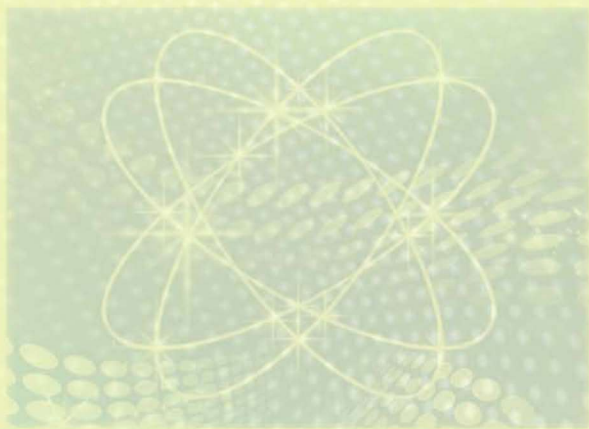


基于产品全寿命周期六西格玛 管理的容差设计方法

伍建军 著



中南大学出版社

基于产品全寿命周期六西格玛 管理的容差设计方法

伍建军 著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

基于产品全寿命周期六西格玛管理的容差设计方法/伍建军著.
—长沙:中南大学出版社,2015.12

ISBN 978 - 7 - 5487 - 2136 - 9

I. 基... II. 伍... III. 产品生命周期 - 研究
IV. F273.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 001983 号

基于产品全寿命周期六西格玛管理的容差设计方法

伍建军 著

责任编辑 胡小锋

责任印制 易建国

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

印 装 长沙理工大学印刷厂

开 本 710 × 1000 1/16 印张 10.5 字数 205 千字

版 次 2015 年 12 月第 1 版 印次 2015 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 2136 - 9

定 价 35.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

本学术专著获江西理工大学优秀学术著作出版基金资助

前 言

容差是产品或零部件的参数(或质量特性值)的容许变化范围。容差设计是平衡产品质量和成本的重要方式。在工程实践中,容差优化设计隐含着巨大降低产品制造成本和改善产品品质的潜力。但当前很多研究者只从制造成本角度研究容差设计问题,没有把产品全寿命周期成本 LCC 结合起来研究,这可能使容差设计方案局部最优而不是全局最优。针对这一关键问题,本书围绕“在产品全寿命周期成本最低情形下如何实现六西格玛质量水平的容差设计方法”这样一个目标展开研究,建立了一套基于产品全寿命周期六西格玛管理的容差设计(Tolerance Design Based on Life Cycle Six Sigma,简称 TD Based on LCSS)方法与理论体系。

本书研究得到以下结论:

(1) 对传统容差设计仅关注制造成本的思想提出商榷。采用多视角的研究方法系统地研究了容差对产品全寿命周期成本的影响规律,并在此基础上创建一套基于全寿命周期六西格玛容差设计方法论,为产品容差设计的全寿命周期全局优化难题提供了一种新的解决途径。这种研究方式扩展了本领域的研究视野。

(2) 提出了一种基于串、并行混合渐进迭代理论的设计早期阶段的容差评估与设计方法,改进了传统容差设计主要集中在详细设计阶段的局限性。

(3) 建立了基于模糊神经网络、灰色理论和多元回归的容差-全寿命周期成本定量模型,揭示了不同容差方案对产品全寿命周期成本变动的规律,克服了传统容差设计主要局限在制造成本局部优化的不足。

(4) 针对容差设计实践中不同质量特性质量损失计算不准确的问题,提出了一种基于统计分析、线性主元分析、互信息熵分析的质量融合损失计算方法,有效解决了工程实践中不同质量特性质量损失函数计算不准确的难题。

(5) 建立了基于全寿命周期六西格玛的多目标容差优化设计决策模型,实例

验证了 TD Based on LCSS 实现从制造成本局部最优到 LCC 全局最优的转变，为解决全寿命周期多约束条件的多目标容差优化难题提供了一种解决途径。

(6) 提出了一种基于 FMEA(Failure Mode Effects Analysis) 的关键件和薄弱环节容差设计方法，为预防工程实践中的重大质量事故的发生提供了一种解决办法，在一定程度上降低了产品的 LCC 成本。

本书引用了国内外最新关于产品全寿命周期六西格玛管理的容差设计方法的成果，对原作者表示衷心的感谢。同时本书获得江西理工大学优秀学术著作出版基金的资助，对学校的资助表示感谢!

