

现代设计丛书



编著 陈立周

稳健设计

机械工业出版社

TB47

463858

现代设计丛书

稳健设计

陈立周 编著



00463858



机械工业出版社

DV86/13

稳健设计是近年来迅速发展的、面向提高与改善产品质量设计的一种工程方法，它的基本思想是使所设计的产品（或系统）无论在制造或使用中当结构参数发生微小的变差、或是在规定的寿命内当结构材料发生老化和变质时，都能保证产品质量的稳健性。

本书系统地介绍稳健设计的基本概念、原理和方法。全书共分7章。前两章主要介绍稳健设计的基本概念和原理以及常用的一些工具；第3章到第7章分别介绍稳健设计的几种方法：损失模型法、响应面模型法、容差模型法和随机模型法等，在每一章中结合方法的介绍附有一些应用实例，可供读者参考。

本书内容新颖、系统、概念清晰，文字简练，适合于自学，既可作为工程技术人员知识增新和创新设计的一本设计参考书，亦可作为工科院校的教师、研究生和高年级本科生的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

稳健设计/陈立周编著. —北京：机械工业出版社，1999.12

(现代设计丛书/姚福生主编)

ISBN 7-111-07720-2

I. 稳… II. 陈… III. 工业产品—产品质量—设计 IV. TB497

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第70469号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑：孙 薇 版式设计：霍永明 责任校对：贾丽萍

封面设计：吴泳江 责任印制：郭 峰

北京新华彩印厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000年5月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm^{1/32}·11.5印张·250千字

0 001—4 000册

定价：20.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993878、68326677—2721

编 辑 委 员 会

主任委员：姚福生

副主任委员：隋永滨

蔡文沁

委 员：吴宗泽

须 雷

刘宏增

孟明辰

段爱珍

黄纯颖

连 刚

刘志峰

陈立周

黄靖远

刘之生

黄洪钟

序

21世纪世界的一个巨大变革就是形成一个统一的全球市场，每一个国家都不可能离开这个全球市场求得自身的发展，都必须在这个全球市场的竞争中求得生存。这对我国制造业提出了严峻的挑战。

市场竞争的生命力在于产品的创新。任何科技成果要转变为有竞争力的商品，设计起着关键性的作用。设计是产品研制的第一道工序，设计工作的质量和水平，直接关系到产品的质量、性能、研制周期和技术经济效益。世界各国都十分重视产品的设计工作。

随着计算机技术的发展，特别是CAD技术的发展，设计手段发生了根本性变化，设计新理论、新方法、新技术不断涌现。广大工程技术人员渴望在“甩掉图板”的同时，更新设计思维，采用现代设计方法，真正提高产品开发能力和设计水平。为此，中国机械工程学会机械设计分会与机械工业CAD咨询服务中心联手，组织机械设计领域从事现代设计研究的、有专长、有经验的专家、教授，编写一套《现代设计丛书》，以适应我国进入21世纪技术创新和振兴制造业的需要。

由于现代设计涉及面广，本丛书选题较多，一时难以全部确定，原则上根据需要成熟一个确定一个，不追求系统和全面。因此，全套丛书的编写及出版将采取分批的方式进行。第一批将出版10册。它们是：《创新设计》、《智能设

计》、《并行设计》、《虚拟设计》、《稳健设计》、《绿色设计》、《优势设计》、《模糊设计》、《反求设计》、《方案设计》。

江泽民总书记在全国技术创新大会上强调，我们既要充分估量新的科技革命带来的严峻挑战，更要珍惜它带来的难得机遇。我们必须抓住机遇，正确驾驶新科技革命的趋势，全面实施科教兴国战略，大力推动科技进步，加强科技创新，加速科技成果向现实生产力转化，掌握科技发展的主动权，在更高的水平上实现技术发展的跨越。我们希望通过《现代设计丛书》的出版，能为我国科技创新工程做出一点应有的贡献。

《现代设计丛书》编委会

1999年8月

前 言

稳健性 (robustness), 在国内的一些技术文献中亦有叫鲁棒性, 是指因素状况 (原因) 发生微小变差对因变量 (结果) 影响的不敏感性, 如使产品性能对所用材质变差的不灵敏性, 能在一些情况下使用较廉价的或低等级的材料; 使产品对制造尺寸变差的不灵敏性, 可以提高产品可制造性、降低制造费用; 使产品对使用环境变化的不灵敏性, 能保证产品使用的可靠性和降低操作费用。根据这种指导思想, 对产品的性能、质量和成本综合考虑作出最佳设计, 既提高了产品质量, 又降低了成本, 这种工程设计方法称为稳健设计。

