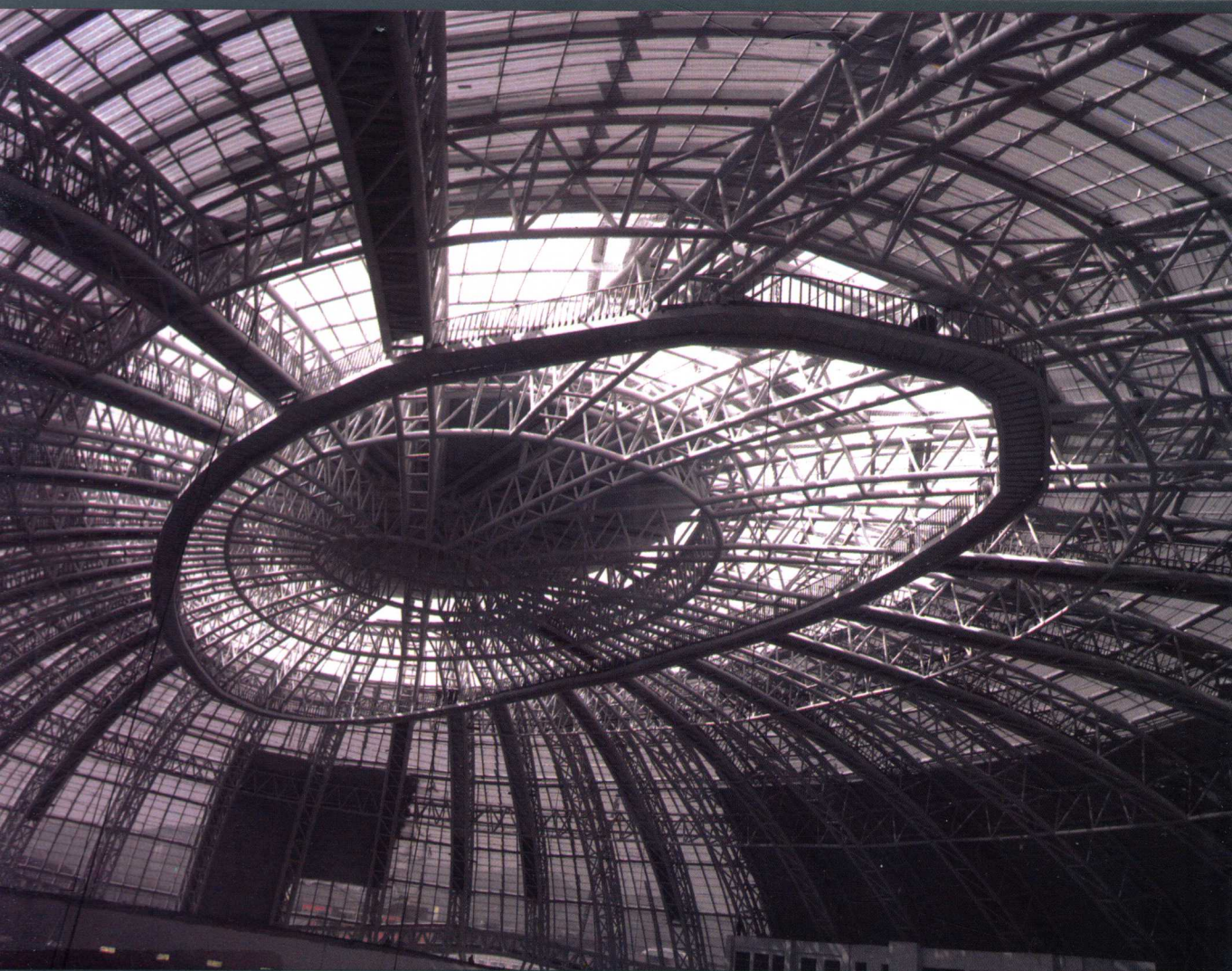


离散变量网壳结构 优化设计

鹿晓阳 赵晓伟 陈世英 著



中国建筑工业出版社

离散变量网壳结构优化设计

Discrete Optimum Design of Lattice Shell Structures

鹿晓阳 赵晓伟 陈世英 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

离散变量网壳结构优化设计/鹿晓阳等著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2011. 9
ISBN 978-7-112-13497-7

I. ①离… II. ①鹿… III. ①离散变量法-应用-
网壳结构-结构设计: 最优设计 IV. ①TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 171004 号

本书在介绍国内外网壳结构的发展与现状、结构优化设计的发展与现状的基础上, 概述了离散变量网壳结构优化设计方法和工程中常用的几种优化设计方法; 系统地阐述了基于离散变量的网壳结构截面优化、形状优化、拓扑优化、布局优化和选型优化设计原理与方法, 优化步骤、相应程序流程图和算例分析; 详细阐述了基于大型有限元分析软件 ALGOR 和 ANSYS 的网壳结构参数化建模和受力分析方法及相应程序, 并介绍了作者的一些研究改进工作。

本书可作为网壳结构优化设计研究和离散变量优化设计方法研究的参考书, 也可作为高等院校相关专业高年级本科生和研究生的教材。

责任编辑: 王 跃 吉万旺

责任设计: 赵明霞

责任校对: 王雪竹 赵 颖

离散变量网壳结构优化设计

Discrete Optimum Design of Lattice Shell Structures

鹿晓阳 赵晓伟 陈世英 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京世知印务有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 20 $\frac{3}{4}$ 字数: 505 千字

2013 年 1 月第一版 2013 年 1 月第一次印刷

定价: 55.00 元

ISBN 978-7-112-13497-7

(21271)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前言

建筑结构优化设计是近几十年方兴未艾的新学科,它将建筑选型(建筑学)与结构优化(结构工程)相结合,在优化方法中引进自然生态理念和仿生学方法,通过优化建筑结构形式、构件形状尺寸来充分发挥材料的力学性能、降低结构成本,实现建筑结构从构件截面到结构形状、拓扑、布局和选型的优化,追求建筑结构美观大方、简洁适用、安全可靠且经济低耗的综合设计目标,从而达到现代建筑结构设计“好”与“省”的和谐统一。

网壳结构作为现代建筑结构的典型代表,因其具有丰富的艺术表现力、受力均匀合理和大跨度、大空间的结构特点而越来越多地受到现代公共建筑(如大型体育、文艺场馆、候机和候车大厅和大型购物中心等)结构选型的青睐,并具有明显的城市标志性建筑发展趋势。

