

过程能力分析 与评价研究

The Study on Process Capability
Analysis and Assessment

杨剑锋 著



化学工业出版社

过程能力分析与评价研究

The Study on Process Capability
Analysis and Assessment

杨剑锋 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书针对实际生产过程中越来越多的非正态过程、时变过程等难点和新情况,运用统计学的转换模型、数学推导、仿真等方法,研究了不同过程的输出分布特征、运行机理和规律,及相应模型,提出了针对不同情况的分析方法。主要的研究内容包括:对于未知分布的过程,通过不同分布类型、参数和样本含量组合的仿真,确定了最优的过程能力指数 Bootstrap 置信下限的计算方法;研究了 Taguchi 过程能力指数与合格率的函数关系;针对偏态分布过程能力分析,提出了基于比例赋权方差 (SWV) 方法的过程能力指数;针对特定的非负零界的偏态过程,研究运用 Box-Cox 幂转换模型的数据转换的处理方法;对于线性偏离的时变过程,确定了输出合成分布的概率密度函数族及相应的分析方法;对自相关特点的时变过程,基于时间序列理论确定了不同自相关时变过程下抽样方案和样本含量的影响和过程能力分析。研究了过程输入对过程能力分析的影响。基于 DEA 排序模型进行过程的水平比较和评价方法。

图书在版编目(CIP)数据

过程能力分析与评价研究/杨剑锋著. —北京: 化学工业出版社, 2008.5
ISBN 978-7-122-02623-1

I. 过… II. 杨… III. 化工过程-研究 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 063096 号

责任编辑: 徐雅妮 操保龙
责任校对: 关雅君

装帧设计: 任仲信

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 化学工业出版社印刷厂
720mm×1000mm 1/16 印张 7¼ 字数 138 千字 2008 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 29.80 元

版权所有 违者必究

前 言

对组织进行过程连续改进是现代质量管理的核心思想,过程能力分析和评价是连续改进的重要一环。过程能力分析与评价是一种重要的统计质量控制技术。作为全面质量管理和 6Sigma 质量改进工具在制造业和服务业都得到了广泛的运用,为提高企业的质量管理、质量控制和质量改进的水平发挥了巨大的作用。通过过程能力分析和评价可以了解过程运行状况、确定改进方向和评价改进成果,从而达到减小和抑制过程波动的目的。

本书是在国家杰出青年科学基金项目“质量管理”(70125004)、国家自然科学基金委资助项目“从基本标准到先进标准体系的实现理论和技术研究”(70072029)和“时变离散过程质量控制实现技术及性能评价”(70572050)的框架内,对过程能力分析和评价的一些难点和热点问题进行了深入研究和探讨。

本书的研究主要集中在以下几方面。

1. 过程能力指数的理论基础和统计特性

从新旧两种质量损失函数的角度研究了几种基本过程能力指数的定义和理论基础,分析比较了几种指数的关系、区别以及与分布特性之间的关系。指出过程能力指数的本质反映了对质量损失理解和质量目标的不同,即合同要求或卓越质量,并提出质量损失指数的概念。针对大量难于确定过程输出分布形式的实际过程,研究了采用非参数的 Bootstrap 方法估计过程能力指数的置信下限,使用 MATLAB 编写了过程能力指数的几种 Bootstrap 置信下限计算程序。以 C_{pk} 为例,对不同分布类型、参数和样本含量的组合进行了大量仿真,确定了不同样本含量下最优 Bootstrap 置信下限的计算方法。针对质量控制人员最关心的过程能力指数的重要特性——与合格率的关系,在讨论 C_p 及 C_{pk} 与合格率关系的基础上,深入研究了 C_{pm} 及 C_{pmk} 等 Taguchi 过程能力指数与合格率的关系,建立了对应的函数,从而促进了其在连续过程改进中推广。

2. 偏态分布过程的能力分析与评价

传统 SPC 和过程能力分析建立在过程输出服从正态分布的假设上,当过程输出不服从正态分布时,如何准确进行过程能力分析与评价一直是该领域的难点。本书在总结偏态过程能力分析方法的基础上,从两个方面进行了研究。针对化工、制药等流程性行业中常见的具有非负零界特点的偏态过程,研究了基于 Box-Cox 幂转换模型的过程能力分析的数据转化方法。针对用于偏态过程的 WV 过程能力指数所存在的统计缺陷,本书结合 SWV 方法和 Clement 偏态过程能力分析的思想,提出了 SWV 偏态过程能力指数。

