

'96卷

大连理工大学教授学术丛书

建模·变换·优化  
结构综合方法新进展

MODELLING

TRANSFORMATION

AND OPTIMIZATION

NEW DEVELOPMENTS

OF STRUCTURAL

SYNTHESIS METHOD

隋允康 著

大连理工大学出版社

大连理工大学教授学术丛书'96 卷

# 建模 · 变换 · 优化

——结构综合方法新进展

隋允康 著

大连理工大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

建模·变换·优化——结构综合方法新进展/隋允康著. —大连:  
大连理工大学出版社, 1996. 12

(大连理工大学教授学术丛书'96 卷)

ISBN 7-5611-1267-X

I. 建… II. 隋… III. 结构设计: 最优设计-科技成果 IV. TU318

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 09769 号

大连理工大学教授学术丛书'96 卷

**建模·变换·优化**

——结构综合方法新进展

隋允康 著

\* \* \*

大连理工大学出版社出版发行

(大连市凌水河 邮政编码 116024)

大连海事大学印刷厂印刷

\* \* \*

开本: 850×1168 1/32 印张: 14.375 字数: 356 千字

插图: 4

1996 年 12 月第 1 版

1996 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1—3000 册

\* \* \*

责任编辑: 方延明

责任校对: 葆 馨

封面设计: 孙宝福

\* \* \*

ISBN 7-5611-1267-X

定价: 20.00 元

O · 152

**本书出版由**

**国 家 自 然 科 学 基 金 资 助**  
**大连理工大学学术著作出版基金**

**Publication of the book is financed by**

**The National Natural Science Foundation of  
China**

**and**

**The Publishing Academic Works Foundation  
of the Dalian University of Technology**

## 序

此书是作者隋允康教授将近 20 年在工程结构优化设计领域中研究工作的反映。由于他勤于思考探索,又善于梳理表达,所以写得不落窠臼,别具一格,有启发性。

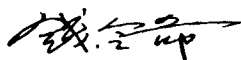
作者把自己对优化方法的研究,分叙六章,冠其名曰:松弛、映射(上、下)、累积、曲线和分解。领悟了当前各种优化方法和工程设计领域对它们提出的要求之后,作者在研究如何能更有效地服务于工程优化设计下了功夫;这一过程,又活跃了作者探索与创新的思路,作进一步的研究。

举第四章(映射)为例。作者从方法论的角度,把数学规划中对偶等方法的“映射”本质引入结构优化设计领域并开拓发扬,以“建模—映射—求解—反演”的途径,为一些难以处理的问题找到了出路。例如多参数单元的映射处理,解决了杆系中梁单元的优化难题。又如离散变量模型的优化,他把英人 Templeman 方法看成从离散到连续的映射,从而导致更一般地处理内力变化的单元,他提出无限小单元似乎与当前连续体拓扑优化的均匀化(Homogenization)方法有异曲同工之处。另外,作者提出的结构拓扑优化中“独立”、“光滑”的概念,是把 0-1 离散拓扑变量映射为 $[0,1]$ 连续拓扑变量的有益探索,鉴于将结构拓扑从广义截面优化(骨架结构)和广义形状优化(连续体结构)中升华出来,又具有光滑性,预期会对该领域有推动作用。类似这一章讲的许多变换(映射、反演等)手段诸如保角映射在结构分析中曾起过作用,现在因有了有限元技术,也就不大用了,可是映射的思想和技巧在结构优化中却大

有用武之地。由此可以得到一个启示,结构优化设计领域还有大量工作可做,然而需要有一个过程、有一些突破,才能达到像结构分析今天的境地。

以上仅就本书的一章谈了一些看法。作者在其他章也多有类似的探索与创见。他善于刨根问底,弄清楚问题的实质,又能从方法论入手,有所前进。附录“关于方法论的思考”作结尾,也颇具新意。

工程结构优化设计领域从 60 年代以来有三十六七年的发展,已经吸引了各国大批学者的注意。它涉及工程、力学、数学和计算机科学等诸学科,有着广阔的发展前景。在发展过程中,希望每有前进,即能在工程服务中获得实践的检验和汲取进步的动力。



写于大连理工大学

---

## PREFACE

It is a great pleasure and a considerable honour for me to be invited to contribute a preface to this book. Dalian University of Technology has a worldwide reputation as a centre of excellence in computational mechanics; in the area of structural optimization with which this book is concerned there can be no doubt that Dalian University of Technology is China's top institution, and is the best by a very large margin. I would like to use this opportunity to pay tribute to the emergence of Dalian University of Technology's structural optimization research into the glare of international recognition.