目前,国内外基于连续变量的结构截面优化设计已趋成熟,而基于离散变量的结构优化设计发展缓慢。但实际工程中的钢构件(各种规格型钢)截面尺寸都是不连续的离散变量。因此,研究离散变量网壳结构优化设计理论和方法及其应用具有重要的理论与工程价值。

目前,国内外尚未见到网壳结构优化设计方面的专著或教材,有关离散变量网壳结构优化设计的文献也很少,本书是著者多年从事离散变量网壳结构优化设计与教学成果的总结。本书在介绍国内外网壳结构的发展与现状、结构优化设计的发展与现状的基础上,概述了离散变量网壳结构优化设计方法和工程中常用的几种优化设计方法;系统地阐述了基于离散变量的网壳结构截面优化、形状优化、拓扑优化、布局优化和选型优化的设计原理与方法、优化步骤、相应程序流程图和算例分析;详细阐述了基于大型有限元分析软件 ALGOR 和 ANSYS 的网壳结构参数化建模和受力分析方法及相应程序,并介绍了著者的一些研究改进工作;为方便阐述优化步骤、比较优化方法性能,个别算例采用了简单桁架、框架、网架结构。书中内容涉及数学、力学、结构设计、计算机软件和编程等基础知识,并列举了国内外大量网壳结构工程实例,力求使读者能够对上述知识融会贯通、综合应用,学用结合、不断创新。

本书可作为网壳结构优化设计研究和离散变量优化设计方法研究的参考书,也可作为高等院校相关专业高年级本科生和研究生的教材。

本书部分研究工作得到山东省教育厅科技攻关项目(J01E03)和山东省研究生教育创新计划项目(SDYY08038)资助;本书撰写过程参阅了国内外著名离散变量优化设计专家、著名空间结构专家和其他专家学者的研究文献(见参考文献);山东建筑大学工程结构现代分析与设计研究所、工程力学研究所的部分研究生参与了本书的部分研究工作;本书部分实验工作得到了山东省建筑结构鉴定加固与改造重点实验室支持,在此一并表示感谢。

由于国内外基于离散变量的网壳结构优化设计研究历史不长,限于水平和时间,本书难免有不足或欠妥之处及需要进一步研究和探讨之处,敬请有关专家和广大读者批评指正。

鹿晓阳

于山东建筑大学 2011 年 4 月

目录

第 1 章 绪论..... 1

1.1 网壳结构的发展和现状 2

1.2 结构优化设计的发展和现状 8

1.3 离散变量网壳结构优化设计方法概述..... 10

第 2 章 常用优化方法 11

2.1 0.618 法 11

2.1.1 0.618 法的基本原理与实现步骤 11

2.1.2 例题..... 12

2.2 复形法..... 14

2.2.1 复形法的基本思想与实现步骤 15

2.2.2 例题..... 17

2.3 相对差商算法..... 19

2.3.1 相对差商法基本原理与实现步骤 19

2.3.2 算法性能统计分析与计算效率 20

2.3.3 例题..... 25

2.4 遗传算法..... 26

2.4.1 遗传算法的基本思想与特点 26

2.4.2 遗传算法的数学基础与实现技术 28

2.4.3 遗传算法运行参数与性能评价 36

2.4.4 例题..... 38

2.5 差异进化算法..... 39

2.5.1 差异进化算法基本原理与主要控制参数选取 39

2.5.2 差异进化算法五种主要模式比较 46

2.5.3 例题..... 47

2.6 人工神经网络方法..... 48

2.6.1 神经网络方法的发展及特点 48

2.6.2 BP 神经网络模型结构及其算法 50

2.6.3 MATLAB 人工神经网络工具箱..... 54

2.7 单纯形模拟退火算法..... 55

2.7.1 单纯形算法简介 56

2.7.2 模拟退火算法 56

2.7.3 单纯形模拟退火混合优化算法 60

第 3 章 网壳结构力学分析原理与有限元分析软件应用 63

3.1 网壳结构有限元分析原理与方法..... 63

3.1.1 基本原理与假设 63

3.1.2	单元刚度矩阵的建立	64
3.1.3	边界条件施加与总刚方程求解	67
3.2	预应力网壳结构非线性有限元分析原理与方法	69
3.2.1	网壳结构几何非线性有限元法的 T. L 列式	69
3.2.2	牛顿-拉斐逊方法 (Newton-Raphson) 解非线性方程	70
3.2.3	铰接杆单元切线刚度矩阵	71
3.2.4	等截面直线空间梁单元切线刚度矩阵	73
3.2.5	索单元刚度矩阵	75
3.3	有限元力学分析软件应用	76
3.3.1	ALGOR 软件与 FORTRAN 优化程序的连接	76
3.3.2	ANSYS 软件与 MATLAB 优化程序的连接	77
3.3.3	ANSYS 软件参数化设计语言 (APDL) 简介	78
3.3.4	基于 ANSYS 的五种典型柱面网壳参数化建模	78
3.3.5	基于 ANSYS 的六种典型球面网壳参数化建模	89
第 4 章	网壳结构受力特性分析	115
4.1	网壳结构的种类及特点	115
4.1.1	典型单层球面网壳结构特点及工程实例	115
4.1.2	典型单层柱面网壳结构特点及工程实例	120
4.1.3	单层双曲抛物面网壳结构特点及工程实例	122
4.1.4	典型双层网壳结构特点及工程实例	123
4.1.5	预应力网壳结构特点及工程实例	126
4.2	网壳结构杆件及节点设计	129
4.2.1	杆件设计	130
4.2.2	节点设计	132
4.3	网壳结构受力特性分析	135
4.3.1	单层球面网壳结构受力特性分析	135
4.3.2	双层网壳结构受力特性分析	153
4.4	预应力网壳结构受力特性分析	168
4.4.1	网壳结构施加预应力的方式和布索方案	168
4.4.2	算例分析	170
第 5 章	离散变量网壳结构截面优化设计	173
5.1	离散变量两级截面优化设计方法	173
5.1.1	序列两级截面优化原理和数学模型	173
5.1.2	网壳结构截面优化程序设计及算例分析	176
5.2	离散变量差异进化截面优化设计方法	182
5.2.1	自适应变异差异进化算法	182
5.2.2	自适应差异进化算法算例分析	185
5.3	单纯形模拟退火网壳结构截面优化设计 ^[91]	192
5.3.1	单纯形模拟退火算法优化数学模型及约束处理	192
5.3.2	单纯形模拟退火算法的改进	194
5.3.3	有记忆的单纯形模拟退火算法	197
5.3.4	算例分析	200