3. 时变过程的过程能力分析

由于生产技术的多样性和自动化生产技术的发展,越来越多的过程输出具有时变性,过程能力分析中的时变性研究逐渐为学术界所重视。本书研究了两类具有典型时变特性的过程能力分析。以刀具磨损等情况为背景,针对不可消除的系统因素导致长期过程输出分布均值发生漂移的周期调整过程,分析了过程输出的合成分布特征,并建立了以调整系数为变量的概率密度函数族及其标准形式。在此基础上,提出过程性能计算公式,并分析比较了新的指数形式与传统公式的差别。针对自动化生产导致的越来越多的自相关过程,基于时间序列理论中的稳定随机过程模型,通过仿真方法研究了自相关过程的过程能力分析问题的。

4. 过程输入对过程能力分析的影响

传统的过程能力分析没有考虑过程输入对过程能力的影响。事实上,过程输入的波动能够以某种方式传递到过程输出。本书将过程输入的影响引入到过程能力分析中,分析了过程输入与输出可能存在的关系,并通过建立了线性和指数型(非线性)过程波动传递模型研究了过程输入对过程能力的影响。首次研究了非线性过程波动传递模型下的过程输入对输出影响的分布形式以及方差传递关系。

5. 过程能力评价向过程性能综合评价的扩展

过程能力是属于狭义质量的范畴,而过程性能(或效能)则是广义质量的范畴。为更好进行过程的连续质量改进,本书将过程能力评价扩展为过程性能的质量、效率综合评价,使用数据包络分析(DEA)方法进行多过程综合性能的水平比较。此外,讨论了基于DEA排序模型的效率值和松弛变量指导过程改进和调整的方法。

本书仅仅是我在质量管理的研究和实践中,有关过程能力分析和评价这一质量控制和改进工具的部分研究和心得,不当之处敬请各位读者指正。也希望本书能够对中国和国际质量管理的发展添一块砖,对连续质量改进工具的实际运用具有促进作用。

值此书出版之际,我要衷心感谢徐济超教授、刘玉敏教授的悉心指导,感谢张黎教授、贺金凤教授、王海宇博士、常广席博士等朋友们的无私帮助!这里特别感谢我的家人们,本书的完成是我们共同的结晶!本书的出版受到了郑州大学商学院的资助,在此对商学院的领导、老师们表示诚挚的感谢!

编者

2008年2月于郑州大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 过程能力分析概述	1
1.1.1 过程和质量波动	1
1.1.2 过程能力及其评价指数	3
1.1.3 过程能力分析及其步骤	5
1.1.4 研究的背景及意义	6
1.2 过程能力分析的发展和研究现状	7
1.2.1 过程能力分析及其统计特性	8
1.2.2 非正态过程的能力分析	9
1.2.3 具有时变特性的过程能力分析	10
1.2.4 过程输入对过程能力的影响	11
1.2.5 多变量过程能力分析	11
1.2.6 相关的过程质量研究	12
1.3 本书的主要内容	12
第 2 章 过程能力指数及其统计特性分析	14
2.1 基于两种质量损失函数的过程能力指数	14
2.1.1 两种质量损失函数	14
2.1.2 几种基本过程能力指数及相互关系	15
2.1.3 几种基本过程能力指数的比较	17
2.2 使用 Bootstrap 方法的过程能力指数估计	21
2.2.1 过程能力指数的点估计与置信区间	21
2.2.2 过程能力指数的 Bootstrap 置信区间	23
2.2.3 过程能力指数 Bootstrap 置信下限的选择	27
2.3 过程能力指数的合格率估计	33
2.3.1 过程能力指数 C_p 、 C_{pk} 与合格率的关系	33
2.3.2 过程能力指数 C_{pm} 与合格率的关系	35
2.3.3 过程能力指数 C_{pmk} 与合格率的关系	38
2.3.4 C_{pk} 、 C_{pm} 、 C_{pmk} 与合格率关系的比较	38
2.4 本章小结	39

第 3 章 偏态分布过程能力分析	40
3.1 非正态分布对过程能力分析的影响及分析方法	40
3.1.1 非正态分布对过程能力分析的影响	40
3.1.2 Clements 分位点方法	41
3.1.3 偏态数据的分布模型拟合和正态性转换	43
3.1.4 偏态过程能力指数	45
3.2 基于 Box-Cox 幂转换模型的偏态分布过程能力分析	45
3.2.1 Box-Cox 幂转换模型	46
3.2.2 过程能力分析中 Box-Cox 幂转换模型性能分析	46
3.2.3 基于 Box-Cox 幂转换模型的过程能力分析	48
3.2.4 使用 Box-Cox 幂转换模型的分析实例	49
3.3 基于比例赋权方差方法的偏态过程能力指数	50
3.3.1 赋权方差 (WV) 过程能力指数的缺陷	50
3.3.2 比例赋权方差 (SWV) 方法	51
3.3.3 SWV 偏态过程能力指数	52
3.3.4 SWV 过程能力指数与 WV 过程能力指数比较	55
3.3.5 SWV 过程能力指数的实际运用	57
3.4 本章小结	59
第 4 章 具有时变特性过程能力分析	60
4.1 周期调整过程的能力分析	60
4.1.1 周期调整过程的过程能力分析	60
4.1.2 输出分布均值线性漂移过程的分布特征	62
4.1.3 分布均值线性漂移过程的能力分析	64
4.1.4 周期调整和性能优化	66
4.2 自相关过程能力分析	66
4.2.1 自相关过程的特点及模型	67
4.2.2 自相关特性对过程能力分析的影响	70
4.2.3 自相关过程的能力分析	73
4.3 本章小结	76
第 5 章 过程输入对过程能力分析的影响	78
5.1 过程波动传递模型	78
5.2 线性过程波动传递模型中输入对过程能力的影响	79
5.3 非线性过程波动传递模型中输入对过程能力的影响	80

