

周廷美 蓝悦明 编著

机械零件与系统 优化设计建模及应用



Chemical Industry Press



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

机械零件与系统优化设计建模及应用

周廷美 蓝悦明 编著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

机械零件与系统优化设计建模及应用/周廷美, 蓝悦明编著. —北京: 化学工业出版社, 2004. 12

ISBN 7-5025-6350-4

I. 机… II. ①周…②蓝… III. 机械设计-最佳化-数学模型 IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 123590 号

机械零件与系统优化设计建模及应用

周廷美 蓝悦明 编著

责任编辑: 李玉晖

文字编辑: 宋 薇

责任校对: 边 涛

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64982530

http://www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 850mm×1160mm 1/32 印张 9 $\frac{3}{4}$ 字数 254 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6350-4/TH·273

定 价: 24.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

应用现代设计理论和方法来改进和提高机械零件与系统的设计质量、降低成本、缩短开发周期、增强产品的竞争能力已被各国实践证明是非常有效的途径。机械优化设计是现代设计方法中最活跃的分支之一，各种优化方法的研究和应用使得机械零件及系统的设计更为合理和实用。

本书较系统地介绍了机械优化设计的常用方法及最新的研究成果，包括多目标优化、非线性规划的灵敏度分析、模糊优化、可靠性优化、工程随机变量优化、智能优化等；同时对机械零件与系统的优化设计建模及应用作了较全面、详细的论述，且重点突出于工程应用。在编写本书的过程中，参考了国内外大量的资料，力求内容的完整、科学和新颖。

本书可作为高等学校研究生“机械优化设计”课程的教材，也可供有关专业的学生、教师及工程技术人员阅读。

全书共分8章，第1、3、4、7、8章由周廷美撰写，第2、5、6章由蓝悦明撰写；于明知、吕俊成、周球、孙涛、卫凌云同志协助收集和整理了大量的资料；本书编写过程中还引用了其他一些作者的资料，在此一并致谢。

本书如能对读者从事机械优化设计提供帮助，那就是作者最大的愿望。由于编著时间仓促，加之作者水平所限，错误和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2004年10月

内 容 提 要

本书系统地介绍了机械优化设计的常用方法及最新的研究成果，包括多目标优化、非线性规划的灵敏度分析、模糊优化、可靠性优化、工程随机变量优化、智能优化等；同时对机械零件与系统的优化设计建模及应用作了较全面、详细的论述，且重点突出于工程应用。本书可使读者了解各种优化方法的适用条件和应用方法，书中大部分模型都有实际工程背景，可以方便地套用。

本书可供机械设计工程、研究、开发技术人员参考，也可作为高等学校相关专业本科生、研究生教材。

目 录

第 1 章 优化设计方法	1
1.1 优化设计概述	1
1.1.1 优化设计的数学模型	2
1.1.1.1 传递转矩并承受弯矩的等截面轴的优化设计	2
1.1.1.2 优化设计的数学模型	4
1.1.2 优化过程的几何描述	6
1.1.3 迭代终止准则	7
1.2 无约束优化方法	7
1.2.1 常用一维搜索方法	8
1.2.1.1 搜索区间的确定	8
1.2.1.2 0.618 法	9
1.2.1.3 一维搜索的其他方法	11
1.2.2 梯度法 (最速下降法)	12
1.2.2.1 梯度法的基本思路	12
1.2.2.2 算例	13
1.2.2.3 梯度法讨论	14
1.2.3 牛顿型方法	16
1.2.3.1 基本思路	16
1.2.3.2 算例	17
1.2.3.3 牛顿法的讨论	18
1.2.4 共轭梯度法	20
1.2.5 变尺度法	20
1.2.5.1 DFP 变尺度法	22
1.2.5.2 DFP 变尺度法的计算步骤	22
1.2.5.3 BFGS 变尺度法	24