5.4	拉索预应力网壳结构优化设计方法及试验研究	206
5.4.1	数学模型与优化方法	206
5.4.2	试验模型与试验过程	209
5.4.3	试验结果与优化设计结果比较	210
5.4.4	有无预应力两种模型优化结果比较	213
第6章	离散变量网壳结构形状优化设计	216
6.1	离散变量两级形状优化设计方法	216
6.1.1	网壳结构形状优化设计数学模型	217
6.1.2	网壳结构形状优化程序设计及算例分析	219
6.1.3	六种典型单层球面网壳结构形状优化设计	221
6.2	离散变量两级形状优化方法改进及应用	227
6.2.1	形状优化方法的改进	227
6.2.2	3杆桁架、10杆桁架算例分析	228
6.2.3	凯威特型带肋局部双层球面网壳形状优化	229
第7章	相对差商法网壳结构拓扑优化设计	236
7.1	离散变量拓扑优化基本思想和步骤	238
7.2	网壳结构拓扑优化数学模型	240
7.3	网壳结构拓扑优化程序设计及算例分析	241
第8章	遗传算法网壳结构拓扑优化设计	247
8.1	遗传算法改进	247
8.1.1	选择算子的改进	247
8.1.2	二进制编码的交叉算子改进	249
8.1.3	防止早熟、停滞的改进	250
8.1.4	离散变量的二进制编码	251
8.2	遗传算法网壳结构拓扑优化方法	252
8.3	优化程序设计与流程图	255
8.4	算例分析	255
第9章	离散变量网壳结构布局优化设计	271
9.1	离散变量布局优化基本思想和方法	271
9.2	网壳结构布局优化数学模型	273
9.3	优化程序设计及算例分析	274
第10章	人工神经网络方法网壳结构选型优化	278
10.1	单层球面网壳结构选型优化	278
10.1.1	选型控制因素分析与提取	279
10.1.2	选型网络结构设计	292
10.1.3	选型优化结果分析	292
10.2	单层柱面网壳结构选型优化	294
10.2.1	单层柱面网壳的截面优化分析	294
10.2.2	基于人工神经网络方法的柱面网壳选型分析	300
第11章	离散变量网壳结构优化设计发展与展望	305
附录	常用型钢规格表	312
参考文献		320

第 1 章 绪 论

网壳结构是沿壳体曲面按一定规律布置、尺寸适度且大致相同的网格组成的空间杆系结构。具有节省材料、受力均匀合理、刚度大、杆件单一、制作安装方便等优点，是当前大、中跨建筑结构中应用最为广泛的一类空间结构。随着工业技术的不断发展和计算分析技术的更加完备，网壳结构日益显示出平面结构无法比拟的丰富多彩的外部形式和艺术创造潜力，体现出大自然的美丽和神奇（图 1-1）。



图 1-1 济南第十一届全运会奥体中心“东荷西柳”体育场馆全貌

在我们的生活中，网壳结构得到了广泛的应用，并对现代建筑产生了重大影响。宽敞明亮的候机或候车大厅、体育和文艺场馆、展览馆、会堂、飞机库、工业厂房等大多采用这种大跨结构。其中令人瞩目的有英国的“千年穹顶”（Millennium Dome），直径 320m、周长 1km、占地面积大于 80000m²、中央高度 50m。主体结构采用悬吊式大跨度圆顶（图 1-2）；再如美国亚特兰大为 1996 年奥运会修建的佐治亚“索穹顶”（Georgia Dome），是当时世界上最大的索结构，平面为准椭圆形，轮廓尺寸 241m×192m，双曲抛物型全张力穹顶，屋盖自重为 410kg/m²，结构体系中所有力柱（含索桁架）均采用钢管，选用焊接钢板鞍形节点，规模宏伟（图 1-3）。2008 年我国北京奥运会建造的国家体育场（鸟巢）

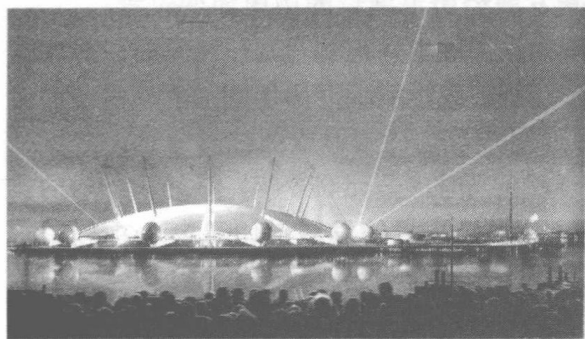


图 1-2 英国“千年穹顶”

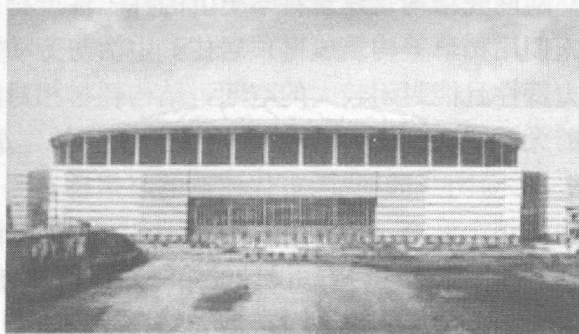


图 1-3 亚特兰大佐治亚“索穹顶”

(图 1-4) 平面为椭圆形, 长轴 332.3m, 短轴 296.4m; 国家游泳中心 (水立方) (图 1-5) 建筑体形为 170m×170m×29m 的方盒子状, 屋盖厚 7m, 墙厚 5.4m, 网格内外均铺设透明的 ETFE 充气膜, 整个建筑看上去晶莹剔透。



图 1-4 国家体育场——鸟巢

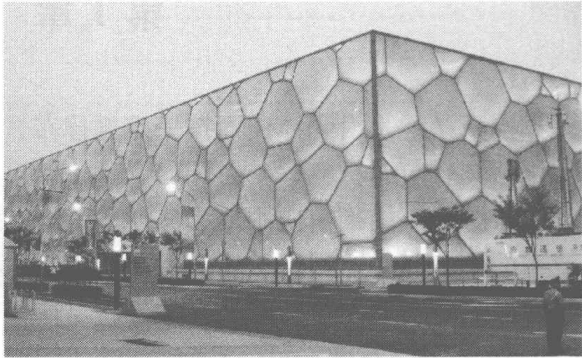


图 1-5 国家游泳中心——水立方

与此同时, 结构优化设计作为一门新技术也在蓬勃发展。结构优化设计能使设计者从被动的单一设计、分析和校核进入主动的全局设计、分析和优选, 这是结构设计史上的一次飞跃。结构优化设计能最合理地利用材料的力学性能, 使结构内部各部位构件得到最好的协调, 并能具有规范所规定的安全度。

