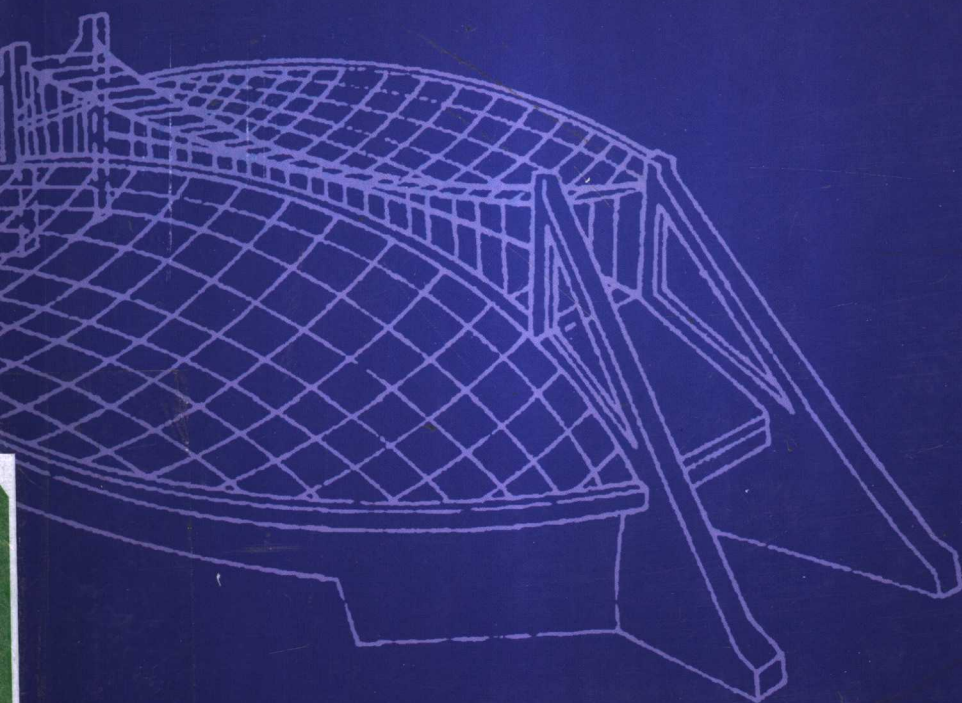


◎董石麟 主审
◎杜文风 张慧 主编

空间结构

SPACE STRUCTURE



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

TU201/44

2008

空间结构

◎杜文风 张慧 主编

◎董石麟 主审



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

本书分为3篇，共21章。第1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2篇对发展较为成熟的网架和网壳结构分别进行了详细论述，可使读者对网架结构和网壳结构的理论分析与工程设计有全面的学习。第3篇对组合网架结构、空腹网壳结构、斜拉网格结构、张弦梁结构、弦支穹顶结构、索穹顶结构、膜结构、开合结构、特种结构这九种新型空间结构进行了具体讲述，可使读者对这些新型空间结构的结构形式、受力特征、工程应用和基本分析方法有所了解。

本书注重基本概念、基本理论和基本方法的讲述，可作为土木工程专业专科生、本科生和结构工程专业研究生的选修课教材使用，也可供设计、施工等领域的人员自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

空间结构/杜文风,张慧主编. —北京:中国电力出版社,2008

ISBN 978-7-5083-6941-9

I. 空… II. ①杜…②张… III. 空间结构 IV. TU399

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第034380号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

责任编辑:关童 电话:010-58383245 E-mail: guan_tong@cepp.com.cn

责任印制:陈焊彬 责任校对:崔燕

北京博图彩色印刷有限公司印刷·各地新华书店经售

2008年4月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·18.75印张·465千字

定价:39.80元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话(010-88386685)

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。因此，空间结构已逐渐成为建筑专业人员必须了解和学习的—门新学科。

为了使学校的教学适应祖国建设事业的需要，紧跟科技和社会发展的步伐，提高学生的专业素质，为土木工程专业的本科生和结构工程专业研究生开设“空间结构”课程是必要的。但鉴于目前国内外论述空间结构的书籍多为专著，专业性和研究性较强，不适合用作教材，因此，编写了这样—本注重基本概念、基本理论和基本方法的《空间结构》。本书的编写—方面满足了教学的需要，另—方面也为非从事空间结构方向研究的人员学习提供—本合适的参考书。

