

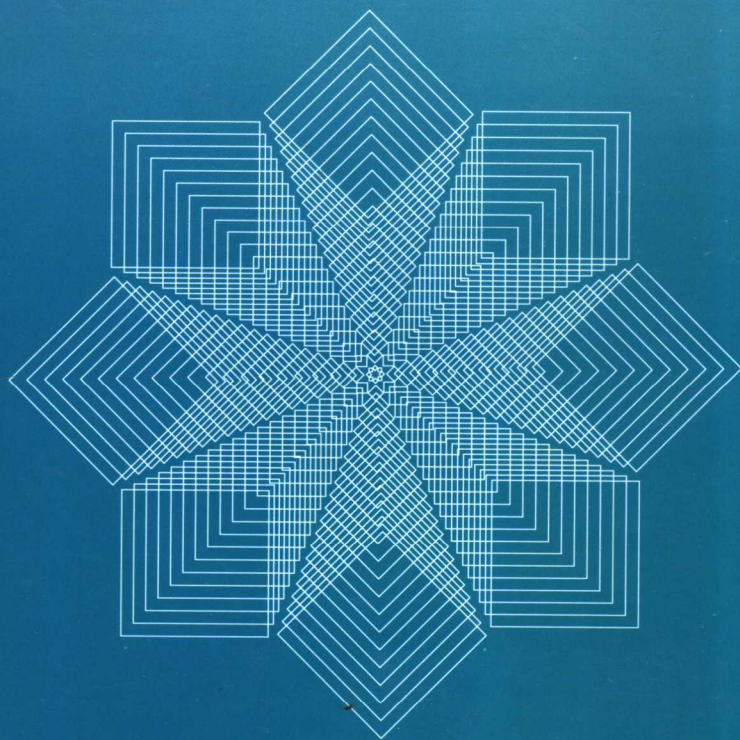
丛书主编 杨黎明

副主编 杨志勤 厉虹

机电一体化设计系列丛书

机械优化设计

◎ 王科社 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

TH122
129
12

机电一体化设计系列丛书

丛书主编 杨黎明
副主编 杨志勤 厉虹

王科社 编著

机械优化设计

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

内 容 简 介

本书主要阐述在机电系统的优化设计中常用的优化方法,着重介绍一维优化方法中的 0.618 法、斐波那契数法、对分法、切线法和二次插值法,无约束优化方法中的梯度法、共轭梯度法、牛顿类方法、鲍威尔法和变尺度法等,约束优化方法中的约束随机方向法、复合形法和惩罚函数法,也对多目标优化方法、离散优化方法和遗传算法及结构准则法优化方法设计进行了介绍。为便于学习和应用,书中第 3 章介绍了必要的数学基础。书中附有各种优化方法的 VB 语言和 C 语言实用程序,供读者应用。书中对优化程序设计中常用的数表、线图的处理方法和数值求导法作了简单介绍,并给出了相应的参考程序;本书也对比较流行的优化设计软件进行了介绍,另外还提供了“见习机械设计工程师”认证考试优化设计部分复习题和部分题参考答案。

本书可供中小工厂、企业中从事机电一体化的技术人员使用,也可供大专院校和职业学校学习机电一体化教师、学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械优化设计/王科社编著. —北京:国防工业出版社,2007.4

(机电一体化设计系列丛书/杨黎明主编)

ISBN 978-7-118-04953-4

I. 机... II. 王... III. 机械设计:最优设计
IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 003123 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京四季青印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 356 千字

2007 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

序 言

“机电一体化”是指在机械的主功能、动力功能、信息处理功能和控制功能等方面引入电子技术,并将机械装置、电力电子设备及相关技术设备组成的有机整体——机械电子产品或系统的总称。

机电一体化技术发展的状况标志着一个国家机械电子科学技术的发展水平,因此,发展机电一体化技术是发展我国机械电子科学技术的必由之路,也是振兴我国机械电子工业的主攻方向。目前,发达国家机电一体化技术已经很普及,国内一些工厂、企业、科研院所及大专院校在各领域已经开展机电一体化工作,并取得了一定成绩,但开展力度不大,不普遍。

为了促进我国机电一体化技术的发展,国防工业出版社特组织专家、教授和工程技术人员编写出版这套《机电一体化设计系列丛书》。

这套丛书包括:

- 《机构选型与运动设计》
- 《机械零部件选用与设计》
- 《机械优化设计》
- 《机械可靠性设计》
- 《转子现场动平衡技术》
- 《机电传动控制技术》
- 《伺服技术》
- 《传感器检测技术》
- 《精密机械元器件与电子元器件》
- 《机电一体化应用集锦》

编写这套丛书时,着重突出以下特点:

(1) 系统性。这套丛书涉及的内容基本覆盖机电一体化技术的相关学科,便于读者系统、深入地学习和应用机电一体化技术。

(2) 实用性。这套丛书从实用出发,本着“必需、够用、实际”的原则精选内容,在简要论述原理、方法、结构、标准的基础上,列举了大量的理论联系实际的例题,有较强的设计示范作用。

(3) 针对性。这套丛书主要是为中小工厂、企业从事机电一体化技术的人员学习和应用编写的,读者在机电一体化技术相关学科都有一定的理论基础和实践经验。因此,策划丛书书目时,基本是按一门学科或一个子系统一本书的原则划分的。因此,丛书内容专、篇幅小,便于读者根据需要选购。

(4) 适用性。这套丛书还可以作为大专院校和职业学校学习机电一体化技术的参考书或教材。因此,这套丛书对促进机电一体化技术的发展具有普及性和适用性。

希望读者喜爱这套丛书,并提出宝贵意见。

杨黎明

2006年9月

前 言

优化设计是 20 世纪 60 年代初发展起来的一门新学科,它为设计提供了一种重要的科学设计方法,因而是构成和推进现代设计方法的产生与发展的重要内容。优化设计是工程技术人员进行设计的重要技术,该技术建立在最优化的原理和方法的基础上,借助计算技术与计算机这一强有力的手段,对某项设计问题,在规定的限制条件下,优选设计参数,使某项或某几项设计指标获得最优值的设计技术。

