

土木工程研究生系列教材

大跨空间结构

张毅刚 薛素铎 杨庆山 范 峰 编著
沈世钊 主审



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



土木工程研究生系列教材

大跨空间结构

张毅刚 薛素铎 杨庆山 范 峰 编著
沈世钊 主审



机械工业出版社

本书系根据土木工程研究生系列教材编委会的要求编写的。书中详细地介绍了大跨空间结构的发展历程，主要大跨空间结构体系的分类、分析理论、设计基础和研究发展趋势，以及正在发展中的大跨空间结构新体系。全书内容包括绪论、网架结构、网壳结构、悬索结构、薄膜结构和大跨空间结构新体系。

本书除作为土木工程研究生教材外，还可以作为土建设计与工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

大跨空间结构/张毅刚等编著. —北京: 机械工业出版社, 2005.1
土木工程研究生系列教材

ISBN 7-111-15540-8

I. 大… II. 张… III. 大跨空间结构: 空间结构-研究生-教材 IV. TU399

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 112820 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 季顺利 李俊玲

责任编辑: 季顺利 版式设计: 张世琴 责任校对: 申春香

封面设计: 张 静 责任印制: 李 妍

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·11.125 印张·26 插页·494 千字

定价: 38.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

68326294、68320718

封面无防伪标均为盗版

土木工程研究生系列教材编审委员会

顾问：（以姓氏笔画为序）

刘宝琛	刘祖德	刘怀恒	王正宏	林 皋
任爱珠	朱博鸿	沈世钊	沈祖炎	欧进萍
陈英俊	周 氏	周锡元	钟善桐	赵国藩
殷宗泽	顾晓鲁	蔡美峰		

主任委员：江见鲸

副主任委员：（以姓氏笔画为序）

朱合华	李宏男	李 奇	李爱群	陈云敏
张永兴	杜修力	张素梅	尚守平	姜忻良
夏 禾	徐志胜	廖红建		

委员：（以姓氏笔画为序）

卫 军	王 钊	王清湘	卢廷浩	朱召泉
李正良	李英民	李洪泉	李鸿晶	刘晶波
吴知丰	陈国兴	杨果林	张家生	张毅刚
张耀春	郑 刚	易伟建	单 建	周朝阳
赵树德	徐礼华	袁迎曙	康清良	盛宏玉

秘书长：季顺利

土木工程研究生系列教材 出版序

随着我国高等教育的发展,普通本科教育已由精英式教育发展成为大众式教育。我国科学技术的高速发展,对具有高级专业知识、高级专业技能的专门人才的需求,日益迫切,这为硕士研究生教育的发展提供了广阔空间。一些高等院校,硕士研究生的招生规模,近年来正以 15%~30% 的速度发展。对一些研究型重点高校,在“十五”期间,本科生与研究生的招生比例要大致相当。许多高校已获得工程硕士的培养授权,这为研究生培养又开辟了新途径。

硕士研究生招生规模的扩大,对传统的研究生教育模式提出了挑战。过去硕士生的培养基本套用博士生的培养模式,主要靠传帮带式的教育模式,而对数量增大的研究生教育,必须建立整建制的培养模式,即要求硕士研究生的教育培养模式向公共化、规范化方向发展。对此,硕士研究生的教材,特别是研究生教育的平台课、学位课的教材建设就显得特别重要了。

机械工业出版社根据当前土木工程研究生教育发展现状,本着“大土木工程”的教育思想,组织国内部分高校土木工程专业的教授,对土木工程研究生用教材建设进行了研讨,并组织编写了土木工程研究生系列教材。为保证教材的编写质量,组织成立了教材编审委员会,聘请了一批学术造诣深、德高望重的专家作顾问和教材主审。本套系列教材编写、出版的思路是:先基础课、平台课教材,后专业课教材。教材组织由长期给研究生授课的老师合作编写,达到“学校优势互补,质量上乘”的目标。教材体系设计,本着“重基本理论、重学科发展,结合学生现状和人才培养要求”的原则。教材编写质量,本着“出精品、主编负责、主审把关”的原则,符合国务院学位委员会设定的专业要求。