5.4	方差传递关系对过程能力改进的作用.....	86
5.5	本章小结.....	87
第 6 章 过程性能的综合评价及改进		88
6.1	数据包络分析 (DEA)	88
6.2	过程性能综合评价的指标选择.....	90
6.3	过程性能的综合评价方法.....	91
6.4	过程综合性能的改进.....	94
6.5	本章小结.....	95
第 7 章 结束语		96
7.1	内容总结.....	96
7.2	研究展望.....	98
附表		99
参考文献		100

第 1 章

绪论

1.1 过程能力分析概述

21 世纪对世界范围内所有企业来说都是一个快速变革的时代,对管理者和员工来说也是一个挑战的时代。世界范围内的市场和经济竞争加剧,各种新技术、信息体系的发展和快速的变革使组织和管理者应接不暇。随着外部环境的变化,组织内部的变化也随之发生。管理理论、管理实践、雇员的作用以及组织结构等都发生着迅速改变,而最具意义的变革也包括质量管理活动的推行,比如 6SIGMA 管理方法论等。管理者和研究者对质量和生产力的关系给以越来越多的重视。美国著名质量管理专家 J. M. Juran 指出,20 世纪以“生产率的世纪”载入史册,未来的世纪将是“质量的世纪”^[1]。质量与时间和成本一样成为企业生存与发展的主要制胜因素^[2]。产品和服务的高质量,操作过程的低成本、生产过程的高效率,顾客满意的新理念,从而使企业具有更大的竞争力^[3]。但是,质量管理活动不仅仅需要质量管理的思想、方法和手段,更需要有各种质量工程技术的支持,特别是统计质量控制(SQC)技术^[4]。

统计质量技术是根据产品质量的统计观点,运用数理统计学的方法,对实际生产制造过程中的质量特性数据进行收集,分析和研究其统计特性,从而了解、预测和监控过程的运行状态,发现和排除质量问题,从而达到控制、改进产品质量的目的^[5]。统计质量控制技术已经成为一个庞大的方法体系,包括了从产品设计、产品实现、生产过程的分析和监控、产品检验等各个环节的统计技术和方法。而所有这些统计技术和方法的基础都是质量工程的理论支柱——波动理论。

1.1.1 过程和质量波动

国际上先进的质量管理理念已经从最初的质量“符合性”^[6]发展到必须在组织的所有过程中减少质量波动的连续改进质量观念^[7]。顾客的需求和期望——特别是质量、价格和准时——成为改进的一部分。连续过程质量改进则是新的质量管理思想的核心。过程质量改进可以简单描述为,过程波动和完成时间的减少。人们可以通过使用过程改进工具逐步达到质量的最高目标——零错误,零缺陷。

过程是一个基本概念,任何事物都可以用过程的概念加以分析。过程是一系列

关联的任务或活动。每一个过程都有一个输入（供应商）和输出（顾客）。过程可以是内部的，或与外部顾客或供应商相联系。2000 版 ISO9000 标准的最重要的飞跃就是以过程的概念描述质量管理的全过程。组织的运作是通过过程来完成的。系统的识别和管理组织所使用的过程，特别是过程之间的相互作用，被称为“过程的方法”^[8]。

Shewhart 在 20 世纪 30 年代发现，一台被精确地安装的名牌高精度新机器用于重复切削同样材料、同一尺寸直径的工件，但无法生产出同样尺寸直径的工件。即便非常精密，每一个工件的直径也都将围绕一些平均尺寸发生变化，这些变化就是过程的波动（Variation）。由于随机干扰因素是客观存在的或难以控制的，所以由此产生的波动也是不可避免的。Taguchi 认为造成产品功能波动的原因可分为三类^[9]：

