

普通高等教育“十三五”规划教材

大跨度空间结构

王秀丽 主编
梁亚雄 吴长 副主编

Large Span
Spatial
Structure



化学工业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

大跨度空间结构

Large Span Spatial Structure

王秀丽 主编

梁亚雄 吴长 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书共分6章,主要介绍了网架结构、网壳结构、悬索结构和膜结构、管桁架结构以及空间组合结构和新型结构体系,空间组合结构和新型结构体系简要地介绍了组合网架结构、斜拉结构、折叠式网壳结构、张弦结构、张拉整体结构、索穹顶结构、仿生结构、自由曲面结构、开合结构。各类型结构主要阐述了其设计方法与分析理论,突出实用的设计分析方法,1~5章都有实际应用案例介绍并配有思考题。

本书可作为高校土木工程专业选修课程教材,适合学时为32~40学时,各学校根据需要进行内容取舍。此外本书也可以作为建筑学专业结构选型参考,也可为科研、设计、施工和管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大跨度空间结构/王秀丽主编. —北京:化学工业出版社, 2017.1

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-122-28682-6

I. ①大… II. ①王… III. ①大跨度结构-空间结构-结构设计-高等学校-教材 IV. ①TU399

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第304915号

责任编辑:刘丽菲

装帧设计:史利平

责任校对:边涛

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张16½ 字数405千字 2017年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 39.80 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

大跨度空间结构的设计与建设是衡量一个国家建筑科技水平的重要标志之一，也是国家经济、文化及文明发展的象征。近年来随着我国经济的腾飞，空间结构越来越广泛地在工程中应用，相关的内容十分丰富，空间结构的分析与设计得到越来越多的重视。对于结构设计人员而言，空间结构领域有更多的创造性设计，对于培养学生创新性思维也有极大的促进作用，因此各高校开设大跨度空间结构的课程，旨在让更多的学生掌握空间结构基本选型、设计理念和设计方法。

结构选型与概念设计是空间结构重要的设计与研究内容之一。本书着重从结构形式和概念设计的角度出发，结合概念设计的基本原理，着重介绍大跨度空间结构体系的分类及特点，强调结构选型的重要性，并阐述各类结构的主要分析理论与设计方法，同时为了启发读者的创新思维，增加了工程案例，对其中部分工程进行点评，并对部分作者参与的实际工程设计与分析进行介绍，欢迎读者对此共同探讨(wangxl9104@126.com)。此外书中部分内容结合作者近年的研究工作连同概念设计给出一些参考构造，便于同行参考。

全书共分为6章，第1章为概述，重点介绍空间结构的演变与发展的历程，结合基本传力理论探讨空间结构构成的概念，此外结合工程实例说明空间结构概念设计的重要性，并对材料选用及相关内容进行了介绍，便于读者全面了解空间结构的演变与发展的相关性；第2、3章着重介绍工程中最常用的网架和网壳结构，以满足常规工程设计的需求；第4章介绍了悬索结构和膜结构的主要力学特征及其设计要点；第5章是目前应用较多的管桁架体系，重点地对这类结构节点构造等进行介绍，并对相贯节点的设计进行论述；第6章对各类其他形式的空间结构进行介绍，同时对具有发展潜力的各种新型结构体系，包括索穹顶结构、弦支穹顶结构等进行了介绍。

本书内容参考了大量国内外空间结构著名专家学者的专著、研究论文以及工程实例，在此对相关的作者表示衷心的感谢。特别需要说明的是，本书所列举的有关研究工作及工程项目得到国家自然科学基金面上项目(51278236)，国家科技支撑计划(2011BAK12B07)，甘肃省科技厅、建设厅及教育厅项目的资助，同时甘肃省建筑勘察设计院、中国市政西北设计研究院有限公司等工程单位也为研究工作提供了大量的工程背景和研究平台，殷占忠、马肖彤、冉永红、苏成江、王本科、虞崇钢等分别参加了部分相关的设计和研究工作，为本书部分章节提供数据平台，在此一并表示诚挚的感谢。