结构优化设计, 按设计变量性质分为连续变量优化设计和离散变量优化设计; 按难易的层次分为构件截面 (或尺寸) 优化 (the size optimization)、形状优化 (the shape optimization, 即寻求使目标函数值最小的结构外形和各构件的形状尺寸)、拓扑优化 (the topology optimization, 即确定构件间的最佳连接方式)、布局优化 (the layout optimization, 即同时求得最佳的结构拓扑、形状和构件截面积分布) 和选型优化 (selectotype optimization, 即通过结构拓扑、形状、布局和构件截面尺寸优化, 来寻求最佳的结构类型)。

在实际工程中, 结构优化设计变量往往是离散的 (如空间网格结构的构件所用型钢都是有一定规格和型号的, 并不是连续变化的)。而目前应用广泛的网壳结构用钢量较大, 对其进行优化设计可以得到明显的经济效益。

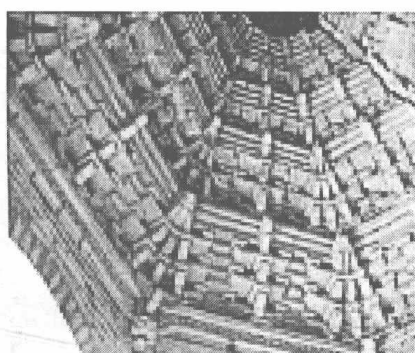
1.1 网壳结构的发展和现状

网壳结构是建筑科学史上的标志性产物, 其发展经历了漫长的历史演变过程。古代, 人们用稻草等构筑成穹顶居住, 生活与劳动实践使人们逐渐认识到穹窿结构具有较好的受力特性且能封闭较大的空间, 结构耗材相对比较经济。我国明朝万历年间建于山西万固寺的无梁殿 (图 1-6) 及古罗马大量的宗教建筑多采用砖石建造圆形或圆柱形穹顶, 跨度一般在 30~40m。我国古代建造的赵州桥 (图 1-7), 在当时 (公元 616 年) 是曲面结构的典型范例。后来, 随着生铁构件、轧制型钢、铆钉及焊接技术的发展, 1863 年, 由施威德勒 (Scheduler J. W) 设计的第一个钢穹顶在德国柏林建成, 用于煤气罐顶盖。

混凝土结构出现后, 薄壳结构受到人们极大重视。第一个真正的薄壳结构是于 1924 年在德国建造的耶拿天文馆钢筋混凝土穹顶, 其厚跨比只有 1/420。然而, 钢筋混凝土薄



无梁殿外景



无梁殿内景

图 1-6 万固寺无梁殿

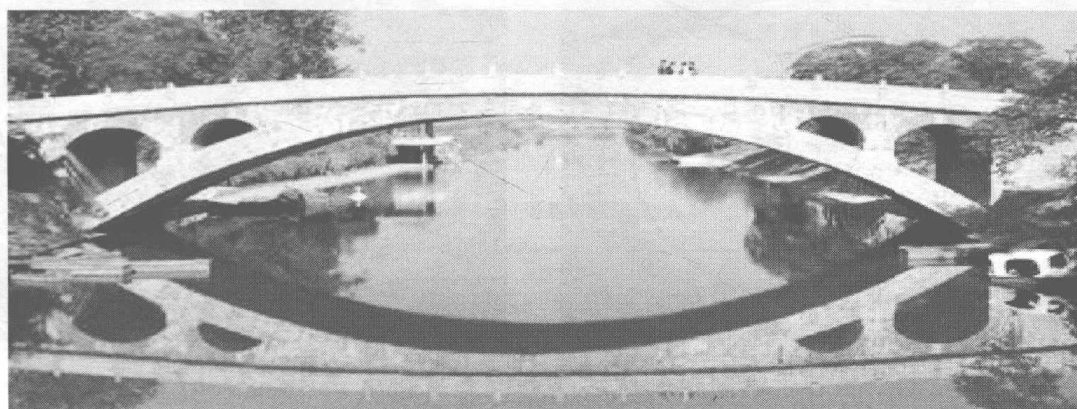
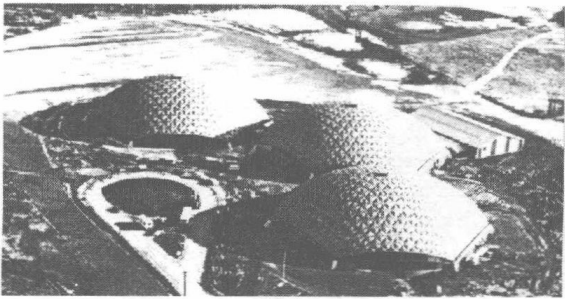


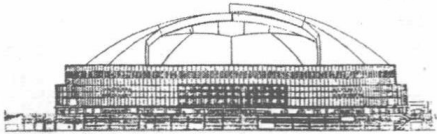
图 1-7 赵州桥

壳结构费工费时，其计算理论与方法至今仍不够精确与完善。因此，随着计算分析技术的不断发展，网壳结构以其受力均匀合理、安装与制作简便等特点得以飞速发展。1924 年，依据天象仪概念的创始者鲍尔斯费尔德教授（德国）提出的计算模型，建造了第一个半球形钢网壳。

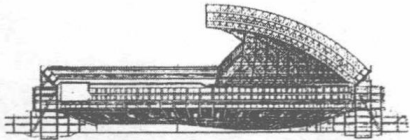
第二次世界大战后，尤其是近 50 年来，网壳结构再一次受到重视，多用于建设多功能体育、文艺场馆，会议展览中心，博物馆，飞机库，候机大厅等。美、日、欧等发达国家相继建成了一批新型、独特的网壳结构^[1,2]。表 1-1 列出了国外具有代表性的一些网壳结构，最早跨度最大的平板网架是 20 世纪 60 年代美国洛杉矶加利福尼亚大学体育馆 $91\text{m} \times 122\text{m}$ （正放四角锥）；最大的双层网壳是 20 世纪 70 年代美国建造的休斯敦宇宙穹顶（直径 196m）及新奥尔良超级穹顶（Superdome，直径 207m）；最大跨度的三向网格单层网壳是 20 世纪 90 年代在日本名古屋兴建的，建筑直径 229.6m，结构直径 187.2m，节点为能承受轴力和弯矩的刚性节点。1993 年日本建成的福冈体育馆，直径 222m（图 1-8），是当今世界上最大的开合钢结构屋顶。另外，历届奥运会场馆、博览会展厅等也修建了不少网格结构。如 1972 年德国慕尼黑奥运会有覆盖 7.48万 m^2 体育场的索网建筑群，1988 年韩国汉城奥运会建造了 120m 直径的体操馆和 93m 直径的击剑馆，都是索穹顶结构，1992 年西班牙巴塞罗那奥运会建造了乔地体育馆（128m），1996 年美国亚特兰大奥运会建造了佐治亚穹顶（ $186\text{m} \times 235\text{m}$ 索穹顶），2000 年澳大利亚悉尼奥运会建造了由两个 $220\text{m} \times 70\text{m}$ 双曲抛物面网壳构造而成的主体育场。