本书共 11 章。第 1 章绪论;第 2 章优化设计概述;第 3 章优化设计的数学基础,介绍优化设计的基本概念和数学基础及优化设计方法的发展情况;第 4 章一维搜索方法,介绍一维优化方法中的 0.618 法、斐波那契数法、对分法、切线法和二次插值法;第 5 章无约束优化方法,介绍梯度法、共轭梯度法、牛顿类方法、鲍威尔法和变尺度法等;第 6 章约束优化方法,介绍随机方向法、复合形法和惩罚函数法等解决有约束问题优化方法;第 7 章线性系统的优化设计,介绍单纯形法和优化设计的灵敏度分析方法;第 8 章多目标及离散变量优化方法,介绍多目标优化方法和离散优化问题;第 9 章优化设计应用举例,对优化程序设计中常用的数表、线图的处理方法和数值求导法作了简单介绍,并通过 10 个例子介绍优化方法的工程应用;第 10 章遗传算法及结构准则法优化设计,对遗传算法及结构准则法优化设计进行介绍;第 11 章优化设计常用软件简介,介绍 LINDO、LINGO 和 MATLAB 软件;附录部分有参加“见习机械设计工程师”认证考试优化设计部分复习题和部分题参考答案以及部分优化方法的程序。本书内容的选择以实用为原则,注重优化方法的工程应用。

本书由北京信息科技大学王科社教授主编,附录部分程序由北京工商大学王洋进行整理和编写。限于编者水平,书中不足之处在所难免,敬请广大读者提出宝贵意见,意见可以通过写信或 E-mail(wangkeshe@126.com)反馈给我们,以便进一步提高本书的质量,从而更好地推进优化设计方法在工程中的应用。

编 者
2006 年 9 月

目 录

第1章 绪论/1

- 1.1 优化设计的含义/1
- 1.2 优化设计与传统设计的比较/2
- 1.3 优化设计在机电产品设计中的作用/2
- 1.4 优化设计发展概况/3
- 1.5 优化设计方法的工程应用领域/6
- 1.6 现代优化设计的发展趋势/7

第2章 优化设计概述/9

- 2.1 优化设计问题的引例/9
- 2.2 优化设计的数学模型/11
 - 2.2.1 设计变量/12
 - 2.2.2 目标函数与等值线/13
 - 2.2.3 约束条件/15
 - 2.2.4 优化设计数学模型的一般形式/15
 - 2.2.5 建模实例/16
- 2.3 优化设计的分类/22
- 2.4 优化设计的步骤/23
- 2.5 优化设计的图解法与几何解释/23
- 2.6 优化问题的数值迭代法/25
 - 2.6.1 数值迭代法的基本思想和迭代格式/25
 - 2.6.2 迭代计算的收敛准则与终止条件/26
 - 2.6.3 迭代计算的收敛性/27
- 2.7 常用优化方法及其特点/28

第3章 优化设计的数学基础/29

- 3.1 函数的方向导数与梯度/29
 - 3.1.1 函数的方向导数/29
 - 3.1.2 函数的梯度/30
- 3.2 多元函数的泰勒展开式/32
- 3.3 凸集、凸函数与凸规划/33
 - 3.3.1 凸集/33

3.3.2 凸函数/33

3.3.3 凸规划/34

3.4 无约束优化问题的极值条件/34

3.4.1 无约束函数局部极小值一次必要条件/34

3.4.2 无约束函数极小值二次充分条件/35

3.5 有约束优化问题的最优化条件/36

3.5.1 下降方向与可行方向/37

3.5.2 KKT 最优化条件/37

第4章 一维搜索方法/43

- 4.1 引言/43
- 4.2 确定最优点所在区间的进退法/43
- 4.3 一维搜索的区间消去方法/45
 - 4.3.1 黄金分割法/45
 - 4.3.2 区间消去的斐波那契数法(Fibonacci)/48
- 4.4 对分法/51
- 4.5 切线法(Newton 法)/52
- 4.6 二次插值法(抛物线法)/53
- 4.7 一维搜索算法比较/56

第5章 无约束优化方法/58

- 5.1 概述/58
- 5.2 梯度法/58
- 5.3 共轭梯度法/59
- 5.4 牛顿类方法/63
- 5.5 坐标轮换法/65
- 5.6 鲍威尔(Powell)方法/66
 - 5.6.1 基本迭代格式/66
 - 5.6.2 基本鲍威尔法/67
 - 5.6.3 修正鲍威尔法/67
- 5.7 变尺度法/70
 - 5.7.1 变尺度法的基本思想/70

