

全国高等院校**土木工程类**应用型系列规划教材

大跨度空间结构设计

孙建琴 主 编
李方慧 副主编
陈务军 主 审



科学出版社
www.sciencep.com

全国高等院校土木工程类应用型系列规划教材



大跨度空间结构设计

孙建琴 主 编
李方慧 副主编
陈务军 主 审



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书着重介绍了大跨度空间结构体系的分类、特点及工程应用,系统阐述了主要的大跨度结构体系分析理论和工程设计。全书内容包括绪论、网架结构、网壳结构、悬索结构和大跨度空间结构新体系,共五章。本书注重理论联系实际,分别对通用软件 SAP2000 和专业软件 MSTCAD 在空间结构分析中的应用进行了介绍。书中附有学习要点、小结和复习思考题与习题,书后附有常用的设计资料,另外还附带电子课件光盘。

本书可作为高等院校土木工程专业及相关专业的教学用书,也可供建筑设计人员和施工技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大跨度空间结构设计/孙建琴主编. —北京:科学出版社, 2009
(全国高等院校土木工程类应用型系列规划教材)

ISBN 978-7-03-025205-0

I. 大… II. 孙… III. 空间结构-结构设计-高等学校-教材
IV. TU330.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 141000 号

责任编辑:王晶晶 陈迅 / 责任校对:柏连海
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2009年8月第一次印刷 印张:13 3/4

印数:1—3 000 字数:309 000

定价:22.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

大跨度空间结构的设计、建造所采用的技术已成为衡量一个国家建筑水平的重要标志。大跨度空间结构以合理的受力及优美的造型在体育建筑、公共建筑,诸如展览馆、候机大厅、候机楼、会堂、大型室内游乐中心、商业中心、大型工业厂房、飞机库等得到了广泛的应用,许多宏伟而富有特色的大跨度建筑已成为当地的象征性标志和著名的人文景观。近几十年,科学技术的发展和生产力水平的大大提高,计算机的广泛应用,以及高强度材料和新型材料的出现,极大地促进了大跨度空间结构的发展,使越来越多的学者重视大跨度空间结构研究,这也对未来从事土木工程专业人员提出了更高的要求。本书力求较全面、较系统地反映大跨度空间结构的设计分析理论及工程应用,以适应当前形势的需要。

全书内容分为五章。第一章为绪论,介绍了大跨度空间结构的特点、分类、发展概况和研究历程,使学生对大跨度空间结构有一个总体认识。第二、三章分别讨论了网架和网壳结构形式,该部分为本书的重点内容,编写思路为结构形式—分析理论—设计计算,强调结构选型的重要性,注重基本概念和基本思路的介绍,强调设计中的构造设计。大跨度空间结构是高次超静定结构,精确的分析计算一般采用有限元分析方法,为适应这一要求,本书在介绍了有限元的基本计算步骤后,对通用分析软件 SAP2000 和专业分析设计 MSTCAD 在大跨度空间结构分析中的应用进行了介绍,便于学生尽快了解、认识和运用软件。第四章介绍了悬索结构的特点、形式、分析理论、设计要点。第五章讨论大跨度空间结构的新体系,内容包括组合网架、斜拉结构、拉索预应力网格结构、张弦结构、膜结构、张拉整体结构和开合结构,以反映当前新型空间结构的发展和工程应用,使学生对这些新型结构形式有所了解,达到拓宽学生知识面的目的。附录包括一些常用的设计资料,便于在设计中查阅。

本书的第一、二章、第五章的第 1~4 节、第 6、7 节和附录由孙建琴编写,第三、四章和第五章第 5 节由李方慧编写,全书由孙建琴统稿。本书编写中引用了许多专家的著述和研究成果,均用参考文献的方式附在书稿末尾,便于读者进一步参考。此外,本书在编写过程中得到兰州交通大学李从林教授的指导,本书成稿后经上海交通大学博士生导师陈务军教授主审,他们为本书提出了许多宝贵意见,作者在此表示衷心的感谢。

本书可作为高等院校高年级学生的教材和毕业设计参考书，也可作为研究、设计和施工单位的工程技术人员参考书。

日新月异的高新技术难以完全包括在本书之内，且由于作者水平有限，书中难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