本套系列教材将于 2005 年陆续出版。我们相信,本套系列教材的出版将对我国土木工程研究生教育的发展和教学质量的提高及人才培养,产生积极作用,为我国经济建设和社会发展做出贡献。

江见鲸

本书序

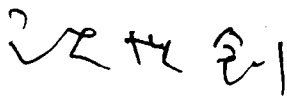
在实际的三维世界里，任何结构本质上都是空间性质的，只不过出于简化设计和建造的目的，人们在许多场合有条件地把它们分解成一片片平面结构来进行构造和计算。这样就形成了桁架、拱、框架等大家熟悉的各种平面结构形式。与此同时，无法进行简单分解的真正意义上的空间体系始终没有停止其自身的发展，而且日益显示出一般平面结构无法比拟的丰富多彩和创造潜力，体现出大自然的美丽和神奇。空间结构的卓越工作性能不仅仅表现在三维受力，而且还在于它们通过合理的曲面形体来有效抵抗外荷载的作用。当跨度增大时，空间结构就越能显示出它们优异的技术经济性能。事实上，当跨度达到一定限度后，一般平面结构就往往难以成为合理的选择。从国内外工程实践来看，现代的大跨度建筑多数采用各种形式的空间结构体系。

我国虽然是一个发展中国家，但由于国大人多，随着国力的不断增强，要建造更多更大的体育、休闲、展览、航空港、机库等大空间或超大空间建筑物，以满足经济发展和社会进步的需求，而且这种需求在一定程度上可能超过许多发达国家。这是我国空间结构领域面临的巨大机遇。事实也是如此，20世纪90年代以来，我国各种类型的大跨空间结构进入协调发展阶段，工程项目逐年增大，结构形式趋向多样化，出现了越来越多的创新设计，理论研究也逐渐配套，形势相当喜人。在这一过程中，锻炼培养了一支精炼能干的技术队伍和研究队伍。一批优秀的空间结构企业也已经或正在茁壮成长。可以预期，随着我国经济和社会的发展，空间结构将会继续以较快的速度向前迈进。

在此背景下，许多高等学校的土木工程学科设立了大跨空间结构研究方向，并为研究生系统开设这门课程。十余年来也陆续出版了一些关于网架结构、网壳结构、索结构和膜结构的专门著作，为空间结构的研究、设计和教学工作提供了有价值的参考资料。但与此同时，我也经常感到，多年来一直缺乏一本内容全面深入、篇幅恰当、概念清晰而文字表达又简明易懂、适合研究生学习的教学用书，使我们在教学中深感不便。根据我的体会，这本书应当覆盖空间结构的各主要类型；内容要适当综合一些，不仅限于各种空间结构的计算分析，还应当较充分地介绍这些结构的构造设计和有关材料及施工工艺方面的内容，讨论与建筑构

思密切相关的结构方案与概念设计方面的内容；并应当收集较多的国内外优秀空间结构作品，进行案例介绍和分析；关于各类空间结构的受力性能和计算分析，则要避免连篇累牍的力学推导，而应当把重点放在理论思路的提炼和概念的阐述上。此外，由于空间结构是一门正在迅速发展的新兴学科，这本书应当尽可能把最新的研究成果消化总结，融入有关章节，并适当介绍各类空间结构的研究动态和发展趋势。我认为，出版这样一本著作对促进我国空间结构学科的人才培养有重要意义。