全书分为3篇，共21章。第1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2篇对发展较为成熟的网架和网壳结构分别进行了详细论述，可使读者对网架和网壳结构的理论分析及工程设计有全面的学习。该部分内容在讲述网架、网壳结构概念和理论的基础上，提供了4个具体工程的设计实例，对初学者将大有裨益。第3篇对组合网架结构、空腹网壳结构、斜拉网格结构、张弦梁结构、弦支穹顶结构、索穹顶结构、膜结构、开合结构、特种结构这九种新型空间结构进行了具体讲述，可使读者对这些新型空间结构的结构形式、受力特征、工程应用和基本分析方法有所了解。同时在对具体结构的讲述中，也简单介绍了相应的制作安装、施工方法等内容。

本书由杜文风同志、张慧同志主持编写。杜文风同志编写了第2章、第6章、第7章、第10章、第12~14章和第21章，张慧同志编写了第3~5章和第15章，袁玉卿同志编写了第16~20章，宋晓同志编写了第1章，王永锋同志编写了第8章和第9章，刘磊同志编写了第11章。在编写过程中，我们借鉴了有关专家学者的资料，在此—并致谢。特别感谢董石麟院士为本书进行了审稿，同时向浙江大学的高博青教授深表感谢，他们为本书的编写提出了宝贵意见。

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。

编 者

目 录

第 1 篇 空间结构总论

第 1 章 空间结构的概念和发展	3
1.1 空间结构的概念	3
1.2 空间结构的发展历史	4
1.3 空间结构的发展规律	17
1.4 空间结构的发展方向	19
第 2 章 空间结构的分类方法	20
2.1 概述	20
2.2 按受力特点划分	20
2.3 按单元划分	23

第 2 篇 空间网格结构

第 3 章 空间网格结构及其特点	27
3.1 空间网格结构	27
3.2 空间网格结构的特点	27
第 4 章 网架结构概述	29
4.1 网架结构的形式与分类	29
4.2 网架结构的支承及选型	34
4.3 网架结构的荷载和作用	38
4.4 网架结构的杆件与节点	40
4.5 网架结构主要几何尺寸	45
第 5 章 网架结构的分析理论	47
5.1 基本假定和计算模型	47
5.2 网架结构分析计算方法及其分类	48
5.3 网架结构的有限元法——空间桁架位移法	50
第 6 章 网架结构的抗震分析	58
6.1 概述	58
6.2 网架结构的振动方程和动力特性	58
6.3 网架结构的地震反应分析	61
6.4 几种网架结构的动内力分布规律	64
6.5 网架结构的简化计算	65

第 7 章 网架结构的工程设计	68
7.1 概述	68
7.2 网架结构设计的基本过程	68
7.3 网架结构的设计实例一	70
7.4 网架结构的设计实例二	75
第 8 章 网壳结构概述	87
8.1 概述	87
8.2 网壳结构的形式与选型	90
8.3 网壳结构设计一般原则	95
8.4 各类派生的新型网壳结构	98
第 9 章 网壳结构的基本理论与分析方法	100
9.1 概述	100
9.2 网壳结构分析的计算方法及其分类	101
9.3 网壳结构分析的有限单元法——空间刚架位移法	103
第 10 章 网壳结构的抗震分析	113
10.1 概述	113
10.2 网壳结构的动力特性	113
10.3 网壳结构的地震反应分析	114
10.4 几种网壳结构的动内力分布规律	116
第 11 章 网壳结构的稳定性	120
11.1 概述	120
11.2 网壳结构的失稳机理	120
11.3 网壳结构稳定性分析的基本方法	122
11.4 各种类型网壳结构的稳定性分析	127
11.5 网壳结构稳定性实用设计方法	134
第 12 章 网壳结构的工程设计	137
12.1 概述	137
12.2 网壳结构的设计实例一	137
12.3 网壳结构的设计实例二	142

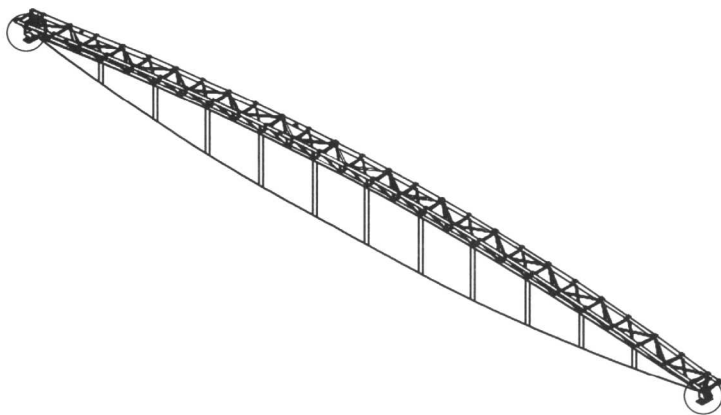
第 3 篇 新型空间结构

第 13 章 组合网架结构	155
13.1 组合网架结构的概念和特点	155
13.2 组合网架结构的形式和分类	157
13.3 组合网架结构的计算方法	159
13.4 组合网架结构的施工	161
第 14 章 空腹网壳结构	164
14.1 空腹网壳结构的概念和特点	164
14.2 空腹网壳结构的形式和分类	165