编者

2009年4月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 空间结构的概念和特点	1
1.1.1 空间结构的概念	1
1.1.2 空间结构的特点	1
1.2 大跨度空间结构的分类	2
1.2.1 按受力特点划分	3
1.2.2 按单元划分	5
1.3 大跨度空间结构的发展概况和研究历程	6
1.3.1 空间结构的发展概况	6
1.3.2 空间结构的研究历程	15
小结	16
复习思考题与习题	16
第二章 网架结构	17
2.1 网架结构的形式与选型.....	17
2.1.1 网架结构的形式.....	17
2.1.2 网架结构的选型.....	25
2.2 网架的整体构造.....	26
2.2.1 网架结构的网格尺寸和网架高度.....	26
2.2.2 网架结构的起拱、屋面排水和容许挠度	27
2.3 网架结构的计算分析.....	29
2.3.1 网架结构的作用和作用效应组合.....	29
2.3.2 网架结构计算方法	33
2.3.3 网架的温度内力计算	46
2.3.4 网架的动力反应分析	48
2.3.5 网架的抗震构造要求	52
2.4 网架结构的杆件设计.....	53
2.4.1 杆件材料和截面形式	53
2.4.2 杆件的计算长度和容许长细比	54
2.4.3 杆件的容许最小截面尺寸	54
2.4.4 杆件设计	54
2.5 网架的节点及设计.....	55
2.5.1 网架结构节点的特性和类型	55

2.5.2 常用节点的设计	56
2.5.3 支座节点设计	64
2.6 网架的制作和施工	69
2.6.1 网架的制作	69
2.6.2 网架的拼装	70
2.6.3 网架的安装	71
2.7 网架(格)结构设计分析软件介绍	77
2.7.1 通用分析软件	77
2.7.2 专业分析软件	87
小结	91
复习思考题与习题	92
第三章 网壳结构	94
3.1 网壳结构分类	94
3.1.1 网壳结构的分类	94
3.1.2 球面网壳的网格划分	98
3.1.3 柱面网壳的网格划分	101
3.2 网壳结构设计基本原理	105
3.2.1 网壳结构设计基本要求	105
3.2.2 稳定性分析	107
3.3 网壳算例	111
3.4 防腐与防火	128
3.4.1 钢结构防腐涂装工程	128
3.4.2 钢结构防火涂装工程	130
小结	132
复习思考题与习题	132
第四章 悬索结构	133
4.1 悬索结构特点及受力分析	133
4.1.1 悬索结构特点	133
4.1.2 悬索结构的受力变形分析	133
4.2 悬索结构形式及结构选型	136
4.2.1 悬索结构形式	136
4.2.2 悬索结构选型	146
4.3 悬索结构的设计	147
4.3.1 初始形态分析	147
4.3.2 悬索结构抗风设计	148
4.4 悬索材料及锚具	160
4.4.1 索材料	160
4.4.2 锚具及钢拉杆	162

小结	165
复习思考题与习题	165
第五章 大跨空间结构新体系	166
5.1 组合网架	166
5.1.1 组合网架的特点和分类	166
5.1.2 组合网架的计算要点	168
5.1.3 组合网架的工程应用	168
5.2 斜拉结构	169
5.2.1 斜拉结构的特点和分类	169
5.2.2 斜拉结构的工程应用	171
5.3 拉索预应力网格结构	173
5.3.1 拉索预应力网格结构的特点和分类	173
5.3.2 拉索预应力网格的设计特点及工程应用	175
5.4 张弦结构	176
5.4.1 张弦结构的特点和分类	176
5.4.2 张弦结构的工程应用	179
5.5 膜结构	181
5.5.1 膜结构的特点和分类	182
5.5.2 膜结构的计算分析要点	183
5.5.3 膜结构的材料和节点构造	186
5.6 张拉整体结构	188
5.6.1 张拉整体结构的概念	188
5.6.2 索穹顶结构	189
5.7 开合结构	191
5.7.1 简述	191
5.7.2 开合结构的开合方式及工程应用	192
小结	195
复习思考题与习题	196
附录 常用的设计资料	197
一 管材的截面特性	197
二 轴心受压构件的整体稳定系数	201
三 螺栓球规格系列及代号	205
四 高强度螺栓抗拉极限承载力	205
五 焊接空心球产品代号及规格系列	206
主要参考文献	208