由于时间仓促和作者水平有限，书中肯定还存在错误和不足之处，恳请读者指正和谅解。

伍建军

2015 年 12 月于赣州

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 研究的背景与意义	(1)
1.1.1 容差在产品设计中的作用	(1)
1.1.2 全寿命周期六西格玛容差设计问题的提出	(2)
1.1.3 研究的意义	(3)
1.2 国内外研究综述	(5)
1.2.1 容差概述	(5)
1.2.2 容差设计研究综述	(5)
1.2.3 并行容差设计研究综述	(8)
1.2.4 研究文献总结	(10)
1.3 研究的理论基础及基本前提	(11)
1.3.1 研究的理论基础	(11)
1.3.2 研究前提	(13)
1.4 研究思路及主要内容	(13)
1.4.1 研究对象及范围	(13)
1.4.2 研究思路、框架及方法	(13)
1.4.3 研究的主要内容	(15)
1.4.4 本书的主要创新之处	(17)
第 2 章 容差对 LCC 的影响分析与容差设计理论体系建立	(19)
2.1 引言	(19)
2.2 全寿命周期成本	(20)
2.2.1 全寿命周期成本的定义	(20)
2.2.2 产品全寿命周期的类型	(20)
2.2.3 全寿命周期成本的构成	(21)
2.2.4 全寿命周期成本的重要性	(24)

2.3	容差设计对全寿命周期成本的影响分析	(25)
2.4	产品全寿命周期六西格玛解决方案的提出	(27)
2.4.1	DMAIC 流程和技术方法的局限性	(27)
2.4.2	提出新的六西格玛解决方案的必要性	(27)
2.4.3	LCSS 的主要架构	(28)
2.5	LCSS 的主要流程简介	(29)
2.5.1	新产品设计的 IDDOV 流程	(29)
2.5.2	大批量产品局部更改设计的 DMADOV 流程	(34)
2.5.3	小批量改进的 DATIC 流程和局部更改设计的 DATDOV 流程	(34)
2.6	TD Based on LCSS 方法与理论框架	(35)
2.6.1	TD Based on LCSS 提出的必要性	(35)
2.6.2	TD Based on LCSS 容差设计原理	(37)
2.6.3	TD Based on LCSS 的理论内涵	(41)
2.6.4	TD Based on LCSS 的健壮设计思想	(42)
2.6.5	TD Based on LCSS 的健壮设计方法	(44)
2.6.6	TD Based on LCSS 中并行质量工程	(45)
2.6.7	TD Based on LCSS 理论架构与实施路线图	(46)
2.6.8	TD Based on LCSS 的技术体系	(49)
2.7	本章小结	(51)
第3章	早期阶段容差总体评价与概念结构优化方法	(52)
3.1	引言	(52)
3.2	毛坯选择与容差	(53)
3.3	容差可加工性评价	(53)
3.3.1	基于容差制造约束的可加工性定性评价	(54)
3.3.2	基于模糊综合评判的容差可加工性定量评价	(57)
3.4	容差工艺性评价	(61)
3.4.1	容差工艺性评价内容	(61)
3.4.2	基于规则的容差工艺性评价	(61)
3.5	产品容差与可装配性评价	(62)
3.5.1	产品容差与可装配性评价的指标	(62)
3.5.2	基于二叉树模型的容差与装配成本、时间的评价	(64)