本书由王秀丽任主编并编写第1~3章，梁亚雄负责编写第4章，王秀丽、杨文伟负责编写第5章，吴长负责编写第6章，全书由王秀丽负责统稿。

由于时间仓促，加之编者水平有限，书中难免有大量的不足和疏漏，恳请读者批评指正。

编者

2017.1

第 1 章 概述

1

- 1.1 ▶ 建筑空间与大跨度空间结构 1
 - 1.1.1 空间结构的概念 1
 - 1.1.2 利用空间结构实现宏大的内部空间 2
 - 1.1.3 空间结构应用范围的拓展 3
- 1.2 ▶ 轻型结构与空间结构 4
 - 1.2.1 薄壳结构 5
 - 1.2.2 拱与拱桁架结构 5
 - 1.2.3 悬索结构及各种组合体系 6
- 1.3 ▶ 建筑材料的发展与空间结构 6
 - 1.3.1 石材砌体结构 7
 - 1.3.2 钢筋混凝土空间结构 7
 - 1.3.3 钢结构 7
 - 1.3.4 悬索结构和膜结构 8
- 1.4 ▶ 大跨空间钢结构的应用及发展 9
 - 1.4.1 大跨空间钢结构的应用 9
 - 1.4.2 大跨空间结构理论分析的发展概要 11
- 1.5 ▶ 空间结构的概念设计定义 13
- 思考题 14

第 2 章 网架结构分析及概念设计

15

- 2.1 ▶ 网架结构形式及选择 15
 - 2.1.1 网架结构的构成分析 15
 - 2.1.2 网架结构的形式和选择 16
 - 2.1.3 网架结构的选型要点 25
 - 2.1.4 网架结构的支承 26

2.2	▶ 网架结构基本尺寸的确定	28
2.2.1	网格尺寸的确定	28
2.2.2	网架高度的确定	28
2.2.3	网架的屋面构造	29
2.3	▶ 网架结构的内力分析方法	30
2.3.1	荷载和作用	30
2.3.2	网架的静力计算方法	33
2.4	▶ 网架结构构造设计	38
2.4.1	网架的杆件设计与构造	38
2.4.2	网架结构的节点设计与构造	39
2.4.3	网架的支座节点	50
2.5	▶ 网架结构概念设计及实例点评	53
2.5.1	网架结构工程中存在的问题	53
2.5.2	网架工程实例及点评	54
	思考题	57

3.1	▶ 网壳结构工程应用及特点	58
3.1.1	网壳结构发展及应用	58
3.1.2	网壳结构的特点	60
3.1.3	网壳结构现状与概念设计	61
3.2	▶ 网壳结构形式、分类及其选型	62
3.2.1	网壳结构的分类	62
3.2.2	按网格形式划分的网壳结构	68
3.2.3	网壳结构的选型	75
3.3	▶ 网壳结构一般设计原则	76
3.3.1	荷载和作用的类型	76
3.3.2	一般设计原则	80
3.4	▶ 网壳结构的内力分析方法简述	81
3.4.1	概述	81
3.4.2	空间铰支杆单元非线性有限单元法——空间桁架位移法	82
3.4.3	空间梁-柱单元非线性有限单元法	86
3.5	▶ 网壳结构的抗震概念设计	95
3.5.1	概述	95
3.5.2	网壳结构的动力特性	95
3.5.3	网壳结构的振动方程	96
3.5.4	抗震分析	97

3.5.5	几种网壳结构的动内力分布规律	99
3.6	▶ 网壳结构的稳定性及其概念设计	101
3.6.1	网壳的失稳现象	101
3.6.2	影响网壳结构稳定性的主要因素	103
3.6.3	网壳结构稳定性分析的连续化方法	105
3.6.4	网壳结构稳定性分析的有限单元法	106
3.6.5	网壳结构的稳定设计	110
3.7	▶ 网壳结构的杆件设计与节点构造	112
3.7.1	网壳结构的杆件设计	112
3.7.2	网壳结构的节点构造与设计	115
3.8	▶ 网壳结构工程实例与点评	116
3.8.1	单层球面网壳工程实例	116
3.8.2	双层球面网壳实例	119
3.8.3	异型网壳工程实例	120
思考题		123

