

SIX SIGMA TOLERANCE

DESIGN METHODS



六西格玛公差 设计方法研究

张志红◆著



电子科技大学出版社

SIX SIGMA TOLERANCE

DESIGN METHODS

六西格玛公差 设计方法研究

张志红◆著



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

六西格玛公差设计方法研究 / 张志红著. —成都: 电子科技大学出版社, 2009. 11

ISBN 978-7-5647-0195-6

I. 六… II. 张… III. ①公差—配合②技术测量
IV. TG801

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 177472 号

六西格玛公差设计方法研究

张志红 著

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产
业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 朱 丹

责任编辑: 朱 丹

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 中国核动力研究设计院印刷厂

成品尺寸: 146mm×208mm 印张 7.125 字数 182 千字

版 次: 2009 年 11 月第一版

印 次: 2009 年 11 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-0195-6

定 价: 30.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83208003
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

作者简介

张志红，博士，副教授，硕士生导师，博士后，佐治亚理工学院访问学者（2009年）。

2003年3月毕业于山东大学材料科学与工程学院，获得硕士学位，2006年4月毕业于天津大学管理学院，获博士学位。

2006~2008年天津大学机械工程学院博士后，2009年佐治亚理工学院（Georgia Institute of Technology）访问学者。

自2004年以来，在《机械工程学报》、《西安交大（英文版）》、《中国机械工程》等期刊以及国际会议上发表论文三十余篇，其中EI检索5篇。参与国家自然科学基金和社科基金项目三项，主持省级课题一项，参与多项省部级项目。

现担任山东经济学院资产评估教研室主任，讲授资产评估、企业价值评估、工程造价管理、建筑工程概论、证券价值评估等课程。

主要研究方向：质量工程；资产评估定量分析技术和方法。

序 言

六西格玛公差设计技术是六西格玛管理思想和公差设计技术相结合的设计优化技术，是在并行质量工程的思想指导下实现高质量产品设计的重要方法。六西格玛公差设计最早源于 Mike Harry 在 20 世纪 80 年代所做的开创性的工作，目前学术界在这一领域的研究还比较欠缺。但是，随着国内外越来越多的企业实施六西格玛管理，企业迫切需要六西格玛设计的理论和方法的指导。因此研究六西格玛公差设计技术，不仅具有重要的理论意义，同时具有重要的实践价值。

张志红博士所著的“六西格玛公差设计方法研究”是她在天津大学攻读博士学位期间所做的研究工作的总结，与传统公差设计相比，六西格玛公差设计融合了过程能力分析和公差设计技术，保证公差设计达到六西格玛质量水平。这一研究是通过应用实验设计技术，尤其是双响应 RSM 建模，将参数设计和容差设计集成在一起，随着统计技术和统计软件包的逐渐成熟和企业的广泛推广，基于 RSM 的参数设计和容差设计，不仅是必要的，而且是完全可行的。

本书对于从事公差设计、稳健性设计等方面的研究人员来说具有重要的参考价值，对于实施六西格玛设计的企业来讲，本书提供了实现六西格玛公差设计的具体指导。当然，我也衷心希望更多的有志于从事该领域研究的博士、硕士研究生在本书的基础上能够做出更高水平的研究成果。

作为张志红博士的导师，我非常高兴看着这本书能够出版，也希望她以此书为起点，在这一领域取得更具标志性的成绩。

何 楨

天津大学管理学院，教授、博导
全国六西格玛推进工作委员会 专家委员会主任

2009年9月

前 言

基于并行质量工程的思想面向六西格玛 (Design for Six Sigma, DFSS) 进行公差设计是六西格玛关键技术的难题之一, 如何解决这一问题本书的主旨所在, 目的是在产品开发的早期阶段有效地改进设计质量并降低成本。本书采用了基于响应曲面方法 (RSM) 的稳健优化方法作为六西格玛公差设计的技术支持, 构建了涵盖从产品到过程设计同时优化参数和公差设计的模型来实现上述目的。

本书首先介绍公差设计的一些基本理论和传统方法, 阐明并行质量工程的思想 and DFSS 的基本哲理及其实践模式。随后在技术方法上将六西格玛机械公差设计与实验设计 (DOE) 相结合, 利用变异系数和方差百分比对田口公差设计进行改进研究。在分析、利用 RSM 双响应进行并行参数和公差设计的必要性基础上, 基于 RSM 双响应模型构建了应用于各种设计情况的六西格玛并行公差设计模型, 基于 RSM 响应模型的最小过程方差置信域构建了面向噪声因子的并行参数和公差设计模型。针对 RSM 的中心复合设计——外切中心复合设计、嵌套中心复合设计和面心立方设计进行了比较、评价, 并给出了结合表实验设计的选择方法和望目特性稳健参数设计优化标准。最后, 利用实例对所提出的各种方法进行了分析、比较, 得到如下结论:

(1) 结合 DOE 改进的六西格玛机械公差设计和田口公差设计方法更适用、更合理, 过程能力指数为面向可制造性设计提供了更大的灵活性;

(2) 并行参数和公差设计比单独考虑参数设计或公差设计或者序贯设计所得到的方案更优、成本更低, 从而有力地证明了并

行质量工程的作用；

(3) 采用 RSM 稳健实验设计技术来减少变异效应是六西格玛公差设计的有效策略，考虑噪声因子会进一步降低成本、提高稳健性；

(4) 置信域约束给设计增加了柔性，可得到满足六西格玛水平的、更经济的过程均值和公差；

(5) 六西格玛公差设计可以实现高质量和低成本，实例也表明这两个目标不是相互矛盾的，而是高质量必然会导致低成本，这与戴明博士的观点完全一致。

利用并行质量工程的思想 and 所提出的联系产品设计和过程设计之间的数学模型，并行的产品和过程设计的可制造性将得到保证，六西格玛公差设计为实现 DFSS 的设计目标——经济稳健的产品设计和过程设计（同时优化参数和公差）提供了具有可操作性的系统方法。

声明：尽管已经在书中尽量做了文献的引用标注，但借鉴的观点太多，难免疏忽，如有疏漏，请给予指正。作者向引用的参考文献所有者表示感谢，向文中可能疏忽的转载和引用权的资料、图片、文献、研究思想和设想的所有者表示感谢。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 六西格玛简介	1
1.2 六西格玛公差设计的必要性	2
1.3 六西格玛公差设计的内涵	4
1.4 研究意义和目的	6
1.4.1 研究意义	6
1.4.2 研究目的	7
1.5 研究综述	8
1.5.1 前言	8
1.5.2 稳健公差设计研究综述	9
1.5.3 并行公差设计研究综述	10
1.5.4 总结	10
1.6 研究问题的提出	11
1.7 研究内容	12
1.8 本研究的创新之处	14
第二章 六西格玛公差设计的基本理论和方法	17
2.1 六西格玛设计	17
2.1.1 DFSS	18
2.1.2 DFSS 流程及主要设计工具	19
2.1.3 DFSS 与 DMAIC 的区别	24
2.2 并行质量工程	25

2.3	DFSS 的重要性及其哲理	27
2.4	稳健设计	30
2.4.1	稳健设计的思想	31
2.4.2	稳健设计方法	33
2.5	传统的公差设计方法	34
2.5.1	极值法	35
2.5.2	统计平方公差方法	35
2.5.3	六西格玛机械公差设计	36
2.6	Taguchi 的公差设计	42
2.6.1	质量损失函数	43
2.6.2	Taguchi 的公差确定方法和公差设计的区别	44
2.6.3	Taguchi 的公差设计	44
2.6.4	Taguchi 公差设计的不足	47
2.7	本章小结	48
第三章 对传统公差设计方法的改进		49
3.1	六西格玛机械公差设计实例分析	49
3.1.1	六西格玛机械公差设计优化流程	49
3.1.2	六西格玛机械公差设计实例分析	50
3.1.3	对六西格玛机械公差设计的几点说明	54
3.2	对六西格玛机械公差设计的改进	56
3.2.1	建立一般尺寸链的统计公差	56
3.2.2	结合 DOE 的六西格玛机械公差设计	57
3.2.3	改进的六西格玛机械公差设计的实例分析	61
3.2.4	对改进的六西格玛机械公差设计的评价	64
3.3	过程能力指数在公差设计中的作用及其形式	65
3.3.1	过程能力指数在公差设计中的作用	65
3.3.2	过程能力指数的假设条件	66