5.7.2	对称秩1算法/71	优化问题的图解法/103
5.7.3	SFP算法/72	7.2.3 线性系统优化问题解的特点/104
第6章	约束优化方法/74	7.3 单纯形法/104
6.1	随机方向法/74	7.3.1 单纯形法的基本原理/104
6.1.1	随机数的产生/74	7.3.2 单纯形解法/107
6.1.2	初始点的选择/75	7.3.3 大M法/113
6.1.3	可行搜索方向的产生/75	7.4 线性系统优化的灵敏度分析/116
6.1.4	搜索步长的确定/75	7.4.1 单纯形法的矩阵表达式/117
6.1.5	随机方向法的计算步骤/77	7.4.2 系数变化的灵敏度分析/119
6.2	复合形法/77	7.4.3 设计变量增减的灵敏度分析/123
6.2.1	复合形法的基本思想/77	7.4.4 约束条件增减的灵敏度分析/124
6.2.2	初始复合形的构成/77	第8章 多目标及离散变量优化方法/126
6.2.3	复合形法的搜索方法/78	8.1 多目标优化问题概述/126
6.2.4	复合形法的搜索步骤/79	8.2 多目标优化方法/127
6.3	可行方向法/80	8.2.1 多目标优化的基本概念/127
6.3.1	可行方向法的搜索思路/80	8.2.2 多目标优化的具体方法/127
6.3.2	产生可行方向的条件/81	8.3 离散变量优化问题/132
6.3.3	可行方向的产生方法/83	8.3.1 以按连续变量优化为基础的方法/133
6.3.4	步长的确定/83	8.3.2 离散变量的分支定界法/136
6.3.5	收敛条件/85	8.3.3 离散变量型普通网格法/136
6.3.6	可行方向法的计算步骤/87	第9章 优化设计应用举例/138
6.4	拉格朗日乘子法/87	9.1 机械优化设计的一般步骤/138
6.5	惩罚函数法/90	9.2 数学模型的尺度变换/138
6.5.1	基本思想/90	9.3 数据表格及线图资料的处理/140
6.5.2	内点惩罚函数法/91	9.3.1 数表的程序化/140
6.5.3	外点惩罚函数法/92	9.3.2 线图的程序化/144
6.5.4	混合惩罚函数法/95	9.4 求导数的数值计算方法/144
第7章	线性系统的优化设计/98	9.4.1 中点方法/145
7.1	线性系统优化问题及其数学模型/98	9.4.2 插值型求导公式/145
7.1.1	线性系统优化问题的数学模型/98	9.5 平面铰链四杆机构再现运动规律的最优化设计/147
7.1.2	线性系统优化问题的结构特征/100	9.6 最小体积二级圆柱齿轮减速器的优化设计/149
7.1.3	线性系统优化问题的标准形式/101	9.7 驱动挤出螺杆的双级蜗杆减速器的优化设计/150
7.2	线性系统优化问题的图解法/102	
7.2.1	线性系统优化问题解的基本概念/102	
7.2.2	两个变量的线性系统	

9.8	垃圾转运站中用磁选装置优化设计/153
9.9	车辆起重器的优化设计/155
9.10	手动螺旋千斤顶的优化设计/157
9.11	桁架结构优化设计/159
9.12	螺栓组联结的优化设计/161
9.13	射流发电机机械振动系统的动力优化设计/163
9.14	摆线针轮行星减速器多目标优化设计/167
9.15	优化结果分析和全局最优解问题/170
第 10 章	遗传算法及结构准则法优化设计/171
10.1	遗传算法优化设计/171
10.1.1	遗传算法的基本概念/171
10.1.2	遗传算法的原理/172
10.1.3	遗传算法的应用/174
10.2	结构准则法优化设计/176
10.2.1	概述/176
10.2.2	满应力法/177
10.2.3	满应力法在应用中的几个问题/177

10.2.4	满应力齿行法(改进的满应力法)/178
10.2.5	位移准则法/179

第 11 章 优化设计常用软件简介/183

11.1	概述/183
11.2	LINDO、LINGO 软件/183
11.2.1	简介/183
11.2.2	用 LINGO 求解线性规划, 整数规划和二次规划/184
11.3	MATLAB 软件/186
11.3.1	概述/186
11.3.2	优化工具箱中的函数/186
11.3.3	模型输入时需要注意的问题/188
11.3.4	单变量最小化问题/188
11.3.5	线性规划问题/190
11.3.6	非线性规划问题/197
11.3.7	二次规划问题/203
11.3.8	多目标规划问题/204
11.3.9	最大最小化问题/208
11.3.10	foptions 函数/211

参考文献/212

第 1 章 绪 论

1.1 优化设计的含义

优化是一个人们普遍理解和接受的概念,也是人们始终的追求,优化思想在日常生活中更是随处可见,甚至自然界的万物演化也遵循优化的规律。当人们按理性行为从事一项工作时,总希望把它尽量做好,做出效率,做出效益,这就是优化。

在设计过程中,常常需要根据产品设计的要求合理确定各种参数,例如:质量、成本、性能、承载能力、效率等,以达到最优的设计目标。

实际上,随着生产、经济和技术的发展,工程技术、管理人员在实际工作中常常会面临这样一类问题:在工程设计中,怎样选取参数使得设计既能满足要求又能降低成本;在资源分配中,怎样的分配方案既能满足各方面的基本要求,又能获得好的经济效益;在生产计划安排中,选择怎样的计划方案才能提高产值和利润;在原料配比问题中,怎样确定各种成分的比例才能提高质量、降低成本;在城建规划中,怎样安排工厂、机关、学校、商店、医院、住宅和其他单位的合理布局,才能方便群众,有利于城市各行业的发展。这一类问题的共同点是选出最合理、达到最优目标的方案,这就是工程优化问题。

优化设计(Optimal Design)是从 20 世纪 60 年代初期发展起来的一门新的学科,它是最优化技术和计算机计算技术在设计领域应用的结果。优化设计为工程设计提供了一种重要的科学设计方法,在解决复杂设计问题时,它能从众多的设计方案中找到比较理想的设计方案。早在 17 世纪,英国伟大科学家牛顿(Newton)开创微积分时代时,已经提出极值问题;后来出现拉格朗日(Lagrangian)乘数法,1847 年法国数学家 Cancky 研究了函数沿什么方向下降最快的问题;1949 年苏联数学家 KaHTOPOBNq 提出解决下料问题和运输问题这两种线性规划问题的求解方法。但是受到计算手段等条件的限制,在 20 世纪 50 年代以前,最优化理论还不能形成一门学科。