4.1	▶ 悬索结构的概念	124
4.2	▶ 悬索结构的受力与变形特点	126
4.2.1	索的支座反力	126
4.2.2	索的拉力	127
4.2.3	悬索的变形	127
4.3	▶ 悬索结构的形式	128
4.3.1	单层悬索体系	128
4.3.2	双层悬索体系	130
4.3.3	交叉索网体系	132
4.4	▶ 悬索结构分析	134
4.4.1	设计基本规定	134
4.4.2	荷载	135
4.4.3	钢索设计	138
4.5	▶ 悬索结构的稳定分析与构造	138
4.6	▶ 悬索结构的动力特性及抗震抗风分析	140
4.6.1	自振特性与阻尼	140
4.6.2	悬索结构的地震反应分析	141
4.6.3	悬索结构的风振反应分析	141
4.7	▶ 悬索结构的强度和刚度的校核	144
4.8	▶ 悬索结构的节点构造	145

4.8.1	钢索与钢索连接	146
4.8.2	钢索连接件	146
4.8.3	钢索与屋面板连接	147
4.8.4	钢索支承节点	147
4.8.5	钢索与中心环的连接	148
4.8.6	钢索与钢檩条的连接	149
4.8.7	拉索的锚固	149
4.9	▶ 膜结构简介	149
4.9.1	膜结构的分类	151
4.9.2	膜结构的材料	154
4.9.3	膜结构的荷载、作用及其组合	156
4.9.4	一般设计计算原则	158
4.9.5	索膜结构的基本理论与分析方法	159
4.9.6	膜结构的节点构造	164
4.10	▶ 工程实例简介	166
4.10.1	美国雷里体育馆	166
4.10.2	北京工人体育馆	167
4.10.3	加拿大卡尔加里滑冰馆	168
	思考题	169

第5章

管桁架结构

170

5.1	▶ 管桁架结构的概念	170
5.2	▶ 管桁架结构选型	172
5.2.1	管桁架结构的基本形式	172
5.2.2	管桁架结构的分类	172
5.3	▶ 基本尺寸的确定	174
5.4	▶ 管桁架结构内力分析	175
5.4.1	管桁架的一般设计原理	175
5.4.2	管桁架的杆件设计	177
5.5	▶ 管桁架节点构造	178
5.5.1	管桁架节点分类	178
5.5.2	钢管节点的构造要求	180
5.5.3	连接焊缝的计算	183
5.5.4	钢管相贯节点的强度	185
5.5.5	矩形管直接焊接节点的承载力计算	189
5.6	▶ 管桁架结构工程实例	192
	思考题	195

6.1	▶ 概述	196
6.2	▶ 组合网架结构	198
6.2.1	组合网架结构的概念和应用概况	198
6.2.2	组合网架的特点与分类	199
6.2.3	组合网架的构件选型	201
6.2.4	组合网架的计算要点	202
6.2.5	组合网架构件设计、构造	206
6.2.6	组合网架施工方法简介	207
6.3	▶ 斜拉结构	208
6.3.1	斜拉网架结构的形式	208
6.3.2	斜拉网架结构的特点	209
6.3.3	斜拉网架结构的选型	209
6.3.4	斜拉网架结构的内力分析	210
6.3.5	斜拉结构设计构造	213
6.3.6	工程实例与点评	214
6.4	▶ 折叠式网壳结构	215
6.4.1	折叠式网壳结构的简介与特点	215
6.4.2	折叠式网壳结构的分类	216
6.4.3	折叠式网壳结构的工程应用	216
6.5	▶ 张弦结构	219
6.5.1	张弦网架结构简介	219
6.5.2	张弦梁结构	223
6.6	▶ 张拉整体结构	235
6.6.1	张拉整体结构的简述	235
6.6.2	张拉整体结构的形式和特点	235
6.7	▶ 索穹顶结构	236
6.7.1	索穹顶结构的发展和工程应用	236
6.7.2	索穹顶结构的形式和特点	238
6.7.3	索穹顶结构的初始预应力确定	239
6.7.4	索穹顶结构的节点构造	245
6.8	▶ 仿生结构	246
6.9	▶ 自由曲面结构	248
6.9.1	自由曲面结构简介	248
6.9.2	自由曲面结构的形态创建	249
6.10	▶ 开合结构	249

6. 10. 1 简述	249
6. 10. 2 开合结构的开合方式	249
6. 10. 3 工程应用	250
思考题	251

第1章

概述

1.1 建筑空间与大跨度空间结构

1.1.1 空间结构的概念

“空间结构”(Space Structure 或者 Spatial Structure)基本定义是“创造宏大的内部空间的产物”,主要特点是利用空间形态或者三维形态抵抗外力。空间结构不仅考虑结构的内部空间,也顾及结构外部空间的影响,不仅要直接表达力学理念,也要通过规模、形态来展示建筑意图,同时空间结构的发展与进步,也是伴随着建筑材料与结构体系以及建筑技术综合发展的过程。

