

机械优化设计方法

(第4版)

JIXIE YOUHUA SHEJI FANGFA

主编 陈立周 俞必强



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

机械优化设计方法

(第4版)

主编 陈立周 俞必强

北 京
冶金工业出版社
2014

内 容 提 要

本书是在前3版的基础上,根据优化设计理论与技术的发展并结合课堂教学经验,系统地介绍了机械优化设计的基本原理与方法,较为全面地介绍各种优化设计方法及其应用,包括无约束问题和约束问题等常用优化设计方法,模拟退火算法、遗传算法和蚁群算法等现代优化设计方法,复杂系统的多学科设计优化原理与方法以及工程应用中的多目标问题、离散问题、随机问题、模糊问题和稳健问题等优化设计方法。

本书可作为机械工程专业研究生教学用书,亦可作为相近工科专业的教学参考书。在使用本书时,各校可根据安排的教学时数和学生情况选用内容,对于40左右学时的,建议选用前8章内容,后面几章可以作为选讲内容。

图书在版编目(CIP)数据

机械优化设计方法/陈立周,俞必强主编.—4版.—北京:
冶金工业出版社,2014.1
ISBN 978-7-5024-6407-3

I. ①机… II. ①陈… ②俞… III. ①机械设计—最优
设计 IV. ①TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第270481号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 陈慰萍 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6407-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京百善印刷厂印刷

1985年6月第1版,1995年5月第2版,2005年3月第3版,

2014年1月第4版,2014年1月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;20印张;481千字;301页

42.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)



· 第 4 版前言 ·

近年来,在机械工业领域中,为了不断满足产品设计质量的高要求和国内外市场竞争的需要,学术界和工程界对现代设计理论、方法和技术的研究与应用有了很大的进展,新的设计理论、新的方法和新的技术不断丰富和拓展。工程优化设计虽然只是现代设计中的一个学科分支,但它对提高产品的设计质量和设计效率起到重要的作用,并也在实践中得到了发展和丰富。基于这个原因,及时修订本教材是十分必要的。

在这次修订中,保留了前3版原作者陈立周教授、周培德教授和高云章教授所撰写的内容,但做了一些精简、调整和更新,删去了一些不是很重要的内容,补充了一些新的内容。例如,在现代优化计算方法这一章中补充了蚁群算法;新增加了第9章“多学科问题优化设计方法”和第13章“稳健问题优化设计方法”。这几部分内容由俞必强博士撰写。

本书的修订和审稿,得到了翁海珊教授、邱丽芳教授的帮助;还应特别指出,本书出版得到北京科技大学研究生教育发展基金的资助,在此一并致以深切的谢意。

作者对给本书第3版提出过宝贵意见和改进建议以及指出错误的读者表示真诚的谢意。

书中不妥之处,望读者给予指正。

编 者

2013年6月于北京

· 第 3 版前言 ·

本书自 1993 年第二次修订出版以来, 刚好 10 年。在这段时间里, 设计工作多数已经发生了重要的变化, 除了计算机已成为设计工作的一种必备工具外, CAD 和优化设计等一些现代设计技术也已深入到日常的设计工作中, 并已成为提高设计质量和设计效率的重要手段。基于这一点, 在这次修订中, 一方面需要增加优化设计近期发展的一些理论与技术, 使之跟上本学科发展的步伐; 另一方面也要随着人们对优化设计认识的不断深入需要补充和修正一些概念和知识。但归根到底, 还是要加强优化建模、模型求解方法及其两者关系正确处理等方面问题的阐述。

在优化建模方面, 除了加强一般优化建模的论述外, 增加了稳健优化建模的概念和方法、人工神经网络用于建模的讨论以及对模型的单调性分析、解的稳健性和灵敏度分析等方面的介绍。

在求解方法方面, 除把原第 5 章和第 6 章精简合并为约束优化方法外, 增加了现代优化计算方法一章, 主要介绍模拟退火算法、遗传算法和人工神经网络算法等几种现代启发式算法。