第一章 绪 论

学习要点:本章介绍了空间结构的概念、特点、分类,大跨度空间结构的发展和研究历程。理解空间结构的概念和优缺点,掌握空间结构的分类,了解空间结构的发展及未来的发展趋势,以对大跨度空间结构有一定的初步认识。

1.1 空间结构的概念和特点

1.1.1 空间结构的概念

为了满足社会生活和居住环境的需要,人们向建筑物提出要求,尽量减少内部的隔墙和柱子以提供更大的覆盖空间,如大型的集会场所、候机楼、工业厂房、体育馆、飞机库等,跨度要求很大,达几百米或更大。我们所熟知的平面结构如梁、桁架、平面刚架、拱等,单向受力,由于其结构形式的限制,很难跨越大的空间,从技术经济方面讲,也很难满足建筑平面和造型的要求,而解决这一难题就需要空间结构。所谓空间结构是指建筑结构的形体具有三维空间形状,在荷载作用下具有三维受力特性、呈立体工作状态的结构。例如,薄壳结构、网架结构、网壳结构如图 1.1 所示。观察自然界我们会发现许多空间结构,如蛋壳、乌龟壳、蚌壳、花生壳、各种植物种子的外壳等,是一种受力性能很好的空间结构(薄壳结构);蜂窝也是空间结构(空间网格结构);蜘蛛网属于索网结构;肥皂泡是典型的空间结构(充气薄膜结构)。从自然界的进化演变过程来看,以仿生原理来理解和发展空间结构形体有着特别重要的意义。人类在观察大自然中,创造了很多既经济又美观的空间结构为建造房屋所用。

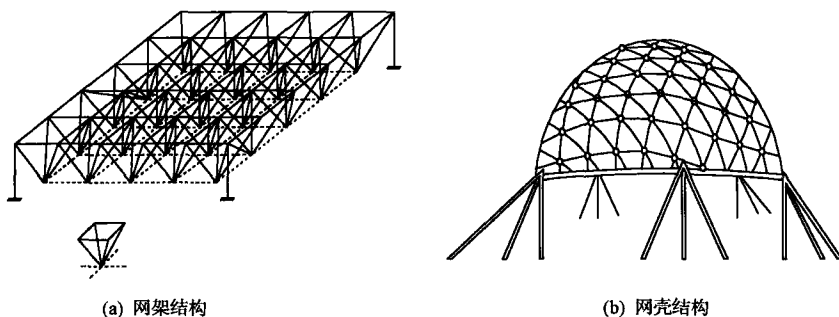


图 1.1 空间结构

1.1.2 空间结构的特点

空间结构是相对于平面结构而言的。平面结构的特点是结构与承受的荷载在同一平

面内,具有二维受力特性。结构或构件抗力,主要依赖截面尺寸和材料的强度。而空间结构必须在三维空间内按照空间几何特性承受荷载,不仅仅依赖截面尺寸和材料的性能,而且充分利用三维几何构成,形成合理的受力形态,发挥不同材料的性能优势,以适应不同建筑造型和功能的需要,跨越更大空间。从结构受力分析与空间构成的角度来讲,不能分解为平面结构体系。实际上,空间结构和平面结构没有严格的界限,所有的结构都是空间结构。但某些结构,如图 1.2 所示的单层工业厂房,根据受力特点可简化为平面结构计算。

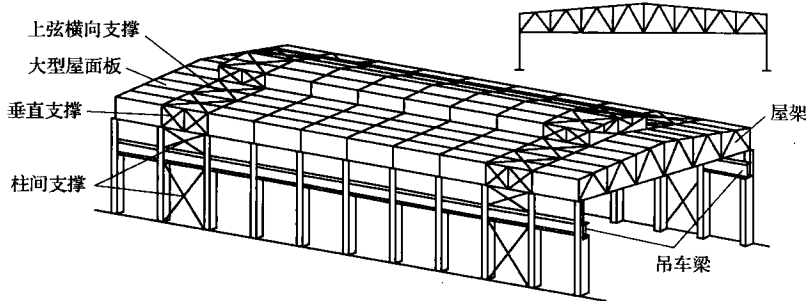


图 1.2 钢结构厂房

空间结构的特点:

- 1) 空间结构具有合理形体,三维受力特性,内力均匀,结构整体刚度大,抗震性能好。对集中荷载的分散性较强,能很好的承受不对称荷载或较大的集中荷载。
- 2) 自重轻,经济性好。目前大部分空间结构都采用钢材、膜材等制作,轻质高强材料的运用使结构自重大大减轻。
- 3) 便于工业化生产。空间结构的构件通常在工厂中制作,在工地上可以较快地安装。
- 4) 形式多样化,造型美观。空间结构的形式丰富多彩,千变万化,个性鲜明,为建筑师的自由创作提供了广阔的想象空间。
- 5) 有较大的跨越能力,为建筑功能提供较大的空间。
- 6) 建筑、结构和使用功能的统一。

1.2 大跨度空间结构的分类

大跨度空间结构的发展方兴未艾,新的结构形式不断涌现,但是长期以来对大跨度空间结构的形式与分类并没有统一的标准,习惯上将大跨度空间结构分为薄壳结构、网架结构、网壳结构、悬索结构和膜结构五大类。后来,有的学者在五大类的基础上,将平板型的网架结构和曲面型的网壳结构合并总称为网格结构,将悬索结构和膜结构合并总称为张拉结构,这样大跨空间结构归并为三大空间结构。然而,以上分类方法难以概括近年来发展中出现的新结构,也难以反映新结构的构成及其特点。因此,有的学者提出了新的划分方法,从受力特点和基本单元两方面来划分。

1.2.1 按受力特点划分

按大跨度空间结构的受力特点来划分,可分为刚性空间结构、柔性空间结构和杂交结构体系三大类。

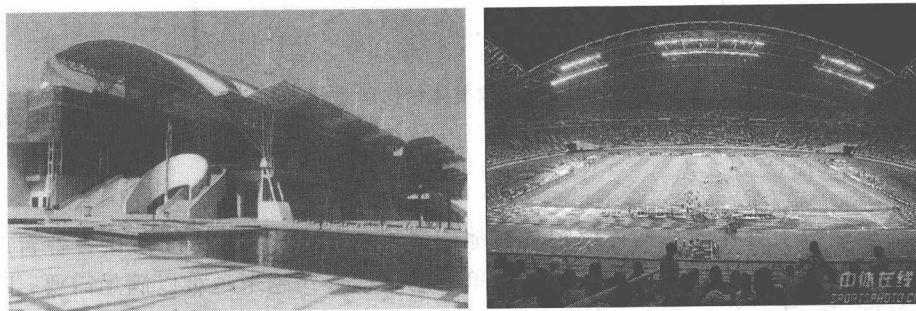
1. 刚性空间结构体系

刚性空间结构体系是指刚性构件构成的具有很好刚度的空间结构体系,包括薄壳结构、空间网格结构及立体桁架结构。

薄壳结构多为钢筋混凝土整体浇灌而成,将承重结构和围护结构的两种功能融为一体。由于其曲面特征,壳体的主要内力沿中曲面作用且主要受压,充分利用混凝土材料的抗压性能好的特点。但是钢筋混凝土薄壳在施工中耗用模板及脚手架较多,曲面壳体的模板制作复杂,所需劳动量较大,费用高,高空浇筑或吊装费工费时。因此,薄壳结构的应用近年来有所减少。

空间网格结构一般是由钢杆件按一定规律组成的网格状高次超静定空间杆系结构。空间网格结构根据外形分为两大类,一类称为网架,其外形呈平板状[图 1.1(a)];另一类称为网壳,其外形呈曲面状[图 1.1(b)]。网架结构大多由杆件组成,具有多向受力的性能,空间刚度大,整体性强,并具有良好的抗震性能,制作安装方便,是我国空间结构中发展最广的结构形式。目前,我国可以说是网架生产大国,年生产规模、建筑面积成为世界之最。网壳结构是曲面形的网格结构,兼有杆系结构和薄壳结构的特点,主要优点是覆盖跨度大、整体刚度好、结构受力合理,有良好的抗震性能,材料耗量低,且造型美观,富于表现,有丰富的文化内涵。

