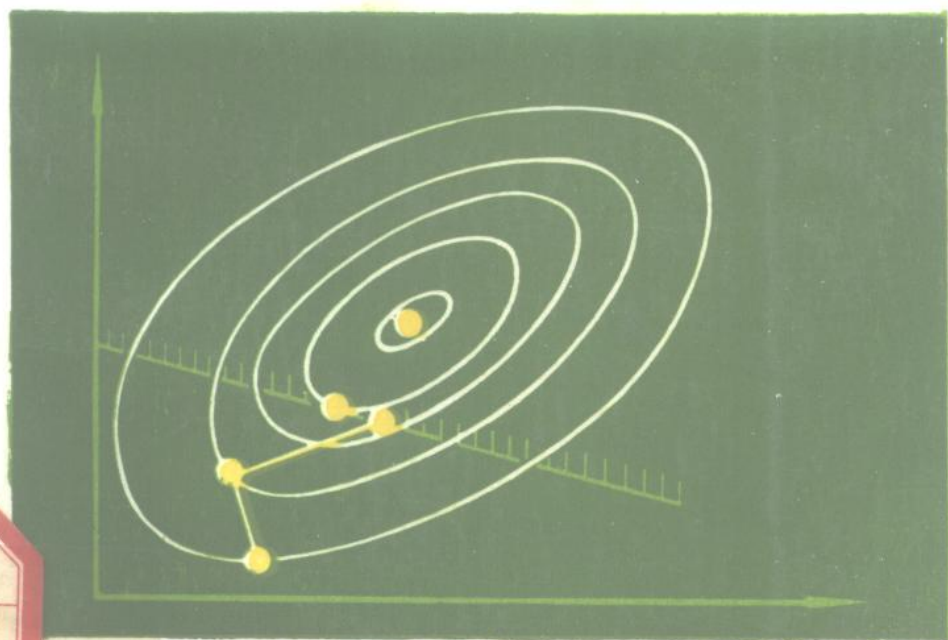


机电产品现代设计统一培训教材

优化设计

曾昭华
傅样志

主编



机械工业出版社

机电产品现代设计统一培训教材

优 化 设 计

曾昭华 傅祥志 主编



机 械 工 业 出 版 社

(京) 新登字054号

内 容 简 介

本书是机电产品优化设计的统一培训教材。其主要内容为工程优化设计的基本概念和理论,常用优化方法,优化方法程序库PC-OPB 及其使用方法,典型的机电产品优化设计实例。为了适应工程技术人员学习的特点,本书在讲述优化概念和理论时,力求说理透彻、深入浅出;所介绍的优化算法以非线性规划算法为主,也兼顾了线性规划算法和准则优化法,特别着重讨论了最优秀的三种约束优化算法(即序列二次规划法、广义简约梯度法和广义乘子法)和在工程优化设计中广泛采用的常用算法;本书在讲解机电产品优化设计实例时,注意完整而具体地介绍优化设计全过程,因而便于读者对全书内容融汇贯通,灵活运用,全面掌握。

本书主要作为机电产品设计人员的培训教材,也可作为高等工科院校高年级学生及研究生学习优化设计的参考书。

优 化 设 计

曾昭华 傅祥志 主编

责任编辑:盛秀峰 版式设计:朱淑珍

封面设计:姚毅

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

北京通县科海印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32·印张 10.875 ·字数 300千字

1992年1月北京第一版·1992年10月北京第二次印刷

印数 5,001—8,000 ·定价:8.00元

ISBN 7-111-03228-4/TH·355

编辑委员会

主任委员：郭志坚

副主任委员：李宜春 潘兆庆

委 员：周长源 孙靖民 张存库 杨敢新 刘元杰
陈康民 赵松年 赵学仁 万耀青 李光泉
郭青山 范祖尧 束鹏程 毕振南 计有为
卢玉明 雷闻宇 徐宗俊 薛继良 许大中
黄纯颖 欧宗瑛 周 济 洪如娟 韩中光

序 言

在各级领导部门、高等院校的倡导和宣传下，机电行业的现代设计方法推广和培训工作取得了很大进展，并且已经见了成效。1990年，机电部颁发了机电科[1990]213号文件及附件《加强机电产品的设计工作的规定》，明确地指出了推广和普及现代设计方法的重要性，并把现代设计方法推广纳入了宏观管理的轨道。从1989年到现在，有关部委和地方机电制造主管部门在充分酝酿和讨论的基础上，制定了机电产品现代设计试点项目共1401项。至目前为止，1/3的项目已经完成。一些企业在完成这些项目的过程中，创造了明显的经济效益，尝到了甜头。