除上述外, 在第 1 章中补充了设计过程概论, 强调了优化设计在设计全过程中的作用和应用价值, 以及优化设计学科发展中的一些新分支和名词术语。此外, 新增了第 11 章模糊问题优化设计方法, 删去了第 2 版中的附录。

作者对给本书第 1 版和第 2 版提出宝贵意见、改进建议和指出错误的读者表示真诚的谢意, 并希望大家继续关注本书的第 3 版。

在本次修订中, 翁海珊教授仔细地审阅了全稿, 并提出了许多宝贵的意见, 在此表示衷心的感谢。

编 者

2004 年 10 月于北京

· 第 2 版前言 ·

本教材自 1985 年 6 月出版以来,被一些工科院校本科、短期培训班选作教材,认为它的总体结构、内容与分量、论述方式等基本上是合适的。

编者在总结使用经验、听取读者意见的基础上,根据《冶金工业部关于编写高等院校教材的几项原则》对原教材进行了修订。在本次修订中,保留了原教材的特点、基本内容与风格,适当地加入了本学科发展中的某些新成就;删去了原教材中部分不适应本科生学习的内容;提高了内容的科学严密性和计算、数据、图表的正确性;重视学生对基本概念、原理的掌握和知识的获取,以及基本方法和技能的训练。

全书分为 10 章。内容包括两部分:第一部分是从第 1 章至第 6 章,主要讲述机械优化的基本概念、理论及常用的一些优化设计方法,内容包括绪论、机械优化的基本术语和数学模型、优化的某些基本概念和理论、几种常用的无约束优化方法、约束优化设计问题的直接解法和间接解法等;第二部分是从第 7 章至第 10 章,主要讲述机械优化设计中各种类型问题的优化设计方法及其应用技术,内容包括优化设计实践中的某些问题、多目标优化设计方法、离散变量优化设计方法和随机变量优化设计方法等。书后附有几个优化方法的 BASIC 程序,可供学生上机使用。

西安建筑科技大学李建华副教授和南方冶金学院朱正暘副教授审阅了本书初稿的各章内容,并提出许多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

值此本书再版之际,对广大曾提出过意见的读者深表谢意;并再次恳请读者提出批评和意见。

编 者

1993 年 8 月于北京

· 第 1 版前言 ·

本书系根据 1982 年制订的冶金部教材编写出版规划及次年拟定的“机械优化设计方法”(40~60 学时)编写大纲编写的。

机械优化设计是机械设计理论和技术发展中的一门新兴学科,它的基本思想是:根据机械设计的一般理论、方法以及设计规范和行业标准等,把工程设计问题按照具体要求建立一个能体现设计问题的数学模型,然后采用最优化技术与计算机技术自动找出它的最优方案,使问题的解决在某种意义上达到无可争议的完善化。显然,这门新兴的科学技术对于进一步提高机械设计水平、改进机械产品质量、发展计算机辅助设计将起到重要的作用。实践越来越证明,机械优化设计方法是解决复杂设计问题的一种有效手段。为此,对于机械工程各专业的高年级学生,在学完设计课程中有关机构、零部件和机械系统一般设计理论与方法的基础上,继续学习机械优化设计的一些最基本概念、理论和方法,开拓优化设计的思想,掌握优化设计的方法是十分必要的。

本书试图把机械工程设计实践中应用的最优化技术和计算机技术结合起来融为一体,介绍有关机械优化设计的最主要的理论和方法,以及这门新兴技术科学现状与发展方面的一些知识。本书内容包括两大部分:第一部分是从第一章至第五章,主要讲述机械优化设计的基本概念、理论及目前常用的一些优化设计方法等;第二部分是从第六章至第九章,主要讲述机械优化设计中各种类型问题的一些处理方法及其经验,其中包括了当前机械优化设计理论与方法发展中的几个问题,如多目标优化设计方法、混合离散变量优化设计方法、优化设计结果的灵敏度分析等。由于篇幅所限,本书尚未包括线性规划、动态规划、状态空间法等一些优化技术以及最优化方法中的一些新方法,如广义简约梯度法、二次规划法等,同时尚未涉及机械优化设计的概率数学模型方面的问题。