因此，当听说北京工业大学张毅刚教授和薛素铎教授发起，并邀约北京交通大学杨庆山教授和哈尔滨工业大学范峰教授，拟共同编写出版这样一本教科书时，我就感到十分高兴。后来看到了书稿，觉得他们写这本书的指导思想同我上面说的那些想法相当接近。这几位学者长期从事空间结构方面的研究、教学和工程咨询工作，积累了丰富的经验；写作态度也十分严谨。可以看出，为了使这本书既能反映空间结构学科的实际发展状况，又符合研究生教学及广大设计技术人员学习的需要，作者们是付出了巨大努力的。我相信，这本书的出版将会对我国空间结构学科研究生的培养发挥重要作用。同时，也会对广大设计技术人员系统学习空间结构提供重要帮助。不能说这本书已尽善尽美；任何一本优秀教材均需要通过教学实践千锤百炼，并不断从学科发展中吸取新的养料，及时修订再版，使其日益臻于完善；我也以此寄望于作者。爰为之序。



2004年5月16日
于哈尔滨工业大学

前 言

大跨空间结构的发展状况已经成为衡量一个国家建筑科学技术水平的重要标志之一，越来越多高等院校的土木工程学科设立了大跨空间结构这一研究方向，为研究生开设了这门课程。许多著名专家领衔，已经培养出一大批博士、硕士，活跃在我国大跨空间结构的研究与工程领域，进一步推动了大跨空间结构的发展。已经陆续可以见到有关大跨空间结构主要结构形式如网架、网壳、悬索、膜结构等的专门著述。然而，多年来一直缺少一本系统的、适合于研究生授课用的教学用书。几位志同道合的教授在整理自己多年教案的基础上，携手编写了这本教材，希望能够为大跨空间结构领域的人才培养作一点贡献。

本书第1章为绪论，介绍了大跨空间结构的基本类型，尽量详细地回顾了大跨空间结构的发展历程，特别是在我国的发展，由北京工业大学张毅刚教授执笔。第2、3章分别讨论了网格结构的主要形式：网架与网壳结构的分类、分析理论与设计基础，由哈尔滨工业大学范峰教授执笔。第4、5章分别讨论了张力结构的主要形式：悬索与膜结构的分类、分析理论、设计和施工要点，由北京交通大学杨庆山教授执笔。第6章讨论大跨度空间结构的新体系，介绍当前正在发展中的新型空间结构的理论与设计要点，由北京工业大学薛素铎教授执笔。全书由张毅刚教授统稿。

作为研究生教材的特点，本书对各类结构专门安排了研究发展趋势一节，尽量介绍国内外最新研究进展，希望能够引起更多的研究兴趣。同时，尽量搜集了资料图片，随书整理了资料光盘，便于教师们制作电子教案。本书编写过程中引用了许多著名专家的著述和研究成果，均用参考文献的方式附在每一章的后面，便于读者进一步参考，在此也一并向专家们表示衷心的感谢。

大跨空间结构是极富生命力的发展领域，对于从事该领域研究的学者也极富挑战性。日新月异的高新技术难以完全包揽在本书内，且由于作者水平有限，谬误之处难免，敬请读者批评指正。

作 者

目 录

土木工程研究生系列教材出版序

本书序

前言

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 大跨空间结构的发展历程	7
1.3 我国大跨空间结构研究的工作历程	52
参考文献	58
第2章 网架结构	60
2.1 网架结构的类型和选型	60
2.1.1 网架结构的类型	60
2.1.2 网架结构的支承	67
2.1.3 网架结构的选型	70
2.2 网架结构的一般问题	71
2.2.1 网架结构主要几何尺寸的确定	71
2.2.2 网架的整体构造	72
2.3 网架结构分析	73
2.3.1 网架计算原则	73
2.3.2 空间桁架位移法	74
2.3.3 网架温度应力计算	84
2.3.4 网架抗震计算	87
2.3.5 网架结构的荷载、作用与效应组合	99
2.4 网架结构的杆件和节点	102
2.4.1 杆件的设计与构造	102
2.4.2 节点的设计与构造	104