工程设计上的“最优值”(Optimum)是指在满足多种设计目标和约束条件下所获得的最令人满意、最适宜的值,它反映了人们的意图和目的,这不同于表示事物本身规律的最大值和最小值。但在很多情况下,也可以用最大值或最小值来代表最优值。最优值的概念是相对的,随着科学技术的发展以及设计条件的变化,最优化的标准也将发生变化。也就是说,优化设计反映了人们对客观世界认识的深化,它要求人们根据事物的客观规律,在一定的物质基础和技术条件下充分发挥人的主观能动性,得出最优的设计方案。

最优化技术是优化设计全过程中各种方法、技术的总称,它主要包含两部分内容:优化设计问题的建模技术和优化设计问题的求解技术。如何将一个实际的设计问题抽象成一个优化设计问题,并建立起符合实际设计要求的优化设计数学模型,这就是建模技术中要解决的问题。建立实际问题的优化数学模型,不仅需要熟悉和掌握优化设计方法的基本理论、设计问题抽象和数学模型处理的基本技能,更重要的是要具有该领域的丰富设计经验和专业知识。此外,在进行优化设计求解过程中,要不断地分析实际问题与数学模型之间存在的差距,不断地修正优化设计数学模型。只有这样,才可能建立起正确的数学模型,求解的最优解才有实际意义。

现代设计技术中的一般性优化设计方法及其应用已日趋成熟,普通的连续变量优化设计、混

合离散变量优化设计,已发展到随机变量优化设计(可靠性优化设计)、模糊变量优化设计,单目标优化设计已发展到多目标优化设计。仅将优化设计的范围局限于优化方法及其应用程序的编制上已不能适应工程技术发展的需要,因而全过程的优化设计成为研究和应用的主流。

广义的优化设计已成为优化设计的重要发展方向,其内容主要包括工程优化设计问题的自动建模技术、优化设计问题的前处理与后处理、优化设计结果的评价等。此外,基于优化设计和制造的分级分解优化也是目前重要的研究内容。上述优化方向的实现,必然涉及到人工智能、信息技术、控制技术等多种方法、技术及软件系统的综合运用。

1.2 优化设计与传统设计的比较

传统设计也是要追求最优的设计结果,它通常是指在调查分析的基础上,参照同类产品,通过估算、经验类比或试验来确定初始设计方案,并且经过构思方案—评价—再构思—再评价的寻优过程。依赖过去的经验确定设计过程中需要确定的参数的问题,这似乎是切实可行的,并且没有太大的风险,但是其处理过程会融入决策者太多的主观因素,常常难以客观地给予描述,从而无法确认结果的最优性。实践证明,这样设计的结果都有改进提高的余地。做大量的试验反复比较固然比较真实可靠,但是常要花费太多的资金和人力,而且得到的最优结果基本上跑不出开始设计的试验范围。可见,传统的设计只是主观上追求最优结果,但手段上只是被动地重复分析产品的性能,而不是主动地设计产品的参数,因而得到的只会是满足设计(satisfactory design)而非最优设计(optimal design)。而优化设计是用数学建模(mathematical modeling)的方法建立优化模型(optimization model)并求解最优参数。虽然建模时要作适当的简化,可能使得结果不一定完全可行或达到实际上的最优,但它是基于客观规律和数据的,又不需要多大的费用,因此具有经验类比或试验手段无可比拟的优点。如果在此基础上再辅之以适当的经验和试验,就可以期望得到实际问题的一个比较圆满的设计结果。

随着市场由传统的相对稳定转向动态多变,机械产品更新换代周期日益缩短,把优化设计方法与计算机辅助设计结合起来,使产品设计过程完全自动化,已成为设计方法的一个重要发展趋势。

1.3 优化设计在机电产品设计中的作用

产品设计是影响产品性能、质量、成本和企业经济效益的一项重要工作,产品能否满足用户要求,在很大程度上取决于产品设计工作。积极有效地开展机电产品优化设计,可以提高机电产品性能,节约原材料,降低成本。

通过优化设计,可以使产品获得良好的结构性能,即在优化设计中全面考虑机械设备工作的可靠性、安全性及工作寿命,在产品研究、设计、生产、使用、废物回收的全过程中全面考虑绿色环保问题等,这对产品综合质量的提高具有十分重要的意义。

通过动态优化设计,可以使产品获得良好的结构性能(安全、可靠、耐用等),即考虑机械设备工作的可靠性、安全性及工作寿命等,可以提高机电产品的综合质量。如图 1-1 所示的设备盖,经过拓扑优化设计后,一阶固有频率由 60Hz 提高到 100Hz,可见其动态性能明显提高。

优化方法在结构设计中的应用,既可以使方案在设计要求下达到良好的性能指标,又不必耗费过多的材料,使机器质量降低。例如起重机主梁、塔梁、雷达接收天线结构、机床多轴箱方案、建筑结构等,利用优化设计,可使质量减轻 15% 以上。在国外,如美国贝尔(Bell)飞机制造公司

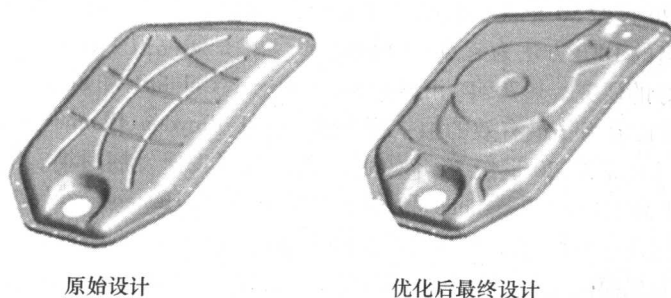


图 1-1 结构的拓扑优化设计结果比较

采用优化设计方法优化了 450 个设计方案, 2 个大型结构问题, 使得在一个机器设计中, 质量减轻 25%。我国某生产厂家引进的 17-00 薄板轧机是德国 DMAG 公司提供的, 该公司对此产品进行优化设计后, 可以多盈利几百万马克。