- 外部干扰——外界环境变化引起的干扰；
- 内部干扰——内在因素变化引起的干扰；
- 随机干扰——各种随机性干扰原因，如人员、材料、设备、方法和环境（5M1E）等^[5]，由于自身存在波动而引起的干扰。

所以，即使是同一个操作者在相同的条件下生产出的产品，其质量特性的测量值也是不相同的。产品质量实际上取决于过程质量。过程质量控制就是应用过程的方法，通过对过程中各种影响因素的识别、分析和控制来实现产品质量的控制和改进^[10]。实施过程质量控制和改进的基本环节可以用 PDCA 循环描述，如图 1-1 所示。

对于过程质量控制和改进而言，过程的质量规划阶段主要涉及质量功能展开（Quality Function Development, QFD）、质量计划工具（Quality Planning）、试验设计（Design of Experiment, DOE）等统计技术；质量实现和质量改进主要是通过设备、工艺等的实现和改进；分析和监测阶段主要涉及过程质量控制（Statistic Process Capability, SPC）^[11,12]、过程能力分析（Process Capability Analysis,

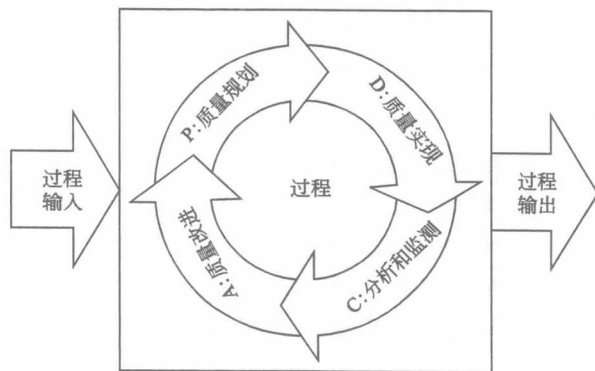


图 1-1 过程质量控制的 PDCA 循环

PCA) 和测量系统分析 (Measurement System Analysis, MSA) 等技术。其中, 过程能力分析是进行连续过程改进的最重要的分析和评价手段。

1.1.2 过程能力及其评价指数

随着工业进步和质量管理科学的发展, 过程能力的研究逐渐得到重视和发展。从 20 世纪 80 年代, 判断过程具有能力与否的理论框架被建立起来, 相关的过程分析技术和评价体系也得到迅猛发展^[13]。

过程能力分析最早在 1989 年开始被 Ford 和 Motorola 所采用^[14]。而后, 在 1991 年 AIAG 制订的汽车行业质量管理标准 QS9000 中, 过程能力分析成为对内部生产体系和供应商进行评估的一个重要方法, 使之在全球工业界得到巨大的推广, 在促进质量保证、降低成本以及提高顾客满意度等方面发挥了巨大的作用。在美国波音公司通过几十年的质量管理实践总结出的, 以连续质量改进的管理哲学和理论为基础, 以统计控制技术为核心的先进质量管理体系 (Advance Quality System, AQS) 中, 过程能力分析也被作为过程质量波动研究的重要工具^[13]。由于过程能力分析能够更合理、更全面地分析和反映系统和随机因素对过程输出的影响, 过程能力分析作为 6SIGMA 管理方法论中的核心工具之一, 成为过程质量的测定和改进的重要工具^[15]。Deleryd 曾总结了过程能力分析的 13 种用途^[16], 其中, 最核心功效在于它是组织进行过程评价和改进的基础。

任何过程都必然存在输出, 无论其输出的样本多少, 都存在确定的分布^[17], 只是人们是否能够发现而已。由于过程输出的分布形式和机理的不同, 过程能力分析和评价方法的特点也是不同的。过程能力分析是通过统计学方法进行研究, 每一种指数都是对过程输出的期望值和方差等统计特性进行分析和比较的, 其分析的基础是数理统计学中相关的统计方法和分布理论^[18]。为充分理解过程能力分析的含义, 必须对概率论和数理统计方法有基本理解。

产品质量的波动大小是过程的内在能力所决定的, 它是构成过程的 6 大要素 (5M1E) 作用于产品质量的综合反映^[5]。波动大小通常用过程处于稳定状态的过程输出所形成分布的标准差 σ 来表示, 它也是过程能力的度量基础。通常人们使用质量特性分布的 6 倍标准差 (6σ) 来表示过程能力, 如图 1-2 所示。因此, 过程能力代表了过程输出所能达到的质量水平。任何给定的过程输出或产品, 都有一个或多个质量特性, 通过测量、收集这些质量特性的数据可以分析过程的能力, 反过来, 通过过程能力分析的结果可以对过程进行改进^[19]。

