

高校土木工程专业规划教材

GAOXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

# 空间结构

潘秀珍 主编

KONGJIAN JIEGOU

中国建筑工业出版社

013071272

TU399-43  
02

高校土木工程专业规划教材

# 空间结构

潘秀珍 主编  
李峰 参编  
郝际平 主审



北航 C1680175

中国建筑工业出版社

TU399-43

02

013071275

图书在版编目(CIP)数据

空间结构/潘秀珍主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 9

(高校土木工程专业规划教材)

ISBN 978-7-112-15667-2

I. ①空… II. ①潘… III. ①空间结构-高等学校-教材 IV. ①TU399

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 170493 号

本书以作为空间结构课程的教材为出发点, 编写原则为简单易懂, 通过介绍各类空间结构形式的发展历程和各自的优缺点, 总结出目前应用比较广泛、有发展前景的几种空间结构形式, 分别叙述结构形式分类、组成、受力特点、结构选型、设计及施工方法。全书内容包括: 空间结构综述; 空间网架结构; 空间网壳结构; 索杆张力结构; 膜结构; 开合屋盖结构。

本书可供土木工程专业的专科生、本科生学习, 还可作为土建设计人员、建筑学专业、城市规划等专业的参考书。

审主 平刘雅  
\* \* \*

责任编辑: 刘瑞霞 辛海丽  
责任设计: 董建平  
责任校对: 肖 剑 赵 颖

高校土木工程专业规划教材

空间结构

潘秀珍 主编  
李 峰 参编  
郝际平 主审

\*

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

北京红光制版公司制版

北京同文印刷有限责任公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15¼ 字数: 376 千字

2013 年 9 月第一版 2013 年 9 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978 - 7 - 112 - 15667 - 2  
(24196)

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

随着社会需求的增加和建筑科技的进步,空间结构得到了迅速发展和广泛应用,它不仅应用于体育馆、歌剧院、会展中心、候机厅等大跨度公共建筑设施中,而且在多层和高层建筑等需要大空间的楼面和工业厂房、商场等中小跨度建筑中的应用也越来越广泛。近30年来,我国的大跨度空间结构得到了迅速的发展,空间结构的形式不断创新,并且具有我国自己的特色。因此,空间结构已逐渐成为建筑专业人员必须了解和科学的一门新科学。

编者在大型国家设计院从事钢结构设计工作八年有余,主持完成了特大吨位吊车梁、大跨度重型厂房、多层及高层钢框架、轻型门式刚架等大量的高难度钢结构设计,积累丰富设计经验的同时,也接触到各种形式的大跨屋盖结构。到高校任教以后,发现学生主要学习传统的结构形式,很少有机会了解、学习新兴的大跨空间结构,为了让学生们能够紧跟时代发展的步伐,适应时代进步的潮流,深感学生们需要一本大跨结构的教材,于是产生了编写一本适合学生学习的空间结构教材的想法。

本书在出版前,已经作为讲稿给西安理工大学土木工程专业的本科生授课两年,深受学生们的好评。通过本门课程的学习,不但激发了学生们的创新意识,还拓宽了学生们的视野和专业范围。本书的编写以简单易懂为原则,首先介绍了各类空间结构形式的发展历程和各自的优缺点,总结出目前应用比较广泛、有发展前景的几种空间结构形式作为学习的主要对象,主要讲解结构形式分类、组成、受力特点、结构选型、设计及施工方法。

全书分为六篇。第一篇讲述了空间结构的发展史以及分类方法,帮助读者了解空间结构迅速发展的历史和工程背景。第二篇、第三篇分别对发展比较成熟的网架结构和网壳结构进行了详细的论述,可以使读者对网架和网壳结构的理论分析及工程设计有全面了解。第四篇重点讲述了索杆张力结构的组成、分类和受力特点,并对其设计和施工作了简要介绍。第五篇根据膜结构的分类,分别讲述了各类膜结构的受力特点和设计、施工方法。第六篇讲述了开合屋盖结构的形式、分类和计算方法。