2.5 网架结构研究的发展趋势	113
参考文献	115
第3章 网壳结构	117
3.1 网壳结构的类型和选型	117
3.1.1 网壳结构的类型	117
3.1.2 球面网壳的网格划分	121
3.1.3 柱面网壳的网格划分	127
3.1.4 双曲抛物面网壳的网格划分	130
3.1.5 网壳结构的选型	130
3.2 网壳结构分析	133
3.2.1 空间刚架位移法	133
3.2.2 温度应力和装配应力计算	142
3.2.3 网壳结构抗震分析	143
3.2.4 网壳结构的荷载、作用与效应组合	148
3.3 网壳结构的稳定性	153
3.3.1 网壳结构全过程分析方法	154
3.3.2 网壳结构全过程分析实例	164
3.3.3 单层球面网壳的稳定性	167
3.3.4 单层柱面网壳的稳定性	169
3.3.5 单层椭圆抛物面网壳的稳定性	174
3.3.6 单层双曲抛物面网壳的稳定性	176
3.3.7 网壳等效刚度的计算公式	177
3.3.8 网壳设计规程关于稳定性验算的规定及说明	178
3.4 网壳结构的杆件与节点	182
3.4.1 杆件的设计与构造	182
3.4.2 节点的设计与构造	183
3.5 网架与网壳的防腐和防火	185
3.5.1 网架与网壳的防腐	186
3.5.2 网架与网壳的防火	189
3.6 网壳结构研究的发展趋势	190
参考文献	192
第4章 悬索结构	194
4.1 悬索结构的类型与选型	194

4.1.1	单层悬索体系	194
4.1.2	预应力双层悬索体系	198
4.1.3	预应力鞍形索网	200
4.1.4	含劲性构件的悬索结构	204
4.1.5	组合悬索结构	206
4.2	钢索及其基本受力特性	207
4.2.1	钢索的种类	207
4.2.2	钢索的制作	210
4.2.3	柔性索的基本受力特性	211
4.3	悬索结构分析的有限单元法	215
4.3.1	大位移理论预备知识	215
4.3.2	有限元列式	219
4.4	悬索结构的形态分析	224
4.5	悬索结构的受力分析	227
4.6	悬索结构的动力特性及抗风抗震分析	229
4.6.1	自振特性与阻尼	229
4.6.2	悬索结构的地震反应分析	231
4.6.3	悬索结构的风振反应分析	233
4.7	悬索结构的强度和刚度校核	236
4.8	钢索的锚固及连接节点	238
4.8.1	钢索的锚固	238
4.8.2	悬索结构的连接节点	243
4.9	悬索结构的施工要点	248
4.10	悬索结构研究的发展趋势	252
参考文献	253
第5章	薄膜结构	255
5.1	薄膜结构的类型与选型	255
5.1.1	柔性壳体的基本力学性能	256
5.1.2	结构的支承体系	257
5.1.3	膜材的剪裁与连接	261
5.2	建筑膜材	264
5.2.1	概述	264
5.2.2	膜材的本构模型	266
5.3	薄膜结构的有限元分析	268
X		

5.3.1	形函数矩阵	268
5.3.2	几何方程	270
5.3.3	局部坐标系下的单元平衡方程	273
5.4	薄膜结构的形态分析	274
5.5	膜曲面的裁剪分析	279
5.5.1	裁剪线的确定	279
5.5.2	膜片的展开	280
5.6	薄膜结构的受力分析与设计	284
5.6.1	受力分析	284
5.6.2	薄膜结构强度和刚度	287
5.7	薄膜结构的连接与节点	291
5.7.1	膜材与膜材的连接	292
5.7.2	索与膜的连接	296
5.7.3	膜材与刚性边界的连接	301
5.7.4	索节点	301
5.7.5	柱节点	303
5.7.6	索膜节点	306
5.8	薄膜结构研究的发展趋势	308
参考文献		310
第6章 大跨空间结构新体系		312
6.1	可展开折叠式结构	312
6.1.1	概述	312
6.1.2	可展开折叠结构的几何构成	314
6.1.3	可展开折叠结构的力学分析	323
6.1.4	可展开折叠结构的节点构造	325
6.2	开合屋盖	327
6.2.1	概述	327
6.2.2	屋盖的开合方式	333
6.2.3	开合屋盖结构的设计要素	341
6.3	张拉整体结构	345
6.3.1	张拉整体结构的概念及发展过程	345
6.3.2	索穹顶结构	350
6.4	张弦结构	355
6.4.1	张弦梁(桁架)	356