管理干部培训对现代设计方法推广起了很大的促进作用。从1988年到现在，有关部委和几乎所有的地方主管部门都举办了各种形式的管理干部现代设计方法学习班、研讨班，大部分领导同志都是通过这些培训才对现代设计方法有所了解，并认识到了推广现代设计方法的紧迫性。很多负责同志在接受培训后积极主动地要求承担项目试点任务。

推广现代设计方法的中心环节和中心内容是设计人员尤其是骨干设计人员的培训。因为只有让大多数设计人员掌握了现代设计理论和设计技术，并将之应用于产品开发和设计，从根本上提高机电产品的设计水平和产品水平，才会产生巨大的经济效益，促进整个行业的迅速发展。为此，机电部科技司于1990年9月在上海专门召开了一次由行业主管部门、高等院校的领导、专家、学者参加的现代设计统一培训联席会议，决定对设计人员进行有计划、有步骤的统一培训，并由一直协助科技司进行现代设计方法推广工作的机电产品设计信息中心负责组织有关专家编写一套融科学性与实用性为一体的培训教材，即《机电产品现代设计统

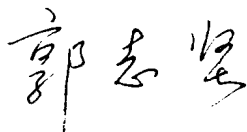
一培训教材》。这套教材共分14册，各分册的名称是：计算机辅助设计、优化设计、可靠性设计、工业艺术造型设计、设计方法学、反求工程技术、有限元法、价值工程、机械动态设计、三次设计、疲劳设计、专家系统、智能工程、模块化设计。

现代设计方法，既不是单纯指计算机技术，也不单纯指以设计的一般规律和一般途径为研究对象的设计方法学。它应当包括一切先进的设计理论、设计技术和设计方法，是一切先进而行之有效的设计思想的集成与统一。现代设计培训应当把学以致用作为基本原则。正因为如此，被邀请参加编写教材的作者大都是现代设计方法推广中有丰富实践经验的专家和学者，而这套教材不仅系统地介绍了现代设计方法的基本内容，还列举了大量应用实例。

设计是一项涉及多种学科、多种技术的交叉工程。它既需要方法论的指导，也依赖于各种专业理论和专业技术，更离不开技术人员的经验和实践。现代设计方法是在继承和发展传统的设计方法的基础上融汇新的科学理论和新的科学技术成果而形成的。因此，推广现代设计方法，并不是要完全抛弃传统方法和经验，而是要让广大设计人员在传统方法和实践经验的基础上掌握一把新的思想钥匙。

设计是产品生产和经营的后盾，企业实现自主设计是我国企业自力更生的主要标志。要想以优秀的产品占领国内外市场，就要在设计上下大工夫。这就要求我们尽快更新设计人员的知识结构，更新设计基础数据和设计手段，提高产品开发和改进的速度和效益。希望大家在实践中了解和学习这套教材，更希望现代设计方法在产品开发的实践中结出累累硕果！

机械电子部副总工程师



1991年8月

前 言

优化设计是一种现代设计方法。优化方法应用于机电产品设计,可大幅度地缩短设计周期,改善工程设计方案,从而达到提高产品质量、节省原材料、降低产品成本,提高经济效益的目的。

国家“六五”科技攻关课题《常用优化方法程序库的研究》通过机电部主持的鉴定后,常用优化方法程序库OPB-1及其微机版本PC-OPB在全国有关单位得到越来越广泛的应用,有力地促进了优化方法在机电产品设计中的推广。为了进一步在广大工程技术人员中普及推广优化设计方法,我们编写了这本书。在编写过程中,我们注意了以下几点:

(1) 先进性 本书以介绍常用优化方法程序库PC-OPB中采用的具有先进性的非线性算法为主,也兼顾线性规划算法和准则优化法。特别着重讨论了具有最新水平的算法(如序列二次规划法、广义简约梯度法及广义乘子法)和在工程设计中已经广泛应用的常用算法(如惩罚函数法和可行方向法)。

(2) 实用性 本书在结合实例对优化理论和算法中的几何、数学概念及基本原理作深入浅出、通俗易懂的阐述的基础上,着重说明优化算法及PC-OPB程序库的使用方法,并以实例具体而详细地说明之。

(3) 完整性 本书在注重先进性和实用性的基础上,对机电产品优化设计全过程作了完整而具体的阐述。对于初学优化设计的读者,可结合本书第八章实例,从建立数学模型、选择优化算法和优化软件、编写主程序和函数子程序到上机计算及优化结果分析,进行模仿学习,以缩短掌握优化设计方法解决机电产品优化设计问题的过程。