本书不但适合土木工程专业的专科生、本科生学习,还可作为土建设计人员、建筑学专业、城市规划等专业的参考书。

本书是由长期从事钢结构设计和空间结构教学的西安理工大学潘秀珍副教授主编,西安建筑科技大学的李峰副教授参编,西安建筑科技大学郝际平教授最后审定。

限于编者水平有限及编写时间仓促,有不当之处,敬请读者批评指正。



# 目 录

第一篇 空间结构综述 .....	1
第一章 空间结构的概念 .....	3
第一节 单层刚架 .....	3
第二节 空间结构的优点和分类 .....	5
思考题 .....	5
第二章 空间结构的发展史 .....	6
第一节 古代空间结构 .....	6
第二节 薄壳结构的出现和发展 .....	7
第三节 折板结构 .....	9
第四节 空间网格结构的兴起 .....	10
第五节 悬索结构的发展 .....	13
第六节 薄膜结构的发展 .....	15
第七节 现代新型空间结构的出现和发展 .....	18
思考题 .....	19
第三章 空间结构的发展规律 .....	20
思考题 .....	21
第二篇 空间网架结构 .....	23
第一章 空间网架结构概述 .....	25
第一节 空间网格结构与空间网架结构的定义 .....	25
第二节 网架结构的形式与分类 .....	25
第三节 网架结构的支承 .....	31
第四节 网架结构的选型 .....	33
第五节 网架结构的荷载和作用 .....	35
第六节 网架结构的杆件 .....	36
第七节 网架结构的节点类型 .....	37
第八节 网架结构的主要几何尺寸 .....	42
第九节 网架结构的基本理论和分析方法 .....	43
思考题 .....	46
第二章 组合网架结构 .....	47
第一节 组合网架结构的概述 .....	47
第二节 组合网架结构的形式和分类 .....	49

101	第三节	组合网架结构的计算方法	50
101	第四节	组合网架结构的节点施工	51
101		思考题	53
101	<b>第三章</b>	<b>空腹网架结构</b>	54
101	第一节	空腹网架结构的概述	54
101	第二节	空腹网架结构的形式与分类	56
101	第三节	空腹网架结构的内力分布	57
111	第四节	空腹网架结构的变形特点	58
111	第五节	空腹网架结构的截面设计与施工	59
111		思考题	60
111	<b>第四章</b>	<b>折板形网架结构</b>	61
111	第一节	折板形网架结构的概述	61
111	第二节	折板形网架结构的形式与分类	62
111	第三节	折板形网架结构的支承形式	67
111	第四节	折板形网架的受力性能	67
111		思考题	69
111	<b>第五章</b>	<b>三层网架结构</b>	70
121	第一节	三层网架结构概述	70
121	第二节	三层网架结构的形式、分类与选型	72
121	第三节	三层网架结构的计算方法与支承方式	77
121	第四节	三层网架结构的受力性能	78
121		思考题	80
121		类代研大研的研研究究 研二第	
	<b>第三篇</b>	<b>空间网壳结构</b>	81
131	<b>第一章</b>	<b>空间网壳结构概述</b>	83
131	第一节	网壳结构的概念	83
131	第二节	网壳结构的形式与选型	86
131	第三节	网壳结构设计一般原则	91
131	第四节	网壳结构的基本理论和分析方法	93
131	第五节	网壳结构的稳定性	94
141		思考题	97
141	<b>第二章</b>	<b>组合网壳结构</b>	98
141	第一节	组合网壳结构的概述	98
141	第二节	组合网壳的形式与分类	99
141	第三节	组合网壳的计算方法	100
141	第四节	组合网壳的节点构造	101
141		思考题	102
141	<b>第三章</b>	<b>空腹网壳结构</b>	103