另外通过电路优化设计, 使原来电路的性能在满足设计功能和指标的基础上, 在一定的约束条件下, 对某些参数进行调整, 就使得电路的某些性能更为理想。目前, 已有现成的电路优化软件, 如 OrCAD/PSpice9 软件中的 PSpice Optimizer 模块, 可对电路进行优化设计, 优化时可以同时调整电路中 8 个元器件的参数, 以满足最多 8 个目标参数和约束条件的要求。可以根据给定的模型和一组晶体管特性数据, 优化提取晶体管模型参数。

总之, 优化设计可使机电系统的设计在一定程度上达到无可争议的完善。因此可以提升我国机电设备设计技术水平和企业的竞争能力, 同时显著提高企业的经济效益与社会效益。

1.4 优化设计发展概况

1. 线性最优化发展概况

线性最优化又称线性规划, 是运筹学中应用最广泛的一个分支, 这是因为自然科学和社会科学中许多问题都可以近似地化成线性规划问题。线性规划理论和算法的研究及发展共经历了三个高潮, 每个高潮都引起了社会的极大关注。线性规划研究的第一高潮是著名的单纯形法的研究。这一方法是 Dantzig 在 1947 年提出的, 它以成熟的算法理论和完善的算法及软件统治线性规划达 30 多年。随着 20 世纪 60 年代发展起来的计算复杂性理论的研究, 单纯形法在 20 世纪 70 年代末受到了挑战。1979 年, 苏联数学家 Khachiyan 提出了第一个理论上优于单纯形法的所谓多项式时间算法——椭球法, 成为轰动一时的新闻, 并掀起了研究线性规划的第二个高潮。但遗憾的是广泛的数值试验表明, 椭球法的计算比单纯形法差。

1984 年, Karmarkar 提出了求解线性规划的另一个多项式时间算法。这个算法从理论和数值上都优于椭球法, 因而引起学术界的极大关注, 并由此掀起了研究线性规划的第三个高潮。从那以后, 许多学者致力于改进和完善这一算法, 得到了许多改进算法。这些算法运用不同的思想方法均获得通过可行区域内部的迭代点列, 因此统称为解线性规划问题的内点算法。

2. 非线性最优化发展概况

在实际研究工作和生产实践中存在大量非线性最优化问题, 把它们完全简化成线性问题来处理是不妥当的。随着科学技术和计算机的发展, 这些实际问题具有这样一些特点: 一是问题的变量比较多, 因为问题涉及的因素越来越多; 二是问题的规模越来越大; 三是问题越来越复杂, 即问题的非线性程度越来越高。这类问题通常描述成在一组非线性约束条件下寻求某一非线性目标函数的最小值。

非线性规划的一个重要理论是 1939 年 Karus 以及 1951 年 Kuhn-Tucker 最优条件 (KKT 条

件)的建立,此后的20世纪50年代主要是对梯度法和牛顿法的研究。以Davidon(1959)、Fletcher和Powell(1963)提出的DFP方法为起点,20世纪60年代是研究拟牛顿方法的活跃时期,同时对共轭梯度法也有较好的研究。1970年,由Broyden、Fletcher、Goldfarb和Shanno从不同的角度共同提出的BFGS方法是目前为止最有效的拟牛顿方法。由于Broyden、Dennis和More的工作使得拟牛顿方法的理论变得很完善,20世纪70年代是非线性规划飞速发展时期,约束变尺度(SQP)方法(以Han和Powell为代表)和Lagrange乘子法(以Powell和Hestenes为代表)是这一时期主要研究成果。计算机的飞速发展使非线性规划的研究如虎添翼。20世纪80年代开始研究信赖域法、稀疏拟牛顿法、大规模问题的方法和并行计算,20世纪90年代研究解非线性规划问题的内点法和有限储存法。可以毫不夸张地说,20世纪后半期是最优化发展的黄金时期。

与线性规划相比,非线性规划软件还不够完善,但是已有大量解非线性规划问题的软件,其中有相当一部分可从互联网上免费下载。BTN是利用线搜索技术的块截断牛顿方法解无约束问题的软件,近似牛顿方法是通过块共轭梯度法解牛顿方程得到的。块状结构比较方便对线性代数方程和函数计算进行并行化处理。BTN有简本和用户版本两个版本,简本不需并行化技术,而用户版本允许多种复杂运算,包含并行化处理,此软件可以通过`ftp://netlib2.cs.utk.edu/opt`获得。BQPD是Fletcher研制的解二次规划的软件,所使用的基本方法是零空间积极集法。DONLP2是Spellucci研制的用SQP方法解一般非线性约束问题的软件,适合解小规模优化问题,可以从`ftp://netlib2.cs.utk.edu/opt/donlp2/`上免费下载。HOOKE是解无约束最优化问题的一个直接方法的软件,可以通过`ftp://netlib2.cs.utk.edu/opt/hooke.c`获得。LANCLOT是由Conn、Gould和Toint研制的解大规模最优化问题的软件包,适合解无约束最优化、非线性最小二乘、边界约束最优化和一般约束最优化问题。这个软件的基本思想是利用增广Lagrange函数来处理约束条件,在每步迭代中解一个边界约束优化子问题,其所用的方法结合信赖域和投影梯度等技术。MINPACK是美国Argonne国家实验室研制的软件包,适合求解非线性方程组和非线性最小二乘问题,所用的基本方法是阻尼最小二乘法,此软件可以从网上图书馆获得。PROC NLP是SAS软件公司研制的SAS商业软件中OR模块的一个程序,这个程序适合解无约束最优化、非线性最小二乘、线性约束最优化、二次规划和一般约束最优化问题。TENMIN是Schnabel等研制的解中小规模问题($n < 100$)的张量方法软件。在互联网上能访问到的解非线性最优化问题的软件还有:CONOPT(非线性规划)、DOT(优化设计工具箱)、Excel and Quattro Pro Solvers(线性、整数和非线性规划)、FSQP(非线性规划和极小极大问题)、GRG2(非线性规划)、LBFGS(有限储存法)、LINDO(线性、二次和混合整数规划)、LSSOL(最小二乘和二次规划)、MINOS(线性和非线性规划)、NLPJOB(非线性多目标规划)、OPTPACK(约束和无约束最优化)、PETS(解非线性方程组和无约束问题的并行算法)、QPOPT(线性和二次规划)、SQOPT(大规模线性和凸二次规划)、SNOPT(大规模线性、二次和非线性规划)、SPRNLP(稀疏最小二乘,稀疏和稠密非线性规划)、SYSFIT(非线性方程组的参数估计)、TENSOLVE(非线性方程组和最小二乘)、VE10(非线性最小二乘)等。

