



中青年经济学家文库

ZHONGQINGNIAN JINGJIXUEJIA WENKU

# 面向先进制造业产品质量管理的 多响应稳健参数设计

张流洋 陈清利 / 著

MIANXIANG XIANJIN ZHIZAOYE CHANPIN ZHILIANG GUANLI DE  
DUOXIANGYING WENJIAN CANSHU SHEJI

中国财经出版传媒集团



经济科学出版社  
Economic Science Press

中青年经济学家文库

河南省软科学研究计划项目基金资助

河南省哲学社会科学规划项目基金资助

# 面向先进制造业产品 质量管理的多响应 稳健参数设计

张流洋 陈清利 著

中国财经出版传媒集团



经济科学出版社  
Economic Science Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

面向先进制造业产品质量管理的多响应稳健参数设计/  
张流洋, 陈清利著. —北京: 经济科学出版社, 2019. 2  
ISBN 978 - 7 - 5218 - 0338 - 9

I. ①面… II. ①张…②陈… III. ①制造业 - 产品质量 - 质量管理 - 研究 - 中国 IV. ①F426. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 039840 号

责任编辑: 程晓云 王金红  
责任校对: 靳玉环  
版式设计: 齐 杰  
责任印制: 王世伟

## 面向先进制造业产品质量管理的多响应稳健参数设计

张流洋 陈清利 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址: 北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编: 100142

总编部电话: 010 - 88191217 发行部电话: 010 - 88191522

网址: [www. esp. com. cn](http://www.esp.com.cn)

电子邮件: [esp@ esp. com. cn](mailto:esp@esp.com.cn)

天猫网店: 经济科学出版社旗舰店

网址: [http: //jjkxcbs. tmall. com](http://jjkxcbs.tmall.com)

北京季蜂印刷有限公司印装

710 × 1000 16 开 10.5 印张 200000 字

2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5218 - 0338 - 9 定价: 38.00 元

(图书出现印装问题, 本社负责调换。电话: 010 - 88191510)

(版权所有 侵权必究 打击盗版 举报热线: 010 - 88191661)

QQ: 2242791300 营销中心电话: 010 - 88191537

电子邮箱: [dbts@ esp. com. cn](mailto:dbts@esp.com.cn))

# 前 言

质量反映了一个国家的综合实力，是和平占领市场最有效的武器；质量发展是兴国之道、强国之策。党和国家历来高度重视质量工作，党的十八大报告指出：切实把推动发展的立足点转到提高质量和效益上来；党的十九大报告指出：我国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段。习近平总书记强调“发展要以提高质量和效益为中心”“推动中国制造向中国创造转变、中国速度向中国质量转变、中国产品向中国品牌转变”，指明了我国质量发展的方向与目标。国务院颁布的《质量发展纲要（2011～2020）》明确了我国中长期质量发展的总体目标、任务要求和政策措施，进一步动员全社会重视质量，增强质量意识，加强质量工作，提升质量水平，建设质量强国，为全面建成小康社会提供质量保障。《中国制造2025》作为我国实施制造强国战略的第一个十年行动纲领，强调坚持把质量作为建设制造强国的生命线。

产品质量问题是我国先进制造业向智能制造、服务型制造和绿色制造转变过程中所面临的核心问题，解决产品质量问题的唯一出路就是全面实施质量创新驱动发展，全面实施质量创新驱动发展需从政府、社会、企业、人才等四个维度上进行综合施策，努力探索出以政府质量制度创新为顶层设计、以满足社会质量需求为核心目标、以企业质量技术创新为主体支撑、以培养质量创新人才为关键基础的质量创新体系，努力探索出在经