14.3	空腹网壳结构的结构分析	167
14.4	空腹网壳结构的施工	177
第15章	斜拉网格结构	178
15.1	斜拉网格结构的概念和特点	178
15.2	斜拉网格结构的形式和分类	181
15.3	斜拉网格结构的计算方法	182
15.4	斜拉网格结构的施工	186
第16章	张弦梁结构	188
16.1	张弦梁结构的概念和特点	188
16.2	张弦梁结构的形式和分类	191
16.3	张弦梁结构的计算方法	192
16.4	张弦梁结构的施工	204
第17章	弦支穹顶结构	207
17.1	弦支穹顶结构的概念和特点	207
17.2	弦支穹顶结构的形式和分类	212
17.3	弦支穹顶结构的计算方法	213
17.4	弦支穹顶结构的施工	217
第18章	索穹顶结构	220
18.1	索穹顶结构的概念和特点	220
18.2	索穹顶结构的形式和分类	222
18.3	索穹顶结构的理论分析	230
18.4	索穹顶结构的施工	234
第19章	膜结构	236
19.1	膜结构的概念和特点	236
19.2	膜结构的形式和分类	238
19.3	膜结构的计算方法	240
19.4	膜结构的施工	245
第20章	开合结构	247
20.1	开合结构的概念和特点	247
20.2	开合结构的形式和分类	250
20.3	开合结构的计算方法	253
20.4	开合结构的施工	263
第21章	特种空间结构	264
21.1	概述	264
21.2	人行天桥网架	266
21.3	高层、高耸网架	269
主要参考文献		285

第 1 篇

空间结构总论



第 1 章 空间结构的概念和发展

1.1 空间结构的概念

国际《空间结构》杂志前主编马考夫斯基 (Z. S. Makowski) 说：“在 20 世纪 60 年代空间结构还被认为是一种兴趣但仍属陌生的非传统结构，然而今天已被全世界广泛接受。”

所谓空间结构是相对于平面结构而言的。一般来说日常所采用的梁、桁架、拱等都属于平面结构，它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。空间结构的荷载、内力、变形则是必须被考虑为三维的，即作用于空间而非平面内。如图 1-1 所示为框架结构，梁与柱实际上组成一个空间刚架。如图 1-1 (a) 所示，对水平荷载如风荷载和地震力来说，结构的横向刚度较小，纵向刚度较大。为保证结构的承载力，通常截取横向刚架来进行计算，如图 1-1 (b) 所示，这时即认为该结构是平面结构。如图 1-2 所示的空间网架结构，不能简化为平面结构，必须在三维空间内整体计算，这种结构即为我们所说的空间结构。

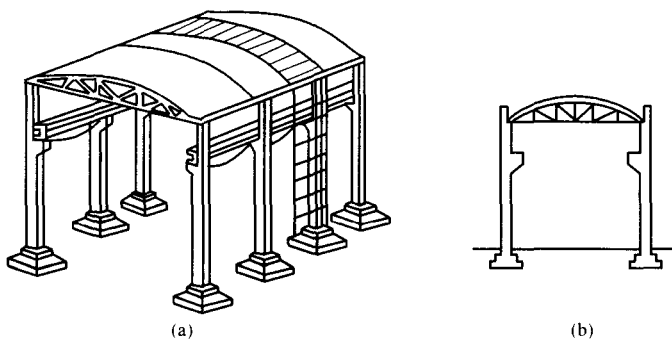


图 1-1 平面结构简例

(a) 整个结构；(b) 横向平面刚架

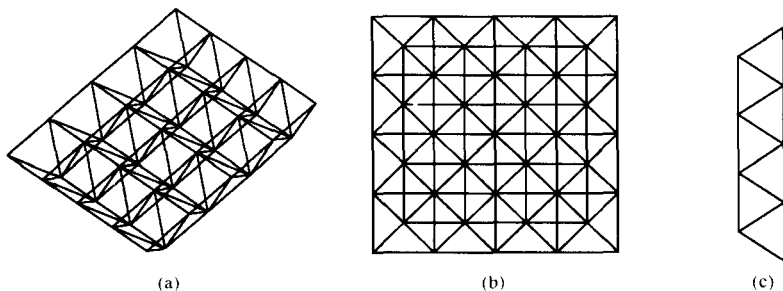


图 1-2 空间网架结构简例

(a) 轴测图；(b) 平面图；(c) 侧面图

空间结构的优点一般表现为

(1) 自重轻。这是空间结构最主要的优点，由于它的材料在空间分布，荷载作用下力的传递基本上是轴向拉力或压力，因而任何杆件中的材料都能被充分利用。此外，目前大部分空间结构都采用钢材、膜材等制作，这都使结构自重大大减轻。

