产单位数的比率。但是，此种质量评价方法不能计算该过程的输出在通过最终检验前发生的返工、返修的损失。这里我们把返工等叫做“隐蔽工厂”（hidden factory）。隐蔽工厂不仅出现在制造过程，同时也出现在服务过程。

5. 一次合格率

一次合格率（first time yield，FTY）是指第一次就把事情做对，由没有经返工、返修便通过的过程输出单位数而计算出的合格率。

当缺陷以随机方式出现时，可以认为单位产品的缺陷服从泊松分布。则单位产品出现 d 个缺陷的概率是：

$$P\{X=d\}=\frac{(DPU)^d e^{-DPU}}{d!}$$

当 $x=0$ 时，即一次合格率，$FTY=e^{-DPU}$。

DPU 和一次合格率的关系可以写成：

$$DPU=-\ln FTY$$

例 2—5 按例 2—1 中的数据计算得到：

$$DPU=\frac{5}{100}=0.05$$

$$FTY=e^{-DPU}=e^{-0.05}=0.951$$

6. 流通合格率

对于一个串行生产过程，假定各过程彼此独立，则其流通合格率（rolled throughput yield，RTY）为每个子过程的 FTY 的乘积，表明由这些子过程串联构成的大过程的一次合格率。

$$RTY=FTY_1\times FTY_2\times\cdots\times FTY_n$$

式中，FTY_i 是各子过程的一次合格率；n 是子过程的个数。

例 2—6 某产品的生产过程有三道工序：首先是下料，一次合格率为 95.5%；其次是车削，一次合格率 97%；最后是钻孔，一次合格率为 94.4%。请计算该过程的流通合格率。

$$RTY=FTY_1\times FTY_2\times\cdots\times FTY_n=FTY_1\times FTY_2\times FTY_3$$
$$=95.5\%\times97\%\times94.4\%=87.4\%$$

流通合格率就是一种能够找出隐蔽工厂的“地点和数量”的测量方法。

最终合格率与流通合格率的区别是，*RTY* 充分考虑了过程中子过程的存在，即隐蔽工厂的因素。若过程有 n 个子过程，而子过程的合格率分别为 y_1，y_2，…，$y_n(i=1, \cdots, n)$，则 $RTY = y_1 y_2 \cdots y_n = \prod_{i=1}^{n} y_i$，这样，就充分考虑了过程中各子过程的因素，比较客观地反映了过程运作的实际。而最终合格率没有考虑过程的返修，因而掩盖了隐蔽工厂，从而掩盖了质量问题。但是在实际生产过程中，不少企业计算的合格率是最终合格率，并没有统计流通合格率，这是需要改进的地方。

例 2—7　某生产过程投产 1 000 单位产品，包含 5 个子过程，每个子过程都有独立的合格率（y_i）（$i=1, \cdots, 5$），分别计算 *PFY* 和 *RTY*（见图 2—6）。

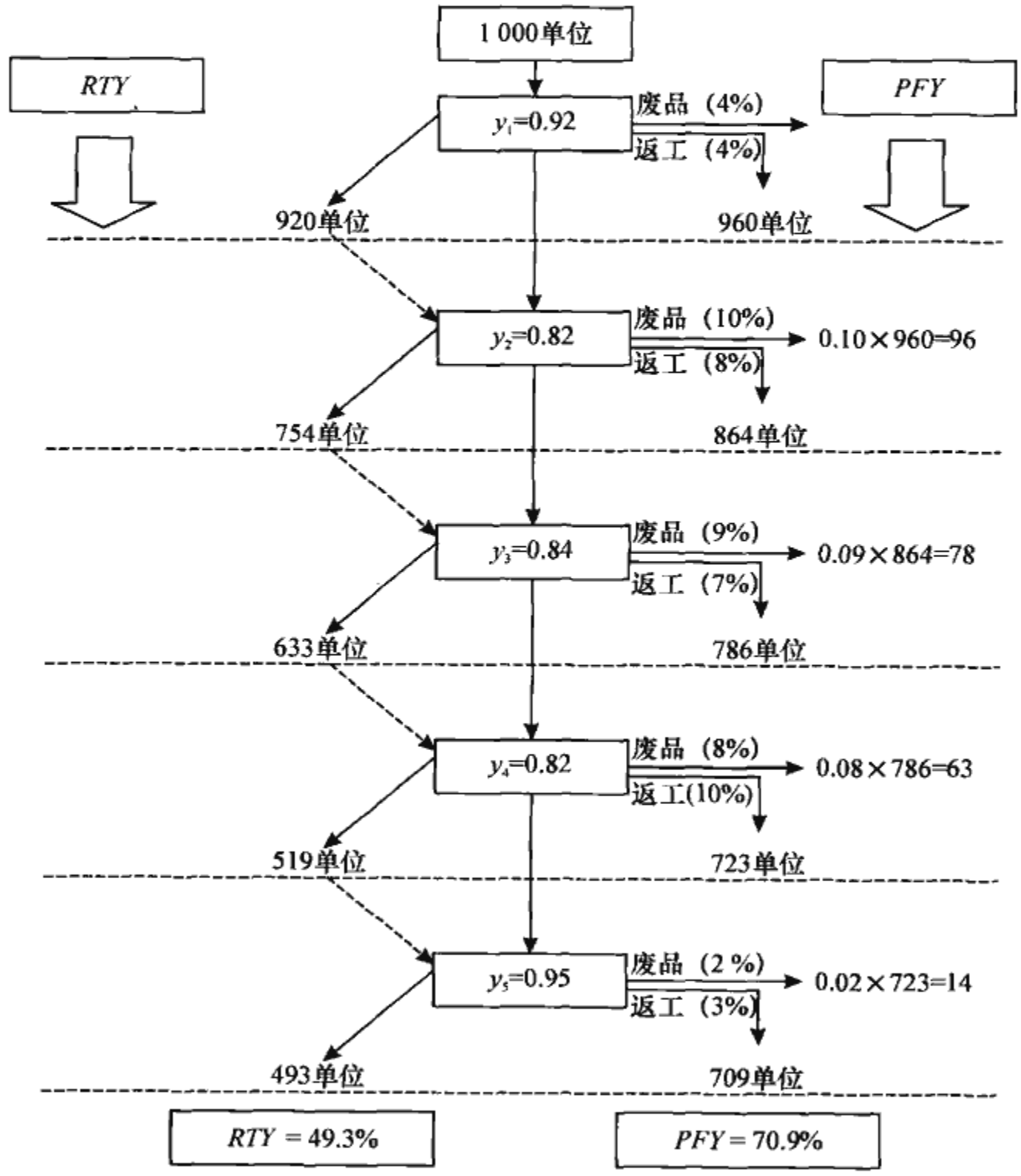


图 2—6　过程最终合格率（*PFY*）和流通合格率（*RTY*）计算实例

本例中 *RTY* 也可以这样计算：

$$RTY = y_1 y_2 y_3 y_4 y_5 = 0.92 \times 0.82 \times 0.84 \times 0.82 \times 0.95$$
$$= 0.493 = 49.3\%$$

在图 2—6 中的左边，我们发现通过每一个子过程的单位数自 1 000 逐渐递减至 920，754，633，519，直至 493。当 1 000 单位投入第一个子过程时，只有 920 单位一次合格。在图 2—6 的右边，我们可以看到另外 80 单位的去向：40 单位成为废品，40 单位需要返工并重新回到生产循环。在第一个子过程中，共 920 单位一次合格而直接进入第二个子过程，其一次合格率为 82%，得到 754 个一次合格的在制品……如此继续运作，直到完成所有五个子过程，得到 493 个全过程均不需返工的合格品，其流通合格率（*RTY*）为 49.3%。

图 2—6 的右边则说明如何计算 *PFY*。经过第一个子过程，原 1 000 个投入单位减少为 960 单位，因为其中 40 单位成为废品无法返工。可返工的 40 单位合格后（为简化起见，我们假定所有返工的产品都能通过检验），投入第二个子过程继续加工，这样第一子过程的 *PFY* 为 96%。类推至第五个子过程，过程最终合格率降为 70.9%。

本例中，两种方法计算的合格率分别为 70.9%与 49.3%。企业的会计制度通常未能显示返工损失，返工部分往往被一般企业所忽略。

这里需要指出的是，在实际生产过程中，还存在子过程的并联。如果要计算一个混联的过程流通合格率，则需要先计算并联过程的一次合格率，然后视其为一个子过程 *FTY*，采用上述方法计算过程总的 *RTY*。并联过程一次合格率的计算包括：

（1）如果是组成产品的 n 个零部件的并联生产过程，且各零部件的生产相互独立，则并联过程的一次合格率也是各个零件一次合格率的乘积；

（2）如果是相同产品在不同生产线的并联生产过程，则并联过程的一次合格率为各机台一次合格率按产量加权平均，或直接用总的一次合格品数除以总的投产数。

2.2.2 连续型数据度量指标

六西格玛管理中常用的过程绩效连续型度量指标有：过程输出（产品）关键特性的过程能力指数（C_p，C_{pk}）、过程绩效指数（P_p，P_{pk}），参见本书第 4 章中的过程能力分析。

2.3 六西格玛项目选择

六西格玛管理是通过有组织、有计划地实施六西格玛项目而实现其经济效益的，同时也是通过六西格玛项目的实施来促进人们观念和行为方式转变的。因此，六西格玛项目实施是六西格玛管理的组成要素。六西格玛项目遵循了项目管理的一般原则，同时，六西格玛项目实施又有其特定的要求和管理特点。

2.3.1　六西格玛项目选择原则

六西格玛项目指由职责明确的团队通过运用六西格玛方法（DMAIC 或 DFSS），在规定时间内，寻找最佳方案并实现预定目标的特定过程。一般来说，六西格玛项目的选择遵从以下原则。

1. 选出的六西格玛项目要有意义、有价值

六西格玛项目的意义和价值体现在以下几个方面：

（1）六西格玛项目要支持顾客满意的改善。以顾客为中心是六西格玛价值观之一。六西格玛有两个基本点：一是产品或服务让顾客满意直至忠诚；二是减少缺陷直至彻底消除缺陷。因此，所解决的问题必须来自对顾客需求、顾客反馈等信息的分析，找出顾客真正关心的问题，在此基础上确定关键质量特性。

（2）六西格玛项目要支持企业战略目标的实现。六西格玛管理是企业实现战略目标的有效手段，每一个六西格玛项目都应支持企业战略的实现。也就是说，通过六西格玛项目为企业架设实现未来战略目标的桥梁，促进企业战略目标的实现。

（3）六西格玛项目目标要有挑战性。一般来说，六西格玛项目都要使缺陷显著减少，只有这样，才能实现过程绩效的突破性改进。

（4）六西格玛项目要强调过程的改进。聚焦于过程改进也是六西格玛价值观之一，六西格玛是通过应用过程方法来实现过程绩效突破性改进的。

（5）六西格玛项目要为企业带来较大的经济效益。六西格玛管理要用财务的语言阐述现状水平和改进后的绩效，用财务指标将绩效转化成财务效益。

2. 选出的六西格玛项目要可管理

每个六西格玛项目都应是可管理的，也就是说，六西格玛项目欲解决的问题应清晰且可测量。六西格玛改进不仅关注产品质量，而且关注缩短制造或服务周期、改善服务或交付的响应时间、提高生产能力、提高产品开发过程能力、提高效率、降低不良质量成本等。无论对哪种问题，都必须先定义“缺陷”，换句话说，就是先定义评判“好”、“坏”的标准及其测量方法，然后才能评估欲解决问题的现状水平。

六西格玛项目的范围应清晰可控。每个项目都要有一个明确的要解决的问题，每个问题的范围应界定清楚，并且适当，一般来说项目应在 4～6 个月内完成。但在许多情况下，一个问题的解决会涉及多个方面，比如：缩短产品的交付时间可能会涉及制造过程的质量，也会涉及原材料采购周期、产品运输周期、运输质量等一系列问题，这时可分解成几个小项目，在相对小的可控范围内解决，便于管理。

六西格玛项目应得到管理层的支持和批准。项目必须得到管理层的支持和批准，才能获得适当的资源（人、财、物等）支持。

2.3.2 六西格玛项目选择流程

六西格玛项目选择流程，也就是通过分析确定六西格玛项目的过程。一般来说，六西格玛项目选择流程遵循以下步骤（见图 2—7）：

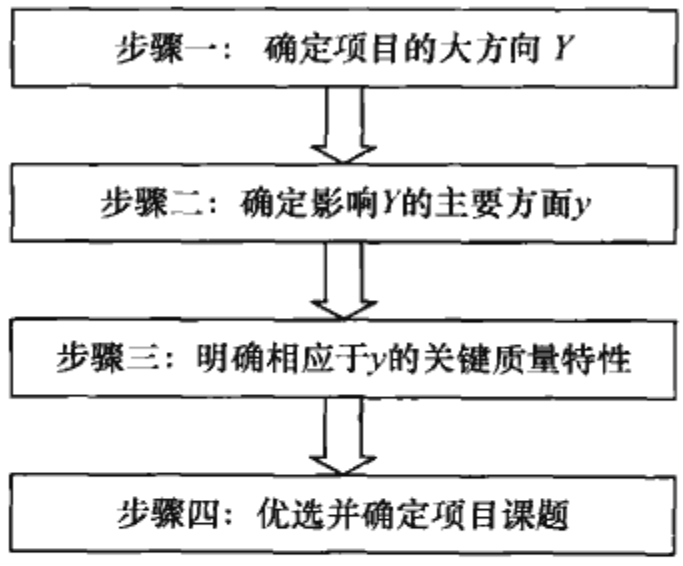


图 2—7 六西格玛项目选择流程

步骤一：确定项目的大方向 Y。确定项目的大方向是非常重要的步骤，一般来说，可从以下几个方面选择项目的大方向：

（1）战略实施的关键点。

（2）企业经营目标及重点。

（3）顾客关注或投诉的热点。

（4）困扰企业质量、成本、周期的难点。

（5）财务效益的增长点。

（6）与竞争对手比较的薄弱点。

项目的 Y 一般表现为公司级的指标，如企业的顾客满意度低、生产效率低等，为了进一步明确问题，应对影响 Y 的方面进行分解。

步骤二：将 Y 分解为若干 y，如 y_1，y_2，…，y_n，并确定本项目针对哪个方面进行改进。在确定了项目的大方向 Y 后，基于 Y 是综合因素的反映以及涉及的方面较广等原因，一般难以针对 Y 直接进行改进。为此，需要分析影响 Y 的主要方面，通过逐层分解，确定要改进的主要方面 y。根据范围及影响度的不同，一般 y 需跨部门解决的，则可定义为黑带（BB）项目；在部门内或一定可控范围内可以解决的，往往可作为绿带（GB）项目；对于范围可控、难度较小的不需要高级统计工具来分析解决的项目（用老七种工具或新七种工具等即能分析解决的问题），可定义为一般项目，通过现场改进小组等方式实施。例如，造成顾客满意度低的一个主要原因是返修品的处理周期太长，因此返修品的处理时间就是一个 y，而对返修品的处理涉及市场部、质量部、技术部、制造部和车间，问题的解决需要一个跨职能的团队。

步骤三：针对选定的需要改进的 y，明确顾客关注的关键质量特性（CTQ）。在选定了项目 y 以后，有时还不能直接确定 y 为改进项目。因为前面已经说过，六西格玛的价值观之一是以顾客为中心，因此需要针对 y 去倾听“顾客的声音”，调

查并了解顾客对 y 的需要，从而确定顾客最关心的 CTQ。对于返修品处理周期长的问题，顾客关注的 CTQ 包括顾客从把需要返修的产品交付给企业到接到问题处理结果为止的时间，以及问题解决率、对顾客损失的赔付等。

步骤四：根据 CTQ 确定项目课题。通过前面三个步骤，已经明确了项目的改进点 y 和在改进点 y 顾客最关心或最关注的是什么特性，在此基础上最终确定项目课题。

在确定项目课题时通常要考虑以下问题：

（1）优选项目。如果有很多 CTQ 都需要改进，而且改进资源有限，则应根据组织的战略发展需要和改进项目给组织带来的绩效，选择优先改进的机会。

（2）确定项目。确定项目的方式有两种：一是直接将顾客的 CTQ 确定为改善项目，例如将缩短返修品处理时间作为改进项目；二是通过矩阵图，找出影响顾客 CTQ 的相关流程，确定一个或几个流程的改善为改进项目。

（3）进行完整的问题陈述。言简意赅地定义问题并使之量化。

（4）确定项目课题名称。

（5）描述项目目标，做到 SMART，即具体的（specific）、可测的（measurable）、可行的（attainable）、相关的（relevant）（与欲解决问题是一致的）、有时间限制的（time bound）。关于 SMART 的详细介绍参见第 3 章 3.4 节。

2.3.3　六西格玛项目选择需注意的问题

在六西格玛项目选择过程中，应注意避免下述常见问题或错误：

（1）项目欲解决的问题与企业发展重点或关键顾客需求等没有联系，因此体现不出项目价值，无法得到管理层的支持和承诺，此类问题不适合选为六西格玛项目。

（2）项目改进内容不是针对顾客的 CTQ，项目实施后看不到对 Y 的改善，不见成效，此类问题也不适合选为六西格玛项目。

（3）没有针对 Y 进行分析、分解，直接将 Y 作为改进项目，造成因素太多，项目太大，抓不住重点，项目难以达成目标，应该将 Y 分解成若干个具体的六西格玛项目。

（4）欲解决的问题原因已经明确，行动措施已经初步确定，此种问题应该立即采取行动，而不需要再选作六西格玛项目，避免走过场，搞形式主义。

（5）项目衡量指标不明确或项目目标没有挑战性，此类问题浪费资源、无意义，不适合选为六西格玛项目。

（6）项目难度太大，超出项目团队的能力或授权，不适合选为六西格玛项目。

（7）项目改进空间太小，预期收益太低，企业得不到适当的回报，此类问题也不适合选为六西格玛项目。

总的来说，好的开始是成功的一半，选择好的项目是企业六西格玛管理成功的关键。初次导入六西格玛管理的企业在考虑选择什么项目时，可能不是那么顺利，会占用一些时间，甚至会有一些反复的过程，然而，这却是六西格玛管理活动中必不可少的一项重要工作，多花一些时间也很必要。

2.4 六西格玛项目团队建设

2.4.1 团队的组建和授权

六西格玛项目是在黑带/绿带带领下，由项目团队实施完成的。团队的作用是非常重要和不可替代的。

六西格玛团队通常由以下人员组成并授权承担下述职责：

(1) 团队领导/组长，由黑带或绿带担任，对整个项目负责。

(2) 核心成员，是团队领导/组长选择来实施项目计划的人员，全程参与项目。

(3) 扩展成员，即根据项目的需要，只需部分参与项目的成员，如团队中财务核算人员、供应商代表、个别的技术专家等。

(4) 业务负责人，是项目所在部门的负责人和过程的管理者，具体职责参见本书第 1 章 1.3 节。

(5) 倡导者，有时也直接参与团队活动，具体职责参见本书第 1 章 1.3 节。

(6) 项目指导人或教练，是为团队成员提供六西格玛方法、工具指导的人员，一般由资深黑带或咨询顾问担任。

为了使团队领导/组长履行好其职责，保证项目的顺利开展，在项目启动前，需要做好相应的准备工作，表 2—2 和表 2—3 列出了可供团队领导/组长参考的准备工作的注意事项和活动建议。

表 2—2　　团队领导/组长核查表：六西格玛项目团队首次会议前准备工作

☐ 与业务负责人及倡导者一起起草项目立项表。
☐ 如需要，挑选小组成员。
☐ 联系并欢迎成员加入。
☐ 起草首次会议日程。
☐ 安排会议后勤事项。
☐ 选择一个启动会议时调节气氛的小技巧。
☐ 与过程负责人建立联系，并让其了解项目的整体方向。
☐ 做相关方分析。
☐ 开始罗列小组所需外部支持人员名单等。

表 2—3　　项目小组首次会议

与会人员：(名单)		
日期：	时间：	地点：
会议目的：(六西格玛项目名称) 启动会		
日程安排： ● 致欢迎词 ● 小组成员介绍 ● 讨论小组成员的目标、期望及角色、团队活动规则、章程等 ● 审核项目立项表 ● 列出主要相关方名单		

续前表

● 根据小组成员提出的疑问、项目立项表及下次会议所需准备，列出行动事项 ● 确定下次会议时间和议程 ● 评估会议效果 ● 结束会议

2.4.2　团队发展阶段

随着团队成员共同工作，团队逐步进入成长和成熟阶段。理解这些发展阶段对有效的管理团队过程是很有价值的。这些阶段可能表现出不同的强度和持续期，这取决于团队的类型、团队工作环境以及构成团队的个体。达克曼描述了项目团队发展阶段的四个阶段（见图 2—8）。

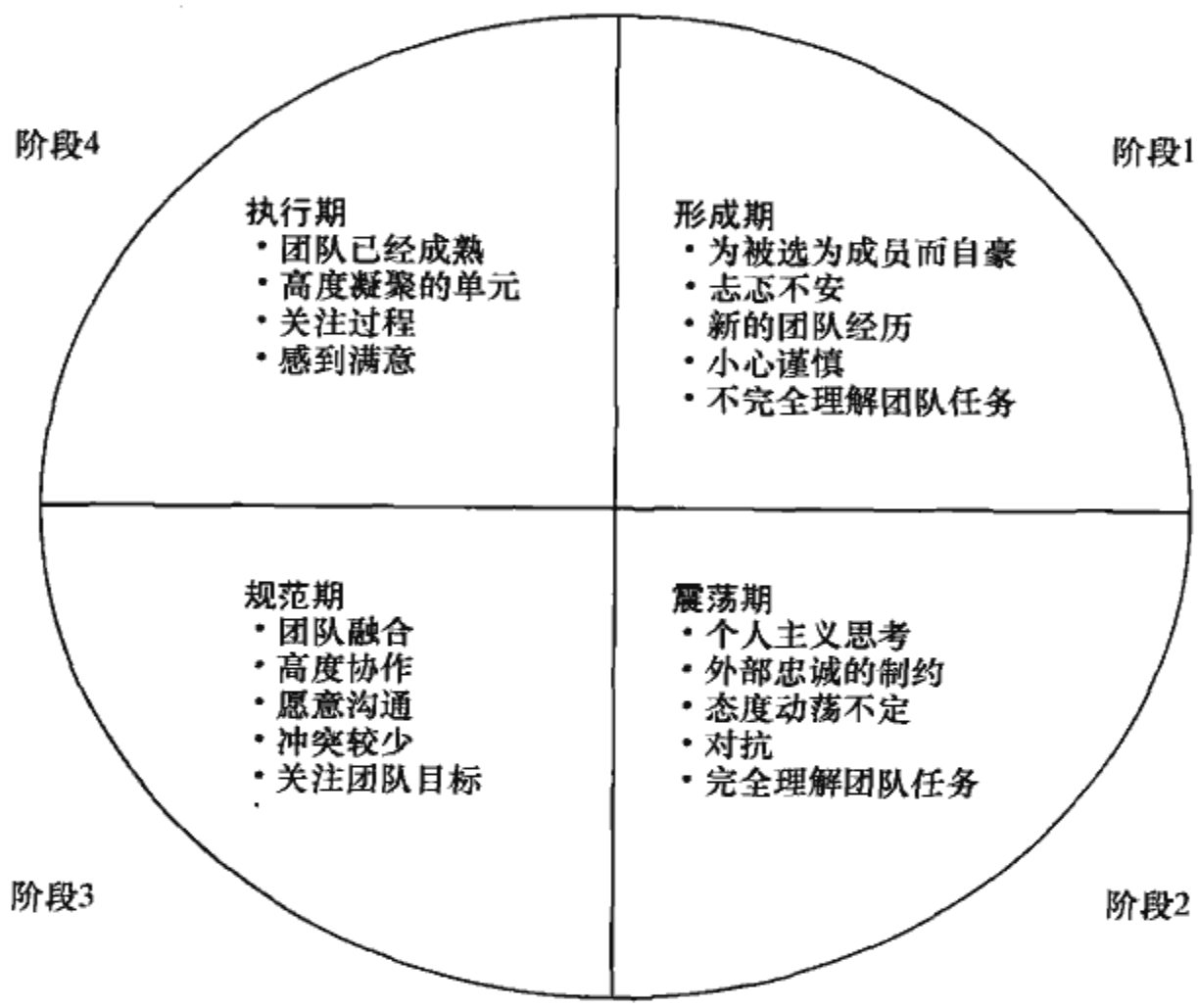


图 2—8　项目团队发展的四个阶段

阶段 1：形成期。团队首次聚在一起，随之而来的是本人个性以及反映自身环境的价值观。每个团队都是一个新的经历，甚至对那些以前曾参加过团队的成员来说也是如此。每个人都小心谨慎地进入这个环境，他们在这个新的经历中对角色和绩效感到忐忑不安。因此，在形成期，团队通常要阐明其目的，确定每个成员的角色，进行团队培训，以及制定可接受的行为准则。

阶段 2：震荡期。在此期间，团队成员对团队任务的真实情况已完全理解，但团队成员仍首先作为个体来思考，并往往根据自己的经历作出决定，而不是与其他成员协商广泛听取建议。随着团队成员一起工作，他们对于实现项目目标的最佳方法会存在分歧，甚至对项目的总体目标也可能存在分歧。大家还会发现每个人在项目中的工作方法不同，这些分歧可能引起团队内的争论甚至矛盾。对于团队来讲，

如果不能处理好这一阶段的问题，很可能就会导致项目最终失败。对此，团队领导/组长应该事先估计到这是团队组建过程中必然出现的正常阶段。他可以通过与团队成员的个别沟通，重申团队的目标、鼓励成员发表解决问题的意见等方式，排除障碍，带领团队跨过这一阶段。必要时可以请业务负责人或倡导者出面支持。

阶段 3：规范期。在此阶段，团队成员已从关心个人问题转变为关注实现团队目标，个人已融入团队中。团队成员间会达到一定程度的适应。团队成员开始就各种问题达成一致，并愿意为了团队而协商和消除分歧，因而在这个阶段团队有了更多的协商和对话。团队领导/组长应予以支持和赏识。

阶段 4：执行期。在此阶段，团队已经成为一个具有高度凝聚力的整体。团队成员对他人的优缺点以及他们如何完成使命了如指掌，并能够群体解决问题。在此期间，团队在实现目标上取得重大进展，团队领导/组长可以更多地授权。

虽然发展的四个阶段表明了时间的逻辑结果，但每个团队的实际发展过程千差万别。例如，已前进到阶段 3 或阶段 4 的团队可能退回到阶段 1 或阶段 2。如果他们认识到之前的相互假设并不真实，他们已用于决策的信息并不确切，或是由于工作的调动而改变团队的成员关系，这种情况就可能发生。一些团队可能在原阶段停滞不前，但项目的时间有限，必须在动态中及时调整、解决团队的问题。

2.4.3 团队动力与绩效

一个成功的团队应该是一个高度团结、独立自主的团队。这些不仅仅是在选择团队成员时要注意的，也是一个团队在开展工作的过程中应该努力营造的。当然，其中团队领导/组长要负主要的职责。通常团队建设的步骤如下：

（1）仔细分析任务，确定所需的技能组合和工作风格，以取得互相补充、互相促进的组合。

（2）向每一位团队成员讲述团队的愿景、目标以及对个人的任务要求。

（3）提供必要的技能培训以及必要的处理工具（软件、硬件等）。

（4）共同建立团队规则（见图 2—9），包括团队的例会制度、问题的沟通解决机制、编制项目立项表，等等。

（5）监控进度、保证团队凝聚力，并不断向目标迈进。

（6）注意团队工作中的成绩，并给予祝贺。

六西格玛团队规则

我们一致同意从我们团队自己做起，最有效地利用时间。我们承诺以下行为准则：

1. 会议准时开始和结束。
2. 如果有人不能参加会议，要至少提前一天通知组长。
3. 每次会议的内容都要提前通知：做一个议程，或在会前加以讨论。
4. 准时完成所分派的工作。如果做不到，则要至少提前一天通知组长。
5. 对任务坚持不懈。
6. 会议仅通知那些需要参加的人。
7. 会议以开放式论坛的方式进行。我们彼此挑战，坦诚相见。
8. 可能时，我们将利用午饭时间开会。

图 2—9　团队规则举例

面对六西格玛管理的挑战，六西格玛团队必须讲求团队技巧。人们希望努力工作去争取成就，但个人的成就总是有限的，团队的绩效要优于个人成就。前面我们已经提到黑带不仅必须具备使用统计方法的能力，同时也必须拥有卓越的领导力与亲和力，使六西格玛团队成员相互依存、相互帮助，项目才能取得真正的成功。那么团队负责人如何领导团队取得成功呢？这需要一些方法和技巧。

1. 团队激励

作为团队的负责人，欲使其成员共同为项目负责，激励技巧是十分重要的，这里有一种务实的团队激励办法，即 TARGET 方法可供参考，具体如下：

T（truth，事实）：团队成员必须知道事实真相，团队负责人应与团队成员坦诚沟通，分享经验，这有助于建立“勇于面对事实真相”的工作环境。

A（accountable，负责）：团队成员应该为自己的绩效负责。团队负责人可以通过诸如审查项目计划及定期检查项目实施情况并予以指导等，增强团队成员的责任感。

R（respect，尊重）：团队成员应该本着正直与坦诚的原则，相互学习，交换心得。直接点出问题，然后制定一个了解问题、探索问题的解决方案。

G（growth，成长）：团队成员及团队本身都必须能够经由学习而成长，以便有能力挑战更困难的工作任务。团队负责人可以协助团队成员认识通过六西格玛活动而成长的重要性，让团队成员愿意经由学习而成长。

E（empowered，授权）：成功的群体仍需个别的行动，尤其是在专业技术背景方面。团队负责人应协调业务负责人或倡导者，让团队成员取得授权，落实个别的具体行动，发挥个人的特长。

T（trust，信任）：作为一个有效的群体，六西格玛团队成员之间应该相互信任，并且同心协力完成指定的任务。团队负责人可以协助团队成员增进彼此间的相互信任。

有了上述保证，六西格玛团队就可以表现出下列高效六西格玛团队的共同特征：

（1）跨职能团队：团队成员应来自不同的职能领域，同时拥有互助互补的技术能力。跨职能团队的多数成员仍须兼顾自己部门的工作。

（2）挑战性绩效：更有挑战意义的绩效改进，将十分激励团队士气。在根据内外部顾客需求制定的挑战性目标的指导下，团队成员之间充分沟通，团队成功机会将大大增加。

（3）有意义的目标：团队的每一位成员都必须认同团队存在的价值及其对组织整体的贡献，成功的团队必须共享目标，并得到所有成员的认可。

（4）清楚的方法：团队必须使用共同语言，每位成员都必须了解并接受每一个问题解决办法。每位成员都必须彻底认识其所负责的过程作业。

（5）开放的沟通：团队成员间的开放、诚实和经常沟通是一种基本要求。六西格玛的价值观之一是无边界合作，这是建立在广泛沟通的基础之上的。

（6）公正的回报：为了发挥团队的激励作用，对工作卓越的团队或成员给予表

彰和激励，使辛勤付出能够有相应的回报。

2. 团队培训

六西格玛团队组建之后，必须结合项目的情况实施专题培训，教导“为何”(why)，指导“如何”(how)。

在项目团队的发展过程中，应当不断地对项目团队的绩效进行评估，从中及时发现团队发展中的问题。同时，团队绩效评估也是向管理层反馈团队在实现目标过程中的进展情况的一种有效手段，它对项目团队获得管理层的支持十分重要。

在项目实施的过程中，除了跟踪项目目标的实现情况，并由此评价项目团队的绩效，也可以采用内部导向的测量指标，如团队会议的出勤率，团队成员的满意程度，以及其他表征团队动力的因素。项目团队应当进行自我评价，并向倡导者和业务负责人报告这些评价指标的测评结果。

团队进行自我评价的方式是建立在有效团队的指南或团队行为规范一览表基础上的。每次团队会议结束后，对团队的表现作出评价。评价标准可以随着时间的推移而修订。

2.4.4 团队工具

用于团队工作的工具很多，例如：头脑风暴法、名义组技术、多重投票法、力场分析等。这里重点介绍头脑风暴法及其应用。

头脑风暴法是团队工作中经常运用的方法，一般可以分为三个阶段。第一阶段关注的是小组创造出的点子的数量。第二阶段需要审视这些点子，删除与实现目标无关的点子。第三阶段包括对筛选下来的点子做进一步的审视，并按照小组的意见，对它们进行优先排序。

头脑风暴法是一个团队对诸如为解决已知问题产生多个想法的一种简单方法。一般的头脑风暴会议过程如下：

(1) 头脑风暴的主题为小组所接受，并用清晰的语句，以小组成员都能看到的方式写出。

(2) 组织者向小组成员征求想法。

(3) 成员写下每个想法，不讨论、分析或批评。

(4) 这个过程延续到没有新的想法出现。

再次审视想法表，保证每个人都理解它，然后将相类似的想法合并，形成可用于投票的想法表。

头脑风暴也可以做得更加结构化，如轮回法要求小组的每个成员每次提出一个想法，如果没有想法则简单地跳过他们，接着询问下一个人的想法，然后是再下一个，依此类推，当最后一圈每个人都没有新的想法时，头脑风暴会议完成。也可以使用类似的过程，将几张纸贴在房间的四周，在每张纸的顶端写上特定的主题或问题，小组成员从一张纸走到另一张纸，把他们的想法写下来。在桌旁围坐的小组同样可以用传递卡片的方法来完成类似的过程。

头脑风暴还有一种特别的方法可用于以下场合：所处理的是特别敏感的主题，或小组成员间还没有建立高度的信任。这个方法叫做 Crawford 卡片法，请每个人制作自己想法列表的卡片，接着，递给一个可信赖的人（例如，团队负责人），这个人将其编辑为单一的列表。这种方法的匿名性可以使人们自由提出他们的想法，在小组中经常会发现有几个人有着相同的想法，从此开始建造共同的平台。

2.5　六西格玛项目监控与促进变革

2.5.1　项目跟踪和监控

在项目开始阶段，团队往往会投入较多的时间精力来界定项目，编制项目立项表和计划。一旦项目立项表和计划被批准，就需要采取一系列的措施，应用甘特图和网络计划技术等，跟踪、监督和控制项目的实施状况，包括监测项目进程，预测、发现并解决问题以及重新计划，以使项目恢复正常运作。

项目监控的目的是在预算内按时完成任务。在项目进行过程中，肯定会出现与计划不一致的事情，对此就需要团队快速地识别问题，解决问题，尽快使项目恢复正常。如何对项目进行有效的监控呢？图 2—10 是项目监控的常用流程。

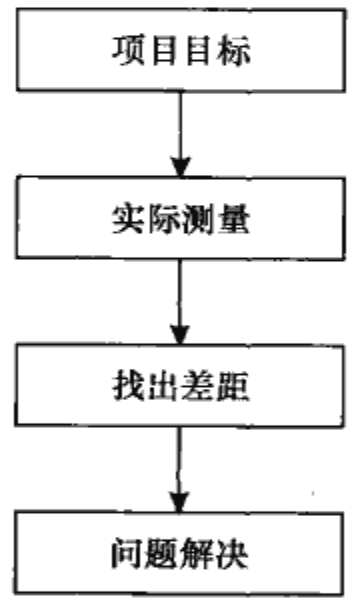


图 2—10　项目监控流程

项目目标是在制定项目计划时产生的。在制定项目计划时，为了便于以后的跟踪控制，项目计划中应该有里程碑计划（milestone），对每一项工作都应该有明确的输出要求。实际测量是指团队通过一些手段来明确项目目前的进展状况。这些手段可以是向业务负责人或倡导者报告、团队会议、甘特图检查等。要了解目前项目进展状况，就要与项目计划中的标准进行对比，找出差距，有效解决。

2.5.2　促进变革

六西格玛项目的实施过程是一个流程变革、系统变革和文化变革的过程。项目的负责人要带领团队迎接变革，倡导变革。项目管理是一门复杂的科学，其成败取决于很多因素，项目管理中的沟通与变革管理是项目成败的关键之一。成功的六西

格玛项目不仅是一项技术工作，而且是一项变革管理。

变革管理的根本目的是取得项目实施成功所必需的利益相关者的支持与承诺，同时促使全体员工接受并适应新的系统与业务流程。

具体而言，变革管理必须实现以下目标：项目团队能与业务部门领导、公司决策层进行开诚布公、及时有效的沟通，从而获得他们的支持、参与和推动；项目团队内部能进行高效的沟通，以保证项目团队成员的工作协调一致，按时、保质、保量实现预期的目标，并得到认同。

为使整个组织能清楚地理解项目实施的目的、影响与进度，应做到所有员工都理解项目实施的原因、意义及其对整个组织及组织内部每个部门或个人的影响；使广大员工能看到公司高层领导通过实际行动所表现出来的对于项目实施的支持与承诺；保证组织合理安排员工的工作职责和角色转换，以及可能发生的组织结构调整。

对项目所涉及的人员要进行必要的教育与培训，使其以积极主动的心态迎接可能的变革，并具有相应的技能来适应这种变革；加强内外部的宣传与沟通，为项目顺利推进营造一种适宜的组织氛围。

变革管理工作的核心是沟通。沟通是取得那些会受到变革影响的人的支持的基础。这种支持只有在关键决策者认识到变革的作用并推动变革时才会取得。所以项目负责人不仅是变革的倡导者，还应该具有良好的沟通能力及影响力。

2.6 六西格玛项目管理工具

应用项目管理工具可以帮助六西格玛项目团队更有效地组织并实施项目。下面重点介绍六西格玛项目实施中常用的项目管理工具。

2.6.1 亲和图

亲和图（affinity diagrams）是由日本学者川喜田二郎（Kawakita Jiko）于1970年前后研究开发并加以推广的一种质量管理方法，又称KJ法。所谓亲和图法，就是针对某一问题，充分收集各种经验、知识、想法和意见等语言、文字资料，通过图表进行汇总，并按其相互间的亲和性归纳整理这些资料，使问题得以明确，统一认识和协调工作，以利于问题的解决。

亲和图的主要用途如下：

（1）归纳思想，认识事物。对未知的事物或领域广泛收集实际资料，并从杂乱无章的资料中整理出事物的相互关系和脉络，就某件事情达成共识。

（2）打破现状和可能的束缚。通过集思广益产生新的想法，并加以归纳整理。

（3）参谋筹划。不同观点的人集中在一起，很难统一意见。最好能由相互理解的人组成计划小组。为着共同的目标，小组成员提出自己的经验、意见和想法，然后将这些资料编成卡片并进行整理。

（4）贯彻方针。向下级贯彻管理人员的想法和方针。靠强迫命令不会取得好的

效果，亲和图可以帮助人们进行讨论，集思广益，从而将方针自然地贯彻下去。

亲和图是用来把大项目重组成较小的、容易理解和处理的部分的方法。这种方法通常用于在用头脑风暴法分析口头数据或绘制树图之后，对罗列出的想法进行组织。有两种方式制作亲和图：先创建分类，然后将想法按分类组合；先将所有的想法按相似性分组，在组合完之后给分组命名。这个过程可以借助写卡片完成，每个想法写一张卡片，小组成员移动卡片进行组合，直到小组全体成员对组合满意为止。当确实需要时，一些条目可以放在多个组中。因此，该方法适用于事实或观点处于混乱状态时，或问题看起来太大、太复杂而无法掌握，小组必须达成一致意见时。

亲和图的绘制步骤如下：

（1）将要讨论的问题清晰地表述出来。

（2）用头脑风暴法产生与讨论问题有关的事项（思想、方案），一般至少要产生20项，每一项写在一张卡片上。

（3）将所有项目分类。

（4）将每一类的项目放在一起，并对每类项目命名（用卡片表明）。

亲和图的主要优点是建立了每个人对各种想法参与讨论的平台，所产生的图表是小组成员联合建立的对所分析问题的概念模型。图2—11是“改善团队行为方法”的亲和图的例子。

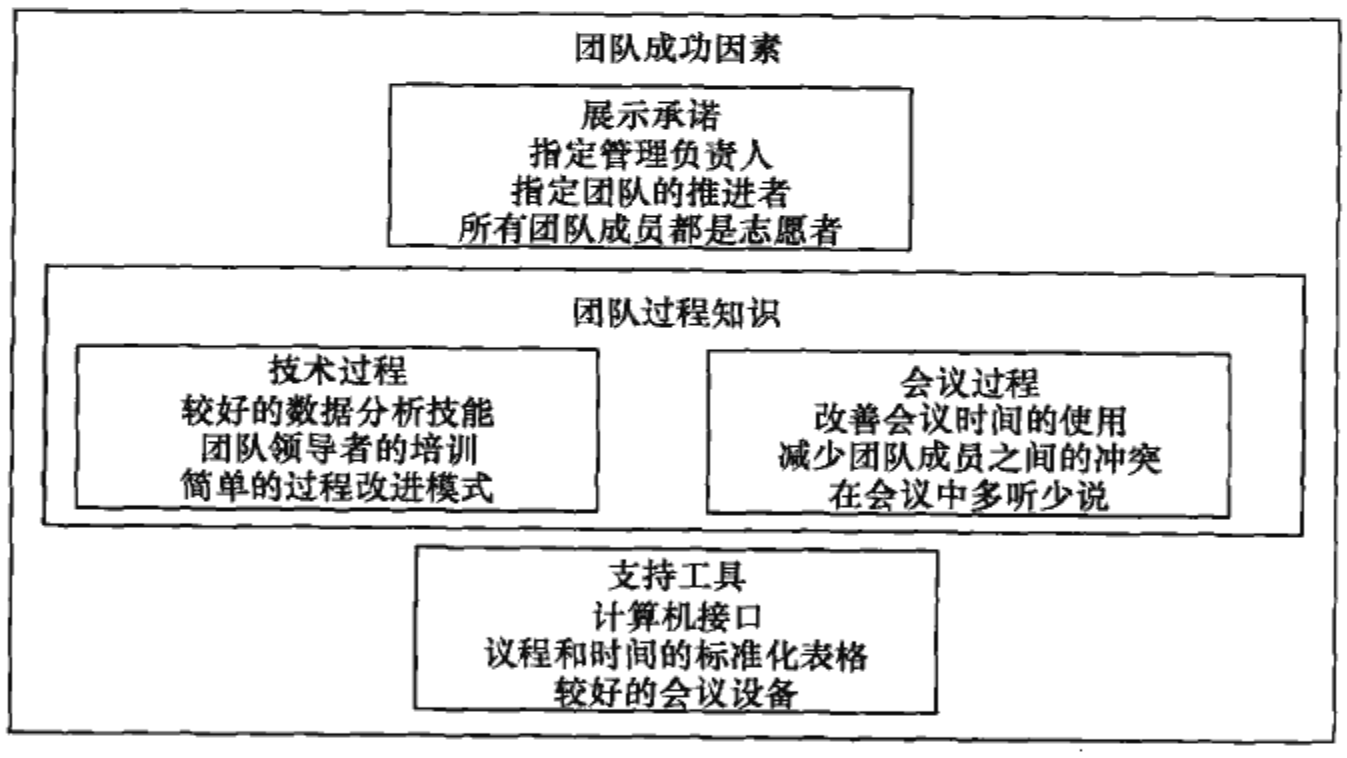


图2—11　“改善团队行为方法”的亲和图

在亲和图的运用过程中，一个小组要打破惯例思维和已有的分类。这项技术要求有强大的知识和存在于我们直觉中没被开发的理解力。在亲和图的使用过程中，资料收集是至关重要的一环。语言文字资料收集的方法将随亲和图的用途与目的的不同而不同。

2.6.2　关联图

关联图（interrelationship digraphs）也称关系图，是将关系纷繁复杂的因素

（因素与因素或因素与问题之间互相缠绕）按原因—结果或目的—手段有逻辑地连接起来，厘清复杂问题、整理语言文字资料的一种图形方法。关联图主要用于以下几个方面。

（1）界定六西格玛项目的范围和边界。

（2）原因分析：因素之间相互缠绕，或者一个因素同时影响两个及两个以上问题。

（3）确认关键影响因素。

（4）拟定制造过程中预防不良品的措施。

（5）提出解决市场问题的措施。

（6）改进企业的日常管理活动。

下面结合实例（见图 2—12）介绍关联图的绘制步骤。

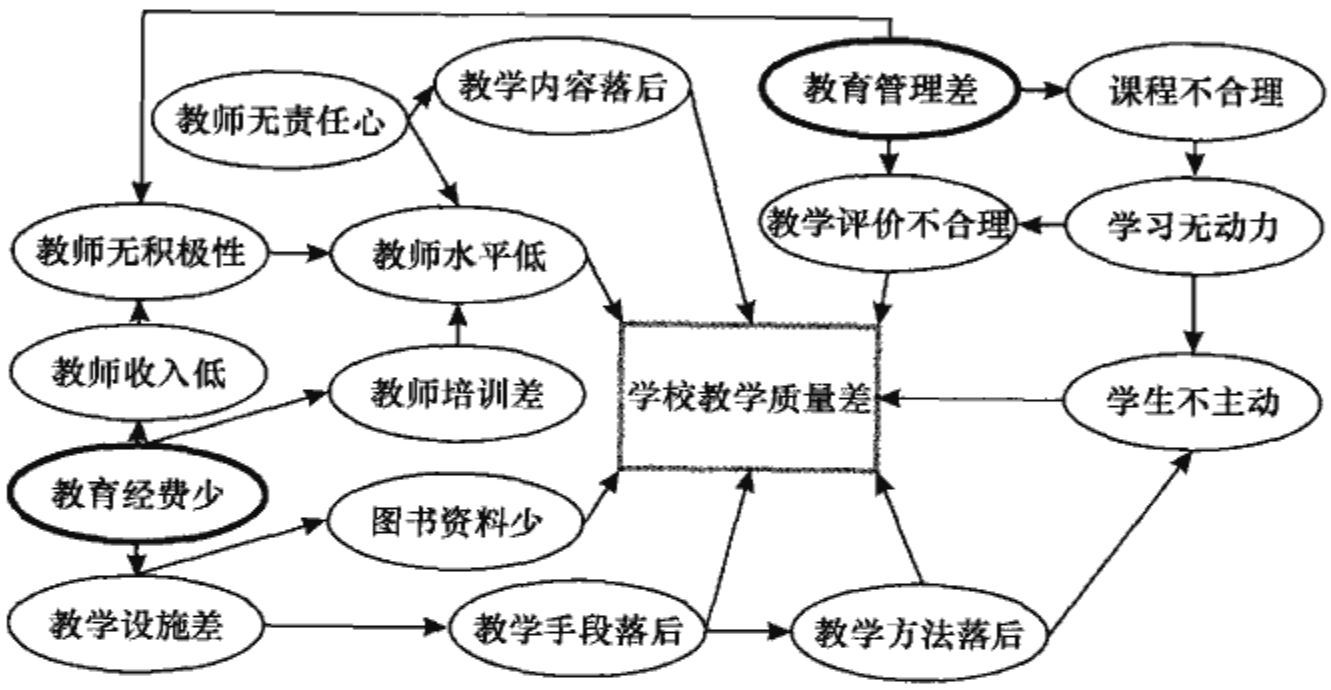


图 2—12　关联图举例

（1）明确所分析的问题。确认问题的存在，用图形圈起来（如学校教学质量差）。

（2）组成小组。小组成员要对问题有统一的认识，对问题比较了解。小组规模不宜过大，一般 4～6 人。小组成员自由地提出导致存在问题的有关因素（包括原因、理由、个人看法等）。

（3）整理出所有的问题要素。用明确的语言标示出问题和因素的名称，用图形圈起来，最好写在卡片上（如教学设施差、教学手段落后、教学方法落后等）。

（4）根据因果关系进行连接。确定问题和各种因素间的因果关系，并用箭线连接起来，箭头由原因指向结果，只能使用单向箭头（如教育经费少导致教学设施差等）。

（5）对图形进行整体分析，对要素间的因果关系进行确认，小组成员意见一致后定稿。根据图形进行分析讨论，检查有无不够确切或遗漏之处，复核和认可上述各种因素之间的逻辑关系。

（6）确定关键要素。将重要问题或重要因素用红色粗线醒目地标示出来，并确定从何处（如教育经费少、教育管理差）入手解决问题。

2.6.3　树图

树图（tree diagram）又称系统图。它按照“主题—主要类别—组成要素—子要素”的顺序，将主题分解或者分层，以不断地增加细节内容，旨在使笼统的主题分解成较小的部分，使之变得更易于理解和解决。从一个项目出发，展开两个或两个以上分支，然后从每一个分支再继续展开，依此类推，很像一棵树。树图通常是用来将主要的类别逐渐分解成许多越来越详细的层。绘制树图有助于思维从一般到具体的逐步转化。树图是将复杂问题（任务或目标）进行分解的一般工具。可以自左而右，或自上而下地展开。

树图有以下几种类型及用途：

（1）“目标—手段”类别的树图。将欲实现的目标与需要采取的措施或手段系统地展开，以寻求最佳手段或措施。采用自左向右展开的较多。

（2）“问题—原因”类别的树图。用于分析质量问题与其影响因素之间的因果关系，以寻求根本原因和对策措施。采用自左向右展开的较多，实际上是因果图的另一种表现方式，如图2—13所示。

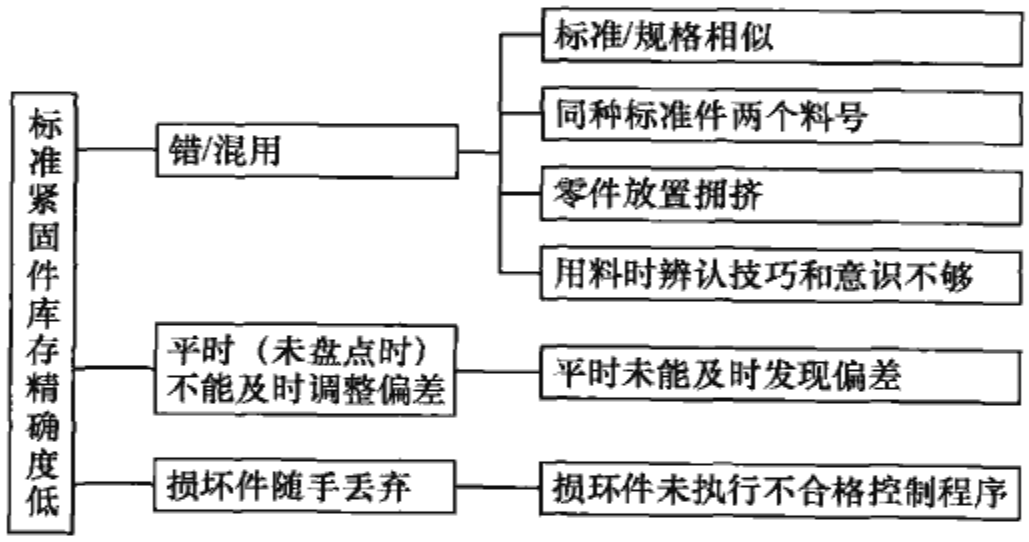


图2—13　用于原因分析的树图示例

（3）组织结构图。用于描绘组织结构，一般采用自上而下的展开形式。

（4）项目管理中的任务分解（work breakdown structure，WBS）。用于分解项目管理的任务范围，一般采用自上而下的展开形式。

绘制系统图的一般步骤如下：

（1）简明扼要地讲述清楚要研究的主题（目标、问题等）。

（2）确定该主题的主要类别，即主要的层次。这时可以利用亲和图中的主卡片，也可以利用头脑风暴法中确定的主要层次来确定。

（3）构造树图。把主题放在最左侧或上方的开始框内，把主要类别放在右侧或下方的框内。

（4）针对这个主要类别确定其组成要素和子要素，并依次画出。

（5）评审画出的树图，确保无论在顺序上或逻辑上均没有差错和空当。

在实施六西格玛的过程中，树图可以用来将复杂的改进机会进行分解，从而确定具体的六西格玛项目，如某企业针对提高顾客满意度进行分解得到如图2—14所示的

树图，根据顾客满意度调查的数据发现对售后服务的抱怨最多，而且绝大部分的抱怨是缺陷品的处理周期过长，最后确定将缩短缺陷品处理周期作为六西格玛项目。

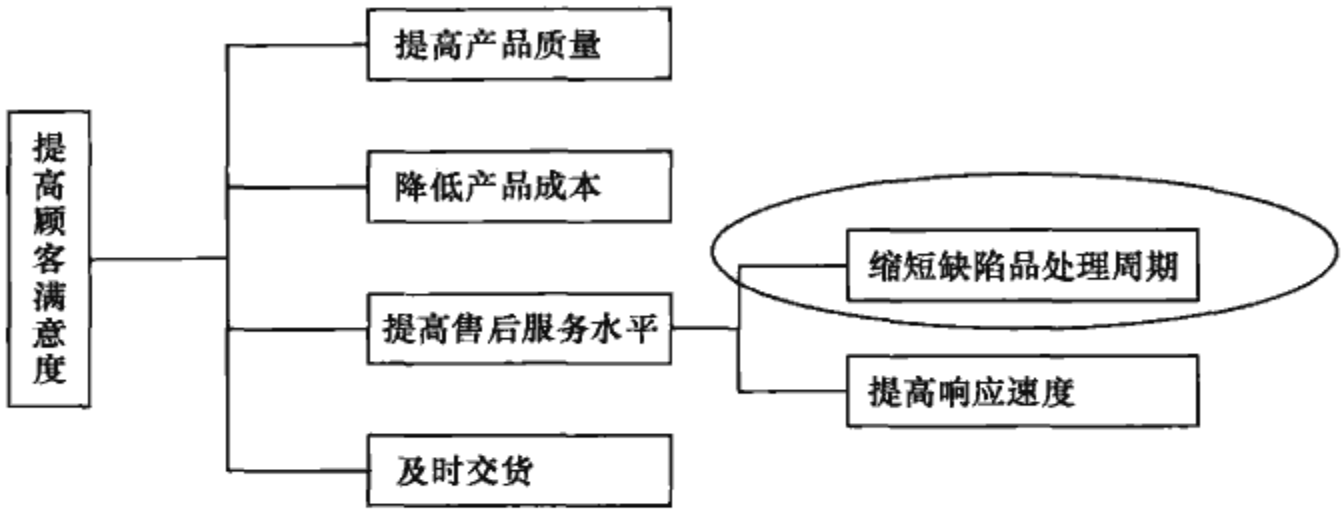


图 2—14　利用树图选择六西格玛项目

2.6.4　矩阵图

所谓矩阵图（matrix diagrams）法，就是从问题的各种关系中找出成对要素，并按数学上矩阵的形式，把问题及与其有对应关系的各个因素按行和列排成图，并在其交点处标出两者之间的关系，从中确定关键点。

在寻求问题的解决手段时，若目的（或结果）能够展开为一元性手段（或原因），则可用树图。然而，若有两种以上的目的（或结果），则其展开用矩阵图法较为合适。

在分析质量问题的原因、整理用户需求、分解质量目标时，将问题、用户需求、质量目标放在矩阵图的左边，将由问题的原因、用户需求转化而来的质量目标或针对质量目标提出的质量措施列在矩阵图的上方，用不同的符号表示它们之间关系的强弱，一般称 L 型矩阵图。

矩阵图的绘制步骤如下：

（1）明确要分析的问题，确定与问题有关的因素。

（2）组成跨职能小组。

（3）选择适宜的矩阵图。

（4）确定因素间的关系。

矩阵图，尤其是因果矩阵，在六西格玛实施中得到大量应用。在六西格玛项目选择过程中，一般用矩阵图进行项目选择和排序，如表 2—4 所示。

表 2—4　　矩阵图在六西格玛项目选择中的应用

	对质量的影响	对运转周期的影响	对成本的影响	对管理水平的影响	项目排序
项目 1	◎	○	◎	△	1
项目 2	○	◎	○	○	2
项目 3	○		△	◎	3
项目 4		○	○	△	4

说明：◎表示强相关；○表示较强相关；△表示弱相关。

此外，矩阵图还可用于如下方面：

（1）设定系统产品开发或改进的着眼点。

（2）产品的质量展开以及其他展开，尤其是广泛应用于质量功能展开（QFD）之中。

（3）系统核实产品的质量与各项操作和管理活动之间的关系，从而便于全面地对工作质量进行管理。

（4）发现制造过程中产生不良品的原因。

（5）了解市场与产品的关联性分析，制定市场产品发展战略。

（6）明确一系列项目与相关技术之间的关系。

（7）探讨现有材料、元器件、技术的应用新领域。

2.6.5　优先矩阵图

区分优先次序是指按照重要性的不同进行安排或者处理。优先矩阵图（prioritization matrics）是树图和矩阵图的结合，它可以帮助决策者确定所考虑的活动或者目标的重要程度。描绘优先矩阵图的目的是促使团队重点关注对组织最重要的关键事项，帮助我们在有着不同收益的多种选择间进行优选。每个行动方案的相对优点和相关影响构建了一张复杂的图，一个人很难在头脑中完成对它的优选。例如，一个人在两辆汽车之间进行选择，其中一辆提供了平均油耗里程、四轮驱动、车窗及座椅控制的全自动装置，而另一辆有优越的音响系统、乘坐平稳并且有较好的燃料经济性，他将如何选择？对于一个驾驶者来说，四轮驱动可能是在其他所有考虑之上的首要选择；但对于另一个驾驶者来说，可能认为燃料经济性在其他选择之上。

优先矩阵图的建立和使用遵循以下步骤：

（1）建立一个矩阵图，将树图的末端项目列为评价项目，并作为行和列的标题，然后比较相互之间的重要性，计算每一项目的权重得分（行的相对百分比），如表2—5所示。

表2—5　　优先矩阵——评价项目的相关重要度

	便于操作	加速性	舒适性	价格	行总和	行%
便于操作		1	10	5	16.0	42.3
加速性	1		10	5	16.0	42.3
舒适性	1/10	1/10		1/5	0.4	1.1
价格	1/5	1/5	5		5.4	14.3

说明：10——非常重要；5——重要；1——相同；1/5——不太重要；1/10——非常不重要。

（2）对评价项目给出权重后，对所有可能的选择（指参与选择的项目）对照每一项目进行评分。这时需要建立新的矩阵，用来基于每一项目，对各个选择进行评估（例如，表2—6是基于四个评价项目中的“加速性”的，对各个选择进行了评价）。

表 2—6　　优先矩阵——基于同一评价项目（加速性）

	第一辆车	第二辆车	第三辆车	第四辆车	行总和	行%
第一辆车		5	1/10	1/10	5.2	10.2
第二辆车	1/5		1/5	1/10	0.5	1.0
第三辆车	10	5		1/10	15.1	29.7
第四辆车	10	10	10		30	59.1

说明：10——非常好；5——比较好；1——相同；1/5——有点不好；1/10——非常不好。

（3）最终的矩阵是将要做比较的各个选择放在左边的表头，评价项目放在顶部表头。将来自上述矩阵的权重得分（行的相对百分比值）填入并相乘，对每个选择的得分求和，并计算其相对百分比，得分最高的被认为是最好的选择，如表 2—7 所示。

表 2—7　　优先矩阵——汇总表

	便于操作	加速性	舒适性	价格	行总和	行%
第一辆车	（项目的行百分比×选择的行百分比）	（42.3×10.2） 431				
第二辆车		（42.3×1.0） 42				
第三辆车		（42.3×29.7） 1 256				
第四辆车		（42.3×59.1） 2 500				

优先矩阵能够增加决策的客观性（相对于情绪化的决策）。当存在众多的可能性并具有多种复杂的选择和评价项目时，这个工具可供团队系统地讨论、识别，优选出对作出决策最具影响力的评价项目，并评估所有可能，同时团队能够将全貌时刻保存在头脑中。

2.6.6　过程决策程序图

在质量管理活动中，要达到目标或解决问题，总是希望按计划推进原定的各实施步骤。但是，随着各方面情况的变化，当初拟定的计划不一定行得通，往往需要临时改变计划。特别是解决困难的问题时，修改计划的情况更是屡屡发生。为应对这种意外事件，一种有助于使事态向理想方向发展的解决问题的方法——过程决策程序图（process decision program charts）被提出。

PDPC 法的工具就是过程决策程序图。PDPC 法于 1976 年由日本学者提出，是运筹学中的一种方法，是为了完成某个任务或达到某个目标，在制定行动计划或进行方案设计时，预测可能出现的障碍和结果，并相应地提出多种应变计划的一种方法。这样在计划执行过程中遇到不利情况时，仍能按第二、第三或其他计划方案进行，以便达到预定的计划目标。该方法适用于计划既庞大又复杂时；计划必须如期完成时；失败成本很高时；特别是执行计划之前。如图 2—15 所示，当 A 方案在 A_2 步骤遇到困难时，可改用 B 方案；当工作刚开始时（A_0），A_1 就受到严重阻碍，

只有使用C方案，而在C_2步骤也很有可能受阻，则可实施D方案，最终能够实现理想目的Z。

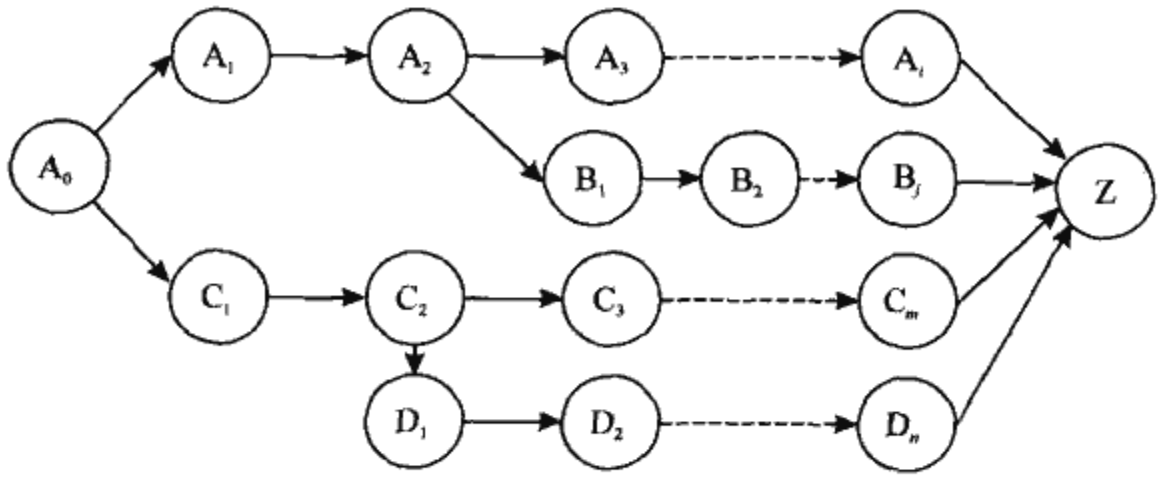


图2—15　PDPC法概念图

PDPC法具有如下特征：

（1）从全局、整体掌握系统的状态，因而可作全局性判断。

（2）可按时间先后顺序掌握系统的进展情况。

（3）密切注意系统进程的动向，掌握系统输入与输出间的关系。

（4）情报及时，计划措施可被不断补充、修订。

使用PDPC法的基本步骤如下：

（1）召集有关人员讨论所要解决的课题。

（2）从自由讨论中提出达到理想状态的手段、措施。

（3）对提出的措施，列举出预测的结果及遇到困难时应采取的措施和方案。

（4）将各研究措施按紧迫程度、所需工时、实施的可能性及难易程度予以分类。

（5）决定各项措施实施的先后顺序，并用箭线向理想状态方向连接起来。

（6）落实实施负责人及实施期限。

（7）不断修订过程决策程序图。

图2—16是某设备维修改进团队应用PDPC法进行设备维修计划安排的例子。

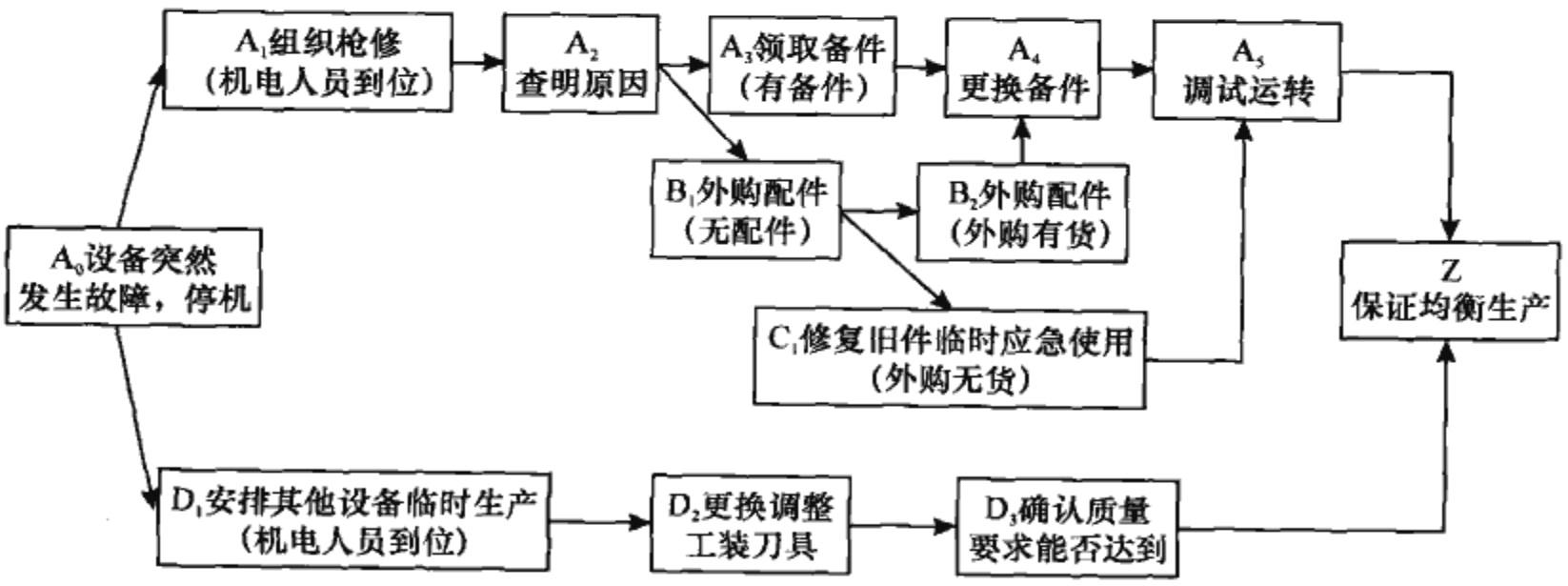


图2—16　某设备维修改进团队PDPC法应用示例

2.6.7 网络图

1. 基本概念

网络图也称箭条图或矢线图。利用网络图进行计划安排和优化的方法称为网络计划技术，在我国也称为统筹法，把推进计划所必需的各项工作按时间顺序和从属关系，用网络形式表示为一种“矢线图”（见图 2—17）。一项任务或工程，可以分解为许多作业，这些作业在生产工艺和生产组织上相互依赖、相互制约，网络图可以把各项作业之间的这种依赖和制约关系清晰地表示出来。通过网络图，能找出影响工程进度的关键和非关键因素，从而进行统筹协调，合理地利用资源，提高效率与效益。

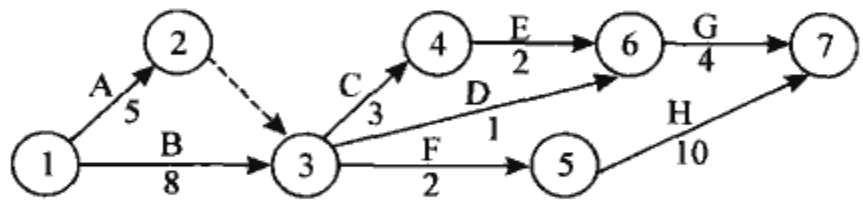


图 2—17　网络图概念图

网络图是一张有向无环图，显示了所有活动的先后关系，也就是任务被完成的先后顺序。箭头表示一道具体工序（如 A，B，C，…），箭头边上的权值表示活动持续的时间（如 5，8，3，…）。因为箭线首尾的节点编号只能唯一地表示一项活动，但对于平行活动来讲，要正确表示活动之间的关系，往往借助虚工序。虚工序用虚箭线表示，它仅仅起着表示活动先后顺序的作用，并不是一项真正的活动，它没有活动名称，既不占用时间，也不消耗资源，计算网络时间参数时，可以把虚工序看作作业时间为零的一项活动（如：2→3）。其中节点表示事件（如 1，2，3，…），表示一些工序的结束或开始。连接箭尾的节点称为该工序的紧前工序，连接箭头的节点称为该工序的紧后工序。线路是指从网络始点事项开始，顺着箭线方向，到网络终点为止，中间由一系列首尾相连的节点和箭线所组成的通路（如 1→3→4→6→7）。在网络图中，路径最长（权重数值之和最大）的路径称为关键路线，它的长度代表完成整个工程的最短时间，称为总工期（如 1→3→5→7）。关键路线上的工序称为关键工序。由于只有通过压缩关键路线上的活动时间，才能使整个工期缩短，因此关键路线上的活动是影响整个工程的主要因素，这就是“关键”一词的由来。

关键路线是网络图中一个极其重要的概念。关键路线又称主要矛盾线，其周期决定了整个作业进度的周期。关键路线上的延迟或提前，将直接导致整个项目总工期的拖延或提前。关键路线上的作业称关键作业。关键作业在时间上没有回旋的余地。因此，要缩短总工期，必须抓住关键路线上的薄弱环节，采取措施、挖掘潜力，以压缩工期。关键路线能使管理者对工程做到心中有数、明确重点。

2. 网络图的绘制规则

（1）网络图中不能出现循环线路。即箭线从某一个节点出发，只能按照编号由

小到大，方向自左向右前进，不能重新回到该节点上去。出现循环线路意味着工序先后顺序的混乱，如图 2—18 是不正确的。

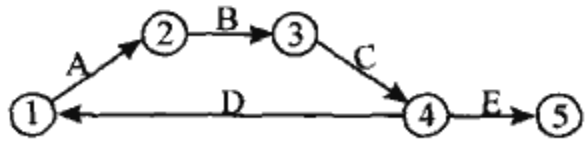


图 2—18　含循环的网络图

（2）任一节点可以与许多箭线相连，但两节点之间只能有唯一的一条箭线。两个节点编号只能唯一地表示一道工序，换句话说，如果一道工序和其他工序有共同的起始节点，它们就不能有共同的终止节点，这时需要增加虚工序，如图 2—19（a）是错误的，因为（4，8）既表示 A 工序，同时又表示 B 和 C，不能唯一地表示某一道工序。该工序关系应绘成图 2—19（b）来表示。

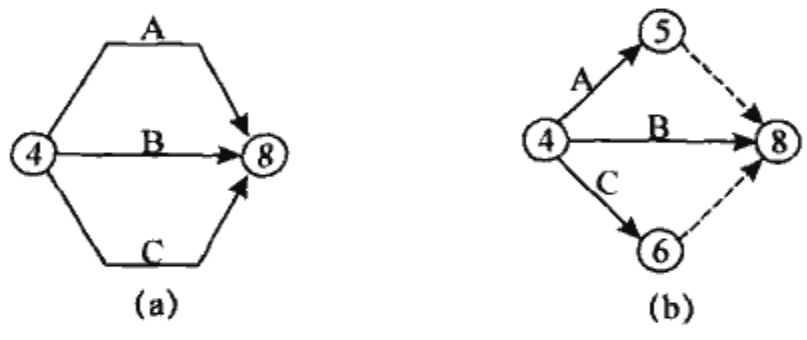


图 2—19

（3）箭线的首尾必须都有节点，不能从箭线的中间引出另一条箭线，也不能使一条箭线指向另一条箭线的中间。如图 2—20（a）是错误的，如果要表示在 A 工序进行到某一阶段即可开始 B 工序，则可以把 A 工序分解为 A_1 和 A_2 两个子工序，正确的表示如图 2—20（b）所示。

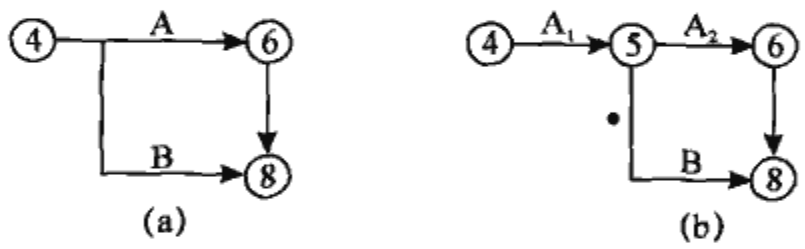


图 2—20

（4）任何一个网络图只能有一个始点和一个终点。除始点和终点外，不能出现没有先行工序或没有后续工序的节点，如图 2—21（a）是错误的。应把多个始点和多个终点，合并成一个始点和一个终点，如图 2—21（b）所示。

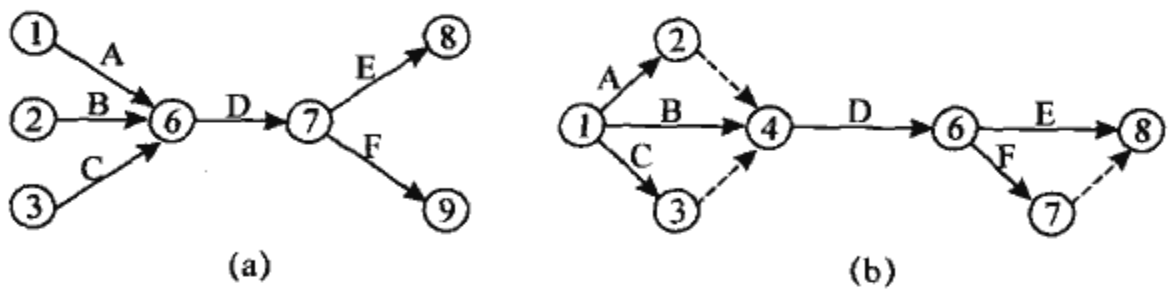


图 2—21

（5）一张网络图中，每道工序只能出现一次。在实际生产中，可能会出现工序的重复，如刷油漆→油漆干燥→刷油漆。虽然有相同的两道刷油漆工序，但不能用同一工序名表示，可分别表示为油漆 1 和油漆 2，以区别为两道不同的工序。

（6）为了便于检查和使用网络图，如图 2—21 所示，箭线方向一律指向或斜向右方，沿箭线方向节点编号由小到大。

（7）网络图必须正确反映工序之间的逻辑关系。网络图中工序的数目（不包括虚工序）和工序之间的紧前、紧后或平行关系必须和工序要求一致。

3. 网络图实例

网络计划技术作为组织与控制项目进度的方法，在把项目绘制成网络图的基础上，要进行各项时间参数的计算，以便对项目中各道工序在时间上进行科学合理的安排。网络计划技术中的时间参数包括各道工序的作业时间、节点的最早时间和最晚时间。各道工序的最早开始时间和最早结束时间、最晚开始时间和最晚结束时间及时差等。下面结合实例介绍网络图，某房屋建造工程中的活动如表 2—8 所示。

表 2—8　　房屋建造工程中的活动

工序	紧前工序	工序时间（天）
开挖	—	2
打地基	开挖	4
筑墙	打地基	10
电线铺设	筑墙	7
外部管道	筑墙	4
内部管道	外部管道	5
墙板	电线铺设，内部管道	8
地板	墙板	4
内部粉刷	墙板	5
内部装修	内部粉刷，地板	6
屋顶	筑墙	6
外墙	屋顶	7
外部粉刷	外部管道，外墙	9
外部装修	外部粉刷	2

（1）首先，要弄清这些活动间的先后次序，例如只有先筑好墙后才能建屋顶。作业时间的估计采用单一时间估计法，即对每道工序的作业时间仅确定一个估计值，用 $t(i, j)$ 表示工序 (i, j) 的作业时间。如表 2—8 中所给出的，$t(1, 2)=2$，$t(2, 3)=4$ 等。

（2）描绘网络图，计算每个工序的最早结束时间和最晚结束时间。

按规则绘制网络图如图 2—22 所示。

网络时间参数计算的目的，在于确定工序的最早开始与结束时间、工序的最晚开始与结束时间、时差和关键路线，为了方便地计算出工序的四个时间参数，需计算节点的两个时间参数：最早时间和最晚时间。

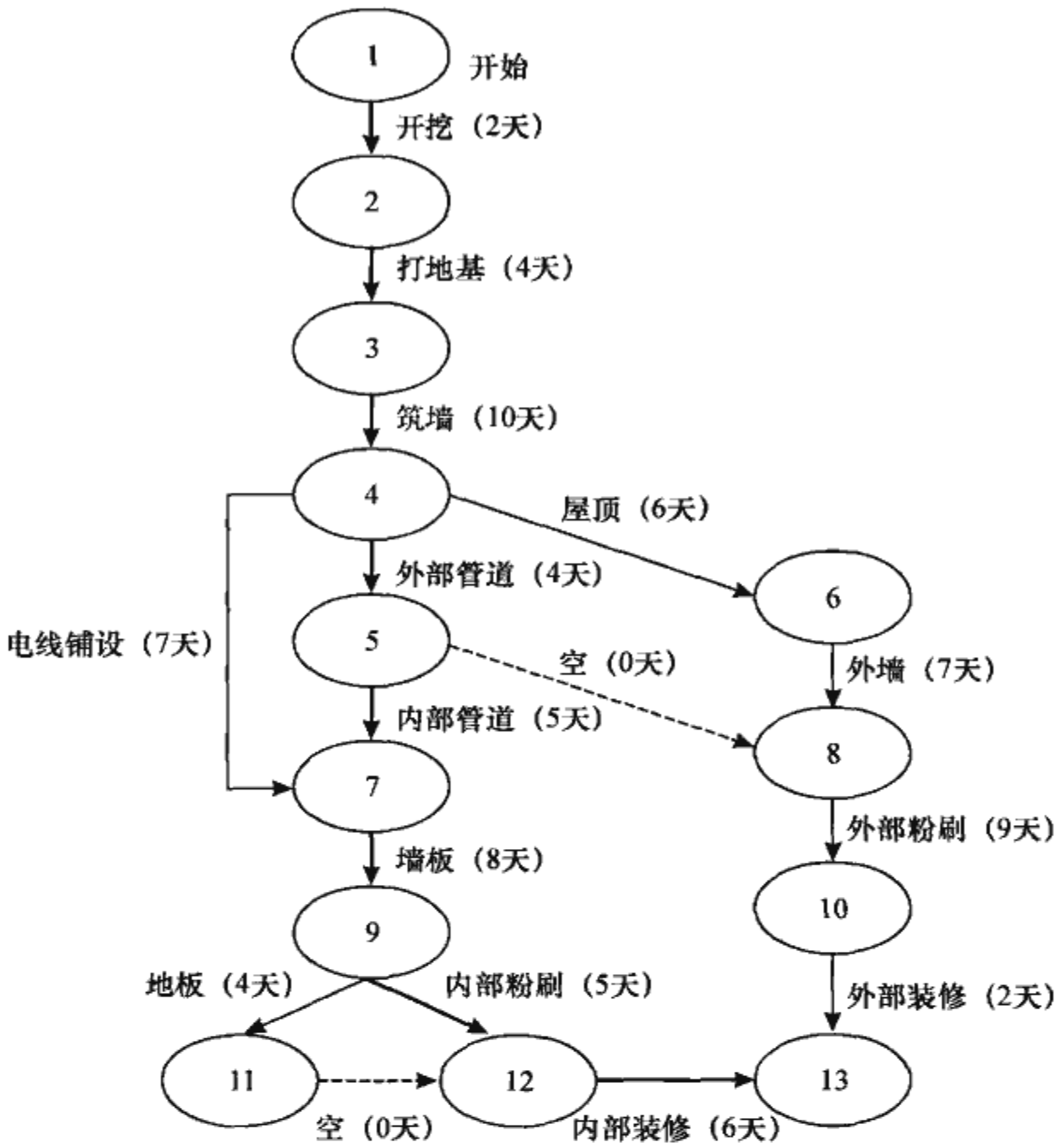


图 2—22　房屋建造工程的网络图

节点的最早时间是指以该节点为起始节点的所有工序的最早开始时间。计算节点的最早时间是从网络的始点开始，按箭头方向自左向右计算，一直到网络终点为止。并假定网络始点的最早时间为零（当然在实际应用中，网络始点的最早时间也可以是某一特定时点），对于其他节点，箭头节点的最早时间等于所有直接指向该节点的各箭尾节点的最早时间与该箭线所表示工序作业时间之和的最大值，假设始点编号为1，即

$$ET(1)=0$$

$$ET(j)=\max_{i\to j}\{ET(i)+t(i,j)\}$$

式中，$i\to j$ 表示箭线由节点 i 直接指向节点 j。

各节点的最早时间为：$ET(1)=0$，$ET(2)=0+2=2$，$ET(3)=2+4=6$，$ET(4)=6+10=16$，$ET(5)=16+4=20$，$ET(6)=16+6=22$，$ET(7)=\max\{16+7, 20+5\}=25$，$ET(8)=\max\{20+0, 22+7\}=29$，$ET(9)=25+8=33$，$ET(10)=29+9=38$，$ET(11)=33+4=37$，$ET(12)=\max\{37+0, 33+5\}=38$，$ET(13)=\max\{38+2, 38+6\}=44$。

节点的最晚时间是指以该节点为终止节点的所有工序的最迟必须完工时间，若

各道工序不在此时点之前完工，势必影响以该节点为起始节点的所有工序的开工。计算节点的最晚时间是从网络的终点开始，按箭尾方向自右向左计算，一直到网络始点为止。网络终点的最早时间表明了整个项目的最早完工时间，为了尽量缩短项目的完工时间，我们规定，网络终点的最晚时间等于网络终点的最早时间，也就是说，项目既然能在某一最早完工时间内完工，就一定要安排它在该时间内完工。对于其他节点，箭尾节点的最晚时间等于所有从该节点直接发出的各箭头节点的最晚时间与该箭线所表示工序作业时间之差的最小值，假设终点编号为 n，即

$$LT(n)=ET(n)$$

$$LT(i)=\min_{i\to j}\{LT(j)-t(i,\ j)\}$$

各节点最晚时间为：LT(13)＝44，LT(12)＝44－6＝38，LT(11)＝38－0＝38，LT(10)＝44－2＝42，LT(9)＝min{38－4，38－5}＝33，LT(8)＝42－9＝33，LT(7)＝33－8＝25，LT(6)＝33－7＝26，LT(5)＝min{33－0，25－5}＝20，LT(4)＝min{25－7，20－4}＝16，LT(3)＝16－10＝6，LT(2)＝6－4＝2，LT(1)＝2－2＝0。

工序的最早开始时间是指工序在其所有紧前工序都结束后的最早可能开始时间。每一道工序都有起始节点，而节点的最早时间表示以该节点为起始节点的所有工序的最早开始时间，因此有

$$ES(i,\ j)=ET(i)$$

工序的最早结束时间即工序的最早可能结束时间，它等于工序的最早开始时间与工序作业时间之和，即

$$EF(i,\ j)=ES(i,\ j)+t(i,\ j)$$

工序的最晚开始时间是指为了不影响项目以最短时间完工，工序最晚必须开始的时间。每一道工序都有终止节点，而节点的最晚结束时间表示以该节点为终止节点的所有工序的最晚必须完工时间，因此有

$$LF(i,\ j)=LT(j)$$

$$LS(i,\ j)=LF(i,\ j)-t(i,\ j)$$

（3）时差分为工序总时差和工序单时差。工序总时差是指在不影响整个项目最早结束的条件下，工序最早开始（或结束）时间可以推迟的时间，也就是在不影响紧后工序最晚开始时间的前提下，工序可以推迟开始或推迟结束的一段时间，工序 $(i,\ j)$ 的总时差常用 $TF(i,\ j)$ 表示。其计算公式如下：

$$\begin{aligned}TF(i,\ j)&=LS(i,\ j)-ES(i,\ j)\\&=LF(i,\ j)-EF(i,\ j)\\&=LT(j)-ET(i)-t(i,\ j)\end{aligned}$$

（4）寻找关键路径。项目的关键路线就是网络图上延迟时间为零的活动组成的路径 1→2→3→4→5→7→9→12→13（见图 2—22 中粗箭线组成的路径），这些活动

就是关键活动，其时间总和就是项目完成的总时间。

掌握和控制关键路线是实施网络计划技术的精髓。关键路线的长度决定了工期，缩短关键路线上工序作业时间即可缩短工期，但是关键路线上工期的缩短并不是无止境的，当缩短到一定程度时，关键路线将变成非关键路线，非关键路线的总时差被全部利用后，也会变成关键路线。另外，关键路线可能不止一条，关键路线越多，关键工序就越多，就越需要加强管理。

在计算网络时间参数时，采用图上作业法，把所有时间参数都标在图上，会使网络图显得很乱，而且工序的时间参数很容易由节点时间参数推算出来。所以一般网络图上只标出节点的时间参数，工序时间参数和时差通过表格形式计算（见表2—9）。

表2—9　　网络时间参数计算表

工序名称	节点编号	作业时间	ES(i，j)	EF(i，j)	LS(i，j)	LF(i，j)	TF(i，j)	关键路线
开挖	(1，2)	2	0	2	0	2	0	√
打地基	(2，3)	4	2	6	2	6	0	√
筑墙	(3，4)	10	6	16	6	16	0	√
电线铺设	(4，7)	7	16	23	18	25	2	
外部管道	(4，5)	4	16	20	16	20	0	√
内部管道	(5，7)	5	20	25	20	25	0	√
墙板	(7，9)	8	25	33	25	33	0	√
地板	(9，11)	4	33	37	34	38	31	
内部粉刷	(9，12)	5	33	38	33	38	0	√
内部装修	(12，13)	6	38	44	38	44	0	√
屋顶	(4，6)	6	16	22	20	26	4	
外墙	(6，8)	7	22	29	26	33	4	
外部粉刷	(8，10)	9	29	38	33	42	4	
外部装修	(10，13)	2	38	40	42	44	4	

2.7　六西格玛总结与成果评审

项目管理的最后一个过程是项目收尾，包括行政收尾和合同收尾。对于六西格玛项目而言，主要包括六西格玛项目总结、项目成果评审与分享。

项目总结、项目成果评审与分享的过程是六西格玛项目管理PDCA循环的A阶段，也是实现“闭环评价和知识管理”的过程，即：通过对达到目标的项目进行文件化并予以闭环评价，将获得的实践经验的教训进行管理，以便识别新的机会，包括与其他相关部门、类似过程以及顾客、供应商、社会等利益相关方分享项目的知识成果，进而使项目的成果倍增，从而实现六西格玛项目知识资产的确认、积累和分享。

2.7.1 六西格玛项目总结

1. 项目总结报告的编写

为交流和承认成果，推进六西格玛项目的持续开展，项目团队应给基于项目立项表和项目文档，对活动记录进行整理归纳，撰写成果报告书，要求文字精练，条理清楚，尽量选用图表表达。一般可包括以下内容：

（1）前言。

（2）界定。项目背景、项目目标、项目计划、项目团队、过程分析等。

（3）测量。过程输出绩效的测量、过程因素分析、过程因素测量、测量系统分析等。

（4）分析。潜在故障模式与影响分析、关键过程因素与输出绩效的回归和相关分析、假设检验、方差分析等。

（5）改进。试验设计、解决方案的确定和实施等。

（6）控制。改进效果验证、收益评估（硬性的和软性的），控制图与过程能力分析、标准化等。

（7）经验教训、遗留问题和下一步打算等。

2. 项目总结报告的审核

项目总结报告应报请业务负责人、财务总管、资深黑带和倡导者审核。业务负责人从业务的角度，核实项目过程及效果的真实性；财务主管核实项目财务收益的计算方法和结果；资深黑带对项目全过程进行全面的核实；而倡导者的责任更多的是从公司文化和战略的宏观视角审核六西格玛项目的成果。表 2—10 是一家公司的六西格玛项目成果审核表，可供参考。

表 2—10　　六西格玛项目成果审核表示例

<table>
<tr><td>项目名称：</td><td>组长：</td><td>团队成员：</td></tr>
<tr><td>项目目标：</td><td>项目启动时间：</td><td>项目结束时间：</td></tr>
<tr><td>改进前后状况及数据</td><td>改进内容及设计文件</td><td>过程负责人审核</td></tr>
<tr><td>改进前：</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">年　月　日</td></tr>
<tr><td>改进后：</td></tr>
<tr><td colspan="3">潜在年收益计算：
实际收益计算：
财务审核
年　月　日</td></tr>
<tr><td>资深黑带审核
年　月　日</td><td colspan="2">倡导者审核
年　月　日</td></tr>
</table>

3. 项目移交

在项目成果得到审核确认后，项目团队应将之移交给过程所在部门或区域，由后者对项目成果进行日常监测和控制。同时，做好项目文档的最终归档（移交给公司档案管理部门或六西格玛管理归口部门）。

2.7.2 六西格玛项目成果评审与分享

企业应当对六西格玛项目成果进行科学、全面的评价，建立符合企业自身特点的激励政策，使改进活动步入良性循环。

1. 成果发布、评审与分享

企业应根据六西格玛管理的推进情况，定期举行六西格玛项目成果发布、评审与分享会，参加者包括：评审人员、项目团队成员以及各相关过程、部门的人员。

企业可建立由倡导者、资深黑带以及项目相关的业务负责人等组成的六西格玛项目评审委员会，对参与发布的成果进行无记名评分，对各评委的评分进行平均，必要时可结合进行现场核实。评价应鼓励和突出互相学习与交流，注重活动过程的有效性，倡导有特色的成果，兼顾经济、环境与社会效益。对项目成果的评价一是要科学，采用科学的评价方案，要实事求是，不能夸大项目的成果；二是要全方位地评价，不要局限于经济效益方面的成果，对不足之处也要指出。项目评审一般包括以下方面的内容：

（1）项目选择的合理性。

1）选项是否有意义和有价值。

2）项目目标是否具有挑战性、符合 SMART 原则，是否达成目标。

（2）应用六西格玛理念方法和统计技能。

1）是否正确运用六西格玛的思路、方法解决问题。

2）是否时机正确，合理运用统计工具和技能推进问题的解决。

3）发布资料是否完整和具有较高的质量。

（3）项目收益。

项目收益计算是否合理正确，是否为公司带来可观的项目收益或取得了显著的管理效果。

（4）项目范围和推广应用前景。

1）在项目涉及的范围方面，团队成员是否与项目本身所涉及的职能部门一致，并承担适宜的项目工作，是否体现跨职能合作。

2）项目是否有推广应用价值。

（5）发布人的思辨、表达、沟通、组织协调、回答问题等软性技能的表现。

1）表述是否清晰。

2）时间掌握是否恰当。

3）回答问题是否正确。

4）团队负责人是否具备组织、领导项目组的能力。

除了在企业内部进行发布、分享外，在不泄露公司商业机密的前提下，还可以与顾客、供应商和合作伙伴，以及在行业内外发布和分享（如参加全国或地区、行业六西格玛成果发布会和六西格玛优秀项目评选，编写资料或书籍等），促进社会进步和发展。分享的目的在于进一步扩大改进和创新的效应，在更广泛的意义上降低改进的成本和提高改进的效率，扩大收益区域，为利益相关方创造更多的价值。

2. 成果激励

六西格玛成果是追求卓越绩效的体现，值得公开承认和奖赏，以增强参与员工的自尊和成就感。企业需要根据所在行业的特点以及自己的条件，制定多样化的激励方式和手段，包括物质的和精神的激励。

企业可依据项目评审的结果，设立有序六西格玛项目、六西格玛成就奖、明星黑带和绿带等各种奖项，授予项目团队和成员。

（1）物质激励。可包括：

1）奖金。

2）奖品。

3）晋升与加薪。

要基于个人贡献的大小来评价团队成员在六西格玛团队中的绩效，进行奖金分配。

（2）精神奖励。可包括：

1）让项目黑带或绿带有机会登台发布结果，可邀请其亲属、朋友参加。

2）高层领导签署表彰令，亲自参加成果发布会议、成果表彰仪式或宴会，授予奖状、奖章或奖牌（刻有项目名称和黑带等团队成员姓名）。

3）将项目报告及团队成员照片刊登在公司的新闻媒介上。

4）完成六西格玛管理培训也是一种成果，因此可给完成课程的人员授予证书、徽章等。

3. 黑带与绿带认证

黑带与绿带认证也是一种激励，一种对员工职业生涯发展的激励。企业可以自行认证，也可以鼓励员工参加权威的第三方机构（如中国质量协会）组织的资格考试、项目评审和注册。

一般地，企业内部的黑带和绿带认证应具备以下条件：

1）完成黑带知识课程培训，至少完成两个项目，取得显著收益，并为通过企业内部成果评审的项目组长，予以公司内部黑带认证，发给黑带证书。

2）完成绿带知识课程培训，组织完成或参与完成年收益较显著的若干个项目（如1～2个），并通过企业内部项目成果评审，予以公司内部绿带认证，发给绿带证书。



本章小结

项目管理是六西格玛中的重要内容。本章介绍了改进机会确定、过程绩效指

标、六西格玛项目选择、项目团队建设、项目监控与促进变革、项目管理工具以及六西格玛总结与成果评审等相关内容：讨论了通过顾客需求分析、水平对比、平衡计分卡和关键绩效指标来确定改进机会；介绍了几种常用的过程绩效指标；说明了六西格玛项目选择、团队建设、监控与促进变革等相关内容；详细解释了几种常用的管理工具的用法。

第3章

项目界定

六西格玛 DMAIC 五步法的第一个步骤是界定，它是六西格玛项目过程的第一个关键阶段，这个阶段的工作主要是为项目正式启动打好基础。界定阶段是过程改进中不可省略的一个重要环节，在界定阶段要根据顾客的关键要求或者组织发展的战略重点，将对过程的要求逐层分解展开，形成针对相关过程的关键质量特性（CTQ）及其测量标准，明确缺陷是什么，并在此基础上建立明确的改进目标。上述这些是对六西格玛管理的基本思考，它驱动我们以新的和独创的方式来思考过去经常忽略的问题。我们可以通过明确和界定要解决的问题，编制、更新和完善团队的 DMAIC 项目立项表，并用其来组织项目活动。

3.1 六西格玛与过程管理

过程概念是现代管理最基本的概念之一，过程管理则是现代管理最基本的方式之一。从组织的使命、愿景、价值观，到战略目标和战略规划，都要通过过程管理来落实；所有的改进和创新也都是通过过程改进实施的。现代管理重在结果和创造价值，但结果和价值都是通过过程取得的，因此它必须面向过程。对于一个追求卓越的组织而言，过程是因，结果应是有因之果，应当通过卓越的过程创造卓越的结果。

六西格玛价值观之一就是聚焦于过程改进，减少或消除过程变异。六西格玛管理不应该是一系列相互割裂的项目组合，任何改进的努力都要与企业发展战略、顾客和其他利益相关方的需求相连接。而战略的实施和顾客及其他相关方需求的满足都要通过过程来落实，因此，六西格玛管理应当基于组织的业务过程和业务系统，聚焦于过程和系统的整体改进。

1. 过程的定义

在ISO9000：2005《质量管理体系基础和术语》中，过程被定义为：将输入转化为输出的相互关联的或相互作用的一组活动。

在过程示意图（见图3—1）中：

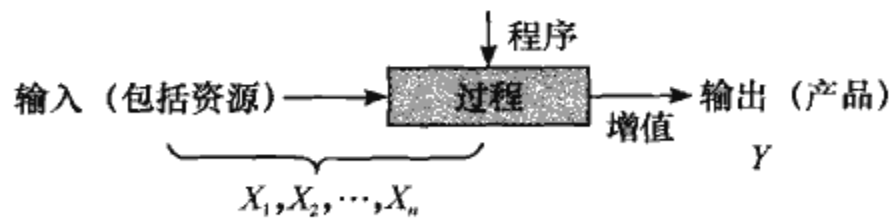


图3—1 过程示意图

（1）过程的任务在于将输入转化为输出，而输出就是过程的产品（包括服务），输入、输出以及过程特性应是可测量的。输入和预期的输出可以是有形的（如设备、材料和元器件），也可以是无形的（如能量或信息）。输出也可能是非预期的，如废料或污染。

（2）对形成的产品是否合格不易或不能经济地进行验证的过程，通常称为“特殊过程”。

（3）增值是对过程的期望，即每一个过程均应该是增值的过程，反之则应进行改进或删除。

（4）为了使过程增值，组织应当对过程进行策划，即识别过程及其要求，进行过程设计并形成程序，建立过程绩效测量和过程控制方法。过程程序的实施能够使组织稳定受控地获得增值，但为了使过程具有更强的增值能力，组织还应当对过程进行持续改进和创新。

（5）将输入转化为输出的动因是活动，而且是一组相互关联或相互作用的活动。

（6）过程具有伸展性：一个过程可以分解成若干更小的子过程；若干小过程可集成为一个较大的过程。

（7）根据所含活动的多少、大小，过程可以是一个大过程（如产品实现过程），也可以是一个小过程（某一个冲裁生产过程）。

过程输入可以是人力、设备设施和材料，或者是决策和信息等。输入包括可控因素，也包括噪声因素，即那些被认为不可控制、不期望控制或控制费用昂贵的因素。实用而简单的过程概念模型是“Y 是 X 的函数”：

$$Y=f(X_1,\ X_2,\ \cdots,\ X_n)$$

这里，Y 代表结果变量，而 X 为输入变量或过程变量，它是自变量，是独立的因素，而 Y 是因变量、非独立因素。上式表达的信息是，通过选取和控制各 X 值，能够改进过程输出 Y。值得强调的是，在众多 X 中，只有少数 X 对 Y 起决定性的影响。我们称这些 X 为关键 X 或关键输入变量（key process input variables，KPIV）。

2. 过程负责人和相关方

在过程管理中，很重要的一点是明确对过程负有管理职责的人员，通常称其为该过程的负责人。

每一个过程都有顾客和受过程输出影响的其他相关方（他们可以是组织内部的，也可以是外部的），他们是过程输出（即产品）的接受者，即广义的顾客。利益相关方指组织的行动和成功所影响的所有群体，关键的利益相关方通常包括顾客、股东、供应商及合作伙伴、员工以及社区等。图 3—2 中蒸汽生产过程的利益相关方包括预期产品过热蒸汽、热水的顾客，非预期产品烟尘、废气、废渣和热量的影响者——社区（环境），过程信息输出（报表、记录）和过程绩效（产值、成本、效率）的影响者——股东及管理层，过程健康安全的影响者——员工，还包括过程输入的外部供应商——水厂、煤矿和内部供应商——空压站、计划部、技术部、财务部、人力资源部等。

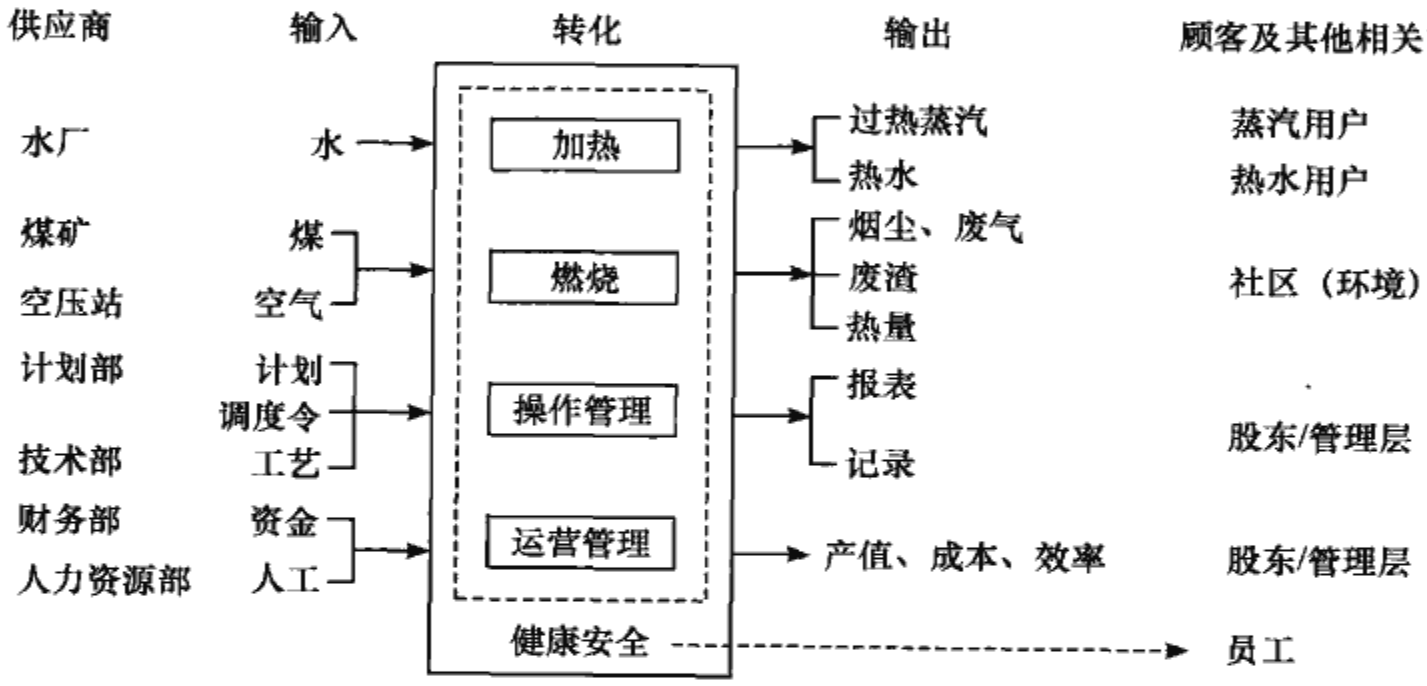


图 3—2　过程要素分析

3.2　六西格玛项目范围界定——SIPOC

在项目的界定阶段，为了识别项目重点关注的内部流程，需要将内部流程与顾客关键要求联系起来，在此基础上，清晰地界定项目范围。这个识别过程首先从宏观的流程分析开始。而 SIPOC 分析方法正是通常使用的宏观流程分析方法。

1. SIPOC 图的构成

SIPOC 图也称高端流程图，名称来自供方、输入、过程、输出和顾客的第一个英文字母的缩写，如图 3—3 所示。其中：

供方（supplier）：提供输入的组织或个人，在六西格玛项目管理中，专指向过程提供关键信息、材料或其他资源的组织或个人，供方可以是内部的也可以是外

部的。

输入（input）：供方提供的输入（信息和资源，包括人员、机器、材料、方法、环境等）。

过程（process）：将输入转化为输出的活动。过程是使输入发生改变的一组步骤，理论上，这个过程（由这些步骤组成的过程）将增加输入的价值。

输出（output）：过程的结果。

顾客（customer）：接受输出的人、组织或过程。

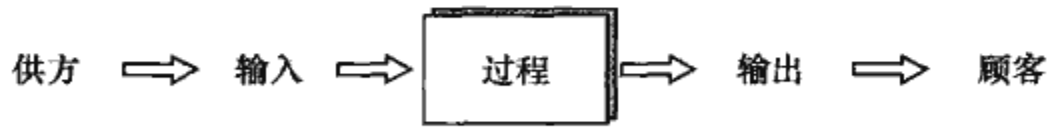


图 3—3 SIPOC 图

SIPOC 图中还可以加上过程输入和过程输出的基本要求，用来表示一个业务流程或产品（服务）实现过程中的主要活动或子过程，帮助项目团队界定过程的范围和过程的关键因素，确定关键输入变量（KPIV）和关键输出变量（key process output variables，KPOV）。SIPOC 图的优点是：能在一张简单的图中展示出从输入到输出的跨职能活动。因此，在项目界定阶段应使用 SIPOC 分析和 SIPOC 图，来识别项目涉及的主要业务流程和相关职能，确定项目范围，识别项目相关方并组织项目团队。此外，通过 SIPOC 分析，使项目团队保持对流程的宏观认识也是非常重要的。

2. SIPOC 图绘制步骤

为了提供一份宏观的过程步骤和关键的供方、输入、输出与顾客关联关系的 SIPOC 图表，需要确定项目所关注的过程起点和终点，在此基础上，确定相应的供方和输入，以及输出和顾客（包括组织内部的和外部的顾客）（见表 3—1）。

表 3—1　　SIPOC 工作表

供方	输入	过程	输出	顾客

西蒙（Simon）建议，可采用下述办法带领团队来绘制 SIPOC 图：

（1）用一块足够大的墙面或白板，供团队成员来讨论和列写过程的供方、输入、过程、输出和顾客，直到最后确定它们。

（2）过程的步骤不宜列得过细，只需用 4～5 个关键宏观步骤来表达从输入到输出的核心业务流程。

（3）团队讨论过程的输出。过程有哪些结果（产品或服务）产生？应该包括哪些内容？过程的输出点或结束点应该在什么地方？

（4）列出过程输出的顾客。谁是过程结果的用户/使用者？

（5）列出过程的输入。过程的输入来自何处？

（6）列出提供输入的供方。谁是关键的供方？

（7）顾客的主要要求是什么？

（8）与团队的负责人、流程主管、倡导者以及其他相关方一起，确认项目的SIPOC图。

表3—2是一个设备租赁过程的SIPOC工作表的例子。

表3—2　　设备租赁过程的SIPOC工作表（示例）

供方S	输入I	过程P	输出O	顾客C
申请人	租赁申请	（见下表）	批准的申请表	申请人
	资质证明		出租的设备	
	信用证明		随机文件	
信用调查部门	信用报告		服务信息	

过程（process）

顾客信用调查	⇨	设备确认与准备	⇨	随机文件的准备	⇨	收抵押金	⇨	交付

3. SIPOC图的检查

为了保持SIPOC图的正确性，可采取下面一些检验活动：

（1）如果在SIPOC图的“P”中，步骤数量超过了7～8个，则可能项目团队对过程的考虑过于详细了。在项目界定阶段，需要在比较宏观的层面上把握项目范围，审视项目需要关注的流程，需要以宏观视角将需要包括在项目工作中的相关过程识别出来。过细的流程图可能会导致团队的视角变窄，忽略了应该在项目中考虑的跨职能合作问题。

（2）如果SIPOC图显示出需要对项目涉及的步骤、输出或输入进行重新确定，则意味着需要调整项目的范围。

3.3　六西格玛过程绩效度量指标

3.3.1　确定项目测量指标

1. 关键质量特性的树图展开

六西格玛项目实施中通常使用树图分析技术将关键质量特性（CTQ）进行适当的展开，CTQ树图将帮助项目团队选择出与顾客满意密切相关的关键变量。一个CTQ展开树图可以将最初的顾客要求转化成可量化的产品或服务的要求，而这些可量化的变量可以视为过程的输出（Y）的关键测量项。

一个CTQ树图的展开过程将从一般的顾客要求开始逐层展开至具体的过程输出要求，或者说从难以测量的特性逐步展开至容易测量的特性。一般说来，将一般需求展开到过程的CTQ，需要经过2～3个层次的展开。

构建 CTQ 树图的步骤如下：

(1) 识别顾客。

(2) 识别顾客要求。

(3) 识别第一层顾客要求。

(4) 逐层细化到适当的层次。

(5) 确认这些要求，以确保 CTQ 树图反映顾客要求。

例 3—1 某快餐店的 CTQ 树图的展开。

该快餐店的顾客是那些希望方便快捷地解决吃饭问题的消费者。他们的主要需求是：方便快捷地订餐。各层 CTQ 树图展开见图 3—4 的示例。

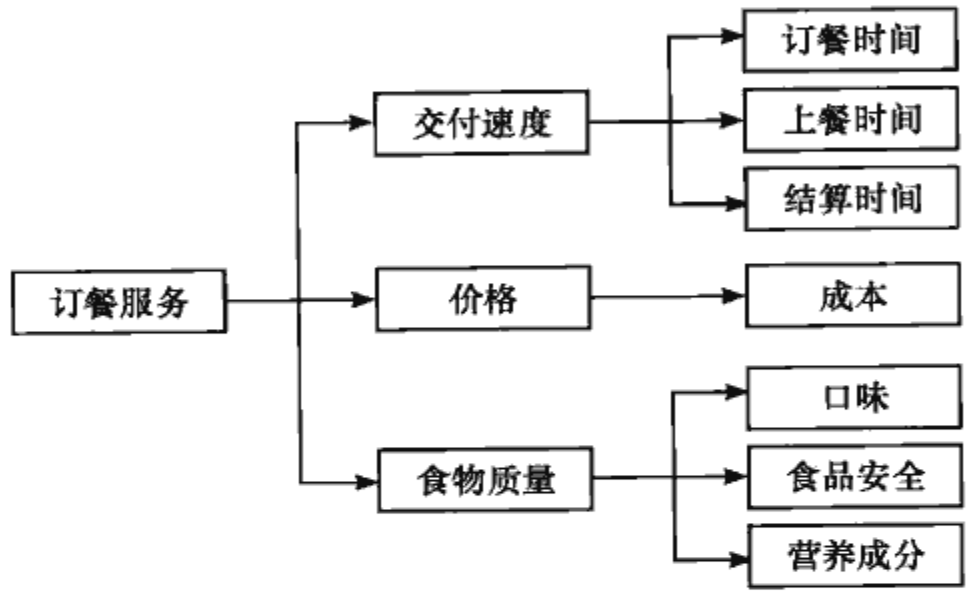


图 3—4 快餐店 CTQ 树图展开示例

2. 建立测量指标

在 CTQ 树图展开的基础上，团队需要针对项目关注的 CTQ 选择适当的测量指标，以便建立测量、确定标准、定义缺陷。可以按下述步骤选择出适用的 Y 的测量指标：

(1) 测量指标的选择。在界定阶段，团队确认了 DMAIC 项目要解决的主要问题，以及关键的顾客要求。这时要根据测量来获得对问题严重程度及出现频率的了解，以及对于顾客要求的达成程度的评判。在选择测量指标时应注意测量指标对问题分析的价值，以及收集数据的可行性和难易程度。表 3—3 是选择测量指标时的一些参考建议。

表 3—3 选择测量指标时的一些参考建议

可用性/测量指标的价值	可行性/难易程度
√ 与重要的顾客要求有关	√ 是否有历史数据供分析使用
√ 能准确表达顾客要求的满足程度	√ 测量周期是否很长
√ 易于暴露问题与改进机会	√ 测量是否复杂
√ 可以作为与其他组织进行对比的标杆	√ 是否与其他测量指标冲突
√ 可以持续测量并提供有价值的信息	√ 是否可以重复和再现

（2）用 CTQ 树图来确认测量。通过 CTQ 树图展开，Y 的测量会进一步明确。可以通过 CTQ 树图进一步明确项目的测量。例如，图 3—4 对快餐店的顾客来说，顾客要求的一个重要方面是交付速度，这个问题也是团队重点要解决的问题。那么，团队选择的测量指标可以是：1）订餐时间；2）上餐时间；3）结算时间。对于这些测量指标，团队可以考察它们的可用性和可行性，以确认它们是否是合适的测量指标。

（3）测量指标的细化及测量评估。更加详细的测量以及数据收集方法的确定，对整个项目的实施会非常有帮助。但是，在项目界定阶段，关于测量指标的选择在比较高阶的层面上展开即可。更加详细的测量以及数据收集的方法，将在测量阶段展开，这里不再赘述。

3.3.2 关键输出变量的确定——排列图法

在前述过程的基础上，项目团队应当进一步确定项目应关注的关键输出变量（KPOV）或称为 CTQ。通常采用排列图确定过程的 KPOV。

排列图是建立在帕雷托原则之上的，即 80%的结果源于 20%的原因。排列图的目的是比较不同的缺陷类型所导致的结果或对顾客的影响，以便找出最重要的需要优先关注的问题；设置优先权并定义问题/机会；确定关键输出变量。

一般来说，排列图的作图步骤如下：

步骤一：收集过程输出在某时间段内的数据，并确定过程输出中都有哪些不符合顾客要求的缺陷项。

步骤二：将各项缺陷发生的频数按从大到小的顺序排列，计算各自占总缺陷数的比率和累积比率。

步骤三：将横坐标按从大到小的顺序，依次列出各种缺陷项。

步骤四：以左侧纵坐标为缺陷发生频数，右侧纵坐标为频率。

步骤五：在横坐标上的每个缺陷项处，画出与其发生频数对应的矩形。

步骤六：由左至右累加每个缺陷项的比率，画出累积频率曲线。

表 3—4 和图 3—5 是某顾客服务过程输出缺陷排列图作图和分析的一个例子。

表 3—4　　某顾客服务过程输出缺陷排列图计算表

缺陷类型	发生频次（2005 年 1—10 月）	累积缺陷数	频率（%）	累积频率（%）
A：顾客等待时间长	51	51	51	51
B：迟于规定时间回复	25	76	25	76
C：回复不准确	13	89	13	89
D：遗漏顾客信息	7	96	7	96
E：账单错误	2	98	2	98
F：收费错误	2	100	2	100
合计	100		100	

图 3—5 是根据排列图计算表 3—4 作出的排列图。

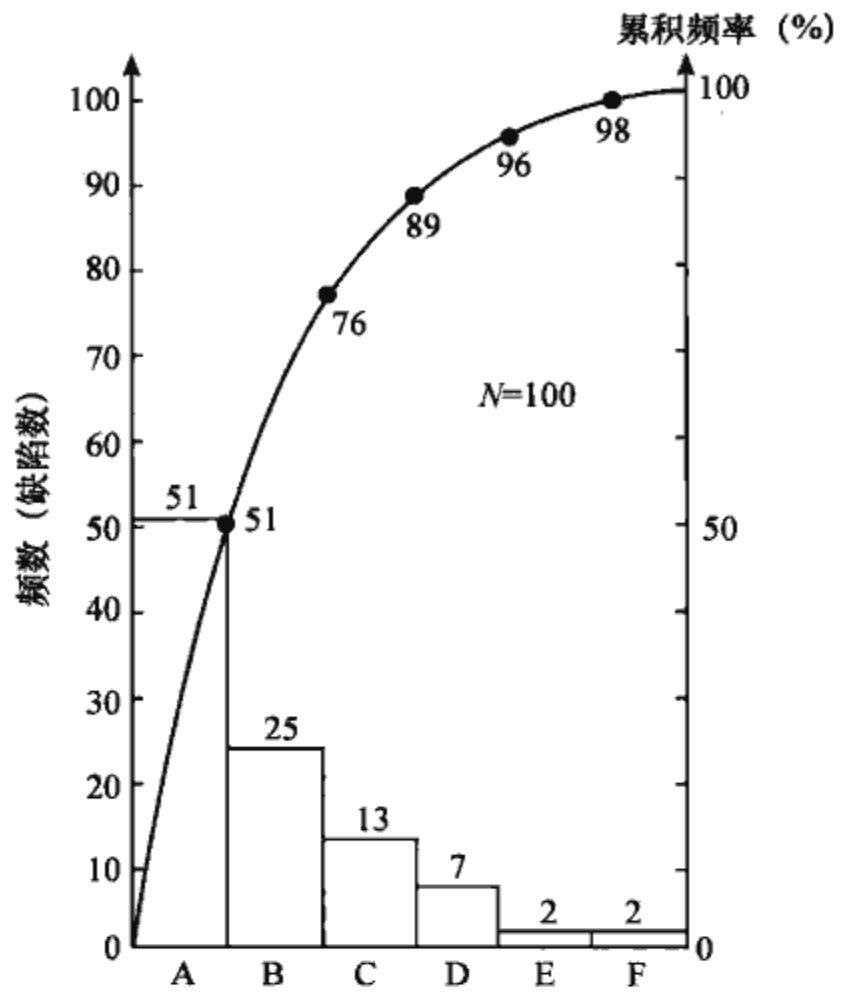


图 3—5　顾客服务过程缺陷的排列图

从排列图可以看出，占发生频次总数 80%左右的缺陷是 A 类缺陷和 B 类缺陷。因此，项目需要改善的过程关键输出变量应该是：（1）顾客等待时间；（2）回复时间。

采用计算机作排列图时，作图步骤将大大简化。图 3—6 所示的是用 MINITAB 软件作出的某铸造过程输出缺陷的排列图。从这张排列图上可以看出，项目应当关注的过程关键输出变量（KPOV）或项目的 Y 应当是“气孔”和“夹渣”，这两种缺陷占过程输出总缺陷数的 82%左右。

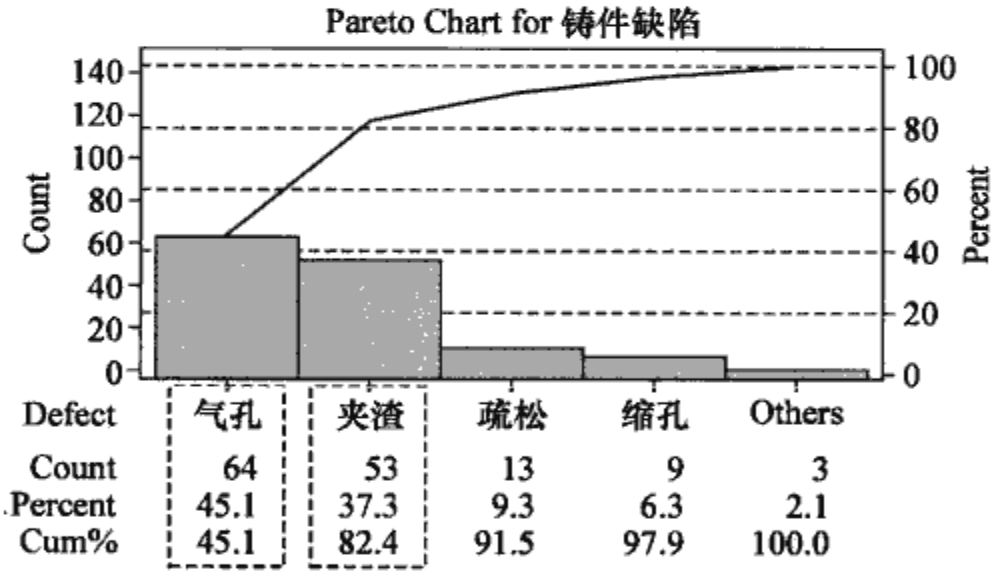


图 3—6　某铸造过程输出缺陷的排列图

3.4　项目目标的确定

项目目标是团队共同努力的方向，是六西格玛期望达到的效果。组织需要在参

考自己历史最优数据和竞争对手的目标之后，确定自己的项目目标。制定目标看似是一件简单的事情，但是如果上升到技术的层面，就必须学习并掌握 SMART 原则。

SMART 原则是对六西格玛项目目标进行评估的重要方法。第一，项目目标必须具体，比如，“降低库存量”就不是一个具体的目标，没有指出是什么类型的库存，如是在制品、原材料还是产成品，不同类型的库存成因是不同的，不能一概而论。第二，项目目标必须可以测量，能够量化。有的项目目标可能比较容易量化，有的就比较困难，如顾客满意本身就是一个难以量化的指标，但是现在一般采用问卷调查和统计分析工具把它量化出来。项目目标不能量化，就难以考核目标是否达成。第三，项目提出的指标必须是可行的，是通过项目组的努力可以达到的，项目目标既要有挑战性，又要有可行性。一般在制定目标时，要考虑历史上的本流程的最佳水平以及与同行最佳水平比较的结果。第四，项目的目标必须与企业的战略相联系，与战略的大方向保持一致或者能够支持企业战略目标的实现。第五，项目目标的实现要给出时间节点，如果总目标下有分目标，也要给出分目标实现的具体时间节点。

3.5 六西格玛项目效益的预估和风险分析

3.5.1 六西格玛项目效益的预估

1. 经济性——六西格玛的核心特征

ISO/TR10014《质量经济性指南》给出了质量经济性管理的两个基本要素：提高顾客满意度和降低资源成本。而这恰恰是六西格玛管理的基本原则和核心特征（见图 3—7）。

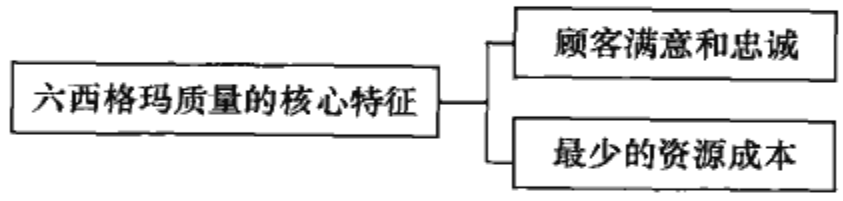


图 3—7 六西格玛质量的核心特征

降低资源成本是六西格玛管理的一个重要原则。六西格玛追求零缺陷，其最终目的在于降低风险，一方面可以降低顾客购买产品或服务的风险，另一方面也降低产品或服务提供者的风险。换言之，应用六西格玛来降低风险意味着绩效的提高，如质量、能力、周期时间、库存以及其他关键因素。这样，客观上降低了企业为纠正缺陷和防范风险所需的成本，从而实现了真正意义上的低资源成本。

2. 六西格玛管理与财务收益

每个六西格玛项目应能为企业带来合理的回报，特别是经济效益的回报。因此，在项目界定阶段，就需要对六西格玛项目能否为企业带来财务收益进行预估。

可从下述方面估算六西格玛项目的效益：

（1）增加收益。从增加收益方面看，实施六西格玛管理对顾客而言，可以减少费用、改进适用性；对企业而言，可以提高利润和市场占有率。实现途径如下：

1）开发新的、特有的产品和服务，或改进现有的产品和服务，并缩短进入市场所需的时间。

2）开拓现有产品或服务的市场，提高满意度和忠诚度，赢得信誉，增加市场份额。

下面列出了在缩短周期时间、加快资金周转以及提高准时交付率方面所增加收益的计算方法：

- 缩短周期时间、加快资金周转（应收款、库存）。

$$\text{效益}=\frac{\text{年销售额}\times\text{加权资金成本}\times\text{缩短的天数}}{360}$$

式中：

$$\text{加权资金成本}=\frac{\text{借款利率}\times(1-\text{所得税率})\times\text{借款}}{\text{借款}+\text{权益}}+\frac{\text{权益报酬率}\times\text{权益}}{\text{借款}+\text{权益}}$$

$$\text{权益报酬率}=\frac{\text{净利润}}{\text{期初所有者权利}}$$

- 提高准时交付率。

$$\text{效益}=\frac{\text{订单总金额}\times(1-\text{平均交付率})\times\text{资金回报率}\times 360\text{ 天}}{\text{交付期}}$$

例 3—2　某六西格玛项目将从送货到货款回笼的平均时间由 30.6 天缩短到 26.6 天。如果公司 2005 年的预计销售额为 400 000 000 元，预计净利润 50 751 000 元，期初权益 123 839 053 元。公司的借款金额为 80 550 000 元，借款利率为每年 5.94%，公司的权益报酬率为每年 40.98%，所得税率为每年 12%。则该项目全年的收益是多少？

$$\text{项目收益}=\frac{\text{2005 年销售额}\times\text{加权资金成本}\times\text{缩短的天数}}{360}=1\,195\,111.11\text{（元）}$$

经过计算，该公司的加权资金成本为每年 26.89%，由于该项目缩短了回笼天数 4 天，则经核算全年共计节约 1 195 111.11 元。

（2）降低成本。从降低成本方面看，实施六西格玛管理对顾客而言，可以减少购置费、运行费、保养费、停机损失和修理费以及可能的处置费用；对企业而言，可以降低产品生命周期全过程的缺陷，包括不满意的产品返工、返修、更换、生产损失、担保和现场修理等发生的费用，以及承担产品责任和索赔风险。实现途径如下：

1）降低符合性成本：重新设计以获得更高的过程能力，提高现行过程能力和提高技能等。

2）降低非符合性成本：减少浪费，减少废品和返工返修，减少停工损失，减

少超支，减少污染和顾客退货等。

下面列出在降低成本方面的计算方法：

- 降低成本。

效益＝产量×单位成本降低额

- 降低不合格率。

效益＝产量×(改进后 RTY－改进前 RTY)×单位成本

式中，RTY 表示流通合格率，是指整条生产线的一次合格率。

3. 基本财务模型

由于投资可以获得升值，因此财务理论认为货币有时间价值。货币时间价值是财务决策理论的基础，对应于今天可用的一定金额的钱就视为“现值”（present value，PV），在未来可收回或可支付的一定金额就视为“终值”（future value，FV）。

(1) 终值与现值。六西格玛管理可以提高企业经济效益，实际上六西格玛项目也是“投资”，当然也有“回报”，即“终值与现值的差额”。

$$FV=PV\times(1+\iota)^n$$

式中，ι 为利率；n 为有效（计息）期。

(2) 净现值（net present value，NPV）。评价六西格玛项目的成本和收益时，成本和收益通常是以现金流的方式产生的，而不是一下子全部出现。一般，现金流不是均匀的，每次现金流的金额可能都不相等。净现值是指将投资项目在有效期内或寿命期内的净现金流量按一定的折现率全部折算到零期的累计现值之和，其表达式为：

$$NPV=\sum_{t=0}^{n}(CI_t-CO_t)(1+\iota_0)^{-t}$$

式中，CI_t 为为第 t 年的现金流入量；CO_t 为第 t 年的现金流出量；从而 (CI_t-CO_t) 为第 t 年的净现金流量；ι_0 是项目的收益率。

如果净现值大于零，六西格玛项目在经济上是可行的。净现值越大，六西格玛项目的回报就越大。净现值小于零，则该项目的经济性不好，不可行 。

(3) 内部收益率（internal rate of return，IRR）。内部收益率是考虑货币的时间价值的财务分析评价方法，它是根据方案的现金流量计算出的方案本身的投资报酬率，是指能够使未来现金流入量现值等于未来现金流出量现值的贴现率，或者是说使投资方案净现值为零的贴现率。

IRR 的算法：找到贴现率 ι_1，使 $NPV_1>0$；找到贴现率 ι_2，使 $NPV_2<0$，然后利用插值法得到 IRR 的值，计算公式如下：

$$IRR=i_1+(\iota_2-\iota_1)\frac{NPV_1}{NPV_1+|NPV_2|}$$

例 3—3　如果某团队改进方案用 18%的贴现率计算，财务净现值为－499 元，用 16%的贴现率计算，财务净现值为 9 元，则项目的财务内部收益率为：

$$IRR=16\%+\frac{(18\%-16\%)\times 9}{9+|-499|}=16.04\%$$

有关净现值和内部收益率的计算可用 Excel 软件来实现。

（4）投资收益率或回报率（return on investment，ROI）。

$$ROI=\frac{\text{项目预计收益}}{\text{项目预计成本}}\times 100\%$$

例 3—4　某团队项目效果核算如表 3—5 所示。

表 3—5　　项目六西格玛改进效果核算表（减少不合格品的收益）

年产量	10 000 件
单件成本	1 200 元
不合格品率降低	由原来的 10%降低到 2%
报废的单件产品价值（按回收废品处理）	100 元
年节约额	8%×10 000×(1 200－100)=880 000（元）
项目改进成本（第一年的咨询、培训和夹具制作等）	20 000 元
第 1 年 *ROI*	(880 000/20 000)×100%=4 400%

4. 质量成本和不良质量成本

（1）质量成本概念的演进。质量成本的概念是 20 世纪 50 年代由美国质量管理专家朱兰、费根堡姆等人首先提出的。其定义是：为了确保和保证满意的质量而发生的费用以及没有达到满意的质量所造成的损失。它是企业生产总成本的一个组成部分。

传统的质量成本由以下四部分构成：

1）预防成本，指为了预防故障所支付的费用。一般包括质量策划费用、过程控制费用、顾客调查费用、产品设计评审和鉴定费用、体系研究和管理费用、供应商评价费用、培训费用以及其他预防费用。

2）鉴定成本，指为评定质量要求是否被满足而进行试验、检验和检查所支付的费用。一般包括检验和试验费用、计量服务费用、质量审核费用以及其他鉴定费用。

3）内部故障（损失）成本，指产品在交付前，不能满足质量要求所造成的损失。一般包括报废损失、返工返修损失、降级损失、停工损失、质量事故处理费用、纠正措施费用以及其他内部故障费用。

4）外部故障（损失）成本，指产品在交付后，不能满足质量要求所造成的损失。一般包括产品售后服务及保修费用、顾客投诉处理费用、产品责任费用等外部故障费用。

传统的质量成本在故障成本方面的收集范围过窄，而且忽视了三个方面的“隐藏成本”：一是工作和过程质量（特别是非生产过程的工作和过程质量）故障损失；

二是尽管生产的是合格产品但过程效率低带来的损失，这种低效率来自过大的资源消耗和非增值的过程步骤等；三是由于不良质量而导致的销售损失，包括因质量问题以及产能不足而导致的顾客流失损失等。

这导致了人们对故障成本的过低估计，以至于认为在低于100%合格水平的某处存在一个“适宜的质量成本”。当我们将三个方面的“隐藏成本”分别加入内部、外部故障成本后，可以得出如图3—8所示的现代质量成本模型。

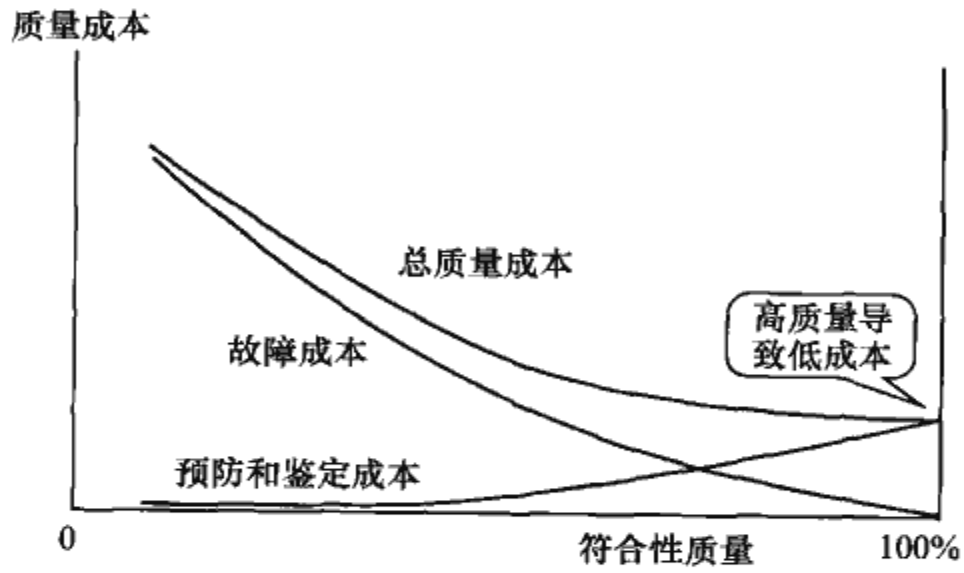


图3—8　现代质量成本模型

组织在推行质量成本管理的初期，注重通过增加预防和鉴定成本来降低内外部故障成本，随着质量水平和经营管理成熟度的提升，将着力于通过增加预防成本以降低鉴定成本和故障成本。完美无缺无疑是我们的向往，从长远和总体的角度看，质量水平越高，其质量成本越低，即所谓“质量是免费的”。

(2) 符合性成本、非符合性成本与不良质量成本。质量成本根据其性质又可分为符合性成本（cost of conformity）和非符合性成本（cost of unconformity）。符合性成本是指在现行过程无故障情况下完成所有顾客需求所支付的费用；非符合性成本是指由于现行过程的故障而造成的损失。符合性成本包括预防成本和鉴定成本（预先检验预防部分）；非符合性成本包括鉴定成本（查明故障原因部分）和故障成本（内部+外部）。

六西格玛管理要求降低经营资源成本，因而要降低非符合性成本和符合性成本。非符合性成本是不增值的，而符合性成本由增值和不增值两个部分组成。要通过有效的手段，找出不增值的部分加以改进，即消灭所谓的隐蔽工厂，从而降低成本。于是人们又构筑了不良质量成本的概念（见表3—6），即：

$$\text{不良质量成本}=\begin{matrix}\text{预防成本和鉴定成本中的}\\ \text{不增值部分}\end{matrix}+\text{故障成本}$$

表3—6　　不良质量成本的构成

不良质量成本	符合性成本	预防成本（不增值的部分）
		鉴定成本（预先检验预防的不增值部分）
	非符合性成本	鉴定成本（分析故障原因）
		故障成本（内部和外部损失）

这一概念已经广泛地用于六西格玛管理，是指由于质量不良而造成的成本损失，或者说是由于我们没有“第一次就把事情做对、做好”而额外付出的成本。由于质量不良而造成的成本损失是十分惊人的，遗憾的是这部分成本往往不为人们所知。

我们已经讨论过这样的问题：六西格玛值得推行吗？问题的反面是：假定不推行六西格玛，代价如何？维持现状，不作改进的成本又如何？对组织而言，维持现状或许是正确的选择。但组织应该先比较维持现状的成本与改进现状的成本，才能作出正确的决定。因此，即使是符合性成本，也应该认真加以研究，探索改进的空间。我们应该同时考虑对效率（efficiency）和有效性（effectiveness）的改进。

不良质量成本的观念将有助于我们挑选或者界定六西格玛项目，因为在成本节省方面是否有潜力是选择项目的重要考虑事项之一。在项目初期进行不良质量成本的测算，可以作为项目选择的依据，也有利于明确项目改进的方向，同时，也为项目总结时评估项目财务效益奠定基础。如果项目团队能够根据各项目的不良质量成本金额大小制作排列图，然后制定改进的优先顺序，那将是十分有效的，当然要花很大的工夫。

3.5.2 六西格玛项目风险与分析

一般说来，六西格玛项目不会完全按照预期的那样顺利进行，一些意外情况的发生会给项目带来很大的影响，甚至会导致项目的失败。这就需要提前识别风险并有效管理风险。因此，需要对项目进行风险分析并在此基础上制定风险管理计划。风险管理计划的制定可以参照风险识别、风险评估、风险管理三个步骤完成。

（1）风险识别。一般地，项目风险来源于两个方面：一是项目本身；二是项目外部，如企业战略的调整、行业政策的变化等。团队可以运用头脑风暴法从以上两个方面去识别项目风险。

（2）风险评估。团队对于已经识别的风险进行评估，评估每项风险对项目威胁的大小，针对可能对项目造成较大威胁的风险制定预防及应急计划，进行风险管理。一般对风险的评估从三个方面进行：风险发生后果的严重性、风险发生的概率、及时发现风险的难易程度（见表3—7）。

表3—7　　对某风险的评估

风险	后果的严重性	发生的概率	及时发现的难易程度	总体威胁
1. 订单量激增	M	H	L	L
2. 订单量严重不足	H	M	L	M
3. 熟练员工大量流失	H	L	H	M
4. 工时统计不及时	H	M	L	H
5. 新产品推出慢	H	H	L	M
6. 订单模式的变化大	M	H	M	M
7. 工艺的重大变化	M	M	H	M

说明：H代表高；M代表中等；L代表低。

总体威胁决定风险管理的优先顺序。对于总体威胁中等及总体威胁大的，要制定风险预防计划。

（3）风险管理。主要从三个方面来考虑制定风险预防计划，包括预防措施、应急措施、风险发生的临界定义，最好指定一名风险负责人（见表 3—8）。

表 3—8　　对某风险的预防

风险	预防措施	应急措施	临界定义	责任人
2. 订单量严重不足	培养一岗多能的弹性用工	优化生产安排	任务量低于 2 000 台	王小明
4. 工时统计不及时	专人负责统计	由生产处经理主管监督	连续两次发现有损失工时不报的情况	周大海
5. 新产品推出慢	试生产阶段做好工程准备	调整项目计划	新品试生产上线一周后，效率达不到正常水平	赵明
6. 订单模式的变化	研究批次、每批任务量与效率之间的关系	调整项目计划	小批次特配订单任务量超过 50%	孙峰
7. 工艺的重大变化	加强对质量问题的监控	调整工艺及人员	批次性质量问题，加严测试	王小明

3.6　六西格玛项目立项表和计划

1. 项目立项表和计划概述

编制和完善项目立项表（或称项目特许任务书）是界定阶段工作的主要输出，项目立项表将表述项目的范围，阐明团队使命，陈述问题和机会，明确项目的目标和预期收益，并且帮助团队沟通各自的分工和计划。立项表是项目工作的第一个并且通常是最重要的里程碑，团队开始实施项目之前，立项表必须先由倡导者等领导批准。

作为界定阶段团队活动标志性的成果，立项表直接反映了项目团队活动的质量，直接关系到项目的进展和 DMAIC 过程的实施。项目立项表是正式批准项目的文件，该文件授权六西格玛项目组长（黑带或绿带）在项目活动中动用组织的资源。项目立项表包括以下要素：

（1）项目名称；

（2）项目背景及选择理由；

（3）问题/机会陈述；

（4）目标陈述；

（5）项目团队组成及职责分工；

（6）项目涉及的过程和职能范围、约束和假定；

（7）项目利益相关方及其影响；

（8）总体里程碑进度表（阶段性任务及时间安排）；

（9）倡导者的批准和授权。

项目立项表一般应由项目组长组织项目成员一起讨论、分析，制定出初稿，报企业负责六西格玛协调、推进的资深黑带或承担类似职责的主管人员，或培训师、咨询师审议，最后报送发起该项目的倡导者批准。

项目立项表的完善是一个动态的过程：在六西格玛项目的界定阶段，应对项目立项表要素进行进一步的明确和更新；当测量阶段结束后，如果项目过程绩效基线数据与界定阶段不同，也应对问题/机会和目标陈述予以必要的更新和完善；当项目总结时，基于项目立项表评价项目目标的完成情况等。

2. 项目规划工具

有很多工具和技术都可以协助项目团队制定项目时间表，按时间分配资源，在项目计划的实施过程中跟踪项目的进展。下面介绍最常用的甘特图。

甘特图显示了随着时间的推移，项目任务之间的关系。甘特图的横轴是时间单元（天、周、月等），纵轴是需要完成的活动。条形显示了各个活动的估计开始时间和持续时间。表3—9是某企业六西格玛项目界定阶段的甘特图。

表3—9　　六西格玛项目计划甘特图

D阶段	周（5月4—31日）			
任务	第1周 5月4—10日	第2周 5月11—17日	第3周 5月18—24日	第4周 5月25—31日
评价项目立项表和确定项目				
确定顾客需求的关键质量特性（CTQ）				
确认关键输出变量（KPOV）				
界定不良质量成本				
估算σ质量水平，评价现有数据				
完成界定阶段，着手测量计划				

甘特图可以进行一些功能上的增强，如增加里程碑事件的标志、项目进展图示、任务负责人等。

甘特图是在20世纪早期发展起来的经典的计划制定工具，具有形象、直观、简明、易懂、作图简单等优点，至今仍是行之有效的制定计划的方法。用甘特图制定项目计划时，必须清楚任务之间的相互关系，即哪些任务在其他任务开始之前必须完成，哪些任务可以同时进行。传统甘特图的主要缺点之一是不能在图上清晰和严密地显示各项任务之间相互关联、互为条件、互为因果的依存关系，以及在时间上的先行和后续的衔接关系。因此，如果一项任务被延误，其他哪些任务将会受到影响就不能明显地表示出来。不过，大多数项目管理软件包（如Microsoft Project）能够提供通过应用连接箭头表示任务间相互依存关系的甘特图。

3. 项目文档

作为六西格玛项目管理的一部分，规范一致的项目文档是必需的。这些规范的文档对于持续改进活动及知识的积累都会起到很好的作用。在项目实施过程中，应有专人负责对这些文档进行动态的归集、管理和维护，进行阶段性的审查，并在项目完成后交由六西格玛管理机构或档案管理部门存档。随着信息化时代的到来，使用电子文档来保存项目全寿命周期的信息将越来越普遍。