济新常态背景下我国先进制造业全面实施质量创新驱动发展的关键路径。本书正是从企业质量技术创新维度为出发点，以我国先进制造业在转型升级发展过程中所面临的产品质量问题为研究对象，以质量管理理论与质量工程技术为研究方法，以系统建模、仿真试验与案例分析为研究手段，重点研究了企业质量技术创新在我国先进制造业向智能制造、服务型制造和绿色制造转变过程中所发挥的重要作用，努力探索出适合我国先进制造业全面实施质量创新驱动发展的企业质量设计方法与企业质量改进技术，为我国先进制造业的产品质量升级提供理论指导和技术支持，以系统地提高我国先进制造业的产品质量，构建我国先进制造业的质量品牌，以推动我国先进制造业的高质量发展，促进我国实现从制造大国向制造强国的质量转变。

随着全球经济的快速发展与科学技术的不断进步，以装备制造、食品制造、新材料制造、电子制造、汽车制造为主导的先进制造业产品质量已经成为世界各大企业之间竞争的焦点，更是在全球市场上获得竞争优势的关键。因此，持续性质量改进已经成为世界各大企业永恒追求的目标。实现先进制造业产品的持续性质量改进，不仅需要质量管理思想与方法的指导，更需要质量工程技术的支持。从现代质量工程的观点来看，产生质量问题的根本原因是波动。所谓波动就是差异、偏差，尽管我们无法完全消除波动，但是可以减小和控制波动。稳健参数设计作为在持续性质量改进活动中的重要支撑技术，主要应用在先进制造业的产品设计阶段，以达到从源头上减小和控制产品实现过程中的波动，从而使先进制造业产品质量得到进一步的提升与改进。随着先进制造业的产品设计与制造过程越来越复杂，在实际的产品实现过程中经常会遇到含有多个响应（质量特性）的稳健参数设计问题。由于多个响应具有不同的量纲以及多个响应之间往往存在着相关性等问题，导致多响应优化问题通常很难获得一组可控因子的最优水平组合使所有指标同时达到最优。因此，面向先进制造业产品质

量管理的多响应稳健参数设计问题在我国先进制造业企业实施产品质量技术创新活动中显示出越来越重要的地位与作用。本书的主要研究内容包括：

(1) 绪论。

(2) 相关的基础理论与方法。针对面向先进制造业产品质量管理的多响应稳健参数设计问题，重点介绍了多响应系统的基本理论、响应曲面方法的基本理论、稳健参数设计的基本理论与方法、多响应优化方法、参数估计与混合遗传算法等相关的基本理论。这些预备知识为后续研究奠定了坚实的理论基础。

(3) 基于均值—方差响应的静态多响应稳健参数设计。针对面向先进制造业产品质量管理活动中现有的多响应优化方法大都采用双响应曲面法对响应的均值与方差（标准差）进行分别建模，并通过优化得到预测响应的稳健最优点。在此研究的基础上，本书提出了对响应的均值与方差集成建模的思想，构建了均值—方差响应这一新的稳健性度量指标，分析了模型参数不确定性情况下均值—方差响应的置信区间，并通过对先进制造业产品质量管理问题的案例进行分析，验证了所提方法能够有效地解决多响应优化的稳健性问题。

(4) 变量间存在相关性的静态多响应稳健参数设计。针对面向先进制造业产品质量管理活动中现有的多响应优化方法大都是基于响应变量之间相互独立的假设，未考虑多个响应之间以及协变量之间存在的相关性问题。针对这一问题，本书提出了基于主成分分析与似然不相关回归技术相结合的满意度函数法，并通过对先进制造业产品质量管理问题的案例进行分析，验证了所提方法能够有效地解决含有多个协变量的多响应优化的相关性问题。

(5) 考虑权重确定策略的静态多响应稳健参数设计。针对面向先进制造业产品质量管理活动中现有的多响应优化方法在解决权重确定问题时

往往只考虑决策者的主观偏好，导致优化结果受决策者的主观因素影响较大，从而降低了优化结果的可信度。针对这一问题，本书在考虑了决策者主观信息的基础上，同时考虑了样本数据本身的客观信息，提出了考虑主客观信息的权重确定策略，并通过对先进制造业产品质量管理问题的案例进行分析，验证了所提方法的有效性。