立体桁架结构是以钢管通过焊接有机连接而成的一种空间结构(图 1.3)。立体桁架结构是在网架、网壳结构的基础上发展起来的,与网架、网壳结构相比具有独特的优越性和实用性。该结构省去一些纵向弦杆和球节点,并具有简明的结构传力方式,可满足各种不同的建筑形式的要求,尤其是构筑圆拱和任意曲线形状更有优势。桁架自身刚度大,施工方便。钢管截面各向等强度,回转半径大,对受压受扭均有利。钢管端部封闭后,内部不易锈蚀,表面也不易积灰尘和水,具有较好的防腐性能。目前,国内外都流行一种波浪



(a) 南京会展中心

(b) 沈阳奥体中心

图 1.3 立体桁架结构

形曲面、树状支承,以及直接交汇的相贯节点的立体桁架体系。我国深圳机场、首都机场、上海浦东机场、南京会展中心[图 1.3(a)]及沈阳奥体中心[主拱全长 360m,为全国最大的立体桁架结构,图 1.3(b)]就是典型的例子。

2. 柔性空间结构

柔性空间结构体系是指由柔性构件构成,如钢索、薄膜等,通过施加预应力而形成的具有一定刚度的空间结构体系。结构的形体由体系内部的预应力来决定。包括悬索结构、膜结构和张拉整体结构等。

悬索结构以一系列单向受拉的索作为主要承重构件,拉索按一定规律组成各种不同形式的体系,并悬挂在相应的支承结构上。悬索一般采用由高强度钢丝组成的钢丝束、钢绞线或钢丝绳,也可采用圆钢筋或带状的薄钢板。悬索结构通过索的轴向拉伸来抵抗外荷载的作用,可以最充分地利用钢材的强度。

膜结构是通过对膜施加预张力而形成的结构体系,主要受力构件为双向受拉的膜。膜结构中充气膜是以空气作为受压结构,使膜产生张力而承受外荷载,包括气承式和气肋式两种。气承式充气膜结构是在薄膜覆盖的空间内充气,利用内外部的气压差承受荷载。气肋式充气膜结构是在一定直径的薄膜管内充气,使充气管形成构架来承受荷载。

张拉整体结构是一组互相独立的受压钢杆与一套连续的预应力受拉索相互联系,不依赖任何外力的作用,受拉索与受压构件自应力、自平衡,实现自支承的结构体系(图 1.4)。张拉整体结构的思路,在结构中尽可能地减少受压状态而使结构处于连续的张拉状态,使压杆的孤岛存在于拉杆的海洋中。它的几何形状和刚度与体系内部的预应力大小直接有关。张拉整体结构具有构造合理、自重小、跨越空间能力强的特点,在实际工程中展示了强大的生命力和广阔的应用前景。

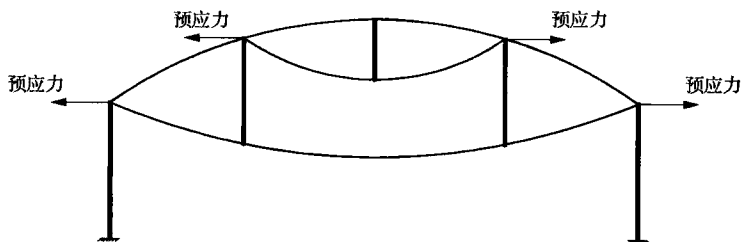


图 1.4 张拉整体结构示意图

3. 杂交空间结构体系

在工程结构中现存的结构体系都具有他们自身的优点,但也往往存在着各自的局限性,特别是在结构跨度较大的情况下,传统单一的结构形式越来越难以满足需要,于是,一种形式新颖、协同工作的“杂交结构体系”应运而生。所谓“杂交结构”(HS—hybrid structures)是将几种不同类型的结构体系组合成为一种新的结构体系,它能进一步发挥不同类型结构的优点,克服缺点,丰富建筑造型,改善总体力学性能,可以更经济、更合理