6.4.2 索承网壳	359
6.5 预应力拱架结构	362
6.6 新型围护体系	368
6.6.1 点支玻璃幕墙	368
6.6.2 新型金属屋面板——彩涂压型钢板	375
参考文献	386

第1章 绪 论

1.1 引言

远古的人类挖洞穴居或筑木为巢，满足了生存空间的需要。随着社会的进步，人们需要较大的空间进行公共活动。中国古代工匠用木材构筑梁柱结构的宫殿或寺庙，跨度达到20~30m。古罗马人用砖石建造拱顶或穹顶，跨度达到40多米，然而结构自重为 $6400\text{kg}/\text{m}^2$ ，又厚又重。

20世纪的工业革命推动了建筑科学技术的发展。在出现了水泥和钢铁等新型材料之后，人们学会了建造桁架、拱、钢架之类的平面结构，跨越50~70m的跨度。随着生活水平的提高，人类从事生产和社会活动对更大跨度的空间提出了需要。如载客300~400人的波音747飞机，机翼宽60m、尾翼高20m，这就需要更大更高的飞机库。又如体育馆，要求有能够容纳几万人进行体育、文娱表演、集会、展览的多功能大厅，跨度需做到100~200m，甚至更大。图1.1.1、1.1.2分别是中国为2008年奥运会修建的国家体育场和游泳中心，跨度均在200m以上。图1.1.3为英国伦敦的“千年穹顶”，其直径已经达到320m。日本巴组铁工所认为：21世纪是为人类创造舒适、清洁、节能的新型城市的时代，具有现代设备与人工智能的封闭式城市环境，将为人类提供与自然相协调的理想生活环境。图1.1.4为巴组铁工所提出的跨度为500~1000m的穹顶空间，体现工作、居住、娱乐一体化的理想的未来城市。