稳健设计最早源于 70 年代日本学者 G. Taguchi 所创立的以试验设计和信噪比设计为工具的三次设计法 (或称 Taguchi 法, 田口方法), 由于此方法对于提高产品质量和性能的稳定性具有重要作用, 引起了欧美各工业国家的关注, 并进行了一系列与 Taguchi 思想相结合的研究与生产活动, 特别是近年来, 随着计算机技术、优化和 CAD 技术的发展与应用, 产生了许多与 Taguchi 方法不完全一致的一些新方法。为此, 在目前的一些技术文献中把早期的三次设计称为 Taguchi 稳健设计, 而把有关既提高产品质量、又降低产品成本的工程方法统称为稳健设计。

本书是在总结近年来的工程稳健设计的发展及作者的一些研究成果基础上编写而成的, 系统地介绍了稳健设计的基本概念、原理和方法, 并把稳健设计分述为损失模型法、

响应面模型法、容差模型法和随机模型法等几种主要方法，其中损失模型法的基本内容是 Taguchi 稳健设计方法，但补充了约束多目标的试验设计方法。响应模型法和容差模型法是参考了国外的一些论文和著作（见主要参考书目）写成的。随机模型法，也包括质量、成本模型的稳健设计，是根据作者近期研究成果写成的。在编写本书过程中引用了国内外著作和论文中的一些内容和实例，在此对所有作者表示诚挚的感谢。

北京科技大学教授韩建友博士审阅了本书稿，提出了很多宝贵的意见；中国机械工程学会设计学会的秘书处和机械工业出版社的同志对本书的出版给予了热情的支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

希望本书的出版能对工程稳健设计的研究与应用起到促进作用，但是以此定名出版的著作是首次，由于编者水平所限，不妥和错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

1999 年 5 月于北京

目 录

前言

第 1 章 稳健设计的基本概念	1
1.1 概述	1
1.2 产品质量特性值的统计性质	2
1.2.1 产品质量特性值的波动与容差	2
1.2.2 产品质量问题	4
1.3 产品质量设计模型	7
1.3.1 产品的功能因素	7
1.3.2 模型的基本要素	8
1.4 稳健设计的基本原理与方法	11
1.4.1 基本原理	11
1.4.2 稳健设计	13
1.4.3 稳健设计的分类	16
1.4.4 稳健设计的一般步骤	18
1.5 稳健设计的发展现状与趋势	18
第 2 章 产品的质量信息及其分析方法	22
2.1 引言	22
2.2 质量特性的类型	22
2.3 质量特性的评价指标	26
2.3.1 部分缺陷	27
2.3.2 功能特性指数	27
2.3.3 质量损失函数	29
2.3.4 三种质量特性指标的比较	31
2.3.5 质量信息熵函数	32

2.4	稳健设计中的试验设计	34
2.4.1	试验设计的作用和分类	34
2.4.2	试验数据的方差分析	37
2.4.3	试验数据的相关性分析	48
2.4.4	试验数据的回归分析	50
2.5	质量特性的随机性分析	58
2.5.1	一般解析关系	59
2.5.2	均值和方差的近似计算方法	62
2.5.3	数值计算方法	64
2.5.4	随机模拟计算方法	67
第3章	基于损失模型的稳健设计	73
3.1	概述	73
3.2	质量损失模型	74
3.2.1	功能质量损失函数	74
3.2.2	信噪比	79
3.2.3	Taguchi 三次设计法	87
3.3	正交试验设计	88
3.3.1	正交表	89
3.3.2	正交试验设计	95
3.4	Taguchi 参数设计	102
3.4.1	参数设计的一般原理和步骤	102
3.4.2	用正交试验的参数设计	105
3.4.3	动态特性的参数设计	110
3.5	Taguchi 容差设计	119
3.5.1	引言	119
3.5.2	用正交试验的容差设计	119
3.6	约束多目标的 Taguchi 稳健设计	132
3.6.1	方法的基本思想和步骤	132
3.6.2	矛盾目标的处理方法	135

3.6.3	计算示例	136
第4章	基于响应面模型的稳健设计	144
4.1	概述	144
4.2	响应面模型的拟合和分析	146
4.2.1	一阶响应面模型	146
4.2.2	二阶响应面模型	149
4.2.3	用正交多项式拟合响应面模型	
151	4.2.4 二阶响应面模型分析	
157	4.3 响应面设计	161
4.3.1	试验设计	161
4.3.2	一阶响应面设计	168
4.3.3	二阶响应面设计	170
4.3.4	响应面模型几个合乎需要的基本性质	172
4.4	用混合水平数值的响应面设计	176
4.5	响应面法在稳健设计中的应用	
182	4.5.1 最速上升法	182
4.5.2	稳健优化设计准则	186
4.5.3	响应面法稳健设计的一般程序	188
4.5.4	应用示例	189
第5章	基于容差模型的稳健设计	197
5.1	概述	197
5.2	容差分析原理	199
5.2.1	基本原理	199
5.2.2	容差的计算	200
5.2.3	方差的计算	202
5.2.4	设计函数的因子设计求积法	204
5.3	容差模型	208
5.3.1	稳健设计准则	208
5.3.2	可行稳健性	209