3.5.3	基于广义键对容差装配难度的评价	(65)
3.6	容差评价对系统设计功能模式的影响	(69)
3.6.1	容差评价对系统设计的影响	(69)
3.6.2	容差评价有助于对概念结构方案的优化	(70)
3.7	本章小结	(71)
第4章	容差与产品全寿命周期成本模型建立	(73)
4.1	全寿命周期成本的计算方法	(73)
4.1.1	基于统计参数拟合的方法	(73)
4.1.2	分析计算方法	(74)
4.2	容差设计方案与LCC各种组成成本定量模型的建立	(75)
4.2.1	设计容差与劣质成本定量模型	(76)
4.2.2	容差设计与库存成本定量模型	(78)
4.3	容差-寿命周期成本模型	(79)
4.3.1	产品寿命周期成本与容差特征界定	(79)
4.3.2	基于神经网络的容差-LCC模型的建立	(81)
4.3.3	基于灰色理论的容差-LCC模型的建立	(87)
4.3.4	基于多元线性回归的容差-LCC模型的建立	(91)
4.4	定量模型比较分析与讨论	(94)
4.5	结论	(95)
第5章	容差设计中不同质量特性质量损失计算问题	(96)
5.1	引言	(96)
5.2	基于统计分析的产品质量特征融合	(97)
5.2.1	质量特征统计融合准则的确定	(97)
5.2.2	基于统计分析的特征融合算法	(97)
5.2.3	基于统计分析的质量特征融合结果	(100)
5.3	基于线性主元分析的质量特征融合	(102)
5.3.1	线性主元分析的基本原理	(102)
5.3.2	基于线性主元分析的质量特征融合算法	(102)
5.3.3	利用线性主元分析进行质量特征融合	(103)
5.4	基于互信息熵分析的质量特征融合	(106)
5.4.1	基于互信息熵的质量特征融合原理	(106)

5.4.2 基于互信息熵的产品质量特征融合算法	(107)
5.4.3 利用互信息熵进行产品质量特征的融合	(108)
5.5 无量纲“标准化”多元质量损失函数	(109)
5.6 本章小结	(110)
第6章 基于全寿命周期的六西格玛多目标容差优化设计	(111)
6.1 基于全寿命周期的多目标容差设计问题的提出	(111)
6.2 现有多目标问题求解方法的总结归类	(112)
6.3 面向产品全寿命周期六西格玛多目标容差设计决策模型的提出	(113)
6.4 基于多准则群决策协调权方法的组成环贡献率分析	(114)
6.4.1 问题描述	(114)
6.4.2 组成环贡献率定性分析算法	(116)
6.4.3 组成环贡献率系数确定	(118)
6.5 模型求解与分析	(118)
6.6 本章小结	(124)
第7章 基于 FMEA 的关键零部件和薄弱环节容差设计方法	(125)
7.1 设计或工艺薄弱环节容差设计基本思想	(125)
7.2 关键薄弱环节容差设计方法介绍	(127)
7.2.1 用于容差设计风险评估工具 FMEA 方法的概述	(127)
7.2.2 容差设计中 FMEA 方法的分类	(128)
7.2.3 FMEA 用于关键薄弱环节评估的一般程序	(128)
7.3 薄弱环节的 DFMEA 容差设计分析	(130)
7.4 DFMEA 容差设计分析实例	(133)
7.4.1 工程背景	(133)
7.4.2 建立功能方框图	(134)
7.4.3 分析失效类型以及影响	(135)
7.4.4 查找潜在原因, 确认频度	(137)
7.4.5 现行设计控制	(138)
7.4.6 计算 <i>RPN</i>	(138)
7.5 薄弱环节的 PFMEA 容差设计分析	(139)
7.6 针对关键零部件和薄弱环节进行容差设计	(143)

7.7 本章小结	(145)
第 8 章 研究结论与讨论	(146)
8.1 本书得到的研究结论	(146)
8.2 研究的启示	(147)
8.3 本书的创新之处	(148)
8.4 本书存在的不足及需进一步研究的问题.....	(149)
参考文献.....	(151)

第1章 绪论

1.1 研究的背景与意义

1.1.1 容差在产品中的作用

1. 容差的概念

在工业生产中,通常把产品或零部件的参数(或质量特性值)的容许变化范围称为容差。在机械、电子等不同行业,产品的研发、设计、制造等环节都会涉及容差。从工程角度看,容差是实际参数值的允许变动量,这里的参数既包括机械加工中的几何参数,也包括物理、化学、电学等学科的参数。由于在生产过程中不能做到完全精确,就需要规定指标允许有一定的容许范围,这就是容差,如手表走时的误差、产品测试过程中的向量规格、设备状态参数允许变化的范围、棉纱单位面积的瑕疵点数等。对于机械制造来说,容差通常称为公差,指允许几何形状和尺寸的变动量,如尺寸公差、形状公差、位置公差等。机械产品容差的目的是为了确定产品的几何参数,使其变动量在一定的范围之内,以便达到互换或配合的要求。从统计角度看,可以认为,某一指标的容许变化范围称为容差;从设计质量角度看,容差是一种允许极限,是从经济角度考虑允许质量特性值的波动范围,它是贯穿于产品设计、制造、装配、使用与维护等整个寿命周期的重要技术信息。

