

大连理工大学教授学术丛书

离散变量结构优化设计

(增订版)

孙焕纯 柴山 著
王跃方 石连拴

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

离散变量结构优化设计/孙焕纯等著. —增订版. —大连:
大连理工大学出版社, 2002. 6
大连理工大学教授学术丛书
ISBN 7-5611-1129-0

. 离 孙... . 离散变量法-最优设计 . TB21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 094434 号

大连理工大学出版社出版发行
大连市凌水河 邮政编码 116024
电话: 0411-4708842 传真: 0411-4701466
E-mail: dutp@mail.dlptt.ln.cn
URL: http://www.dutp.com.cn
大连海事大学印刷厂印刷

开本: 850 毫米× 1168 毫米 1/32 字数: 343 千字 印张: 13.75 插页: 4
印数: 3001—4000 册
1995 年 10 月第 1 版 2002 年 6 月第 2 版
2002 年 6 月第 2 次印刷

责任编辑: 韩 露

责任校对: 文 舫

封面设计: 孙宝福

定价: 30.00 元

The Professors Academic Works Series
of the Dalian University of Technology

Discrete Optimum Design of Structures

Sun Huanchun Chai Shan

Wang Yuefang Shi Lianshuan

Dalian University of Technology Press

本书由

国家自然科学基金 10002005 项目

大连市人民政府

大连理工大学学术著作出版基金 资助出版

山东省自然科学基金 L2000A01 项目

天津市教委 20010210 科学基金项目

The published book is sponsored by

The National Natural Science Foundation
of China 10002005 item

The Dalian Municipal Government

The Publishing Academic Works

Foundation of the Dalian University
of Technology

The Natural Science Foundation of
Shandong Province L2000A01 item

and

The Science Foundation of Tianjin

Education Commission 20010210 item

增订版序言

大连理工大学工程力学系博士生导师孙焕纯教授率他的学生柴山、王跃方、石连拴所著的《离散变量结构优化设计》的专著,其令人赞赏之处,首先在于孙焕纯教授以力学研究服务于工程的信念,二十年如一日,锲而不舍,啃着“离散变量结构优化”这个硬骨头,终于做出系统的研究成果。

由于工程结构设计中变量的离散性,使优化设计的数学规划模型面临“组合爆炸”的计算困难,令人视为畏途。但作者却理论联系实际,提出了独创的思想和算法。他们建立了各个层次的离散变量结构优化设计的数学模型,先后提出了离散变量结构截面优化的 $(0, 1)$ 规划、 $(0, 1, 2)$ 规划、 $(0, 1, 2, 3)$ 规划和多值规划及求解的定界组合算法和相对差商法,以及形状、拓扑、布局(包括支座布置)等优化设计的序列多重两级算法和序列综合两级算法。尤为可贵的是,这些方法充分考虑到了工程上的应用要求:算法可以满足工作规范的规定,可以容纳相当多的约束条件,可以处理多种工程结构和结构材料,可以分析多种类型的荷载等。书中介绍的一些方法已成功地应用于工程实际中,取得了很好的效果。

总之,作者克服了“组合爆炸”的计算困难,取得了理

论、方法、程序及应用等系列成果,可用于工程结构的截面、形状、拓扑、布局优化等多层次优化问题,使离散变量结构优化设计改变了它一向被视为畏途的看法,实为可喜。

该专著是反映了数学规划研究领域理论服务于工程实际的优秀著作,希望这些工作得以推广应用,取得更大的成果和效益。

2001. 10. 10

前 言

本书是作者 20 年来关于离散变量结构优化设计研究成果的系统归纳和总结。作者于 1985 年曾写过一本离散变量结构优化设计的讲义用于教学。在该讲义中除了当时的部分研究成果外,还收入了已有的前人的研究成果,例如 Gomory 的割平面法、Dakin 所改进的分支定界法、Balas 的 $(0, 1)$ 规划的加法、动态规划法以及 Templeman 对桁架结构的多节杆线性规划法和隋允康所改进的 Templeman 的多节杆线性规划法等等。随着时间的推移和工作的广泛、深入开展,内容也逐渐丰富起来。在编写本书时,考虑到前述诸方法在过去许多著作的个别章节中已有阐述,读者也不难查到,故将这些内容全部删除了,以免内容冗长。