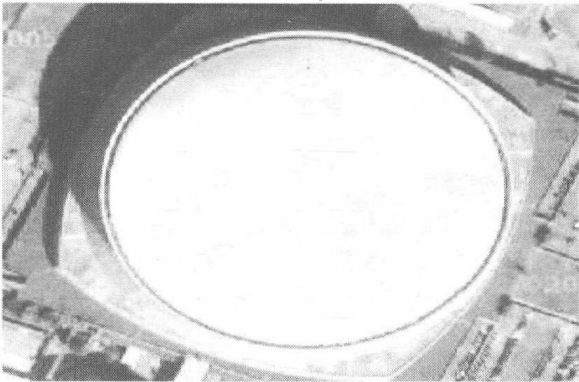
纽约埃尔迈拉学院三个短程线网壳
结构组合穹顶体育场群体



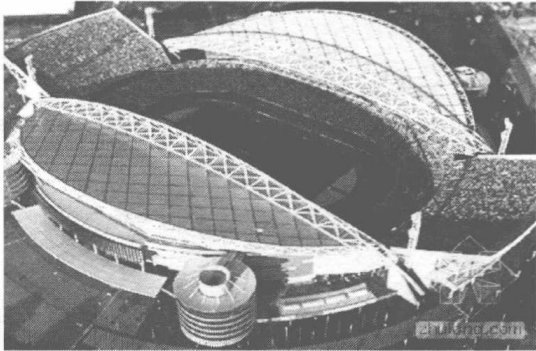
立面图



剖面图
日本福岡开合式穹顶体育馆



新奥尔良超级穹顶



悉尼奥运会主体育场

图 1-8 国外网壳结构工程实例

国外有代表性的网壳结构

表 1-1

时间 (年)	名称、地点	网壳类型	网壳尺寸	地 位
1973	纽约州埃尔迈拉学院体育场	三个短程线型网壳结构组合穹顶	每一穹顶的净跨 71m, 矢高 19m, 建筑覆盖面积为 3530 m ²	最大的板锥短程线穹顶网壳
1976	美国新奥尔良“超级穹顶”(Superdome)	凯威特型(K12)双层球面网壳	净跨 213m, 矢高 83m, 网壳厚 2.2m, 72000 座, 整个网壳用钢量 126kg/m ²	
1976	美国底特律韦思体育馆	球面网壳	直径达 266m, 51000 座	
1979	南斯拉夫斯普利特体育场天棚	预应力双层柱面网壳	每个挑棚内径 447.4m, 外径 452m, 与水平面倾斜 11.2°, 前边拱跨度 205m, 其展开长度 220m, 最大伸臂 45m, 总用钢量 311t (45.7kg/m ²)	
1988	瑞典斯德哥尔摩地球体育馆	双层正放四角锥球面网壳	球径 110m, 矢高 85m, 壳厚 2.1m, 由 12858 根杆件和 1859 个节点组成, 沿曲面的用钢指标仅为 30 kg/m ²	世界上最大的全球形网壳
1989	多伦多开合天空穹顶(Toronto Sky Dome)	筒壳与球壳的组合网壳	可容纳 68000 人, 由四个单独的钢结构网壳组成, 三个可以移动, 屋盖缩进后 91% 座位在露天, 结构中部为两个筒壳, 两端为 1/4 球壳, 直径 203m, 整个结构用钢 1 万余吨	世界最大的娱乐和展览中心

续表

时间 (年)	名称、地点	网壳类型	网壳尺寸	地 位
1989	美国佛罗里达州 “太阳海岸穹顶”	索穹顶 (Cable Dome)	直径 210m	
1992	佐治亚穹顶 (Georgia Dome)	双曲抛物形 全张力穹顶	椭圆形平面 192.02m × 213.6m, 覆盖 3716m ² , 席位 7.2 万个	世界最大的索 结构
1993	日本福冈开合 式穹顶体育馆	开合式穹顶、三块可 旋转的球面网壳	圆形平面直径 222m, 容纳 4 万人, 体育馆 穹顶有三种状态: 全封闭、半开启(1/3 穹顶 露天)、全开启(2/3 穹顶露天)	世界最大跨的 可开合式钢网壳
	委内瑞拉加拉 卡斯体育馆	铝合金双层 短程线形穹顶	跨度 147m, 两层结构分为三角形外部网 格和六角形内部网格	世界上最大的 铝穹顶
1997	英国千年穹顶	悬吊式大 跨圆顶建筑	直径 320m, 屋盖采用圆球形的张力膜 结构	
2000	澳大利亚悉尼奥 林匹克主体育场	两个双曲 抛物面网壳	两个 220m × 70m 双曲抛物面网壳构造而 成, 可容纳 11 万人, 用钢量 32000t	最大露天体 育场
2004	雅典奥林 匹克主体育场		可容纳 55000 人	

我国虽然是发展中国家, 但近 40 年来, 我国网壳结构的建筑数量和建造规模均处世界前列 (表 1-2)。历届全运会和 2008 年奥运会的召开促进了我国网格结构的飞速发展。天津体育馆是为 1995 年第 43 届世乒赛所建的双层球形网壳, 直径 108m, 矢高 13.5m, 覆盖面积 14313m²。于 2002 年施工建设的哈尔滨国际会展体育中心, 是 21 世纪哈尔滨市标志性建筑, 由会议中心、展览中心和体育中心组成; 总建筑面积 36 万 m², 展览中心面积 22 万 m²; 总用钢量 12000t。由 2001 年开工建设的国家大剧院 (图 1-11), 2007 年底投入使用, 它攻克了七大技术难题, 取得了非凡的建设成就, 是目前最大的钢穹顶结构。为第十一届全运会而建的济南奥体中心, 位于省城东部新城, 总占地面积 81hm², 总建筑面积约 35 万 m², 包括一场三馆, 总体布局成“东荷西柳” (图 1-9), 6 万人体育场在西边, 呈“柳叶”造型; 体育馆、网球中心、游泳中心在东边, 呈“荷花”造型, 分别取自济南的市树和市花。山东省体育局训练中心室内自行车馆 (图 1-10), 是继北京奥运会新建老山自行车馆后国内第二座全封闭的自行车馆, 钢结构呈偏心椭圆形, 外形酷似自行车运动员的头盔, 其造型别致、美观。