2. 容差在产品中的作用

容差有什么作用呢?对某一产品来说,若容差过松,往往生产成本较低,但产品质量与可靠性、装配性能、维修性、保障性、测试性、安全性等可能难以达到设计要求;若容差过紧,虽然质量能达到要求,但制造需要更高的要求 and 成本。因此,容差在质量与成本之间扮演着重要角色,在设计和制造环节之间起着不可缺少的桥梁作用,它不仅影响产品的质量与可靠性、产品功能的实现、工艺方法的选择,而且对产品的生产制造成本、使用维护成本及全寿命周期成本(Life Cycle Cost, 简称 LCC) 等产生显著影响。

21 世纪的制造企业面临着全球性以知识为基础的竞争,企业必须解决缩短生产时间 T 、提高性能质量 Q 、降低制造成本 C 、提供优质服务 S 以及保持清洁环境

E等问题,应保证T、Q、C、S与E的和谐统一。一方面,产品的质量是由顾客提出的,质量工作应源于顾客需求,终结于顾客满意,制造商必须将顾客的声音(Voice of Customer, VOC)贯穿于整个供应链的所有行动之中。产品的形成过程实际上就是产品质量的形成过程,影响质量的因素贯穿于产品的整个寿命周期,包括开发研制、采购、生产、检验和测试、安装与运行、技术服务和维护等几个方面,仅对制造过程进行控制是不能保证产品质量的。另一方面,在质量保证的过程中又要平衡相关成本。

但企业往往在质量和成本之间难以协调统一。从各个行业工程实践经验来看,设计决定了产品的固有质量和产品80%的成本。因此,许多新的设计理念和制造模式,如六西格玛设计(Design for Six Sigma, DFSS)、虚拟制造、网络制造、敏捷制造、并行工程等应运而生,需要人们去探讨和研究这些新设计理念和制造模式所涉及的理论和技术问题。质量是企业的立足之本,成本是生存之道,缩减成本、提高质量是现代企业管理中经常提及的目标,而容差设计的课题就是解决质量与成本之间的平衡问题。

既然容差的作用非同小可,那么,如何设计容差的问题就显得很重要了。容差设计是通过研究容差范围与产品质量、成本之间的关系,对质量和成本进行综合平衡的科学方法。工程实践与理论均表明,容差设计的好坏很大程度上决定了产品最终质量与全寿命周期成本,从而决定企业获利的情况。因此,容差设计问题仍然是理论界应当而且必须十分关注的问题。

1.1.2 全寿命周期六西格玛容差设计问题的提出

从文献研究和工程实践表明,系统科学的容差设计方法对企业的T、Q、C、S与E竞争要素提升具有重要的贡献。容差设计是一种科学的容差分配的方法,用来评估设计中重要的子系统和零部件规格,以在满足高质量、高可靠前提下达到产品制造以及全寿命周期成本最低的目的。容差设计问题和产品成本、质量和周期有着密切的联系,它贯穿于产品全寿命周期的全过程,已成为制造业努力提高可生产性和质量的焦点问题。所以要全面提高企业竞争力和达到6Sigma质量,就必须采用容差设计技术。尤其在精密制造业中,容差的地位是不可或缺的。不恰当的容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。因此,以制造业为例,容差优化设计隐含着巨大的降低产品制造成本和改善产品品质的潜力。

各国学者对支持容差设计各个阶段的技术和工具进行了广泛而深入的研究。早期的研究工作主要围绕产品详细设计阶段进行。但是,一方面,现有的许多容差优化设计方法主要还在理论研究和在实验室实现的层次上,尚未推广应用到设计阶段和制造现场。许多设计者迫切需要“现在就改善”的容差优化设计方法。另

一方面,容差设计所涉及的因素较多,但传统的容差设计流程较少考虑供应链环境下全寿命周期各阶段制造资源的约束。在设计质量工程技术开始实用化的今天,容差设计技术的研究及实际工程应用已明显落后于系统设计、参数设计等质量工程技术的研究与发展,特别是与产品全寿命周期六西格玛解决方案 LCSS 等先进技术已不适应,已成为制约质量工程技术继续发展的瓶颈环节之一,因此需要集中力量进行深入系统的研究。