作者对离散变量结构优化的主要贡献和本书的特点是: 将非线性结构优化设计问题转化为线性 $(0, 1)$ 规划问题。采用二进制的一种隐枚举算法和定界组合算法求解,大大地减少了组合次数。 利用结构优化设计在大多数情况下目标函数和约束函数关于设计变量的单调性提出了相对差商法,大大地加快了解的收敛速度,提高了解的稳定性。 将相对差商法和多有效约束凝聚为单约束的方法相结合,提出了一种近似算法,将组合数降到 n 以下,并给出了误差估计的公式。当误差超过工程允许的范围时,又给出了 0 阶修正和 1 阶修正算法。 提出了求解 $(0, 1, 2)$ 规划问

题的定界组合算法,为离散变量结构优化设计提供了一种高效的算法。该法可求得问题的局部最优解,解决了启发式算法的解是否是局部最优解的判定问题。对离散变量结构截面(或尺寸)优化问题多值规划定界组合算法,有时可比现有方法得到更优的解,不过计算量大一些。对离散变量结构形状、拓扑和布局优化问题先后给出了两类算法,第一类是序列多重二级算法,将不同类型的设计变量分级处理,以减少解题规模和求解难度,提高了效率;第二类是序列综合算法,对形状优化将两类变量(截面和坐标)同时处理,对拓扑优化将两类变量(截面和拓扑)同时处理,对布局优化则分级交替进行形状和拓扑优化。第二类算法充分考虑了两类变量的耦合影响,比第一类方法得到更优的解(包括新的拓扑解),只是工作量要大一些,从研究中得到了若干有价值的结论(见本书绪论)。所提出的优化数学模型符合工程设计规范的所有要求,适用于工程结构的优化设计。利用静定化假设求得的超静定结构优化问题的解,一般地说,不是结构优化原问题的解,不论采用什么方法。

本书初版第1章由孙焕纯执笔,第2至第5章由柴山执笔,第6至第9章由王跃方执笔,最后由孙焕纯统稿。书稿由隋允康教授(博士生导师)初审,程耿东教授(中国科学院院士)二审,钟万勰教授(中国科学院院士)也审阅了书稿并作序,他们对本书提出了许多宝贵意见,本书的出版又得到了钱令希院士的热情支持和鼓励,在此向他们表示崇高的敬意和深深的谢意。

本书增订版在初版的3~8章中增加了以下几节:3.1.6,4.5,5.6(初版中的5.6~5.8顺次改为5.7~5.9),5.10,6.3(初版中的6.3改为6.2.5),6.4,7.4,7.5(初版中的7.4改为7.6),8.4,8.5和附录。前言、绪论和5.9.1,

5.9.2由孙焕纯执笔修改;3.1.6和附录由柴山执笔;4.5, 5.6, 5.10, 6.3, 6.4, 7.4, 7.5和8.5由石连拴执笔;8.4由王跃方执笔。最后由孙焕纯统稿并对初版中的一些错误予以纠正。另有毛生根、陈勤、许强三位同志也为本书的出版做了许多工作,一并表示谢意。

增订版经中科院资深院士钱令希教授审查和作序,并推荐出版,谨向他致以衷心的感谢。

另蒙李兴斯教授(博士生导师)的审阅和推荐出版,也向他表示深深的谢意。

由于水平所限,本书两版中的论述难免有所疏漏和失误,敬希各位专家和读者不吝赐教。

著 者

2001.9

初版序言

结构优化设计的理论和方法近 30 年来得到迅速的发展,但大多数的研究都是针对连续变量的,尚未见到有离散变量结构优化设计的专著问世。离散变量结构优化设计需要采用组合最优化的理论和方法,而组合最优化问题属 NP 完全类问题,其求解算法则属 NP 困难问题。设变量数为 n , 许用离散集合元素数为 m , 则可能的组合数为 m^n , 当 m, n 较大时, 计算工作量急剧增加, 无法承受。迄今为止, 对截面优化来说, 所采用的方法有隐枚举法、割平面法、分支定界法、(0, 1) 规划的巴拉斯(Balas)法、动态规划法等。这些算法的优点是对约束函数为设计变量的显函数问题(静定问题)可以求得问题的精确解, 但解题的规模较小; 而连续变量优化解的圆整法, 优点是可以利用连续变量的优化理论和方法, 但不足之处是得到的不是离散变量的最优解, 有时可能相差较大。近年来发展的遗传算法(GA), 虽有可能求得问题的最优解, 但是结构重分析次数太多; 还有模拟退火法(Simulated Annealing), 主要缺点也是工作量太大。另外一些方法也不够令人满意。