(2) 便于工业化生产。因为空间结构的构件通常可在工厂中制作，这些简单的预制构件非常适合标准化及商品化，在工地上可以很快地安装起来，不需要复杂的技术。同时，大规模工业化生产也导致它的造价比较低。

(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这一特点形成的。因此，空间结构能很好地承受不对称荷载或较大的集中荷载。此外在结构平面及支撑柱的布置上也有较大的灵活性，这些特点使空间结构特别适合在大跨度屋盖上使用。

(4) 造型美观。为满足建筑上的需要，空间结构可以提供许多外形和形式。目前建筑艺术方面有一种值得注意的趋势，这种趋势就是将结构构件外露，作为建筑的一种直观表达形式，而空间结构恰好能满足这样的视觉效果。

正因为空间结构具有这样的优点，才使其在大型体育馆、歌剧院、会展中心、候机厅等大跨度公共建筑设施中得到广泛应用，这些建筑通常成为一个国家和地区的标志性建筑，为世人所瞩目。如图 1-3 所示是我国为 2008 年北京奥运会而兴建的主体育场鸟巢方案；如图 1-4 所示是 1996 年美国亚特兰大奥运会主场馆乔治亚索穹顶方案。这些建筑物的建造同时也极大的推动了空间结构的发展和受关注程度。

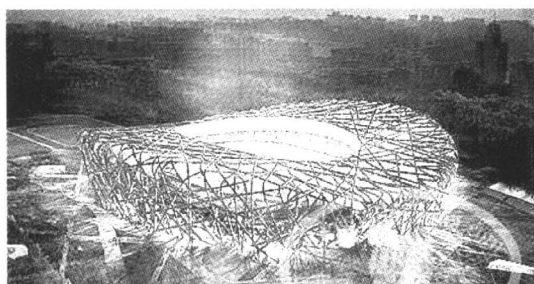


图 1-3 北京奥运会主体育场鸟巢方案



图 1-4 美国亚特兰大奥运会主场馆乔治亚索穹顶方案

1.2 空间结构的发展历史

1.2.1 古代空间结构

在人类古老的建筑中早就已经出现了空间结构的痕迹，例如我国半坡遗址的居屋是一个原始的空间骨架，如图 1-5 所示，北美印第安人从他们始祖继承下来的棚屋，其以枝条搭成的穹顶与现代网壳结构则有惊人的类似，如图 1-6 所示。古代的人类通过详细观察，发现自然界中存在大量受力特性良好、形式简洁美观的天然空间结构，如蛋壳、蜂窝、鸟类的头颅、山洞等，他们利用仿生原理加以利用，不仅改善了生活条件，还更好地理解和发展了空间结构。



图 1-5 半坡遗址的居屋

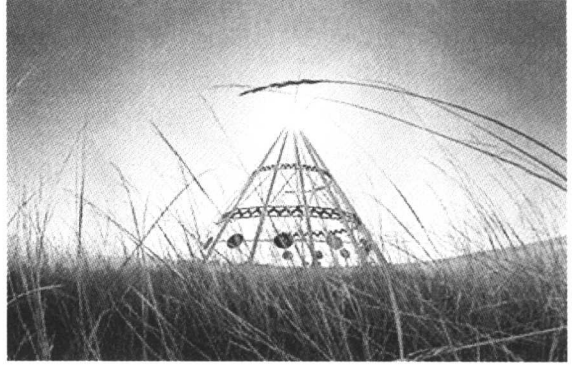
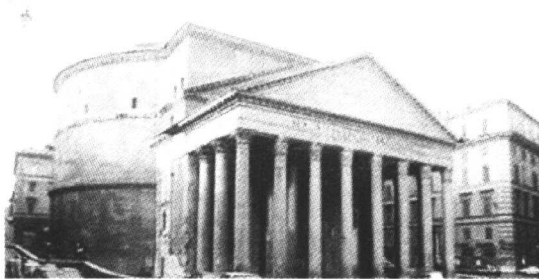