普通的连续变量优化设计、混合离散变量优化设计,已发展到随机变量优化设计(可靠性优化设计)、模糊变量优化设计,单目标优化设计已发展到多目标优化设计。仅将优化设计的范围局限于优化方法及其应用程序的编制上已不能适应工程技术发展的需要,广义的工程优化设计是优化设计的重要发展方向,其内容主要包括工程优化设计问题的自动建模技术、优化设计问题的前处理与后处理、优化设计结果的评价等。此外,基于优化设计和制造的分级分解优化也是目前重要的研究内容。上述优化方向的实现,必然涉及到人工智能、信息技术、控制技术等多种方法、技术及软件系统的综合运用。

3. 全局最优化(global optimization)方面的新发展

科学计算和工程中的许多最优化问题都要求全局最优解。多数人认为最优化问题的主要区

别是目标函数或者可行域是否具有凸性,但是由于大多数最优化问题的目标函数或可行域的凸性并不知道或者很难知道,因此求解起来就相对困难。传统求解最优化问题的方法在计算稳定点和局部最优解方面做得很好,可是如果遇到多极值点问题而又要求全局最优,传统的方法就远远不够了。

1) 确定性方法(deterministic approaches)

该方法利用问题的凸性和单调性两个重要解析特性,从而产生了两个重要的研究方向——凸函数差分最优化方法(d. c. optimization)和单调最优化方法(monotonic optimization)。

(1) 凸函数差分最优化问题。对于目标函数和条件约束都是凸的情况已有很有效的算法可以利用,但是若其中一个不是凸的,对于求解问题困难就大了。大多数最优化问题都可以描述为:

$$\begin{aligned} \min f_0(X) &= f_{01}(X) - f_{02}(X) \\ \text{s. t. } g_u(X) &= g_{u1}(X) - g_{u2}(X) \leq 0 \quad (u = 1, \dots, m) \\ x &\in D \subset R^n \end{aligned} \quad (1-1)$$

其中 D 是严格凸集,差是凸函数。一个函数表示成两个凸函数的差称之为差分函数(d. c. function),式(1-1)称为凸函数差分最优化问题(d. c. optimization program)。利用如下特性,每一个连续最优化问题都可变成式(1-1)的形式。

① 差分函数的普遍性:任何连续二阶可微的函数在任何属于 R^n 的紧集上都是差分函数。

② 差分函数的线性性:任何差分函数的线性组合还是差分函数。

③ 任何闭集都可以表示成差分函数不等式的形式。将问题转换成该形式后,就可以利用现在比较成熟的方法去求解。

(2) 单调最优化方法。经济、工程学和其他领域里的很多最优化问题,其数学模型中目标函数关于变量都具有单调性或者部分具有单调性,一些论著里阐述了很多“单调性原理”,提供了对这类问题的研究工具。但是如果对最优化问题的单调结构不清楚,求解起来则会比较困难。对于目标函数是完全单调的(递增或递减,设为递增)问题,它同时也提供了一些全局的信息有利于简化问题,把全局搜索域限制在可行域里的一个有限范围内。对于问题(P),一旦找到它的一个可行解,就可以放弃该搜索域,因为在该搜索域里已没有更好的可行解。

(3) 二次多项式规划(quadratic and polynomial programming)。二次规划的重要性,是由二次多项式函数的特点决定的:

① 任何二次可微函数都可以在给定点的邻域内用二次多项式函数来逼近。

② 二次函数比较简单,其导数很容易求得,并且容易控制。

③ 许多组合优化问题也可以用二次规划来描述。

(4) 离散问题的全局优化方法(global optimization approaches to discrete problems)。求解离散最优化问题的方法可分为组合优化方法和连续优化方法。典型的组合优化方法就是从离散有穷集内产生一状态序列表示问题的部分解,而求解离散优化问题的连续方法是根据在连续空间里的不同等价特性——等价连续表示或者连续松弛,也就是把离散域嵌入到一个大的连续空间内。其实有很多方法把离散问题等价描述成连续问题,或者将离散可行域嵌入到一个大的连续空间内。求解这类问题的方法包括混和整数规划和 LCP 的等价(equivalence of mixed integer programming and LCP, LCP i. e. linear complementarity problem)、可满足性问题(satisfiability problem)、极小极大最优化(minimax optimization)。

2) 随机法(stochastic approaches)

(1) 两阶段法(two-phase methods)。两阶段法包括全局阶段(global phase)和局部阶段(local phase),全局阶段就是在可行域内抽取随机的样本点来估计目标函数,而局部阶段是通过处理得到的样本点趋于全局最优。

(2) 随机搜索法(random search methods)。这种方法就是根据预先知道的概率分布,在可行域里产生一点列,这类方法适合于求解病态结构的问题,因而显得比较灵活。