不同的企业会制定不同的六西格玛项目文档的模板及记录要求，但通常会包含以下内容：

（1）项目立项表及其更新；
（2）项目计划（甘特图等）及其更新；
（3）不良质量成本测算报告；
（4）项目收益预测与资源需求预算；
（5）团队规则；
（6）会议纪要、电子邮件及学习笔记等；
（7）项目状态分析资料、报告及演讲材料；
（8）项目效果测评（包括成本—收益分析）和确认；
（9）行之有效的措施的标准化（程序、图纸等的更改）；
（10）项目总结报告（包括经验教训）、成果发布和分享材料。

一般来说，推行六西格玛管理的企业都要建立六西格玛项目的审批流程及项目管理制度，其中应规定对项目文档管理的具体要求。

4. 六西格玛项目立项表样例

表 3—10 为某公司的六西格玛项目立项表。

表 3—10　　某公司的六西格玛项目立项表样例

DMAIC 项目立项表	
项目名称 ：缩短 SM300 系列出口产品交付周期，提高市场竞争力	
项目领导 ：李向阳	团队成员： 李向阳：项目负责人（黑带） 于一周：生产计划部副部长（绿带） 孙代红：供配部成品采购组组长（绿带） 张成雨：装配车间主任（绿带） 王德西：成品总库副主任（绿带） 李　红：工程部副总工程师（绿带） 章法强：质量保证部 SM300 经理（绿带） 强　为：财务部业务经理
选题背景： 进入新一代数码仪产品国际市场是企业“十一五”计划期间重要战略增长点。2005 年，首批进入国际市场的 SM300 系列产品，遇到了较强的市场竞争。竞争压力主要来自交付周期。主要竞争对手的交付周期达到了 10 天，而本企业 SM300 的交付周期平均为 18 天。由此带来的直接市场损失为 2 600 万美元/年。	
问题/机会陈述： 统计数据表明 2005 年 6—12 月，SM300 数码仪的平均交付周期为 18 天且波动较大，最快的交付批其交付周期可以达到 8 天，但最迟的交付批达到了 32 天。如果以交付周期不超过 12 天为标准，则大约有 82%的交付批次超过了这个标准。	目标陈述： 本项目的预期目标是：以交付周期不超过 12 天为标准，到 2006 年年底将 SM300 系列产品的交付周期超过 12 天的比例（缺陷率）从 82% 降低到 25%。

续前表

DMAIC项目立项表			
项目范围、约束和假定： 本项目范围是从生产计划、采购/配套、装配调试到包装发运的业务流程		相关部门： 生产计划部、供配部、装配车间、成品总库、工程部、质量保证部	
预期计划	目标日期	实际日期	评审
开始日期			
界定（define）	3月28日		
测量（measure）	4月15日		
分析（analyze）	5月15日		
改进（improve）	6月15日		
控制（control）	7月15日		
完成日期	8月30日		

项目主管：李向阳　　业务主管：洪常　　倡导者：王广昌
日　　期：2006-03-28　　日　　期：2006-03-30　　日　期：2006-04-01



本章小结

界定阶段的主要工作是识别顾客需求，明确要解决的问题，明确过程输出变量的测量和标准，确定项目涉及的内部流程以及对项目的财务收益进行预估，从而确立项目责任以及项目目标和项目实施关键步骤或里程碑。在此基础上，组织六西格玛项目团队，并且发挥六西格玛组织体系的作用，使六西格玛项目实现其预期目标。

界定阶段的成果应该包括：清晰完备的问题输出，基于SMART原则的项目目标改进，正确合理的财务收益预估，适当的项目范围，填写完备的项目立项表。

界定阶段的主要输出是“项目立项表”。通过项目立项表来全面回答以下问题：

（1）为什么企业需要关注本项目提出的问题？它与企业战略目标和顾客满意的关系是什么？

（2）如果这个问题不解决的话，将会产生什么后果？给企业带来的损失是什么？

（3）项目欲解决问题的陈述是否明确？

（4）问题陈述描述了哪些缺陷和现象？

（5）项目目标陈述符合SMART原则吗？

（6）项目团队的职责与项目范围是否相适应？

（7）团队成员来自项目涉及的相关部门吗？

（8）项目是可控的吗？

（9）如何测量（用通用术语描述团队将如何测量它）？

在界定阶段相关工具常见的有：SIPOC分析，排列图，甘特图，项目计划，项目立项表等。

第4章

测　量

作为 DMAIC 过程的第二阶段，测量既是界定阶段的后续活动，也是连接分析阶段的桥梁，测量是六西格玛项目的关键环节，是以事实和数据驱动的六西格玛管理思想的具体体现。

测量阶段有两个目的：一是收集过程输入与输出的测量数据，确认并量化问题和机会；二是对过程数据进行分析，确定输出的波动规律，为查找原因提供线索；同时了解当前绩效水平与顾客要求或组织目标之间的差距，识别实现项目目标可能的途径和改进方向。

测量欲达到以上目的，需借助大量的工具和方法，如各种过程分析工具，文档和图形分析工具以及过程能力分析方法等。为保证测量数据的准确性与可靠性，还需评估测量系统的能力。

4.1　过程分析与文档

过程是“一组将输入转化为输出的相互关联或相互作用的活动”。任何的生产、服务、管理活动均可看作一系列的过程。过程输出的种类很多，可以是实际产品、生产效率，也可以是无形服务等。过程分析是对过程中影响过程输出的各类输入因素进行分析，找出具有重要影响的因素，调查确认这些因素与过程输出之间的关系，进而对过程输出进行改进。对需要改进的过程进行分析，需考察这些过程的构成与步骤，目的在于使项目团队对该过程达成统一认识，对产生问题的区域进行定位，识别与改进过程非增值步骤，形成过程步骤的文档记录，以便与改进后的过程进行对比分析。

以下介绍一些过程分析的基本工具及常用文档。

4.1.1 流程图

流程图是描述过程各项活动所遵循顺序的图形文档，它将整个过程的各个步骤用图的形式表示出来。绘制流程图有助于加深对过程的理解，对于流程图的分析可以发现过程中潜在的问题，对产生问题和缺陷的重点区域进行定位，如系统的瓶颈、非必需步骤、非增值步骤等。流程图由一系列容易识别的标志构成，绘制流程图应使用规范符号，常用符号如表 4—1 所示。

表 4—1　　绘制流程图的常用符号

符号名称	符号形状	符号的意义
操作、阶段或步骤	矩形	显示各步骤采取的活动或描述各阶段的活动或事件
决策点	菱形	显示可能的分支途径
端点	椭圆	开始或结束
流程线	带箭头线条	显示流程方向
连接点	小圆	显示流程线的转换

一般来说，绘制流程图应按照以下步骤进行：

(1) 判定过程的开始点和结束点。

(2) 观察从开始到结束的整个过程。

(3) 识别过程中的步骤及各个步骤的流向和相互关系。

(4) 按过程步骤绘制，形成流程图草图。

(5) 项目成员对该草图进行交流沟通达成共识。

(6) 形成正式文档。

图 4—1 是一个流程图的例子。

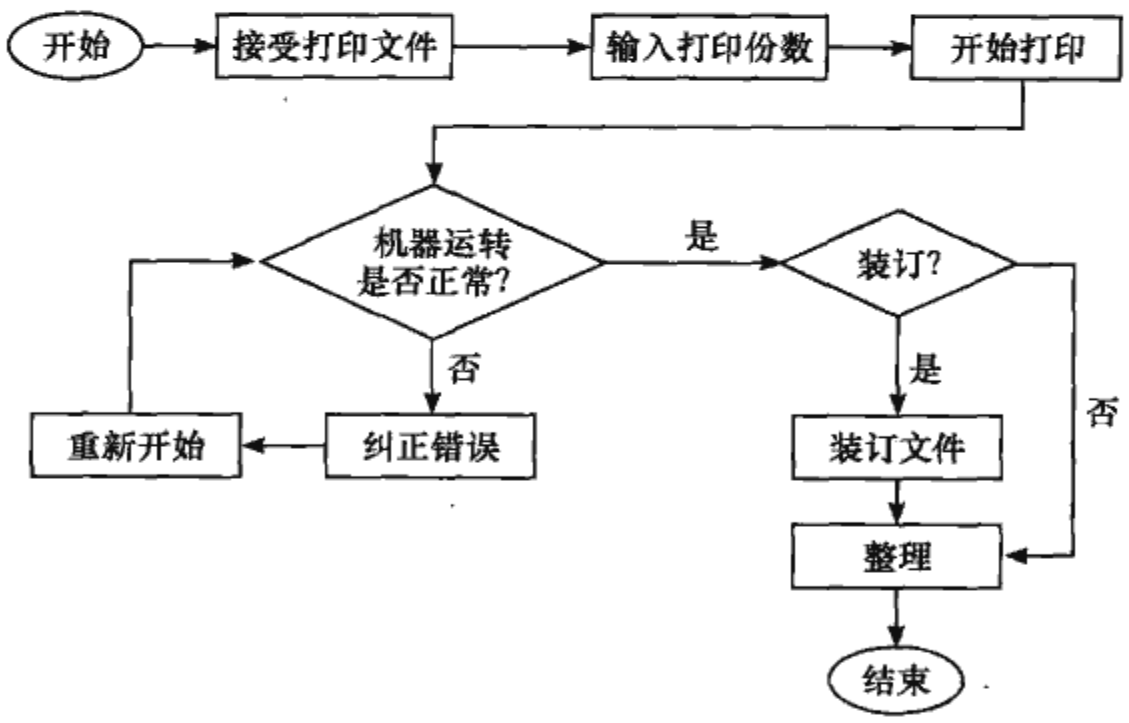


图 4—1　打印文件的流程图示例

如果过程涉及的活动和参与的单位非常多，或者为了进一步明确不同部门的职

责，还可以在流程图中附加周期或者责任者等信息，此类流程图称为跨职能流程图。图 4—2 是将过程中所涉及的责任者加以标注的跨职能流程图，它可以对涉及不同职能部门的比较复杂的过程进行说明。此外，还有其他一些流程图的方式，如宏观流程图、详细流程图等。

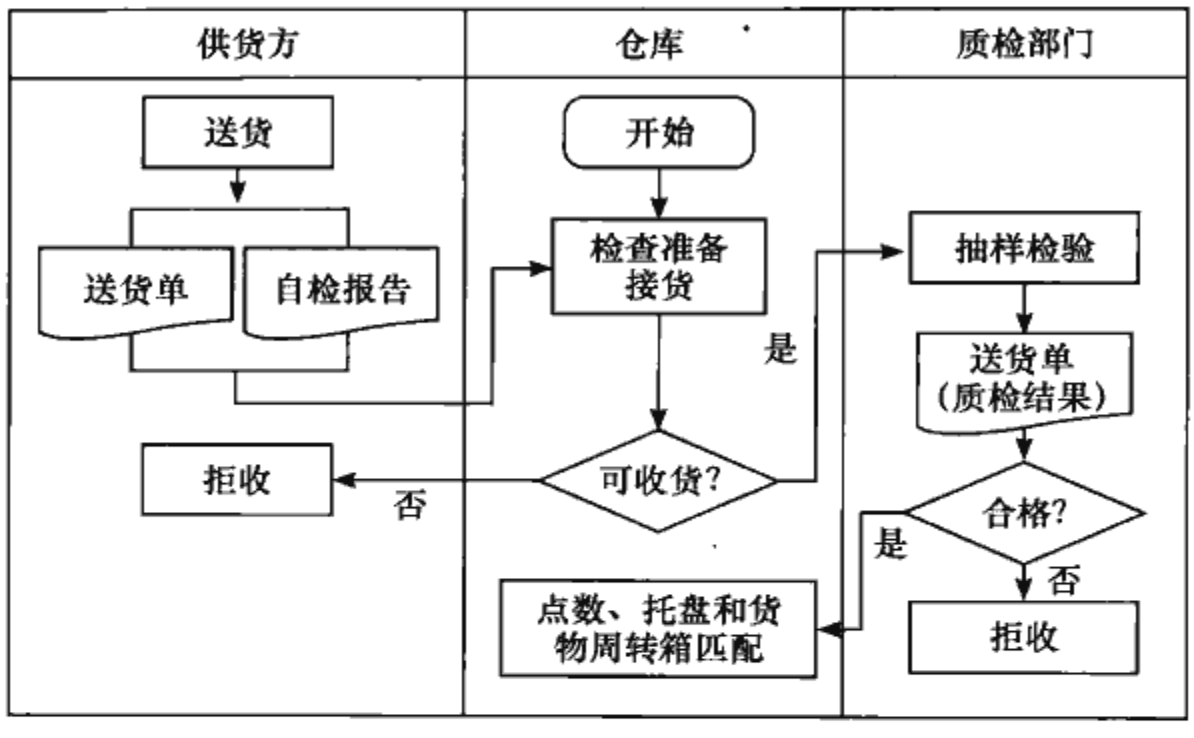


图 4—2　物料检查入库跨职能流程图

在绘制流程图时，应当集思广益，按照过程的实际情况进行绘制，切忌凭空捏造，否则绘制的流程图无法识别问题和产生关键影响因素的区域，对问题的测量、分析、改进也没有实际价值。很多情况下无法找到问题产生的原因，就是因为团队不能对过程的实际流程达成共识，使后续工作丧失了重要的基础。

4.1.2　因果图与因果矩阵

因果图（cause and effect diagram），又称石川馨图（Ishikawa chart）或鱼骨图（fishbone chart）等，也是表达和分析因果关系的重要工具和文档。因果图的主要作用是分析和表达存在问题与原因之间的因果关系，它能够帮助我们透过现象看本质。在因果图中，“鱼头”代表所形成的某些质量问题（effects），“鱼刺骨”代表造成结果的原因（causes）。绘制因果图的过程需要团队成员的积极参与，通常采用头脑风暴法将大家的认识和想法全部收集上来，并用因果图将其展示出来。

一般来说，可按照以下步骤绘制因果图：

（1）在“鱼头”部分简要地标明问题。

（2）确定产生问题的几个主要类别，标注于因果图的“鱼肋骨”旁。一般来说，对于制造类问题，可以采用经典的 5M1E 分类方法：人员、机器设备、材料、方法、测量和环境；对于服务类或管理类问题，经常使用 4P 分类法：人、政策、程序和场所设施。

（3）采用头脑风暴法丰富鱼骨图，将产生问题的所有可能原因按其不同分类填入“鱼肋骨”中。

（4）检查和整理鱼骨图，改进表达含糊的内容，合并重复的内容。

（5）团队成员讨论可能导致问题的原因，确定少数可能性较高的原因作为下一步调查和收集数据的重点。

以下举例来分别说明绘制制造类问题因果图及服务与管理类因果图。在焊接过程中，经常会出现的缺陷有焊接漏，我们用鱼骨图对造成焊接漏的原因进行分析，如图 4—3 所示；在某餐饮店，因管理不善而造成顾客抱怨增多，我们用鱼骨图对造成顾客抱怨增多的原因进行分析，如图 4—4 所示。

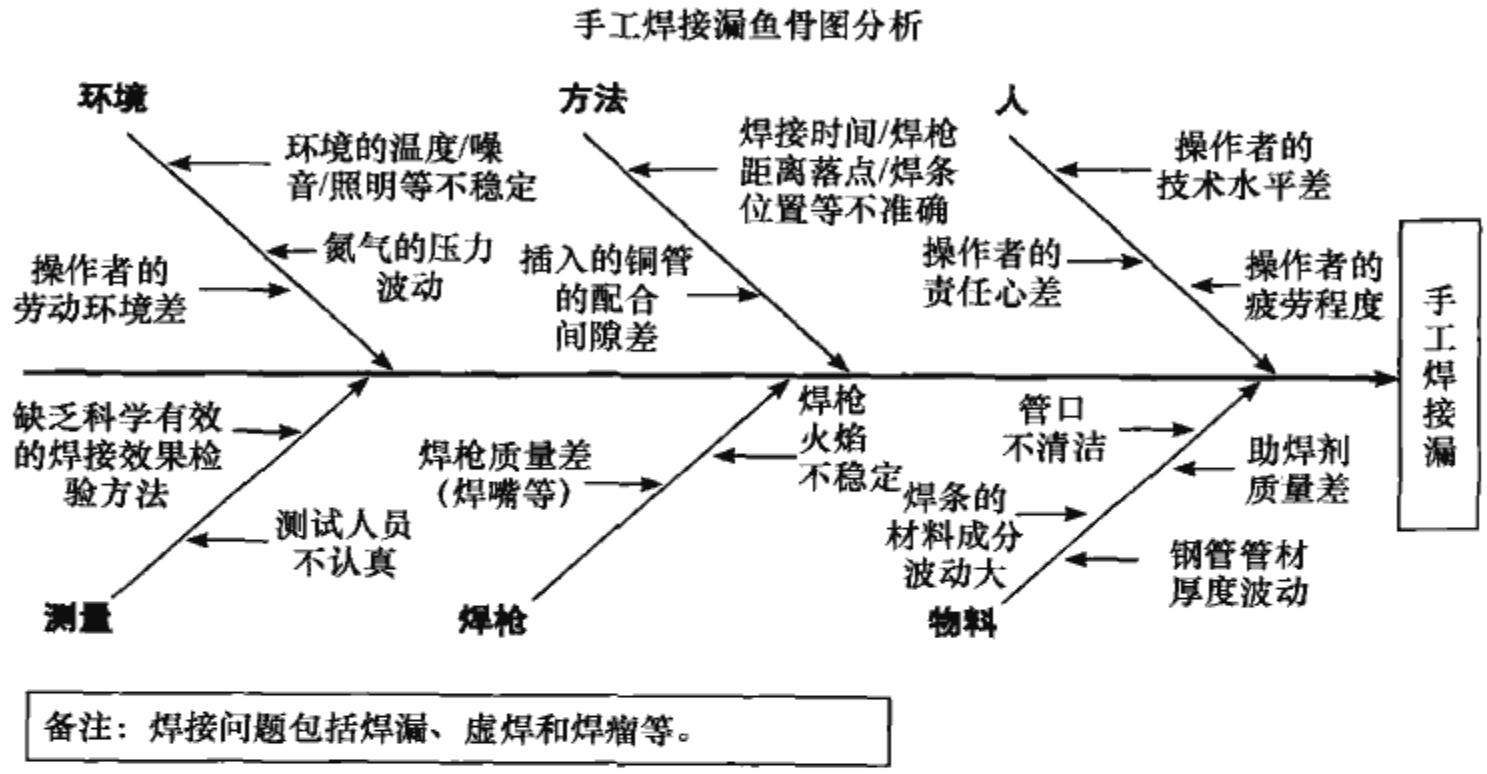


图 4—3 制造类问题因果图

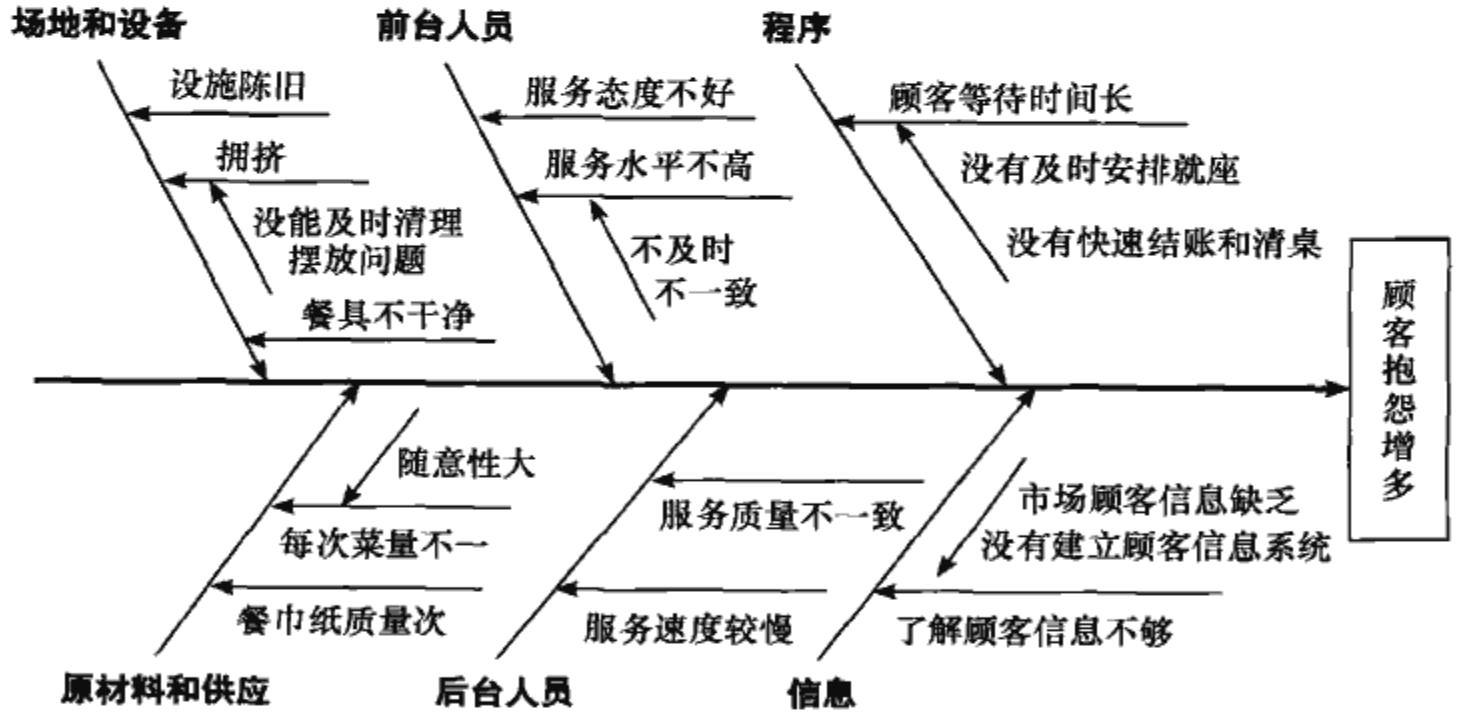


图 4—4 服务与管理类因果图

当需要解决的问题比较复杂，问题呈现为多种形式且产生原因相互关联，无法将其分开来考察和解决时，采用因果矩阵（cause and effect matrix）可为我们提供更有效的分析（见图 4—5）。因果矩阵可帮助团队选择需要重点关注的输入因素，以便有针对性地收集数据进行分析。此外，因果矩阵还可以与其他分析工具结合，

用于对多质量特性的过程进行分析和改进。

重要度	5	8	10	5	3	输入重要度排序
输出 / 输入	绝缘强度低	耐压击穿	功率大	转速低	启动性能差	
绝缘漆浓度低	◎	○				69
预供时间短		○	○			54
定子性能差			◎	◎	◎	162
转子缺陷	○		◎	◎		150
风叶不配套			○		○	39
风叶角度与电机不匹配			◎		△	93
轴承不合格		△	△	○	△	36
精加工精度差	◎	△		○		68

说明：◎为 9 分，○为 3 分，△为 1 分，空格为 0 分。

图 4—5　因果矩阵示例

绘制因果矩阵时，一般应遵循以下步骤：

（1）在矩阵图的上方输入问题的各种形式或关键过程输出特性。

（2）确定每种问题和过程输出特性的重要度，并给定其权重（1～10，10 代表的重要度最高）。

（3）在矩阵图的左侧，列出输入变量或者所有可能的影响因素。

（4）评价每个输入变量或影响因素对各个问题和输出变量的相关关系，矩阵图中的单元格用于标明行对应的输入变量与该列对应问题的相关程度。一般这种相关程度分为四类，并分别赋予 0，1，3，9 或者 0，1，3，5 的分值，标明其不同的相关程度。

（5）评价过程输入变量或影响因素的重要程度。将每一输入变量对各个问题的相关程度乘以相应的权重数求和，该结果代表该过程输入的权重。

（6）考察每个输入变量的权重数，权重较高的将是项目重点关注的对象。

因果图或因果矩阵为后续的测量以及收集数据工作奠定了基础，它是过程分析的重要工具，也是项目工作中产生的重要文档之一。

4.1.3　其他过程分析工具与文档

除了上述用于过程分析的基本工具与文档外，还有一些常用于过程分析的文档。其中，在测量阶段使用较多的是过程故障模式与影响分析（process failure mode and effect analysis，PFMEA）。有关 PFMEA 的详细阐述，参见本书第 8 章。

PFMEA 是关于产品或过程的一种风险分析工具和文档。最初是用来对设计方案的风险进行评估的。在 DMAIC 的测量阶段，常使用 PFMEA 对过程的输入和影响因素进行评估，寻找那些对过程输出影响较大的输入或影响因素，作为测量和分析的重点。

简单地说，项目团队在做 PFMEA 分析时需完成下列工作：

（1）识别过程的功能和要求。

（2）使用头脑风暴法分析潜在故障模式及其后果。

（3）评定每一后果的严重度（S）。

（4）使用头脑风暴法分析故障的潜在原因，即过程的故障原因/故障机理。

（5）评定每一原因的频度（O）。

（6）识别当前的过程控制方法。

（7）评定不可探测度等级（D）（即检测难度，是指在现行的控制下无法发现问题的可能性）。

（8）针对每一行计算一个风险度（RPN）（它等于严重度、频度、不可探测度三者的乘积）。

（9）具有高风险等级数的项将是收集数据进行分析和改进的重点。

4.1.4 过程输入与输出

根据过程的定义可以看出，过程的任务在于将输入转化为输出。过程存在的前提是有过程输入，即输入是施加给过程的条件；过程的结果是产生有价值的过程输出，即输出是过程对外界产生的影响。要进行过程分析，深入了解过程输入与输出之间的关系，必须能够清楚地识别过程输入与输出。

过程输入可以是人力、设备、设施和材料，或者是决策和信息等。输入包括可控因素，也包括噪声因素，即那些认为不可控制、难以控制或控制费用昂贵的因素。输出的形态可能是有形的，也可能是无形的，不同的过程会有不同的输出。过程的输入与输出之间必然存在一种转化关系，输出对输入而言发生了质的变化，例如，原材料进入产品实现过程后，其形态、物理或化学特性就会改变。对过程而言，有输入就一定有输出，但如果输出没有发生特性的变化就不是“转化关系”，而是“导出关系”。实用而简单的过程概念模型是：Y 是 X 的函数，即 $Y=f(X_1, X_2, \cdots, X_n)$。其中，$Y$ 是因变量，代表结果变量；X 是自变量，代表输入变量或过程变量。该式说明，通过选取不同的 X 值，能够改进过程输出 Y 的值。在一个过程链中，一个过程的输出通常是其他后续过程的输入，同样，一个过程的输入通常也是其他过程的输出。

在测量阶段，针对六西格玛项目所涉及的过程，要明确关键输出变量（KPOV）和关键输入变量（KPIV）。对于每个 KPOV/KPIV，需要回答以下几个问题：

（1）为什么测量这个指标？

（2）指标的定义是什么？

（3）如何测量？

（4）采用什么测量设备？

（5）测量结果是否可靠？

（6）有无更好的测量方法？

从统计上讲，测量的指标是一个随机变量，如何将测量的数据转化为对分析和决策都有用的信息，需要具备一定的概率与数理统计知识。

4.2 概率与数理统计基础

4.2.1 概率论基础知识

许多决策都是在不确定的情况下作出的。例如，测量方法是否正确？过程能力能否达到要求？接收到的产品是否满足预定的合格率要求？利用概率论可以解决这一系列问题，下面来明确概率的一些基本概念。

1. 随机试验和随机事件

在同一组条件下，对某事物或现象所进行的观察或实验称为试验，把观察或实验的结果称为事件。广义上讲，从某一研究目的出发，对随机现象进行观察均称为随机试验，但严格意义上的随机试验应该满足三个条件：(1) 试验可以在相同的条件下重复进行。(2) 试验的所有可能结果是明确可知的，并且不止一个。(3) 每次试验总是恰好出现这些可能结果中的一个，但试验前不能肯定这次试验会出现哪个结果。随机事件就是随机试验中可能出现也可能不出现的事件。特别地，每次随机试验一定出现的事件称为必然事件，一定不会出现的事件称为不可能事件。

2. 事件间的关系与运算

(1) 事件的包含与相等。如果事件 A 出现一定导致事件 B 出现，则称事件 A 包含于事件 B，用记号 $A \subset B$ 表示（见图 4—6）。例如，“电话交换台一分钟内接到的电话呼叫恰为指定次数”是一个随机事件，可能是 0，1，2，…。“接到呼叫 2 次”和“接到呼叫不超过 5 次”这两个事件有明显的关系，前者发生，后者一定发生，前者包含于后者，或者说后者包含了前者。如果 $A \subset B$ 同时 $B \subset A$，则称事件 A 与事件 B 相等，用记号 $A=B$ 表示。

(2) 事件不相容。事件 A 与事件 B 没有共同的样本点，则称事件 A 与事件 B 不相容或称事件 A 与事件 B 是互斥事件（见图 4—7）。例如，掷骰子时，出现 1 个点和出现 2 个点的结果不可能同时出现，即“出现 1 个点”和“出现 2 个点”是互斥事件。检查一批产品，“恰有 1 件不合格品”和“恰有 2 件不合格品”是互斥事件。呼叫中心的客服人员“在 5 分钟内接到过电话”和“在 5 分钟内未接到电话”是互斥事件。

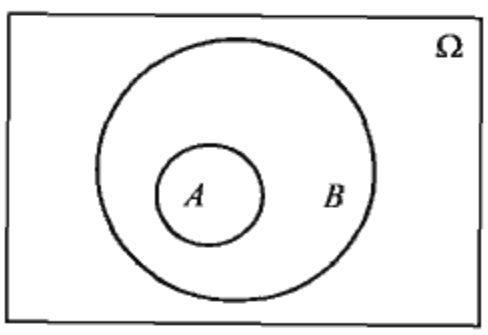


图 4—6 A 包含于 B

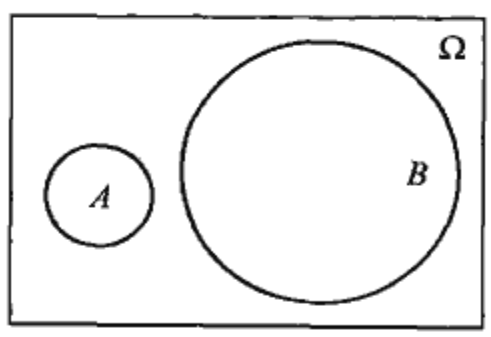


图 4—7 A 与 B 不相容

（3）事件的并。由事件 A 与事件 B 中所有样本点组成的新事件称为事件 A 与事件 B 的并，记为 $A \cup B$，是逻辑上“或”的关系（见图 4—8）。例如，在学校某一个班级内抽签，A=“班干部”，B=“女生”，则 $A \cup B$=“班干部或女生”；在电话交换台，A=“接到呼叫 1 次”，B=“接到呼叫 2 次”，则 $A \cup B$=“接到呼叫 1 次或 2 次”。

（4）事件的交。由事件 A 与事件 B 中公共的样本点组成的新事件称为事件 A 与事件 B 的交，记为 $A \cap B$ 或 AB，是逻辑上“与”的关系（见图 4—9）。例如，在一个班级内抽签，A=“班干部”，B=“女生”，则 $A \cap B$ =“班干部并且是女生”；在电话交换台，A=“接到呼叫多于 3 次”，B=“接到呼叫少于 5 次”，则 $A \cap B$=“接到呼叫 4 次”。

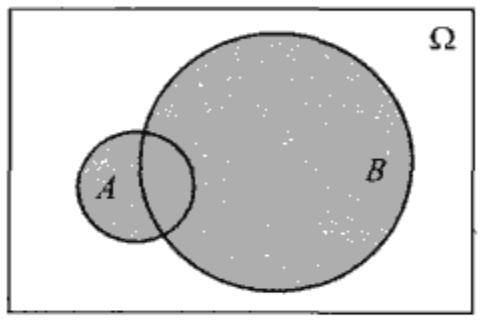


图 4—8 A 与 B 的并

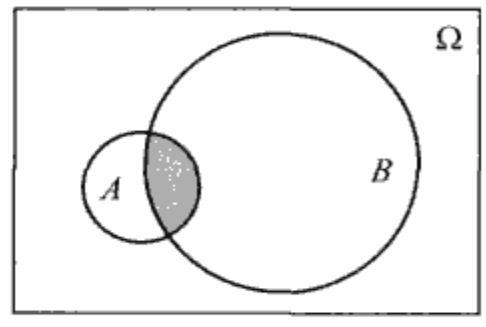


图 4—9 A 与 B 的交

（5）事件的差。由在事件 A 中而不是在事件 B 中的样本点组成的新事件称为事件 A 对事件 B 的差，记为 $A-B$（见图 4—10），同理可知 $B-A$（见图 4—11）。仍以在一个班级内抽签为例，A=“班干部”，B=“女生”，则 $A-B$=“班干部但不是女生”；$B-A$=“女生但不是班干部”。在电话交换台，A=“接到呼叫多于 3 次”，B=“接到呼叫少于 5 次”，则 $A-B$=“接到呼叫多于 4 次”，$B-A$=“接到呼叫少于 4 次”。

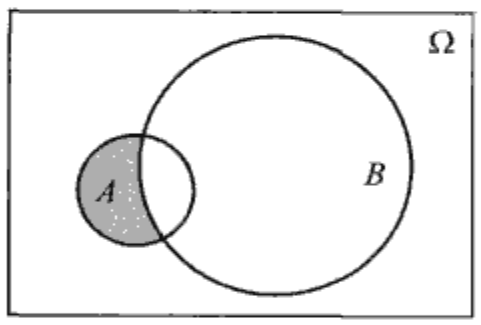


图 4—10 $A-B$

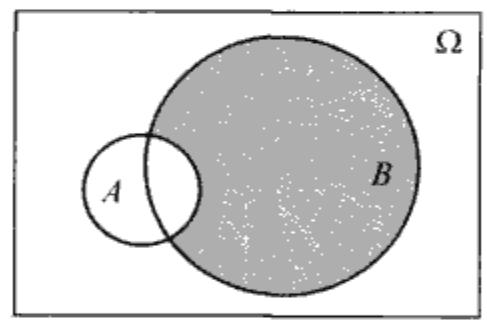


图 4—11 $B-A$

（6）对立事件。假设所有的事件构成样本空间为 Ω，在 Ω 中而不在事件 A 中的样本点组成的事件称为事件 A 的对立事件，记为 $\overline{A}$（见图 4—12）。例如，检查布匹时，事件 A“至少有 1 个疵点”的对立事件 $\overline{A}$ 是“没有疵点”。

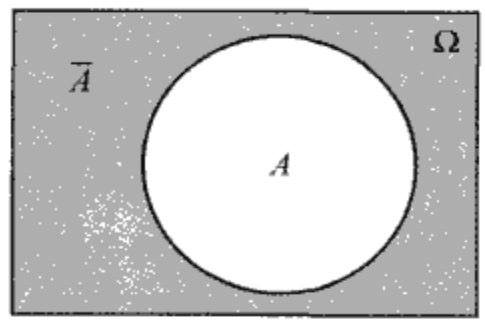


图 4—12 A 的对立事件 $\overline{A}$

3. 概率

概率是对一个事件发生的可能性大小的度量，表示事件 A 发生可能性的数值 $P(A)$ 称为事件 A 的概率。抛掷一枚质地均匀的硬币，“正面朝上”与“背面朝上”的可能性各为 1/2。抛掷骰子时，“恰为 6 点”的可能性为 1/6。概率是一个介于 0～1 的数，概率越大，事件发生的可能性越大；概率越小，事件发生的可能性越小。不可能事件的概率为 0，必然事件的概率为 1。

4. 概率的性质和运算法则

概率具有以下基本性质。

性质 1：对任一随机事件 A，有 $0\leqslant P(A)\leqslant 1$。

不可能事件的概率为 0，必然事件的概率为 1，即 $P(\Phi)=0$，$P(\Omega)=1$。例如，抛掷骰子时，出现任何点数的概率 p 都是一个大于 0 小于 1 的正数。

性质 2：事件 A 的对立事件为 $\overline{A}$，有 $P(A)+P(\overline{A})=1$。

例如，抛掷骰子，事件 $A=$“出现点数 3”，则 $\overline{A}=$“不出现点数 3”，所以 $P(A)+P(\overline{A})=1$，它表示抛掷骰子时，出现的点数要么是 3 要么不是 3。

性质 3：若 $A\supset B$，则 $P(A-B)=P(A)-P(B)$。

例如，抛掷骰子，事件 $A=$“出现点数小于 3”，事件 $B=$“出现点数 1”，则 $A\supset B$，所以 $P(A-B)=P(A)-P(B)$。

性质 4：加法法则。

事件 A 与事件 B 的并的概率为 $P(A\cup B)=P(A)+P(B)-P(AB)$。当事件 A 与事件 B 不相容时，$P(AB)=0$，则 $P(A\cup B)=P(A)+P(B)$。

例如，抛掷骰子，事件 $A=$“出现点数小于 5”，事件 $B=$“出现点数大于 3”，则 $A\cup B=$“出现点数为 1～6 中的任意一个数”，事件 $AB=$“出现点数 4”，所以 $P(A\cup B)=P(A)+P(B)-P(AB)=\frac{4}{6}+\frac{3}{6}-\frac{1}{6}=1$。当事件 $A=$“出现点数小于 2”，事件 $B=$“出现点数大于 5”时，事件 A 和事件 B 不相容，即 $P(AB)=0$，所以 $P(A\cup B)=P(A)+P(B)=\frac{1}{6}+\frac{1}{6}=\frac{2}{6}$。

此性质可推广到多个两两互不相容的随机事件 A_1，A_2，…，A_n，则

$$P(A_1\cup A_2\cup\cdots\cup A_n)=P(A_1)+P(A_2)+\cdots+P(A_n)$$

性质 5：乘法法则。

对任意两个事件 A 与 B，有 $P(AB)=P(B\mid A)P(A)=P(A\mid B)P(B)$，其中 $P(A\mid B)$ 为事件 B 发生条件下事件 A 发生的条件概率，此时要求 $P(B)>0$。

例如，投掷骰子时，事件 $A=$“出现点数大于 2”，事件 $B=$“出现点数小于 4”，则 $P(A)=\frac{4}{6}$，$P(B)=\frac{3}{6}$。当事件 A 发生时，即出现点数为 3，4，5 或 6，此时事件 B 也发生的条件概率为 $P(B\mid A)=\frac{1}{4}$，所以 $P(AB)=P(B\mid A)P(A)=\frac{1}{4}\times\frac{4}{6}=$

$\frac{1}{6}$。同理可得，$P(AB)=P(A\mid B)P(B)=\frac{1}{3}\times\frac{3}{6}=\frac{1}{6}$，即 $P(AB)=P(B\mid A)P(A)=P(A\mid B)P(B)=\frac{1}{6}$。

当两个事件的发生互不影响，则称这两个事件相互独立，即 $P(A\mid B)=P(A)$，$P(B\mid A)=P(B)$，此时乘法原则简化为：$P(AB)=P(A)P(B)$。

例 4—1 某地有甲、乙两家著名的报纸，该地的成年人有 20%读甲报，有 16%读乙报，8%两种报纸都读。成年人中至少读一种报纸的概率是多少？

解：设事件 A 为“读甲报”，事件 B 为“读乙报”，事件“至少读一种报纸”可以用事件 $A\cup B$ 表示，其概率为 $P(A\cup B)=P(A)+P(B)-P(AB)$。

由题意知，$P(A)=0.2$，$P(B)=0.16$，$P(AB)=0.08$。则

$$P(A\cup B)=0.2+0.16-0.08=0.28$$

故有 28%的成年人至少读一种报纸。

例 4—2 100 件产品中，有 80 件正品，20 件次品；而 80 件正品中一等品 50 件，二等品 30 件。现从 100 件产品中任取一件，问：

(1) 取到正品的概率是多少？

(2) 取到一等品的概率是多少？

(3) 如果取到的是正品，那么，恰好是一等品的概率是多少？

解：设事件 A 为“取到正品”，事件 B 为“取到一等品”。

(1) 取到正品的概率 $P(A)=\frac{80}{100}=0.8$。

(2) 取到一等品的概率 $P(B)=\frac{50}{100}=0.5$。

(3) 由于 $A\supset B$，故 $P(AB)=P(BA)=P(B)$。利用条件概率的计算公式知，如果取到的是正品，恰为一等品的概率是：

$$P(B|A)=\frac{P(BA)}{P(A)}=\frac{P(B)}{P(A)}=\frac{5}{8}$$

同样，也可以根据题意直接得到。如果取到的是正品，恰为一等品的概率是：

$$P(B|A)=\frac{50}{80}=\frac{5}{8}$$

例 4—3 10 件产品中，有 8 件正品，2 件次品。问：

(1) 某检验员从 10 件产品中依次抽取了 2 件。2 件都是次品的概率是多少？

(2) 甲、乙两位实习检验员先后独立从这 10 件产品中抽取一件产品进行检测，且抽取后皆放回。两位实习检验员先后都抽到次品的概率是多少？

解：设事件 A_1 为“某检验员第一次抽到的是次品”，事件 A_2 为“某检验员第二次抽到的是次品”，事件 B_1 为“甲实习检验员抽到的是次品”，事件 B_2 为“乙实习检验员抽到的是次品”。

(1) $P(A_1)=\frac{2}{10}=0.2$，$P(A_2\mid A_1)=\frac{1}{9}$，故都是次品的概率为：

$$P(A_1A_2)=P(A_1)P(A_2|A_1)=0.2\times\frac{1}{9}\approx0.022$$

(2) $P(B_1)=\frac{2}{10}=0.2$，因为甲、乙两位实习检验员抽取产品彼此独立，故

$$P(B_2|B_1)=P(B_2)=\frac{2}{10}=0.2$$

都是次品的概率为：

$$P(B_1B_2)=P(B_1)P(B_2)=0.2\times0.2=0.04$$

4.2.2 随机变量及分布

1. 随机变量

先看一个熟悉的例子：抛掷一枚质地均匀的硬币，有两种可能的结果，若用 ω_0 表示正面朝上，用 ω_1 表示背面朝上，则所有可能出现的结果组成一个样本空间 $\Omega=\{\omega_0,\omega_1\}$。引入可能出现的变量 X，将可能出现的结果量化，令

$$X=X(\omega)=\begin{cases}0, & \omega=\omega_0\\ 1, & \omega=\omega_1\end{cases}$$

X 是定义在样本空间 Ω 上的函数，对于每个可能的结果都有一个不同的实数 $X(\omega)$ 与之相对应。并且，随机变量 X 以确定的概率取不同的结果：

$P(X=0)=0.5$

$P(X=1)=0.5$

因此，随机变量，即按照一定的概率取值的变量，通常用大写字母 X，Y，Z 等表示，而随机变量的取值通常用小写字母 x，y，z 等表示。随机变量通常具有以下两个特征：

(1) 取值的随机性，即事先不能确定 X 取哪个值。

(2) 取值的统计规律性，即可确定 X 取某个数值或 X 在某一区间内取值的概率。

通常我们只研究两类随机变量：离散型随机变量 (discrete random variable) 和连续型随机变量 (continuous random variable)。例如：

(1) 设 X 为某铸件上的缺陷数，则 X 是离散型随机变量，可取 0，1，2，…可列个可能值，使用随机变量 X 的取值来表示事件。如“$X=0$”表示事件“铸件无缺陷”，“$X=2$”表示事件“铸件上有两个缺陷”，“$X>2$”表示事件“铸件缺陷多于两个”。这些事件可能发生，也可能不发生。X 取 0，1，2，…这些值是随机的，但 X 以确定的概率取不同的值。

类似地，玻璃单位面积上的气泡数、布匹上的疵点数、车床一天内发生的故障数等都是取值为 {0，1，2，3，…} 的离散型随机变量。

(2) 设 X 为某电视机的寿命（单位：小时），则 X 是在 $[0,\infty)$ 上取值的连

续型随机变量。“$X=0$”表示事件“电视机开机即发生故障”，“$X<10\,000$”表示事件“电视机寿命小于 10 000 小时”，“$X>40\,000$”表示事件“电视机寿命超过 40 000 小时”。

类似地，测厚仪测量所得的涂料厚度、某超市一天内售出的鸡蛋重量等都是在$[0，\infty)$上取值的连续随机变量。

(3) 设 X 为产品检测的结果，可能是合格品，也可能是不合格品。若用“$X=0$”表示合格品，“$X=1$”表示不合格品。则 X 是只能取值 0 或 1 的随机变量。

2. 离散型随机变量和分布

如果随机变量 X 所有可取值集合只包括有限或可列个元素集合，则 X 为离散型随机变量。如抛硬币得到正或反面的次数、铸件上的缺陷数等都是离散型随机变量。其中：$P(X=x_i)=p_i$ 为离散型随机变量 X 的概率函数。其分布列表如下：

$X=x_i$	x_1	x_2	…	x_n	…
$P(X=x_i)=p_i$	p_1	p_2	…	p_n	…

说明：$p_i\geqslant 0$，$p_1+p_2+\cdots+p_i+\cdots=1$。

例 4—4 一批产品分为一、二、三级，其中一级品率为 50%，二级品率为 35%，三级品率为 15%。从这批产品中随机抽取一件，观察其级别。

解： 设 X 表示“随机抽取一件产品，所观察到的产品级别”，显然，有

$$P(X=1)=0.5$$
$$P(X=2)=0.35$$
$$P(X=3)=0.15$$

其分布列表如下：

$X=x_i$	1	2	3
$P(X=x_i)=p_i$	0.5	0.35	0.15

例 4—5 抛掷一枚质地均匀的骰子，观察其结果。

解： 设 X 表示“抛掷骰子的结果”，则 X 是取值为 1，2，…，6 的离散型随机变量。它的分布为：

X	1	2	3	4	5	6
$P(X=x_i)=p_i$	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6

3. 连续型随机变量和分布

如果随机变量 X 能在一个数值区间内取任何值，则 X 为连续型随机变量。如灯泡、电视机等电器的使用寿命等都是连续型随机变量。对于连续型随机变量，我们一般用概率密度函数（probability density function）来表示其分布情况。假设

$p(x)$ 是连续型随机变量 X 的概率密度函数，则 $p(x)$ 满足：（1）$p(x)\geqslant 0$。(2) $\int_{-\infty}^{+\infty} p(x)\mathrm{d}x = 1$，如图 4—13 所示的阴影部分的面积。(3) $P(a \leqslant X \leqslant b) = \int_a^b p(x)\mathrm{d}x$，如图 4—14 所示。

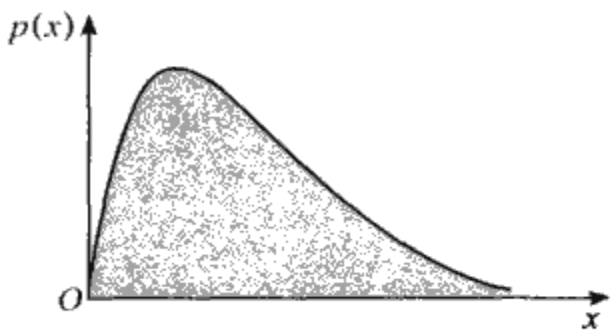


图 4—13

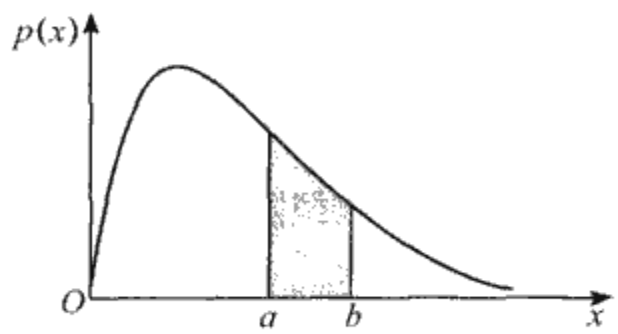


图 4—14

其中，随机变量 X 小于或等于实数 x 的概率 $F(x)=P(X\leqslant x)$，则有

$$P(X \leqslant x) = \int_{-\infty}^{x} p(t)\mathrm{d}t$$

$F(x)$ 又称为累积分布函数（cumulative distribution function）或分布函数，如图 4—15 阴影部分所示。

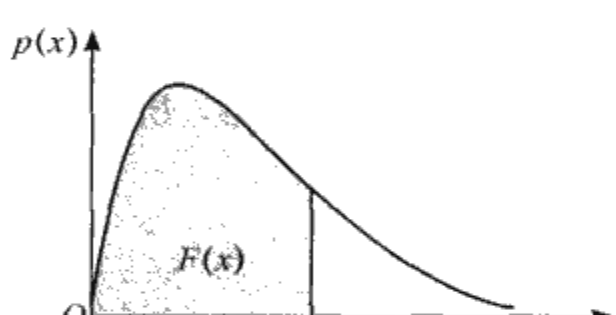


图 4—15　分布函数

由于在计算面积时，直线的面积为 0，即 $P(X=a)=0$，所以有

$$P(a\leqslant X\leqslant b)=F(b)-F(a)$$

指数分布（exponential distribution）是一种常见的连续分布，其概率密度函数为：

$$p(x)=\begin{cases}\lambda \mathrm{e}^{-\lambda x}, & x\geqslant 0\\ 0, & x<0\end{cases}$$

记为 $E(\lambda)$。式中，$\lambda>0$，为参数。在工程实践中，不少产品首次发生故障的时间，或发生故障后需要维修的时间都服从指数分布。

例 4—6　某厂生产的推土机首次发生故障的时间 T（单位：小时）服从指数分布 $E(0.002)$。概率密度函数如图 4—16 所示。

$$p(t)=\begin{cases}0.002\mathrm{e}^{-0.002t}, & t\geqslant 0\\ 0, & t<0\end{cases}$$

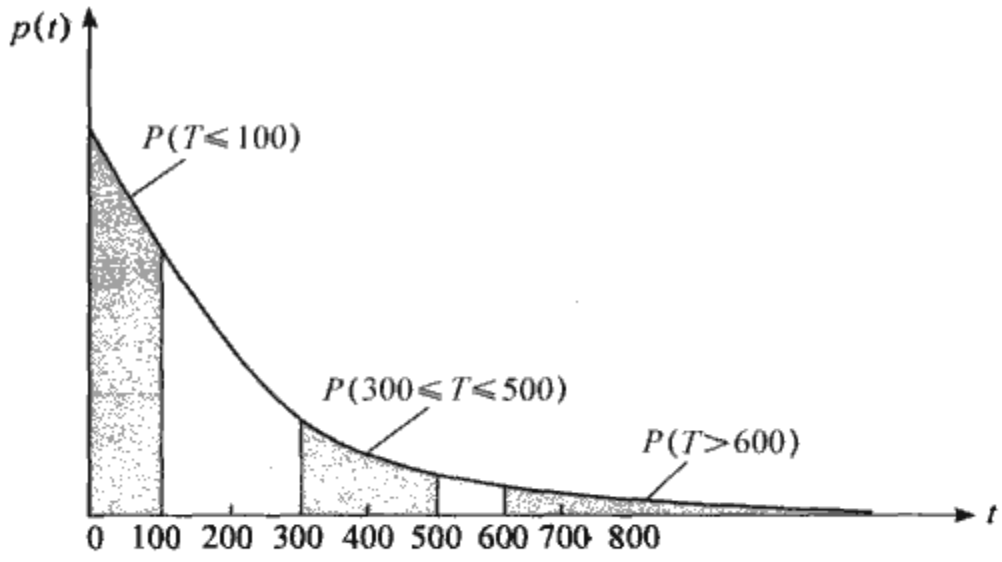


图 4—16 指数分布 $E(0.002)$ 的概率密度曲线

问：(1) 该厂生产的推土机在 100 小时内需要维修的概率是多少?

(2) 该厂生产的推土机在 300～500 小时内需要维修的概率是多少?

(3) 该厂生产的推土机在 600 小时以后才需要维修的概率是多少?

解：(1) 该厂生产的推土机在 100 小时内需要维修的概率，如图 4—16 左侧阴影所示，可用积分计算：

$$P(T \leqslant 100) = \int_0^{100} 0.002e^{-0.002t}dt = -e^{0.002t}\Big|_0^{100} = 1 - e^{-0.2} = 0.181$$

(2) 该厂生产的推土机在 300～500 小时内需要维修的概率，如图 4—16 中间阴影所示。

$$P(300 \leqslant T \leqslant 500) = \int_{300}^{500} 0.002e^{-0.002t}dt = 0.180\,9$$

(3) 该厂生产的推土机在 600 小时以后需要维修的概率，如图 4—16 右侧阴影所示。

$$P(T \geqslant 600) = \int_{600}^{+\infty} 0.002e^{-0.002t}dt = 0.301\,2$$

对于以上例题的求解，我们也可以通过 MINITAB 软件来实现。打开 MINITAB 软件，依次进行以下操作：计算→概率分布→指数，则可得到对话框，如图 4—17 所示。

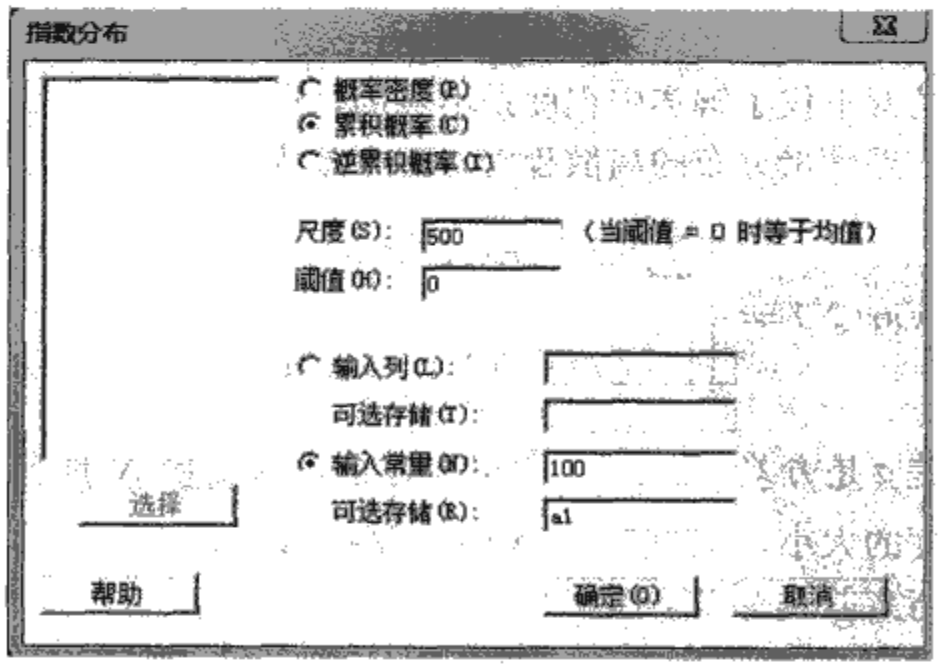


图 4—17 指数分布对话框

在对话框中，选择累积概率，设定尺度为分布函数的均值，本题中均值为1/0.002=500，然后输入所求的累积概率的 x（本例中 $x=100$）值，并设定将计算出的累积概率存储在变量 $a1$ 中（读者可自行设定），单击确定，即可获得所需的概率值。其结果保存在相应的变量中（本例中为 $a1$）。若想查看变量 $a1$ 的值，可通过进行如下操作：数据→显示数据，在打开的对话框中选择所使用的变量，单击确定，即可显示出变量值，如下所示：

数据显示

a1	0.181 269

4.2.3 数学期望、均值及方差

均值（mean）、方差（variance）与标准差（standard deviation）均为描述数据分布状况的重要指标。均值用来表示分布的中心位置，反映分布的集中情况，用 $E(X)$ 表示。均值的计算公式为：

$$E(X)=\begin{cases}\sum_i x_i p_i, & X \text{ 为离散型随机变量}\\ \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)\mathrm{d}x, & X \text{ 为连续型随机变量}\end{cases}$$

例如某租赁公司规定，租赁某种昂贵的建筑设备时，顾客必须至少提前 3 天进行预订。租赁费是 500 元。如果下雨，顾客将无法使用该设备，但是，顾客仍要支付 500 元。如果没有下雨，顾客使用建筑设备完成工作可获得收入 1 000 元。若降雨概率是 20%，租赁设备获得收益的期望值是多少？

$$E(X)=0.2\times(-500)+(1-0.2)\times 1\,000=700(\text{元})$$

顾客可以获得期望收入 700 元。注意，实际上，如果只租赁一天，则获利 700 元是不可能发生的，租赁人要么失去 500 元，要么获得 1 000 元。期望值给出了顾客长期租赁可获利的平均水平，概率作为“权重”被应用于不同的结果。因此，数学期望可看作各种可能结果的加权平均。

很多情况下仅了解集中程度是不够的，还必须了解随机变量的离散特征。我们通常使用方差度量分布的离散程度，记方差为 $\mathrm{Var}(X)$，其计算公式如下：

$$\mathrm{Var}(X)=\begin{cases}\sum_i [x_i-E(X)]^2 p_i, & X \text{ 为离散型随机变量}\\ \int_{-\infty}^{\infty} [x-E(X)]^2 p(x)\mathrm{d}x, & X \text{ 为连续型随机变量}\end{cases}$$

标准差 σ 是方差 $\mathrm{Var}(X)$ 的正平方根，与变量 X 具有相同的单位，也用来反映离散程度的大小，记为 $\sigma=\sigma(X)=\sqrt{\mathrm{Var}(X)}$。

均值与方差具有以下性质：

（1）设 X 为随机变量，a 与 b 为任意实数，则有 $E(aX+b)=aE(X)+b$，$\mathrm{Var}(aX+b)=a^2\mathrm{Var}(X)$。

(2) 对任意两个随机变量 X_1 和 X_2，有 $E(X_1+X_2)=E(X_1)+E(X_2)$；如果 X_1 和 X_2 独立，则有 $\mathrm{Var}(X_1\pm X_2)=\mathrm{Var}(X_1)+\mathrm{Var}(X_2)$。

4.2.4 常用的离散分布

常用的离散分布有：

- 0—1 分布（0-1 distribution）。
- 二项分布（binomial distribution）。
- 泊松分布（Poisson distribution）。
- 超几何分布（hypergeometric distribution）。

1. 0—1 分布

当每次试验中，只有两种可能的结果，例如正面朝上与背面朝上，产品合格与不合格，检验通过与不通过，目标命中与不命中，具备某特性与不具备某特性等，或是只关注试验的两种不同结果，例如手机月话费是否高于 100 元，布匹疵点数是否多于 5 个等，可以将这两种结果称为成功与失败。若成功的概率为 p，则失败的概率为 $1-p$，设随机变量 X 表示“试验的结果”，则 X 服从两点分布。若把成功记为 1，失败记为 0，则称 X 服从 0—1 分布，记为 $X\sim B(1,\ p)$。

X	0	1
$P(X=x_i)=p_i$	$1-p$	p

0—1 分布的均值、方差与标准差分别为：

$$E(X)=p,\mathrm{Var}(X)=p(1-p),\sigma(X)=\sqrt{p(1-p)}$$

2. 二项分布

统计学把只有两种可能结果的随机试验称为伯努利试验。在相同条件下若将伯努利试验独立地重复 n 次，n 是一个固定数值，则称该试验为 n 重伯努利试验。二项分布是 n 重伯努利试验中出现“成功”次数 X 的概率分布，$P(X=x)=C_n^x p^x(1-p)^{n-x}$（$x=0,\ 1,\ \cdots,\ n$），记为 $X\sim B(n,\ p)$。

由此可以看出二项分布具有四个基本性质：

(1) 重复试验次数 n 固定不变。

(2) 每次试验只有“成功”和“失败”两种结果。

(3) 每次试验“成功”的概率都为 p。

(4) 每次试验相互独立。

二项分布的均值、方差与标准差分别为：

$$E(X)=np,\mathrm{Var}(X)=np(1-p),\sigma(X)=\sqrt{np(1-p)}$$

例 4—7 从一批产品中随机抽取进行检测，根据历史数据知，产品的不合格品率为 10%。假设要求产品检测人员每次抽取一件产品，检测完毕后，要放回这批产品中（又称有放回抽样）。检验人员共检测了 6 件产品，问检测到的不合格品数分

别为 0，1，2，…，6 的概率是多少?

解：设随机变量 X 表示“6 件检测产品中不合格品的个数”，显然，X 可能的取值为 0，1，2，…，6，取这些值的概率为：

$$P(X=x)=C_6^x 0.1^x(1-0.1)^{6-x},\quad x=0,1,2,\cdots,6$$

称 X 服从二项分布，记为 $X\sim B(6,\ 0.1)$。

没有不合格品的概率为：

$$P(X=0)=C_6^0 0.1^0(1-0.1)^{6-0}=\frac{6!}{0!\ (6-0)!}0.9^6\approx 0.531\ 4$$

式中，“!”为阶乘。$6!=1\times2\times3\times4\times5\times6$，$0!=1$，$C_6^0=\frac{6!}{0!\ (6-0)!}=1$。

恰有一件不合格品的概率为：

$$P(X=1)=C_6^1 0.1^1(1-0.1)^{6-1}=\frac{6!}{1!\ (6-1)!}\times0.1\times0.9^5\approx 0.354\ 3$$

类似地可分别计算有 2，3，4，5，6 件不合格品的概率，有分布列表如下：

X	0	1	2	3	4	5	6
P	0.531 4	0.354 3	0.098 4	0.014 6	0.001 2	0.000 1	0.000 0

这里，$P(X=6)\approx0.000\ 001$，取前四位小数为有效数字，故为 0.000 0。

在 MINITAB 中求解如下，打开工作表“例 4—7”① 中的二项分布数据，进行如下操作：计算→概率分布→二项，在打开的对话框中进行如图 4—18 所示的设定，其中 C1 列的数据指不合格品数，事件概率为不合格品率，本例中为 0.1，C2 列是与 C1 列相对应的不合格品数的概率。

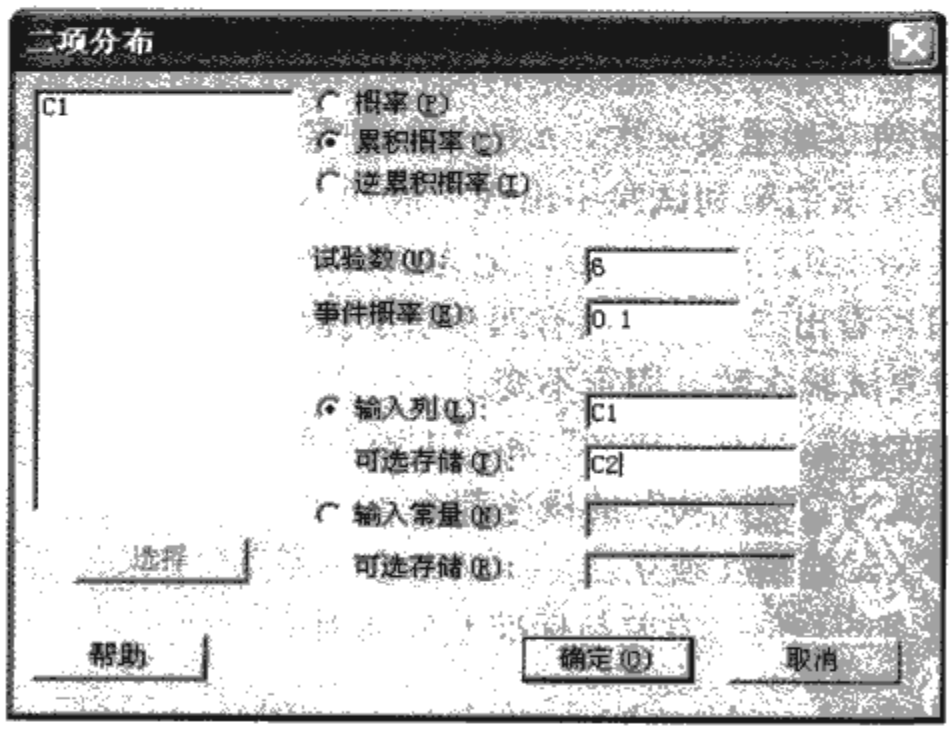


图 4—18　二项分布对话框

① 读者可登录 www.rdjg.com.cn 免费查阅相关工作表文件。

运行结果如图 4—19 所示。

+	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C
1	0	0.53144					
2	1	0.88574					
3	2	0.98415					
4	3	0.99873					
5	4	0.99994					
6	5	1.00000					
7	6	1.00000					
8							
9							
10							
11							
12							

图 4—19 运行结果

3. 泊松分布

在质量控制中，我们不仅要关注一批产品整体的不合格率，也要关注单件产品的不合格项情况。此时若用 X 表示单件产品的不合格项个数，X 值可取 0，1，2，…，n，且 X 取这些值的概率为：$P(X=x)=\lambda^x e^{-\lambda}/x!$ $(x=0, 1, 2, \cdots, n)$，则称 X 服从泊松分布，记为 $X\sim P(\lambda)$，式中 e=2.718 281 8。λ 是泊松分布的重要参数，它给出了单件产品的平均不合格项数。泊松分布的均值与方差相等，均为 λ，即 $E(X)=\mathrm{Var}(X)=\lambda$，$\sigma(X)=\sqrt{\lambda}$。

例 4—8 一条生产导弹的流水线，当每枚导弹制造完成时，要通过一个空气动力模型进行检查，对照设计要求把各处不合格项记录下来。任何严重的不合格项都可能成为拒绝接受导弹的理由。军方还要求对次要的不合格项进行控制，像模糊的文字、小毛刺等问题在审核时都要求明确记录下来。过去的历史数据显示，每枚导弹平均有 3 个次要的不合格项。问：生产的导弹没有次要不合格项的概率是多少？

解： 设 X 表示“导弹次要不合格项的个数”，由题意知，$\lambda=3$。则生产的导弹没有次要不合格项的概率是：

$$P(X=0)=\frac{3^0 e^{-3}}{0!}=\frac{1\times e^{-3}}{1}\approx 0.05=5\%$$

换言之，100%−5%=95%的导弹至少有一处次要不合格项。

在 MINITAB 中求解如下：计算→概率分布→Poisson，在打开的对话框中进行如图 4—20 所示的设定，单击“确定”即可得到生产的导弹没有次要不合格项的概率。

运行结果如下：

概率密度函数
Poisson，平均值=3
x P(X=x)
0 0.049 787 1

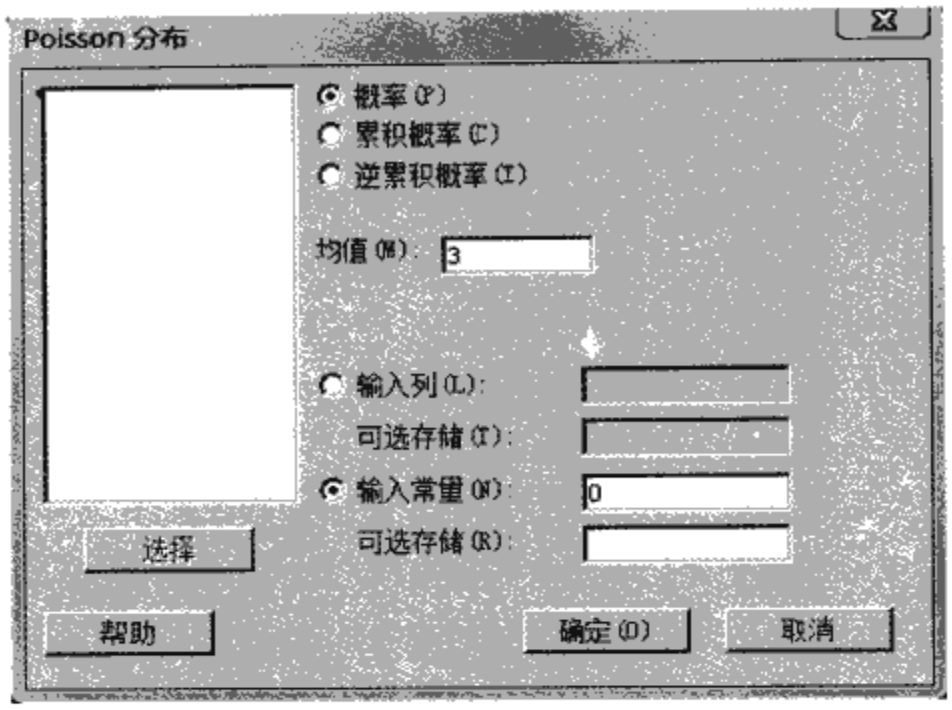


图 4—20　泊松分布对话框

4. 超几何分布

二项分布主要用于计算有限总体重复抽样的概率，而如果在有限总体中进行不重复抽样，则此时试验成功的次数就服从超几何分布。如果一个含 N 个元素的总体中有 M 个某种特征的单位数目，对这个总体进行 n 次不放回简单随机抽样，用随机变量 X 表示样本中具有某种特征的单位和数目，则 X 服从参数为（N，M，n）的超几何分布。

超几何分布的概率是：

$$P(X=x)=\frac{C_M^x C_{N-M}^{n-x}}{C_N^n},\quad x=0,1,2,\cdots,\min(M,n)$$

式中，x 为所抽取样本中具有某种特征的单位数目。超几何分布的均值、方差分别为：

$$E(X)=\frac{nM}{N}$$

$$\mathrm{Var}(X)=\frac{n(N-n)}{N-1}\cdot\frac{M}{N}\cdot\frac{N-M}{N}$$

例 4—9　某批发商提供了一批产品，共 12 件，其中 3 件有轻微碰撞的痕迹。现用户取出 4 件使用。问：4 件全部完好无损的可能性有多大?

解：首先，注意这里涉及无放回抽样，即从这批产品中随机地取出一件，再从剩余产品中选出另一件，这就是无放回抽样。而且，这批产品只有 12 件，抽取 4 件产品占了总量的 33%左右。

设 X 表示“4 件产品中不合格品的个数”，则 X 服从超几何分布。可以用下列公式来计算其概率：

$$P(X=x)=\frac{C_M^x C_{N-M}^{n-x}}{C_N^n},\quad x=0,1,2,\cdots,\min(M,n)$$

式中，N 是批量；M 是该批产品中的不合格品数；n 是样本量；x 是样本中不合格品的个数；$P(X=x)$ 为在样本中恰好有 x 件不合格品的概率。记为 $X\sim H(N, M, n)$。

由题意知，$N=12$，$M=3$，$n=4$。则全部完好无损的概率为：

$$P(X=0)=\frac{C_{12-3}^{4-0}C_3^0}{C_{12}^4}=\frac{126\times 1}{495}\approx 0.255$$

故用户使用的 4 件产品全部完好无损的可能性为 25.5%。

在 MINITAB 中求解如下：计算→概率分布→超几何，在打开的对话框中进行如图 4—21 所示的设定，单击“确定”即得到所求结果如下：

概率密度函数
超几何分布，N=12，M=3 以及 n=4
x　P(X=x)
0　0.254 545

以上是四种常用的离散分布，在实际应用中，当样本容量小于批量的 10%时，超几何分布近似为二项分布；二项分布中，当 n 很大而 p 很小时，二项分布近似为泊松分布，所以泊松分布实际上是二项分布的极限分布。

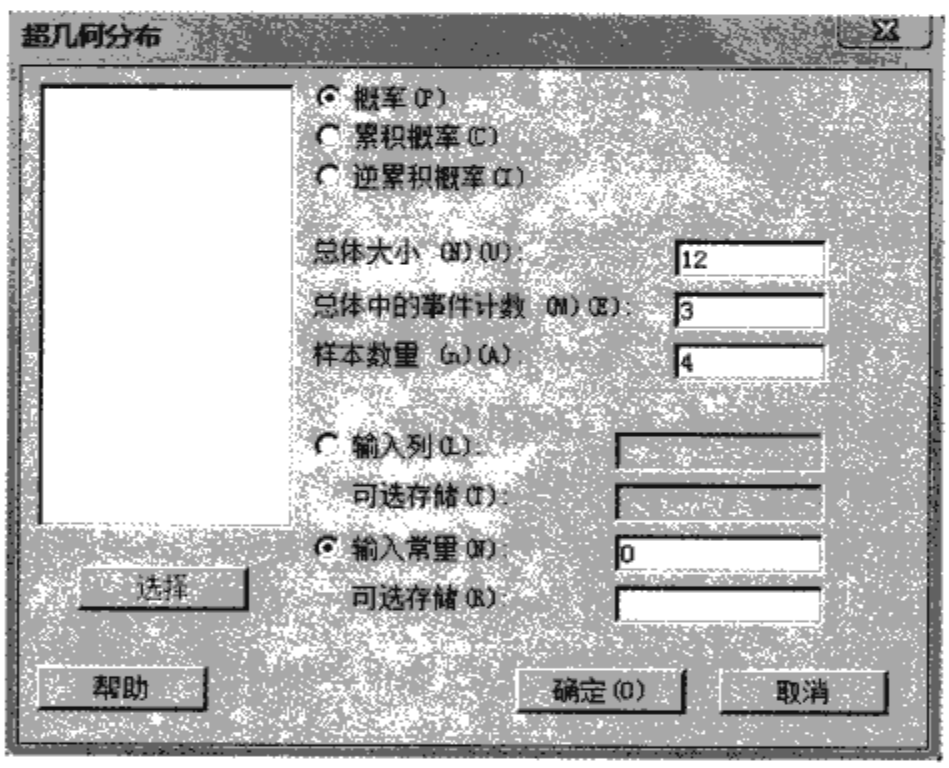


图 4—21　超几何分布对话框

4.2.5　常用的连续分布

常见的连续分布有：

- 正态分布（normal distribution）。
- 均匀分布（uniform distribution）。
- 指数分布（exponential distribution）。
- 对数正态分布（logarithmic normal distribution）。

- 威布尔分布（Weibull distribution）。

1. 正态分布

质量管理中最常用的连续分布是正态分布，它能够描述很多质量特性随机取值的统计规律性。正态分布的概率密度函数为：

$$p(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2},\quad -\infty<x<+\infty$$

式中，μ 为正态分布均值，反映曲线的中心位置；σ^2 为正态分布方差，反映曲线的形状；$\sigma(\sigma>0)$ 是正态分布的标准差。正态分布也称为高斯分布，记为 $X\sim N(\mu,\sigma^2)$。如图 4—22 所示，概率密度函数图像为“中间高、两边低、左右对称”的钟形曲线，根据不同的均值和方差可以得到各种不同形状的正态分布函数曲线。

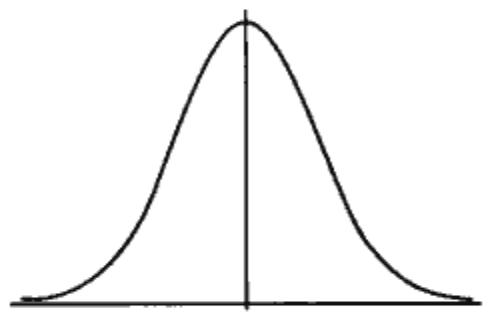


图 4—22　标准正态分布的概率密度函数曲线

特别地，当 $\mu=0$，$\sigma=1$ 时，此时的正态分布称为标准正态分布（standard normal distribution），记为 $N(0,1)$。设 $X\sim N(\mu,\sigma^2)$，则 $\frac{X-\mu}{\sigma}\sim N(0,1)$。式中的 $\frac{X-\mu}{\sigma}$ 常被称为标准变换。经过标准变换，任何正态分布都可以转化为均值为 0、标准差为 1 的标准正态分布。利用标准正态分布函数表，可以查表得到 $\Phi(x)=P(X\leqslant x)$ 的概率值。如果 $P(X\leqslant x)=\alpha$，则 $P(X\geqslant x)=1-\alpha$，称 x 为 α 分位数，又记为 z_α。由于正态分布图像左右对称，因此 $P(X\leqslant -x)=P(X\geqslant x)=1-P(X\leqslant x)$。

例 4—10　检查微电路生产中关键线路粘合过程的阻断力。过程平均力度是 19，标准差为 4。过程力度服从正态分布。如果工程规范下限为 13，则过程力度低于规范下限的比例为多少？

解：设 X 表示过程力度，$X\sim N(19,4^2)$。则 $\frac{X-19}{4}\sim N(0,1)$。考虑过程力度低于规范下限的概率。首先，进行标准变换 $\frac{13-19}{4}=-1.5$，然后，查标准正态分布函数表，得到 6.68%，即

$$P(X\leqslant 13)=P\left(\frac{X-19}{4}\leqslant\frac{13-19}{4}\right)=P\left(\frac{X-19}{4}\leqslant -1.5\right)=6.68\%$$

故 6.68%的阻断力低于规范下限 13。质量控制通常要求均值距离规范界限至少 3 倍标准差。为了实现这个目标，需要改进过程，要么提高阻断力的均值，要么减小

过程的标准差，或者同时改进这两个方面。

在 MINITAB 中求解如下：计算→概率分布→正态分布，在打开的对话框中进行如图 4—23 所示的设定，单击“确定”即得到所求结果如下：

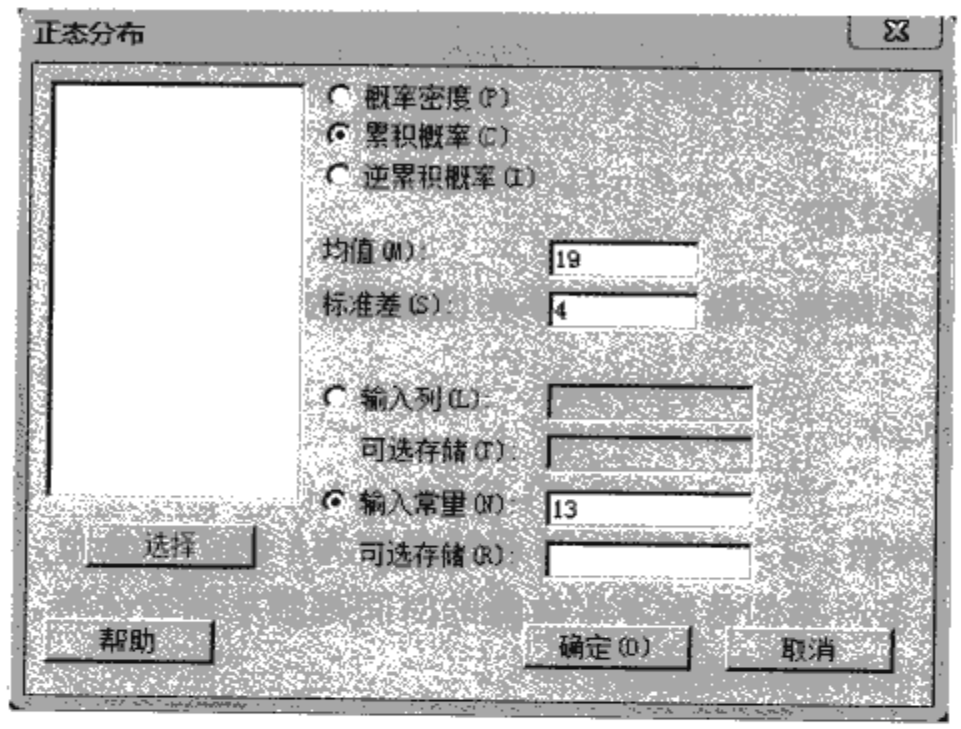


图 4—23 正态分布对话框

累积分布函数

正态分布，平均值＝19 和标准差＝4

x	P(X<=x)
13	0.066 807 2

2. 均匀分布

设连续随机变量 X 具有概率密度函数为：

$$p(x)=\begin{cases}\dfrac{1}{b-a}, & a<x<b\\ 0, & \text{其他}\end{cases}$$

则称 X 在区间（a，b）上服从均匀分布，记为 $X\sim U(a,b)$，如图 4—24 所示。如果变量 X 在区间（a，b）上服从均匀分布，意味着 X 落在区间（a，b）中任意长度相同的子区间内的可能性相同。均匀分布 $U(a,b)$ 的均值、方差与标准差分别为：

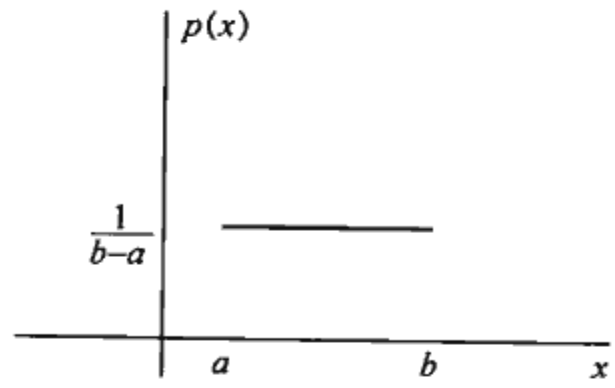


图 4—24 均匀分布的概率密度函数和分布函数

$$E(X)=\frac{a+b}{2}$$

$$\mathrm{Var}(X)=\frac{(b-a)^2}{12}$$

$$\sigma(X)=\sqrt{\frac{(b-a)^2}{12}}$$

3. 指数分布

设连续型随机变量 X 的概率密度函数为：

$$p(x)=\begin{cases}\lambda e^{-\lambda x}, & x\geqslant 0\\ 0, & x<0\end{cases}$$

式中，λ 为参数，$\lambda>0$，则称 X 服从参数为 λ 的指数分布，记为 $X\sim E(\lambda)$。在实际生活中，很多产品的首次发生故障的时间都服从指数分布。

指数分布的分布函数为：

$$F(x)=P(X\leqslant x)=\begin{cases}1-e^{-\lambda x}, & x\geqslant 0\\ 0, & x<0\end{cases}$$

指数分布的均值、方差和标准差分别为：

$$E(X)=\frac{1}{\lambda}$$

$$\mathrm{Var}(X)=\frac{1}{\lambda^2}$$

$$\sigma(X)=\frac{1}{\lambda}$$

例 4—11 一家城市水资源管理公司，平均每年发生 500 次泄漏。假定两次泄漏的间隔时间服从指数分布。问：周末（从周五晚上六点至周一早上六点）工作人员没有接到报修电话的概率是多少？

解：这里给出的是每年平均的泄漏次数，需要转化为两次泄漏之间的平均间隔时间（MTBF）。每年 365 天，每天 24 小时，即 8 760 小时。两次泄漏之间的平均间隔时间为 $\frac{8\,760}{500}=17.52$ 小时。设 X 表示两次泄漏的间隔时间，则 X 服从均值为 17.52 小时的指数分布，故 $\lambda=\frac{1}{17.52}=0.057$，即 $X\sim E(0.057)$。周五晚六点至周一早六点之间共有 60 个小时，这 60 小时内发生泄漏的概率为：

$$P(X\leqslant 60)=1-e^{-60/17.52}\approx 0.967=96.7\%$$

因此，这 60 小时没有发生泄漏，即工作人员周末空闲的概率仅为 $1-96.7\%=3.3\%$。

在 MINITAB 中求解如下：计算→概率分布→指数，在打开的对话框中进行如

图 4—25 所示的设定，单击“确定”即得到所求结果如下：

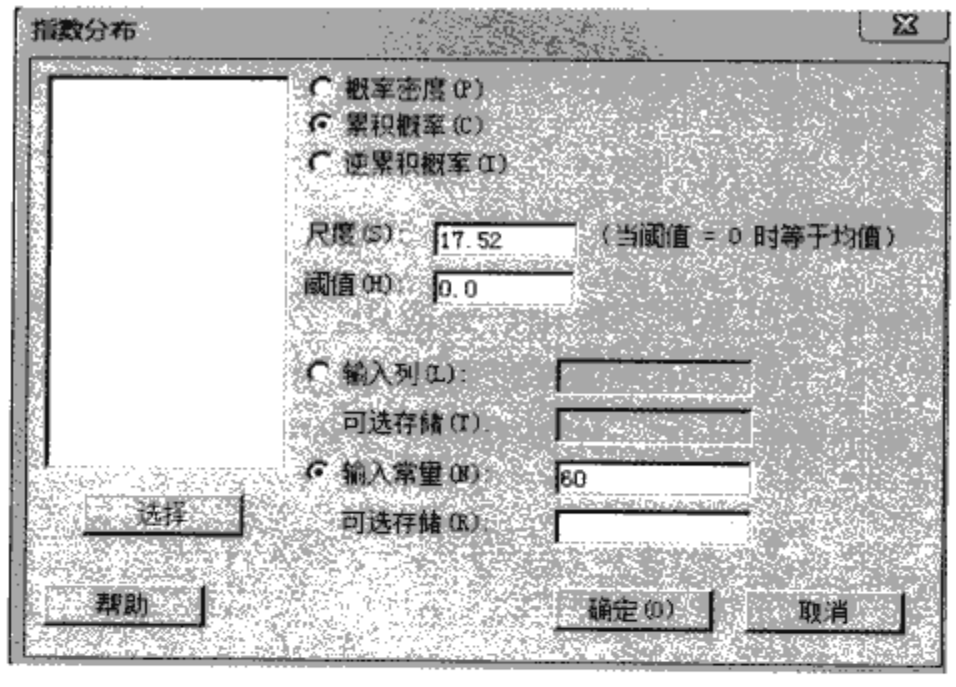


图 4—25 指数分布对话框

累积分布函数
指数分布，平均值=17.52

x	P(X<=x)
60	0.967 440

4. 对数正态分布

对数正态分布是对数取值后为正态分布的随机变量的概率分布。设 X 是取值为正数的随机变量，若 $\ln X \sim N(\mu, \sigma^2)$，则称 X 服从对数正态分布，记为 $X \sim \mathrm{LN}(\mu, \sigma^2)$，如图 4—26 所示。如果一个变量可以看作许多很小独立因子的乘积，则该变量可以看作对数正态分布。对于 $x>0$，对数正态分布的概率分布函数为：$f(x;\ \mu,\ \sigma)=\dfrac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-(\ln x-\mu)^2/2\sigma^2}$。其均值、方差分别为：

$$E(X)=e^{\mu+\sigma^2/2}$$
$$\mathrm{Var}(X)=e^{2\mu+\sigma^2}(e^{\sigma^2}-1)$$

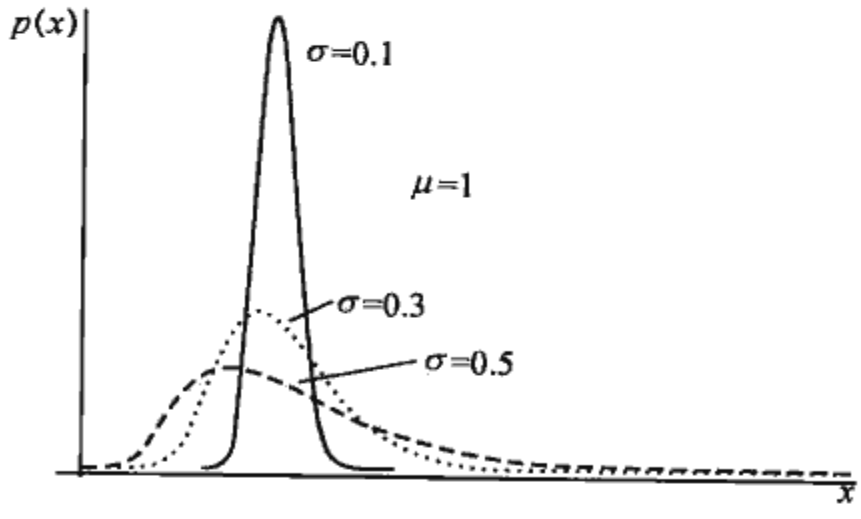


图 4—26 对数正态分布的概率密度函数曲线（$\mu=1$，σ 不同）

在地质勘探中，岩石的某种化学成分的对数服从正态分布，故得名对数正态分布。对数正态分布出现在很多领域，如针刺麻醉的阵痛效果、英语单词的长度、流行病的蔓延时间、某些电器的寿命、化学反应时间、绝缘材料的被击穿时间、产品维修时间，等等。

5. 威布尔分布

威布尔分布在可靠性工程中广泛应用，尤其适用于机电类产品的磨损累计失效的分布形式。由于可以利用概率纸很容易地推断出它的分布参数，所以广泛应用于各种寿命试验的数据处理。其概率密度函数为：

$$p(x)=\begin{cases}\dfrac{\alpha}{\beta}(x-\gamma)^{\alpha-1}\mathrm{e}^{-\frac{(x-\gamma)^{\alpha}}{\beta}}, & x\geqslant\gamma\\ 0, & x<\gamma\end{cases}$$

式中，α 为形状参数，$\alpha>0$；γ 为位置参数，$r\geqslant 0$；β 为尺度参数，$\beta>0$。记为 $X\sim W(\alpha,\beta,\gamma)$。当 $\gamma=0$，$\alpha=1$ 时，威布尔分布即为指数分布。

威布尔分布的形状参数 α 往往与失效机理相联系。尺度参数 β 起到放大与缩小比例常数的作用。位置参数 γ 是一个平移参数，有时又称为最小保证寿命，产品在 γ 以前不会失效，即失效的概率为零。

4.2.6 中心极限定理

假设随机变量 X_1 和 X_2 相互独立，且 X_1 和 X_2 同分布，即 X_1 和 X_2 具有相同的分布形状和分布参数，则称 X_1 和 X_2 是独立同分布的随机变量。

特别地，对于独立同正态分布具有以下性质：假设 X_1，X_2，…，X_n 是 n 个独立同正态分布的随机变量，且有有限的数学期望和方差，$X_i\sim N(\mu,\sigma^2)$（$i=1,2,\cdots,n,$）则样本均值 $\overline{X}=\dfrac{X_1+X_2+\cdots+X_n}{n}=\sum\limits_{i=1}^{n}\dfrac{X_i}{n}$ 仍服从均值为 μ，方差为 $\dfrac{\sigma^2}{n}$ 的正态分布，即 $\overline{X}\sim N(\mu,\dfrac{\sigma^2}{n})$。

以上是对于独立同正态分布的随机变量的性质。如果随机变量是非正态分布，甚至是离散分布时，只要独立同分布的随机变量个数 n 足够大，那么随机变量的和与均值的分布都可以近似为正态分布，这就是中心极限定理。

设 X_1，X_2，…，X_n 是 n 个独立同分布的随机变量，分布均值为 μ，方差为 σ^2，则在 n 较大时，有：

(1) $X_1+X_2+\cdots+X_n=\sum\limits_{i=1}^{n}X_i$ 近似服从均值为 $n\mu$、方差为 $n\sigma^2$ 的正态分布 $N(n\mu,n\sigma^2)$；

(2) $\overline{X}=\dfrac{X_1+X_2+\cdots+X_n}{n}=\sum\limits_{i=1}^{n}\dfrac{X_i}{n}$ 近似服从均值为 μ、方差为 $\dfrac{\sigma^2}{n}$ 的正态分布 $N\left(\mu,\dfrac{\sigma^2}{n}\right)$。

当 X_i 的分布对称时，只要 $n\geqslant 5$ 近似效果就比较理想；当 X_i 的分布非对称时，一般 $n\geqslant 30$ 近似效果才比较理想。根据中心极限定理，可用多次测量的方法对样本均值进行更精确的估计。

以下我们通过 MINITAB 软件来验证中心极限定理。首先设 X_1，X_2，X_3，X_4，X_5 分别为均匀分布的随机变量，我们使用 MINITAB 分别产生这 5 个随机变量的 100 个观测值，实现过程如下：打开 MINITAB 软件，将工作表的 C1～C5 列分别命名为 X_1，X_2，X_3，X_4，X_5。

按如下步骤分别对 5 个随机变量产生均匀分布的随机数：计算→随机数据→均匀，打开产生均匀分布随机数的对话框如图 4—27 所示，在窗口“要生成的数据行数”中设置“100”表示产生 100 个随机数据，并将其依次存储于 X_1，X_2，X_3，X_4，X_5 列，于是便得到 5 个均匀分布的数据表，如图 4—28 所示。

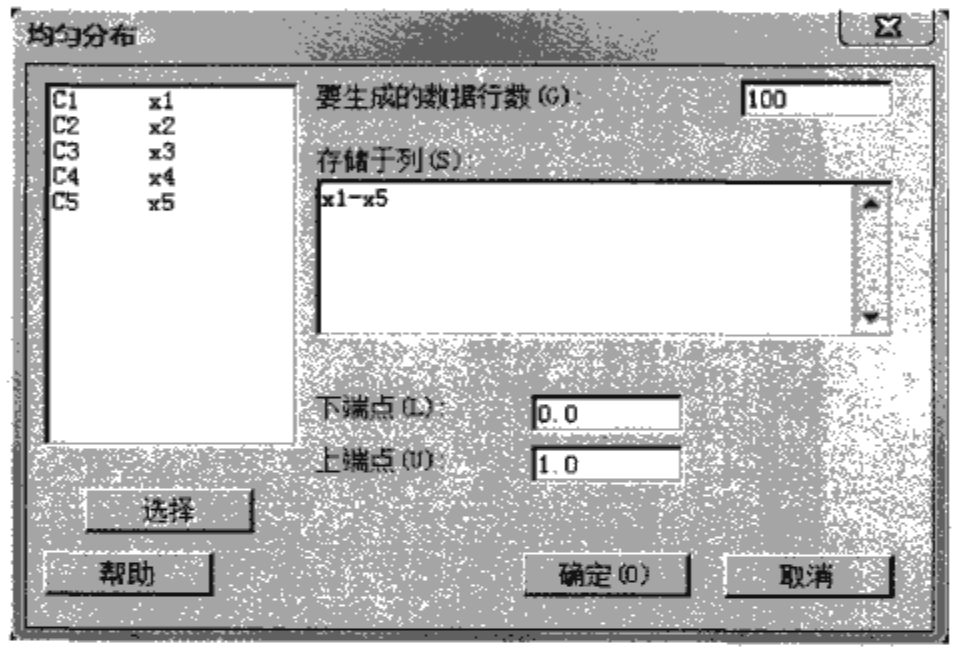


图 4—27 均匀分布对话框

工作表 1 ***

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	x1	x2	x3	x4	x5	
1	0.94339	0.17226	0.27830	0.78740	0.06420	
2	0.64483	0.96518	0.81142	0.95040	0.34435	
3	0.63419	0.48208	0.96473	0.62318	0.07950	
4	0.96865	0.45370	0.73812	0.82556	0.45160	
5	0.43268	0.91884	0.44981	0.74933	0.16779	
6	0.90633	0.69870	0.80559	0.78064	0.79246	
7	0.98642	0.48656	0.89713	0.09437	0.60940	
8	0.18826	0.03209	0.13605	0.73859	0.10889	
9	0.36342	0.59744	0.77671	0.27878	0.41577	
10	0.01702	0.33903	0.45794	0.85764	0.99769	
11	0.06793	0.45305	0.80013	0.20701	0.99965	

图 4—28 均匀分布数据表

产生均匀分布的数据后，我们分别对数据的每一行求其均值，将其值保存在 C6 列，并将其命名为“X-bar”，求均值操作如下：计算→行统计量，打开求行统计量对话框，如图 4—29 所示，选择“统计量”为“均值”，单击“确定”，结果如图 4—30 所示。

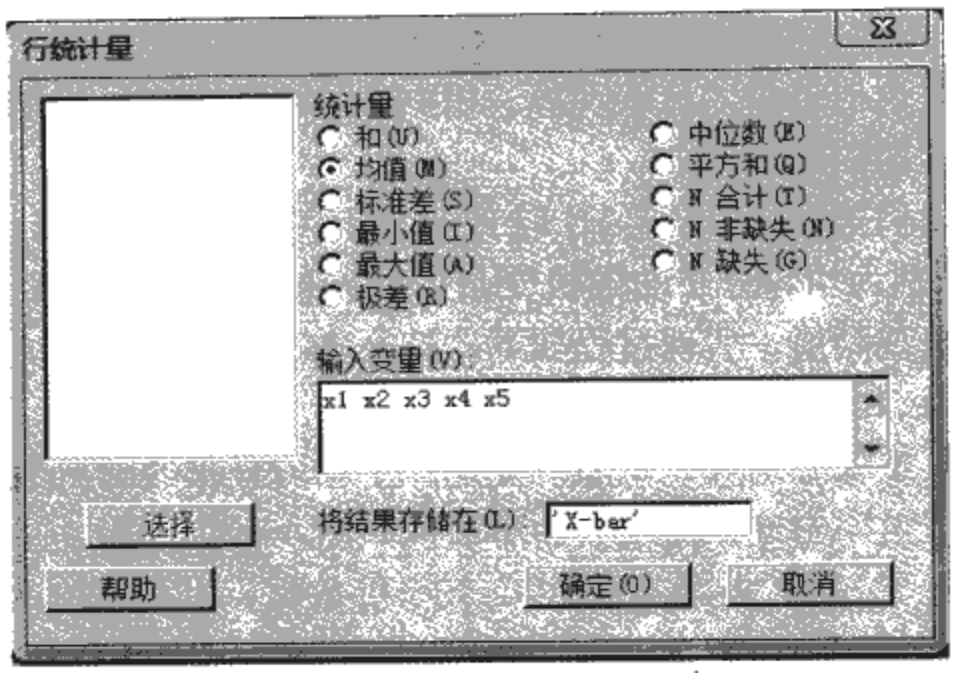


图 4—29　行统计量对话框

工作表 1 ***

+	C1	C2	C3	C4	C5	C6
	x1	x2	x3	x4	x5	X-bar
1	0.94339	0.17226	0.27830	0.78740	0.06420	0.44911
2	0.64483	0.96518	0.81142	0.95040	0.34435	0.74324
3	0.63419	0.48208	0.96473	0.62318	0.07950	0.55674
4	0.96865	0.45370	0.73812	0.82556	0.45160	0.68753
5	0.43268	0.91884	0.44981	0.74933	0.16779	0.54369
6	0.90633	0.69870	0.80559	0.78064	0.79246	0.79674
7	0.98642	0.48656	0.89713	0.09437	0.60940	0.61478
8	0.18826	0.03209	0.13605	0.73859	0.10889	0.24078
9	0.36342	0.59744	0.77671	0.27878	0.41577	0.48642
10	0.01702	0.33903	0.45794	0.85764	0.99769	0.53387
11	0.06793	0.45305	0.80013	0.20701	0.99965	0.50555

图 4—30　求均值结果

最后用 MINITAB 对均值数据用直方图来描述，操作如下：图形→直方图，打开直方图类型对话框，选择“包含拟合”选项，并单击“确定”，即得到直方图对话框，如图 4—31 所示。

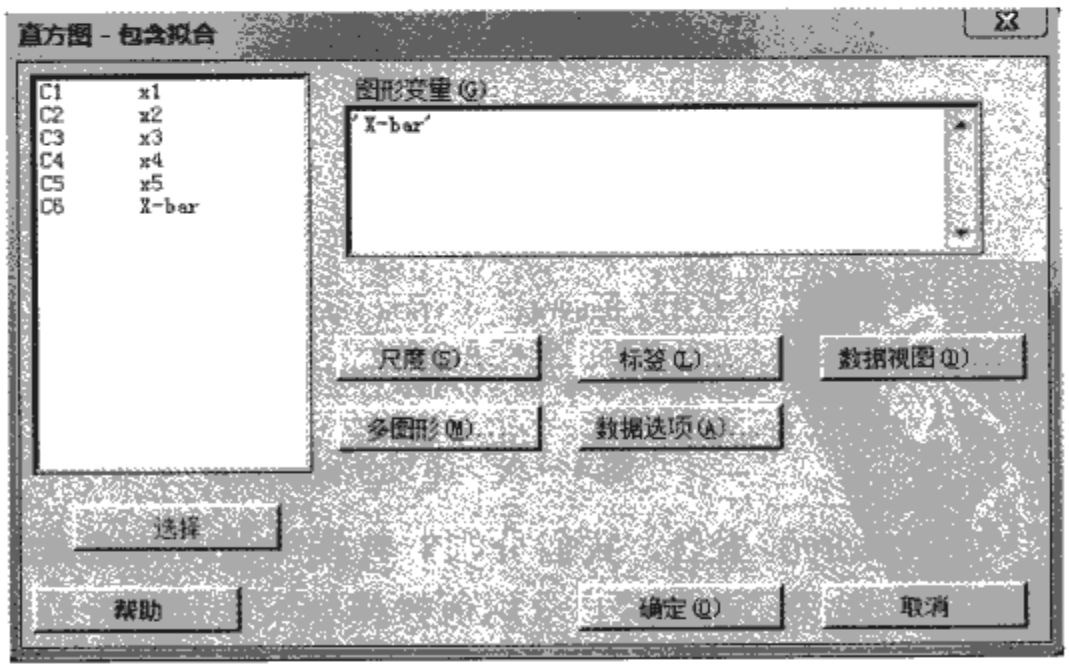


图 4—31　直方图对话框

在图形变量中选择 X-bar 列，单击“确定”，结果如图 4--32 所示。

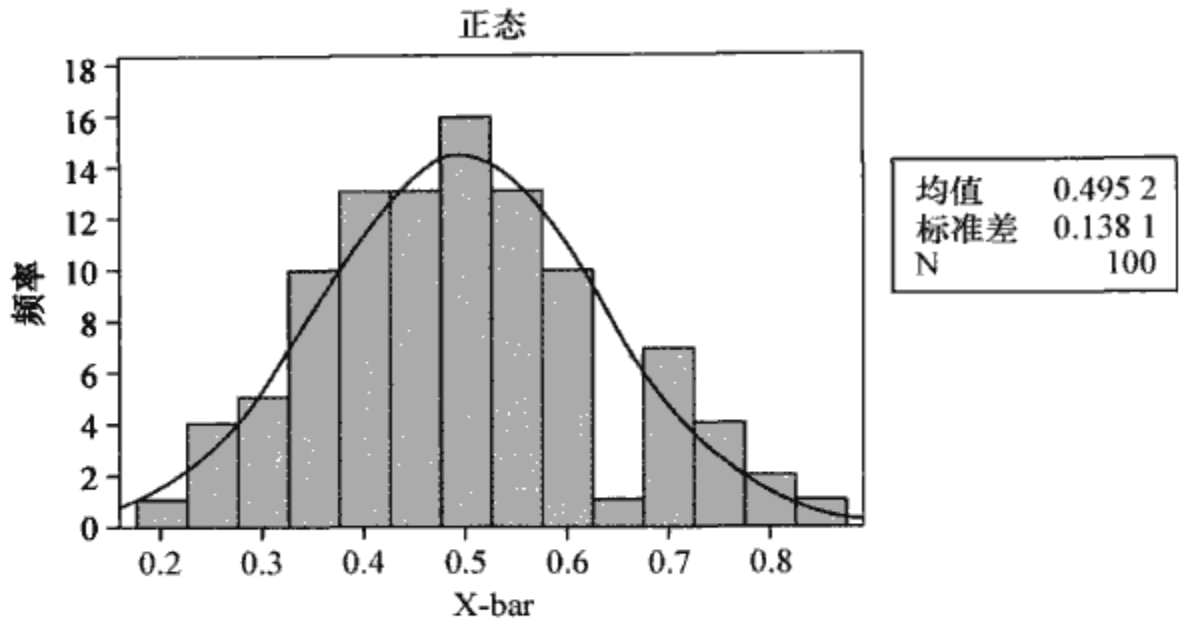


图 4—32 X-bar 的直方图

从图 4—32 中很容易看出，X-bar 近似服从正态分布。读者可以进一步尝试在不同的样本量时计算样本均值的分布。

4.2.7 统计量及抽样分析

1. 统计量

总体（population）是指所要研究事物及其现象的全体，可用随机变量 X 表示。构成总体的元素称为个体，构成总体的全部个体数量称为总体容量。样本（sample）是指从总体抽取的若干个体构成的集合，样本中所含的个体称为样品，样品的个数称为样本容量，常用 n 表示。容量为 n 的样本记为 X_1，X_2，…，X_n，是独立且与总体具有相同分布的随机变量。样本的观测值用 x_1，x_2，…，x_n 表示。

设 X_1，X_2，…，X_n 是来自总体的一个样本，$g(X_1, X_2, \cdots, X_n)$ 是 X_1，X_2，…，X_n 的函数，若 g 中不含有未知参数，则 $g(X_1, X_2, \cdots, X_n)$ 为统计量。描述中心位置常用的统计量有均值与中位数，众数用的相对较少。常见的描述波动情况的统计量有：

- 样本极差（sample range）：$R=X_{\max}-X_{\min}$，其中 $X_{\max}$，$X_{\min}$分别代表样本中的最大观测值和最小观测值，计算简单，但对信息的利用少。
- 样本方差（sample variance）：$s^2=\sum_{i=1}^{n}\frac{(X_i-\overline{X})^2}{n-1}$，运用广泛。
- 样本标准差（sample standard deviation）：$s=\sqrt{s^2}$，运用广泛。
- 变异系数（coefficient of variation）：$CV=s\sqrt{X}$，常用于不同数据的离散程度比较。

2. 抽样分布

抽样分布是指样本统计量的分布，是区间估计、假设检验的理论基础。

(1) 样本均值的分布。设 X_1，X_2，…，X_n 是来自正态总体 $N(\mu, \sigma^2)$ 的一个

样本，则

1）方差 σ^2 已知时，有 $\frac{\overline{X}-\mu}{\sigma/\sqrt{n}}\sim N(0,1)$。

2）方差 σ^2 未知时，有 $\frac{\overline{X}-\mu}{s/\sqrt{n}}\sim t(n-1)$，即服从自由度为 $n-1$ 的 t 分布。当 $n\geqslant 30$ 时，t 分布近似于标准正态分布。

（2）正态样本方差 s^2 的分布——χ^2 分布（χ^2 distribution）。设 X_1，X_2，…，X_n 是来自正态总体 $N(\mu,\sigma^2)$ 的一个样本，则

$$\frac{(n-1)s^2}{\sigma^2}=\sum_{i=1}^{n}\frac{(X_i-\overline{X})^2}{\sigma^2}\sim\chi^2(n-1)$$

即服从自由度为 $n-1$ 的 χ^2 分布。

（3）两个独立的正态样本方差之比的分布——F 分布。设有两个独立的正态总体 $N(\mu_1,\sigma_1{}^2)$ 和 $N(\mu_2,\sigma_2{}^2)$，X_1，X_2，…，X_n 是来自 $N(\mu_1,\sigma_1{}^2)$ 的一个样本，Y_1，Y_2，…，Y_m 是来自 $N(\mu_2,\sigma_2{}^2)$ 的一个样本，而且这两个样本相互独立。则它们的样本方差之比为：

$$\frac{s_1{}^2/\sigma_1{}^2}{s_2{}^2/\sigma_2{}^2}\sim F(n-1,m-1)$$

式中，$n-1$ 称为分子自由度，$m-1$ 称为分母自由度。

4.2.8 点估计和区间估计

统计推断的主要问题可以分为两大类，估计和检验。这里主要讨论估计问题中的点估计与区间估计。

1. 点估计

在介绍点估计（point estimate）之前我们先明确一下估计量和估计值的概念。估计量是指用于估计相关的总体参数的统计量，所要估计的总体参数一般用 θ 表示，其估计量一般用 $\hat{\theta}$ 表示。估计值是指估计量的具体数值。点估计是根据样本数据计算的总体参数的一个估计值。

同一个参数的估计量可以有很多，并非所有的估计量都是优良的，因此选择估计量时一般有三个评选标准：

（1）无偏性。设 θ 为未知参数，$\hat{\theta}=\hat{\theta}(x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 是 θ 的估计量，若 $E(\hat{\theta})$ 存在且 $E(\hat{\theta})=\theta$，则称 $\hat{\theta}$ 是参数 θ 的无偏估计量。

（2）一致性。当样本容量 n 增大时，如果估计量越来越接近总体参数的真值时，称该估计量为一致估计量。

（3）有效性。主要用于度量估计量的离散程度，如果两个估计量都是无偏的，可认为其中方差小的估计量更有效。

常见的点估计量有以下几种：

1）正态总体均值的无偏估计：样本均值 $\bar{x}$ 和样本中位数 $\tilde{x}$。当样本容量为 1

或者 2 时，两者相同；当样本容量大于 2 时，$\bar{x}$ 优于 $\tilde{x}$。

2）总体方差的无偏估计：样本方差 $s^2=\sum_{i=1}^{n}\frac{(x_i-\bar{x})^2}{n-1}$。研究表明，它是 σ^2 的所有无偏估计中最好的。

3）正态分布标准差 σ 的无偏估计并不是样本标准差 s，而是将其进行偏差修正得到，或者将样本极差除以一个与 n 有关的常数而得到：

$$\hat{\sigma}_s=\frac{s}{c_4},\quad s=\sqrt{s^2}\quad \text{或者}\quad \hat{\sigma}_R=\frac{R}{d_2},\quad R=x_{(n)}-x_{(1)}$$

式中，修偏系数 c_4 与系数 d_2 是仅与样本容量 n 有关的常数，可通过查表获得。根据样本容量不同，可分为以下几种情况：

（1）当 $n=2$ 时，上述两个估计相同。

（2）当 $n\geqslant 3$ 时，上述两个估计是不同的，理论研究表明，$\hat{\sigma}_s$ 优于 $\hat{\sigma}_R$，因为 $\hat{\sigma}_s$ 比 $\hat{\sigma}_R$ 波动小，所以在实际中应该优先选用 $\hat{\sigma}_s$。

（3）当 n 较大（如 $n>30$）时，无须修正，可以将样本标准差 s 直接作为 σ 的估计。

下面给出一个简单例子说明其用法，在实际估计样本均值时样本容量应大于 15，估计方差和标准差时样本容量应大于 30。

例 4—12 某产品直径服从正态分布 $N(\mu,\sigma^2)$，从一批产品中随机抽取 6 个测其直径，得到如下数据（单位：厘米）：14.8，15.3，15.1，15，14.7，15.1，给出产品 μ，σ^2，σ 的无偏估计。

解：我们用样本均值 $\bar{x}$ 估计 μ，用 s^2 估计 σ^2：

$$\hat{\mu}=\bar{x}=\frac{14.8+15.3+15.1+15+14.7+15.1}{6}=15$$

$$\hat{\sigma}^2=s^2=\frac{0.2^2+0.3^2+0.1^2+0.3^2+0.1^2}{6-1}=0.048$$

对 σ 采用对标准差进行修偏的方法进行估计，$n=6$，查得 $c_4=0.9515$：

$$\hat{\sigma}_s=\frac{s}{c_4}=\frac{0.219}{0.9515}=0.23016$$

对 σ 采用样本极差的方法进行估计，$n=6$，查得 $d_2=2.534$：

$$\hat{\sigma}_R=\frac{R}{d_2}=\frac{15.3-14.7}{2.534}=0.2368$$

可见 $\hat{\sigma}_s$ 与 $\hat{\sigma}_R$ 非常接近。

利用 MINITAB 可以方便地计算出样本数据的各种统计量，操作如下：打开工作表“例 4—12”① 数据表，依次执行：统计→基本统计量→显示描述性统计量，得到对话框如图 4—33 所示。

① 读者可登录 www.rdjg.com.cn 免费查阅相关工作表文件。

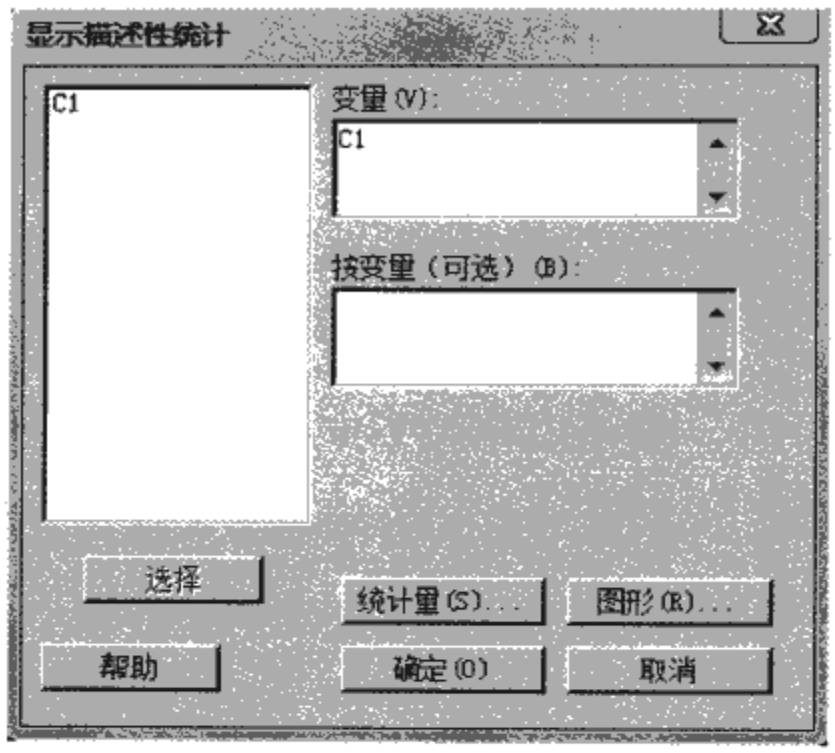


图 4—33　显示描述性统计量对话框

单击“统计量”按钮，打开统计量对话框，选择需要计算的统计量并进行相应的设置，如图 4—34 所示，单击“确定”，回到显示描述性统计量对话框，再单击“确定”，得到所求的样本的均值、标准差、方差和极差。结果如下：

描述性统计：C1

变量	平均值	标准差	方差	极差
C1	15.000	0.219	0.048 0	0.600

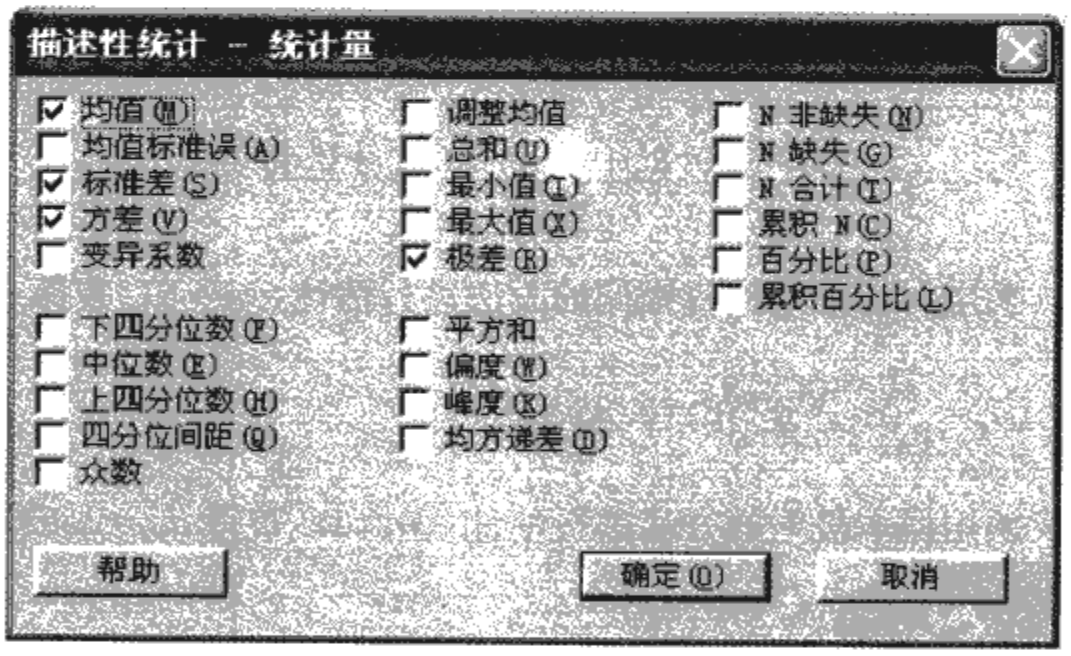


图 4—34　统计量对话框

2. 区间估计

点估计仅仅给出参数的一个具体的估计值，无法确定它与真值的误差及估计可靠性如何，而区间估计可弥补这种不足。区间估计是通过样本估计总体参数可能位于的区间。

设 θ 是总体的一个待估参数，对于给定的 $\alpha(0<\alpha<1)$，若由样本确定的两个估

计量 $\theta_L=\theta_L(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 和 $\theta_U=\theta_U(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 满足 $P(\theta_L\leqslant\theta\leqslant\theta_U)=1-\alpha$，则称随机区间$[\theta_L, \theta_U]$是 θ 的置信水平为 $1-\alpha$ 的置信区间，θ_L 与 θ_U 为 $1-\alpha$ 的置信下限与置信上限。在区间估计中，对置信区间的上限和下限均加以限定的称为双侧区间估计，仅对其中的上限或者下限加以限定的称为单侧区间估计。在构造置信区间时，常用 90%，95%，99%三个置信水平。

(1) 单个正态总体参数的区间估计。设分布为 $N(\mu, \sigma^2)$，从总体中抽取的样本为 $x_1, x_2, \cdots, x_n$，样本均值为 $\bar{x}$，样本方差为 s^2，样本标准差为 s。

1) 总体均值 μ 的区间估计。

μ 的估计一般采用样本均值 $\bar{x}$，从 $\bar{x}$ 的分布来构造置信区间。

当总体标准差 σ 已知时，根据 $Z=\dfrac{\overline{X}-\mu}{\sigma/\sqrt{n}}\sim N(0, 1)$ 可得 $1-\alpha$ 置信区间为：

$$\bar{x}-z_{1-\alpha/2}\frac{\sigma}{\sqrt{n}}\leqslant\mu\leqslant\bar{x}+z_{1-\alpha/2}\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

记为 $\bar{x}\pm z_{1-\alpha/2}\sigma/\sqrt{n}$，其中 $z_{1-\alpha/2}$是标准正态分布的 $1-\alpha/2$ 分位数。

当总体标准差 σ 未知时，根据$\dfrac{\overline{X}-\mu}{s/\sqrt{n}}\sim t(n-1)$ 可得 μ 的 $1-\alpha$ 置信区间为：

$$\bar{x}\pm t_{1-\alpha/2}(n-1)\frac{s}{\sqrt{n}}$$

式中，$t_{1-\alpha/2}(n-1)$ 表示自由度是 $n-1$ 的 t 分布的 $1-\alpha/2$ 分位数。

2) 总体方差 σ^2 与标准差 σ 的区间估计。

当总体均值 μ 已知时，由 $\sum\dfrac{(x_i-\mu)^2}{\sigma^2}\sim\chi^2(n)$ 可得 σ^2 的 $1-\alpha$ 置信区间为：

$$\left[\frac{\sum(x_i-\mu)^2}{\chi^2_{1-\alpha/2}(n)}, \frac{\sum(x_i-\mu)^2}{\chi^2_{\alpha/2}(n)}\right]$$

式中，$\chi^2_{\alpha/2}(n)$ 与 $\chi^2_{1-\alpha/2}(n)$ 分别是 $\chi^2(n)$ 分布的 $\alpha/2$ 分位数与 $1-\alpha/2$ 分位数。两边开方，可得 σ 的 $1-\alpha$ 置信区间为：

$$\left[\frac{\sqrt{\sum(x_i-\mu)^2}}{\sqrt{\chi^2_{1-\alpha/2}(n)}}, \frac{\sqrt{\sum(x_i-\mu)^2}}{\sqrt{\chi^2_{\alpha/2}(n)}}\right]$$

当总体均值 μ 未知时，由 $\dfrac{(n-1)s^2}{\sigma^2}=\sum\dfrac{(X_i-\overline{X})^2}{\sigma^2}\sim\chi^2(n-1)$ 可得 σ^2 的 $1-\alpha$ 置信区间为：

$$\left[\frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{1-\alpha/2}(n-1)}, \frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{\alpha/2}(n-1)}\right]$$

式中，$\chi^2_{\alpha/2}(n-1)$ 与 $\chi^2_{1-\alpha/2}(n-1)$ 分别是 $\chi^2(n-1)$ 分布的 $\alpha/2$ 分位数与 $1-\alpha/2$ 分

位数。同理，σ 的 $1-\alpha$ 置信区间为：

$$\left[\frac{s\sqrt{n-1}}{\sqrt{\chi^2_{1-\alpha/2}(n-1)}},\frac{s\sqrt{n-1}}{\sqrt{\chi^2_{\alpha/2}(n-1)}}\right]$$

例 4—13 某种灯泡的寿命服从正态分布，现从一批灯泡中随机抽取 16 只，测得其使用寿命（单位：小时）如下：1 510，1 450，1 480，1 460，1 520，1 480，1 490，1 460，1 480，1 510，1 530，1 470，1 500，1 520，1 510，1 470。给出该批灯泡平均使用寿命 95%的置信区间。

解：运用 MINITAB 进行本例的计算，打开工作表“例 4—13”① 灯泡寿命表，依次进行下列操作：统计→基本统计量→单样本 t，得到 t 统计量对话框，对其进行相应的设置，如图 4—35 所示，单击“图形”按钮，对其进行设定，如图 4—36 所示。单击“确定”，回到 t 统计量对话框，再点击“选项”按钮，得到如图 4—37 所示对话框，设定置信水平为 95%，并在备择中选择“不等于”对其进行相应设定，点击“确定”回到 t 统计量对话框，继续点击“确定”，得到结果如下：

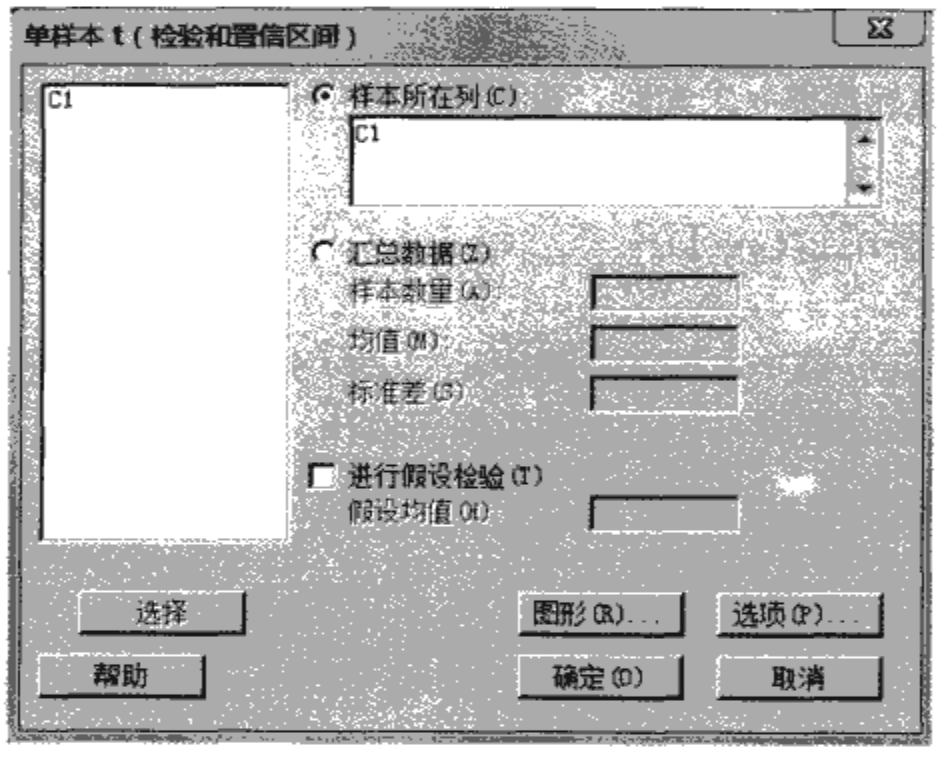


图 4—35 单样本 t 对话框

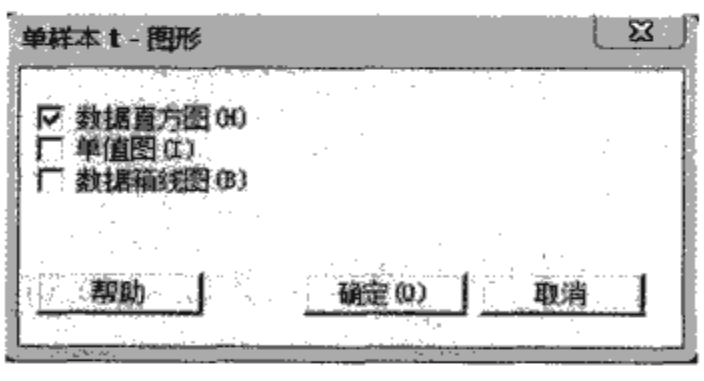


图 4—36 图形对话框

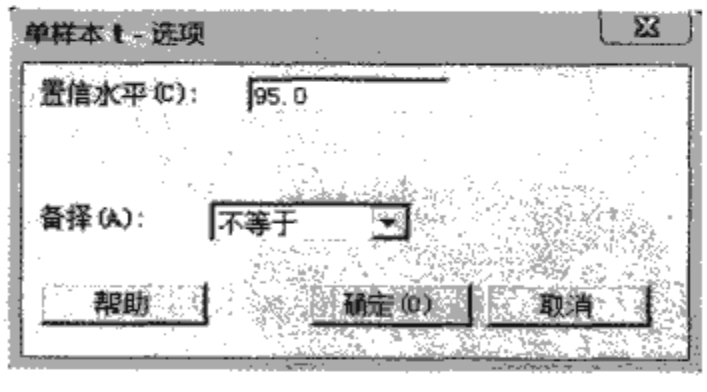


图 4—37 选项对话框

① 读者可登录 www. rdjg. com. cn 免费查阅相关工作表文件。

单样本 T: 使用寿命

平均值

变量	N	平均值	标准差	标准误	95% 置信区间
使用寿命	16	1 490.00	24.77	6.19	(1 476.80，1 503.20)

使用寿命的直方图如图 4—38 所示。

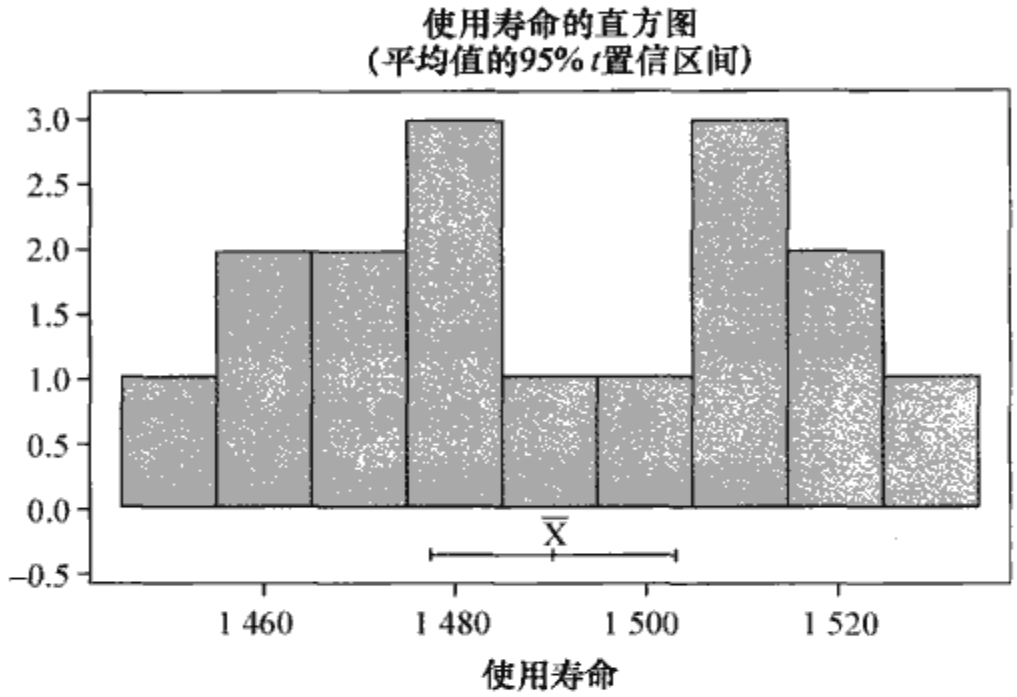


图 4—38 使用寿命的区间估计

(2) 总体比率 p 的区间估计。设总体 $X\sim b(1,\ p)$，所抽取的样本容量为 n，抽取的样本比例为 $\bar{p}$，当样本容量足够大（至少 $np\geqslant 5$）时，可认为样本比例 $\bar{p}$ 的抽样分布服从于正态分布 $N\left(p,\dfrac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}\right)$。因此 p 的 $1-\alpha$ 置信区间为：

$$\bar{p}\pm z_{1-\alpha/2}\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$$

式中，$z_{1-\alpha/2}$是标准正态分布的 $1-\alpha/2$ 分位数。

例 4—14 在一项家电市场调查中，随机抽取了 300 个居民户，调查他们是否拥有某一品牌的电视机。其中拥有该品牌电视机的家庭占 26%。求总体比例的置信区间，置信水平为 95%。

解：使用 MINITAB 对其进行求解，过程如下：统计→基本统计量→单比率，打开如图 4—39 所示的对话框，在本例中，事件数为总试验数乘以事件发生率，即 300×26%=78，然后点击“选项”命令，打开对话框，如图 4—40 所示，在本例中选择的置信区间为 95%，在备择中选择“不等于”，并选择使用基于正态分布的检验和区间（注：选择这一项表示计算出的置信区间是根据正态分布估计的。若不选择此项，MINITAB 给出的是基于精确算法的置信区间），单击“确定”，回到单比率置信区间对话框，再单击“确定”，即得到我们所求的总体比率的置信区间，结果如下：

单比率检验和置信区间

样本	X	N	样本 p	95% 置信区间
1	78	300	0.260 000	(0.210 365，0.309 635)

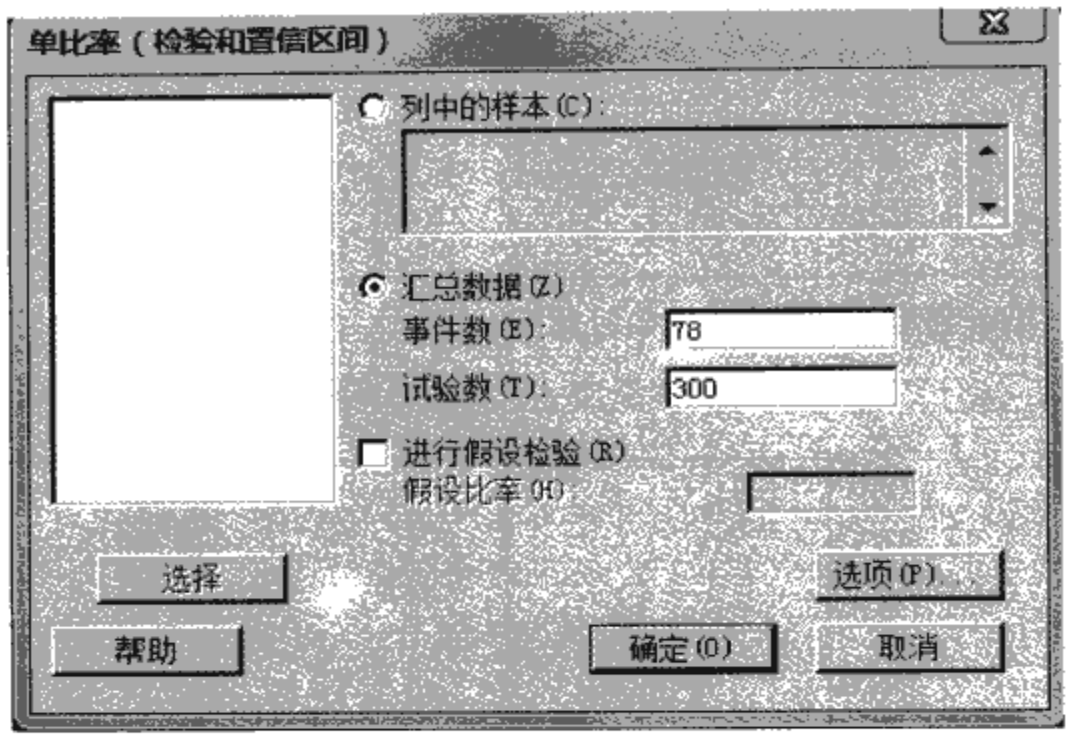


图 4—39　单比率置信区间对话框

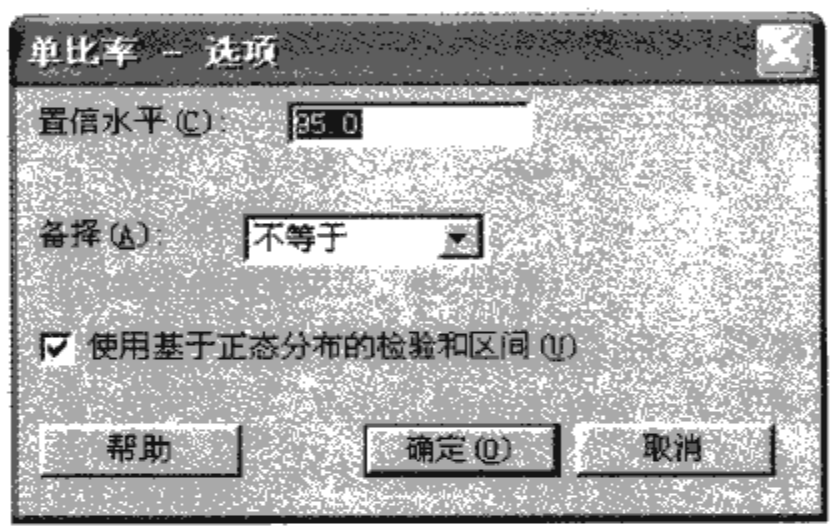


图 4—40　单比率选项对话框

故在本例中，拥有该品牌电视机比率的95%的置信区间为（0.210 365，0.309 635）。

4.3　数据的收集和整理

4.3.1　测量尺度与数据类型

1. 测量尺度

测量者采用一定的测量方法或借助一定的测量工具，对观测对象的某个质量特性进行赋值的过程，即对测量对象进行量化的过程。由于客观事物及其现象具体特征不同，进行数据收集时采用的测量尺度也不同，因此得到的数据精确程度也不同。按照由粗略到精细，由初级到高级，可将数据的测量尺度分为定类测量尺度、定序测量尺度、定距测量尺度和定比测量尺度四个层次。

（1）定类测量尺度（nominal measurement scale）。定类测量尺度只能表明个体所属的类别而不能体现数量大小、多少或先后顺序，一般用于对测量对象进行平行的

分类或分组。例如，0=男，1=女，可以是两类，也可以是多类。以定类测量尺度收集的数据称为属性数据。使用定类测量尺度进行分类必须保证每个个体或单位都能够归属于某一类别，并且只能属于某一个类别，即“=”（属于）或“≠”（不属于）。

（2）定序测量尺度（ordinal measurement scale）。定序测量尺度是对事物之间等级或顺序的一种测度。如产品按其质量高低列为一等品、二等品、三等品等。它不仅可以测度类别差，还可以测度次序差，并可比较大小，但其序号仍不能进行加减乘除等数学运算。有时在质量管理中也把定序数据转化为定类数据，然后用二项分布或泊松分布进行分析。

（3）定距测量尺度（interval measurement scale）。定距测量尺度是以数值来表示个体的特征并且能测定个体之间数据差距的尺度。定距尺度不仅能区分事物的类别，进行排序，比较大小，还可以精确地计量差异的大小，可以进行加减运算，不能进行乘除运算。如温度 20℃与 10℃的差距与 10℃与 0℃的差距相等，但定距数据中“0”是没有意义的，所以没有倍数的概念，因此不能说 20℃比 10℃热一倍。

（4）定比测量尺度（ratio measurement scale）。定比测量尺度是对事物之间比值的一种测定。例如，人的年龄、身高、体重，物体的长度、面积、容积等数量标志。除了具有以上三种尺度的全部特性外，还具有一个特性，那就是可以计算出两个测度之间的比值，即能够进行乘除运算。这种数据中的“0”是有意义的，所以有倍数的概念，因此我们可以说 20cm 是 10cm 的两倍。

2. 数据类型

数据分类的方法很多，按照不同的方法或不同数据特性所分的类别不同。

（1）从计量尺度来说，分为定性数据与定量数据。定性数据是指只能用文字或数字代码来表现事物的本质特征或属性特征的数据，如人口按性别分为男与女两种类别，或者用 1，0 分别表示男性与女性。定量数据是指用数值来表现事物数量特征的数据，如两位学生的考试成绩分别为 85 分与 80 分。

（2）按统计角度，可分为连续型数据与离散型数据（或称属性值数据）。用量具进行测量得出的可连续取值的数据是连续型数据，也称计量数据，如长度、重量、温度等。它可以比较敏感地反映过程变化，包含的信息丰富。离散型数据也称非连续型数据、计数数据，反映过程变化时不如连续型数据敏感。如合格/不合格，成功/失败，是/否，接受/拒绝，好/坏等。离散型数据又分为计件值数据和计点值数据。计件值数据是指按件计数的数据，如不合格品数、彩色电视机台数等；记点值数据是指按缺陷点计数的数据，如疵点数、沙眼数、气泡数等。

（3）按数据来源，可分为观测数据与实验数据。观测数据是指在没有对现象进行人为控制条件下，通过统计调查或观察而得到的数据。实验数据是在人为控制条件下通过实验方式获取的关于实验对象的数据。

（4）按加工程度，可分为原始数据与次级数据。原始数据是研究者直接对研究对象进行调查、观测和实验所获得的反映个体特征的数据，也称为直接数据。次级数据也称为加工数据或二手数据，是指已经过加工整理、能反映总体数量特征的各种非原始数据。

4.3.2 收集数据与方法

收集数据的方法有很多，包括观察法、实验法、报告法与询问法等，其中询问法又包括访问调查、电话调查、座谈会等。本书主要介绍一种数据收集的工具——检查表。检查表是测量阶段过程数据收集时最常用的工具。针对不同的测量过程，不同测量对象需要使用不同的测量表，因此要有针对性地设计检查表，按团队意图收集重要数据。通常在检查表中要注明被测变量，同时还应注明由谁来收集数据以及采用的测量间隔。表 4—2 是一个检查表的示例。该表既记录了抽样数量和检测到的不合格品的数量，又记录了各种缺陷发生的频次。

表 4—2　　某成品抽样检验及外观不合格项目检查表（示例）

批次	产品号	成品量（箱）	抽样数（支）	不合格品数（支）	批不合格品率（%）	外观不合格项目								
						切口	贴口	空松	短烟	过紧	钢印	油点	软腰	表面
1	烤烟型	10	500	3	0.6	1					1			1
2	烤烟型	10	500	8	1.6			2	1					
3	烤烟型	10	500	4	0.8		1					1		
4	烤烟型	10	500	3	0.6		2			1				
5	烤烟型	10	500	5	1.0	1		1						1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮									
250	烤烟型	10	500	6	1.2			1		1				
合计		2 500	125 000	990	0.8	80	297	458	35	28	10	15	12	55

4.3.3 抽样方法

抽样时需要考虑的重点是所抽取样本对总体的代表性和准确性。采用不同的抽样方法样本的代表性和准确性不同，因此必须采用合适的抽样方法，常用的有简单随机抽样、分层抽样等。

1. 简单随机抽样

简单随机抽样也叫单纯随机抽样，指直接从抽样总体中随机地抽取样本，并以该样本对总体相应的指标作出统计推断。简单随机抽样必须满足两个条件：（1）等可能性，即总体的每个个体都有同等机会被抽到。（2）独立性，即每次抽样都是相互独立的。常用的简单随机抽样方法有：