另一方面,为了提升企业的质量竞争力,六西格玛管理(简称6Sigma)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6Sigma方法的过程中,一个重要的理念是:6Sigma质量首先是设计出来的,然后才是生产出来的。因而对实施6Sigma的技术方法的研究是企业提高竞争力的重要途径。但目前许多企业在推广6Sigma时把重点放在了DMAIC(Define定义、Measure测量、Analyze分析、Improve改善、Control控制)流程上,而在理论上对6Sigma设计(DFSS)的支撑技术研究却不够。当摩托罗拉在其质量之旅不断改进时,发现通过DMAIC对过程的不断改进虽然能够达到4~5个 σ 水平,而公司却面临Harry(2000)所指出的“5 σ 墙”^[1]。只有大力推进六西格玛设计,并对系统设计、参数设计和容差设计的作用有了更清楚地理解才有可能达到6Sigma水平^[1]。所以我们仅仅满足工程规格和功能需求是不够的,应当重视从产品全寿命周期、面向制造与装配的设计(DFMA)等角度来进行产品的设计。邵家骏等(2007)提出的产品全寿命周期六西格玛解决方案(Product Life Cycle Six Sigma Solution,简称LCSS)^[2]则把重视设计、全寿命周期的思想进行了融合,可以为产品设计方法的拓展提供借鉴。

能否把容差设计与LCSS结合起来呢?从文献研究和工程实践表明,现有容差设计方法中有关六西格玛系统方法的应用很少,从质量工程和健壮设计角度所研究的容差设计也很不成熟,传统的容差设计方法大多不符合全寿命周期全局优化、并行工程及DFMA的设计思想,而低成本、高质量、短周期已不能单独决定制造业的竞争优势。因此,如何基于全寿命六西格玛设计的思想、面向X设计,探索新的容差设计方法,设计并生产出低成本、短周期和高质量的产品来获得竞争优势,从理论界和工程界两个角度都显得非常必要。因此如何在LCSS中进行容差设计是一个亟待研究的问题。于是,作者就产生了把这三方面同时考虑的想法,这就是本书提出的基于产品全寿命周期六西格玛管理的容差设计(Tolerance Design Based on LCSS,简称TD Based on LCSS)。

1.1.3 研究的意义

1. 研究的实践意义

容差是产品性能或质量特性的规格。容差设计是基于顾客需求的设计规格分

析与过程能力的综合,是平衡产品质量和成本的重要方式。从当前工程实践的情况来看,容差设计基本上还是凭工程师的经验来进行,缺乏足够的适用理论和方法的支持。

TD Based on LCSS 是并行质量工程思想的体现,是实现面向 X 设计(Design for X, DFX)、达到 6Sigma 质量并降低全寿命周期成本的关键技术。从技术角度看,TD Based on LCSS 方法有利于制造资源的充分利用,有利于产品质量的提升,也有利于低成本实现,同时是达到高质量、低成本、高效益的有效质量工程方法,在现代设计中将发挥重要作用。

从应用角度来看,对于目前还处于拍脑袋、凭经验的容差设计工程实践现状来说,TD Based on LCSS 更体现了工程界解放设计思想,冲破传统经验桎梏的精神,是适应产品设计方法革新发展的需要,也体现了容差设计与其他配套先进方法接轨的发展趋势。因此,创建系统科学的 TD Based on LCSS 方法论对指导容差工程实践是非常必要的。本书的研究对于更好地指导工程界科学开展容差设计,具有重要的现实意义。TD Based on LCSS 将进一步推动 6Sigma 现代质量管理方法在我国企业中的应用,同时也有助于提高我国在容差设计方法上的技术水平。因此,对 TD Based on LCSS 的研究将具有极其重要的实践价值。

2. 研究的理论意义

由于发达国家的制造业对容差设计极其重视,因此,越来越多的研究人员投入到容差问题的研究中来,并且产生了一系列影响面很大的成果。容差设计问题也因此成了设计与管理学科的一个重要研究领域。但是迄今容差设计的研究大多是在关注制造成本的背景下进行的。

容差设计现有理论在工程界应用效果如何?容差设计理论应该如何进一步发展?而容差又对产品的全寿命周期成本影响规律是什么呢?产品全寿命周期的更多因素如可靠性、维修性、安全性等是否也对容差设计决策有一定影响?容差设计方案对 LCC 各组成部分如制造成本、使用维修成本影响上是否存在差异?这些都是理论界尚需解决的问题。当前国内外有关这方面的研究还很少,将全寿命周期成本与容差设计相结合的研究更是凤毛麟角,对基于六西格玛管理的产品全寿命周期容差设计研究的文献目前也还没有见到。