4. 多目标优化问题(Multi-objective Optimization Problem, MOP)的研究发展概况

由于多目标问题的广泛存在性与求解的困难性,该问题一直是富有吸引力和挑战性的。研究多目标优化问题一直缺乏一种高效实用的求解方法,好在 20 世纪 90 年代开始流行的演化计算为求解多目标优化问题提供了有力的工具。近些年来演化计算界相继提出了不同的多目标演化算法,这些算法的提出引起了众多研究机构的重视,这一方向已成为学术界研究的热点,其在近几年来取得的引人注目的发展与其应用于实际工程中的巨大价值已使得 IEEE 进化杂志出版了多目标演化计算理论与技术的专辑。

多目标最优化问题的最早出现应追溯到 1772 年,当时 Franklin 就提出了多目标矛盾如何协调的问题。但国际上一般认为多目标最优化问题最早是由法国经济学家 V. Pareto 在 1800 年提出的。当时他从政治经济学的角度,把很多不好比较的目标归纳成多目标最优化问题。1944 年, Von. Neumann 和 J. Morgenstern 从对策论的角度,提出多个决策者而且互相矛盾的多目标决策问题。1951 年, TC. Koopmans 从生产与分配的活动分析中提出了多目标最优化问题,并且第一次提出了 Pareto 最优解的概念。同年, H. W. Kuhn 和 A. W. Tucker 从数学规划的角度,给出了向量极值问题的 Pareto 最优解的概念,并且研究了这种解的充分与必要条件。1953 年, Arrow 等人对凸集提出了有效点的概念,从此多目标规划逐渐受到了人们的关注。1963 年, L. A. Zadeh 又从控制论的角度提出多目标控制问题,这期间 Charnes、Karlin、Klinger、Polak、Keeney、Geoffrion 等人先后都做出了较有影响的工作。1968 年, Z. Johnsen 系统地提出了关于多目标决策问题的研究报告,这是多目标最优化这门学科开始大发展的一个转折点。

多目标最优化问题从 Pareto 正式提出到 Johnsen 的系统总结,先后经过了六七十年时间。但是,传统的数学规划与模拟退火算法是以单点搜索为特征的串行算法,不可利用 Pareto 最优概念对解进行评估。1967 年, Rosenberg 在其博士论文中曾提出可用基于遗传的搜索算法来求解多目标的优化问题,但直到 1985 年才出现基于向量评估的遗传算法(VEGA),这是第一个多目标演化算法(MOEA)真正引起演化界重视的是 1990 年后,相继提出的多目标演化算法, Fonseca 和 Fleming 提出的多目标遗传算法(MOGA), Srinivas 和 Deb 提出的非劣分层遗传算法(NSGA), Horn 和 Nafoliotis 提出的小组决胜遗传算法(NPGA),这些算法已成为多目标演化算法研究的基石。多目标演化算法已成功应用于燃气涡轮泵控制器设计、航空器机构设计及汽车发动机设计等。当前,作为一个优化工具,多目标优化演化算法在解决工程技术、经济、管理、军事和系统工程等众多方面的问题上也越来越显示出它的强大生命力。

1.5 优化设计方法的工程应用领域

从 20 世纪后半期开始,最优化这门学科蓬勃发展,许多新的理论和算法已经用来解决科学计算和工程应用中的许多问题。在现实生活中,最优化问题也存在于很多方面,其应用遍布于工农业生产、工程技术、交通运输、生产管理、经济计划、国防、金融、分配和定位问题、运筹学、统计、结构优化、工程设计、网络传输问题、数据库问题、化学工程设计和控制、分子生物学等方面。最优化问题已受到科研机构、政府部门和产业部门的高度重视。随着市场经济的发展,产品市场竞争日趋激烈,工矿企业迫切期望提高产品性能,减少原材料消耗,降低生产成本,增强产品的竞争力,这使得工程优化设计的应用范围愈来愈广,收到的效益也愈来愈显著。

工程技术的优化问题可分为静态与动态两类。静态优化问题也称参数优化问题,是在一定范围内选取一些参数,使问题的性能指标达到最优值,常用于在一定的最优目标下,确定工程

问题的最佳操作和设计参数。动态优化问题是选择一个或几个函数,使问题的性能指标达到最优值,常用于在一定的最优目标下,确定某些函数应具有的最佳变化规律。最优化技术在工程中的应用主要有下列四个方面:

- (1) 工程部件、单元设备或全系统的最优设计。
- (2) 现有操作的分析和计划制定。
- (3) 工程分析和数据处理。
- (4) 研究过程动态特性和设计最优控制方案。

1.6 现代优化设计的发展趋势

我国自 20 世纪 80 年代初以来,在优化技术研究与应用方面有了长足的发展,在优化决策理论与方法研究上能够跟踪这一领域的国际发展前沿,在优化设计软件开发和工程应用中取得不少成果。“六五”期间,由合肥工业大学和华中工学院牵头的 15 所高校联合开发的“常用优化方法程序库”和“常用机械零部件及机构优化设计程序库”,标志着我国在优化方法及应用方面的研究已接近或达到了当时的世界先进水平。“七五”期间,由合肥工业大学承担完成的国家科技攻关项目“综合模块化优化方法程序库的研究”,是在“六五”期间的研究成果“常用优化方法程序库”的基础上进行的。新的“优化方法程序库”在程序模块质量、求解问题的综合能力等方面有较大的提高,基于该程序库,同期还完成了国家科技攻关项目“多目标优化方法程序的研制”,并在“数控机床 CAD 系统”中得以成功的应用,这些程序库已成为开展工程优化设计不可多得的工具软件。