本书由华中理工大学曾昭华、丁幼琳、傅祥志、王惠珍和重庆大学王彩华共同编写。其中,第一、七章由曾昭华编写,第二章由丁幼琳、傅祥志编写,第三、五章由傅祥志编写,第四章由

王惠珍编写，第六章由王彩华编写，第八章由丁幼琳、曾昭华编写。曾昭华、傅祥志负责全书的主编工作。

本书承哈尔滨工业大学孙靖民教授精心主审，并对本书提出了不少宝贵意见，在此表示衷心谢意。

编者

1991年3月

目 录

第 1 章 工程优化设计的基本概念	1
1.1 优化设计问题的提出	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 工程优化设计的两个分支——数学规划法与准则法	2
1.1.3 工程优化设计的两个层次——总体方案优化与设计参数优化	3
1.2 优化设计问题举例与数学模型	4
1.2.1 优化设计问题举例	4
1.2.2 优化设计的数学模型	9
1.2.3 工程优化设计问题的主要类型	18
1.3 工程优化问题的几何描述	19
第 2 章 工程优化设计的基本理论	21
2.1 函数的最速下降方向	21
2.1.1 函数的方向导数	21
2.1.2 函数的梯度及最速下降方向	23
2.2 函数的泰勒近似展开式与 Hessian(海色)矩阵	26
2.3 函数的凸性与凸规划	29
2.3.1 函数的凸性及其判别	29
2.3.2 凸规划	33
2.4 二次型函数与正定二元二次函数	34
2.4.1 二次型函数	34
2.4.2 正定二元二次函数	35
2.5 无约束优化问题的极值条件	37
2.5.1 一元函数的极值条件	37
2.5.2 二元及多元函数的极值条件	38
2.6 约束优化问题的极值条件	41
2.6.1 等式约束优化问题的极值条件	42

2.6.2	不等式约束优化问题的极值条件	46
2.7	工程优化问题迭代算法	52
2.7.1	数值迭代算法的迭代格式	52
2.7.2	数值迭代算法的评价准则	53
2.7.3	数值迭代算法的终止准则	54
第3章	无约束优化方法	58
3.1	一维搜索方法	59
3.1.1	搜索区间的确定	59
3.1.2	0.618法(黄金分割法)	61
3.1.3	二次插值法	69
3.2	梯度法	73
3.2.1	梯度法迭代方向与步长因子	74
3.2.2	梯度法的迭代步骤与计算框图	74
3.2.3	梯度法的特点	75
3.3	牛顿法	76
3.3.1	牛顿法的基本原理与迭代公式	77
3.3.2	修正牛顿法及其迭代步骤	79
3.4	变尺度法	80
3.4.1	变尺度法(DFP法)的迭代公式	81
3.4.2	变尺度矩阵及其递推公式	81
3.4.3	DFP变尺度法的迭代步骤与程序框图	84
3.4.4	变尺度法的特点	85
3.4.5	BFGS变尺度法及其修正矩阵	86
3.5	Powell共轭方向法	89
3.5.1	坐标轮换法的基本原理	89
3.5.2	共轭方向及其构成	91
3.5.3	Powell共轭方向法的基本原理	93
3.5.4	Powell共轭方向法的修正	95
3.5.5	修正的Powell共轭方向法的迭代步骤及计算框图	97
第4章	线性规划的算法	104
4.1	线性规划的标准形式	104
4.1.1	线性规划问题举例	104
4.1.2	线性规划的标准形式	106

4.2	线性规划的基本性质	109
4.2.1	性规划的几何意义	109
4.2.2	线性规划的基本性质	111
4.3	解线性规划的单纯形法	113
4.3.1	单纯形法的基本思想	114
4.3.2	单纯形法的算法及其迭代过程	119
4.3.3	单纯形表	125
4.4	初始基本可行解	129
4.4.1	用大 M 法找初始基本可行解	129
4.4.2	用两阶段法找初始基本可行解	132
4.5	改进单纯形法	135
4.5.1	单纯形法的矩阵形式	135
4.5.2	改进单纯形法	137
第5章	约束优化方法	147
5.1	概述	147
5.1.1	间接解法所采用的基本策略	148
5.1.2	起作用约束集	148
5.2	可行方向法	149
5.2.1	适用可行方向的条件	150
5.2.2	最佳适用可行方向的确定	152
5.2.3	步长因子的确定	154
5.2.4	ϵ -起作用约束的可行方向	156
5.2.5	可行方向法的迭代步骤与框图	157
5.3	简约梯度法及广义简约梯度法	162
5.3.1	简约梯度法	162
5.3.2	广义简约梯度法 (GRG方法)	175
5.4	惩罚函数法	187
5.4.1	外罚函数法 (外点法)	188
5.4.2	内罚函数法 (内点法)	199
5.4.3	混合罚函数法	204
5.5	广义乘子法	206
5.5.1	等式约束下的广义乘子法	206
5.5.2	不等式约束下的广义乘子法	214