为便于说明, 在本书中 USL 、 LSL 表示上、下公差限, M 和 T 分别为公差中心和设计目标值, μ 和 σ 分别为过程输出分布的均值和标准差。

准确地说, 进行过程能力分析的目的在于研究过程输出满足技术或其他需求 (通称顾客声音) 的能力^[13]。为直观地反映过程能力评价的结果, 引入了的无量纲单指数的度量评价指标——过程能力指数 (Process Capability Index, PCI), 它为衡量实际的过程输出满足质量需求的能力提供了一个易于理解的术语, 其总的形式可

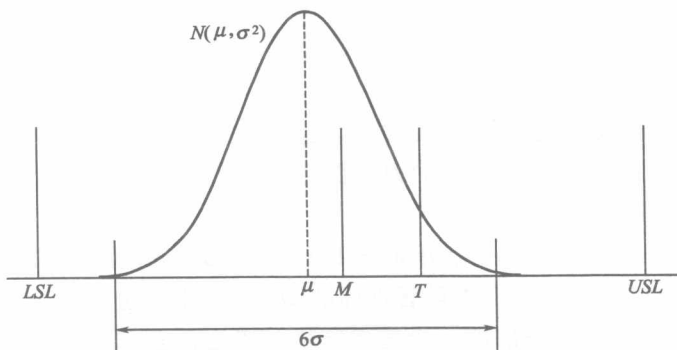


图 1-2 过程能力示意

以表示为：

$$PCI = \frac{\text{过程输出的技术和其他需求（顾客声音）}}{\text{过程输出实际的散布}}$$

过程能力指数解决的是如何简洁地表述在完成过程能力分析之后发现了什么。正是对简洁的寻求才导致了过程能力指数的创立和使用，这也是出于建立一个简单的、数字化的、无量纲的评价指标的需求。有了这样一个无量纲的评价指标，企业就可以建立数字化目标，也能够对不同产品和过程的表现进行判断和分析。像生活中许多事一样，信息越简单，效果可能就越好。也就是说，过程能力指数试图提供一个过程满足质量特性的特定需求的能力的单指数评价指标^[19]。

但是，过程能力分析并不仅仅是计算一个指数，它还包括许多内容。过程能力分析的运用几乎和控制图和监控一样悠久。过程控制建立起来以后，就要评估其能力。评估实质上是根据工程需要，比较数据或模型的分布，特别是工程规范。如果认为过程是有能力的，那么过程就要继续运用统计过程控制方法，相反，如果认为过程没有能力，即它所生产的是无法接受的、不符合规格的产品，那么这个过程就要进行改进，以获得一个可以接受的、有能力和可控的过程输出。过程能力分析的核心是通过分析了解过程能力的状况，以过程能力指数这一量化方式为决策者提供简洁的判断依据。事实上，过程能力指数已经摩托罗拉公司、通用电器公司、德州仪器公司、惠普公司、施乐公司等世界最优秀的企业均采用“6σ”控制方式，即要求 $C_p = 2$ 和 $C_{pk} > 1.5$ ，成功地实施了 6SIGMA 质量管理战略^[20]。

过程能力指数在国内也被称为“工序能力指数”，这一提法过于狭窄。“Process”不仅是生产过程，也包括其他过程，如测量、服务、管理等过程，是组织的全方位过程管理。因此，过程能力指数可以并且已经超出了生产过程的范畴，扩展到了其他领域，国外一些学者将过程能力指数用于评价服务过程能力。在全球生产服务一体化的新条件下，应与国际一致，统称为“过程能力指数”。这样更易于对过程能力指数的准确理解，并广泛运用于各种过程能力评价领域。

1.1.3 过程能力分析及其步骤

经过几十年的发展,无论从理论到实践,过程能力分析的理论框架围绕其分析结论——过程能力指数被建立起来。过程能力分析过程是一个系统过程,包括:①确定过程处于统计控制状态和②估计过程能力,然后和公差比较,得到相应的结果(计算过程能力指数)。

传统上,为准确地进行过程能力分析并得到适当的结果,必须满足以下的一些条件^[21]才能进行:

- 合格的测量装置;
- 过程处于统计过程控制状态;
- 连续的数据收集;
- 使用置信区间;
- 几种过程能力指数同时运用;
- 过程输出分布的检验。

基本的过程能力分析过程包括了许多步骤,而在实际过程能力分析中,人们往往并没有做到这些,只是简单地计算过程能力指数。过程能力分析的步骤可以通过流程图表示,如图 1-3 所示。