东荷



西柳

图 1-9 济南第十一届全运会奥体中心“东荷西柳”体育场馆

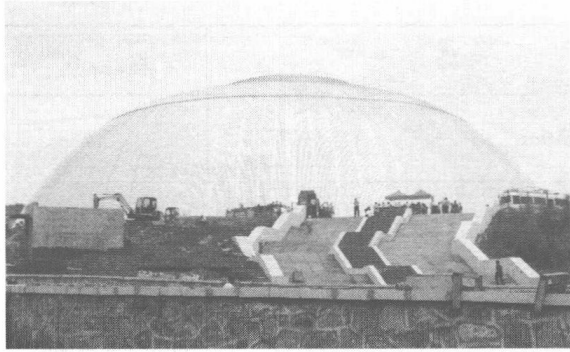


图 1-10 济南第十一届全运会自行车馆

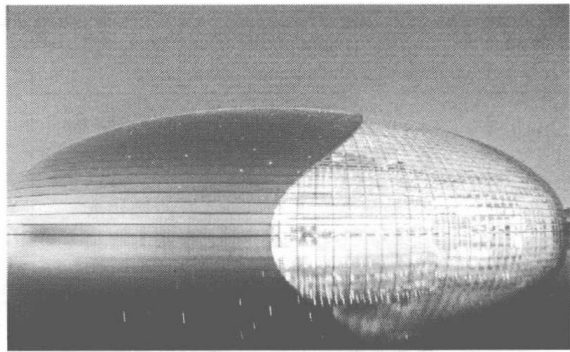


图 1-11 北京国家大剧院

上海 2010 年世博会是继北京 2008 奥运会后又一举世瞩目的盛会。在世博会场馆及辅助建筑 3.4km^2 的建设区域内，“一轴四馆”即世博轴、中国馆、主题馆、世博中心、演艺中心五个工程项目最为瞩目。世博轴工程是世博会园区内最大的单体工程，总占地面积约 13万 m^2 ，总建筑面积约 25万 m^2 ，其中地下空间建筑面积约 18万 m^2 ，地上建筑面积约 7万 m^2 。工程总投资约 35 亿元。其中“阳光谷”（图 1-12）是世博轴建筑最重要的形象标志，共有六个独立的单体组成，钢结构形式为上大下小的圆锥状，像朝天的喇叭，截面为变曲率的双曲面，阳光谷的连接节点做法是目前世界上独一无二的，每个阳光谷钢结构由 1600~1800 个形状各异的中央连接节点，连接近 6000 根长短不一的杆件，组成变曲率的网壳型钢结构。

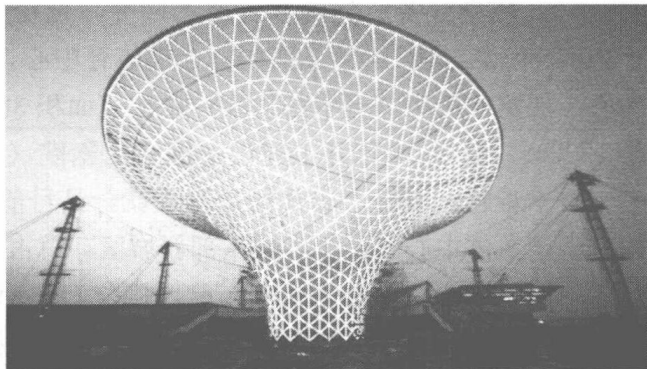


图 1-12 上海世博会世博轴“阳光谷”

我国有代表性的网壳结构 表 1-2

时间(年)	名称、地点	网壳类型	网壳尺寸	地 位
1990	北京奥林匹克体育中心体育馆	斜拉双坡曲面网壳(杂交结构)	覆盖平面为 $70\text{m} \times 83.2\text{m}$, 矢高 13.5m , 用钢量 60 kg/m^2	我国第一座覆盖建筑面积最大的斜拉网壳
1994	四川攀枝花市体育馆	球面柱面组合双层预应力短程线穹顶网壳	平面呈八角形, 中央球壳跨度 60m , 对角线长 64.9m , 正八边形外侧有长为 $2.4 \sim 7.4\text{m}$ 的变高度柱面壳作为屋盖悬挑	世界首次将多次预加应力理论应用于空间钢网壳屋盖中, 比非预应力钢网壳节省用钢量 35%
1994	广东清远市体育馆	拉索预应力组合扭壳	六边形平面上由六块单轴对称双层预应力钢扭壳组成屋面, 平面尺寸 $81.1\text{m} \times 93.6\text{m}$, 厚 2.8m , 矢高 8.0m	