00	第一节 空腹网壳结构的概述 .....	103
12	第二节 空腹网壳结构的形式和分类 .....	104
23	第三节 空腹网壳结构的施工 .....	105
12	思考题 .....	106
14	<b>第四章 斜拉网格结构</b> .....	107
00	第一节 斜拉网格结构的概念和特点 .....	107
50	第二节 斜拉网格结构的形式和分类 .....	109
38	第三节 斜拉网格结构的选型 .....	111
02	第四节 斜拉网格结构的计算方法 .....	112
02	第五节 斜拉网格结构的施工 .....	113
10	思考题 .....	113
10	..... 圣斯特的斜拉索网壳结构 可一第	
	<b>第四篇 索杆张力结构</b> .....	115
30	<b>第一章 索杆张力结构概述</b> .....	117
33	第一节 索杆张力结构的定义和特点 .....	117
00	第二节 索杆张力结构的形式和分类 .....	117
70	第三节 索杆张力结构的发展与工程应用 .....	119
70	第四节 索杆张力结构的体系分析 .....	122
57	第五节 索杆张力结构的分析方法 .....	123
77	思考题 .....	124
20	<b>第二章 张弦梁结构</b> .....	125
08	第一节 张弦梁结构概述 .....	125
	第二节 张弦梁结构的形式和分类 .....	128
18	第三节 张弦梁结构的计算方法 .....	129
38	第四节 张弦梁结构的节点形式 .....	132
28	第五节 张弦梁结构的施工 .....	134
08	思考题 .....	135
10	<b>第三章 张拉整体结构</b> .....	136
00	第一节 张拉整体结构的概述 .....	136
10	第二节 张拉整体结构的形态 .....	138
70	第三节 张拉整体结构的特点 .....	141
30	思考题 .....	142
20	<b>第四章 索穹顶结构</b> .....	143
00	第一节 索穹顶结构的概念和特点 .....	143
001	第二节 索穹顶结构的形式和分类 .....	147
101	第三节 索穹顶结构的理论分析 .....	150
301	第四节 索穹顶结构的节点设计和整体张拉技术 .....	152
001	第五节 索穹顶结构的施工 .....	153

思考题	153
<b>第五章 弦支穹顶结构</b>	154
第一节 弦支穹顶结构的概念和特点	154
第二节 弦支穹顶结构的形式和分类	158
第三节 弦支穹顶结构的计算方法	160
第四节 弦支穹顶结构的施工方法	161
思考题	162
<b>第六章 环形张力索桁结构</b>	163
第一节 环形张力索桁结构的概述	163
第二节 环形张力索桁结构的分析	164
第三节 环形张力索桁结构的施工	165
思考题	166
<b>第七章 点支式玻璃幕墙结构</b>	167
第一节 点支式玻璃幕墙结构概述	167
第二节 点支式玻璃幕墙的组成	169
第三节 点支式玻璃幕墙支承结构的形式与分类	171
第四节 点支式玻璃幕墙的分析与设计	173
第五节 点支式玻璃幕墙支承结构的施工	175
思考题	179
<b>第五篇 膜结构</b>	181
<b>第一章 膜结构概述</b>	183
第一节 膜结构的概念	183
第二节 膜结构的发展和应用状况	183
第三节 膜结构的特点	192
第四节 非织物类膜结构——ETFE 膜结构	193
思考题	196
<b>第二章 膜结构的形式与选型</b>	197
第一节 膜结构的形式和分类	197
第二节 膜结构的选型	199
思考题	200
<b>第三章 膜结构的荷载与一般设计原则</b>	201
第一节 荷载与作用	201
第二节 荷载效应的组合	202
第三节 一般设计原则	202
思考题	206
<b>第四章 膜结构的材料</b>	207
第一节 国内外膜材发展的现状	207



## 目 录

第二节 膜材的种类	208
第三节 膜材的基本性能	209
思考题	210
第五章 膜结构的施工	211
思考题	211
第六篇 开合屋盖结构	213
第一章 开合屋盖结构的概念和特点	215
第一节 开合屋盖结构的概念	215
第二节 开合屋盖结构的发展和应用状况	215
第三节 开合屋盖结构的特点	218
思考题	219
第二章 开合屋盖结构的形式和分类	220
第一节 按开合频率分类	220
第二节 按开合方式分类	220
第三节 按结构体系分类	222
第四节 按受力特性分类	223
第五节 按其他方式分类	224
思考题	224
第三章 开合屋盖结构的计算方法	225
第一节 建筑设计	225
第二节 结构设计	226
第三节 安全设计	230
思考题	230
第四章 开合屋盖结构的施工	231
思考题	231
参考文献	232