从理论上讲,LCSS 是 6Sigma 管理模式提升企业竞争力的主要途径之一,而 TD Based on LCSS 将为 LCSS 提供关键的支撑技术和方法。因此,本书的研究对于揭示容差设计方法对 LCC 影响的内在规律,建立基于 LCC 的容差设计流程、工具和方法,丰富容差设计理论具有重要的学术价值。

1.2 国内外研究综述

1.2.1 容差概述

通过文献研究发现,容差设计的研究已取得了较大的发展,且出现了不少新的容差设计理论。下面介绍容差设计历史及发展现状。

容差在加工业已经应用了100多年了,容差的最初概念源于Eli Whitney的互换性思想,即使得机器零件足够精确以达到装配互换性^[3]。随着20世纪早期大批量生产的需求,容差设计的发展趋向于提高可制造性和加强质量控制。在1988年由NSF和ASME发起的MTW(Mechanical Tolerancing, Workshop)就是对容差关注的证明^[4]。关于容差设计早期的出版文献可追溯到20世纪50年代,C. J. Marks(1953)论述了如何利用容差图安排容差^[5], E. W. Pike(1953)研究了以最大化经济安排容差的问题^[6],起源于20世纪50年代的尺寸链技术是容差设计的基本工具^[7, 8]。20世纪70—80年代,研究者在容差技术领域已经做了许多工作,尤其是计算机辅助容差设计得到了很大发展,王兆征在《计算机辅助尺寸容差设计的研究》中给予了详细论述^[9]。在过去的几十年里,关于容差设计在制造方面的研究主要集中于满足设计功能需求、最小化制造成本和最大化可生产性等方面,其中的一个重要领域是容差分析和综合。H. C. Zhang和M. E. Huq(1992)对容差技术进行了概括和总结,并对未来趋势进行展望,把以前的研究按分析方法的不同划分为五类:尺寸容差链技术,容差中的几何模型,统计和概率模型,基于分析和综合的容差,基于成本的容差算法^[10]。

国内浙江大学的吴昭同等研究了计算机辅助容差设计、方差分析在健壮容差设计(Robust Tolerance Design)中的应用、现代质量工程中几个重要问题的研究进展和基于田口质量观的并行容差设计等几个方面^[11];浙江大学曹衍龙等进行了基于双响应面方法的容差设计研究和容差-成本健壮性分析^[12];哈尔滨工业大学的姬舒平等提出了一种基于制造环境的统计容差分析方法^[13]。这些研究均以制造成本最低为目标函数来优化容差。陈立周所著《稳健设计》一书中的容差设计方法实质上是容差约束来实现健壮设计(Robust Design),而不是优化分配容差^[14]。

1.2.2 容差设计研究综述

合理的容差设计对于提高可生产性、产品质量和节约成本是一个关键的因素,因而在质量工程领域,以田口思想为基础发展起来的容差设计和优化容差成为研究热点之一。

目前容差设计优化的方法主要有:线性或非线性规划法、最小成本法、遗传

算法、模糊综合法、人工智能法等^[15]。

容差设计首推田口三次设计中的容差设计及其质量损失函数^[16-20]；以之为基础，Chen (1989)、Fathi (1990) 和 Jeang (1994、1995) 等以质量损失函数为目标作了进一步的研究^[21-23]。由于质量损失函数易于应用且具有经济意义，大多数以之作为容差设计的优化目标。田口的正交表在统计上的缺陷限制了质量损失函数在容差设计中的应用^[24]。

H. Vasser^[25] 等采用统计的容差来计算产品的总成本(加工成本和质量损失成本)，并以此及各已知加工工序能力来选择零件的加工方法；J. R. Derrico 和 N. A. Zaino^[26] 改进了 Taguchi 方法(调整样本点以使其更逼近尺寸的正态分布)，并以质量损失最小进行了容差设计。

D. B. Parkinson^[27] 应用田口三次设计方法，认为尺寸名义值是可以调整的，而设计变量(实际尺寸)是在名义尺寸和容差的范围内变动，同时装配性能(如装配间隙)为实际尺寸的函数，这样设计的目标就是使装配间隙变动(最大和最小的差值)最小，从而使得装配性能尺寸变动的敏感性最小，实现健壮设计。