对离散变量结构截面优化设计这个最基本的问题, 本书采用序列(0, 1)和(0, 1, 2)规划法, 分别将 m^n 组合数化为 2^n 和 3^n 组合数, 分别应用二进制算法、定界组合算法和两级定界组合算法, 大大地减少了组合次数。算例表明通常的组合数在 n^2 以下, 优于分支定界法和巴拉斯的算法, 且

在优化过程中无需求解数学规划的方程。值得指出的是,作者提出了一种近似算法,利用相对差商法(同时考虑目标函数和约束函数的变化趋势)和结构优化设计在多数情况下目标函数和约束函数关于设计变量的单调性,并将多约束化为单约束,求得问题的近似解。此外,该算法还可给出近似解的误差估计,当误差较大时可进行逐阶修正,其组合次数最多为 n^2 。通过对几千个随机选择样本的计算结果进行的性能统计分析,表明本法是有效的,计算精度是较高的。另外,本法即使对于目标函数和约束函数不满足关于设计变量的单调性要求的问题,仍然具有一定的使用价值,对 100 个随机选择的算例,只有一个用本法是无效的。因此,本法是离散变量结构优化设计的一个重要进展。

由于离散变量结构截面优化设计方法的限制,关于离散变量结构的形状优化、拓扑优化和布局优化等方面的国际、国内文献就更少了。作者采用序列多重两级优化方法处理了这些问题,对离散变量结构的截面优化、形状优化、拓扑优化和布局优化等,均已提出了有效的算法,值得一读。

本书的另外几个特点是:理论结合实际,优化模型考虑了规范规定的各种约束条件,并做了若干工程实例,可以进行各种结构的优化设计,如桁架、框架、板架、网架、排架、板壳等结构或混合结构。组成结构的材料可以是钢、钢筋混凝土或其他材料等。

本书是作者 15 年来研究成果的系统归纳和总结,在离散变量结构优化设计这一领域,取得了重要的进展。希望这些工作得以推广应用,取得丰硕的成果和效益。

钟万勰

1995. 5

目 录

增订版序言

前言

初版序言

第 1 章 绪论.....	1
1.1 结构优化设计的发展概况	1
1.2 离散变量结构优化设计的发展概况	5
1.3 本书的离散变量结构优化设计方法概述.....	11
1.4 离散变量结构优化设计发展的展望.....	15
第 2 章 预备知识	17
2.1 集合的概念及运算.....	17
2.2 离散变量和离散集的概念.....	24
2.3 离散变量优化问题的可行集与最优解.....	29
第 3 章 离散变量结构优化设计的数学模型及其特点	31
3.1 离散变量结构优化设计的数学模型.....	31
3.2 离散变量结构优化设计的特点.....	53
第 4 章 离散变量结构优化设计的搜索算法	59
4.1 斐波那契(Fibonacci)法	59
4.2 一维搜索算法.....	69
4.3 序列两级算法.....	73
4.4 相对差商法.....	95
4.5 考虑动应力、动位移约束的 离散变量结构优化设计	132