续表

时间(年)	名称、地点	网壳类型	网壳尺寸	地位
1994	天津新体育馆	Schwedler 型 双层球面网壳	跨度 $(108+2\times 13.5)\text{m}$, 矢高 15.4m, 壳体厚 3m, 覆盖面积 14313m^2 , 用钢量为 $55\text{kg}/\text{m}^2$	曾是我国圆形平面跨度最大的球面网壳
1995	黑龙江省哈尔滨速滑馆	双层网壳结构 (中央柱面壳、 两端半球壳)	400m 速滑跑道, 轮廓尺寸 $86.20\text{m}\times 191.20\text{m}$, 覆盖面积达 15000m^2 , 壳体厚度仅为 2.10m, 用钢量为 $50\text{kg}/\text{m}^2$	
1997	上海八运会体育场挑棚	桁架-支承膜 杂交结构	双向交叉桁架与支承膜结构组合而成杂交结构, 外形马鞍形, 覆盖建筑总面积 36100m^2 , 最大悬臂跨度为 73.5m	我国悬臂跨度最大的交叉桁架-支承膜杂交结构, 是我国首次在大中型建筑上采用膜结构
1998	长春体育馆	错边蚌形网壳	平面 $120\text{m}\times 166\text{m}$ 错边蚌形, 壳厚 2.8m, 连同支架的平面为 $146\text{m}\times 191.70\text{m}$, 占地约 21000m^2	当时我国跨度最大、覆盖面积最大的网壳结构, 设计和施工均由国内独立完成
1999	上海东方明珠二期工程—国际会展中心	肋环形单层 球形网壳	距地 80m 高大球直径 49m, 离地 280m 高小球直径 38m, 杆件采用耐候钢方管	不锈钢网壳
1999	漳州后石电厂干煤棚	超过半球的 球面网壳	直径 125m 的超过半球的球面网壳	我国跨度最大的球面网壳
2000	杭州黄龙体育中心体育场挑棚	斜拉网壳	平面两个月牙形, 外径 244m, 总面积 21000m^2 , 耗钢量 $80\text{kg}/\text{m}^2$, 内环箱形钢梁, 外侧双层类四角锥网壳, 9 根稳定拉索, 两端锚固于外环梁	国内外独一无二的双塔斜拉索网壳挑篷设计; 国内独创无伸缩缝的混凝土施工技术; 国内独创跨度达 50 多米的无视觉障碍挑篷结构
2007	北京国家大剧院	半椭圆球形网壳	东西长轴 212.4m, 南北短轴 143.64m, 总高度 46.285m	最大钢穹顶结构
2008	北京奥运会“鸟巢”	椭圆形网壳	平面为椭圆形, 长轴 332.3m, 短轴 296.4m, 大跨屋盖支撑在 24 根桁架柱上	
2008	老山自行车馆	球面网壳	屋盖跨度 130m, 矢高 1/10, 周边悬挑 8.8m, 覆盖直径 147m	
2009	济南全运会“东荷西柳”	东荷: 弦支穹顶 西柳: 钢桁架	“东荷”总用钢量 2111t; “西柳”体育场罩棚结构单片罩棚由 64 榀钢桁架组成, 总用钢量 6650t	“东荷”体育馆屋盖结构目前是世界上跨度和单索拉力最大的弦支穹顶结构体系
2009	济南全运会自行车馆	偏心椭圆形壳	外形酷似自行车手戴的车帽, 工程占地 2.2万 m^2 , 建筑面积 1.6万 m^2	国内第二座封闭式自行车馆
2010	上海世博会阳光谷	变曲率网壳	由六个独立单体组成, 截面是变曲率的双曲面	

值得一提的是, 20 世纪 50 年代在钢结构中首次应用预应力。比利时的 G. Magnel 教授经数年研究于 1953 年设计了布鲁塞尔飞机库大门预应力双跨连续钢桁架结构 ($153\text{m}\times 66\text{m}$), 取得了令人满意的效果。同年, 美国的威斯基建筑师又设计并建造了著名的雷里竞技场, 它的双曲抛物面预应力悬索屋盖及流畅的建筑造型一时风靡国际, 成为以后悬索预应力空间网格结构在世界各地广泛应用的示范典型。近年来, 我国也建造了一批先进的预应力空间钢结构, 其中最具代表性的是 1994 年建成的四川攀枝花市体育馆和广东清远

市体育馆，两者均地处边远山区，施工条件困难。北京工业大学体育场馆也采用了预应力方案，此场馆曾用于 2008 年奥运会羽毛球和艺术体操比赛。



图 1-13 北京工业大学体育馆

1.2 结构优化设计的发展和现状

结构优化设计从马克斯威尔 (Maxwell, 1880) 理论和米歇尔 (Michell, 1905) 桁架出现起已有百余年，从史密特 (Schmit) 用数学规划来解决结构优化设计问题算起亦有 50 多年历史，特别是近 30 年内，在理论、算法和应用方面都取得了长足的发展。这些发展绝大部分是关于连续变量优化设计的，只有少数是关于离散变量优化设计的。

在连续变量优化设计中，采用的方法很多，主要有准则法、规划法以及近些年来发展的仿生学算法。连续变量优化设计数学模型参见式 (1-1)，即在可行域 X 内寻求满足约束条件 $g_j(X) \leq 0$ 且使目标函数 $f(X)$ 最小的自变量 x_i 。

$$\left. \begin{aligned} \min f(X) \\ \text{s. t. } g_j(X) \leq 0 \quad (j=1, 2, \dots, l) \\ X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}^T, X \in R^n \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

在实际工程中，结构的优化设计变量 (式 1-1 中的自变量 x_i) 往往受到一定的限制 (如角钢、型钢的横截面积)，并不是连续变化的。因此，基于离散变量的结构优化问题体现出实用价值。离散变量优化设计数学模型参见式 (1-2)。

$$\left. \begin{aligned} \min f(X) \\ \text{s. t. } g_j(X) \leq 0 \quad (j=1, 2, \dots, l) \\ x_i \in S_i, S_i \in S, (i=1, 2, \dots, m) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

所不同的是设计变量 x_i 需在工程规范 S 限定的可行离散集 S_i 内选择。然而，离散变量优化设计的如下特点造成了其研究的艰难性：(1) 数学模型 $f(X)$ 是不可微的、非凸规划模型；(2) 可行域 X 转化为可行集 S_i ；(3) 连续变量优化中的许多有效的解析算法 (如：各种梯度算法中的敏度分析法) 和优越条件 (如：K-T 条件) 失去了意义，从而使各种对偶算法在很大程度上失去了其有效性 (因为对偶间隙无法估计)。因此，离散变量优化设计发展较为缓慢，截面优化对大规模问题尚缺少有效的方法；至于形状优化、拓扑优化、布局优化和选型优化方面的工作和论文甚少，且不够完善。

目前从事该领域研究的主要有：美国的 Arora 和 Kirsch U，大连理工大学的孙焕纯、柴山、石连栓、王跃方，浙江大学的董石麟院士、邓华以及北京科技大学的陈立周等。目前国内关于离散变量优化设计方面的专著只有两本^[3,4]。

离散变量优化设计问题实质上是组合最优化设计问题（即从所有可能的组合中寻求最优解），一般属 NP 困难问题，其设计方法可归结为三大类：

（1）精确算法。这类算法可求得问题的全局最优解，但一般这些算法都是指数型算法，如：枚举法、隐枚举法、高茂利（Gomory）的割平面法^[5,6]、达金（Dakin）的改进的分支定界法^[7]和（0,1）规划的巴拉斯（Balas）法（亦称加法）^[8,9]、定界组合算法、动态规划法^[10]等。对这类算法的评价标准是其计算效率。

（2）近似算法。这类算法求得的不是精确最优解而是近似最优解，但是该类算法可以保证近似最优解与精确最优解的相对误差不超过某一固定的比值。由于确定相对误差界非常困难，所以只有很少几个问题有近似算法，如：一维装箱问题适合的 FF 算法等。