空间结构的创建中,材料、形态、体系和结构的表现深深地交织在一起,展示出建筑造型与合理结构体系的高度和谐(图1-1、图1-2),这就要求建筑师和结构工程师密切合作。空间结构的发展也带来了施工技术的发展,因此空间结构是建筑艺术与科学技术工程协调统一的杰作。



图 1-1 大连友谊广场

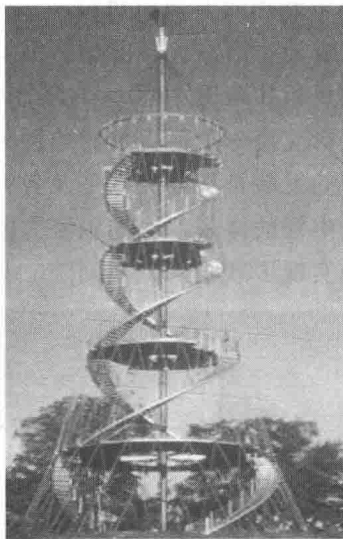


图 1-2 斯图加特观光塔

从结构受力分析与空间构成的角度出发,无法简化为平面结构的结构均为空间结构。实际上每个结构都应该是三维的,而对于某些工程可采用简化的平面体系分析即可满足其主要

受力特性。图 1-3 为兰州中山桥，是位于城北白塔山下的黄河铁桥，是兰州境内历史最悠久的古桥，有“天下黄河第一桥”之称。1954 年，兰州市人民政府整修加固了铁桥，又增加了五座弧型钢架拱梁，使铁桥显得坚固耐用，气势雄浑。其中弧型钢架拱梁可以按照平面结构进行分析与设计。此外目前大量采用的门式刚架体系（图 1-4），均可采用平面结构进行分析，既可以满足工程设计要求，又可以简化计算。

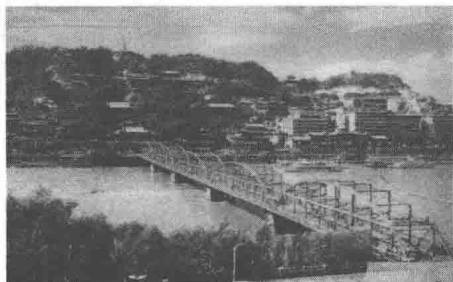


图 1-3 兰州中山桥外景



图 1-4 典型的门式刚架结构

1.1.2 利用空间结构实现宏大的内部空间

随着世界工业化的发展，对大跨度结构的功能要求也越来越高。空间结构由于其造型丰富多样，构成灵活机动，成为建筑师和结构工程师共同寻求解决结构整体空间问题的同一途径，因此合理协调建筑空间效果与寻求最佳受力的结构体系是空间结构的发展方向，也使得结构向超大跨度方向发展成为可能。

世界上许多著名设计师认为网壳结构是空间结构中覆盖最大跨度和空间的结构形式。凯威特从理论上分析认为联方形网壳的跨度可以达到 427m，1959 年富勒曾提出建造一个直径达 3.22km 的短程线球面网壳，覆盖纽约市第 23~59 号街区，该网壳重约 80000t，每个单元重 5t，利用直升飞机可以在三个月左右安装完毕。日本的巴组铁工所认为 21 世纪将是人类创造舒适、清洁、节能的新型城市的时代，因此曾经提出跨度 500m 的全天候多功能体育、娱乐场所和跨度 1000m 的理想未来城市的穹顶空间。对于如此大的空间结构的可行性和实用性研究是一个值得探讨的问题。

空间结构的发展是与经济水平及各种需求发展密切相关的。近年来有不少的工程利用空间结构实现楼中楼的体系，例如国家大剧院工程，参见图 1-5，就是采用了外围的一个大型空间网壳结构实现了歌剧院、戏剧院、音乐厅为一体的多功能建筑结构。