（1）抽签法。将总体中的每个个体编号，用手工或者摇号机随机抽取号码，确定抽样单位。

（2）随机数表法。随机数表中的数字的出现及其排列是随机形成的。使用时先将总体编号，按随机数表的任意一列任意行开始向任何方向寻找，凡属于范围内的编号都可作为样本。

（3）计算机模拟法。利用计算机中的随机数字发生器进行抽取。

（4）信手抽取法。从研究总体中随手抽取所需的调查单位。

简单随机抽样使用简单，但当总体中各标志值之间差异较大时，这种抽样形成

的代表性较小，这时采用分层抽样的代表性更好。

2. 分层抽样

分层抽样又称类型抽样或分类抽样，是统计分组与随机抽样的结合。它是将抽样总体按某一标志分层，然后从每层总体样本中随机抽取若干个样本组成抽样样本。假设总体含有 N 个样本，且被划分为 k 层，每层总体样本为 N_i，则有 $\sum_{i=1}^{k} N_i = N$，从每层总体 N_i 中随机抽取 n_i 个样本，则样本 $n = \sum_{i=1}^{k} n_i$ 。根据不同要求，对于样本容量 n，可以有三种不同的分配方法。

（1）比例分配法。样本数按各层总体数的多少比例分配，即 $\frac{n_1}{N_1} = \frac{n_2}{N_2} = \cdots = \frac{n_k}{N_k} = \frac{n}{N}$，则各层的样本数为：

$$n_i = n\frac{N_i}{N}, \quad i = 1,2,\cdots,k$$

（2）适度分配法。比例分配法未考虑波动程度的差异。适度分配法认为波动程度较大的层应多取样，波动程度小的层应少取样，这样可以减少抽样误差。记 σ_i（$i=1$，2，…，k）为第 i 层的标准差，适度分配法要求各层样本数 n_i 与各层总体与各层标准差乘积的比例相等，即

$$\frac{n_1}{N_1\sigma_1} = \frac{n_2}{N_2\sigma_2} = \cdots = \frac{n_k}{N_k\sigma_k} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{k} N_i\sigma_i}$$

则各层的样本数为：

$$n_i = n\frac{N_i\sigma_i}{\sum_{i=1}^{k} N_i\sigma_i}, \quad i = 1,2,\cdots,k$$

（3）经济分配法。经济分配法在适度分配法基础上考虑了抽样成本，对于抽样费用较高的层相对少取样，而费用较低的层则可以多取样，记 C_1，C_2，…，C_k 为各层的抽样费用。由于样本数与费用的平方根成反比，应该使下列比例保持相等，达到在一定抽取费用情况下抽样误差最小，或在一定的抽样误差情况下抽样费用最少，即

$$\frac{n_1}{N_1\sigma_1/\sqrt{c_1}} = \frac{n_2}{N_2\sigma_2/\sqrt{c_2}} = \cdots = \frac{n}{\sum_{i=1}^{k} N_i\sigma_i/\sqrt{c_i}}$$

则各层的样本数应为：

$$n_i = n\frac{N_i\sigma_i/\sqrt{c_i}}{\sum_{i=1}^{k} N_i\sigma_i/\sqrt{c_i}}, \quad i = 1,2,\cdots,k$$

4.3.4 描述性统计方法

当我们获得样本数据后，需找出能反映数据分布特征的各个代表值，如数据分布的集中趋势，数据分布的离散程度，数据分布的偏度和峰度，等等。在前面已经介绍了常用的描述数据集中程度的统计量有均值、中位数、众数等；反映数据分布的离散程度的统计量有方差、标准差和极差等。这里仅介绍反映数据分布形状的统计量：偏度和峰度。

偏度（skewness）是对数据分布的偏移方向和程度所作的描述。若已知样本数据，其偏度的估计为：

$$\beta_3 = \frac{n\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^3}{(n-1)(n-2)s^3}$$

当数据对称性分布，$\beta_3=0$。若 $\beta_3>0$，表示右偏态；若 $\beta_3<0$，表示左偏态。

峰度（kurtosis）是对数据分布的陡峭程度所做的描述。若已知样本数据，其峰度的估计为：

$$\beta_4 = \frac{n(n+1)\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^4}{(n-1)(n-2)(n-3)s^4} - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)}$$

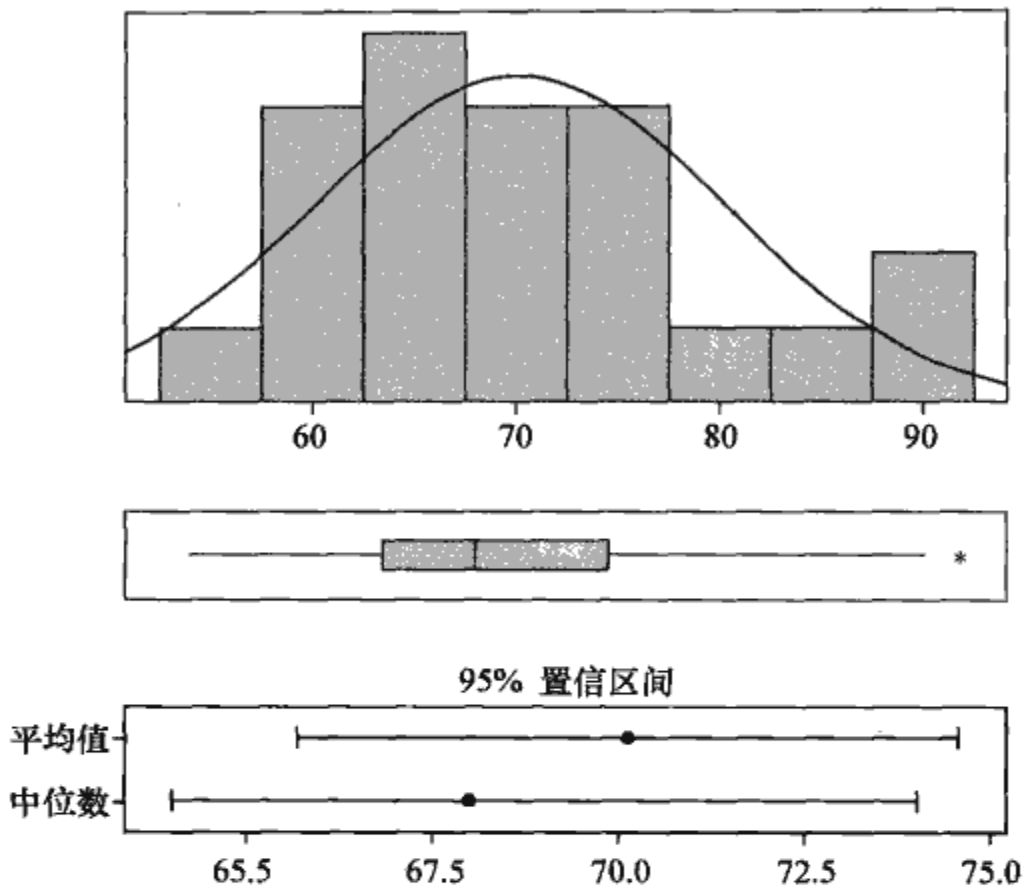
当数据呈正态分布时，$\beta_4=0$。数据分布越扁平，峰度越低；数据分布越陡峭，峰度越高。

例 4—15 为了解某地区成年人心脏健康程度，项目小组对该地区的成年人脉搏分别进行了随机抽样。小组测量的脉搏的数据如表 4—3 所示。

表 4—3　　小组测量的脉搏数据表　　单位：次/分钟

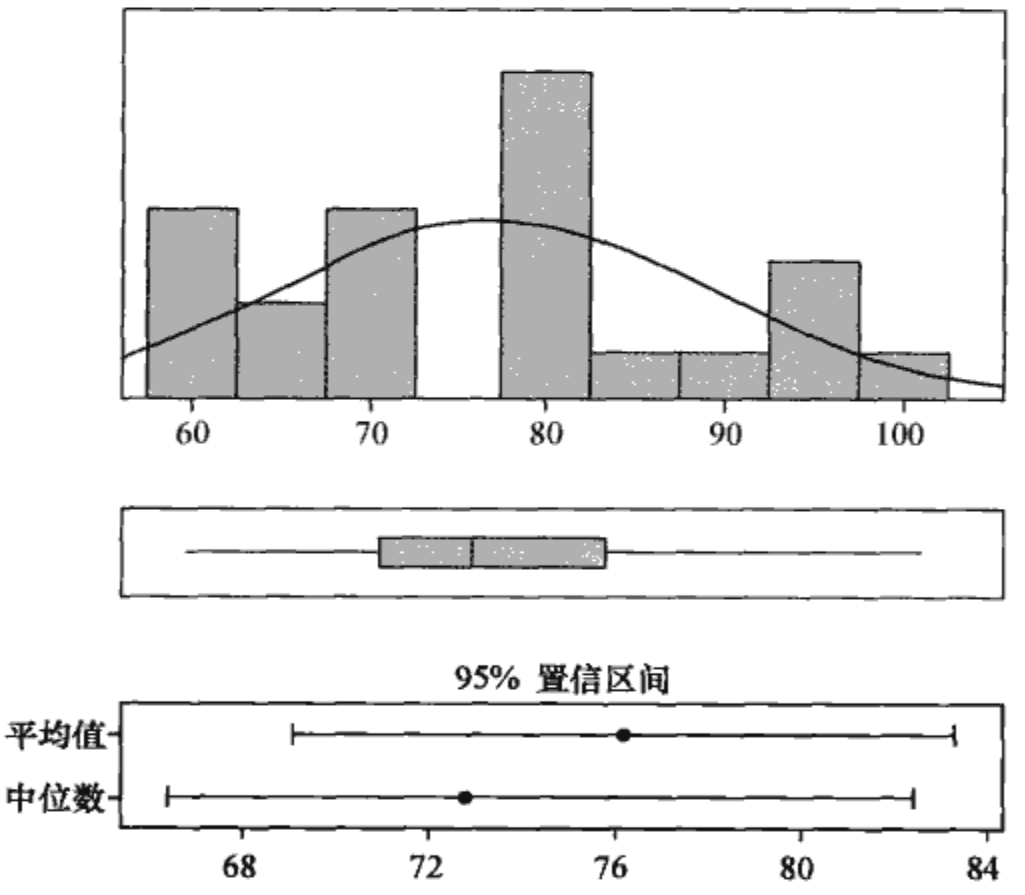
序号	脉搏	性别	序号	脉搏	性别	序号	脉搏	性别
1	64	男	16	74	男	31	72	女
2	58	男	17	68	男	32	82	女
3	62	男	18	64	男	33	100	女
4	66	男	19	90	男	34	68	女
5	64	男	20	92	男	35	88	女
6	74	男	21	60	男	36	62	女
7	84	男	22	76	男	37	80	女
8	68	男	23	96	女	38	61	女
9	62	男	24	78	女	39	64	女
10	70	男	25	96	女	40	94	女
11	74	男	26	62	女	41	60	女
12	66	男	27	78	女	42	84	女
13	70	男	28	82	女	43	72	女
14	54	男	29	78	女	44	66	女
15	82	男	30	68	女	45	80	女

运用 MINITAB 进行计算，实现路径为统计→基本统计量→图形化汇总，得到的结果如图 4—41 和图 4—42 所示。



Anderson-Darling 正态性检验	
A 平方	0.51
P 值	0.181
平均值	70.091
标准差	9.961
方差	99.229
偏度	0.758 832
峰度	0.118 591
N	22
最小值	54.000
第一四分位数	63.500
中位数	68.000
第三四分位数	74.500
最大值	92.000
95% 平均值置信区间	
65.974	74.508
95% 中位数置信区间	
68.000	82.000
95% 标准差置信区间	
9.440	17.277

图 4—41 图形化汇总（男）



Anderson-Darling 正态性检验	
A 平方	0.41
P 值	0.310
平均值	77.000
标准差	12.207
方差	149.000
偏度	0.322 552
峰度	−0.899 885
N	23
最小值	60.000
第一四分位数	66.500
中位数	78.000
第三四分位数	84.000
最大值	100.000
95% 平均值置信区间	
71.721	82.279
95% 中位数置信区间	
68.000	82.000
95% 标准差置信区间	
9.440	17.277

图 4—42 图形化汇总（女）

在图 4—41 和图 4—42 中，包含了样本的大量信息，包括平均值、标准差、方差、极值、中位数、四分位数、偏度、峰度，以及对样本的正态性检验和置信区间的计算结果。

4.3.5 数据的图示方法

1. 直方图

直方图是用矩形的宽度和高度来表示频数分布的图形，我们可以从图中看出数据的聚集程度与离散程度。作直方图的步骤一般如下：

（1）从 n 个样本中找出最大值 x_{max} 与最小值 x_{min}，计算极差 R。

（2）对样本进行分组，决定组数 k 和组距 d，具体组数根据样本容量 n 确定，可按表 4—4 选择组数，组距 d 根据组数 k 与 R 来确定，$d=R/k$。

表 4—4　　组数 k 的参照表

样本量（n）	组数（k）
40～100	5～8
101～200	8～10
201～500	9～11
501～1 000	10～13
1 000 以上	12～15

（3）确定各组的区间端点。

（4）统计样本在各组的频数 n_i 及频率 $f_i=\frac{n_i}{n}$。

（5）画出频率直方图。以样本 x 为横坐标，以频率/组距为纵坐标，在每个小区间上竖起长条矩形。纵轴的单位也可以用频率来表示，这里之所以用频率/组距来表示，是为了保证这些矩形面积之和为 1。

直方图主要用于展示分组数据的分布，对于未分组的原始数据则可以用茎叶图和箱线图来观察分布。

例 4—16　表 4—5 为某公司 4 个月共 120 天的销售量数据，利用 MINITAB 给出其直方图。

表 4—5　　4 个月每天的销售量

234	159	187	155	172	183	182	177	163	158
143	198	141	167	194	225	177	189	196	203
187	160	214	168	173	178	184	209	176	188
161	152	149	211	196	234	185	189	196	206
150	161	178	168	174	153	186	190	160	171
228	162	223	170	165	179	186	175	197	208
153	163	218	180	175	144	178	191	197	192
166	196	179	171	233	179	187	173	174	210
154	164	215	233	175	188	237	194	198	168
174	226	180	172	190	172	187	189	200	211
156	165	175	210	207	181	205	195	201	172
203	165	196	172	176	182	188	195	202	213

解：运用 MINITAB 进行计算，实现路径为：图形→直方图，得到的结果如

图 4—43 所示。

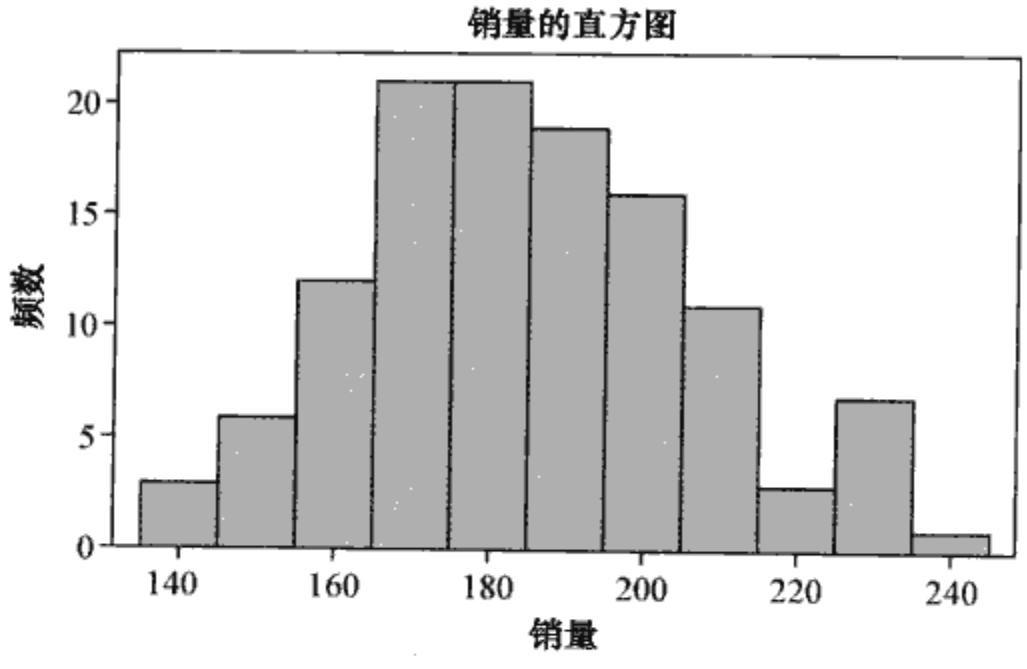


图 4—43 产品销量的直方图

2. 茎叶图

茎叶图是由“茎”与“叶”两部分组成，反映原始数据分布的图形，其图形是由数字组成的，高位数字为茎，低位数字为叶。茎叶图类似于横置的直方图，它能给出数据的分布情况，又能给出每一个原始数据，即保留了原始数据。我们可以在茎叶图上看出数据的分布形状及数据的离散状况。下面通过一个例子来说明茎叶图的做法。

例 4—17 根据例 4—16 的数据，给出销量的茎叶图。

解：运用 MINITAB 进行计算，实现路径为：图形→茎叶图，选中“修整异常值”，在增量中填上 10，得到的结果如图 4—44 所示。

茎叶图显示：销量

茎叶图 销量 N = 120
叶单位 = 1.0

```
 4     14  1349
 13    15  023345689
 29    16  0011233455567888
 56    17  011222223344455556677888999
(20)   18  00122345667777888999
 44    19  00124455663667788
 27    20  0123356789
 17    21  00113458
 9     22  3568
 5     23  3344

HI 杠杆率 237
```

图 4—44 产品销量的茎叶图

说明：(20) 表示中位数位于其中。

3. 箱线图

箱线图主要由数据中的五个统计量：最小值、第一四分位数、中位数、第三四

分位数和最大值绘制而成，通过它可以粗略地得出数据分布的对称性、离散程度等信息。箱线图具有不同类型：中位数/四分位数/极差箱线图，均值/标准误差/标准差箱线图，均值/标准差/1.96 倍的标准差箱线图，均值/标准误差/1.96 倍标准误差箱线图。其中中位数/四分位数/极差箱线图是最常见的，这里只介绍该种箱线图，其他类别的箱线图可参考相关统计学资料。在箱线图中，两个四分位数组成的矩形称为箱体，箱体与极值的连线称为须触线。在图中用中位数来表述数据的集中趋势，箱体与须触线均用来描述数据的离散程度。

箱线图比较简单，从中位数可以确定中心趋势或者位置；箱体的长度可以确定观测值的离散程度；如果中位数不在箱体的中心，说明分布是有偏的。

例 4—18 从某班级随机抽取 11 人，对两门课程的考试成绩进行调查，所得数据如表 4—6 所示。给出两门课程的考试成绩比较箱线图。

表 4—6　　11 名学生两门课程的考试成绩数据　　单位：分

课程名称	学生编号										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
L1	76	90	97	71	70	93	86	83	78	85	81
L2	65	95	51	74	78	63	91	82	75	71	55

解： 运用 MINITAB 进行计算，实现路径为：图形→箱线图，得到的结果如图 4—45 所示。

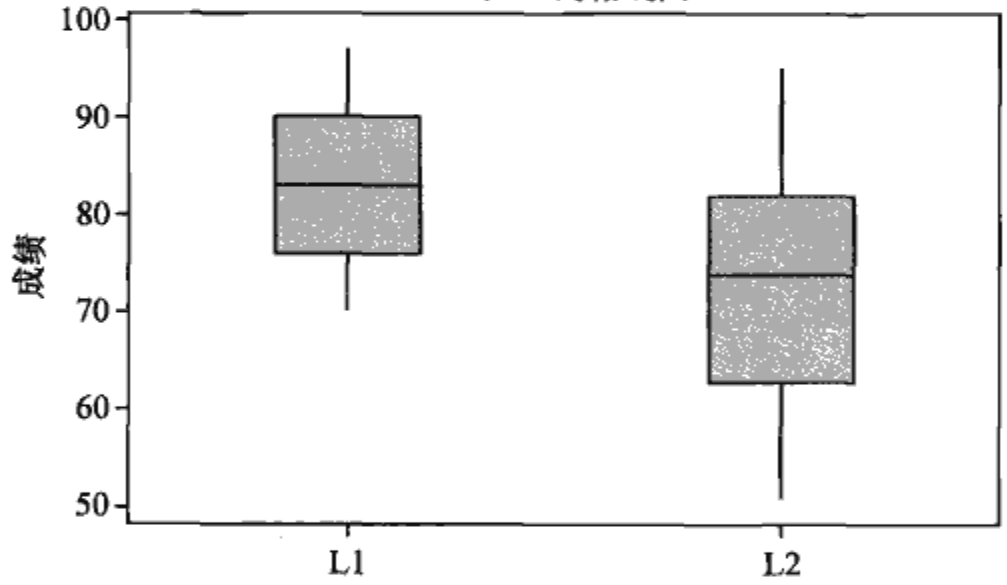


图 4—45　学生成绩的箱线图

4. 链图

链图也称趋势图，它是显示质量特性随时间变化的图表，是控制图的基础。分析链图是为了确认所出现的波动是由随机因素引起还是由特殊因素引起。链图可用于任何按时间序列收集的数据的图形分析。

链图的绘制具有以下步骤：

（1）按时间顺序画出数据的折线图。

（2）找到数据的中位数，画一条水平线穿过该折线图，标识为“中位数”或

$\tilde{X}$。图 4—46 就是一个链图的例子。

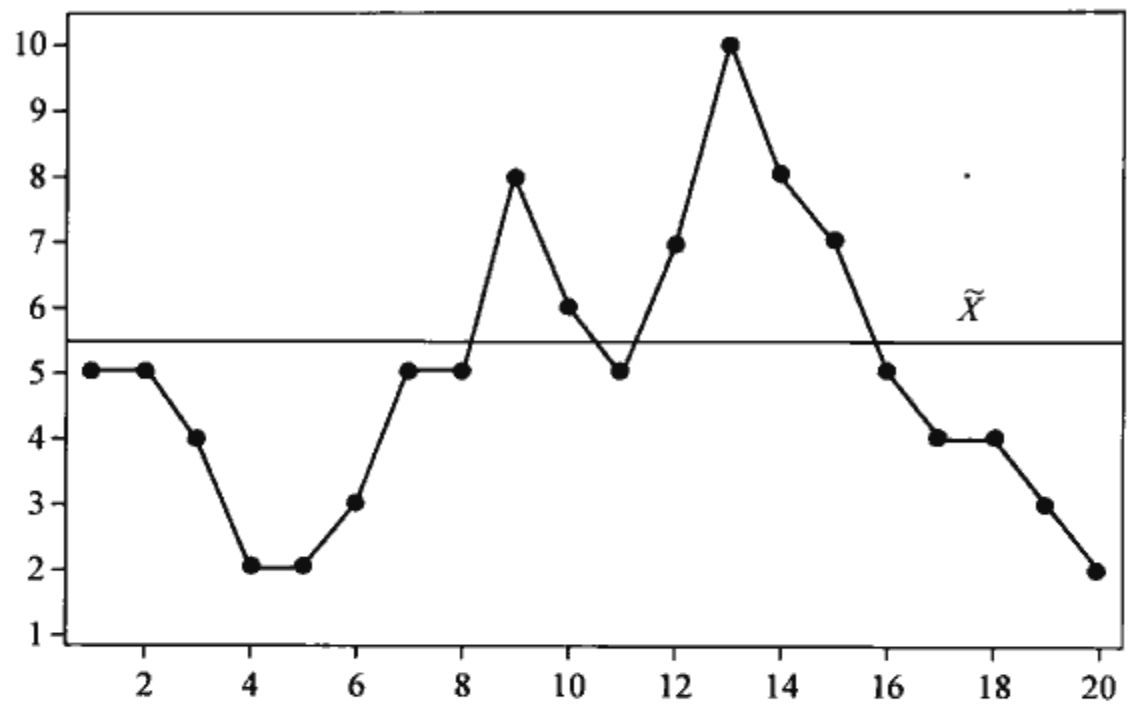


图 4—46 链图示例

判断过程是否受到特殊因素影响可从以下几方面进行：

（1）链的长度。链的长度是指位于中位数同一侧的连续点数目。除非过程受到异常因素影响，否则过程中不太可能出现一长串连续点落在中位数的同一侧。如果只有一个点落在中位数线上，忽略该点；如果有多个点落在中位数上，按每侧各占50%把这些点分配到两侧。如果最长链的长度较长，这个过程很有可能受到特殊波动原因的影响。

（2）链的数目。位于中位数同一侧连续点的序列构成一个链。一个受控过程中期望得到的链的数目同样可以用数学方法来确定。一个没有受特殊因素影响的过程，链不会太多也不会太少，应通过统计检验判断链的数目是否正常。

（3）趋势。链图中不应该存在任何异常的连续上升和连续下降的序列。如果出现这种情况，则暗示存在某种异常趋势。如果连续增高或连续降低的点数较多，那么有可能存在特殊因素引起的过程偏移，需通过统计检验判断链图中的趋势是否异常。

5. 正态概率图

正态概率纸是一种特殊的坐标纸，横坐标是等间隔的，用来表示观察值的大小，其纵坐标是按标准正态分布累积概率分布 $\Phi(x)=P(X\leqslant x)$ 标示的。在正态坐标纸上：

- 任一正态分布函数呈上升直线状。
- 任一右偏分布函数呈上凸曲线状。
- 任一左偏分布函数呈下凹曲线状。
- 任意两个方差相等的正态分布函数呈平行直线状。

用正态概率纸可检验一组数据 x_1，x_2，…，x_n 是否为来自正态分布的样本。具体操作如下：

（1）将样本排序：$x_{(1)}\leqslant x_{(2)}\leqslant\cdots\leqslant x_{(n)}$。

(2) 在点 $x_{(i)}$ 处的累积概率 $\Phi(x_{(i)})=P(X\leqslant x_{(i)})$ 用修正频率 $\frac{i-3/8}{n+1/4}$ $\left(\text{或}\frac{i}{n+1}\right)$ 来估计。

(3) 把 n 个点 $\left(x_{(1)},\ \frac{1-0.357}{n+0.25}\right)$, $\left(x_{(2)},\ \frac{2-0.375}{n+0.25}\right)$, …, $\left(x_{(n)},\ \frac{n-0.375}{n+0.25}\right)$, 逐一标在正态概率纸上，得到正态概率图。现在，随着统计软件的普及，利用 MINITAB 等统计软件包可以很方便地绘制出正态概率图。

(4) 用目测去判断。

若 n 个点近似在一条直线附近，则认为该样本来自某正态总体。

若 n 个点明显不在一条直线附近，则认为该样本来自非正态总体。

例 4—19 用正态概率纸检验某品牌的防锈剂的防锈能力是否服从正态分布。

表 4—7　　防锈剂的防锈能力数据

抽样编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
防锈能力	86.1	92.7	88.1	90.6	87.1	92.4	87.7	90.8	89.1	89.8

解：运用 MINITAB 进行计算，实现路径为：统计→基本统计量→正态性检验，得到的结果如图 4—47 所示：

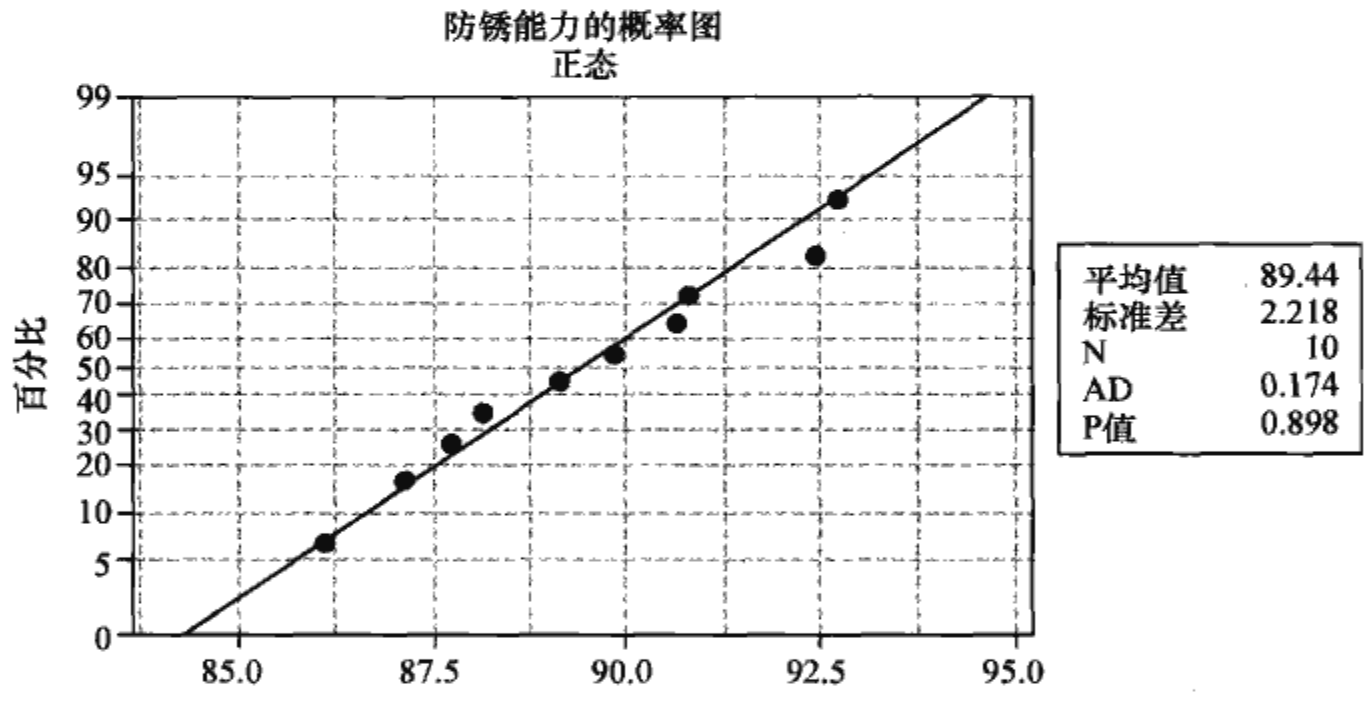


图 4—47　防锈能力的正态概率图

根据图 4—47 右侧的 P 值可判定样本防锈能力是否服从正态分布。其假设是：H_0：数据服从正态分布，H_1：数据不服从正态分布。根据假设检验的规则，如果 P 值小于 0.05，则认为分布非正态；如果 P 值大于 0.05，没有充分的理由拒绝原假设，可以认为分布为正态。

4.4　测量系统分析

六西格玛倡导以事实和数据驱动管理，因此在六西格玛项目中作决策时应该以

数据和信息分析为基础，这就要求测量数据必须能够反映事实，数据质量也必须具有足够高的水平，可以说数据的质量在很大程度上决定了项目的成败。数据是测量的结果，要获得高质量的测量数据，用于判断产品是否合格、生产过程是否稳定等，不仅要求量具合格，还要求测量系统具备相应的判断能力，这可以通过测量系统分析来解决。

4.4.1 基本概念

测量系统是指用来对测量对象进行定量测量或对被测特性进行定性评价的人员、量具、测量方法、参照标准、测量环境等的集合体，即测量系统涵盖用来获取测量结果的整个过程。测量系统分析（measurement system analysis）是指用统计方法来确定测量系统中的波动源，以及它们对测量结果的影响，最后对测量系统是否符合使用要求给出明确判断。

一个合格的测量系统必须具备较高的准确度（accuracy）和精确度（precision），通常用偏倚和波动来表示。测量系统的偏倚是指多次测量的平均值与被测质量特性基准值之差，其中基准值是已知的参考值或利用更高级的测量设备进行若干次测量后取其平均值来确定。波动表示在相同测量条件下进行多次重复测量的结果分布的离散程度。

每个测量系统都有其量程，因此，好的测量系统应该要求在量程的任何一处都不存在偏倚。但由于偏倚可以通过校准而加以修正，因此有时可以对测量系统的偏倚要求放宽些，但为了在任何一处都能对观测值加以修正，我们必须要求测量系统的偏倚具有线性。测量系统的线性是指在其量程范围内，偏倚是基准值的线性函数。对于通常的测量方法，一般说来，当测量基准值较小（量程较低的地方）时，测量偏倚也会比较小；当测量基准值较大（量程较高的地方）时，测量偏倚也会比较大。线性就是要求这些偏倚量与其测量基准值呈线性关系。

此外，测量系统还必须具有稳定性，即系统的计量特性随时间保持恒定的能力。在研究测量系统稳定性时，假定测量系统在一定时间内各项统计性能（包括偏倚、总波动及测量误差的分布等）均保持恒定。它主要是用测量结果的统计稳定性来衡量的。定期地对测量标准器（量具）或标准件进行重复测量，并绘制测量值的控制图。从控制图上可以判断测量系统是否统计稳定，然后可以针对引起不稳定的原因进行分析和纠正。关于控制图的内容，请参见本书第7章的相关内容。

4.4.2 测量系统的重复性与再现性

测量系统的波动主要是由量具和操作者引起的，其次是测量对象间的差异对测量结果的影响。下面将分别考虑量具、操作者以及测量对象间的波动，以确认系统是否合格，在不合格时识别波动源并提出改进方向。

1. 重复性

测量系统的重复性是指在尽可能相同的测量条件下，对同一测量对象进行多次重复测量所产生的波动。重复性波动主要反映量具本身的波动，记为 EV（equip-

ment variation)。在“尽可能相同的条件”下进行重复测量是指同一个操作员对同一个测量对象的同一部位，放在量具的同一位置，在较短时间内进行多次测量。此时重复性误差的产生只能由量具本身的固有波动引起。合格的测量系统应该具有良好的重复性。计算量具重复性的公式，可以用 $EV=6\sigma_e$（有些企业也采用 $EV=5.15\sigma_e$）表示，式中的 σ_e 是测量过程重复测量引起的标准差。

2. 再现性

测量系统的再现性又称复现性和重现性，表示不同测量系统在相同条件下对同一测量对象进行测量时的变异。在实际测量过程中，由于测量者是影响测量结果的一个重要因素，经常用改变测量者表示改变测量系统。因此，对于一个典型的测量系统分析问题而言，再现性是指不同的操作者使用相同的量具对同一测量对象进行重复测量而产生的波动，记为 AV（appraiser variation)。其中，量具是相同的，测量对象也是相同的，不同的是操作者，所以再现性主要反映操作者在测量过程中的波动。好的测量系统也应该具有良好的再现性。

一般来说，重复性和再现性的研究有以下步骤：

(1) 从正常生产过程中随机选取 10～20 个零件，应确保这些零件的波动代表生产过程的正常波动。将其编号，且编号不让操作员看到；随机选取 2 个或 2 个以上的操作员，让每个操作员按随机顺序对全部零件测量两遍或多遍；将所有记录按固定顺序整理好，录入类似表 4—8 所示的数据表格中。

(2) 考察测量过程是否稳定，即测量过程的波动是否仅由正常原因引起。多选择几个测量对象，并且每个测量对象都测量相同次数，建立 R 控制图（有关 R 控制图的建立参见本书第 7 章相关内容)，观察其是否受控。若出现失控现象必须寻找原因加以纠正，在确定测量系统稳定后可进行下一步。

(3) 对整个测量系统的分析，可以运用 MINITAB 进行计算，实现路径为：统计→质量工具→量具研究→量具 R&R 研究（交叉)，再选择 Xbar-R(X) 法或方差分析法进行测量系统的重复性和再现性分析。均值极差法和方差分析法的区别在于，均值分析法没有考虑操作者与零件间的交互作用，因此，在实际的分析计算中应区别选择。

这里通过一个例子简单介绍重复性和再现性研究阶段的数据测量和整理过程。

例 4—20 假定 A，B，C 三位操作者，选 n 个零件，让每个操作者对每个零件重复测量 m 次，三位操作者的测量数据如表 4—8 所示。

表 4—8　　操作者的测量数据表

操作者 / 轮数 / 零件	A					B					C				
	1	…	m	R	$\bar{x}$	1	…	m	R	$\bar{x}$	1	…	m	R	$\bar{x}$
1	x_{111}	…	x_{1m1}	R_{11}	$\bar{x}_{11}$	x_{211}	…	x_{2m1}	R_{21}	$\bar{x}_{21}$	x_{311}	…	x_{3m1}	R_{31}	$\bar{x}_{31}$
2	x_{112}	…	x_{1m2}	R_{12}	$\bar{x}_{12}$	x_{212}	…	x_{2m2}	R_{22}	$\bar{x}_{22}$	x_{312}	…	x_{3m2}	R_{32}	$\bar{x}_{32}$
⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮
n	x_{11n}	…	x_{1mn}	R_{1n}	$\bar{x}_{1n}$	x_{21n}	…	x_{2mn}	R_{2n}	$\bar{x}_{2n}$	x_{31n}	…	x_{3mn}	R_{3n}	$\bar{x}_{3n}$

3. 测量对象间的波动

任意两个测量对象间总存在差异，这种差异反映在它们各自的测量值上。如果测量 n 个不同对象，可得到 n 个测量值 x_1，x_2，…，x_n 或者 n 个测量均值 $\bar{x}_1$，$\bar{x}_2$，…，$\bar{x}_n$。同时，测量对象间的波动也可以通过均值极差法和方差分析法进行分析。σ_p 表示在不考虑测量误差的情形下，随机抽取的测量对象之间的波动的标准差。

4. 测量系统的分辨力

测量系统的分辨力（discrimination）是指测量系统识别并反映测量对象最微小变化的能力。测量系统的分辨力不够高，就无法正确识别过程的波动，因而影响对测量结果的定量描述。

在测量系统分析中，对于连续型测量数据，常直接用测量结果的最小间距作为其分辨力；还有一种方法，用经统计分析后由测量系统所得到的两个标准差来确定的可区分的类别数来评价测量系统是否有足够的分辨力。数据组数可从下面的公式中得到：

$$\text{数据组数}=\left\lfloor \frac{\sigma_p}{\sigma_{ms}}\times 1.41 \right\rfloor$$

式中，“⌊⌋”为取下整符号；σ_p 是测量对象波动的标准差；σ_{ms} 是测量系统波动的标准差。

一般来说，如果数据组数小于 2，这样的测量系统分辨力不够高，测量得到的数据不能用于控制和分析过程；当数据组数为 2～4 个时，测量系统仅能提供粗糙的估计值，一般说来也还不能用于估计过程的参数或计算过程能力指数；当数据组数大于等于 5，这时测量系统才有足够的分辨力，测量得到的数据才能够较好地用于分析和控制过程。

5. 总波动的分解和测量系统能力的评价

在测量过程中，观测值的波动等于各随机波动之和，包括测量对象间的波动和测量系统的波动。对于一个典型的测量系统分析问题（统计上可描述成两因素的交叉模型），我们用两因素随机效应模型描述测量过程的重复性和再现性。

$$X_{ijk}=\mu+O_i+P_j+(O\times P)_{ij}+e_{k(ij)}$$
$$i=1,2\cdots,I;j=1,2\cdots,J;k=1,2,\cdots,K$$

式中，X_{ijk} 为第 i 个操作者对第 j 个零件进行的第 k 次测量；μ 是未知常数（总均值），O_i，P_j，$(O\times P)_{ij}$，$e_{k(ij)}$ 分别为操作者、零件、操作者与零件交互作用以及重复测量效应的随机变量，假设 $O_i\sim N(0,\ \sigma_o^2)$，$P_j\sim N(0,\ \sigma_p^2)$，$(O\times P)_{ij}\sim N(0,\ \sigma_{o\times p}^2)$，$e_{k(ij)}\sim N(0,\ \sigma_e^2)$，其中 O_i，P_j，$(O\times P)_{ij}$，$e_{k(ij)}$ 相互独立。

模型中，观测值 X_{ijk} 的总波动（方差）等于各随机波动（方差）之和：

$$\sigma_T^2=\sigma_o^2+\sigma_p^2+\sigma_{o\times p}^2+\sigma_e^2$$

式中，除 σ_p^2 表示测量对象本身的波动外，其余方差项均与测量系统有关，测量数据的总方差 σ_T^2 由测量对象的方差 σ_p^2 与测量系统的方差 σ_{ms}^2 组成，即 $\sigma_T^2=\sigma_{ms}^2+\sigma_p^2$；而测量系统的方差又由测量者的方差和量具的方差构成，即可表示为 $\sigma_{ms}^2=\sigma_o^2+\sigma_{op}^2+\sigma_e^2$。

对 $\sigma_T^2=\sigma_o^2+\sigma_p^2+\sigma_{op}^2+\sigma_e^2$ 两端各乘以 6^2，可以得到：

$$(TV)^2=(PV)^2+(EV)^2+(AV)^2$$

式中，TV 为总波动，等于 $6\sigma_T$；PV 为测量对象间的波动，等于 $6\sigma_p$；EV 为测量系统的重复性误差，等于 $6\sigma_e$；AV 为测量系统的再现性误差，等于 $6\sqrt{\sigma_o^2+\sigma_{op}^2}$；$(EV)^2+(AV)^2$ 为量具重复性和再现性波动的平方，也直观地记作 $(R\&R)^2$。

据此可以对测量系统的能力作出评价，常用方法有如下两种：

（1）用测量系统波动 $R\&R$ 与总波动之比来度量，记为：

$$R\&R\%=P/TV=\frac{R\&R}{TV}\times 100\%$$

（2）用测量系统波动 $R\&R$ 与测量对象质量特性的公差之比来度量，记为：

$$P/T=\frac{R\&R}{USL-LSL}\times 100\%=\frac{6\sigma_{ms}}{USL-LSL}\times 100\%$$

若仅有单侧上规格限时：

$$P/T=\frac{3\sigma_{ms}}{USL-\mu}\times 100\%$$

若仅有单侧下规格限时：

$$P/T=\frac{3\sigma_{ms}}{\mu-LSL}\times 100\%$$

当 $P/TV\leqslant 10\%$ 或 $P/T\leqslant 10\%$ 时，表明测量系统是有能力的；当 $10\%<(P/TV)\leqslant 30\%$ 或者 $10\%<(P/T)\leqslant 30\%$ 时，表明测量系统能力处于临界状态，不能测量重要测量对象；当 P/TV 或 $P/T>30\%$ 时，表明测量系统本身波动过大，必须进行改进。

例 4—21 某团队在做测量系统分析时，选择了 A，B，C 三个操作者，对 10 个零件各测量了两次，采集的数据如表 4—9 所示。

表 4—9　　某团队的测量数据

操作者	零件 1	零件 2	零件 3	零件 4	零件 5	零件 6	零件 7	零件 8	零件 9	零件 10
A	0.65	1.00	0.85	0.85	0.55	1.00	0.95	0.85	1.00	0.60
A	0.60	1.00	0.80	0.95	0.45	1.00	0.95	0.80	1.00	0.70
B	0.55	1.05	0.80	0.80	0.40	1.00	0.95	0.75	1.00	0.55
B	0.55	0.95	0.75	0.75	0.40	1.05	0.90	0.70	0.95	0.50
C	0.50	1.05	0.80	0.80	0.45	1.00	0.95	0.80	1.05	0.85
C	0.55	1.00	0.80	0.80	0.50	1.05	0.95	0.80	1.05	0.80

解：运用 MINITAB 进行计算，实现路径为：统计→质量工具→量具研究→量具 R&R 研究（交叉），分析方法选择 Xbar 和 R(X)，得到的结果如下：

量具 R&R 研究－Xbar/R 法

来源	方差分量	方差分量贡献率
合计量具 R&R	0.002 083 9	6.33
重复性	0.001 154 9	3.51
再现性	0.000 929 1	2.82
部件间	0.030 827 1	93.67
合计变异	0.032 911 1	100.00

来源	标准差（SD）	研究变异（6 * SD）	%研究变异（%SV）
合计量具 R&R	0.045 650	0.273 90	25.16
重复性	0.033 983	0.203 90	18.73
再现性	0.030 481	0.182 88	16.80
部件间	0.175 577	1.053 46	96.78
合计变异	0.181 414	1.088 48	100.00

可区分的类别数 = 5

根据以上结果可以看出，该测量系统可分的类别数为 5，表示测量系统的分辨力勉强合格；系统符合 $10\%<(R\&R\%=25.16\%)\leqslant 30\%$，根据测量系统能力判别准则，系统测量能力处于临界状态，不能用于测量重要特性的产品。

上述介绍的只是典型情形下的测量系统分析方法。在实际生产中，为了分析测量过程的变异源的大小以及对过程质量的影响，需要根据实际问题构造统计分析模型，采用方差分析和方差分量法估计测量系统的波动大小，这一部分涉及较为复杂的统计分析，在绿带教材中不予介绍，有兴趣的读者可以参阅相关文献。

4.4.3 属性值数据一致性分析

测量结果并不都是连续型的计量型数据，有时是属性值数据或计数型数据。计数型测量系统最常见的结果是通过/不通过、合格/不合格等两种等级，当然也有一些计数型测量系统的结果形成两个以上的不同的分级。计数型数据不同于计量型数据，所以对计数型数据的分析也不能采用适用于计量型数据的分析方法。经过实践和理论研究，采用属性值数据一致性分析的方法可以解决这个问题。属性值数据一致性分析即对属性值数据进行相关性和一致性的分析。

在获取属性值一致性分析的测量数据时，一般选取 20 个或 20 个以上的零件，零件合格数与不合格数最好控制在各占 50%。应在从事日常检验活动的人员中选择至少 2 人，每个操作者对每个零件重复测量至少 2 次，以决定该零件是否可接受。用测量者判定结果的一致性来表示属性值测量系统的好坏。显然，重复性是指同一个测量者对同一零件在不同测量轮数时的一致程度；再现性则是不同

测量者对同一零件测量时的一致性。下面用一个简单的例子来说明属性值数据一致性分析。

例 4—22 假设选取 20 个零件，2 个检验员，每个人测量 2 次，得到如表 4—10 所示数据，其中 P 表示合格，NP 表示不合格。

表 4—10　　计数型测量系统的研究

零件号	检验员 A		检验员 B		已知属性或标准
	第 1 次	第 2 次	第 1 次	第 2 次	
1	P	P	P	P	P
2	P	P	P	P	P
3	NP	P	P	P	P
4	NP	NP	NP	NP	NP
5	P	P	P	P	P
6	P	P	P	P	P
7	NP	NP	NP	NP	NP
8	NP	NP	P	P	NP
9	P	P	P	P	P
10	P	P	P	P	P
11	NP	NP	NP	NP	NP
12	P	P	P	P	P
13	P	NP	P	P	P
14	NP	NP	NP	NP	NP
15	P	P	P	P	P
16	P	P	P	P	P
17	P	P	P	P	P
18	P	P	P	P	NP
19	P	P	P	P	P
20	NP	NP	NP	NP	NP

解：检验员各自的一致性分析如表 4—10 所示，检验员 A 测量 20 个零件各 2 次，其中有 2 次不一致，一致性比率为 18/20＝90%；而检验员 B 则全部一致，一致性比率为 100%。

依此类推，可得到每个检验员与标准，检验员之间以及所有测量者与标准整体的一致性比率和 95%的置信区间。

运用 MINITAB 进行计算，实现路径为：统计→质量工具→属性一致性分析，得到的结果如下：

检验员自身
评估一致性

检验员	#检验数	#相符数	百分比	95%置信区间
A	20	18	90.00	(68.30，98.77)
B	20	20	100.00	(86.09，100.00)

每个检验员与标准

评估一致性

检验员	#检验数	#相符数	百分比	95%置信区间
A	20	17	85.00	(62.11，96.79)
B	20	18	90.00	(68.30，98.77)

检验员之间

评估一致性

#检验数	#相符数	百分比	95%置信区间
20	17	85.00	(62.11，96.79)

评估不一致

检验员	#P/NP	百分比	#NP/P	百分比	#Mixed	百分比
A	1	14.29	0	0.00	2	10.00
B	2	28.57	0	0.00	0	0.00

#P/NP：多个试验中误将标准=NP者一致评估为=P的次数

#NP/P：多个试验中误将标准=P者一致评估为=NP的次数

#Mixed：多个试验中所有的评估与标准不相同者。

所有检验员与标准

评估一致性

#检验数	#相符数	百分比	95%置信区间
20	16	80.00	(56.34，94.27)

其中的检验员自身的评估一致性即为重复性；检验员之间的一致性即为再现性。

此外，还有其他方法可以对属性值测量系统进行分析，如有效性、漏判率、误判率。有效性分为测量者的有效性和系统的有效性。测量者对测量对象的测量结果一致，且与标准一致，则称为有效，有效测量对象数与被测量对象数之比称为测量者的有效性。系统有效性是指所有操作者的判断结果完全一致，且与标准一致的测量对象数与被测量对象数之比值。漏判率是将标准为不合格的测量对象判为合格的机会百分比。误判率是将标准为合格的测量对象判断为不合格的机会百分比。属性值数据测量系统的判断标准如表4—11所示。

表4—11　　属性值数据测量系统的判断标准

判断	有效性	漏判率	误判率
可接受	≥90%	≤2%	≤5%
接受——需要改进	≥80%	2%～5%	5%～10%
不可接受	≤80%	≥5%	≥10%

实际操作中，还应结合测量对象的重要程度进行分析，对于关键的测量对象应适当严格判断标准；反之，可以适当放宽判断标准。

4.5 过程能力分析

4.5.1 过程统计控制状态

在生产中，任何过程均受到随机因素和系统因素的影响而产生波动。随机因素

又称偶然因素，是过程所固有的，难以消除与控制，它所产生的波动变化幅度较小。系统因素是一些不经常发生的，对过程影响比较大并且呈现出一定规律的因素。当系统因素发生变异时，过程输出质量特性的规律将会遭到破坏，从而过程失控。

如果一个过程仅受到随机因素的影响，且产品的质量特性均值和波动都能基本保持稳定，则称该过程处于统计控制状态。只有当过程处于统计控制状态时，对过程能力的分析才是有意义的。

4.5.2 过程能力指数 C_p 与 C_{pk}

过程能力是处于稳定生产状态下过程的实际加工能力，它是衡量过程波动的一种标志。对任何生产过程，产品的质量特性值总是有波动的。当过程输出质量特性 $y\sim N(\mu, \sigma^2)$，则输出值落在 $[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma]$ 区间的概率为 99.73%，落在该区间之外属于小概率事件。因此一般将 6σ 范围视为过程的自然波动范围，称为过程能力。因此范围越小，产品质量特性值的离散程度就越小；范围越大，产品质量特性之离散程度就越大。对加工过程的过程能力进行分析，可使我们随时掌握制造过程中各过程质量的保证能力，为保证和提高产品质量提供必要的信息和依据。为了分析过程能力水平对于设计要求或顾客要求的满足程度，需要将过程的波动范围与允许的公差范围进行比较，计算和分析过程能力指数。

1. 过程能力指数 C_p 的计算与意义

假设过程输出质量特性 $y\sim N(\mu, \sigma^2)$，其中 μ，σ 分别为 y 的均值和标准差。当过程处于统计控制状态时，则定义过程能力指数 C_p 为公差 T 与过程波动范围之比，即：

$$C_p=\frac{USL-LSL}{6\sigma}=\frac{T}{6\sigma}$$

式中，USL，LSL 分别为质量特性的上、下规格限。$M=\frac{USL+LSL}{2}$，称为公差中心。C_p 是反映过程潜在能力的重要指标。当 $C_p<1$ 时，过程能力不足；$1\leqslant C_p<1.33$ 时，过程能力尚可；$1.33\leqslant C_p<1.67$ 时，过程能力充足；当 $C_p\geqslant 1.67$ 时，过程能力富余。需要注意的是，C_p 的计算与过程输出的均值无关，它是假定过程输出的均值与公差中心重合时的过程能力之比。因此，C_p 只是反映了过程的潜在能力，所以在一般场合下，C_p 称为潜在过程能力指数。

例 4—23 某工厂有 A 和 B 两个生产轴承的流水线，即过程 A 和过程 B。客户对于生产的轴承直径有规格限制。假设 A 和 B 流水线的生产水平如图 4—48 所示，已知过程 A 和 B 的 C_p 相同，且过程 B 中 $\mu\neq M$，可见过程 B 生产产品的不合格率明显高于过程 A。因此，当 $\mu\neq M$ 时，C_p 并不能充分反映过程的能力，引入另一个过程能力指数 C_{pk} 就是为了解决这个问题。

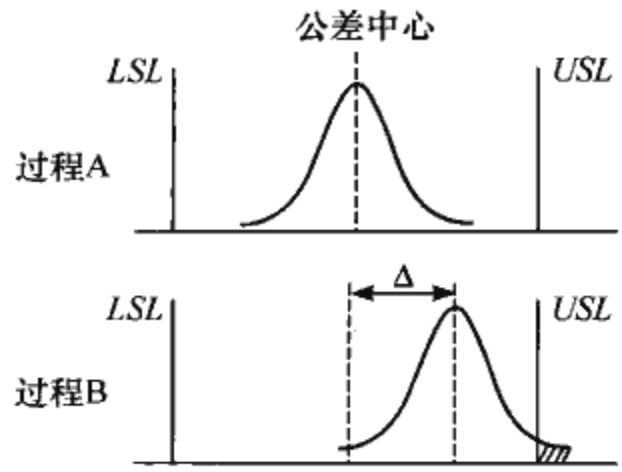


图 4—48 过程均值漂移对缺陷率的影响

2. 过程能力指数 C_{pk} 的计算与意义

当过程输出均值 μ 与公差中心或目标值不重合时，用 C_{pk} 来反映过程的能力。由于过程输出均值 μ 通常位于规格限 $[LSL, USL]$，因此，取 μ 与上下规格限较近的距离与 3σ 之比作为过程能力指数，即：

$$C_{pk}=\min\left\{\frac{USL-\mu}{3\sigma},\frac{\mu-LSL}{3\sigma}\right\}=\min\{C_{pu},C_{pl}\}$$

式中，$C_{pu}=\dfrac{USL-\mu}{3\sigma}$，称为单侧上限过程能力指数，仅有上规格限的情况即可使用；$C_{pl}=\dfrac{\mu-LSL}{3\sigma}$称为单侧下限过程能力指数，仅有下规格限的情况即可使用。

由 C_p 和 C_{pk} 的表达式可看出，当 $\mu=M$ 时，$C_{pk}=C_p$；$\mu\neq M$ 时，$C_{pk}<C_p$。只要双侧的规格限都给定，C_p 就有意义，则应该同时考虑 C_p 及 C_{pk} 两个指数，以便对整个过程的状况有较全面的了解。此外，C_{pk} 还有另一种形式：$C_{pk}=\dfrac{T}{6\sigma}-\dfrac{|M-\mu|}{3\sigma}$。

若令 $K=\dfrac{2|M-\mu|}{T}$，则 $C_{pk}=C_p(1-K)$，其中 K 为相对偏移系数。

4.5.3 过程能力指数 C_{pm}

当过程输出均值与目标值不重合时，为强调质量特性偏离目标值造成的质量损失，将目标值 m 引入到过程能力指数中，可以得到反映田口质量观的第二代过程能力指数 C_{pm}。下面给出 C_{pm} 的计算公式：

$$C_{pm}=\frac{USL-LSL}{6\sigma'}$$

式中，$\sigma'^2=E(y-m)^2=\sigma^2+(\mu-m)^2$，$\sigma^2=\mathrm{Var}(y)$，$\mu=E(y)$，$m$ 为质量特性的目标值。

特别地，当 $\mu=M$ 且 m 与 M 重合时时，$C_{pm}=C_p$。C_{pm} 反映了过程输出 μ 与目标值 m 之间的偏差，主要用于反映过程的期望损失，体现了田口质量损失函数的理念，而且在目标值 m 并不恰好为公差中心 M 时，C_{pm} 比 C_p 能更好地反映过程输出 μ 与目标值 m 之间的偏差。

4.5.4 过程绩效指数 P_p 与 P_{pk}

过程能力指数反映的是短期内过程输出满足产品质量要求的程度，而过程绩效指数则是从过程长期的总波动来考虑过程输出满足质量要求的程度。

过程绩效指数 P_p 和 P_{pk} 与过程能力指数 C_p 和 C_{pk} 计算方法类似，前两者是使用过程长期的总波动，而后两者是使用过程短期内的波动。过程长期的总波动用样本标准差 s 来估计，$s=\sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}$，其中 x_i 是各个测量值，$\bar{x}$ 是所有测量值的均值。而短期波动是用样本组内波动来估计 σ 的，通常取 $\hat{\sigma}=\dfrac{\bar{R}}{d_2}$。

下面分别给出过程绩效指数 P_p 与 P_{pk} 的计算公式：

潜在过程绩效指数 $P_p=\dfrac{USL-LSL}{6s}$

单侧上限过程绩效指数 $P_{pu}=\dfrac{USL-\bar{x}}{3s}$

单侧下限过程绩效指数 $P_{pl}=\dfrac{\bar{x}-LSL}{3s}$

实际过程绩效指数 $P_{pk}=\min\{P_{pu},P_{pl}\}$

由于长期波动一般比短期波动要大，因此理论上讲，过程绩效指数要比相应的过程能力指数小。

4.5.5 过程能力指数与缺陷率的关系

当过程受控时，输出的质量特性呈正态分布，一定的过程能力指数与一定的不合格品率相对应。明确过程能力指数与缺陷率的关系有利于我们更深刻地认识过程能力指数 C_p。

当输出的质量特性值服从正态分布时，其不合格品率为：

$$\begin{aligned}P(d)&=P_L+P_U=P(y<LSL)+P(y>USL)\\&=\Phi\left(\frac{LSL-\mu}{\sigma}\right)+\left[1-\Phi\left(\frac{USL-\mu}{\sigma}\right)\right]\\&=\Phi(-3C_{pl})+[1-\Phi(3C_{pu})]=\Phi(-3C_{pl})+\Phi(-3C_{pu})\end{aligned}$$

式中，Φ 为标准正态分布的概率分布函数。当 μ 正好与上下规格限中心 M 无偏时，有 $C_p=C_{pl}=C_{pu}$，则 $P(d)=2-2\Phi(3C_p)$。当 μ 位于上下规格限之间但与公差中心 M 有偏时，可以得到 $C_{pu}+C_{pl}=2C_p$，且 C_{pu}，C_{pl} 之一正好等于 $C_{pk}=(1-K)C_p$，由此可得：

$$P(d)=\Phi(-3C_{pl})+\Phi(-3C_{pu})=\Phi[-3(1+K)C_p]+\Phi[-3(1-K)C_p]$$

对于计量型数据的过程描述，采用过程能力指数，而对于属性值数据或计数型数据的过程能力描述，一般用西格玛水平进行描述。如果用西格玛水平来描述计量型数据，西格玛水平 Z_{bench} 就是从过程均值 μ 到技术规格限的距离内所含的过程标准

差的倍数，西格玛水平与不合格品率或者百万机会缺陷数 $DPMO$ 是一一对应的。一般所说的西格玛水平考虑了过程的长期总波动，等于 $1.5+Z_{bench}$。

当仅有上规格限时，$Z_{bench}=\dfrac{USL-\mu}{\sigma}=3C_{pu}$。

当仅有下规格限时，$Z_{bench}=\dfrac{\mu-LSL}{\sigma}=3C_{pl}$。

当具有双侧规格限时，$Z_{USL}=\dfrac{USL-\mu}{\sigma}=3C_{pu}$，$Z_{LSL}=\dfrac{LSL-\mu}{\sigma}=-3C_{pl}$。

根据公式 $P(d)=\Phi(-3C_{pl})+\Phi(-3C_{pu})$，可以推算出西格玛水平，即 $Z_{bench}=\Phi^{-1}[1-P(d)]$。

4.5.6 过程能力分析举例

下面举一个实例来说明过程能力的应用。

例 4—24 在钢珠生产过程中，允许的钢珠直径变异范围为 [10.90，11.00]，其测量数据见表 4—12，试对其进行过程能力分析。

表 4—12　　25 个批次的样本钢珠直径

批次	直径 1	直径 2	直径 3	直径 4	直径 5
1	10.95	10.90	10.95	10.96	10.98
2	10.91	10.97	10.95	10.98	10.94
3	10.97	10.91	10.94	10.95	10.93
4	10.92	10.94	10.95	10.95	10.93
5	11.02	10.96	10.92	10.98	10.99
6	10.92	10.94	10.93	10.98	10.95
7	10.98	10.91	10.96	10.90	10.93
8	10.96	10.93	10.94	10.93	10.96
9	10.94	10.93	10.97	10.96	10.95
10	10.91	10.95	10.93	10.96	10.92
11	10.94	10.94	10.98	10.94	10.97
12	10.97	10.95	10.93	10.92	10.98
13	10.99	10.95	10.95	10.95	10.96
14	10.93	10.97	10.94	10.92	10.93
15	11.02	10.98	10.97	10.96	10.91
16	10.95	10.95	10.93	10.94	10.93
17	10.96	10.95	10.97	10.99	10.95
18	10.97	10.97	10.93	10.95	11.01
19	11.00	10.93	10.95	10.96	10.96
20	10.95	10.92	10.92	10.98	10.93
21	10.95	10.94	10.95	10.96	10.97
22	10.92	10.97	11.00	10.94	10.94
23	10.95	10.94	10.93	10.96	10.95
24	11.00	10.99	10.90	10.94	10.98
25	10.94	10.92	10.96	10.93	10.96

解：运用 MINITAB 进行计算，实现路径为：统计→质量工具→能力分析→正态，在“规格下限”中输入“10.90”，在“规格上限”中输入“11.00”，打开“选项”，在“目标”中输入“10.95”，运行命令后得到的结果如图 4—49 所示。

$C_p=C_{pl}=C_{pu}=0.67$，μ 与公差中心 M 重合；$C_{pk}=\min\{C_{pu},\ C_{pl}\}=0.67$；$P_{pl}=\dfrac{\bar{x}-LSL}{3s}=0.68$；$P_{pu}=\dfrac{USL-\bar{x}}{3s}=0.67$；$P_{pk}=\min\{P_{pu},P_{pl}\}=0.67$；$C_{pm}=\dfrac{USL-LSL}{6\sigma}=0.67$。

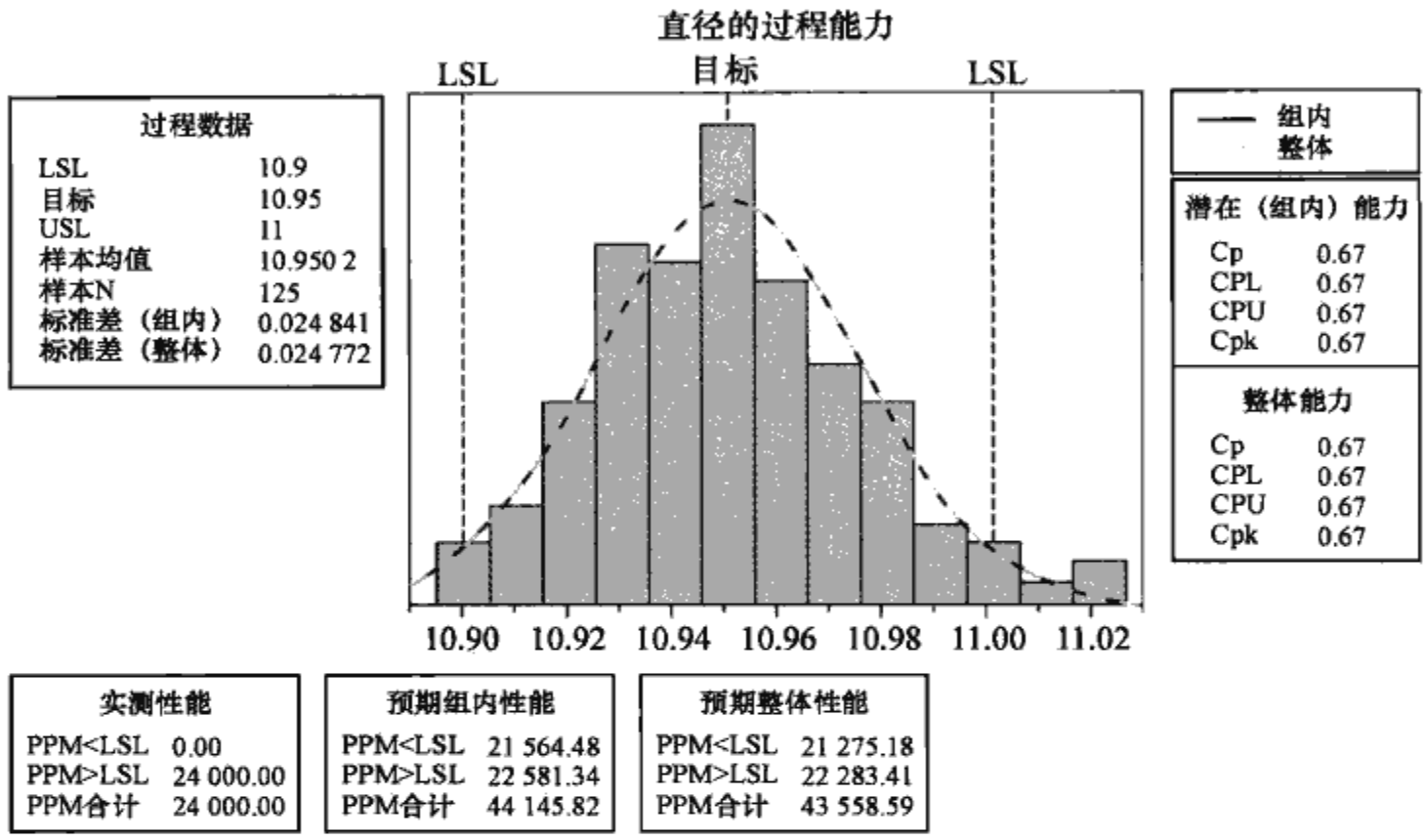


图 4—49　生产钢珠的过程能力分析

由图 4—49 可以看出，当 $\mu=M$ 时，$C_{pk}=C_p$；当 $\mu=M$ 且 m 与公差中心 M 重合时，$C_{pm}=C_p$。图 4—49 左下角部分还给出了实际观测到的数据超出公差的 PPM 值以及在正态分布下基于组内和整体波动估计出的 PPM 值。

要特别强调的是，C_{pk} 和 C_p 都是由处于统计受控状态下的过程波动的大小和均值偏离决定的，因而首先要判明过程是否处于统计受控状态，这需要通过控制图等统计工具进行判断，关于如何应用控制图分析判断过程的受控状态，请参见本书第 7 章的内容。

4.5.7　属性值数据过程能力分析

过程能力指数仅适用于连续型数据的情况，对于属性值数据的过程能力分析，可以测算其西格玛水平，以对过程能力进行评价。属性值数据包括计点值数据和计件值数据。计点值的测量数据在随机情况下一般服从泊松分布，如铸件的砂眼数、布匹上的疵点数等；计件值的测量结果只有两种，如产品合格和不合格。对记点值数据进行过程能力分析时，先计算出过程的 $DPMO$，然后利用标准正态分布表将其换算成相应的 Z_{bench}，然后其对应的西格玛水平 $Z=1.5+Z_{bench}$。对计件值数据进行过程能力分析则先计算出其合格品率，然后对照标准正态分布表找到相应的

Z_{bench}，其对应的西格玛水平 $Z=1.5+Z_{bench}$。

例 4—25 某公司开单据，一个月中共开出 2 500 张，每张各有 10 处需要填写的栏，其中，共有 8 处出现了错误。请计算该过程的 *DPU*，*DPMO* 和西格玛水平 *Z*。

解：令 D=缺陷数=8，O=单位缺陷机会=10，U=单位数=2 500。

（1）计算该过程的 *DPU*：

$$DPU=\frac{D}{U}=\frac{8}{2\,500}=0.003\,2$$

（2）计算该过程的 *DPMO*：

$$DPMO=\frac{D}{UO}\times 10^6=\frac{8}{2\,500\times 10}\times 10^6=320$$

（3）计算该过程的西格玛水平 *Z*。

利用 MINITAB 计算 $(1-DPMO\times 10^{-6})=0.999\,68$ 所对应的 Z_{bench} 值，实现路径为：计算→概率分布→正态，选择逆累积概率，可得到 $Z_{bench}=3.41$，因此，得到西格玛水平：

$$Z=Z_{bench}+1.5=3.41+1.5=4.91$$

此外，上述计算过程可以通过 DPMO—西格玛水平计算器[①]（DPMO-Sigma Calculator），进行简单的计算，结果如图 4—50 所示。

计算DPU、DPMO和西格玛水平

		输入
1 抽样的单位产品数	N=	2 500
2 检测到的缺陷个数	D=	8
3 单位产品的出错机会数	O=	10
4 DPU，DPMO	0.003 2，	320
5 Sigma Level	Sigma=	4.91

图 4—50 DPMO—西格玛水平计算器结果截图



本章小结

测量阶段是六西格玛项目工作中一个非常重要的阶段。没有测量，也就没有改进。从测量阶段起就要开始收集数据并着手对数据进行分析，通过测量阶段的数据收集和评估工作，可以获得对问题和改进机会的定量化认识，并在此基础上获得项目实施方向的信息。

本章的主要知识有：关于过程分析和文档的知识，包括流程图的绘制和分析方

① 读者可登录 www. rdjg. com. cn 查阅相关 Excel 文件。

法、因果图等；关于概率与统计学的基础知识，这些知识是测量数据分析的基础；关于数据的收集和整理的方法，这些方法可以将实际问题转化为可测量和定量表述的问题；关于测量系统分析的基础概念和方法，它们是保证获得可靠的测量数据所不可缺少的；以及关于过程能力分析的工具和方法，过程能力分析是测量阶段最重要的工作内容，也是测量阶段所产生的输出结果。通过本章的学习，绿带应对上述知识有一个整体的了解，并能够简单地应用所介绍的工具及方法。

第5章

分　析

分析阶段是 DMAIC 各个阶段中最难以预见的阶段。项目团队所使用的方法将在很大程度上取决于所涉及的问题与数据的特点。在这个阶段，DMAIC 团队应详细研究资料，增强对过程和问题的理解，进而识别产生问题的原因，使用各分析步骤来寻找问题根源。

有时，问题的根本原因是显而易见的，此时，团队能很快通过分析找到，并可以立即采取改进措施，即 Quick Hit 速赢方案。有时，影响问题的原因很多，而且非常复杂，多年来许多人都根据他们习惯的方法去做工作，而没有考虑和证明其合理性。当发生这种情况时，团队可能要花几周或更长的时间，使用各种工具和试用各种不同的观点去分析，才可能得出正确的结果。

DMAIC 团队用循环分析方法来实现他们对原因的探索。这个循环从数据的测量开始，通过对过程的分析，提出对原因的初始推测或者假设；接着收集和关注更多数据和其他看得见的证据，对这些推测或者假设作出进一步的判断；分析循环继续进行，各种假定不断地被确认或被拒绝，直到真正的问题根源通过严谨的数据分析被明确识别出来。分析步骤中最大的挑战之一是正确使用工具，能够用简单工具找到根本原因，就不用复杂工具。有时原因是深藏而不易识别的，有时问题与其他较多因素相关联而纠缠混杂在一起，这时就需要用到更高级的统计技术或其他管理技术来确定和验证根本原因。本章介绍的统计方法将有助于团队除了使用常用的图示工具以外，还可通过运用统计推断、假设检验、方差分析、回归分析和精益工具等方法来确定项目问题的根本原因，确定和验证 $Y=f(X_S)$ 的关系，为改进找到有效的方向。这里需要说明两点。一是尽管本章介绍了很多的统计分析工具，但是六西格玛的分析工具并不是仅仅指这些工具，六西格玛的工具箱是开放性的，任何适用于实际项目的分析工具都可以被整合和应用，作为一名六西格玛绿带，要善于持续学习。二是分析和测量两个阶段之间有很多交叉，在对某一个原因进行深入分析时，有可能发现已有的测量数据远远不够，需要补充测量大量数据。

5.1 过程分析概述

六西格玛团队在寻找原因时会经历一个过程，这个星期得出的结论可能会被下个星期得到的数据所推翻；再下一个星期收集的新数据可能又暗示了一个新的问题，等等，直到团队成员能够用数据真正证实某个假设，捕获到真正的原因。过程分析方法不失为研究问题真正原因的利器。

过程分析深入研究并分析过程工作是如何开展的，从而识别出与过程目标不一致的、可能引起问题发生或导致问题发生的环节。通过增值分析，可以判别过程中哪些环节对顾客增值，哪些环节对顾客虽非增值但对过程是增值的，哪些环节是不增值、可以考虑删除的，哪些是不能确定是否增值的，最终找到过程不能满足顾客需求的真正原因，找出改进的方向。

大多数团队在项目的分析阶段寻找缺陷原因时均遵循如下三阶段的循环过程：

（1）推测。以开放的态度调查数据和过程，目的是找出可以研究的问题或因素。

（2）提出关于原因的假设。运用已有的知识，提出最有可能的缺陷原因。

（3）证实或排除原因。利用数据、试验或进一步的过程分析对原因的假设作出判断、证实，确认哪个因素或环节是引起缺陷的最重要原因。

事实上，这三个阶段也不可能截然分开。团队可能在推测之前，就已经有了关于原因的假设；如果你不能提出假设，就得重新回到推测阶段。事实上，大多数团队在正确定位问题关键原因之前，都要经历好几次推测—假设—证实的循环。团队会议的讨论从来都是十分必要的，即使你不按照正常顺序经历这些步骤。而且，是否需要重新回到某一步骤也要经过讨论来决定。每次会议开始时都要明确本次会议的重点："我们在这儿是为了提出关于原因的假设……""我们在这儿讨论如何证实这些原因……"或"今天的会议重点是我们将如何分析数据"。

在六西格玛团队组成后，一定要很清醒地认识到，不是所有团队成员对整个过程都非常熟悉。即使他们自认为对过程非常了解，借助详细的流程图或过程映射（process mapping），通过系统的过程分析，他们也会非常吃惊地发现有很多自己不知道的事。这里提供的过程分析工具和方法将会帮助全体团队成员对过程的认识达成一致，并且通过集体讨论指出过程中可能引起问题的疑点和波动。

1. 过程分析的第一阶段：推测

在项目的界定阶段，团队可能提出一个用于界定项目过程边界的高端（或称宏观）过程图（SIPOC 图），SIPOC 图着重分析宏观流程，比较粗糙，许多过程中出现的细节问题在 SIPOC 图中都找不到。因此，在分析阶段，团队必须更细致地去分析过程中的各个细节部分，以便能够引导自己发现某些隐藏着的 X 变量（原因）。为此，要绘制详细流程图并加以证实。

（1）绘制详细流程图。本书第 4 章已经讨论了流程图的绘制，这里不再赘述。只是从过程分析的角度特别指出，详细的过程分析或过程映射对问题分析是至关重

要的。当然流程图绘制的详细程度取决于项目的目标和问题本身。如对一个生产线而言，如果进行工作地（work station）安排，只要将生产过程所需的作业及其前后关系描述清楚就可以了；而对于如何减缓生产线的节拍，则可能需要将工人的动作都描述出来，如绘制工人双手作业程序图。一个详尽的流程图的绘制本身，对团队成员而言就是一次有意义的经历，在这个过程中他们慢慢地认识到别人的工作，意识到本流程中所使用的方法其实可以有很多的变动，尤其是在服务行业。

这一阶段另一个有用的工具是跨职能流程图，即在通常的流程表中增加具体的职能部门，在图上标明哪个部门负责完成哪个环节。如果一个业务流程需要多个部门的参与（许多服务行业都是如此），那么跨职能流程图将非常有用。

（2）核实流程图。一旦团队完成了一张详尽的流程图，就应该花时间去证实图上反映的内容是否就是实际中真实发生的，因为有时候它们只是团队成员头脑中的产物。为了证实这些，还要花几天时间去跟踪某些典型的产品或服务小组的处理过程。应该使用一张过程检查单来做这个工作，务必以足够的细节来描述过程以获取每个重要步骤，补充流程图并证实流程图的真实性。

2. 过程分析的第二阶段：提出关于原因的假设

团队成员在绘制流程图时，潜在的问题就会被自然而然地提出来。如果三个人处理同一过程的某一步骤，但他们对如何完成该步骤的方法不能达成一致，那么实际上就找出了潜在的原因。当然，还需要证实这种混乱的确是过程中发生缺陷的一个重要原因。如果有人处理程序的顺序是 A，B，C，另一个人则是 B，A，C，那就要查看这种顺序的不同是否会对产品或服务产生影响。

在本阶段，可以细分为两层分析，先要识别过程中明显存在的问题，再进行量化增值分析。

（1）第一层分析：识别过程中明显存在的问题。流程图一旦确定下来就可能成为团队会议的焦点，队员可以用手中的记号笔来标记如下一些问题。讨论时要记住，我们是在寻找那些经常发生的以至于已经成为过程中的一些典型性问题的问题。

脱节：过程处理中存在于轮班之间、顾客和供应商之间或者经理和职员之间的使信息交流中断的步骤。

瓶颈：过程中的某个步骤的工作量超过了其本身原设定的容量，此步骤就会减慢整个进程的流动。可以设想，如果某项工作必须等待某人休假回来才能再进行，你就会看到瓶颈作用。

冗余：不同过程中的不同步骤提出了相同的活动和结果。例如，两个步骤中提出了相同的信息并且带着相同的信息进入相同的地方。

返工循环：过程中某步骤的输出产品有缺陷，必须返回其上游步骤，或另设“修复”步骤直到必需的工作完成为止。检查步骤往往是返工循环的起始点。

决定点/检查点：这是过程中的一个步骤，在那里进行一系列的检查和评估工作：对于合格产品进入正常程序的下一步；对不合格产品进入另设的“修复”阶段或进入返工循环。对于质量水平高的过程，这样的检查点是很少的；而在缺陷严重

的过程中，有大量这样的检查点。由于每一种类型的问题都可能成为在过程中导致缺陷的一个潜在的原因，为了减少缺陷产品送到顾客手中的可能性，必然要设立很多检查点。但是从顾客的角度看，由于检查步骤没有任何有价值的输出，还延长了产品和服务送达顾客的时间，对生产的进行造成了阻碍，而这些增加的成本时常会通过某种形式转嫁给顾客，因此顾客当然希望这种检查点越少越好。

（2）第二层分析：量化增值分析。当过程较复杂时，人们往往会关注过程本身的顺利进行而忽略了顾客为什么会花钱买产品。在高度发达的商业社会中，任何一个单独的集团为市场和社会提供的价值都是微不足道的，但它确实为顾客提供了某种价值。因此，“价值分析”作为一种途径，它通过外部顾客的视角重新审视工作流程并再三强调识别顾客需求。在量化增值分析的过程中，我们将每个步骤分成如下三种类型。

1）顾客增值（customer value added）。这些任务或活动在外部的顾客看来是有价值的。这很重要，因为几乎任何步骤在某些操作员的眼里都可以被证明是有理的。“老板要我们做，我们就做”并不意味着这项工作对顾客而言是增加价值的。

对顾客而言，增加价值的三个标准是：

- 顾客关心的，顾客承认它的价值并愿意付钱。
- 改进提供的服务和提高产品质量。显然，货物运输只移动物体位置，并不增加价值。
- 顾客希望一次做对。要注意：修补、返工、替换等只是改正以前造成的缺陷，它们并不增加价值。

“顾客增值”步骤必须同时满足上述三项标准。

2）运行增值（或过程增值）（operational value added）。有时我们采取的一些活动，没有同时满足“顾客增值”步骤的三个标准，但是具备潜在的增值可能。比如对于在流水线上为每件产品贴上编号条码，顾客不会因为我们贴了条码而愿意多付钱。不过贴条码可以使生产过程的管理效率大大提高，这就是使运行（或过程）达到增值。对于员工的培训也是这样，有效的培训可以提高员工的意识和技能，在适当的时机，可能开发出新的产品和新的服务。因此称这些活动是“运行增值”或“潜在增值”步骤。

3）不增值（non-value added）。在许多过程里都存在大量不增值的步骤。属于这种类型的活动包括返工、延迟、检查、回顾、安装和准备、传输（从一个地点或过程中的一个步骤传到下一个地点或步骤）、内部报告和内部调整等。“不增值”类型的判定看起来相当残忍，但仔细研究会发现，许多组织所做的事情大部分在顾客眼里确实并没有增加价值。如组织内部流程中大量的审批、报告，生产过程中大量的设备调整、检验、返修、维护等，诸如此类的事很多很多，你的顾客会愿意为这些步骤多支付金钱吗？

上述分析是把过程的步骤分成三种与价值相关的类型，可以帮助你识别出哪个步骤从价值的角度对顾客而言是最重要的。与此类似的是，把过程的步骤分成三种与时间相关的类型，这就是时间分析法。

过程的时间分析可能会给你另一个震惊：商业过程中往往有许多时间是空闲

的，并不是人闲坐在那里，而是那些该做的事情衔接不上。员工大多忙于一些无价值增值的活动。在优先考虑生产过程周期时间的地方，时间分析的巨大作用使得整个过程耗时由月削减到天、由天削减到小时。激烈的商业竞争从“及时的递送”到快速产品周期再到多种基于时间的服务竞争，这些都是速度的需要。在过去的15年里，在全世界的范围内，时间竞争已经给人们留下了深刻的印象，但是直到现在，仍然有很多过程尚未被触及，因而还有巨大的潜力。

过程的时间由如下两个部分组成：

工作时间：实际花费的用于生产产品或向顾客提供服务的时间。

等待时间（或称“排队时间”或“堆栈时间”）：产品或服务为等待某些事情发生而花费的时间。想象一下，有一批零部件、一大堆请求或者一车皮的产品都等在那里，等着有人来处理或者移动它们，这是多大的浪费！本书在后续章节中会介绍消除浪费的方法。

3. 过程分析的第三阶段：证实或排除原因

一般说来，从过程分析中辨认并查实原因并不困难。因为过程分析的判断准则很简单，即任何非增值过程步骤，任何增加耗时但并不增加价值的步骤都是在浪费时间，应尽量删减之。

但是，你将不得不做更多的调查工作，因为有些缺陷对顾客而言既重要又很容易被他们注意到，而你并不明白在过程步骤中存在的疑惑或变数是否真的会导致那些缺陷，你就必须分析清楚并给出结论。如果在物流运输过程中，张三总是将航班标签贴在箱子的正中，而李四总是将它们贴在右下角，那结果会怎样呢？它们对运输效率是否有影响？只要这种状况实际存在于运输过程之中，它就可能成为一种影响运输效率的原因。

证实过程原因的提示：

- 使用因果逻辑关系。
- 如果你还没有这样做，作一张详细的流程图来看是否在过程步骤中存在重要区别。
- 定点测试中的“试验”是另一种验证过程的缺陷是否确实带来影响的好方法。只要你在过程中，人为“试验”发生一个预定的波动（波动规模当然要小些），然后测量波动造成的影响，就可以断定此缺陷是否是真正的原因了。假设你认为物流部门在操作员总是把标签贴在确定的不变位置的情况下能够以更快的速度完成任务，那么可以用这种方法来测试一个或两个星期，看过程时间是否减少了。

当然，最终目的是完全去除那些在顾客眼里不能增加价值的任何步骤，包括花费时间去返工和检查等。去除许多上面列举的不增加价值的步骤，你将很可能缩短整个过程的周期时间从而增加利润，这也会令你的顾客感到高兴。六西格玛团队常常能缩短70%～80%的在顾客看来是被用来花费在返工上的和其他不增加价值的步骤上的时间。但是，仅仅加速问题处理的过程对团队并不是最重要的，团队必须设法消除那些经分析已被揭示出的缺陷原因，然后才能进入提高阶段。

5.2 假设检验

假设检验是六西格玛团队项目中应用最多的统计工具，如判断下列结论是否正确："新员工会比老员工受到更多的投诉"，"改进工作后平均产量有提高"，"加工温度为 180 度时比 160 度时垫圈断裂强度要高"，等等。由于我们观测到的样本数据总会带有误差，不能根据简单的样本统计量的结果下定论，必须使用严格的统计假设检验方法才能得出准确的判断结论。本节着重介绍有关假设检验的基本概念和简单的检验方法，这是后几章讲解统计方法的理论基础。

5.2.1 假设检验的基本概念

1. 假设检验问题

参数估计和假设检验是统计推断的两个重要方面。参数估计是以"数"为其输出结果，而假设检验是以"判断"为其输出结果。为了说明这一基本思想先看一个例子。

例 5—1 原来的冷拉钢筋生产线上的钢筋平均抗拉强度为 2 000kg，标准差为 300kg。希望经过参数调整后，钢筋平均抗拉强度能有所提高。项目团队在实施改进后抽取了 25 根钢筋，测得钢筋平均抗拉强度为 2 150kg。问：钢筋平均抗拉强度是否确有提高？

用 μ 代表改进后总体的钢筋抗拉强度的平均值，这个值是未知的。从抽样中得到的只是样本均值，而统计学的目的就是要用样本去推断总体。对于这个问题，已知若总体均值 $\mu>2\,000$，则认为平均抗拉强度有提高，若均值 $\mu\leqslant 2\,000$，则认为没有提高。为此可以建立两个命题，在假设检验中称它们为假设（hypothesis），一个为原假设（或零假设（null hypothesis）），记为 H_0；另一个称为备择假设（alternative hypothesis）（或对立假设），记为 H_1，即：

$$H_0:\mu\leqslant 2\,000,\ H_1:\mu>2\,000$$

问题就是要根据样本的观测值去判断 H_0 是否为真。通常选要证明的命题为备择假设，而把正常情况下成立的，一般不需证明而且是不证自明的作为原假设。在对某个参数进行检验时，把要证明的、不相等的、有差别的结论作为备择假设；相等的、无差别的、等号成立的结论作为原假设。因而在对于参数的检验问题中，备择假设中永远不会包含等号，只可能是"大于"、"小于"或"不等于"这三种情况之一。

2. 基本概念与步骤

假设检验的步骤可归纳为以下几点：

（1）建立假设。假设检验的第一步是建立假设，通常需要建立两个假设：原假设 H_0 和备择假设 H_1。

在对总体均值进行检验时，有三类假设：

$H_0:\mu=\mu_0$(或 $\mu\leqslant\mu_0$)，$H_1:\mu>\mu_0$

$H_0:\mu=\mu_0$(或 $\mu\geqslant\mu_0$)，$H_1:\mu<\mu_0$

$H_0:\mu=\mu_0$，$H_1:\mu\neq\mu_0$

称前两个为单边假设检验，后一个为双边假设检验。在例 5—1 中用的是单边检验 $H_0:\mu\leqslant2\,000$，$H_1:\mu>2\,000$。假设检验的任务是根据样本 x_1，x_2，…，x_n 来判断原假设是否为真。

(2) 选择检验统计量，确定拒绝域的形式。若对总体的均值进行检验，用样本均值 $\bar{x}$ 引出检验统计量；若对正态总体的方差进行检验，从样本方差 s^2 引出检验统计量。

根据统计量的值把整个样本空间分成两个部分：拒绝域 W 与不能拒绝域 A。当样本统计量的值落在拒绝域中就拒绝原假设，否则就无法拒绝原假设。所以在假设检验中必须找出拒绝域。

根据备择假设的不同，拒绝域可以是双边的也可以是单边的。在确定了拒绝域的类型后，还要确定临界值 c，这应根据允许犯错误的概率来确定。

(3) 给出检验中的显著性水平 α。在对原假设是否成立进行判断时，由于样本的随机性，判断可能产生两类错误，其示意列在表 5—1 中。第一类错误是当原假设为真时，由于样本的随机性，使样本观测值落在拒绝域 W 中，从而作出拒绝原假设的决定，其发生的概率称为犯第一类错误的概率，也称为拒真概率，记为 α，即 $P_{H_0}(W)=\alpha$。第二类错误是当原假设为假时，由于样本的随机性，使样本观测值落在不能拒绝域 A 中，从而作出无法拒绝原假设的决定，其发生的概率称为犯第二类错误的概率，也称为取伪概率，记为 β，即 $P_{H_1}(A)=\beta$。

若要求犯第一类错误的概率不超过 α，由此给出的检验称为水平为 α 的检验，称 α 为显著性水平，常取 α 为 0.05，有时也可能取 0.10 等。

表 5—1　　假设检验中两类错误

判断结论 \ 总体情况	H_0 为真	H_1 为真
接受 H_0	结论正确	第二类错误
拒绝 H_0	第一类错误	结论正确

以例 5—1 为例。因为要求检验钢筋平均抗拉强度是否超过 2 000kg，因此 H_0 的要求就是“钢筋平均抗拉强度未提高”。如果 $H_0:\mu\leqslant2\,000$ 被拒绝，则表明钢筋平均抗拉强度比原来的 2 000kg 确实有提高。为了真正理解假设检验结论的含义，应该具体地理解犯两类错误的实际意义。

关于第一类错误的说明：如果钢筋平均抗拉强度为 $\mu\leqslant2\,000$，平均抗拉强度并未提高，但拒绝了它，即把“未提高”当作了“有提高”。一般来说就是，当 H_0 成立时，却拒绝了 H_0，这就是第一类错误。通常取 $\alpha=0.05$ 作为犯第一类错误的风险概率。

关于第二类错误的说明：如果钢筋平均抗拉强度比原来真有提高，这时钢筋平

均抗拉强度已经不是原来的2 000kg了，但没有拒绝H_0，误认为没提高，即把“已提高”误认为“未提高”。一般来说就是，当H_0不成立时，却没有拒绝H_0，这就是第二类错误。

（4）给出临界值，确定拒绝域。有了显著性水平α后，可以根据给定的检验统计量的分布，查表得到临界值，从而确定具体的拒绝域。在不同的备择假设下，拒绝域、临界值与显著性水平α的关系是不同的，其示意图见图5—1。

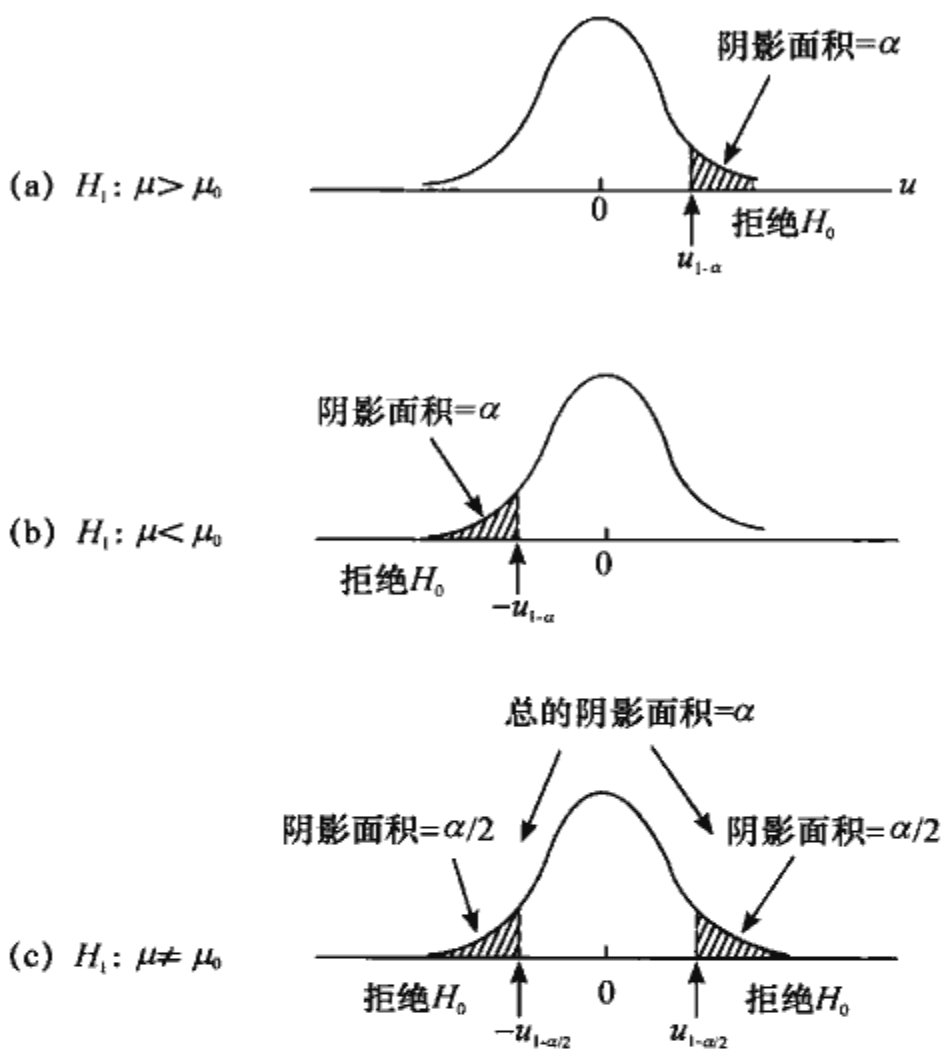


图5—1　备择假设、拒绝域和显著性水平

说明：图中曲线为$N(0, 1)$的密度函数曲线。

（5）根据样本观测值，计算检验统计量的值。收集样本数据，计算检验统计量的值。

（6）根据检验统计量的值是否落在拒绝域中作出判断。

1）将检验统计量的值与拒绝的临界值相比较，当它落在拒绝域中就作出拒绝原假设的结论，否则就作出不能拒绝原假设的结论。

2）由检验统计量计算P值。P值就是当原假设成立时，出现目前状况的概率（严格地说是当原假设成立时，出现目前状况或对原假设更不利状况，即对备择假设更有利状况的概率）。当这个概率很小时（例如小于0.05），这个结果在原假设成立的条件下就不该在一次试验中出现；但现在它确实出现了，因此有理由认为“原假设成立”这个前提是错的，因而应该拒绝原假设，接受备择假设。因此有一个最一般的规则：如果$P<\alpha$，则拒绝原假设。目前大多数统计软件都提供了与假设检验对应的P值，不必再查统计表确定拒绝域就可以根据P值作出判断。

3）根据样本观测值可以得到总体参数的置信区间，如果原假设的参数值未落入此置信区间，就作出拒绝原假设的结论，否则就作出保留原假设的结论。目前大多数统计软件都提供了相应的置信区间，不必自己计算，因此用这个方法判断也很方便。

3. 对总体均值进行假设检验时样本容量的确定

如果是对总体均值进行假设检验，使用者通常事先指定显著性水平以确定发生第一类错误的概率。以此为基础，通过控制样本容量，也可以对发生第二类错误的概率进行控制。下面介绍在总体均值的单边检验中如何确定样本容量。

$$H_0:\mu\leqslant\mu_0,\ H_1:\mu>\mu_0$$

式中，μ_0 为原假设总体均值。

由于两类错误造成的损失是不同类型的，其严重性也不同，因此不同的人可能会对两类错误的概率作出不同的限制。但是，在确定样本容量之前，必须对发生两类错误所允许的概率作出明确规定。

在假设检验中还常用到一个名词：检出力（power of test）。它的定义就是 $1-\beta$，相当于“在备择假设成立时不犯第二类错误”的概率，或说“在备择假设成立时拒绝原假设”的概率。在例 5—1 中，如果限定 $\alpha=0.05$，$\beta=0.10$，则总体均值的单边假设检验中所推荐的样本容量可用 MINITAB 计算得到，路径为：统计→功效和样本数量→单样本 t（见图 5—2）。

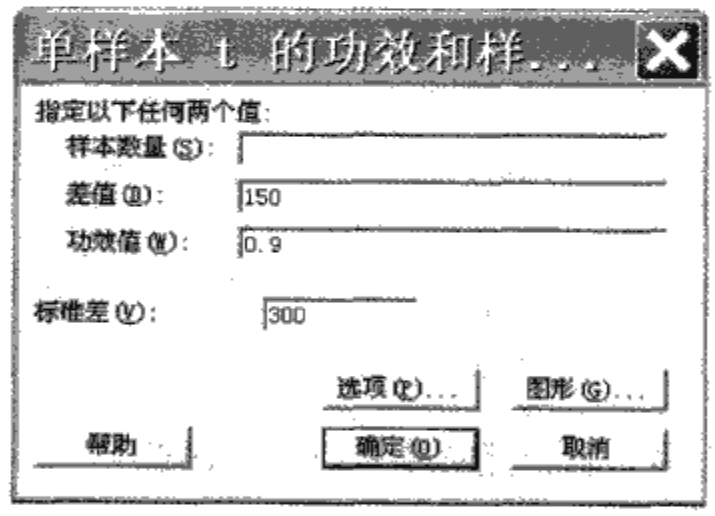


图 5—2 单样本 t 检验对话框

功效和样本数量
单样本 t 检验
检验平均值＝零（与＞零）
计算功效的平均值＝零＋差值
Alpha＝0.05　　假定标准差＝300

差值	样本数量	目标功效	实际功效
150	36	0.9	0.902 575

当 $n=36$ 时，由于犯第一类错误和犯第二类错误的概率已经控制在可接受的水平内，因此在假设检验中，质量控制人员只要在收集数据后，在拒绝 H_0 和接受

H_0 之间中作出判断就行了。

可以观察到当 α，β 和样本容量 n 三者中有两者已知时，即可计算得到第三者。对于给定的显著性水平 α，增大样本容量将会减小 β；对于给定的样本容量，减小 α 将会使 β 增大，增大 α 将会使 β 减小。

当样本容量 n 给定时，不能选择太小的显著性水平 α，因为选择较小的显著性水平 α 意味着将使发生第二类错误的风险增大，通常固定选取 α 为 0.05。当样本容量 n 给定，α 也取定时，如何比较两种检验方法的优劣呢？这就要比较它们犯第二类错误的概率。所谓一种方法比另一种方法“灵敏”，指的就是犯第二类错误的概率 β 小，或说检出力 $1-\beta$ 较高，即当备择假设成立时能够很明确地拒绝原假设而接受备择假设。

5.2.2 均值、方差和比例的假设检验

1. 单个正态总体均值、方差的显著性水平为 α 的检验

设总体分布为 $N(\mu, \sigma^2)$，从总体中抽取的样本为 x_1，x_2，…，x_n，样本均值为 $\bar{x}$，样本方差为 s^2，样本标准差为 s。

(1) 关于 μ 的显著性水平为 α 的检验。

1) 当 σ 已知时，关于正态均值 μ 常用的三对假设为：

$$\left.\begin{array}{l} H_0:\mu\leqslant\mu_0, H_1:\mu>\mu_0 \\ H_0:\mu\geqslant\mu_0, H_1:\mu<\mu_0 \end{array}\right\}\text{单边假设检验问题}$$

$$H_0:\mu=\mu_0, H_1:\mu\neq\mu_0\ \}\text{双边假设检验问题}$$

检验统计量都用统计量 $z=\dfrac{\bar{x}-\mu_0}{\sigma/\sqrt{n}}$。在 H_0 成立，即 $\mu=\mu_0$ 时，$z\sim N(0, 1)$。

给出显著性水平 α，根据上述假设，分别定出拒绝域 W：

$$W=\{z\geqslant z_{1-\alpha}\}, W=\{z\leqslant z_\alpha\}, W=\{|z|\geqslant z_{1-\alpha/2}\}$$

2) 当 σ 未知时，可以用样本标准差 s 代替。

大样本（$n\geqslant 30$）时，采用检验统计量 $z=\dfrac{\bar{x}-\mu_0}{s/\sqrt{n}}$。拒绝域 W 为：

$$W=\{z\geqslant z_{1-\alpha}\}, W=\{z\leqslant z_\alpha\}, W=\{|z|\geqslant z_{1-\alpha/2}\}$$

小样本（$n<30$）时，采用检验统计量 $t=\dfrac{\bar{x}-\mu_0}{s/\sqrt{n}}$。在 H_0 成立时，$t\sim t(n-1)$。

相应于上述三个检验问题的拒绝域 W 改用 t 分布获得，分别为：

$$W=\{t\geqslant t_{1-\alpha}(n-1)\}, W=\{t\leqslant t_\alpha(n-1)\}, W=\{|t|\geqslant t_{1-\alpha/2}(n-1)\}$$

式中，$t_{1-\alpha/2}(n-1)$ 是自由度为 $n-1$ 的 t 分布的 $1-\alpha/2$ 分位数，其他意义相同。

(2) 关于 σ^2 的显著性水平为 α 的检验。

可以采用检验统计量 $\chi^2=\dfrac{(n-1)s^2}{\sigma_0^2}$，在不同的检验问题中拒绝域按如下方法确定。

若原假设与备择假设分别为：H_0：$\sigma^2\leqslant\sigma_0^2$(或 $\sigma^2=\sigma_0^2$)，H_1：$\sigma^2>\sigma_0^2$，那么拒绝域为$\{\chi^2\geqslant\chi^2_{1-\alpha}(n-1)\}$。

若原假设与备择假设分别为：H_0：$\sigma^2\geqslant\sigma_0^2$(或 $\sigma^2=\sigma_0^2$)，H_1：$\sigma^2<\sigma_0^2$，那么拒绝域为$\{\chi^2\leqslant\chi^2_{\alpha}(n-1)\}$。

若原假设与备择假设分别为：H_0：$\sigma^2=\sigma_0^2$，H_1：$\sigma^2\neq\sigma_0^2$，那么拒绝域为$\{\chi^2\leqslant\chi^2_{\alpha/2}(n-1)$ 或 $\chi^2\geqslant\chi^2_{1-\alpha/2}(n-1)\}$。这里 $\chi^2_{\alpha/2}(n-1)$ 是自由度为 $n-1$ 的 χ^2 分布的 $\alpha/2$ 分位数，其他意义相同。

将上述结果列在表 5—2 中以便查用，通常将用 z，t，χ^2 做检验统计量的检验称为 z，t，χ^2 检验。

表 5—2　　单个正态总体均值、方差的显著性水平为 α 的检验

检验法	条件	H_0	H_1	检验统计量	拒绝域
z 检验	σ 已知	$\mu\leqslant\mu_0$ $\mu\geqslant\mu_0$ $\mu=\mu_0$	$\mu>\mu_0$ $\mu<\mu_0$ $\mu\neq\mu_0$	$z=\dfrac{\overline{x}-\mu_0}{\sigma/\sqrt{n}}$	$\{z\geqslant z_{1-\alpha}\}$ $\{z\leqslant z_{\alpha}\}$ $\{\lvert z\rvert\geqslant z_{1-\alpha/2}\}$
z 检验	σ 未知 大样本 $n\geqslant30$	$\mu\leqslant\mu_0$ $\mu\geqslant\mu_0$ $\mu=\mu_0$	$\mu>\mu_0$ $\mu<\mu_0$ $\mu\neq\mu_0$	$z=\dfrac{\overline{x}-\mu_0}{s/\sqrt{n}}$	$\{z\geqslant z_{1-\alpha}\}$ $\{z\leqslant z_{\alpha}\}$ $\{\lvert z\rvert\geqslant z_{1-\alpha/2}\}$
t 检验	σ 未知 小样本 $n<30$	$\mu\leqslant\mu_0$ $\mu\geqslant\mu_0$ $\mu=\mu_0$	$\mu>\mu_0$ $\mu<\mu_0$ $\mu\neq\mu_0$	$t=\dfrac{\overline{x}-\mu_0}{s/\sqrt{n}}$	$\{t\geqslant t_{1-\alpha}(n-1)\}$ $\{t\leqslant t_{\alpha}(n-1)\}$ $\{\lvert t\rvert\geqslant t_{1-\alpha/2}(n-1)\}$
χ^2 检验	μ 未知	$\sigma^2\leqslant\sigma_0^2$ $\sigma^2\geqslant\sigma_0^2$ $\sigma^2=\sigma_0^2$	$\sigma^2>\sigma_0^2$ $\sigma^2<\sigma_0^2$ $\sigma^2\neq\sigma_0^2$	$\chi^2=\dfrac{(n-1)s^2}{\sigma_0^2}$	$\{\chi^2\geqslant\chi^2_{1-\alpha}(n-1)\}$ $\{\chi^2\leqslant\chi^2_{\alpha}(n-1)\}$ $\{\chi^2\leqslant\chi^2_{\alpha/2}(n-1)$ 或 $\chi^2\geqslant\chi^2_{1-\alpha/2}(n-1)\}$

当然，用 MINITAB 软件可以更加方便地得出结论，省去大量烦琐的计算，提高效率。

例 5—2　某零件的厚度在正常生产情况下服从 $N(0.13,\ 0.015^2)$。某日在生产的产品中抽查了 10 次，其观测值为：0.112，0.130，0.129，0.152，0.138，0.118，0.151，0.128，0.158，0.142。发现平均厚度已稍有变化，如果标准差不变，试问生产是否正常？($\alpha=0.05$)

解：(1) 建立假设：H_0：$\mu=0.13$，H_1：$\mu\neq0.13$。

(2) 由于 σ 已知，故选用 z 检验。

(3) 由 MINITAB 计算，路径为：统计→基本统计量→单样本 Z，填写变量名后，要特别注意在“选项”窗口选择双侧检验“不等于”，得到结果如下：

单样本 Z：C1
mu=0.13 与≠0.13 的检验
假定标准差=0.015

变量	N	平均值	标准差	平均值标准误	95% 置信区间	Z	P
C1	10	0.135 80	0.015 11	0.004 74	(0.126 50，0.145 10)	1.22	0.221

因为 $P=0.221>0.05$，不能拒绝 H_0，即认为平均厚度变化到 0.136 与 0.13 并无显著差别，即这批产品平均厚度合格。由于观测的样本均值是 0.136，置信区间显示，以 95%的把握断言，总体均值落在（0.127，0.145），$\mu=0.13$ 落入此置信区间，因而无法拒绝原假设。MINITAB 还可给出非常直观的图形（见图 5—3）帮助判断：当 H_0 所对应的均值未落入均值的置信区间时，则拒绝原假设；否则不能拒绝原假设。本例的结论是：不能拒绝原假设 H_0，即平均厚度与 0.13 无显著差别。

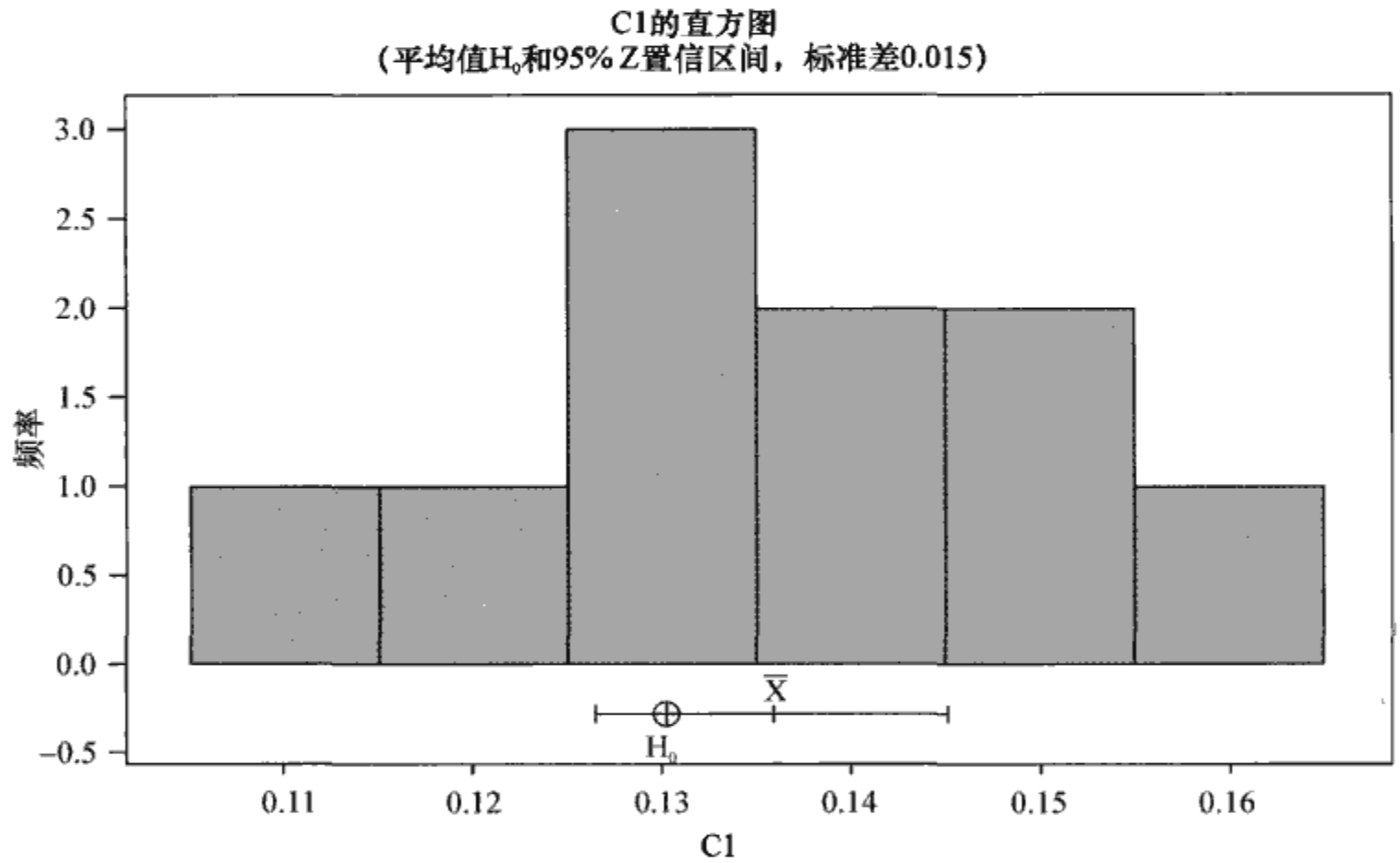


图 5—3　假设检验用的直方图和置信区间

例 5—3　某宾馆六西格玛团队评定某项服务的等级，最大可能的级别为 10。服务等级的总体均值“达到 7”的服务项目可以接受，总体均值“超过 7”的认为有提高。随机调查 12 位顾客，要求他们对此项服务评定等级，得到 12 个级别数据分别为：7，8，10，8，6，9，6，7，7，8，9，8。假设总体级别近似服从正态分布，在显著性水平 $\alpha=0.05$ 的情况下，问服务项目确实比规定的可接受标准有提高吗？

解：（1）建立假设：$H_0:\mu=7$，$H_1:\mu>7$。

（2）如果拒绝 H_0，则可以认为服务项目确实比规定标准有提高。由于是小样

本，并且 σ 未知，故选用单样本 t 检验。

(3) 下面是 MINITAB 路径：统计→基本统计量→单样本的 T 检验。软件计算的结果：

单样本 T: C1

$mu=7$ 与 >7 的检验

变量	N	平均值	标准差	平均值标准误	95% 下限	T	P
C1	12	7.750	1.215	0.351	7.120	2.14	0.028

计算结果显示：$\bar{x}=7.750$，$s=1.215$，$t=2.14$ 故拒绝 H_0，可以认定服务项目确实比规定标准有提高。

同样，因为 $P=0.028<0.05$，拒绝 H_0，获得同样结论。

例 5—4 某种导线的电阻服从 $N(\mu, \sigma^2)$，μ 未知，但要求千米长导线电阻的标准差不得超过 0.005Ω。现随机抽取 9 根千米长导线，测得其电阻数据分别为：10.010 0，9.997 7，9.989 8，10.000 8，10.002 4，10.004 8，9.999 6，10.007 8，9.993 2，测得样本的标准差 $s=0.006\ 6$。试问在 $\alpha=0.05$ 水平上能否认为该批导线电阻标准差发生变化?

解：(1) 建立假设：$H_0:\sigma=0.005$，$H_1:\sigma\neq0.005$。

(2) 由于 μ 未知，故选用 χ^2 检验。

(3) 在用 MINITAB 软件计算时，路径为：统计→基本统计量→图形化汇总，求出标准差的 95%双侧置信区间为 (0.004，0.013)（见图 5—4），而 0.005 落入此置信区间，因此不能拒绝原假设，认为该批导线电阻标准差合格。

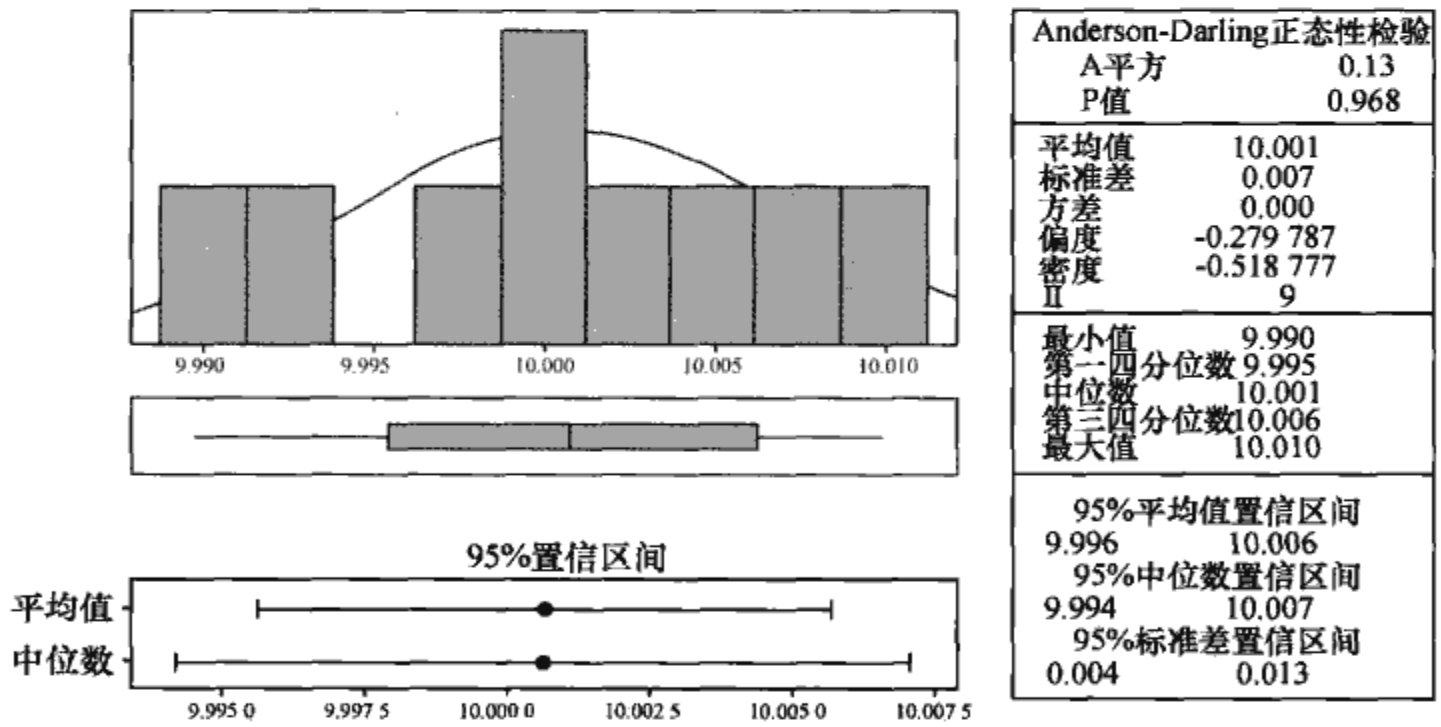


图 5—4 某导线 χ^2 检验

一般来说，估计总体均值大约 $n=15$ 就够了，而估计标准差大约要 $n=30$ 才能估计得比较好。本例中 $n=9$，对于估计样本均值样本容量已经不够，当然对于估计

标准差就更不够了，所以才导致最终结果中其双侧置信区间太宽了。

2. 两个总体均值、方差的显著性水平为 α 的检验

设有两个独立总体，$X\sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$，$Y\sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$。从总体 X 中抽取的样本 x_1，x_2，…，x_n，样本均值为 $\bar{x}$，样本方差为 s_x^2，样本标准差为 s_x。从总体 Y 中抽取的样本为 y_1，y_2，…，y_m，样本均值为 $\bar{y}$，样本方差为 s_y^2，样本标准差为 s_y。

（1）关于两个正态总体均值的显著性水平为 α 的检验。

1）当 σ_1，σ_2 已知时，可以采用检验统计量 $z=\dfrac{\bar{x}-\bar{y}}{\sqrt{\sigma_1^2/n+\sigma_2^2/m}}$。

对检验问题 $H_0:\mu_1\leqslant\mu_2$（或 $\mu_1=\mu_2$），$H_1:\mu_1>\mu_2$，拒绝域为$\{z\geqslant z_{1-\alpha}\}$。

对检验问题 $H_0:\mu_1\geqslant\mu_2$（或 $\mu_1=\mu_2$），$H_1:\mu_1<\mu_2$，拒绝域为$\{z\leqslant z_{\alpha}\}$。

对检验问题 $H_0:\mu_1=\mu_2$，$H_1:\mu_1\neq\mu_2$，拒绝域为$\{|z|\geqslant z_{1-\alpha/2}\}$。

2）当 σ_1，σ_2 未知，但 $\sigma_1=\sigma_2$ 时，可以采用检验统计量 $t=\dfrac{\bar{x}-\bar{y}}{s_w\sqrt{1/n+1/m}}$，其中：$s_w^2=\dfrac{(n-1)s_x^2+(m-1)s_y^2}{n+m-2}$。

对上述三个检验问题的拒绝域可以用 t 分布的分位数得到，它们分别是：$\{t\geqslant t_{1-\alpha}(n+m-2)\}$，$\{t\leqslant t_{\alpha}(n+m-2)\}$，$\{|t|\geqslant t_{1-\alpha/2}(n+m-2)\}$。

3）当 σ_1，σ_2 未知，但 n 与 m 都较大时，可以采用检验统计量 $z=\dfrac{\bar{x}-\bar{y}}{\sqrt{s_x^2/n+s_y^2/m}}$，对上述三个检验问题的拒绝域仍可以用 $N(0,1)$ 分布的分位数获得，它们分别是：$\{z\geqslant z_{1-\alpha}\}$，$\{z\leqslant z_{\alpha}\}$，$\{|z|\geqslant z_{1-\alpha/2}\}$。

（2）关于两个正态总体方差的显著性水平为 α 的检验。可以采用检验统计量 $F=\dfrac{s_x^2}{s_y^2}$。

1）检验问题 $H_0:\sigma_1^2=\sigma_2^2$，$H_1:\sigma_1^2\neq\sigma_2^2$，拒绝域为：

$$\{F\leqslant F_{\alpha/2}(n-1,m-1)\text{或 }F\geqslant F_{1-\alpha/2}(n-1,m-1)\}$$

2）检验问题 $H_0:\sigma_1^2\leqslant\sigma_2^2$（或 $\sigma_1^2=\sigma_2^2$），$H_1:\sigma_1^2>\sigma_2^2$，拒绝域为：

$$\{F\geqslant F_{1-\alpha}(n-1,m-1)\}$$

3）检验问题 $H_0:\sigma_1^2\geqslant\sigma_2^2$（或 $\sigma_1^2=\sigma_2^2$），$H_1:\sigma_1^2<\sigma_2^2$，拒绝域为：

$$\{F\leqslant F_{\alpha}(n-1,m-1)\}$$

将上述关于两个总体均值、方差的显著性水平为 α 的检验列在表 5—3 中，用检验统计量 z，t，F 的检验分别称为 z，t，F 检验。

表 5—3　　两正态总体均值、方差的显著性水平为 α 的检验

检验法	条件	H_0	H_1	检验统计量	拒绝域
z 检验	σ_1，σ_2 已知	$\mu_1\leqslant\mu_2$ $\mu_1\geqslant\mu_2$ $\mu_1=\mu_2$	$\mu_1>\mu_2$ $\mu_1<\mu_2$ $\mu_1\neq\mu_2$	$z=\dfrac{\bar{x}-\bar{y}}{\sqrt{\sigma_1^2/n+\sigma_2^2/m}}$	$\{z\geqslant z_{1-\alpha}\}$ $\{z\leqslant z_\alpha\}$ $\{\lvert z\rvert\geqslant z_{1-\alpha/2}\}$
t 检验	$\sigma_1=\sigma_2$ 未知	$\mu_1\leqslant\mu_2$ $\mu_1\geqslant\mu_2$ $\mu_1=\mu_2$	$\mu_1>\mu_2$ $\mu_1<\mu_2$ $\mu_1\neq\mu_2$	$t=\dfrac{\bar{x}-\bar{y}}{s_w\sqrt{1/n+1/m}}$	$\{t\geqslant t_{1-\alpha}(n+m-2)\}$ $\{t\leqslant t_\alpha(n+m-2)\}$ $\{\lvert t\rvert\geqslant t_{1-\alpha/2}(n+m-2)\}$
近似 z 检验	σ_1，σ_2 未知 m，n 大样本	$\mu_1\leqslant\mu_2$ $\mu_1\geqslant\mu_2$ $\mu_1=\mu_2$	$\mu_1>\mu_2$ $\mu_1<\mu_2$ $\mu_1\neq\mu_2$	$z=\dfrac{\bar{x}-\bar{y}}{\sqrt{s_x^2/n+s_y^2/m}}$	$\{z\geqslant z_{1-\alpha}\}$ $\{z\leqslant z_\alpha\}$ $\{\lvert z\rvert\geqslant z_{1-\alpha/2}\}$
F 检验	μ_1，μ_2 未知	$\sigma_1^2\leqslant\sigma_2^2$ $\sigma_1^2\geqslant\sigma_2^2$ $\sigma_1^2=\sigma_2^2$	$\sigma_1^2>\sigma_2^2$ $\sigma_1^2<\sigma_2^2$ $\sigma_1^2\neq\sigma_2^2$	$F=\dfrac{s_x^2}{s_y^2}$	$\{F\geqslant F_{1-\alpha}(n-1,\ m-1)\}$ $\{F\leqslant F_\alpha(n-1,\ m-1)\}$ $\{F\leqslant F_{\alpha/2}(n-1,\ m-1)$ 或 $F\geqslant F_{1-\alpha/2}(n-1,\ m-1)\}$

例 5—5　在改进工艺前后，分别测量了若干钢条的抗剪强度，数据如下：

改进后：525，531，518，533，546，524，521，533，545，540

改进前：521，525，533，525，517，514，526，519

问：可以认为改进工艺后钢条的平均抗剪强度有提高吗？首先在 $\alpha=0.05$ 水平上检验改进前后的方差是否相等，若可以认为相等的话，再在 $\alpha=0.05$ 水平上进一步检验改进后均值是否增大。

解：(1) 首先检验方差是否相等。

1) 设 $H_0:\sigma_1^2=\sigma_2^2$，$H_1:\sigma_1^2\neq\sigma_2^2$。

2) 用 F 检验，显著性水平 $\alpha=0.05$。

MINITAB 计算路径：统计→基本统计量→双方差（见图 5—5 和图 5—6）。

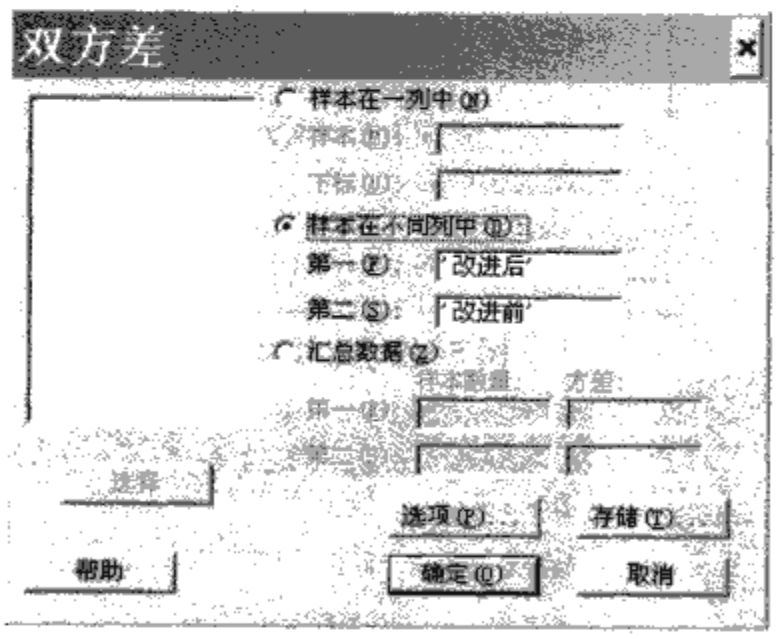


图 5—5　两总体 F 检验中的双方差对话框

由于 $P=0.211>0.05$，因此不能拒绝原假设，可以认为改进前后的方差相等。

(2) 检验均值是否有提高。

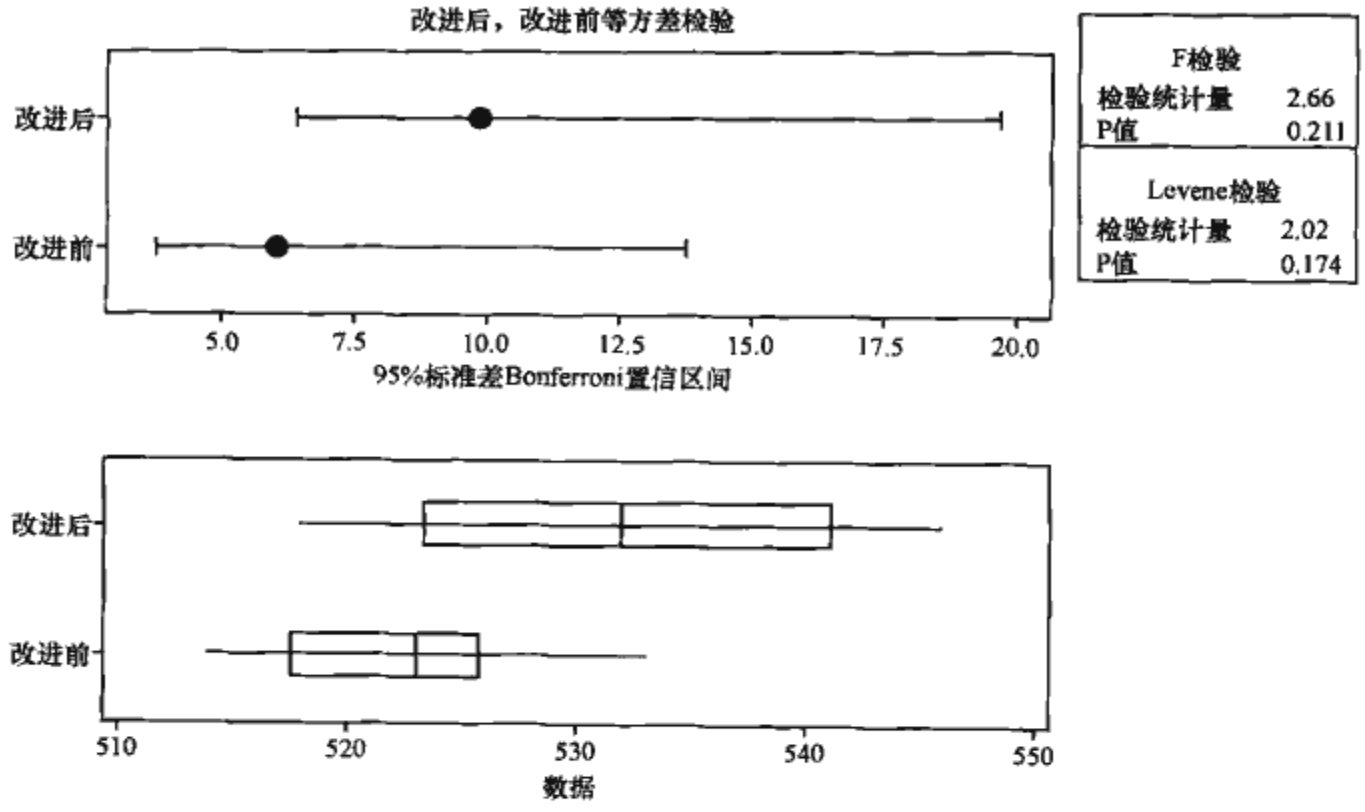


图 5—6　两总体方差相等性检验

1）设 $H_0:\mu_1=\mu_2$，$H_1:\mu_1>\mu_2$。

2）由于两总体方差相等，但未知，故选用 t 检验。

3）根据显著性水平 $\alpha=0.05$，进行 MINITAB 运算（见图 5—7 和图 5—8）。结果如下所示。

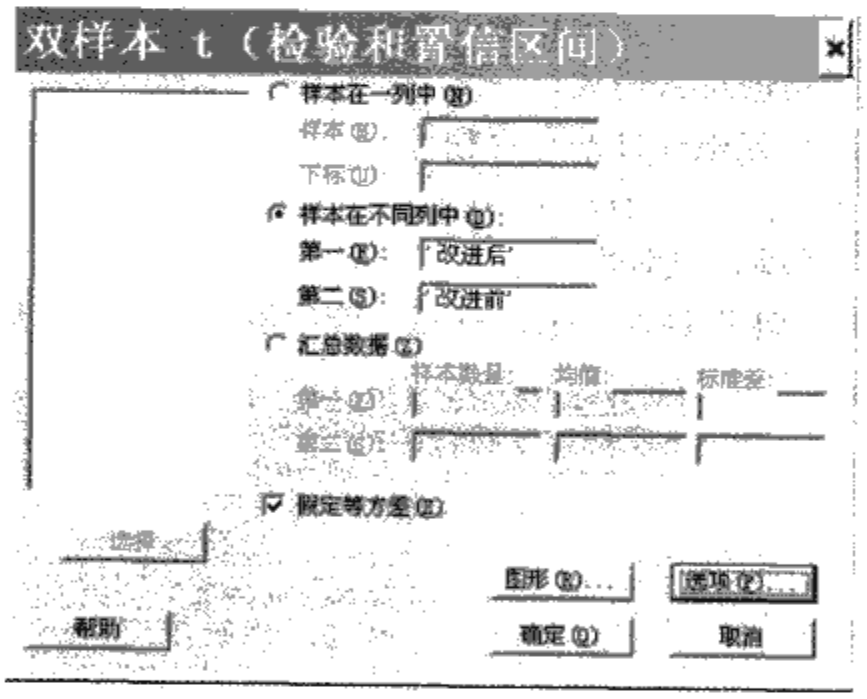


图 5—7　双样本 t 检验对话框

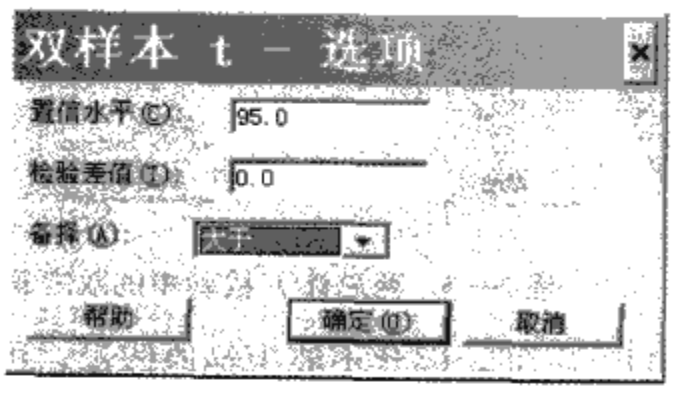


图 5—8　双样本 t 检验中的选项对话框

双样本 T 检验和置信区间：改进后，改进前

改进后 与 改进前 的双样本 T

	N	平均值	平均值标准差	标准误
改进后	10	531.60	9.78	3.1
改进前	8	522.50	6.00	2.1

差值＝mu(改进后)－mu(改进前)

差值估计：9.10

差值的 95% 置信下限：2.19

差值＝0（与>）的 T 检验：T 值＝2.30　P 值＝0.018　自由度＝16

两者都使用合并标准差＝8.338 2

因为 $P=0.018<0.05$，所以拒绝原假设，即可认为改进后的钢条的平均抗剪强度确有提高。其检验结果的示意图如图 5—9 所示。

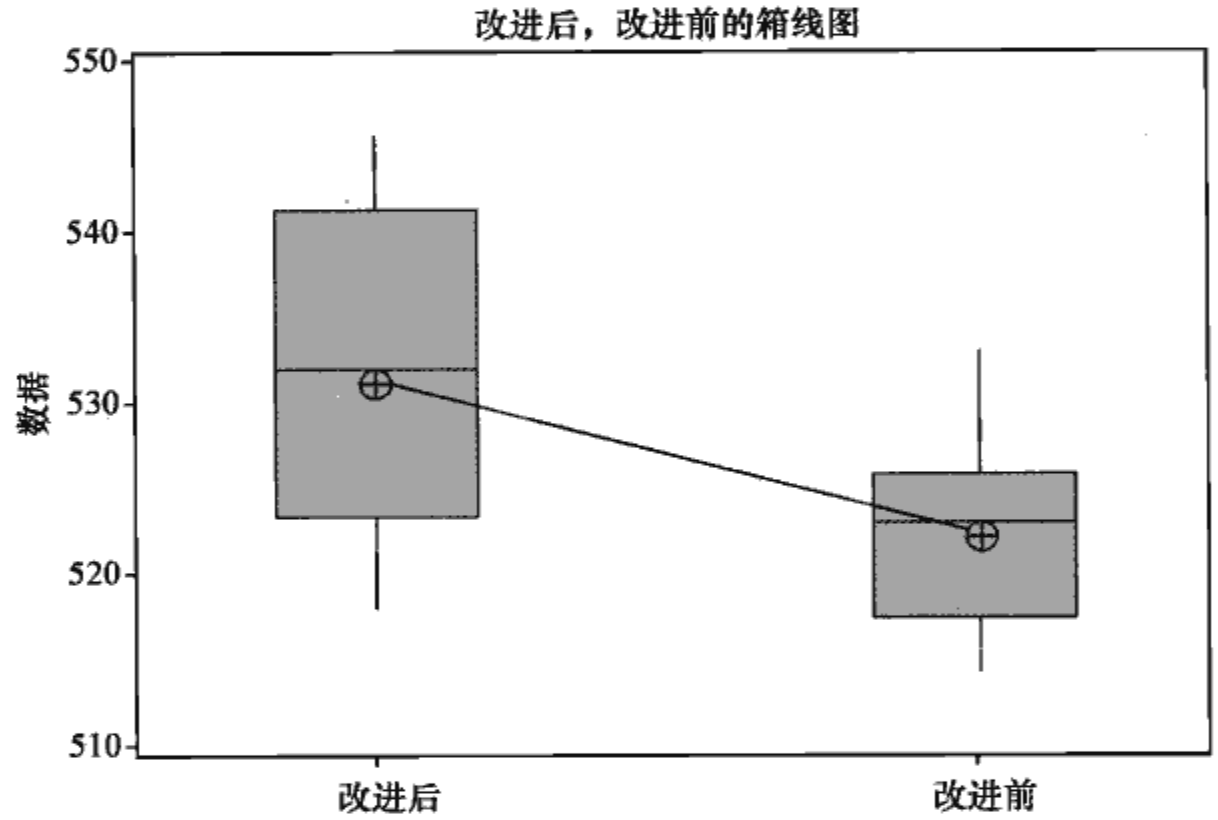


图 5—9　改进工艺前后钢条的抗剪强度比较图

3. 比率 p 的假设检验

(1) 单比率 p 的显著性水平为 α 的检验。

例 5—6　某厂规定产品必须经过检验合格后才能出厂，其不合格品率 p_0 不得超过 5% 。现从一批产品中随机抽取 200 个进行检验，发现有 16 个不合格品，问该批产品能否出厂？($\alpha=0.05$)

1) 设 $H_0: p\leqslant 0.05$，$H_1: p>0.05$。

2) 显著性水平 $\alpha=0.05$。

用 MINITAB 软件计算，路径为：统计→基本统计量→单比率（见图 5—10 和图 5—11）。

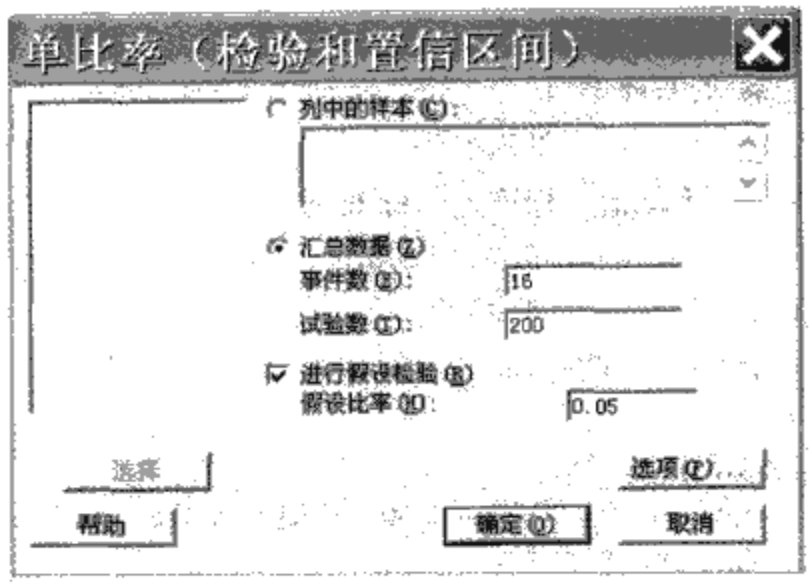


图 5—10　单比率检验对话框

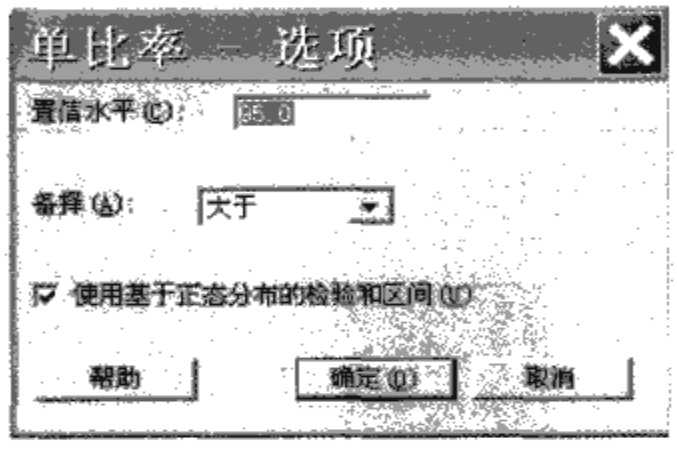


图 5—11　单比率检验中的选项对话框

可得下列结果：

单比率检验和置信区间

p=0.05 与 p>0.05 的检验

样本	X	N	样本 p	95% 下限	Z 值	P 值
1	16	200	0.080 000	0.048 446	1.95	0.026

使用正态近似。

所以拒绝原假设，不允许这批产品出厂。

（2）双比率、显著性水平为 α 的检验。

例 5—7　用 A 与 B 两种不同的方法制造某种零件，从各自制造的零件中分别随机抽取 100 个，其中 A 方法有 10 个不合格品，B 方法有 6 个不合格品。在 $\alpha=0.05$ 的水平上，能否认为不合格品率与方法有关？