参加本书编写的有陈立周(第四章的第 4-4 节、第六章至第九章),周培德(绪论、第三、五章),高云章(第一、二章、第四章的第 4-1 节~第 4-3 节)等同志。陈立周同志担任主编,路鹏和孙成宪同志协助进行了某些章节的整理工作。

参加本书审稿的有：东北工学院郑镕之副教授、合肥工业大学马同春副教授、华南工学院黎桂英、西安冶金建筑学院李建华、中南矿冶学院吴今谷、江西冶金学院张春于、北京钢铁学院孙遇春等同志。他们认真细致地审阅了书稿的各章内容，并提出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

本书作为机械工程专业教学用书，亦可作为相近工科专业的教学参考书。在使用本教材时，各校可根据安排的教学时数和学生情况选用内容，对于40左右学时的，建议选用前六章内容，后面几章可以作为选讲内容。此外，本书亦可供机械工程技术人员、科研工作者和管理干部自学与参考。自学者在阅读本书前必须具备相应的数学知识、计算机计算技术和机械设计有关的基本知识。

鉴于近年来机械优化设计涉及的理论与方法非常广泛，发展极其迅速，又限于我们的教学经验和水平，书中不妥和疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1984年6月于北京

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价 (元)
机械设计基础 (本科教材)	侯长来	42.00
机械设计基础课程设计 (本科教材)	侯长来	30.00
现代机械设计方法 (本科教材)	臧 勇	22.00
冶金机械安装与维护 (本科教材)	谷士强	24.00
机械可靠性设计 (本科教材)	孟宪铎	25.00
金属压力加工原理及工艺实验教程 (本科教材)	魏立群	28.00
金属材料工程实习实训教程 (本科教材)	范培耕	33.00
材料科学基础 (本科教材)	王亚男	33.00
机械工程材料 (本科教材)	王廷和	22.00
机械制造工艺及专用夹具设计指导 (本科教材) (第2版)	孙丽媛	20.00
通用机械设备 (高职高专教材) (第2版)	张庭祥	26.00
起重与运输机械 (高等学校教材)	纪 宏	35.00
机械制图 (高职高专教材)	阎 霞	30.00
机械制图习题集 (高职高专教材)	阎 霞	28.00
机械维修与安装 (高职高专教材)	周师圣	29.00
机械设备维修基础 (高职高专教材)	闫嘉琪	28.00
采掘机械 (高职高专教材)	苑忠国	38.00
矿冶液压设备使用与维护 (高职高专教材)	苑忠国	27.00
金属热处理生产技术 (高职高专教材)	张文莉	35.00
矿山固定机械使用与维护 (高职高专教材)	万佳萍	39.00
机械工程控制基础 (高职高专教材)	刘玉山	23.00
机械制造工艺与实施 (高职高专教材)	胡运林	39.00
矿山提升与运输 (高职高专教材)	陈国山	39.00
工程力学 (高职高专教材)	战忠秋	28.00
冶金通用机械与冶炼设备 (职业技术学校用书)	王庆春	45.00
轧钢机械设备 (中职教材)	边金生	45.00
轧钢车间机械设备 (中职教材)	潘慧勤	32.00
机械安装与维护 (职业培训教材)	张树海	22.00
机械基础知识 (职业培训教材)	马保振	26.00
液压可靠性与故障诊断 (第2版)	湛从昌	49.00
机械制造装备设计	王启义	35.00
真空镀膜设备	张以忱	26.00
液力偶合器使用与维护 500 问	刘应诚	49.00
液力偶合器选型匹配 500 问	刘应诚	49.00