# 第一篇 空间结构综述



# 第一章 空间结构的概念

空间结构是相对于平面结构而言的。

平面结构所承受的荷载以及由此产生的内力和变形都被考虑为二维的，即处在同一个平面内，比如梁、桁架、拱等结构都属于平面结构。见图 1.1 中的桁架结构：对于水平荷载，如风、地震作用来说，结构的横向刚度较小，纵向刚度较大，为了保证结构的承载力，通常取横向刚架来计算，这时就认为该结构是平面结构。下面简要介绍一下最简单的平面结构——单层刚架。

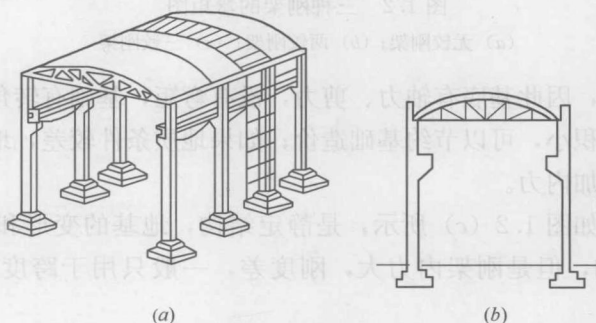


图 1.1 单层刚架布置图

(a) 整个结构；(b) 横向平面刚架

## 第一节 单层刚架

### 一、受力特点

梁柱刚性连接的结构称为刚架（柱脚可以刚接，也可以铰接）。

刚架是以横向受弯为主的结构，有轴力，但是以弯矩为主（梁柱刚接的相互约束减少了梁跨中弯矩和柱内的弯矩）。

### 二、类型及适用范围

#### 1. 按结构形式分类

(1) 无铰刚架：如图 1.2 (a) 所示，是三次超静定结构，刚度好，结构内力小，但是基底内力大，有轴力、剪力、弯矩，需要的基底面积大，因此基础造价高；如果地质条件较差，地基会产生不均匀沉降，刚架内会产生附加内力，基础受力会更加复杂，因此地质条件较差时，应尽量不采用无铰刚架。

(2) 两铰刚架：如图 1.2 (b) 所示，是一次超静定结构，刚架内弯矩比无铰刚架大，



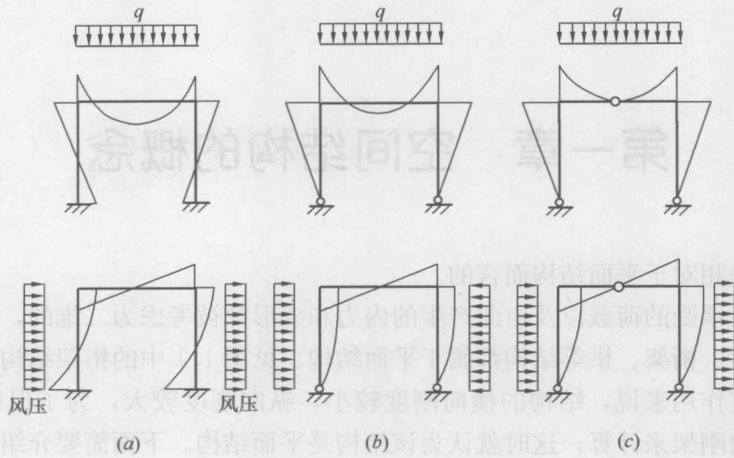


图 1.2 三种刚架的弯矩图

(a) 无铰刚架；(b) 两铰刚架；(c) 三铰刚架

由于柱脚与基础铰接，因此基底有轴力、剪力，没有弯矩，基础有转角对刚架内力也没有影响，需要的基底面积小，可以节约基础造价；如果地质条件较差，地基会产生不均匀沉降，刚架内会产生附加内力。

(3) 三铰刚架：如图 1.2 (c) 所示，是静定结构，地基的变形和基础的不均匀沉降对刚架内力没有影响，但是刚架内力大，刚度差，一般只用于跨度较小或地基较差的情况。