设 A 方法不合格品率为 p_1，B 方法不合格品率为 p_2，此时要检验的假设为：

$$H_0: p_1 = p_2, H_1: p_1 \neq p_2$$

用 MINITAB 计算的路径：统计→基本统计量→双比率（见图 5—12 和图 5—13）。

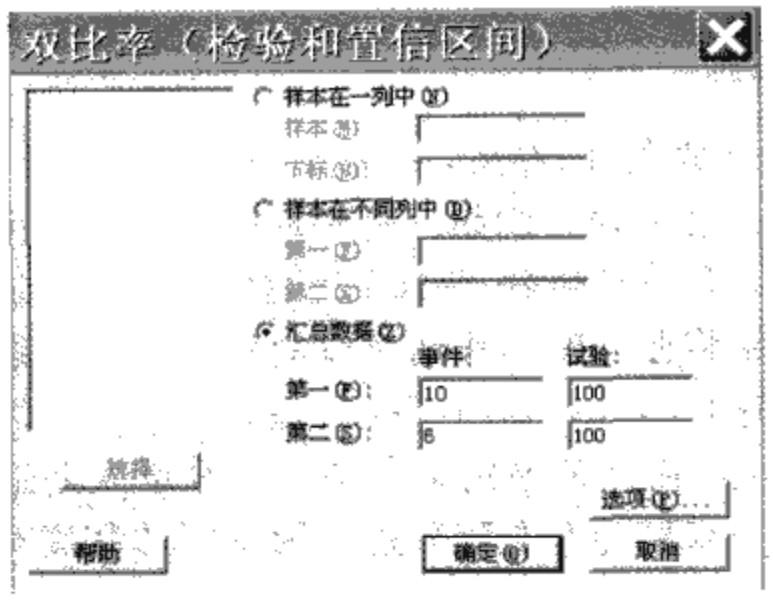


图 5—12 双比率检验对话框

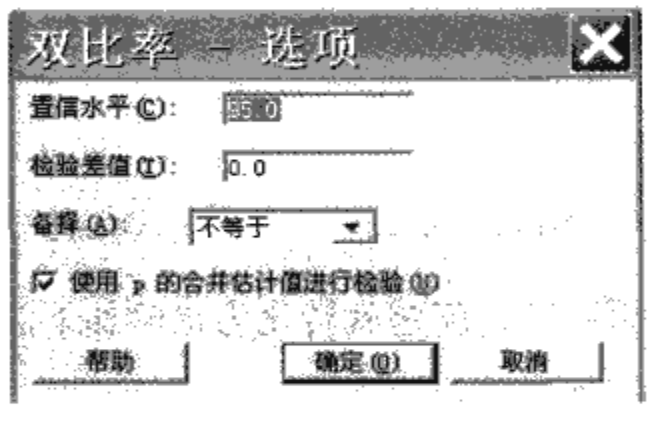


图 5—13 双比率检验中的选项对话框

可得到下列结果：

双比率检验和置信区间

样本	X	N	样本 p
1	10	100	0.100 000
2	6	100	0.060 000

差值＝p (1)－p (2)
差值估计：0.04
差值的 95%置信区间：(－0.034 992 6，0.114 993)
差值＝0 (与 ≠ 0) 的检验：Z＝1.04 P 值＝0.297

这里 P 值为 0.297，大于给定的 $\alpha=0.05$，因此无法拒绝原假设，得到结论：两种方法间无显著差异。这就给我们很大的启示，表面上看 10%当然比 6%要大，但是在样本量较小时竟然得不到有显著差别的结论。统计工作者不相信简单的百分数，6%与 60‰是不同的。如果本例的数字都扩大 10 倍，则二者的差别如下所示就是显著的了。

双比率检验和置信区间

样本	X	N	样本 p
1	100	1 000	0.100 000
2	60	1 000	0.060 000

差值＝p(1)－p(2)
差值估计：0.04
差值的 95%置信区间：(0.016 285 2，0.063 714 8)
差值＝0 (与 ≠ 0) 的检验：Z＝3.30 P 值＝0.001

5.2.3 配对数据检验

x_i 和 y_i 是分别来自 $N(\mu_1, \sigma_1^2)$ 与 $N(\mu_2, \sigma_2^2)$ 的样本观测值，要检验这两个分布的均值是否一致。比如，某儿童运动鞋制造商希望了解两种鞋底材料的耐磨性能，于是随机地选择了 10 名同龄的儿童试穿分别用两种鞋底材料制造的运动鞋。如果将此问题当作两总体的均值检验问题，很容易得到“差别不显著”的结论，这是因为儿童间有很大差异，有的活泼好动，而有的把多数时间花在电脑游戏上。而这种差别又不是由于测量误差造成的。鉴定材料差别的最好方法是将同一双鞋的左右脚分别使用不同的鞋底材料，看其差别的均值是否为零。

采用如下方法处理：

令 $d_i=x_i-y_i$ $(i=1, 2, \cdots, n)$，那么可以把它们看成是来自如下正态总体的样本观察值：

$$D=X-Y\sim N(\mu_1-\mu_2,\sigma_1^2+\sigma_2^2)\overset{记}{=\!=}N(\mu,\sigma^2)$$

则检验 μ_1 与 μ_2 是否相等的问题就转化为检验如下假设：

$$H_0:\mu=0,\ H_1:\mu\neq 0$$

这是单个正态总体均值是否为零的检验问题。

由于 σ 未知，因此对此问题用 t 检验，检验统计量为：

$$t=\frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}}$$

例 5—8 某儿童运动鞋制造商希望了解两种鞋底的材料的耐磨性能，于是随机地选择了 10 名同样年龄的儿童试穿，同一双鞋的左右脚分别使用不同的鞋底材料制作。表 5—4 是测量的记录，问两种材料的耐磨性结果在 $\alpha=0.05$ 水平上有无显著差异？

表 5—4　　鞋底材料磨损情况

MAT A (y_i)	MAT B (x_i)	d_i
13.200 0	14.000 0	0.800 00
8.200 0	8.800 0	0.600 00
10.900 0	11.200 0	0.300 00
14.300 0	14.200 0	−0.100 00
10.700 0	11.800 0	1.100 00
6.600 0	6.400 0	−0.200 00
9.500 0	9.800 0	0.300 00
10.800 0	11.300 0	0.500 00
8.800 0	9.300 0	0.500 00
13.300 0	13.600 0	0.300 00

这里的数据属于配对数据，每次测定的结果不仅与材料有关，还与孩子的运动习惯有关，x_i-y_i（$i=1$，2，…，n），便是两种鞋底材料的差异，$n=10$。

用 MINITAB 软件，对于差值进行单样本均值是否为零的检验，路径为：统计→基本统计量→单样本 t（见图 5—14），得到下列结果：

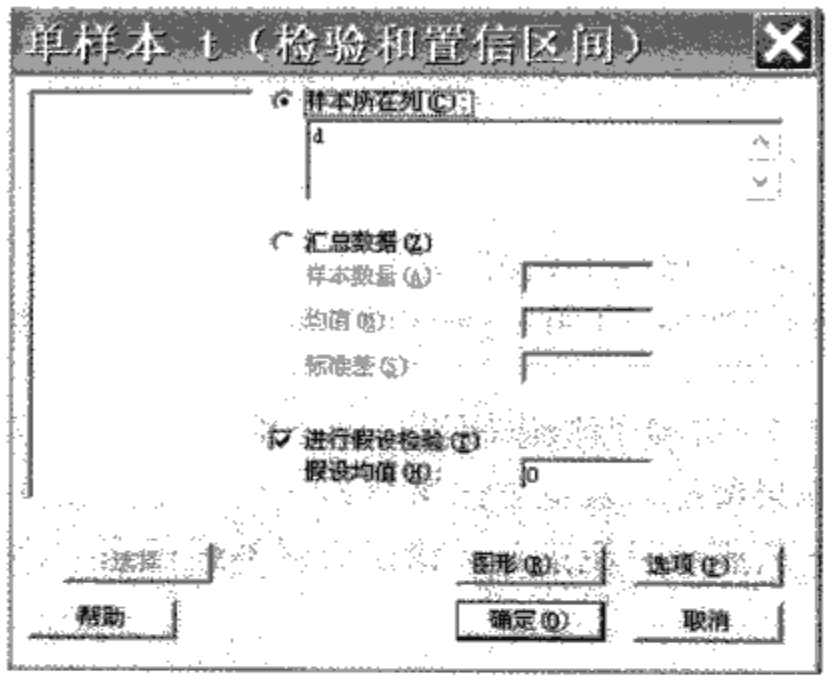


图 5—14 配对数据单样本检验对话框

单样本 T：d

mu=0 与 ≠ 0 的检验

变量	N	平均值	标准差	平均值标准误	95%置信区间	T	P
d	10	0.410	0.387	0.122	(0.133，0.687)	3.35	0.009

该例子也可以用 MINITAB 软件的另一途径计算：统计→基本统计量→配对 T，结果如下：

配对 T 检验和置信区间：MAT B，MAT A

MAT B-MAT A 的配对 T

	N	平均值	标准差	平均值标准误
MAT B	10	11.040	2.518	0.796
MAT A	10	10.630	2.451	0.775
差分	10	0.410	0.387	0.122

平均差的 95% 置信区间：(0.133，0.687)

平均差=0（与 ≠ 0）的 T 检验：T 值=3.35　P 值=0.009

结果与前一种方法完全一致。

如果将此问题误认为是普通的两样本均值检验，可以使用 MINITAB 软件直接用“双样本 t 检验”方法得到下列结果。

双样本 T 检验和置信区间：MAT B，MAT A
MAT B 与 MAT A 的双样本 T

	N	平均值	标准差	平均值标准误
MAT B	10	11.04	2.52	0.80
MAT A	10	10.63	2.45	0.78

差值＝mu (MAT B)－mu (MAT A)
差值估计：0.41
差值的 95%置信区间：(－1.93，2.75)
差值＝0 (与 ≠0) 的 T 检验：T 值＝－0.37　P 值＝0.717　自由度＝17

P 值高达 0.717，不能拒绝原假设，即不能认为测量结果有显著差异。可见对于配对观测数据如果按配对数据方法来分析，可以得到较为精确的结论，误认为普通两样本数据来分析则容易犯第二类错误而得不到正确结论。

5.3 单因子方差分析

有时会遇到需要比较多个总体均值的问题，下面便是一个例子。

例 5—9 现有四条生产线生产同一型号垫片。为了解不同生产线的垫片的断裂强度有无明显的差异，现分别从每一条生产线随机抽取 5 个垫片测定其断裂强度，数据如表 5—5 所示。试问四条生产线生产的垫片的平均断裂强度是否相同？

表 5—5　　四条生产线的垫片断裂强度

生产线	1	2	3	4
断裂强度	86.5	93.4	88.6	94.3
	92.0	87.9	93.2	93.3
	85.2	90.6	88.8	92.0
	87.9	85.5	92.7	89.2
	86.0	88.4	90.9	92.5

在这个问题中，需要比较 4 个总体均值。这类问题可以用方差分析方法来解决。

1. 基本概念

为了以后叙述方便，这里先给出在试验设计中经常遇到的几个概念。

(1) 因子。对指标有影响的因素称为因子，因子常用大写字母 A，B，C，D 等表示。在例 5—9 中，生产线对指标垫片的断裂强度有影响，因此生产线便是因子，记为 A。

(2) 水平。在试验中因子所处的状态称为因子的水平，用因子的字母加下标来表示，譬如因子 A 的水平用 A_1，A_2，…表示。例 5—9 中的四条生产线便是这一过

程中因子的4个水平，分别记为 A_1，A_2，A_3，A_4。

(3) 试验条件（也称处理）。在一次试验中，每个因子总取一个特定的水平，若干因子各取一个特定的水平构成的组合，称为一个试验条件。在例5—9中仅有一个因子，所以每一个水平便是一个试验条件。

(4) 指标。衡量试验条件好坏的量称为指标，用 y 表示，它是一个随机变量。在例5—9中垫片的断裂强度就是试验指标。

2. 单因子方差分析的模型

如果一个试验中所考察的因子只有一个，那么这是单因子试验问题。

设在一个试验中只考察一个因子 A，它有 r 个水平，在每一水平下进行 m 次重复试验，其结果用 y_{i1}，y_{i2}，…，y_{im}（$i=1$，2，…，r）表示。此时共有 $n=r\times m$ 个数据。记第 i 水平下的数据和为 T_i，数据均值为 $\bar{y}_i$，总的均值为 $\bar{y}$。常常把数据列成如表5—6所示的形式。

表5—6　　单因子试验数据表

水平	试验数据	和	均值
A_1	y_{11}，y_{12}，…，y_{1m}	T_1	$\bar{y}_1$
A_2	y_{21}，y_{22}，…，y_{2m}	T_2	$\bar{y}_2$
⋮	⋮	⋮	⋮
A_r	y_{r1}，y_{r2}，…，y_{rm}	T_r	$\bar{y}_r$

为了对这些数据进行统计分析，需要对数据作三项假定：

(1) 在水平 A_i 下，y_{i1}，y_{i2}，…，y_{im} 是来自正态分布 $N(\mu_i,\ \sigma_i^2)$ 的一个样本，其中 μ_i 就是要比较的对象。

(2) 在不同水平下的方差相等，即 $\sigma_1^2=\sigma_2^2=\cdots=\sigma_r^2\triangleq\sigma^2$，只要诸试验是在相同条件下进行，方差相等一般可以满足。

(3) 各数据 y_{ij}（$i=1$，2，…，r；$j=1$，2，…，m）相互独立，这通常只要把试验次序随机化即可得到满足。

在上述三项假定下，诸总体均值是否相等的问题归结为一个假设检验问题，其原假设与备择假设分别为：

$$H_0:\ \mu_1=\mu_2=\cdots=\mu_r,\ H_1:\ \mu_1,\mu_2,\cdots,\mu_r\text{不全相等}$$

检验这一对假设的统计方法便是方差分析（analysis of variance，ANOVA）。

当 H_0 不真时，表示不同水平下指标的均值有显著差异，此时称因子 A 是显著的，否则称因子 A 不显著。

3. 方差分析的基本思想和步骤

(1) 平方和分解。上述 n 个数据不全相等，它们的波动可以用总的偏差平方和 SS_T 表示：

$$SS_T=\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{m}(y_{ij}-\bar{y})^2$$

引起数据波动的原因不外乎如下两个：

一是由于因子 A 的水平不同，当假设 H_0 不真时，各个水平下指标的均值不同，这必然会使试验结果不同，可以用组间偏差平方和来表示，也称因子 A 的偏差平方和：

$$SS_M = SS_A = \sum_{i=1}^{r} m(\bar{y}_{i\cdot} - \bar{y})^2$$

式中乘以 m 是因为每一水平下进行了 m 次试验。

二是由于存在随机误差，即使在同一水平下获得的数据间也有差异，这是由除了因子 A 的水平外的一切原因引起的，将它们归结为随机误差，可以用组内偏差平方和表示：

$$SS_e = \sum_{i=1}^{r} \sum_{j=1}^{m} (y_{ij} - \bar{y}_{i\cdot})^2$$

可以证明有如下平方和分解式：

$$SS_T = SS_M + SS_e$$

(2) 自由度与均方和（平均偏差平方和）。上述诸平方和的大小与数据个数有关。一般地，数据个数越多，偏差平方和会越大，水平数越多，因子 A 的偏差平方和也会越大。所以为了进行比较，还需要引入自由度的概念。这里只给出自由度的计算公式。SS_T，SS_M，SS_e的自由度分别用 df_T，df_M，df_e 表示，那么：

在 SS_T 的 $n = rm$ 个偏差中有一个关系式 $\sum_{i=1}^{r} \sum_{j=1}^{m} (y_{ij} - \bar{y}) = 0$，故仅有 $n-1$ 个偏差是独立的，因而总的偏差平方和的自由度 $df_T = n - 1$。

在 SS_M 的 r 个偏差中有一个关系式 $\sum_{i=1}^{r} (\bar{y}_{i\cdot} - \bar{y}) = 0$，故仅有 $r-1$ 个偏差是独立的，因而因子 A 的偏差平方和的自由度为 $df_M = r - 1$。

在 SS_e 的 $n = rm$ 个偏差中有 r 个关系式 $\sum_{j=1}^{m} (y_{ij} - \bar{y}_{i\cdot}) = 0 (i = 1, 2, \cdots, r)$，$M$ 故仅有 $r(m-1)$ 个偏差是独立的。因而 $df_e = r(m-1) = n - r$。

它们之间也有分解式 $df_T = df_M + df_e$。

将因子或误差的偏差平方和与相应的自由度之比称为因子或误差的均方和，并分别记为：$MS_M = SS_M / df_M$，$MS_e = SS_e / df_e$。

(3) F 比与拒绝域。当原假设 H_0 成立时，μ_i 间无差异，从而因子 A 的均方和较小，即 MS_M 与 MS_e 相差不大；而当 MS_M 相对于 MS_e 大得多时，则可以认为因子 A 是显著的。这一比较可以用两者的比值来表示，记为：$F = MS_M / MS_e$。

当 H_0 成立时，统计量 F 的分布为自由度是 (df_M, df_e) 的 F 分布。当 $F > F_{1-\alpha}(df_M, df_e)$ 时认为因子 A 是显著的，即均值不全相等；当 $F \leqslant F_{1-\alpha}(df_M, df_e)$ 时，认为因子 A 不显著。其中 $F_{1-\alpha}(df_M, df_e)$ 是自由度为 df_M 和 df_e 的 F 分布的 $1-\alpha$ 分位数。

(4) 方差分析表。以上计算过程可列成一张方差分析表（见表 5—7）。

表 5—7 单因子方差分析表

来源	偏差平方和	自由度	均方和	F 比
因子 A	SS_M	$df_M=r-1$	$MS_M=SS_M/df_M$	$F=MS_M/MS_e$
误差 e	SS_e	$df_e=n-r$	$MS_e=SS_e/df_e$	
总计 T	SS_T	$df_T=n-1$		

在以上计算中，关键是计算各个偏差平方和，通过代数运算有：

$$SS_T=\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{m}(y_{ij}-\bar{y})^2=\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{m}y_{ij}^2-\frac{T^2}{n},\ df_T=rm-1$$

$$SS_M=\sum_{i=1}^{r}m(\bar{y}_{i\cdot}-\bar{y})^2=\sum_{i=1}^{r}\frac{T_i^2}{m}-\frac{T^2}{n},\ df_M=r-1$$

$$SS_e=SS_T-SS_M,\ df_e=rm-r$$

式中，T_i是第 i 个水平数据的和；T 为 $n=rm$ 个数据的总和。

（5）MINITAB 软件的运算。如果采用 MINITAB 软件运算，从方差分析→单因子的路径进入，可得计算出的各项离差平方和并给出 ANOVA 表。在 ANOVA 表中若 P 值小于 α，则拒绝 H_0。

（6）方差分析的具体步骤。综上所述，进行方差分析的步骤如下：

1）计算因子 A 的每一水平下数据的和 T_1，T_2，…，T_r 及总和 T。

2）计算各类数据的平方和 $\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{m}y_{ij}^2$，$\sum_{i=1}^{r}T_i^2$ 和总和的平方 T^2。

3）依次计算 SS_T，SS_M，SS_e。

4）填写方差分析表。

5）对于给定的显著性水平 α，将求得的 F 值与 F 分布表中的临界值 $F_{1-\alpha}(df_M, df_e)$比较，当 $F>F_{1-\alpha}(df_M, df_e)$ 时认为因子 A 是显著的，否则认为因子 A 是不显著的。

使用 MINITAB 软件分析数据会节省大量的运算时间，提高效率。

对表 5—4 的数据进行方差分析，下框是利用 MINITAB 软件运算的结果。

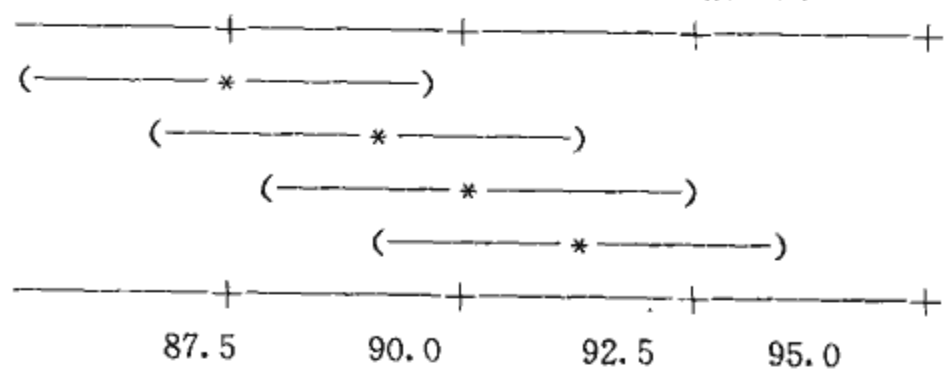
单因子方差分析：C1，C2，C3，C4

来源	自由度	SS	MS	F	P
因子	3	63.29	21.10	3.46	0.041
误差	16	97.50	6.09		
合计	19	160.79			

S=2.469 R-Sq=39.36% R-Sq（调整）=27.99%

水平	N	平均值	标准差
C1	5	87.520	2.690
C2	5	89.160	2.984
C3	5	90.840	2.134
C4	5	92.260	1.919

平均值（基于合并标准差）的单组 95%置信区间



P 值为 0.041，即 $P=0.041<0.05$，所以在 $\alpha=0.05$ 水平上的结论是因子 A 是显著的。

也可以用前述公式手工计算。

（1）计算各类和。每一水平下的数据和分别为：$T_1=437.6$，$T_2=445.8$，$T_3=454.2$，$T_4=461.3$，总和 $T=1\,798.9$。

（2）计算各类平方和。原始数据的平方和为：

$$\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{5}y_{ij}^2=161\,962.85$$

每一水平下数据和的平方和为：

$$\sum_{i=1}^{4}T_i^2=809\,326.73$$

（3）计算各偏差平方和。

$SS_T=160.79$，　$df_T=4\times5-1=19$

$SS_M=63.29$，　$df_M=4-1=3$

$SS_e=160.79-63.29=97.50$，　$df_e=19-3=16$

（4）填写方差分析表（见表 5—8）。

表 5—8　　例 5—9 的方差分析表

来源	偏差平方和	自由度	均方和	F 比
因子 A	$SS_M=63.29$	$df_M=3$	$MS_M=21.10$	$F=3.46$
误差 e	$SS_e=97.50$	$df_e=16$	$MS_e=6.09$	
总计 T	$SS_T=160.79$	$df_T=19$		

（5）如果给定 $\alpha=0.05$，从 F 分布表查得 $F_{0.95}(3,16)=3.24$，由于 $F>3.24$，因此在 $\alpha=0.05$ 水平上的结论是：因子 A 是显著的。

1）因为因子 A 显著，表明不同生产线生产的垫片的平均断裂强度有明显的差异。

2）当因子 A 显著时，还可以给出每一水平下指标均值的估计，以便找出最佳的水平。在单因子试验的场合，第 i 个水平指标均值的估计为：

$$\hat{\mu}_i=\bar{y}_i,\quad i=1,2,\cdots,r$$

在本例中，四条生产线生产的零件的平均强度的估计分别为：

$$\hat{\mu}_1=87.520,\ \hat{\mu}_2=89.160,\ \hat{\mu}_3=90.840,\ \hat{\mu}_4=92.260$$

各水平下的均值可以用图形表示（见图 5—15）。

由此可见，4 号生产线的垫片的断裂强度均值最大，如果需要平均断裂强度大的垫片，那么 4 号生产线的为好。而从过程来讲，1 号与 2 号生产线应该设法改进。

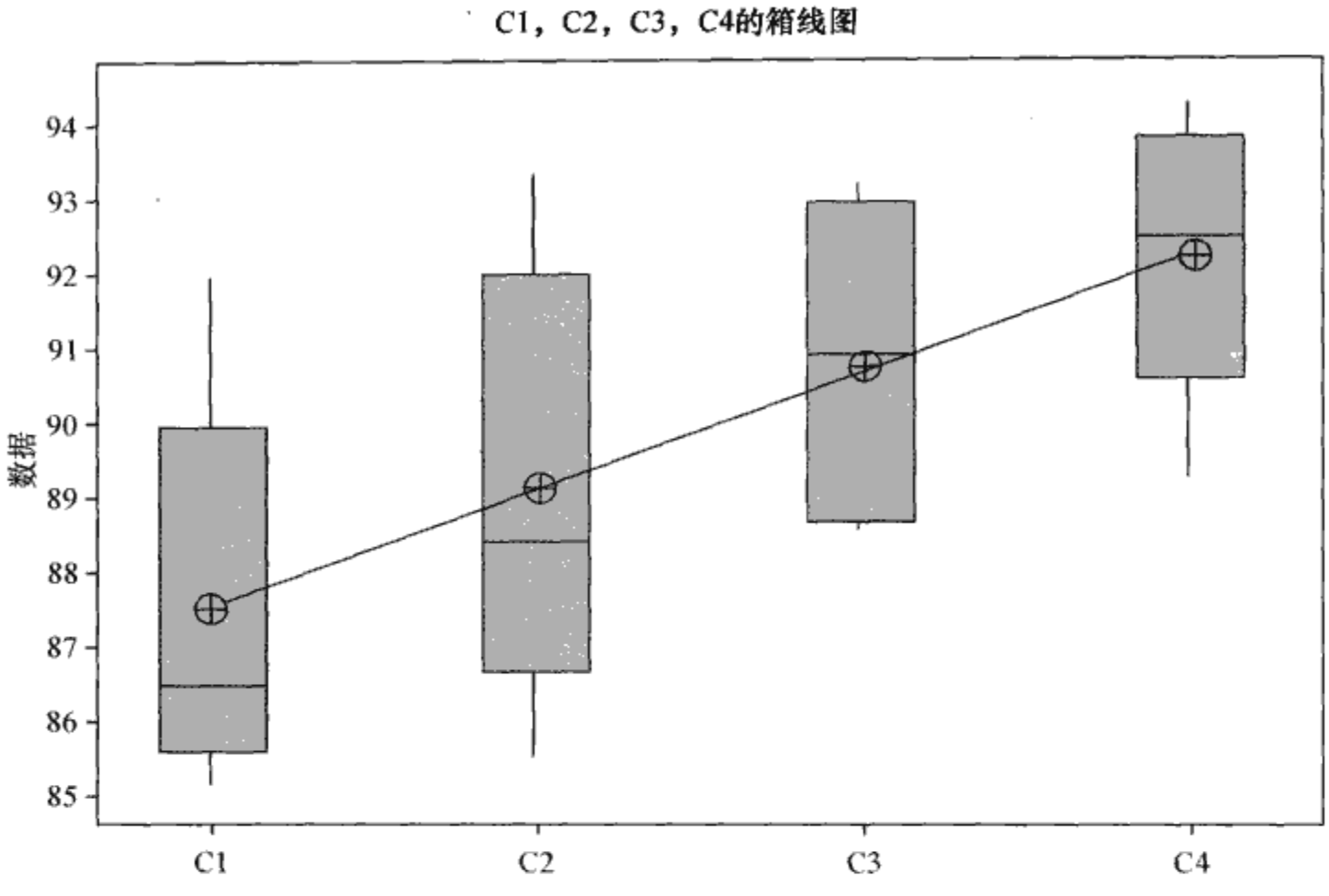


图 5—15 例 5—9 的各水平的箱线图

3）前面提到，即使是同一条生产线（过程），生产的产品特性也是有波动的，若波动用方差度量，则通过数据分析还可以给出误差方差的估计，方差 σ^2 的估计值是 MS_e，在本例中 σ^2 的估计值是 6.09，σ 的估计值是 $\sqrt{6.09}=2.469$。

4. 重复数不同的单因子方差分析

若在每一水平下重复试验次数不同，假定在 A_i 水平下进行了 $m_i(i=1, 2, \cdots, r)$ 次试验。那么进行方差分析的步骤同上，只是在计算中有两个改动：一是此时 $n=\sum m_i$；二是 SS_M 的计算公式改为 $SS_M=\sum_{i=1}^{r}\frac{T_i^2}{m_i}-\frac{T^2}{n}$。

如果采用 MINITAB 软件运算，仍可从方差分析→单因子路径进入，判断法则仍为：若 P 值小于 α，则拒绝 H_0。

例 5—10 某团队项目是在仪器制造中降低材料消耗，用各种结构的仪器分别测定其材料消耗量，数据如表 5—9 所示，确定仪器的结构（记为因子 A）对材料消耗量的影响是否显著（这里假定每一种结构下的材料消耗量服从等方差的正态分布）。

表 5—9 不同结构的仪器的耗材量

水平	材料消耗量							
结构 A_1	61.0	62.8	57.6	58.3	54.7	55.5	59.3	60.3
结构 A_2	52.8	54.5	48.5	50.2				
结构 A_3	54.3	56.1	51.4	53.6				

现在对这批数据作方差分析，结果如下：

单因子方差分析：材料消耗量与结构

来源	自由度	SS	MS	F	P
结构	2	155.65	77.82	11.86	0.001
误差	13	85.34	6.56		
合计	15	240.98			

S=2.562　R-Sq=64.59%　R-Sq（调整）=59.14%

水平	N	平均值	标准差
A1	8	58.688	2.742
A2	4	51.500	2.670
A3	4	53.850	1.943

平均值（基于合并标准差）的单组 95%置信区间

```
      ---------+---------+---------+---------+-
                                    (---------*---------)
(---------*---------)
                  (---------*---------)
      ---------+---------+---------+---------+-
            51.0      54.0      57.0      60.0
```

合并标准差=2.562

由于 $P=0.001<0.05$，故拒绝原假设，或者从 F 分布表查得 $F_{0.95}(2, 13)=3.81$，由于求得的 F 为 $11.86>3.81$ 也同样拒绝原假设。因此在 $\alpha=0.05$ 水平上，因子 A 是显著的。材料消耗量的箱线图如图 5—16 所示。

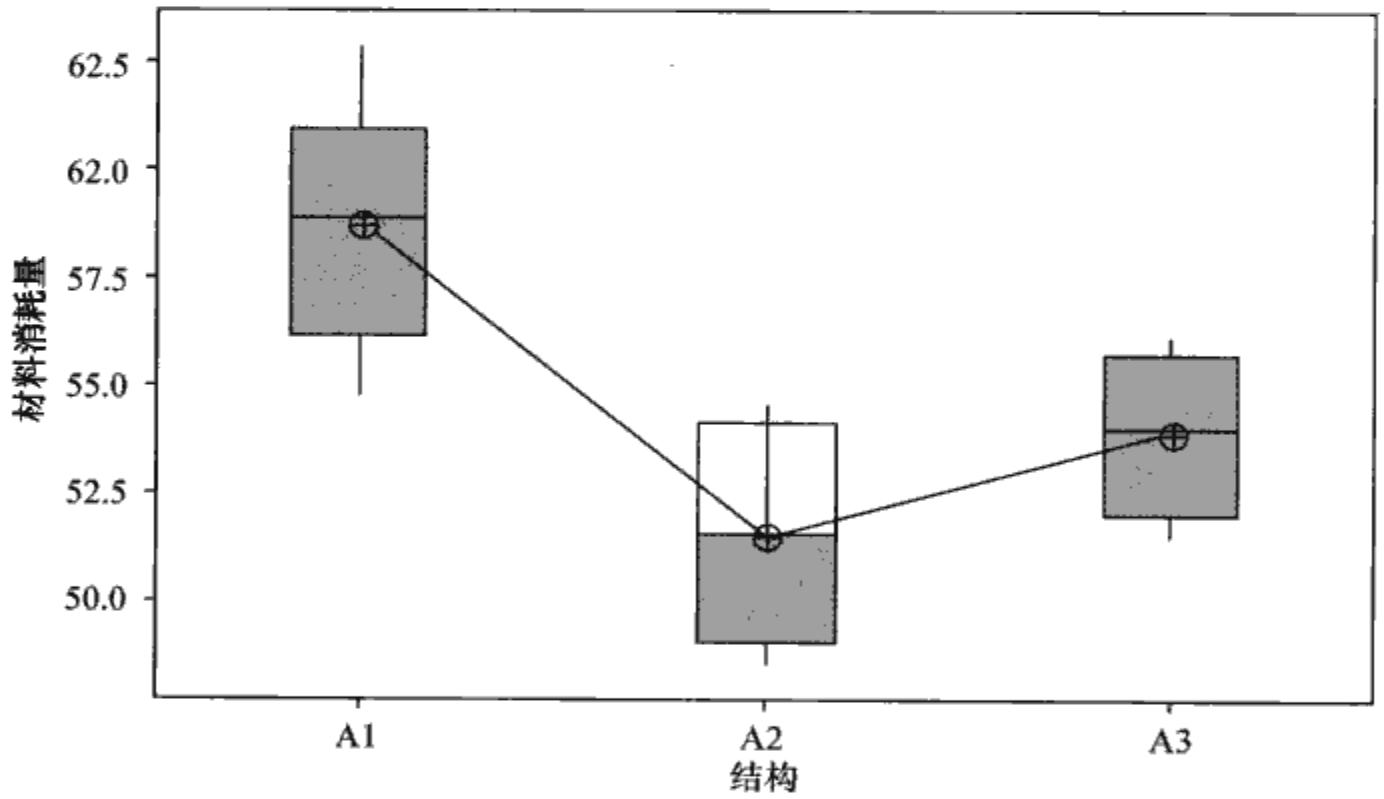


图 5—16　材料消耗量的箱线图

结论：

（1）由于因子 A 显著，表明不同结构生产仪器的材料消耗量有明显的差异。

（2）还可以给出不同结构生产仪器的材料消耗量的估计值：

$\hat{\mu}_1=58.69$，$\hat{\mu}_2=51.50$，$\hat{\mu}_3=53.85$

由此可见，从特性指标的角度看，结构 A_2 最理想，结构 A_3 次之，结构 A_1 最差。

(3) 在本例中误差方差的估计值为 $\hat{\sigma}^2=6.56$，标准差的估计值为 $\hat{\sigma}=2.562$。

5.4 列联表

本章前几节已介绍过了适用于连续型变量的统计分析方法，这些方法对于属性数据就不适用了。我们收集到的只是按各种方法分类的计数数据（即频数），要分析的问题是判断两种分类方式是否具有独立性。例如，研究肺癌与吸烟之间有无关联，工艺改革与合格品率有无关联，事故与工龄有无关联等。列联表（contingency tables）就是用来分析两种方式（即两个因子）分组的数据是否独立的常用方法。

5.4.1 独立性检验概念

先看一个例子，再引出一般的列联表独立性检验概念。

例 5—11 为分析吸烟是否与咳嗽有关，调查了 2 000 人，在 1 200 名不吸烟者中，有 1 100 人不咳嗽，有 100 人咳嗽；在 800 名吸烟者中，有 700 人不咳嗽，100 人咳嗽。将这些数据列成如表 5—10 所示的表格。这张表就称为列联表，因子 A 表示吸烟状况，因子 B 表示咳嗽状况。

表 5—10 **吸烟与咳嗽 2×2 列联表** 单位：人

吸烟情况	B_1：不咳嗽	B_2：咳嗽	行和
A_1：不吸烟	1 100	100	1 200
A_2：吸烟	700	100	800
列和	1 800	200	2 000

1. 列联表

一般地，假设对两个因子的状况进行了分类，其中因子 A 的取值有 r 类：A_1，A_2，…，A_r，因子 B 的取值有 c 类：B_1，B_2，…，B_c，从该总体中获得容量为 n 的样本，按两个变量分类的状况统计各自的频数，将这些频数值排列成一张 r 行 c 列的表（见表 5—11），这就是一张二维 $r\times c$ 列联表。

表 5—11 **$r\times c$ 列联表**

	B_1	B_2	…	B_c	行和
A_1	n_{11}	n_{12}	…	n_{1c}	$n_{1\cdot}$
A_2	n_{21}	n_{22}	…	n_{2c}	$n_{2\cdot}$
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮
A_r	n_{r1}	n_{r2}	…	n_{rc}	$n_{r\cdot}$
列和	$n_{\cdot 1}$	$n_{\cdot 2}$	…	$n_{\cdot c}$	总和 n

表 5—11 中 n_{ij} 是因子 A 取 A_i 且因子 B 取 B_j 的样品数。行和与列和分别为：

$$n_{i\cdot} = \sum_{j=1}^{c} n_{ij}, \quad i = 1,2,\cdots,r$$

$$n_{\cdot j} = \sum_{i=1}^{r} n_{ij}, \quad j = 1,2,\cdots,c$$

式中，行和 $n_{i\cdot}$ 表示样本中 A 取 A_i 的样品数，列和 $n_{\cdot j}$ 表示样本中 B 取 B_j 的样品数。

2. 独立性假设

列联表要研究的问题是这两个因子之间是否有关联，这种关联性的研究在统计上可以描述为如下的假设检验问题：

H_0：因子 A 与因子 B 独立，H_1：因子 A 与因子 B 不独立

5.4.2 列联表的独立性检验方法

在例 5—11 中，不吸烟的比例（不管是否咳嗽）为 1 200/2 000＝0.6，不咳嗽的比例（不管是否吸烟）为 1 800/2 000＝0.9。因此，如果吸烟与咳嗽无关，则不吸烟且不咳嗽的人占总人数的比例应该 0.6×0.9＝0.54，相当于应该有 2 000×0.54＝1 080 人不吸烟且不咳嗽。但实际上不吸烟且不咳嗽的人有 1 100 人，这中间有 20 人的差距。当这个差距不大时，可以认为这是观测误差，仍可以认为吸烟与咳嗽无关；但当这个差距太大时，就不能认为吸烟与咳嗽无关了。

如果采用 MINITAB 软件运算，对于已整理好的数据表，路径为：统计→表格→卡方检验，将列联表中的各列作为响应变量输入，则可直接得到计算结果。若有 P 值小于 α，则拒绝 H_0。

数据如表 5—12 所示。

表 5—12　　咳嗽与吸烟情况　　单位：人

吸烟情况	不咳嗽	咳嗽
不吸烟	1 100	100
吸烟	700	100

例 5—11 的计算结果如下：

卡方检验：不咳嗽，咳嗽
在观测计数下方给出的是期望计数
在期望计数下方给出的是卡方贡献

	不咳嗽	咳嗽	合计
1	1 100	100	1 200
	1 080.00	120.00	
	0.370	3.333	

2	700	100	800
	720.00	80.00	
	0.556	5.000	
合计	1 800	200	2 000

卡方=9.259，DF=1，P值=0.002

由于 P 值只有 0.002，因此拒绝原假设，即应认为吸烟与咳嗽有关，或说吸烟与不吸烟的咳嗽率是有显著差别的。本例中，总卡方统计量是 9.259，其中右下角的贡献 5.000 为最大，它的含义是，若吸烟与咳嗽无关的话，在吸烟又咳嗽的这类人数应该为 80 人，而实际上，这类人达到 100 人，它远远高于应该有的人数，说明吸烟的人患咳嗽的人数太多了，或说吸烟的人患咳嗽的比率确实较高。

下面举例来说明列联表在多个总体比例比较中的应用。

例 5—12 国家有关部门规定，对于工商企业申请营业执照要在 10 个工作日内办理完毕。统计了 A，B，C三个城市实际办理营业执照的及时与不及时状况，得到如表 5—13 所示的结果。问：三个城市办理营业执照的及时率有显著差异吗?

表 5—13　　营业执照办理情况数据表

城市	及时户数	不及时户数
城市 A	205	103
城市 B	312	113
城市 C	150	90

用 MINITAB 计算，可得下列结果：

卡方检验：及时户数，不及时户数

在观测计数下方给出的是期望计数

在期望计数下方给出的是卡方贡献

	及时户数	不及时户数	合计
1	205	103	308
	211.14	96.86	
	0.178	0.389	
2	312	113	425
	291.34	133.66	
	1.465	3.193	
3	150	90	240
	164.52	75.48	
	1.282	2.794	
合计	667	306	973

卡方=9.301，DF=2，P值=0.010

从上述结果中，可以看出应拒绝原假设的结论，即三个城市办理营业执照的及时率方面有显著差异。另外，还可以再进行更具体的分析：在总计卡方统计量9.301中，贡献最大的是城市B的“不及时户数”格中的3.193，如果三个城市在办理营业执照的及时率方面无显著差异，则城市B不及时的应有133.66户，但实际上只有113户，说明城市B办事效率高，不及时的少于预期；贡献次大的是城市C的“不及时户数”格中的2.794，如果三个城市办理营业执照的及时率方面无显著差异，则城市C不及时的应有75.48户，但实际上却高达90户，说明城市C办事效率太低，不及时的多于预期。城市A的贡献几乎为0，说明城市A办事效率居于中等，与三城市的平均水平没什么差距。

例5—13 对某计算机软件的质量情况进行用户调查，请用户对产品的质量情况选择回答：差、一般、好。随机抽取70人，对他们进行询问，并发现其中40人接受过有关的广告宣传，另外30人则不太关心这类广告，回答的结果列在表5—14中。试问广告与人们对产品的评价间有无联系？（$\alpha=0.05$）

表5—14 **软件质量调查结果数据表** 单位：人

观测频数 / 质量情况 / 广告情况	差	一般	好	合计
听过广告宣传	11	18	11	40
未听过广告宣传	10	13	7	30
合计	21	31	18	70

用MINITAB计算，可得下列结果：

卡方检验：差，一般，好
在观测计数下方给出的是期望计数
在期望计数下方给出的是卡方贡献

	差	一般	好	合计
1	11	18	11	40
	12.00	17.71	10.29	
	0.083	0.005	0.050	
2	10	13	7	30
	9.00	13.29	7.71	
	0.111	0.006	0.066	
合计	21	31	18	70

卡方=0.321，DF=2，P值=0.852

要注意的是当每个单元的期望频数过小（一般小于5）时，通常需要将相邻的组进行合并后再进行独立性检验。

例5—14 某厂有三条流水线，统计每条流水线上每天生产的不合格品数，经过整理，得到如列联表5—15所示的每条流水线在300个工作日中，每天生产的不合格品数为0、1、2等的天数。试问在显著性水平0.05上不合格品数与流水线是否有关？

表 5—15 **流水线不合格品数列联表** 单位：个

流水线	不合格品数					合计
	0	1	2～3	4～5	≥6	
甲	230	52	12	4	2	300
乙	236	40	14	9	1	300
丙	197	67	22	11	3	300
合计	663	159	48	24	6	900

由于不合格品数≥6 这一列的期望频数仅为 2，小于 5，因此将该列与前一列合并，列联表修改为表 5—16。

表 5—16 **流水线不合格品数列联表（合并后）** 单位：个

流水线	不合格品数				合计
	0	1	2～3	≥4	
甲	230	52	12	6	300
乙	236	40	14	10	300
丙	197	67	22	14	300
合计	663	159	48	30	900

同样，通过 MINITAB 计算得到的结果，P 值为 0.007，故应拒绝原假设，即认为不合格品数与流水线有关。

卡方检验：0，1，2～3，≥4
在观测计数下方给出的是期望计数
在期望计数下方给出的是卡方贡献

	0	1	2～3	≥4	合计
1	230	52	12	6	300
	221.00	53.00	16.00	10.00	
	0.367	0.019	1.000	1.600	
2	236	40	14	10	300
	221.00	53.00	16.00	10.00	
	1.018	3.189	0.250	0.000	
3	197	67	22	14	300
	221.00	53.00	16.00	10.00	
	2.606	3.698	2.250	1.600	
合计	663	159	48	30	900

卡方＝17.597，DF＝6，P 值＝0.007

列联表的用途很广泛，常用于进行对离散记录的分析，从中可以得到很多有意义的信息。

5.5 多变异分析

让我们考虑一下某工序加工某种轴时其直径波动过大的问题。

例 5—15 用某工序加工某种轴，设计如下抽样计划，在 8:00AM，10:00AM 和 12:00AM 分别连续抽取 5 根轴，每根轴测其两端和中间的直径，得 3 个观测值，共 45 个数据，如表 5—17 所示。比较轴直径之间的差异，思考差异产生的原因有哪些。

表 5—17 **某种轴的直径观测值** 单位：0.1mm

序号	8:00AM			10:00AM			12:00AM		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	7.3	7.4	7.2	7.6	6.7	6.8	7.2	6.7	7.0
2	7.2	7.8	7.7	7.8	7.0	7.0	7.0	7.2	6.8
3	7.4	7.6	8.2	7.2	7.2	7.4	6.8	6.8	6.8
4	7.4	7.4	8.0	8.0	7.4	7.6	6.6	7.4	7.0
5	7.6	7.5	8.2	8.2	6.8	7.0	7.4	7.6	7.2

从表面上看，测量时间不同可能产生差异，每根轴之间有差异，同一根轴测量位置不同也会导致直径间的差异，测量系统会带来差异，等等。

影响过程波动的因素很多，或者说流程输出产生变异有很多来源，称为变异源。在研究中，影响流程输出的因素（或因子）可分为两大类：可控因子和不可控因子（噪声因子）。弄清楚变异的组成，且定量地给出每部分所产生的变异占总变异（用方差分析法计算）的比例（贡献率），这就是多变异分析（也称“变异源分析”（SOV））的目的。

多变异分析属于不改变目前流程情况下的研究工作，是在正式解决问题之前的准备工作，即首先要搞清楚变异究竟是怎样产生的。多变异分析帮助我们找到与潜在自变量有关的响应变量的变异模式。多变异分析用于发现流程中变异的组成并对其进行量化，比如：班次内，班次间，班对班；批次内，批次间，批对批；机器对机器；操作员内，操作员间。使用多变异分析还可以揭示来自供应商的主要变异来源：供应商内，供应商间。

分析多变异问题常用的图形工具是多变异图（multi-vari chart）。精确的数值分析还需要采用复杂的方差分析方法。但实际上，由于因子的性质可能不同，各因子间的结构关系（交叉还是嵌套）不明，因此必须先弄清楚其结构。

多变异分析将工序质量特征值的变异分为三类：产品内变异（within piece variations，positional variation）、产品间变异（piece to piece variation）和时间变异（time to time variation）。

（1）产品内变异。生产出的单位产品，其质量特征值在不同位置上所存在的变异。如加工一根轴，在测量其直径时，分别测其两端和三个中心点，其直径会有差异，这一变异称产品内变异或组内变异。

（2）产品间变异。如果我们对每根轴都测量三个点（中间和两端），取其均值作为这根轴的直径，则从工序上连续抽取两根轴，这两根轴的平均直径也会有差别，这种变异称为产品间变异或组间变异。常见的组间变异如：人员之间的差异、部件之间的差异、原料批次之间的差异、供应商之间的差异、设备之间的差异、方法之间的差异、环境条件之间的差异等。

(3) 时间变异。从不同的时间点抽取样本，如分别在 8:00AM，10:00AM 和 12:00AM抽取若干样本，观察其在不同时间的变异，这种变异称为时间变异。常见的时间变异如每周之间的差异、每周五个工作日之间的差异、早中晚三班之间的差异、每个小时之间的差异等。

通过对三种变异的分析，可以发现哪种变异是显著的变异，从而为分析和控制变异指明方向。

确定因子之间的关系，通常是通过构建树状图来展示，比如对于例 5—15 来说，因子间为嵌套关系，图 5—17 为轴直径（两因子）树状图：

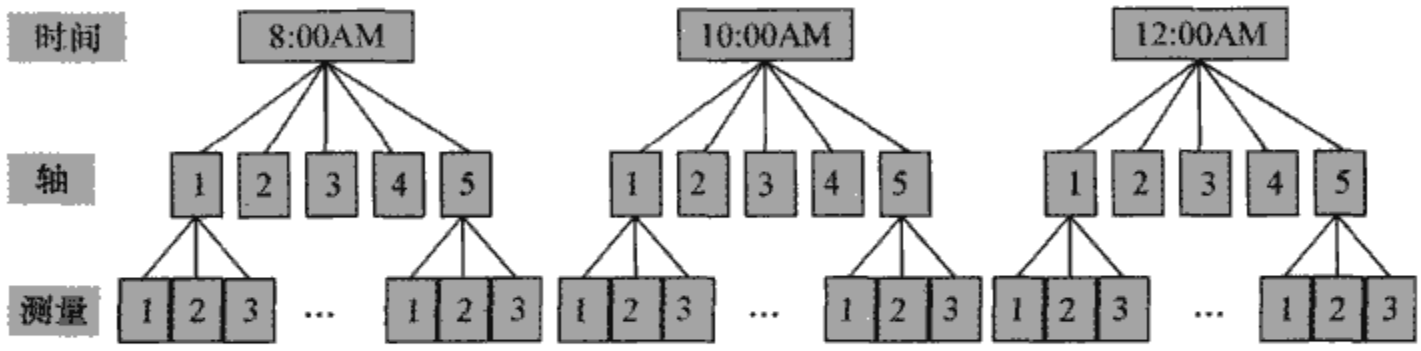


图 5—17 轴直径树状图

多变异分析数据收集计划的重要依据是树状图。在可能的情况下应保证足够的样本量，如果不能满足如下最低条件则不能进行分析：

1) 因子个数 ≥ 2；

2) 每个因子的水平数 ≥ 2；

3) 测量次数 ≥ 2。

根据树状图显示的因子间的结构关系设计数据收集矩阵。

现在继续分析例 5—15 中轴直径间的变异产生的原因。

确定响应量为轴直径（连续型），待考察因子为“时间”和“轴”两个。问题是：在轴直径的变异中，在“时间”和“轴”这两个因子和随机误差之间，究竟哪项最大，它们各占多少比例?

使用 MINITAB 构建多变异图的路径是：统计→质量工具→多变异图（见图 5—18）。

多变异图中显示的点、线等与选项设置有关。在如图 5—19 所示的多变异分析图中，横轴指的是 8:00AM，10:00AM，12:00AM 三个时间点，5 根轴分别用 1，2，3，4，5 表示，纵轴方向的点表示在每个时间点测量每根轴的左、中、右位置的最小值和最大值的范围，折线连接的点是每根轴在每个时间点测量三个位置的均值。

从图 5—19 中可以看出：不同时间点轴直径之间差别很大，即时间因子影响很显著，轴直径在产品内和产品间也有差别，不过相对时间造成的轴直径间差别较小。

结论：轴直径间的差异主要是由时间造成的差别。从图 5—19 也能明显地看出随着时间的变化，轴直径呈逐渐减小的趋势。如果要进行过程能力分析或绘制控制图，在设计抽样方案时，应注意缩短时间间隔才能捕获来自时间的变异。

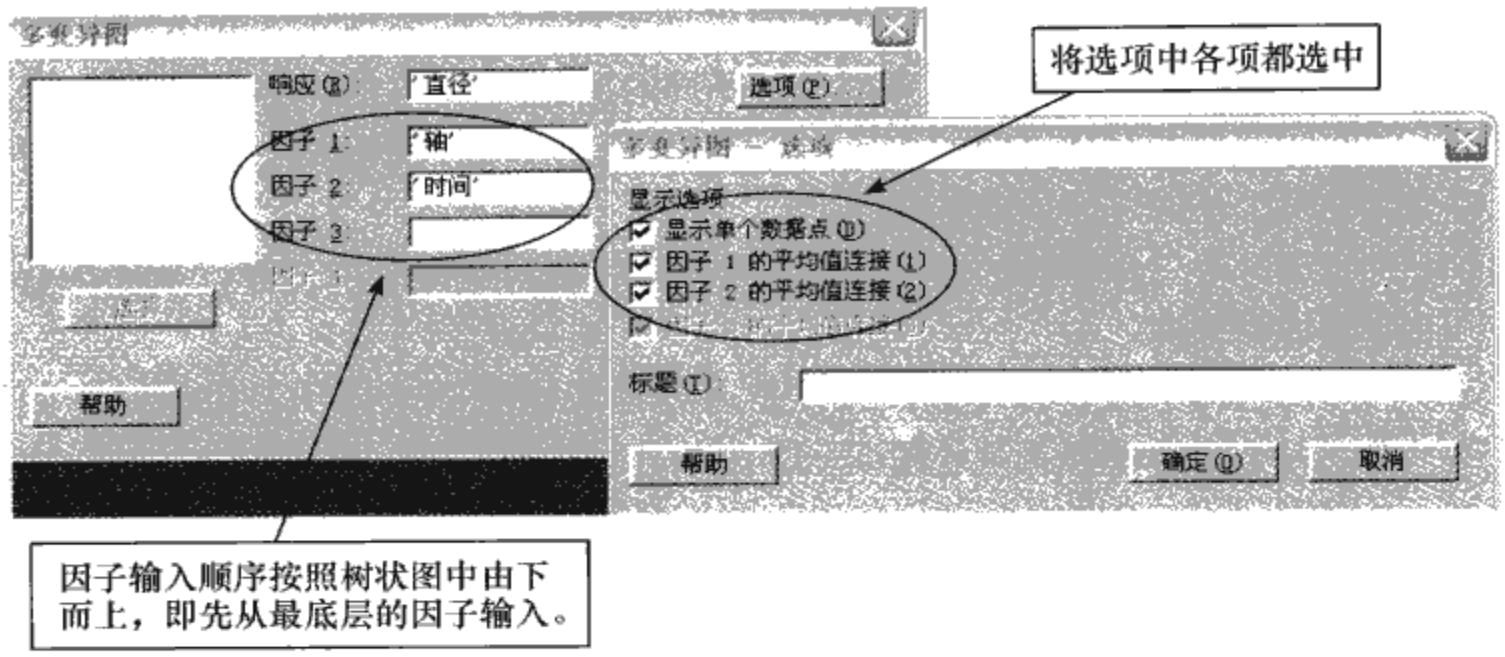


图 5—18　多变异图的计算机输入

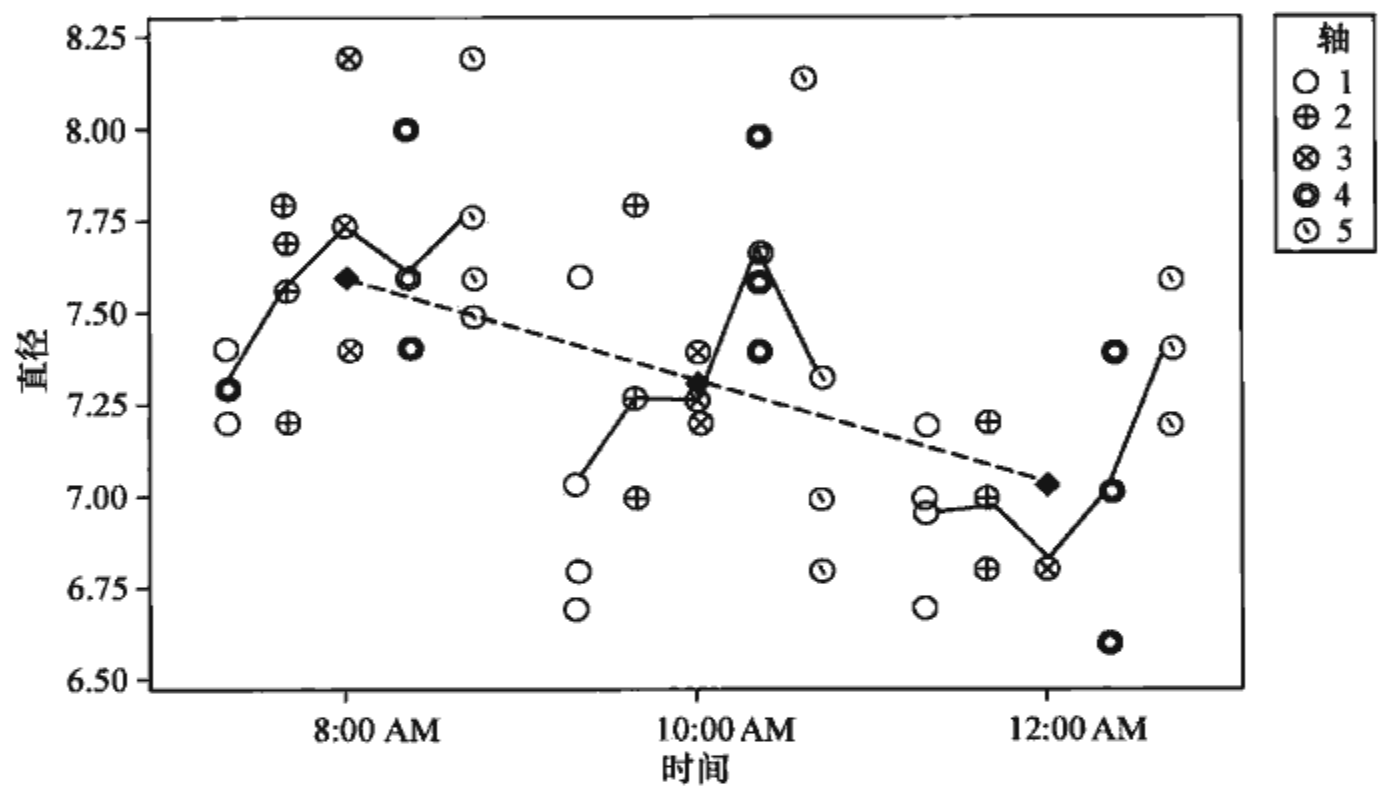


图 5—19　直径对于轴—时间的多变异图

另外，一旦确定了主要变异来源，也就为进一步寻找影响变异的原因指明了方向。对于更复杂的不易确定变差成因主次的情况，不一定全部都能从图形上看出明确结论，这时必须使用更精确的方差分析方法，进一步定量分析每种变异的大小，鉴于篇幅所限，本书不作详细讨论。

5.6　相关分析与回归分析

在六西格玛管理的分析阶段，分析问题出现的原因是至关重要的。这时，统计学中的相关分析及回归分析是很有力的工具。

如果同时获得了两个或多个连续型变量的观测值，就可以使用相关分析或回归分析了。例如，在一定的范围内，反应罐中的温度与最终的产量之间就呈现出某种

关系。分析并确认二者是否有关就是相关分析的任务；把二者的关系用方程的形式表达出来，则是回归分析的任务。回归分析的任务可能更复杂，影响最终产量的，除了温度，还可能有反应时间、反应罐中的压力等多个因素。回归分析按照涉及的自变量的多少，可分为一元回归分析和多元回归分析；按照自变量和因变量之间的关系类型，可分为线性回归分析和非线性回归分析。如果在回归分析中，只包括一个自变量和一个因变量，且二者的关系可用一条直线近似表示，这种回归分析称为一元线性回归分析。如果回归分析中包括两个或两个以上自变量，且因变量和自变量之间是线性关系，则称为多元线性回归分析。限于篇幅，下面只介绍一元线性回归分析方法。

5.6.1 相关分析

如果拥有 X 与 Y 的成对数据，可以把 X 与 Y 画在散点图上，来分析 X 与 Y 之间是否存在相关关系。X 与 Y 的相关关系可能是密切的，也可能是不密切的。

判断原因 X 和结果 Y 之间的相关程度，通常先从散点图获得一个大概的印象。如果数据如在图 5—20 中展示的那样，就可以看出两个变量间是正相关、负相关还是基本上无关。当然，如果只是获得初步印象，是远远不够的，要定量地对相关关系加以分析。

例 5—16 某团队在分析产品加工温度与产量之间的关系时，收集了如表 5—18 所示的数据。

表 5—18　　温度 X 与产量 Y 的数据

序号	温度 X	产量 Y
1	2	58
2	6	105
3	8	88
4	8	118
5	12	117
6	16	137
7	20	157
8	20	169
9	22	149
10	26	202

可以使用散点图初步分析出过程中的产量与加工温度有关。产量与加工温度的散点图如图 5—20 所示。除了直观上所能看到的存在某种关系之外，我们当然更希望能够量化这种相关性的程度——究竟密切的程度如何？相关分析将给出明确的结果。更进一步，如果在一定的范围内，对某个给定的温度点能够预测出产量，那将是更有实际用途的。解决这个问题的有力工具是回归分析，它能够帮助确定所研究的两个或多个变量间的函数关系。

首先，画出产量与温度的散点图（见图 5—20）。

从图 5—20 中可以明显地看出，随着温度的增长，产量也显著地增长。那么如何度量相关的程度？这就要引入相关系数的概念。

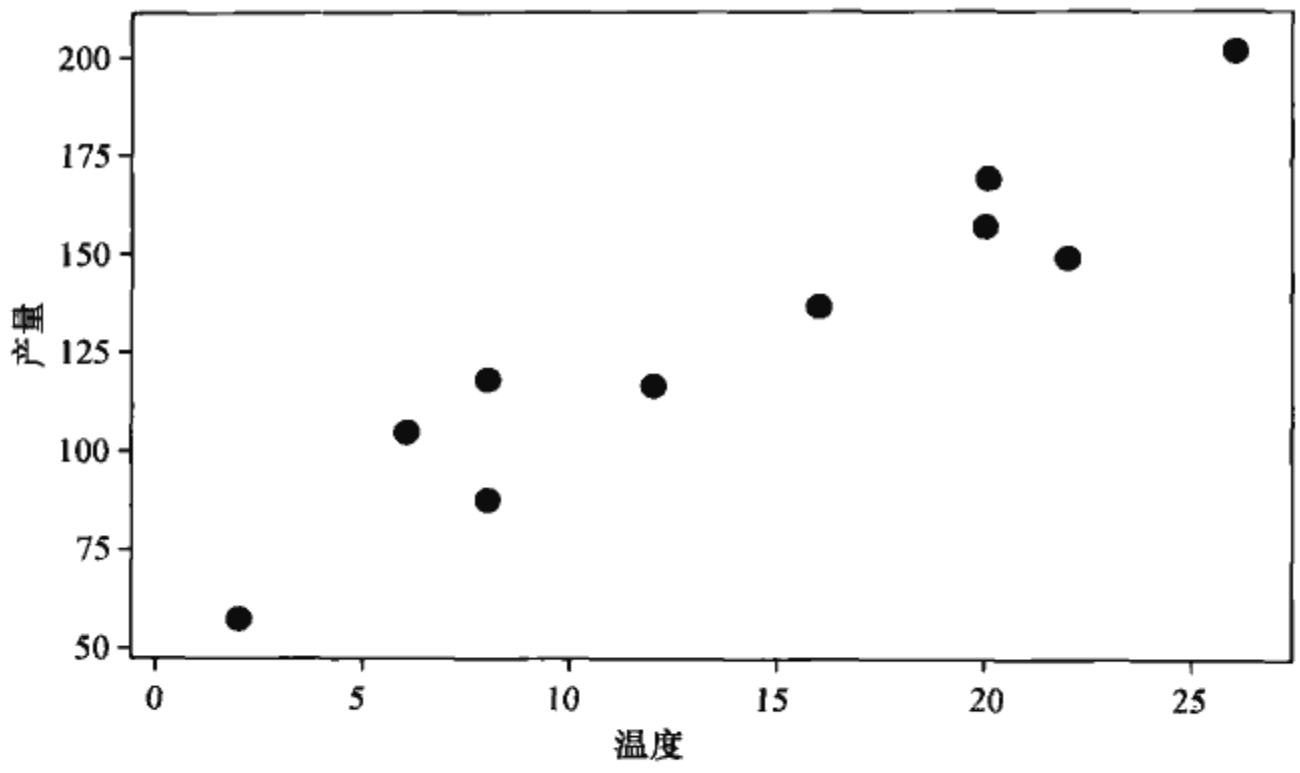


图 5—20　产量与温度的散点图

1. 相关系数的概念

相关系数 r（通常指 Pearson 相关系数）是用来描述两个变量线性相关程度的一种度量。由两个变量的 n 组观测值可以画出多种不同形状的散点图，用相关系数 r 可表示出它们是正相关还是负相关，以及它们以何种程度相关。

当散点图呈现出图 5—20 或图 5—21（a）的形状，即随某一变量值的增加，另一变量值有明显增加的趋势，得到一个正的相关系数，而且两者的关系越接近于一条直线，则此系数越接近于 1；反之，当散点图呈现出如图 5—21（b）所示的形状，相关系数应该为负数。

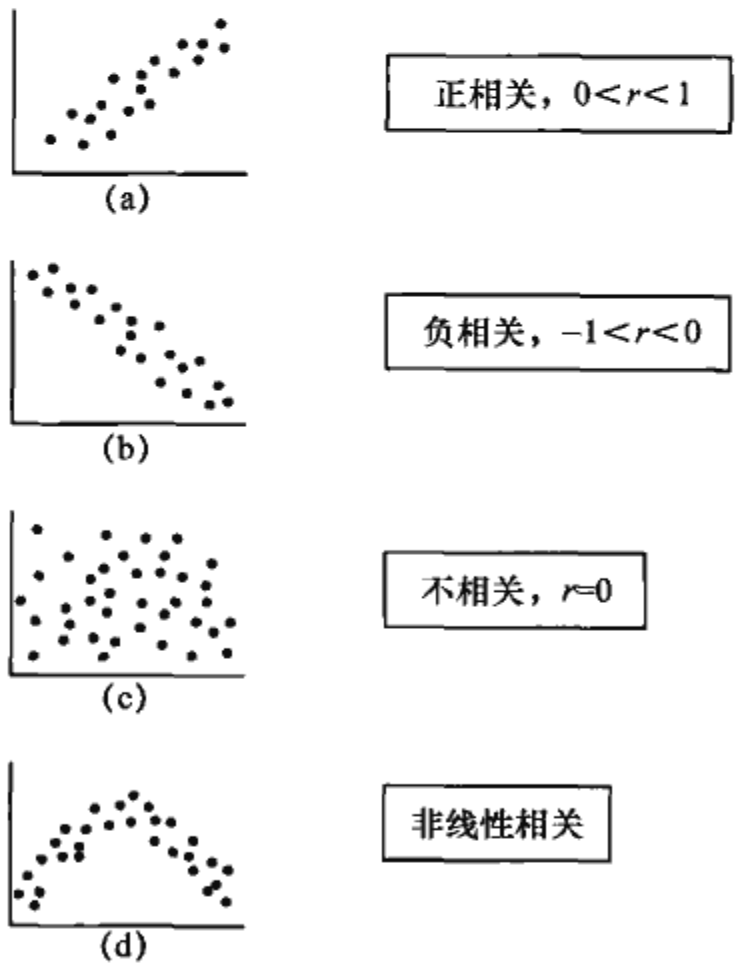


图 5—21　散点图

不必仔细研究如何按公式来具体计算相关系数，但要很清楚地了解相关系数 r 的具体意义。数学上可以证明，一定有关系式：$-1\leqslant r\leqslant 1$ 或 $|r|\leqslant 1$。因此，当 $r=\pm 1$ 时，表明 n 个点全在一条直线上，这时两个变量间完全线性相关；$|r|$ 越接近于 1，表明各个点离直线越近；随着 $|r|$ 的逐渐减小，各个点越远离直线，呈现出越分散的状况。总之，当 $r>0$ 时，称两个变量正相关，这时当某一变量的值增加时，另一变量的值也有增大的趋势（见图 5—21（a）），r 的值越大说明二者关系越密切；当 $r<0$ 时，称两个变量负相关，这时当某一变量的值增加时，另一变量的值有减小的趋势（如图 5—21（b）），r 的绝对值越大说明二者关系越密切。

2. 相关系数的检验

若两个变量无关时，总体的相关系数 ρ 应该为 0，样本的相关系数 $|r|$ 会很小，这时，散点图上的 n 个点会毫无规律地形成“乱作一团”的形状（见图 5—21（c））。但是反之，如果总体的相关系数 ρ 为 0，样本的相关系数 $|r|$ 很小时，不能肯定两个变量无关，因为很可能二者形成某种曲线的关系（如图 5—21（d）所显示的是抛物线型的二次函数关系）。只能肯定地说：如果总体的相关系数 ρ 为 0，样本的相关系数 $|r|$ 很小时，两个变量无线性相关关系。

问题是样本相关系数大到什么程度可以认为两个变量间确实存在相关关系呢？必须指出，判断样本相关系数是否足够大的标准与样本量有非常密切的关系，不可能有一个统一的标准。一般说来，样本量超过 9 时，只要相关系数绝对值达到 0.7，就应当认定两变量间是确实相关的；当样本量超过 25 时，只要相关系数绝对值达到 0.4，就应当认定两变量间是确实相关的。下面介绍计算机检验的方法。

用 MINITAB 软件计算，路径为：统计→基本统计量→相关，可以直接得到如下结果：

相关：产量 Y，温度 X
产量 Y 和 温度 X 的 Pearson 相关系数=0.950
P 值=0.000

所以，X 与 Y 间高度正相关。

当此检验得到的 P 值小于 0.05，则认为 X 与 Y 是线性相关的。

5.6.2 一元线性回归模型

假定有两个变量，x 是自变量，y 是因变量。

假设（x，y）的散点图显示有线性关系，则可以认为观测值 y 由两部分叠加而成：一是 y 的平均值随 x 的变化而呈线性变化的趋势，用 b_0+b_1x 表示；二是其他随机因素影响到 y 值本身会偏离平均值，其误差用 ε 表示，常设 $\varepsilon\sim N(0,\ \sigma^2)$，故有如下的数据结构式：

$$y_i=b_0+b_1x_i+\varepsilon_i,\quad i=1,2,\cdots,n$$

回归系数 b_0，b_1 可以用最小二乘法计算得到。

1. 回归系数的最小二乘估计

按最小二乘法来估计，先定义：

$$Q(b_0,b_1)=\sum_{i=1}^{n}(y_i-b_0-b_1x_i)^2$$

若 $\hat{b}_0$和 $\hat{b}_1$满足如下等式：

$$Q(\hat{b}_0,\hat{b}_1)=\min_{b_0,b_1}Q(b_0,b_1)$$

即估量值 $\hat{b}_0$，$\hat{b}_1$可使 $Q(b_0,b_1)$ 达到极小，则称 $\hat{b}_0$，$\hat{b}_1$为 b_0，b_1 的最小二乘估计。

用求导数的方法得

$$\begin{cases}\dfrac{\partial Q}{\partial b_0}=-2\sum_{i=1}^{n}(y_i-b_0-b_1x_i)=0\\[2ex]\dfrac{\partial Q}{\partial b_1}=-2\sum_{i=1}^{n}(y_i-b_0-b_1x_i)x_i=0\end{cases}$$

解之，得

$$\begin{cases}\hat{b}_1=\dfrac{L_{xy}}{L_{xx}}\\[2ex]\hat{b}_0=\bar{y}-\hat{b}_1\bar{x}\end{cases}$$

式中，$L_{xx}=\sum x_i^2-n\bar{x}^2$，$L_{xy}=\sum x_iy_i-n\bar{x}\bar{y}$。

可以验证 $\hat{b}_0$，$\hat{b}_1$确实可使 $Q(b_0,b_1)$ 达到最小，故 $\hat{b}_0$，$\hat{b}_1$为回归系数的最小二乘估计法计算结果。

2. 手工计算的步骤

(1) 求出 $\sum x_i$，$\sum y_i$ 和 $\bar{x}$，$\bar{y}$。

(2) 求 $\sum x_i^2$，$\sum x_iy_i$。

(3) 计算 L_{xx}，L_{xy}。

(4) 代入公式即可求出 b_0，b_1 的最小二乘估计。

对例 5—16 进行 $\hat{b}_0$，$\hat{b}_1$的计算，利用 MINITAB 软件，路径为：统计→回归→拟合线图，可以直接得到回归系数的计算结果：$\hat{b}_0=60$，$\hat{b}_1=5$。

回归直线方程为：$Y=60+5X$，其中 R-Sq=90.3%=r^2。

回归分析：产量 Y 与 温度 X

回归方程为

产量 Y=60.0+5.00 温度 X

自变量	系数	系数标准误	T	P
常量	60.000	9.226	6.50	0.000
温度 X	5.000	0.580 3	8.62	0.000

S=13.829 3　R-Sq=90.3%　R-Sq（调整）=89.1%

方差分析

来源	自由度	SS	MS	F	P
回归	1	14 200	14 200	74.25	0.000
残差误差	8	1 530	191		
合计	9	1 573			

统计→回归→拟合线图窗口路径只对求一个自变量的回归方程有效，但它的优点是可以显示出回归直线的图形（见图 5—22）。

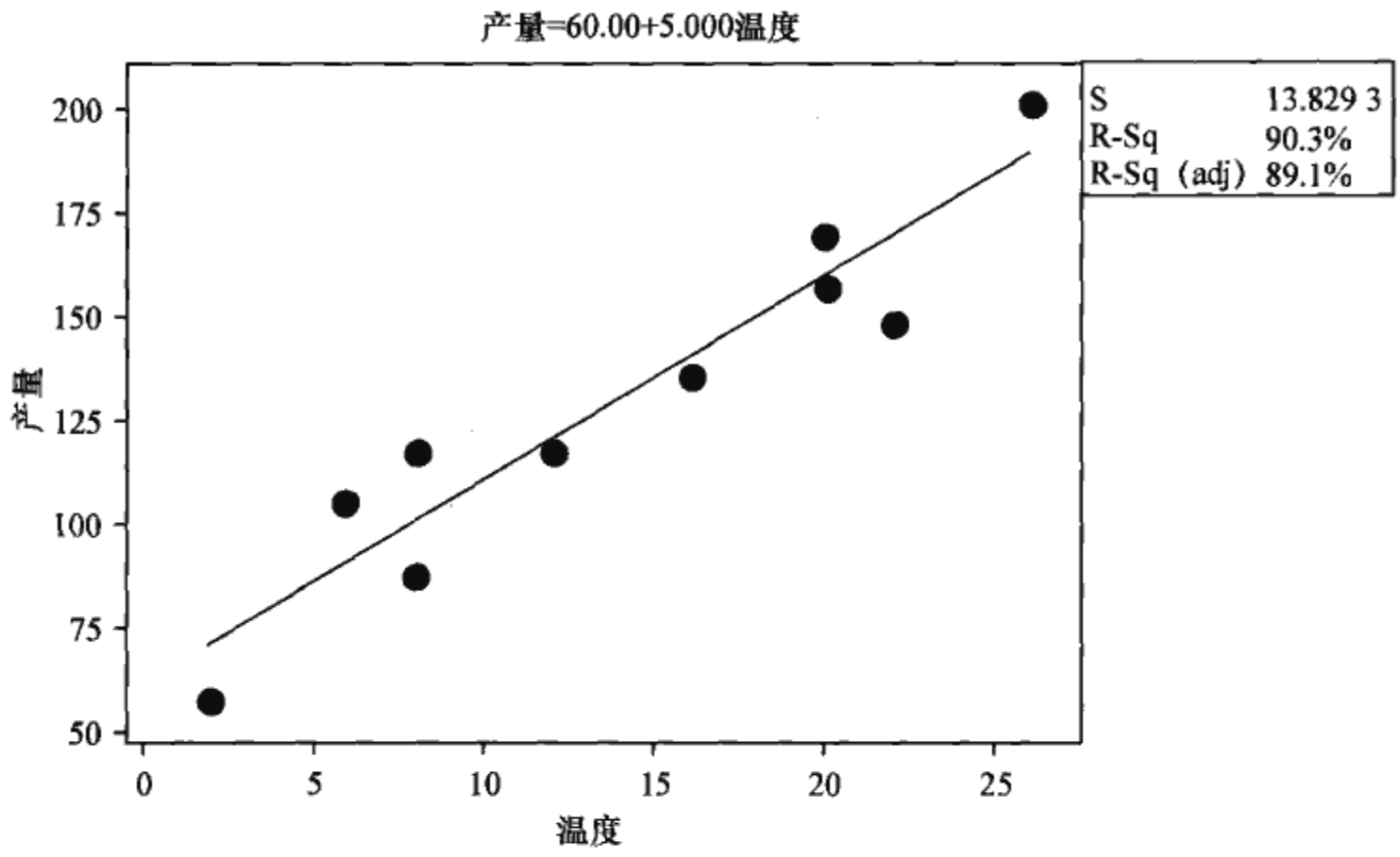


图 5—22 最小二乘拟合的回归直线图

这里特别要说明，回归系数 b_1 是有明确的物理意义的。那就是，当自变量 X 增加一个单位时，Y 平均说来会增加 b_1 个单位。很显然，b_1 是有量纲的，它的量纲是 $[Y]/[X]$。比如本例，回归系数 $b_1=5$，说明温度每升高 1 度，平均说来，产量会增加 5 千克。

3. 回归方程的显著性检验

建立回归方程的目的是表达两个具有线性相关的变量间的定量关系，因此，只有当两个变量确实具有线性相关关系时所建立的回归方程才是有意义的。两个变量间是否存在线性相关关系，可以从 MINITAB 会话窗口中方差分析的 P 值判断。

本例中的 P 值比 0.001 还小，故认为回归方程是有意义的。

4. 利用回归方程预测

当求得了回归方程 $\hat{y}=\hat{b}_0+\hat{b}_1x$，并经检验确认回归方程是显著的，则可以将回归方程用来作预测。

预测是指当 $x=x_0$ 时对相应的 y 的取值 y_0 所作的推断。由于 y 是随机变量，其实际值是无法准确预测的，只能将 $x=x_0$ 代入回归方程作出预测，这个值便称为 y 的预测值（或拟合值）。即：

$$\hat{y}_0=\hat{b}_0+\hat{b}_1x_0$$

如果希望计算预测区间，只能使用功能更强大的另一窗口：统计→回归→回归。此窗口对于任意多个自变量都可以使用，输出的功能也更全面，缺点是没有图

形的输出。为了对新自变量值进行预测，只要在“选项”窗口内填写入自变量值 10（见图 5—23），即可得到下列结果：

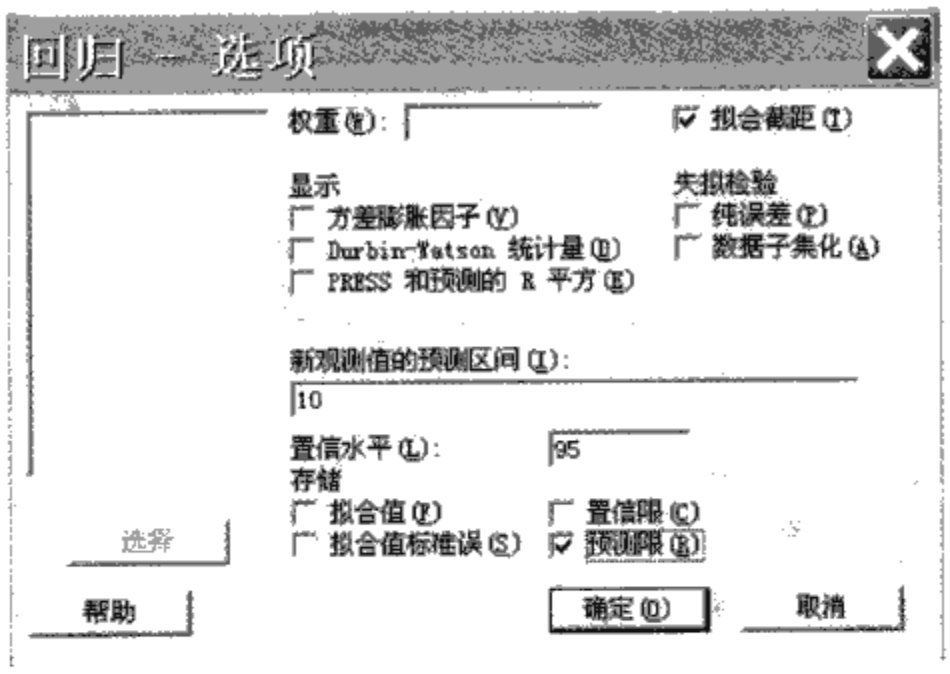


图 5—23　回归中的“选项”窗口

新观测值的预测值

新观测值	拟合值	拟合值标准误	95%置信区间	95%预测区间
1	110.00	4.95	(98.58，121.42)	(76.13，143.87)

新观测值的自变量值

新观测值	温度 X
1	10.0

在计算机显示的结果中此单个观测值的置信区间用“预测区间”表示。另一个置信区间考虑的是：由于回归方程中的系数也是用样本观测值估计出来的，因而系数是有波动的，在回归线上的点的值也会随之波动，因此，预测在该点处的理论均值也会有波动。

5. 残差分析：证实模型假定

使用回归方程的上述统计检验可以获得有关 x 与 y 的丰富信息，但仍然不能确定设定的回归模型是否与数据拟合得很好。为了确认拟合效果，必须采用残差分析方法来进行诊断。定义在 x_i 处的残差 r_i 是因变量的观测值（y_i）与因变量的估计值（$\hat{y}_i$）之差，即：

$$r_i = y_i - \hat{y}_i$$

换言之，x_i 处的残差是利用估计的回归方程去预测 y_i 而引起的误差。对例 5—16，残差的计算见表 5—19，因变量的观测值在第 2 列，利用估计的回归方程 $\hat{Y} = 60 + 5X$ 得到因变量的估计值在第 3 列，对应的残差在第 4 列。对这些残差进行分析将帮助确定对回归模型作出的这些假定是否成立。

表 5—19　　例 5—16 的残差

温度 X_i	产量 Y_i	估计的产量 $\hat{Y}=60+5X$	残差 $Y_i-\hat{Y}_i$
2	58	70	−12
6	105	90	15
8	88	100	−12
8	118	100	18
12	117	120	−3
16	137	140	−3
20	157	160	−3
20	169	160	9
22	149	170	−21
26	202	190	12

现在重温一下例 5—16 中的回归假定。假设简单线性回归模型为：

$$Y=b_0+b_1X+\varepsilon$$

这个模型表示，假定产量（Y）是温度（X）的一个线性函数加上一个误差项 ε。对误差项 ε 作以下假定：

（1）$E(\varepsilon)=0$，即 ε 的均值为 0。

（2）对所有的 x 值，ε 的方差 σ^2 都是相同的。

（3）ε 的值是相互独立的。

（4）误差项 ε 服从正态概率分布。

如果关于误差项 ε 的假定显得不那么可靠，那么有关回归关系的显著性假设检验和区间估计的结果也就站不住脚。

残差图（见图 5—24）的获得可以在 MINITAB 中进行：统计→回归→回归→图形→四合一。

对于残差的诊断可以通过对残差图的分析来进行。

（1）关于按观测值顺序的残差图。关于按观测值顺序的残差图是用横轴表示观测值顺序，用纵轴表示对应的残差值。这些残差点应在横轴（即残差为零）上下随机波动，不应有任何上升、下降、摆动、跳跃等趋势。如果有某种趋势存在，则说明数据观测过程中受到某个未知因素的强大影响，应该找出此因素并加以控制，此图见图 5—24 中的右下方。

（2）关于因变量的预测值（或拟合值）的残差图。第二种残差图（见图 5—24 中右上方）是用横轴表示因变量的预测值，用纵轴表示残差值。因此，这个残差图上的点应该分布在一条水平的带子中。如果在图中有明显的“喇叭口”形状，即表明残差的标准差不是常数，而是随预测值而变化，这提示原来的模型假定可能有问题。如果有“喇叭口”形状，可以通过对因变量作变换加以解决。在本图中没有发现任何不正常之处。

（3）残差的正态性检验。残差应该服从正态分布，对此可加以检验。一方面，可以画出残差的直方图（见图 5—24 中左下方）；另一方面，也可以将残差画在正态概率纸上（见图 5—24 中左上方）。在本图中没有发现任何不正常之处。如果对正态性有怀疑，可以直接对残差数据进行正态性检验。

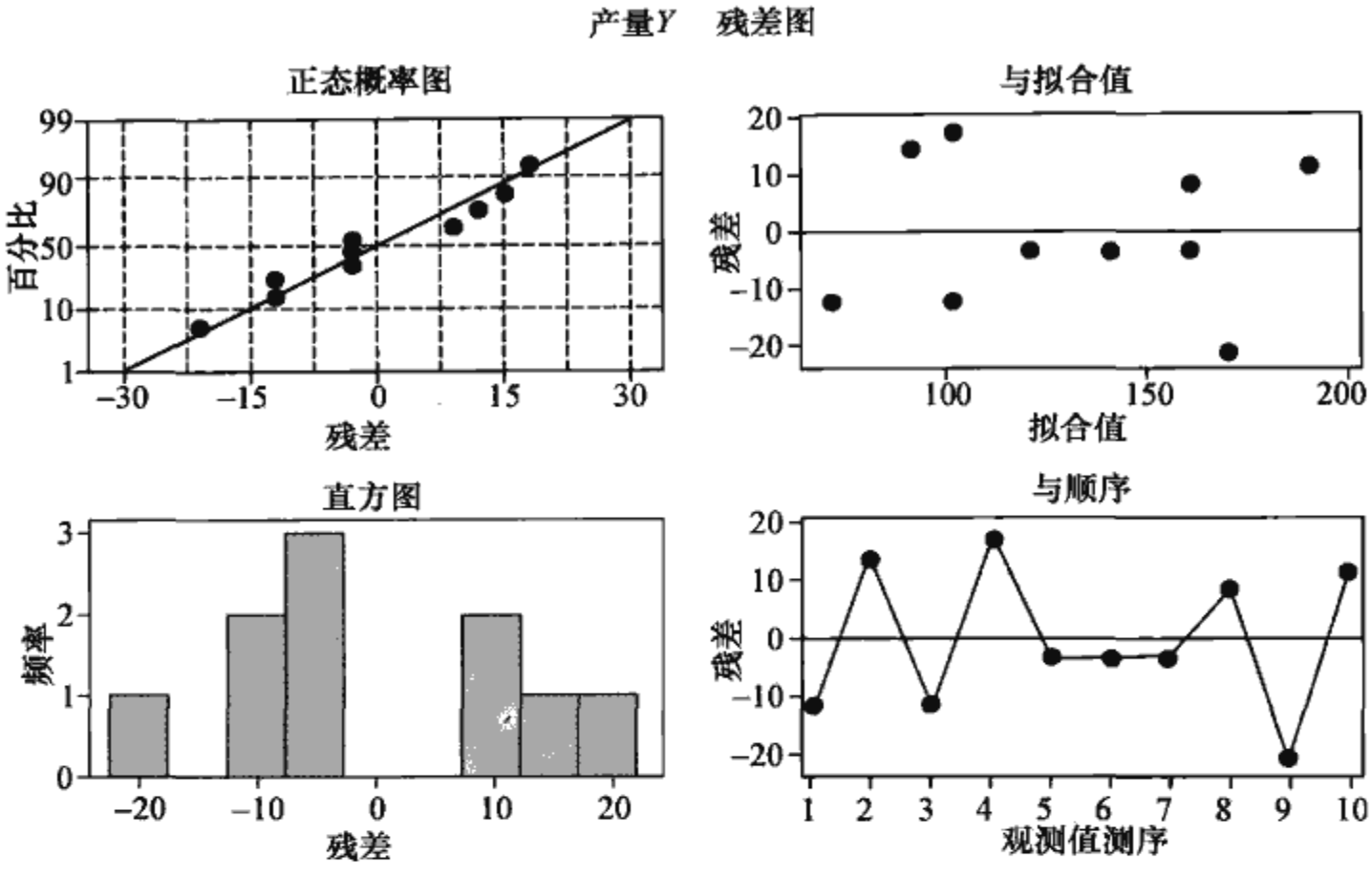


图 5—24 残差图

（4）关于自变量的残差图。关于自变量的残差图是用横轴表示自变量的值，用纵轴表示对应的残差值。每个残差用图上的一个点来表示。图 5—25 是得到的对自变量的残差图。对于此图分析的重点是看残差的标准差能否保持常数（即各残差点是否有“喇叭口”）或是否有弯曲的形状。如果对因变量的预测值的残差图也不正常，首先要考虑对因变量做变换；而如果对因变量的预测值的残差图正常，说明在回归方程中仅有线性项不够，要增加 X 的高阶项或其他项。图 5—25 完全正常。

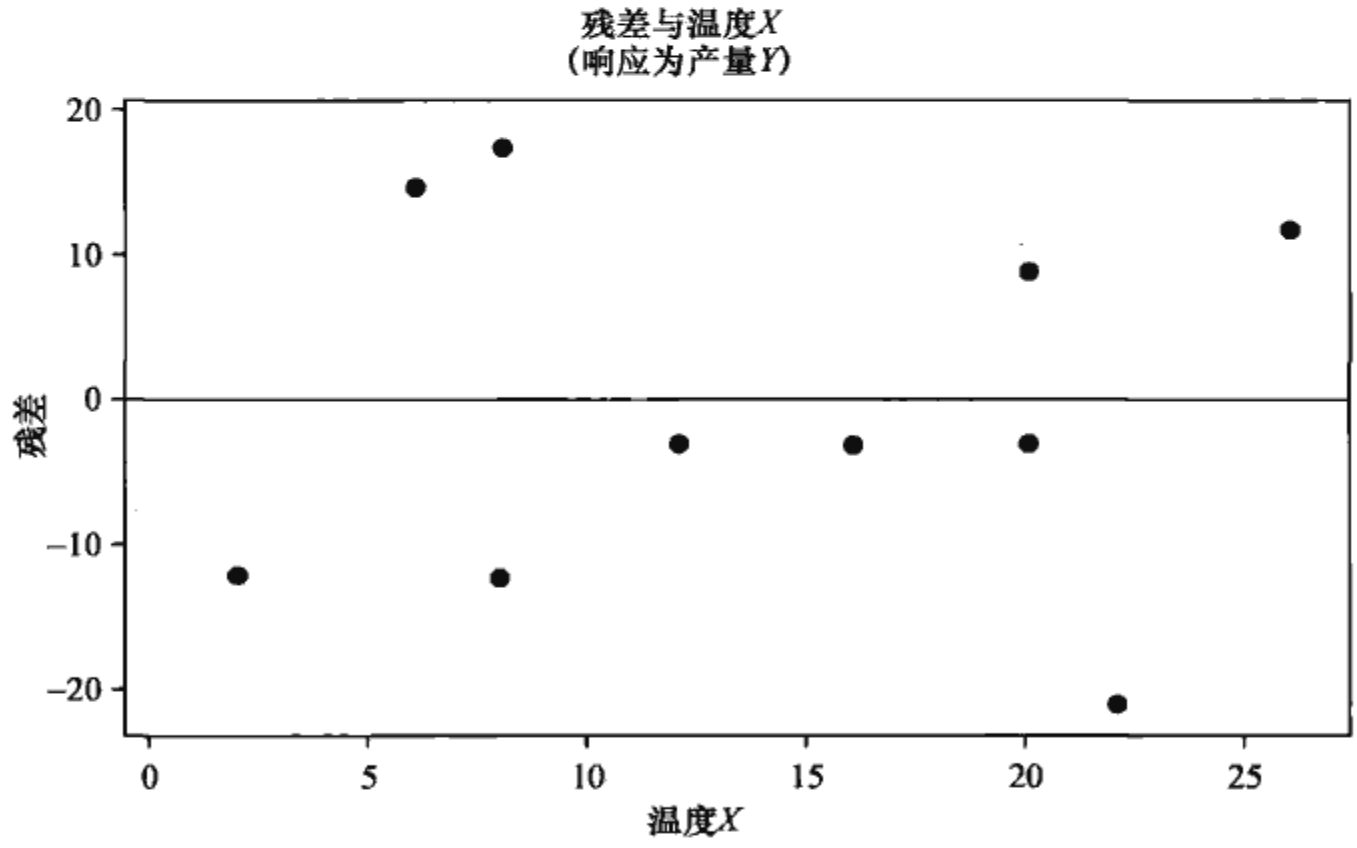


图 5—25 残差对自变量（温度 X）的图

现在总结图 5—24 及图 5—25 所示的残差图。这些残差看来都是正常的。因此，结论是，残差图并没有提供足够的证据，使我们对例 5—16 的回归模型所作的

假定表示怀疑，能够确信例 5—16 的简单线性回归模型是合理的。

5.7 精益分析工具

企业追求精益的过程实质上就是一个持续改进的过程，而且是一个长期的过程，一场没有终点的比赛。改善过程需要综合应用现场管理、设施布置与优化、人机工程、作业研究、质量控制与保证、流程管理与控制、现代制造技术等一系列方法与工具，因此精益生产是一个包含了多种制造技术和管理技术的综合技术体系。实际上，精益生产就是工业工程技术在企业中的具体应用。

5.7.1 流程分析

在生产过程中，从原材料开始，经过多个工序的作业，加工出零件、装配成组件和完整的产品。在整个工艺流程中，安排是否最合理？能否把在制品库存降至最低？非增值活动是否降到最低？这些都需要进行科学的分析，价值流图就是解决上述问题的有效工具。

1. 价值流

价值流是指产品在其生产过程中经历的全部活动。它包括从概念设计、产品设计、过程设计直到投产的设计流和从原材料、制造过程直到产品交到顾客手中的生产流。在企业实践中，一个典型的现象是谁也说不准增值活动占企业生产活动的比例。当一位老总或厂长被告知，他的企业的增值活动还不到所有活动的 5%时（实际上大部分工厂离 5%还差得远），他会大吃一惊，甚至怀疑可能搞错了。导致这种现象的基本原因有两种：其一，在大量生产模式下，部门按职能设置，彼此画地为牢，管理人员缺乏对企业运作的宏观了解。其二，管理人员缺乏对增值和非增值活动的认识和判别，难以运用系统的观点对企业的浪费现象进行分析和改善。对一个产品来说，以下两条主要流动路径是至关重要的：一是从原材料到达顾客手中的生产流程；二是从概念到正式发布的产品设计流程。价值流就是使一个产品通过这些主要流程所需要的全部活动，包括增值活动、必要的非增值活动和不必要的非增值活动（即浪费）三类。研究表明，企业用于增值活动的时间仅占整个流程的极小部分，大部分时间都花在非增值活动中。

迈克尔·波特在 1985 年出版的《竞争优势：创造和保持卓越绩效》一书中提出了价值流的概念：把公司（组织）描述成“设计、营销、配送和支持产品等一系列活动的集合体”的一种方式。他想让经理们理解为顾客创造价值的组织活动的序列，并强调经理们必须理解他们的组织是怎样适应行业的整个价值创造活动的。价值流概念的三个特性最终把“核心过程”转变为企业管理人员关注的焦点：

（1）价值流增强了业务活动内部的关键联系，也增大了组织成功的可能性。不同的职能部门在组织的基本目标中起着不同的作用：向顾客传递某种独特的价值，

价值链的任何一个链条中断或弱化（不同职能部门之间的不协调、不增值的活动）都会影响价值传递过程。

（2）价值流确定了职能部门的贡献率。当每个职能部门都贡献价值时，其中一些起主导作用，另外一些起次要作用。核心过程的贡献率比较显著。

（3）价值流被细化到组织的操作单位层面。

在精益生产中提出了“价值流管理”的概念，这种管理模式彻底打破了大量生产模式下的职能割据，由“价值流团队”对产品从供应商到顾客整个过程进行管理，实现对运作过程的系统而有效的控制，从而提高满足顾客需求的能力及反应速度。价值流经理由直接向最高管理者汇报的管理人员担任，享有改革的充分授权和自主权。价值流经理组建由跨部门成员组成的价值流团队，以顾客为导向选定产品族，并跟随其生产路径，从头到尾分析和描绘每一个工序的状态、工序间的物流、信息流和价值流，此为“当前状态图”。找出需要改善的地方，再描绘一个“未来状态图”，显示价值流改善的方向和结果。在此基础上，团队决定改善的计划和行动。整个价值流管理实行全成本核算，价值流经理对整个产品族的流程、资源配置及成本运作担负着主要领导、协调和控制的责任。

总而言之，价值流管理就是要达成链中成员的无缝连接，以团队的工作方式增值，表现为：快速组装、更准确的信息、更快的反应速度和更好的服务等，以满足和超越顾客的需求和期望，为顾客创造价值和促进顾客的成功，为价值链上的成员创造财富。组织应当通过价值链管理来实施其战略规划，实现其战略目标，进而实现其使命和愿景。

2. 价值流图

在六西格玛管理活动中，常常采用价值流图（value stream mapping，VSM）来分析价值流中各主要过程中的非增值环节和因素，并识别改进机会。价值流图是一种帮助人们了解物流和信息流的可视化工具。它体现了从原材料到成品，再到客户的所有活动，有助于观察和理解产品通过价值流过程时的物料流动和信息流动，以及其中的增值和非增值活动，从而发现浪费和确定需要改善的地方，为改善活动确定蓝图和方向。同时也便于员工了解企业的状态，为其提供参与改善的机会。价值流图研究的是生产流程，它是指将现场观察到的生产流程中物料和信息的流动情况用简图描绘下来，对其进行分析，找出产生浪费的原因，然后识别改进机会或提出改进方案。

应用价值流图分析企业生产流程，意味着要从全盘看待问题，而不是集中于某个单独的过程；意味着将改变整体，而不仅仅是优化某个部分。价值流图分析可以针对企业内部（又称“四堵墙以内”）的活动进行分析和改善，也可以针对“四堵墙以外”，即从供应商出货起到顾客收货为止的整个价值流进行分析和改善。对于价值流图，需要从以下几点进行深入理解：

（1）物料流和信息流是生产过程价值流的两个不可分割的重要方面。

（2）观察研究价值流的范围可以从一个过程、一个车间、一个工厂直至整个公司、整个供应链。一般从一个车间（从进口到出口）着手，然后向下对每一个过程

进行研究并采取具体的改进措施，向上扩展到整个工厂、公司直至整个供应链，改进整个系统的价值流。

（3）价值流图技术强调研究人员亲自到现场观察、了解、记录和画图，而不只是凭书面资料。

价值流图分析包括的主要步骤是：

（1）了解并记录顾客的要求，如图 5—26 中右上角顾客要求框所示，主要应了解顾客的需求量、种类、交付频次和要求等。

（2）了解并画出工厂内材料流图，如图 5—26 中下部的线框所示，也是工厂内的基本生产过程，将能够连续进行的过程列入一个框内，无法连续的则在两框之间用库存三角分开。

（3）收集并记录每个生产过程的数据（数据框），在每个过程线框下记录主要数据，包括生产节拍、换型时间、操作人数、有效工作时间、设备使用率、废品率等与过程改进有关的数据。注意，这些数据应是现场收集的，而不是某些资料记载的。

（4）了解库存情况，小组应对所有库存（包括线上在制品库存）进行盘点，然后记在库存三角下面。注意，是点数而非查账！

（5）原材料采购和交付的情况，如图 5--26 中左上角所示，了解主要供应商的供货情况。

（6）了解、记录顾客订货、生产计划、原材料订货过程的信息传递途径及信息，画出信息流，如图 5—26 上部所示，表示出顾客订单、材料订单和生产信息传递途径和方法。

（7）画出生产时间线和计算相关数据，将库存数量按照顾客需求节拍转化为时间，与生产过程时间数据一同画在时间线上，求出生产过程时间占整个时间的百分比。

以下将简要介绍现状价值流图和未来价值流图的绘制。

3、现状价值流图

图 5--26 是一个现状价值流图的例子。这是一个生产汽车转向柱支架的工厂，转向柱分左置和右置两种。顾客是右上角的××装配厂，供应商是左上角的××钢铁公司。图 5—26 的下部描述物料流。每一个方框表示一个单独的过程，如冲压、点焊、装配和发运。方框的下面是数据框，如加工周期、换模时间、设备的完好率、几班制和有效工作时间等，方框左右的三角形表示库存，例如在冲压过程的前面有 5 天的原材料库存，在它和第一个电焊过程之间有 4 500 件左置和 2 400 件右置的半成品，等等。

图 5—26 的上部描述信息流。生产计划部门根据顾客 90/60/30 天的预测订单和每日送货要求，应用物料需求计划（MRP）系统制定每周生产计划，下达给每一个过程，MRP 系统按 6 周的预测数量通知钢铁厂进行原材料生产，按每周的传真组织发货。

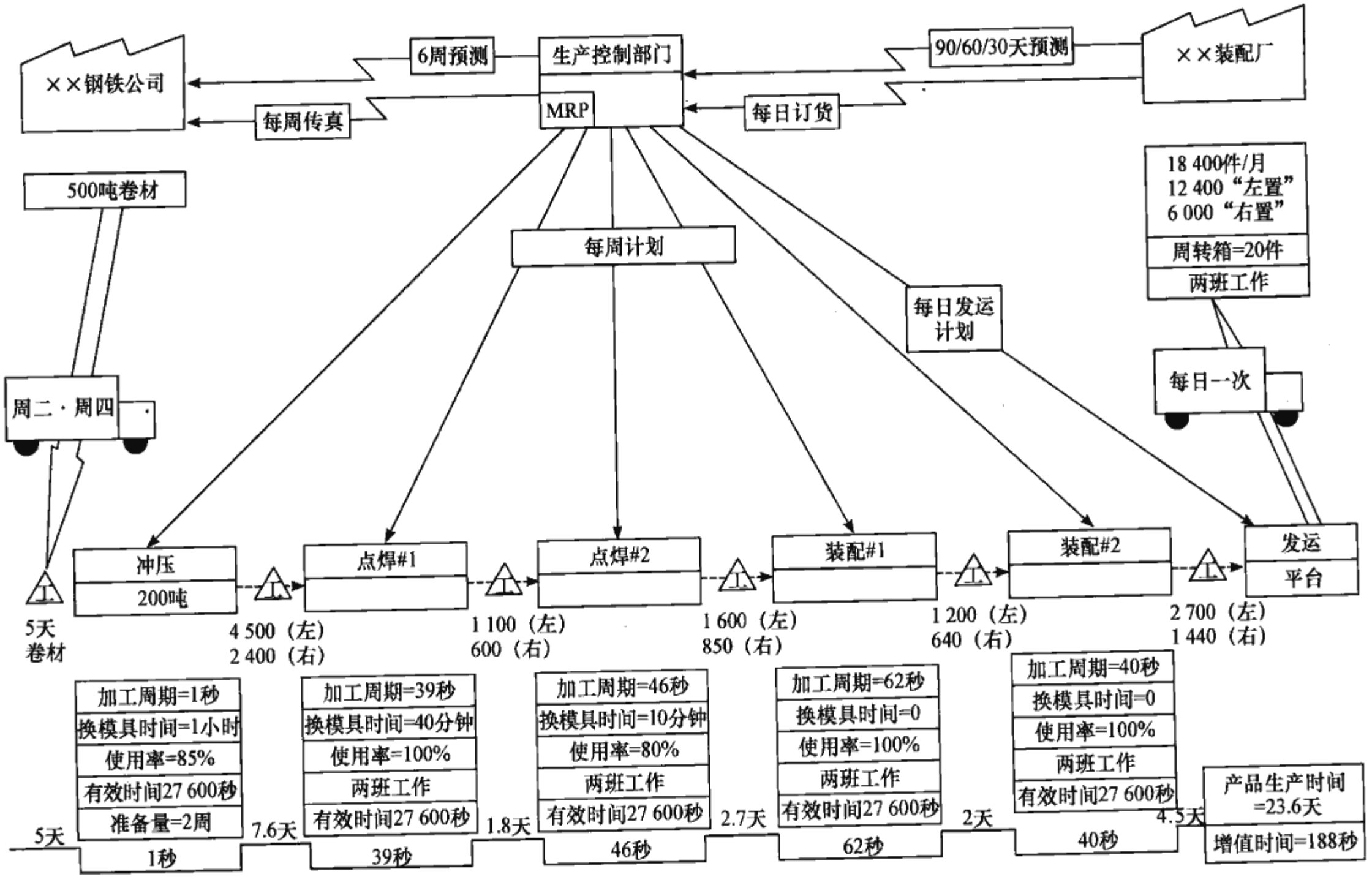

××钢铁公司
6周预测
生产控制部门
90/60/30天预测
××装配厂
每周传真
MRP
每日订货
500吨卷材
每周计划
每日发运计划
18 400件/月
12 400“左置”
6 000“右置”
周转箱=20件
两班工作
周二·周四
每日一次
冲压
200吨
点焊#1
点焊#2
装配#1
装配#2
发运
平台
5天
卷材
4 500（左）
2 400（右）
1 100（左）
600（右）
1 600（左）
850（右）
1 200（左）
640（右）
2 700（左）
1 440（右）
加工周期=1秒
换模具时间=1小时
使用率=85%
有效时间27 600秒
准备量=2周
加工周期=39秒
换模具时间=40分钟
使用率=100%
两班工作
有效时间27 600秒
加工周期=46秒
换模具时间=10分钟
使用率=80%
两班工作
有效时间27 600秒
加工周期=62秒
换模具时间=0
使用率=100%
两班工作
有效时间27 600秒
加工周期=40秒
换模具时间=0
使用率=100%
两班工作
有效时间27 600秒
产品生产时间
=23.6天
增值时间=188秒
5天
1秒
7.6天
39秒
1.8天
46秒
2.7天
62秒
2天
40秒
4.5天

图5—26　现状价值流图

从现状价值流图可以看出，这个工厂当前实行的生产方式是一种按预测进行的“推动”式的批量生产。这种方式存在显而易见的浪费，为保证不中断对顾客的供应，过程之间不得不保持较大数量的库存。其他的浪费还有：人员负荷不满、设备完好率低、换模时间长、过多的搬运、缺陷率高等。如图 5—26 中最下面的数字所示，物料由进入工厂到变成产品的生产周期长达 23.6 天，而实际用于增值加工的时间仅为 188 秒。

4. 未来价值流图

为了减少当前价值流中的浪费（完全消除是很困难的），需要应用精益生产的原理和方法，考虑实际实施的可能性，改进小组首先应该勾画出一个“未来价值流图”。图 5—27 是转向柱支架工厂的未来价值流图。在勾画未来价值流图时，主要应用以下几个原理：

（1）努力实现按节拍时间生产。在确定节拍时间时，应考虑生产节拍与销售节拍相一致，即节拍时间＝每班有效工作时间/每班顾客需求量。在本例中，节拍时间等于：27 600 秒/460＝60 秒。

（2）在可能的地方实现连续流动。连续流动是指产品不经中间停顿从一个过程传递到下一个过程，它是消除过程间库存和提高生产效率的有效方法。例如，把原来分割为相互独立的冲压、焊接和装配过程组合成一个连续流动的过程，并实现按节拍生产。

（3）连续流动无法向上游扩展时，使用“超市”方式控制生产。实际中有些过程由于生产周期过快或过慢以及与其他的过程距离远等原因难以实现和其他过程节拍一致的连续流动生产。为了防止通过生产计划部门单独下达生产计划的管理方式，一个很好的经验方法是，采用类似“超市”的拉动系统。例如在本例中，在冲压过程前、冲压过程中和其他过程中间以及发货过程前设置“超市”系统，冲压过程是按照从“超市”送来的“看板”指定的数量（一般为一个材料搬运箱，例如本例中的 20 件）和品种进行生产，不再有另外的库存，从而把库存降到最低。这要求冲压过程实现快速换模，以实现多品种、小批量生产。

“未来状态图”是以精益思想为指导，按照企业的实际情况，为未来的运作模式指明方向，设计新的精益流程。“未来状态”也仅仅是基于当前的技术和改善水平，在一定时间内可以达到的较为理想的目标。随着生产技术的提高和水平的改善，原来的目标开始变得不理想，人们又进入了一个更高层次的改善循环。如此往复，这正是精益思想中“与完美竞争，永无止境”的精髓之所在。未来价值流图为制定实现精益生产方式的计划提供了基础。但是，真正实施还需要周密的计划和大量的工作。管理者的决心和支持当然是最重要的，员工的理解和参与也不可缺少，需要价值流经理和精益计划推动小组具体指导和推动计划的实施。按照合理的步骤实施计划并在适当的阶段组织评审，根据评审结果，对过程进行必要的修改和调整。

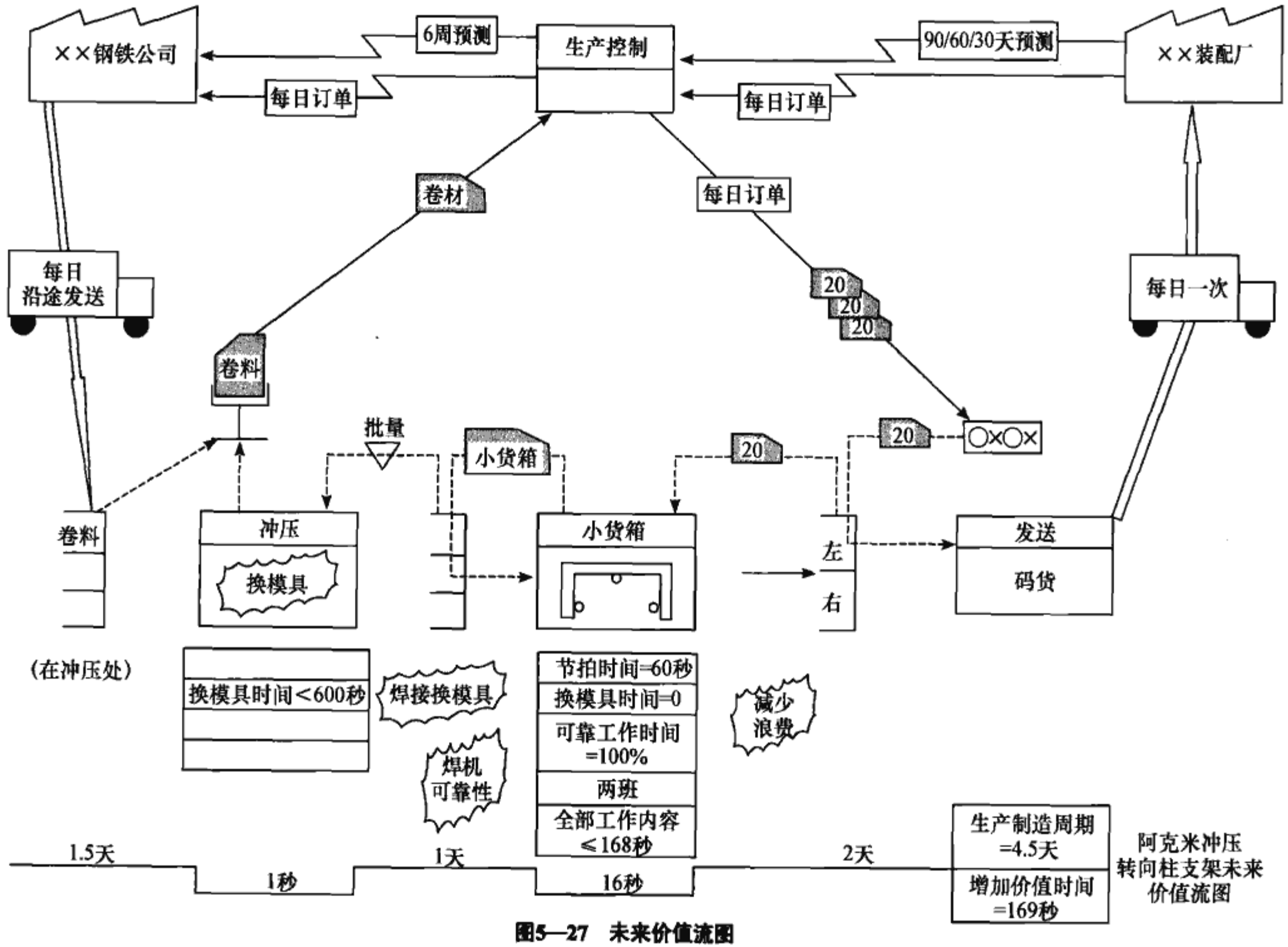
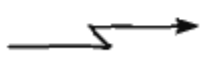
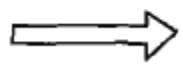
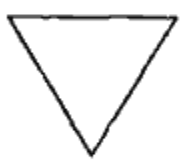
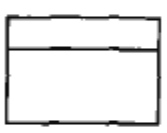
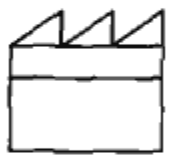

××钢铁公司
6周预测
生产控制
90/60/30天预测
××装配厂
每日订单
每日订单
每日订单
卷材
每日
沿途发送
20
20
20
每日一次
卷料
批量
小货箱
20
20
OXOX
卷料
冲压
换模具
小货箱
左
右
发送
码货
(在冲压处)
换模具时间<600秒
焊接换模具
节拍时间=60秒
换模具时间=0
可靠工作时间
=100%
两班
全部工作内容
≤168秒
减少
浪费
焊机
可靠性
生产制造周期
=4.5天
增加价值时间
=169秒
1.5天
1秒
1天
16秒
2天
阿克米冲压
转向柱支架未来
价值流图

图5—27　未来价值流图

5. 价值流图制图图标

价值流图中所使用的图标如表 5—20 所示。

表 5—20　　价值流图制图图标

			
电子信息流	先进先出	成品	观察
			
库存	改善点	看板批量	看板箱
			
生产看板	看板信号	取料看板	均衡
			
手工信息流	操作工	过程框	拉动箭头
			
拉动圈	推动箭头	计划框	供应商
			
超市	卡车运输	缓冲库存	数据框

6. 流程程序分析

流程程序分析是程序分析中最基本、最重要的分析技术。它以产品或零件的制造全过程为研究对象，把加工工艺划分为加工、检查、搬运、等待和储存五种状态加以记录并逐项分析。

流程程序分析与工艺程序分析相似，都属于对工作现场的宏观分析，但它比工艺程序分析更具体、内容更详细。具有如下特点：

（1）由于它比工艺程序分析更具体、更详细，因此它常常是对每一主要零件的加工制造全过程作单独研究。

（2）特别用于分析搬运距离、等待、储藏等隐蔽成本的浪费。

（3）借助各种流程图进行记录和分析。

流程程序分析由两部分构成：流程程序图和流程分析图表。

流程程序图与工艺流程图的结构极为相似，其差别仅为加入了“搬运”、“储存”、“停滞”三种符号，除记录时间，再加上搬运距离。了解工作的概貌需用工艺流程图，而流程程序图则是进一步对生产现场的整个制造程序的详细记录，以便于对整个制造程序中的“操作”、“搬运”、“检验”、“停滞”、“储存”作详细的研究与分析，特别是用于分析其搬运距离和停滞等隐藏成本的浪费。

流程程序图由操作、搬运、检验、停滞、储存五种符号构成，其构成如表 5—21 所示。此图比工艺流程图详尽而复杂，因而常对每一主要零件（或产品）单独作图，均可对其操作、搬运、检验、停滞、储存进行对立研究。流程程序图依其研究的对象可分为：

（1）材料或产品流程程序图（物料型），说明生产搬运过程中材料或零件被处理的步骤。

（2）人员流程程序图（人型），即说明操作人员在生产过程中一连串的活动。

表 5—21　　流程程序分析符号

符号	意义	说明
○	操作	圆圈。凡一件物品或目标经有意地改变其物理或化学性质，此改变性质的过程称为操作。故操作常使材料、零件或加工更进一步接近完成。当然操作包含事前准备及善后处理。
⇨	搬运	空心箭号。凡有意改变物体之位置，由一处移至另一处，即为搬运。但其移动，如为操作或检验所附带发生者，则非搬运。
□	检验	正方形，为鉴定物体（原材料、零件、半成品、成品）的性质与规格之异同，而给予试验，比较或证明其数量及品质，称为检验。检验须有标准。
D	停滞	正写的“D”字母，由于预定的一次行动（如操作、搬运、检验）未马上发生而产生的停滞，此停滞为非必要或非控制情况之下产生。
▽	储存	物品的保存或维持。储存行动的取消须经制度或法定上的认可，如领出物料，须经有关人员签字。

在实际工作中，一般都使用事先设计好的流程图表。此种图表是将五种符号印在表格中，分析记录时，只需将各项工作按照发生的顺序用直线将符号连接起来。而表头部分则应有工作部门，工作物名称，现行方法还是建议方法及记录人等。表 5—22 给出了流程图表示例。

表 5—22 流程图表示例

流程图表							
表格编号：_____		开始时间：_____					
工作物名称：_____		结束时间：_____					
工作物图号：_____		方法：_____					
工作部门：_____		批量：_____					
记录人：_____		件号：_____					
审定人：_____							
工作说明	距离（米）	时间（分）	符号				
			○	⇨	□	D	▽
合计							
作业内容	次数	时间	距离	备注			
操作							
搬运							
检验							
停滞							
储存							

绘制流程图表必须注意以下原则：图表上记述的内容必须是直接观察所得。图表应提供尽可能全面的信息，所有的图表都应具有有关信息的表头，其内容包括：产品、物料或设备的名称，附上图号或表格编号；所记录的流动程序，应明确说明开始时间和结束时间，以及该方法是现行方法还是建议的新方法；进行操作的地点（部门、工厂、工地等）；图表查阅号、总页、页号；记录人、审定人的姓名和记录日期；记录距离和时间的总计、人工成本、材料成本，以便对新旧方法进行比较。

流程程序分析的对象是作业完成过程中的操作、搬运、检验、停滞、储存等五项活动。在现场经过深入和仔细的调查，完成图表绘制及收集相关数据，在调查的基础上，对除了那些明显暴露出的问题必须加以解决外，通常还采取“5W1H”（或称“六何”，即做何事（what）、何原因（why）、何处做（where）、何时做（when）、何人做（who）、用何种方法做（how））提问技术对各个活动进行提问和思考，以发现较深层次的问题，并采用 ECRS（取消、合并、重排和简化）四项原则加以改进。在形成改进方案后，通常要求对改进前后的方案进行比较，列出各种活动出现的次数、物品的移动距离、活动需要的工时等数据，并进行对比，以评价改进方案的实际效果。其分析改进的重点如表 5—23 所示。

表 5—23　　流程程序分析检查表

活动事项	检查改进重点
操作（○）	● 有没有可以取消的加工活动？ ● 能否通过改变生产设计和加工工艺使加工活动简化？ ● 通过作业条件和布置的改变可否使作业容易、时间缩短？
搬运（⇨）	● 设置的搬运环节是否必要？ ● 物料搬运路线是否最短？ ● 物料搬运的器具及运输工具是否合用？是否足够用？
检验（□）	● 有没有可以取消的检验，能否使检验和操作结合起来进行？ ● 检验工具是否适合？能否进一步改进？ ● 检验方法在确保检验质量的基础上能否更加简便？
停滞（D）	● 能否避免不应有的停放发生？ ● 能否通过改善组织管理减少停放时间及停放次数？
储存（▽）	● 有没有可能取消储存？ ● 储存的数量是否降至最低？ ● 储存时间是否过长？能否压缩？

5.7.2　作业时间分析

作业时间分析指运用系统分析的方法把工作中不合理、不经济、混乱的因素排除掉，寻求更好、更经济、更容易的工作方法，以提高系统的生产率。其基本目标是避免浪费，包括时间、人力、物料、资金等多种形式的浪费。

提高生产率或效率的途径有多种，例如通过购买先进设备、提高劳动强度来实现。作业时间分析遵循以内涵方式提高效率的原则，在既定的工作条件下，不依靠增加投资，不增加工人劳动强度，只通过重新组合生产要素、优化作业过程、改进操作方法、整顿现场秩序等方法，消除各种浪费，节约时间和资源，从而提高产出效率、增加效益、提高生产率。

1. 节拍时间

生产节拍源自德语的“takt time”（T/T），原意是调节演奏的节奏，在精益分析中特指生产一个产品所需的时间，即一天的工作时间除以一天的产品数量。

（1）生产节拍与生产周期。从生产节拍的定义可以看出，生产节拍与生产周期不同，生产节拍实际是一种目标时间，是随需求数量和需求期的有效工作时间变化而变化的，是人为制定的。节拍反映的是需求对生产的调节，如果需求比较稳定，则所要求的节拍也是比较稳定的，当需求发生变化时节拍也会随之发生变化，如需求减少时节拍就会变长，反之则变短。生产周期则是生产效率的指标，比较稳定，是受到一定时期的设备加工能力、劳动力配置情况、工艺方法等因素影响决定的，只能通过管理和技术改进才能缩短。

（2）生产节拍对生产的作用。生产节拍对生产的作用首先体现在对生产的调节控制上。通过节拍和生产周期的比较分析，在市场稳定的情况下，可以明确需要改

进的环节，从而采取针对性的措施进行调整。如当生产节拍大于生产周期时，生产能力相应过剩；如果按照实际生产能力安排生产就会造成生产过剩，导致大量中间产品积压，引起库存成本上升、场地使用紧张等问题。如果按照生产节拍安排生产，就会导致设备闲置、劳动力等工等现象，造成生产能力浪费。当生产节拍小于生产周期的情况下，生产能力不能满足生产需要，就会出现加班、提前安排生产、分段储存加大等问题。因此，生产节拍大于或小于生产周期都会对生产造成不良影响。生产管理改进的目的就是要尽可能地缩小生产周期和生产节拍的差距，通过二者的对比分析安排生产经营活动。

生产节拍的另一个作用是能够有效防止生产过剩造成的浪费和生产过迟造成的分段供应不连续问题，并确定工序间的标准手持品数量。经济学常识告诉我们，成本和产量间存在一种函数关系，当产量过剩时，成本就会增加，当产量不足时单位产品的成本同样处于较高水平，因此从成本的角度出发，生产过剩和不足都是一种浪费，应用生产节拍就可解决这个问题。相对于准时化的零库存理念，生产节拍就是要改变生产越多越好的观念，建立起适量生产的观念。为保证生产中分段连续供应，必要的、合理的分段储存在实际生产中是必需的，因此在平衡生产节奏的同时，通过工序能力分析就可以建立起各工序间必要的分段库存数量，避免分段库存过多造成的严重浪费。

生产节拍的使用可使生产现场的作业规律化，使生产活动稳定，实现定置管理，并成为现场生产效率改善的依据。

2. 动作与时间研究

动作与时间研究（motion and time study），也称“工时学”、“工作研究”或“作业研究”，是指用系统、科学的方法测定、分析和研究作业动作与时间，以获得最佳的工作方法。动作与时间研究对于提高工作效率、降低疲劳度以及测定与管理劳动工时方面有极其重要的作用。

动作与时间研究由动作研究和时间研究两部分组成。动作研究又称“方法研究”或“工作方法设计”，其主要内容是通过各种分析手段发现、寻求最经济有效的工作方法，动作研究的主要发明者是F. B. 吉尔布雷斯和L. M. 吉尔布雷斯夫妇。F. B. 吉尔布雷斯于1885年受雇于一位建筑商时进行了著名的“砌砖研究”。在该研究中，他通过对砌砖动作进行分析和改进，使工人的砌砖效率提高了近200%。1912年，吉尔布雷斯夫妇在美国机械工程师学会会议上，首次发表了题为“细微动作研究”的论文，在文中他们首创用电影摄影机和计时器将作业动作拍摄成影片并进行分析的方法，同时通过自己的研究将人的作业动作分解成三大类共17种基本动作，命名为“动素”。这些基本动作是：伸手、握取、移物、装配、应用、拆卸、放手、检验、寻找、选择、计划、对准、预对、持住、休息、迟延和故延。其中前8种动作为必需动作，中间5种动作为辅助动作，最后4种动作为无效动作。他们指出，提高动作效率必须尽可能地删减后两类动作。之后，F. B. 吉尔布雷斯又独创性地发明了“灯光示迹摄影”和“设计灯光示迹摄影”两种摄影方法，使动作分析的准确性和有效性有了很大提高。为了缓和与消除工人对早期动作研究的抵

触和不满，在富有心理学造诣的 L. M. 吉尔布雷斯的帮助下，F. B. 吉尔布雷斯又逐渐将动作研究范围扩大到工作疲劳与单调、动机及工作态度等方面。

时间研究又称“作业测量”或“工作测量”，其主要内容是通过科学方法测定工作的实际时间，以此作为制定工作定额、核算成本、计划生产以及检验工作方法效率等的基础。时间研究的主要发明者是泰罗。约在 F. B. 吉尔布雷斯从事动作研究的同时，泰罗在美国伯利恒钢铁厂进行了著名的“铁铲试验”。在该研究中，他比较了工人铲煤与铲矿砂间的差异，对工人的铁铲进行了改进，并制定了相应的劳动定额及奖励制度，从而在短短的三年半时间内，使该厂原需 400～600 人的工作只需 140 人即可完成。泰罗在时间研究上的最主要贡献之一是指出了时间研究的过程。他认为时间研究包括工作分析和工作建立两大范围。首先是工作分析，可总结成以下几个步骤：(1) 将作业动作分解成最简单的基本动作；(2) 删除无效动作；(3) 观测部分熟练工人的各项基本动作，借助秒表记下最佳及时间最短的动作方法；(4) 记录、说明、依次标出每一基本动作及恰当的动作时间；(5) 分析、记录各类宽放率或宽放时间。

其次是工作建立，由以下几个步骤组成：(1) 将经常以同样顺序在作业中出现的基本动作合并成一组，记录并标示各组动作；(2) 通过分析、比较，从所有动作组中选择适当的动作组应用于当前情境；(3) 将所有基本动作时间汇总，再加上各类宽放时间，即可估计出各类作业的工作时间。

除吉尔布雷斯夫妇和泰罗外，还有一些人对动作与时间研究的发展也有很重要的作用。如巴恩斯提出了“动作经济原则”，莫金逊 1930 年提出了“工作简化原则”，美国无线电公司的奎克、希尔和考霍列夫于 1935 年创立了“工作因素系统”技术，西屋电气公司的梅纳德、斯坦杰门顿、修瓦伯于 1940 年创立了“方法时间测定”（MTM）技术，等等。动作研究与时间研究约从 20 世纪 30 年代起开始被合称为“动作与时间研究”。在我国，老一辈工业工程学家曾在纺织、机械及煤矿等行业的工种中进行过动作与时间研究，并取得了一定的成就。

一般来说，动作与时间研究可分以下阶段进行：第一阶段是发掘问题。在实际情境中，有许多对象要求进行动作与时间研究，它们的范围大至生产过程、工艺过程，小至工序或操作，选择的余地很大。为了把精力集中到最迫切、最重要的对象上，课题选择必须考虑到经济、技术、心理等因素。第二阶段是现状分析，即对所选定的研究对象进行描述和分析。在这一阶段，可利用许多具体的描述方法，如程序分析、动作分析、直接时间测定、预定动作时间研究、工作抽查，等等。在分析时，既可从对象、人员、地点、时间、方式、目的等方面加以考核（即“6W 原则”或“5W1H 原则”）（见表 5—24），也可以利用“动作经济原则”去对照、比较。第三阶段为新方法设计。利用取消、合并、重排、简化等手段对旧的工作方法进行改进，提出若干新的工作方法。第四阶段是对新方法进行评选，以经济、管理、心理等因素为依据，选择“最佳”的工作方法加以实施。为了保证新方法正确实施，要制定材料、设备、环境等标准，并赋予特定的工时定额。第五阶段是对前一阶段实施新方法的状况进行评估，以确定该项研究的效益。评估的内容包括产量、质量、成本、安全状况、士气等方面。

表 5—24 6W 原则

why（为什么）	• 为什么这项工作是必不可少的？ • 为什么这项工作要以这种方式按这种顺序进行？ • 为什么为这项工作制定这些标准？ • 为什么完成这项工作需要这些投入？ • 为什么这项工作需要这种人员素质？	what	这项工作的目的何在？
		how	这项工作如何能更好完成？
		who	何人为这项工作的恰当人选？
		where	何处开展这项工作更为恰当？
		when	何时开展这项工作更为恰当？

在具体应用时，动作研究可划分为程序分析与动作分析两大类。程序分析的出发点是整个工作程序或流程，或者说，是一种将整个生产或制造过程中所有操作、搬运、检验、停滞、储存等事实用符号加以分析和依次排列，以供了解程序和达到改进目的的图示方法。根据目的不同，程序分析又可分为操作程序图、流程程序图、流程图、联合程序图及操作者程序图五种。操作程序图顺序描述操作与检验两个事实，一般适用于分析整个生产或制造过程；流程程序图包括操作、搬运、检验、停滞、储存所有五个事实，适用于分析产品或原料的流动；将流程程序图画在按比例缩小的工作场区平面图上，则构成流程图，因此，流程图具有详细、直观的双重特点；联合程序图是将同一工作地上人的活动及其与机器的关系依时间标尺图示出来，可作为人、机剩余能力分析及人、机数匹配设计的工具；操作者程序图是一种特殊的程序分析方法，它将操作者左、右手或其他身体部位的动作按发生的时间顺序加以描述、记录，它能清楚地反映左、右手或其他身体部位的操作关系。

与程序分析相反，动作分析是从较微观的角度出发，通过对身体细微动作的记录、分析，达到消除无效动作及提高动作效率的目的。根据使用的精确程度不同，动作分析可区分为目视动作分析、动素分析与影片分析三类。前两者均利用研究人员直接观测、记录、分析及改进作业动作，它们之间的唯一差异是作业所划分的基本动作单位不同。而后者则是指利用摄影机将作业动作拍成影片然后进行放映、分析。影片分析根据拍摄速度不同，可分为“微动作研究”与“微速度动作研究”。如果所研究的动作单位较小，周期短，可用每秒 16 格的速度进行拍摄，这种速度下可拍摄到较为细微的动作变化，故称为“微动作研究”。如果动作单位相对较大，则可以每秒一格（或每分钟 100 格）的较慢速度进行拍摄，这种拍摄速度可以节省大量的费用，但拍摄到的动作变化相对较大，故称为“微速度动作研究”。由早期影片分析发展而来的录像分析是当前动作分析中最重要、最精确和最实用的方法。

在开展动作分析时，经常要用到“动作经济原则”。动作经济原则是一组指导人们如何节约动作、如何提高动作效率的准则，它的目的是减少工作疲劳与缩短操作时间。动作经济原则可划分为三大类，共 22 项。第一类是关于人体的使用，第二类是关于工作场所的布置，第三类是关于工具设备的设计。更综合地说，它可归纳为四点：（1）同时使用两手，避免一手操作一手空闲；（2）力求减少动作单位数，避免不必要的动作；（3）尽可能减少动作距离，避免出现全身性活动；（4）追求舒适的工作环境，减小动作难度，避免不合理的工作姿势或操作方式。

时间研究或时间测定技术，从其发展的角度出发，可依次划分为经验判断法、历史记录法和工作测量法三类。虽然前两类技术仍有某种程度的应用，但不可否

认，第三类技术已成为目前最常用的时间测定技术。第三类技术即工作测量法是根据统计学原理，通过对工作细节内容进行分析、测定来确定标准工时的方法，它按特点的不同可区分为直接时间测定法、预定动作时间研究和工作抽查等类型。

（1）直接时间测定法。这是时间研究中唯一直接测定的方法，是所有工作测量法的基础，它的特点是在现场对工作直接进行划分与测定，因此有具体、客观、适合情境等优点。缺点是不能对设计中的工作进行研究，研究费用高。

（2）预定动作时间研究。预定动作时间研究以以往的时间研究资料为基础，即以长期积累的时间资料综合考虑确定时间标准系统，将这种时间标准系统应用于当前的实际环境，因此，它具有可预测、费用少的特点，但精确性不能得到保证。这一方法中最为常用的技术为方法时间测定（MTM）与工作因素（WF）。MTM 是美国工程师梅纳德、斯坦杰门顿和修瓦伯在综合了前人研究的基础上，通过对钻床工作场所的大量摄影分析发展起来的。该技术将人类操作动作划分为伸手、搬运、旋转、加压、转动、抓握、定位、放手、拆卸、眼动和身体动作等项，通过动作级别、动作距离、动作形态、克服的阻力和重量、动作类型或特点等变量的分析以及同时动作、合并动作、复合动作情境的考虑，实现时间的测定。MTM 可按动作的精确程度划分为 MTM-1，MTM-2，MTM-3 三种形式。与此不同，WF 则将人的操作动作划分为运送、抓取、预对、装配、使用、拆卸、脑力过程和放手八种，从身体的使用部位、运动距离、所要求的手工控制级别以及阻力或重量四个变量进行考虑。

（3）工作抽查。这是利用统计抽查技术对作业动作进行随机、间断的观测、记录，它具有客观性强、费用少的双重特点，特别适用于对特定作业项目的时间或时间率测定。

直接时间测定法和工作抽查的测定工时均涉及工作速度评定（或称“速度评比”）的问题，而所有这三类方法都需要确定宽放时间或宽放率。应该说，直接时间测定法、预定动作时间研究和工作抽查的使用与发展是相辅相成的。

5.7.3 全面生产维护

1. 全面生产维护（TPM）的基本概念

全面生产维护中的“全面”包括以下含义：

- 全面致力于追求经济效益及利润；
- 全面维护系统，包括维护预防、可维护性及预防性维护；
- 员工全面的参与，包括操作工自动维护及团队活动。

设备效率最大化的目标要求完全消除因机器操作产生的故障、缺陷、浪费及损失，TPM 的目标是零停机及零缺陷。通过 TPM 的实施，一些公司报告停机只有原来的 2%，过程缺陷减少了 90%。

有六大损失会给设备效率带来负面影响：

- 停机损失。停机造成时间损失使得生产力降低，要加强预防维修工作，改变事后修理的思维方式，要求做到零故障停机。

● 设置及调试损失。频繁的设备调整会带来损失，应尽量减少设备调整时间甚至无须调整。

● 闲置与小停顿损失。缺陷传感器、流水线产品卡住、生产线不平衡、换班、材料（零件）供应不及时等原因造成短时间的生产中断或速度放慢，从而造成产能损失，对于这些问题，要通过加强现场管理水平和基础管理工作来保证。

● 速度损失。指因设计运行速度与实际运行速度之间差异造成的损失，造成速度减慢的原因一般是由于机器的老化或维修、维护不到位造成的。

● 质量缺陷损失。设备出错造成废品及质量缺陷，过程缺陷造成设备工时损失的同时，造成材料和人工浪费。

● 产出损失。因机器停机及启动造成的产品损失。

表 5—25 显示了相关六大损失及目标。

表 5—25　　六大损失及目标

六大损失	目标
停机损失	0
设置及调试损失	小于 10 分钟
速度损失	0
闲置与小停顿损失	0
质量缺陷损失	0
产出损失	最小化

如果能做到完全消除六大损失，则会给工厂带来显著的改善。如果没有 TPM，精益生产或精益生产系统根本不可能实现。

2. TPM 指标

（1）设备综合效率（overall equipment efficiency，OEE）是用于衡量 TPM 的主要指标，它考虑了三个方面：设备的工作时间、性能和质量水平。用公式表示为：

$$\text{设备综合效率}=\text{时间开动率}\times\text{性能开动率}\times\text{合格品率}$$

时间开动率反映了设备的时间利用情况，性能开动率反映了设备性能的发挥情况，合格品率反映了设备的有效工作情况。

$$\text{时间开动率}=\frac{\text{实际工作时间}}{\text{计划工作时间}}$$

$$\text{计划工作时间}=\text{每班可用时间}-\text{计划停机时间}$$

式中，停机时间主要包括计划性维护、晨会等所需时间；实际工作时间等于计划工作时间减去非计划停机时间。非计划停机时间包括设备故障、产品换型、设备调整等消耗的时间。

例 5—17　若每班单班生产，每班工作 8 小时，每班可用时间为 480 分钟，其中有 15 分钟的换型时间，10 分钟的班前会时间，30 分钟的非计划设备故障。问计划工作时间及时间开动率为多少？

计划工作时间＝每班可用时间－计划停机时间＝480－10＝470(分钟)
实际工作时间＝计划工作时间－非计划停机时间
＝470－30－15＝425(分钟)

$$时间开动率=\frac{425}{470}=90.4\%$$

(2) 性能开动率是指理论产出与实际产出的比值，它考虑了两个方面：净开动率和速度运转率，用公式表示为：

性能开动率＝净开动率×速度运转率

$$净开动率=\frac{产量\times实际节拍}{实际工作时间}$$

净开动率用以测量设备稳定性、小停顿造成的损失、小问题及调试造成的损失。

$$速度运转率=\frac{理论节拍}{实际节拍}$$

速度运转率反映了设备由于老化或维护不良，达不到设计的或理论的节拍所造成的损失。

在本例中，若加工量是 300 件，实际节拍时间是每件 1 分钟，理论节拍时间是每件 40 秒，实际工作时间是 425 分钟，净开动率、速度开动率和性能开动率各是多少?

$$净开动率=\frac{300\times1}{425}=70.59\%$$

$$速度开动率=\frac{40}{60}=66.7\%$$

性能开动率＝0.667×0.705 9＝47.08%

若合格品率为 95%，设备综合效率是：

设备综合效率＝0.904×0.470 8×0.95＝40.4%

在这个例子中，设备综合效率（OEE）很差，为 40.4%。TPM 奖获得者的 OEE 一般大于 85%。理想的情况是：

- 工时利用率大于 90%。
- 性能开动率大于 95%。
- 合格率大于 99%。

3. 实施 TPM 的步骤

日本工厂维护研究所（JIPM）每年颁发预防性维护（PM）奖，评奖标准是基于 TPM 的改进效果，包括：

- 生产效率提升。
- 质量提高。
- 成本降低。

- 库存降低。
- 事故减少或消除。
- 污染控制。
- 工作环境。

将 TPM 原理与公司实际情况有效结合将带来工人与设备利用率的提高，改进员工态度，提高员工技能，改变工作环境和提高员工士气。

(1) 实施步骤。要在几年时间内达到获 TPM 奖的成果，建议实施 12 个步骤。

步骤 1：最高管理层公布进行 TPM 的承诺（报纸、公告）。

步骤 2：通过公司交流程序介绍 TPM（集中的教育课程）。

步骤 3：组织每个职能层面都推行 TPM（以团队形式）。

步骤 4：制定 TPM 方针及目标。

步骤 5：制定详细的 TPM 主计划。

步骤 6：启动 TPM（开始实际工作）。

步骤 7：建立提高设备效率的项目团队（优化努力以达到最大成果）。

步骤 8：培养技能以制定自动维护程序（培训操作工日常维护要求）。

步骤 9：制定计划性维护程序（维护部门开始计划性维护活动）。

步骤 10：操作工及维护技能培训。

步骤 11：制定早期设备管理程序（确保通过对新设备的评估、验证及改进，使其可运用于生产）。

步骤 12：实施 TPM，旨在完美。

(2) 开展 TPM 团队活动。团队活动，包括与职能部门的跨职能活动，是 TPM 的核心，部门主管通常是团队组长，设备清洁、润滑、紧固、检查等活动就是团队活动。进行 TPM 的活动与时间都有监控。团队的发展过程分如下四个阶段：

- 自我发展：成员学习。
- 改进活动：完成团队改进活动。
- 问题解决：团队开始积极地选择问题进行解决。
- 自动管理：团队设定高层目标并独立管理工作。

(3) 具有可维护性与可用性的设备设计。在大部分设备进行故障维修或预防性维护时，设备的可维修性都会影响到时间、材料与费用。易于维护性就是影响这些因素的设计特征。当然对过去初始设计状态的修正也需要计划与成本。

设计可维护性的指导原则将提高可维护性和可用性。

- 标准化：寻找配件的兼容性，减少系统中不同零件类型的数量，这会减少备件库存。
- 模块化：建立模块尺寸、形状的标准，使得装配及拆卸程序标准化。
- 功能包装：将同一内容所需的零件集中在一个包装中。
- 互换性：控制尺寸及功能性公差，这是指插入式装置当有故障零件时，备件可以随时进行互换，一个产品同时可以用在其他装置上。
- 可达性：有一定空间使操作者能够进行适当工作，所有零件都伸手可得。零件能易于够到且易于更换，不需要先将好的零件拆下后才能更换故障零件。

● 故障报警：当发生故障时用一定方法通知操作工，包括用量规、仪表、灯光或声音。

● 问题隔离：错误能被追踪，这是所有维护工作中最耗时的工作，通过预防性维护程序、自带检测设备（BITE）、设计简化及人员培训，这个问题可被降至最低。

● 标识：所有零件都有特定标识，并有记录修理及预防性维护的方法。



本章小结

分析阶段的目标或目的是收集有关现状的数据，分析阶段的成果体现在通过假设检验、回归分析、方差分析等方法，对自变量与因变量的关系进行统计分析，展示两个变量的因果关系图，找出问题产生的根本原因，对需改进的方面进行简要描述。

分析阶段需要解决的问题是确定收集到的数据是否可靠；如何确认潜在原因；用什么工具收集特定的数据；哪些因素是根本原因，或是对问题影响最大的原因；有几个重要的变量影响过程；是哪些变量；已确认出哪些变量是变异的来源，等等。

在分析阶段结束之前还应该明确的问题是能否找到任何可以实现快速改进的方案；过程能力可以进行什么改进；在最终解决方案建立和实施之前，针对某些缺陷，可以采取哪些过渡性问题隔离措施；改进计划是怎样的；下一步要怎样做（包括时间安排、责任落实和目标期望）；改进效果量化的根据是什么。

分析阶段使用的相关工具有：过程图等图表工具，数据和过程分析，抽样，变异源分析，假设检验，相关和回归分析，方差分析，非参数检验等统计和管理工具。

精益生产是工业工程技术在企业中的具体应用。

流程分析是从整个过程或一系列的操作进行全盘考虑，分析工程的分割、顺序、配置是否合适，作业是否多余或重复，搬运、停滞、储存的次数是否太多，时间是否太长等问题，进而改善工程顺序、方法，增加净作业比例及增值的作业，以提高工作效率。价值流图是流程分析的有效工具。