（3）启发式算法。这类算法的基本思想不是一定要求得精确最优解，而是在允许的时间内求得一近似最优解。凡是无法估计计算误差的算法都属该类算法。由于启发式算法的计算工作量较小，可用来求解大规模问题，因此这是实际计算中应用较多的一类算法。对启发式算法的评价标准是近似最优解接近精确最优解的程度，这一标准一般可通过对大量有精确最优解的考题进行检验与统计分析而得到。如：柴山、孙焕纯等提出的相对差商法^[11]；还有仿生学方法——基因遗传算法（GA）、模拟退火法（SA）、神经网络算法（NNA）等。除了上面出现的一些仿生学算法外，20 世纪 70 年代 Bellman 和 Zadeh 还提出了模糊优化理论和方法。同时，模糊排序、模糊集运算、灵敏度分析和对偶理论以及模糊优化在生产实际中的应用^[12]也成为模糊优化理论和方法的重要研究内容。关于这些研究成果和进展可见参考文献 [13]，[14]。

目前，在国内外离散变量结构优化设计的相关研究中，有代表性的工作为：1962 年史密特（Schmit）和吉奇尔（Kicher）^[15]采用枚举法研究了三杆桁架的形状优化问题；1977 年 Lipson 和 Gwin^[16]用复形法对多工况下的桁架结构进行了形状优化；1991 年简金（Jenkins）^[17]用遗传算法研究了离散变量屋顶构架的形状优化问题；1993 年沙拉耶盖（Salajegheh）和万德普拉茨（Vanderplaats）^[18]研究了桁架的离散变量形状优化问题；1994 年 Robert Levy 等^[19]对预应力网架结构进行了理论分析、优化设计及实验研究；同年马克俭等^[20]研究了拉索预应力多块组合扭壳的受力特点和设计问题；1995 年美国亚利桑那州（Arizona）大学的 Rajan S. D^[21]提出对空间桁架结构用遗传算法进行截面、形状、拓扑优化设计；同年尹思明等^[22]针对拉索预应力球壳工程，探讨了结构选型、计算方法、受力特点、构造及施工等方面的问题；1995 年孙焕纯、王跃方、黄吉锋^[23]针对离散变量桁架优化问题进行了研究，给出了一种两级形状优化算法；1996 年柴山、孙焕纯^[24,25]提出求解一类（0,1）规划问题的相对差商法，且给出了该算法的误差估计及解的修正算法；同年柴山、孙焕纯^[26]提出求解（0,1,2）规划问题的两级定界组合算法，可有效地删除大多数非可行组合和非最优组合；1999 年石连栓、孙焕纯、柴山^[27]提出用相对差商法对两类变量综合处理进行结构形状优化；同年邓华、董石麟^[28]提出用两级优化算法对网壳结构进行形状优化设计；2000 年邓华^[29]提出采用相对差商法对空间网格结构进行离散变量的截面优化设计；2002 年张爱林^[30]等研究了预应力索-桁架结构形状优化设计问题；2006

年段学超^[31]等提出了多目标函数的优化；2007年孙贤斌^[32]等用混合遗传算法对桁架结构进行了优化；程耿东^[33]等对传统结构优化界的经典序列近似规划法改造并扩展应用于求解基于可靠度的结构优化问题，构造该问题的序列近似规划模型和求解过程；王伟^[34]等在 Matlab 环境下，编写了使用改进的可行方向法的优化程序，并对翼梁位置完成优化，最终完成了整个机翼的布局优化设计。

1.3 离散变量网壳结构优化设计方法概述

迄今为止，国内外尚未见到有关网壳结构优化设计方面的教材或专著，有关离散变量网壳结构优化设计方面的文献也很少。针对目前网壳结构优化设计理论与工程应用的需要，著者根据总结十几年来从事有关离散变量网壳结构优化设计研究和教学成果，撰写了本书。本书系统地阐述了基于离散变量的网壳结构截面优化、形状优化、拓扑优化、布局优化和选型优化的设计理论和方法，并给出了相应的优化程序流程图和算例分析；详细阐述了基于大型有限元分析软件 ALGOR 和 ANSYS 的网壳结构参数化建模和受力分析方法及相应程序；并介绍了著者的一些研究改进工作。

网壳结构截面优化采用两级截面优化方法，即采用一维搜索方法促其快速收敛，采用相对差商法搜索至近似最优解，再进行 0 阶修正。另外，还采用差异进化算法、单纯形模拟退火法对桁架、框架和网壳结构进行了截面优化。

网壳结构形状优化是寻找使目标函数最小的结构外形和各杆件的尺寸。与截面优化相比，形状优化需要增加描述结构几何外形的设计变量。针对网壳结构尤其是增加节点设计变量后，寻求一种容易求解且满足工程需要的局部最优解的方法值得探讨。本书采用了两级形状优化方法——相对差商法及复形法，兼顾节点变化对整个结构力系重新分配和造价变化的影响，对网壳结构进行了形状优化设计。算例表明了该两级形状优化方法的收敛性和求解效率。

网壳结构拓扑优化借鉴有关文献 [35] 提出了基于离散变量的网壳结构拓扑优化方法，即采用相对差商算法同时处理截面和拓扑两类变量，在求解过程中根据各拓扑变量与截面变量的相对差商确定优化搜索方向，从而获得最优拓扑解。另外，采用遗传算法对在应力、位移约束下的网格结构进行了拓扑优化^[36]，利用对称性对杆件进行分组，使优化后的结构仍然保持对称性，便于工程应用。算例表明了该算法的有效性。

网壳结构布局优化采用序列两级算法——拓扑级优化和形状级优化。第一级在固定的形状下采用相对差商法进行拓扑优化求出相对最优拓扑，第二级在固定的相对最优拓扑形式下采用复形法进行形状-截面优化以求得相对最优形状和截面，使两级优化交替进行，并兼顾节点变化对整体结构内力分配和造价的影响，直到求出最优布局为止。

网壳结构选型优化是在布局优化的基础上将不同网壳的类型也进行优选，增加了优化设计空间的多维非线性，故选型优化难度较大，有时几乎不能实现。为解决此类问题采用了一种智能两级算法，即第一级利用序列两级算法进行截面优化设计；第二级利用 BP 神经网络方法对网壳结构进行选型优化设计。以截面优化设计结果为依据建立优秀样本库，用优秀样本训练选型神经网络，算例表明恰当选择影响结构选型的控制因素并建立较大规模的优秀样本库，将能得到更加合理的选型优化结果。