第 5 章	离散变量结构优化设计的组合算法.....	144
5.1	组合算法概论	144
5.2	(0, 1) 规划的定界组合算法.....	146
5.3	(0, 1) 规划的二进制算法.....	159
5.4	(0, 1) 规划的相对差商法.....	164
5.5	(0, 1, 2) 规划的两级定界组合算法.....	177
5.6	离散变量优化设计多值序列规划定界组合算法	186
5.7	线性整数规划的组合算法	200
5.8	离散变量结构优化设计的(0, 1) 规划法.....	205
5.9	离散变量结构优化设计的(0, 1, 2)、 (0, 1, 2, 3) 规划法.....	228
5.10	离散变量结构优化设计序列定界组合算法.....	235
第 6 章	离散变量结构形状优化设计.....	248
6.1	引言	248
6.2	离散变量桁架结构形状优化的序列两级算法	250
6.3	离散变量结构形状优化设计的综合算法	264
6.4	具有动应力和动位移约束的离散变量结构 形状优化设计方法	281
第 7 章	离散变量结构拓扑优化设计.....	295
7.1	引言	295
7.2	离散变量结构拓扑优化的基本问题	297
7.3	离散变量桁架的拓扑优化方法	307
7.4	包含两类变量的离散变量桁架结构 拓扑优化设计	315
7.5	具有动应力和动位移约束的离散变量结构 拓扑优化设计方法	335
7.6	离散变量刚架的拓扑优化方法	350

第 8 章 离散变量结构布局优化设计	358
8.1 引言	358
8.2 结构布局、拓扑、形状优化之间的关系	359
8.3 离散变量桁架结构布局优化的序列两级算法	362
8.4 考虑支座配置的桁梁桥离散变量 结构布局优化设计	368
8.5 离散变量桁架结构布局优化设计的两级算法	377
第 9 章 离散变量结构优化在铁路客车车辆 设计中的应用	384
9.1 引言	384
9.2 YZ _{25A} 型铁路客车车辆的优化设计	384
附录	400
参考文献	409

Contents

Preface of the enlarged and revised edition

Forewords

Preface of the first edition

Chapter 1	Introduction	1
1.1	The state of art of structural optimum design	1
1.2	The state of art of discrete optimum design of structures	5
1.3	Outline of the methods of the discrete optimum design of structures in the book	11
1.4	Prospects for the developments of discrete optimum design of structures	15
Chapter 2	Preliminary knowledge	17
2.1	The concepts and operation of sets	17
2.2	The concepts of discrete variables and discrete sets	24
2.3	Feasible sets and optimum solutions of discrete variable optimization problems	29
Chapter 3	Mathematical model and characteristics of the discrete optimum design of structures	31
3.1	Mathematical model of the discrete optimum design of structures	31
3.2	The characteristics of the discrete optimum	

design of structures	53
Chapter 4 Search algorithms of the discrete optimum	
design of structures	59
4.1 Fibonacci method	59
4.2 One-dimensional search algorithms	69
4.3 Sequential two-level algorithms	73
4.4 The relative difference quotient algorithm	95
4.5 Discrete optimization of structures under dynamic stress and displacement constraints	132
Chapter 5 Combinatorial algorithms of the discrete optimum design of structures	144
5.1 General introduction of combinatorial algorithms ...	144
5.2 A delimitative combinatorial algorithm for (0, 1) programming	146
5.3 The binary algorithms for (0, 1) programming	159
5.4 Relative difference quotient algorithm for (0, 1) programming	164
5.5 Two-level delimitative and combinatorial algorithm for (0, 1, 2) programming	177
5.6 Sequential multi-value programming delimitative combinatorial algorithm for the discrete optimum design of structures	186
5.7 Combinatorial algorithm for the linear integer programming	200
5.8 (0, 1) programming method for the discrete optimum design of structures	205
5.9 (0, 1, 2), (0, 1, 2, 3) programming methods for the discrete optimum design of structures	228

5. 10	Sequential delimitative combinatorial algorithm for optimum design of structures with discrete variables	235
Chapter 6	Discrete optimum shape design of structures	248
6. 1	Introduction	248
6. 2	Sequential two-level algorithm of the discrete optimum shape design for truss structures	250
6. 3	A comprehensive algorithm for shape optimization of structures with discrete variables ...	264
6. 4	A design method for shape optimization of structures with discrete variables under dynamic stress and displacement constraints	281
Chapter 7	Discrete optimum topology design of structures	295
7. 1	Introduction	295
7. 2	Fundamental problems of the discrete optimum topology design of structures	297
7. 3	Discrete topological optimization method for truss structures	307
7. 4	Topological optimization method for truss structures with two kinds of discrete variables	315
7. 5	A design method for topological optimization of structures with discrete variables under dynamic stress and displacement constraints	335
7. 6	Optimum topology design method for discrete frame structures	350