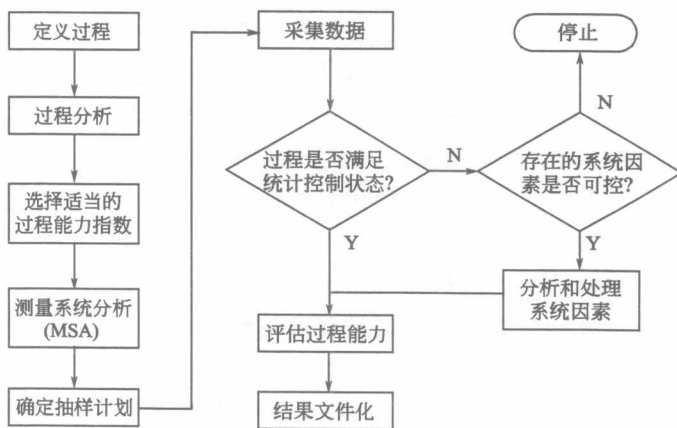


图 1-3 过程能力分析流程

为提供一个清晰完整的分析过程,对图 1-3 进行说明如下:

① 当需要对过程进行能力分析时,需要进行对过程进行定义,明确分析目的。需要注意的是,任何过程的产品或输出都应确定一个或几个关键特性,而没有必要对所有的质量特性进行分析^[22]。

② 过程分析是过程能力分析最重要的步骤之一。进行过程分析的目的是了解过程的本质和特性,了解生产时间、计划、调整等相关情况,确定过程是否存在系统性的影响因素以及输入输出的关系、测量设备与被测质量特性的关系,等等。

③ 测量系统分析 (MSA) 对于整个统计过程技术来说都是重要的,因为,统

计过程技术的基础在于数据，测量误差直接影响了统计过程技术的使用。测量也是一个过程，其输出也存在波动。测量系统分析主要是偏倚和 GR&R 的分析，学者们已为此进行了大量的研究^[23,24]，而且，AIAG 在 QS9000 中也对此进行了规范^[25]。

④ 在进行抽样之前，应根据过程分析的资料确定包括抽样间隔、样本尺寸、抽样时间等在内的抽样计划^[26,27]。抽样计划必须使测量数据能够完整、正确地反映过程输出。由于过程能力分析的前提是过程输出处于统计控制状态，因此，在抽样计划的制定应同时考虑控制图的采样。

⑤ 数据采集应按照计划进行，并注意诸如测量数据的分布特性、相关性、过程存在周期调整等因素对采样的影响^[28]。

⑥ 判断过程是否满足统计控制状态可以选用适当的控制图技术。控制图技术与过程能力分析是连续过程改进的两个部分。其关系如下图所示。

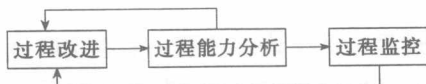


图 1-4 连续过程改进中过程能力分析与过程监控的关系

⑦ 当过程输出没有处于统计控制状态，就需要判断和分析过程中存在的系统因素是否可控。如果存在不可控系统因素，则表明过程不稳定需要对过程进行检查分析查找干扰原因，过程能力分析必须停止。如果是可控系统因素，如刀具的磨损、过程输入的影响、相关性等情况，则需要对数据进行分析和处理。

⑧ 对于存在不可消除的系统因素的数据处理，首先因考虑的方法是从数据中分离出它们，然后分别按照具体情况进行分析处理。

⑨ 评估过程能力就是根据数据进行过程能力指数的计算，并与判断准则进行比较^[29]。指数计算涉及到参数估计，必须明确估计方法的适用性，以及考虑测量系统的波动对过程能力判定可能的影响。需要注意的是，在提供指数估计的同时，应同时计算相应的置信区间以及假设检验，单个指数值并不能完全反映过程的能力^[30]。最终的评估结果应记录并保存，除了相关的估计信息以外，也应提供正态性检验、样本条件等信息，以便为进行的连续改进提供依据。

1.1.4 研究的背景及意义

尽管在国际质量学术界对过程能力分析的理论和方法的研究已经有了近 40 年的历史，在生产制造领域的运用实践中也有了 20 年余的历史。但是，不论是理论还是实际运用方面，过程能力分析都存在着大量的难点问题需要进行深入研究，同时，随着自动化生产过程的发展，过程能力分析和评价也面临着许多新的挑战。比如，建立新的过程能力指数以适应许多特定的实际情况，如非正态分布的情况；一些指数的统计特性及其分析方法，特别是非参数分析方法的研究等；多品种小批量

生产时所需要的数据整合等数据的预处理方法,等等。尽管过程能力分析是以过程能力指数为核心的,但是,过程能力指数作为传统统计质量控制技术的一部分也存在着致命的缺陷,即没有充分考虑过程输入和时变性因素的影响。因此,我们认为,过程能力分析的研究有必要进一步进行拓展,深入研究影响过程能力的各种因素,研究新的方法和评价标准。比如,存在均值漂移和自相关情况等具有时变特性的过程如何进行能力分析,以及这些时变因素对过程能力分析的影响;过程能力分析中过程输入输出的波动传递的影响等领域,还没有得到深入有效的研究。总的来说,国际上有关的过程能力分析和评价的研究通常仅将重点集中在单个指数的研究,其广度和指数的适用性也有待发展。