作业时间分析指运用系统分析的方法把工作中不合理、不经济、混乱的因素排除掉，寻求更好、更经济、更容易的工作方法。

先进的设备管理系统是制造型企业生产系统的最有力的支持工具之一，能够保证生产计划的如期执行以及时响应客户的市场需求，同时能够有效地降低企业的制造成本，如库存积压成本，维修维护成本及其他管理（人工、时间）成本。TPM 活动就是通过全员参与，并以团队工作的方式，创建并维持优良的设备管理系统，提高设备的开机率（利用率），增进安全性及高质量，从而全面提高生产系统的运作效率。

σ 第6章

改　进

通过前面三个阶段的项目工作，团队对要解决的问题以及引起该问题的根本原因等，有了比较准确的把握，从而奠定了从根本上解决这些问题的基础。至此，项目工作进入了关键性的阶段——改进阶段。

6.1　改进方法概述

改进阶段的目标是形成针对根本原因的最佳解决方案，并且验证这些方案是有效的。一般来说，为了达到上述目的，需要完成以下方面的工作：

（1）产生解决方案。通常这些解决方案的产生需要专业知识和对流程的认知与经验等。但是，也有一些方法和原则，将帮助绿带、黑带及其项目团队制定出最佳解决方案。试验设计（design of experiment，DOE）是帮助团队产生最佳解决方案的强有力的工具，此外，还有很多精益改进工具可以使用。

（2）评价解决方案。改进方案产生后，需要对其优劣进行评价。一般从改进方案的效果、可行性、成本投入、周期等方面，评价改进方案的优势与劣势。在许多六西格玛项目实践中，团队会产生多个改进方案，一般选用因果矩阵的评价方法，从项目综合优势角度，选择一个最佳的方案加以验证实施。

当然，对改进方案的评价，不应仅从技术方法上评价，还应该考虑这些方法的被接受程度，如它们将对使用这些方法的人员（包括操作人员、管理人员等）造成什么影响，他们是否愿意接受这样的改进等。有时，需要退一步而求其次。因为，没有好的接受程度，就不会有好的改进效果。有时，团队选用的方案，不一定是技术上最佳的，而是最容易被大家接受的。

（3）完成改进方案的风险评估。一个改进方案的实施是否会给顾客以及流程带

来其他问题？这是每一个绿带和项目团队需要把握的问题。一个好的改进方案，是不能够以给顾客或企业带来较高的风险为代价的。评价改进方案的风险，并且对高风险项加以有效控制，是改进阶段项目团队必须要完成的一项工作。对改进方案进行风险评估的方法比较多，但最常用的是使用 FMEA 方法。本书第 8 章会比较详细地介绍 FMEA 方法，这里不赘述，但需要强调的是，对改进方案进行风险分析是非常必要的。而改进方案的 FMEA 结果，将是控制阶段产生控制计划的必要基础。

（4）改进方案有效性的验证。任何改进方案均需要验证其有效性，才能最终被确认为团队将采取的方案。而其有效性必须通过量化结果加以证明。这些量化结果包括：通过对样本的测量和统计分析得到改进方案实施效果的数据以及作出推断的置信程度；改进后缺陷率降低的情况或者改进后过程能力的评估数据等。

（5）改进方案的实施。所产生的最佳解决方案需要实施，而在实施时要考虑如何实施以及由谁实施、实施进度、全面推广还是局部实验、纠正措施等问题，以使方案能够有效实施，并产生好的结果。

本章 6.2 节将讲述一些常用的创造性思维方法。创造性思维方法是突破传统思维模式，对遇到的难题进行计划、设计和改进的系统性问题解决方法。试验设计（DOE）是产生解决方案的强有力工具，但是 DOE 所使用的统计分析需要较深入的统计学知识，其详细内容在黑带教材中介绍，本书只在 6.3 节试验设计基础中简单介绍 DOE 初步的概念和方法，在 6.4 节中简单介绍全因子设计的试验方法及结果的统计分析。由于产生解决方案也有很多精益改进工具可以使用，相对而言这些工具所需要的理论基础不复杂，6.5 节中将介绍常用的精益改进工具。最后在 6.6 节中介绍改进方案的评价与实施。

6.2 创造性思维方法

创造性思维方法激发的构思或创意越多，获得高质量的问题解决方案的可能性就越大，它是提出有效改进方案的一个强有力的工具。它帮助你预期自己需要达到的目标，并使之顺利实现。创造性思维是一种理性的思维方式，是在实践的基础上发展的，是对问题在原有的知识、经验的基础上以全新的、独创性的、新颖的方式进行的一种高水平的复杂思维活动。创造性思维有别于一般思维，主要表现在思维形式的反常性、思维过程的辩证性、思维成果的独特性、新颖性及思维主体的能动性。只有采用正确的思维方法，才可以获得成功的、有效的方案。创造性思维方法主要包括头脑风暴法＋亲和图法、发散性思维、五个为什么、六顶思考帽法等。创造性思维方法是提出有效改进方案的一种工具，提出有效改进方案的方法还包括横向比较、借鉴其他项目、试验设计、FMEA、防错技术、通过查找根本原因确定改进方案、变异源分析等。下面重点讲述几种常用的创造性思维方法。

1. 头脑风暴法十亲和图法

美国学者阿历克斯·奥斯本于1938年首次提出头脑风暴法。头脑风暴法的主要作用是收集创意，在改进阶段主要是产生有效的改进方案。头脑风暴就是让与会者相互交流，进行智力碰撞，产生智力火花，使与会者的讨论不断地集中精化。在进行头脑风暴的过程中，所追求的就是更多的创造性构思。头脑风暴法的核心在于创造一种自由奔放的思考环境，诱发创造性思维的共振和连锁反应，产生更多的方案。

头脑风暴法参与人数以5～10人为宜，一般以会议的形式，设有一名主持人，只负责主持会议，不参与提出创造性的意见。为了使头脑风暴会议的效率更高，效果更好，可在会前做一点准备工作。如收集一些资料预先给大家参考，以便与会者了解与议题有关的背景材料和外界动态。头脑风暴追求方案数量，越多越好，同时主张与会者独立思考、自由畅谈。过程中严禁评判，提倡在别人创意的基础上提出更好的创意。头脑风暴一般分为三个阶段：第一阶段关注的是小组创造出的方案的数量；第二阶段是审视这些方案，删除与实现目标无关的方案；第三阶段主要是对筛选出来的方案进行进一步的审视，并根据小组意见，对方案进行优先排序。

头脑风暴法强调集体思维，使信息分散在不同的人员之间，有利于以后方案的实施，使方案更容易被大家接受。

在第2章中已经讲述了亲和图，亲和图主要用于归纳思想，认识事物。在改进阶段主要用于在头脑风暴法之后，对罗列的方案进行组织。有两种方式作亲和图：先创建分类，然后将方案分类组合；先将所有的方案按相似性分组，在组合完成后给分组命名，从而得到改进方案的亲和图。

2. 发散性思维

发散性思维，又称扩散性思维、辐射性思维、求异思维，是把问题的“点”引向“面”的思维，是围绕一个问题向不同方向、角度、全面扩散的思维方法，是对问题寻求多种解决方案的思维。其特点是限定条件，而不限定结果。它的核心是对信息尽量产生多个发散点，而在改进过程中它的核心是尽量产生多个解决方案。

通过发散思维，可以活跃人的思路，使人的思维敏捷，在探究问题的过程中，能提出大量可供选择的方案、办法或建议，特别是能提出一些别出心裁、出人意料的新鲜方案，使问题奇迹般得到解决，这些方案的提出有可能使人的思维方式得到改变，使问题的假设受到一定的挑战。

3. 五个为什么

五个为什么是一种通过持续提问“为什么会发生这种问题”来逐步揭示问题深层次原因的方法（见图6—1）。

一般情况下，通过五个甚至五个以内的“为什么”的分析，就可以发现导致问题产生的深层次原因，从而有利于提出有效的解决方案。

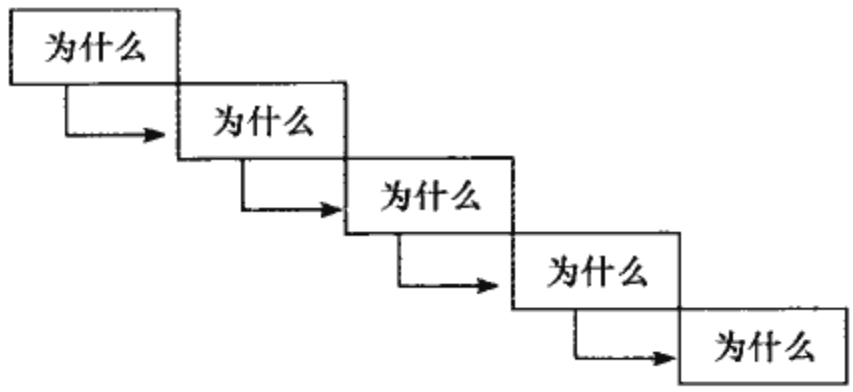


图 6—1　五个为什么

4. 六顶思考帽法

六顶思考帽是英国学者爱德华·德·波诺（Edward de Bono）开发的一种思维训练模式，或者说是一个全面思考问题的模型。人们面临挑战性的重大决策时，这种方式可以帮助他们进行创造性的思考。这个技巧所依据的观点是，存在六种不同的思维类型，每一种都与某种颜色相联系。下面着重介绍这六种思维类型。

蓝帽子表示组织安排。我们的进展如何？现在应使用哪种颜色的帽子？接下来应该做什么？

白帽子表示信息和数据。我们现在有什么数据信息？需要什么信息？还缺少什么信息？该如何获取信息？

红帽子表示直觉、感觉、情绪以及基于直觉的想法。我们只需即时说出自己的想法、自己的感觉是什么，不需要考虑太多。

黑帽子表示谨慎、判别、系统的思考。这是不是真的？是不是可行？会不会成功？存在哪些缺陷？

黄帽子表示向好的方向进行思考。实施这种方案有什么好处？谁会得到好处？好处来自何处？这种方案为什么可以做？为什么会成功？

绿帽子表示异见、新意、创新。有没有其他的解决方案？

虽然六顶帽子代表了六种思维方式，不同人的思维方式可能不同，但是在进行讨论时，六顶帽子每个人都应该尽量试戴，从而全面看待问题，这有利于产生最佳的效果。

6.3　试验设计基础

试验设计方法对产生或形成最佳改进方案的作用是关键性的。许多项目在形成改进方案时，面临的重要问题是：哪些自变量 X 显著地影响着因变量 Y？怎样去改变这些自变量 X 或者这些自变量 X 取什么值时将会使因变量 Y 达到最佳值？这时，可以使用的最主要的手段和工具就是试验设计（DOE）：计划安排一批试验，并严格按计划在设定的条件下进行这些试验，获得新数据，然后进行分析，得到所需的关键信息，从而获得改进的途径。试验设计就是研究如何以最有效的方式安排试验以获得含有最大信息量的数据的一门科学。

如上所述，DOE 所要达到的目的是分析出“哪些自变量 X 显著地影响着因变量 Y，这些 X 取什么值时将会使 Y 达到最佳值”。前面所介绍的统计方法中也有与之类似目的的，那么 DOE 与这些方法间是什么关系呢？

要注意的是，在分析阶段，分析完全依赖于未改变当前生产条件时所获得的数据；而在改进阶段，可能要考虑全新的工艺，也可能要打破目前生产条件的限制，大胆考虑那些从未使用过的值，因而有可能使 Y 获得最佳值。总之，两个阶段的条件限定是不同的。对于过去已经获得的结论要重新考虑其适用性，对于新情况更要开创性地去探索以求得其规律性，以前的结论不能再直接套用。因此，这个阶段是一个最富挑战性的阶段，也是五个阶段中最困难的阶段，要做好足够的精神准备。同时，既然下决心要做试验，期望获得比过去好得多的结果，那也一定要承受可能得到比过去坏得多的结果，加上任何试验的设计和实施及分析都要付出大量的财力、物力和人力，就必然要万分慎重地对待，按照团队工作条例，经过讨论并获得批准后才能付诸实施，切记不要贸然行事。

如果能够利用历史数据获得一些信息，决不应轻易放弃。通常可以使用多元回归分析（multiple regression）方法对历史数据加以分析，获得相应的回归方程，得到 Y 与各个 X 间的关系式。但这种关系的获得是“被动”的，因为使用的是已有的现成数据，几乎无法控制适用范围，无法控制方程的精确度，只能处于“有什么算什么”的状况。而在改进阶段则处于一种全新的状况，面对的首要问题是如何获得更有价值的数据，或者是用最少的试验次数揭示 Y 与 X 之间的关系。当然，在计划好试验，获得了数据之后要进行一系列分析工作，而其中最重要的一项是判断因变量 Y 受哪些自变量 X 的显著影响，并进一步找出 Y 与 X 间的关系，这时就要使用方差分析和多元回归分析方法。因此，方差分析和多元回归分析都是 DOE 分析中所使用的工具。这些工具在前面各章已有介绍，在此不再重复。

6.3.1 试验设计中的基本术语

一般情况下，实际问题都是复杂的，任何数学模型都只是它的某种抽象概括，试验设计也不例外。我们先给出一些有关试验设计的基本概念，稍后将给出一些更深入的概念的定义。

1. 因子：可控因子与非可控因子

将过程模型简化为图 6—2，其中因变量 Y 是我们关心的输出变量，称为“响应变量”（response）或“指标”。一般情况下，需要考虑多方面的指标，但现在，在绿带教材中将只考虑单个响应变量的情况。将影响响应变量 Y 的那些自变量 X 称为试验问题中的因子（factor），这里假定，X_1，X_2，…，X_k 是人们在试验中可加以控制的因子，称可控因子（controllable factor），它们是输入变量，是影响过程最终结果的。这些变量可以是连续型的（通常情况），也可以是离散型的。影响过程及结果的变量除了这些可控因子外还可能包含一些可以记录但不可控制的非可控因子（uncontrollable factor）：Z_1，Z_2，…，Z_n 它们通常包括环境状况、操作员、材料批次等。这些变量可能取连续值，也可能取离散值。对于这些变量，通常

很难将它们控制在某个精确值上，实际问题中它们确实也可能取不同的值。这些非可控因子称为噪声因子（noise factor），因为常把它们当作误差来处理。

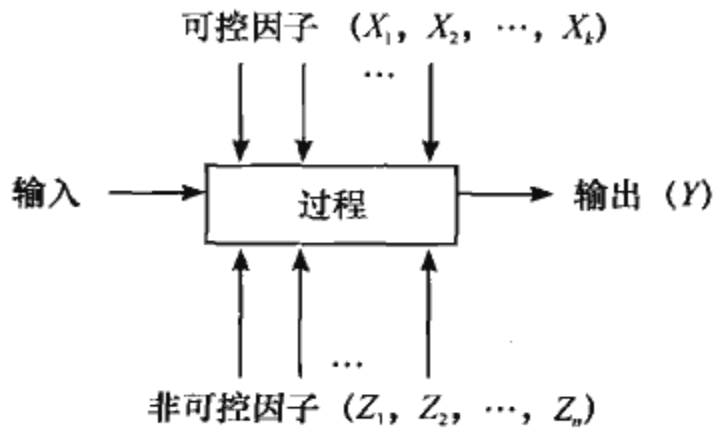


图 6—2　过程模型示意图

2. 水平及处理

为了研究因子对响应变量的影响，需要用到因子的两个或更多个不同的取值，这些取值称为因子的水平（level）或设置（setting）。各因子皆选定了各自的水平后，其组合称为处理（treatment）。按照设定的因子的水平组合，就可以进行试验了。一次试验将会得到一次响应变量的观测值，这就是一次试验（trial or experimental run），简称为一次运行（run）。一个处理可以进行多次试验。

3. 试验单元与试验环境

试验单元（experiment unit）指对于对象、材料或在制品等载体，处理（即试验）应用于其上的最小单位。例如，按因子组合规定的工艺条件所生产的一件（或一批）产品，接受治疗的一个病人，等等。

以已知或未知的方式影响试验结果的周围条件，称为试验环境（experiment environment）。通常包括温度、湿度、电压等。

4. 模型与误差

考虑到影响响应变量 Y 的可控因子是 X_1，X_2，…，X_k，因此，在试验设计中建立的数学模型是：

$$Y=f(X_1,X_2,\cdots,X_k)+\epsilon$$

式中，Y 是响应变量；X_1，X_2，…，X_k 是可控因子；f 是某个已知的确定的函数关系（例如线性函数、二次函数等）；ϵ 为误差。这里的误差 ϵ 主要是非可控因子（或噪声）所造成的试验误差（experimental error），当然误差 ϵ 还包含了测量误差。为了不使测量误差影响分析结果，通常要在试验进行前，先进行测量系统分析，只有测量误差满足了对测量系统的最低要求后，试验才能开始进行。有关测量系统的分析在测量阶段已作了细致的讨论。

5. 主效应和交互效应

举一个最简单的因子设计例子来说明主效应和交互效应的概念。

在农田试验中，考虑两个因子，每个因子皆有两个水平。因子 A：浇水，低水平：水少；高水平：水多。因子 B：施肥，低水平：肥少；高水平：肥多。以产量 Y 为响应变量（单位：kg），列表如表 6—1 所示。

表 6—1 **农田试验产量数据表** 单位：kg

B \ A	水少	水多
肥少	100	120
肥多	130	150

如何分析因子 A 浇水的效应呢？由于 A 处于低水平的情况（不考虑因子 B），得到的产量的平均值是 $\frac{100+130}{2}=115$，A 处于高水平的情况（不考虑因子 B），得到的产量的平均值是 $\frac{120+150}{2}=135$，产量由 115kg 提高到 135kg 完全是因子 A 的作用，这时，称因子 A 的主效应（main effect）为135－115＝20kg。

因子 A 的主效应＝A 处于高水平时 Y 的平均值－A 处于低水平时 Y 的平均值

同样可以算出：

$$\text{因子 } B \text{ 的主效应}=\frac{130+150}{2}-\frac{100+120}{2}=140-110=30\text{kg}$$

不但如此，我们还发现，当因子 B（肥料）处于高水平时，因子 A 的效应为 150－130＝20，当因子 B（肥料）处于低水平时，因子 A 的效应为 120－100＝20，二者完全相同。如果以因子 A 为横轴，以响应变量（产量）为纵轴作图（见图 6—3），可以看出，两条线是平行的。

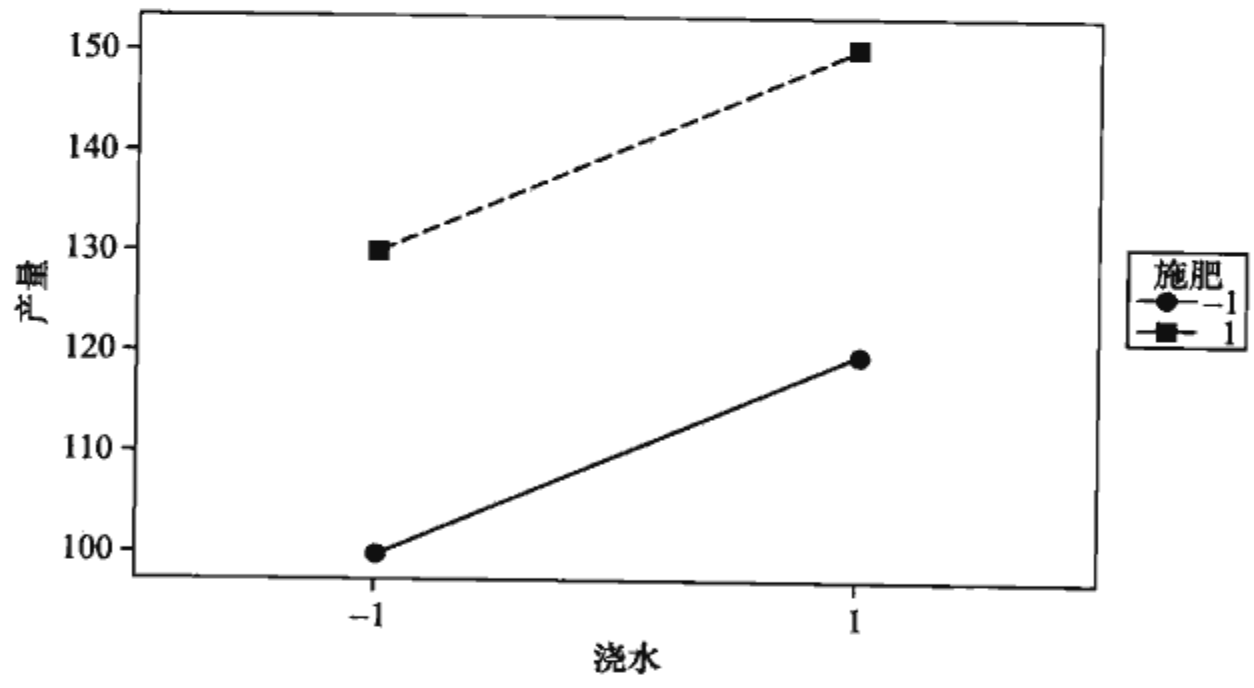


图 6—3 无交互作用时的效应图

如果数据换成另一组（见表 6—2），由于因子 A 处于低水平的情况时产量的平均值是 $\frac{100+130}{2}=115$，因子 A 处于高水平的情况时产量的平均值是 $\frac{120+170}{2}=$

145，称因子 A 的主效应为 145－115＝30kg。同样可以算出：

$$\text{因子 B 的主效应}=\frac{130+170}{2}-\frac{100+120}{2}=150-110=40\text{kg}$$

表 6—2　　农田试验有交互作用的产量数据表

B \ A	水少	水多
肥少	100	120
肥多	130	170

我们发现：当因子 B（肥料）处于高水平时，因子 A 的效应为 170－130＝40，当因子 B（肥料）处于低水平时，因子 A 的效应为 120－100＝20，二者大不相同。仍以因子 A 为横轴，以响应变量（产量）为纵轴作图（见图 6—4），可以看出，两条线是不平行的。

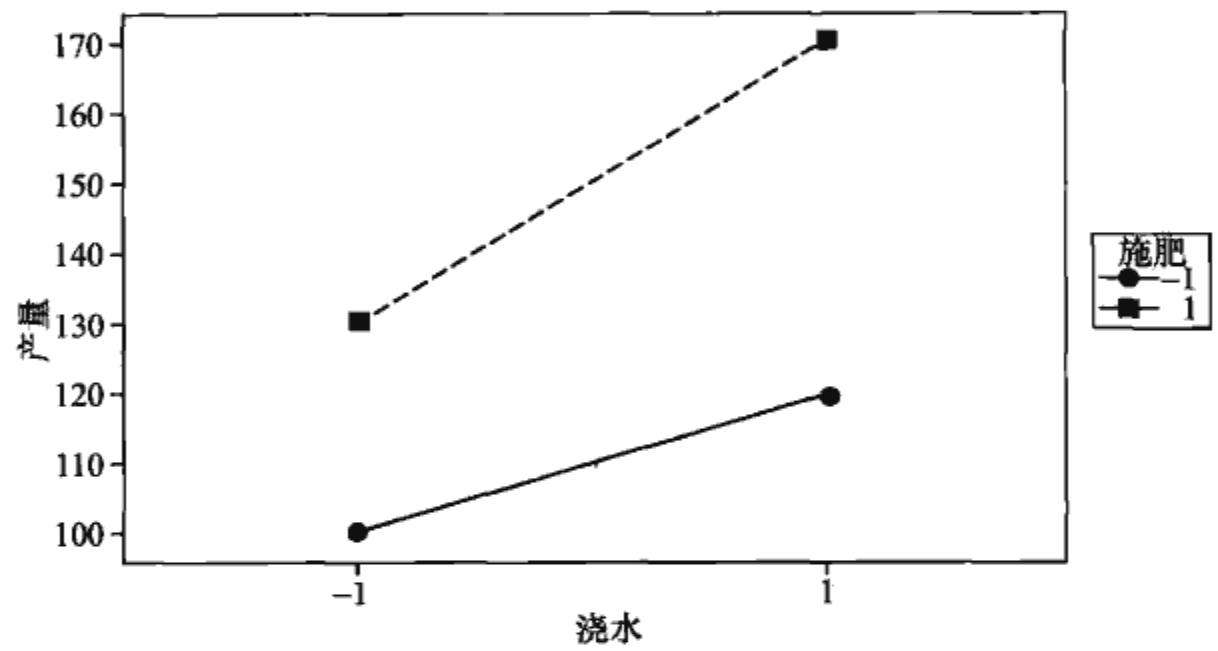


图 6—4　有交互作用时的效应图

定义两因子间有交互作用为：如果因子 A 的效应依赖于因子 B 所处的水平，则称因子 A 与因子 B 之间有交互作用（interaction）。

显然，在前一组数据中，因子 A 与因子 B 没有交互作用；在后一组数据中，因子 A 与因子 B 是有交互作用的。那么，如何来度量交互作用的大小呢？如果没有交互作用，当因子 B 处于不同水平时，因子 A 的效应是固定不变的，因此要考虑的定义交互作用的出发点就是，当因子 B 处于不同水平时，因子 A 的效应到底差了多少？定义交互效应（interaction effect）为下式：

$$AB\text{ 交互效应}=\frac{\text{因子 }B\text{ 处于高水平时}\ \text{因子 }A\text{ 的效应}-\text{因子 }B\text{ 处于低水平时}\ \text{因子 }A\text{ 的效应}}{2}$$

在后一组数据中，AB 交互效应$=\dfrac{(170-130)-(120-100)}{2}=10$。同样，交换 AB 顺序，可以得到公式：

$$BA\text{ 交互效应}=\frac{\text{因子 }A\text{ 处于高水平时}\atop\text{因子 }B\text{ 的效应}-\text{因子 }A\text{ 处于低水平时}\atop\text{因子 }B\text{ 的效应}}{2}$$

BA 交互效应$=\dfrac{(170-120)-(130-100)}{2}=10$，显然二者是相同的。以后不再区分 $A*B$ 或 $B*A$。

需要注意的是，如果两个因子间存在显著的交互作用，就不能只用主效应的大小来作为该因子是否重要的判断依据。有时一个因子主效应很小，只要某个含此因子的交互作用效应显著，则这个因子就是重要的，就应予以保留。

6.3.2 试验设计的基本原则

有三个基本原则在试验设计中必须遵循，为了清楚地说明这些原则，先看一个简单的例子。

例 6—1 提高铣床加工精度试验。

在生产引擎活塞时，用铣床加工其顶面的平面度是关键指标。在提高顶面加工精度（即平面度数值越小越好）的工艺研究中，发现有 3 个因子很重要，它们是因子 A：铣刀转速；因子 B：铣刀水平移动速度；因子 C：铣刀后倾角的角度。对每个因子都设定了高低两个水平。我们希望考察这 3 个因子中，哪些因子效应及交互效应是显著的。其具体取值如下：

因子 A——铣刀转速。低水平：800 转/分钟；高水平：900 转/分钟。

因子 B——铣刀水平移动速度。低水平：2.4 毫米/秒；高水平：2.8 毫米/秒。

因子 C——铣刀后倾角的角度。低水平：80 度；高水平：84 度。

如何安排试验呢？3 个因子按二水平全面搭配应该有 8 种组合。先看如表 6—3 所示的正交表。

表 6—3　　三因子正交试验代码表

因子 / 序号	A	B	C
1	−1	−1	−1
2	1	−1	−1
3	−1	1	−1
4	1	1	−1
5	−1	−1	1
6	1	−1	1
7	−1	1	1
8	1	1	1

按照表 6—3 来安排试验，具体如下：凡表中列为−1 者，试验时取低水平，凡表中列为 1 者，试验时取高水平，这样可以进行 8 次试验。

之所以称如表 6—3 所示的表为正交表（orthogonal array），是因为它有两个特点：

（1）任一列中正负号出现次数各占一半，即在试验中，每个因子取低水平、高水平次数相同。

（2）任两列中，“＋＋”，“＋－”，“－＋”，“－－”四种搭配出现的次数都是相等的。“搭配出现次数都相等”的这种性质，用数学上的方法表示，就是两列间的乘积的和为0，即代数上说的两列“正交”。这种正交性将使试验结果的分析有“均衡分散，整齐可比”的特点，因而具有很多优良性质，而且很容易计算出相应的回归方程。这种试验设计方法常称为正交试验设计法（orthogonal experimental design）。

在本例中，3个因子的水平都被取定后，就可以用它们的组合条件来进行试验了，例如，第1号试验条件是3个因子皆取低水平，铣刀转速取800转/分钟；铣刀水平移动速度2.4毫米/秒；铣刀后倾角的角度为80度。按此条件加工一件活塞，测量其顶部的平面度。依此类推，总计可以得到8个平面度，Y_1，Y_2，…，Y_8。这里的试验单元就是一件活塞，我们要分析的是3个因子的主效应和交互效应。

把正交试验的代码表列在表中的前3列，分别记为A_c，B_c和C_c，把各因子所取的真实值列在紧接着的3列中，将8次试验结果获得的平面度Y记录在最后一列，数据如表6—4所示。

表6—4　　三因子正交试验结果表

因子 / 序号	A_c	B_c	C_c	转速（转/分钟）	移速（毫米/秒）	倾角（度）	平面度（μ）
1	－1	－1	－1	800	2.4	80	34.8
2	1	－1	－1	900	2.4	80	33.5
3	－1	1	－1	800	2.8	80	40.1
4	1	1	－1	900	2.8	80	35.1
5	－1	－1	1	800	2.4	84	33.4
6	1	－1	1	900	2.4	84	32.3
7	－1	1	1	800	2.8	84	41.4
8	1	1	1	900	2.8	84	34.7

有三个基本原则在试验设计中必须考虑：重复试验（replication）、随机化（randomization）和区组化（blocking）。

重复试验是试验设计中的第一个原则。重复试验是指一个处理施于多个试验单元，这些单元是在统计推断中一个处理所形成的总体的代表，它可以使试验误差的大小得以估计。通常的显著性检验都是拿不同处理间形成的差别与随机误差相比较，只有当处理间这种差别比随机误差显著地大时，才说“处理间的差别是显著的”。没有随机误差就无法进行任何统计推断，因此，在试验设计中安排重复试验是必不可少的。需要注意的是：一定要进行不同单元的重复（replicate），而不能仅进行同单元的重复（repetition）。换言之，一定要重新做试验即重复试验，而不能仅是重复观测或重复取样，在试验中一定要包含真正的重复。在例6—1中，如果

只进行这 8 次试验，就无法估计出试验误差，从而无法进行显著性分析，一定要安排重复试验才行。具体的做法可以有多种，8 个试验全部再重复一次，即进行 16 次试验；也可以只在某个试验条件下重复 3 次或 4 次（但这样就破坏了正交性和平衡性）。最好的办法是在上述试验条件的中心点处重复 3 次或 4 次，这样既安排了重复试验又不破坏试验计划的正交性和平衡性。实施的具体结果见后面的分析结果。

随机化是试验设计中的第二个原则。随机化的含义是以完全随机的方式安排各次试验的顺序和/或所用试验单元。这样做的目的是防止那些试验者未知的，但可能会对响应变量产生的某种系统影响。在例 6—1 中，假使在同一天内进行的 8 次试验之顺序就按照表 6—4 所列顺序进行，会有什么问题呢？如果当天的电压有一种由高向低变化的趋势，而恰好电压的降低将导致铣床加工出的平面度数值的增大，那么很明显，前 4 次试验是在电压较高的情况下进行的，后 4 次试验是在电压较低的情况下进行的，如果后 4 次平面度数值明显大于前 4 次，而前 4 次试验恰好是因子 C（铣刀后倾角）处于低水平（80 度）时进行的，而后 4 次试验恰好是因子 C（铣刀后倾角）处于高水平（84 度）时进行的，那么后 4 次平均值变大，究竟是因子 C 的作用还是电压的作用，是无论如何也分辨不清的。如果将这 8 次试验顺序完全打乱，则不会再出现上述问题。随机化并没有减少试验误差本身，但随机化可以防止未知的但可能会对响应变量产生的某种系统影响。

区组化是试验设计中的第三个原则。各试验单元间难免会有某些差异，如果能按某种方式把它们分成组，而每组内可以保证差异较小，即它们具有同质齐性(homogeneous)，则可以在很大程度上消除由于较大试验误差所带来的分析上的不利影响。一组同质齐性的试验单元称为一个区组（block），将全部试验单元划分为若干区组的方法称为分区组或区组化。通过在同一个区组内比较处理间的差异，就可以使区组效应在各处理效应的比较中得以消除，从而使对整个试验的分析更为有效。例如，假定在上（下）午时段之内的差异不大，而上下午差异可能较大，那就把上午、下午当作两个区组。这时在分析中就可以去除掉上下午间的差异的影响，或尽可能把试验全都安排在上午（或下午）进行。如果分区组有效，则这种方法在分析时，可以将区组与区组间的差异分离出来，从而能大大减少可能存在的未知变量的系统影响，这就是分区组的好处。当然，在区组内还应该用随机化的方法进行试验顺序及试验单元分配的安排。什么时候用分区组，什么时候用随机化呢？在试验的设计中应遵照下列原则：能分区组者则分区组，不能分区组者则随机化。

6.3.3 试验设计的类型

根据试验目的而分的主要是两大类：因子筛选设计（screening design）及参数优化设计（parameter optimization）。因子筛选设计是通过试验设计从众多的影响因素中筛选出对 Y 影响显著的 X；参数优化设计的目的是找出最佳的影响因素 X 的设置水平从而使 Y 达到最优。常用的因子筛选设计包括全因子设计（full factorial design）、部分因子设计（fractional factorial design）、Plackett-Burman 设计等。参数优化设计需要确定 Y 与 X 间的关系式，找出 Y 对于 X 的含二次项的回归方程，

这种试验设计称为响应曲面设计（response surface design）。

将全部因子全部水平的全部搭配都进行至少一次试验的安排方法称为全因子设计法。这是人们容易想到的一个方法，而且可以获得相当多的信息。但是由于因子个数增加时，全因子试验的次数会急剧增多，在实际工作中常常行不通。只能从中选择一部分来进行，这就是部分因子设计（fractional factorial design）。具体的实施方法在黑带课程中介绍。试验设计的结果需要使用统计分析工具进行分析，如果拿到试验结果后，只是从中挑选那个最优值就结束，就浪费了大量的有用信息。试验设计的统计分析方法不仅能从试验结果中找到最优值，而且可以判明哪些因子影响显著，哪些因子影响不显著，还可以得到有关的变化规律，预测将要达到的最佳值是多少和这个最佳值将在什么范围内波动，这些就是统计分析方法的威力。响应曲面设计可以建立二次回归方程，从而得到更加细致的结果，但试验次数也会相应增加，只有到了最后阶段因子个数已经很少（一般不超过 5 个）才能使用。由于响应曲面设计需要更多的统计工具的支持，详细的理论基础和具体的实施方法在黑带课程中介绍。

另一类很重要的试验目的是寻求系统的稳健性（robustness）。稳健性是指系统的抗干扰能力要强，即当系统受到难以控制的因子（“噪声”）的严重影响时，系统输出的变异性（variation）要足够小。为做到这一点，应尽量选择那些使得系统对噪声变化不敏感的控制因子的某种水平的组合来达到目的，这就是稳健参数设计（robust parameter design）。这类问题在六西格玛改进工作中也具有重要意义，它们的理论和方法在黑带课程中介绍。

如果讨论的是配方问题，例如在橡胶、造纸、药品生产等行业中，研究在整个产品中各个分量所占的比例问题，显然，这些比例的总和应该为 100%。研究这类问题的试验设计称为混料设计（mixture design），这些内容请参考有关统计资料。

6.3.4 试验设计的策划与安排

人类认识自然界的过程是个循序渐进的过程。先根据已有的知识提出某种设想（idea），设计一个试验去验证或否定它，从试验中获得的数据帮人们验证或修正初始的设想，然后提出一个更新、更深入的设想，再设计新的试验……这个反复的过程会一直持续下去，直到形成较为完整的理论结果。进行试验也是一个学习过程，不可能一蹴而就。不要企图“毕其功于一役”，进行一次试验就结束战斗。一般来说，试验要进行好几轮，一般采用下面几个步骤。

1. 用部分因子设计进行因子的筛选

最开始，情况不很清楚，考虑到影响响应变量的因子个数可能较多（如 5 个以上），这时应在较大的试验范围内，先进行因子的筛选，通常应使用部分因子试验设计法，这样获得的结果可能较为粗糙，但试验次数可以大大减少，只要达到筛选的目的即可。

2. 用全因子试验设计法对因子效应和交互作用进行全面分析

当因子的个数被筛选到小于或等于5个后，可以在稍小范围内进行全因子试验设计以获得全部因子效应和交互作用的准确信息，并通过中心点上的试验结果判定模型是否存在曲性，最优结果是否在试验区域内，如果不在试验区域，如何确定最速上升方向来寻找覆盖最优解的试验区域。本绿带教材中将详细介绍全因子试验设计的安排及分析方法。

3. 用响应曲面设计方法确定回归关系并求出最优设置

当因子个数较少且响应输出与影响因素之间的关系可能存在曲性时，就有条件采用响应曲面设计分析方法，在包含最优点的一个较小区域内，对响应变量拟合一个二次方程，从而可以得到试验区域内的最优点。

以上所说的当然是典型的步骤，在实际工作中，可能跳过某个环节，也可能在某个步骤上反复进行好几次。总之，要不断地筛选因子，不断调整试验的范围和因子水平的选择，经过几轮试验后才能最终达到试验的总目标。

6.3.5 试验设计的基本步骤

粗略地说，试验的计划与实施应该包含计划、实施及分析三个阶段。

1. 计划阶段

计划阶段又可以分为下面几个步骤：

(1) 阐述目标。所有团队成员都要投入讨论，明确目标及要求。究竟是为了筛选因子还是为了找寻关系式？最终要达到什么要求？

(2) 选择响应变量。在一个试验中若有多种响应，则要选择起关键作用的。从统计分析和减少试验次数的角度来看，能用连续型指标做度量的响应变量远比属性值响应（好或坏，通过或不通过）好得多。

(3) 选择因子及水平。用流程图和因果图先列出所有可能对响应变量有影响的因子清单，然后根据数据和各方面的知识进行细致分析作初步筛选。不能确定是否应该删除者就要先保留。对于水平的选择也要仔细处理，一般来说，高低水平的设置应足够分散，这样效应才能检测出来，但也不要太分散，过于分散就难以保证因子的影响是线性或二次曲性，这会使统计建模和预测变得困难。

(4) 选择试验计划。根据试验目的，选择正确的试验类型，确定区组状况、试验次数，并按随机化原则安排好试验顺序及试验单元的分配，排好计划矩阵（planning matrix）。

2. 实施阶段

严格按计划矩阵的安排进行试验，除了记录响应变量的数据外，还要详细记录试验过程的所有状况，包括环境（气温、室温、湿度、电压等）材料、操作员等。试验中的任何非正常数据也应予以记录，以便后来分析使用。

3. 分析阶段

对数据的分析方法应与所应用的设计类型相适应。分析中应包括拟合选定模型、残差诊断、评估模型的适用性并设法改进模型等。当模型最终选定后，要对此模型所给出的结果作必要的分析、解释及推断，从而提出重要因子的最佳设置及响应变量的预测。当认定结果基本达到目标后，给出验证试验（confirmation run）的预测值，并做验证试验以验证最佳设置是否真的有效。关于分析阶段的具体方法和所使用的统计工具请参见以后各节的详细叙述。

6.4 全因子设计简介

全因子设计是指所有因子的所有水平的所有组合都至少要进行一次试验的设计。由于包含了所有的组合，全因子试验所需试验的次数会较多，但它的优点是可以估计出所有的主效应和所有的各阶交互效应，因此也称析因设计。在因子个数不太多，而且确实需要考察较多的交互作用时，常常选用全因子设计。

当因子水平超过两个时，由于试验次数随因子个数的增长而呈指数速度增长，因而通常只做二水平全因子试验。如果确实需要做三水平或更多水平全因子试验时，计算机软件中也有与二水平完全相同的试验设计及分析方法，本节对此不再单独叙述。但通常认为，加上了中心点之后的二水平试验设计在工程实践中已经足够了，在相当大程度上它可以代替三水平试验，而且分析简明易行，已被普遍使用。

6.4.1 二水平全因子试验概述

将 k 个因子的二水平的全因子试验记为 2^k 试验。这是整个全因子试验的记号，而不仅仅是试验次数。当然，2^k 数值本身也恰好是 k 个因子的二水平的全因子试验所需要的最少试验次数。这类记号在试验设计中是常常用到的。

1. 2^k 析因设计

一般析因设计有几种特殊情况很重要，因为它们广泛应用于研究工作，并且它们也是一些有重要实践价值的设计的基础。其中最重要的是，有 k 个因子，每个因子仅有两个水平。这些因子可以是定量的，例如温度、压力；也可以是定性的，例如机器的类型、不同的操作员。这类设计的一个完全重复需要 $2\times2\times\cdots\times2=2^k$ 个观测值，因此称为 2^k 析因设计。

本章重点关注这类极为重要的设计。假定：（1）因子是固定的；（2）设计是完全随机化的；（3）满足通常的输出为正态性的假定。

在试验工作的早期阶段，可能有很多因子需要讨论时，2^k 设计就特别有用。它只需最少的试验次数就可以研究完全析因设计的 k 个因子。因此，这些设计可以广泛地用于因子筛选试验（factor screening experiment）。

因为每一个因子仅有两个水平，所以假定响应在所选的因子水平范围内是线性的。在许多因子筛选试验中，当开始研究过程或系统时，这通常是一个合理的假定。

2. 试验的安排、中心点的选取及随机化排序

在例 6—1 中已经介绍了一个三因子的全因子试验的安排，当时只是作为例题展示了基本思路，还有很多细节需要补充，主要是研究如何在试验设计中考虑三个基本原则：重复试验、随机化和区组化。

如何实现重复试验呢？现在公认的较好办法就是只在中心点处安排重复试验，通常是在中心点重复做 3 次或 4 次试验。

中心点在所有因子都是连续变量时容易找到，那就是各因子皆取其高水平与低水平的平均值。如果因子全部是离散变量，可以选取它们各种搭配中的某一个组合作为“伪中心点”；如果因子中既有连续变量又有离散变量，则可以对连续变量选取其平均值，离散变量选取某一个组合作为“伪中心点”（这时不必要求试验的平衡，强调的是确实要有重复）。

选取中心点并在此处安排重复试验的好处，主要是进行完全相同条件下的重复，可以估计出试验误差。另外，由于每个连续因子的取值原来只有两个值（高水平及低水平），现在增加到了三个值，因而增加了对于响应变量可能存在的弯曲趋势估计的能力，这也是简单全面重复所不能达到的效果。而且，在把因子点试验的顺序随机化之后，如果再把在中心点处所进行的 3 次或 4 次试验安排在全部试验的开头、中间和结尾，那么这几个点的试验结果间只应存在随机误差，如果这几个试验结果呈现非常明显的上升、下降或其他不正常的趋势，则可能有助于发现在试验过程中出现的不正常状况。

总之，安排每个因子取二水平，再加上中心点，则可以构成较好的全因子试验安排。

3. 代码化及其计算

无论试验的目的是筛选还是建立关系式，都要建立回归方程。那么，是对原始的自变量数值进行回归分析好，还是先将这些数值进行代码化后再进行回归分析好呢？代码化（coding）就是将该因子所取的低水平设定代码值为 -1，高水平设定代码值为 1，中心水平定为 0。经过理论上的分析后发现，将自变量代码化后有很多好处，即应该对代码化的数据进行回归分析。

（1）代码化后的回归方程中，自变量及交互作用项的各系数可以直接比较，系数绝对值大者的效应比系数绝对值小者的效应更重要。大家知道，对自变量原始数据所进行的回归方程中的回归系数是有单位的。在 $Y=a+bX$ 中，b 的单位是 $[Y]/[X]$，显然，X 更换单位后，其系数也会更换。如果自变量不止一个，多个自变量间含义不同，量纲也不同，其回归系数之间显然是不可比的。如果代码化后，每个自变量都化为无量纲的 $[-1, 1]$ 上的数据，这时，各自变量间具有相同的“尺度”，各系数之间就可以比较了。

（2）代码化后的回归方程中各项系数的估计量间是不相关的。很明显，X_1 与 X_1X_2 之间是相关的，它们的回归系数的估计量之间也是相关的。比如，在回归方程中，保留 X_1X_2 项及删除此项时，X_1 的回归系数肯定要发生变化，这点不仅造成使用中的诸多不便，而且由于变量间可能存在相关关系，对各变量前的系数直接进行显著性检验容易漏掉一些变量，因而结果并不可信。一旦将自变量全部代码化，就没有这个问题了，删除或增加某项，对于其他项的回归系数将不会产生任何影响。各变量前的系数就可以直接进行显著性检验了。

（3）在自变量代码化后，回归方程中的常数项（或称“截距”）就有了具体的物理意义。代码“－1”与“1”的中点恰好为“0”，而将全部自变量以“0”代入方程得到的响应变量预测值则恰好是截距值。因此，截距值是全部试验结果的平均值，也是全部试验范围中心点上的预测值。

用代码数据得到的回归方程是重要的，但用原始数据得到的回归方程有时也是有意义的，因此应该熟悉真实值与代码值间的换算。

例如，假定因子为温度，温度的真实值的低水平是 100 度，高水平是 200 度，相应的代码值是－1 和 1。列出表格如表 6—5 所示。

表 6—5　　真实值与代码值换算表

水平 / 值	低水平	中心	高水平
真实值（度）	100	150	200
代码值	－1	0	1

记中心值　　$M=\dfrac{\text{低水平}+\text{高水平}}{2}$

半间距　　$D=\dfrac{\text{高水平}-\text{低水平}}{2}$

则有　　$\text{代码值}=\dfrac{\text{真实值}-M}{D}$

或　　$\text{真实值}=M+D\times\text{代码值}$

在本例中，$\text{代码值}=\dfrac{\text{真实值}-150}{50}$，$\text{真实值}=150+50\times\text{代码值}$。

若实际温度为 160 度，则代码值为 $\dfrac{160-150}{50}=0.2$。

6.4.2　全因子设计的计划

在全因子设计的计划中，关键是选定因子及确定它们的水平。先举例说明。

例 6—2　提高铣床加工精度试验。

在生产引擎活塞时，用铣床加工其顶面的平面度是关键指标。在提高顶面加工精度（即平面度数值越小越好，平面度的单位是 μ）的工艺研究中，发现有 3 个因子很重要，它们是因子 A：铣刀转速；因子 B：铣刀水平移动速度；因子 C：铣刀后倾角的角度。对每个因子都设定了高低两个水平。我们希望考察这 3 个因子中，

哪些因子效应及交互效应是显著的。其具体取值如下：

因子 A——铣刀转速。低水平：800 转/分钟；高水平：900 转/分钟。

因子 B——铣刀水平移动速度。低水平：2.4 毫米/秒；高水平：2.8 毫米/秒。

因子 C——铣刀后倾角的角度。低水平：80 度；高水平：84 度。

准备做全因子试验并安排 4 个中心点（即 2^3+4 次）的试验，如何安排试验计划呢?

有了计算机的帮助，制定试验计划就是件简单的事情了。以 MINITAB 软件为例，制定计划的路径是：统计→DOE→因子设计→创建因子设计。虽然要生成的是全因子设计，但它实际上是部分因子设计中的特例。因此，在填写补充信息时，先选定因子个数“3”，再在“设计”对话框内，选中“全因子”，“中心点个数”填入“4”。在“选项”对话框内，保留选项“随机化”，这样就可以获得一个随机化后的试验设计表格（见表 6—6）。其中，最后一列是空白的，试验结果可填入该列。

表 6—6　　全因子试验计划表（随机顺序）

标准序	运行序	中心点	区组	转速（转/分钟）	移速（毫米/秒）	倾角（度）	平面度（μ）
1	3	1	1	800	2.4	80	
2	4	1	1	900	2.4	80	
3	11	1	1	800	2.8	80	
4	6	1	1	900	2.8	80	
5	10	1	1	800	2.4	84	
6	8	1	1	900	2.4	84	
7	7	1	1	800	2.8	84	
8	2	1	1	900	2.8	84	
9	9	0	1	850	2.6	82	
10	1	0	1	850	2.6	82	
11	12	0	1	850	2.6	82	
12	5	0	1	850	2.6	82	

按表 6—6 安排试验就可以进入实施阶段了。试验完成后，就可以得到全部试验结果（见表 6—7）。

6.4.3 全因子设计的分析

全因子设计的分析方法是一般的试验设计分析的典型代表。共有五大步骤。其流程图见图 6—5。

第一步是拟合选定模型，其主要任务是根据整个试验的目的，选定一个数学模型。通常首先可以选定“全模型”。由于三阶及三阶以上的交互作用通常都可以忽略不计，在因子设计的问题中，全模型就是在模型中包含全部因子的主效应及全部因子的二阶交互作用。在经过细致分析后，如果可以断言某些主效应及某些因子的二阶交互作用是不显著的，则在下次选定模型时，将只保留那些效应显著的项。具体的步骤下面结合实例加以介绍。

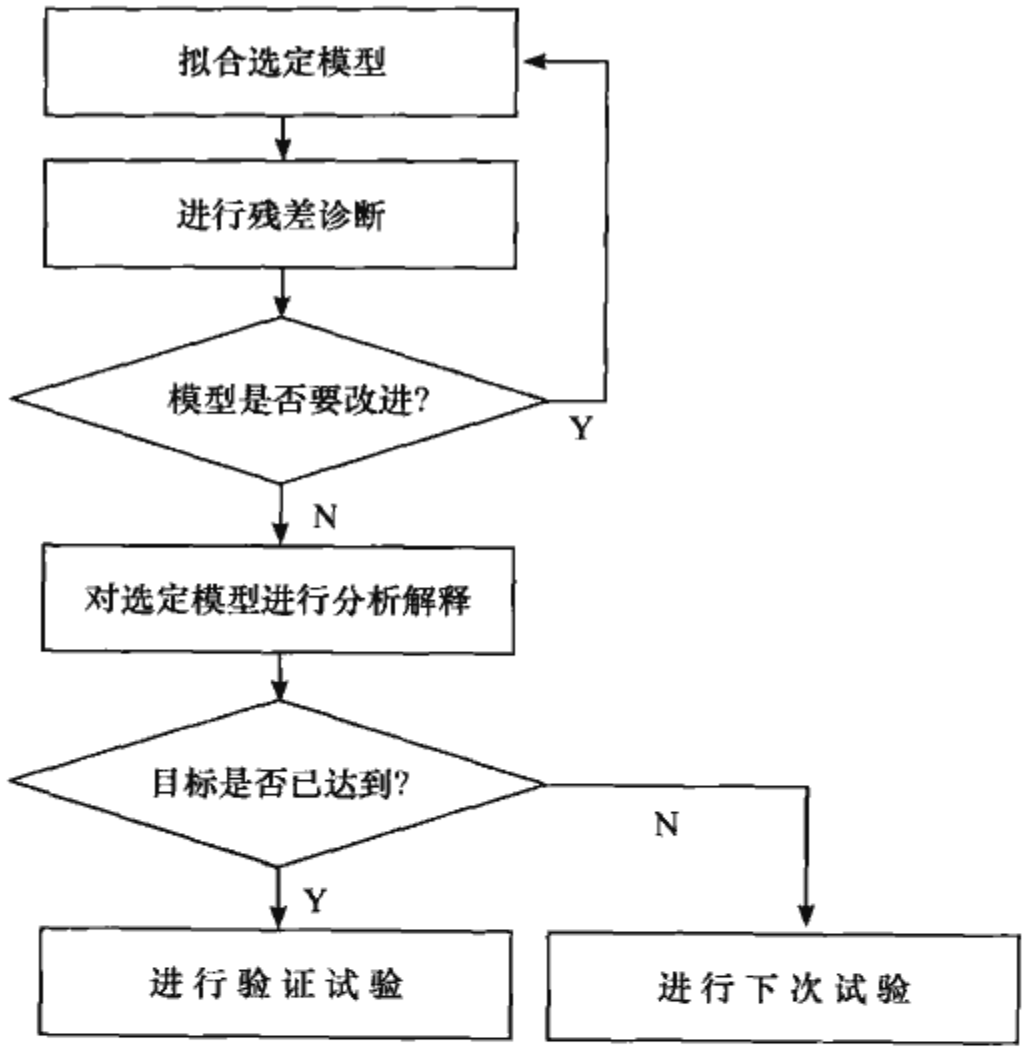


图 6—5　试验设计分析五步法流程图

由于计算机的计算全部是自动进行的，通常见到的软件，都会有下列一些结果输出，这里将指出分析的要点。

第一步中要注意观察下面几处。这些在 MINITAB 软件中可以从“统计→DOE→因子→分析因子设计”路径中选定全模型后，在运行窗口中可以看到它们。

1. ANOVA 和模型整体显著性分析

方差分析（ANOVA）是试验设计重要的分析方法，下面结合了 MINITAB 软件得到的方差分析的结果。方差分析的原假设和备择假设分别是：

H_0：模型无效，H_1：模型有效

如果对应回归项的 P 值小于 0.05，则表明应拒绝原假设，即可以判定本模型总的来说是有效的。如果对应回归项的 P 值大于 0.05，则表明无法拒绝原假设，即可以判定模型总的来说是无效的。遇到这种情况就比较麻烦，这说明模型整体拟合有问题。造成这种情况的常见原因可能如下：

（1）试验误差太大。由于 ANOVA 检验的基础是将有关各项的离差均方和与随机误差的均方和相比较，取其比值形成 F 统计量。如分母的随机误差均方太大，则将使 F 变小，从而得不到“效应显著”的结论。这时，应仔细分析误差产生的各种原因，能否设法降低是找到显著因子的关键措施。当然，也有可能“试验误差太大”是由测量系统不好造成的，这时就要设法改进测量系统。

（2）试验设计中漏掉了重要因子。这当然与上一项有某种关系。漏掉了重要因子必然会使试验误差增大，这时更应仔细分析因子的选定。通常在试验前考虑因子

时，很难有把握说某因子重要或不重要，这时候，应该“宁多毋漏”，而不是相反。因子多选了，将来删去它很容易，一旦漏掉再想找回来就很困难了。

（3）有可能是模型本身有问题，例如模型有失拟（lack of fit），或数据本身有较强的弯曲性（curvature），这时也可能导致判断为“模型无效”。下面将讨论这两方面的问题。

2. ANOVA 与模型失拟

模型失拟是指拟定的模型与试验数据不能很好地拟合。如果模型中漏掉了关键的因子或交互作用项，就会导致失拟。失拟的假设检验是：

H_0：无失拟，H_1：有失拟

在 ANOVA 表中，如果失拟项的 P 值大于 0.05，则表明无法拒绝原假设，即可以判定，本模型并没有失拟现象；反之，就说明模型漏掉了重要的项，应该补上。本项计算的依据是：最初是以重复试验间的差异作为试验误差的估计（pure error），将缺失的项（例如高次项、高阶交互项等）所造成的误差均方与之相比，经过 F 检验即可判明。以后，将判明为不显著的各项都归并为随机误差项，重新计算失拟项是否显著。

3. ANOVA 与模型弯曲项

全因子设计是基于含有所有主因子和交互作用的一阶模型的，如果试验引入了中心点，中心点的试验结果对模型的主因子和交互作用项的参数估计不会有任何影响，也不会帮助估计出二次项。但是中心点的数据可以帮助分析模型的线性假设是否成立。关于是否存在弯曲的假设检验是：

H_0：无弯曲，H_1：有弯曲

在 ANOVA 表中，如果弯曲项的 P 值大于 0.05，则表明无法拒绝原假设，即可以判定模型并没有弯曲现象；反之，就说明数据呈现弯曲，而模型中并没有平方项，需要设计响应曲面模型的试验设计。

4. 拟合的总效果

拟合的总效果可以看多元全相关系数（multiple correlation coefficient）R^2 及调整的多元全相关系数（adjusted multiple correlation coefficient）R^2_{adj}。

由回归分析中的离差平方和分解公式可知：

$$SS_T = SS_M + SS_e$$

考虑 SS_M 在 SS_T 中的比例，定义

$$R^2 = \frac{SS_M}{SS_T}$$

显然，此数值越接近 1 越好。容易看出，它有另一种写法：

$$R^2=1-\frac{SS_e}{SS_T}$$

如果只有一个自变量，并且可以将此自变量看成是随机变量，则可以求出二者间的相关系数，则 R^2 恰好就是此相关系数的平方。因此，它的含义是很容易理解的。对于多个自变量的情况，定义不变，它被推广为“多元决定系数”，仍然表示 SS_M 在 SS_T 中的比例。但它也有一个缺点：当自变量个数增加时，例如只增加一个新自变量，不管增加的这个自变量效应是否显著，R^2 都会增大一些，因而在评价是否该增加此自变量进入回归方程时，使用 R^2 就没有价值了。为此，引入调整的 R^2 即 R^2_{adj}，它的定义是：

$$R^2_{adj}=1-\frac{SS_e/(n-p)}{SS_T/(n-1)}$$

式中，n 为观测值总个数；p 为回归方程中的总项数（包含常数项在内）。也就是说，R^2_{adj} 是扣除了回归方程中所受到的包含项数的影响的相关系数，因而可以更准确地反映模型的好坏。它同样是越接近 1 越好，而且在实际应用中，由于回归方程所含项数 p 总会大于等于 1，因而很容易看出，R^2_{adj} 总比 R^2 要稍小一些。因此，两个模型的优劣可以从 R^2_{adj} 与 R^2 的接近程度来判断：二者之差越小则说明模型越好。我们常常比较包含所有自变量有关项的“全模型”与删去所有影响不显著的项后的“缩减模型”，看看究竟哪个更好，如果将影响不显著的项删去之后，二者更接近，则说明删去这些项确实使模型得到改进。

5. 对于 s 或 s^2 的分析

考虑所有的观测值与理论模型之间可以有误差，但总是假定，这个误差应该服从以 0 为均值，以 σ_e^2 为方差的正态分布。在 ANOVA 表中，对应于残差误差（residual error）那行中的平均离差平方和（MSE）的数值则恰好是 σ_e^2 的无偏估计量，将其记为均方误差 MSE（mean square of error），而有些软件会将其平方根 s 一并输出，可以认为 s 是 σ_e 的估计。粗略地说，在预测值的基础上，加减 2 倍 s，则可以得到预测值的 95%置信区间。因此这里的 s 在分析模型的好坏中起着关键作用，显然 s 越小说明模型越好。因此，比较两个模型的优劣关键的指标就可以选择 s 或 s^2，s 越小，模型越好。

6. 各项效应的显著性

在计算结果的最开始部分，响应变量的效应和系数的估计（已编码单位）给出了各项主效应及各交互效应的数值及检验结果。这是对各项的分别的检验，很可能有些项是显著的，而另一些项不显著，将来修改模型时，应该将这些不显著项删除。这里要注意的是：如果一个高阶项（交互作用项或二次项）是显著的，则此高阶项所包含的主因子也必须被包含在模型中。例如，二阶交互作用 BC 项显著，则 B 及 C 这两个主效应项也一定要被包含在模型中，即使表面上看这两个主效应项本身并不显著。

对于各项效应的显著性，计算机还输出一些辅助图形帮助判断有关结论。这里最重要的就是帕累托效应图（Pareto effect plot）。帕累托效应图是将各效应的 t 检验所获得的 t 值作为纵坐标，按照绝对值的大小排列，根据选定的显著性水平 α，给出 t 值的临界值，绝对值超过临界值的效应将被选中。用帕累托效应图来判断因子效应的显著性是非常直观的，可以借此直观地验证数值结果。

经过上述各项计算，就完成了对数据的初步分析，即第一步拟合选定模型的任务。

试验设计分析五步法的第二步是进行残差诊断。主要目的是基于残差的状况来诊断模型是否合适。单纯从 ANOVA 表及回归系数的估计与检验两方面结果来分析整个结果是远远不够的。数学上可以举出这样的一些例子，其 ANOVA 表及回归系数结果完全相同，但它们的真实状况相去甚远。为了弥补第一步所得结果的不足，要进行残差的诊断。如果数据与模型的拟合是正常的，则残差应该是线性的。

如何判断残差是正常的呢？残差（residual）是观测到的响应变量值与回归模型的预测值之差，并且假定残差是独立的，服从正态分布。应该观察一下，残差是否真的这样分布。如果确实是这样分布，则可以相信所选定的模型是正确的，否则就说明选定的模型不正确，要对模型进行某些修改。由于事先对选定的模型真的没有绝对把握，因此，残差诊断还是有必要的。

具体地说，残差诊断应包括下列四个步骤，观察计算机自动输出的四个图形。在 MINITAB 软件中可以根据路径：统计→DOE→因子→分析因子设计，在对话窗“图形”中选定“四合一”，再加上对各自变量的残差图就可以得到残差诊断图。

（1）观察残差对于以观测值顺序为横轴的散点图：重点考察此散点图中，各点是否随机地在水平轴上下无规则地波动。

（2）观察残差对于以响应变量拟合预测值为横轴的散点图，重点考察此散点图中，残差是否保持等方差性，即是否有“漏斗形”或“喇叭形”。

（3）观察残差的正态性检验图（或直方图），看残差是否服从正态分布。

（4）观察残差对于以各自变量为横轴的散点图，重点考察此散点图中是否有弯曲趋势。

残差诊断的四个图都应是正常的。什么是最常见的情况而被认为“不正常”呢？

异方差性是第一种最常见的残差图不正常的情况，出现在残差对响应变量拟合值的图中，残差未保持等方差，散点明显呈“漏斗形”或“喇叭形”，这说明对响应变量 Y 作某种变换后才会与模型拟合更好。例如，取 $y^*=\sqrt{y}\left(y^2,\ \frac{1}{y},\ \frac{1}{\sqrt{y}},\ \ln y\right)$ 等作为新响应变量，可能会好得多。

模型选择是第二种最常见的残差图不正常的情况，出现在残差对自变量的散点图中。残差虽保持等方差，但散点明显呈 U 形或反 U 形弯曲，这说明对响应变量 Y 而言，对该自变量 X 仅取线性项已经不够了，增加 X 的平方项或立方项，将会

使模型拟合得更好。

总之，DOE 分析的第二步只是进行残差诊断，看“模型是否有问题”。如果确实发现了问题，就转入第三步。

DOE 分析五步法的第三步是判断模型是否要改进。考虑采取措施的主要依据是基于数值计算及残差诊断的两方面结果。如果残差诊断的四个图都是正常的，则说明模型是正常的。因此，如果残差诊断提示，要对响应变量 Y 作某种变换后才行，或要增加 X 的平方项或立方项才会使模型拟合更好，就一定要修改模型。另外，基于各项效应及回归系数计算的显著性分析可以发现，有些主效应项或交互效应项并不显著，这些项应该从模型中删除，模型的拟合要重新进行。总之，凡是发现模型需要修改时，就要返回最初的第一步，重新建立模型，再重复前面所有步骤。

经过前三步的多次反复，可以获得一个我们认为最满意的方程，将它定为选定的模型。DOE 分析五步法的第四步是对选定模型进行分析解释，主要是在拟合选定模型后输出更多的图形和信息，并作出有意义的解释。主要涉及下列三方面，而这些要求在一般的计算机软件中都会自动给出。

（1）输出各因子的主效应图和交互效应图。在 MINITAB 软件中可以从“统计→DOE→因子→因子图”路径得到它们。应该从主效应图、交互效应图进一步确认所选中的那些主因子和交互作用项是否真的很显著，未选中的那些主因子和交互作用项是否真的不显著，从而更具体更直观地确认选定的模型。

（2）输出等高线图、响应曲面图等。在 MINITAB 软件中可以从“统计→DOE→因子→等值线/曲面图”路径得到它们。从等高线图、响应曲面图可进一步确认响应变量是如何受所选中的那些主因子和交互作用项的影响的，它的变化规律如何。如果目标是望大（或望小或望目），那么自变量在什么设置时，将会达到响应变量最大（最小或与目标最接近）？我们要从直观上看到整个试验范围内的最佳值的位置。由于等高线图、响应曲面图都只能对两个自变量的情形给出，因此当自变量个数超过两个时，要分别对选定的某两个自变量作图。其实，MINITAB 或其他很多软件都可以自动给出所有两个自变量的组合的等高线图和响应曲面图。

（3）实现最优化。按照具体问题的望大、望小或望目在数值上求出在整个试验范围内的最佳值。在 MINITAB 软件中可以从“统计→DOE→因子→响应优化器”路径得到它们。虽然在因子设计阶段，试验设计的主要目标是筛选变量，但实际上，根据 DOE 分析第一步就可以判断出哪些自变量效应是显著的，哪些自变量效应是不显著的，可以在使用这些信息的基础上，获得最佳值。计算机提供的“响应变量优化器”（response optimizer）是个功能强大的工具，它可以自动给出最优设置。通常只要在选定响应变量后，再对最优的目标（goal）予以设定（setup）即可。

DOE 分析五步法的第五步是判断目标是否已达到。这主要是将预计的最佳值与原试验目标相比较。如果离目标尚远，则应考虑安排新一轮试验，通常是在本次获得的或预计的最佳点附近，重新选定试验的各因子及其水平，继续做因子设计（DOE）或响应曲面设计（RSM），以获得更好的结果。如果已基本达到目标，则

要做验证试验以确保将来按最佳条件生产能获得预期效果。试验设计大师鲍克斯（G. Box）有句名言："所有统计模型都是错的，只不过有些模型有用罢了。"对于根据试验数据所建立的任何统计模型是否符合实际规律，在未验证前都是没有把握判断的。通常的做法是先算出在最佳点的观测值的预测值及其变动范围，然后在最佳点做若干次验证试验（通常要 3 次以上）。如果验证试验结果的平均值落入事先计算好的范围内，则说明一切正常，模型是正确的，预测结果可信；否则就要进一步分析发生错误的原因，改进模型，重新验证，以求得符合实际数据的统计模型。用 MINITAB 软件从"统计→DOE→因子→分析因子设计"路径可以得到对于指定的自变量设置计算出预测值（fits），预测值处的标准差（SEs of fits），预测值处的回归结果的置信区间（confidence limit，输出时缩写为 95% CI），预测值处的单个观测值的置信区间（prediction limit，输出时缩写为 95% PI）。

前一个置信区间（95.0% CI）表明的是回归方程上的点的置信区间，这是由于回归系数是以样本观测值为基础估计出来的，它必然会有误差，而回归系数的误差必然导致回归方程的预测值的误差。对此区间可以理解为，当按照此自变量的设置无限多次地重复运行下去将会获得的理论均值的 95%置信范围，此值可以作为改进结果的预报写在总结报告中。后一个置信区间（95.0% PI）表明的是以上述回归方程上的点的置信区间为基础，加上观测值具有的方差为 σ_e^2 的波动而给出的单个试验值的置信区间。这是将来做一次验证试验时将要落入的范围，可供作验证试验时使用。

6.4.4 全因子设计实例

针对例 6—1 中的提高铣床加工精度试验，实施全因子试验，按计划矩阵做试验，得到相应数据记录，结果如表 6—7 所示。对这批数据进行分析，按五步法，其分析步骤如下。

表 6—7　　提高铣床加工精度之工艺条件试验结果数据表

标准序	运行序	中心点	区组	转速（转/分钟）	移速（毫米/秒）	倾角（度）	平面度（μ）
10	1	0	1	850	2.6	82	34.3
8	2	1	1	900	2.8	84	34.7
1	3	1	1	800	2.4	80	34.8
2	4	1	1	900	2.4	80	33.5
12	5	0	1	850	2.6	82	34.4
4	6	1	1	900	2.8	80	35.1
7	7	1	1	800	2.8	84	41.4
6	8	1	1	900	2.4	84	32.3
9	9	0	1	850	2.6	82	37.5
5	10	1	1	800	2.4	84	33.4
3	11	1	1	800	2.8	80	40.1
11	12	0	1	850	2.6	82	36.3

第一步：拟合选定模型。按"统计→DOE→因子→分析因子设计"路径进入，

在“项”中，首先将全部备选项列入模型。这里包含转速、移速和倾角及它们之间的交互作用项：转速 * 移速，转速 * 倾角及移速 * 倾角。注意，这里只选了全部主效应和二阶交互作用项，并不含三阶交互作用项，而且不要勾选“在模型中包含中心点”。其计算结果如下：

拟合因子：平面度　与　转速，移速，倾角

平面度的效应和系数的估计（已编码单位）

项	效应	系数	系数标准误	T	P
常量	35.650	0.357 8	99.63	0.000	
转速	−3.525	−1.762	0.438 2	−4.02	0.010
移速	4.325	2.162	0.438 2	4.93	0.004
倾角	−0.425	−0.213	0.438 2	−0.48	0.648
转速 * 移速	−2.325	−1.162	0.438 2	−2.65	0.045
转速 * 倾角	−0.375	−0.188	0.438 2	−0.43	0.687
移速 * 倾角	0.875	0.438	0.438 2	1.00	0.364

S=1.239 56　　PRESS=24.894 3

R-Sq=90.74%　　R-Sq（预测）=69.98%　　R-Sq（调整）=79.62%

对于　平面度　方差分析（已编码单位）

来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
主效应	3	62.623 7	62.623 7	20.874 6	13.59	0.008
2 因子交互作用	3	12.623 7	12.623 7	4.207 9	2.74	0.153
残差误差	5	7.682 5	7.682 5	1.536 5		
弯曲	1	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.00	0.967
失拟	1	0.451 3	0.451 3	0.451 3	0.19	0.694
纯误差	3	7.227 5	7.227 5	2.409 2		
合计	11	82.930 0				

从 ANOVA 表中可以清楚地看出，主效应项中，P 值为 0.008，显示所选定的模型中主效应总体是显著的。在弯曲一栏中，P 值为 0.967，显示没有明显的弯曲趋势。在失拟一栏中，P 值为 0.694，显示这里的拟合模型没有明显的失拟。

在 ANOVA 表之前得到的各效应和系数的估计（已编码单位）是各项主效应及各交互效应的结果。从显著性来看，转速、移速及它们之间的交互作用项转速 * 移速对应的 P 值都小于显著性水平 0.05，因此可以判定，这三项效应是显著的，而其余各项皆不显著。

另外，从因子效应的帕累托图（见图 6—6）中，也可以验证这一点。

DOE 分析的第二步是残差诊断。按“统计→DOE→因子→分析因子设计”路径进入，打开“图形”窗口，选定残差的“四合一”图（见图 6—7），并选中残差对各自变量的图形。对于这些图按规定的四个步骤进行残差分析。

（1）观察残差对于以观测值顺序为横轴的散点图（见图 6—7 中右下），重点考察对观测值顺序的散点图中各点是否随机地在水平轴上下无规则地波动，是否有不正常的升降趋势。

本例中，此图是正常的。

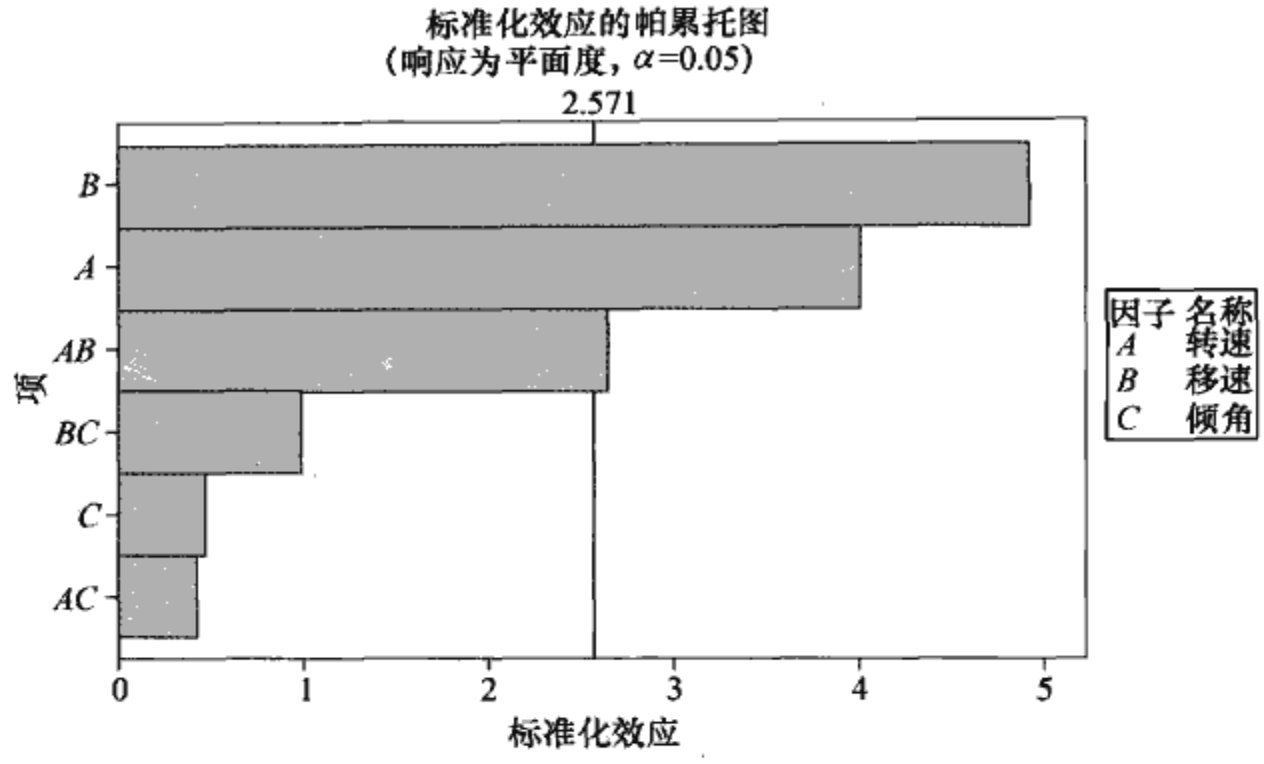


图 6—6 例 6—1 因子效应帕累托图

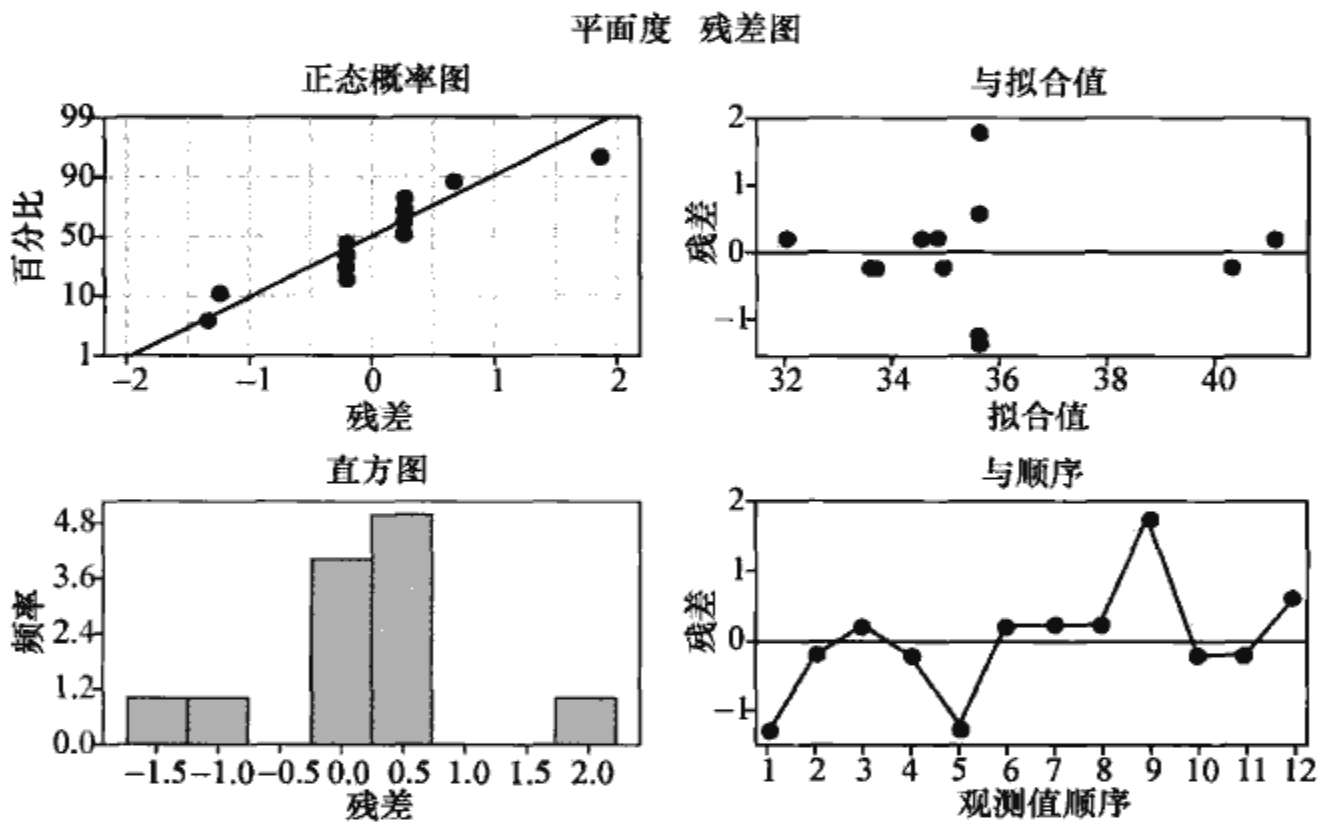


图 6—7 四合一的残差图

(2) 观察残差对于响应变量拟合值的散点图（见图 6—7 中右上），重点考察残差是否保持等方差，即是否有“漏斗形”或“喇叭形”。

本例中，此图是正常的。

(3) 观察残差的正态性检验图（见图 6—7 中左上），看残差是否符合正态分布。

这里只有粗糙的散点图，要想得到准确的检验结果，可以直接对残差进行正态性检验。如果这里不能服从正态分布也不用着急，因为现在还只是初步模型，还要经过模型的修改，很可能将来残差对于最终模型是正态的。

(4) 观察残差对于各自变量的散点图（见图 6—8、图 6—9 及图 6—10），重点考察是否有弯曲趋势。

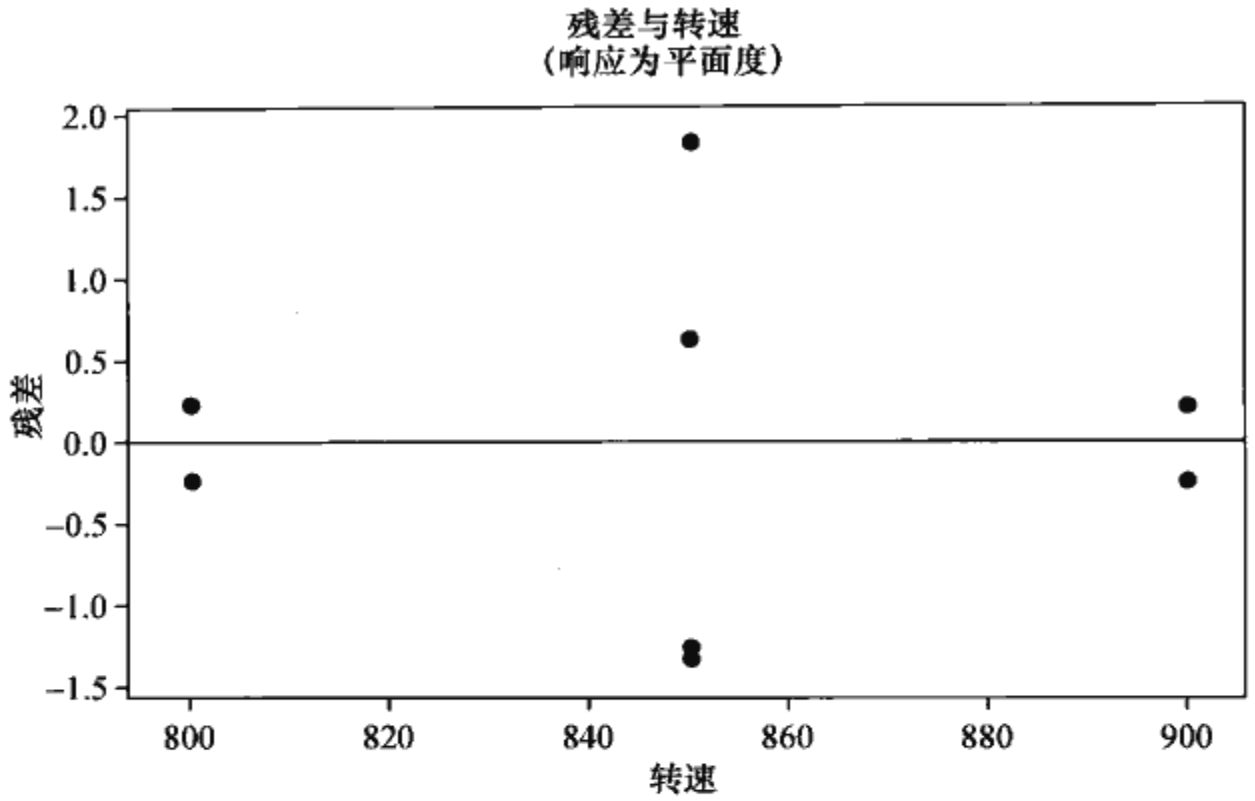


图 6—8　残差对自变量 *A* “转速”的散点图

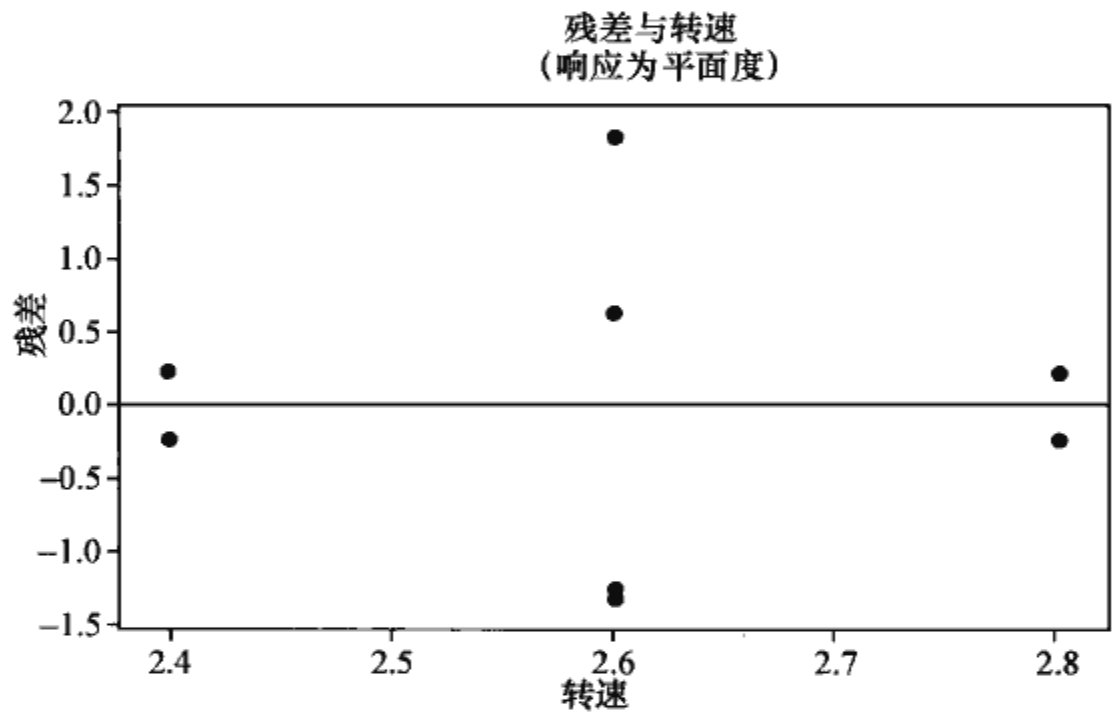


图 6—9　残差对自变量 *B* “移速”的散点图

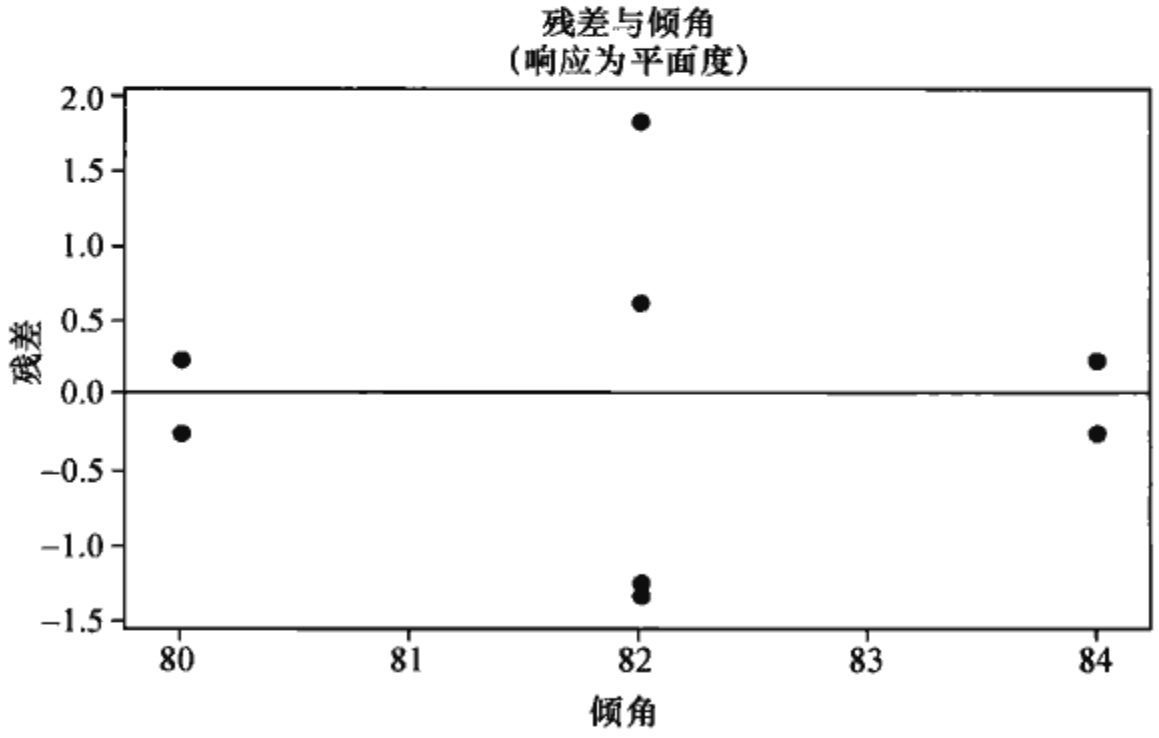


图 6—10　残差对自变量 *C* “倾角”的散点图

本例中，这三个图都是正常的，看不出有弯曲的趋势。

第三步，判断模型是否要改进。从残差诊断看出，模型拟合得还可以，只是在检验各项效应中，发现三个自变量主效应中，只有 A（转速）、B（移速）及它们之间的交互作用项 $A*B$（转速 * 移速）对应的 P 值都小于显著性水平 0.05，因此可以判定，这三项效应是显著的，而其余各项皆不显著。因此修改拟合模型中的“项”，重新进行计算，即又回到第一步。

新第一步：拟合选定模型。拟合结果如下：

拟合因子：平面度 与 转速，移速

平面度 的效应和系数的估计（已编码单位）

项	效应	系数	系数标准误	T	P
常量		35.650	0.320 4	111.26	0.000
转速	−3.525	−1.762	0.392 4	−4.49	0.002
移速	4.325	2.162	0.392 4	5.51	0.001
转速 * 移速	−2.325	−1.162	0.392 4	−2.96	0.018

S=1.109 97　PRESS=17.555 3

R-Sq=88.11%　R-Sq（预测）=78.83%　R-Sq（调整）=83.66%

对于 平面度 方差分析（已编码单位）

来源	自由度	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
主效应	2	62.262 5	62.262 5	31.131 2	25.27	0.000
2 因子交互作用	1	10.811 2	10.811 2	10.811 2	8.78	0.018
残差误差	8	9.856 3	9.856 3	1.232 0		
弯曲	1	0.003 8	0.003 8	0.003 8	0.00	0.960
纯误差	7	9.852 5	9.852 5	1.407 5		
合计	11	82.930 0				

平面度的系数估计，使用未编码单位的数据

项	系数
常量	−219.412
转速	0.267 000
移速	109.625
转速 * 移速	−0.116 250

对于这次的计算结果，仍沿用前面介绍过的方法与步骤来进行分析。

先看 ANOVA 表中的总效果。在本例中，对应主效应项及二阶交互项的 P 值分别为 0.000（即小于 0.001）和 0.018，表明应拒绝原假设，即可以判定模型总的来说是有效的。在本例中，对应弯曲项的 P 值为 0.960，其值远比临界值 0.05 大，表明无法拒绝原假设，即可以判定模型并无弯曲。要看删减后的模型是否比原来有所改进，要比较全相关系数 R^2 和调整的多元全相关系数 R^2_{adj}，然后把两个模型计算的 R^2 和 R^2_{adj} 以及 s（即 ANOVA 表中的 MSE），汇总成表（见表 6—8）。

表 6—8　　全模型与删减模型效果比较表

拟合优度 \ 模型	全模型	删减模型
R^2	0.907 4	0.881 1
R^2_{adj}	0.796 2	0.836 6
s	1.239 56	1.109 97

可以看出，由于模型项数减少了 3 项，R^2 肯定会有一定程度的降低（本例由 0.907 4 降低到 0.881 1），但关键是看调整的 R^2_{adj} 是否有所提高。本例中，R^2_{adj} 由 0.796 2 提高到 0.836 6，可见删除不显著的主因子及交互作用项后，回归的效果更好了，而 s 的值由 1.239 56 降为 1.109 97，再次证明删除不显著的主因子及交互作用项后，回归的效果更好了。

新第二步：残差诊断。残差诊断仍按规定的 4 个步骤进行，全部结果都是正常的。特别是残差的正态性，由于删除了不显著项，残差的正态性大大改善了（详细结果从略）。

新第三步：判断模型是否要改进。由上述分析，可以认为已经选定了最终的模型。MINITAB 给出了回归方程的系数和对应的 P 值。可以写出最后确定了的基于代码数据的回归方程：

$$Y=35.650-1.762A+2.162B-1.162A*B$$

转化为自然变量的回归方程是：

$$Y=35.650-1.762\left(\frac{\text{转速}-850}{50}\right)+2.162\left(\frac{\text{移速}-2.6}{0.2}\right)-1.162\left(\frac{\text{转速}-850}{50}\right)*\left(\frac{\text{移速}-2.6}{0.2}\right)$$

简化后的方程是：

$$Y=-219.412+0.267\ \text{转速}+109.625\ \text{移速}-0.116\ 25\ \text{转速}*\text{移速}$$

第四步：对选定模型进行分析解释。在拟合选定模型后输出更多的信息，并给出有意义的解释。

（1）输出各因子的主效应图、交互效应图。主效应图见图 6—11。

从图 6—11 可以看出，因子 A（转速）和因子 B（移速）对于响应变量平面度的影响确实是显著的，而因子 C（倾角）对于响应变量平面度的影响确实是不显著的，还可以看出，为使平面度取值更小，应该让因子 A（转速）尽可能大，让因子 B（移速）尽可能小。

交互效应图见图 6—12。

从图 6—12 可以看出，因子 A（转速）和因子 B（移速）的交互作用对于响应变量平面度的影响确实是显著的（两条线非常不平行），而其他交互效应对于响应变量平面度的影响确实是不显著的（两条线几乎平行）。

（2）输出等高线图、响应曲面图等。在 MINITAB 软件中可以按“统计→DOE→因子→等值线和曲面图”路径得到它们（见图 6—13 及图 6—14）。

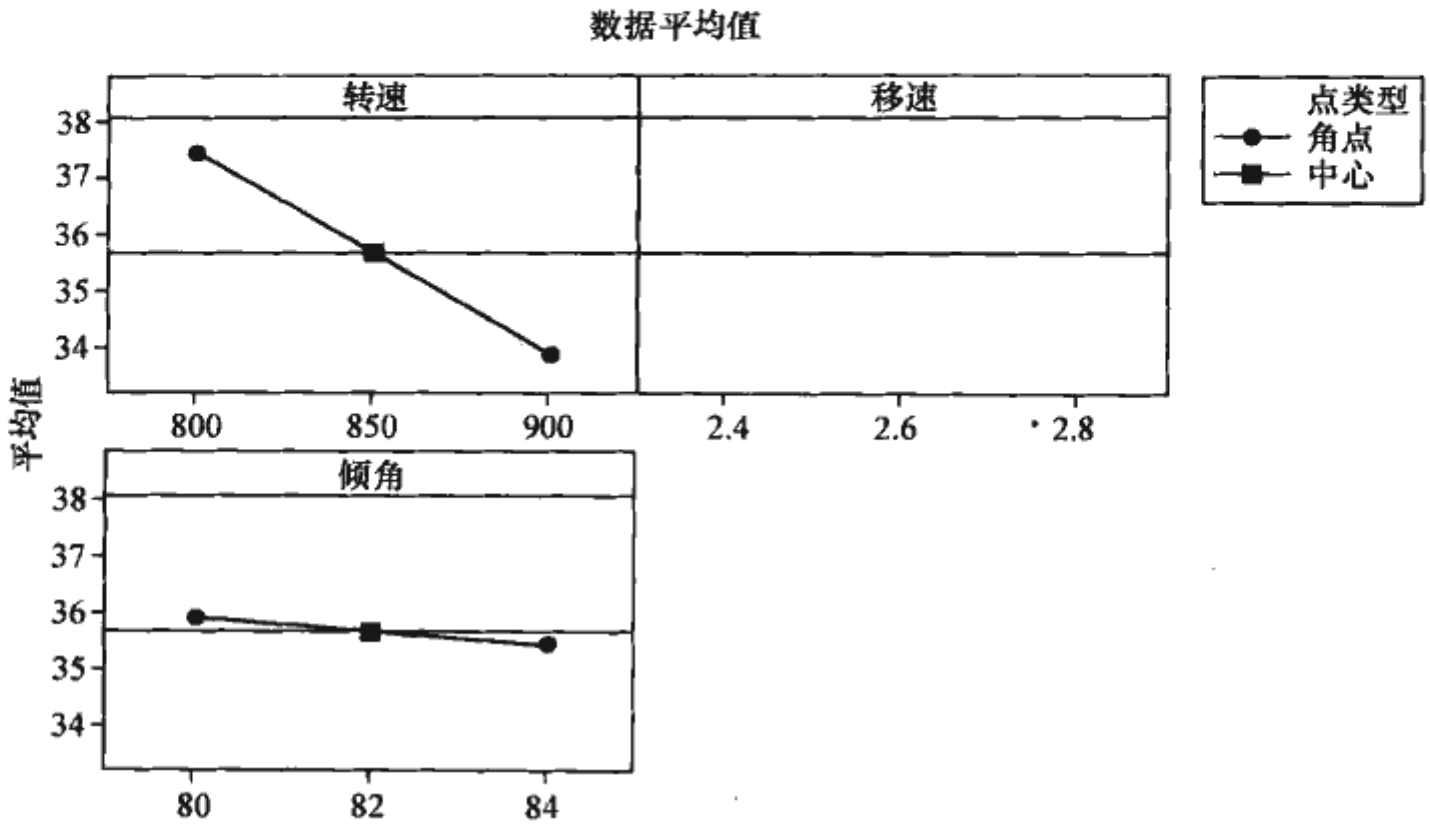


图 6—11 各因子的主效应图

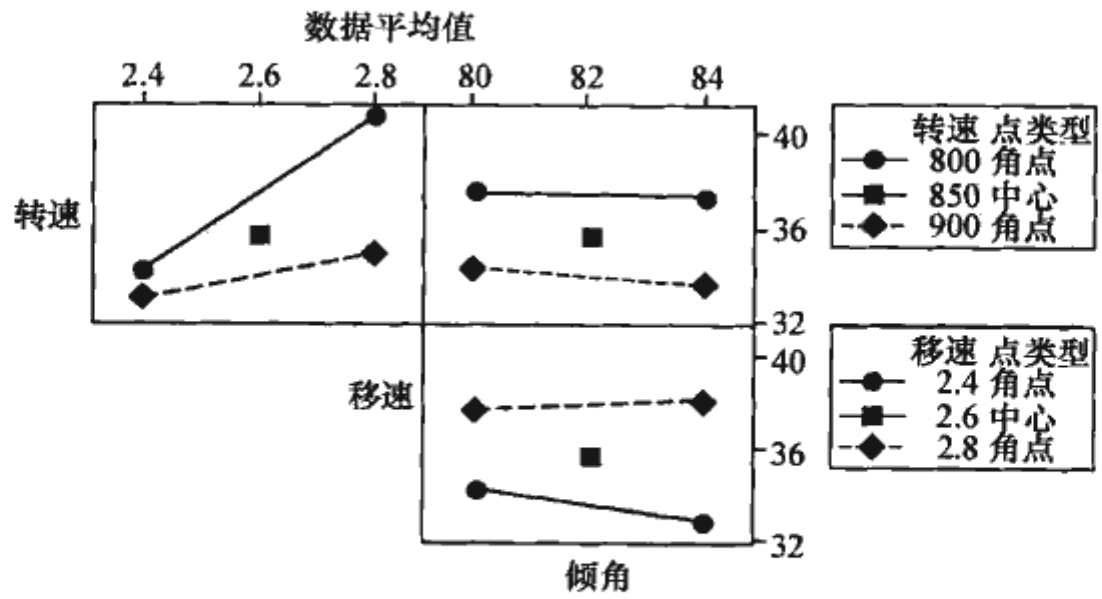


图 6—12 各因子间的交互效应图

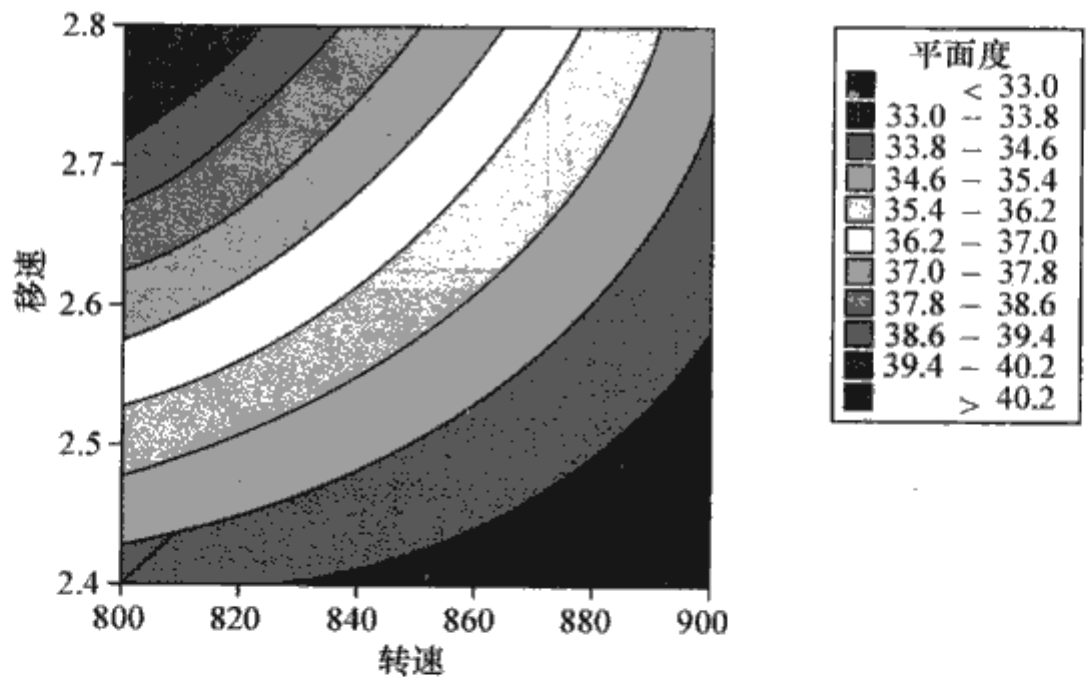


图 6—13 响应变量等高线图

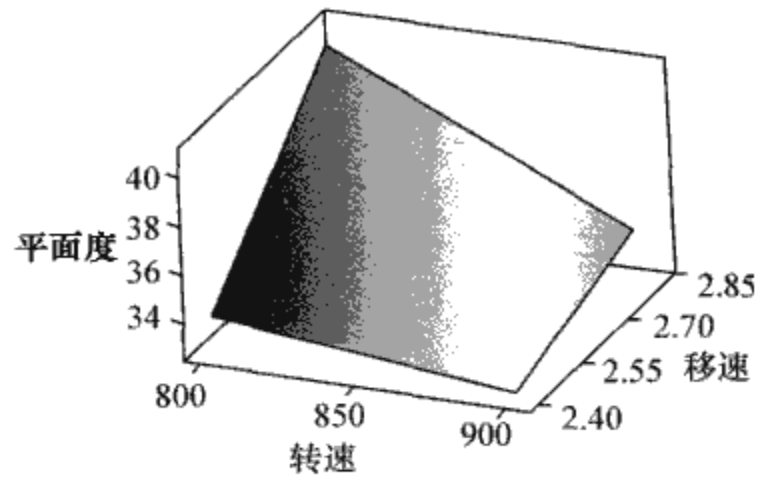


图 6—14　响应变量曲面图

从图 6—13 和图 6—14 中可以看出，因子 A（转速）及因子 B（移速）主效应及其交互作用对于响应变量平面度的影响确实是显著的（等高线很弯曲，曲面偏离平面很严重），为使平面度取值更小，如在因子效应分析中的结论相同，即应该让转速尽可能大，让移速尽可能小。

（3）实现最优化。根据本具体问题要求，优化目标是属于“望小”型的。在 MINITAB 软件中可以按“统计→DOE→因子→响应优化器”路径得到它们。这时，在对最优的目标（goal）设定上，取“极小化”，在设定中，只需填写“上端”（upper）及“目标”（target）两项，而“下端”（lower）留为空白即可。取上端＝33（这个值是在做过的试验中已经实现了的），取目标＝30（这个值是在做过的试验中未能达到的，是较高理想）。通常要把求响应变量 Y 达到最优的问题转化为求一个渴求函数（desirability function）的合意性 d（$0 \leqslant d \leqslant 1$）达到最大的问题。这个渴求函数的具体设置是计算机根据“望大”、“望小”或“望目”三种不同情况自动设置的，不必过问其细节。计算机自动搜索后，得到最小值计算结果（见图 6—15）。

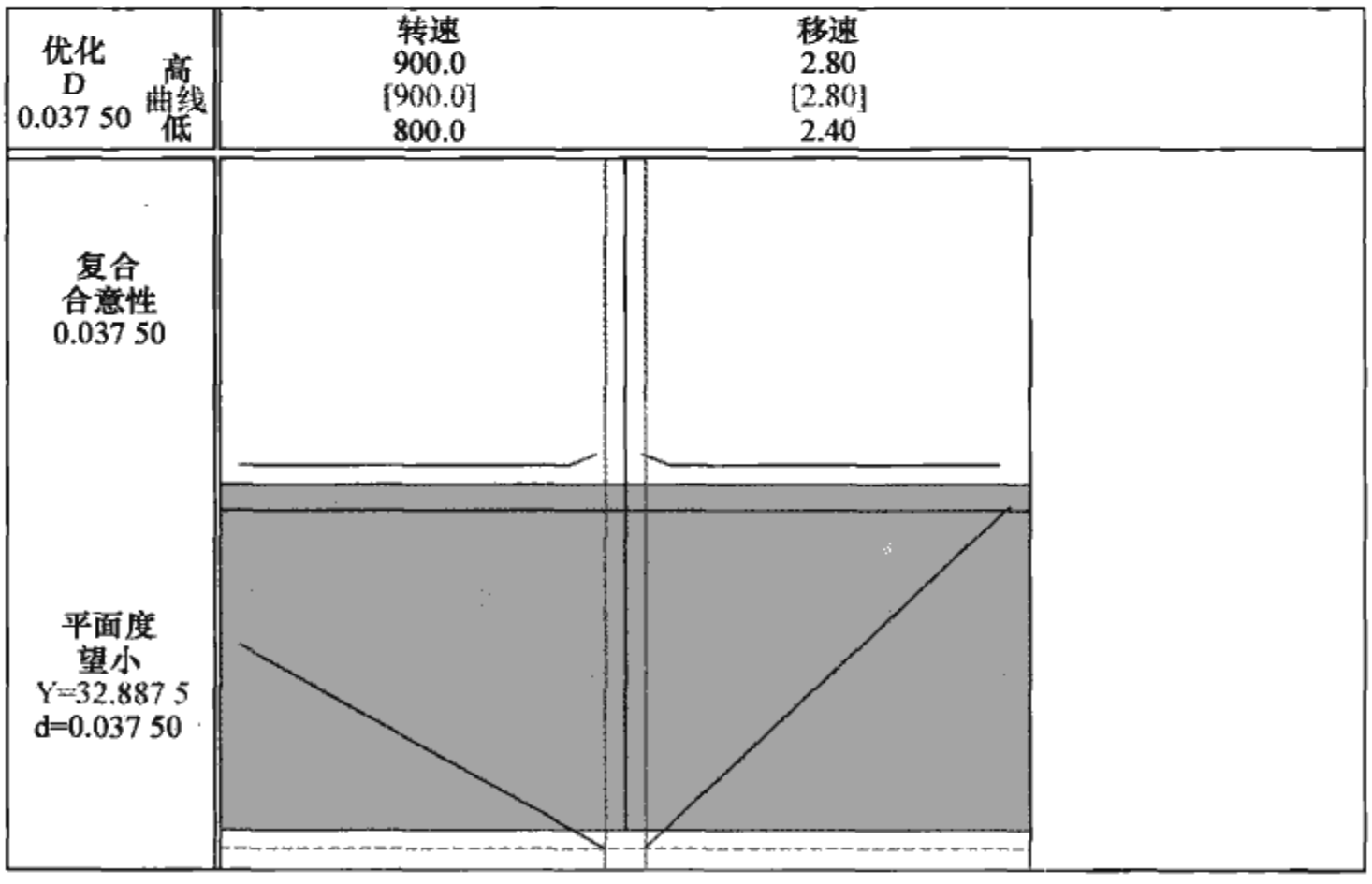


图 6—15　响应变量优化器输出结果图

当因子A（转速）取900转/分钟（这是最大值），因子B（移速）取2.4毫米/秒（这是最小值）时，平面度将会达到平均最小值32.887 5μ。这里还输出了指标d，这是渴求函数所取得的最大值。越接近设定目标，此值就越向1靠拢，本例结果是$d=0.037\ 5$，这是对最大值理想为30而言的。最大值的设定不相同时，完全相同的最佳结果也会使d值不同，使用者对此不必关注。

可以看到，在试验过程中，第8号试验（标准序为6），取转速为900转/分钟，移动速度为2.4毫米/秒，倾角为84度时，曾经达到过平面度为32.3μ，为什么最后计算出的最优值（32.887 5μ）还不如已经得到的结果呢？这是因为试验总是会有误差的，第8号试验的结果有偶然性，它是偏小的。仔细分析，还可以看到另一个结果：第4号试验（标准序为2），取转速为900转/分钟，移动速度为2.4毫米/秒，倾角为80度时，平面度高达33.5μ。而经过分析，因子C倾角效应并不显著，因此，这两个值都应考虑到。事实上，最优预测值是综合了全部试验结果，仔细估计了误差状况，又考虑了显著因子的效应才计算出来的。大体上的估算可以取33.5μ与32.3μ的平均值（32.9μ），此值已经与准确的最后综合预测值32.887 5μ很接近了。

第五步：判断目标是否已达到。本例得到预测的最佳值为32.887 5μ，应将它与试验目标相比较。如果认为仍然离目标尚远，则需考虑安排新一轮试验。一个显然的问题是，在技术允许的条件下，如果进一步将转速增加，将移速降低，是否可以进一步降低平面度？如何确定转速增加和移速降低的幅度，使得平面度的降低量最大，这就需要确定一个最速上升（下降）方向，并沿着该方向进行试验，找到一个最优点的区域，并在区域内安排响应曲面设计。关于响应曲面方法，在黑带教材中详细介绍。

如果认为平面度达到32.887 5μ已基本达到目标，则可以结束试验，但此时不要忘记做验证试验，以确保将来按最佳条件生产能获得预期效果。在最佳点（转速为900转/分钟，移动速度为2.4毫米/秒）做若干次验证试验（次数记为m，通常应该3次以上）。现在的任务就是计算出每一次试验结果应该落在什么范围内（黑带教材中会详细分析如何计算出m次验证试验结果的平均值应落入什么范围内），如果每次验证试验结果的平均值落入事先计算好的范围内，则说明一切正常，模型正确，预测结果可信。

MINITAB软件在DOE分析中可以很方便地给出预测值和预测区间，从“统计→DOE→因子→分析因子设计”路径进入，点击“预测”选项，在“因子”的空栏依次输入优化的主因子的取值，就可以在最后报告中得到预测值和预测区间。

使用 平面度 模型的新设计点数的预测响应

拟合值

点	拟合值	标准误差	95%置信区间	95%预测区间
1	32.887 5	0.751 5	(31.154 6，34.620 4)	(29.796 5，35.978 5)

预测值结果为32.887 5μ，这与优化器计算结果完全一致。预测值处的置信区

间（95% CI）和预测值处的单个观测值的置信区间（95% PI）都已经给出。

前一个置信区间（95.0% CI）结果为（31.154 6，34.620 4），表明的是回归方程上的点的置信区间。它的含义是：按照此自变量的设置，无限多次地重复运行下去将会获得的理论均值的95%置信范围，这个结果应该作为成果写入最后的总结报告中。后一个置信区间（95.0% PI）结果为（29.796 5，35.978 5），表明的是单个观测值的置信区间，它是做验证试验时参考使用的。

试验设计是一个非常有用的改进工具，但是真正掌握试验设计技术和统计分析需要较深的统计学知识，对于绿带学员，如果需要试验设计，最好能够得到黑带甚至资深黑带的帮助。

6.5 常用的精益改进工具

对于很多绿带项目，很多简单实用的改进技术往往能够收到显著的效果，其中精益改进工具广泛应用于精益六西格玛项目。下面重点介绍基于精益思想的工具。

6.5.1 看板、目视管理、5S管理以及定置管理

1. 看板

（1）看板生产拉动的基本概念。看板是对生产过程中的各工序生产活动进行控制的信息系统。看板通常是一种在透明塑料袋内的卡片，上面记载有零部件型号、取货地点、送货地点、数量等信息，以此作为生产、取货的指令。经常使用的看板主要有两种：取料看板和生产看板。取料看板标明了后道工序应领取的物料的数量等信息；生产看板则显示前道工序应生产的物品的数量等信息。精益生产以逆向“拉动”方式控制着整个生产过程，即从生产终点的总装配线开始，依次由后道工序“在必要的时刻领取必要数量的必要零部件”，而前道工序则“在必要的时刻生产必要数量的必要零部件”，以补充被后道工序领走的零部件。这样，看板就在生产过程中的各工序之间周转，从而将与取料和生产相关的时间、数量、品种等信息从生产过程的下游传递到上游，并将相对独立的工序个体联结为一个有机的整体，如图6—16所示。使用看板所遵循的基本原则是：

1）不向后一道工序传送次品。

2）在必要的时间由后一道工序来领取必要数量的必要零部件。

3）前道工序只按后一道工序的取货量进行生产。

4）进行均衡生产，各工序均匀地领取零部件。

5）根据看板进行微小的调整。

6）要使生产工序稳定化、合理化，因为看板数量越多在制品就越多，所以要不断地减少看板数量。

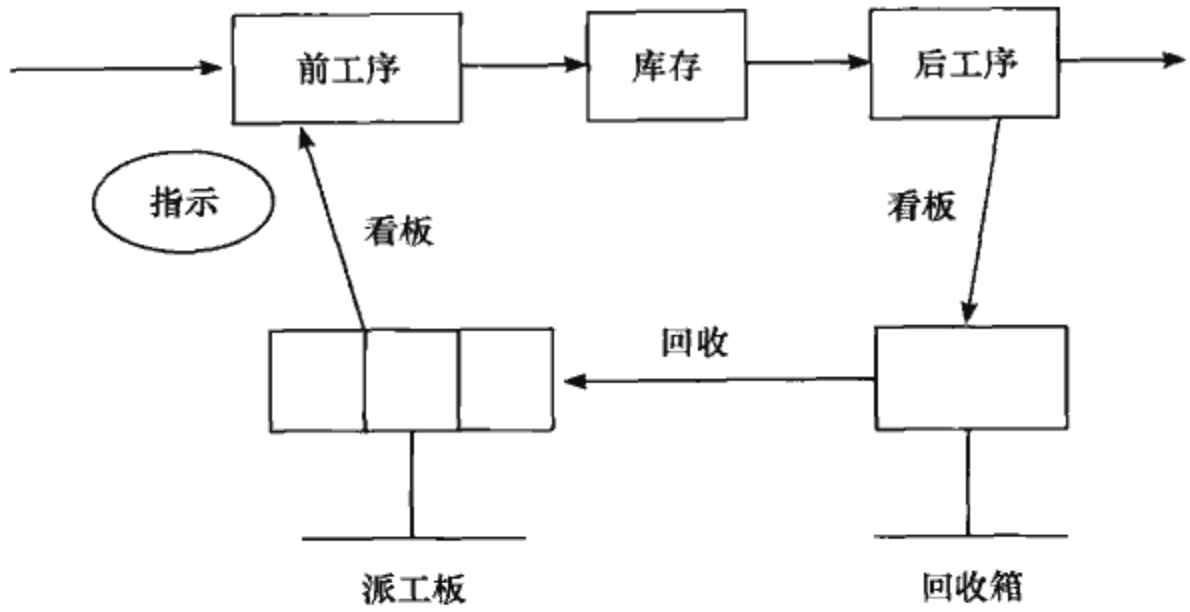


图 6—16 看板拉动生产模型

（2）看板的设置与计算。看板的设置以生产过程中的产品和零部件的搬运单位作为基准，搬运的工具通常有托板、拖车、零件箱以及专用物流器具等。

拉动生产过程中每种产品所需看板张数通常使用下列公式进行计算，式中各参数的含义和关系如图 6—17 所示。

$$\text{看板张数}=\frac{\text{每班最大产量}\times\left(\text{生产间隔期}+\text{生产提前期}+\text{回收提前期}+\text{安全库存}\right)}{\text{单位容器容量}}$$

式中，生产间隔期指从对生产线做生产指示到下次生产指示的间隔；生产提前期指从对生产线做生产指示到生产结束的间隔；回收提前期指回收放在回收箱内的看板，用来对前工序做生产指示的间隔；安全库存指为应付突发事件所储备的库存，这里用安全库存量能够维持的生产时间表示；单位容器容量指单位物流容器存放的零件数。

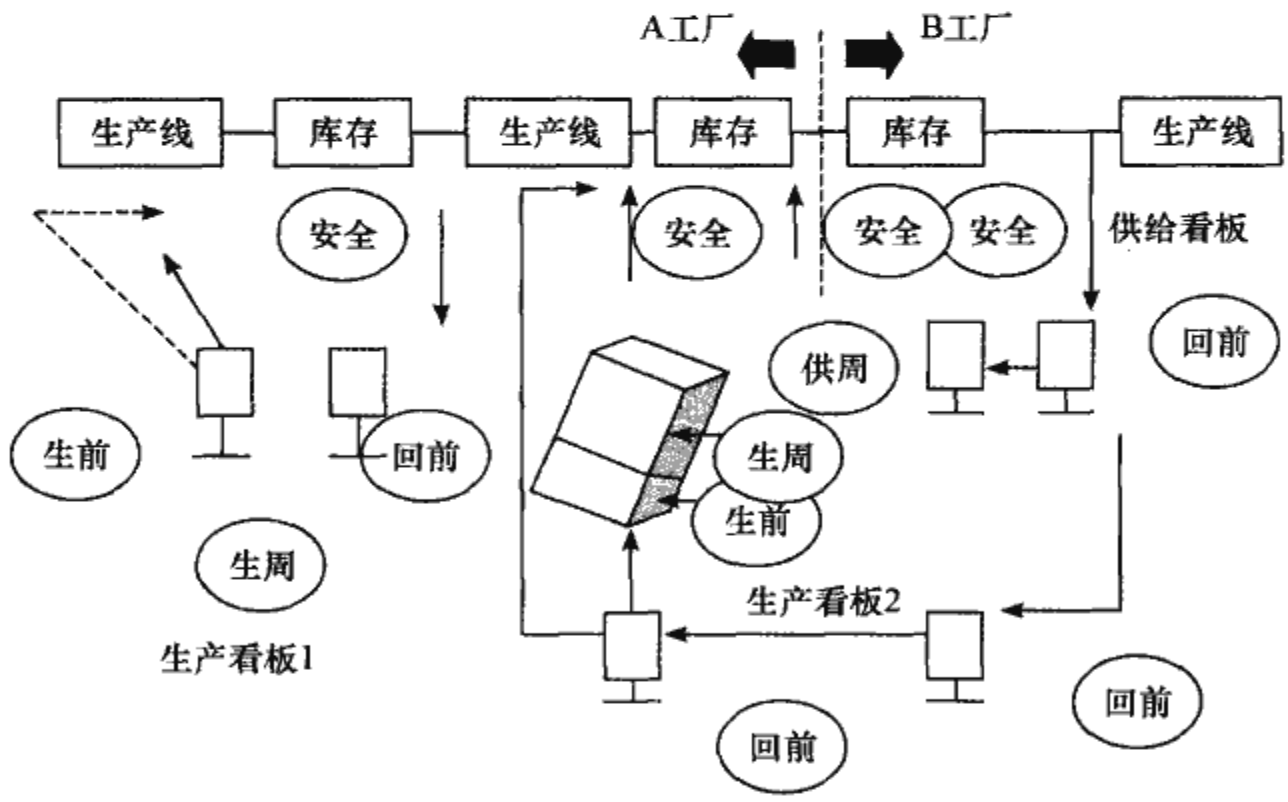


图 6—17 看板张数计算方法

说明：图中的“安全”指“安全库存”，“生前”指“生产提前期”，“生周”指“生产周期”，“回前”指“回收提前期”，“供周”指“供应周期”。

图 6—18 所示为看板张数的计算例子，生产间隔期＝0.5 日，生产提前期＝0.2 日，回收提前期＝0.6 日，安全库存＝0.2 日产量，单位容器容量＝5 个/托板。一天两班次：A 产品＝100 个/班，B 产品＝150 个/班，C 产品＝150 个/班。则每班产品 A，B，C 所需看板张数分别为：

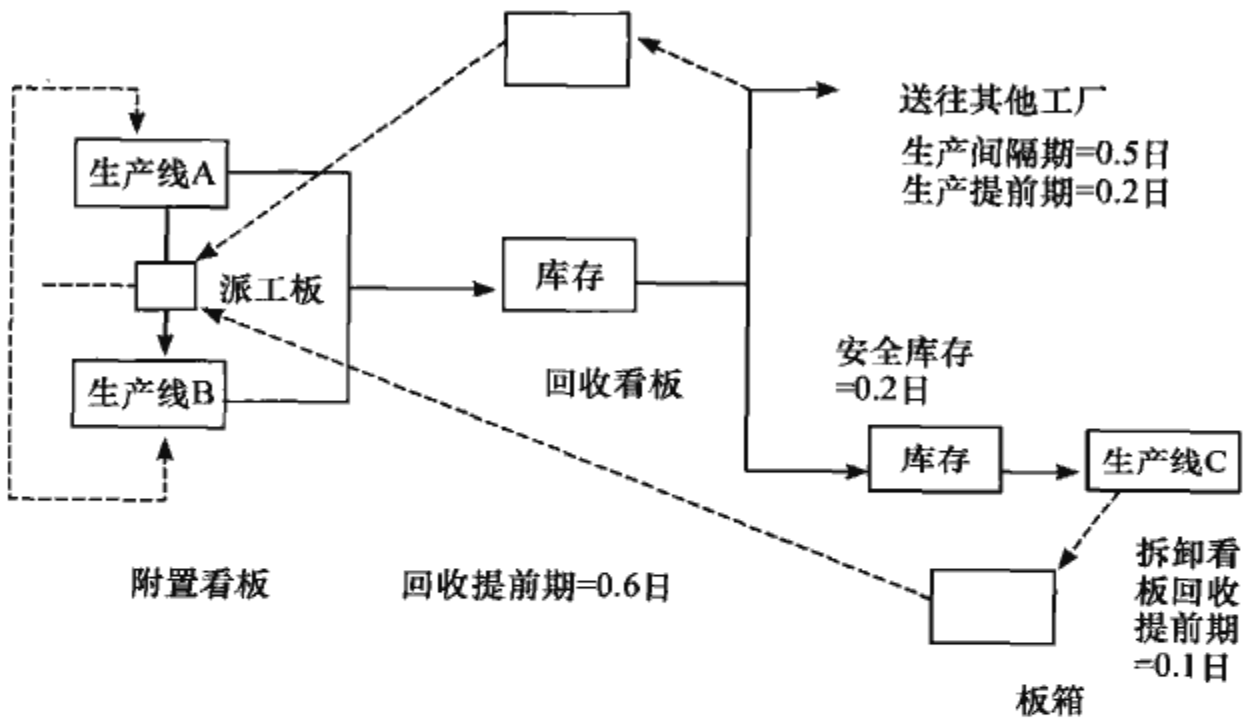


图 6—18　看板张数计算示例

$$A=\frac{100\times(0.5+0.2+0.6+0.2)}{5}=30$$

$$B=\frac{150\times(0.5+0.2+0.6+0.2)}{5}=45$$

$$C=\frac{150\times(0.5+0.2+0.6+0.2)}{5}=45$$

看板拉动的优点如下：

（1）暴露生产中的问题，使得企业越做越好。

（2）由于前道工序只按后一道工序的取货量进行生产，使得整个过程中的库存量降低。

（3）看板随物流而动，信息流与物流融为一体，使得企业能够实现更好的管理。

（4）生产过程中的信息流动性高，有利于企业质量的提高。

实施看板拉动是有条件的，如生产能够均衡，设备运行良好且布局合理，作业标准化，原材料和零配件的供应必须准时、保质、保量等。如果这些条件满足不了，看板拉动就不能发挥应有的作用，从而难以实现精益生产。

2. 目视管理

目视管理是通过视觉导致人的意识变化的一种管理方法。它是利用形象直观、色彩适宜的各种视觉感知信息来组织现场生产活动，达到提高劳动生产率的一种管理方式。它是以视觉信号为基本手段，以公开化为基本原则，尽可能地将管理者的要求和意图让大家都看得见，借以推动自主管理、自我控制。目视管理是一

种以公开化和视觉现实为特征的管理方式，也可称为“看得见的管理”、“可视化管理”。

在传统的管理中，管理人员通常通过口头或文件形式安排生产发布指令。在现场，员工难以很清楚地了解他们应该做什么、怎么做、当前的质量如何等问题，而目视管理正是顺应了这种需求，它利用表格、图形、信息板等形式生动地向工人传达各种信息。

目视管理的内容与形式如下：

(1) 生产任务、工作任务和完成情况要公开化和图表化。公开化就是将生产、工作任务、计划指标、完成情况均按车间、班组、个人落实，并列表公布在墙上，并用作图法，使大家都能形象地看出各个指标完成中的问题和发展趋势，以便都能按期、按质、按量地完成各自的任务。

(2) 与现场、办公室密切相关的规章制度和工作标准、时间标准要公之于众。与岗位工人直接相关的部分应分别展示在岗位上并始终保持完整、齐全、正确。

(3) 以清晰、标准化的视觉显示信息落实定置管理。采用标准化、清晰的信息显示符号，将各种区域、通道、物品的摆放位置鲜明地标示出来，机器设备和各种辅助设备器具均应有标准颜色，不得任意涂改。

(4) 要采用与现场工作状况相适应的信息传导信号。为能及时地控制生产作业，生产环节和工种之间也要设立方便实用的信息传导信号，以便尽量减少工时损失，提高生产的连续性。在各质量管理点，要有质量控制图，清楚地显示质量波动信息，车间要公布不良品的统计情况，出现的废品要展示。

(5) 现场、办公室的各种物品的码放和运送要标准化。在现场，各种物品要按标准化运送及码放，以实现过目知数。

(6) 统一规定现场人员着装，实行挂牌制度。

(7) 现场、办公室的各种色彩运用要实现标准化，有利于人的身心健康，现场的色彩也要标准化。

目视管理的基本要求如下：

(1) 统一：目视管理要实现标准化。

(2) 简明：各种显示信号应易看懂，一目了然，简单明确。

(3) 醒目：各种视觉显示信号要清晰、位置适宜。

(4) 实用：少花钱、多办事、讲求实效。

(5) 严格：严格遵守和执行各种规定。

总之，目视管理是一种有效的管理方法，形象直观，有利于信息交流，识别异常情况，提高工作效率，有利于现场人员互相监督，发挥激励作用，产生良好的生理和心理效应。

3. 5S 管理

目视管理是精益管理的基础，5S 管理也是精益管理的基础。5S 管理是起源于日本丰田公司的一种现场管理模式，它提出的目标简单明确，就是要为员工创造一

个干净、整洁、舒适、科学合理的工作场所和空间环境并通过实施有效的 5S 管理，最终提升人的素质，为企业造就一个高素质的优秀群体。5S 是整理（seiri）、整顿（seiton）、清扫（seiso）、清洁（seiketsu）、素养（shitsuke）五项活动的总称。整理就是把需要的东西和不需要的东西明确地分开，把不需要的东西扔掉。整顿就是把需要的物品按需要时便于使用的原则整齐地放置，明确标识，以便大家明白。清扫就是对工厂进行全面细致的打扫，保持清洁。清洁就是不断地保持整理、整顿、清扫的结果。素养就是培养员工遵守规章制度、纪律的习惯。没有 5S 造就的良好管理现场基础，企业实施精益生产是不可想象的。

5S 是现场管理的基础，在一个没有实施 5S 管理的企业中，浪费随处可见，无论是精益生产还是 MRP、ERP 等信息管理系统的实施，都要求全体人员具有按规定做事的习惯，知道什么物品应放在哪里，数量应是多少，何时出入库，等等，否则再好的生产系统也无法取得良好的效果，甚至实施后效果更糟，企业内部陷入混乱之中。5S 管理是通过现场现物的规范，明确“场所、方法、标识”，确定“定点、定容、定量”及大量使用目标管理等方法、手段，构筑一个整洁、明朗、一目了然的工作现场。5S 管理能有效解决工作场所凌乱、无序的状况，有效提升个人行动能力与素质，有效改善文件、资料、档案的管理，有效处理工具、物品、器械的管理，使工序简洁化、人性化、标准化，节约时间，提升工作效率，有效提升团队业绩。实施 5S 管理不仅提高了企业形象，还能增强顾客的满意度。5S 管理同时减少了生产过程中的浪费，为企业增加利润。另外，5S 管理强调作业标准化，为标准化工作的推进起到重大作用。5S 管理的实施创造了良好的工作环境和氛围，改善了员工的情绪，提升了员工的归属感和成就感。

近年来，有些企业将 5S 进一步推广开来，倡导 7S，增加了安全（safety）和节约（save）两项内容，将安全生产和减少浪费、节约用电、节约用水、保护环境紧密地联系在一起。也有的企业加上习惯化（shiukanka）、服务（service）及坚持（shikoku），形成了 10S，但是万变不离其宗，所谓 7S、10S 都是从 5S 衍生出来的。企业的管理水平上去了，所生产的产品质量自然也就提高了，同时也会降低企业的生产制造成本，创造经济效益，这不仅会增强企业的市场竞争力，也有利于企业的生存和发展。

4. 定置管理

定置管理是研究生产现场人、物、场所的结合状态，动态地掌握人、物、场所的关系，并从其内在联系中寻找改善和加强现场管理的对策和措施，使物流运行处于受控的状态，使现场生产要素有效地结合，实现人、物、场所在时间上、空间上的优化组合，以最少的时间、最低的成本，生产出用户满意的产品。它以物在场所的科学定置为前提，以完善的信息系统为媒介，以实现人和物的有效结合为目的，通过对生产现场的整理、整顿，把生产中不需要的物品清除掉，把需要的物品放在规定的位置，使之随手可得，促进生产现场文明化、科学化，达到高效、优质、安全的生产效果。

定置管理包括生产厂区的定置、车间定置和库房定置等内容。开展定置管理应

按照以下六个步骤进行。

（1）工艺研究。工艺研究是定置管理开展的起点，通过对生产现场的加工方法、机器设备、工艺流程等的分析调查以及可行性研究，从而确定生产现场产品制造的工艺路线和搬运路线。

（2）人和物结合的状态分析。人和物结合的状态分析，是开展定置管理中最关键的一个环节。定置管理的主体和本质就是人和物的结合。而要在生产中实现人、物、场所三者最佳结合，就必须对人和物结合状态进行分析。

（3）信息流的分析。信息媒介就是人与物、物与场所合理结合过程中起指导、控制和确认等作用的信息载体。由于生产中使用的物品种类不同、数量大，就需要一定的信息来指导找到它们的流向和数量。因此，在定置管理中，完善而准确的信息媒介是很重要的，它影响到人、物、场所的有效结合程度。

（4）定置管理设计。定置管理设计就是对各种场地及物品如何科学、合理定置的统筹安排。定置管理设计主要包括定置图设计和信息媒介物设计。

（5）定置实施。定置实施是理论付诸实践的阶段，也是定置管理工作的重点。包括三个步骤：第一步，清除与生产无关之物；第二步，根据定置图实施定置；第三步，放置标准信息名牌。

（6）定置检查与考核。定置管理的一条重要原则就是持之以恒。只有建立定置检查与考核制度，才能实现定置管理长期化、制度化和标准化。

定置管理改善了工人的操作条件和环境，有效地防止了劣质产品的产生；同时减少了寻找时间，提高了工作效率，可使生产现场的人流、物流、信息流顺畅，使工人产生一种“看着顺眼，拿着顺手，干着顺心”，既文明整洁又心情舒畅的感觉，从而激发广大员工高昂的劳动热情和生产积极性，以及以厂为家的主人翁责任感。

6.5.2 设备布局改进

设备布局改进是指按照一定的原则，在设备和车间内部空间面积的约束下，对车间内各组成单元、工作地以及生产设备进行合理的布置，使它们之间的生产配合关系最优，物料运送代价最小。设备布局是否合理将直接影响到生产能力、生产成本和工作效率。良好的设备布局可以减少生产成本，减少在制品的停留时间，加快产品的生产，节省空间。设备布局就是将各个工作地内的各个设备合理安排，在满足各设备面积和位置的限制条件下，使它们组合成一定的空间形式，从而有效地为企业的生产运作服务，以获得更好的效果。常见的布局形式有单行布局、多行布局、U形布局和环形布局等，其中的约束条件包括：设备不可重叠，设备不可超出工作地范围，设备之间必须满足最小间距要求，等等。

下面以丰田汽车的设备布局方式来介绍U形布局，它按零件的加工工艺要求，把功能不同的机器设备集中布局在一起组成一个个小的加工单元。这种设备布局方式可以简化物流路线，加快物流速度，减少供需之间不必要的在制品储量，减少运输成本。U形布局如图6—19所示。

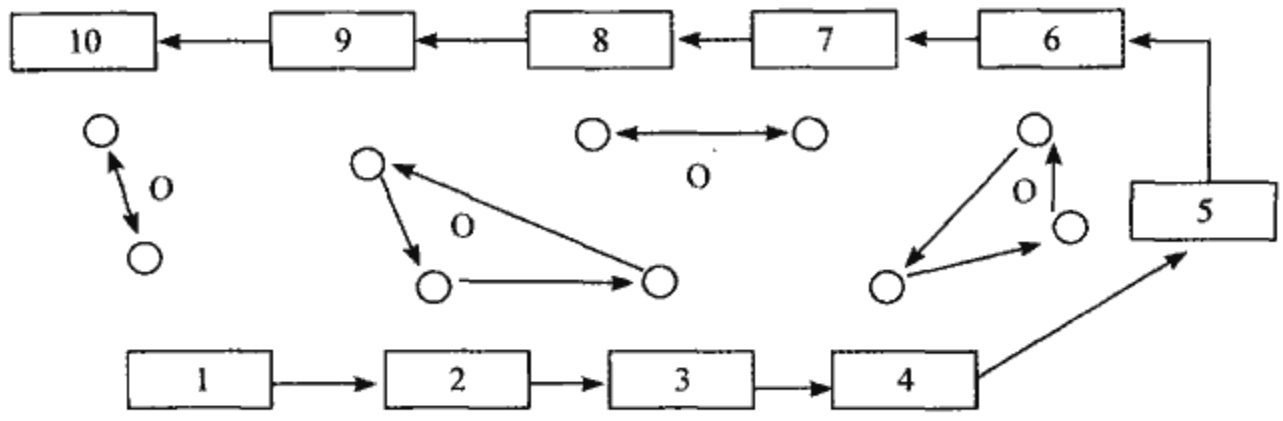


图 6—19　U 形生产单元

说明：O 为作业员。

U 形单元中，作业员是可以操纵多种不同工作站的多技能作业人员，所以这种形式可以缩减人员成本和使生产线更富有弹性，同时也因为作业人员之间的距离较近，若系统中有问题产生，作业员可以很快地作出反应并相互配合解决问题，进而减少损失。如图 6—19 所示，U 形单元物料的投入和产出由同一作业员控制，可以有效地控制 U 形单元的生产节拍和中间在制品的数量，实现标准化作业。

6.5.3　快速换型

快速换型（single minute exchange of die，SMED）也称单分钟换模，是指通过应用工业工程的方法，将模具（现在也包括各种生产线上的工装夹具等）的更换时间、开机设置时间、生产启动时间等减少到 10 分钟以内（单分钟）的一种过程改进方法。快速换型是有必要的，国外有研究显示，在一种产品加工过程的所有操作中，只有 5%是真正能够给产品创造附加值的，其余的 95%并不能给产品增值。这 95%包括诸如以下内容：原材料缺陷、待工、返工、产品质量检查、设备停机、模具更换、库存、材料处理以及物流货运。其中，换型时间的长短是影响企业生产率高低的一个重要因素。而目前的市场是基于多品种小批量、短交付期的产品竞争，在这种形势下，缩短模具切换时间无疑是提高企业生产率和竞争力的一种有效措施。

快速换型的要领就是把设备换型调整的所有作业划分为两大部分，即外部换型调整作业和内部换型调整作业。外部换型调整作业是指那些能够在设备运转之时进行的设备调整作业；内部换型调整作业是指那些必须或者只能在设备停止运转时才能进行的换型调整作业。为了缩短换型调整时间，操作人员必须在设备运行中完成所有的外部换型调整作业，一旦设备停下来，就要集中全力于内部换型调整作业。最重要的一点是尽可能地把内部换型调整作业转化为外部换型调整作业，并缩短两者的时间，以保证迅速完成换型调整作业。

为了缩短作业转换时间，重要的是事先在设备运行当中把所必需的夹具、工具、下一次使用的模具和材料准备好，然后在设备停止下来后安装上模具，设备一开始运转，就把拆下来的模具和夹具移走。作业人员在设备停止运转时，必须集中全力进行内部换型调整作业。

实现快速换型的方法主要有以下几种：（1）将外部作业转换标准化；（2）使用快速紧固件；（3）使用辅助工具；（4）推行并行作业；（5）利用机械的自动换型方式。

实现快速换型可以缩短生产线生产不同产品时的转换时间，确保在尽可能短的

时间内换型成功并生产出合格产品，可促使生产者减少生产批量和降低库存水平而不影响正常的生产作业。快速换型的成功可以带来如下有益的变化：

（1）降低库存数量，节约库存空间。

（2）减少不合格品。

（3）缩短生产周期，减少生产批量，增加顾客的满意度。

（4）提高生产线安全和卫生水平，增加作业人员的责任心。

（5）使精益生产的思想落到实处。

（6）增加生产系统的柔性。

6.5.4 “5W1H”提问技术和“ECRS”原则

在改进阶段，常用的精益改进工具还有方法研究和时间研究。方法研究是对现有的作业方法进行系统的记录、分解和分析，明确每一项活动或作业的价值，消除不必要的非增值作业活动或对现有作业进行优化。方法研究一般包括程序分析、操作分析和动作分析等。程序分析包括生产流程分析、加工路线分析、物料搬运分析和管理业务流程分析。操作分析包括操作作业分析、人机作业分析等。动作分析包括动作影片分析、动素分析等。时间研究的目的是确定一项活动所需标准时间。时间研究的方法包括秒表法、预定时间制（predetermined time system，PTS）。受篇幅所限，本书未详细介绍方法研究和时间研究的技术。在过程改进中，“5W1H”提问技术和“ECRS”原则是常用的改进技术，通过这些方法可以减少物料、资金、时间、能源的浪费，从而降低成本；可以减轻劳动强度，充分发挥工人的潜在能力，提高劳动生产效率；可以缩短零件加工周期，从而有利于提高企业效益和建立新的方法。

“5W1H”（when，what，where，who，why，how）提问技术主要用于对已经记录的事实和材料进行分析提问，以便提出新的方法。为了得到更多的信息，最好按以下步骤进行提问：完成了什么？何时做？何处做？由谁做？如何做？为什么要这样做，是否必要？有无其他更好的成就？为什么要此时做？有无其他更合适的时间？为什么要在此做？有无其他更合适的地方？为什么要此人做？有无其他更合适的人？为什么要这样做？有无其他更合适的方法？“5W1H”又被称为6W技术，这是因为相应的每一提问中都有W字母。这种系统的提问技巧有利于得到更多的信息，了解现行的情况，提出建设性的方法。

在建立新的方法的时候要灵活应用“ECRS”原则。“ECRS”原则即取消（eliminate）、合并（combine）、重排（rearrange）、简化（simplify）。

（1）取消。在经过“完成了什么”、“是否必要”及“为什么”等问题的提问后，其中不能有满意答复者皆非必要，即应予取消。取消为改善的最佳模式，如取消不必要的工序、操作、动作，这是不需要投资的一种改进，是改进的最佳原则。

（2）合并。对于有必要而无法取消的活动或作业，看能否合并，以达到省时简化的目的。如合并一些工序和动作，或将由多人于不同地点从事的不同操作，改为由一人或者一台设备完成。

（3）重排。经过取消合并后，可根据“何人、何处、何时”三提问进行重排，使其能有最佳的顺序、去除重复、办事有序。

（4）简化。在经过取消、合并、重排之后，再对该项工作进行深入的分析研究，使方法和动作尽量简化，使新的工作方法效率更高，成本最低。

6.6 方案的评价与实施

6.6.1 方案的评价

改进方案产生之后，需要对其优劣进行评价。评价方案时要考虑改进方案实施的难易程度、方案的成本、接受的程度、方案实施所需时间、方案所带来的影响等因素。评价方案主要从以下几个方面进行：（1）方案的经济性，包括分析实施方案预计所需资源、时间，方案预计收益等；（2）方案的可接受性，包括方案被利益相关方所接受的程度；（3）方案的风险分析，包括方案实施后对利益相关方所带来的影响，尤其是方案实施不成功所带来的风险，是否存在弥补方案以及可能的后果等。下面着重讲述一些常用的评价方法。

1. 鱼骨图的变形

鱼骨图是利用头脑风暴，集思广益，来寻找影响问题的潜在原因，然后用图形加以表示的一种有用的方法。借助鱼骨图可以将影响质量的各种原因反映到一张树状图中，它旨在寻找问题的根本原因。在常规鱼骨图中，问题填在图右侧的方框中，也就是通常所说的“鱼头”的位置，造成问题产生的原因填写在各个主分类线周围，它们构成“鱼肋骨”。而鱼骨图的变形是系统地思考由于一种新的方案可能造成影响的一种方法，与鱼骨图相似，它仍然采用团队头脑风暴的方式来实现，所不同的是，它分析一种方案可能对其他因素造成的影响。在鱼骨图的变形中，方案填在图左侧的方框中，也就是通常所说的“鱼头”的位置，方案造成的影响填写在各个主分类线周围，它们构成“鱼肋骨”。