5.6	序列二次规划算法	218
5.6.1	等式约束下的二次规划子问题的形成	219
5.6.2	序列二次规划算法的原理	221
5.6.3	不等式约束下的二次规划子问题	223
5.6.4	二阶导数矩阵 H^k 的修正方法	224
5.6.5	序列二次规划算法的求解步骤	225
第6章	准则优化法	231
6.1	满应力准则法	231
6.1.1	满应力准则	231
6.1.2	满应力准则法的迭代公式	232
6.1.3	满应力准则法的迭代步骤	233
6.2	齿形法	237
6.2.1	齿形法的基本思想	237
6.2.2	齿形法的迭代公式	238
6.2.3	齿形法的迭代步骤	238
6.3	库恩-塔克准则	240
6.4	受单个位移约束的库恩-塔克准则法	243
6.4.1	优化准则	243
6.4.2	迭代公式	244
6.4.3	拉格朗日乘子的计算	245
6.4.4	迭代步骤	246
6.4.5	可行性调整	247
6.5	受多个位移约束的库恩-塔克准则法	248
6.5.1	优化准则	248
6.5.2	迭代公式	249
6.5.3	拉格朗日乘子的计算	250
6.5.4	迭代步骤	251
6.5.5	可行性调整	253
6.6	多工况多约束下的库恩-塔克准则法	254
6.7	结构响应的灵敏度	255
6.7.1	位移对设计变量的梯度	256
6.7.2	结构频率对设计变量的梯度	256
6.8	准则优化法和数学规划法的结合	258

6.9	工程应用实例	260
6.9.1	机床主轴的优化设计	260
6.9.2	主轴的有限元一优化设计	264
第7章	微机优化方法程序库 PC-OPB 简介	272
7.1	概述	272
7.2	PC-OPB 程序库的总体结构	273
7.3	PC-OPB 程序库的内容及特点	274
7.3.1	常用优化方法程序包 DOP	274
7.3.2	约束变尺度法程序包 CVM01	277
7.3.3	序列二次规划算法程序包 MARQ	277
7.3.4	拟牛顿乘子法程序 QNM01	278
7.3.5	广义简约梯度法程序 GRG-D	278
7.3.6	混合罚函数法程序 MPOP	279
7.3.7	离散变量优化方法程序 MDOP	279
7.4	PC-OPB程序库的使用说明	280
7.4.1	运行前的准备工作	28 ⁰
7.4.2	运行操作步骤	282
第8章	工程优化设计实例	284
8.1	工程优化设计的一般步骤	284
8.2	工程优化设计的数学模型及其尺度变换	285
8.2.1	工程优化设计的数学模型	285
8.2.2	数学模型的尺度变换	285
8.3	数据表格及线图资料的处理	290
8.3.1	表格的程序化	290
8.3.2	线图的程序化	294
8.4	工程优化设计实例	296
8.4.1	2K-H(NGW)型行星轮系的优化设计	296
8.4.2	单级直齿圆柱齿轮传动减速箱的优化设计	307
8.4.3	弹簧的优化设计	315
8.4.4	四杆机构再现预定轨迹的优化设计	319
8.4.5	电机优化设计	323

附录		328
1 简约梯度法及广义简约梯度法中的公式推导		328
2 不等式约束下的增广拉格朗日函数表达式及乘子 λ 的修正		
公式的推导		331
参考文献		333

第1章 工程优化设计的基本概念

1.1 优化设计问题的提出

1.1.1 概述

优化设计是60年代开始发展起来的一门新的学科。这种设计方法是数学规划与现代电子计算机技术相结合的产物。因而数学规划的理论和方法的日趋成熟，电子计算机技术的高速发展与广泛应用，为工程设计中普遍使用优化设计方法，提高设计质量，缩短设计周期，开拓了广阔的前景。

一般工程设计问题都有许多种可行的设计方案。如何根据设计任务和要求，从众多的可行方案中，寻求一个最好的方案，即最优方案，是设计工作者的首要任务。要完成这样一个困难的任务，必须掌握可靠的先进设计方法。