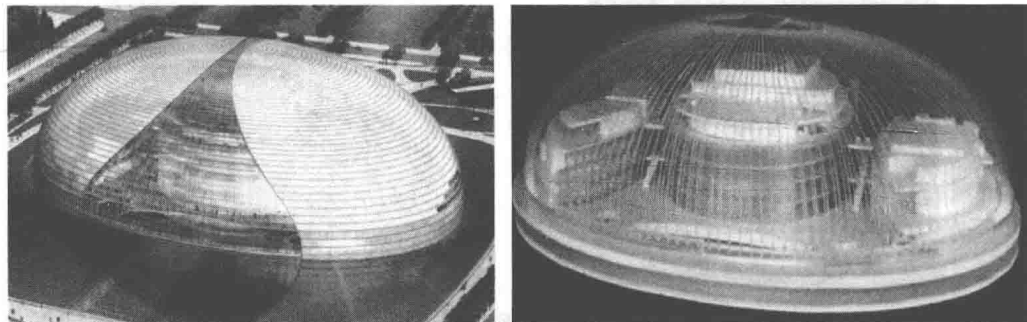


图 1-5 国家大剧院外形与内部空间结构

又如北京侨福花园工程(图1-6)是基于现代环保设计的理念,用一个环保罩将四栋建筑物覆盖在其中的空间结构。该工程建筑面积14.4万平方米,占地3万平方米,地下三层,地上共有四座塔楼,其中A、B座为两栋完全相同的19层、总高为78m的高塔,C、D座为两栋完全相同的11层、总高为41.7m的低塔,所有内部的四栋建筑均为钢筋混凝土框架剪力墙结构。

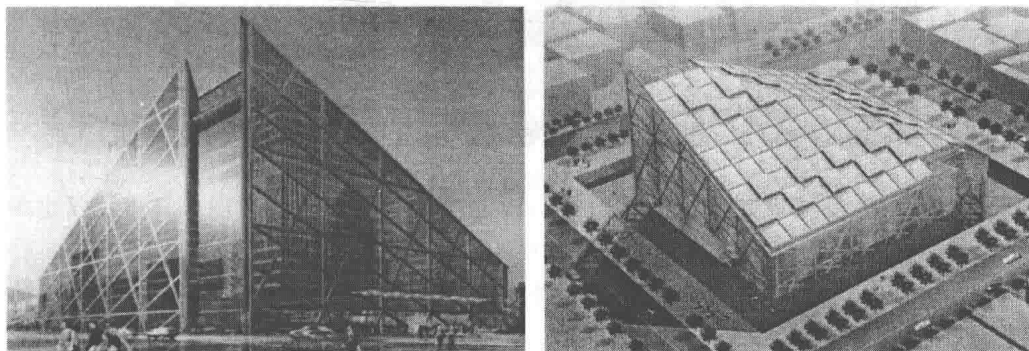


图1-6 侨福花园工程

环保罩由分别沿着东西和南北 28° 角倾斜的两个三角形斜面组合而成,环保罩由正交斜交的交叉梁组成的空间结构体系构成,上端铰接下端固定支承于塔楼屋顶的钢管柱上,铰接处采用铸钢支座;环保罩的侧面为玻璃幕墙结构,靠内部的塔楼作为其平面外的侧向支撑,四片侧罩在角部设伸缩缝分开。

1.1.3 空间结构应用范围的拓展

空间结构的造型是由理性的思考而来的,如结构体系的确认,相关条件的选择都具有多样性与创造性。世界著名空间结构专家、国际IASS学会主席、结构设计大师——德国斯图加特大学教授约格·施莱希在他的著作《轻型结构》中谈到:“对于每一个任务,无论怎样仔细地加以定义,都会有无数个主观的概念设计,因此你总有机会发展自己的构思,仍然可以构造一个有个性的区别于其他任何东西的作品。”这就表明空间结构的形成与发展无不具有创造性。在这个创造的过程中,概念设计是每一个作品的指导方针及原动力,它既是建筑形态是否能够实现的基本保证,又是作品是否具有独特风格的思维构成。