## 2. 按材料分类

(1) 胶合木刚架：利用短薄的板材拼接而成，不受原木尺寸及缺陷的限制，具有较好的防腐和耐燃性能，可以提高生产效率。构造简单、造型美观、方便运输和安装。缺点：跨度小、承载能力小。

(2) 钢刚架：分为实腹式和格构式两种。

实腹式适用于跨度不大的结构，常做成两铰式，截面形状一般采用焊接工字形，也有少数情况会采用 Z 形，制作、安装都很方便。当跨度和荷载都较大时，梁、柱都可以采用变截面，刚架梁在弯矩较小的位置改变截面，无铰刚架的柱脚和柱顶弯矩都较大，不采用变截面的方式，两铰刚架和三铰刚架的刚架柱可以按一定斜率改变截面，做成楔形截面，柱脚处截面小，柱顶处截面大。

格构式适用于跨度和荷载都较大的情况，具有刚度大、用钢量省的特点。可以采用无铰刚架，当跨度较大时也可以采用两铰刚架和三铰刚架。

以上两种形式的刚架都可以在支座水平面内设拉杆，并施加预应力，使刚架梁产生反拱和卸荷力矩。

(3) 钢筋混凝土刚架：一般适用于跨度不大于 18m，高度不大于 10m 的无吊车或吊车荷载不大于 100kN 的结构，最大跨度为 30m。

钢筋混凝土刚架的截面形式一般是矩形，为了减轻自重，也可以做成空心截面、工字形截面或空腹式截面。为了减少截面尺寸，增大建筑使用面积，也可以采用预应力混凝土

刚架, 预应力混凝土刚架的最大跨度可以达到 50m。

### 3. 按建筑体型分类

有平顶、坡顶、拱、单跨和多跨等形式。

## 第二节 空间结构的优点和分类

空间结构的荷载、内力、变形都必须被考虑为三维的, 即作用于空间而不是平面内。比如框架结构, 梁与柱实际上组成一个空间刚架, 不能简化为平面结构, 必须在三维空间内整体计算, 这种结构就是通常所说的空间结构。

### 一、空间结构的优点

1. 自重轻。目前大部分空间结构都采用钢材、膜材等制作, 使结构自重大大减轻。
2. 便于工业化生产。空间结构的构件可在工厂制作, 非常适合标准化、商品化生产, 在工地上可以很快地拼装起来, 不需要复杂的技术。
3. 刚度好。这是由于空间结构具有三维特性, 所有构件都能充分受力形成。另外, 空间结构能很好地承受不对称荷载或较大的集中荷载, 结构平面布置具有较大的灵活性, 因此空间结构特别适合在大跨度的屋盖上使用。
4. 造型美观。目前建筑艺术上的一种趋势是使结构构件外露, 空间结构恰好能满足这样的视觉效果。

### 二、空间结构的分类

空间结构分为: 薄壳结构、空间网格结构、索杆张力结构、膜结构、开合屋盖结构、现代新型空间结构等。

### 思考题

1. 平面结构与空间结构有什么区别?
2. 单层刚架的受力特点是什么?
3. 无铰刚架、两铰刚架、三铰刚架分别有什么优缺点?
4. 空间结构可以分为哪几类?



图 1.6 某大型建筑空间结构



图 1.7 某大型建筑空间结构

## 第二章 空间结构的发展史

### 第一节 古代空间结构

在人类古老的建筑中就有空间结构的痕迹。例如,图 1.3 所示我国半坡遗址的居屋是一个原始的空间骨架,图 1.4 所示北美印第安人始祖的棚屋,以枝条搭成的穹顶与现代网壳结构极其相似。古代人类利用仿生原理,把蛋壳、蜂窝、鸟类的头颅、山洞等天然空间结构加以利用,不仅改善了生活条件,还更好地理解和发展了空间结构。