5.3.3 稳健可行域的基本概念	215
5.4 基于容差模型稳健设计的二步解法	217
5.4.1 方法的基本思想	217
5.4.2 计算示例	219
5.4.3 传递变差的控制	223
5.5 基于容差模型稳健设计的优化解法	226
5.5.1 两种基本模型	227
5.5.2 计算示例	230
第 6 章 基于随机模型的稳健设计	237
6.1 引言	237
6.2 随机模型的基本概念	238
6.2.1 可控因素的随机性分析	238
6.2.2 不可控因素的随机性分析	241
6.2.3 设计函数的随机性及约束类型	246
6.3 稳健设计随机模型	250
6.3.1 产品质量设计准则	250
6.3.2 稳健优化设计建模	253
6.4 随机模型的计算方法	255
6.4.1 随机模拟方法	256
6.4.2 等价转换逐次逼近法	259
6.4.3 稳健设计优化算法	263
6.5 应用示例	264
第 7 章 基于成本 - 质量模型的混合稳健设计	278
7.1 引言	278
7.2 产品成本分析与估算方法	279
7.2.1 产品成本分析	279
7.2.2 制造成本的计算模型	281
7.2.3 使用成本的计算模型	285
7.3 混合稳健设计方法	286

7.3.1 成本-质量模型	286
7.3.2 混合稳健设计方法	287
7.3.3 应用示例	289
7.4 随机优化设计方法	292
7.4.1 基本原理	292
7.4.2 应用示例	293
主要参考文献	297
附表	300
1. 正态分布表	300
2. F 检验的临界值 (F_α) 表	308
3. t 分布的双侧分位数 t_α 表	328
4. 正交表	331

第1章 稳健设计的基本概念

1.1 概述

随着世界经济的发展和市场竞争的剧烈化，以及用户对产品的多样化要求、生产工艺和经营的不断进步，各发达工业国家把产品质量、成本和交货时间归结为现代商品生产的三个基本要素。

众所周知，产品质量是企业赢得用户的一个最关键因素。任一种产品，它的总体质量一般可分为用户质量（外部质量）和技术质量（内部质量）。前者是指用户所能感受到、见到、触到或听到的体现产品好坏的一些质量特性；后者是指产品在优良的设计和制造质量下达到理想功能的稳健性（robustness），亦称鲁棒性。比如说，产品性能与某个因素有关，当该因素发生微小变化时，产品性能亦随之变化。如果这种变化很小，则认为该产品性能对该因素的变化是不敏感的，可称是稳健的，或者说产品性能对该因素的变化具有稳健性。

实际上，任何一种产品，都有一些因素影响其质量，对待这些因素一般可以有两种态度：其一是尽可能消除这些因素，但实际上往往很难实现，即使可能亦需要花费很大的代价，这是不值得的；其二是尽量降低这些因素的影响，使产品特性对这些因素的变化不十分敏感。根据这种指导思想，在近几年来，逐渐发展了一种面向产品质量的提高性能稳健

性的新工程方法，称为工程稳健设计（Engineering Robust Design）。比如，使产品性能对原材料品质的变差不灵敏，这样就可以在一些情况下采用价廉（低级）的原材料；使产品对制造上的变差不灵敏，就可降低加工精度，减少产品的制造费用；使产品对使用环境的变化不灵敏，就可以提高产品使用的可靠性，减少操作费用等。

1.2 产品质量特性值的统计性质

稳健设计的主要作用是提高产品的质量和减少质量损失。这里所指的质量是一种理想质量的概念，即指产品功能或服务能够符合规定技术要求的程度。这样，质量的好坏便可以用产品的一些技术特性与规定的标准值的一致性程度来衡量。然而，由于产品的技术特性与标准值的差异，会造成生产厂家和用户的损失，按照田口（G.Taguchi）说法“产品的质量就是该产品给社会带来的损失^[25]”。在理想质量下，损失应为零，若损失愈大，则质量愈差。在一般工业产品中，产品的质量常通过对特定的功能、特性的测定或测量所得的数值来评定，这一数值叫做质量特性值。