例如某企业为了提高产品的质量，打算引进一台高水平的质检机器，用鱼骨图的变形对此方案进行分析，如图 6—20 所示，就是要分析实施此方案将会对市场、顾客、供应商、员工、社会和企业效益等造成的影响，譬如实施此方案将造成企业效益的增加，市场份额的增加，员工的减少等。通过对鱼骨图的变形的分析，有利于选择最佳的方案。

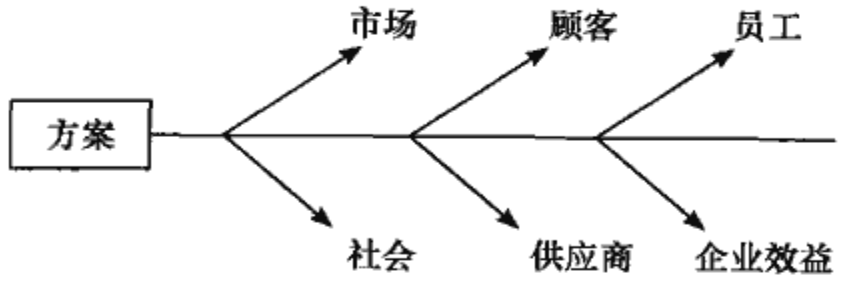


图 6—20 鱼骨图的变形

2. 力场分析

力场分析是我国于 20 世纪 90 年代引进的美国管理科学的“软”技术，是美国

社会心理学家库尔特·勒温（Kurt Lewin）创造的一种企业管理分析方法，是他所提出的组织变革理念的一部分。它能够用于察看各种关系以及影响其变化的因素。一个组织中各种事物的当前状态被看成是一种平衡状态，维持这种状态的是相反两个方向的作用力：驱动力和反驱动力。一项变革不可能在阻力大于动力时发生。增加动力无疑会促进变革的产生，而减少阻力则有可能取得更好的效果。力场分析图是建立在这些作用力与反作用力基础上的一个图表分析模型。力场分析图适用于各个不同层次的变革力量分析，如个人、项目、组织、网络等，能够帮助识别出促进或阻碍变革的各项力量。通常，拟定的变革计划总是位于力场图的最上方（见图6—21）。此图分两栏，各驱动力位于左栏，反驱动力则位于右栏。各力量作用方向均指向中间栏线。其中，箭线较长则意味着作用力也较强。

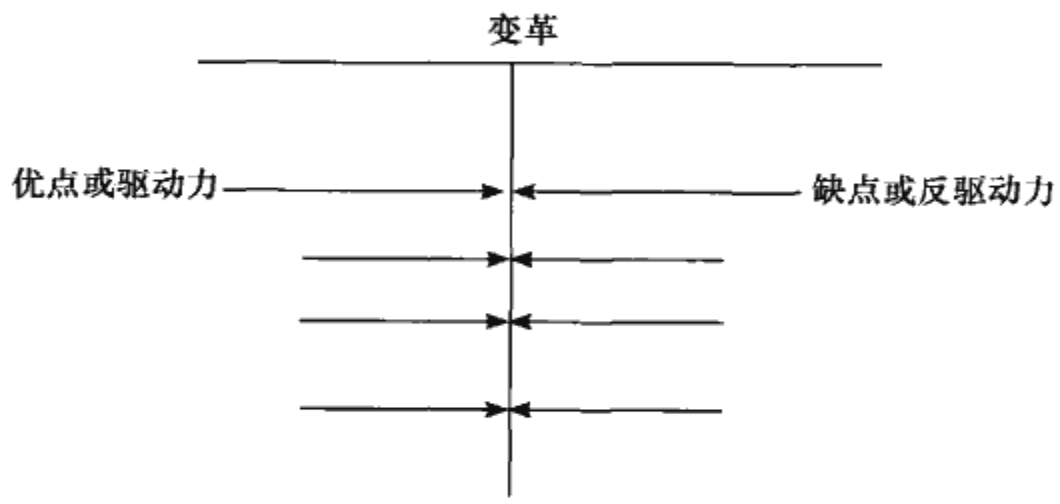


图 6—21 力场分析

改进过程中的力场分析则是把变革变为方案，优点或驱动力为方案实施后产生的益处，缺点或反驱动力则是方案实施后产生的不良后果。为了使分析简单明了，下面以某工厂为例进行说明。为了解决工厂质量水平不高这个问题，某工厂打算引进设备，我们通过力场分析来对此方案进行评价。首先通过分析知道当前工厂的质量水平低下，希望质量水平得到提高，如果不采取有效的行动，工厂可能要面临严重的后果，为此通过分析原因提出了引进设备的改进方法。然后列出了实施此方案的正面作用和负面作用，如图 6—22 所示。

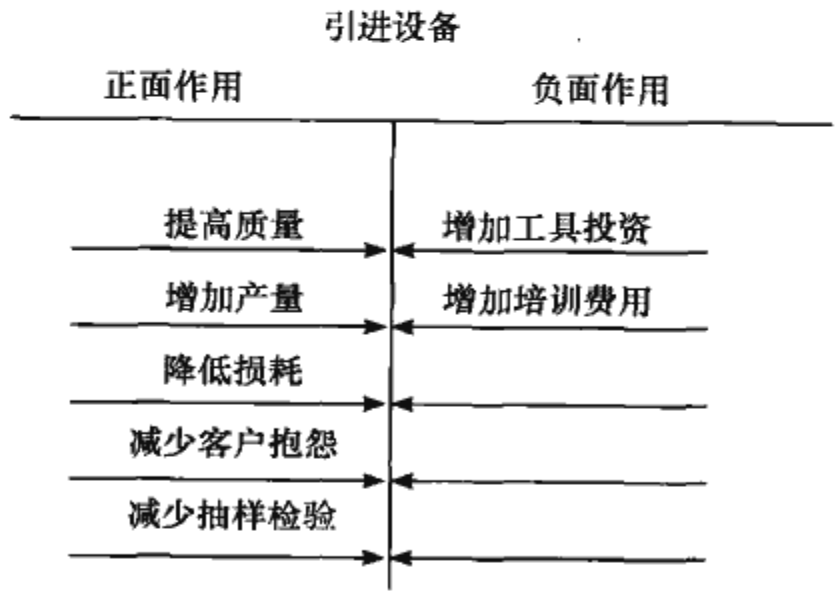


图 6—22 某工厂引进设备的力场分析

接着对正面作用和负面作用的所有力量进行分析，分析它们是否真实有效，能否被改变，哪一些又是最关键的，并对力量的强度进行分析。通过力量分析，判断方案的可行性以及对其实施过程进行判别分析，再接着减少和增强各种驱动力和反驱动力，看看对方案的影响。通过力场分析，可以评价各种方案的经济性、可接受性和风险。

3. 评价矩阵

评价矩阵是定量地评价方案的一种方法，在对各个备选方案进行分析后，选取几个重要的评价要素（评价指标）以及给出它们的权重，然后由专家或者小组对各个方案进行打分，最终根据计算出来的结果选择方案。为了更加清楚地了解评价矩阵，下面给出一个例子。某公司要进行员工培训，通过分析获得三种选择方案：一是通过聘任外部的专业人士进行培训；二是通过内部人员进行培训；三是通过录像自学。这里设定的评价指标是员工培训的效果即质量，方案的可操作性，方案花费的成本，方案所用的时间，如表 6—9 所示，各个指标占的权重分别为 0.4，0.2，0.3，0.1。

表 6—9　　某公司三种方案的评价矩阵

指标与权重 / 方案	质量 (0.4)	可操作性 (0.2)	成本 (0.3)	时间 (0.1)	合计
外部培训	9	3	1	1	4.6
内部培训	3	9	9	3	6.0
录像自学	1	3	9	9	4.6

外部培训的得分＝9×0.4＋3×0.2＋1×0.3＋1×0.1＝4.6

内部培训的得分＝3×0.4＋9×0.2＋9×0.3＋3×0.1＝6.0

录像自学的得分＝1×0.4＋3×0.2＋9×0.3＋9×0.1＝4.6

通过评价矩阵方法，最优方案为内部培训。

6.6.2　方案的实施

经过方案评估后，即可选择出最佳的改进方案。为了保证方案实施的成功，首先要制定实施计划，其次有必要进行一些局部试运行，对改进方案进行验证。通过对局部试验运行效果的分析，为进行全面推广试验奠定基础，从而有利于全面试验的顺利进行。在改进方案推广过程中，企业应广泛宣传推广方案，以取得企业管理层和员工的广泛认同，进一步减少改进的阻力，为方案的实施创造有利的环境；同时将改进方案落实到通俗易懂的文本资料上，以便于执行；实行连续的评估，让企业管理层和员工从评估结果中获得鼓舞和信心；任何改进方案都可能存在需要进一步改进之处，对可能出现的问题，应提前制定应对的策略也就是纠偏方案，并做好进一步改进的准备。

在实施方案时，制定实施计划是非常有必要的，制定实施计划有利于对企业有限的资源进行合理配置，它对方案实施过程中的方方面面进行考虑，同时也设定了

企业实施方案后所取得的成果，便于评估和控制。方案实施计划的内容主要包括：谁来实施，具体的操作步骤，方案实施进度，方案是否可逆，纠偏措施，如何评估实施结果，等等。方案实施计划的给出使得我们能够更加清楚地了解改进方案的实施过程以及如何解决实施过程中产生的问题，保证项目改进方案的顺利实施。



本章小结

改进阶段的目标是形成针对根本原因的最佳解决方案，并且验证这些方案是有效的，所以本章先介绍了产生最佳解决方案的一些方法，其中创造性思维方法、DOE以及精益工具都是产生最佳解决方案的常用方法。接着详细讲述了一些常用的创造性思维方法。然后是试验设计。试验设计是最重要的统计工具，从设计的类型来看，有全因子设计以及部分因子设计、响应曲面设计、稳健参数设计和混料设计。从六西格玛改进策略来看，首先应将有可能影响响应变量的大量因子用部分实施的因子设计进行筛选；然后，当因子个数不超过5个时，就可以进行全因子试验，更细致地考虑因子间的交互作用。紧接着讲述了看板、目视管理、5S管理、定置管理、布局改进、快速换型、“5W1H”提问技术和“ECRS”原则等一些精益工具。产生的解决方案需要评价，本章在最后讲述了评价方案的一些常用方法和方案实施时应注意的问题。

第7章

控　制

“控制”作为六西格玛 DMAIC 实施流程中的最后一个阶段，十分关键。控制阶段是项目团队维持项目改进所取得的成果的重要步骤。控制阶段的主要目的是避免回到旧的习惯和程序，对人们的工作方式形成长期影响并得以保持。

为了保持项目改进的成果，需要将改进阶段对流程的修改或新的流程作业指导书以标准化形式纳入受控的文件体系内，建立过程控制系统。控制关键的质量特性 X，记录每个控制计划，并将修订过程移交过程负责人。六西格玛团队控制细节应当包括：

- 建立监视过程，明确已取得的改进。
- 确定关键控制点、控制参数和控制方法。
- 制定应变方案。
- 形成新的程序文件或作业标准。

7.1　控制阶段概述

控制的目的在于保持项目所取得的成效，进一步实现持续改进。控制阶段有三要素：

（1）过程改进成果的文件化。

（2）建立过程控制计划。

（3）持续的过程测量和控制。

7.1.1　过程改进成果的文件化

在许多企业里，作业程序文件没有得到有效的执行，一个重要原因是企业在员

工执行程序上缺乏明确的规范和纪律，这使得过程控制变得无章可循。因此，企业应当注意以下两点。

1. 使员工明确纪律

员工能否严格按照文件、制度、标准去工作是衡量企业执行力的一个重要方面。因此，企业在员工招聘、培训、跟踪、考核评估和奖励的时候，要考虑员工能否严格执行纪律。组织应当明确确定一个“过程负责人”，保证整个过程是被持续监督、研究和改进的。

只有在员工都能理解监督、控制和改进的原则和好处时，员工才能严格执行制度。因此，企业在实施六西格玛时，对员工进行六西格玛的基础培训，让员工充分了解自己应当履行的职责是必要的。

2. 改进过程文件化

通过过程改进，组织已经取得一定的成效，这时就应当将改进成果维持下去。那么，必须使得已经改进的过程详细记录在册，并形成操作规范及固定程序，将所有新措施文件化。控制阶段的主要输出应该包括：过程控制体系、程序文件、作业标准、数据记录、控制图和失控行动方案。以下是在改进过程文件化中应当注意的问题：

(1) 保持文件的简单化。用通俗易懂的表达方式对过程要求进行阐述，运用流程图、程序文件、图表、照片、录像带等形象化辅助工具。

(2) 应急方案的制定。对于过程中潜在的问题要进行预警，并制定相应应急方案。

(3) 集思广益，对复杂过程要适时进行修订。复杂过程的操作规程不宜立即全部确定，可以召集过程负责人、技术人员、操作人员一起讨论，反复论证，直到文件细化到可以准确顺利执行，并做到适时更新与修订。

7.1.2 建立过程控制计划

在实际中，要对过程实施有效的监督和控制，需要建立过程控制计划。一个良好的过程控制计划一般包括以下内容。

1. 正确的流程图

过程负责人需要掌握过程中各个行动和决策的每个细节，正确、详细的流程图必不可少。

2. 制定明确的过程应变计划

在过程应变计划中应当清楚标明在过程中的哪些地方可以准确测量过程输入、过程操作和过程输出的关键数据。当有质量问题出现时，过程负责人会根据过程应变计划作出反应。

3. 紧急事件抢险

过程一旦发出了行动警报，应急预案或补救计划就显得十分重要。如果员工事先已经了解这些紧急操作步骤，就可以毫不犹豫、有条不紊地圆满完成相关任务。

4. 针对持续改进的计划

除了跟踪过程中发生的问题，过程应变计划也为六西格玛团队彻底检查过程的薄弱环节提供了基础。一旦建立起足够的过程应变计划，在实践中又积累了足够的经验，可以进一步发现改进机会，就有了广泛的项目资源，未来的六西格玛团队可以针对这些项目进行改进。

7.1.3 持续的过程测量和控制

在实施六西格玛的 DMAIC 过程中，项目组通过测量来定义问题、统计缺陷、分析变化的原因，并测量改进是否成功。在控制阶段，项目组仍然要努力关注测量，必须重新明确找出需要测量的关键点，关键点既包括对响应变量的测量，也包括对生产条件中关键输入变量的测量。项目组在寻求测量和控制时有三个关键点。

1. 完善过程的 SIPOC 图

对已经改进的过程，完善其过程 SIPOC 图，其中要特别注意“顾客的需要”这个关键问题。六西格玛团队必须实时地测量过程输出是否与顾客需要相一致，要做到及时发现产品缺陷或过程变化。

2. 对过程关键变量进行控制

确定测量哪个上游的过程变量与改进紧密相连，持续测量这个过程将可以预测中下游的结果。只有控制了过程的所有关键变量，才可以确保过程的输出能够满足要求。例如，如果“准时”是一个关键顾客需求，并且过程测量显示其中的两个关键过程步骤正变得越来越长，团队就需要在它导致结果延迟（即出现缺陷）之前寻找和评估产生这种趋势的原因。

3. 关注关键输入测量

关键输入测量能帮助预测过程关键步骤的运行和关键输出结果的质量。在控制阶段可能要花一段时间来建立对一系列变量进行测量的测量链，这是很值得花精力的工作，测量链最能体现过程的特征。一旦测量链建立，它就变成了计分卡的根据，任何负责团队改进过程的人都可以在固定的基础（例如，天或月）上用计分卡来监督。

当项目组确定最佳测量项 X 以后，一个重要问题是如何根据收集的数据建立过程控制方法。在六西格玛工具集里，有许多过程控制方法，其中控制图是最常用的工具。项目组成员利用控制图对每个 X 将来的稳定性和能力进行监控。

7.2 常规控制图

在完成绩效改进后，六西格玛团队仍然需要关注过程各方面指标的监控。关注及测量的对象不但包括过程输出的响应变量，而且包括过程中输入的关键因子，这些关键指标的监控将使得项目团队能更长时间地维持和管理过程。统计过程控制（SPC）应用统计技术对过程中的各个阶段进行评估和监控，建立并保持过程处于可接受且稳定的水平，是一种保证产品与服务符合规定要求的有效技术。

休哈特博士在美国贝尔实验室提出了过程控制理论和监控过程的工具——控制图，并于1924年5月16日提出世界上第一张控制图——休哈特控制图。控制图不同于抽样检验。抽样检验是对最终产品实施质量控制，这种事后检验会造成浪费和损失。而控制图是在生产的过程中对产品采取预防策略，通常可以避免或减少浪费和损失。控制图的最大特点在于，将过程由静态控制转变为实时的动态跟踪控制，在控制图上可以方便地了解过去、分析现状与预测未来的质量状况，是一种可以在现场直接研究质量特性数据随时间变化的统计规律的动态方法。经过不断地完善和发展，控制图在控制生产或工作的工序状态、检查判断工序异常等方面逐渐得到广泛的应用，成为质量控制中的重要方法。从质量控制理论的发展史来看，休哈特可称为统计过程控制理论的奠基人。

统计过程控制中运用了大量的统计技术与方法来对过程的各个阶段进行监控，其中，统计技术泛指任何可以应用的数理统计方法，以控制图理论为主。统计过程控制理论不仅适用于加工过程，而且适用于各种设计过程、管理过程、生产过程、服务过程等。

休哈特控制图亦称常规控制图，本节将对控制图的基本概念以及几类常见常规控制图的实现过程进行介绍。

7.2.1 控制图的基本概念

1. 质量波动的两种原因

无论在任何情况下，按一定标准制造的大量同类产品间总是存在差别，称为变异。

导致产品质量产生变异的因素有很多，可以归纳为六个方面：人（man）、机（machine）、料（material）、法（method）、测（measurement）、环（environment），简称为5M1E。受5M1E的影响，即使是同一个人、同一种材料或同一台机器生产出来的同一种产品，其质量水平也不尽相同。依照对质量特性影响的不同，导致过程质量波动的原因有两大类：

（1）随机原因（common cause）。随机原因又称偶然原因，是一些经常存在的、对质量影响比较微小，但是在任何情况下都不可能避免的原因。如原材料的化学成分的微小差别、室温的轻微变化、操作者生理和心理的正常变化等，这些变化都没

有规律性并且没有办法规避，因此可把它当做背景噪声而听之任之。

（2）系统原因（special cause）。系统原因又称异常原因，对产品质量的影响较大，比较容易查找其发生的原因，是质量控制关注的主要对象。如工人不遵循操作要求、机床失灵、操作人员思想不集中等，这类因素一般较少出现，一旦出现，应当立即找到改进的措施加以消除，并纳入标准，保证它不再出现。

由随机原因引起的产品质量特性的波动称为正常波动或偶然波动，由系统原因引起的产品质量的波动称为异常波动。

2. 控制图的主要用途

控制图的主要作用是对在生产过程中出现的影响产品质量的各种因素进行控制，使异常因素刚一露出苗头，甚至在未造成不合格品之前就能及时被发现。通过控制图可以判断生产过程是否正常，使生产过程始终处于受控状态。控制图可以做到以预防为主，将可能影响产品质量的各种因素消灭在萌芽阶段，以较小的成本或代价来提高生产效率和经济效益。主要用途包括：及时发现生产过程中的异常现象和缓慢变异，预防不合格品发生，从而降低生产费用和提高生产效率；有效分析、判断生产过程质量的稳定性，从而使生产过程处于统计控制状态。

3. 控制图的基本格式

控制图的基本格式由两部分组成。

第一部分为标题部分。标题部分的内容主要包括：产品名称、工序编号、质量特性、观察方法、规定界限（或要求）、收集数据时间、抽样间隔、抽样数量、设备编号、观察仪器编号以及车间、操作员、检验员、控制图名称等。通常将这些内容根据工序控制的具体要求，制成表格的形式（见表 7—1）。

表 7—1　　控制图标题内容

控制图标题： _____

控制图名称： ×××　**控制图**

<table>
<tr><td>产品名称</td><td></td><td colspan="2">工序编号</td><td></td><td>收集数据时间</td><td></td></tr>
<tr><td>质量特性</td><td></td><td colspan="2">车间</td><td></td><td>设备编号</td><td></td></tr>
<tr><td>观察方法</td><td></td><td colspan="2">给定日产量</td><td></td><td rowspan="3">操作员</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">规定界限（或要求）</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">抽样</td><td>间隔</td><td></td></tr>
<tr><td>数量</td><td></td></tr>
<tr><td>规范编号</td><td></td><td colspan="2">观察仪器编号</td><td></td><td>检验员</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="4">生产过程质量要求</td><td colspan="3"></td></tr>
</table>

第二部分为控制图部分。在普通坐标纸上作出两条控制线和一条中心线，然后按时间顺序抽样，将抽样所得的特性值按时间顺序依次描在坐标图上，基本格式如图 7—1 所示。横坐标表示按时间先后顺序所得到的样本编号；纵坐标表示需要控制的质量特性值；中心线一般用实线表示，上、下两条控制线一般用虚线表示，分别记为上控制界限 UCL 和下控制界限 LCL。

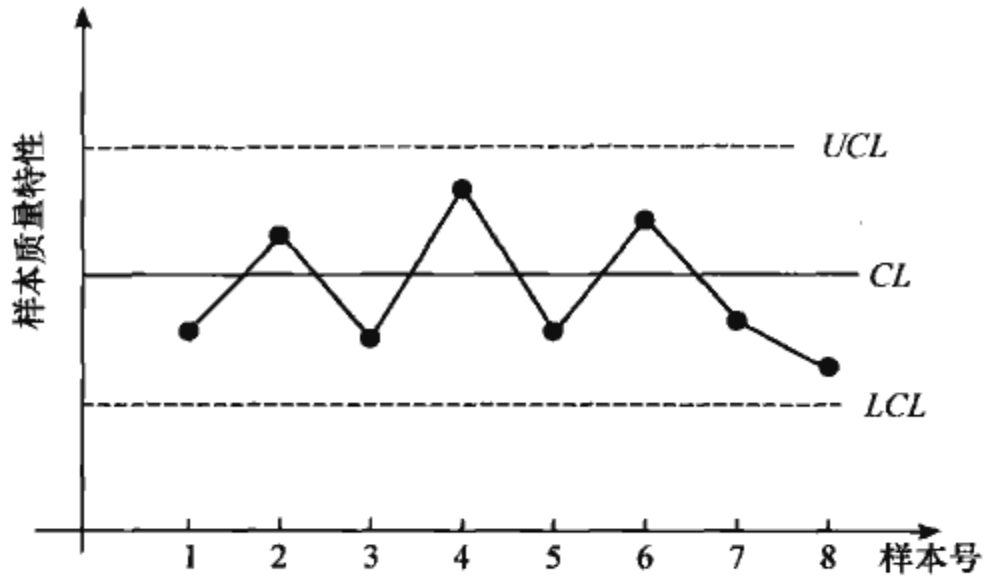


图 7—1 控制图示例

在生产过程中，定时并按序抽取样本，将取得的样本特性值用点描在控制图上的相应位置。如果点全部落在上、下控制界限之内，并且点的排列无缺陷，则判定生产过程处于稳定状态；如果点超出控制界限之外，或者点的排列有缺陷，则判定生产过程中存在异常因素，过程已经处于非统计控制状态。此时必须查明原因、采取措施并设法消除异常因素使过程恢复正常。

4. 控制图的统计原理

任何生产过程生产出来的产品，其质量特性值都会存在一定程度的波动。若过程仅受随机因素的影响，则质量特性值一般服从正态分布，设 $X\sim N(\mu, \sigma^2)$。正态分布中的一个结论在质量控制中有着重要应用，即无论均值 μ 和标准差 σ 取何值，产品质量特性值落在 $\mu\pm3\sigma$ 之间的概率为 99.73%，如图 7—2 所示。如果生产过程只受随机因素的影响，该过程的产品的质量特性值应当有 99.73%的概率落入该范围，即：

$$P\{\mu-3\sigma<X<\mu+3\sigma\}=99.73\%$$

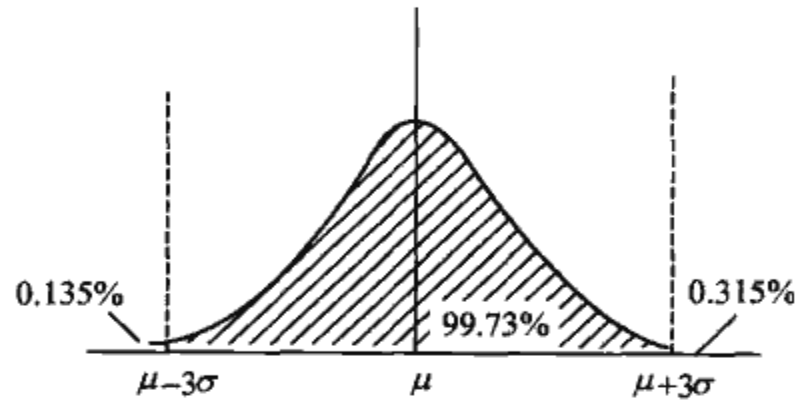


图 7—2 质量特性正态分布图与 3σ 准则

将图 7—2 按顺时针方向转 90°，再将图上下翻转，成为图 7—3，这样就得到了一张控制图的基本形状。其中，$UCL=\mu+3\sigma$ 为上控制界限，$CL=\mu$ 为中心线，$LCL=\mu-3\sigma$ 为下控制界限。

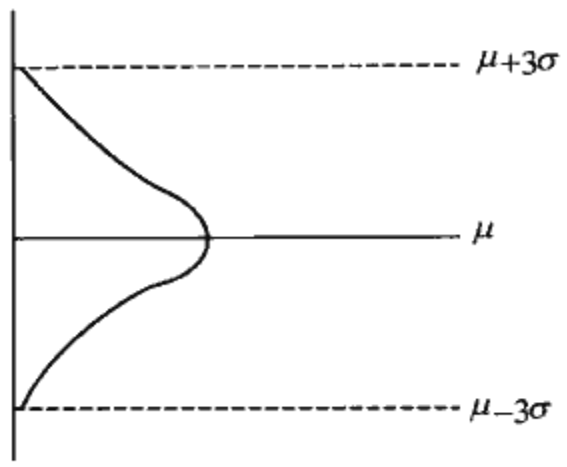


图 7—3　控制图示例

由 3σ 准则可知，当质量特性 X 服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 时，X 落在 $\mu \pm 3\sigma$ 控制界限之外的概率为 100%−99.73%=0.27%，而超过一侧，即大于 $\mu+3\sigma$ 或小于 $\mu-3\sigma$ 的概率为 $\frac{0.27\%}{2}=0.135\%\approx1‰$。休哈特建议用界限 $\mu \pm 3\sigma$ 作为控制界限来管理过程，即假设检验中“小概率事件实际不可能发生”原理来对过程进行控制。正常情况下，X 一般不应该超出控制界限，一旦有界限之外的数据点出现，就可判为异常点，即认为它们是由特殊因素造成的过程变异使得 X 的分布发生了偏离。统计过程控制图的基本原理可用图 7—4 概括表示。

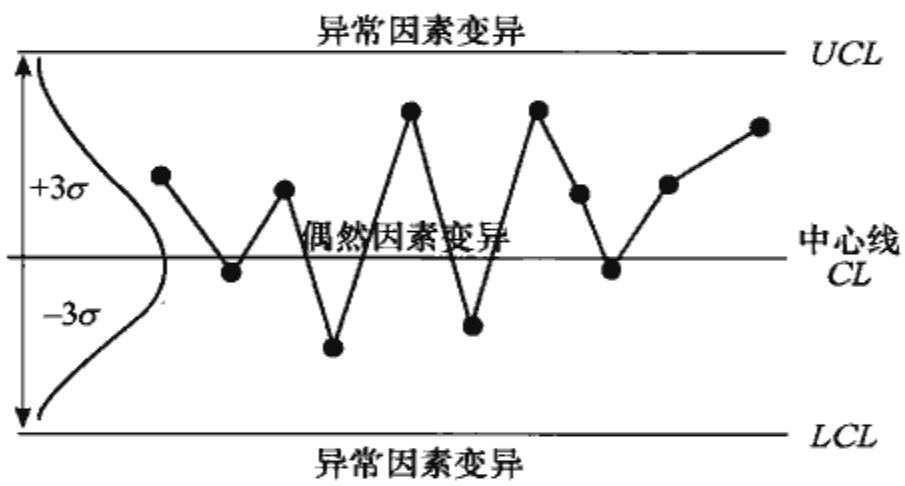


图 7—4　控制图原理示意图

当过程出现异常时要及时查找并进一步分析导致过程发生变异的原因。控制阶段实施过程控制所追求的目标是只有偶然因素没有异常因素的状态，称为统计控制状态（state in statistical control），简称稳态。

注意：控制界限与顾客需求或产品或服务的规格或规范是无关的。不能主观地认定只要过程数据均保持在控制界限内就满足了顾客的需求。控制界限是用于区分过程中偶然波动与异常波动的科学界限，是通过过程数据计算得来的，不能反映出顾客的需求或产品服务的规格规范要求。例如，某蛋糕店运用控制图来监控蛋糕的制作时间，整个过程中都没有发出异常信号，控制图监控显示蛋糕制作过程受控。然而，承诺顾客 2 小时取蛋糕，而实际平均蛋糕制作时间为 2 小时 25 分钟，过程虽然受控但显然未能达到顾客的要求。因此，如何将蛋糕制作时间稳定地控制在 2 小时以内，满足顾客的需求，正是六西格玛团队进行质量改进的一项目标。

5. 控制图的设计思想

控制图对生产过程进行监控时采取抽样的方式，这种方式虽然十分经济但也存在风险。在控制图应用过程中会导致发生两种错误：

（1）虚发警报的错误，也称第一类错误。在生产正常的情况下，纯粹由于偶然因素而导致点出界的概率虽然很小，但不是绝对不可能发生的。因此，在生产正常的场合下，根据点出界而判断生产异常就犯了虚发警报的错误即第一类错误，发生这种情况的概率通常记为 α，也称弃真概率（见图 7—5）。虚发警报的错误将引起寻找并不存在异因的损失。

（2）漏发警报的错误，也称第二类错误。在生产异常的情况下，产品质量的分布偏离了典型分布，但总有一部分产品的质量特性值在上、下控制界限之内。如果取到这些产品进行检测并在控制图中描点，这时由于点未出界而判断生产正常就犯了漏发警报的错误即第二类错误，发生这种情况的概率通常记为 β，也称存伪概率（见图 7—5）。漏发警报将引起废次品增加的损失。

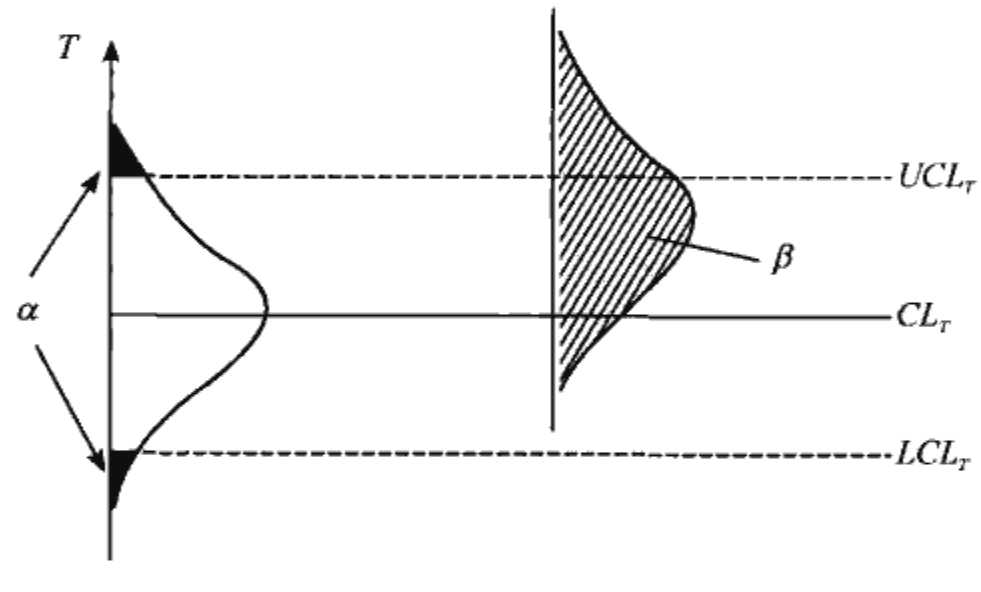


图 7—5 两类错误及其发生的概率示意图

一般，若统计量为 T，且 T 服从正态分布，控制图的控制界限为：

$$UCL_T=\mu_T+3\sigma_T$$
$$CL_T=\mu_T$$
$$LCL_T=\mu_T-3\sigma_T$$

式中，μ_T，σ_T 为统计量的总体参数，下标 T 泛指某统计量。可见，常规控制图的设计思想是先定 α，再看 β。休哈特为增强使用者的信心，把常规控制图的虚发警报概率 α 取得特别小，仅为 $\alpha=0.27\%$。

6. 控制图的判异准则

常规控制图的设计思想是先确定犯第一类错误的概率 α，然后再根据犯第二类错误的概率 β 的大小来考虑是否采取必要的措施。休哈特将 α 取值 $2.7‰\approx3‰$。这样，对于“点出界就判异”这条判异准则来讲，意味着：当过程处于统计控制状态时，大约1 000 个点中仅有不到 3 个点会超出控制界限。但 α 小，β 就大。为减少第二类错

误，对于控制图中的界内点增添了第二条判异准则，即“界内点排列不随机判异”。于是，判断异常的准则就分为以下两大类：

（1）点出界就判断异常。

（2）界内点排列不随机就判断异常。

具体来讲，共有八条判异准则来判断过程是否受控。为了便于具体说明八条判异准则，可将控制图分为六个区，分别标号为 A，B，C，C，B，A，每个区的宽度为 σ，两个 A 区、两个 B 区、两个 C 区都关于中心线对称（见图 7—6）。

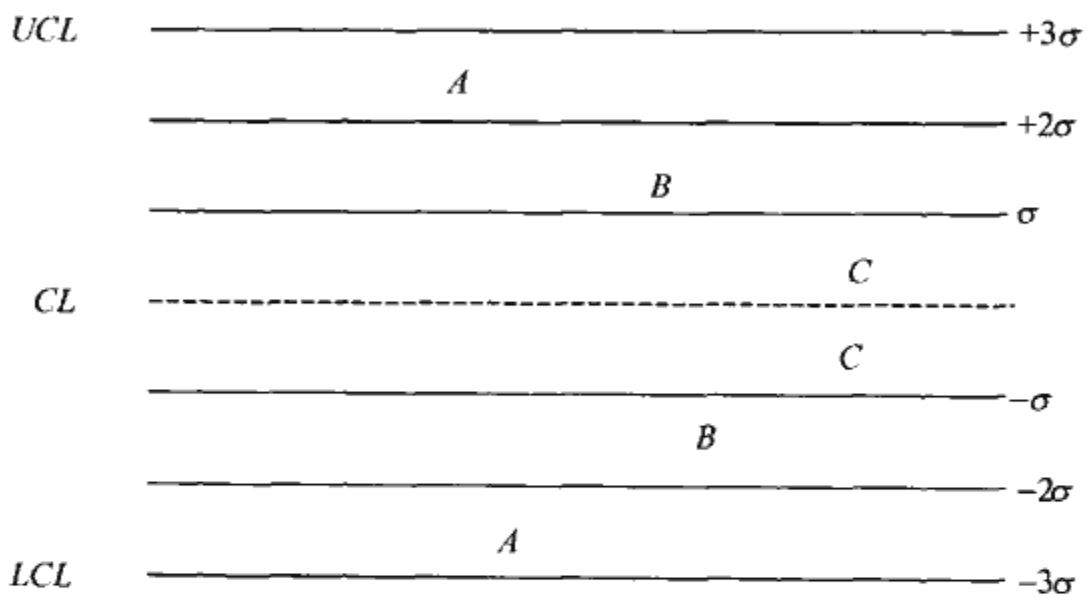


图 7—6　控制图的分区

根据控制图的分区定义，八条判异过程异常波动的准则可以表达为：

（1）1 个点落在控制界限之外。当过程处于统计控制状态时，点落在控制界限内的概率为 99.73%，落在一侧控制界限外的概率为 $\frac{1-99.73\%}{2}=0.135\%$。

（2）连续 9 个点落在中心线同一侧。当过程处于统计控制状态时，连续 9 个点落在中心线同一侧的概率为：

$$P(\text{连续 9 个点落在中心线同一侧})=2\times 0.5^9=0.003\,906=0.390\,6\%$$

即虚发警报的概率为 0.390 6%，犯第一类错误的概率 α 为 0.390 6%。

在控制图中心线同一侧连续出现的点称为链，链可能位于中心线的上侧也可能位于下侧。注意：链必须由“连续”出现的点构成。链中包含的点数目称为链长。链长≥9，判断过程出现异常。

（3）连续 6 个点递增或递减。当过程处于统计控制状态时，连续 6 个点递增或递减的概率为：

$$P(\text{连续 6 个点递增或递减})=\frac{2}{6!}\times(0.997\,3)^6=0.002\,733=0.273\,3\%$$

即虚发警报的概率为 0.273 3%，犯第一类错误的概率 α 为 0.273 3%。

点逐点上升或下降的状态称为倾向或趋势。注意递减的下降倾向，后面的点一定要低于或等于前面的点，否则趋势中断，需要重新算。递增的上升倾向与此相同。

（4）连续14个点中相邻点升降交错。对于“连续14个点中相邻点升降交错”这种情况，《常规控制图》国家标准GB/T 4091—2001的参考文献（Nelson，L. S.，Interpreting Shewhart $\bar{X}$Control Chart，Journal of Quality Technology，17，No. 2，April 1985，pp. 114-116）中有一段描述：“例如：两台设备、两只纺锤、两位操作工、两台自动售货机，它们交替使用所带来的系统影响就会引发这样的现象。在记录交替倒置的鸡蛋计时器流出的沙子的时间时，也会观察到这样的现象。因此，这种模式又名‘鸡蛋计时器效应’。点数的选择依据蒙特卡洛（Monte Carlo）的试验结果，因为14个点时虚发警报的概率（α大约为0.004）与准则（1）基本一致。”

（5）连续3个点中有2个点落在中心线同一侧的B区之外。当过程处于统计控制状态时，连续3个点中有2个点落在中心线同一侧的B区以外的概率为：

$$
\begin{aligned}
&P(\text{点落在中心线一侧}B\text{区以外的概率})\\
=&\begin{cases}P(X>\mu+2\sigma)=1-P(X\leqslant\mu+2\sigma)=1-0.977\,2=0.022\,8\\ P(X<\mu-2\sigma)=0.022\,8\end{cases}\\
&P(\text{连续3个点中有2个点落在中心线同一侧的}B\text{区以外})\\
=&2\times C_3^2\times(1-0.977\,2)^2\times 0.977\,2=6\times 0.022\,8^2\times 0.977\,2\\
=&0.003\,048=0.304\,8\%
\end{aligned}
$$

即虚发警报的概率为0.304 8%，犯第一类错误的概率α为0.304 8%。

（6）连续5个点中有4个点落在中心线同一侧的C区之外。当过程处于统计控制状态时，连续5个点中有4个点落在中心线同一侧的C区以外的概率为：

$$
\begin{aligned}
&P(\text{点落在中心线一侧}C\text{区以外的概率})\\
=&\begin{cases}P(X>\mu+\sigma)=1-P(X\leqslant\mu-\sigma)=1-0.841\,3=0.158\,7\\ P(X<\mu-\sigma)=0.158\,7\end{cases}\\
=&\begin{cases}P(X>\mu+2\sigma)=1-P(X\leqslant\mu+2\sigma)=1-0.841\,3=0.158\,7\\ P(X<\mu-\sigma)=0.158\,7\end{cases}\\
&P(\text{连续5个点中有4个点落在中心线同一侧的}C\text{区以外})\\
=&2\times C_5^4\times(1-0.841\,3)^4\times 0.841\,3=10\times 0.158\,7^4\times 0.841\,3\\
=&0.005\,331=0.533\,1\%
\end{aligned}
$$

即虚发警报的概率为0.533 1%，犯第一类错误的概率α为0.533 1%。

（7）连续15个点落在C区之内。当过程处于统计控制状态时，连续15个点落在中心线两侧的C区内的概率为：

$$
\begin{aligned}
&P(\text{连续15个点落在中心线两侧的}C\text{区内})\\
=&(1-0.158\,7\times 2)^{15}=0.003\,26=0.326\%
\end{aligned}
$$

即虚发警报的概率为0.326%，犯第一类错误的概率α为0.326%。

（8）连续8个点落在中心线两侧，但无一在C区内。当过程处于统计控制状态时，连续8个点落在中心线两侧且无一在C区内的概率为：

$$P(\text{连续 8 个点落在中心线两侧且无一在 C 区内})$$
$$=(0.158\,7\times2)^8=0.000\,103=0.010\,3\%$$

即虚发警报的概率为 0.010 3%，犯第一类错误的概率 α 为 0.010 3%。

以上八种现象发生的概率大致都近似于 0.27%，小概率事件的发生导致我们判定过程为异常。

7. 控制图的分类

(1) 根据数据类型分类。控制图可以分为计量值控制图和计数值控制图两大类，还可以进一步将它们分为八种类型的控制图。计量值控制图一般适用于控制对象为计量值的场合，这类控制图有均值—极差控制图（$\bar{X}$-R 控制图）、均值—标准差控制图（$\bar{X}$-S 控制图）、中位数—极差控制图（$\tilde{X}$-R 控制图）、单值—移动极差控制图（X-R_S 控制图）。计数值控制图是以计数值数据的质量特性值作为控制对象这类控制图，又可以分为计件控制图和计点控制图。计件控制图有不合格品率控制图（p 控制图）、不合格品数控制图（np 控制图）。计点控制图有单位缺陷数控制图（u 控制图）、缺陷数控制图（c 控制图）。常规控制图的分类详见表 7—2。

表 7—2　　控制图的种类

质量数据类型	数据	分布	控制图种类	简记	适用数据
计量型	计量值	正态分布	均值—极差控制图	$\bar{X}$-R 控制图	单件子组的连续数据。标出子组平均值或中位数和子组极差或子组标准差。
			均值—标准差控制图	$\bar{X}$-S 控制图	
			中位数—极差控制图	$\tilde{X}$-R 控制图	
			单值—移动极差控制图	X-R_S 控制图	单件的连续数据。标出单件的观测值以及移动极差。
计数型	计件值	二项分布	不合格品率控制图	p 控制图	计件离散数据，例如不合格品数、销售中的流失数等。
			不合格品数控制图	np 控制图	
	计点值	泊松分布	单位缺陷数控制图	u 控制图	计点离散数据，例如缺陷点数、瑕疵数、数目较小错误数等。
			缺陷数控制图	c 控制图	

(2) 根据应用目的分类。根据控制图的用途和应用场合不同，控制图可以分为分析用控制图和控制用控制图，详见表 7—3。分析用控制图用在对生产过程控制之初。当过程几乎不处于统计控制阶段，存在异常波动时，收集几组数据，绘制分析用控制图，目的在于判断过程是否存在异常因素，调整过程，使得过程受控，同时使得过程能力指数 C_p 或 C_{pk} 达到顾客要求。一般要求 $C_{pk}\geqslant1.33$。控制用控制图则是当过程稳定且能满足技术要求时，将分析用控制图的控制界限作为控制标准，延长控制界限作为控制用的控制图，对过程进行日常控制，及时预警，以保持过程的统计控制状态。

表 7—3 分析用控制图和控制用控制图的主要区别

差异点	分析用控制图	控制用控制图
过程以前的状态	未知	已知
作图需要的子组数	每次 20～25 组	每次一组
控制图的界限	需计算	延长前控制界限
使用目的	了解过程	控制过程
使用人员	工艺、质管	现场操作和管理人员

8. 应用控制图的程序

应用常规控制图对过程进行控制一般包括以下步骤：

（1）确定要控制的产品质量特性。

（2）确定变异来源和抽样方案。要明确是单变异还是多变异来源。如果存在多变异来源，用多变异分析确定最大的变异来源。确定抽样方案时，要确定样本含量，如何抽取数据和抽样的时间间隔。

（3）收集数据。初始建立分析用控制图的控制界限，至少要抽取 20 组样本，要尽量使用最新数据，并且记录数据收集的日志，包括人员、时间、原因、事件、地点和方案。同时，要保证抽样是随机进行的。

（4）计算控制界限。要根据选择的控制图类型计算出控制界限 UCL 和 LCL。

（5）绘制控制图。绘制控制图时要选择比例适当的控制界限。

（6）描点。必要时重新计算控制界限。如果过程能继续处于控制状态，要定期评价控制界限。当操作人员、原材料、机器设备、操作方法等发生变化时，要进行控制界限的再计算，继续实施过程控制，重复以上步骤。

控制图的选用流程如图 7—7 所示。

9. 控制图判异准则的使用

国家标准 GB/T 4091—2001《常规控制图》明确指出：判断异常波动的八种判异准则适用于 $\overline{X}$ 控制图和单值（X）控制图。这里假定质量特性 X 的观测值服从正态分布。

应该注意，极差和标准差的分布并不是正态的，尽管在计算控制界限估计常数时，对极差和标准差的分布作了近似正态性的假设，这种假设对于经验决策程序而言还是令人满意的。因此，对于极差 R 控制图，国家标准 GB/T 4091—2001《常规控制图》指出，与控制界限进行对比，检查数据点是否有失控点，或有无异常的模式或趋势。对于极差数据中关于可查明原因的每一个征兆，分析过程的运行，以便找出原因，进行纠正，并防止它再次出现。

对于不合格品率 p 控制图，国家标准 GB/T 4091—2001《常规控制图》指出，p 图用来确定在一段时间内所提交的平均不合格品百分数。该平均值的任何变化都会引起过程操作人员和管理者的注意。p 控制图判断过程是否处于统计控制状态的

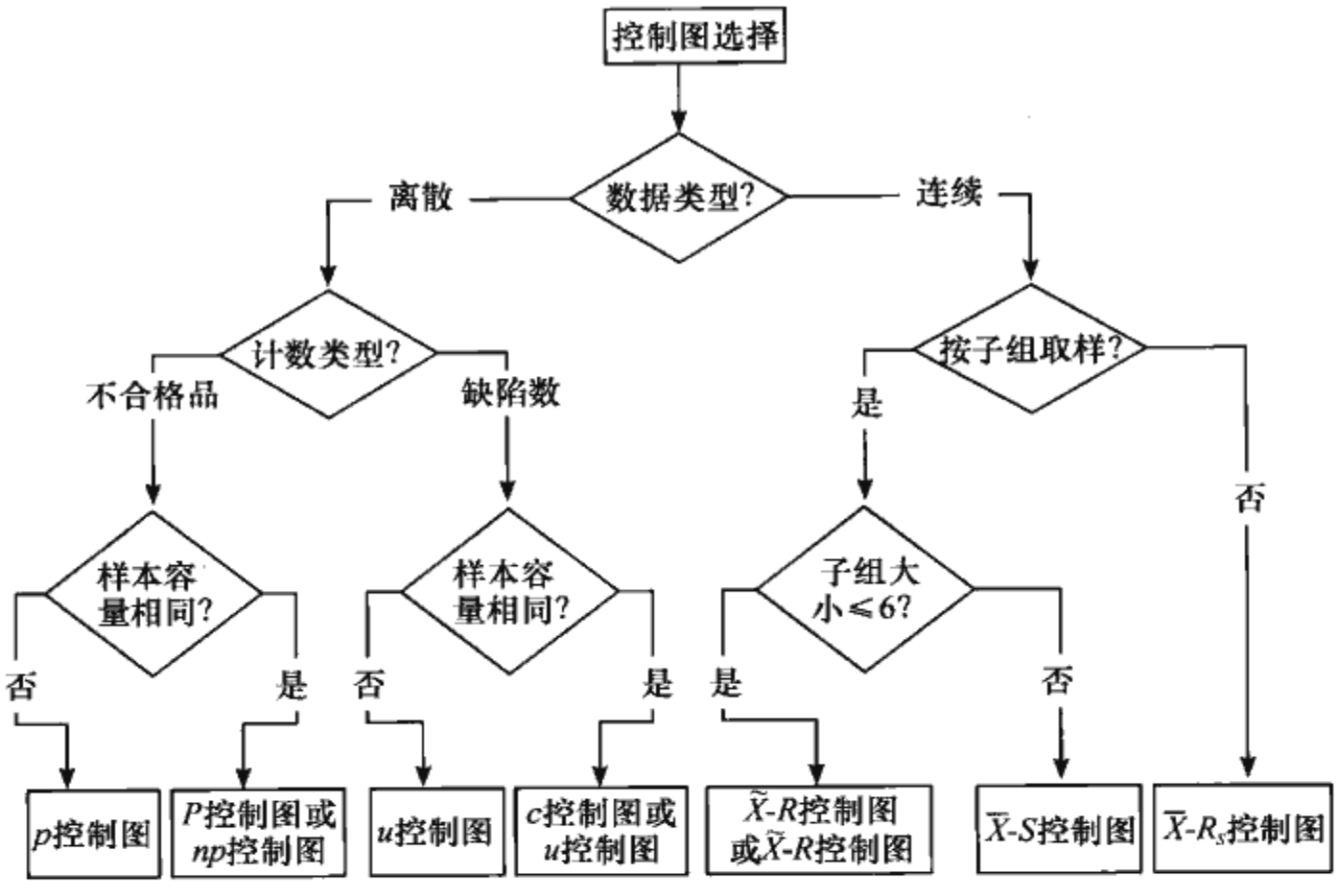


图 7—7　常规控制图的选择流程图

判断方法与 $\overline{X}$ 和 R 控制图相同。若所有子组点都落在试用控制界限之内，并且也未呈现出可查明原因的任何迹象，则称此过程处于统计控制状态。这种情况下，取平均不合格品率 $\overline{p}$ 为不合格品率 p 的标准值，记为 p_0。

综上所述，国家标准 GB/T 4091—2001《常规控制图》给出的八种判异准则，对于 $\overline{X}$ 控制图和单值（X）控制图，完全适用；对于极差控制图和标准差控制图，因为存在极差和标准差的近似正态性假设，所以，可以近似使用；对于不合格品率 p 控制图、不合格品数 np 控制图、单位缺陷数 u 控制图以及缺陷数 c 控制图，同样因为存在近似正态性假设，所以，可以近似使用八种判异准则，以判断过程中异常原因是否出现以及何时出现。

7.2.2　计量值控制图

一般地，对连续型随机变量所做的控制图，称为计量值控制图。计量值数据有两个特点：连续性和可测量，比如周期时间、过程时间、等待时间、高度、面积、成本或收益等。计量值控制图建立在所控制的质量特性值的统计量（T）服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 的基本假定之上，其中：μ 为正态分布的均值，σ 为正态分布的标准差，并且 μ 与 σ 相互独立。因此，要对计量值的波动进行控制需要两张控制图一起使用：一张用于控制过程的位置特征量（比如均值 $\overline{X}$、单值 X）；另一张用于控制过程的散布特征量（比如极差 R、标准差 s）。

根据样本大小 n 和用于估计 μ 和 σ 的统计量的不同，计量值控制图共分为四对，分别是：

（1）均值—极差控制图（$\overline{X}$-R 控制图）：灵敏度尚可，使用方便，$n=2\sim6$。

（2）均值—标准差控制图（$\overline{X}$-S 控制图）：灵敏度最高，计算量较大，$n\geqslant2$。

(3) 中位数--极差控制图（$\tilde{X}$-R 控制图）：灵敏度较差，计算量较小，$n=2\sim6$。

(4) 单值—移动极差控制图（X-R_S 控制图）：灵敏度较差，$n=1$。

这里将以最具代表性并且应用最广泛的均值—极差控制图（$\bar{X}$-R 控制图）为例，对计量值控制图的具体实现过程与实际应用进行介绍。

1. $\bar{X}$-R 控制图

(1) $\bar{X}$-R 控制图的制作步骤。

1) 收集数据，合理分组。以子组为单元收集数据，确定子组大小、子组个数与子组间隔。

子组大小 n：一般以 4～5 个为宜。

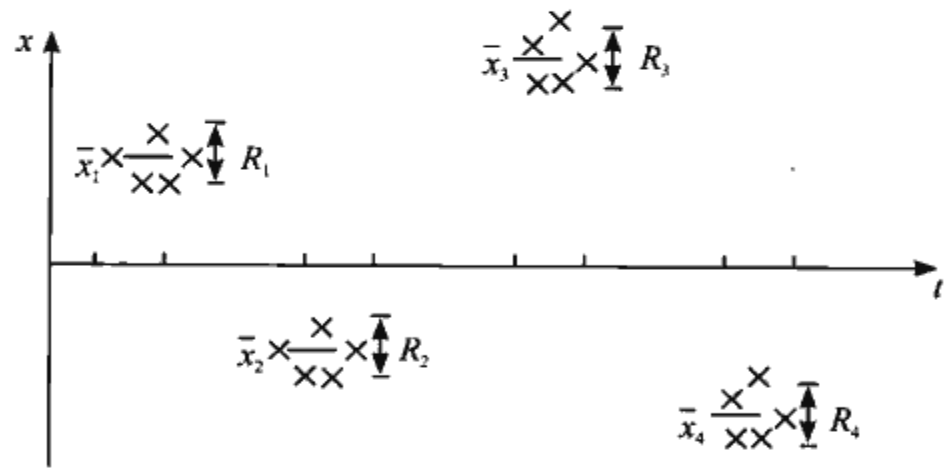
子组个数 m：一般以 20～25 组为宜。

子组间隔：一般没有统一规定，视产量而定。例如每小时生产 10 个以下产品，子组间隔可定为 8 小时；若每小时产量在 10～19 个之内，子组间隔可定为 4 小时；若每小时产量在 20～49 个之内，子组间隔可定为 2 小时；若每小时产量在 50 个以上，子组间隔可定为 1 小时。

按合理子组原则在生产线上抽样及测量，抽样要尽快完成，以减少对生产线的干扰。

合理子组原则是休哈特提出的控制图基础理论之一。在抽取样本时要使得：组内波动仅由偶然原因引起；组间波动主要由异常原因引起。休哈特称这样得到的样本为子组。由于子组内无异常波动，故用其估计标准差可以得到较为精确的估计，且估值一般较小。进而上下控制界限的间隔也不大，从而使得检出异常波动较为灵敏。

为了实现合理子组原则，一个最简单的方法就是在短时间内抽取一个子组所需的全部个体，或者对连续生产产品进行“块抽样”。由于抽样间隔时间比较短，就尽可能避免了异常因素进入子组。详见图 7—8。



($\bar{X}_i$与R_i分别为第i个子组的均值与极差)

图 7—8 合理子组原则示意图

2) 取控制图用纸（见图 7—9），填写表头，记录测量数据。

计量值控制图

																	零件号			图号					
零件名				质量特征值					工序名称								公差								
操作者				设备号					测量仪器								测量单位								
日期																									
次数																									
样本	1																								
	2																								
	3																								
	4																								
	5																								
合计																									
均值$\overline{X}$																									
极差 R																									
操作者																									

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$\overline{X}$																									
R																									

图7—9 控制图表的一般格式

3）计算每个子组的统计量：均值 $\overline{X}$ 和极差 R。

$$\overline{X}=\frac{X_1+X_2+\cdots+X_n}{n}$$

$$R=X_{\max}-X_{\min}$$

4）描绘每个子组均值和极差的运行图。

5）确定并添加均值图（$\overline{X}$ 控制图）和极差图（R 控制图）的中心线和上下控制界限。

计算 m 个子组均值的平均值 $\overline{\overline{X}}$，又称过程平均，作为 $\overline{X}$ 控制图的中心线。

$$\overline{\overline{X}}=\frac{\overline{X}_1+\overline{X}_2+\cdots+\overline{X}_m}{m}$$

计算 m 个子组极差的平均值 $\overline{R}$，又称平均极差，作为 R 控制图的中心线。

$$\overline{R}=\frac{R_1+R_2+\cdots+R_m}{m}$$

计算 R 控制图的上下控制界限，得到 R 控制图的控制界限为：

$$UCL_R=\overline{R}+3\frac{d_3}{d_2}\overline{R}=D_4\overline{R}$$

$$CL_R=\overline{R}$$

$$LCL_R=\overline{R}-3\frac{d_3}{d_2}\overline{R}=D_3\overline{R}$$

计算 $\overline{X}$ 控制图的上下控制界限，得到 $\overline{X}$ 控制图的控制界限为：

$$UCL_X=\overline{\overline{X}}+3\frac{\overline{R}}{d_2\sqrt{n}}=\overline{\overline{X}}+A_2\overline{R}$$

$$CL_X=\overline{\overline{X}}$$

$$LCL_X=\overline{\overline{X}}-3\frac{\overline{R}}{d_2\sqrt{n}}=\overline{\overline{X}}-A_2\overline{R}$$

注意 A_2，D_3，D_4 与样本量 n 有关，可查计量值控制图计算控制界限的系数表得到。

6）分析过程的受控状况。

完成对 $\overline{X}$ 控制图和 R 控制图的绘制后就应当考察过程是否受控。应当从控制图上判断过程是否存在异常波动，并对每个波动逐个进行分析，寻找原因，及时纠正，纳入标准，以免再现。$\overline{X}$ 控制图显示子组间的波动，并表明过程的稳定性。R 控制图显示子组内的波动，也反映了所考察过程的波动程度。R 控制图的失控将会影响到 $\overline{X}$ 控制图，因为 $\overline{X}$ 控制图的上下控制界限依赖于平均极差 $\overline{R}$。所以在对控制图进行分析时，应先分析 R 控制图，后分析 $\overline{X}$ 控制图。

（2）应用实例。下面用实例对 $\overline{X}$-R 控制图的实际应用加以说明。

例 7—1 某乳制品企业生产一种 A 型袋装乳制品，每袋规格装入量为 52 克。企业的管理层正在着手一个统计过程控制的六西格玛项目，决定采用 $\overline{X}$-R 控制图对

A型乳制品的生产装入过程进行检测。在95分钟内每隔5分钟抽取6袋乳制品，每6袋测量值构成一个子组。20个样本子组中的袋重量如表7—4所示。

表7—4　　20个时间段里每次抽查6袋的测量结果　　单位：克

观测批次	时间	观测值						样本均值 $\bar{X}_i$	样本极差 R_i
		X_{i1}	X_{i2}	X_{i3}	X_{i4}	X_{i5}	X_{i6}		
1	9：00	52.10	51.93	52.02	51.95	52.07	52.09	52.03	0.17
2	9：05	52.05	51.97	51.96	52.01	52.01	51.74	51.96	0.31
3	9：10	52.15	52.01	52.03	51.98	52.05	51.91	52.02	0.24
4	9：15	51.94	52.00	52.12	52.13	51.92	52.13	52.04	0.21
5	9：20	51.98	51.92	52.10	52.08	51.85	51.94	51.98	0.25
6	9：25	51.89	51.83	52.10	52.01	51.96	51.98	51.96	0.27
7	9：30	52.09	51.90	51.96	51.87	51.95	52.13	51.98	0.26
8	9：35	51.97	51.96	52.09	52.07	52.07	52.01	52.03	0.13
9	9：40	52.08	51.90	51.87	51.92	51.96	52.04	51.96	0.21
10	9：45	51.98	52.08	51.95	51.98	52.25	52.12	52.06	0.30
11	9：50	51.98	51.99	51.94	51.87	52.10	52.04	51.99	0.23
12	9：55	51.94	51.97	52.07	52.18	51.90	51.90	51.99	0.28
13	10：00	52.03	51.96	51.99	52.06	52.01	51.91	51.99	0.15
14	10：05	52.10	51.94	51.97	52.14	51.93	52.03	52.02	0.21
15	10：10	52.08	51.93	51.94	52.13	51.79	51.91	51.96	0.34
16	10：15	52.05	51.93	52.15	52.13	51.92	51.84	52.00	0.31
17	10：20	51.85	52.10	52.06	52.03	52.06	52.08	52.03	0.25
18	10：25	51.93	51.96	52.00	51.88	52.02	52.00	51.96	0.14
19	10：30	51.96	51.93	52.10	51.97	52.02	52.04	52.00	0.17
20	10：35	52.00	51.98	51.97	52.12	52.03	51.89	52.00	0.23

手工计算的实现方法如下：

步骤一，计算出每个子组的均值 $\bar{x}$ 和极差 R，见表7—4。

步骤二，计算得到极差图和均值图的中心线，分别是：

$$CL_R=\bar{R}=\frac{R_1+R_2+\cdots+R_m}{m}=\frac{R_1+R_2+\cdots+R_{20}}{20}=\frac{4.66}{20}=0.233$$

$$CL_X=\bar{\bar{X}}=\frac{\bar{X}_1+\bar{X}_2+\cdots+\bar{X}_m}{m}=\frac{\bar{X}_1+\bar{X}_2+\cdots+\bar{X}_{20}}{20}=\frac{1\,039.97}{20}=51.998\,7$$

在本例中，子组大小为6，查表得知：$A_2=0.483$，$D_3=0$，$D_4=2.004$。因此，可以得到极差图和均值图的上下控制界限分别为：

$$UCL_R=\bar{R}+3\frac{d_3}{d_2}\bar{R}=D_4\bar{R}=2.004\times0.233\approx0.466\,9$$

$$LCL_R=\bar{R}+3\frac{d_3}{d_2}\bar{R}=D_3\bar{R}=0$$

$$UCL_X=\bar{\bar{X}}+3\frac{\bar{R}}{d_2\sqrt{n}}=\bar{\bar{X}}+A_2\bar{R}=51.998\,7+0.483\times0.233\approx52.111\,3$$

$$LCL_X=\overline{\overline{X}}+3\frac{\overline{R}}{d_2\sqrt{n}}=\overline{\overline{X}}-A_2\overline{R}=51.998\,7-0.483\times0.233\approx51.886\,1$$

步骤三，根据子组数据和以上计算结果可以绘制出所需要的 $\overline{X}$-R 控制图。

运用计算机软件 MINITAB 绘制 $\overline{X}$-R 控制图的实现路径如下：

第一，从“统计→控制图→子组的变量控制图→Xbar-R 控制图”进入。

第二，指定选项“子组的观测值位于多列的同一行中”。

第三，在“Xbar-R 选项→估计→‘子组大小>1’”中选择“Rbar”。

第四，点击“确定”，运行命令，得到图 7—10。

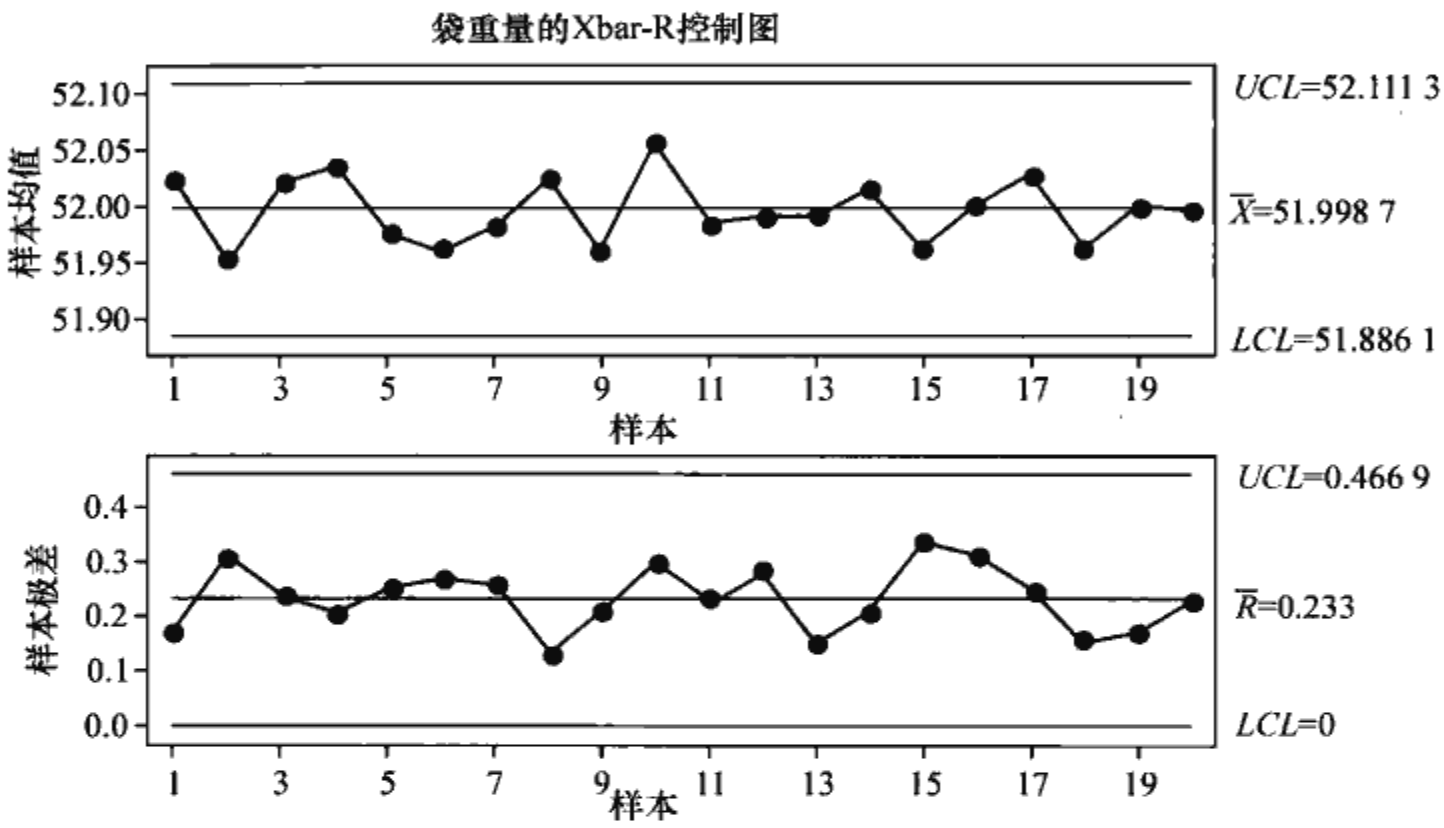


图 7—10 袋重量的 $\overline{X}$-R 控制图

根据图 7—10，首先观察 R 控制图，其次观察 $\overline{X}$ 控制图，可发现两个图中所有数据点都未违背任何一条判异准则，均无异常点出现，可以看出过程没有造成特殊原因偏差的来源。因此，可以判定 A 型乳制品的生产装入过程处于统计控制状态。如果能够同时证明该过程的过程能力满足预期要求，就可以延长此控制界限，成为控制用的控制图。

2. 其他计量值控制图

与 $\overline{X}$-R 控制图控制界限的计算原理与程序类似，可以计算出 $\overline{X}$-S 控制图、$\tilde{X}$-R 控制图、X-R_S 控制图的控制界限，如表 7—5 所示。

表 7—5 三种计量值控制图的中心线和上下控制界限

控制图的名称与符号		CL	UCL	LCL
均值—标准差控制图（$\overline{X}$-S 控制图）	$\overline{X}$ 图	$\overline{\overline{X}}$	$\overline{\overline{X}}+A_3\bar{s}$	$\overline{\overline{X}}-A_3\bar{s}$
	S 图	$\bar{s}$	$B_4\bar{s}$	$B_3\bar{s}$
中位数—极差控制图（$\tilde{X}$-R 控制图）	$\tilde{X}$ 图	$\overline{M}_e$	$\overline{M}_e+A_4\overline{R}$	$\overline{M}_e-A_4\overline{R}$
	R 图	$\overline{R}$	$D_4\overline{R}$	$D_3\overline{R}$

续前表

控制图的名称与符号		CL	UCL	LCL
单值—移动极差控制图（X-R_S 图）	X 图	$\overline{X}$	$\overline{X}+E_2\overline{R}$	$\overline{X}-E_2\overline{R}$
	R_S 图	$\overline{R}$	$D_4\overline{R}$	$D_3\overline{R}$

说明：表中 A_3，D_3，D_4，B_3，B_4 与样本量 n 有关，可查计量值控制图计算控制界限的系数表得到。
表中 $E_2=3/d_2$，对于单值—移动极差控制图，由于采用移动极差，样本含量为 2，$d_2=1.128$，$E_2=2.66$。
表中 A_4 的值见表 7—6。

表 7—6　　A_4 的值

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A_4	1.88	1.19	0.80	0.69	0.55	0.51	0.43	0.41	0.36

仍然沿用例 7—1，同样的程序，运用软件 MINITAB 可以制作 $\overline{X}$-S 控制图、$\widetilde{X}$-R 控制图、X-R_S 控制图。以 $\overline{X}$-S 控制图为例。

计算出 $\overline{X}$ 图的控制界限：

$$UCL_{\overline{X}}=\overline{\overline{X}}+A_3\overline{s}=52.1126$$
$$CL_{\overline{X}}=\overline{\overline{X}}=51.9987$$
$$LCL_{\overline{X}}=\overline{\overline{X}}-A_3\overline{s}=51.8847$$

S 图的控制界限：

$$UCL_S=B_4\overline{s}=0.1744$$
$$CL_S=\overline{s}=0.0885$$
$$LCL_S=B_3\overline{s}=0.0027$$

运用计算机软件 MINITAB 绘制 $\overline{X}$-S 控制图的实现路径如下：

第一，从“统计→控制图→子组的变量控制图→Xbar S 控制图”进入。

第二，指定选项“子组的观测值位于多列的同一行中”（这是 MINITAB15.1 版本新增功能）。

第三，在“Xbar-S 选项→估计→‘子组大小→1’”中选择“Sbar”。

第四，点击“确定”，运行命令，得到图 7—11。

根据图 7—11 显示可知，S 图与 $\overline{X}$ 图都无异常点出现，过程受控。因此，可以判定 A 型乳制品的生产装入过程处于统计控制状态，而且 $\overline{X}$-S 图的控制精度更高些。

根据不同过程质量特性的特征和需要，按照相同的程序结合软件 MINITAB 分析，也可运用 $\widetilde{X}$-R 控制图、X-R_S 控制图来对过程进行分析，这里不再赘述。

7.2.3　计数值控制图

一般，对离散型随机变量所作的控制图，称为计数值控制图。计数值控制图又可以分为计件控制图与计点控制图。计件控制图包括监控不合格品率的 p 控制图，监控不合格品数的 np 控制图。计数值控制图适用于产品检验结果只有两类的情形：

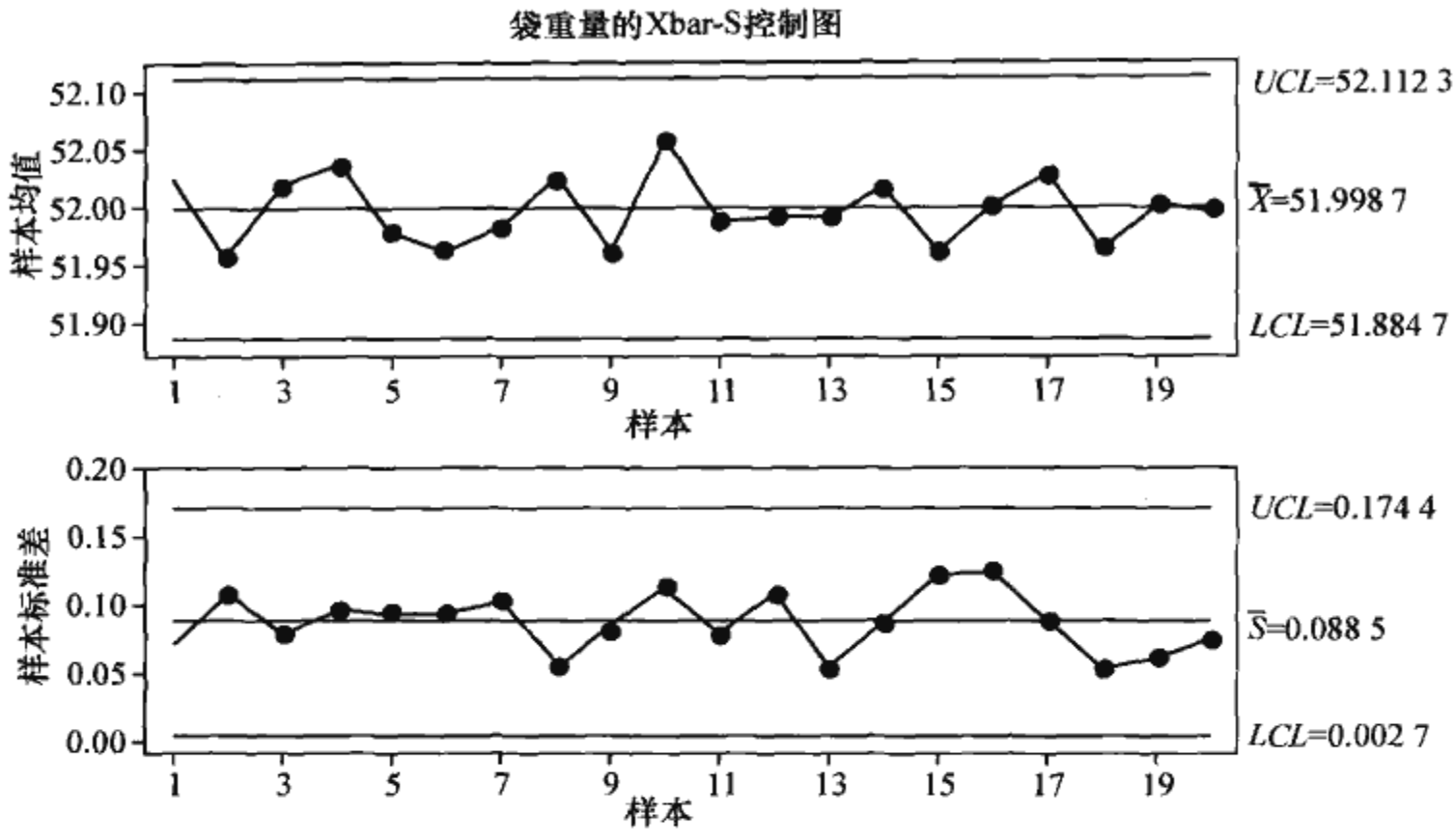


图 7—11 袋重量的 MINITAB 的 $\bar{X}$-S 控制图

合格或不合格。从一批稳定状态下生产的大量产品中随机抽取一定量的样品数，不合格产品数 X 小于总抽取产品数 n，且不合格产品数 X 服从二项分布 $B(n, p)$，当 $np \geqslant 5$ 时，近似服从正态分布。计点控制图包括监控缺陷数的 c 控制图，监控单位缺陷数的 u 控制图。计点控制图适用于产品质量特性是产品的缺陷数时的情形，例如一定面积上的针孔数，一定长度布匹上的疵点数，等等。产品的缺陷数常常服从泊松分布 $P(\lambda)$，当 $\lambda \geqslant 5$ 时，近似服从正态分布。

根据以上四种类型的计数值控制图的统计基础，计算出相应的控制界限，如表 7—7 所示。控制界限中的 $\bar{p}$，$\bar{c}$，$\bar{u}$ 是根据实测数据估计而得到的相应平均值。

表 7—7 计数值控制图的控制中心线和上下控制界限

控制图的名称与符号		CL	UCL/LCL	数据分布	备注
不合格品率控制图（p 控制图）	参数值未给定	$\bar{p}$	$\bar{p} \pm 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}$	二项分布	样本量相等与不等时均可使用
	参数值给定	p_0	$p_0 \pm 3\sqrt{\frac{p_0(1-p_0)}{n}}$		
不合格品数控制图（np 控制图）	参数值未给定	$n\bar{p}$	$n\bar{p} \pm 3\sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$	二项分布	限于样本量相等时使用
	参数值给定	np_0	$p_0 \pm 3\sqrt{np_0(1-p_0)}$		
单位缺陷数控制图（u 控制图）	标准值未给定	$\bar{u}$	$\bar{u} \pm 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$	泊松分布	样本量相等与不等时均可使用
	标准值给定	u_0	$u_0 \pm 3\sqrt{\frac{u_0}{n}}$		
缺陷数控制图（c 控制图）	标准值未给定	$\bar{c}$	$\bar{c} \pm 3\sqrt{\bar{c}}$	泊松分布	限于样本量相等时使用
	标准值给定	c_0	$c_0 \pm 3\sqrt{c_0}$		

计数值控制图的制作程序与计量值控制图类似。下面通过四个案例，对四类计

数值控制图的实现方法及 MINITAB 实现路径逐一阐述。

（1）不合格品数控制图（*np* 控制图）。

例 7—2 某公司在传感器生产线上进行抽检，于每日生产结束时抽取 160 个传感器进行检验。某月的 27 个工作日每天检测的不合格传感器数量的记录如表 7—8 所示。该公司准备设计一个控制图来分析传感器生产中的不合格品数是否稳定。

表 7—8　　传感器的抽样结果

工作日	样品数量	不合格品数量	工作日	样品数量	不合格品数量	工作日	样品数量	不合格品数量
1	160	3	10	160	7	19	160	7
2	160	4	11	160	9	20	160	4
3	160	6	12	160	6	21	160	12
4	160	8	13	160	12	22	160	5
5	160	6	14	160	3	23	160	8
6	160	6	15	160	7	24	160	8
7	160	3	16	160	10	25	160	7
8	160	4	17	160	6	26	160	5
9	160	8	18	160	3	27	160	9

由于每次抽检的样本数量都是固定的常数“160”，因此这里可以采用不合格品数控制图来进行生产的监控。

绘制 *np* 图的 MINITAB 软件实现路径如下：

1）从“统计→控制图→属性控制图→NP”进入。

2）指定“变量”为“不合格品数量”，“子组大小”为“样品数量”。

3）点击“确定”，运行命令，得到 *np* 控制图（见图 7—12）。

由图 7—12 可知，*np* 控制图中无异常点出现。因此，可以判定传感器的生产过程处于统计控制状态。

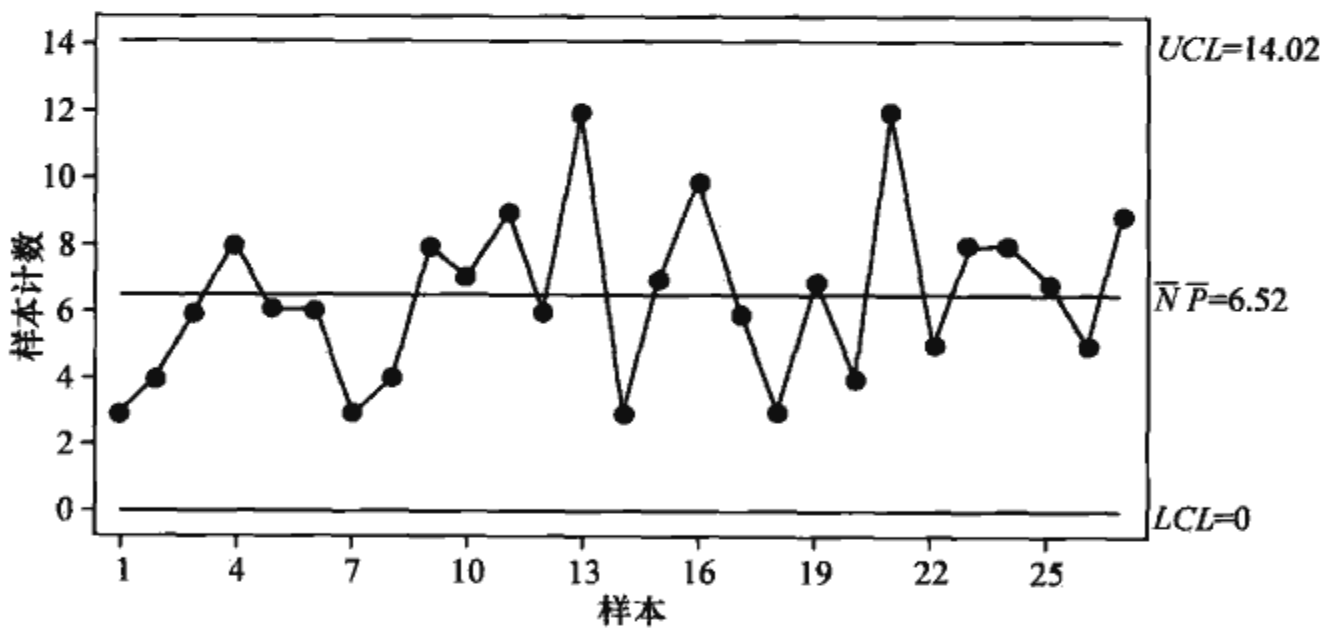


图 7—12　传感器不合格品数量的 *np* 控制图

（2）不合格品率控制图（*p* 控制图）。

例 7—3 某公司在晶体管的生产线上进行抽检，公司在每天结束生产后，在当

天产品中随机抽取一个样本，并检查其不合格品数。某月连续抽取 26 个工作日，获得的数据如表 7—9 所示。该公司准备设计一个控制图来分析晶体管生产中的不合格品率是否稳定。

表 7—9　　晶体管的抽样结果

样本号	检查数	不合格品数	样本号	检查数	不合格品数	样本号	检查数	不合格品数
1	158	11	10	148	5	19	150	9
2	140	11	11	150	2	20	148	5
3	140	8	12	153	7	21	135	2
4	155	6	13	149	7	22	165	12
5	160	4	14	145	8	23	143	10
6	144	7	15	160	6	24	138	8
7	139	10	16	165	15	25	144	14
8	151	11	17	136	11	26	161	14
9	163	9	18	153	10			

由于每日抽取进行检验的晶体管数量不等，因而只能采用不合格品率控制图进行生产的监控。

绘制 p 图的 MINITAB 软件实现路径如下：

1）从“统计→控制图→属性控制图→P”进入。

2）指定“变量”为“不合格品数”，“子组大小”为“检查数”。

3）点击“确定”，运行命令，得到 p 控制图（见图 7—13）。

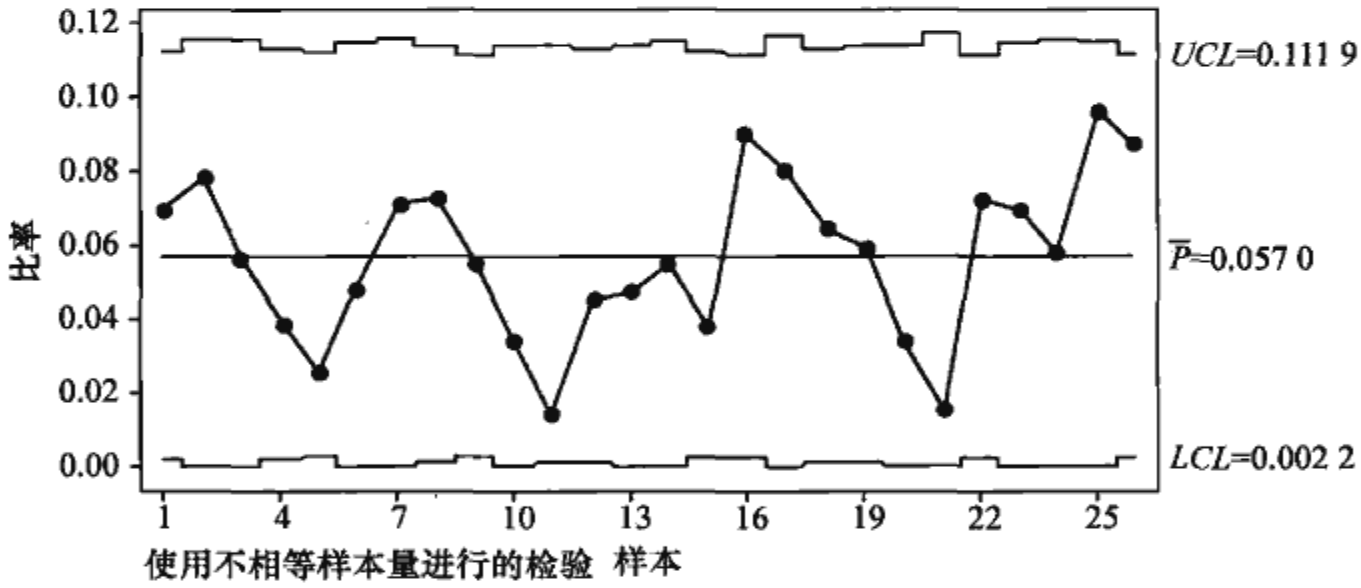


图 7—13　晶体管不合格品数的 p 控制图

由于每天抽取的晶体管数量不全相同，p 图中的上下控制界限变成了“城墙”型。

由图 7—13 可知，p 控制图中的所有数据点都未违背任何一条判异准则，整个过程的不合格品率非常稳定。因此，可以判定晶体管的整个生产过程处于统计控制状态。

前面讨论的 np 控制图及 p 控制图都是针对“计件”型产品而定的，产品检验结果只有两类：合格或不合格。当总检查产品数 n 以及不合格品率 p 给定时，不合

格产品数 X 服从二项分布 $B(n, p)$。针对计数型数据，还存在一种情况则是缺陷点的“计点”型，缺陷点数 X 服从均值为 λ 的泊松分布，抽样调查的样本中很可能出现缺陷点个数超过检验样品数的情况。例如检查了 6 个仪表板，共出现了 11 个斑点。这时监控生产就要采用另外两种控制图：监控缺陷数的 c 控制图；监控单位产品上的缺陷数的 u 控制图。下面将对这两种控制图分别举例进行介绍。

（3）缺陷数控制图（c 控制图）。

例 7—4 在给汽车外壳进行喷漆的过程中，如果外壳上存在气泡，则每个气泡都被认为是缺陷。每个班次连续 16 个工作日每天结束工作前抽取 12 个汽车外壳进行检验，收集的数据记录如表 7—10 所示。试设计一个控制图来分析汽车外壳上的斑点数是否稳定。

表 7—10　　外壳的抽样结果

样本号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
样本数量	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
气泡数	26	23	28	18	35	32	35	24	18	28	16	15	22	34	30	28

由于每次抽检的样本数量都是固定的常数“12”，因此这里可以采用缺陷数控制图（c 控制图）来对汽车的喷漆过程进行监控。

绘制 c 控制图的 MINITAB 软件实现路径如下：

1）从“统计→控制图→属性控制图→C”进入。

2）指定“变量”为“气泡数”。

3）点击“确定”，运行命令，得到 c 控制图（见图 7—14）。

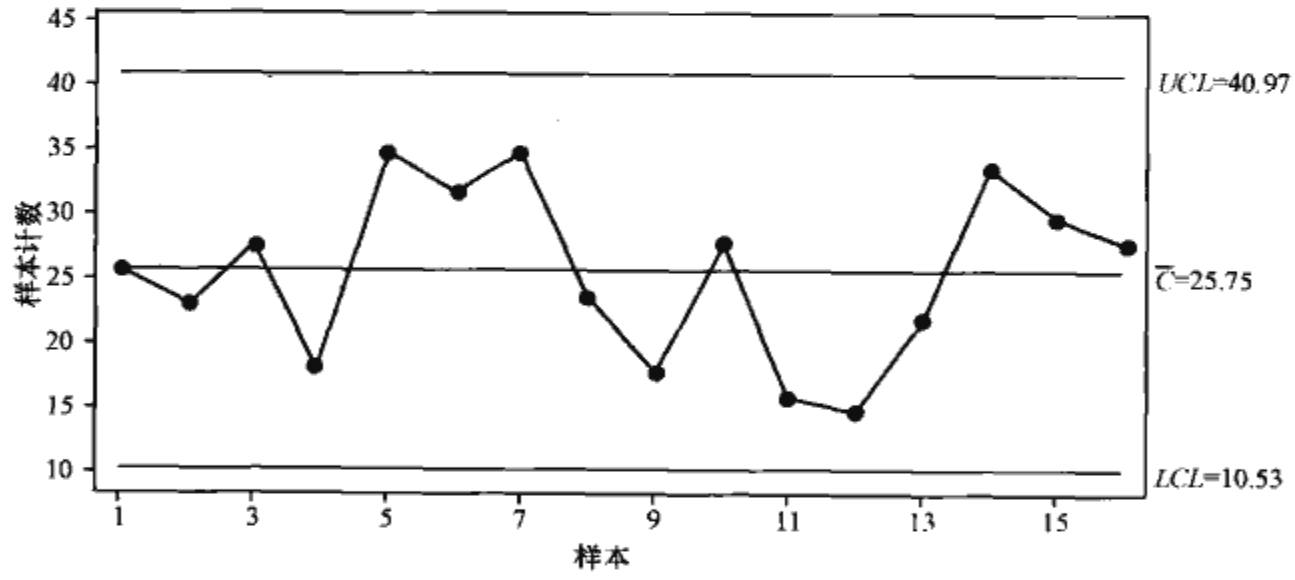


图 7—14　外壳气泡数的 c 控制图

由图 7—14 可知，c 控制图的所有数据点都未违背任何一条判异准则，整个过程十分稳定。因此，可以判定汽车的喷漆过程处于统计控制状态。

（4）单位缺陷数控制图（u 控制图）。

例 7—5 在给汽车外壳进行喷漆的过程中，如果外壳上存在气泡，则每个气泡都被认为是缺陷。每个班次连续 16 个工作日每天结束工作前抽取一定数量的汽车外壳进行检验，每次抽取进行检查的外壳数不全相同，收集的数据记录如表 7—11 所示。试设计一个控制图来分析汽车外壳上的斑点数是否稳定。

表 7—11 外壳的抽样结果

样本号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
样本数量	12	10	8	11	15	14	16	9	8	14	12	9	10	12	13	12
气泡数	26	23	28	18	35	32	35	24	18	28	16	15	22	34	30	28

绘制 u 控制图的 MINITAB 软件实现路径如下：

1）从“统计→控制图→属性控制图→U”进入。

2）指定“变量”为“气泡数”，“子组大小”为“样本数量”。

3）点击“确定”，运行命令，得到 u 控制图（见图 7—15）。

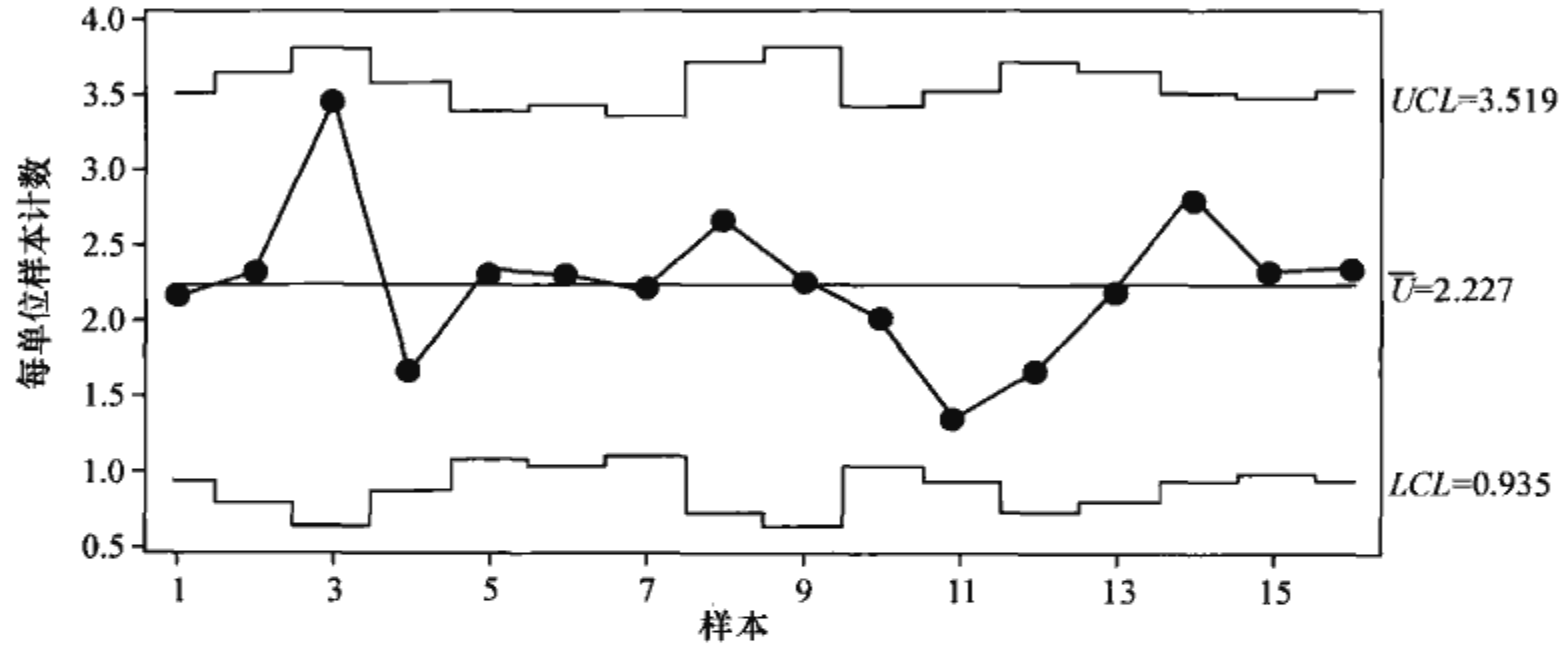


图 7—15 外壳气泡数的 u 控制图

由于每天抽取的外壳数量不全相同，u 图中的上下控制界限变成了“城墙”型。

由图 7—15 可知，u 控制图中的所有数据点都未违背任何一条判异准则，整个过程非常稳定。因此，可以判定汽车的整个喷漆过程处于统计控制状态。

休哈特控制图存在不足之处：仅依赖最近的点来判定过程而忽略所有点所包含的信息；相对而言，对于过程较小（小于 1.5σ）的波动不太敏感。对较小波动比较关注时，可用累积和控制图（CUSUM 控制图）、指数加权移动平均控制图（EWMA 控制图）。关于这两类控制图本书不做详述。但是，这两类控制图对于较大波动检出力较弱，因此，休哈特控制图与 CUSUM 控制图（或 EWMA 控制图）联合使用，控制效果最好。

7.3 精益控制工具

7.3.1 防错

在六西格玛项目产生的缺陷中，很多是由于差错造成的。这些差错可能来源于产品设计、生产制造以及使用不当。由于差错导致的缺陷可能给企业造成损失，给

用户带来伤害，因此六西格玛团队在控制阶段的一大重点是如何预防差错，杜绝缺陷。

如何才能杜绝缺陷，以保证产品的制造质量和使用者的安全？经过质量工作者的长期关注和探求，“防差错”的概念被提出。该概念由日本著名的质量管理专家新乡重夫（Shigeo Shingo）最早提出。“防差错”概念是用以获得零缺陷，最终免除质量检验的工具，定名为 Poka-Yoke。有以下几点含义：

- 现场质量控制的核心就是杜绝缺陷。
- 缺陷是差错的结果。
- 如果差错无法根除，必须及时发现和立即纠正，防止差错形成缺陷。

在生产过程中，无论是主观差错还是客观差错，都是随机发生的，往往难以预测并且后果严重。鉴于此，Poka-Yoke 方法倡导采用积极预防的措施和可靠应对的装置，Poka 是疏忽错误之意，Yoke 是防止的意思。通过各种差错预防装置，能够实现：

- 寻找差错，转变检验的重点。
- 在形成缺陷产品之前，及时制止和纠正发生的差错，“第一次即把事情做好”。
- 尽量采用自动预防装置，实现 100%检验。

Poka-Yoke 方法的内容包括两个基本方面：一是检测出现的差错；二是 Poka-Yoke 防错装置。检测差错包括三种形式：一是后继检测，即下一道工序的生产者检查上一道工序的质量问题并立即反馈给上一道工序的生产者，让其停止生产纠正错误；二是自我检测，即生产者检查自身的工作；三是预防性检测，即在错误未发生之前发现它并采取相应措施。所有的检查都必须是 100%地逐个检测，而不是抽查或其他非完全检查。

Poka-Yoke 防错装置主要包括两种类型：信号型 Poka-Yoke 和控制型 Poka-Yoke。前者是对生产失误所发出的警示，后者是对出现的错误所采取的保险性措施。如生产作业中，一个待加工零件被放在机器上一个不正确的位置，那么信号型 Poka-Yoke 可能是一个指示灯，提醒工人要纠正位置。而控制型 Poka-Yoke 则可能是连接机器电源的一个装置，它会自动切断电源，使生产停止，直至零件被拿走或放于正确位置。

Poka-Yoke 的设置可在发生生产失误时对生产者发出及时警告，提醒其改正错误。同时它也可以通过一定的装置或手段对失误自动采取应急措施，防止生产失误转化成产品质量问题，因而成为预防质量问题的“保险”。

Poka-Yoke 防错装置实现的主要功能有：

- 出现操作错误时工件无法安装。
- 工件出现问题时，机器无法开始加工。
- 出现操作错误时，机器无法开始加工。
- 自动修正错误操作使加工继续进行。
- 后道工序检查前道工序出现的问题，防止出现不良品。
- 丢序漏序时下一工序无法开始。

图 7—16 所示的是切削加工时经常出现零件错装夹的情况，通过在机床上加装防错挡板（见图 7—16 中的下图所示）防止零件错装夹；图 7—17 所示的是焊接加工时如果漏装了工件，随焊机主轴上下移动的防错装置会及时按下停止按钮，防止错误发生。

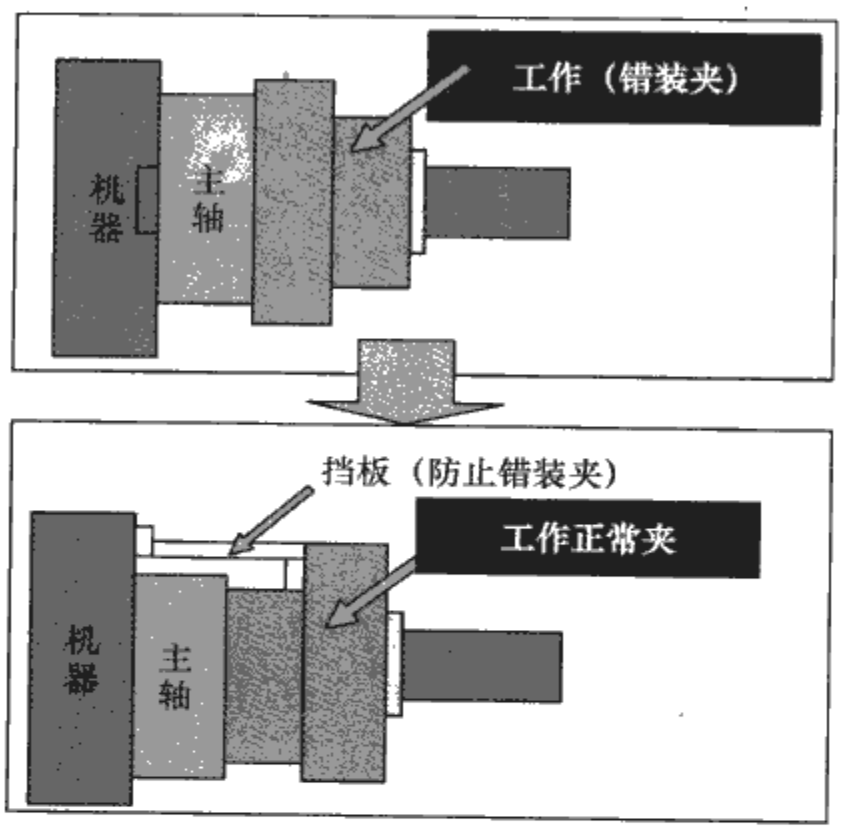


图 7—16 切削加工防错装置

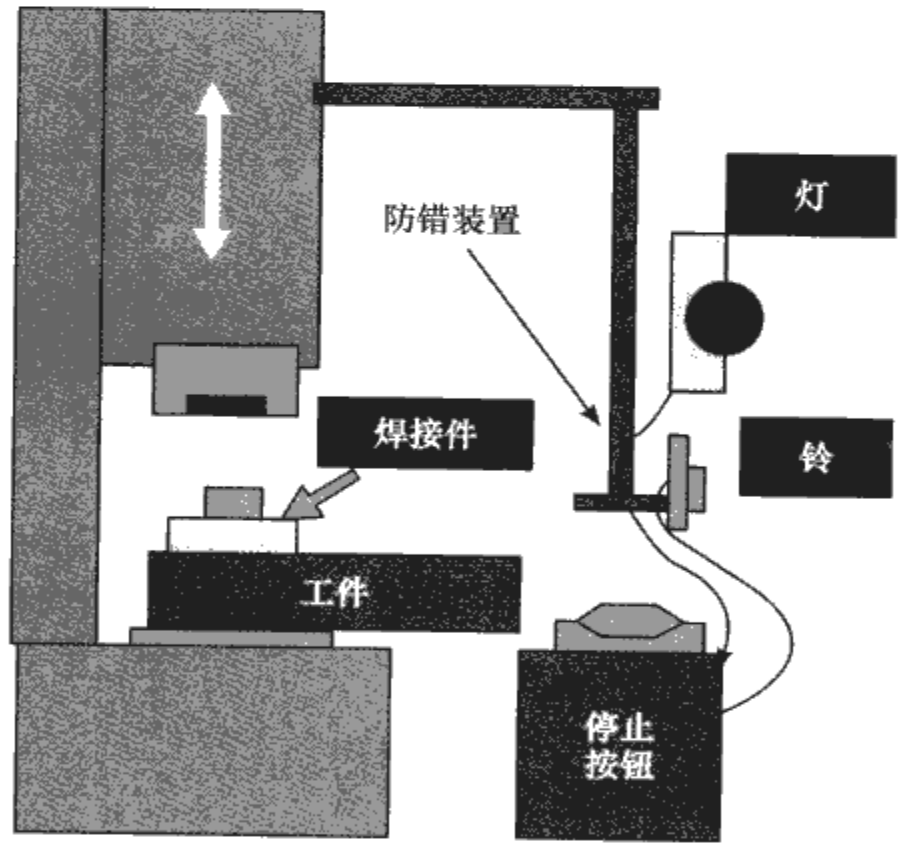


图 7—17 焊接加工防错装置

7.3.2 标准化作业

由于操作人员习惯不同、动作不规范，常常会造成同类产品之间质量特性的差异较大。为了使这些差异不影响改进效果的稳定性，需要采用相应的措施来对差异

进行控制。标准化作业就是解决这类问题的有效方法。

标准化作业是指把生产过程中的各种要素（人、机、料、法、环、测）进行最佳组合，按准时化生产的要求制定出相适应的作业标准，各类作业人员按照作业标准进行操作。作业标准一方面是操作者的行为规范，另一方面是管理者检查指导工作的依据。

标准化作业对每一个工序按照能够达到的最佳效果的工作模式编制标准化作业表，把制造过程中的每一步动作都予以详细描述，为每个操作工提供相同的作业动作的信息，从而保证了每一个工人，每一次都重复同样的动作。标准化作业使操作人员养成了一致的习惯，从而避免了对所加工产品一致性的不良影响，同时还能有效防止由于作业行为不当而引发的差错。

标准化作业有三个目标：第一个目标是工人操作时遵循作业标准顺序，称作“标准操作规程”（standard operating procedure，SOP）；第二个目标是在生产时间上，各制造过程达到平衡化；第三个目标是将半成品的标准库存量控制在最小数量范围内。

作业标准确定后，并不是一成不变的。随着技术的发展、工艺的改进以及持续不断的改善，需要反复修订作业标准。标准化作业同时适用于很多过程，包括更换产品、文件报告、目视管理、仓储管理等。

标准作业的目的是通过必要的、最少数量的作业人员进行生产。它由下面的程序确定：

- 确定生产节拍（循环时间）。
- 确定一个单位产品的完成时间。
- 确定标准作业顺序。
- 确定在制品的标准持有量。
- 编制标准作业组合表。

标准化作业是实现均衡化生产和单件生产、单件传送的又一重要前提，是指在标准周期时间内，把每一位多技能作业员所承担的一系列的多种作业标准化。标准化作业主要包括三个内容：标准周期时间、标准作业顺序、标准在制品存量，它们可用“标准作业组合表”来表示，如图 7—18 所示。

标准周期时间是指各生产单元内（或生产线上），生产一个单位的制成品所需要的时间，也称为生产线的节拍。标准周期时间可由下列公式计算出来，如图 7—18 所示，若每班产量是 1 050 台，则：

$$\text{标准周期时间}=\frac{\text{每班的工作时间}}{\text{每班的必要产量}}$$

$$=\frac{8\times 60\times 60}{1\,050}=27.4(\text{秒})$$

根据标准周期时间，生产现场的管理人员就能够确定在各生产单元内生产一个单位制品或完成产量指标所需要的作业人数，并合理配备全车间及全工厂的作业人员。

标准作业顺序是用来指示多技能作业员同时操作多台不同机床时所应遵循的作

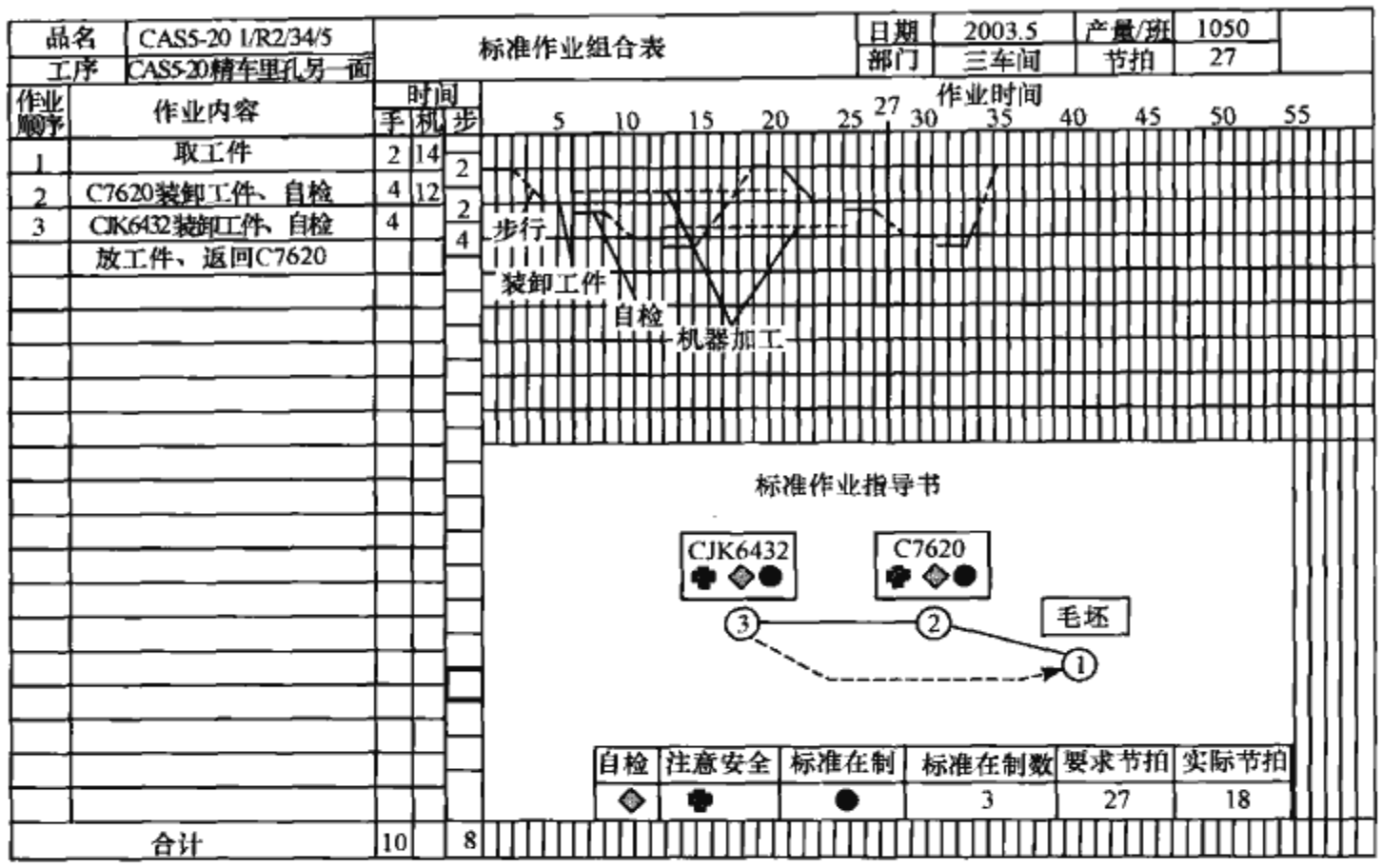


图 7—18 标准作业组合表及指导书

业顺序，即作业人员拿取材料、上机加工、加工结束后取下以及再传给另一台机床的顺序，这种顺序在作业员所操作的各种机床上连续地执行。因为所有的作业人员都必须在标准周期时间内完成自己所承担的全部作业，所以在同一个生产单元内或生产线上能够达成生产的平衡。

标准在制品存量是指在每一个生产单元内，在制品储备的最低数量，它包括仍在机器上加工的半成品。如果没有这些数量的在制品，那么生产单元内的一连串机器将无法同步作业。但是，应尽量减少在制品存量，使之维持在最低水平。

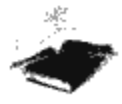
根据标准化作业的要求（通常用标准作业组合表表示），所有作业人员都必须在标准周期时间之内完成单位制品所需要的全部加工作业，并以此为基础，对作业人员进行训练和对工序进行改善。

制定标准化作业有很多好处：可以保证提高生产效率和产品质量，保证生产节拍；通过制定标准作业顺序，合理利用机器设备；消除多余工序，简化流程；规范操作者的行为，减少违规操作，保障生产安全；易于寻找工具和材料，控制在制品存量，保障生产正常运行；规定作业标准，易于发现异常。

7.4 六西格玛项目总结和成果评审

六西格玛项目总结和成果评审是六西格玛项目管理的最后一个过程，属于六西格玛项目管理 PDCA 循环的 A 阶段，也是实现“闭环评价和知识管理”的过程，即通过对达到目标的项目进行文件化并予以闭环评价，将获得的实践经验和教训进行管理，以便识别新的机会，包括与其他相关部门、类似过程以及顾客、供应商、社会等利益相关方分享项目的知识成果，进而使项目的成果倍增，从而实现六西格

玛项目知识资产的确认、积累和分享。本书第 2 章已经比较详细地介绍了六西格玛项目报告的编写，这里不再赘述。



本章小结

控制是对改进成果进行固化，通过修订文件等方法，使成功经验制度化。是通过有效的监测方法，维持过程改进的成果并寻求进一步提高改进效果的持续改进方法。本章主要介绍了在项目控制阶段的工作内容和常用的工具，重点介绍了控制图的原理和常规控制图——计量值控制图和计数值控制图。六西格玛团队在控制阶段还要注意使用精益控制工具。本章介绍了防错和标准化作业两种精益控制方法。另外，项目控制阶段结束后，还有必要对整个项目工作进行总结和成果评审，为以后的项目开展积累经验。

第8章

六西格玛设计

8.1 六西格玛设计概述

8.1.1 六西格玛设计的产生和发展

前面章节所讲到的六西格玛改进主要通过 DMAIC 流程来实现，即界定、测量、分析、改进、控制，是旨在通过持续改进企业业务流程，实现客户满意的业务改进方法体系。但 DMAIC 流程对产品的质量优化仍具有局限性。众所周知，质量首先是设计出来的，实践表明，至少 80%的产品质量是在早期设计阶段决定的，所以没有面向六西格玛的设计，仅采用 DMAIC 流程来提高产品的质量，其成效是有限的，难以突破五西格玛的质量水平（称为五西格玛墙）。若想真正实现六西格玛的质量水准，就必须考虑六西格玛管理战略实施的另外一种途径——六西格玛设计。

在当今全球经济一体化的进程中，企业只有不断缩短产品开发时间，提高质量，降低成本并改进服务才能抓住机遇，适应不断变化的国际市场需求。六西格玛设计正是基于这种理念产生和发展起来的。国外的一些知名大企业，如摩托罗拉、通用电气、卡特彼勒等已先后应用了六西格玛设计，但我国制造业中，成功实施六西格玛设计的还比较少。因此要适应日益激烈的国际竞争，实施六西格玛设计对我国企业已是迫在眉睫。

8.1.2 六西格玛设计的含义和基本理念

六西格玛设计（DFSS）就是按照合理的流程，运用科学的方法准确理解和把握顾客需求，对新产品/新过程进行稳健设计，使产品/过程低成本地实现六西格玛

质量水平；同时，使产品/过程本身具有抵抗各种干扰的能力，即使使用环境恶劣或操作不当，产品仍能满足顾客的需求。六西格玛设计就是帮助你实现在提高产品质量和可靠性的同时，降低成本和缩短研制周期的有效方法，具有很高的实用价值。

六西格玛设计具有以下基本理念：

（1）基于预防性思想。在 DFSS 中，团队不仅要预测和预防缺陷，还必须能够预测和满足外在的和潜在的顾客需求。当今质量界已普遍认识到产品设计中的预防是最有效的预防，设计中的浪费是最大的浪费。质量必须从源头就设计到产品之中，并建立预测和预防控制的思想和方法才能达到卓越，从而真正缩小产品设计与实际生产、交货间的差距。DFSS 就是在产品/过程设计一开始就寻找缺陷，将一切可能出现的问题消灭在萌芽状态，努力创造一个新的更好的产品/过程。

（2）基于并行质量工程哲理。六西格玛设计在设计之初就考虑了产品的稳健性、可制造性、可维修性、可靠性等，这些充分体现了并行工程的思想。同时，六西格玛设计致力于提高产品各方面的抗干扰能力，减少质量波动，提高质量水平。

（3）以顾客为关注焦点。从统计意义上讲，DFSS 的本意是要减少产品/过程的质量波动，其隐含的前提是：设计目标值必须与顾客的要求完全一致，并且质量特性的规格限必须是顾客可以接受的。如果忽视了顾客的需求，所确定的设计目标值和规格限并不能使顾客满意，DFSS 也就毫无意义。因此，设计的出发点和归宿都必须以顾客满意为最高准则。

8.1.3 六西格玛设计的技术路线

六西格玛改进的 DMAIC 流程已经成为实施六西格玛管理企业的标准流程。与 DMAIC 相似，六西格玛设计也有自己的流程，但目前还没有统一模式。这里主要介绍 DMADOV，IDDOV 和六西格玛公差设计三种模式。

1. DMADOV

DMADOV 流程，即界定（define）、测量（measure）、分析（analyze）、设计（design）、优化（optimize）、验证（verify），各阶段使用的主要工具方法见表 8—1。

表 8—1　　DMADOV 各阶段使用的主要工具方法

	D 界定	M 测量	A 分析	D 设计	O 优化	V 验证
常用工具和技术	确定目标顾客 顾客需求分析 问题/目标陈述 水平对比 流程图 KANO 分析 CTQ 确定 QFD	关系矩阵 因果矩阵 散点图 趋势图 直方图 箱线图 检查表 帕累托图 测量系统分析 过程能力分析	鱼骨图 因果矩阵 ANONA 多变异分析 假设检验 FMEA 回归 相关性分析 散点图 残差分析	TRIZ 公理设计 水平对比 FMEA 模拟 具体工程技术	DOE RSM 田口方法 优化技术	过程能力分析与验证 试验验证

2. IDDOV

IDDOV流程，即识别（identify）、界定（define）、研发（develop）、优化（optimize）、验证（verify），是由美国供应商协会（ASI）的总裁乔杜里先生提出的，本书借鉴ASI的IDDOV流程，但将研发阶段改为设计（design）阶段，并提出了IDDOV流程各个阶段的主要工作内容、技术方法和设计输出（见表8—2）。

表8—2　　六西格玛设计IDDOV流程的主要工作内容、技术方法和设计输出

	I 识别	D 界定	D 设计	O 优化	V 验证
主要工作内容	寻找市场机会，识别顾客需求，制定项目特许任务书	顾客需求的确定和展开，产品总体设计方案的论证和确定	初步设计，全尺寸样机（试样）的设计，过程设计和样机的试制	产品设计的优化，过程设计的优化	设计质量的验证，制造质量的验证，产品的验证与确认
主要技术方法	QFD KANO分析 新QC七工具 风险分析	QFD 系统设计 DFX 功能FMEA 新QC七工具 风险分析 LCC分析	系统设计 QFD FMEA DFX DOE 参数设计 公差设计 CAD/CAM 研发试验 FRACAS LCC分析 DFSS计分卡	DOE 参数设计 公差设计 DFX FMEA LCC分析 CAD/CAM 仿真 优化试验 FRACAS DFSS计分卡	仿真试验 V&V试验 可靠性试验 寿命试验 鉴定试验 小子样SPC ATP FRACAS MTBF S/N比 DFSS计分卡
主要设计输出	1. 项目可行性研究报告 2. DFSS项目特许任务书	1. 产品设计方案 2. 技术规范	1. 样机生产用图纸和工艺文件 2. 产品规范（试行稿） 3. 售后保障体系（含保障资源）设计方案初稿	1. 产品生产图纸和工艺文件 2. 产品规范 3. 售后保障体系（含保障资源）设计方案	1. 设计验证试验报告 2. 设计鉴定报告 3. 过程能力分析 4. DFSS项目绩效报告

IDDOV流程各阶段的工作步骤具体如下：

（1）识别阶段又可划分为“寻找市场机会”、“识别顾客需求”、“制定项目特许任务书”三个步骤，要应用QFD、KANO分析、新QC七工具、风险分析等方法寻找市场机会、识别顾客需求、论证和确定要开展六西格玛设计的项目、组织项目团队、落实人员和职责，并编制和批准六西格玛设计项目特许任务书。

（2）界定阶段又可划分为“顾客需求的确定和展开”、“产品总体设计方案的论证和确定”两个步骤。要通过QFD深入分析，将顾客需求逐层地展开为设计要求、工艺要求、生产要求，并采用系统设计（包括TRIZ）、DFX、功能FMEA、新QC七工具、风险分析、全寿命周期费用（life cycle cost，LCC）分析等方法，通过创

造性的思维和自上向下的设计，形成一个可以实现顾客需求的总体设计方案。

（3）设计阶段又可划分为“初步设计”、“全尺寸样机（试样）的设计”、“过程设计和样机的试制”三个步骤，要采用系统设计、QFD、FMEA、DFX、参数设计、公差设计、CAD/CAM 等方法进行产品的初步设计（技术设计）、产品各子系统、部件、设备和供应商的确定、全尺寸样机及其制造过程的设计、保障资源的设计等。

（4）优化阶段又可划分为“产品设计的优化”、“过程设计的优化”两个步骤，要通过稳健设计（DOE、参数设计、公差设计）和 FMEA、DFX 等方法，使产品质量特性稳定在目标附近（变异小），在使用中抗干扰，并进行过程设计的优化。

（5）验证阶段又可划分为“设计质量的验证”、“制造质量的验证”、“产品的验证与确认”三个步骤，要通过小子样 SPC、验收检验规程（acceptance testing procedure，ATP）等方法进行过程能力的分析、制造质量的验证，通过仿真试验、V&V 试验、可靠性试验、寿命试验、鉴定试验等方法进行六西格玛设计产品的验证与确认，以及通过平均故障间隔时间（MTBF）和信噪比（S/N 比）的统计及六西格玛设计（DFSS）计分卡等来考察产品的质量可靠性水平，并通过请顾客试用来验证六西格玛设计是否达到了希望的目标。当然，最优化的方案还应当通过技术状态控制的方法固化下来，以保证设计的产品在后续加工过程中完全符合顾客的需求。

总之，IDDOV 是一整套不同于常规设计的方法，它以顾客需求为导向，以质量功能展开（QFD）为纽带，深入分析和展开顾客需求，综合应用系统设计（包括 TRIZ）、试验设计、参数设计、公差设计以及普氏矩阵、FMEA 等设计分析技术，大幅度地提高产品的固有质量，从而更好地满足顾客的需求。六西格玛设计还体现了激发创新能力、加快创新速度、预防为主等思想理念。六西格玛设计工作一般结束于新产品设计鉴定并投入批量生产时，在投入批生产和投放市场后出现少量不满足顾客需求的问题，还可以通过六西格玛改进 DMAIC 流程来解决。

3. 六西格玛公差设计

（1）六西格玛公差设计的必要性。公差设计是一种科学的分配公差的方法，用来评估设计中重要的子系统和零部件，以达到全部产品制造以及生命周期的最低成本。公差设计与产品成本、质量和周期时间有密切的联系，它贯穿于产品生命周期的全过程，已成为制造业努力提高可生产性和质量的焦点问题。制造过程中的控制往往应用高成本设备来减少变异缺陷，而稳健公差设计则通过在设计阶段最小化变异来改进质量。所以要全面提高企业竞争力和达到六西格玛质量，就必须采用公差设计技术。尤其在精密生产中，公差的地位是不可或缺的。不恰当的公差可能降低质量或增加报废，因而增加了产品成本和交付时间。

（2）六西格玛公差设计的内涵。公差是产品性能特征的规格。公差设计是顾客驱动的规格（在系统设计阶段确定的）与系统、产品和/或过程能力的整合。系统的能力是通过其重要的性能测量值的均值及其变异性来度量的，这些测量值反过来又直接依赖于构成产品或者系统的子系统、零部件或者噪声因子的均值和变异性。

摩托罗拉公司高度成功的六西格玛项目已经被许多公司作为质量改进项目的模型。六西格玛项目要求总公差宽度不小于 12σ 或者等同的过程能力指数 $C_p \geqslant 2$。6σ

的统计含义是建立在数理统计学中最常见的正态分布基础上的。在实际应用中，考虑到均值有 1.5σ 的漂移，这样数据落在 σ 界限以外的概率只有百万分之 3.4，参见图 1—3。

因此，六西格玛公差设计的基本原理同样基于统计思想，它假设系统的响应（Y）是各个参数 X_i 的函数，且 $X_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$，响应的方差是各个参数方差的平方和，即：$\sigma^2 \approx \sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_i^2$，公差以过程能力指数 C_p，C_{pk} 和标准偏差 σ 表达，要求设计达到 6σ 的质量水平。

在公差设计中，改进六西格玛能力可通过两种方式实现：一是增大公差域；二是减少标准差。第一种方法由于设计本身的需求经常是不可行的，因而通过稳健设计减少变异性成为切实可行且高效的方法。

质量是由顾客需求决定的，设计质量要充分考虑顾客需求和成本之间的平衡。在不确定条件下的过程设计中，质量成本和稳健性标准的识别和结合已成为一个关键问题，而六西格玛公差设计为这一结合提供了正确的途径，将稳健性标准结合到优化中就保证了过程的稳健性。然而，在大多数的优化研究中，并没有明确考虑稳健性问题，尽管有的研究已经尝试将稳健性和设计优化联系起来。一般认为只有在参数设计达不到所要求的性能变异时，才采用公差设计，通过减小公差来降低变异。但我们的目标不仅仅是满足性能要求，还要同时达到高质量和低成本。因此六西格玛公差设计的含义是在达到稳健性的基础上寻求最优的响应值，优化不仅包括传统的优化更重要的是实现稳健性。

六西格玛公差设计实际上是一个系统地在设计阶段建立六西格玛的方法，它是根据稳健性测量的试验评价模型将六西格玛设计与稳健优化设计结合在一起，通过公差设计得到稳健优化的系统。

（3）六西格玛公差设计方法。目前比较成熟且广泛应用的公差设计方法包括两个方面：一个是机械公差设计；另一个是田口三阶段中的公差设计。机械公差设计最基本的包括极值分析法和统计平方公差方法，还有摩托罗拉公司于 1988 年开发的六西格玛机械公差设计。

1）极值分析方法（worse-case analysis，WC）是目前应用最广、最流行的方法，大多数的设计都基于这个概念。这种方法简便易行，零部件都设计为名义值，然后按照如下方法分配公差：公差完全向一个或另一个方向积累，装配仍能满足产品的功能要求。WC 设计方法并不属于统计方法，但它为关于公差分析和分配的统计平方公差方法提供了比较的基础，因此有助于更好地理解并意识到应用统计方法的好处。

在 WC 分析中可以用向量化尺寸简单地线性相加减来描述，它虽然确保了所有零件的装配，但往往最终结果是过于保守，像间隙过大或过小的公差。而太严格的公差会导致成本的提高，所以不可避免地存在浪费，而且它仅仅考虑了设计规格的线性极值，没有考虑过程能力，因而有必要考虑统计平方公差分析方法。

2）统计平方公差方法（root-sum-of-squares analysis，RSS）采用统计分析进行公差分析，它可以防止保守的设计，扩展公差，如果清楚过程能力，甚至可以得

到更宽松的公差。采用统计的公差分析基于如下理论：大多数的机械零件在它们的公差限范围内呈正态概率分布，单个零件的分布可以合并成一个正态分布。当组成环的分布不能确定时，根据中心极限定理，随着组成环数的增多，封闭环的分布迅速地近似于正态分布，而与组成环的分布无关。

3）六西格玛机械公差设计。摩托罗拉公司的六西格玛机械公差设计为实现六西格玛目标提供了系统的公差设计策略。六西格玛机械公差设计分析的假设前提是：变量之间相互独立，均值和方差相互独立；所有零件的尺寸均服从正态分布；σ用来描述变异性，由于材料和制造过程中不可避免的变异，采用1.5σ作为标准漂移来计算公差域之外的概率。

这一过程以过程数据和指标（σ，C_p等）为设计向导来优化可量化的加工过程及性能，因而所创建的六西格玛设计是稳健的，也可以说，基于过程能力而创建稳健设计比在制造阶段跟踪并减少变异容易得多。

虽然该方法具有许多优势，但该方法在应用中还存在以下几个方面的不足之处：

第一，适用范围比较小。六西格玛机械公差设计所分析的是公差设计中最简单最常见的一种情况——直线尺寸链，假定尺寸链关系已知而且目标函数f对各个零部件尺寸x的偏微分$\frac{\partial f}{\partial x}=1$，所以目标函数的统计公差$\sigma^2=\sum\sigma_i^2$。而在机械装配中的公差累积实质上大多是非线性的，一般而言尺寸链关系未知或者很复杂，不可能求得$\frac{\partial f}{\partial x}$。

第二，权重分配缺乏科学性。在上述优化设计过程中，无论是名义值的权重分配还是联合方差的权重设置均是基于经验和良好的工程判断，于是所优化的公差就带有太多的主观随意性，不同的工程师所设计的公差可能相差很大，缺少一个准确科学的评价方法来断定孰优孰劣。

第三，没有考虑成本因素。虽然六西格玛机械公差设计以装配概率为目标达到了六西格玛水平，但是公差设计与成本密不可分，稳健性的提高是否会带来加工成本的增加也未可知，所以应该设定一个成本评价函数来说明优化的结果不仅是稳健的，而且不会增加成本。

4）田口的公差设计。田口思想的主要特点是引进了质量损失函数，把质量和成本联系起来。田口从工程技术观点来研究质量管理中的各种问题，因而其思想和方法亦称“质量工程学”。质量工程学分为线外质量计划和线内质量控制两部分。线外质量计划是指通过缺陷分析和DOE达到工艺偏差的减小和设计稳健性的提高，它包括系统设计、参数设计和公差设计三个相互关联的部分，又称为三次设计。公差设计是在参数设计阶段确定的最佳条件基础上，为每个参数确定公差规格。实际上，通过线外质量计划所识别的关键因子也可以用在线内控制来确定应该控制什么以及如何控制等问题。当仅用参数设计不可能将所有的内外噪声的影响充分衰减时，对于影响大的内外噪声，即使要增加费用，也应将其自身的波动控制在一定范围之内，这就是公差设计。由于误差因素的影响大多可用参数设计使其变小，因此

公差设计应在参数设计之后进行，这点很重要。

8.1.4　六西格玛设计与其他设计方法、理念之间的关系

1. DFSS与并行质量工程

对并行质量工程（concurrent quality engineering）的定义应该首先基于对并行工程和质量工程的概念和含义的理解。

并行工程是对产品及其相关过程（包括制造过程和支持过程）进行并行、一体化设计的一种系统化的工作模式。这种工作模式力图使开发者一开始就考虑到产品生命周期中的所有因素，包括质量、成本、速度和用户需求。从定义可以看出，并行工程是集成、并行地设计产品及其相关过程的系统方法。它体现了一个哲理：设计的早期阶段就考虑下游过程中可能存在的各种问题，力争早期作出正确决策，确保产品开发一次成功。

面向X的设计（DFX）就是基于并行工程的最重要的设计方法之一，它从技术的角度充分支持了并行工程的要求。包括面向制造的设计（design for manufacturing，DFM）、面向装配的设计（design for assembly，DFA）、面向成本的设计（design for cost，DFC）、面向试验的设计（design for test，DFT）、面向可靠性和维修性的设计（design for reliability & maintainability，DFRM）、面向售后服务的设计（design for service，DFS）、面向环境的设计（design for environment，DFE），以及面向其他因素的设计等一系列面向某一需重点考虑或保证的领域的设计技术。

早在20世纪60年代，几家大公司就开发了在产品设计阶段应用制造问题的方针，最著名的一个例子是通用电气公司内部出版的《制造可生产性手册》（The Manufacturing Producibility Handbook）。

在过去几十年里，质量工程（quality engineering）作为一种重要的持续改进方法而发展起来。从20世纪70年代田口提出质量工程的概念到今天，这一概念已不仅仅包含田口质量损失的思想及其三次设计，它延伸到产品或过程质量形成的各个阶段，即顾客需求研究、满意度分析、设计质量、过程改进和控制、质量保证以及企业质量管理体系的建立等方面。它是一个能够使产品功能满足顾客需求并且经济而有效地生产高质量产品的过程，在这一过程中，它将质量系统的各种技术应用到工程实践中，分析产品及其相关过程的各个阶段以最大化过程本身的质量及其所生产产品的质量。这一过程的广泛性和复杂性就需要在质量工程中应用并行工程的思想，使质量工程与设计方法论达到有机地集成。

并行质量工程是将并行工程的思想运用到质量工程中，使持续质量改进的思想与并行工程的思想相互融合。它是一个基于并行工程的质量工程的集成过程，并从全局优化的角度出发，对集成过程进行管理和控制。并行质量工程的目的是提高全过程（包括设计、工艺、制造、销售、服务等）的质量、开发稳健的产品、降低成本（包括产品设计、工艺、制造、发送、支持、客户使用乃至产品报废等成本）和缩短设计与制造的时间（包括减少设计反复、降低设计、生产准备和投放市场

的时间）。

DFSS 的应用基于并行质量工程的原理。由于传统的设计方法导致产品质量低和稳健性差，因此 DFSS 有必要采用 DFX 的设计方法，在设计中把并行过程的各种质量要素啮合在一起，在设计之初就考虑产品的稳健性、可制造性、可维修性、可靠性等，这些充分体现了并行工程的思想。如果过程设计得好，就会大大降低设计的复杂性和加工精度。另外，质量工程最基本也是最重要的目标是使得设计参数/过程变量对变异来源不敏感，强调在设计阶段更好地理解产品/过程而非一般意义上的优化，这就需要在设计方法和质量工程之间有一个平衡，DFSS 就成为在这两者之间建立工程模型的桥梁，为实现质量工程的目标提供了卓有成效的途径。

2. DFSS 与稳健性设计

稳健性设计（robust design）又称健壮设计或鲁棒设计。它是在试验设计、田口方法基础上发展起来的低成本、高稳定性、高再现性的产品与技术开发、设计方法体系。其含义是以最小的资源消耗，通过产品设计、技术开发使产品或技术对于外界环境变化、零部件（元器件）制造公差和时间因素造成的老化、劣化、磨损等干扰的影响具有很强的抵抗能力，从而使产品具有高度稳定的性能，使开发的技术在大规模生产和各种不同使用条件下具有高度再现性，以达到稳定、长期地满足客户需求的目的。

稳健性设计是一种科学、高效率、高效益的工程优化设计方法体系，是保证产品、技术研制开发质量的关键环节，是质量工程的核心技术。它也是一种成本有效方法，因为它减少变异的方式不是通过紧缩公差从而增加成本，而是通过降低变异效应来实现高质量的产品设计。

要想实现六西格玛，必须将质量工程中稳健性设计的思想全面而深入地贯彻到产品设计之中，应用稳健性设计的思想对于节约成本、提高产品性能、技术的高度再现性、满足客户需求方面具有重大的意义，有利于 DFSS 的发展，因此稳健性设计对于 DFSS 是不可或缺的，它是 DFSS 的关键支撑技术。

通常，要达到稳健性设计的目的，主要的策略是：（1）通过产品的概念设计，改变输入和输出的关系，使其功能特性尽可能接近目标值。（2）通过参数设计调整设计变量的名义值，使输出均值达到目标值。（3）减小参数名义值的公差，从而缩小输出特性的方差，但是减小参数的公差意味着提高产品的加工成本。（4）利用非线性效应，通过合理地选择参数在非线性曲线上的响应均值，使输出的质量特性的波动减小，这是一种使波动传递衰减的非线性技术。而 DFSS 的不断发展正是对上述策略的不断优化发展，使其不断完善，满足实现稳健设计的要求，因此 DFSS 的发展在很大程度上推动了稳健性设计的进步。

综上所述，DFSS 和稳健性设计是互相促进、互相支持的，是不可分离的两项技术，一方应用于另一方不仅可以促进对方的发展，而且在最优化设计、满足顾客需求、减少浪费等方面都具有重大的意义。

8.2　质量功能展开

8.2.1　概述

质量功能展开（QFD）是质量展开（quality deployment）与狭义的质量功能展开的总称。赤尾洋二将质量展开定义为："将顾客的需求转换成代用质量特性，进而确定产品的设计质量（标准），再将这些设计质量系统地（关联地）展开到各个功能部件的质量、零件的质量或服务项目的质量上，以及制造工序各要素或服务过程各要素的相互关系上，使产品或服务事前就完成质量保证，符合顾客要求。"水野滋将狭义的质量功能展开定义为："将形成质量保证的职能或业务，按照目的、手段系统地进行详细展开，通过企业管理职能的展开实施质量保证活动，确保顾客的需求得到满足。"

作为产品设计阶段的一种工具，QFD的实质是用一种系统工程的观点将顾客的需求转化为工程特性。QFD体现了以市场为导向，以顾客需求为产品开发唯一依据的指导思想。在六西格玛设计方法体系中，QFD技术占有举足轻重的地位，它是开展六西格玛设计的先导步骤，通过对顾客需求的逐层展开来确定产品研制的关键质量特性（CTQ）和关键过程特性（CTP），从而为六西格玛设计的具体实施确定重点，明确方向。

QFD由赤尾洋二博士提出，之后经过在日本的发展，逐渐被一些西方工业国家引入，在汽车工业和国防工业得到推广，得到了进一步提高。目前，QFD已经在全球几十个国家得到广泛应用。QFD已经不只应用于最初的生产领域，而是广泛地应用于非生产领域，如服务业、软件业、医疗卫生行业等。

8.2.2　QFD的基本方法

QFD过程是通过一系列图表和矩阵来完成的，其中起重要作用的是质量屋。赤尾洋二教授将质量屋定义为："将顾客要求的真正的质量，用语言表现，并进行体系化，同时表示它们与质量特性的关系，是为了把顾客需求变换成代用特性，进一步进行质量设计的表。"

1. 质量屋的建立

质量屋也称质量表（quality chart or quality table），是一种形象直观的二元矩阵展开图表，如图8—1所示。其基本结构要素如下：

（1）左墙——顾客需求及其重要度。

（2）天花板——工程措施（设计要求或质量特性）。

（3）房间——关系矩阵。

（4）地板——工程措施的指标及其重要度。

（5）屋顶——相关矩阵。

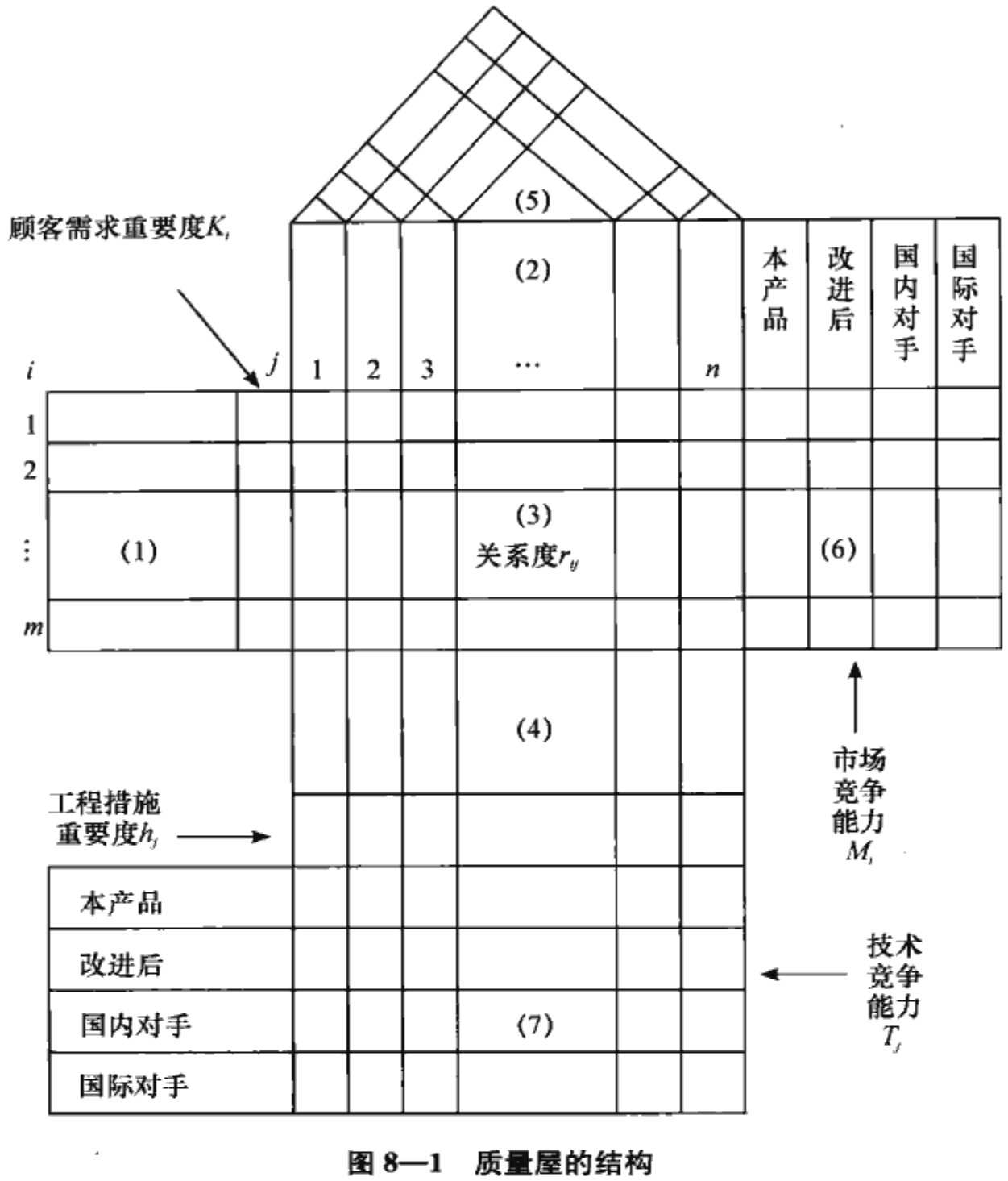


图 8—1　质量屋的结构

（6）右墙——市场竞争能力评估矩阵。

（7）地下室——技术竞争能力评估矩阵。

根据上述组成建立质量屋的基本框架，输入相关信息，通过分析评价得到输出信息，从而实现一种需求转换。

2. 四个阶段的质量功能展开

四阶段模式是美国供应商协会（ASI）提倡的四阶段展开方法，它从顾客需求开始，经由四个阶段即四步展开，用四个矩阵，得出产品的工艺和生产（质量）控制参数。

（1）产品规划阶段。通过产品规划矩阵（质量屋），将顾客需求转换为质量特性（产品特征或工程措施），并根据顾客竞争性评估（从顾客的角度对市场上同类产品进行的评估，通过市场调查得到）和技术竞争性评估（从技术的角度对市场上同类产品的评估，通过试验或其他途径得到）的结果确定各个质量特性（产品特征或工程措施）的目标值。