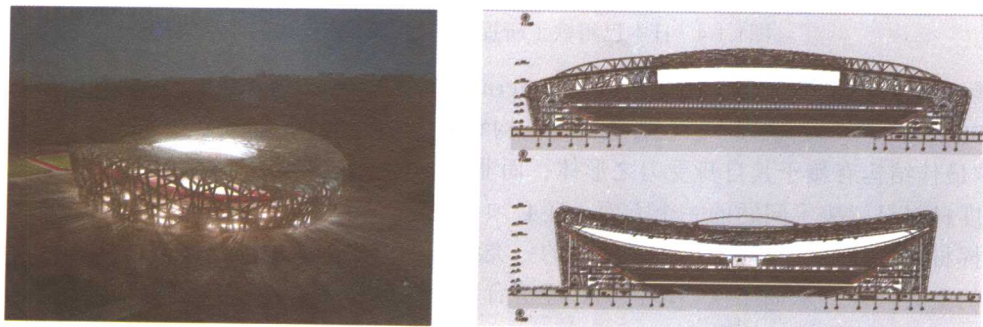


图1.1.1 中国国家体育场

对大跨度空间的需求，促使专家学者们深入研究什么样的结构体系既能够满足建筑平面、空间和造型的要求，跨越足够大的跨度，又具有更好的技术经济指

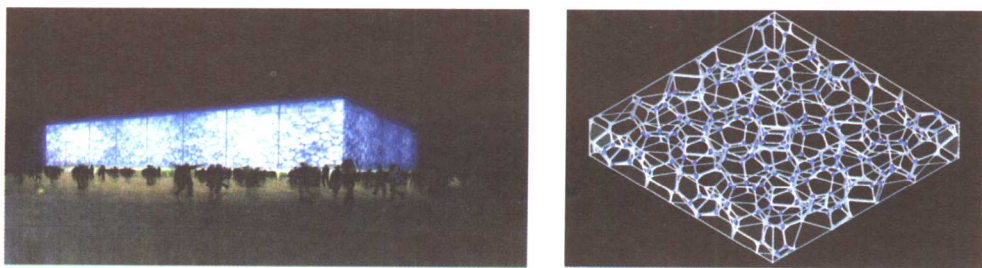


图1.1.2 中国国家游泳中心

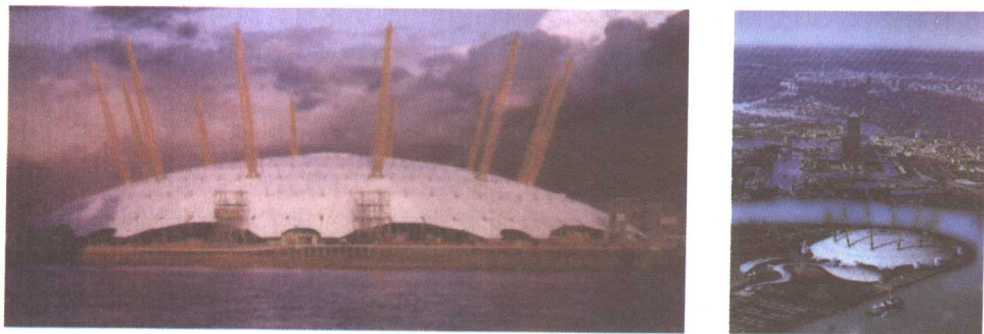


图1.1.3 英国伦敦“千年穹顶”

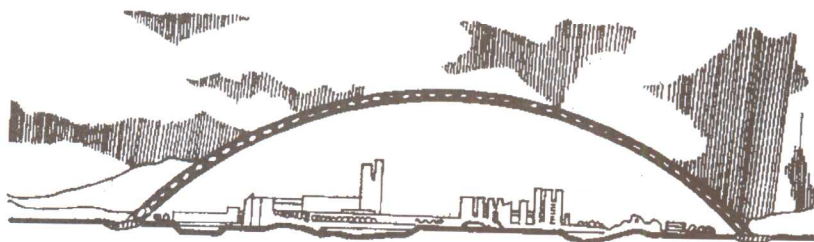


图1.1.4 日本巴组铁工所提出的超大跨度穹顶空间

标。国际壳体与空间结构协会（The International Association of Shell and Spatial Structures）的创始人、已故著名薄壳结构专家托罗哈（Torroja, E.）有一句名言：“最佳结构有赖于其自身受力之形体，而非材料之潜在强度”。就是说：采用高强度材料只解决了问题的一个方面，还必须寻找形体合理的结构，使其能够充分发挥材料的潜力。空间结构正是如此的一类结构。它的合理形体，使得它具有良好的受力性能。从而不仅形体优美、经济合理，还可以跨越超大的空间，成为近年来最具生命力的结构形式之一。

所谓空间结构是指：具有不宜分解为平面结构体系的三维形体，具有三维受力特性，在荷载作用下呈空间工作的结构。图1.1.5所示单层工业厂房是典型的由平面结构组成的结构体系。图1.1.6所示的框架虽然具有三维形体，但通常它的纵

横框架有主次之分，可取主要受力的横向框架按平面结构计算。图1.1.7所示的桁架结构和图1.1.8所示的拱结构都是平面结构。而图1.1.9所示的壳体显然不能被分解为平面结构，明显具有三维受力特性，在荷载作用下呈空间工作，是典型的空间结构。图1.1.10展示了网架结构的几种基本单元，可以看出它的组成本身就是空间形体，每个节点的受力也是三维的。