1.2.6	坐标轮换法	24
1.2.6.1	坐标轮换法的基本思路	25
1.2.6.2	坐标轮换法的讨论	26
1.2.7	Powell 方法	27
1.2.7.1	Powell 的基本算法	27
1.2.7.2	改进 Powell 的算法	29
1.2.8	各种无约束优化方法的比较	32
1.2.8.1	迭代公式	32
1.2.8.2	各种方法的比较	32
1.3	约束优化	33
1.3.1	惩罚函数法	34
1.3.1.1	内点惩罚函数法	35
1.3.1.2	外点惩罚函数法	37
1.3.1.3	SUMT 方法的讨论	38
1.3.1.4	混合惩罚函数法	40
1.3.1.5	惩罚函数法的计算过程及框图	41
1.3.2	复合形法	42
1.3.2.1	初始复合形的生成	42
1.3.2.2	搜索策略	43
1.3.2.3	复合形法的讨论	45
1.3.3	简约梯度法及广义简约梯度法	45
1.3.3.1	简约梯度法	45
1.3.3.2	广义简约梯度法	49
1.4	应用实例	51
1.4.1	行星轮系的优化设计	51
1.4.2	键连接的优化设计	53
1.4.2.1	平键、楔键、切向键的失效形式及其优化数学模型	53
1.4.2.2	优化结果	55
1.4.3	滑块式万向接轴优化设计	56
1.4.3.1	优化模型的建立	56
1.4.3.2	优化方法的选择	57
1.4.3.3	计算结果及处理	57

1.4.4	汽车变截面钢板弹簧的优化设计	58
1.4.4.1	数学模型的建立	59
1.4.4.2	优化设计计算	66
1.4.4.3	计算结果分析	67
	参考文献	68
第2章	机械优化设计的建模及优化方法评价	69
2.1	机械优化设计的一般过程	69
2.2	机械优化设计建模的基本原则	71
2.2.1	确定系统边界	71
2.2.2	设计变量的选择	72
2.2.3	确定目标函数	73
2.2.4	建立约束函数	74
2.3	机械优化设计数学模型的分析与变换	78
2.3.1	模型变换的概念及作用	78
2.3.2	尺度变换的概念	80
2.3.3	模型线性化	83
2.3.4	将代数模型转化为几何规划	85
2.4	优化方法的评价	87
2.4.1	考题的选择	87
2.4.2	优化方法及程序的评价指标	88
2.4.3	评价结果	89
2.4.4	优化方法程序的选择方法	90
	参考文献	91
第3章	多目标优化设计的建模及应用	92
3.1	多目标优化设计的数学模型	92
3.2	多目标优化设计的求解方法	93
3.2.1	统一目标法	93
3.2.1.1	线性加权法	93
3.2.1.2	理想点法	93
3.2.1.3	目标规划法	94
3.2.1.4	乘法法	94

3.2.1.5	功效系数法	95
3.2.2	主目标法	95
3.2.3	分层序列法	96
3.2.4	极大-极小法	96
3.3	应用实例	97
3.3.1	摆线针轮行星减速器多目标优化设计	97
3.3.1.1	基本尺寸的几何计算	97
3.3.1.2	建立优化设计的数学模型	97
3.3.1.3	多目标优化设计方法的选择	103
3.3.1.4	计算实例	103
3.3.2	四连杆变幅机构的多目标优化设计	104
3.3.2.1	四连杆变幅机构分析	104
3.3.2.2	四连杆变幅机构优化的数学模型	105
3.3.2.3	四连杆变幅机构的优化结果	109
	参考文献	110
第4章	非线性规划的灵敏度分析	111
4.1	概述	112
4.2	使用几何规划进行灵敏度分析的原理和方法	112
4.2.1	正定几何规划和带负数的几何规划灵敏度分析的基本原理	112
4.2.1.1	几何规划简介	112
4.2.1.2	使用几何规划进行灵敏度分析的基本原理	114
4.2.2	使用几何规划进行灵敏度分析的算法	117
4.2.3	使用几何规划进行结构优化设计的灵敏度分析	120
4.2.3.1	建立空心梁的优化设计的数学模型	120
4.2.3.2	使用几何规划进行灵敏度分析	122
4.2.3.3	应注意的问题	125
4.3	使用惩罚函数法进行灵敏度分析的原理和方法	125
4.3.1	一般参数非线性规划	126
4.3.2	灵敏度分析的基本原理	127
4.3.3	使用惩罚函数法进行灵敏度分析的基本原理	130