· 目 录 ·

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 设计过程	1
1.2.1 设计过程及其特点	1
1.2.2 概念设计与参数设计	2
1.2.3 设计中几种常用的决策方法	3
1.2.4 最优化在设计中的作用	5
1.3 优化设计问题的分类及其一般实施步骤	7
1.3.1 分类	7
1.3.2 一般实施步骤	7
1.4 优化设计学科中的一些常见术语	9
1.5 机械优化设计的发展与趋势	11
2 优化设计的基本术语和数学模型	13
2.1 引言	13
2.2 优化设计的基本术语	15
2.2.1 设计变量	15
2.2.2 目标函数	17
2.2.3 设计约束	18
2.3 优化设计的数学模型及其分类	21
2.3.1 数学模型的格式	21
2.3.2 数学模型的精确形式	23
2.3.3 数学模型的分类	23
2.4 优化设计模型的几何解释	25
2.5 优化计算方法概述	28
习题	29
3 优化设计的某些基本概念和理论	31
3.1 目标函数与约束函数的某些基本性质	31
3.1.1 函数的等值面(或线)	31
3.1.2 函数的最速下降方向	33
3.1.3 函数的局部近似函数和平方函数	36
3.1.4 函数的凸性	38

3.1.5 函数的单调性	39
3.2 约束集合及其性质	40
3.2.1 约束集合和可行域	40
3.2.2 起作用约束和松弛约束	41
3.2.3 冗余约束	42
3.2.4 可行方向	42
3.3 约束最优解及其最优性条件	44
3.3.1 约束最优解	44
3.3.2 局部最优点和全局最优点	44
3.3.3 无约束最优解的最优性条件	45
3.3.4 约束最优解的最优性条件	46
3.4 优化问题的数值计算方法及收敛条件	51
3.4.1 数值计算的迭代法	51
3.4.2 无约束优化迭代计算的终止准则	53
3.4.3 约束优化迭代计算的终止准则	53
习题	55
4 无约束优化计算方法	57
4.1 引言	57
4.2 单变量优化计算方法	57
4.2.1 搜索区间的确定	58
4.2.2 黄金分割法	60
4.2.3 二次插值法	63
4.3 多变量优化计算的非梯度方法	66
4.3.1 坐标轮换法	66
4.3.2 Powell 法	69
4.3.3 单纯形法	74
4.4 多变量优化计算的梯度方法	76
4.4.1 梯度法	76
4.4.2 共轭梯度法	77
4.4.3 牛顿法和修正牛顿法	80
4.4.4 变尺度法	82
习题	86
5 约束优化计算方法	87
5.1 引言	87
5.2 随机方向搜索法	87
5.2.1 基本原理	87
5.2.2 随机搜索方向向量的确定	88

5.2.3 可行初始点的产生方法	89
5.2.4 算法步骤	89
5.3 复合形法	93
5.3.1 基本原理	93
5.3.2 初始复合形的构成	93
5.3.3 复合形法的基本运算	94
5.3.4 算法步骤	95
5.4 惩罚函数法	99
5.4.1 基本概念	99
5.4.2 内点惩罚函数法	101
5.4.3 外点惩罚函数法	108
5.4.4 混合惩罚函数法	113
5.5 约束优化计算其他方法概述	115
5.5.1 可行方向法和梯度投影法	115
5.5.2 约束变尺度法	121
5.5.3 广义简约梯度法	122
习题	123
6 现代优化计算方法	125
6.1 引言	125
6.2 计算复杂性和启发式算法的概念	125
6.2.1 计算复杂性的基本概念	125
6.2.2 启发式优化算法	126
6.3 模拟退火优化算法	127
6.3.1 基本思想	127
6.3.2 算法的基本步骤	128
6.3.3 算法实现的几个技术问题	129
6.3.4 模拟退火算法的改进	130
6.4 遗传优化算法	131
6.4.1 基本思想	131
6.4.2 算法的基本步骤	133
6.4.3 算法实现的几个技术问题	134
6.4.4 遗传算法的改进	136
6.5 蚁群算法	137
6.5.1 基本原理	137
6.5.2 蚁群算法的构造和基本步骤	138
6.5.3 函数问题的蚁群算法	141
6.5.4 蚁群算法的改进	143
6.6 混合优化算法	145