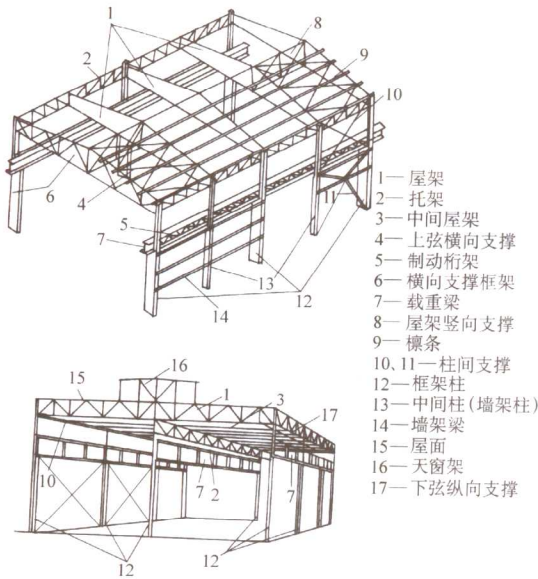


图1.1.5 由平面结构组成的单层工业厂房

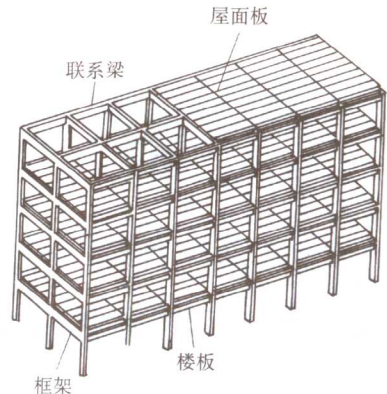


图1.1.6 钢筋混凝土框架

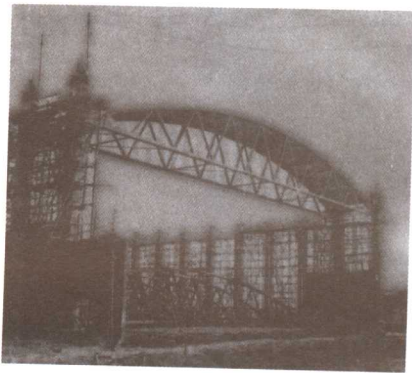


图1.1.7 平面桁架结构

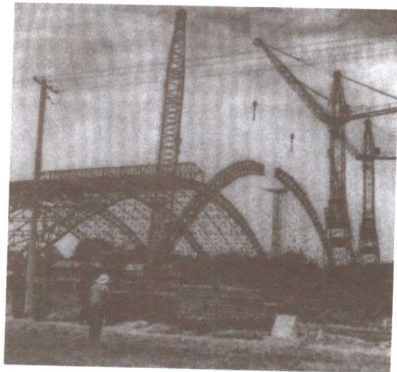


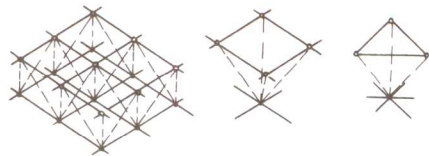
图1.1.8 拱结构

空间结构可以分为以下三种基本类型：

实体结构类——薄壳结构、折板结构。它们一般是钢筋混凝土实体结构，如图1.1.11、图1.1.12所示。近年来应用不是很多，本书不拟作详细讨论。



图1.1.9 蒙特利尔短程线型双层网壳 ($D=76\text{m}$)



a) 交叉桁架系 b) 四角锥体 c) 三角锥体

图1.1.10 网架结构的几种基本单元

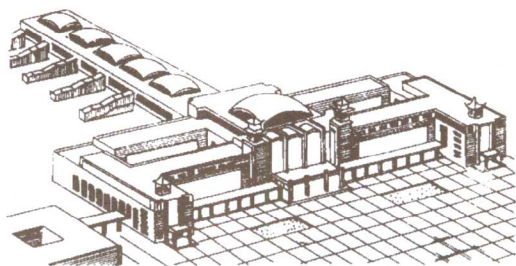


图1.1.11 北京火车站屋面双曲抛物面薄壳



图1.1.12 郑州第二砂轮厂食堂折板结构

网格结构类——网架结构、网壳结构。它们一般是由杆件按一定规律组成的网格状高次超静定空间杆系结构，如图1.1.13、图1.1.14所示，将在本书第2、3章详细讨论。



图1.1.13 首都机场四机位机库网架