然而长期以来，机械设计工作者一直沿用着经验类比设计方法。这种传统设计方法的设计过程可概述如下：首先根据设计任务及要求进行调查研究和搜集有关资料，参照已完成的相同或类似任务现有的较为成熟的设计方案，凭借设计者的经验，辅以必要的分析计算，确定一个合适的设计方案，并通过估算，初步确定有关设计参数；然后对初定方案进行必要的分析及校核计算；如果某些设计要求得不到满足，则可进行设计方案的修改，设计参数的调整，并再一次进行分析及校核计算，如此多次反复，直到获得满意的设计方案为止。也就是说，传统的设计方法要通过多次反复地“设计—分析—再设计”的过程，才可能得到一个较为满意的设计方案。显然，这个设计过程是人工试凑与类比分析的过程，不仅需要花费较多的设计时间，增长设计周期，而且只限于在少数几个候选方案中进行分析比较。所以，这种设计方法虽

然也有可能获得较好的方案，但是由于设计过程缺乏严格的、科学的定量分析计算，一般很难得到近乎最优的设计方案，特别是对于影响因素很多的复杂设计问题，更是如此。当然，有些工程设计方案是通过长期的实践，逐步完善，不断演化而形成的，因而可能是比较令人满意的。但这种发展完善过程往往要经历很长的时间，有时甚至要付出高昂的代价，因而很难适应高速发展的现代工业的要求。为此，寻求新的设计理论和设计方法成为一项迫切的任务。

随着电子计算机技术的发展与应用，50年代发展起来的以线性规划与非线性规划为主要内容的新的数学分支——数学规划被应用于解决工程设计问题，形成了工程设计的新理论和新方法，即工程优化设计理论与方法。

优化设计理论和方法用于工程设计是在60年代后期开始的，国内则从70年代中期才开展有关研究。发展历史虽然不长，但由于数学规划理论的日趋成熟，电子计算机技术的高速发展与普及，优化设计理论、方法在飞机、汽车、船舶、机床、起重运输机械等领域内，得到了广泛的应用，取得了显著的技术、经济效益。据有关资料介绍，机电产品的优化设计比传统的设计可以节省材料5%~25%。20余年的工程优化设计理论与方法的研究与实践，使传统的工程设计方法发生了根本性变革，从而把经验的、感性的、类比的传统设计方法转变为科学的、理性的、立足于计算分析的设计方法。特别是近年来，随着有限元素法、可靠性设计、计算机辅助设计(CAD)的理论与方法的发展及与优化设计方法的结合应用，使整个工程设计过程逐步向自动化、集成化、智能化发展，其前景是令人鼓舞的。因而，工程设计工作者必须适应这种发展变化，学习、掌握和应用优化设计理论与方法。

1.1.2 工程优化设计的两个分支——数学规划法与准则法

工程设计中广泛应用的优化方法可按其原理的不同区分为数学规划法与准则法。数学规划法是以数学规划理论为基础的严格

意义上的优化方法,其算法有充分的理论依据,因而理论上均可保证收敛到问题的最优点,算法平稳、成熟,计算结果可靠。但是,这类算法的计算过程的迭代次数多,计算时间较长,特别是随着问题规模的增大,其迭代次数明显增加,计算时间显著增长,因而对于较复杂的大型问题来说,是一个较为严重的缺点。

准则法则往往是从一些基本概念出发,建立一些准则,如满应力准则、库恩-塔克准则等,并认为满足这些准则的可行方案,就是最优设计或近乎最优设计方案。它与数学规划法相比,缺乏严格的数学理论依据,有时还要凭直觉作某些近似处理,计算结果一般比较粗糙,即求得的方案不一定是最优解。但其收敛速度快,迭代次数少,特别是其迭代次数与问题的规模基本上无关,所以往往用于比较复杂的工程设计问题。应当指出的是,准则法一般只能作工程结构的最小体积(或最轻重量)的优化设计,适用范围较窄。

鉴于这两类优化方法各有其优缺点,如何将它们结合起来,扬长避短,形成新的优化方法是当前优化理论和方法发展的一个方向。

1.1.3 工程优化设计的两个层次——总体方案优化 与设计参数优化

与一般工程设计类似,工程优化设计可分为总体方案优化与设计参数优化两个层次。前者是指总体布局、结构或系统的类型以及几何形式的优化设计;后者是在总体方案选定后,对具体设计参数(几何参数、性能参数等)的优化设计。总体方案设计是一种创造性活动,必须依靠思考与推理,综合运用多学科的专门知识和丰富的实践经验,才能获得正确、合理的设计。这类设计工作是符号推理型工作,其主要任务是建立和处理知识模型,可采用人工智能的一个分支——专家系统方法予以解决,这不是本书讨论的范畴;设计参数优化属于数值计算型工作,其主要任务是建立和求解数学模型,是本书讨论的对象。不言而喻,对一个具体的工程设计来说,若顺次进行两个层次的优化设计,会取得