6.6.1 引言	145
6.6.2 遗传模拟退火优化算法	146
6.6.3 模拟退火单纯形优化算法	147
习题	147
7 优化设计实践中的某些问题	148
7.1 引言	148
7.2 优化设计的建模	148
7.2.1 建模的方法论和步骤	148
7.2.2 减少数学模型规模的措施	149
7.2.3 模型函数	153
7.2.4 建模中数表和图线的程序化	154
7.3 数学模型的尺度变换	157
7.3.1 设计变量的标度	157
7.3.2 目标函数的尺度变换	159
7.3.3 约束函数的归一化	160
7.4 优化计算方法和精度的选择	161
7.4.1 优化计算方法的选择	161
7.4.2 收敛精度的选择	162
7.5 优化计算结果的分析	164
7.5.1 计算结果分析	164
7.5.2 计算结果的灵敏度分析	165
习题	167
8 多目标问题优化设计方法	169
8.1 引言	169
8.2 基本概念和定义	169
8.3 多目标问题的最优化决策方法	172
8.3.1 协调曲线法	172
8.3.2 统一目标函数法	175
8.3.3 加权因子的确定	178
8.3.4 功效系数法	184
8.4 多属性问题的选择决策方法	188
8.4.1 决策矩阵	188
8.4.2 权值的确定方法	190
8.4.3 决策方法	192
8.4.4 模糊综合评判法	194
习题	196

9 多学科问题优化设计方法	197
9.1 引言	197
9.2 多学科设计优化的基本思想	197
9.2.1 总体思想	197
9.2.2 基本特点	198
9.3 多学科设计优化的基本方法	199
9.3.1 系统分解和分析方法	199
9.3.2 敏度分析	200
9.3.3 建模方法	201
9.3.4 设计优化策略与优化算法	202
9.3.5 集成平台界面	205
9.4 多学科变量耦合优化方法	205
9.4.1 总体思路	205
9.4.2 子系统间的耦合关系	206
9.4.3 系统级协调策略	206
9.4.4 系统优化模型	208
9.4.5 多学科变量耦合优化方法工作流程	208
9.5 多学科目标兼容优化方法	211
9.5.1 总体思路	211
9.5.2 系统之间的变量	211
9.5.3 兼容约束与兼容目标函数	212
9.5.4 多学科目标兼容优化方法工作流程	213
习题	216
10 离散问题优化设计方法	217
10.1 引言	217
10.2 离散问题优化设计的基本概念	218
10.2.1 离散变量与离散空间	218
10.2.2 连续变量的离散化	219
10.2.3 离散问题优化设计的数学模型	220
10.3 离散问题的最优解及最优性条件	220
10.3.1 离散单位邻域和坐标邻域	220
10.3.2 离散变量问题的最优解	221
10.3.3 离散最优解的最优性条件	222
10.3.4 离散问题优化计算方法概述	223
10.4 离散变量自适应随机搜索算法	224
10.4.1 基本原理	224
10.4.2 设计点样本产生的基本方程	225
10.4.3 随机移步查点技术	226

10.4.4	算法构造原理及步骤	227
10.5	离散变量组合形算法	227
10.5.1	初始离散组合形的产生	228
10.5.2	离散一维搜索	228
10.5.3	约束条件的处理	229
10.5.4	算法的辅助功能和终止准则	230
10.5.5	算法的基本步骤	231
10.6	离散惩罚函数算法	231
10.6.1	基本原理	231
10.6.2	关于惩罚因子和离散惩罚函数指数的选择	233
10.6.3	伪最优和校正	234
10.6.4	算法的基本步骤	234
	习题	236
11	随机问题优化设计方法	237
11.1	引言	237
11.2	含有随机因素问题的优化设计数学模型	238
11.2.1	随机模型的基本要素	238
11.2.2	随机问题优化设计数学模型及其最优解	242
11.3	随机模型的分析方法	244
11.3.1	概率分析的主要方法及其特点	244
11.3.2	均值和方差的近似计算方法	245
11.3.3	随机模拟计算方法	246
11.4	随机问题的优化计算方法	249
11.4.1	一次二阶矩法	249
11.4.2	随机模拟搜索算法	251
11.4.3	随机拟次梯度算法	251
	习题	257
12	模糊问题优化设计方法	258
12.1	引言	258
12.2	含有模糊因素问题的优化设计数学模型	258
12.2.1	模糊模型的基本要素	258
12.2.2	模糊问题优化设计数学模型及其最优解	264
12.3	模糊问题优化设计模型的确定型解法	266
12.3.1	清晰目标函数在模糊约束时的解法	266
12.3.2	模糊目标和模糊约束时的解法	267
12.3.3	清晰等价解法	269
12.4	模糊模拟搜索解法	270