Structural optimization has its scientific origins in the last century and has been the subject of major research, development and application since the early 1960s. It has benefited from a steady flow of new concepts and ideas over the past thirty years, all of which have contributed to the continuing high level of research and industrial interest in the subject area. My own interest in structural optimization dates from the mid-1960s when, as a PhD student, the possibilities of using computers to improve the structural design process first became apparent to me. I did not realise at that time that my involvement with structural opti-

mization would be the lifelong activity that it has turned out to be.

For me the founding fathers of structural optimization were people such as Michell, Hemp, Prager, Livesley, Schmit and Moses, all of whom worked in Europe or the USA. Throughout the 1960s and 1970s the centre of gravity of structural optimization research seemed to be located somewhere in the Atlantic Ocean midway between the USA and Europe. It was not until the early 1980s that I first became aware of Chinese interest in structural optimization. My first encounter with this arose almost casually as a result of a telephone call I received from Professor O. C. Zienkiewicz of Swansea University who had a couple of visiting Chinese academics whom he thought I might like to entertain on a day trip to Liverpool. Arrangements were made for a visit and in due course I met in my office in Liverpool Professor Qian Lingxi and Professor Cheng Gengdong. At the time of their visit their names and the name of their institution meant nothing to me; even the name of the city they came from, Dalian, was unknown to me.

It was therefore a considerable surprise to me to realise that these Chinese visitors knew as much, if not more, about structural optimization than I did, and had a flourishing research group in structural optimization which was larger than any existing groups in Europe or the USA at that time. For me, that meeting was rather like discovering that the water molecule had three hydrogen atoms instead of the conventionally-assumed



two. The centre of gravity of structural optimization activity suddenly moved to incorporate the new, Chinese dimension.

That meeting resulted in a long-standing research association which I have had with Dalian University of Technology. I quickly learned to respect the very high academic quality, not only of Professors Qian Lingxi and Cheng Gengdong, but also of other members of their research group, Zhong Wanxie, Sui Yunkang, Li Xingsi, and of the many staff members and students who subsequently spent time with me in Liverpool as research associates. The constant factor which has made all the interactions and collaborations with Dalian so rewarding for me has been the maturity of the research ideas they have put forward. So much research consists of incrementally edging forward the well-delineated boundary of a topic. Whilst this can be rewarding and satisfying work it is seldom exciting. For me and for my colleagues in Dalian the excitement of research comes from trying to think differently about a whole research area, attempting to radically innovate rather than to gently edge forward. Of course, this does not always succeed, but the attempt is always exciting and even the failures create new insights.

The flavour of this radical approach to thinking comes across in the present book by Professor Sui Yunkang. He has not written a standard, conventional textbook on structural optimization of which many are now available. Instead, he has presented a very personal approach to the development of structural synthesis methods. This book clearly demonstrates that Professor Sui has

continued the traditions established by Professor Qian and others and that the standards of excellence which I saw in Dalian University of Technology during the 1980s are being maintained and enhanced during the 1990s. This book should ensure that they flourish well into the 2000s.

Professor A B Templeman

*Andrew Templeman*

(坦普尔曼教授是英国利物浦大学土木系主任, 国际杂志《工程优化》主编)

---

## 同于道者，道亦乐得之

# 前 言

本书是作者从1978年以来主要从事结构优化设计研究大部分工作的系统归纳与总结。

本书在阐述作者工作之前的头两章是引论和必要的基础简介。引论不是综述，只是介绍为了引向作者工作的某些观点；基础简介力求用较少的篇幅深入浅出地叙述，把所需的基础以作者思考的方式简捷地介绍，为青年读者直接切入研究主题提供方便，为同行迅速浏览作者的工作提供一个索引。