国内外大量兴建的各类体育场馆均选择了空间结构作为主要承重体系,造型上日渐丰富。例如甘肃省庆阳体育馆采用了复杂造型的曲面网壳外加弧形大拱结构体系(图1-7)。该工程位于甘肃省庆阳市西峰区世纪大道,建筑面积 19505m^2 ;建筑层数地上4层;建筑高度 15.45m ;下部结构为框架;基础为柱下条形基础;屋面结构为钢结构,其中比赛馆屋盖平面尺寸为 $100.20\text{m}\times 108.00\text{m}$,屋盖高度 17.8m ,训练馆屋盖平面投影尺寸为 $48.69\text{m}\times 65.4\text{m}$,高 9m ,均采用双向交叉立体桁架构成的曲面钢网壳结构,焊接球节点与相贯节点配合使用。

此外,其他各类结构均可采用空间结构的设计理念进行分析与设计,使其工程应用的范围日益增加,如高度 46m 的南海大佛雕塑骨架(图1-8),各种塔桅结构(图1-9),深圳世界之窗入口金字塔网架(图1-10),贵州人行天桥网架(图1-11)等。



图 1-7 甘肃省庆阳体育馆

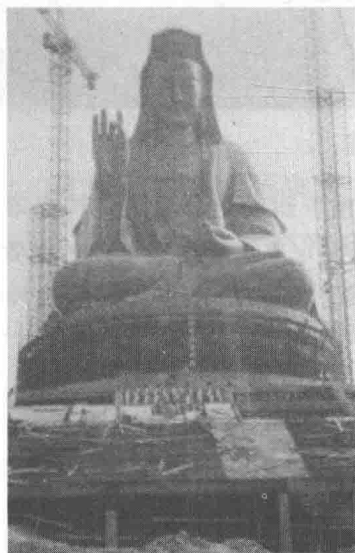


图 1-8 南海大佛雕塑骨架

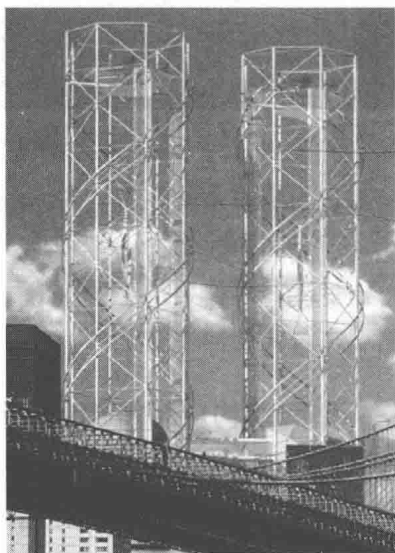


图 1-9 塔桅结构

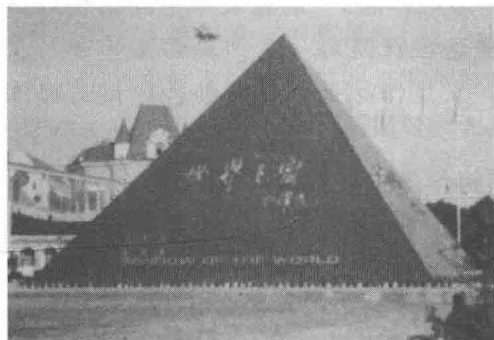


图 1-10 深圳世界之窗入口金字塔网架



图 1-11 贵州人行天桥网架

1.2 轻型结构与空间结构

空间结构具有受力合理，整体性和稳定性好，空间刚度大，抗震性能好，造型美观等优

点，因此人们一直在寻求最优的结构体系。而最优的结构通常被人们认为是艺术与结构融合的产物。从典型的钢筋混凝土薄壳结构、拱及桁架结构到网壳结构、索网结构、薄膜结构，都是朝着这一模式不断发展而来的，空间结构就是实现轻型结构的途径之一。

1.2.1 薄壳结构

薄壳结构是一种极富魅力的结构形式，使人感觉其如同打破了重力定律的框架，飘浮于空中，是艺术在工程中的体现，以高效的承重实现了其结构的轻盈，轻盈与承重高度统一，其基本原理就在于薄壳结构具有良好的空间受力关系。遗憾的是，随着经济的发展，原材料越来越低廉而人工越来越贵，相应模板的造价昂贵，使得这种轻盈的薄壳结构使用越来越少。

典型的工程有采用混凝土薄壳结构的法国巴黎国家工业与技术展览中心大厅（图 1-12），折算壳面总厚度只有 180mm，厚跨比为 1:1200，比鸡蛋壳的厚长比 1:100 还小 12 倍。建筑造型新颖，充分说明混凝土壳体结构的优越性。