（2）零件配置阶段。利用前一阶段定义的质量特性（产品特征或工程措施），从

多个设计方案中选择一个最佳方案，并通过零件配置矩阵将其转换为关键的零件特征。

（3）工艺设计阶段。通过工艺设计矩阵，确定为保证实现关键的质量特性（产品特征）和零件特征所必须保证的关键工艺参数。

（4）生产控制阶段。通过生产控制矩阵将关键的零件特征和工艺参数转换为具体的生产（质量）控制方法或标准。

根据下一道工序就是上一道工序的“顾客”的原理，四阶段模式从产品设计到生产的各个过程均建立质量屋，且各阶段的质量屋在内容上有内在的联系。在此模式中，上一阶段的质量屋“天花板”的主要项目将转换为下一阶段质量屋的“左墙”，上一步的输出就是下一步的输入，构成瀑布式分解过程。QFD的展开要将顾客的需求逐层分解，直至可以量化度量。同时采用矩阵（质量屋）的形式，将顾客需求逐步展开，分层转换为设计要求、零件特性、工艺要求和生产（质量）要求。

图8—2显示了四个阶段的QFD。其中零件配置阶段质量屋“左墙”的顾客需求应是产品规划阶段质量屋中关键的工程措施（设计要求）及其指标，“天花板”是为实现设计要求而提出的零（部）件特性。与此相仿，工艺设计阶段质量屋的“左墙”应为零件特性及其参数，“天花板”是工艺要求；生产控制阶段质量屋的“左墙”应为工艺要求及其参数，“天花板”是生产要求。

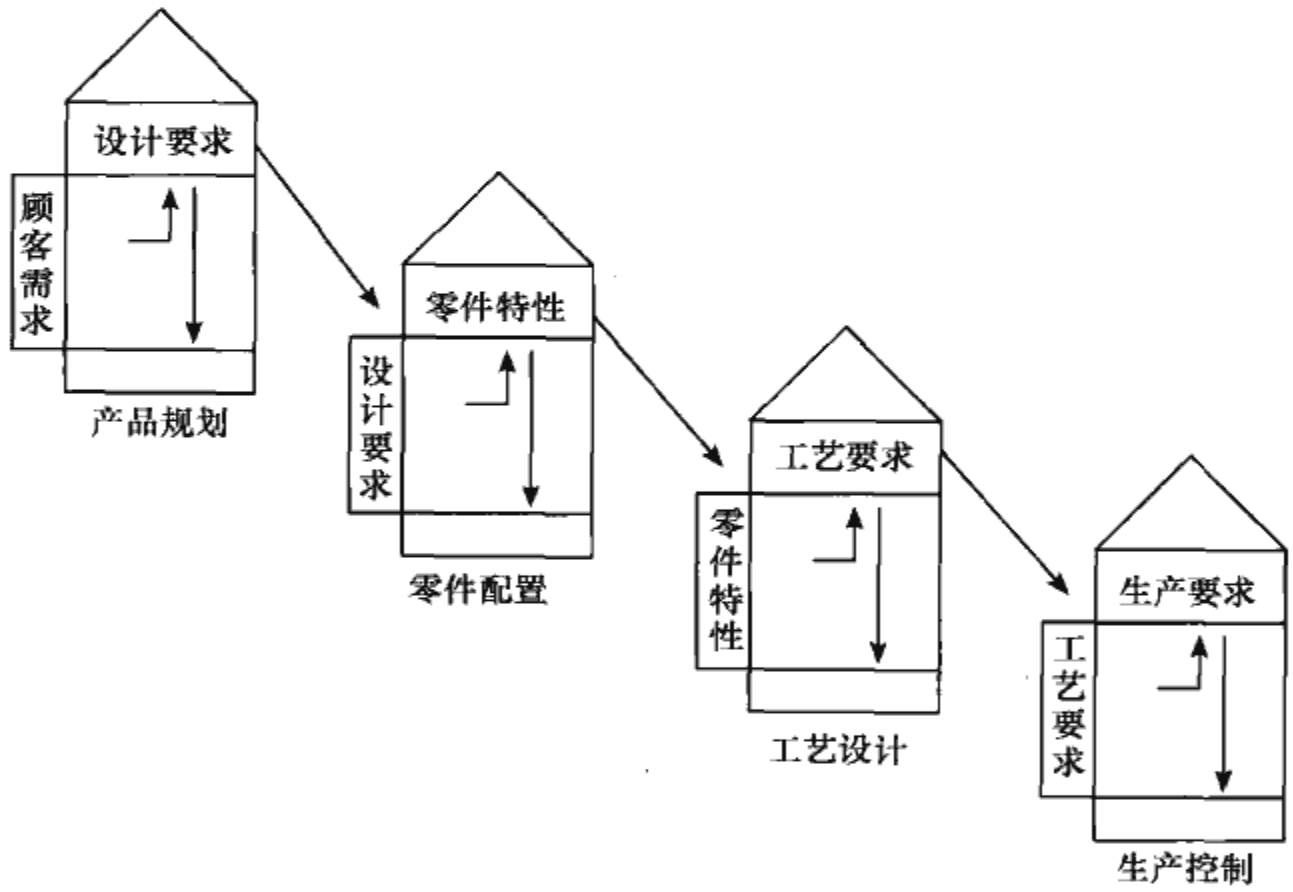


图8—2　四个阶段的QFD

并不是所有的QFD都需要完整地包括上述四个阶段。根据QFD工作对象的复杂程度，可按如下原则对四个阶段的QFD进行剪裁或扩充：

（1）每一阶段质量屋的工程措施应足够具体和详细，适于作为下一个阶段质量屋的顾客要求（左墙）。例如，若产品规划质量屋中关键的工程措施不够具体和详细，可能需要在进行零件配置前增加一层质量屋；反之，若产品规划阶段工程措施对于工艺设计阶段已足够详细，则可省略零件配置阶段。

（2）质量屋的规模不宜过大，即顾客需求和工程措施的数量不宜过多，以便于

操作。一般顾客需求不应多于 20 项，工程措施不应多于 40 项。要特别指出的是，四个阶段的质量屋必须按照并行工程的原理在产品方案论证阶段同步完成，以便同步规划产品在整个开发过程中应该进行的所有工作，确保产品开发一次成功。质量功能展开是贯彻实施并行工程思想的十分有力的工具。

3. 并行工程与 QFD 的结合运用

并行工程的发展与市场竞争的推动和信息技术的发展密切相关。一方面，由于竞争的激化，出现了经济全球化的趋势，有实力的企业纷纷提出了全球营销战略，要求在大范围和短时间内将产品投放市场并尽可能降低成本；另一方面，随着生产和装配向自动化方向发展，计算机技术的广泛应用，CAD/CAM 技术的深入发展，要求产品设计和工艺人员加强合作以改进产品的可生产性，保证产品的质量。为适应这一环境，需要对产品设计、工艺设计、制造等活动进行并行的分析和实施，研制全过程中的信息数据应在整个企业内发布并由各个部门共享，从而推动并行工程的发展。这意味着产品设计、工艺、生产和其他研制工作并行地开展，包括使有关的、有用的和所有潜在的信息在全公司各部门间流动，在方案论证阶段就并行地考虑安排各项有关工作，在产品设计阶段充分考虑工艺、制造、运输、维修和售后服务的需要，以便最大限度地缩短产品开发周期，并保证一次成功。

由于 QFD 有效地支持了产品开发的策划工作，在组织结构上采用跨专业、跨职能综合小组的形式，它的实施为并行工程的开展提供了一种载体，成为直观、形象、功能强大的工具。四个阶段的质量屋是按照并行工程原理，在产品开发早期就同步完成的，规划了产品全生命周期的全部工作，尽可能暴露各种矛盾并予以解决，这样就避免了返工和报废，缩短了产品的研制周期，降低了成本，提高了产品的质量，保证产品研制一次成功。

并行的 QFD 的另一个表现是，在较复杂产品的开发中，在零（部）件展开阶段可能不止建立一个质量屋，而是相互平行的各专业或各子系统分别根据产品规划阶段的输出建立自己的零件配置质量屋，并行地进行 QFD，从各自的角度对产品的设计要求进行全面系统的演绎分析。对于工艺设计及生产控制阶段也是如此。

8.2.3 QFD 的工作程序

QFD 的基本工作程序如下。

1. 确定项目

QFD 既适用于产品开发，又适用于质量保证、目标管理以及服务项目；既可用于大型复杂的项目，又可用于小型、简单的项目。QFD 的开展有可能涉及公司所有部门，也可能只涉及小范围的部门和人员。公司不同级别的管理部门应确定在本部门管理范围内开展 QFD 项目，并对项目的实施、进度进行检查和监督，对项目效果进行确认和处置。

2. 成立跨职能小组

跨职能小组是由与QFD项目有关的部门管理人员、专业技术人员组成的，是对QFD项目进行研究与实施的临时组织机构。跨职能小组的大小与项目大小和复杂程度有关，对于产品开发项目而言，一般应包括市场营销、产品设计、工艺设计、产品制造、工装设计与制造、计划管理、财务管理、销售管理、售后服务、供应部门人员。小组成员应具有一定的专业技术水平和协调能力，以便对项目进行技术决策、管理决策和推进项目实施。

3. 顾客需求展开和工程措施分析

满足顾客需求是开展活动的最终目的。因此，顾客需求分析是QFD项目的研究重点。一般而言，顾客对所需求的产品特性的描述是不严格的、非定量化的，但它们却是顾客需要的真正的质量特性，掌握顾客对产品需求的真正质量特性是QFD项目成功的关键。

顾客需求的分析依据包括市场调研、产品质量跟踪、售后服务信息及用户代表座谈会的意见等。调查顾客需求以后，应采用亲和图法进行顾客需求的整理和工程措施的整理。工程措施应从产品整体着眼提出，以免限制产品的设计方案，影响创造力发挥。同一级的工程措施应相互独立，并根据工程措施的相互关系建立相关矩阵。

4. 建立产品规划（一级）质量屋

在关系矩阵初步建立的基础上，跨职能小组进一步研究确定顾客需求重要度、关系度、工程措施，并对市场竞争能力和技术竞争能力进行评估。

在质量屋的建立过程中，跨职能小组应自始至终保持良好的会议气氛，采用头脑风暴法分析为满足这些顾客需求应具备的零（部）件特性，并筛选重要的、对产品最终质量特性影响大的零（部）件特性，建立质量屋。

5. 质量屋的迭代

一级质量屋初步确定了设计方案，随着产品开发研制工作的不断深入，应对质量屋确定的关键工程措施（关键技术）不断进行及时的迭代和完善。此外，随着产品工程措施（设计要求）的展开，应协调和同步地建立零件配置、工艺设计和生产控制质量屋（见图8—2），以同步确定零（部）件质量特性、工艺制造条件与规范、生产控制要求等所有满足顾客需求的手段与措施。

值得注意的是，质量屋的四个阶段应与设计评审、工艺评审和产品评审结合进行。

6. 开展并行工程

应用QFD方法建立的产品、零（部）件、工艺、生产阶段质量屋为并行设计和开展并行工程创造了条件。它可以使产品设计、零（部）件设计、工艺设计及制造过程质量控制的设计并行进行，并在设计过程中不断进行信息融通，采用不同方法和技术解决每个过程的质量与技术关键。

7. 落实关键环节的稳健性设计和控制手段

对 QFD 确定的关键环节采用试验设计（DOE）、田口方法、故障模式与影响分析（FMEA）、故障树分析（FTA）、统计过程控制（SPC）等方法进行稳健性优化设计和控制。

8. 资料归档

质量屋是集体智慧的结晶，是集中技术信息的宝库。作为公司重要的技术文件，质量屋应纳入技术档案。

8.2.4 QFD 应用实例

下面以圆珠笔的开发为例，使读者对 QFD 有一个初步的了解。

圆珠笔的设计要求包括：笔尖组件设计、油墨浓度、油墨成分、收放机构、外形设计、成本控制和材料。这七项要求没有层次上的隶属关系，作为同级工程措施并列填入质量屋的天花板。

为了从上述七项工程措施中挑选出具有关键意义的几项，首先要确定顾客需求与工程措施两两之间的关系度 r_{ij}（关系矩阵）。关系度的等级规定如下：

1 表示该交点所对应的工程措施和顾客需求间存在微弱的关系；

3 表示该交点所对应的工程措施和顾客需求间存在较弱的关系；

5 表示该交点所对应的工程措施和顾客需求间存在一般的关系；

7 表示该交点所对应的工程措施和顾客需求间存在密切的关系；

9 表示该交点所对应的工程措施和顾客需求间存在非常密切的关系。

根据实际情况，必要时也可采用中间等级：

2 表示介于 1～3 之间；

4 表示介于 3～5 之间；

6 表示介于 5～7 之间；

8 表示介于 7～9 之间；

空白即为 0，表示不存在关系。

有时，也可只采用 1，3，9 三个关系度等级，此时，可用符号“◎”表示 9，“○”表示 3，“△”表示 1。

加权后工程措施的重要度为：

$$h_j = \sum_{i=1}^{m} K_i r_{ij}, \quad j = 1,2,\cdots,n$$

以顾客需求的重要度作为加权系数，分别计算每项工程措施与全部顾客需求的加权关系度之和并进行比较，加权关系度之和大（亦即对满足顾客需求贡献大）的那些工程措施就是所谓的关键措施或 CTQ。每项工程措施对顾客需求的加权关系度之和称作工程措施的重要度，根据该重要度明确重点，集中力量实现关键的工程措施，最大限度地发挥人力、物力的作用。

关键措施的重要度应明显高于一般工程措施的重要度。如可将重要度高于所有工程措施的平均重要度1.25倍以上的工程措施列为关键措施。

图8—3给出了开发优质圆珠笔的质量屋。通过建立质量屋进行量化评估，最终确定了两项关键措施：油墨成分和笔尖组件设计。

工程措施（一级） / 顾客需求（一级）	重要度 K_i	笔尖组件设计	油墨浓度	油墨成分	收放机构	外形设计	成本控制	材料	市场竞争能力 M_i 本产品	改进后	国内对手	国际对手
书写流利	5	9	5	5			1	2	4	5	4	5
永不褪色	4		2	9			1		3	4	3	5
外形美观	3	1			3	9	1	2	4	5	4	5
使用方便	3	1			8	1			4	5	5	5
价格适中	1	1		2	2		9		4	5	4	4
适度耐用	2	2			3		1	7	5	5	5	5
		圆珠与珠座间隙适当	将浓度目标值控制在某一百分比	选择合理的配方	收放简便，可无故障收放×次	美观大方，适合不同消费者	售价不高于一美元	选用合适的笔尖和笔杆材料	0.78	0.96	0.81	0.99
									市场竞争能力指数 M			
工程措施重要度 h_j		56	33	63	41	30	23	30				
技术竞争能力 T_j	本产品	4	4	3	3	5	4	3	0.72	技术竞争能力指数 T		
	改进后	5	4	4	5	5	5	4	0.91			
	国内对手	4	4	3	4	5	4	4	0.78			
	国际对手	5	5	5	5	5	4	5	0.98			

图8—3　开发优质圆珠笔一级质量屋

8.3　故障模式与影响分析概述

8.3.1　FMEA方法的适用范围

六西格玛设计的目的是减少产品的质量波动，从而减少各种质量问题，包括故障。在产品研制和设计优化、过程优化、质量改进、售后服务等工作中，FMEA是

一种复杂度介于因果分析图（鱼骨图）法和试验设计/田口方法之间的质量问题分析方法。FMEA（failure mode and effects analysis）在我国译为“故障模式与影响分析”，迄今基本上也只应用于故障的分析。应当注意，名词“故障”来自英文单词 failure，就英文本意而言，failure 的含义是失败、失效、故障、事故、中断、损坏、折断、衰退、缺少、不足等，可见 failure 的含义本不限于“故障”，而是包含了各种质量问题在内。FMEA 方法的适用范围包括产品和工艺设计中的各种质量问题的分析。在国际标准 ISO9004：2000《质量管理体系业绩改进指南》中，已把 FMEA 列为对“产品和过程的确认和更改”以及对“设计和开发”进行风险评估的工具。

为了统一，也为了充分利用 20 多年来 FMEA 方法在可靠性工程中应用的经验和基础，本书仍沿用“故障模式与影响分析”的名称，在分析表格中，被分析的问题仍称为“故障模式”，但应强调的是本章中所称“故障”均泛指各种质量问题，“故障模式”是指质量问题模式。

8.3.2 FMEA 的目的

进行 FMEA，主要是为了达到以下三个目的：

（1）认知及评估系统、产品、过程、设计或服务等的已知和潜在故障。

（2）确认能消除或降低潜在故障发生的纠正措施。

（3）文件化、档案化，经过确认故障原因，引入纠正或预防措施，再把相关程序或工作书标准化，其实也是 PDCA 管理循环的表现。

8.3.3 FMEA 方法的分类

FMEA 大体可分为系统 FMEA（system FMEA）、设计 FMEA（design FMEA）、过程 FMEA（process FMEA）、服务 FMEA（service FMEA）四类。其中，系统 FMEA 用于在早期构思设计阶段分析系统和子系统，着重分析由系统缺陷引起的与系统功能相联系的潜在故障模式；设计 FMEA 用于在产品交付生产前分析产品，重点分析由设计缺陷引起的产品潜在故障模式；过程 PFMEA，用于分析制造或装配过程，重点分析由制造或装配过程缺陷引起的潜在产品故障模式。服务 FMEA 用于在服务到达顾客前对服务进行分析，重点分析由系统或过程缺陷引起的故障模式。本章将在 8.3.5 中详细讲述过程 FMEA 方法。

8.3.4 FMEA 的一般程序

（1）组织 FMEA 推行小组与头脑风暴。确保适合的参与者，即小组，必须是跨部门、多学科的，同时小组成员必须乐于奉献。

（2）绘制功能方块图与/或工艺流程图。功能方块图适用于系统 FMEA 和设计 FMEA。工艺流程图更适用于过程 FMEA 和服务 FMEA。

（3）确定优先次序。在小组了解问题之后，就可以着手进行切实的分析。常用的问题有：什么部分重要？小组应从何处开始改进？

（4）收集数据。收集有关故障的数据并将其正确合理地分类。从这一步，小

组开始填写 FMEA 表格，所找到的故障即该 FMEA 的故障模式。同时，确定系统、设计、过程、服务所有潜在的故障模式，确定它们对产品所需要完成任务的影响。

（5）分析。利用数据解决问题。

（6）研究的结果。对每一故障模式确定其检测方法和补救措施。该步中的信息用来量化严重度、发生频度、检测水平和 RPN（危险优先序数，亦称风险度），并填写 FMEA 表中相应的栏。

（7）证实/评估/测量结果。记录结果后，评估改进方案是否成功。评估一般采用以下三个基本问题：

- 情况比先前有好转吗？
- 情况比先前更糟糕吗？
- 情况没有改变吗？

（8）全部再做一遍。不管前七步结果如何，遵循 FMEA 的重要原理：连续改进，FMEA 推行小组都应继续改进。

FMEA 的具体工作流程图如图 8—4 所示。

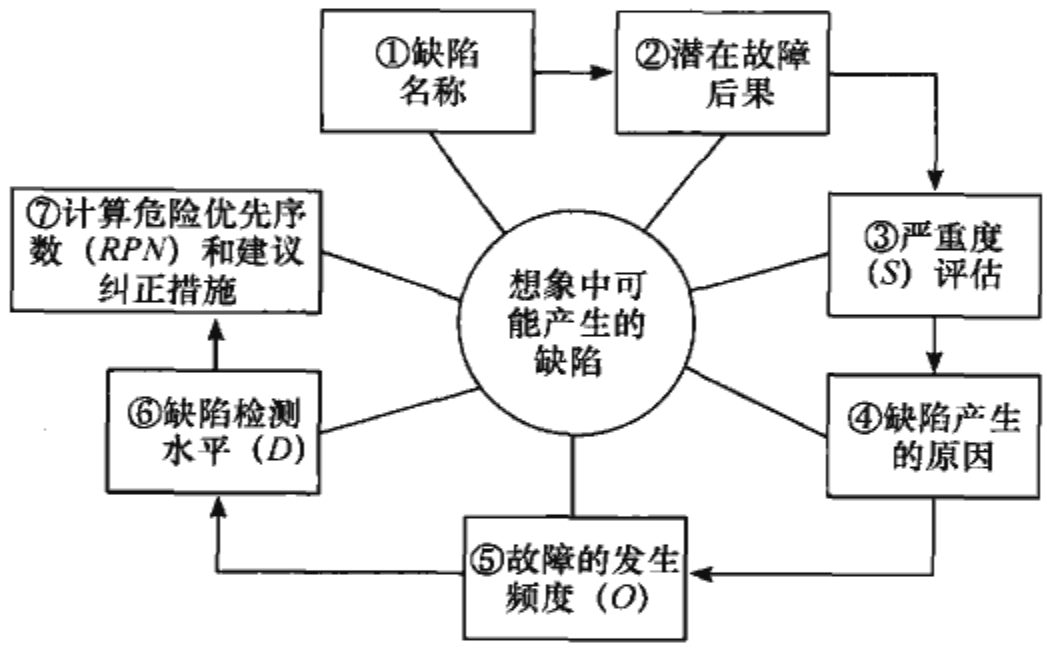


图 8—4　FMEA 的工作流程图

8.3.5　过程 EMEA（PFMEA）

PFMEA 中使用的“故障”一词与可靠性工程中的故障定义有所差别，过程故障包括了更广的含义，例如各种情况的超差、组装错误、热处理和表面处理不合格以及环境变化所引起的过程波动等。PFMEA 的目标是：

- 确定潜在的与过程故障模式有关的产品。
- 评估过程故障对顾客的潜在影响。
- 确定引起故障的潜在的制造或装配过程原因，并确定哪一类过程故障是应该重点避免的以及相关的关键过程。
- 找到和发现一系列的过程故障模式，为今后的分析工作打下良好的基础，建立一个优选的系统。

PFMEA 最早应在可行性论证前或可行性论证时进行，先于对产品的加工，按

照从单独的元器件到装配件的过程，考虑所有的加工操作。在制造计划阶段，新过程（或修改过程）的早期检查和分析可以帮助预测、解决和监控潜在的过程关键问题。在产品的整个研制过程中，应适时对 PFMEA 进行迭代完善。下面结合图 8—4，详细阐述 PFMEA 的工作流程。

（1）缺陷名称，即潜在的过程故障模式，是指过程可能发生的不满足过程要求和设计意图的形式。这一步要求根据零件的工艺特性，对特定的工序列出每一个潜在故障模式，前提是这种故障可能发生，但不一定非得发生。确定这些缺陷时，应查看一下同类产品或工艺以前的 FMEA 表格，以及生产加工过程中或用户使用过程中经常出现的质量问题，还应考虑到在使用一段时间后（仍在使用寿命内）出现的质量问题。如弯曲、粘和、毛刺、断裂等。

（2）潜在故障后果，是指过程故障模式对顾客的影响，顾客可以是下一道工序、代理商或最终顾客。例如站在下一道工序操作者的立场上看，故障的后果有无法安装、不配合、损坏设备等；作为顾客可能注意到或经历到的情况有：噪音、外观锈蚀、工作不正常等。

（3）严重度（*S*）评估。严重度是潜在故障模式对顾客的影响后果的严重程度的评价指标。如果顾客是下一道工序，应站在操作者的立场上评价。严重度仅适用于评估故障的后果。严重度评估一般分为 1～10 级，评价准则可参考克莱斯勒、福特、通用三大汽车公司 FMEA 手册。

（4）缺陷产生的原因，即过程的故障原因/故障机理，是指故障是怎么发生的，并依据可以纠正或控制的原则来描述。针对每一个潜在故障模式，在尽可能广的范围内，列出每个可以想到的故障原因。不论缺陷是何种类，只有找到原因，才能找出解决的措施。故障的许多起因并不是相互独立的、唯一的，要纠正或控制一个起因，需要考虑诸如试验设计方法等，以便针对那些相关的因素采取纠正措施。典型的故障起因包括：扭矩过大、焊接不正确、零件漏装或错装等。

（5）故障的发生频度（*O*），是指具体的故障起因/机理发生的频度。频度的等级数着重在其含义而不是数值。评价准则和分级规则应意见一致，参考上述三大汽车公司 FMEA 手册的评价准则。

（6）缺陷检测水平（*D*），即检测难度，指在现行的过程控制中，零（部）件离开制造工序或装配工位之前，缺陷有可能被发现并阻止故障发生的可能性。这些控制方法如防错夹具之类的过程控制方法，或者统计过程控制。可参考上述三大汽车公司 FMEA 手册的评价准则。

（7）计算危险优先序数（*RPN*）和建议纠正措施。危险优先序数（*RPN*）＝严重度（*S*）×故障的发生频度（*O*）×缺陷检测水平（*D*）。危险优先序数是 FMEA 中的一个重要参数，*RPN* 越大，说明所产生缺陷的影响越大。

下面详细介绍用于 PFMEA 的表格并列举 PFMEA 的一个案例。

1. PFMEA 表格及填写说明

PFMEA 表格如表 8—3 所示。

表 8—3 **过程故障模式与影响分析表**

产品名称/型号：　　完成部门：　　PFMEA 编号：　　第　页共　页

过程名称：　　分析：　　审核：　　批准：　　填表日期：　年　月　日

(1) 过程名称、功能要求	(2) 潜在的过程故障模式	(3) 过程故障影响	(4) 严重度 S	(5) 过程的故障原因/故障机理	(6) 频度 O	(7) 过程控制	(8) 检测难度 D	(9) 风险度 RPN	(10) 建议的改进或补偿措施	(11) 责任部门/责任人及完成日期	改进后				
											(12) 实施的改进/补偿措施和日期	(13) 严重度 S	(14) 频度 O	(15) 检测难度 D	(16) 风险度 RPN

填表说明如下：

第（1）列（过程名称、功能要求）：填写被分析过程的名称，该名称应与工艺规程一致；并填写该过程的功能、过程操作的目的、操作要求和与其他过程的关系等。

第（2）列（潜在的过程故障模式）：分析人员应根据工艺规程和国家、行业的有关规定和标准所确定的各质量特性的指标要求，结合工程实践经验、专业技术知识和类似过程所发生的故障，分析确定所有可能无法满足过程要求和/或设计意图的故障模式。应注意，在 FMEA 中，应假设正在加工的零（部）件/材料是没有问题的。

第（3）列（过程故障影响）：尽可能使用表示产品功能的词汇，将过程缺陷对部件及系统的影响提出来。故障影响是故障模式对顾客的影响，这里的顾客可以是下一过程、部件、系统、最终用户等，在进行分析时，应考虑到对所有顾客的影响，填写每个潜在的故障对过程输出以及生产线所导致的后果。

第（4）列（严重度 S）：按照表 8—4 所推荐的过程故障严重度（S）评分标准确定故障模式的严重度 S。

表 8—4　　推荐的过程故障严重度（S）评分标准

影响	评分标准	严重度
无警告的严重危害	在没有任何预兆的情况下产生的影响操作人员和机器安全或违反有关法律法规的极其严重的故障模式。	10
有警告的严重危害	在有故障预兆的情况下产生的影响操作人员和机器安全或违反有关法律法规的极其严重的故障模式。	9
很大	对生产线造成较大的破坏，产品可能必须 100%报废，使产品或系统丧失主要功能的故障模式，顾客非常不满。	8
大	对生产线造成较大的破坏，产品需分选，部分产品报废，导致产品或系统降级工作，顾客不满。	7
中等	对生产线造成较小的破坏，部分产品报废（但产品不需分选），一些部件失效，影响产品的舒适性和方便性，顾客感觉不方便。	6
小	对生产线造成较小的破坏，产品可能必须 100%返工，一些部件失效，影响产品的舒适性和方便性，顾客感觉有些不满。	5
很小	对生产线造成较小的破坏，产品需分选，部分产品返工，顾客不满，加工精细、外观、噪声等方面不符合要求，大部分顾客能发现有缺陷。	4
轻微	对生产线造成很小的破坏，部分产品站外在线返工，加工精细、外观、噪声等方面不符合要求，有一半顾客发现有缺陷。	3
很轻微	对生产线造成很小的破坏、部分产品站内在线返工，加工精细、外观、噪声等方面不符合要求，但很少有顾客发现缺陷。	2
无	无影响。	1

第（5）列（过程的故障原因/故障机理）：确定并说明与潜在的故障有关的各种原因，包括过程设计的缺陷，工艺参数的量值，人、机、料、法、环因素，检验试验方法，特定的物理、化学过程等。必要时还应考虑相关过程的故障原因。尽可能列出每个故障模式所对应的任何可以想到的故障原因。故障原因的定义应详细且明确（如：操作人员未安装密封垫），不能使用模糊不清的定义（如：操作人员出

错，机器故障等）；

第（6）列（频度 O）：估计每个故障模式和故障起因发生的可能性，按照表 8—5 所推荐的过程故障频度（O）评分标准来确定故障模式或故障起因的频度 O。

表 8—5　　推荐的过程故障频度（O）评分标准

故障概率	设计寿命期内可能的故障率	C_{pk}	频度
很高：故障几乎不可避免	≥1/2	<0.33	10
	1/3	≥0.33	9
高：反复发生的故障	1/8	≥0.51	8
	1/20	≥0.67	7
中等：偶尔发生的故障	1/80	≥0.83	6
	1/400	≥1.00	5
	1/2 000	≥1.17	4
低：相对很少发生的故障	1/15 000	≥1.33	3
	1/150 000	≥1.50	2
极低：几乎不可能发生的故障	1/1 500 000	≥1.67	1

第（7）列（过程控制）：说明在现行设计方案中已经采取的过程控制措施，如工作环境的控制、工序的检验、特种工序的参数控制、统计过程控制、5S 管理、检测不同故障的测试装置及其检测方法等。

第（8）列（检测难度 D）：取决于现行设计控制措施的有效程度，可按照表 8—6 所推荐的过程故障检测难度（D）评分标准来确定故障模式或故障起因的检测难度 D，需注意过程控制措施的有效程度越低，检测难度就越高。

表 8—6　　推荐的过程故障检测难度（D）评分标准

检测可能性	利用现行过程控制方法检测故障模式的可能性	检测难度
绝对不可能	没有过程控制方法能检测故障模式。	10
很微小	利用现行过程控制方法检测故障模式的可能性很微小。	9
微小	利用现行过程控制方法检测故障模式的可能性微小。	8
很小	利用现行过程控制方法检测故障模式的可能性很小。	7
小	利用现行过程控制方法检测故障模式的可能性小。	6
中等	利用现行过程控制方法检测故障模式的可能性中等。	5
中等偏上	利用现行过程控制方法检测故障模式的可能性中等偏上。	4
高	利用现行过程控制方法检测故障模式的可能性高。	3
很高	利用现行过程控制方法检测故障模式的可能性很高。	2
几乎肯定能	利用现行过程控制方法几乎肯定能检测故障模式。	1

第（9）列（风险度 RPN）：计算并填写表示过程故障模式的风险度的 RPN 数值。

第（10）列（建议的改进或补偿措施）：首先针对 $RPN \geqslant C$ 的故障模式的起因提出纠正和预防措施，以消除该故障或减低故障发生的风险。若故障模式的根本起因不详，应通过试验设计等手段来确定主要起因。若对某一特定起因尚无纠正和预防措施，应提出设计、工艺、质控和操作上的补偿措施。若没有任何可采取的措施，在该栏填写“无”字予以明确。对于危及人员安全的故障模式，若不能消除，必须提出防护措施。

第（11）列（责任部门/责任人及完成日期）：对于所提出的改进/补偿措施，应同时建议责任部门/责任人及完成日期。

第（12）列（实施的改进/补偿措施和日期）：填写实际执行的改进/补偿措施和日期。

第（13）、（14）、（15）、（16）列可参照表 8—3 中第（4）、（6）、（8）、（9）列分别确定并填写经过程改进后过程故障的严重度 S、频度 O、检测难度 D 和 RPN 值，RPN 值的降低就是过程六西格玛设计或六西格玛改进的绩效的一种体现。

2. PFMEA 的例子

例 8—1 某兼容磁头装置的极尖加工过程故障模式和影响分析。

磁头是磁带记录仪的关键部件之一，它是一种电磁、磁电换能器，其质量直接关系到磁带机记录及重放信号的好坏。某兼容磁头装置是 IRIG 标准宽频带计测记录—重放仪的磁头，信道数为 14 道/英寸，要求在 3 米/秒带速下记录重放 400Hz 到 2MHz 的宽带信号。

此类磁头录放过程的特点是：工作频带宽，偏磁频率高，信号波长短，带速快，头—带压强大，对失真度和信噪比要求苛刻。其工艺复杂，制造精度要求很高。

单个磁头的结构如图 8—5 所示，根据类似磁头的加工经验，其中加工难度最大的是磁头极尖的生产加工，且从功能上进行分析，磁头极尖质量直接关系到磁头的质量以及磁带记录仪录放信号的质量。由于极尖加工难度大，极易造成报废，因此，需要进行该型兼容磁头装置加工过程的 PFMEA。

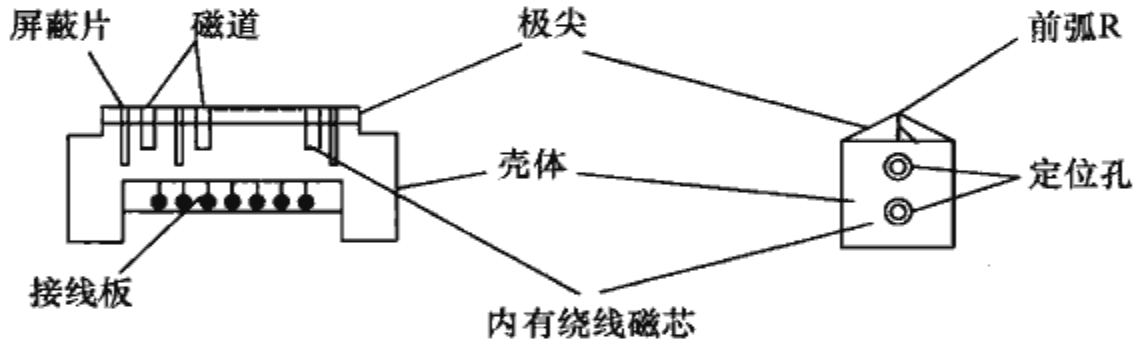


图 8—5 磁头结构示意图

首先进行磁头加工过程流程/风险评估分析，结果如表 8—7 所示。

表 8—7　　磁头加工过程流程/风险评估表

	过程步骤	风险评估		过程步骤	风险评估
1	磁头壳体的加工	低风险	8	磁头极尖复合面研抛	中风险
2	屏蔽片的加工	中风险	9	磁头后磁芯组复合面研抛	中风险
3	接线板的加工	低风险	10	极尖与后磁芯的复合组装	低风险
4	磁头后磁芯的加工	中风险	11	灌环氧树脂固封磁头	中风险
5	磁头后磁芯绕线	低风险	12	磁头前弧面加工	中风险
6	磁头后磁芯入壳	低风险	13	前弧 R 研抛	中风险
* 7	磁头极尖的加工	高风险	14	打定位孔	中风险

对标“*”的高风险过程“磁头极尖的加工”进行 PFMEA，结果见表 8—8。

表 8—8 **某兼容磁头装置过程故障模式与影响分析表**

产品名称/型号：某兼容磁头装置　　完成部门：工艺室　　PFMEA 编号：P-003　　第 5 页共 17 页

过程名称：磁头极尖加工　　分析：　　审核：　　批准：　　填表日期：2003 年 5 月 8 日

(1) 过程名称、功能要求	(2) 潜在的过程故障模式	(3) 过程故障影响	(4) 严重度 S	(5) 过程的故障原因/故障机理	(6) 频度 O	(7) 过程控制	(8) 检测难度 D	(9) 风险度 RPN	(10) 建议的改进或补偿措施	(11) 责任部门/责任人及完成日期	改进后				
											(12) 实施的改进/补偿措施和日期	(13) 严重度 S	(14) 频度 O	(15) 检测难度 D	(16) 风险度 RPN
磁头极尖加工；要求形成满足技术条件的高磁阻间隙。	1. 缝隙开裂	极尖报废	8	1. 缝隙玻璃选用不当，粘接强度低	3	1. 目视	4	96	1. 选用满足要求的粘接玻璃	2003 年 5 月 31 日前：工艺室提出改进措施及培训要求；人教处组织上岗培训。	2003 年 5 月 28 日前有关单位已实施第(10)列所有措施，其中对磨床细磨极尖缝隙平面的措施又进行了 PFM EA，见修改工艺后的 PF MEA 表 008 号。	8	2	4	64
				2. 烧结工艺不合理	2		2	32	2. 改进烧结工艺				1	2	16
	2. 缝隙宽度不均匀且超差	极尖报废	8	1. 缝隙平面度不满足要求	7	2. 用高倍显微镜检测	5	280	1. 改进缝隙平面研抛工艺			8	3	5	120
				2. 缝隙中夹有杂质	2		4	64	2. 保持加工间的洁净度				1	4	32
				3. 合缝工艺问题	2		3	48	3. 改进合缝工艺				1	3	24
				4. 合缝夹具不满足要求	3		2	48	4. 修整合缝夹具			8	2	2	32
	3. 缝隙过大或过小	极尖报废	8	1. 膜层厚度控制不好	5	3. 用高倍显微镜检测	2	80	1. 调整膜层厚度				4	2	64
				2. 缝隙粗糙度不满足要求	3		5	120	2. 加强缝隙面的抛光并进行检测			6	2	5	80
	4. 缝隙面烧伤或裂纹	料块磁性能下降	6	1. 缝隙平面研抛加工应力偏大	4	4. 用高倍显微镜检测	7	168	1. 改进研抛加工工艺				2	7	84
				2. 研抛工艺操作人员技术不过关	2		5	60	2. 对操作工人进行培训				1	5	30

对表 8—8 中风险度 *RPN* 值进行分析发现，故障模式 2（缝隙宽度不均匀且超差）的故障原因 1（缝隙平面度不满足要求）的 *RPN* 值最高，为 280；故障模式 4（缝隙面烧伤或裂纹）的故障原因 1（缝隙平面研抛加工应力偏大）的 *RPN* 值其次，为 168，均大于 150，而这两项故障原因的纠正措施均为改进缝隙平面的研抛过程，因此，再对缝隙平面研抛过程作下一层次的 PFMEA。

例 8—2 某兼容磁头装置磁头极尖缝隙平面研抛过程的 PFMEA。通过例 8—1 磁头极尖加工过程的 PFMEA，确定关键过程为磁头极尖缝隙平面研抛过程，现对磁头极尖缝隙平面研抛进行 PFMEA，根据分析结果，采取改进措施。

首先进行磁头极尖缝隙平面研抛过程流程/风险评估分析，结果如表 8—9 所示。

表 8—9　　磁头极尖缝隙平面研抛过程流程/风险评估表

	过程步骤	风险评估		过程步骤	风险评估
1	用丙酮、酒精清洗待磨极尖料块	低风险	* 6	用磨床细磨极尖缝隙平面	高风险
2	用 502 胶将极尖料块粘在工艺垫块上	中风险	7	从夹具上取下工艺垫块并清洗	低风险
3	在磨床上调校夹具的平行度和垂直度	低风险	8	手工精抛极尖缝隙平面	中风险
4	将工艺垫块装在夹具上	低风险	9	清洗	低风险
5	用磨床粗磨极尖缝隙平面	中风险	10	检测平面度	低风险

标“*”的过程为高风险过程，因此，对用磨床细磨极尖缝隙平面过程进行 PFMEA，结果见表 8—10。

本案例通过对极尖加工过程的 PFMEA，找出影响极尖加工成品率的 4 个潜在故障模式及所有的故障原因，并采取改进设计、改进工艺、改进管理等措施，使所有 *RPN* 值均有所降低，并全都低于 120；使磁头极尖的成品率从类似磁头极尖的 20%上升到 50%左右，并且与类似磁头相比，技术指标也明显提高，使整机顺利达到预定的技术指标要求。



本章小结

六西格玛设计从设计源头出发，基于并行质量工程的思想，面向六西格玛进行设计，主动采用系统的解决问题的方法，把关键顾客需求融入产品设计过程中，实现无缺陷的产品和过程设计。本章主要包括六西格玛设计概述、QFD 方法和 FMEA 方法等内容。先讲述了六西格玛设计的产生和发展、基本理念、IDDOV 等技术路线以及六西格玛设计与并行工程、稳健性设计方法之间的关系等几个方面内容；然后讲述了 QFD 基本方法及其工作程序；最后讲述了 FMEA 方法的适用范围、目的、分类、一般程序，并着重对 PFMEA 方法进行了详细讲解和举例说明。

六西格玛设计的内容十分丰富，开展六西格玛设计也是当前六西格玛管理深入发展的方向。鉴于本书的读者是面向绿带，本书只对六西格玛设计进行了简要介绍。需要深入学习六西格玛设计的读者，可以阅读书后所列的参考文献。

表 8—10

某兼容磁头装置过程故障模式与影响分析表

产品名称/型号：某兼容磁头装置　　完成部门：工艺室　　PFMEA 编号：P-008　　

过程名称：磁头极尖缝隙平面研抛　　分析：　　审核：　　批准：　　填表日期：2003 年 6 月 2 日

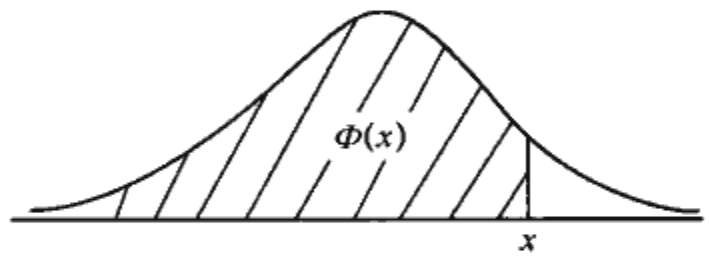
(1) 过程名称、功能要求	(2) 潜在的过程故障模式	(3) 过程故障影响	(4) 严重度 S	(5) 过程的故障原因/故障机理	(6) 频度 O	(7) 过程控制	(8) 检测难度 D	(9) 风险度 RPN	(10) 建议的改进或补偿措施	(11) 责任部门/责任人及完成日期	改进后				
											(12) 实施的改进/补偿措施和日期	(13) 严重度 S	(14) 频度 O	(15) 检测难度 D	(16) 风险度 RPN
磨床细磨极尖缝隙平面；要求极尖缝隙平面具有良好的平面度和粗糙度。	1. 缝隙表面烧伤	1. 影响磁头某些磁道的性能	4	1. 研磨时未按要求进行冷却	3	1. 目视	1	12	1. 加冷却并提高加工人员水平	2003 年 6 月 30 日前：工艺室修改工艺；人教处组织培训。	2003 年 6 月 25 日工艺室修改了工艺，人教处组织了补充培训。	4	2	1	8
	2. 缝隙表面产生微裂纹	2. 影响磁头的质量和使用寿命	7	2. 砂轮进刀量偏大或未使用研磨冷却或操作人员技术问题	2	2. 用高倍显微镜检测	7	98	2. 提高加工人员加工技术水平和责任心			7	1	6	42
	3. 未达到要求的平面度（如塌边等）	3. 影响磁头某些磁道的性能	4	3. 砂轮平面度不满足要求	5	3. 平晶检测	1	20	3. 加强对砂轮平面度的检测并定期修磨砂轮			2	5	1	10
	4. 未达到要求的粗糙度	4. 造成磁头实际缝隙宽度增大，影响磁头性能	7	4. 加工时间不够或未使用规定粒度的砂轮	6	4. 目视或粗度仪检测	2	84	4. 提高加工人员加工技术水平和责任心			7	3	2	42

附　表

附表 1

标准正态分布函数表 $\Phi(x)$

$$\Phi(x)=\int_{-\infty}^{x}\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{x^2}{2}}dx$$



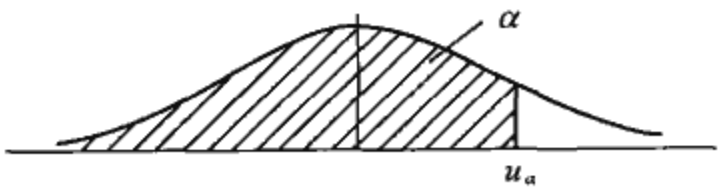
x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5190	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7157	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7703	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8970	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9270	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9278	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9430	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9648	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9700	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9762	0.9767
2.0	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817

续前表

x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9874	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
x	0.00	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
3.0	$0.9^{2}8650$	$0.9^{3}0324$	$0.9^{3}3129$	$0.9^{3}5166$	$0.9^{3}6631$	$0.9^{3}7674$	$0.9^{3}8409$	$0.9^{3}8922$	$0.9^{4}2765$	$0.9^{4}5190$
4.0	$0.9^{4}6833$	$0.9^{4}7934$	$0.9^{4}8665$	$0.9^{5}1460$	$0.9^{5}4587$	$0.9^{5}6602$	$0.9^{5}7887$	$0.9^{5}8699$	$0.9^{6}2067$	$0.9^{6}5208$
5.0	$0.9^{6}7133$	$0.9^{6}8302$	$0.9^{7}0036$	$0.9^{7}4210$	$0.9^{7}6668$	$0.9^{7}8101$	$0.9^{7}9828$	$0.9^{8}4010$	$0.9^{8}6684$	$0.9^{8}8182$
6.0	$0.9^{9}0136$									

附表 2

标准正态分布的 α 分位数表



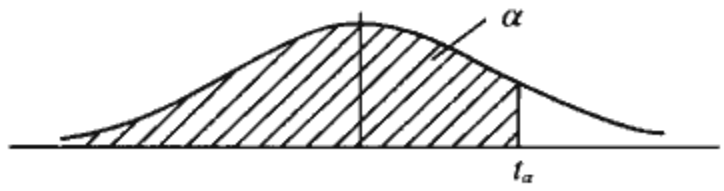
α	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.00	—	−2.33	−2.05	−1.88	−1.75	−1.64	−1.55	−1.48	−1.41	−1.34
0.10	−1.28	−1.23	−1.18	−1.13	−1.08	−1.04	−0.99	−0.95	−0.92	−0.88
0.20	−0.84	−0.81	−0.77	−0.74	−0.71	−0.67	−0.64	−0.61	−0.58	−0.55
0.30	−0.52	−0.50	−0.47	−0.44	−0.41	−0.39	−0.36	−0.33	−0.31	−0.28
0.40	−0.25	−0.23	−0.20	−0.18	−0.15	−0.13	−0.10	−0.08	−0.05	−0.03
0.50	0.00	0.03	0.05	0.08	0.10	0.13	0.15	0.18	0.20	0.23
0.60	0.25	0.28	0.31	0.33	0.36	0.39	0.41	0.44	0.47	0.50
0.70	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.67	0.71	0.74	0.77	0.81
0.80	0.84	0.88	0.92	0.95	0.99	1.04	1.08	1.13	1.18	1.23
0.90	1.28	1.34	1.41	1.48	1.55	1.64	1.75	1.88	2.05	2.33

α	0.001	0.005	0.010	0.025	0.050	0.100
u_α	−3.090	−2.576	−2.326	−1.960	−1.645	−1.282

α	0.999	0.995	0.990	0.975	0.950	0.900
u_α	3.090	2.576	2.326	1.960	1.645	1.282

附表 3

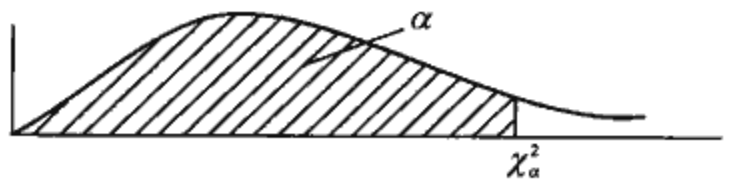
t 分布的 α 分位数表



df	$t_{0.60}$	$t_{0.70}$	$t_{0.80}$	$t_{0.90}$	$t_{0.95}$	$t_{0.975}$	$t_{0.99}$	$t_{0.995}$
1	0.325	0.727	1.376	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	0.289	0.617	1.061	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	0.277	0.584	0.978	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	0.271	0.569	0.941	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	0.267	0.559	0.920	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	0.265	0.553	0.906	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	0.263	0.549	0.896	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	0.262	0.546	0.889	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	0.261	0.543	0.883	1.383	0.833	2.262	2.821	3.250
10	0.260	0.542	0.879	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	0.260	0.540	0.876	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	0.259	0.539	0.873	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	0.259	0.538	0.870	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	0.258	0.537	0.868	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	0.258	0.536	0.866	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	0.258	0.535	0.865	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	0.257	0.534	0.863	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898
18	0.257	0.534	0.862	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	0.257	0.533	0.861	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	0.257	2.533	0.860	1.325	1.725	2.086	2.528	2.861
21	0.257	0.532	0.859	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831
22	0.256	0.532	0.858	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819
23	0.256	0.532	0.858	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807
24	0.256	0.531	0.857	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797
25	0.256	0.531	0.856	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787
26	0.256	0.531	0.856	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779
27	0.256	0.531	0.855	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771
28	0.256	0.530	0.855	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763
29	0.256	0.530	0.854	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756
30	0.256	0.530	0.854	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750
40	0.255	0.529	0.851	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704
60	0.254	0.527	0.848	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660
120	0.254	0.526	0.845	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617
∞	0.253	0.524	0.842	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576

附表 4

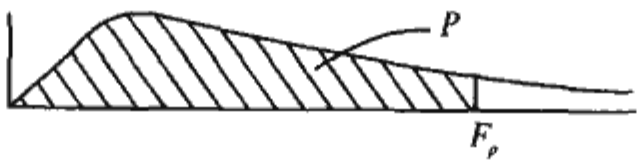
χ^2 分布的 α 分位数表



df	$\chi^2_{0.005}$	$\chi^2_{0.01}$	$\chi^2_{0.025}$	$\chi^2_{0.05}$	$\chi^2_{0.10}$	$\chi^2_{0.90}$	$\chi^2_{0.95}$	$\chi^2_{0.975}$	$\chi^2_{0.99}$	$\chi^2_{0.995}$
1	0.000 039	0.000 16	0.000 98	0.003 9	0.015 8	2.71	3.84	5.02	6.63	7.88
2	0.0100	0.0201	0.0506	0.1026	0.2107	4.61	5.99	7.38	9.21	10.60
3	0.0717	0.115	0.216	0.352	0.584	6.25	7.81	9.35	11.34	12.84
4	0.207	0.297	0.484	0.711	1.064	7.78	9.49	11.14	13.28	14.86
5	0.412	0.554	0.831	1.15	1.61	9.24	11.07	12.83	15.09	16.75
6	0.676	0.872	1.24	1.64	2.20	10.64	12.59	14.45	16.81	18.55
7	0.989	1.24	1.69	2.17	2.83	12.02	14.07	16.01	18.48	20.28
8	1.34	1.65	2.18	2.73	3.49	13.36	15.51	17.53	20.09	21.96
9	1.73	2.09	2.70	3.33	4.17	14.68	16.92	19.02	21.67	23.59
10	2.16	2.56	3.25	3.94	4.87	15.99	18.31	20.48	23.21	25.19
11	2.60	3.05	3.82	4.57	5.58	17.28	19.68	21.92	24.73	26.76
12	3.07	3.57	4.40	5.23	6.30	18.55	21.03	23.34	26.22	28.30
13	3.57	4.11	5.01	5.89	7.04	19.81	22.36	24.74	27.69	29.82
14	4.07	4.66	5.63	6.57	7.79	21.06	23.68	26.12	29.14	31.32
15	4.60	5.23	6.26	7.26	8.55	22.31	25.00	27.49	30.58	32.80
16	5.14	5.81	6.91	7.96	9.31	23.54	26.30	28.85	32.00	34.27
18	6.26	7.01	8.23	9.39	10.86	25.99	28.87	31.53	34.81	37.16
20	7.43	8.26	9.59	10.85	12.44	28.41	31.41	34.17	37.57	40.00
24	9.89	10.86	12.40	13.85	15.66	33.20	36.42	39.36	42.98	45.56
30	13.79	14.95	16.79	18.49	20.60	40.26	43.77	46.98	50.89	53.67
40	20.71	22.16	24.43	26.5	29.05	51.81	55.76	59.34	63.69	66.77
60	35.53	37.48	40.48	43.19	46.46	74.40	79.08	83.30	88.38	91.95
120	83.85	86.92	91.57	95.70	100.62	140.23	146.57	152.21	158.95	163.64

附表 5

F 分布的 0.90 分位数 $F_{0.90}(n_1, n_2)$ 表



n_1＝分子的自由度，n_2＝分母的自由度

n_2 \ n_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	39.86	49.50	53.59	55.83	57.24	58.20	58.91	59.44	59.86	60.19	60.71	61.22	61.74	62.00	62.26	62.53	62.70	63.06	63.33
2	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.35	9.37	9.38	9.39	9.41	9.42	9.44	9.45	9.46	9.47	9.47	9.48	9.49
3	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.24	5.23	5.22	5.20	5.18	5.18	5.17	5.16	5.15	5.14	5.13
4	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.94	3.92	3.90	3.87	3.84	3.83	3.82	3.80	3.79	3.78	3.76
5	4.06	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.32	3.30	3.27	3.24	3.21	3.19	3.17	3.16	3.14	3.12	3.10
6	3.78	3.46	3.29	3.18	3.11	3.05	3.01	2.98	2.96	2.94	2.90	2.87	2.84	2.82	2.80	2.78	2.76	2.74	2.72
7	3.59	3.26	3.07	2.96	2.88	2.83	2.78	2.75	2.72	2.70	2.67	2.63	2.59	2.58	2.56	2.54	2.51	2.49	2.47
8	3.46	3.11	2.92	2.81	2.73	2.67	2.62	2.59	2.56	2.50	2.50	2.46	2.42	2.40	2.38	2.36	2.34	2.32	2.29
9	3.36	3.01	2.81	2.69	2.61	2.55	2.51	2.47	2.44	2.42	2.38	2.34	2.30	2.28	2.25	2.23	2.21	2.18	2.16
10	3.29	2.92	2.73	2.61	2.52	2.46	2.41	2.38	2.35	2.32	2.28	2.24	2.20	2.18	2.16	2.13	2.11	2.08	2.06
11	3.23	2.86	2.66	2.54	2.45	2.39	2.34	2.30	2.27	2.25	2.21	2.17	2.12	2.10	2.08	2.05	2.03	2.00	1.97
12	3.18	2.81	2.61	2.48	2.39	2.33	2.28	2.24	2.21	2.19	2.15	2.10	2.06	2.04	2.01	1.99	1.96	1.93	1.90
13	3.14	2.76	2.56	2.43	2.35	2.28	2.23	2.20	2.16	2.14	2.10	2.05	2.01	1.98	1.96	1.93	1.90	1.88	1.85
14	3.10	2.73	2.52	2.39	2.31	2.24	2.19	2.15	2.12	2.10	2.05	2.01	1.96	1.94	1.91	1.89	1.86	1.83	1.80
15	3.07	2.70	2.49	2.36	2.27	2.21	2.16	2.12	2.09	2.06	2.02	1.97	1.92	1.90	1.87	1.85	1.82	1.79	1.76

续前表

n_2 \ n_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
16	3.05	2.67	2.46	2.33	2.24	2.18	2.13	2.09	2.06	2.03	1.99	1.94	1.89	1.87	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72
17	3.03	2.64	2.44	2.31	2.22	2.15	2.10	2.06	2.03	2.00	1.96	1.91	1.86	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72	1.69
18	3.01	2.62	2.42	2.29	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00	1.98	1.93	1.89	1.84	1.81	1.78	1.75	1.72	1.69	1.66
19	2.99	2.61	2.40	2.27	2.18	2.11	2.06	2.02	1.98	1.96	1.91	1.86	1.81	1.79	1.76	1.73	1.70	1.67	1.63
20	2.97	2.59	2.38	2.25	2.16	2.09	2.04	2.00	1.96	1.94	1.89	1.84	1.79	1.77	1.74	1.71	1.68	1.64	1.61
21	2.96	2.57	2.36	2.23	2.14	2.08	2.02	1.98	1.95	1.92	1.87	1.83	1.78	1.75	1.72	1.69	1.66	1.62	1.59
22	2.95	2.56	2.35	2.22	2.13	2.06	2.01	1.97	1.93	1.90	1.86	1.81	1.76	1.73	1.70	1.67	1.64	1.60	1.57
23	2.94	2.55	2.34	2.21	2.11	2.05	1.99	1.95	1.92	1.89	1.84	1.80	1.74	1.72	1.69	1.66	1.62	1.59	1.55
24	2.93	2.54	2.33	2.19	2.10	2.04	1.98	1.94	1.91	1.88	1.83	1.78	1.73	1.70	1.67	1.64	1.61	1.57	1.53
25	2.92	2.53	2.32	2.18	2.09	2.02	1.97	1.93	1.89	1.87	1.82	1.77	1.72	1.69	1.66	1.63	1.59	1.56	1.52
26	2.91	2.52	2.31	2.17	2.08	2.01	1.96	1.92	1.88	1.86	1.81	1.76	1.71	1.68	1.65	1.61	1.58	1.54	1.50
27	2.90	2.51	2.30	2.17	2.07	2.00	1.95	1.91	1.87	1.85	1.80	1.75	1.70	1.67	1.64	1.60	1.57	1.53	1.49
28	2.89	2.50	2.29	2.16	2.06	2.00	1.94	1.90	1.87	1.84	1.79	1.74	1.69	1.66	1.63	1.59	1.56	1.52	1.48
29	2.80	2.50	2.28	2.15	2.06	1.99	1.93	1.89	1.86	1.83	1.78	1.73	1.68	1.65	1.62	1.58	1.55	1.51	1.47
30	2.88	2.49	2.28	2.14	2.05	1.98	1.93	1.88	1.85	1.82	1.77	1.72	1.67	1.64	1.61	1.57	1.54	1.50	1.46
40	2.84	2.44	2.23	2.09	2.00	1.93	1.87	1.83	1.79	1.76	1.71	1.66	1.61	1.57	1.54	1.51	1.47	1.42	1.38
60	2.79	2.39	2.18	2.04	1.95	1.87	1.82	1.77	1.74	1.71	1.66	1.60	1.54	1.51	1.48	1.44	1.40	1.35	1.29
120	2.75	2.35	2.13	1.99	1.90	1.82	1.77	1.72	1.68	1.65	1.60	1.55	1.48	1.45	1.41	1.37	1.32	1.26	1.19
∞	2.71	2.30	2.08	1.94	1.85	1.77	1.72	1.67	1.63	1.60	1.55	1.49	1.42	1.38	1.34	1.30	1.24	1.17	1.00

附表 6

F 分布的 0.95 分位数 $F_{0.95}(n_1, n_2)$ 表

n_1＝分子的自由度，n_2＝分母的自由度

n_2 \ n_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.56	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96

续前表

n_2 \ n_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

附表 7

F 分布的 0.975 分位数 $F_{0.975}(n_1, n_2)$ 表

n_1＝分子的自由度，n_2＝分母的自由度

n_2 \ n_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	647.8	799.5	864.2	899.6	921.8	937.1	948.2	956.7	963.3	968.6	976.7	984.9	993.1	997.2	1 001	1 006	1 010	1 014	1 018
2	38.51	39.00	39.17	39.25	39.30	39.33	39.36	39.37	39.39	39.40	39.41	39.43	39.45	39.46	39.46	39.47	39.48	39.49	39.50
3	17.44	16.04	15.44	15.10	14.88	14.73	14.62	14.54	14.47	14.42	14.34	14.25	14.17	14.12	14.08	14.04	13.99	13.95	13.90
4	12.22	10.65	9.98	9.60	9.36	9.20	9.07	8.98	8.90	8.84	8.75	8.66	8.56	8.51	8.46	8.41	8.36	8.31	8.26
5	10.01	8.43	7.76	7.39	7.15	6.98	6.85	6.76	6.68	6.62	6.52	6.43	6.33	6.28	6.23	6.18	6.12	6.07	6.02
6	8.81	7.26	6.60	6.23	5.99	5.82	5.70	5.60	5.52	5.46	5.37	5.27	5.17	5.12	5.07	5.01	4.96	4.90	4.85
7	8.07	6.54	5.89	5.52	5.29	5.12	4.99	4.90	4.82	4.76	4.67	4.57	4.47	4.42	4.36	4.31	4.25	4.20	4.14
8	7.57	6.06	5.42	5.05	4.82	4.65	4.53	4.43	4.36	4.30	4.20	4.10	4.00	3.95	3.89	3.84	3.78	3.73	3.67
9	7.21	5.71	5.08	4.72	4.48	4.32	4.20	4.10	4.03	3.96	3.87	3.77	3.67	3.61	3.56	3.51	3.45	3.39	3.33
10	6.94	5.46	4.83	4.47	4.24	4.07	3.95	3.85	3.78	3.72	3.62	3.52	3.42	3.37	3.31	3.26	3.20	3.14	3.08
11	6.72	5.26	4.63	4.28	4.04	3.88	3.76	3.66	3.59	3.53	3.43	3.33	3.23	3.17	3.12	3.06	3.00	2.94	2.88
12	6.55	5.10	4.47	4.12	3.89	3.73	3.61	3.51	3.44	3.37	3.28	3.18	3.07	3.02	2.96	2.91	2.85	2.79	2.72
13	6.41	4.97	4.35	4.00	3.77	3.60	3.48	3.39	3.31	3.25	3.15	3.05	2.95	2.89	2.84	2.78	2.72	2.66	2.60
14	6.30	4.86	4.24	3.89	3.66	3.50	3.38	3.29	3.21	3.15	3.05	2.95	2.84	2.79	2.73	2.67	2.61	2.55	2.49
15	6.20	4.77	4.15	3.80	3.58	3.41	3.29	3.20	3.12	3.06	2.96	2.86	2.76	2.70	2.64	2.59	2.52	2.46	2.40
16	6.12	4.69	4.08	3.73	3.50	3.34	3.22	3.12	3.05	2.99	2.89	2.79	2.68	2.63	2.57	2.51	2.45	2.38	2.32
17	6.12	4.62	4.01	3.66	3.44	3.28	3.16	3.06	2.98	2.92	2.82	2.72	2.62	2.56	2.50	2.44	2.38	2.32	2.25

续前表

n_2 \ n_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
18	5.98	4.56	3.95	3.61	3.38	3.22	3.10	3.01	2.93	2.87	2.77	2.67	2.56	2.50	2.44	2.38	2.32	2.26	2.19
19	5.92	4.51	3.90	3.56	3.33	3.17	3.05	2.96	2.88	2.82	2.72	2.62	2.51	2.45	2.39	2.33	2.27	2.20	2.13
20	5.87	4.46	3.86	3.51	3.29	3.13	3.01	2.91	2.84	2.77	2.68	2.57	2.46	2.41	2.35	2.29	2.22	2.16	2.09
21	5.83	4.42	3.82	3.48	3.25	3.09	2.97	2.87	2.80	2.73	2.64	2.53	2.42	2.37	2.31	2.25	2.18	2.11	2.04
22	5.79	4.38	3.78	3.44	3.22	3.05	2.93	2.84	2.76	2.70	2.60	2.50	2.39	2.33	2.27	2.21	2.14	2.08	2.00
23	5.75	4.35	3.75	3.41	3.18	3.02	2.90	2.81	2.73	2.67	2.57	2.47	2.36	2.30	2.24	2.18	2.11	2.04	1.97
24	5.72	4.32	3.72	3.38	3.15	2.99	2.87	2.78	2.70	2.64	2.54	2.44	2.33	2.27	2.21	2.15	2.08	2.01	1.94
25	5.69	4.29	3.69	3.35	3.13	2.97	2.85	2.75	2.68	2.61	2.51	2.41	2.30	2.24	2.18	2.12	2.05	1.98	1.91
26	5.66	4.27	3.67	3.33	3.10	2.94	2.82	2.73	2.65	2.59	2.49	2.39	2.28	2.22	2.16	2.09	2.03	1.95	1.88
27	5.63	4.24	3.65	3.31	3.08	2.92	2.80	2.71	2.63	2.57	2.47	2.36	2.25	2.19	2.13	2.07	2.00	1.93	1.85
28	5.61	4.22	3.63	3.29	3.06	2.90	2.78	2.69	2.61	2.55	2.45	2.34	2.23	2.17	2.11	2.05	1.98	1.91	1.83
29	5.59	4.20	3.61	3.27	3.04	2.88	2.76	2.67	2.59	2.53	2.43	2.32	2.21	2.15	2.09	2.03	1.96	1.89	1.81
30	5.57	4.18	3.59	3.25	3.03	2.87	2.75	2.65	2.57	2.51	2.41	2.31	2.20	2.14	2.07	2.01	1.94	1.87	1.79
40	5.42	4.05	3.46	3.13	2.90	2.74	2.62	2.53	2.45	2.39	2.29	2.18	2.07	2.01	1.94	1.88	1.80	1.72	1.64
60	5.29	3.93	3.34	3.01	2.79	2.63	2.51	2.41	2.33	2.27	2.17	2.06	1.94	1.88	1.82	1.74	1.67	1.58	1.48
120	5.15	3.80	3.23	2.89	2.67	2.52	2.39	2.30	2.22	2.16	2.05	1.94	1.82	1.76	1.69	1.61	1.53	1.43	1.31
∞	5.02	3.69	3.12	2.79	2.57	2.41	2.29	2.19	2.11	2.05	1.94	1.83	1.71	1.64	1.57	1.48	1.39	1.27	1.00

附表 8

F 分布的 0.99 分位数 $F_{0.99}(n_1, n_2)$ 表

n_1＝分子的自由度，n_2＝分母的自由度

n_2 \ n_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	4 052	4 999.5	5 403	5 625	5 764	5 859	5 928	5 982	6 022	6 056	6 016	6 157	6 209	6 235	6 261	6 287	6 313	6 339	6 366
2	98.50	99.00	99.17	99.25	99.30	99.33	99.36	99.37	99.39	99.40	99.42	99.43	99.45	99.46	99.47	99.47	99.48	99.49	99.50
3	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.35	27.23	27.05	26.87	26.69	26.60	26.50	26.41	26.32	26.22	26.13
4	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.66	14.55	14.37	14.20	14.02	13.93	13.84	13.75	13.65	13.56	13.46
5	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	10.16	10.05	9.89	9.72	9.55	9.47	9.38	9.29	9.20	9.11	9.02
6	13.75	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.72	7.56	7.40	7.31	7.23	7.14	7.06	6.97	6.88
7	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.47	6.31	6.16	6.07	5.99	5.91	5.82	5.74	5.65
8	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.67	5.52	5.36	5.28	5.20	5.12	5.03	4.95	4.86
9	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26	5.11	4.96	4.81	4.73	4.65	4.57	4.48	4.40	4.31
10	10.04	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.71	4.56	4.41	4.33	4.25	4.17	4.08	4.00	3.91
11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.40	4.25	4.10	4.02	3.94	3.86	3.78	3.69	3.60
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.16	4.01	3.86	3.78	3.70	3.62	3.54	3.45	3.36
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	3.96	3.82	3.66	3.59	3.51	3.43	3.34	3.25	3.17
14	8.86	6.51	5.56	5.04	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.80	3.66	3.51	3.43	3.35	3.27	3.18	3.09	3.00
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.67	3.52	3.37	3.29	3.21	3.13	3.05	2.96	2.87
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.55	3.41	3.26	3.18	3.10	3.02	2.93	2.84	2.75
17	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.46	3.31	3.16	3.08	3.00	2.92	2.83	2.75	2.65

续前表

n_2 \ n_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51	3.37	3.23	3.08	3.00	2.92	2.84	2.75	2.66	2.57
19	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.30	3.15	3.00	2.92	2.84	2.76	2.67	2.58	2.49
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37	3.23	3.09	2.94	2.86	2.78	2.69	2.61	2.52	2.42
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40	3.31	3.17	3.03	2.88	2.80	2.72	2.64	2.55	2.46	2.36
22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	3.12	2.98	2.83	2.75	2.67	2.58	2.50	2.40	2.31
23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30	3.21	3.07	2.93	2.78	2.70	2.62	2.54	2.45	2.35	2.26
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26	3.17	3.03	2.89	2.74	2.66	2.58	2.49	2.40	2.31	2.21
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.85	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	2.99	2.85	2.70	2.62	2.54	2.45	2.36	2.27	2.17
26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09	2.96	2.81	2.66	2.58	2.50	2.42	2.33	2.23	2.13
27	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06	2.93	2.78	2.63	2.55	2.47	2.38	2.29	2.20	2.10
28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12	3.03	2.90	2.75	2.60	2.52	2.44	2.35	2.26	2.17	2.06
29	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.33	3.20	3.09	3.00	2.87	2.73	2.57	2.49	2.41	2.33	2.23	2.14	2.03
30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07	2.98	2.84	2.70	2.55	2.47	2.39	2.30	2.21	2.11	2.01
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.80	2.66	2.52	2.37	2.29	2.20	2.11	2.02	1.92	1.80
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.50	2.35	2.20	2.12	2.03	1.94	1.84	1.73	1.60
120	6.85	4.79	3.95	3.48	3.17	2.96	2.79	2.66	2.56	2.47	2.34	2.19	2.03	1.95	1.86	1.76	1.66	1.53	1.38
∞	6.63	4.61	3.78	3.32	3.02	2.80	2.64	2.51	2.41	2.32	2.18	2.04	1.88	1.79	1.70	1.59	1.47	1.32	1.00

附表 9　　计量值控制图计算控制限的系数表

子组中观测值个数 n	控制限系数											中心线系数			
	A	A_2	A_3	B_3	B_4	B_5	B_6	D_1	D_2	D_3	D_4	c_4	$1/c_4$	d_2	$1/d_2$
2	2.121	1.880	2.659	0.000	3.267	0.000	2.606	0.000	3.686	0.000	3.267	0.797 9	1.253 3	1.128	0.886 5
3	1.732	1.023	1.954	0.000	2.568	0.000	2.276	0.000	4.358	0.000	2.574	0.886 2	1.128 4	1.693	0.590 7
4	1.500	0.729	1.628	0.000	2.266	0.000	2.088	0.000	4.698	0.000	2.282	0.9213	1.085 4	2.059	0.485 7
5	1.342	0.577	1.427	0.000	2.089	0.000	1.964	0.000	4.918	0.000	2.114	0.940 0	1.063 8	2.326	0.429 9
6	1.225	0.483	1.287	0.030	1.970	0.029	1.874	0.000	5.078	0.000	2.004	0.951 5	1.051 0	2.534	0.394 6
7	1.134	0.419	1.182	0.118	1.882	0.113	1.806	0.204	5.204	0.076	1.924	0.959 4	1.042 3	2.704	0.369 8
8	1.061	0.373	1.099	0.185	1.815	0.179	1.751	0.388	5.306	0.136	1.864	0.965 0	1.036 3	2.847	0.351 2
9	1.000	0.337	1.032	0.239	1.761	0.232	1.707	0.547	5.393	0.184	1.816	0.969 3	1.031 7	2.970	0.336 7
10	0.949	0.308	0.975	0.284	1.716	0.276	1.669	0.687	5.469	0.223	1.777	0.972 7	1.028 1	3.078	0.324 9
11	0.905	0.285	0.927	0.321	1.679	0.313	1.637	0.811	5.535	0.256	1.744	0.975 4	1.025 2	3.173	0.315 2
12	0.866	0.266	0.886	0.354	1.646	0.346	1.610	0.922	5.594	0.283	1.717	0.977 6	1.022 9	3.258	0.306 9
13	0.832	0.249	0.850	0.382	1.618	0.374	1.585	1.025	5.647	0.307	1.693	0.979 4	1.021 0	3.336	0.299 8
14	0.802	0.235	0.817	0.406	1.594	0.399	1.563	1.118	5.696	0.328	1.672	0.981 0	1.019 4	3.407	0.293 5
15	0.775	0.223	0.789	0.428	1.572	0.421	1.544	1.203	5.741	0.347	1.653	0.982 3	1.018 0	3.472	0.288 0
16	0.750	0.212	0.763	0.448	1.552	0.440	1.526	1.282	5.782	0.363	1.637	0.983 5	1.016 8	3.532	0.283 1
17	0.728	0.203	0.739	0.466	1.534	0.458	1.511	1.356	5.820	0.378	1.622	0.984 5	1.015 7	3.588	0.278 7
18	0.707	0.194	0.718	0.482	1.518	0.475	1.496	1.424	5.856	0.391	1.608	0.985 4	1.014 8	3.640	0.274 7
19	0.688	0.187	0.698	0.497	1.503	0. [illegible]	1.483	1.487	5.891	0.403	1.597	0.986 2	1.014 0	3.689	0.271 1
20	0.671	0.180	0.680	0.510	1.490	0.504	1.470	1.549	5.921	0.415	1.585	0.986 9	1.013 3	3.735	0.267 7
21	0.655	0.173	0.663	0.523	1.477	0.516	1.459	1.605	5.951	0.425	1.575	0.987 6	1.021 6	3.778	0.264 7
22	0.640	0.167	0.647	0.534	1.466	0.528	1.448	1.659	5.979	0.434	1.566	0.988 2	1.011 9	3.819	0.261 8
23	0.626	0.162	0.633	0.545	1.455	0.539	1.438	1.710	6.006	0.443	1.557	0.988 7	1.011 4	3.858	0.259 2
24	0.612	0.157	0.619	0.555	1.445	0.549	1.429	1.759	6.031	0.451	1.548	0.989 2	1.010 9	3.895	0.256 7
25	0.600	0.153	0.606	0.565	1.435	0.559	1.420	1.806	6.056	0.459	1.541	0.989 6	1.010 5	3.931	0.254 4

资料来源：ASTM，Philadelphia，PA，USA.

附表 10 **西格玛水平换算表**

西格玛水平（σ）	每百万机会缺陷数 *DPMO*	西格玛水平（σ）	每百万机会缺陷数 *DPMO*
0	933 193	3.1	54 799
0.1	919 243	3.2	44 565
0.2	903 200	3.3	35 930
0.3	884 930	3.4	28 717
0.4	864 334	3.5	22 750
0.5	841 345	3.6	17 864
0.6	815 940	3.7	13 903
0.7	788 145	3.8	10 724
0.8	758 036	3.9	8 198
0.9	725 747	4	6 210
1	691 462	4.1	4 661
1.1	655 422	4.2	3 467
1.2	617 911	4.3	2 555
1.3	579 260	4.4	1 866
1.4	539 828	4.5	1 350
1.5	500 000	4.6	968
1.6	460 172	4.7	687
1.7	420 740	4.8	483
1.8	382 089	4.9	337
1.9	344 578	5	233
2	308 538	5.1	159
2.1	274 253	5.2	108
2.2	241 964	5.3	72.3
2.3	211 855	5.4	48.1
2.4	184 060	5.5	31.7
2.5	158 655	5.6	20.7
2.6	135 666	5.7	13.3
2.7	115 070	5.8	8.5
2.8	96 800	5.9	5.4
2.9	80 757	6	3.4
3	66 807		

术语表

1-sample proportion test　单样本比率检验
1-sample t-test　单样本 t 检验
2-sample proportion test　双样本比率检验
2-sample t-test　双样本 t 检验
5S（seiri，seiton，seiso，seiketsu，shitsuke）　整理、整顿、清扫、清洁、素养
6σ　六西格玛

A

accelerated change　加速变革
acceptable quality level，AQL　合格质量水平
acceptance testing procedure，ATP　验收检验规程
accuracy　准确性；准确度
action learning　学以致用
activity based cost，ABC　作业成本法
adjusted multiple correlation coefficient　调整的多元全相关系数
adjustment factor　调节因子
advanced quality system，AQS　先进质量体系
affinity diagram　亲和图
algorithm for inventive problem solving，AIPS　创造性问题解决步骤
alias　别名
alias structure　别名结构
align　整合
alpha error　α 错误，也称第一类错误
alternative hypothesis　备择假设
analysis of control chart　控制图分析
analysis of variance，ANOVA　方差分析
Anderson-Darling test　Anderson-Darling 检验，一种正态性检验方法
artificial limits　人为界限
asymmetrical orthogonal array　非对称正交表

attribute measurement system analysis　属性值测量系统分析
average quality loss　平均质量损失
axiomatic design　公理性设计

B

balanced scorecard　平衡计分卡
Bartlett test　Bartlett 检验
benchmarking　水平对比
beta error　β错误，也称第二类错误
bias　偏倚
big Y　大 Y
binomial distribution　二项分布
black belt，BB　黑带
blitz team　突击队
block　区组
blocking　区组化
bottleneck technique　瓶颈技术
box-and-whisker plots　箱线图
Box-Behnken design　Box-Behnken 设计
Box-Cox transformation　Box-Cox 转化
box plot　箱线图
brainstorming　头脑风暴法
business case　经营情况

C

capability maturity model，CMM　能力成熟度模型
C chart　C 图，缺陷数控制图
cash flow　现金流
cause and effect diagram　因果图
cause and effect matrix　因果矩阵
CDAM（combine，delete，add，or modify）　组合、删除、增加、修改
center line，CL　中心线
center point　中心点
central composite circumscribed design，CCC　中心复合序贯设计
central composite design　中心复合设计
central composite face-centered design，CCF　中心复合表面设计
central composite inscribed design，CCI　中心复合有界设计
central limit theorem　中心极限定理
central tendency　数据分布中心
champion　倡导者
change acceleration framework　变革加速框架
change plan　变革计划
charter　团队或项目宪章，或称特许任务书

check sheet 检查表
Chi square tests 卡方检验
coded unit 编码单位
code of conduct 行为规范
coding 代码化
common cause 偶然原因
comparative methods 比较方法
complete randomized design 完全随机化设计
computer simulation 计算机模拟
concentration diagram 示意图
concurrent engineering 并行工程
confidence coefficient 1—α 置信水平 1—α
confidence interval 置信区间
confirmation run 验证试验
confounded 混杂
contingency tables 列联表
continuous flow manufacturing, CFM 连续流生产
control array 控制表
control chart 控制图
control limits 控制界限
controllable factor 可控因子
corporate responsibility 公司责任
correlation coefficient 相关系数
cost benefit analysis 成本—收益分析
cost of conformity 符合性质量成本
cost of nonconformity 非符合性质量成本
cost of poor quality, COPQ 不良质量成本或劣质成本
cost of quality, COQ 质量成本
critical business requirement, CBR 业务关键要求
critical to process, CTP 关键过程特性
critical to quality, CTQ 关键质量特性
critical customer requirement, CCR 顾客关键需求
critical value 临界值
cross array 乘积表；交叉表
customer 顾客
customer requirements 顾客要求
customer value added activity 顾客增值活动
CUSUM control chart 累积和控制图
cycle time, CT 周期时间
cycle-time reduction 缩短周期

D

data analysis 数据分析

defect　缺陷
defects per million opportunities，DPMO　百万机会缺陷数
defects per opportunity，DPO　机会缺陷率
defects per unit　单位缺陷数
defining relation　定义关系
design for X，DFX　面向 X 的设计
design failure mode and effect analysis，DFMEA　设计 FMEA
design for assembly，DFA　面向装配的设计
design for cost，DFC　面向成本的设计
design for environment，DFE　面向环境的设计
design for manufacturing，DFM　面向制造的设计
design for reliability & maintainability，DFRM　面向可靠性和维修性的设计
design for service，DFS　面向售后服务的设计
design for six sigma，DFSS　六西格玛设计
design for test，DFT　面向试验的设计
design mapping process　设计的映射过程
design of experiment，DOE　试验设计
detection　检测
digital simulation　数字仿真
direct costs　直接成本
discrete data　离散数据
discrimination ratio　分辨力
dispersion factor　散度因子
distribution　分布
DMADV（define，measure，analyze，design，and verify）　界定、测量、分析、设计和验证
DMAIC（define，measure，analyze，improve，and control）　界定、测量、分析、改进和控制
dynamic parameter design　动态参数设计

E

effect　效应
effect sparsity principle　效应稀疏原则
engineering specialty integration　工程专业知识综合
estimable　可估的
event tree analysis　事件树图分析
evolutionary operation，EVOP　调优运算
experiment environment　试验环境
experiment run　试验
experiment unit　试验单元
experimental error　试验误差
exponentially weighted moving average，EWMA　指数加权滑动平均
EWMA control chart　指数加权滑动平均控制图
external customers　外部顾客
external noise　外噪声

extreme vertices design　极端顶点设计法

F

factor　因子
factorial design　因子设计
failure　故障；失效
failure mode　故障模式
failure mode and effects analysis，FMEA　故障模式与影响分析
failure tree analysis，FTA　故障树分析
families of variation　变异类别
financial metrics　财务指标
five why's　五个为什么
flow chart　流程图
flow diagram　流程图
force field analysis　力场分析
fractional factorial design　部分因子设计
full factorial design　全因子设计
F-test　*F* 检验
functional deployment process map　跨职能流程图

G

gage　测量仪器
Gantt chart　甘特图
generator　生成元
goal statement　目标陈述
goodness-of-fit test　拟合优度检验
green belts，GB　绿带

H

hidden factory　隐蔽工厂
histogram　直方图
hypothesis testing　假设检验

I

ideal technical system　理想技术系统
in control　受控
independence assumption　独立性假设
independent axiom　独立性公理
independent sample　独立样本
indirect costs　间接成本
industrial engineering　工业工程
information axiom　信息公理
inherent process variation　过程固有波动

input variable　输入变量
institutionalizing　制度化
integrated review process　全面的评审过程
interaction　交互作用
interaction effect　交互效应
interim containment action，ICA　临时应急措施
internal noise　内噪声
internal estimate　区间估计
internal customers　内部顾客
interquartile range，IQR　四分位间距
interval measurement scale　定距测量尺度
inter-outer array　内外表
is/is not　是非分析
ISO 14001　环境管理的国际标准
ISO 9000　质量管理体系国际标准

K

KANO analysis　KANO 分析
key process input variable，KPIV　关键过程输入变量
key process input variable，KPOV　关键过程输出变量
killer phrases　扼杀性言语
Kruskal-Wallis test　Kruskal-Wallis 检验

L

lack of fit　失拟
lateral thinking　水平思考
lean concepts　精益思想
lean six sigma　精益六西格玛
lean tool　精益工具
level　水平
level of confidence　置信水平
Levene test　Levene 检验
lower control limit，LCL　下控制界限
life cycle cost，LCC　全生命周期费用
linearity　线性
location and dispersion modeling　位置和散度建模法
location factor　位置因子
logistic regression　logistic 回归

M

main effect　主效应
Mann-Whitney test　Mann-Whitney 检验
master black belt，MBB　资深黑带

maxi-problem 扩大的问题
mean 均值
mean square of error，MSE 均方误
mean time between failures，MTBF 平均故障间隔时间
measure performance 测量绩效
measurement system analysis，MSA 测量系统分析
median 中位数
method time measurement，MTM 方法时间测量
milestones 里程碑
mini-problem 缩小的问题
mission 使命
mistake proofing 错误预防
mixture design 混料设计
mixtures of distributions 分布的混合
mixture-amounts 混料—总量型
mixture-process variable 混料—过程变量型
mode 众数
multiple comparison 多重比较
multiple correlation coefficient 多元全相关系数
multiple regression 多元回归分析
multi-vari chart 多变异图
multivoting 多轮投票
multi-way layout 多向分类

N

natural limits 自然界限
near rotatability 近似旋转性
nested design 嵌套设计
net present value，NPV 净现值
noise array 噪声表
noise factor 噪声因子
nominal measurement scale 名义测量尺度
non value-added activities 非增值活动
nonparametric test 非参数检验
normal distribution 正态分布
normal effect plot 正态效应图
null hypothesis 原假设或零假设
number of distinct categories 可区分的类别数

O

objective tools 客观工具
occurrence 频度
one-factor 单因子

one-factor-at-a-time，OFAT　单因子试验
one-factor-at-one-time　单因子变化法，一次一因子法
one-way-layout　单向分类
operational definition　作业定义
ordinal measurement scale　定序测量尺度
orthogonal array　正交表
orthogonal experimental design　正交试验设计
orthogonal polynomial regression　正交多项式回归
outcome indicators　输出指标
outlier　异常值
out of control　失控
output requirements　输出要求
overfitting　超拟合

P

p，np，c，u control chart　p，np，c，u 控制图
paired comparison design　配对比较设计
paired-comparison test　配对数据检验
Paired t-Test　配对 t 检验
parameter design　参数设计
Pareto effect plot　帕累托效应图
Pareto chart　排列图；帕累托图
partial balanced incomplete block design　部分平衡不完全区组设计
path of steepest ascent　最速前进方向
PDPC　过程决策程序图法
Pearson correlation coefficient　Pearson 相关系数
percent precision to tolerance ratio，%P/T　精度/公差比率
percent repeatability and reproducibility，%R&R　重复性与再现性百分比
physical mapping　物理映射
pilot plan　试运行计划
Plackett-Burman design　Plackett-Burman 设计
planning matrix　计划矩阵；实施矩阵
point estimate　点估计
Poisson distribution　泊松分布
Poka-Yoke　防差错
polynomial regression　多项式回归
power　功效或检出力
precision　精度；精密度
pre-control　预控制
predetermined time system，PTS　预定时间制
process control system　过程控制体系
probability density function，pdf　概率密度函数
problem/opportunity statement　问题/机会描述

process 过程
process analysis 过程分析
process capability indices，PCI 过程能力指数
process control plan 过程管理计划
process failure mode and effect analysis，PFMEA 过程 FMEA
process mapping 过程映射
profit and loss，P and L 损益表
program evaluation review technique，PERT 计划评审法
project scope 项目范围
Pugh matrix 普氏矩阵
pull system 拉式系统
push system 推式系统
P-Value *P* 值

Q

qualitative analysis 定性分析
quality control circle 质量管理小组
quality function deployment，QFD 质量功能展开
quality house 质量屋
quality loss function 质量损失函数
quality system standards 质量体系标准
quantitative data 定量数据

R

random words 随机词汇
randomization 随机化
randomized block design 随机区组设计
range 极差
ratio measurement scale 定比测量尺度
rational subgrouping 合理子组化
real-life simulation 模拟现实
region of rejection 拒绝域
regression and correlation analysis 回归和相关分析
regression design 回归设计
rejectable quality level，RQL 拒收质量水平
repeatability 重复性
repetition 相同试验条件的连续重复
replicate 仿行，相同试验条件下的非连续重复
reproducibility 再现性
requirement mapping 需求映射
residual diagnostic 残差诊断
resolution 分辨度
response model 响应模型

response surface methodology，RSM　响应曲面方法
response　响应变量
return on investment，ROI　投资回报率
return on net assets，RONA　净资产回报率
risk priority number，RPN　风险度；风险系数
robust design　稳健设计；健壮设计
robust parameter design　稳健参数设计；健壮参数设计
rotatability　旋转性
rolled throughput yield，RTY　流通合格率
root cause　根本原因
run chart　链图
runs test　游程检验

S

sample size　样本容量
sampling　抽样
scatter plots　散点图
screening design　因子筛选设计
service requirements　服务要求
setting　设置
severity　严重度
short-run SPC　小批量生产统计过程控制技术
sigma calculation　西格玛水平计算
sigma level　西格玛水平
signal factor　信号因子
signal to noise ratio　信噪比（S/N 比）
signal-response system　信号—响应系统
sign test　符号检验
simple linear regression　一元线性回归
simple response　简单响应
simple response system　简单响应系统
simplex centroid　单纯形重心法
simplex lattice　单纯形格点法
single array　单一表
SIPOC analysis and map　SIPOC 分析和绘图
six sigma design scorecard　六西格玛设计计分卡
single minute exchange of die，SMED　快速换模
SMART（specific，measurable，attainable，relevant，and time bound）criteria　SMART 准则，代表具体、可衡量、可实现、相关性和时间限制
Software Engineering Institute，SEI　卡内基梅隆大学的软件工程研究所
sources of variation（SOV）studies　变异源研究
special cause　特殊原因
specification limits　规格限

spline regression 样条回归
sponsor 资助者
stability 稳定性
stakeholders 利益相关方
standard deviation 标准差
standard work 标准作业
static parameter design 静态参数设计
statistical inference 统计推断
statistical process control，SPC 统计过程控制
statistical quality control，SQC 统计质量控制
statistics 统计学
steepest ascent search 最速上升法
stem-and-leaf plot 茎叶图
stratified random sampling 分层随机抽样
substance-field analysis 物体—场分析
sum of squares 平方和，统计中指离差平方和
supplier-input-process-output-customer map，SIPOC SIPOC 图，高端流程图，宏观流程图
symmetrical orthogonal array 对称正交表
system design 系统设计
systematic process sampling 过程系统抽样

T

Taguchi method 田口方法
task-oriented roles 面向任务的角色
team charter 团队宪章，或团队特许任务书
test statistic 检验统计量
TL 9000 电信行业的质量管理标准
the effects of interactions between input's 输入变量间交互作用的影响
the effects of time relationships 时间关系效应
time study 时间研究
tips for innovation problem solving，TRIZ 创造性问题解决理论
theory of constrains，TOC 约束理论
tolerance 公差
tolerance design 公差设计
top-down chart 自上而下流程图
top-down design 自上向下的设计
total quality control，TQC 全面质量控制
total quality management，TQM 全面质量管理
total productive maintenance，TPM 全面生产维护
Toyota production system，TPS 丰田生产方式
treatment 处理
triads analysis 三元分析
TS 16949 汽车制造行业执行的一套过程管理系统

two-sided comparison　双侧比较
two-way ANOVA　两因素方差分析
two-way layout　双向分类
type Ⅰ error　第一类错误
type Ⅱ error　第二类错误
type of design of experiment　试验设计类型

U

unbiased　无偏的
uncontrolled factor　非可控因子
uniform precision　一致均匀精度
upper control limit，UCL　上控制界限

V

value engineering/value analysis，VE/VA　价值工程与价值分析
variance　方差
variance component modeling　方差分量模型
verification & validation testing　双 V 试验；V&V 试验
vision　愿景
voice of the business，VOB　公司要求
voice of the customer，VOC　顾客声音

W

Weibull distribution　威布尔分布
Wilcoxon rank test　Wilcoxon 秩检验
Wilcoxon signed rank test　Wilcoxon 符号秩检验
word　字
wordlength　字长
work study　工作研究

X

X-bar and R control chart　均值—极差控制图
X-bar and S control chart　均值—标准差控制图

参考文献

1. Pyzdek, T. The Complete Guide to Six Sigma QA Publishing, L. L. C. 1999

2. Pyzdek, T. Defining Six Sigma Projects. Retrieved August 19, 2001

3. Rath and Strong. (2000). Rath & Strong's Six Sigma Pocket Guide. Lexington, MA: Rath & Strong Management Consultants

4. Simon, K. (2001). Sample SIPOC Diagram. Retrieved August 19, 2001

5. Berenson. Basic Business Statistics, Prentice-Hall, 1999

6. Box, G. E. P. and Draper, N. R. Evolutionary Operation. New York: John Wiley, 1969

7. Box, G. E. P., Hunter W. G., and Hunter, J. S. Statistics for Experiments, New York: John Wiley, 1978

8. Box, G. E. P. and Draper, N. R. Empirical Model Building and Response Surfaces. John Wiley, New York, 1987

9. MINITAB User's Guide 2: Data Analysis and Quality Tools, Release 13 for Windows, 2000

10. Chapman, Ross L. and Hunt, Robert. (edited). Proceedings of the World Innovation & Strategy Conference, University of Western Sydney, Macarthur, 1998

11. Fey, Victor R. and Rivin, Eugene I. The Science of Innovation, TRIZ Group, 1997

12. King, Bob. Better Design in Half the Time, GOAL/QPC, 1989

13. Mizuno, Shigeru and Akao, Yoji. QFD: The Customer-Driven Approach to Quality Planning and Deployment, Asian Productivity Organization, 1994

14. Phadke, Madhav S. Quality Engineering Using Robust Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989

15. Reference Manual, Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation, 1995

16. Suh, Nam Pyo. Axiomatic Design: Advances and Applications, Oxford University Press, 1999

17. Shao, Jiajun. Research and Applications of Quality Function Deployment, Proceedings of 2nd Sino-America Quality Conference, Beijing, 2001

18. QS 9000, Quality System Requirements, Third Edition, 1998

19. Stamatis, D. H. Failure Mode and Effect Analysis FMEA from Theory to Execution. ASQC Quality Press Milwaukee, Wisconsin, 1995

20. 马林，何桢. 六西格玛管理（第二版）. 北京：中国人民大学出版社，2004

21. 全国六西格玛管理推进工作委员会. 六西格玛管理评价准则. 北京：中国标准出版社，2007

22. 马林. 全国质量奖对提升我国企业国际竞争力的意义. 中国质量，2003（5）

23. S·托马斯·福斯特. 质量管理：集成的方法. 北京：中国人民大学出版社，2005

24. 弗兰克·M·格里纳. 质量策划与分析. 北京：中国人民大学出版社，2006

25. 上海质量管理科学研究院. 六西格玛核心教程：黑带读本. 北京：中国标准出版社，2002

26. 上海质量管理科学研究院. 六西格玛自由论坛：论文汇编. 北京：中国标准出版社，2002

27. 全国质量专业技术人员职业资格考试办公室组织编写. 质量专业理论与实务、质量专业综合知识（中级）. 北京：中国人事出版社，2003

28. 潘德. 六西格玛是什么. 北京：中国财政经济出版社，2002

29. 朱兰学院. 六西格玛基础教程. 北京：中国财政经济出版社，2002

30. 潘德. 六西格玛团队实战手册. 北京：中国财政经济出版社，2003

31. 蒙哥马利. 实验设计与分析. 北京：中国统计出版社，1998

32. 吴建福. 试验设计与分析及参数优化. 北京：中国统计出版社，2003

33. 任露泉. 试验优化设计与分析. 长春：吉林科学技术出版社，2001

34. 朱兰等. 朱兰质量手册（第五版）. 北京：中国人民大学出版社，2003

35. 上海质量管理科学研究院. 六西格玛核心教程黑带读本. 北京：中国标准出版社，2002

36. 茆诗松，马逢时，吴建福. 序贯淘汰水平法——一种利用正交表的搜索方法. 应用概率统计，1990，6（2）：185～204

37. 何桢，刘豹，齐二石. 基于多变异分析的工序控制方法研究. 管理工程学报，2002，16（2）：1～4

38. 门田安弘. 新丰田生产方式. 保定：河北大学出版社，2001

39. 杰弗里·莱克. 丰田汽车案例 14 项原则. 北京：中国财政经济出版社，2005

40. 詹姆斯·沃麦克，丹尼尔·琼斯. 改变世界的机器. 北京：商务印书馆，1999

41. 詹姆斯·沃麦克，丹尼尔·琼斯著. 精益思想. 北京：商务印书馆，1999

42. 何桢，魏明，周善忠. 我国企业推广六西格玛应注意的关键问题. 工程机械，2004，35（12）：34～37

43. 何桢，车建国. 精益六西格玛：新竞争优势的来源. 天津大学学报（社科版），2005，7（5）：321～325

44. 胡亚琴，何桢. 论六西格玛的本质属性. 科学学与科学技术管理，2004，25（10）：137～139

45. 何桢，张志红. 精益与六西格玛的比较研究. 工业工程，2006，9（1）：1～4

46. 何桢，张志红. 基于并行质量工程的六西格玛公差设计方法应用研究. 中国机械工程，2005（9）：827～830

47. 何桢，张志红. 精益与六西格玛的比较研究. 工业工程，2006，9（1）：1～4

48. 肖智军等. 精益生产方式 JIT. 深圳：海天出版社，2003

49. 魏大鹏. 丰田生产方式研究——准时化生产方式的技术支撑体系（第 2 版）. 天津：天津科学技术出版社，2003

50. 迈克·鲁斯，约翰·舒克. 学习观察——增加价值、消除浪费的价值流图. 北京：中国劳动社会保障出版社，2005

51. 邵家骏. 质量功能展开. 北京：机械工业出版社，2004

52. 乔杜里. 6 西格玛设计. 北京：机械工业出版社，2003

53. 坦南特. 六西格玛设计——新产品/新服务完美投放市场. 北京：电子工业出版社，2002

54. 邵家骏. 健壮设计手册. 北京：国防工业出版社，2002

55. 美国洛克希德导弹和空间公司. 美国系统工程管理. 北京：航空工业出版社，1991

56. 尤列加，威廉等. 质量功能展开概论. 北京：国防工业出版社，1991

57. 田口玄一. 开发设计阶段的质量工程学. 北京：兵器工业出版社，1990

58. 田口玄一. 质量工程学概论. 北京：中国对外翻译出版公司，1985

59. 张性原. 设计质量工程. 北京：航空工业出版社，1999

60. 张宗斌，邵家骏. QFD 技术在计算机软件改造中的应用. 世界标准化与质量管理，1998（10）

61. 邵家骏，赵胜. 系统设计的基本原理和方法. 中国质量，2001（12）

62. 陈晓川，张暴暴，冯辛安. 面向成本的设计的关键技术及其概念模型. 大连理工大学学报，1999（6）

63. 邵家骏. 开展六西格玛设计，创造世界一流产品. 中国质量，2005（3）

64. 刘书庆，杨水利. 质量管理学. 北京：机械工业出版社，2003

65. 格雷格·布鲁. 6 西格玛经理人. 北京：机械工业出版社，2003

66. W·爱德华·戴明. 戴明论质量管理. 海口：海南出版社，2003

67. 马特· 巴尼，汤姆· 麦卡锡. 总裁读：新六西格玛. 北京：中国人民大学出版社，2003

68. 马林，罗国英. 全面质量管理基础知识. 北京：中国经济出版社，2001

69. 彭娟. 浅谈 GE 质量经营战略、六西格玛与质量经营. 联想质量探索，2003（1）

70. Thomas Pyzdek. 六西格玛（6σ）手册. 北京：清华大学出版社，2003

71. 孙静. 最新国家标准 GB/T 4091—2001《常规控制图》理解与实施. 北京：中国标准出版社，2002

72. 罗纳德·D·斯尼，罗格·W·何瑞尔. 领导者读六西格玛. 北京：中国人民大学出版社，2003

73. 曾凤章. 稳健性设计. 北京：兵器工业出版社，2004

74. 何桢，赵燕，邹峰. 产品设计阶段 QFD 与 FMEA 的集成研究与应用. 管理技术，2007

75. 何桢，梁昭磊，邹峰. 六西格玛设计模式及其应用. 工程机械，2006，37（7）：62～65

76. 何桢，张志红，刘子先. 基于并行质量工程的 6σ 公差设计方法应用研究. 中国机械工程，2005，16（9）：827～830

77. 何桢，Learn something about your Six Sigma Program's Maturity. Quality Progress Aug，2009：23～28

78. 岳刚，马义中. 六西格玛管理中需要澄清的几个问题. 数理统计与管理，2006，25（3）：351～357

79. 杨振海. 6σ 管理和统计技术. 数理统计与管理，2007，26（6）：1039～1048

80. 何桢，岳刚，王丽林. 六西格玛管理及其实施. 数理统计管理，2007，26（6）：1049～1055

中国质量协会
注册六西格玛绿带知识大纲

Ⅰ．六西格玛管理概论

A．六西格玛管理的发展

1．六西格玛的起源和发展

了解六西格玛的起源，理解质量大师（朱兰、戴明、休哈特等）的质量理念；六西格玛管理的演变过程；识别组织为何使用六西格玛，六西格玛与其他管理模式之间的关系。（理解）

2．六西格玛解决问题的逻辑

识别企业的关键绩效指标和业绩驱动因素，平衡计分卡、绩效指标以及自上而下的业务流程改进。（理解）

B．六西格玛管理的概念和核心理念

1．六西格玛管理的概念

掌握六西格玛的基本概念，了解其统计意义和管理意义。（理解）

2．六西格玛的核心理念

掌握六西格玛的核心理念和价值观。（理解）

C．六西格玛管理的组织和推进

1．六西格玛管理领导力与战略

掌握六西格玛管理实施中高层领导的作用，六西格玛与企业战略。（理解）

2．六西格玛管理的组织结构

掌握实施六西格玛管理需要建立的基础架构和条件，组织各部分的角色（高层

领导团队、倡导者、资深黑带、黑带、绿带等）和作用。（理解）

3. 六西格玛管理的推进步骤

掌握六西格玛实施的主要阶段和步骤，各阶段的特点、主要内容等。（理解）

4. 六西格玛项目管理

掌握六西格玛项目管理的基本原则、意义和作用。（理解）

D. 六西格玛管理方法论

1. 六西格玛改进的模式——DMAIC

掌握 DMAIC 解决问题的基本逻辑和流程，各阶段的主要内容，与其他持续改进思想之间的关系。（理解）

2. 六西格玛设计的模式

了解六西格玛设计的基本思想，描述并区别 DMADOV（界定、测量、分析、设计、优化验证），识别它们如何与 DMAIC 相联系及在 DFSS 的设计阶段如何全程跟进帮助改进最终产品和过程。（理解）

E. 精益六西格玛

1. 精益生产的产生及发展

了解精益生产的产生和精益的思想，掌握一些概念，例如价值链、看板、拉动系统等。（理解）

2. 精益生产的核心理念

了解精益生产的核心理念，掌握增值作业和非增值作业，识别在过量库存、空间、测量检测、重复工作、运输和仓储等方面的浪费。（理解）

3. 精益生产与六西格玛的融合

了解如何将精益的工具融入六西格玛问题解决的基本框架之中。（理解）

Ⅱ. 六西格玛——界定

A. 六西格玛与过程管理

1. 过程要素

定义并描述过程构成和界限。识别过程如何跨越不同的职能部门、如何实现过程改进。（分析）

2. 过程负责人和相关方

识别过程的所有者，内部和外部顾客以及其他相关方。（应用）

3. 价值链与价值流图

了解价值、价值链和价值流图，价值流图的作用。（应用）

B. 改进机会确定

1. 识别顾客

能在一个具体的项目中识别和区分内部和外部顾客并能说明项目如何影响顾客。(应用)

2. 收集顾客数据

使用多种方法收集顾客反馈(如调查、焦点小组、访问、观察)并能区分这些方法有效的主要因素;审查调查中的问题以减少模糊不清和偏差。(应用)

3. 分析顾客信息和顾客满意度评价

使用图表、统计等定量方法以及定性方法来分析顾客的反馈,识别顾客的关键需求,了解顾客满意度评价的简单方法。(分析)

4. 转化顾客需求

帮助将顾客需求转化为项目目标,包含关键质量特性(CTQ)和要求的描述。使用"顾客的声音"分析工具如质量功能展开(QFD)把顾客要求转化为绩效测量指标。(分析)

5. 水平对比

了解水平对比(benchmarking)的目的和简要步骤,了解如何使用水平对比确定改进机会。(理解)

C. 六西格玛项目管理

1. 六西格玛项目选择

了解六西格玛项目选择的原则和流程,项目选择主要考虑的因素。(理解)

2. 六西格玛项目范围界定

使用排列图、流程图等,进一步界定项目,使用 SIPOC 图界定项目的范围。(应用)

3. 项目目标

掌握项目目标的确定方法,包括基线和改进目标,目标评价的 SMART 原则。(应用)

4. 六西格玛过程绩效度量指标

确定项目测量指标(如质量、周期时间、成本)以及与"顾客的声音"有关的关键项目指标的设定;关键质量特性的树图展开;如何建立测量指标;如何根据排列图法或其他方法确定关键过程输出变量。计算过程绩效指标,如单位缺陷数(DPU)、流通合格率(RTY)、劣质成本(COPQ)、百万机会缺陷数(DPMO)、西格玛水平等。(应用)

5. 六西格玛项目选择需注意的问题

了解六西格玛项目选择的误区,常见的问题以及如何避免。(应用)

6. 六西格玛项目效益预估和风险分析

了解六西格玛项目效益的评价方法,描述项目风险分析的目的和意义,包括资源、财务及对顾客和利益相关方的影响等。(应用)

7. 六西格玛项目立项表和计划

定义并描述项目立项表（特许任务书）的要素、项目计划方法、项目文档要求。（应用）

8. 六西格玛项目团队建设

掌握团队的组建和授权；了解团队发展阶段、团队动力与绩效、团队工具。（应用）

9. 六西格玛项目监控与促进变革

了解六西格玛项目审核和监控的必要性，总结项目经验教训，如何通过六西格玛项目转变思维方式和促进管理变革。（应用）

D. 六西格玛项目管理工具

会选择和使用界定阶段常用的管理和计划工具，如亲和图、关联图、树图、优先矩阵图、矩阵图、过程决策程序图法（PDPC法）、活动网络图。（应用）

Ⅲ. 六西格玛——测量

A. 过程分析和文档

1. 流程图

掌握绘制流程图的方法，进行作业定义，制定流程的作业指导书、工作说明等。（分析）

2. 因果图与因果矩阵

会绘制因果图和因果矩阵。使用因果图和因果矩阵确定关键的过程输入与输出。（分析）

3. 过程输入与输出

过程输入与输出变量的测量，如何量化。（分析）

B. 概率与数理统计基础

1. 概率论基础知识

描述和应用一些基本概念，如独立性、不相容、乘法法则等。（应用）

2. 随机变量及分布

掌握随机变量的类型、统计分布、概率密度函数等概念。（应用）

3. 数学期望、均值与方差

掌握数学期望、均值、方差、标准差等概念。（应用）

4. 常用的离散分布

掌握常用的几种离散分布：超几何分布、二项分布和泊松分布。（应用）

5. 常用的连续分布

掌握常见的几种连续分布：正态分布、指数分布等。（应用）

6. 中心极限定理

理解中心极限定理，及其在统计推断应用中的意义。（应用）

7. 统计量与抽样分布

区分量化（描述性的）和分析（推断性的）研究；区分总体参数和样本统计量；掌握常用统计量的分布。（应用）

8. 点估计和区间估计

掌握点估计和区间估计的概念，了解常用参数的点估计和区间估计方法。（应用）

C. 收集和归纳数据

1. 数据类型和测量尺度

识别和区分连续的数据（计量值）和离散的数据（计数值）。定义和应用名义上的、顺序上的、间隔的和比率测量尺度。（应用）

2. 数据收集方法

定义并应用收集数据的方法，如检查单、编码数据等。（应用）

3. 抽样方法

样本同质性，定义并应用抽样方法，如随机抽样法、分层抽样法等。（应用）

4. 描述性统计方法

定义、计算、解释离散和集中趋势的量度，构建并解释频率分布和累积频率分布。（应用）

5. 数据的图示方法

通过构建、应用、解释图形和图表来诠释事物之间的关系。如茎叶图、箱线图、运行图、散点图、排列图等；通过构建、应用、解释诸如直方图、正态概率图来解释分布状态。（综合）

D. 测量系统分析

1. 基本概念

掌握测量系统的构成、分析的基本概念，包括重复性和再现性、测量的相关性、偏倚、线性、百分比一致性、精度/公差（P/T）等。（评估）

2. 测量系统的重复性与再现性

计算、分析和解释测量系统的重复性与再现性。（评估）

3. 属性值数据一致性分析

计算、分析和解释属性值测量系统的一致性。（评估）

E. 过程能力和绩效

1. 过程统计控制状态

了解过程统计控制状态的含义和对过程能力分析的意义，验证稳定性和正态性。（评估）

2. 过程能力和过程绩效

识别、描述并应用设计和开展过程能力研究的要素，包括识别特性、识别规范

或公差，拟定抽样计划。解释过程能力和过程绩效的概念。（评估）

3. 过程能力指数 C_p 与 C_{pk}

定义、选择、计算 C_p 和 C_{pk}，并评价过程能力。（评估）

4. 过程能力指数 C_{pm}

了解过程能力指数 C_{pm}。（理解）

5. 过程绩效指数 P_p 与 P_{pk}

定义、选择并计算 P_p，P_{pk}，C_{pm}，并评价过程绩效。（评估）

6. 过程能力指数与缺陷率的关系

基于正态分布理解过程能力指数与缺陷率的关系。（评估）

7. 长期能力与短期能力

解释长期能力和短期能力的关系。（评估）

8. 属性值数据的过程能力分析

理解单位缺陷（DPU），百万缺陷机会缺陷数（DPMO）和西格玛水平的关系。（应用）

Ⅳ. 六西格玛——分析

A. 过程分析概述

理解过程分析的目的和意义。（评估）

B. 假设检验

掌握假设检验的基本概念，理解应用显著性水平、检出力、第一类错误和第二类错误。掌握均值、方差和比例的假设检验以及配对数据的假设检验。（应用）

C. 单因子方差分析

理解与单因子方差分析相关的术语并解释得出的结果和图示。（应用）

D. 列联表

理解与列联表相关的术语并解释得出的结果和图示。（应用）

E. 多变异分析

理解多变异研究的目的，理解产品内、产品间和时间变异的区别和联系。应用抽样计划来研究最大变异源。（综合）

F. 相关分析与回归分析

解释相关系数及其在统计上的显著性，认识相关性和因果关系之间的区别。解释一元线性回归方程及其在统计上的意义。使用回归模型进行估计和预测。（评估）

G. 精益分析工具

1. 流程分析

掌握流程分析的目的和主要工具。(应用)

2. 作业时间分析

掌握节拍时间的概念和应用，掌握工作研究（时间和动作研究）方法及其应用。(分析)

3. 设备管理分析——全面生产维护 (TPM)

掌握 TPM 的思想和实施步骤，计算、分析 OEE。(评估)

Ⅴ. 六西格玛——改进

A. 改进方法概述

了解改进阶段的主要工作和可能用的工具和技术，了解创造性思维工具和方法。(应用)

B. 试验设计（DOE）基础

1. 试验设计中的基本术语

了解试验设计的基本思想和基本术语。(应用)

2. 试验设计的基本原则

了解试验设计的基本原则和要求，理解随机化、区组化等。(应用)

3. 试验设计的类型

了解试验设计的主要类型，包括全因子、部分因子和响应曲面分析。(记忆)

4. 试验设计的基本步骤

了解试验设计的基本步骤和每一步的要求。(应用)

C. 全因子设计简介

掌握二水平全因子试验的特点，解释要因和交互作用图，解释 2×2 设计的分析结果。(应用)

D. 精益改进工具

了解改进阶段常用的精益工具，包括看板、目视管理、5S 管理、定置管理、布局改进（U 形）、快速换型等。(应用)

E. 改进方案验证、评价与实施

1. 改进方案的验证

掌握改进方案的验证方法，包括通过 F 检验、t 检验、测量系统改进后分析能

力、过程能力改进后重新分析等。(综合)

2. 改进方案的评价与实施

掌握改进方案的评价需要考虑的因素、常用的评价方法，如决策矩阵、力场分析等，改进方案的实施策略。(应用)

Ⅵ. 六西格玛——控制

A. 控制阶段概述

了解控制阶段的主要工作，包括过程改进成果的文件化、建立过程控制计划、如何实施持续的过程测量和控制。(应用)

B. 常规控制图

1. 控制图的基本概念

描述统计过程控制的目的和作用，分辨随机原因和特殊原因，定义并描述如何使用合理分组。(分析)

2. 计量值控制图

识别、选择、构建并应用下列控制图：均值—极差、均值—标准差、单值—移动极差。解释控制图并应用计量值控制图的判定准则来区分普通和特殊的影响因素。(分析)

3. 计数值控制图

识别、选择、构建并应用下列控制图：p，np，c 和 u 控制图。解释控制图并应用计数值控制图的判定准则来区分普通和特殊的影响因素。(分析)

C. 精益控制工具

了解控制阶段常用的工具，包括防错、标准化作业等。(应用)

D. 六西格玛项目总结和成果评审

了解六西格玛项目成果的总结、评审、项目移交的过程和要求。(应用)

Ⅶ. 六西格玛设计简介

A. 六西格玛设计概述

简要了解六西格玛设计的基本思想、技术路线。理解并行质量工程在六西格玛设计中的应用。(理解)

B. 质量功能展开

了解质量功能展开（QFD）的主要用途，了解质量屋的构成。（理解）

C. FMEA 简介

了解故障模式和影响分析（FMEA）的主要用途、类型，了解质量屋的构成。（理解）

知识点评价

在大纲中除了知识点，还列出了对每个知识点应掌握的程度。根据布鲁姆目标分类学和 ASQ 知识体系划分方法，将绿带阶段的认知水平划分为六个层次，从易到难。供阅读知识大纲时参考。

记忆（了解水平）

能够记忆或认识术语、定义、事实、概念、材料、模式、顺序、方法和原理等。

理解（理解水平）

能够阅读和理解所描述的内容、报告、表格、图表、说明和规则等。

应用（应用水平）

知道在何时以及如何使用概念、程序、方法、公式、规则、原理等。

分析（分析水平）

能够将信息分解成小的要素并识别各要素之间的相互联系以及它们的组织方式；从一个复杂的场景中识别出次级因素或数据。

评估（评估水平）

对知识点和基本概念和方法及其应用条件进行评价，掌握其优缺点，能够对建议的概念、解决方案等作出判断。

综合（综合水平）

能够综合所学知识，根据问题具体情况给出解决方案。

中国质量协会
注册六西格玛绿带考试样题

说明：此样题共40题，分单项选择（25题）和多项选择（15题），主要目的是为读者提供注册六西格玛绿带考试题目的难度和类型。实际考题数量参见中国质量协会年度注册六西格玛绿带考试通知。

单选题（1～25题）

1. 在下列陈述中，不正确的是（　　）。

A. 六西格玛管理只是一种解决质量问题的工具

B. 六西格玛管理是企业获取竞争优势的战略

C. 六西格玛管理是企业整体业务改进的管理模式

D. 六西格玛管理是不断提高顾客满意度的科学方法

2. 关于六西格玛绿带的描述，不正确的是（　　）。

A. 绿带可以作为成员参与六西格玛黑带项目

B. 绿带可以作为项目组长负责六西格玛绿带项目

C. 绿带可以作为项目组长负责六西格玛黑带项目

D. 绿带可以作为组员参与六西格玛绿带项目

3. 朱兰的质量管理三部曲是指（　　）。

A. 质量策划—质量控制—质量改进

B. 质量目标—质量策划—质量改进

C. 质量战略—质量目标—质量控制

D. 质量分析—质量策划—质量改进

4. 有关田口的质量损失函数和六西格玛减少波动的理念，下列说法中正确的是（　　）。

A. 对于同一产品质量特性，只有超出规格范围外的波动才会导致质量损失

B. 对于同一产品质量特性，只要在规格范围内，减少波动与减少质量损失没

有关系

C. 对于同一产品质量特性，减少波动同时可以减少质量损失

D. 对于同一产品质量特性，减少波动会增加质量损失

5. 精益生产的核心理念是（　　）。

A. 实现拉动生产　　B. 减少一切不必要的浪费

C. 实现质量水平零缺陷　　D. 看板管理

6. 按照平衡计分卡的理论，企业培训的六西格玛倡导者、绿带、黑带和资深黑带，可以作为下述哪个维度的指标纳入企业的绩效评价体系（　　）。

A. 财务　　B. 顾客

C. 内部流程　　D. 学习与成长

7. 在六西格玛项目的界定阶段进行问题陈述时，以下描述中错误的是（　　）。

A. 应阐明问题对企业战略目标或顾客的影响

B. 要将造成问题的原因和改进方案一起描述

C. 应阐明问题发生的条件（时间、地点等）和频率

D. 应阐明问题导致的损失

8. 表面封装技术（surface mount technology，SMT）生产主要由锡浆印刷、插件和回流焊三道工序组成。某企业统计发现，该 SMT 生产线的 $DPU=0.04$，产品在该生产线上的缺陷机会数为 200，则该 SMT 生产过程的 $DPMO$ 为（　　）。

A. 8　　B. 200　　C. 5 000　　D. 500

9. 根据 KANO 模型分析顾客对手机的需求，有人提出手机电池要安全（不能爆炸），这一需求应属于（　　）。

A. 期望型需求（满意度与满足要求的程度成正比）

B. 兴奋需求

C. 基本需求

D. 以上都不对

10. 有关 SIPOC 图的描述，不正确的是（　　）。

A. SIPOC 图描述了项目所涉及的范围

B. SIPOC 图描述了项目的主要过程

C. SIPOC 图描述了过程的输入和输出

D. SIPOC 图描述了过程的增值活动和非增值活动

11. 某六西格玛项目的主要任务是分析一个复杂的施工过程并试图缩短工期，通过作业分解已经掌握了各项活动的时间和前后关系，为了分析计算工期和优化资源，该项目组应该采用（　　）。

A. PDPC 法　　B. 因果分析　　C. 网络图　　D. 排列图

12. 以下是某企业的六西格玛绿带项目的选题，选题不太妥当的是（　　）。

A. 减少 C 车间油料损耗量　　B. 提高 D 企业产品的竞争力

C. 缩短 A 生产线换模时间　　D. 降低 B 车间产线库存量

13. 某六西格玛团队通过抽样估计某生产过程生产的某零件的关键尺寸的均值，若过程是稳定的且抽样是随机的。第一次抽取 100 件产品，得到一组均值，若进一步

增加样本容量，置信水平不变，则均值的点估计和区间估计的变化趋势为（　　）。

A. 均值的点估计基本不变，区间估计变小

B. 均值的点估计变小，区间估计不变

C. 均值的点估计基本不变，区间估计变大

D. 均值的点估计变大，区间估计不变

14. A 和 B 两个供应商都提供 SMT 生产所需锡浆，想比较它们提供的锡浆的黏度是否相同，随机抽取 A 和 B 各 10 个批次的锡浆，为了判定 A 和 B 两个供应商提供的锡浆的黏度是否相同，以下做法正确的是（　　）。

A. 先检查数据的独立性和正态性，再检查方差是否相等，最后进行双样本 t 检验

B. 先检查方差是否相等，再检查数据的独立性和正态性，最后进行双样本 t 检验

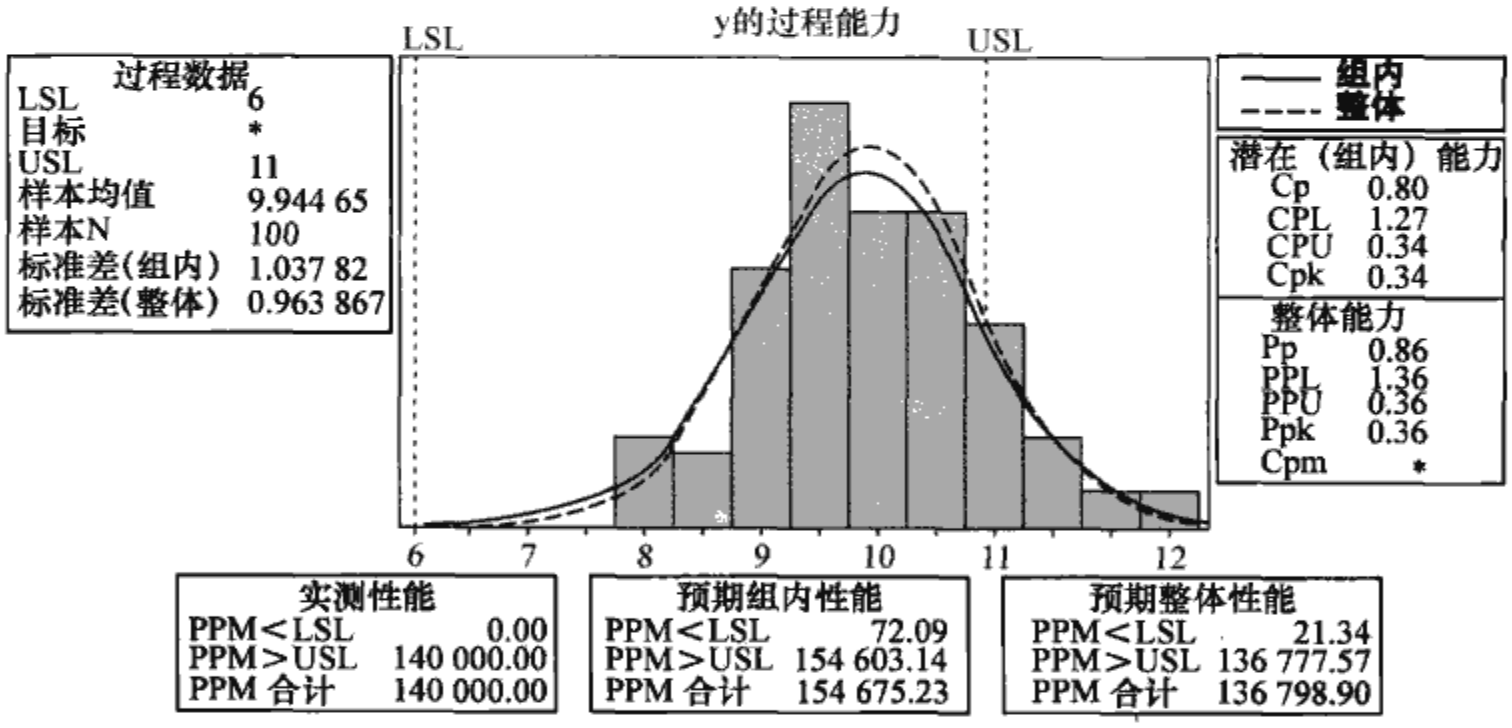
C. 只需先检查独立性，直接进行配对 t 检验

D. 先检查数据的独立性和正态性，再进行双样本 t 检验，最后检查方差是否相等

15. 假定某晶片生产过程检测发现晶片的 $DPU=1$，缺陷的出现是完全随机的且服从泊松分布，则随机抽取一片晶片，该晶片没有缺陷的概率近似为（　　）。

A. 50%　　B. 0　　C. 37%　　D. 10%

16. 某六西格玛绿带项目组对一关键过程进行了过程能力分析，分析结果见以下 MINITAB 输出的报告。基于这一报告，你对该过程的过程能力水平的评价是（　　）。



A. 绝大部分产品落在规格范围内，说明过程能力很高

B. 过程能力较低，过程分布中心与规格中心（公差中心）偏离较大

C. 过程能力很高，只是分布中心与规格中心（公差中心）偏离较严重

D. 无法根据此报告判定过程能力

17. 关于多变异分析（MVA）的说法，下列正确的是（　　）。

A. MVA 的目的是确定主要的变异源

B. MVA 的目的是对过程变异进行控制

C. MVA 的目的是分析过程变异与规格的关系

D. MVA 的目的是通过改变影响因素的变化观察过程的变异

18. 下列有关价值流图分析的说法，错误的是（　　）。

A. 价值流图分析的目的是发现各主要过程中的非增值环节和因素，并识别改进机会

B. 价值流图分析的主要目的是确定产品的生产价值或成本

C. 现状价值流图表示当前生产流程的现状，主要是揭示问题

D. 未来价值流图表示未来生产过程应该努力改进的方向

19. 某六西格玛团队在项目测量阶段对某关键测量设备进行重复性和再现性分析，他们随机选取了 3 名测量工，20 个被测零件，结果发现，$R\&R\%=50\%$，且主要原因是由于再现性很差，你认为导致再现性差的最可能原因是（　　）。

A. 3 名测量工人的测量方法有差异　　B. 20 个零件之间有显著差异

C. 测量设备的精度太差　　D. 选择的测量工人人数太少

20. 某工程师拟合反应釜的收率（Y）与反应釜温度（X）之间的回归关系，根据收集的数据，拟合了一条 $Y=a+bX$ 直线，得到以下回归模型拟合结果。为了检查模型，他还进行了模型诊断，得到下图，根据残差图，你认为以下结论中正确的是（　　）。

回归方程为

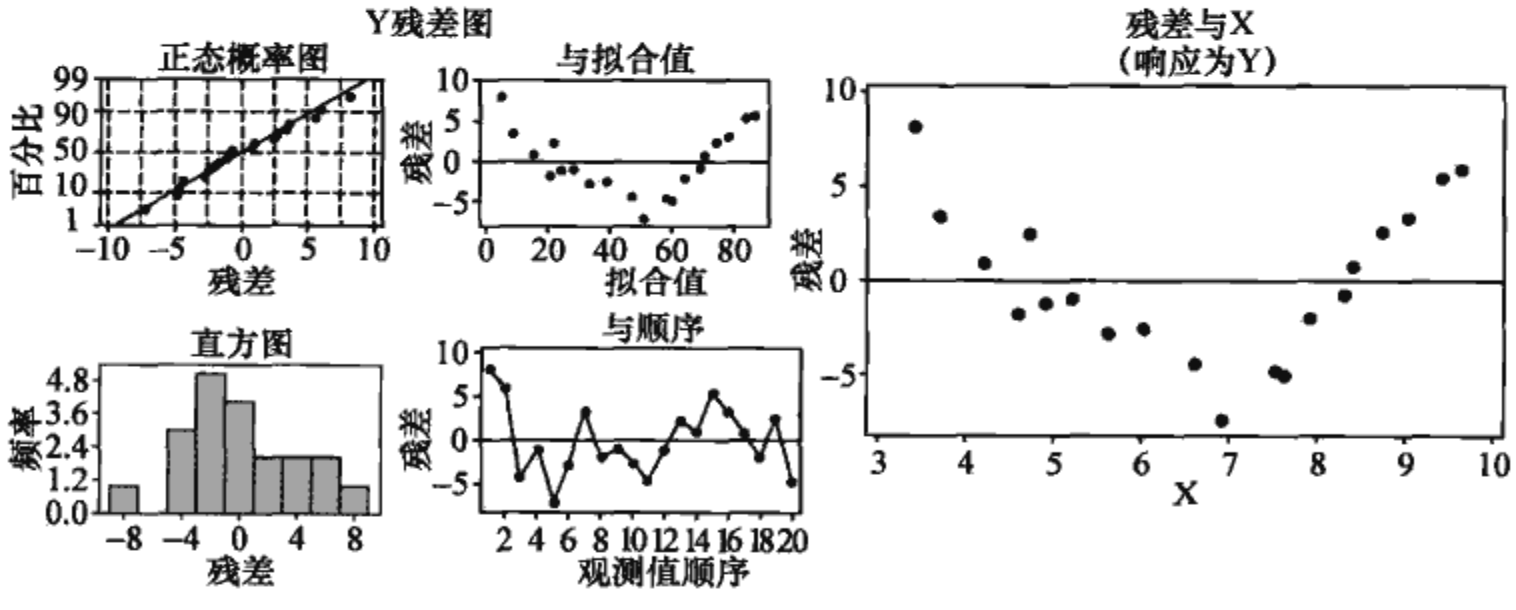
Y＝－39.7＋13.1X

自变量	系数	系数标准误	T	P
常量	－39.712	3.323	－11.95	0.000
X	13.133 4	0.482 5	27.22	0.000

S＝4.177 14　　R-Sq＝97.6%　　R-Sq（调整）＝97.5%

方差分析

来源	自由度	SS	MS	F	P
回归	1	12 929	12 929	741.00	0.000
残差误差	18	314	17		
合计	19	13 243			



A. 两个系数的 P 值都小于 0.05，且 R-Sq＝97.6%，R-Sq(调整)＝97.5%，说明模型拟合很好

B. Y 和 X 存在明显的线性关系

C. 方差分析表明模型拟合非常好

D. 残差图表明 Y 与 X 可能存在二次非线性关系

21. 某空调企业的六西格玛团队想研究焊接缺陷出现的频数与铜管的厂家和焊环的类型是否相关，为此收集了大量生产过程中记录的不同厂家的铜管和不同焊环类型下的缺陷点数，为了得到研究结论，你认为该团队应该采用的统计分析方法是（　　）。

A. 回归分析　　B. 列联表　　C. t 检验　　D. F 检验

22. 某绿带需要在项目改进阶段使用试验设计，他认为有 3 个连续变量的影响因素，准备进行全因子试验，在角点重复 2 次，并在中心点做 3 次试验，则总的试验次数为（　　）。

A. 11 次　　B. 19 次　　C. 9 次　　D. 18 次

23. 在实施精益生产时，流程程序分析是非常重要的发现过程浪费的技术。有关流程程序分析的说法，不正确的是（　　）。

A. 流程程序分析可以发现生产过程搬运、停滞、储存等隐蔽成本的浪费

B. 流程程序分析可以揭示生产过程物料搬运距离

C. 流程程序分析可以揭示生产过程中的检验环节

D. 流程程序分析的所有操作环节都是增值的，而运输、检验、储存等都是不增值的

24. 某六西格玛团队拟采用均值—极差控制图控制某注塑机注塑的零件关键尺寸，当团队采用 DOE 优化了注塑模温和压力后，在均值控制图上发现连续 15 个点均在中心线 1σ 内（即 C 区），此现象表明（　　）。

A. 按照控制图判异准则，过程失控，参数优化失败

B. 过程均值发生了显著变化

C. 过程方差显著增大，需要重新计算控制限

D. 过程方差显著减小，需要重新计算控制限

25. 关于基于并行质量工程的 DFSS 的表述，不正确的是（　　）。

A. 基于并行质量工程的 DFSS 需要采用跨职能的组织方式

B. 在产品设计早期阶段就要考虑与制造有关的约束

C. 基于并行质量工程的 DFSS 不需要供应商的参与

D. 基于并行质量工程的 DFSS 要求并行开发产品和工艺

多选题（26～40 题）

26. 六西格玛管理所体现的企业文化包括（　　）。

A. 顾客驱动

B. 基于事实和数据的管理

C. 跨职能团队合作解决问题

D. 构建学习型组织

27. 下列工具中可以应用于分析影响一个结果的可能原因的是（　　）。

A. 因果图（鱼骨图）　　B. 关联图

C. 网络图　　D. 因果矩阵

28. 在实施六西格玛管理的过程中，应用水平对比的主要目的是（　　）。

A. 通过水平对比确定本企业的改进机会

B. 通过水平对比确定项目的目标

C. 通过水平对比寻找改进方案

D. 通过水平对比证明比较弱的竞争对手要强

29. 某企业在购买新的生产设备时，有两台不同厂家的设备可以选择，生产同样的产品，对A厂家的设备进行过程能力分析，发现$C_p=1.4$，$C_{pk}=1.0$；而B厂家的结果是$C_p=1.0$，$C_{pk}=1.0$。假定两台设备的价格和厂家提供的服务均相同，你认为从质量角度应该（　　）。

A. 选择A厂家，因为A厂家设备的加工精度更高

B. 选择B厂家，因为B厂家设备的$C_{pk}=C_p$，表明过程没有漂移

C. 选择B厂家，因为A厂家设备的$C_{pk}<C_p$，表明其过程有漂移

D. 选择A厂家，因为A厂家的潜在能力更高

30. 以下内容属于质量成本中的内部故障成本的是（　　）。

A. 工厂内部缺陷产品的返修成本

B. 售后保修期内的缺陷产品在厂内的返修成本

C. 工厂内部缺陷产品报废成本

D. 机器设备出现故障后的修理成本

31. 某六西格玛团队在对某关键测量设备进行重复性和再现性分析时发现，$R\&R\%=40\%$，$P/T\%=50\%$，假定被测样本的选取是随机的，样本波动能代表实际生产过程的波动。据此可以推断（　　）。

A. 测量系统能力不足

B. 测量系统能力充分

C. 过程能力不足，估计过程能力指数C_p小于1.0

D. 过程能力充分，估计过程能力指数C_p大于1.0

32. 在精益改进工具中，根据流程程序图，采用“ECRS”原则进行改进时常用的方法，这里“ECRS”的含义包括（　　）。

A. 删除　　B. 合并　　C. 重排　　D. 简化

33. 快速换模技术（SMED），也称快速换型，是一项重要的精益技术，下述关于SMED的陈述中，正确的是（　　）。

A. 快速换模也称单分钟换模，要争取换模时间小于10分钟

B. 换模时间是指从生产线上生产的前一种产品的最后一件合格品到生产出下一种产品的首个合格品之间的间隔时间

C. 将换模时间分为内部换模时间和外部换模时间，并实现外部换模向内部换模的转化即可缩短整个换模时间

D. 将换模时间分为内部换模时间和外部换模时间，并实现内部换模向外部换模的转化即可缩短整个换模时间

34. 有关全因子试验设计的应用条件，下列表述中正确的是（　　）。

A. 因子的个数较少（在 5 个以内）

B. 因子个数较多，一般在 5 个以上

C. 因子和响应输出之间是线性关系

D. 因子间可能存在交互作用

35. 为了评估六西格玛项目改进方案，需要考虑方案造成的影响，下列方法中可以进行改进方案评估的是（　　）。

A. 排列图　　B. 鱼骨图的变形（反向鱼骨图）

C. 力场分析　　D. 关联图

36. 某电子企业六西格玛团队拟对生产的晶体坯的频率采用控制图进行控制，有人建议采用均值—极差控制图或均值—标准差控制图，也有人建议用单值—移动极差控制图，团队需要根据抽样的成本、样本含量、检测时间和过程的稳定性等确定采用哪一种控制图。对于同一过程，有关三种不同控制图的选择，正确的是（　　）。

A. 如果每次抽取 2～7 个晶体坯，最好用均值—极差控制图

B. 如果每次抽取 7 个以上的晶体坯，最好用均值—极差控制图

C. 如果每次抽取 7 个以上的晶体坯，最好用均值—标准差控制图

D. 如果抽样间隔期不变，采用单值—移动极差控制图的检出力（功效）最低

37. 下列属于信号型 Poka-Yoke 的是（　　）。

A. 微波炉只有关门后才开始工作

B. 电脑视频输出口设计为梯形

C. 汽车车门没有关闭，报警器报警

D. 关闭 word 文件时，系统提示是否保存

38. 某六西格玛团队采用 TPM 方法计算某关键设备的设备综合效率（OEE），以下指标会影响 OEE 的是（　　）。

A. 设备时间利用率　　B. 设备当前节拍和理论节拍

C. 设备生产的产品的合格率　　D. 设备的换型时间

39. 下列有关 QFD 的表述中正确的是（　　）。

A. QFD 实质是用一种系统工程的观点将顾客的需求转化为工程特性

B. QFD 体现了以市场为导向，以顾客要求为产品开发唯一依据的指导思想

C. QFD 只是适用于产品设计的一种方法

D. QFD 是通过质量屋将顾客需求层层展开的

40. 在进行 PFMEA 时，要分析每道工序中每个操作的风险优先数（RPN），RPN 主要取决于（　　）。

A. 失效（或故障）产生的后果的严重性

B. 失效（或故障）发生的概率

C. 失效（或故障）发生的检测难易程度

D. 失效（或故障）发生的条件

答案

1. A	2. C	3. A	4. C	5. B
6. D	7. B	8. B	9. C	10. D
11. C	12. B	13. A	14. A	15. C
16. B	17. A	18. B	19. A	20. D
21. B	22. B	23. D	24. D	25. C
26. ABCD	27. ABD	28. ABC	29. AD	30. AC
31. AC	32. ABCD	33. ABD	34. ACD	35. BC
36. ACD	37. CD	38. ABCD	39. ABD	40. ABC

JMP 统计软件使用简介

本书中六西格玛统计工具的使用是基于 MINITAB15 版编写的，为方便读者，本书还提供了本书例子中 MINITAB 的相关数据文件（放在中国人民大学出版社工商管理出版分社网站上）。由于很多企业在实施六西格玛过程中使用的统计分析工具是 JMP，为了方便使用 JMP 的绿带学员使用本书，这里提供了 JMP9 版统计软件使用简介和 JMP9 版数据文件。JMP 是一套功能强大的统计分析软件，完全熟悉和掌握其功能需要参阅软件手册或其他 JMP 学习教材。限于篇幅，本处只是以书中的部分例子为对象，简述绿带常用的统计工具如何在 JMP 中实现。

一、JMP 软件简介

JMP 是著名的高端精益六西格玛和质量管理统计分析软件，20 世纪 80 年代由全球统计分析软件领导者 SAS 推出。JMP 和 SAS 软件共享统计分析算法。JMP 广泛用于质量管理、流程优化、产品研发、临床试验、公共卫生和精益六西格玛等领域以及高校的统计教学——特别是应用类统计专业，如应用统计硕士。

与普通统计软件相比，JMP 有显著的优势：

（1）易学易用。为了更适合工程师和六西格玛从业人员等非专业统计背景的用户，JMP 特别按照待解决问题的类型将分析方法规整为几个分析平台，用户只需根据不同的问题类型选用相应的平台，无须在冗长的统计工具列表（或软件菜单）中进行选择，降低犯错几率。

（2）分析功能全面而强大。除了常见的描述性统计、假设检验、回归等基础统计分析方法，JMP 还提供了更多先进的分析方法，如蒙特卡洛模拟，数据挖掘，统计过程控制，测量系统分析，可靠性分析，探索性数据分析等；其试验设计平台是备受推崇的试验设计方案。另外，来自 SAS 的统计算法使得 JMP 的数据处理能力极为强大，在处理来自银行、电信、保险等行业的海量数据方面具备明显优势。

（3）数据可视化。JMP 具备了统计软件中最优秀的图形分析功能。图形与图形、图形与数据表之间可以动态链接，极大简化了分析和阅读的难度；图形生成器和地图功能令用户轻松探索和展现数据及分析结果，使得统计学习和应用的门槛大大降低。

（4）交互性和可扩展性。用户在分析数据时可以享有愉悦的人机交互体验；可以用 JMP 脚本语言（JSL）实现分析自动化或开发个性化功能。JMP 的分析自动化能力能够使用户在开展分析项目时实现数据处理和分析的全过程自动化。

二、JMP 软件在测量阶段的应用

JMP 软件在描述统计信息方面不仅有控制图、直方图、帕累托图等基本工具，还有气泡图、图形生成器、制表等直观易用的交互式可视化工具；它全面提供包括测量系统重复性及再现性分析、能力分析等在内的测量系统分析工具；JMP 的“可视化六西格玛”设计理念，即用图形甚至动画来描述统计信息，将多种变量的特性及其关系集中在一张图形中进行生动、直观、交互式的展现，不仅能让分析过程栩栩如生，极大降低六西格玛数据分析的难度，更为六西格玛及持续改善成功经验在组织内部的交流和推广提供了极大的便利。

（一）JMP 在描述性统计学中的应用

以第 4 章中例 4—15 为例，建立脉搏数据的统计分布，显示常用的统计量、分位数图、正态性检验等。

第一步：建立统计分布，显示常用的统计量和分位数表。

打开数据表，通过“分析→分布”路径，用鼠标把“选择列”中的“男”拖入“Y”，把“选择列”中的“女”拖入“Y”，点击“确定”，得到图 1、图 2 和分析结果分别如下。