本书在作者研究工作的阐述上则不吝篇幅，以方法论为主线分门别类地贯穿成一个总体。在内容的处理上，不是从结构优化设计纵向层次上去分类，不是从横向拓广上去介绍，不是按规划法与准则法去划分内容，也不是从理论、方法与应用上去叙述，而是从方法论的高度，每一章冠以方法论的主题词：松弛、映射、累积、曲线、分解，分成六章阐明围绕相应主题词所展开的独特的研究。其中注意区别模型化与最优化的差别，按背景、理论、方法与应用依次叙述，有结构优化具体层次上的研究，也有应用的实例，还有把具体的结构优化问题上升为一般的数学结论的尝试。

书中的研究工作大部分反映在作者发表的 80 多篇论文之中,这次著述中又有展开和发展,个别是尚未发表的最新工作。书中的研究也反映在作者去国外进行合作研究工作、讲学内容和参加国际会议交流之中,还反映在作者作为主要参加者曾获得的国家自然科学二等奖、国家科技进步三等奖和国家教委科技进步一等奖之中。

在内容的组织上,力求做到翔实和完整,力求做到历史与逻辑一致的安排,力求照顾人们接触不熟悉事物的习惯,力求以读者易于把握的方式,由浅入深、由表及里、由背景到推导地叙述;尽量做到让别人容易了解,尽量避免艰涩、晦暗的表达,尽量地采用通俗、明快、流畅的表达去著述。

为了结合从事的具体学科研究探索一般的科研方法,从自身的经验中总结,反转过来推动具体学科的研究,从而在潜科学或前科学阶段更好地展发创造能力,附录以“关于方法论的思考”为题叙述了有关的研究心得。

作者对这一领域最初的兴趣是中科院院士钱令希教授培养的。在作者被钱令希先生调转回母校六年前,曾经多次听到钱教授谈及结构优化设计,钱教授把倡导在中国进行结构优化设计的文稿给作者看,后来又给作者寄去了印刷品<sup>[1]</sup>。作者回校后,担任钱教授的科研助手,主要从事结构优化方面的教学、科研与指导研究生工作。开始还有过一段在钟万勰院士领导下对结构计算大程序的研制工作,奠定了把结构优化理论与方法的研究落实到软件开发的基础。

18 年来,作者能够把科研兴趣基本稳定在结构优化设计和实用数学规划的领域中,除了因为学科本身的极强吸引力,有学术领导人的大力倡导外,还有一个学术环境,就是大连理工大学力学系有一批学者对结构优化的研究有兴趣,如程耿东院士、博士生导师孙焕纯教授、李兴斯教授,还有王希诚教授等人,数学系也有一批

从事数学规划研究的学者。

借这本书出版之际,作者衷心感谢钱先生,十分感谢国内外合作过、支持过、鼓舞过作者的学者们,十分感谢工程界的朋友们,感谢他们对结构优化的兴趣以及对作者与合作者在结构优化应用工作的支持与鼓励。作者还感谢自己指导过的博士生、硕士生和本科生,他们的名字在作者所列文章的合作者中可以看到。作者衷心感谢贤内助叶宝瑞副教授一贯的支持、鼓励和帮助。作者衷心感谢大工出版社王海山教授与方延明编审,由于他们的支持,使这本书终于问世了。

作者衷心感谢国家自然科学基金委,书中的不少研究都曾获得资助。

隋允康

于大连理工大学

# 目 录

## 序

## 前言

第一章 引论	1
1.1 结构优化设计的综合决策本质	1
1.2 结构设计从艺术到科学的发展	3
1.3 进展的关键在于方法论的选择	6
1.4 本书进行的有关研究	10
第二章 同新进展相关的基础	14
2.1 优化设计的有关基本概念	14
2.1.1 优化设计三要素	15
2.1.2 三要素的几何表达	21
2.2 方向导数、梯度、海赛阵和极值条件	25
2.3 库恩-塔克条件和对偶理论	30
2.4 函数变换下的函数高阶展式	39
第三章 松弛优化	45
3.1 线性规划	45
3.1.1 单相的线性规划解法	45
3.1.2 任意线性约束下初始基本可行解的寻求	52
3.1.3 求解线性规划的两相法	54
3.2 非线性方程组的松弛解法	57
3.3 梯度投影问题的松弛优化	61
3.4 规划法与准则法一大类问题的松弛解法	76
第四章 映射优化及其解法	87
4.1 变换优化模型为映像规划求解	87