此外，著名的澳大利亚悉尼歌剧院（图 1-13），该工程外形由大平台上十个巨型壳片组成，三角形壳瓣是以 Y 形、T 形的钢筋混凝土肋骨拼结而成，各种房间隐藏在它的内部。这些壳片如同花瓣似的指向天空，构成奇异的造型，给人以美的联想。

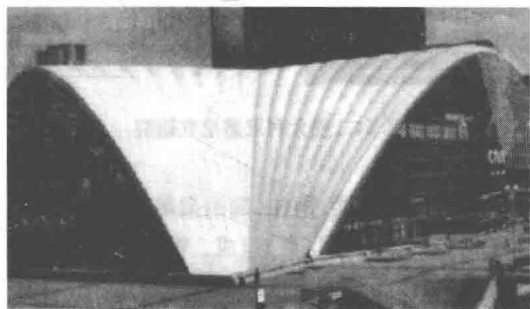


图 1-12 巴黎国家工业与技术展览中心大厅

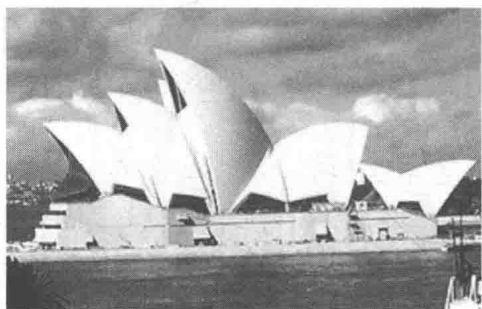


图 1-13 澳大利亚悉尼歌剧院

1.2.2 拱与拱桁架结构

拱是人类最早尝试营造大跨度的重要结构形式。当拱的形式符合其合理轴线时，或者通过适当的方法提高强度及抗弯刚度，或者通过应力拉索来抵抗不均匀荷载，可达到轻量化结构具有较大承载力的目的。同时拱的曲线造型也符合人们的审美观点。图 1-14 就是采用典型的拱形结构，实现了其轻巧优美的造型，但是拱结构会产生较大的水平推力，若拱结构在屋顶位置势必会造成下部结构需要抵抗很大的水平力，因此增设拉索与撑杆解决了这一技术问题，参见图 1-15。

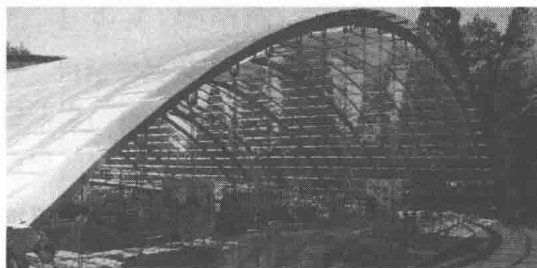


图 1-14 典型的拱形结构

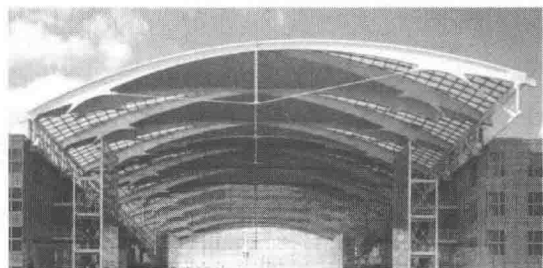


图 1-15 带拉索的拱结构

随着建筑物跨度的增加，相应的拱梁截面就会增加较多，这时实现大跨度的结构形式可以由杆件组成的桁架结构代替钢梁，这种结构避免了单个杆件上的弯矩，最大限度地发挥了结构的材料性能，而桁架内部的三角形体系使得结构整体非常坚固，并且由于单元化的结构形式和优良的预制化程度，使得这种结构非常经济实用，近年来得到了越来越多的应用。张弦梁结构就是基于这种概念发展起来的新型结构体系，图 1-16 为广州会展中心的大跨度张弦梁结构。