(6) 考虑响应分布特征的动态多响应稳健参数设计。针对面向先进制造业产品质量管理活动中现有的动态特性系统一般模型中，通常是假定响应变量服从正态分布；然而，在许多实际系统中，响应变量往往并非服从严格的正态分布，而是存在一定的偏度特征。在此种情况下，假若仍以正态分布作为响应变量的统计模型，势必会给动态特性系统带来更大的偏差。针对这一问题，本书提出了基于多元偏正态分布与响应曲面方法相结合的动态多响应稳健优化模型，并通过对先进制造业产品质量管理问题的案例进行分析，验证了该模型不仅能够考虑动态多响应之间的相关性，而且也能够考虑尺度与偏度对动态多响应系统最优性与稳健性的影响。

(7) 结论。本书的研究进一步丰富了多响应稳健参数设计在我国先进制造业产品质量管理领域的研究内容，为我国先进制造业全面实施质量创新驱动发展提供了一些新的企业质量设计方法与企业质量改进技术，为企业质量技术创新在我国先进制造业向智能制造、服务型制造和绿色制造转变过程中所发挥的重要作用提供了一些新的理论指导和技术支持，以系统地提高我国先进制造业的产品质量。虽然本书的研究已经达到了预定的研究目标，但是由于学识水平、试验条件等多方面的限制，本书的研究还存在一定的不足之处，其中一些问题还有待于进一步的深入研究。

本书的出版得到了河南省软科学研究计划项目“河南省先进制造业全面实施质量创新驱动发展路径研究（编号：182400410187）”与河南省哲学社会科学规划项目“河南省高端装备制造业的绿色供应链并行质量管理策略研究（编号：2017BJJ038）”基金资助。

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 国内外研究现状及分析 .....	5
1.2.1 静态多响应优化问题的研究 .....	5
1.2.2 动态多响应优化问题的研究 .....	15
1.3 研究内容及内在关系 .....	20
1.3.1 研究内容 .....	20
1.3.2 内在关系 .....	22
1.4 研究的创新之处 .....	25
第 2 章 相关的基础理论与方法 .....	27
2.1 多响应系统简介 .....	27
2.1.1 静态多响应系统 .....	28
2.1.2 动态多响应系统 .....	29
2.2 响应曲面方法的基本理论 .....	31
2.2.1 响应曲面方法的基本概念 .....	31
2.2.2 响应曲面的二阶效应分析 .....	32
2.3 稳健参数设计的基本理论与方法 .....	34

2.3.1	基于田口方法的稳健参数设计	35
2.3.2	基于响应曲面方法的稳健参数设计	37
2.4	多响应优化方法	40
2.4.1	满意度函数法	40
2.4.2	质量损失函数法	43
2.4.3	其他方法	44
2.5	参数估计方法	47
2.5.1	最小二乘回归	47
2.5.2	似然不相关回归	48
2.6	混合遗传算法	50
2.6.1	基本遗传算法简介	51
2.6.2	遗传算法的改进	54
2.7	本章小结	57
<b>第3章</b>	<b>变量间存在相关性的静态多响应稳健参数设计</b>	<b>58</b>
3.1	变量之间相关性分析	58
3.1.1	协变量之间相关性分析	58
3.1.2	响应变量之间相关性分析	60
3.2	考虑相关性的满意度函数法	63
3.3	基于满意度函数法的多响应稳健参数设计	65
3.4	实例分析	68
3.5	本章小结	75
<b>第4章</b>	<b>基于均值—方差响应的静态多响应稳健参数设计</b>	<b>76</b>
4.1	稳健性度量指标的分析与构建	76
4.1.1	采用均值与方差分别建模	76