我国质量学术界在过程能力分析和评价领域的研究还很不系统,在许多方面甚至未有涉足。许多研究成果是在国外研究成果的基础上的借鉴和讨论,有待进一步深入和创新。同时,由于生产和服务的全球化也使得国内企业在过程能力分析和评价方面的实际运用需求非常迫切。因此,对过程能力分析和评价进行综合的和系统性的研究具有重要的理论和现实意义。

本书在回顾过程能力分析的基本方法和理论的基础上,针对生产中的一些实际情况,研究和改进了过程能力分析和评价的理论和方法,并提供了切实可行的实现技术,从而达到更准确地分析和评价过程能力和连续质量改进的目的,以便促进其在质量管理与控制领域的广泛应用。本研究提出的方法论能够更好地提高过程能力分析和评价的准确性,从而指导企业和其他组织的过程连续质量改进活动,对提高企业的产品质量具有重要的意义。

1.2 过程能力分析的发展和研究现状

过程能力分析的目的是通过分析对过程能力是否满足要求做出判断,其相关的理论和方法是围绕着如何准确恰当地做出这一结论,即选择适当的过程能力指数并对结果进行判断。因此,过程能力分析研究在某种意义上是围绕着过程能力指数的构造、参数估计、统计特性和适用性进行的。但是,过程能力指数并不是万能的,过程能力分析并不仅仅是选择和计算一个指数,还包括了许多其他相关内容,如过程的稳定性、测量数据的分布特征、对过程输出的影响因素分析,输入和输出的关联关系,等等。

自从质量管理大师 Juran 在 1974 年最早提出过程能力指数的概念以来,有关过程能力指数的研究已超过 30 年。由于 20 世纪 80 年代以后的“质量革命”和 90 年代的 6SIGMA 管理在全球顶尖公司的推行使得人们重新对过程的重要性有了新的认识,带来了过程能力分析理论和应用方法的飞速发展。目前已有 20 余种不同形式的单变量过程能力指数和 7 种多变量过程能力指数^[31]。有五本讨论过程能力指数的书籍和几百篇有关过程能力指数的研究论文,以及许多相关的应用软件。而

且,在美国和欧洲分别设立了过程能力研究所,从事专业的研究和咨询工作。

从总体上说,目前关于过程能力指数的研究主要有两条主线:①在不同环境下的过程能力指数及其估计值的统计特性的研究;②在特定的环境中建立新的过程能力指数以便更好地描述过程^[31]。随着对过程能力研究的深入,一些学者认为,过程能力分析并不是简单的过程能力指数的计算,单指数的结论并不能全面地反映过程能力^[32]。此外,传统的过程能力分析只涉及到对过程输出的统计分析,忽略了过程输入对过程能力分析的影响。在实际生产过程中,不满足传统的统计过程控制的过程越来越多,传统的过程能力分析的局限性也越来越大,随着自动控制技术等引入质量控制领域,在过程能力分析中也开始引入时间序列、方差分析等多种技术。此外,过程能力指数的运用也得到了进一步的发展,不再仅仅局限于对过程能力的评价。

结合本书的研究范围,对目前过程能力分析的发展和研究现状从几个方面进行简要概述。

1.2.1 过程能力分析及其统计特性

生产领域中的过程能力概念最早产生于日本,他们使用了能力比率(Capability Ratio, CR)对过程能力进行评价。目前工业界普遍使用的过程能力指数的概念是Juran在1974年最早提出的,它也是最基本的过程能力指数 C_p ^[33]。尽管从1974年提出了过程能力分析方法和过程能力指数的定义,但之后的10余年在学术界仅有少量的论文进行讨论。从20世纪90年代开始,在国际质量学术期刊上出现了大量的相关论文,使得过程能力指数的研究取得了长足的发展。构造了基于不同的思想和适用于不同情况的过程能力指数形式、相关的统计特性和分析方法。