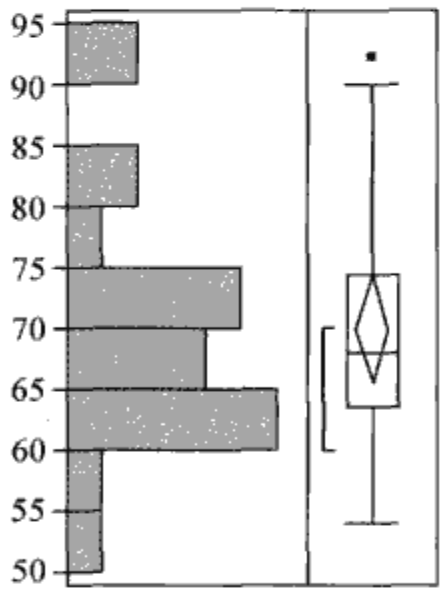


图1　脉搏数据的分布（男）

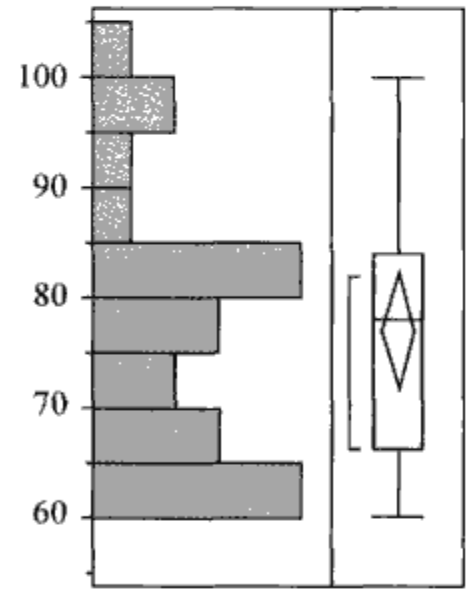


图 2　脉搏数据的分布（女）

男性的脉搏分析结果：

100.0%	最大值	92	均值	70.090 909
99.5%		92	标准差	9.961 397 4
97.5%		92	均值标准误差	2.123 777 1
90.0%		88.2	上限 95%均值	74.507 545
75.0%	四分位数	74.5	下限 95%均值	65.674 273
50.0%	中位数	68	数量	22
25.0%	四分位数	63.5		
10.0%		58.6		
2.5%		54		
0.5%		54		
0.0%	最小值	54		

女性的脉搏分析结果：

100.0%	最大值	100	均值	77
99.5%		100	标准差	12.206 556
97.5%		100	均值标准误差	2.545 242 8
90.0%		96	上限 95%均值	82.278 51
75.0%	四分位数	84	下限 95%均值	71.721 49
50.0%	中位数	78	数量	23
25.0%	四分位数	66		
10.0%		61.4		
2.5%		60		
0.5%		60		
0.0%	最小值	60		

输出结果包含了样本的大量信息，包括数据分布的直方图、分位数图、均值、标准差和置信区间等。

第二步：对数据进行正态性检验。

在第一步中所得分布中点击▼（“男”前）→连续拟合→正态，点击“确定”，得到图 3、图 4 和分析结果如下。

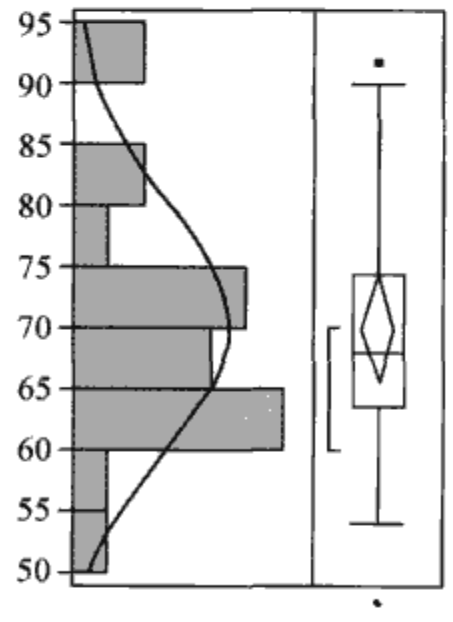


图3　脉搏数据的正态拟合（男）

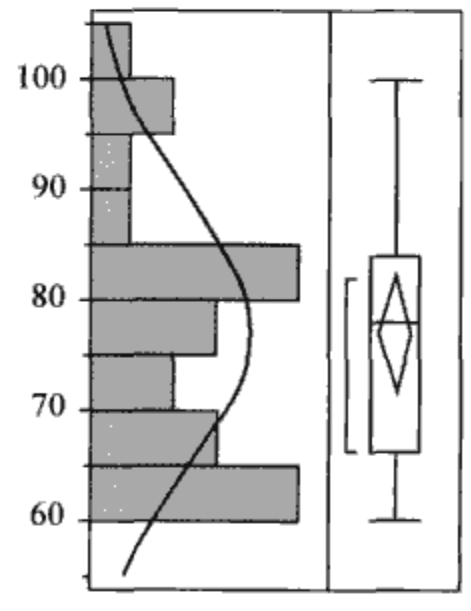


图 4　脉搏数据的正态拟合（女）

男性数据的正态（70.090 9，9.961 4）拟合：

类型	参数	估计值	下限 95%	上限 95%
位置	μ	70.090 909	65.674 273	74.507 545
离差	σ	9.961 3974	7.663 814 5	14.235 481

女性数据的正态（77，12.206 6）拟合：

类型	参数	估计值	下限 95%	上限 95%
位置	μ	77	71.721 49	82.278 51
离差	σ	12.206 556	9.440 487 2	17.276 566

输出结果包括脉搏数据的正态拟合的结果、均值 μ 和标准差 σ 的 95%置信区间，男性和女性的脉搏数据均近似正态分布。

需要得到正态拟合分布的偏度、峰度等参数值时，通过▼→显示选项→更多矩，即可得到男性脉搏数据正态拟合分布的偏度为 0.758 831 9，峰度为 0.118 5915，变异系数为 14.212 11；女性脉搏数据正态拟合分布的偏度为0.322 551 6，峰度为—0.899 885，变异系数为 15.852 67。

介绍完常规的统计描述方法，下面来看 JMP 独有的数据可视化工具：气泡图、图形生成器和地图。

1. 气泡图

利用气泡图可以超越传统的柱状图、饼图等普通图形，将多达六维的变量特征及其关系集中在一张图中进行动态、可视化的分析。

《福布斯》公布了世界 2 000 强企业在 2004—2010 年中排名、市值、市场份额和利润等数据。现以此数据为例介绍气泡图在描述统计学中的应用。

打开 JMP 工作表①中的“Forbes”数据表，通过“图形→气泡图”路径进入窗口，用鼠标把“选择列”中的“Sales”拖入“Y”，把“选择列”中的“Market Value”拖入“X”，把“选择列”中的“Company”拖入“ID”，把“选择列”中的“Year”拖入“时间”，把“选择列”中的“Profits”拖入“大小”，把“选择列”中的“Industry”拖入“颜色”，点击“确定”得到图 5。

图 5 显示了世界 2 000 强企业各个维度的分布及对比情况，气泡大小表示利润，气泡颜色表示不同行业，点击单个气泡会显示公司名称。

需要观察单个公司的经营状况随时间变化的趋势时，先点击需要观察的公司（图中彩球），再点击▼→尾迹线，以 ExxonMobil 和 PetroChina（中石油）为例，得到其经营状况变化的轨迹如图 6 和图 7 所示。

① 读者可登录 www. rdjg. com. cn 免费查阅相关工作表文件，以下不再提示。

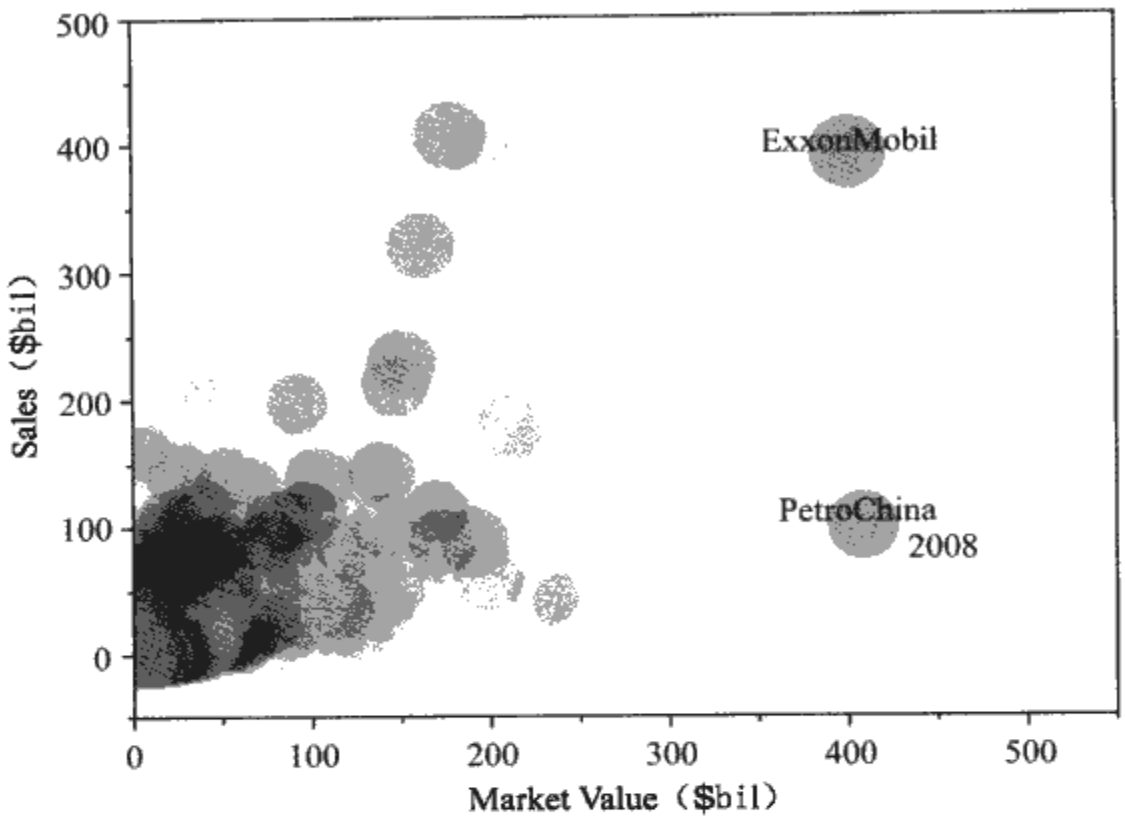


图 5　"Market Value-Sales" 气泡图

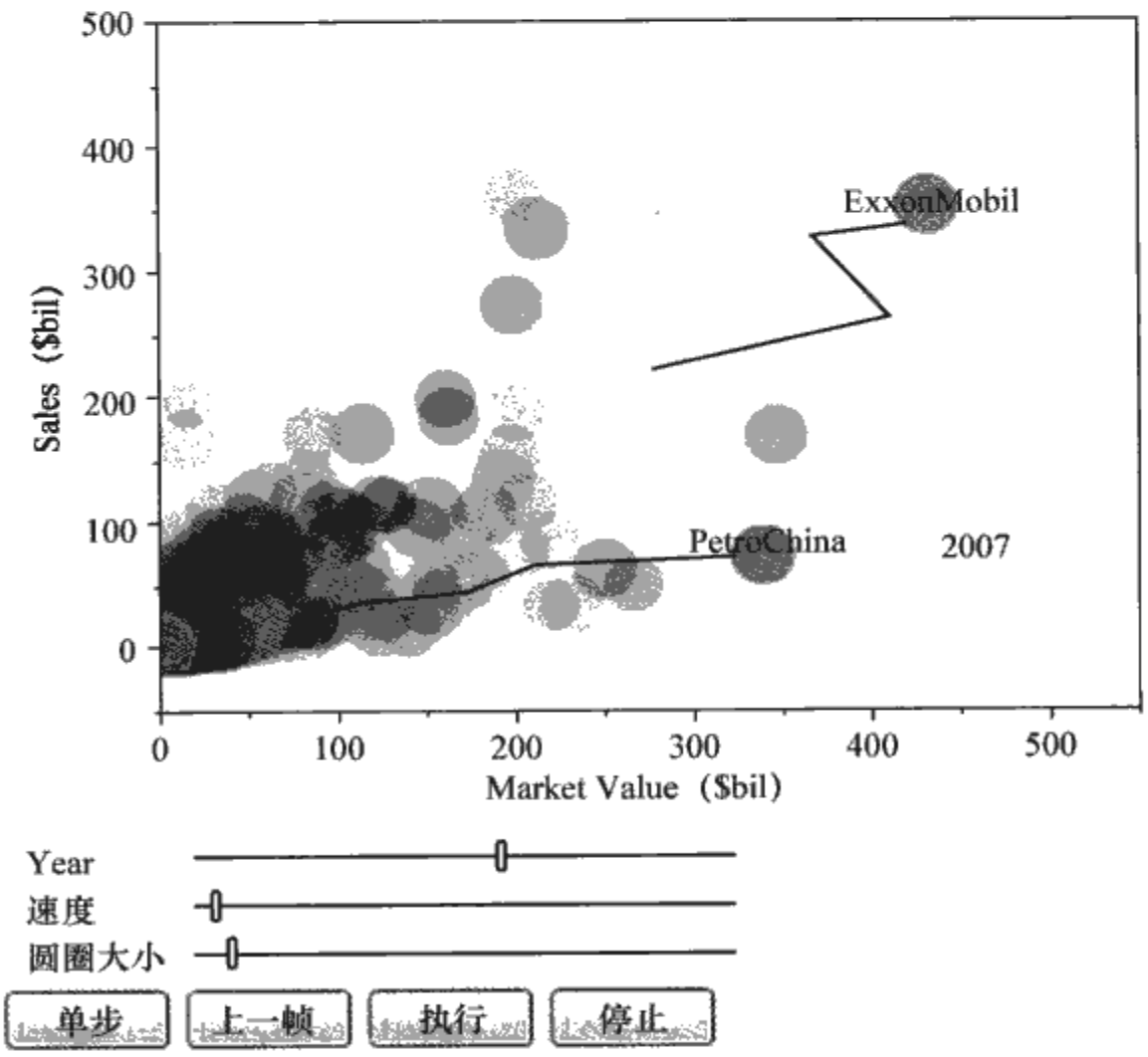


图 6　2004—2007 年 "Market Value-Sales" 尾迹图

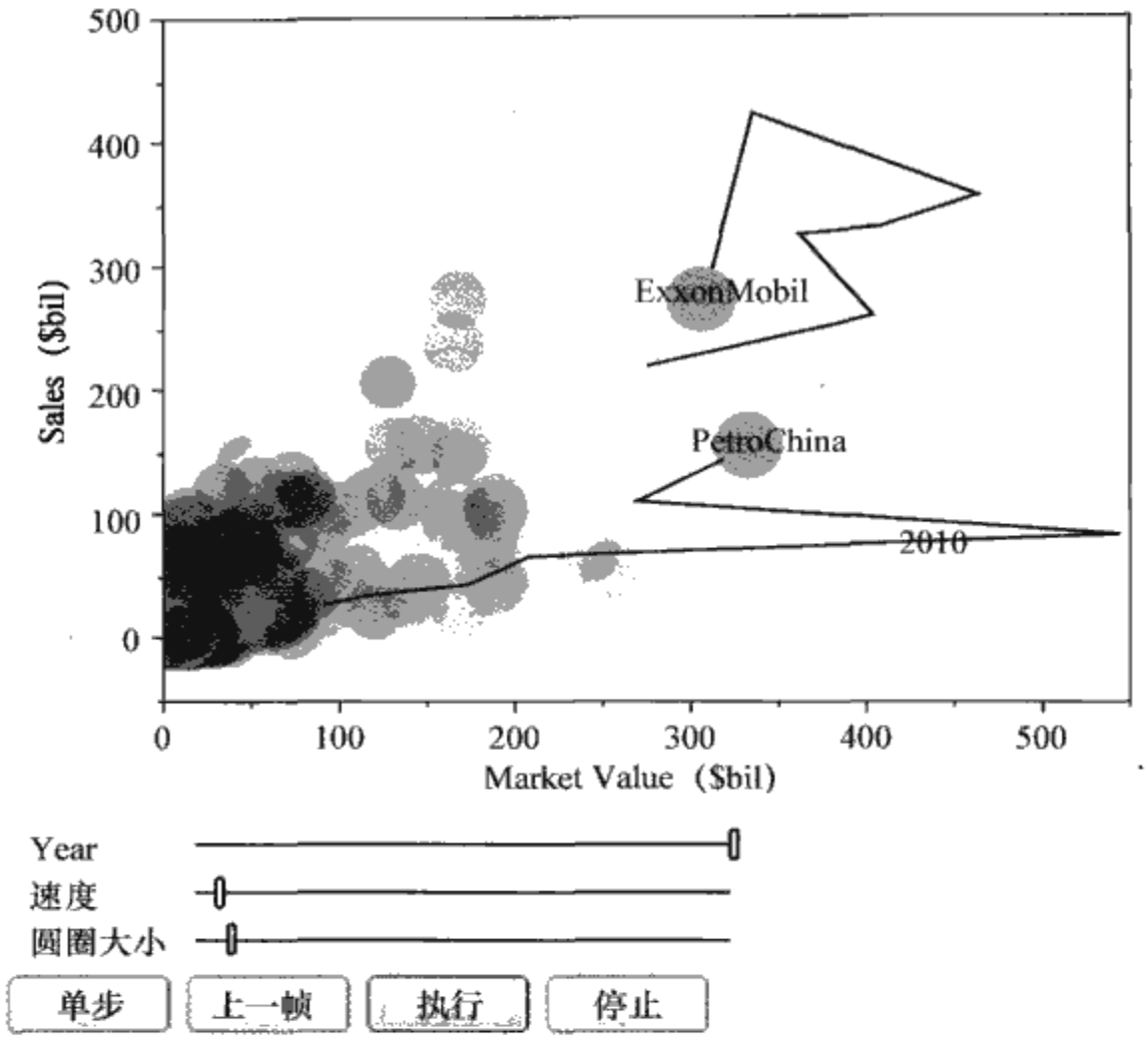


图 7　2004—2010 年“Market Value-Sales”尾迹图

点击对话框下方的“执行”按钮，此图形就会按照时间顺序自动播放动画，直观、清晰地得到不同行业、不同公司的销量和市值随时间的变化轨迹和变化过程，有助于发现规律和预测趋势。这一动画可以单独存为 flash 文件，在 IE 浏览器或者幻灯片文件中放映。因为本书采用黑白印刷，所以图中各种彩色透明球体所代表的不同行业信息无法通过印刷体现。读者可以自行在本书指定的网站（www. rdjg. com. cn）找到数据文件并用 JMP 软件运行，得到彩色动画播放效果。

2. 图形生成器和地图

这里以 Maps 数据为例，介绍 JMP 中图形生成器的使用。Maps 数据中提供了中国各省份（港澳台地区除外）近 10 年来的居民消费价格总指数，通过图形生成器不同的设置，实时、交互地获得多角度的分析图形。JMP 图形生成器开辟了全新的数据可视化和探索性数据分析（exploratory data analysis，EDA）模式，除具备动态的图形效果之外，在使用图形生成器作图时，读者无须事先考虑需要生成何种类型的图形，只需要将所关注的变量拖入拖出制图区域即可。这种思路与传统的“先确定需要作何种图形，然后寻找对应的菜单”的思路有很大不同，请读者留意。

打开 JMP 工作表中 Maps 数据表，通过“图形→图形生成器”路径，用鼠标把“选择列”中的“居民消费价格总指数”拖入“Y”，把“选择列”中的“年份”拖入“X”，把“选择列”中的“省份”拖入“分组”，把“地区”拖入“颜色”，点击“完成”得到图形，在图形上鼠标右击，选择添加→线图，得到图 8。

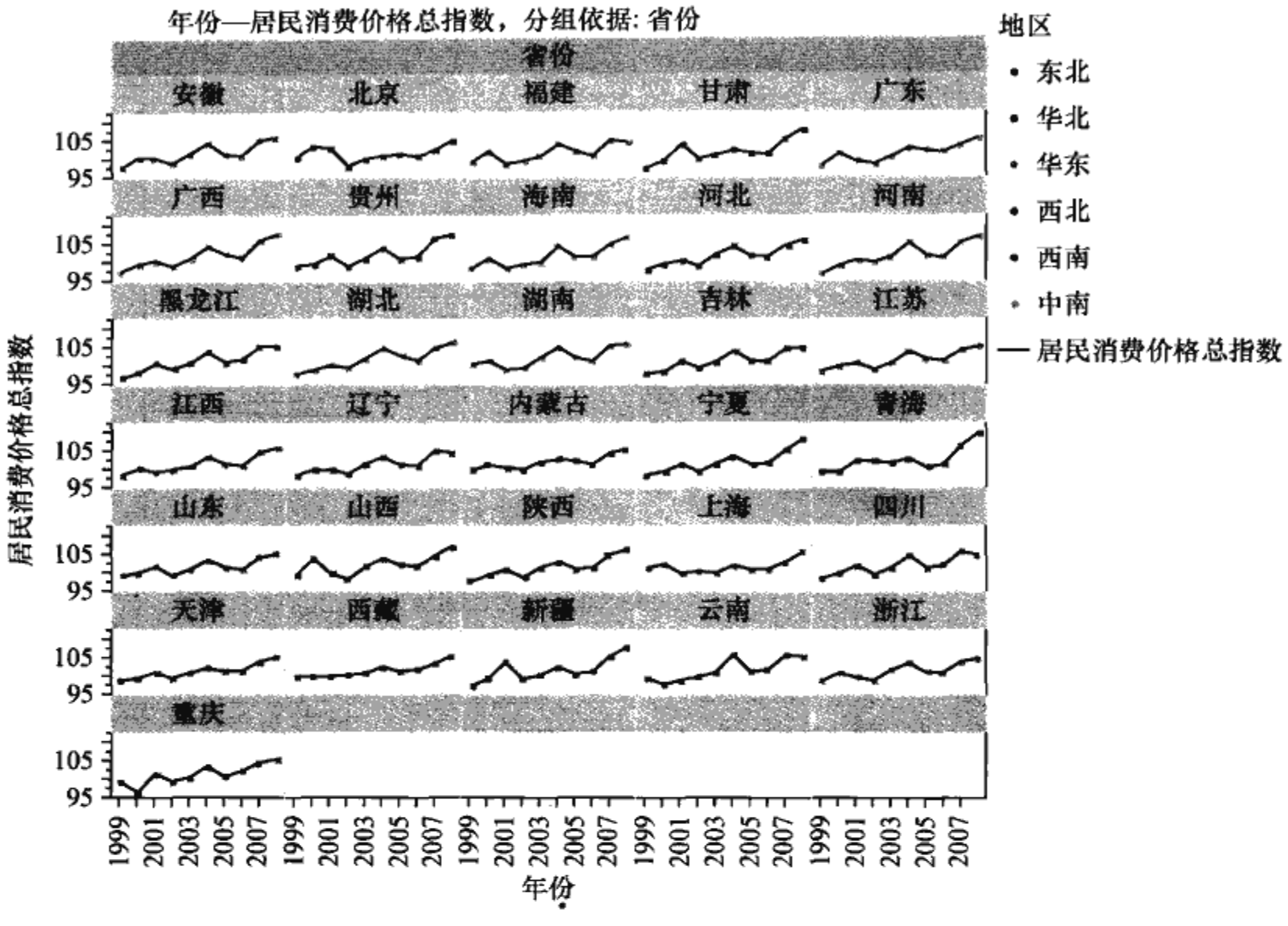


图 8　居民消费价格总指数——年份—省份表

在图 8 中可以看到 1999—2009 年 10 年间各省份居民消费价格总指数的变化趋势，并用颜色区分各省份所在的地区，图 8 因为黑白印刷导致了效果失真，可以在 JMP 软件中看到清晰的图形。

通过“图形→图形生成器”路径，用鼠标把“选择列”中的“省份”拖入“形状”，把“选择列”中的“居民消费价格总指数”拖入“颜色”，点击“完成”得到图 9。

在图 9 中，颜色代表 10 年间各省份居民消费价格总指数的平均值，可以通过在图形上点击右键→地图形状→汇总统计量选择关注的值。颜色越靠近红色，值越高；颜色越靠近蓝色，值越低。我们可以得到青海省在 10 年间的平均居民消费价格总指数最高，黑龙江省、辽宁省、广东省等总指数平均值偏低（同样，因为黑白印刷，图中各种颜色无法显示，请读者在 www. rdjg. com. cn 网站上找到相关文件运行，以便观察）。

3. 气泡图和地图

气泡图和地图在数据分析中具有各自的优势，现将这两种方法结合起来对英国不同地区不同公司的抗忧郁药的销售数据进行分析。

打开 JMP 工作表中的 DynamicMap 数据表，点击按钮，再点击“确定”。得到图 10。

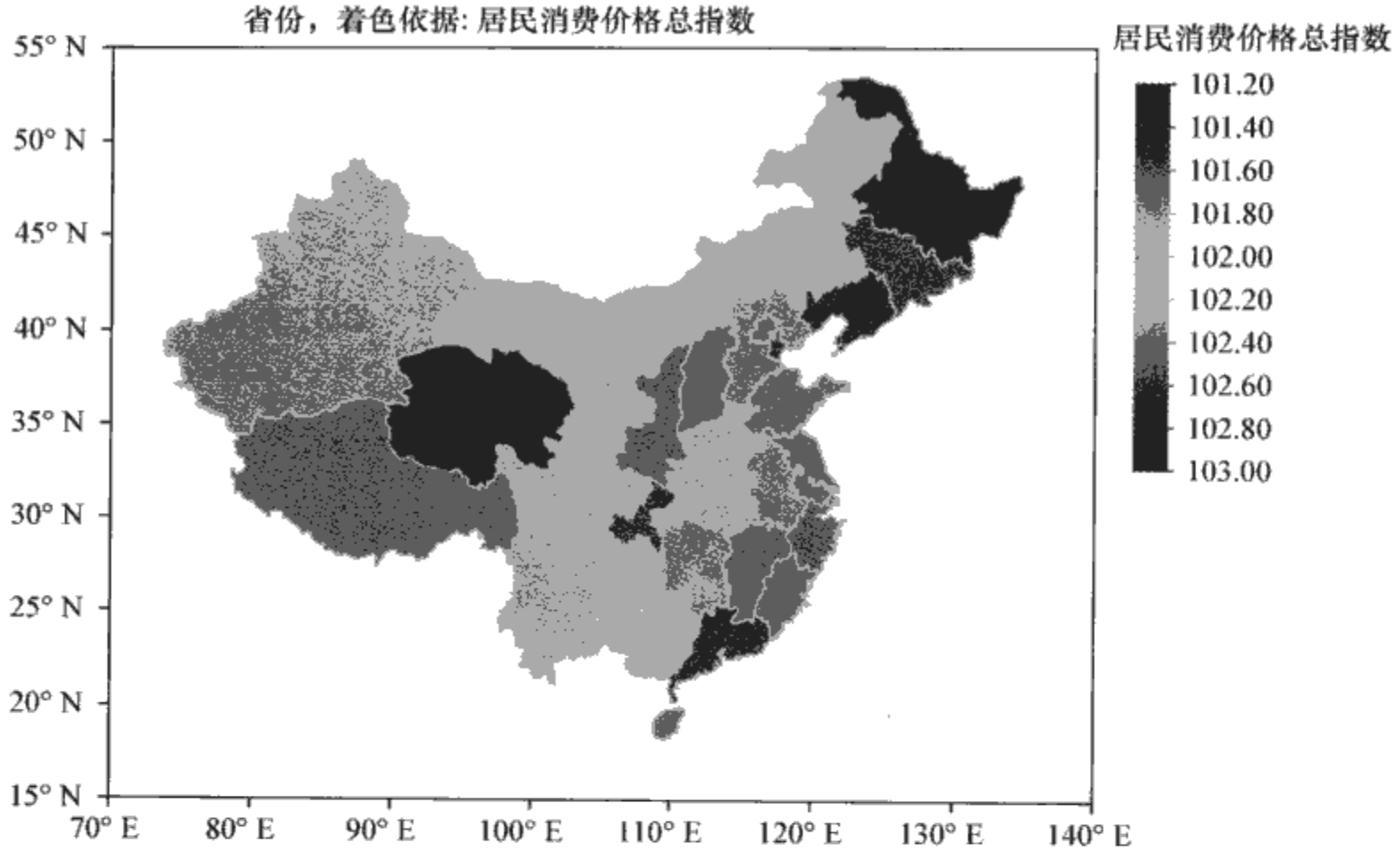


图 9　居民消费价格总指数——省份地图

说明：数据表中没有提供中国港澳台地区的数据，所以地图中没有显示这些地区。

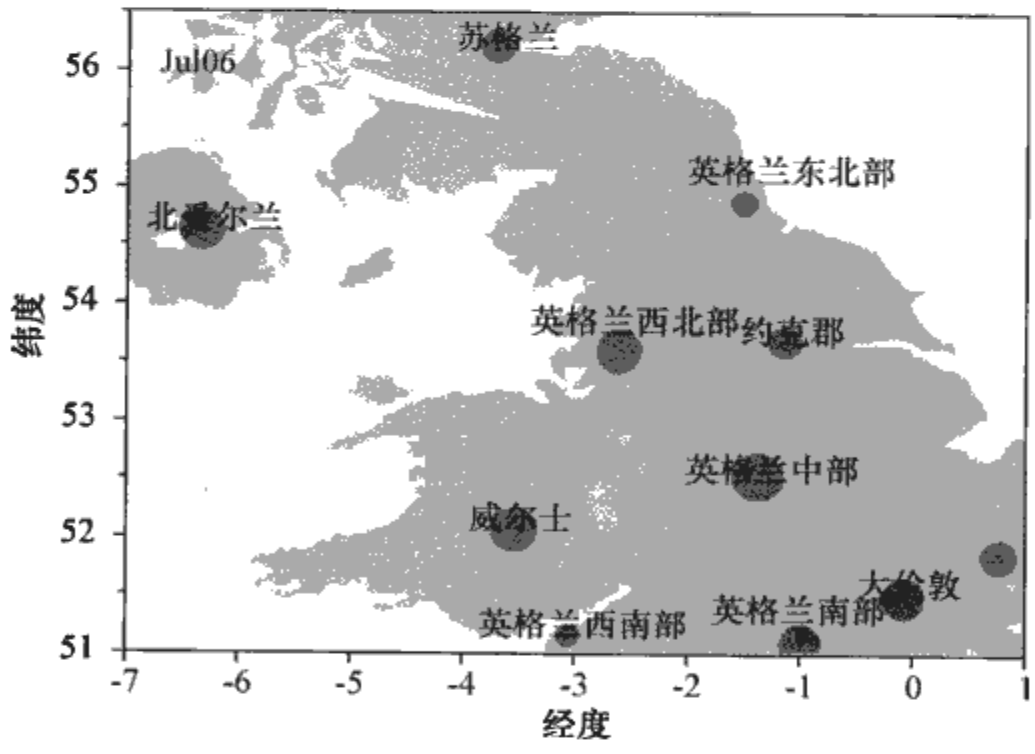


图 10　销售分布的气泡地图

图 10 中显示的气泡的大小代表销售量，气泡的位置代表区域。可以通过点击执行按钮来观察不同区域销售总数的变化情况，以苏格兰为例。通过▼→所有标签，在气泡图中点击苏格兰，再点击执行按钮，得到图 11 如下。

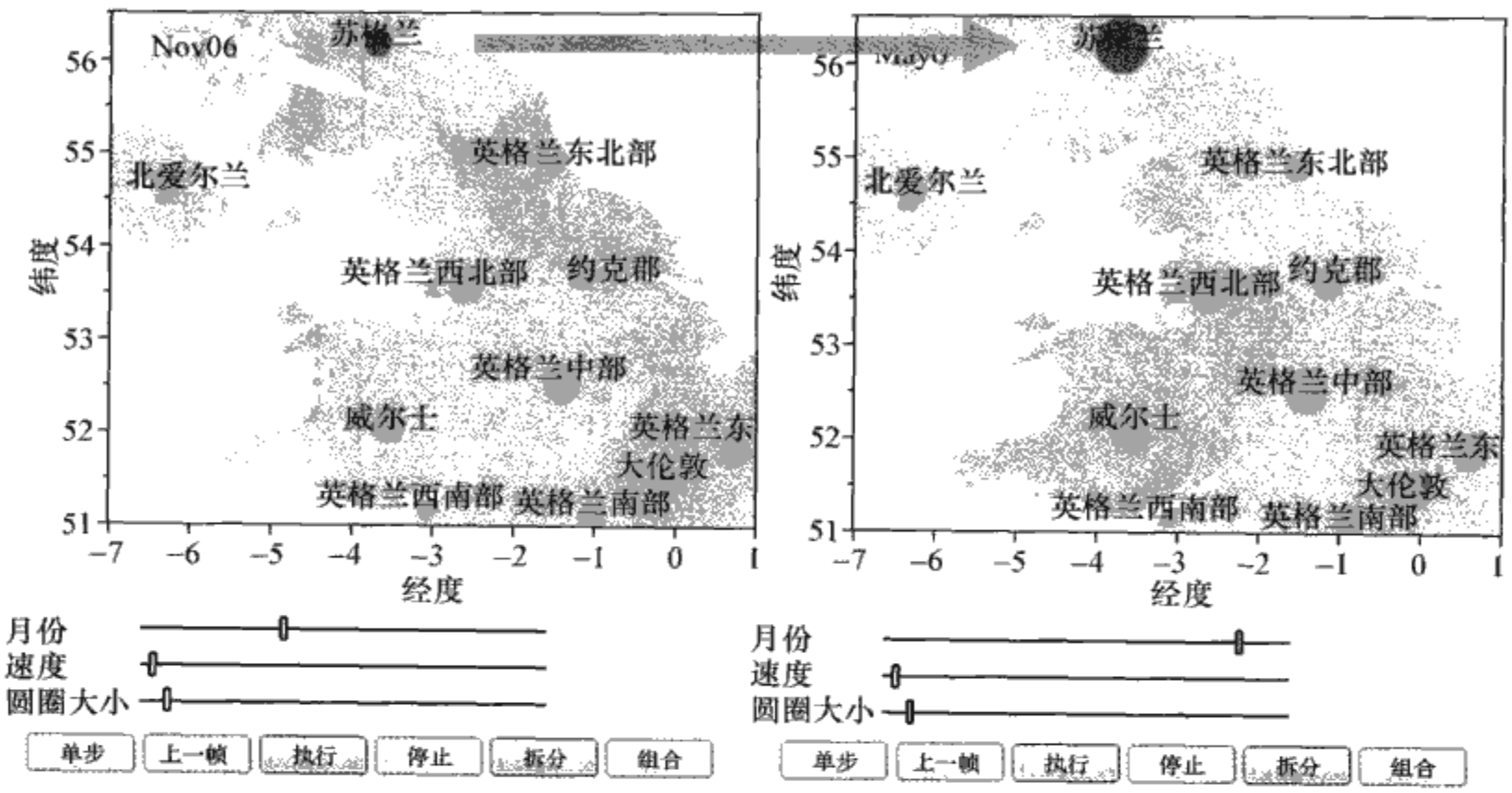


图 11　苏格兰地区销售数量变化图

图 11 中动态显示了苏格兰地区从 2006 年 11 月份到 2007 年 6 月份的抗忧郁药销售数量变化。当需要调查影响其变化的主要分区时，通过点击拆分按钮，得到图 12。

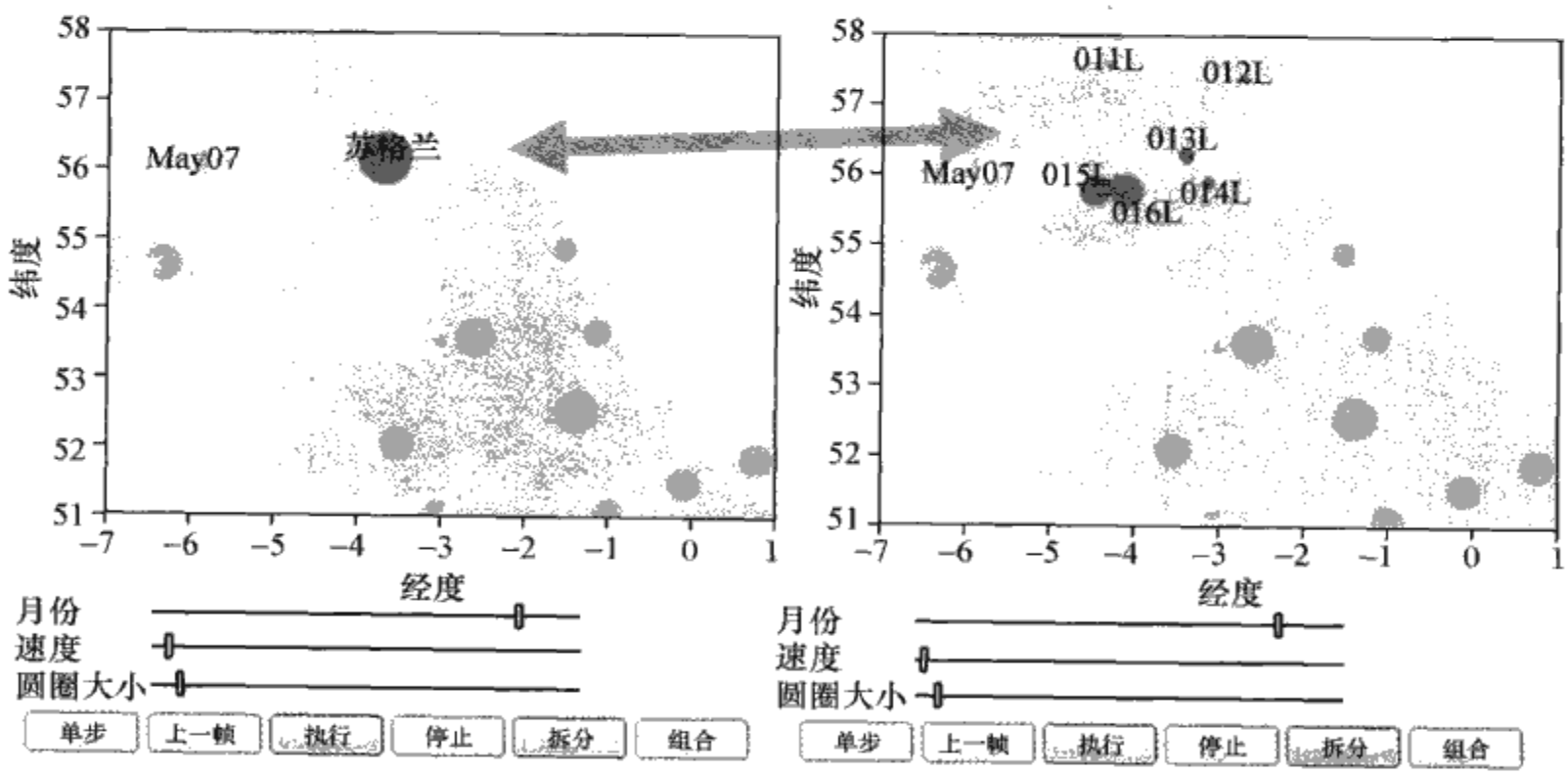


图 12　苏格兰地区销售数量拆分、组合图

图 12 中显示主要由 015L 和 016L 两个分区的销售数量显著变化引起的苏格兰地区销售总量的变化。反之，点击“组合”按钮，分区的销量会自动汇聚成苏格兰

地区的总销量。

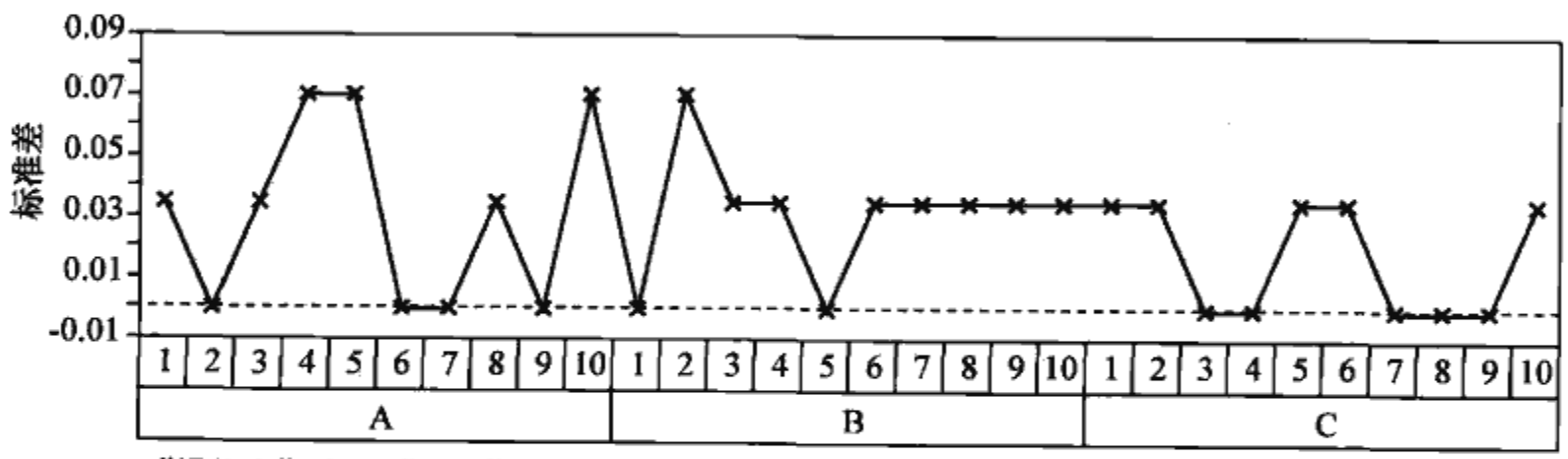
当然，在图形生成器中还能很方便地绘制更多直观的图形，其重要的特点之一是实时交互性，读者只需要将所关注的变量拖入拖出制图区域就能获得最新的图形。本例中实际动画的效果要远远超出上述静态截屏，有兴趣的读者可以查看 JMP 软件手册或 www. jmp. com/china 的视频学习教材。

（二）JMP 在测量系统分析中的应用

1. 计量值测量系统分析

以第 4 章中例 4—21 为例，进行计量值测量系统分析。

通过“图形→变异性/量具图”路径，用鼠标把“选择列”中的“零件”拖入“ID”，把“选择列”中的“操作者”拖入“X”，把“选择列”中的“测量值”拖入“Y”，图表类型选择“变异性”，模型类型选择“交叉”，点击“确定”。点击▼，选择“连接单元格均值”、“方差分析”，以及“量具研究→量具 RR”，得到图 13 和分析结果如下。



“操作者”中的“零件”

图 13　“测量值”的变异性图

方差分析

源	自由度	平方和	均方	F 比率	概率>F
操作者	2	0. 048	0. 024	4. 1672	0. 032 6*
零件	9	2. 058 708	0. 228 75	39. 717 8	<. 000 1*
操作者 * 零件	18	0. 103 667	0. 005 76	4. 458 8	0. 000 2*
内	30	0. 038 75	0. 001 29		
合计	59	2. 249 125	0. 038 12		

6	K
32. 659 7	%量具 R&R=100 * （RR/TV）
0. 345 55	部件变更精度=RR/PV
4	不同类别的数目=1. 41（PV/RR）

量具 R&R 的方差成分

成分	方差成分	占合计的百分比	标绘百分比
量具 R&R	0.004 437 50	10.67	
重复性	0.001 291 67	3.10	
再现性	0.003 145 83	7.56	
零件间	0.037 164 35	89.33	

输出结果选用的方法考虑了操作者和零件之间的交互作用，第 4 章中 MINITAB 选用的方法没有考虑交互作用，因此分析结果略有不同。此例中，该测量系统不同类别的数目为 4，表示系统分辨力不高，仅能提供粗糙的估计值；$R\&R\%$ 值为 32.659 7%＞30%，表示系统测量能力不足。

2. 属性值测量系统分析

以第 4 章中例 4—22 为例，进行属性值测量系统分析。

通过“图形→变异性/量具图”路径，用鼠标把“选择列”中的“零件”拖入“X”，把“选择列”中的“标准”拖入“标准”，把“选择列”中的“操作者 A”拖入“Y”，把“选择列”中的“操作者 B”拖入“Y”，图表类型选择“特性”，点击“确定”。得到分析结果如下：

操作者间的一致性：

检验员	与检验员比较	Kappa	Kappa 图	标准误差
操作者 A	操作者 B	0.764 7		0.108 5

操作者与标准的一致性：

检验员	与标准比较	Kappa	Kappa 图	标准误差
操作者 A	标准	0.780 2		0.104 0
操作者 B	标准	0.764 7		0.108 5

操作者自身的一致性：

检验员	检查数	匹配数	检验员评分	95%的置信区间下限	95%的置信区间上限
操作者 A	20	18	90.000 0	69.896 6	97.213 4
操作者 B	20	20	100.000	83.887 5	100.000

输出结果显示操作者间一致性的 Kappa 值，操作者 A，B 与标准的一致性的 Kappa 值分别为 0.764 7，0.780 2，0.764 7 均介于 0.7～0.9，处于可接受水平；操作者自身的一致性分别为 90%和 100%。输出中还显示出有效性和误分类的分析结果，这里不再一一列举。

注意，Kappa 是度量测量结果一致性程度的统计量，只用于两个变量具有相同的分级数和分级值的情况。计算公式为：$K=\frac{P_0-P_e}{1-P_e}$。其中 P_0 为实际一致的比率；P_e 为期望一致的比率。

（三）JMP 在过程能力分析中的应用

以第 4 章中的例 4—24 为例，进行过程能力分析。

通过“分析→分布”路径，用鼠标把“选择列”中的“直径”拖入“Y”，点击“确定”。点击▼，选择“能力分析”，在“规格下限”中输入“10.90”，在“目标”中输入“10.95”，在“规格上限”中输入“11.00”，选择“短期 Sigma”，得到图 14 和分析结果如下。

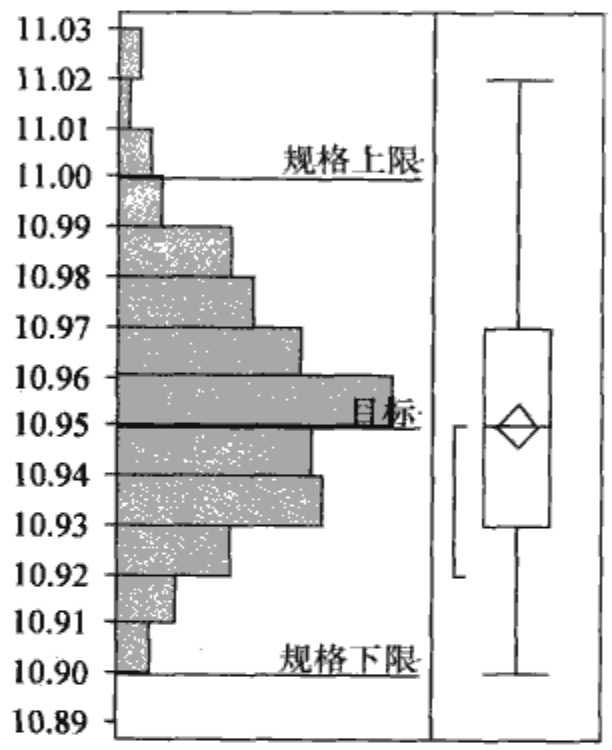


图 14　过程能力分析

矩：

均值	10.950 24
标准差	0.024 772
均值标准误差	0.002 215 7
上限 95%均值	10.954 625
下限 95%均值	10.945 855
数量	125

能力分析：

规格	值	对应部分	实际百分比
规格下限	10.9	低于规格下限	0.000 0
规格目标	10.95	高于规格上限	2.400 0
规格上限	11	限值外合计	2.400 0

长期过程能力：

性能	指数	置信区间下限	置信区间上限
CP	0.673	0.589	0.756
CPK	0.670	0.568	0.771
CPM	0.673	0.592	0.759
CPL	0.676	0.573	0.778
CPU	0.670	0.567	0.771
对应部分	百分比	PPM	西格玛水平
低于规格下限	2.127 5	21 275.182	3.528
高于规格上限	2.228 3	22 283.411	3.509
限值外合计	4.355 9	43 558.593	3.211

短期过程能力：

能力	指数	对应部分	百分比	PPM	西格玛水平
CP	0.673	低于规格下限	2.130 5	21 304.559	3.528
CPK	0.669	高于规格上限	2.231 4	22 313.668	3.508
CPM	0.673	限值外合计	4.361 8	43 618.228	3.210
CPL	0.676				
CPU	0.669				

其中长期 Sigma 为 0.024 77，短期 Sigma 为 0.024 78。长期过程能力指标和短期过程能力指标 C_p，C_{pl}，C_{pu} 均十分接近，可以认为 μ 与公差中心 M 近似重合。过程能力近似值为 0.67，小于 1，表示过程能力不足，需要提高。

三、JMP 软件在分析阶段的应用

JMP 软件是一款功能强大的实用分析软件，它将分析方法按照工程师和六西格玛人员分析和解决问题的思路整合成少数几个分析平台，在分析阶段常用的是："分布"平台用于分析一列变量；"以 X 拟合 Y"平台用于分析两列变量之间的关系(JMP 会根据数据类型自动确定合适的方法进行分析)；"模型拟合"平台用于多元变量的分析和建模等。下面主要介绍不同情形下均值的比较、方差分析、非参数方法等假设检验方法以及多变异分析和回归分析。

(一) JMP 软件在假设检验中的应用

1. 总体均值的比较

以第 5 章中例 5—5 为例，首先检验改进前后的方差是否相等，若可以认为相等，再使用均值比较、方差分析、非参数方法等方法，检验改进后均值是否增大。

第一步：检验改进前后的方差是否相等。

通过"分析→以 X 拟合 Y"路径，用鼠标把"选择列"中的"数据"拖入"Y"，把"选择列"中的"状态"拖入"X"，点击"确定"。点击▼，选择"方差不齐"，得到分析结果如下：

检验	F 比率	分子自由度	分母自由度	p 值
O'Brien [.5]	2.586 4	1	16	0.127 3
Brown-Forsythe	2.022 4	1	16	0.174 2
Levene	2.044 9	1	16	0.172 0
Bartlett	1.636 4	1	.	0.200 8
F 双边检验	2.655 6	9	7	0.211 4

输出结果显示 P 值均大于 0.05，即可以认为改进前后的方差相等。

第二步：检验均值是否有提高。

在第一步中所得分布中点击▼，选择均值/方差分析/合并的 t，非参数→Wilcoxon，以及显示选项→连接均值，点击“确定”，然后点击▼→比较均值→每对，student t，点击“确定”。得到图 15 和分析结果如下。

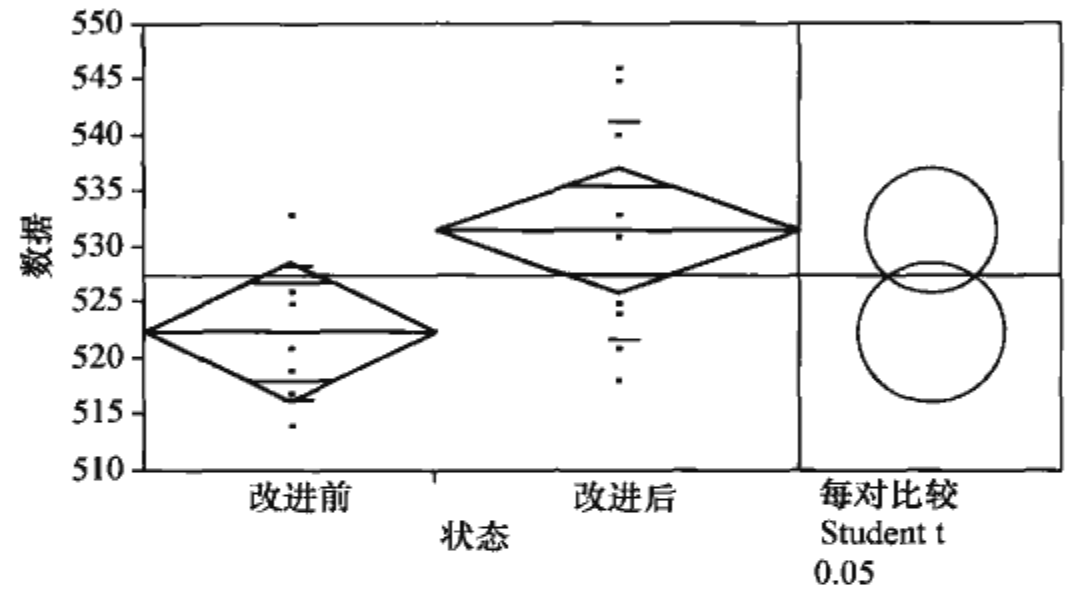


图 15　改进工艺前后钢条的抗剪强度比较图

t 检验：

差值	9.100 0	t 比率	2.300 804
差值标准误差	3.955 1	自由度	16
差值置信上限	17.484 5	概率>|t|	0.035 2*
差值置信下限	0.715 5	概率>t	0.017 6*
置信	0.95	概率<t	0.982 4

方差分析：

源	自由度	平方和	均方	F 比率	概率>F
状态	1	368.044 4	368.044	5.293 7	0.035 2*
误差	16	1 112.400 0	69.525		
校正合计	17	1 480.444 4			

单因子方差分析均值：

水平	数量	均值	标准误差	下限 95%	上限 95%
改进前	8	522.500	2.948 0	516.25	528.75
改进后	10	531.600	2.636 8	526.01	537.19

水平	计数	标准差	均值的绝对平均差值	中位数的绝对平均差值
改进前	8	6.000 000	4.750 000	4.750 000
改进后	10	9.777 525	7.800 000	7.800 000

Welch 检验：

F 比率	分子自由度	分母自由度	概率>F	t 检验
5.889 8	1	15.151	0.028 2*	2.426 9

Wilcoxon/Kruskal-Wallis 检验（秩和）：

水平	计数	评分和	期望评分	评分均值	(Mean-Mean0)/Std0
改进前	8	55.500	76.000	6.937 5	−1.785
改进后	10	115.500	95.000	11.550 0	1.785

输出结果中包括 t 检验、比较环图、不同情形下均值的比较、方差分析和非参数方法（Welch 检验）等。其中 P 值均小于 0.05，即可认为改进后，钢条的平均抗剪强度确有提高。

JMP 提供的另一个直观的方法是通过观察图 14 右侧的比较环图得到分析结果。点击选中其中的一个圆环（此圆环对应的数据在 X 轴上也被选中，见图 14），另外的圆环如果与之颜色一致，则表示它们之间没有显著差异；如果与之颜色不一致，则表示它们之间存在显著差异。在单因子多水平的比较中，这种方法的优点将更加突出，这种方法可以让一些六西格玛初级人员，甚至未经过专业六西格玛培训的人员也能够很好地进行均值比较。关于比较环图的原理，读者可以参照相关的 JMP 使用手册了解更多细节。

2. 比率检验

在进行比率检验时，JMP 软件通常使用列联表分析方法来实现，以第 5 章中的例 5—7 为例，进行两个比率的比较。

通过“分析→以 X 拟合 Y”路径，用鼠标把“选择列”中的“检验结果”拖入“Y”，把“选择列”中的“方法”拖入“X”，把“选择列”中的“数量”拖入“频数”，点击“确定”。得到图 16 和分析结果如下。

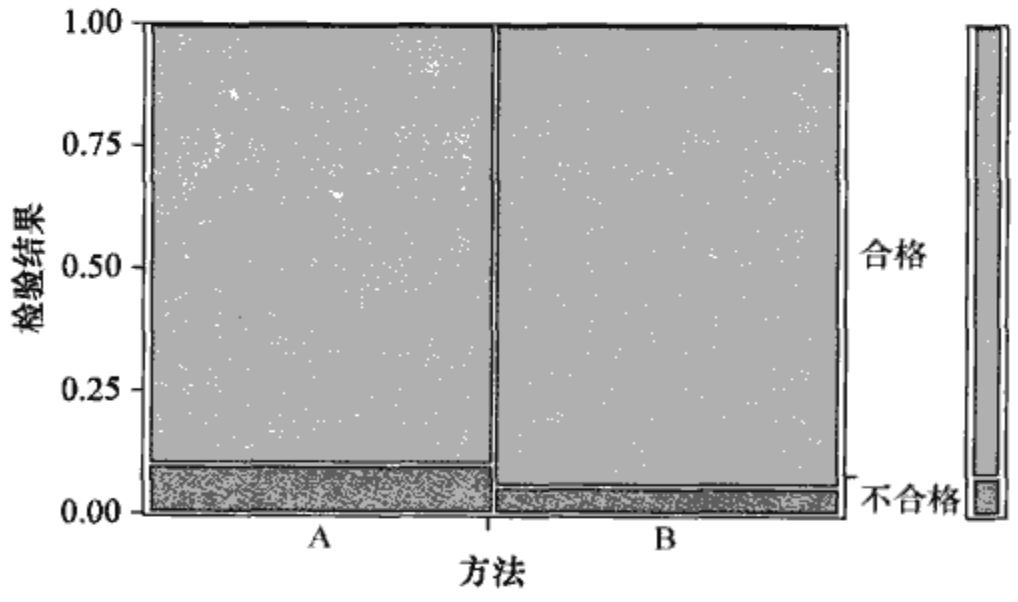


图 16　总体比率检验

列联表：

计数 合计百分比 列百分比 行百分比	不合格	合格	
A	10 5.00 62.50 10.00	90 45.00 48.91 90.00	100 50.00
B	6 3.00 37.50 6.00	94 47.00 51.09 94.00	100 50.00
	16 8.00	184 92.00	200

检验	卡方	概率>卡方
似然比	1.098	0.294 8
Pearson	1.087	0.297 1

P 值大于 0.05，可以认为两种方法间无显著差异。当本例的数字都扩大 10 倍时，让我们看看检验结果是否会有变化。

通过“分析→以 X 拟合 Y”路径，用鼠标把“选择列”中的“检验结果”拖入“Y”，把“选择列”中的“方法”拖入“X”，把“选择列”中的“数量 2”拖入“频数”，点击“确定”。得到图 17 和分析结果如下。

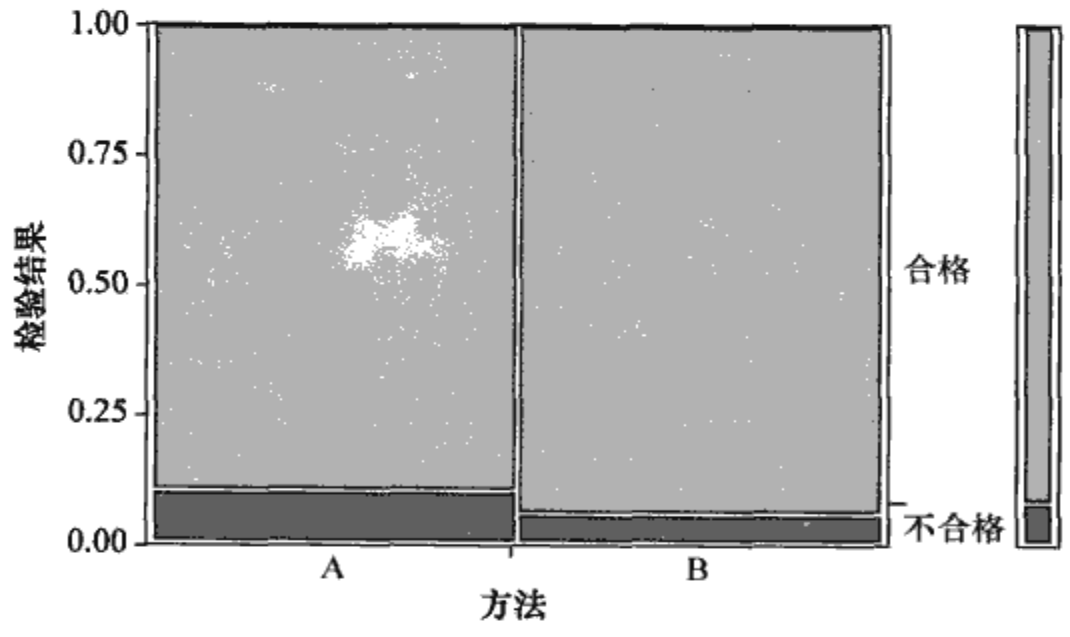


图 17　总体比率检验

列联表：

计数 合计百分比 列百分比 行百分比	不合格	合格	
A	100 5.00 62.50 10.00	900 45.00 48.91 90.00	1 000 50.00
B	60 3.00 37.50 6.00	940 47.00 51.09 94.00	1 000 50.00
	160 8.00	1 840 92.00	2 000

检验	卡方	概率>卡方
似然比	10.976	0.000 9*
Pearson	10.870	0.001 0*

该 P 值小于 0.05，可以认为两种方法具有显著差异。这就给我们很大的启示，表面上看 10%当然比 6%要大，但是在样本量较小时竟然得不到有显著差别的结论。统计工作者不相信简单的百分数，100 分之 6 与 1 000 分之 60 是不同的。将数字扩大 10 倍，则二者的差别就是显著的了。

除了常规的 P 值分析法，还可以通过图 16 和图 17 所显示的马赛克图中合格和不合格的面积比例（Y 轴）来判断这两种方法是否具有显著差异（在马赛克图中，各个区域在 X 轴上的宽度与样本量相对应）。这可以帮助不懂统计学的工程师进行直观的可视化分析。

3. 配对检验

以例 5—8 为例，利用 JMP 进行配对检验。

打开数据表，通过“分析→配对”路径，选择“MAT A，MAT B”加入“Y，成对响应”，点击“确定”得到结果如下。

配对：

MAT B	11.04	t 比率	3.348 877
MAT A	10.63	自由度	9
均值差值	0.41	概率>|t|	0.008 5*
标准误差	0.122 43	概率>t	0.004 3*
上限 95%	0.686 95	概率<t	0.995 7
下限 95%	0.133 05		
数量	10		
相关性	0.988 23		

（二）JMP 在多变异分析中的应用

以例 5--15 为例，说明应用 JMP 如何实现多变异分析。通过“图形→变异性/量具图”路径，选择“直径”加入“Y，响应”，选择“时间”加入“X，分组”，选择“轴”加入“部件，样本 ID”，点击“确定”得到分析图（见图 18）。

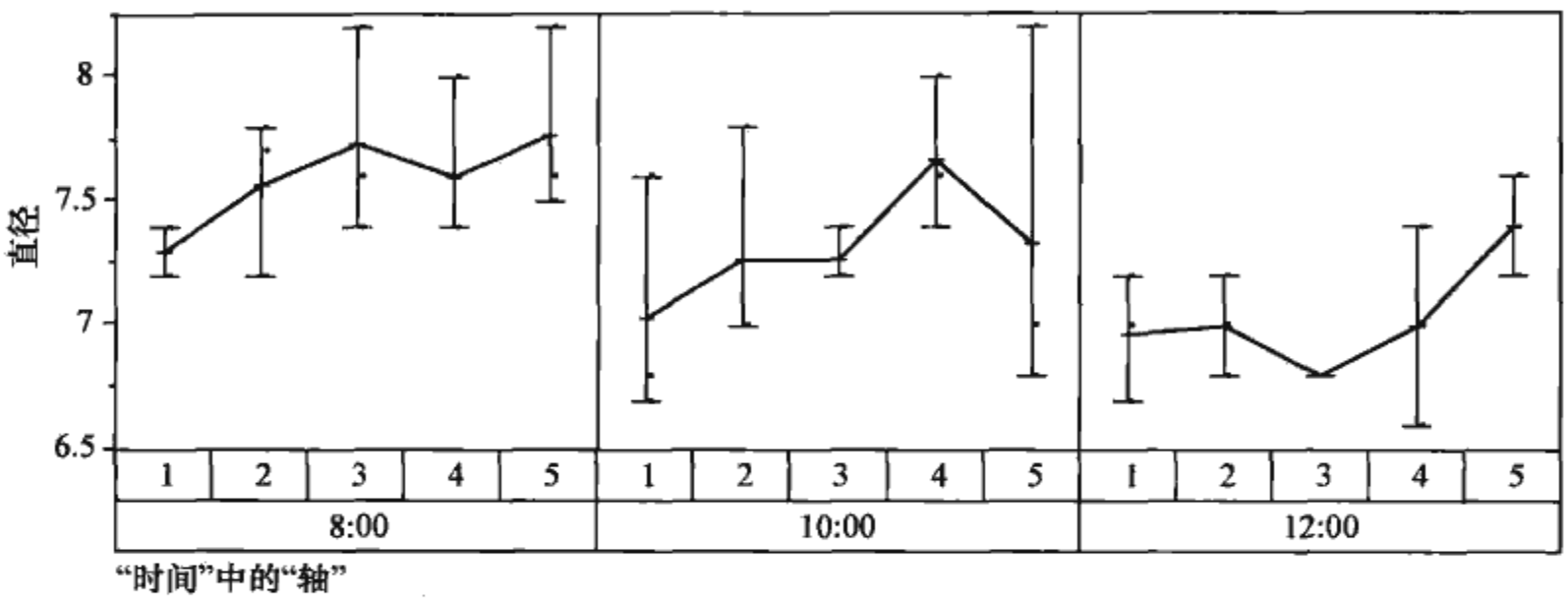


图 18　直径对时间—轴的多变异图

从图 18 中看出：不同时间轴直径之间差别很大，即时间因子影响很显著，轴直径在产品内和产品间也有差别，不过相对时间造成的轴直径间差别较小。可以得到结论：轴直径间的差异主要是由不同时间造成的差别。

JMP 除了提供传统的多变异分析方法，还提供一种更为直观动态的可视化方法。

以工作表中的 yield 数据表为例，说明 JMP 动态链接的实现方法。

在 yield 数据表中可以看出，影响 yield 分类的因子有很多个，针对这样的问题 JMP 提供了动态链接的方法，帮助使用者快速直观地判断出显著的影响因子。实施途径如下：分析→分布，把“所有候选变量”都选入“Y，响应”，点击“确定”，得到图 19。然后在 Yield Classification 图形鼠标左击“Normal 的条形柱”，与 Normal 相关的因子数据分布就显示出来，这样可以方便直观地初步判断显著的影响因子。

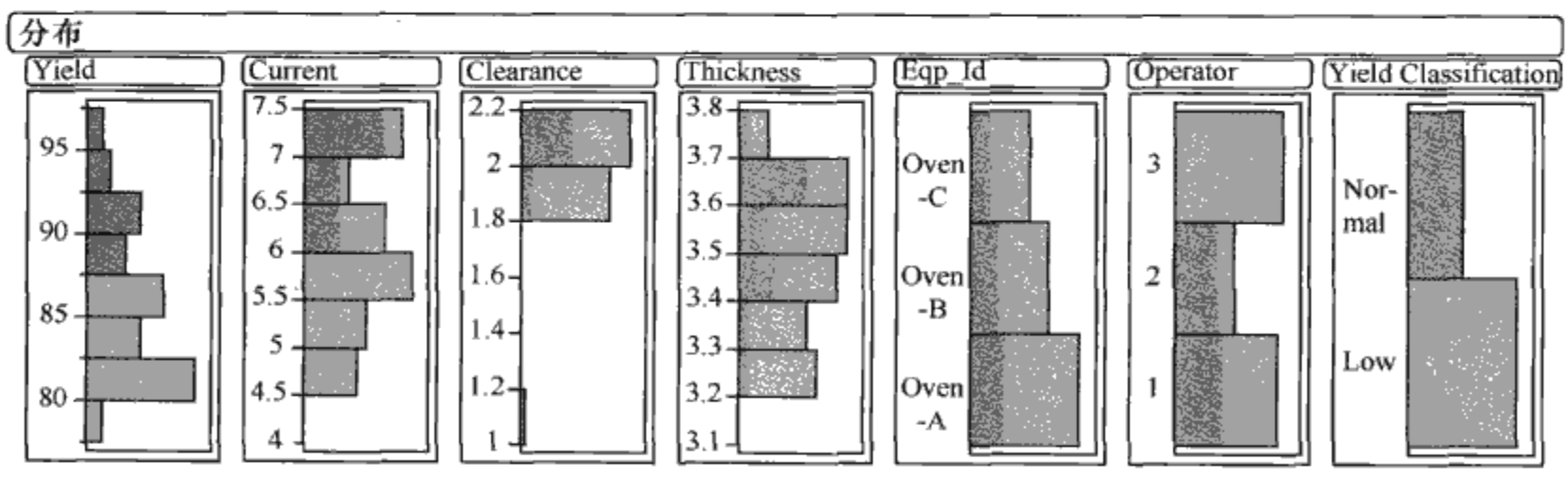


图 19　yield 分布图

可以看出，Yield Classification 分类差异主要是受 Operator 和 Current 的影响。

（三）JMP 在回归分析中的应用

以例 5—16 为例，说明应用 JMP 进行回归分析。首先打开例 5—16 数据表，通过“分析→以 X 拟合 Y”路径，将“产量”选入“X”，“温度”选入“Y”，点击“确定”得到散点图如图 20 所示。

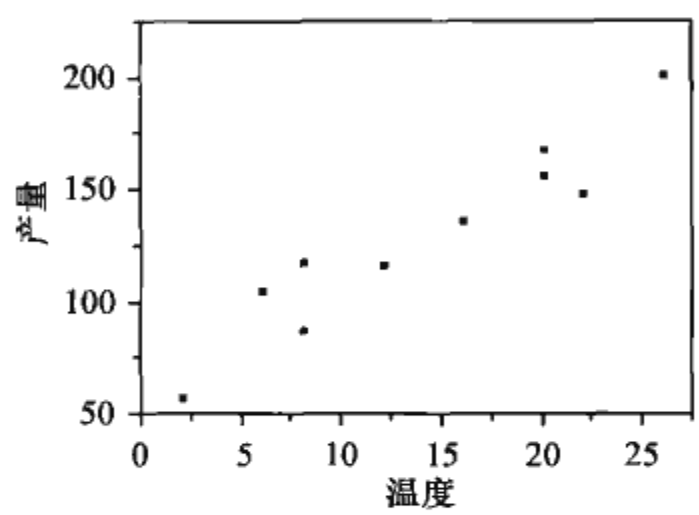


图 20　产量与温度的散点图

然后计算相关系数，点击▼→椭圆密度→0.95，点击相关性前面的灰色三角打开相关性结果：

相关性：

变量	均值	标准差	相关性	显著性概率	数量
温度	14	7.944 25	0.950 123	<.000 1*	10
产量	130	41.806 43			

这里确实见到 X 与 Y 间高度正相关的情况。当此检验得到的 P 值小于 0.05 时，则拒绝原假设，即应该认为 X 与 Y 是线性相关的。

利用 JMP 建立一元线性回归模型，实现步骤如下：在散点图的窗口中，点击▼→拟合线，得到拟合线图（见图 21）和拟合的运算结果如下。

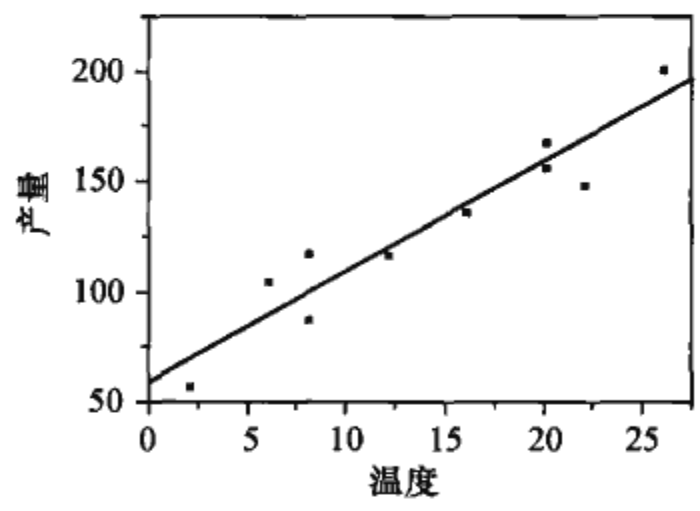


图 21　温度拟合产量图

线性拟合：

产量＝60＋5＊温度

拟合汇总：

R 方	0.902 734
调整 R 方	0.890 575
均方根误差	13.829 32
响应均值	130
观测数（或权重和）	10

方差分析：

源	自由度	平方和	均方	F 比率
模型	1	14 200.000	14 200.0	74.248 4
误差	8	1 530.000	191.3	概率＞F
校正合计	9	15 730.000		＜.000 1*

参数估计值：

项	估计值	标准误差	t 比率	概率＞|t|
截距	60	9.226 035	6.50	0.000 2*
温度	5	0.580 265	8.62	＜.000 1*

建立回归方程的目的是表达两个具有线性相关的变量间的定量关系，因此，只有当两个变量确实具有线性相关关系时所建立的回归方程才是有意义的。两个变量间是否存在线性相关关系，可以从 JMP 计算的结果中方差分析的 P 值判断。这里，P 值比 0.001 还小，故认为回归方程是有意义的。

对残差进行分析时，可以通过对残差图的分析来进行。获得残差图可以通过点击▼（线性拟合前）→标绘残差得到。下面根据残差图进行分析。

1. 关于按观测顺序的残差图

关于按观测顺序的残差图是用水平轴表示观测顺序，用纵轴表示对应的残差值。这些残差点应在横轴（即残差为 0）上下随机波动，不应有任何上升、下降、摆动、跳跃等趋势。如果有某种趋势存在，则说明数据观测过程中受到某个未知因素的强大影响，应该找出此因素并加以控制，如图 22 所示。

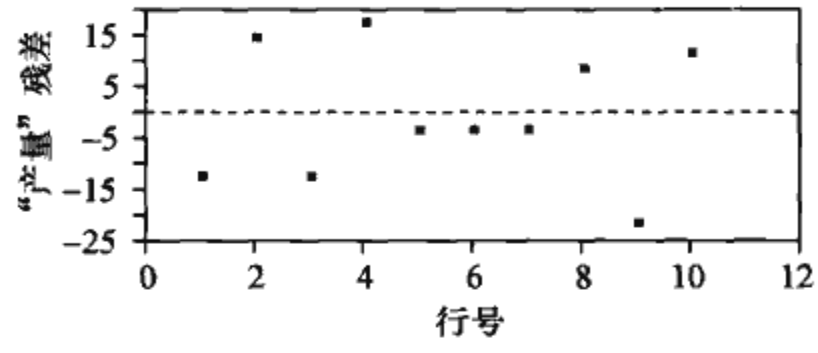


图 22　“行号—残差”图

2. 关于因变量的预测值 $\hat{y}$ 的残差图

第二种残差图（见图 23）是在水平轴上表示因变量的预测值 $\hat{y}$ 和在纵轴上表示残差值。因此，这个残差图上的点应该分布在一条水平的带子中。如果在图中有明显的“喇叭口”的形状，即表明残差的标准差不是常数，而是在随预测值而变化，这提示原来的模型假定可能有问题。如果有“喇叭口”的形状，可以通过对 Y 作变换加以解决。在图 23 中没有发现任何不正常之处。

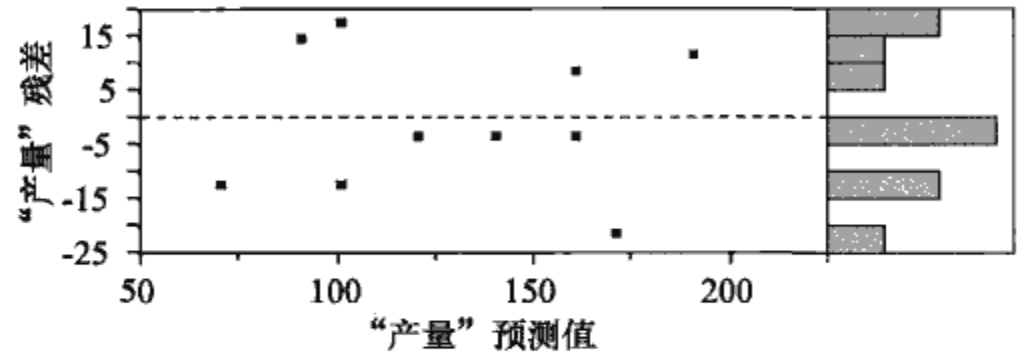


图 23　“行号—残差”图

3. 残差的正态性检验

残差应该服从正态分布，我们对此可以加以检验。可将残差画在正态概率纸上（见图 24）。在图 24 中没有发现任何不正常之处。如果对正态性有怀疑，可以直接对残差数据进行正态性检验。

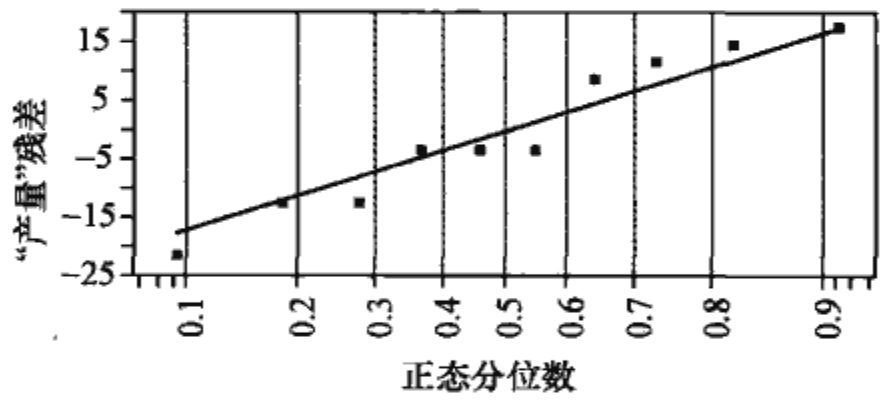


图 24　残差正态分位数图

4. 关于自变量 X 的值的残差图

自变量 X 的值的残差图可以通过下面步骤实现。通过点击▼（线性拟合前）→保存残差，回到数据表窗口，通过“分析→以 X 拟合 Y”路径，选择“产量残差”加入“Y”，选择“温度”加入“X”，点击“确定”。点击▼→拟合均值，得到残差对自变量温度的散点图。

关于自变量 X 的值的残差图是用水平轴表示自变量的值，用纵轴表示对应的残差值。每个残差用图上的一个点来表示。每个点的横坐标由 x_i 的值给出，纵坐标由对应的残差值给出。图 25 是得到的对自变量的残差图。对于此图分析的重点是看残差的标准差是否能保持常数（即各残差点是否有“喇叭口”形状）或是否有

弯曲的形状。如果对 Y 的预测值的残差图也不正常，首先考虑对 Y 作变换；而如果对 Y 的预测值的残差图正常，这时说明在回归方程中仅有线性项不够，要增加 X 的高阶项或其他项。图 25 完全正常。

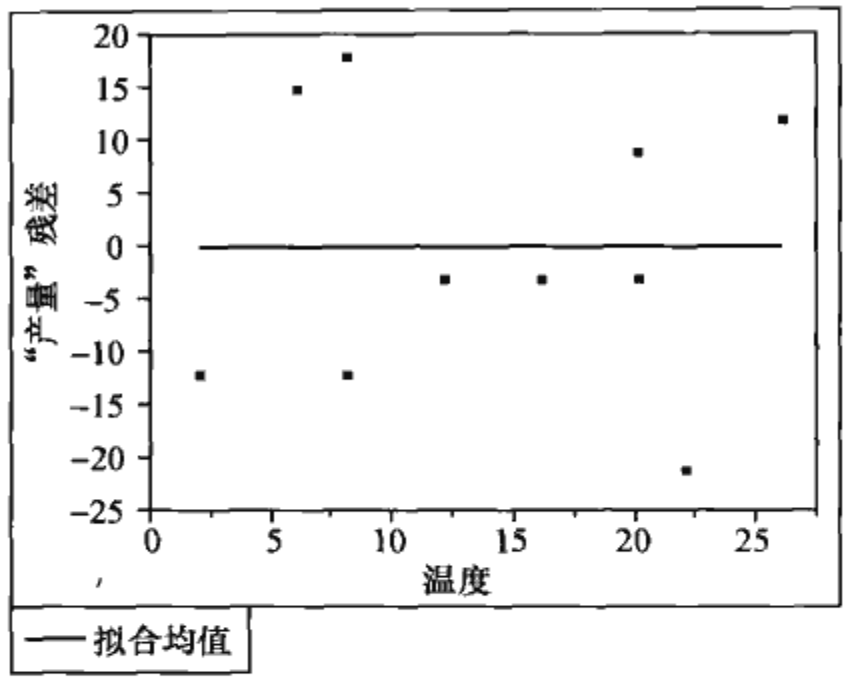


图 25　残差对自变量的图

现在总结图 24 及图 25 所示的两张残差图。这些残差看来都是正常的。因此结论是，残差图并没有提供足够的证据，使我们对例 5—16 的回归模型所作的假定表示怀疑。这将导致我们最后能够确信，例 5—16 的一元线性回归模型是合理的。

（四）JMP 的分析自动化功能

在数据分析的阶段，常常需要对不同来源的数据进行整合，然后进行统一分析，利用 JMP 脚本，可以轻松地实现分析过程的规范化和自动化，避免重复劳动，节约分析时间，提高分析效率。下面利用一个简单的例子来说明这一过程的实现。

首先，JMP 可以对不同来源的数据表进行数据的预处理，内容包括数据的获取、整理、清洗和定义等。以例 5—16 中的数据为例，其原始数据最初来源于两个不同的 Excel 文件（见 JMP 工作表中的例 5—16—1 和例 5—16—2）。用 JMP 打开这两个文件，在 JMP 主窗口点击表→拼接进入窗口，选择 Sheet1 和 Sheet2 进行“添加”，“输出表名称”填入“total”，点击“确定”得到新的总数据表。

然后，在数据表上进行各类分析。以例 5—16 为例作回归分析，具体操作见前面的详细说明。

最后，将以上所有操作，即数据的获取、整理和分析过程保存至脚本，形成 JSL 文件。在以后需要对数据执行相同操作时，只需要将数据表格保存至指定的路径，打开 automation 脚本文件点击运行即可。关于 JMP 脚本使用的更多信息，可以在 JMP 软件帮助→手册→脚本指南中获得。

四、JMP 软件在改进阶段的应用

JMP 的试验设计平台拥有全球统计软件中最全面的试验设计方法集，不仅能实现析因设计、响应面设计、混料设计等传统试验设计方案，还能轻松实现目前业界其他同类软件不具备的高级试验设计工具集，包括：空间填充设计、公差设计、非线性设计以及定制设计等高级试验设计方案。JMP 的定制设计是目前最灵活的试验设计方案，它能够充分考虑试验设计应用环境中的各种实际情况，如可控/不可控因子、难改变的因子、自定义试验次数等。在这里，针对书中有关试验设计的要求，简单介绍在 JMP 软件中如何实现试验设计和分析。

首先，以 3 因子为例（温度、压力、速度），用 JMP 软件生成一个两水平的有三个中心点的全因子设计。

在 JMP 软件中，从“试验设计→完全析因设计”路径进入设计窗口（见图 26），单响应时不需要“添加响应”，点击“目标”选择优化目标，接下来创建因子，在“连续”中选择“2 水平”，双击名称栏改为“温度”，按此步骤创建三个连续型的 2 水平因子。点击“继续”，填入“中心点数”为 3，保留“试验顺序”选项“随机”，点击“制表”，这样就可以获得一个随机化后的试验设计表格（见表 1）。其中“响应 Y”一列为空白，试验结果可以填入该列。

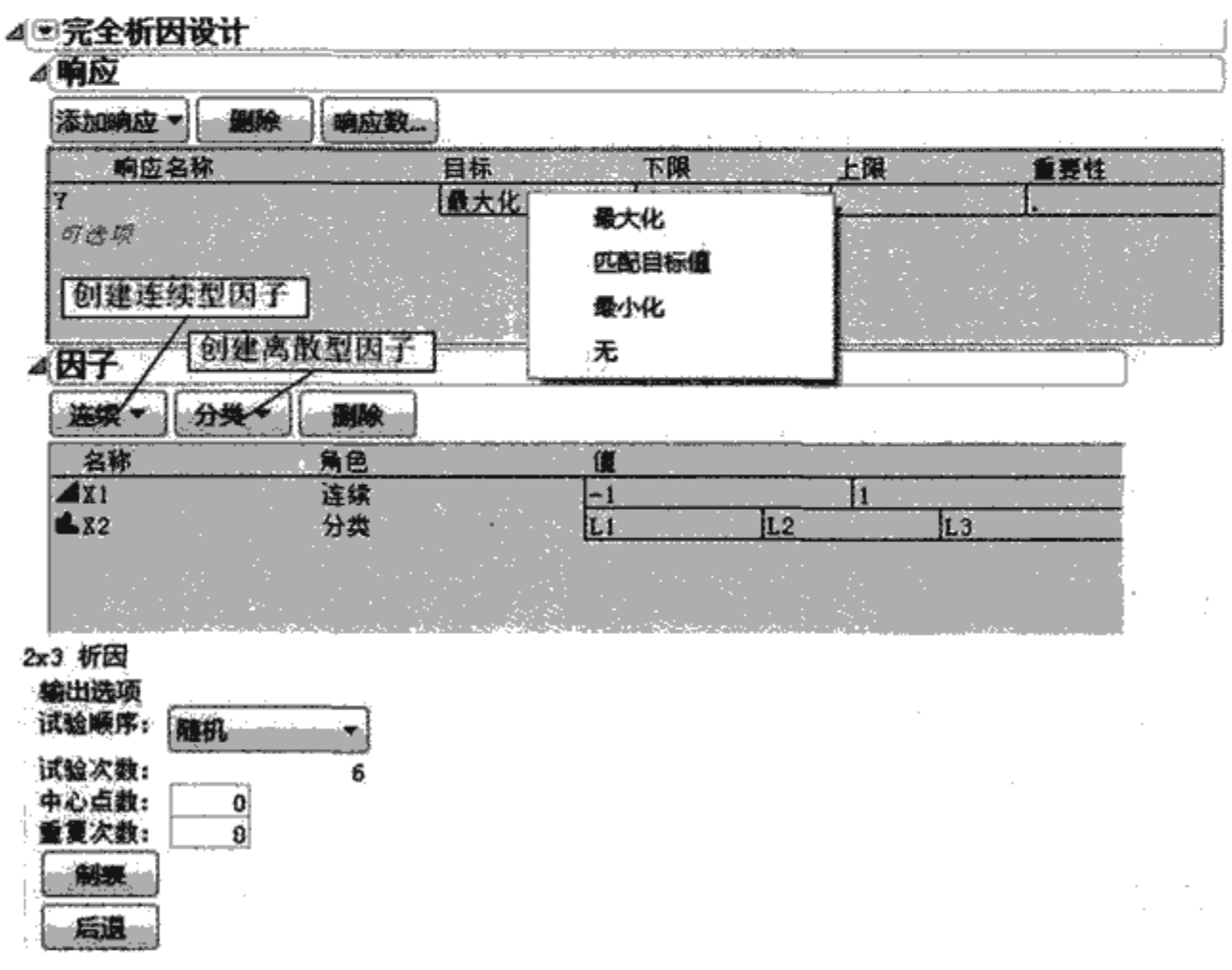


图 26　完全析因设计窗口

表 1　　全因子试验计划表（随机顺序）

模式	温度	压力	速度	响应 Y
−+−	−1	1	−1	
−−−	−1	−1	−1	
+−−	1	−1	−1	
+−+	1	−1	1	
000	0	0	0	
000	0	0	0	
+++	1	1	1	
−++	−1	1	1	
000	0	0	0	
−−+	−1	−1	1	
++−	1	1	−1	

接下来，以第 6 章中例 6—1 为例，进行全因子试验设计分析。

第一步：拟合选定模型。

打开例 6—1 数据表，从“分析→拟合模型”路径，将“平面度”选入“Y”中，选中转速、移速、倾角，宏→析因次数，填入“次数”为“2”，这样就构造了全部主效应和二阶交互作用项。点击运行，得到如下结果。

拟合因子：平面度与转速，移速，倾角。

拟合汇总：

R 方	0.907 362
调整 R 方	0.796 196
均方根误差	1.239 556
响应均值	35.65
观测数（或权重和）	12

方差分析：

源	自由度	平方和	均方	F 比率
模型	6	75.247 500	12.541 3	8.162 2
误差	5	7.682 500	1.536 5	概率>F
校正合计	11	82.930 000		0.017 9*

失拟：

源	自由度	平方和	均方	F 比率
失拟	2	0.455 000 0	0.227 50	0.094 4
纯误差	3	7.227 500 0	2.409 17	概率>F
总误差	5	7.682 500 0		0.912 5
				最大 R 方
				0.912 8

参数估计值：

项	估计值	标准误差	t 比率	概率>|t|
截距	35.65	0.357 829	99.63	<.000 1*
转速（800，900）	−1.762 5	0.438 249	−4.02	0.010 1*
移速（2.4，2.8）	2.162 5	0.438 249	4.93	0.004 3*
倾角（80，84）	−0.212 5	0.438 249	−0.48	0.648 3
转速 * 移速	−1.162 5	0.438 249	−2.65	0.045 3*
转速 * 倾角	−0.187 5	0.438 249	−0.43	0.686 6
移速 * 倾角	0.437 5	0.438 249	1.00	0.364 0

在参数估计值中，从显著性来看，转速、移速及它们之间的交互作用项转速 * 移速对应的 P 值都小于显著性水平 0.05，因此可以判定，这三项效应应该是显著的，而其余各项皆不显著。

第二步：残差诊断。

（1）观察残差对于以观测值顺序为横轴的散点图（见图 27），重点考察对观测值顺序的散点图中各点是否随机地在水平轴上下无规则地波动，是否有不正常的升降趋势。

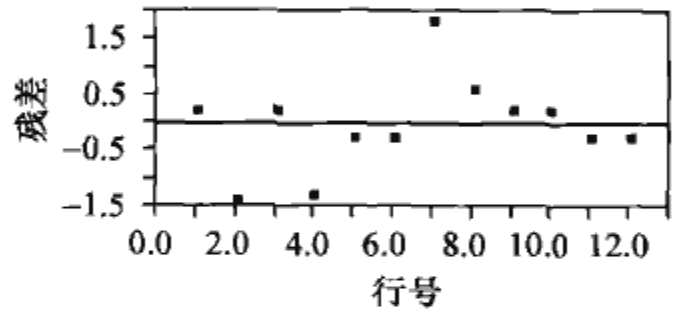


图 27　“行号—残差”图

在拟合最小二乘法窗口，从“▼→行诊断→标绘‘行号—残差’图”路径得到图形，在图形中“鼠标右键→大小/尺寸”中，可以修改 X，Y 轴的坐标增量。

本例中，此图是正常的。

（2）观察残差对于响应变量拟合值的散点图（见图 28），重点考察残差是否保持着等方差，即是否有“漏斗形”或“喇叭形”。

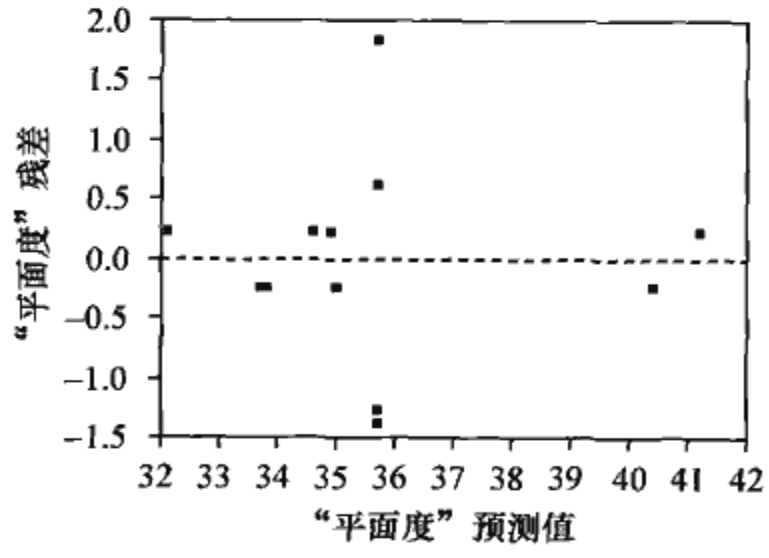


图 28　“预测值—残差”图

在拟合最小二乘法窗口，从“▼→行诊断→标绘‘预测值—残差’图标绘‘行号—残差’图”路径得到图形。

本例中，此图是正常的。

（3）观察残差的正态性检验图（见图 29），看残差是否符合正态分布。

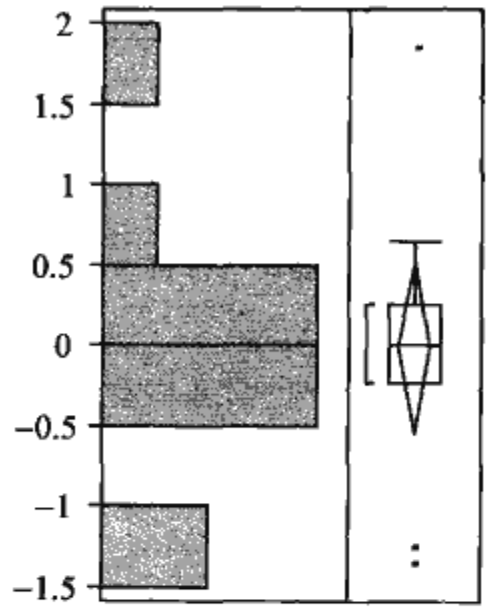


图 29　残差的正态性检验图

这里只有粗糙的散点图，要想得到准确的检验结果，可以直接对残差进行正态性检验。如果这里不能服从正态分布也不用着急，因为现在还只是初步模型，还要经过模型的修改，很可能将来残差对于最终模型是正态的。

在拟合最小二乘法的窗口中，从“▼→保存列→残差”路径，然后回到“数据表”窗口，通过“分析→分布”路径，选择“残差平面度”加入“Y，列”，点击“确定”得到图形。

（4）观察残差对于各自变量的散点图（见图 30、图 31 及图 32），重点考察是否有弯曲趋势。

在数据表窗口，通过“分析→以 X 拟合 Y”路径，选择“残差平面度”加入“Y，响应”，选择“转速、移速、倾角”加入“X，因子”，点击“确定”，从“▼→拟合均值”路径，得到残差对于各自变量的散点图。

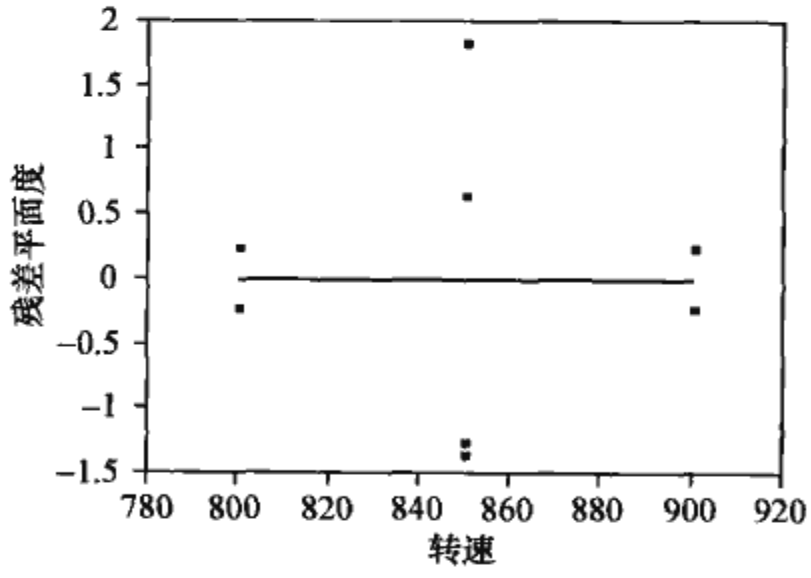


图 30　残差对转速的散点图

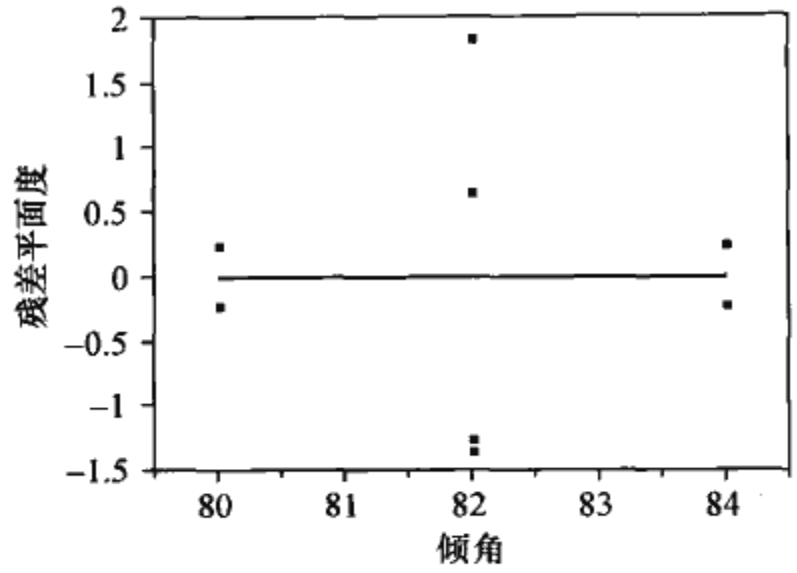


图 31　残差变量移速的散点图

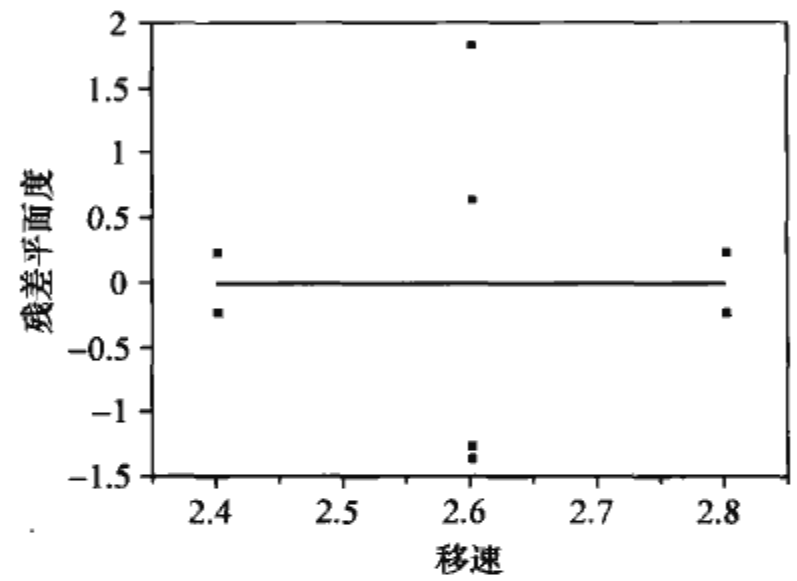


图 32　残差对倾角的散点图

本例中，这三个图都是正常的，看不出弯曲的趋势。

第三步：判断模型是否要改进。

从残差诊断中看出，模型拟合得还可以，只是在检验各项效应中，发现三个自变量主效应中，只有转速、移速及它们之间的交互作用项转速 * 移速对应的 P 值都小于显著性水平 0.05，因此可以判定，这三项效应是显著的，而其余各项皆不显著。因此修改拟合模型中的“项”，重新进行计算，即又回到第一步。

新第一步。

拟合因子：平面度与转速，移速。

拟合汇总：

R 方	0.881 15
调整 R 方	0.836 581
均方根误差	1.109 969
响应均值	35.65
观测数（或权重和）	12

方差分析：

源	自由度	平方和	均方	F 比率
模型	3	73.073 750	24.357 9	19.770 5
误差	8	9.856 250	1.232 0	概率>F
校正合计	11	82.930 000		0.000 5*

失拟：

源	自由度	平方和	均方	F 比率
失拟	1	0.003 750 0	0.003 75	0.002 7
纯误差	7	9.852 500 0	1.407 50	概率>F
总误差	8	9.856 250 0		0.960 3
				最大 R 方
				0.881 2

参数估计值：

项	估计值	标准误差	t 比率	概率>|t|
截距	35.65	0.320 42	111.26	<.000 1*
转速（800，900）	−1.762 5	0.392 433	−4.49	0.002 0*
移速（2.4，2.8）	2.162 5	0.392 433	5.51	0.000 6*
转速 * 移速	−1.162 5	0.392 433	−2.96	0.018 1*

对于这次的计算结果，仍用前面介绍过的方法与步骤来进行分析。

新第二步：残差诊断。

残差诊断仍按规定的四个步骤进行，全部结果都是正常的。

新第三步：判断模型是否要改进。

由上述分析，可以认为已经选定了最终的模型。JMP 软件给出了回归方程的系数和对应的 P 值。可以写出最后确定了的回归方程。

通过“▼→估计值→显示预测表达式”路径得到自然变量的预测表达式如下：

$$35.65$$

$$+-1.762\,5 * \left(\frac{\text{转速}-850}{50}\right)$$

$$+2.162\,5 * \left(\frac{\text{移速}-2.6}{0.2}\right)$$

$$+\left(\frac{\text{转速}-850}{50}\right) * \left(\left(\frac{\text{移速}-2.6}{0.2}\right) * -1.162\,5\right)$$

$$y=-219.412+0.267\ \text{转速}+109.625\ \text{移速}-0.116\,25\ \text{转速} * \text{移速}$$

第四步：对选定模型进行分析解释。

应在拟合选定模型后输出更多的信息，并给出有意义的解释。

（1）输出各因子的主效应图、交互效应图。各因子的主效应图如图 33 所示。

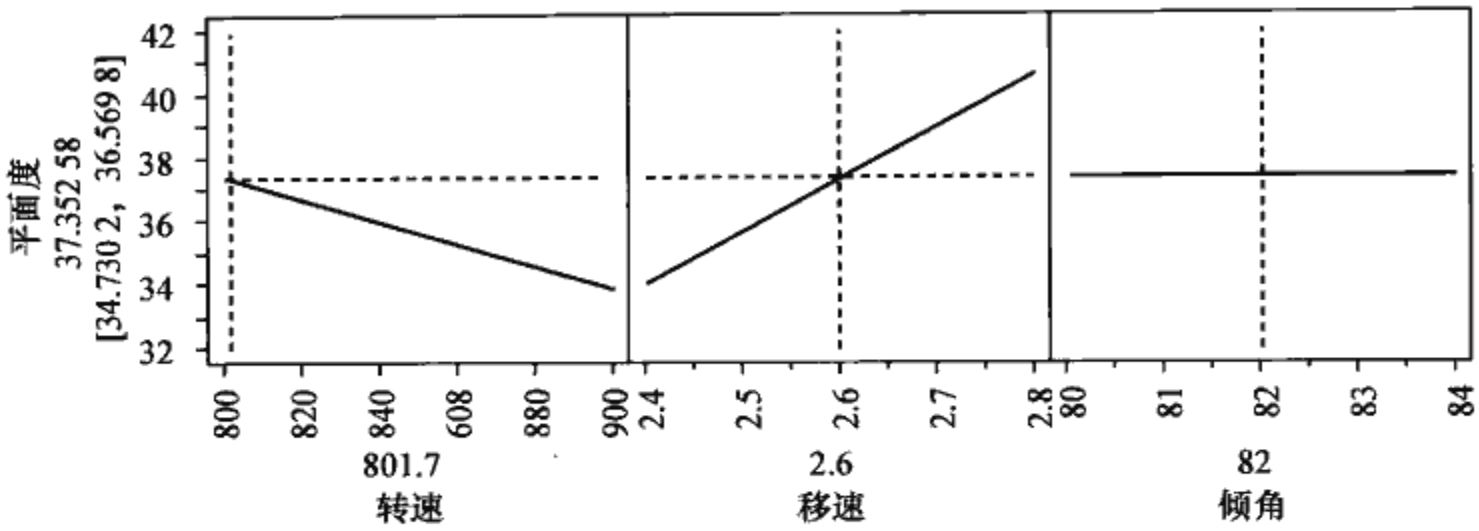


图 33　各因子的主效应图

从图 33 中可以看出，因子转速和因子移速对于响应变量平面度的影响确实是很显著的，而因子 C 倾角对于响应变量平面度的影响确实是不显著的，而且可以看出，为使平面度取值更小，应该让转速尽可能大，让因子移速尽可能小。

交互效应图可通过“▼→因子刻画→交互作用图”路径得到，如图 34 所示。

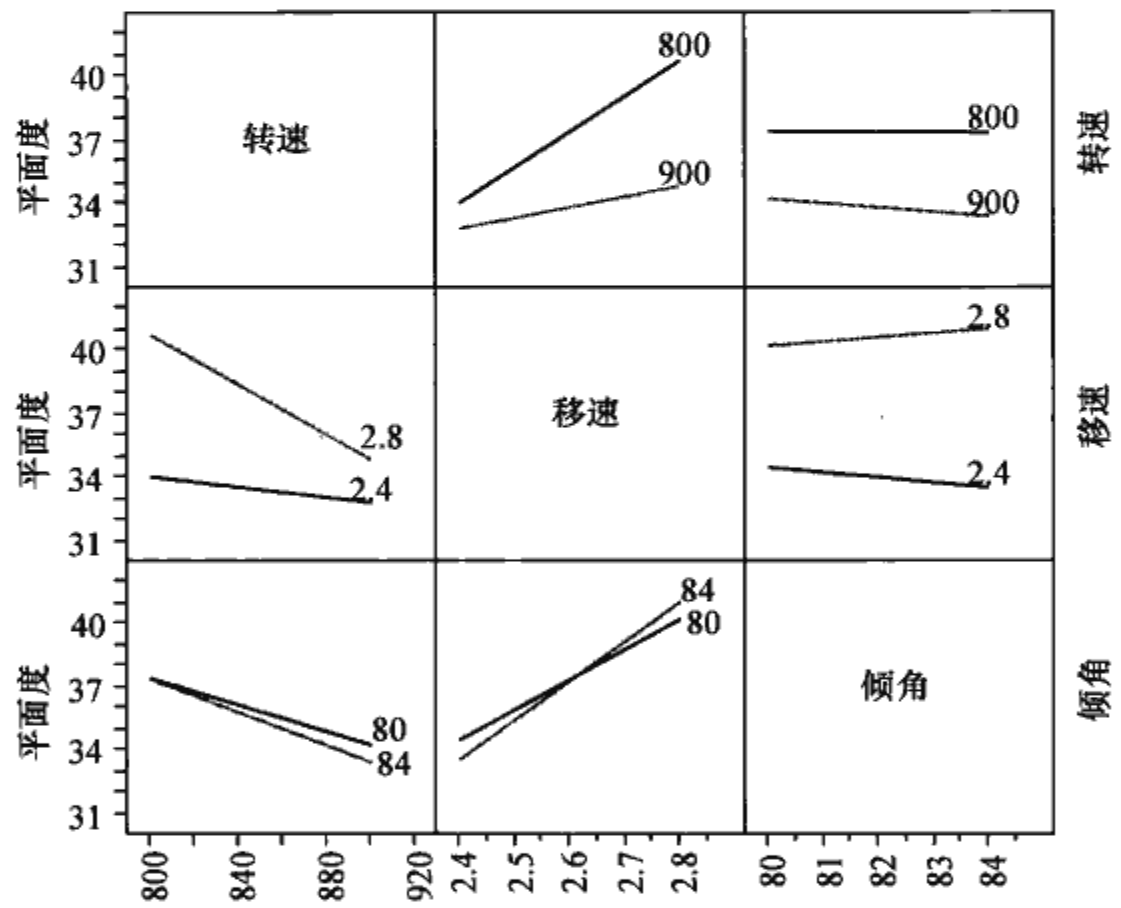


图 34　各因子间的交互效应图

从图 34 中可以看出，因子转速和因子移速交互作用对于响应变量平面度的影响确实是很显著的（两条线非常不平行），而其他交互效应对于响应变量平面度的影响确实是不显著的（两条线几乎平行）。

（2）输出等高线图、响应曲面图等。

在 JMP 软件中可以通过“▼→因子刻画→等高线刻画器和曲面刻画器”路径得到（见图 35 和图 36）。

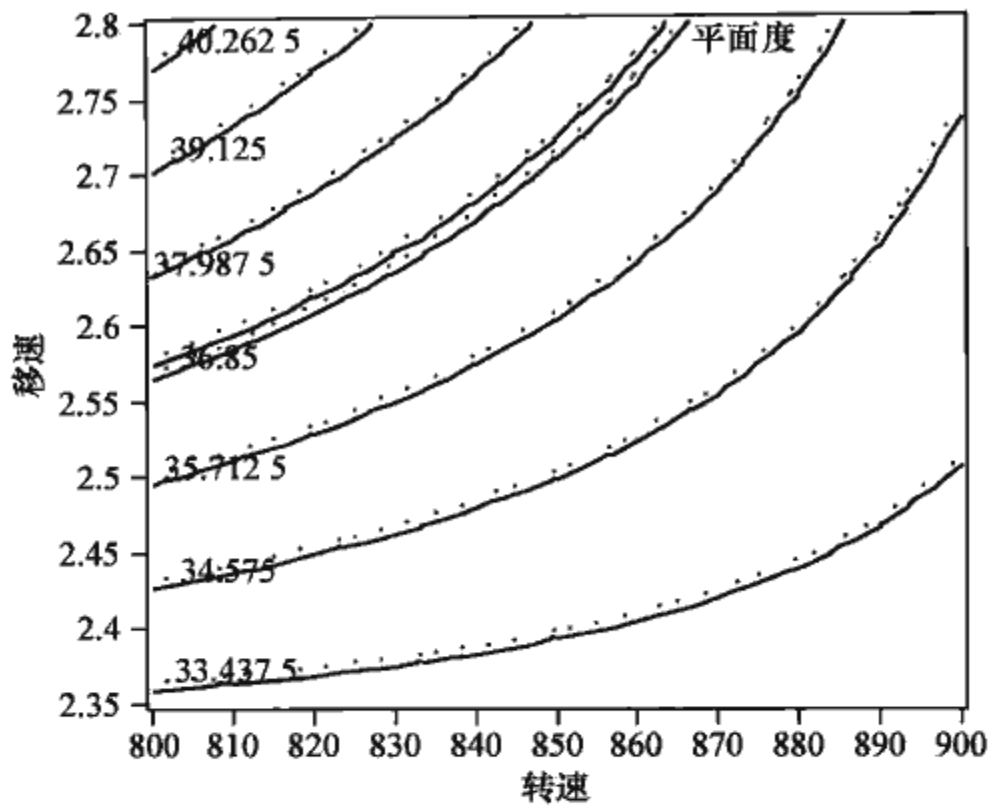


图 35　等高线图

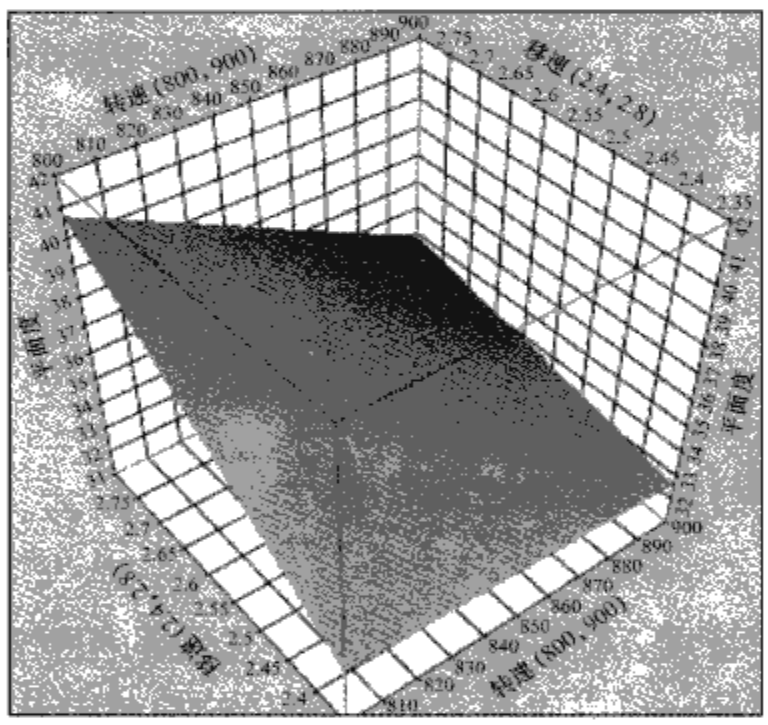


图 36　响应曲面图

从图 35 和图 36 中可以看出，因子 A（转速）及因子 B（移速）主效应及其交互作用对于响应变量平面度的影响确实是很显著的（等高线很弯曲，曲面偏离平面很严重），为使平面度取值更小，如在因子效应分析中的结论相同，即应该让转速尽可能大，让移速尽可能小。

（3）实现最优化。根据本具体问题要求，优化目标是属于“望小”型的。在拟合最小二乘法窗口下，从“▼（响应‘平面度’前）→因子刻画→刻画器”路径，得到预测刻画器，再从“▼（预测刻画器前）→设置期望”路径，选择“最小化”，设定“期望值”，点击“确定”。然后从“▼（预测刻画器前）→最大化期望”路径，自动计算出结果（见图 37）。

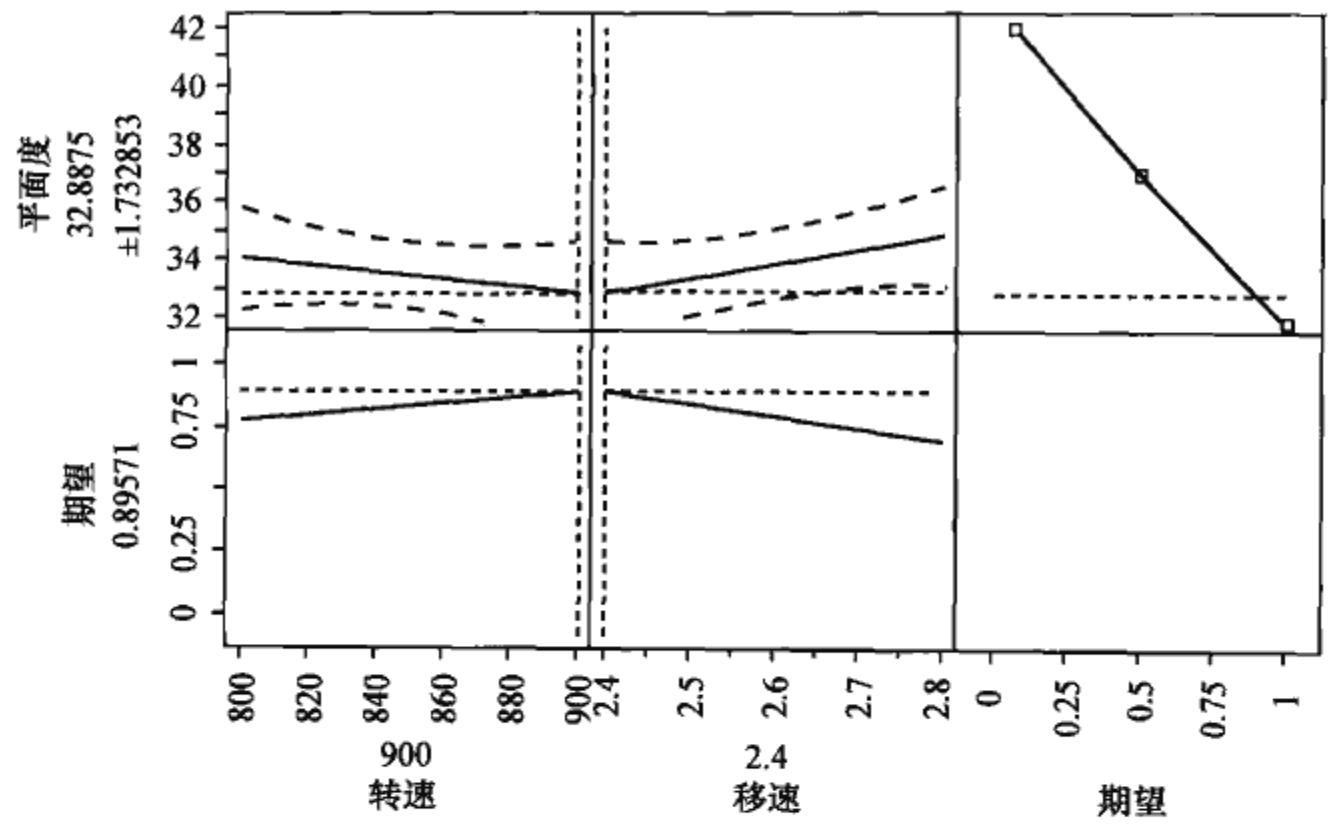


图 37　预测刻画器输出最优结果图

当因子 A（转速）取 900 转/分钟（这是最大值），因子 B（移动速度）取 2.4 毫米/秒（这是最小值）时，平面度将会达到平均最小值 32.887 5μ。

第五步：判断目标是否已经达到。

这一部分在书中正文部分有详细内容，故不赘述。顺便提及，JMP 还提供了专业的蒙特卡洛模拟器帮助对模型的实际效果进行预测，有兴趣的读者可以参照相关 JMP 使用手册。

五、JMP 软件在控制阶段的应用

在本书第 7 章中介绍了多种用于控制阶段的控制图。在 JMP 软件中通过“图形→控制图”途径，可以使用 JMP 所提供的控制图分类，如均值，单值极差，p，np，c，u 控制图等。而且 JMP 软件还可以通过脚本文件来实现统计过程控制（SPC）自动化。JMP 软件中的记录功能模块为六西格玛项目的管理与总结工作提供了便利的平台。

（一）JMP 在控制图中的应用

1. 绘制均值控制图

下面以第 7 章例 7—1 为例，说明在 JMP 软件中如何绘制均值控制图。

绘制 $\bar{X}$-R 控制图的步骤如下：通过“图形→控制图→XBar”路径，将“观测值”加入“过程”，将时间加入“样本标签”，保留“XBar”和“R”的选项，点击“确定”后得到图 38。

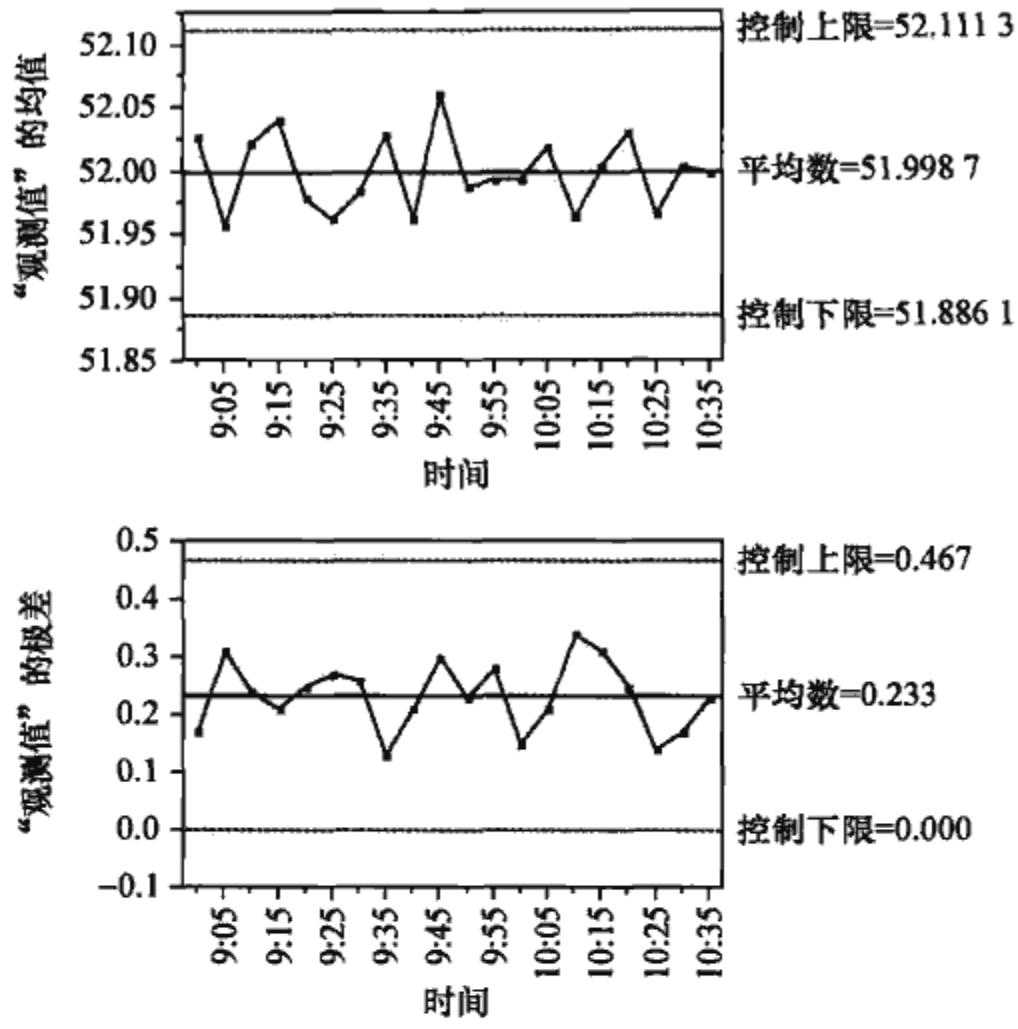


图 38　袋重量的 $\bar{X}$-R 控制图

为了能够方便使用者直观地查看控制图，可以用颜色表示出不同的指控域。通过下列步骤实现：从“▽（‘观测值’前）→显示区域默认颜色”路径，点击“确定”得到图 39。

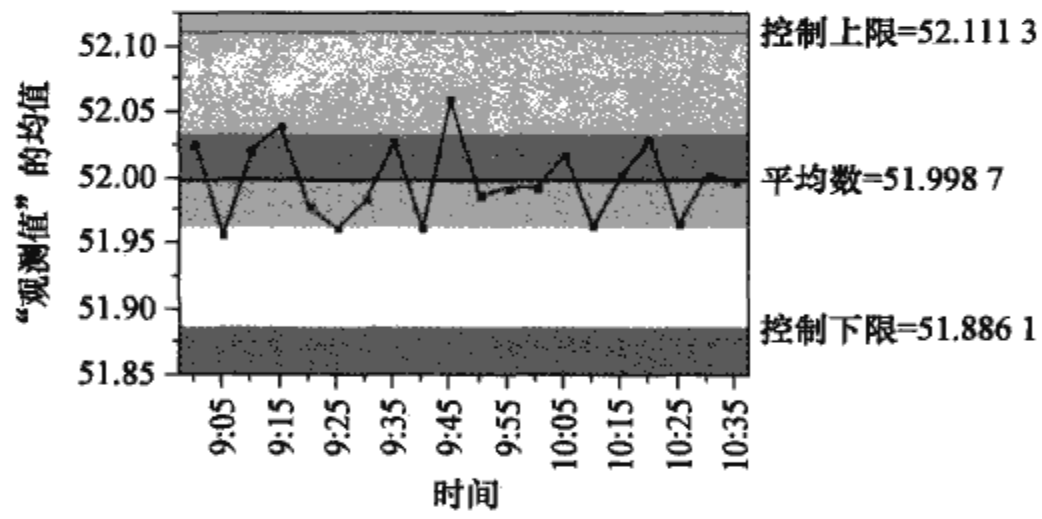


图 39　袋重量的 JMP 的 $\bar{X}$-R 控制图

绘制 $\bar{X}$-S 控制图的步骤如下：从“图形→控制图→均值”路径，将“观测值”加入“过程”，将“时间”加入“样本标签”，选择“XBar”和“S”的选项，点击“确定”之后，得到图 40。

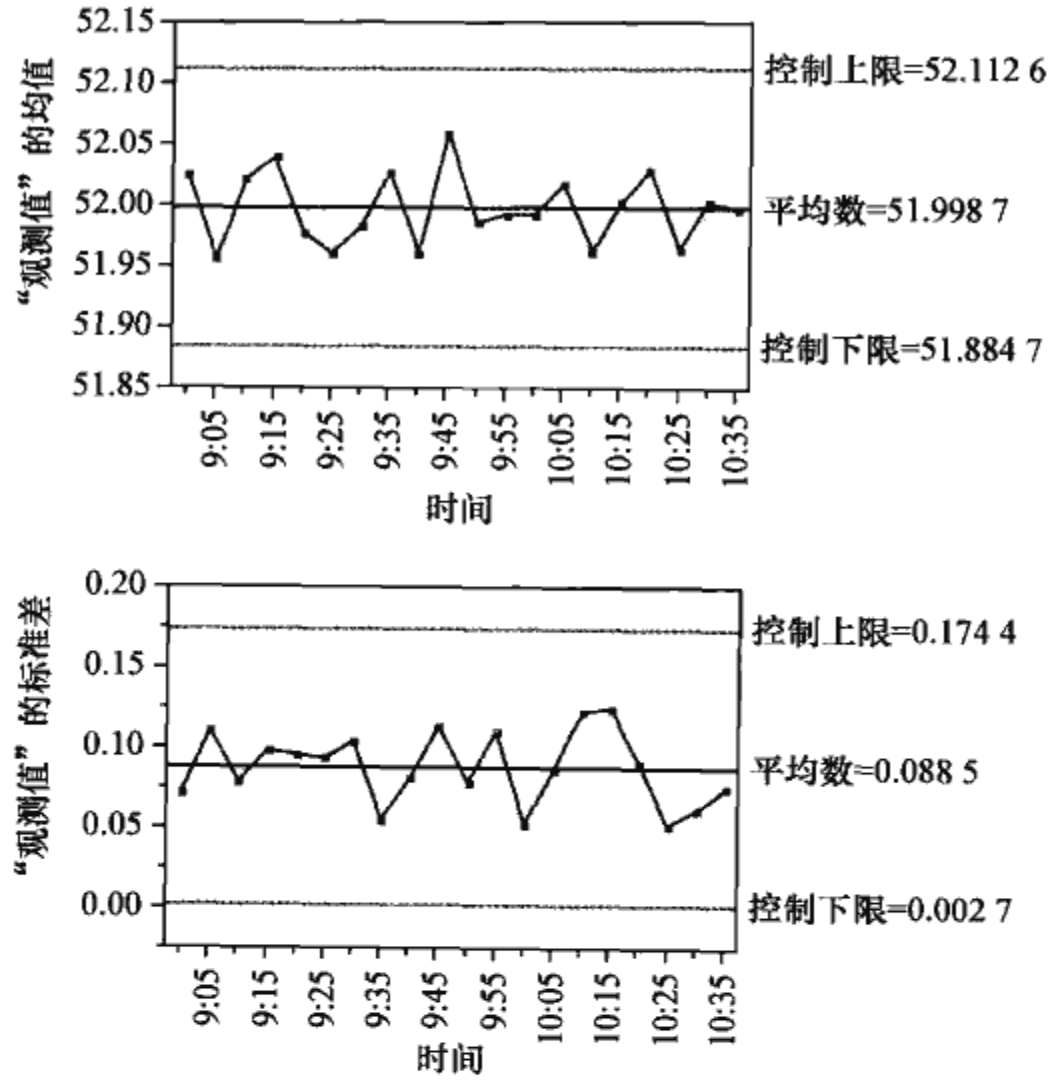


图 40　袋重量的 JMP 的 $\bar{X}$-S 控制图

2. 统计过程控制自动化

读者运用 JMP 脚本语言进行简单编写，可以通过 JMP 软件实时采集过程数据进行同步分析。当发现过程异常时，JMP 会自动以电子邮件等预先设定的方式通知工作人员。数据来源既可以是生产现场可以产生数据的生产设备和测量仪器，也可以是和上述设备动态连接的数据库系统或者文本文件。JMP 可以连接上述两种不同的动态数据源并第一时间将数据转变成动态控制图。

以 JMP 工作表中 Live Control Chart 脚本文件为例，演示 JMP 软件是如何实现统计过程控制自动化的。

打开 JMP 工作表中的 LiveControlChart 脚本文件，点击，再点击“确定”，得到图 41。

在用 JMP 脚本实现统计过程控制自动化彻底颠覆了传统过程控制人工采集数据进行事后分析的被动局面，方便工作人员对生产过程进行监测和控制。

（二）JMP 在六西格玛项目总结和成果评审中的应用

六西格玛总结和项目评审是六西格玛项目管理中最后一个过程，项目经验和知识成果的分享和积累对组织的持续改进起着至关重要的作用。运用 JMP 的项目展示器，可以将整个六西格玛项目的实施、管理过程集成于一个窗口中，这样做的好处是，除了能够非常方便地进行项目的总结和汇报之外，还能够开发出成型的六西

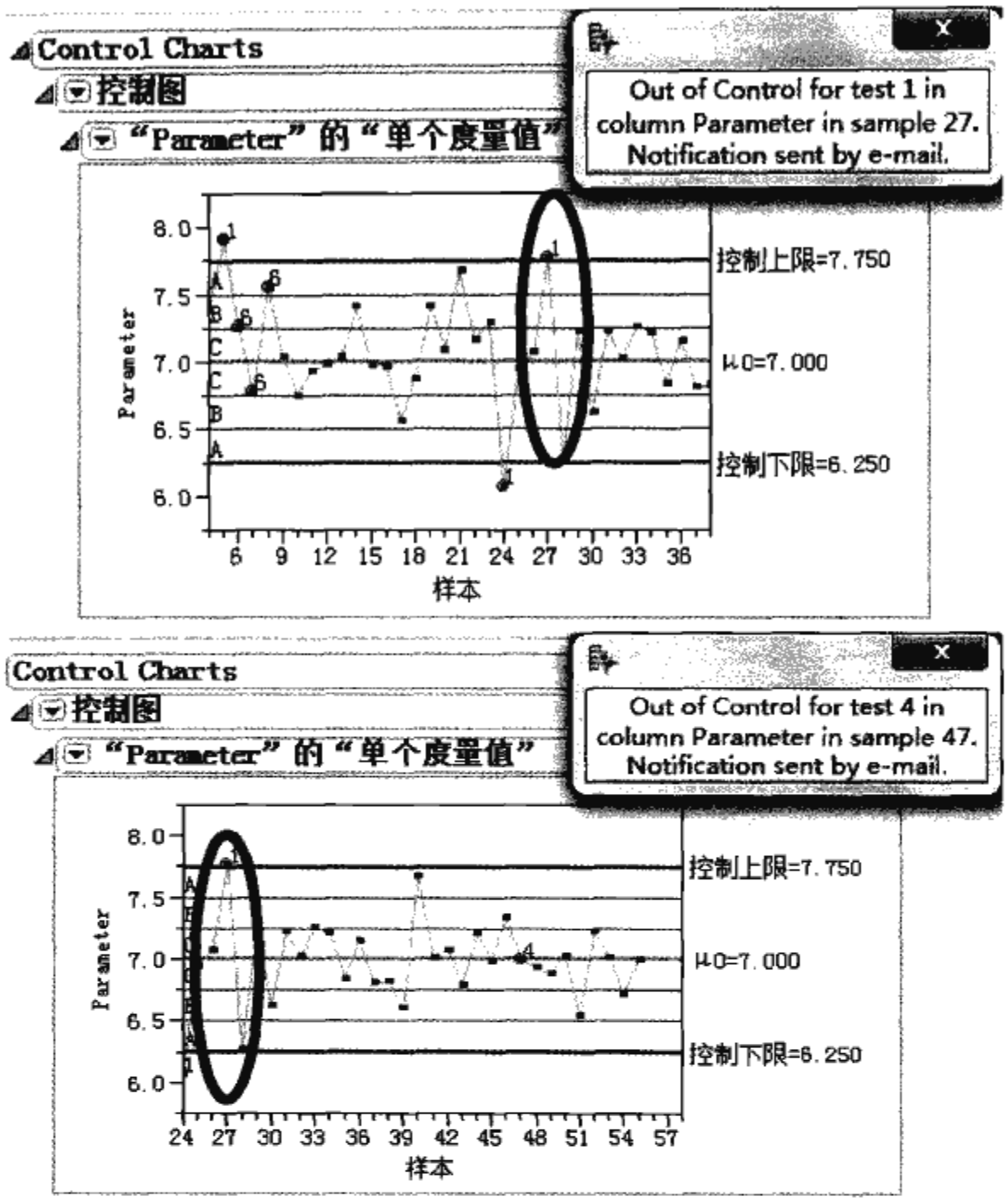


图 41　在线过程控制图

格玛项目模板，用于指导一大类六西格玛项目的进行，提高六西格玛成功经验的推广效率。

在图 42 中展示了一个完整的六西格玛改进项目的实施过程，可以随意对其中的文本进行编辑，或者将图形植入这个项目报告，甚至可以通过添加按钮，在报告中重新回顾所有的数据分析过程。具体的实现过程可以查看 JMP 的帮助文档和相关学习教材。

在这里，还推荐使用一种工具一雷达图对项目成果进行评价，它可以清晰明了地展示不同项目在各个评价维度上的优劣，以便使用者寻找进一步改进的方向。图 42 是根据 JMP 工作表 Radar Plot 提供的数据，运用 JMP 脚本语言进行简单编写后得到的图形。

打开 JMP 工作表中 RadarPlot 数据表后，从 "▼（第二个 Radar Plot 前）→运行脚本" 路径，选择 "Fab" 进入 "Label"，选择 "其他变量" 进入 "Y，Columns"，点击 "确定"，得到图 43。

记录: Six Sigma Tablet Manufacturing - JMP

jmp

Visual Six Sigma: Secondary Tablet Manufacturing

定义

- 药片以批次为单位进行生产，每个批次均在生产线的终端接受检验，以确定是否放行。
- Dissolution（溶出度）是确定该药片能否成为合格药品的重要标准。
- 那么，现状如何呢？
- 打开数据源： Integrated Tablet Manufacturing Data
  Baseline Process Capability
- 不合格率很高，16%批次的Dissolution没有达到溶解度放行要求。Cpk为0.27，仅相当于"2.3 sigma"，这肯定不是一个"6 sigma"流程。
- 第一步是绘制流程图并标示潜在因素：

▷ 流程图

Next

测量

- 整合Dissolution（溶出度）和流程图中所标示的潜在因素的历史数据
- Dissolution（溶出度）是一种破坏性测量，传统的 Gauge R&R方法不适用。

Next

▷ 分析
▷ 改善
▷ 控制

图 42　六西格玛改进项目展示器

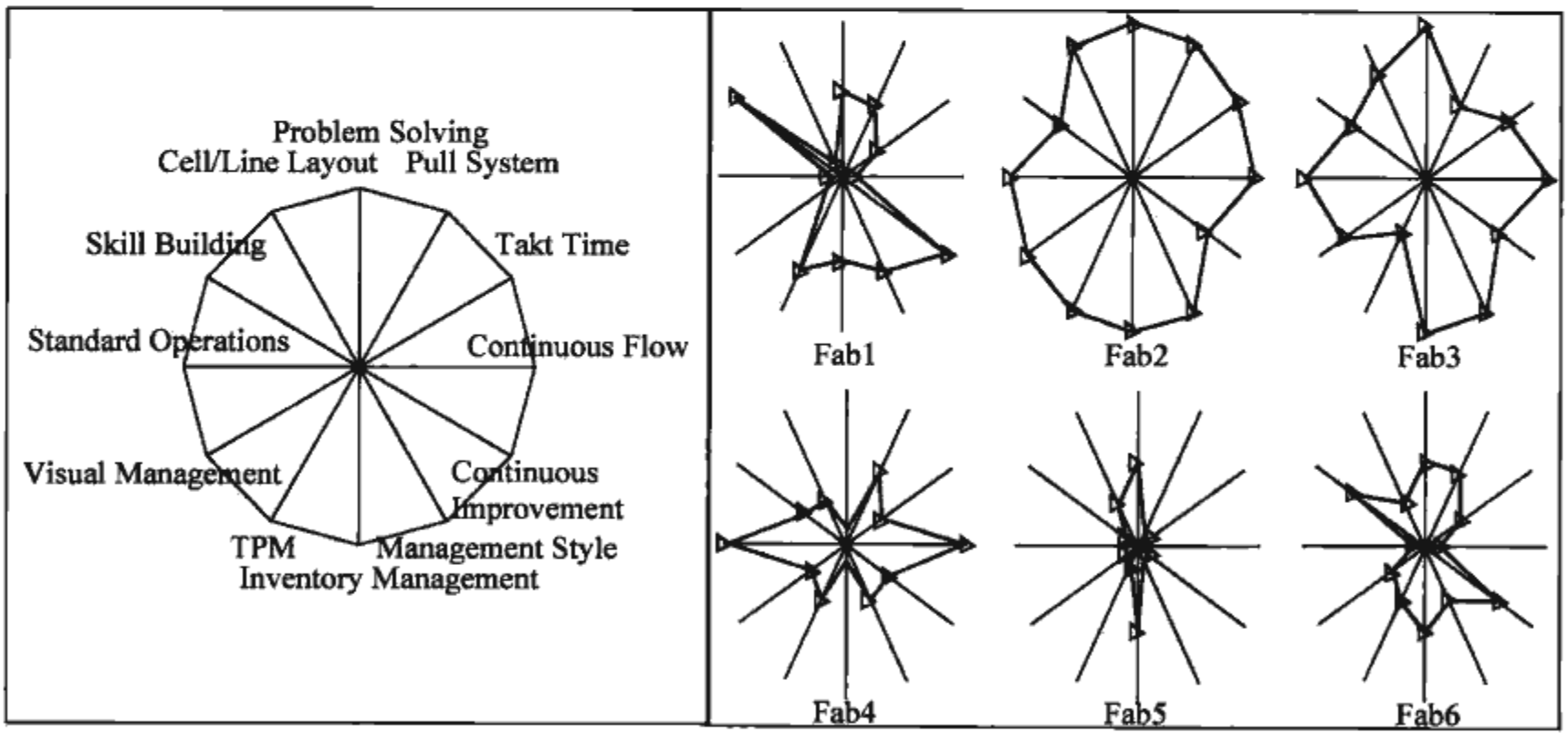


图 43　雷达图

在图 43 中的左侧可以直观地看到本案例中，对于精益六西格玛实施效果的评估共分为 12 个维度，包括 Skill Building，Standard Operations 等。图 43 中的右侧是 6 个工厂的具体实施效果评价，可以轻松发现 Fab2 在各项指标中表现都较优异且总体发展较为均衡，而 Fab5 在 Problem Solving，Cell/Line Layout 和 Inventory Management 三项指标外的其他方面中几乎没有什么表现。这样一目了然的绩效评估可以帮助质量或者运营改善部门轻松了解各工厂实施状况，并且为下一步的改善和提高指明方向。

六西格玛绿带手册

内容简介

经过20多年的发展与演化，六西格玛管理已成为国内外许多知名企业的持续改进经营战略，并为企业带来了显著的经济效益。六西格玛黑带和绿带是企业实施六西格玛管理的主力军。相对于黑带而言，绿带不需要掌握过于复杂的六西格玛理论和工具，更容易吸引多数员工参与，而且由于绿带直接分布在生产和管理的一线，培养一支高素质的绿带队伍对于六西格玛理念自上而下贯彻和持续推进起着关键作用。

本书针对中国质量协会六西格玛绿带注册考试编写，梳理了六西格玛绿带知识体系，主要包括六西格玛项目管理、DMAIC各阶段的主要工具方法、六西格玛设计等，并将精益知识融入六西格玛的DMAIC流程，更方便绿带学员在实践中综合使用精益和六西格玛的工具解决问题。除介绍MINITAB软件的操作，附录部分提供了JMP统计软件使用介绍。本书不仅可以作为中国质量协会六西格玛绿带注册考试的辅导教材，也可作为企业内部的六西格玛培训用书。

人大经管图书在线：www.rdjg.com.cn

策划编辑　黄　佳
责任编辑　胡志敏
版式设计　赵星华
封面设计　*知行非远*

ISBN 978-7-300-13287-7

ISBN 978-7-300-13287-7
9 787300 132877 >

定价：59.00 元