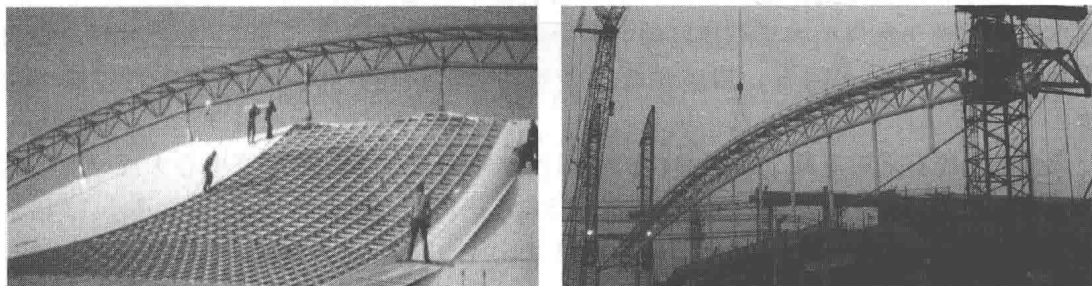


图 1-16 广州会展中心大跨度张弦梁结构

1.2.3 悬索结构及各种组合体系

悬索结构是非常合理的结构体系，但是它也存在着整体刚度较小的弱点，采用悬索结构与其他刚性结构组合的混合结构体系无疑是非常合理的结构设计。图 1-17 是美国华盛顿杜勒斯国际机场航站楼，位于华盛顿市区以西约 43km，是芬兰建筑师 Eero Saarinen 设计，1962 年建造的。屋盖为平行布置的悬索结构，机场的柱子是向外倾斜的，索拉紧外倾的柱子，在自重和屋面荷载下自然下垂成悬链状。在柱子之间设置了沿着索的方向倾斜的梁板。外侧形成屋檐的形状，内侧承受屋面索的拉力。



图 1-17 美国华盛顿杜勒斯国际机场航站楼

1.3 建筑材料的发展与空间结构

空间结构由于受力体系好，应用的材料范围也极为广泛，因而使得空间结构设计的领域也十分宽阔。随着空间结构的发展，每个时期所用的主流材料也有较大的不同。目前常用的材料最多的是钢材及膜，其他还有石材、砖、钢筋混凝土、木材、竹、铝合金、塑料等，均

在空间结构中发挥着材料的优势。

1.3.1 石材砌体结构

埃及金字塔是古埃及国王为自己修建的陵墓，已发现近 80 座，其中胡夫金字塔（图 1-18）建于公元前 2000 余年，是一座正方形底座、侧面三角形的锥形石结构。底边长 230.5m，高 146.6m，斜面倾角 52° 。总石块量有 230 余万块，平均每块约重 2.5t。西欧各国以意大利比萨大教堂和法国巴黎圣母院为代表的宗教建筑，都采用了砖石拱券结构。巴黎圣母院（图 1-19）建于 1163—1257 年，位于巴黎中心区域中岛上，正门前面是广场。教堂平面宽约 47m，长 125m，可容近万人。结构采用柱墩骨架、拱券和飞扶壁等组成的砖石框架结构。



图 1-18 埃及胡夫金字塔



图 1-19 巴黎圣母院

1.3.2 钢筋混凝土空间结构

早期的空间结构采用钢筋混凝土结构较多，多为钢筋混凝土薄壳结构。混凝土薄壳的代表作是罗马小体育宫（图 1-20）。该工程由意大利建筑师 A. 维泰洛齐和工程师 P. L. 奈尔维设计，为 1960 年在罗马举行的奥林匹克运动会修建的练习馆。建筑平面为圆形，直径 60m，屋顶是一球形穹顶，在结构上与看台脱开。穹顶宛如一张反扣的荷叶，由沿圆周均匀分布的 36 个“丫”形斜撑承托，把荷载传到埋在地下的地梁上。斜撑中部有一圈白色的钢筋混凝土“腰带”，是附属用房的屋顶，兼作联系梁。

1.3.3 钢结构

钢结构的发展与应用与冶金材料生产密切相关，19 世纪 50 年代前为铸铁结构，后出现钢结构。1851 年英国伦敦万国博览会的水晶宫，长 563m，宽 124m，跨度 22m，采用铸铁结构。1889 年法国巴黎博览会建成高达 321m 的艾菲尔铁塔（图 1-21）。以艾菲尔铁塔为标志，钢结构开始进入工程应用。中国钢结构应用的初盛时期是 20 世纪 50 年代，20 世纪 60～70 年代为限制使用时期（当时国家年钢产量仅有 1 千万～2 千万吨），主要用于国防和机械工业，国家政策限制使用建筑用钢，“凡是可用其他材料代替的，均不用钢结构建造”。从