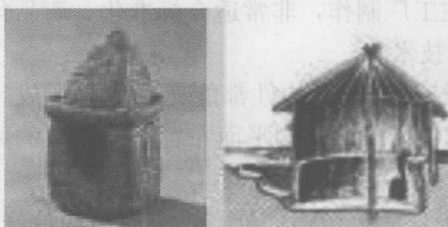


图 1.3 我国半坡遗址的居屋



图 1.4 北美印第安人的棚屋

在人类历史上空间结构的发展是缓慢的,直到欧洲文艺复兴时代所出现的教堂建筑,虽然以砖石构成的穹顶又厚又重,但是仍具有重要的意义,可以认为是空间结构发展的重要阶段。

图 1.5 所示圣彼得大教堂,是现在世界上最大的教堂,总面积  $2.3 \text{ 万 m}^2$ ,主体建筑高  $45.4 \text{ m}$ ,长约  $211 \text{ m}$ ,最多可容纳近 6 万人同时祈祷。登教堂正中的圆穹顶部可眺望罗马全城;在圆穹顶内的环形平台上,可俯视教堂内部,欣赏圆穹顶内壁的大型镶嵌画。砖石穹顶自重达到  $6400 \text{ kg/m}^2$ 。

古罗马人利用石料或砖建造了大量的圆形或圆柱形穹顶,用做宗教活动场所,但是跨度都不大,一般为  $30 \sim 40 \text{ m}$ ,穹顶的厚度与跨度之比为十分之一左右。并且,早期的穹顶自重都很大。

图 1.6 和图 1.7 所示建于公元  $120 \sim 124$  年的罗马万神庙是早期穹顶的典型代表,正



图 1.5 圣彼得大教堂



图 1.6 罗马万神庙外景

面的 16 根圆柱让人联想到古希腊建筑。殿堂建造比例协调, 计算十分精确: 直径与高度相等, 约 43m; 大圆顶的基座从总高度一半的地方开始建起, 殿顶圆形曲线继续向下延伸形成的完整球体恰巧与地相接; 拱门分担了整体的重量, 整个殿堂内没有一根柱子。这是建筑史上的奇迹, 表现出古罗马的建筑师们高超的建筑知识和深奥的计算方法。

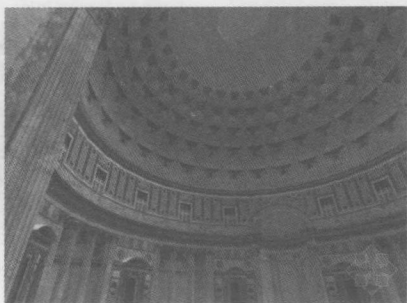


图 1.7 罗马万神庙内景

万神殿还是第一座注重内部装饰胜于外部造型的罗马建筑。神殿入口处的两扇青铜大门为至今犹存的原物, 高 7m, 是当时世界上最大的青铜门。藻井装饰着美丽的雕刻, 圆形屋顶上开有直径为 9m 的天窗, 既有采光和计时的实用功能, 又营造出一种庄严、肃穆的气氛。

## 第二节 薄壳结构的出现和发展

由于先进建筑材料——钢铁与混凝土的诞生, 20 世纪初期钢筋混凝土薄壳结构开始兴建, 应该算是现代空间结构开始发展并且走向蓬勃发展的动力。

钢筋混凝土薄壳结构是曲面的薄壁结构, 按曲面生成的形式分为筒壳、圆顶薄壳、双曲扁壳和双曲抛物面壳等。

图 1.8 所示悉尼歌剧院是丹麦建筑师乌松之作, 悉尼歌剧院的外形犹如即将乘风出海的白色风帆, 与周围景色相映成趣。歌剧院白色屋顶是钢筋混凝土建造的薄壳屋顶, 由一百多万片瑞典陶瓦铺成, 并经过特殊处理, 因此不怕海风的侵袭, 屋顶下方就是悉尼歌剧院的两大表演场所——音乐厅 (Concert Hall) 和歌剧院 (Opera Theater)。阳光照射后, 歌剧院闪耀着光芒和海上闪耀着的波光相辉映, 歌剧院成为澳洲的地标。

图 1.9 所示我国 1959 年建成的北京火车站屋面也采用了双曲抛物面薄壳结构, 表面几何形状是一双曲抛物面。图 1.10 所示 1664 年建成的高雄圣保罗教堂, 采用反曲抛物面薄壳屋顶。