4.1.2 采用均值—方差集成建模 .....	77
4.2 基于均值—方差响应的满意度函数法 .....	78
4.3 模型不确定性对均值—方差响应的影响 .....	79
4.4 考虑模型参数不确定性的多响应稳健参数设计 .....	81
4.5 实例分析 .....	84
4.6 本章小结 .....	90
<b>第5章 考虑权重确定策略的静态多响应稳健参数设计 .....</b>	<b>91</b>
5.1 权重确定策略 .....	91
5.1.1 基于主观信息的权重确定方法 .....	91
5.1.2 基于客观信息的权重确定方法 .....	92
5.2 考虑主客观权重的满意度函数法 .....	94
5.2.1 主观满意度函数 .....	94
5.2.2 客观满意度函数 .....	95
5.2.3 综合满意度函数 .....	96
5.3 实例分析 .....	97
5.3.1 柴胡皂甙的微波萃取试验 .....	97
5.3.2 胶态气体泡沫的合成试验 .....	103
5.4 本章小结 .....	109
<b>第6章 考虑响应分布特征的动态多响应稳健参数设计 .....</b>	<b>110</b>
6.1 动态特性系统的一般模型 .....	110
6.2 响应变量的分布特征分析 .....	111
6.3 基于多元偏正态分布的联合位置、尺度与偏度模型 .....	115
6.4 考虑偏度特征的动态多响应稳健优化模型 .....	118
6.5 实例分析 .....	121

6.5.1 案例描述 .....	121
6.5.2 分析过程 .....	124
6.6 本章小结 .....	132
第7章 总结与展望 .....	133
7.1 总结 .....	133
7.2 展望 .....	135
参考文献 .....	137
后记 .....	155

# 第 1 章

## 绪 论

本章首先阐述了面向先进制造业产品质量管理的多响应优化问题的研究背景与研究意义，针对具有静态与动态特性的多响应优化问题的研究现状分别进行了综述与分析，进而指出了多响应优化领域目前存在的主要问题，在此基础上，阐述了本书的研究内容及其内在逻辑关系，最后指出了本书研究的创新之处。

### 1.1

---

#### 研究背景及意义

随着当今世界贸易保护主义的逐渐抬头以及国际市场竞争的日趋激烈，国内外众多先进制造业企业越来越认识到产品质量的重要性。尤其是 2015 年中国政府发布了实施制造强国战略的《中国制造 2025》以来，以装备制造、食品制造，新材料制造、电子制造、汽车制造为主导的先进制造业产品质量已经成为世界各大企业之间竞争的焦点，构成了现代企业生存与发展的核心。先进制造业产品质量不仅是企业的生命线，更是在全球市场上赢得顾客的关键。因此，持续性质量改进已经成为世界各大企业永恒追求的目标。实现产品的持续性质量改进，不仅需要质量管理思想与方法的指导，更需要质量工程技术的支持<sup>[1]</sup>。美国著名的质量管理学专家朱兰（J. M. Juran）曾经指出：“21 世纪将是质量的世纪，质量是和平占领市场最有效的武器”。全面质量管理专家菲根堡姆（A. V. Feigenbaum）

也认为质量在全球经济中处于领导地位<sup>[2]</sup>。从现代质量工程的观点来看,产生质量问题的根本原因是波动。所谓波动 (Variation) 就是差异、偏差,尽管我们无法完全消除波动,但是可以减小和控制波动。新的质量损失原理表明:“只要质量特性 (Quality Characteristic) 偏离其设计目标值,就会造成质量损失,偏离越远,损失越大。”所以,为了改进和提高产品质量、降低成本,就必须最大限度地减小和控制产品实现过程/系统的输出均值围绕设计目标值的波动<sup>[3]</sup>。因此,如何采用质量改进技术,设计并制造出高质量、低成本、短周期的产品,以此获得竞争优势,已经成为国内外工业界与学术界极为关注的问题<sup>[4][5]</sup>。