图 1-6 印第安人的棚屋

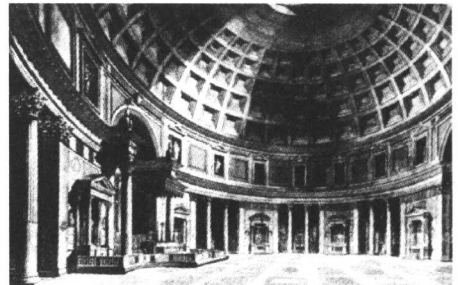
其后，空间结构同其他科学技术一样，在人类历史上的发展是缓慢的，直至欧洲文艺复兴时代所出现的教堂建筑，虽然以砖石构成的穹顶又厚又重，但仍具有重要的意义，可认为此时是空间结构发展的重要阶段。古罗马人利用石料或砖建造了大量圆形或圆柱形穹顶，用作宗教活动场所，这些穹顶的跨度都不大，一般为 30~40m，穹顶的厚度与跨度之比为十分之一左右，因此早期的穹顶自重很大。如图 1-7 所示的圣彼得大教堂砖石穹顶自重达到 $6400\text{kg}/\text{m}^2$ 。建于公元 120~124 年的罗马万神庙（Pantheon）是早期穹顶的典型代表，该穹顶跨度达到 44m，基面为圆形（见图 1-8）。



图 1-7 圣彼得大教堂新景



(a)



(b)

图 1-8 罗马万神庙（Pantheon）

(a) 外景；(b) 内景

1.2.2 薄壳结构的出现和发展

现代空间结构的出现，应该从 20 世纪初期兴建的钢筋混凝土薄壳算起，这主要归功于先进建筑材料——钢铁与混凝土的诞生。第二次世界大战之后，百废待兴，使空间结构走向蓬勃发展的康庄大道。

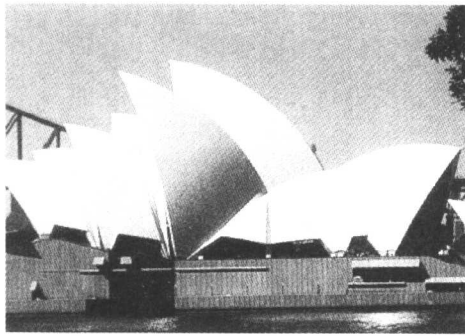


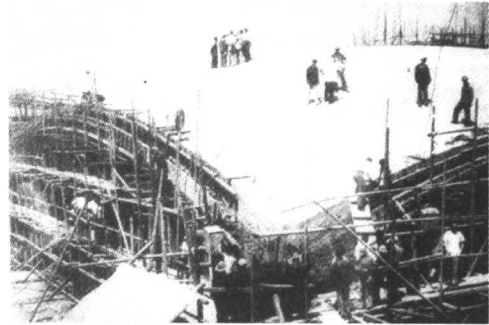
图 1-9 悉尼歌剧院

钢筋混凝土薄壳结构为曲面的薄壁结构，按曲面生成的形式分筒壳、圆顶薄壳、双曲扁壳和双曲抛物面壳等。壳体充分利用材料强度，同时又能将承重与围护两种功能融合为一，因其容易制作，稳定性好，易适应建筑功能和造型需要，故应用较为广泛。如图 1-9 所示丹麦建筑师乌松之作悉尼歌剧院，在钢筋混凝土建造的薄壳屋顶上覆盖着陶瓷屋瓦，阳光照射后，歌剧院闪耀着光芒和海上闪耀着波光，歌剧院成为澳洲的地标。我国 1959 年建成的北京火车站屋面也采用了薄壳结构，表面几何形状为一双曲抛物面，如图 1-10 所示。1964 年建成的高雄圣保罗教堂，采用反曲薄壳屋顶，如图 1-11 所示。

火车站屋面也采用了薄壳结构，表面几何形状为一双曲抛物面，如图 1-10 所示。1964 年建成的高雄圣保罗教堂，采用反曲薄壳屋顶，如图 1-11 所示。



(a)



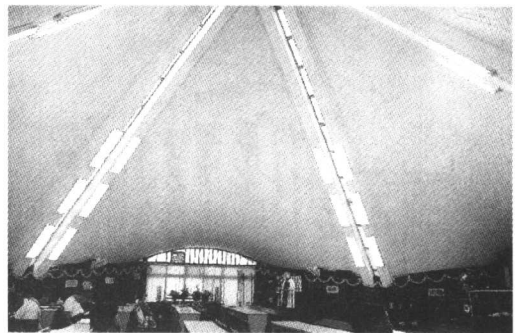
(b)

图 1-10 北京火车站屋面双曲抛物面薄壳

(a) 火车站近景；(b) 施工时的场景



(a)



(b)

图 1-11 高雄圣保罗教堂反曲薄壳屋顶

(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，由三组厚 11.5cm 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，相接处设置采光带。