4.4	使用惩罚函数法进行起重机结构优化设计的灵敏度分析	133
4.4.1	起重机箱型主梁的优化问题	133
4.4.2	灵敏度分析	134
4.5	使用惩罚函数法进行四连杆变幅机构优化的灵敏度分析	138
4.5.1	约束右边干扰时的灵敏度分析	138
4.5.2	参变量干扰时的灵敏度分析	142
4.5.3	四连杆变幅机构灵敏度分析的结果	153
	参考文献	156
第5章	模糊优化设计的建模及应用	157
5.1	常规机械优化设计与模糊优化设计	157
5.2	模糊优化设计的数学模型	158
5.2.1	模糊优化的设计变量	158
5.2.2	模糊优化设计的目标函数	159
5.2.3	模糊优化设计的约束条件	159
5.2.4	模糊优化的数学模型	159
5.3	模糊优化设计的基本含义及分类	160
5.3.1	模糊优化设计的基本含义	160
5.3.2	模糊优化设计的分类	160
5.4	对称模糊优化设计及其解法	161
5.4.1	对称模糊优化模型	161
5.4.2	模糊优越集的其他形式	162
5.4.3	非模糊目标函数极值的求解方法	163
5.5	模糊优化迭代的基本解法	163
5.5.1	模糊优化迭代的基本原理	163
5.5.2	对称模糊优化迭代的步骤	165
5.6	非对称优化设计的数学模型	166
5.6.1	非对称模糊优化设计的数学模型	166
5.6.2	容差的确定	168
5.6.3	非对称模糊优化模型的水平截集法	171

5.7	多目标模糊优化	173
5.7.1	常规多目标优化设计的模糊解法	173
5.7.2	对称多目标模糊优化模型的求解	175
5.7.3	普通多目标模糊优化模型的求解	176
5.7.4	模糊综合评判的多目标优化解	177
5.7.5	多目标模糊优化设计的理想点法	179
5.8	应用实例	183
5.8.1	柱塞式液压泵系统模糊可靠性优化设计的研究	183
5.8.1.1	柱塞泵系统可靠度模型的建立	183
5.8.1.2	柱塞泵系统的模糊可靠度分配	184
5.8.1.3	计算结果及结论	187
5.8.2	圆柱形螺旋压缩弹簧的模糊多目标优化设计	188
5.8.2.1	多目标模糊优化模型的建立	189
5.8.2.2	模糊约束的处理	191
5.8.2.3	优化模型的求解	193
	参考文献	194
第6章	可靠性优化设计的建模及应用	195
6.1	机械可靠度计算模型	195
6.1.1	机械零件应力-强度“干涉”模型	195
6.1.2	应力、强度均为正态分布的可靠性模型	197
6.1.3	应力和强度为其他分布时的可靠度计算	198
6.1.4	机械零部件强度可靠性近似计算模型	199
6.1.4.1	图解近似计算模型	199
6.1.4.2	概率分布的 Edgeworth 级数渐近展开近似计算模型	200
6.1.4.3	Monta Carlo 近似计算模型	201
6.1.4.4	最大失效概率法	202
6.1.4.5	其他近似计算方法的可靠度计算	204
6.1.5	机械系统的可靠度计算	204
6.1.5.1	串联系统的可靠度	204
6.1.5.2	纯并联系统	205
6.1.5.3	表决系统	205