截至 2018 年,中国先进制造业在全球先进制造业中所占比重已经超过 1/3,中国已经成为全球主要的制造业大国<sup>[6]</sup>。然而,中国先进制造业主要是以劳动密集型产业为主,其生产效率仍远低于美国、日本等发达国家。相比较于发达国家先进制造业主要集中在资金和技术等高附加值的制造行业,中国先进制造业则主要生产一些附加值较低的产品<sup>[7]</sup>。根据 2018 年中国质量协会对全国先进制造业企业质量管理现状进行调查后发现,中国先进制造业企业普遍存在质量管理成熟度不高、质量责任未完全落实、质量工具与方法应用效果有待提高、质量改进的广度与深度远远不够以及质量管理思想的设计与开发亟待加强等问题,特别是中国先进制造业所依赖的关键生产技术大都来源于国外<sup>[2][8]</sup>。通过调查分析结果表明:中国许多大中型先进制造业企业仍然依赖产品检验方法来保证产品质量,很少使用先进的质量工程技术,如试验设计 (Design of Experiment, DOE)、稳健参数设计 (Robust Parameter Design) 等技术,导致中国先进制造业企业目前仍缺乏核心技术、缺乏自主创新能力、缺少质量过硬的世界品牌,所以中国先进制造业大而不强<sup>[9]</sup>。近年来,为了缩小中国先进制造业企业在质量管理领域与发达国家的差距,国内各大中型企业均积极地引进发达国家的先进质量管理理念与质量工程技术,如全面质量管理 (Total Quality Management)<sup>[10]</sup>、六西格玛管理 (Six Sigma Management)<sup>[11]</sup>等,以改进产品质量、提高生产效率,从而在竞争日益激烈的全球市场中赢

得竞争优势,以早日实现中国从制造业大国向制造业强国的质量转变<sup>[2][12]</sup>。

先进制造业企业为了生产出高质量、低成本、短周期的产品,需要在产品实现的不同阶段使用不同的质量工程技术,以减少产品实现过程中的波动。从产品实现的阶段来划分,质量工程(Quality Engineering)技术可以分为离线质量控制(Off-line Quality Control)<sup>[13]</sup>与在线质量控制(On-line Quality Control)<sup>[14]</sup>。所谓离线质量控制就是在产品的设计阶段所采用的质量工程技术,也称质量设计(Quality Design)<sup>[15]</sup>;所谓在线质量控制就是在产品的生产制造阶段所采用的质量工程技术,也称过程控制(Process Control)。从质量工程技术的发展阶段来划分,质量工程技术一般可以分为三个阶段。第一阶段就是检验技术。早期的质量检验技术仅仅限于抽样技术,通过抽样检验剔除不合格产品,从而实现对产品的质量进行事后把关的目的。显然,这种质量检验技术并不能真正地提高产品的质量,完全是一种被动的质量管理方法<sup>[2][16]</sup>。第二阶段是过程控制。以统计过程控制(Statistical Process Control, SPC)<sup>[17]</sup>技术为基础,融合了自动过程控制(Automatic Process Control, APC)<sup>[18]</sup>技术,形成了SPC与APC相结合的过程控制技术。SPC技术是在20世纪20年代由美国著名质量管理专家休哈特(Walter A. Shewhart)博士首次提出控制图(Control Chart)的概念以后逐步完善起来的质量工程技术<sup>[19]</sup>。APC技术是伴随着计算机技术和其他高新技术的发展而逐步发展起来的,应用越来越广泛。20世纪60年代,著名的统计学家博克斯(Box)提出将SPC技术与APC技术二者结合起来<sup>[20]</sup>,对产品的设计与制造过程进行质量控制,以有效地减少产品实现过程中的波动,这种思想已经在工业界与学术界形成了广泛被认同的学术思想。由于过程控制技术能够有效地贯彻预防的原则,所以将产品质量的控制从检验阶段提前到制造阶段。第三阶段就是质量设计。它主要包含两个方面的研究内容:一方面是试验设计及其分析与建模技术,如经典的试验设计<sup>[5][16]</sup>、计算机试验设计(Computer Experiment Design)<sup>[21][22]</sup>、响应曲面方法(Response Surface Methodology, RSM)等<sup>[23][24]</sup>等技术;另一方面是在20世纪80年代由日本著名质量工程专家田口(Tagu-