12.4.1 模糊模拟技术	270
12.4.2 基于模糊模拟的遗传算法	271
12.5 多目标模糊优化设计方法	272
习题	277
13 稳健问题优化设计方法	278
13.1 引言	278
13.2 产品质量的稳健性与稳健设计	279
13.2.1 产品的质量问题的	279
13.2.2 产品的质量特性与评价指标	280
13.2.3 稳健性特征量与稳健设计	282
13.3 稳健优化设计的基本原理	285
13.3.1 设计变量与参数的变差和容差	285
13.3.2 技术特性值的变差和容差	285
13.3.3 稳健问题优化设计的基本数学模型	286
13.4 基于容差模型的稳健优化设计	288
13.4.1 容差分析原理	288
13.4.2 稳健优化设计的容差模型	290
13.4.3 容差模型稳健优化设计的近似解法	290
13.5 基于随机模型的稳健优化设计	292
13.5.1 随机模型稳健优化设计的几项准则	292
13.5.2 稳健优化设计的随机模型	293
13.5.3 优化计算方法及基本步骤	294
习题	300
参考文献	301



绪 论

1.1 引言

“设计”作为人们综合运用科学技术原理和知识并有目的地创造产品的一项技术，已经发展成为现代社会工业文明的重要支柱。伴随着人类文明的起源与发展，设计亦从技艺发展到科学。它一方面被社会需求所推动，另一方面也受当时自然、社会和科学技术发展水平的约束。今天，设计水平已是一个国家的工业创新能力和市场竞争能力的重要标志。不少先进的工业国认为，工业革新必须以设计为中心，未来国际市场竞争将是设计竞争。

许多的设计实践经验告诉人们，设计质量的高低，是决定产品的一系列技术和经济指标的重要因素。因此，在产品生产技术的第一道工序——设计上，考虑越周全和越符合客观，则效果就会越好。统计结果表明，产品的质量问题的，约有 50% 是由于设计不周所造成的；产品的成本约有 70% 是在设计阶段决定的；设计的周期约占产品开发总周期的 40%。因此，随着社会对技术产品越来越高的要求，必须更好地学习与应用现代设计理论、方法和技术，以不断改进产品的设计质量，提高其市场的竞争能力。

在产品设计中，追求设计结果的最优化，一直是设计师们工作努力的目标。现代设计理论、方法和技术中的优化设计，为工程设计人员提供了一种易于实施且可使设计结果达到最优化的重要方法和技术，以便在解决一些复杂问题时，能从众多设计的方案中找出尽可能完善的或是最好的方案。这对于提高产品性能、改进产品质量、提高设计效率，都是具有重要意义的。

1.2 设计过程

设计过程是根据一定的目的和要求进行构思、策划和计划、试验、计算和绘图等一系列活动的总体。“设计”对不同的人 and 事会有不同的含义。在这里我们仅涉及机械产品的设计过程，它可以定义为“……为了把一台机器、一套工艺设备或生产系统制定得十分详细，以至可以参照实施为目的的各种技术和科学原理的利用过程”。设计可以是简单的，也可以是非常复杂的；容易的或是非常难的；精确的或是粗糙的；无关紧要的或是极其重要的。设计是工程实践的一个重要组成部分。

1.2.1 设计过程及其特点

一般，一个设计过程至少应包含 10 个步骤（见表 1-1），并具有如下几个特点：

（1）设计是一个创造性思维过程。在多种不同类型知识（如经验、常识、规范和标准、法规、原理和理论、计算公式和方法）的基础上，通过反复地、有步骤地、连贯地思考，提出前人未提出的问题，解决前人未解决的问题，这就是设计过程中的创新。在创新活动中，创造想象或构思是重要的组成部分，是根据一定目的、任务创造出新形象的过