4.1.1	对二次函数线性变换后的寻优·····	88
4.1.2	关系映射反演原则引入优化领域·····	91
4.1.3	精确映射反演方法·····	92
4.1.4	序列近似映射反演方法·····	100
4.1.5	半精确映射反演方法·····	101
4.2	映射反演思想与二次规划、广义二次规划的求解·····	103
4.2.1	从RMI观点看二次规划的求解·····	104
4.2.2	松弛解法的线性互补求解途径·····	110
4.2.3	序列映射方法解广义二次规划·····	113
4.3	数学映射反演对结构优化的建模与求解·····	119
4.3.1	满应力准则的函数变换映射解·····	119
4.3.2	多参数单元的映射处理·····	133
4.3.3	复杂结构的序列近似映射解法·····	138
4.4	力学映射反演对结构优化的建模与求解·····	158
4.4.1	等内力单元离散变量映射为连续变量的 优化方法·····	158
4.4.2	变内力单元离散变量映射为连续变量的模型 构造与解法·····	168
4.4.3	RMI导致新的拓扑变量概念和产生映射 反演的结构拓扑优化途径·····	177
<b>第五章</b>	<b>映射优化的高阶理论与应用·····</b>	<b>196</b>
5.1	函数变换用于高度非线性问题的映射优化·····	196
5.2	广义几何规划对偶映射下的求解·····	202
5.3	广义几何规划原问题映射下的SQP与 广义SQP解法·····	210
5.4	多参数单元高阶映射下的多变量处理和复杂结构 基于二阶GGP原算法的寻优·····	228
<b>第六章</b>	<b>累积优化·····</b>	<b>241</b>

6.1 累积迭代信息对于改善模型、提高收敛效率与稳定性的作用 .....	241
6.2 累积信息对解方程、一维搜索和满应力方法的应用 .....	250
6.3 基于两点信息的倒、正变量近似的结构优化方法 .....	264
6.4 按有理逼近累积信息改进大量优化方法 .....	278
6.4.1 两点有理逼近的建立与性能 .....	279
6.4.2 两点有理逼近用于改进优化方法 .....	285
<b>第七章 曲线优化</b> .....	303
7.1 无约束曲线寻优的理论 .....	304
7.2 无约束曲线寻优的实用算法 .....	315
7.3 约束曲线寻优的理论与算法 .....	324
7.4 约束曲线寻优的可分离变量解法及其在结构优化设计中的应用 .....	331
<b>第八章 分解优化</b> .....	344
8.1 目标与约束的近似置于不同层次的分解处理 .....	345
8.2 支座变量与截面变量分层处理的分解优化 .....	354
8.3 截面优化与形状优化的分解执行 .....	366
8.4 层间传递一、二阶敏度建模和寻优的分解方法 .....	388
<b>参考文献</b> .....	400
<b>附 录 关于方法论的思考</b> .....	415
附.1 把握“无有运变”从根本上提出新思想 .....	416
附.2 突破定势·砥砺锋芒·升华层次 .....	417
附.2.1 抽印本说明 .....	417
附.2.2 关于培养创造能力的几点思考 .....	418
附.3 化难为易、化繁为简的方法——对于超静定结构的静定化处理的思考 .....	427
附.4 边缘学科的嫁接型描述及其发展规律初探 .....	430



---

# Contents

## Preface

## Forewords

<b>Chapter 1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1 The essence of synthesis and decision for the structural optimization .....	1
1.2 Advances of structural design from arts to sciences .....	3
1.3 The key of progress—choice of methodology .....	6
1.4 Relevant researches in the book .....	10
<b>Chapter 2 Fundamentals related with new developments         .....</b>	<b>14</b>
2.1 Basic concepts about optimum design .....	14
2.1.1 Three essential factors .....	15
2.1.2 Geometrical descriptions of three essential factors .....	21
2.2 Directional derivative, gradient, Hessian matrix and conditions for extremum value .....	25
2.3 Kuhn-Tucker conditions and dual theory .....	30
2.4 High order expansions of function transformation .....	39
<b>Chapter 3 Slack optimization .....</b>	<b>45</b>
3.1 LP(linear programming) .....	45
3.1.1 Solution technique for LP with single phase ...	45