3.3.3 过程能力指数的形式.....	66
3.3.4 如何应用过程能力指数.....	68
3.4 基于变异系数和方差百分比改进的 Taguchi 公差设计	69
3.4.1 设计过程.....	70
3.4.2 实例分析.....	71
3.4.3 改进的 Taguchi 公差设计流程.....	75
3.5 本章小结	76
第四章 基于 RSM 双响应的并行公差设计	77
4.1 成本函数的开发.....	78
4.1.1 质量损失函数的形式.....	79
4.1.2 总成本函数.....	80
4.2 对并行参数和公差设计的理解.....	82
4.3 各种设计情况的分类.....	85
4.3.1 根据公差表达形式的分类.....	86
4.3.2 根据响应的质量特性确定设计内容.....	87
4.3.3 各种设计情况所采用的质量损失函数形式.....	88
4.4 基于 RSM 稳健设计方法进行六西格玛公差设计的必要性	88
4.4.1 应用 RSM 的必要性.....	88
4.4.2 应用 RSM 双响应稳健设计方法的必要性	89
4.5 应用 RSM 来近似转换函数的并行参数和公差设计	93
4.5.1 整合函数的构建.....	94
4.5.2 稳健性验证及公差调整.....	97
4.5.3 小结	97
4.6 基于 RSM 方差模型的公差设计方法	98
4.6.1 方差分析.....	98
4.6.2 均值的调整策略.....	99

4.6.3	优化模型的开发.....	102
4.7	考虑偏倚的公差设计方法的构建.....	103
4.7.1	考虑偏倚的必要性和优势.....	103
4.7.2	考虑偏倚的优化模型.....	104
4.8	对于望大、望小特性优化模型的构建.....	105
4.8.1	确定过程稳定点的稳健域.....	105
4.8.2	建立望大、望小特性的优化模型.....	108
4.9	公差作为参数时设计方法的研究.....	109
4.9.1	基于RSM方差模型的公差设计方法的开发.....	109
4.9.2	对优化模型1的实例分析.....	110
4.9.3	均值有偏倚时的设计方法.....	114
4.9.4	对望大、望小特性优化模型的建立.....	120
4.10	MSE标准的延伸——考虑预测稳健性.....	120
4.11	基于VM双响应的并行公差设计的技术路线.....	122
4.11.1	六西格玛能力验证.....	122
4.11.2	并行公差设计的步骤和技术路线.....	122
4.12	本章总结.....	123
第五章	面向噪声因子的并行公差设计.....	126
5.1	产品稳健设计和过程稳健设计.....	127
5.2	对噪声因子的理解.....	128
5.2.1	在公差设计中对噪声因子的解释.....	128
5.2.2	控制和噪声交互作用的重要性.....	130
5.3	包含噪声因子的RSM响应模型的建模策略.....	131
5.3.1	包含噪声因子的RSM响应模型.....	131
5.3.2	均值和方差双响应模型的构建.....	133
5.3.3	双响应模型的分析.....	134
5.3.4	过程方差稳健域的构建.....	136

5.4	基于最小过程方差置信域优化模型的建立.....	138
5.5	面向噪声因子的并行公差设计步骤及技术路线.....	140
5.6	本章总结	141
第六章	实验设计的选择.....	142
6.1	对稳健性的理解.....	142
6.1.1	稳健性定义.....	142
6.1.2	对变异的理解以及减少变异的策略.....	143
6.1.3	对 RSM 设计稳健性的认识	144
6.2	CCDs 设计的选择.....	145
6.2.1	CCDs 及其主要类别简介.....	146
6.2.2	主要的概念.....	148
6.2.3	对三类设计的评价与比较.....	150
6.2.4	实例分析.....	152
6.2.5	CCC、CCI 和 CCF 异同点的比较和总结.....	154
6.2.6	选择 CCDs 的指导原则.....	156
6.3	结合表实验设计的选择.....	156
6.3.1	田口内外表和 RSM 结合表的比较	156
6.3.2	适于结合表的混级设计.....	159
6.4	几个稳健性指标.....	160
6.5	望目特性稳健参数设计优化标准的构建.....	161
6.6	本章小结	163
第七章	应用研究	164
7.1	整合方法	164
7.1.1	问题描述.....	164
7.1.2	模型求解.....	166
7.2	对并行公差设计方法的验证.....	166

7.2.1 验证流程.....	166
7.2.2 模型.....	167
7.2.3 实例分析与验证.....	168
7.3 本章小结.....	174
结束语.....	176
参考文献.....	179
附录.....	198
研究成果.....	209