1.2.1 产品质量特性值的波动与容差

在进行产品设计时，首先需要考虑的是如何保证它的质量特性（或输出特性）满足规定的技术要求。但是实际上由于在制造和使用中许多因素的影响，产品的质量特性值并非与所规定的目标值完全一致。例如零件不可能按规定的名义尺寸精确地加工出来，发动机亦不可能按规定的名义输出功率进行工作；钢也不可能按规定的强度极限值生产出来，这就是说，任何一种产品，它的质量特性值与名义值之间都存在一定的偏差。这种偏差愈小，产品质量愈好。设产品质量

特性 y 值对目标值 y_0 的变差为 δ_y , 则

$$y = y_0 + \delta_y \quad (1-1)$$

实践证明, δ_y 是服从一定概率分布的随机变量。在一些情况下, 当它服从正态分布时, 其变量为 $\delta_y \sim N(0, \sigma^2)$ 。例如, 如图 1-1 所示, 有两个设计: 设计 I 和 II, 在图 a 中, 虽然 y_1 和 y_2 的统计均值 \bar{y}_1 和 \bar{y}_2 都接近于目标值 y_0 , 但由于 y_1 的散布 (波动) 范围大于 y_2 , 因而设计 II 要好于设计 I; 另外如图 b 所示, $\bar{y}_2 - y_0 < \bar{y}_1 - y_0$, 虽然 y_2 的散布 (波动) 范围大于 y_1 , 但认为设计 II 也好于设计 I。由此可知, 在设计中要想获得优质的产品, 除要使质量特性的波动范围小外, 还应该保证其统计均值 \bar{y} 接近于目标值 y_0 。

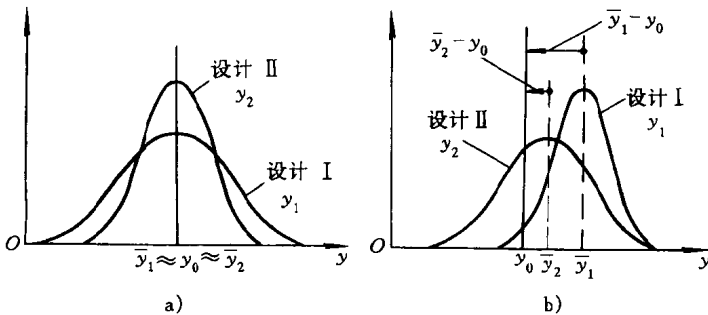


图 1-1 产品质量特性的波动

考虑到产品质量特性的这类波动性, 为了保证产品能够发挥正常的功能, 规定出了它的允许波动范围

$$R_y = [y_0 + \Delta y^-, y_0 + \Delta y^+] \quad (1-2)$$

其中 Δy^- 和 Δy^+ 称为质量特性的容差, 是产品质量特性波动的允许界限, 如图 1-2 所示。

例如, 某种材料的抗拉强度按其技术规范规定为 $(45 \pm$

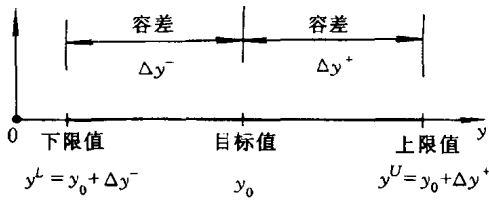


图 1-2 质量特性的目标值及其容差

2)MPa, 可知该材料抗拉强度的容差 $|\Delta y^+| = |\Delta y^-| = \Delta y = 2\text{MPa}$, 名义值 $\bar{y} = 45\text{MPa}$, 极差 $R_y = [43, 47]\text{MPa}$, 这就是说, 只要该种材料出厂的抗拉强度在此极差内都认为是合格的。

若用容差来控制产品的质量, 则要求产品质量特性的实际变差必须满足条件

$$|\delta y| \leq |\Delta y| \quad (1-3)$$

1.2.2 产品质量问题

在一般的工业产品中, 多数以其功能特性值对目标值 y_0 的变差大小来评定质量好坏, 若规定 $|y - y_0| > \Delta y$ 为不合格品 (或废品), 则 $|y - y_0| \leq \Delta y$ 为合格品 (或正品), 在合格品中有时又将它划分为 n 个等级, 如 A、B、C... 或优、良、中... 等, 第 i 级品质量特性值的允许偏差为

$$(i-1)\Delta y/n < |y - y_0| \leq i\Delta y/n \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1-4)$$

如果某一种产品的质量特性服从正态分布 $y \sim N(\mu_y, \sigma_y^2)$, 按正态分布的“ 3σ ”原则, 其质量容差可取 $\Delta y = 3\sigma_y$, 如图 1-3 所示, 则有

$ y - y_0 \leq \Delta y/3$	产品为 A 级优质品	占 68.3%
$\Delta y/3 < y - y_0 \leq 2\Delta y/3$	产品为 B 级良品	占 27.2%