两个圆柱形曲面相交线做成突出于曲面上的交叉拱，既增加了壳体强度，又把荷载传至支座。其支座为铰接点。加厚并带加劲肋的壳体边缘向上卷起，使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，1950年建造的都灵展览馆的波形装配式薄壳屋顶建筑便是其杰作（见图1-12）。我国1957年建成的北京天文馆，屋顶球壳直径为25m，厚度只有6cm（见图1-13）。1957年罗马为举办奥林匹克运动会而建的罗马小体育馆，其屋顶直径达到59.13m，采用钢筋混凝土肋形球壳（见图1-14），在现代建筑史上占有重要地位。

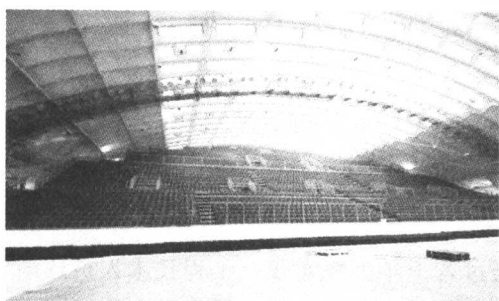


图 1-12 意大利都灵展览馆

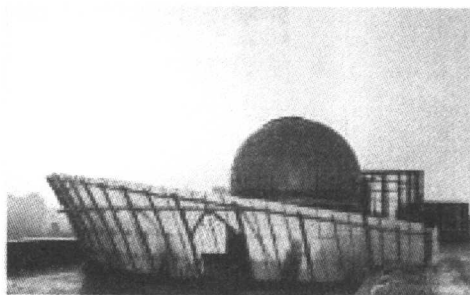
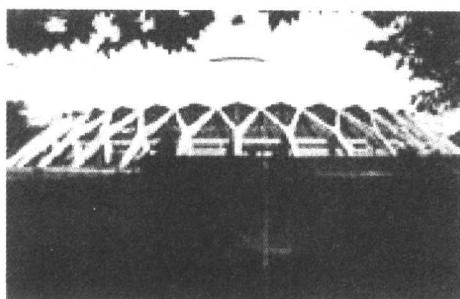
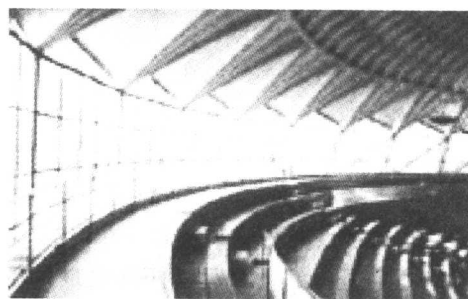


图 1-13 北京天文馆



(a)



(b)

图 1-14 罗马小体育馆

(a) 外景；(b) 内景

薄壳结构不但可以减轻自重，节约钢材、水泥，而且造型新颖流畅。但是，曲面壳体的显著的缺点是：模板制作复杂，不能重复利用，耗费木材，大跨度结构在高空进行浇筑和吊装也耗工费时。美国根赛特等人的分析表明，薄壳结构造价的60%耗费在施工成本上，因而影响了薄壳结构的应用。于是，用平面模板代替曲面模板，用折线代替曲线，由薄平板以一定角度相互整体联结而成的折板结构应运而生。

折板结构可认为是薄壳结构的一种，它是由若干狭长的薄板以一定角度相交连成折线形的空间薄壁体系。其跨度不宜超过30m，适于长条形平面的屋盖，两端应有通长的墙或圈梁作为折板的支点。常用有V形、梯形、H形、Z形等型式。我国常用为预应力混凝土V形折板，具有制作简单、安装方便与节省材料等优点，最大跨度可达24m。折板结构的折线形状横截面，大大增加了空间结构刚度，既能作梁受弯，又能作拱受压，且便于预制，因而得到广泛的发展。近年来在园林建筑中很多用V形折板拼成多功能的活泼造型的屋顶或小品，

如亭、榭、餐厅等。折板结构亦可用作车间、仓库、车站、商店、住宅、体育看台等工业与民用建筑的屋盖，福州长乐国际机场候机楼屋盖就采用了折板结构（见图 1-15）。



图 1-15 福州长乐国际机场折板结构

1.2.3 空间网格结构的兴起

钢筋混凝土薄壳结构尽管有诸多优点，但经过若干年工程实践，工程技术人员逐渐发现这种结构的缺点：钢筋混凝土薄壳施工时需要架设大量模板，工程量很大，施工速度较慢，工程造价很高。因而人们逐渐对之丧失兴趣，开始寻求新的结构构造形式。随着铁、钢材、铝合金等轻质高强材料出现及应用，富有想象力的工程师开始着力于穹顶结构各种杆件形式的发展。公认的“穹顶结构之父”——德国工程师施威德勒对穹顶网壳的诞生与发展起了关键性的作用。他在薄壳穹顶的基础上提出了一种新的构造形式，即把穹顶壳面划分为经向的肋和纬向的水平环线，并连接在一起，而且在每个梯形网格内再用斜杆分成两个或四个三角形。这样穹顶表面的内力分布会更加均匀，结构自身重量也会进一步降低，从而可跨越更大的空间。这样的穹顶结构实际上已经是真正的网壳结构，即沿某种曲面有规律的布置大概相同的网格或尺寸较小的单元，从而组成空间杆系结构。