第一章 绪 论

1.1 六西格玛简介^①

六西格玛 (Six Sigma, 西格玛是正态分布的标准差, σ) 最早由摩托罗拉的一位工程师 Bill Smith 在 1985 年提出, 后得到公司总裁 Robert Galvin 的鼎力支持, 并将六西格玛作为质量目标; 另一位摩托罗拉工程师 Craig Fullerton 设计了“六西格玛设计方法”(SSDM 或 DFSS), 并于 1986 年在全公司推广六西格玛质量改进项目^[1]。1988 年摩托罗拉因成功地应用六西格玛而成为赢得第一届马可姆·波里奇奖 (Malcolm Baldrige National Quality Award) 的大公司, 并于 2002 年在全球电子、电信行业再度获此殊荣, 摩托罗拉因此成为世界性的质量领袖。此后, 许多世界著名企业也开始应用六西格玛来提高企业竞争力。在这一应用过程中, 六西格玛从一个衡量优良程度的标准、解决问题的技术演化为一个企业建立持续改进系统、增强综合领导能力、不断提升业绩和带来巨大利润的管理理念和系统方法^[1, 2]。

从统计上讲, 六西格玛强调理解过程输入变量 x 和过程输出变量 y 的关系。一旦过程的输入对输出的影响和/或作用得到充分

① 相关概念等参见下列信息:

何桢, 张志红, 精益与六西格玛的结合研究, 工业工程, 2006, 9 (3): 9~12+52

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

的理解,该过程就可以采用稳健思想和优化技术来设计,使输出尽量靠近目标值而不是以公差范围来衡量,同时使变异达到最小,这与 Taguchi 的损失函数目标相一致。因此,为了有效地追求改进,落脚点必须放在过程的输入 x 上。

从整体业务改进方面看,六西格玛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来达到短期的财务目标;另一方面还要在关键人才和核心流程方面为未来的发展积蓄能力^[1]。

六西格玛是一套旨在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。实施六西格玛管理模式提升企业竞争力的主要途径有两个:一是对现有流程进行改进的 DAMIC (Define, Measure, Analysis, Improve, Control) 流程;二是对新过程和新产品进行设计的 DFSS (Design for Six Sigma, DFSS)。将最佳的实践流程与工具整合起来构建业务改进的框架^[1]:整合 (Align)、调动 (Mobilize)、加速 (Accelerate)、控制 (Govern),利用此框架在实现短期业务目标的同时培养其持久的未来能力。在这一管理方法中实现了向以顾客为关注焦点转移和向以过程为中心转移,向系统思维方法转移,创建学习型组织环境。

1.2 六西格玛公差设计的必要性

六西格玛作为业务改进方法已成为许多国际著名企业提高竞争力的长期战略。在实施六西格玛的过程中,一个重要的理念是:六西格玛首先是设计出来的,然后才是生产出来的。因而对实施六西格玛的技术方法的研究是企业提高竞争力的根本。但目前许多企业在推广六西格玛时把重点放在了DMAIC流程上,而在理论上对六西格玛设计的支撑技术的研究却不够。当摩托罗拉在其质量之旅不断改进时,发现通过过程的不断改进虽然能够达到4~5

个西格玛水平，公司却面临Harry (2000)所指出的“五西格玛墙”，公司只有对稳健设计——系统设计、参数设计和公差设计的作用有了更清楚的理解才有可能达到六西格玛水平^[3]。所以仅仅满足工程规格和功能需求是不够的，必须从产品生命周期开始就致力于达到高质量，产品必须面向可制造性设计 (Design For Manufacturing, DFM)，使之对生产环境及其应用环境的变异不敏感，并最终从生产者和顾客这两方面同时减少成本。

公差设计是一种科学地分配公差的方法，用来评估设计中重要的子系统和零部件，以达到产品生命周期内的成本最低^[4]。公差设计问题和产品成本、质量和生命周期时间有着密切的联系，它贯穿于产品全生命周期的全过程，已成为制造业努力提高可制造性和质量的焦点问题^[5]。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，公差中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率因而增加产品成本和拖延交付时间。

一个系统的质量受两个主要设计缺陷的影响，即由于违背设计原则而引起的概念缺陷和由于在应用环境中缺少稳健性而引起的操作缺陷，这样操作缺陷的影响就使得设计过程必须以稳健性作为目标^[6]。由于缺乏一个找到理想方案的系统方法，概念设计缺陷通常被忽略，而 DFSS 正是这样一种解决质量问题的系统方法^[7]，Baem Said El-Haik (2002) 指出 DFSS 是一个将设计、线外质量方法和六西格玛哲理相融合的过程^[6]。由于在当前提高质量和成本有效性的激烈竞争中，稳健设计经常是保证产品质量和低成本的一个有效方式，所以质量工程应用稳健设计通过减少变异效应带动产品功能性来提高产品质量，而控制这些变异的一个可能的方法是有一个恰当的公差设计^[8]。