chi) 博士提出的三次设计思想, 即系统设计 (System Design)、参数设计 (Parameter Design) 与容差设计 (Tolerance Design), 其核心是参数设计, 也称稳健设计 (Robust Design) 或稳健参数设计<sup>[3][25]</sup>。由于质量设计应用于产品实现过程的早期阶段, 从而能够从源头上查找导致产品产生缺陷的原因, 彻底改变了以往依靠检验技术进行事后管理的理念, 因此, 在工业界和学术界目前已经形成一种共识: “产品质量首先是设计出来的, 其次才是制造出来的, 检验并不能够提高产品质量”<sup>[2][4]</sup>。

作为质量设计和持续性质量改进的重要支撑技术, 稳健参数设计是由田口博士以正交试验设计 (Orthogonal Experiment Design) 和信噪比 (Signal-noise Ratio) 为基础提出来的, 其核心思想是在保证产品实现过程/系统的均值尽可能接近设计目标值的基础上, 最大限度地减少产品实现过程/系统输出响应值围绕设计目标值的波动<sup>[26][27]</sup>。这种思想改变了欧美等工业化国家通常采用的质量设计方法, 即仅仅关注产品/过程输出响应的均值。尽管田口方法仍然存在着很多争议, 但是他所提出的“波动造成质量损失, 波动越小, 质量损失越小”的质量哲学思想已经被工业界与学术界普遍接受, 被视为质量工程研究领域的一块里程碑<sup>[2][28]</sup>。因此, 自从田口提出稳健参数设计以来, 许多国内外的质量工作者对此进行了大量的应用研究, 积累了许多的实践成果。但是这些研究和应用大多是针对含有单个响应 (质量特性) 的产品实现过程/系统, 而针对含有多个响应的产品实现过程/系统的研究成果相对较少<sup>[9][29][30]</sup>。随着产品的设计与制造过程越来越复杂, 实际的产品实现过程/系统往往需要同时考虑产品的多个响应。因此, 如何基于稳健参数设计的思想, 构建多响应的稳健性度量指标, 采用多响应优化方法, 寻找多响应系统的稳健最优解, 进而设计并生产出高质量、低成本、短周期的产品具有十分重要的理论意义与实际价值。为此, 通过本书的研究, 希望能够进一步地丰富和发展关于多响应优化 (Multi-response Optimization, MRO)<sup>[31][32]</sup> 问题的研究内容, 不仅为实现多响应系统的质量设计和持续性质量改进提供新的解决方法与技术, 同时也为我国先进制造业企业实施产品质量技术创新提供必要的企业质量设

计方法与企业质量改进技术,为我国先进制造业的产品质量升级提供理论指导和技术支持,以系统地提高我国先进制造业的产品质量,构建我国先进制造业的质量品牌,以推动我国先进制造业的高质量发展,促进我国实现从制造大国向制造强国的质量转变。

## 1.2

### 国内外研究现状及分析

本书将围绕面向先进制造业产品质量管理中具有静态与动态两种特性情况下的多响应优化问题,在质量设计研究领域内的国内外研究现状进行系统的综述并进行深入的分析,进而对本书所要研究的主要问题进行详细的阐述。

#### 1.2.1 静态多响应优化问题的研究

针对具有静态特性的多响应优化(亦称静态多响应优化)问题,国内外许多统计学家与质量管理专家对其进行了相应的研究与探讨。关于解决静态多响应优化问题的方法,主要包括满意度函数法、质量损失函数法等。因此,针对静态多响应优化问题的国内外研究现状,将根据相应的解决方法进行综述与分析。