在 20 世纪 50 年代后期以杆件组成的空间网格结构崭露头角。空间网格结构分为两种，平板形的称为网架结构，曲面形的称为网壳结构。例如，如图 1-16、图 1-17 所示分别为我国采用网架结构的首都机场四机位机库和采用双层球面网壳结构的天津新体育馆，它们是空间网格结构的典型代表。网架结构的出现晚于网壳结构。第一个平板网架是 1940 年在德国建造的，而此时传统的肋环型穹顶已有 100 多年的历史。

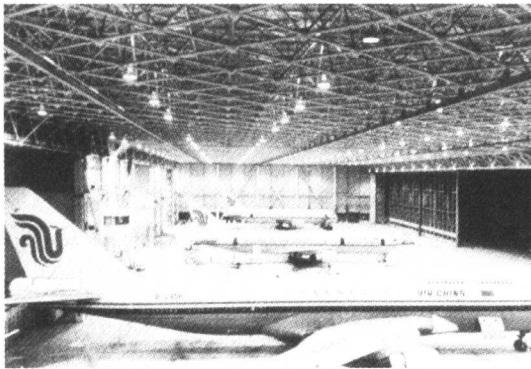


图 1-16 首都机场四机位机库



图 1-17 天津新体育馆

在众多形式的空间结构中，网架结构是近半个世纪以来在国内外得到推广和应用最多的一种形式。网架是以多根杆件按照一定规律组合而成的网格状高次超静定结构，杆可以由多种材料制成，如钢、木、铝、塑料等，尤以钢制管材和型材为主。20世纪60年代，计算机技术的发展和运用解决了网架力学分析的困难，使得网架结构迅速发展起来。

1964年，我国建成的第一个平板网架——上海师范学院球类房正放四角锥网架，跨度为 $31.5\text{m}\times 40.5\text{m}$ ，如图1-18所示。1967年建成的首都体育馆，采用正交斜放网架，其矩形平面尺寸为 $99\text{m}\times 112\text{m}$ ，厚6m，采用型钢构件，高强螺栓连接，用钢指标 $65\text{kg}/\text{m}^2$ ，如图1-19所示。1973年建成的上海万人体育馆采用圆形平面的三向网架，净跨达到110m，厚6m，采用圆钢管构件和焊接空心球节点，用钢指标 $47\text{kg}/\text{m}^2$ ，如图1-20所示。这些网架是早期成功采用平板网架结构的杰出代表。此后陆续建成的南京五台山体育馆、上海体育馆、福州市体育馆等，也都采用了网架结构。20世纪80年代后期北京为迎接1990亚运会兴建的一批体育建筑中，多数仍采用平板网架结构。

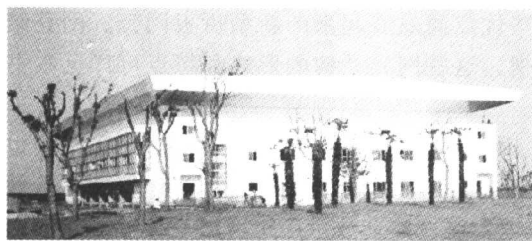


图 1-18 上海师范学院球类房正放四角锥网架



图 1-19 首都体育馆正交斜放网架

目前，我国网架结构的发展规模在全世界位居前列。网架结构在我国从20世纪80年代初开始发展，进入90年代开始普及。据统计，从20世纪90年代至今，我国网架结构每年约有1000余座工程，覆盖面积约150万平方米以上，而且目前仍然朝气蓬勃、经久不衰，健康发展。

网壳结构在第二次世界大战结束后开始重新流行并获得飞速发展。美国科学家——“全能设计师”巴克斯特·富勒起了极大的推动作用。另外列德雷尔、莱特、卡达尔及其他几位卓越的设计师对网壳结构的发展也做了很大的贡献。随着科学技术的快速发展和人们不懈的发明与创造，网壳结构无论在结构型式，还是在构造材料和计算方法上都取得了很大的发展。