Gadallah^[28] 利用正交试验所获得的模拟数据，以总成本最小进行了容差设计；Jeang^[29] 应用商业软件 Monte Carlo 方法模拟获得实验数据，然后进行试验设计(Design of Experiments, DOE)，找出能降低成本并可提高质量的最佳方案，应用 Taguchi 类型质量损失函数，以综合成本最小为目标来设计容差；Jeang^[30] 应用响应面法(Response Surface Methodology, RSM) 以综合成本最小进行了容差设计。

Wu^[31] 认为质量损失和加工成本应处于同等重要的地位，因此也以综合成本最小进行容差设计，但采用了不对称的损失函数；Zhang Chun^[32] 认为容差 - 成本函数中的参数是不确定的，因此很难得到准确的模型，而且基于总成本最小的设计方法没有将加工过程的优化包括在内。

从所应用的方法上来划分，大量的研究可分为两个方面：

(1) 将容差设计问题用各种成本 - 容差函数和(或)质量损失函数作为一个线性或非线性优化问题，通过数学模型或优化技术来进行容差设计。这些方法的目标通常是在满足装配要求的前提下，使制造成本最低。因此成本 - 容差函数得到了广泛的研究，提出了多种不同的成本和容差数学模型，比较成熟的有^[33-44]：

① 指数模型(Exponential Model)：

$$C(T) = a_0 e^{-a_1 T}$$

② 负平方模型(Reciprocal Squared Model)：

$$C(T) = \frac{a_0}{T^2}$$

③ 倒数幂指数模型(Reciprocal Powers Model)：

$$C(T) = a_0 T^{-a_1}$$

④ 多项式模型(Polynomial Model), 例如三次多项式模型为:

$$C(T) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3$$

⑤ 复合模型(Hybrid Model)。常用的有指数和幂指数混合模型:

$$C(T) = a_0 + a_1 T^{-a_2} + a_3 e^{-a_4 T}$$

线性和指数混合模型:

$$C(T) = a_0 + a_1 T + a_2 e^{-a_3 T}$$

指数和分式混合模型:

$$C(T) = a_0 e^{-a_1 T} + \frac{T}{a_2 T + a_3}$$

指数和倒指数混合模型:

$$C(T) = a_0 e^{-a_1 T} + a_2 e^{\frac{-a_3}{T}}$$

倒指数积和指数混合模型:

$$C(T) = a_0 T e^{\frac{-a_1}{T}} + a_2 e^{-a_3 T}$$

⑥ 改进的指数模型(Modified Exponential Model):

$$C(T) = a_0 + a_1 e^{-a_3(T-a_2)}$$

⑦ 神经网络模型:

利用神经网络的高度非线性映射特点, 以零件的容差作为神经网络的输入, 加工成本为网络的输出, 由此构造了加工成本 - 容差的神经网络模型。

这些模型的共同点是: 主要考虑的是制造成本, 没有考虑产品全寿命周期成本的变化规律。这些模型通常假定在某一特定的加工环境下, 采集足够的容差成本的统计数据, 然后用最小二乘法等来确定模型中的参数。这样的成本容差模型与具体实现容差的工艺过程没有或很少联系, 只是在特定的加工环境下具有良好的效果。然而在不同的加工环境下或采用不同的加工手段必然会导致加工成本以外的成本(比如使用维护成本等)差异, 则此模型就不能确切反映产品全寿命周期成本和容差的正确关系, 进行设计就可能带来较大的误差。显然, 这种做法是难以实现容差设计全局最优的目标。

(2) 利用实验设计和(或)计算机模拟优化方法进行容差设计。

H. Moskowitz^[44-45], R. Plante^[46] 提出了产品的多个质量指标为设计参数线性或二次函数的多变量的容差优化方法, 包括参数化和非参数化设计方法。前者用于已知设计参数分布函数的场合, 后者用于仅仅知道设计参数的方差和均值的场合。A. Jeang^[47-52] 提出了使产品制造成本、质量损失、返工成本以及废弃成本的总和为最小的装配容差优化模型, 并考虑产品质量和加工能力约束; 针对具体设计目标, 讨论了望目、望大、望小、望正态等容差设计模型; 研究了在产品装配设