6.1.5.4	等待系统	206
6.1.5.5	复杂机械系统	207
6.2	机械系统可靠度优化分配模型	208
6.2.1	等分配模型	208
6.2.2	相对失效率模型	209
6.2.3	AGREE 分配模型	209
6.3	机械可靠度优化设计	210
6.3.1	机械可靠性优化设计的数学规划模型	210
6.3.1.1	单元零部件可靠性优化设计的数学规划模型	211
6.3.1.2	系统可靠性优化分配的数学规划模型	212
6.3.1.3	系统可靠性优化设计的整体数学规划模型	212
6.3.1.4	3种数学规划模型之间的关系及证明	213
6.3.2	机械系统可靠性优化设计的实现策略	214
6.3.2.1	耦合优化策略	214
6.3.2.2	分解协调优化策略	214
6.3.2.3	分散优化策略	217
6.4	应用实例	218
6.4.1	行星轮传动系统的可靠性优化设计	218
6.4.1.1	行星轮传动系统的优化设计模型	218
6.4.1.2	行星轮传动系统可靠性优化设计过程	220
6.4.1.3	计算实例与分析	221
6.4.2	装载机差速器的可靠性优化设计	222
6.4.2.1	差速器齿轮齿根弯曲强度的可靠度计算	223
6.4.2.2	差速器可靠性优化设计数学模型的建立	225
6.4.2.3	优化方法及计算结果分析	227
	参考文献	228
第7章	工程随机变量优化设计建模及应用	229
7.1	工程随机变量优化设计的数学模型	229
7.1.1	工程设计信息的不确定性	229
7.1.2	工程随机优化设计的基本概念	231
7.1.3	工程随机优化设计的几种基本模型	234

7.1.3.1	统计均值模型	234
7.1.3.2	概率约束函数模型	235
7.1.3.3	风险设计模型	236
7.1.3.4	容差设计模型	237
7.1.3.5	补偿模型	238
7.1.3.6	工程随机优化设计模型的统一形式	239
7.2	随机模型的求解方法	239
7.2.1	随机拟次梯度法	240
7.2.2	随机逼近法	244
7.2.3	随机模拟搜索法	245
7.3	应用实例	248
7.3.1	压力容器的概率优化设计	248
7.3.1.1	压力容器的概率优化设计数学模型	249
7.3.1.2	优化设计结果	250
7.3.2	气动换向装置输出特性的容差最优设计	251
7.3.2.1	设计条件	251
7.3.2.2	容差设计模型的建立	252
7.3.2.3	计算结果	253
7.3.3	不完全概率信息的连杆可靠性优化设计	254
7.3.3.1	连杆的力学模型	254
7.3.3.2	连杆优化设计的数学模型	256
7.3.3.3	连杆的优化求解	257
7.3.4	V带传动的概率约束函数模型的优化设计	257
7.3.4.1	建立V带传动的概率约束函数模型	258
7.3.4.2	V带的优化求解	263
	参考文献	264
第8章	智能优化设计建模及应用	265
8.1	神经网络优化计算原理	265
8.1.1	神经网络优化计算原理及过程	266
8.1.2	用于机械优化设计的几种神经网络模型	266
8.1.2.1	反馈神经网络	267

8.1.2.2	多层前向神经网络	268
8.2	神经网络优化计算的工程应用	270
8.2.1	齿轮传动机构人工神经网络辅助优化设计	270
8.2.1.1	BP神经网络模型原理	270
8.2.1.2	齿轮机构BP网络辅助优化设计	272
8.2.2	盘式制动器多目标优化的神经网络方法	275
8.2.2.1	建立盘式制动器优化设计的数学模型	275
8.2.2.2	神经网络优化	279
8.2.2.3	计算结果分析	280
8.3	用于机械优化设计的进化计算方法	281
8.3.1	遗传算法	282
8.3.1.1	遗传算法的计算步骤	282
8.3.1.2	基于遗传算法的双万向轴优化设计	283
8.3.2	进化策略应用于机械优化设计	287
8.4	基于过程的优化算法及在机床主轴中的应用	287
8.4.1	基于过程的优化算法基本理论	288
8.4.2	基于过程的机床主轴优化设计	290
8.4.3	计算结果分析	292
8.5	结束语	293
	参考文献	293

第 1 章 优化设计方法

1.1 优化设计概述

优化设计是 20 世纪 60 年代初发展起来的一门新学科，它将最优化原理和计算技术应用于设计领域，为工程设计提供了一种重要的科学设计方法。目前在工程设计的各个领域得到了广泛的应用。应用实践表明，优化设计不仅为工程设计提供了一种新的科学设计方法，使得在解决复杂设计问题时，能从众多的设计方案中找到尽可能完善的或最合适的设计方案，而且能大大提高设计效率和设计质量，具有较明显的经济效益和社会效益。如美国贝尔（Bell）飞机公司采用优化设计方法解决了 450 个设计变量的大型结构优化设计问题，一个机翼减轻重量达 35%。国外经验表明，采用优化设计可使结构节约材料或造价 10%~50%。