Kane指出, C_p 不能反映输出分布的均值变化,提出了考虑均值偏离公差中心的指数 C_{pk} ^[34]。根据Taguchi质量损失函数^[35],Hsiang和Taguchi将过程输出偏离目标值的质量损失引入过程能力指数中,提出了 C_{pm} ^[36~38],也被称为Taguchi过程能力指数。Chio和Owen基于 C_{pm} 提出了 C_{pmk} ^[39]。一些文章讨论了几种基本指数之间的数学关系^[40,41]。Vännman引入了一个通用的过程能力指数 $C_p(u, v)$,该指数可以通过选择不同的 u 和 v 构造合适的指数,并且可以表示 C_p 、 C_{pk} 、 C_{pm} 、 C_{pmk} 四种基本指数,并认为对于汽车工业 $C_p(0, 4)$ 是一个实用的指数^[42]。Spring也同样考虑了加权 w 的指数 $C_{pw} \equiv C_p(0, w)$ 作为通式^[43]。以上都是过程能力指数的基本形式,其他过程能力指数基本上都是从这几种基本形式的变形。

通常情况下, $T=M$,但有时也会出现 $T \neq M$ 的情况及非对称的情况(如图1-2所示),Boyles等学者对这些情况下的过程能力指数进行了研究^[44~47]。除了这些用于双侧公差限的过程能力指数以外,还有单侧的 C_{pl} 和 C_{pu} ^[33,44]。

由统计学知识可以知道,过程能力指数 C_p 与产品的合格率存在对应关系^[48]。当过程输出服从正态分布时, C_p 和 C_{pk} 可以决定合格率并为实际工作者提供了表格^[5]。研究发现,与 C_p 相比 C_{pk} 对合格率的影响更大,可以忽略 C_p ,直接通过

C_{pk} 确定合格率的下限,并通过 C_p 和 C_{pk} 建立过程能力图^[49]。

所有的过程能力指数,无论其形式如何,它们都依赖于参数(如 μ 、 σ 、 μ_3 以及其他参数),通常这些参数都是未知的,需要通过采样测量进行估计。因此,各种指数的统计特性问题一直是重要的研究方向。对于正态分布条件下的几种基本过程能力指数 C_p 、 C_{pk} 、 C_{pm} 、 C_{pmk} 的估计值的统计特性已经有了详尽的研究。通过数理分析的方法可以得到几种基本指数的估计值的分布和置信区间,研究表明, C_p 和 C_{pm} 的置信区间仅与样本容量有关^[34,38,39],而 C_{pk} 、 C_{pmk} 的置信区间则非常复杂^[50,51],不得不使用简化的近似值^[52]。此外,Boyles 还研究了非对称公差置信区间问题^[42,43]。这些研究也包括对估计式的偏离的研究,并给出了有偏估计的修正^[52,53]。通过研究几种指数估计值的分布和置信区间,提供了确定相应的抽样方法和样本容量的方法^[28,54]。由于指数估计值的渐进性质对样本容量的重要性,Chen 等进行了指数的渐进分布的研究^[55,56]。其他一些指数的估计值也得到了初步研究^[57]。

当测量数据不服从正态分布时,对指数的估计还没有准确地数理统计的方法。Franklin 和 Wasserman 最早提出使用 Bootstrap 方法研究过程能力指数的置信区间问题^[58],一些学者用这一方法进一步研究了非正态条件下的置信区间估计问题^[44,59,60]。

测量误差会导致测量分布发生变化,这方面的研究并不多。Mittag 等一些学者对测量误差与过程能力指数进行了分析并建立了测量误差与估计值之间的关系^[61]。Persijn 和 Van Nuland 研究了测量系统能力指数 MI 与过程能力之间的关系,并提出了 MI 对应于 C_p 的判断准则^[62]。他们的研究结论也反映在 AIAG 的新版 QS9000 标准的附件 MSA 中^[25]。Bordignon 和 Scagliarini 深入讨论了测量误差对 C_p 和 C_{pk} 的统计特性的影响^[63]。Majeske 和 Andrews 研究了测量波动与过程波动之间的函数关系,提出了测量系统能力和过程能力的判定准则及相互关系^[64]。最新的研究还有 Wilson 等讨论了在存在非标准测量误差的情况下如何评价产品的质量^[65]。

1.2.2 非正态过程的能力分析

传统的过程能力指数公式及其统计特性均是基于过程输出服从正态分布的假设建立的,显然这是一个很严格的前提条件。实际生产过程中存在大量已知或未知的的影响,这些影响的叠加导致过程输出服从一定的分布,这些分布并不总服从正态分布,有些过程输出呈偏态。在这种情况下计算的过程能力指数所得结论往往是错误。Gunter 指出,在非正态情况下,不能使用 C_{pk} ^[66~69]。English 和 Taylor 通过 Monte Carlo 仿真的方法研究了正态分布、三角分布、均匀分布和指数分布对 C_{pk} 的影响^[70],进一步证明了这一观点。Leung 等研究了非正态性对 C_{pm} 的影响^[71]。

如何解决不服从正态分布的过程能力分析已成为研究热点之一。为解决偏态分布过程的过程能力评价问题,Clements 最早提出用过程输出分布函数的 0.135%分