人类从自身的进化到从事各种活动,无不贯穿着优化的思想。然而,由于认识不足、方法不足、条件不足等,使得人类在设计领域上达不到真正的“最优解”,而只能尽可能在已有条件上采用种种措施,使设计结果向“最优解”逼近。以数学规划法为基础的最优化设计方法在工程设计领域中虽取得了一定的经济效益和社会效益,但其应用远比预期的小,其原因主要有以下几方面:

(1) 最优化设计方法只是在参数优化设计和结构优化设计等方面比较有效,而在方案设计与选择、决策等方面则无能为力。众所周知,参数优化设计、结构优化设计所产生的效益是有限的,人们往往看中方案优化、决策优化。

(2) 建模难度大,技术性高,特别是对于动态系统,数学模型描述能力低,数学模型误差大。

(3) 方法程序的求解能力有限,难以处理复杂问题和性态不好的问题,难以求得全局最优解。

为了提高最优化方法的综合求解能力和使用效果,近年来人们在以下方面进行了众多有益的探索:

(1) 人工智能、专家系统技术的引入,增加了最优化方法中处理方案设计、决策等优化问题的能力。在优化方法中的参数选择时,借助专家系统可以减少参数选择的盲目性,提高程序求解能力。

(2) 针对难以处理性态不好的问题、难以求得全局最优解等弱点,发展了一批新的方法,如模拟退火法、遗传算法、人工神经网络法、模糊算法、小波变换法、分形几何法、有混合遗传基因优化方法、混沌优化方法、多态蚁群优化方法、动态蚁群优化方法等。

(3) 在数学模型描述能力上,由仅能处理连续变量、离散变量,发展到能处理随机变量、模糊变量、非数值变量等;在建模方面,开展了柔性建模和智能建模的研究;利用人工神经网络来解决目标函数和约束条件函数难以准确写出的问题;利用人工神经网络来解决多数机器设备的实际

工作系统是强耦合的数学模型建立问题;动态多变量优化和工程不确定模型优化(模糊优化)、不可微模型优化及多目标优化等优化方法与程序的研究,并进一步发展到广义工程大系统的优化设计的研究。

(4) 在研究对象上,从单一部分的、单一性能或结构的、分离的优化设计,进入到整体优化、分步优化、分部和分级优化、并行优化等,提出了覆盖设计全过程的优化设计思想。方法研究的重点,从着重研究单目标优化问题进入到着重研究多目标问题。

(5) 在最优化方法程序设计研究中,一方面努力提高方法程序的求解能力和各个方法程序之间的互换性,研制方法程序包、程序库等;另一方面大力改善优化设计求解环境,开展了优化设计集成环境的研究,这为设计者提供了辅助建模工具、优化设计前后处理模块、可视化模块、接口模块等。

(6) 开展多学科优化研究,即把计算机仿真、计算机图形学、智能技术、虚拟现实技术、多媒体技术、机械动力学、有限元等和优化设计方法融为一体,解决具有非稳态(慢变、参变、时滞等)、强耦合、多参数、非线性等的复杂系统问题,目前在复杂结构优化设计中有一定的进展,但还没有形成解决复杂系统问题的优化设计理论、方法和体系。

第2章 优化设计概述

2.1 优化设计问题的引例

例2-1 有一块边长为600mm的正方形不锈钢板,四角各裁去一个小的方块,做成一个无盖的盒子。试确定裁去的四个小方块的边长,以使做成的盒子具有最大的容积。

解:设裁去的四个小方块边长为 x (见图2-1),盒子的容积可表示成 x 的函数 $f(x) = x(600 - 2x)^2$ 。于是,上述问题可描述为

求变量 x

使函数 $f(x) = x(600 - 2x)^2$ 极大化

这就是此问题的数学模型。其中, x 称为设计变量; $f(x)$ 称为目标函数。由于目标函数是设计变量的一元三次函数,且没有附加的约束条件,故此问题属一元非线性无约束优化设计问题。根据一元函数的极值条件,令 $f'(x) = 0$,解得极值点和极值分别为 $x^* = 100\text{mm}$, $f^* = 16000000\text{mm}^3$,称为该设计问题的最优解。

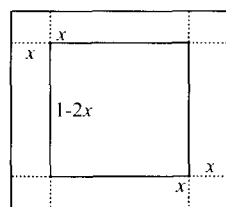


图2-1

例2-2 某厂生产甲、乙两种产品。生产每种产品所需的材料、工时、电力和可获得的利润,以及能够提供的材料、工时和电力(见表2-1)。试确定两种产品每天的产量,以使每天所获得的利润最大。

表2-1 生产条件与供给数据

产品	材料/kg	工时/h	电力/kW·h	利润/元
甲	90	30	40	600
乙	40	100	50	1200
供应量	3600	3000	2000	

解:这是一个生产计划问题,可归结为既满足各项生产条件,又使每天所能获得的利润达到最大的优化设计问题。

设每天生产甲产品 x_1 件,乙产品 x_2 件,每天获得的利润可用函数 $f(x_1, x_2)$ 表示,即

$$f(x_1, x_2) = 600x_1 + 1200x_2$$

每天实际消耗的材料、工时和电力可分别用函数 $g_1(x_1, x_2)$ 、 $g_2(x_1, x_2)$ 和 $g_3(x_1, x_2)$ 表示,即

$$g_1(x_1, x_2) = 90x_1 + 40x_2$$

$$g_2(x_1, x_2) = 30x_1 + 100x_2$$

$$g_3(x_1, x_2) = 40x_1 + 50x_2$$

于是上述生产计划问题可归结为

求变量 x_1, x_2

使函数 $f(x_1, x_2) = 600x_1 + 1200x_2$ 极大化

满足条件 $g_1(x_1, x_2) = 90x_1 + 40x_2 \leq 3600$

$g_2(x_1, x_2) = 30x_1 + 100x_2 \leq 3000$