图 1-20 上海万人体育馆圆形平面的三向网架

在最初阶段，网壳结构型式多为半球型，这是因为半球型网壳为同向曲率，易于设计、制造和施工，而且半球型网壳可以封闭和没有支柱，尤其是从造型上看起来雄伟、高大和美观。随后出现了肋环型和施威德勒型球面网壳。后来又出现了联方型球面网壳，这种网壳的网格是由两向斜交杆系构成的，它的基本单元是菱形。三向格子型球面网壳是在

球面上用三个大圆构成网格，形成比较均匀的三角型格子。其优点是结构的受力性能好，且易于标准化，可在工厂中大批量生产，经济性也很好，产生了许多优美的大跨度穹顶网壳。凯威特型球面网壳，又称平行联方型网壳。这种网壳综合了施威德勒型网壳、联方型网壳和三角形格子网壳分割的优点，其结构受力性能良好，尤其是在强烈风荷载和地震荷载作用下的受力性能更好，因此常用于大跨度结构。这种网壳在美国和日本广为流行，1973年7月建成的美国新奥尔良体育馆就是此种网壳的典型代表，其静跨为213m，矢高32m，可容纳观众72000人左右。富勒利用短程线的概念发明了短程线网壳。“短程线”这个术语来自地球测量语，即连接球面任意两点的最短距离。他认为这种网壳将是最轻的、强度最高的，同时又是最经济的结构。工程实践证明，短程线型网壳的网格划分规整均匀，杆件和节点的种类在各种球面网壳中是最少的，其杆件受力非常均匀，最适合在工厂中大批量生产，造价也最经济。

除了上述球面形状的网壳外，如果建筑平面是正方形或者矩形，特别是狭长平面时，常常会选用柱面网壳。有时也会把柱面网壳放在中间，而在两端用两个半球面网壳进行封闭，构成一个组合网壳。后来又出现了双曲抛物面型网壳，这种网壳结构形体优美。还有综合了钢筋混凝土折板、网格结构和壳体的一些优点而发展起来的新型折板网壳。网壳结构型式多种多样，近年来越来越受到人们的重视。这些网壳结构的形式和特点可详见本书第2篇的空间网格结构。

由于网壳结构与网架结构的生产条件相同，因此随着网架结构的迅速发展，网壳结构也具备了现成的基础，因而从20世纪80年代后半期起，当相应的理论储备和设计软件等条件初步完备，网壳结构就开始了在新的条件下的快速发展。建造数量逐年增加，各种形式的网壳，包括球面网壳、柱面网壳、鞍形网壳（或扭网壳）、双曲扁网壳和各种异形网壳相继被用于实际工程中。20世纪90年代中期建造了一些规模相当宏大的网壳结构。1994年建成的天津体育馆采用肋环斜杆型双层球面网壳（见图1-17），其圆形平面净跨108m，周边伸出13.5m，网壳厚度3m，采用圆钢管构件和焊接空心球结点，用钢指标 $55\text{kg}/\text{m}^2$ 。

20世纪90年代中后期兴建的一批有标志性的体育建筑中，多数采用了网壳结构。例如，1995年建成的黑龙江省速滑馆用以覆盖400m速滑跑道，其巨大的双层网壳结构由中央柱面壳部分和两端半球壳部分组成，轮廓尺寸 $86.2\text{m}\times 191.2\text{m}$ ，覆盖面积达 15000m^2 ，网壳厚度2.1m，采用圆钢管构件和螺栓球节点，用钢指标 $50\text{kg}/\text{m}^2$ （见图1-21）。1997年建成的长春五环万人体育馆平面呈桃核形，由肋环型球面网壳切去中央条形部分再拼合

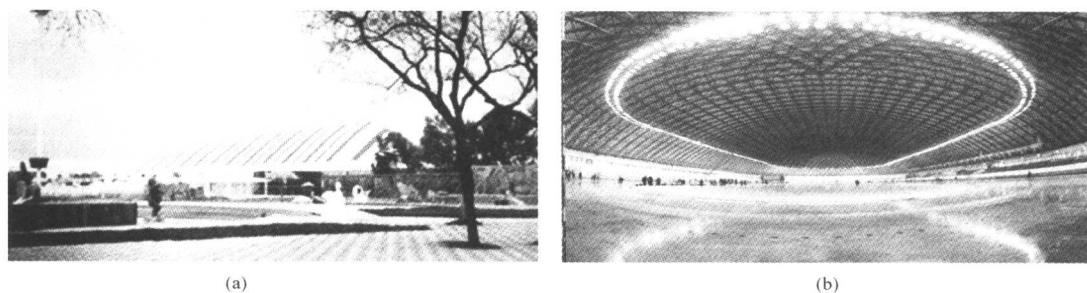


图 1-21 黑龙江省速滑馆

(a) 外景；(b) 内景