优化设计的理论基础是数学规划，采用的工具是电子计算机，与常规设计相比，具有以下两方面的优点。

① 常规设计方案的好坏取决于设计人员的经验，而优化设计能使各种设计参数自动向更优的方向进行调整，直到找到一个尽可能完善的或最合适的设计方案。

② 常规设计过程是人工试凑和定量分析比较的过程，其中涉及到大量的重复计算，设计人员不得不花费很长的时间进行繁琐的计算，而优化设计的手段是采用电子计算机，在很短的时间内就可以分析一个设计方案，并判断方案的优劣和是否可行，因此可以从大量的方案中选出更优的设计方案，这是常规设计所不能比的。

1.1.1 优化设计的数学模型

1.1.1.1 传递转矩并承受弯矩的等截面轴的优化设计

以图 1-1 所示的传递转矩并承受弯矩的等截面轴为例，设该轴两端装有齿轮或带轮等其他传动元件并由轴承支承。

(1) 设计变量

设计变量取为轴的直径 d 和传动元件的间距 l ，即

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d \\ l \end{bmatrix}$$

(2) 目标函数

以轴的质量为目标函数，要求越小越好。若轴所选用的材料密度为 ρ ，则目标函数为

$$f(\mathbf{x}) = \rho \frac{\pi d^2}{4} l = \rho \frac{\pi x_1^2 x_2}{4}$$

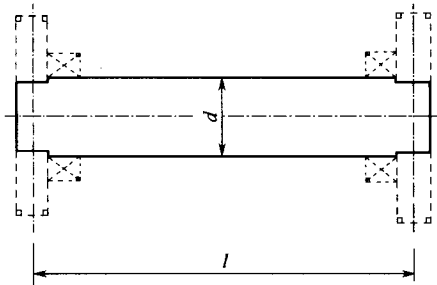


图 1-1 传递转矩并承受弯矩的等截面轴

(3) 约束函数

① 扭转强度约束条件。通过材料力学的计算公式可求得扭转应力的表达式，要使轴正常工作，其工作应力必须小于许用应力，即

$$\tau = \frac{M_T}{W_T} \leq [\tau]$$

式中 M_T ——轴所传递的最大转矩；

W_T ——轴的抗扭截面模量，对实心轴 $W_T = \pi d^3 / 16$ ；

$[\tau]$ ——许用扭转应力。

因此，扭转强度所决定的约束条件为

$$g_1(\mathbf{x}) = \frac{16M_T}{\pi x_1^3} - [\tau] \leq 0$$

② 扭转刚度约束条件。根据扭转刚度，要求扭转变形小于许用值，即

$$\varphi = \frac{M_T l}{G J_P} \leq [\varphi]$$

$$\theta = \frac{M_T}{G J_P} \leq [\theta]$$

式中 φ ——扭转角；

θ ——单位长度的扭转角；

G ——材料的剪切弹性模量；

J_P ——轴的抗扭截面模量，对实心轴： $J_P = \pi d^4 / 32$ ；

$[\varphi]$ —— φ 的许用值；

$[\theta]$ —— θ 的许用值。

因此，扭转刚度所决定的约束条件为

$$g_2(\mathbf{x}) = \frac{32M_T x_2}{\pi G x_1^4} - [\varphi] \leq 0$$

③ 几何约束

$$g_3(\mathbf{x}) = d_{\min} - x_1 \leq 0$$

$$g_4(\mathbf{x}) = x_1 - d_{\max} \leq 0$$

$$g_5(\mathbf{x}) = l_{\min} - x_2 \leq 0$$

$$g_6(\mathbf{x}) = x_1 - l_{\max} \leq 0$$

(4) 数学模型

$$\min f(\mathbf{x}) = \rho \frac{\pi x_1^2 x_2}{4}$$

$$\text{s. t. } g_1(\mathbf{x}) = \frac{16M_T}{\pi x_1^3} - [\tau] \leq 0$$