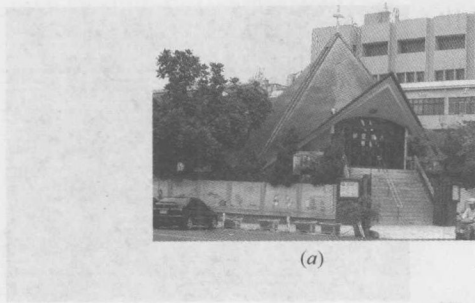


图 1.8 悉尼歌剧院

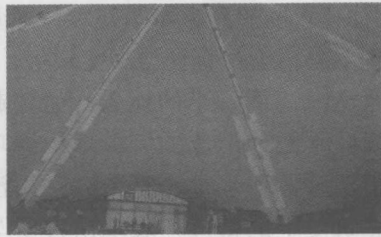


图 1.9 1959 年建成的北京火车站





(a)



(b)

图 1.10 高雄圣保罗教堂

(a) 外景; (b) 内景

随着力学的发展,薄壳结构在技术水平和结构形式上取得了很大进展。美国在 20 世纪 40 年代建造的兰伯特圣路易市航空港候机室,由三组 11.5cm 厚的现浇钢筋混凝土壳体组成,每组是两个圆柱形曲面壳体正交,并切割成八角形平面状,相交处设置采光带。两个圆柱形曲面相交线做成突出于曲面上的交叉拱,壳体交叉拱的建筑造型简洁、别致。

20 世纪 40 年代末,奈尔维设计了连续拱形薄壳结构,奈尔维是钢丝网水泥壳体的发明人。这种材料就是在数层重叠的钢丝网上涂抹数层水泥砂浆制成,性能类似钢材,抗拉强度远远超过普通钢筋混凝土。它可以作薄壁曲面预制构件,也可作模板。奈尔维曾经用它造游艇、建仓库。奈尔维在 1935~1942 年为意大利空军设计的 8 座飞机库(图 1.11),这些飞机库都用钢筋混凝土网状落地筒拱。图 1.12 所示 1950 年建造的都灵展览馆的波形装配式薄壳屋顶建筑,也是奈尔维的杰作。

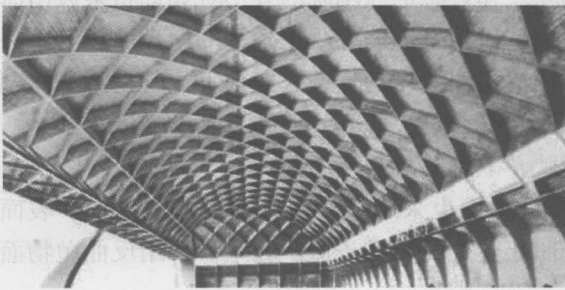


图 1.11 奈尔维设计的飞机库

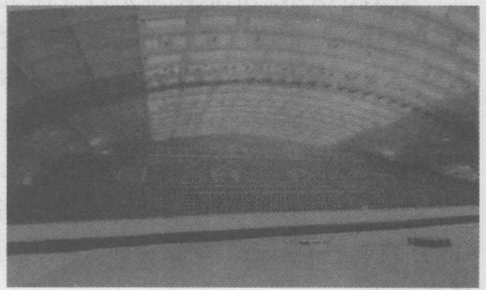


图 1.12 意大利都灵展览馆

图 1.13 是 1957 年罗马为举办奥林匹克运动会而建的罗马小体育馆,屋面采用钢筋混凝土肋形球壳,屋顶直径 59.13m,在现代建筑史上占有重要地位。

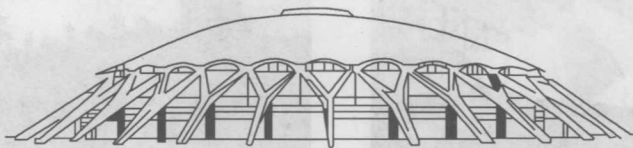


图 1.13 罗马小体育馆

薄壳结构在我国的工程应用不多,始建于 1955 年,1957 年建成开放的北京天文馆(图 1.14),屋顶采用钢筋混凝土薄壳结构,球壳直径为 25m,厚度只有 6cm。