满意度函数法(Desirability Function Approach)作为应用最为广泛的解决多响应优化问题的方法之一,是由哈密尔顿(Harrington)<sup>[33]</sup>提出的,后经过戴瑞杰和斯维奇(Derringer and Suich)<sup>[34]</sup>改进并应用于解决多响应优化问题。该方法首先根据响应所具有的不同特性,将每个被估计的响应函数 $\hat{y}_i(i=1, 2, \dots, q)$ 转化为相应特性的个体满意度函数 $d(\hat{y}_i)$ ,该个体满意度函数的取值范围为 $[0, 1]$ ;然后采用几何平均的思想将转化后的 $d(\hat{y}_i)$ 通过乘积的形式构建综合满意度函数 $D(\hat{y})$ ,最后通过对综合满意度函数 $D(\hat{y})$ 在规定的试验区域内进行最大化求解,从而获得一组可控

因子  $x$  的最优水平组合。戴瑞杰 (Derringer)<sup>[35]</sup> 在以往研究的基础上, 采用加权几何平均的思想构建了新的综合满意度函数用于解决多响应优化问题; 然而, 该方法仅仅适用于直接搜索优化方法, 而不适用于高效的梯度算法, 因为该方法通常在目标点是不可微的, 而高效的梯度算法必须要求函数处处满足一阶可微的条件。为了解决这一问题, 戴尔·卡斯特罗 (Del Catillo) 等<sup>[36]</sup> 在以往研究的基础上, 提出了在不可微点采用局部多项式回归技术, 进而近似一种分段连续的满意度函数, 以此解决在目标点不可微的问题。吴杰福和哈马丹 (Wu L. and Hamada)<sup>[37]</sup> 在以往研究的基础上, 对满意度函数进行了相应的改进, 构建了指数形式的满意度函数以解决该方法在目标点不可微的问题。塞埃恒等 (Ch'ng et al)<sup>[38]</sup> 通过分析实际响应的规格限与预测响应之间的关系, 采用算术平均的思想构建了一种综合满意度函数以解决该方法在目标点不可微的问题。金光杰和林德恩 (Kim and Lin)<sup>[39]</sup> 为了考虑多响应的最优性问题, 提出了一种指数形式的满意度函数法, 该方法首先最小化单个响应的个体满意度函数, 然后将所得到的优化结果再进行最大化求解, 从而获得可控因子的最优水平组合。姜银俊和金光杰 (Jeong and Kim)<sup>[40]</sup> 根据决策者的不同偏好灵活地确定各响应的规格限、目标值以及满意度函数的形状参数等, 提出了一种交互式的满意度函数法, 该方法通过对各个参数的合理设置使得各响应的输出值达到最优。吴杰福和哈马丹<sup>[5]</sup> 根据响应所具有的望大、望小与望目特性, 构建了基于加权几何平均的满意度函数以解决多响应的优化问题。

随着田口<sup>[3]</sup> 所提出的稳健参数设计思想被应用于解决多响应优化问题, 国内外许多统计学家与质量管理专家分别提出了改进的满意度函数法, 这些方法不仅考虑了多响应的最优性, 同时也考虑了多响应的稳健性。如金光杰和林德恩<sup>[41]</sup> 在迈尔斯和卡特 (Myers and Carter)<sup>[42]</sup> 提出双响应曲面法 (Dual Response Surface Methodology, DRSM) 的基础上, 进而提出了基于 DRSM 的满意度函数法, 该方法首先构建每个响应的均值 (Mean) 与方差 (Variance) 模型, 进而构建了最大最小化的满意度函数, 以获得可控因子的最优水平组合。李美宋和金光杰 (Lee and Kim)<sup>[43]</sup> 在此研究的