的跨越较大空间。因此,杂交结构越来越受到人们的关注。杂交体系按照其组合方式的不同可分为以下三类:第一类为刚性结构体系之间的组合,如组合网架、组合网壳、拱支网壳等。第二类为柔性结构体系与刚性结构体系的组合,属于半刚性结构,这种又可分为斜拉结构、拉索预应力结构、张弦结构、支承膜结构等。从大量的工程实践中可以发现,拉索是一个十分活跃的单元体,具有与各类结构进行广泛组合的可能性。第三类为柔性体系之间的组合,如柔性拉索与索网的杂交,柔性拉索与膜材之间的组合形成索-膜结构。索-膜组合结构体系由于膜材的日益增多,近年来发展较快,结构的主要受力构件为高强度受拉钢索和轻质的受拉膜材,通过施加预应力,合理的改变构件的受力分布,提高结构的整体抵抗外部效应的性能,充分发挥材料的潜力,容易跨越较大的跨度,具有良好的经济性。“索穹顶”体系就是最近发展起来的一种新型结构体系,如美国亚特兰大 Georgia 穹顶(1992年),平面尺寸 $186\text{m}\times 235\text{m}$ (图 1.5)。最为典型的例子就是千禧之年世纪之交的千年穹顶(The Millenium Dome)(图 1.6),1997年6月开始拟建,仅用一年时间施工,1998年6月举行升顶仪式,该馆位于英国伦敦泰晤士河南岸格林尼治,是当今世界跨度最大的悬挂式膜结构,穹顶酷像飞碟,直径 320m ,穹顶由12根高 100m 桅杆塔柱通过总长度 70km 的钢缆绳悬挂起来的,桅杆塔柱布置在直径 200m 的圆周上,支承在由四根杆组成的四角锥形底座上。总之,杂交结构潜在的优势和应用方面的多样性,可以预期“杂交”将是今后空间钢结构发展和创新的重要途径。

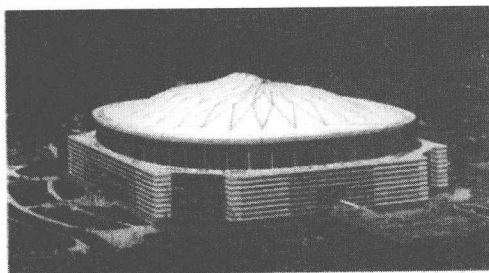


图 1.5 美国亚特兰大 Georgia 穹顶

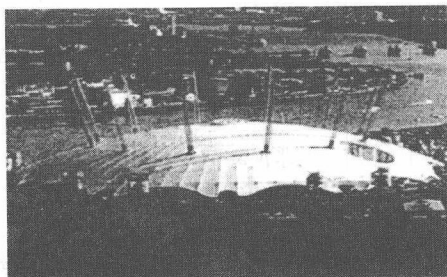


图 1.6 英国千年穹顶

1.2.2 按单元划分

有学者提出将大跨度空间结构按照基本单元种类来划分,因为结构的计算主要依靠计算机,采用有限元方法,不同的结构,计算采用不同单元,因此,按单元划分结构比较合理。将组成大跨度空间结构的基本单元归纳为五种,即板壳单元、梁单元、杆单元、索单元和膜单元。一种单元或多种单元集合便构成各种各样具体形式的空间结构。由五种基本单元根据国内外已建成的大跨度空间结构工程归纳为以下的结构形式,见表 1.1。按单元划分结构,能较好的反映不同结构的受力特点。例如,网壳结构中,单层网壳由梁单元组成,而双层网壳由杆单元组成,这样单双层网壳分属于两种不同的结构,这与我国新颁布的《网壳结构技术规程》是一致的。另外,这种划分对尚未出现的新结构形式留有较大空间。

表 1.1 大跨度空间结构分类

单元形式		结构形式				
I	板壳单元	薄壳结构	折板结构	波纹拱结构	I	
		带肋薄壳	带肋折板	I+II		
		悬挂薄壳	I+IV			
II	梁单元	单层网壳	空腹网架	空腹网壳	树状结构	II
		组合网壳	空腹夹层板	II+I		
		局部双层网壳	II+III			
		张弦梁结构	拱支网壳	II+III+IV		
III	杆单元	网架结构	双层网壳	立体桁架	III	
		张弦立体桁架	斜拉网架(壳)	拉索预应力网架(壳)	III+IV	
		组合网架	III+I+II			
IV	索单元	悬索结构	索网结构	IV		
		拉索网架	索桁结构	悬索-桁架结构	张拉整体结构	IV+III
		索穹顶结构	IV+III+V			
V	膜单元	气承式膜结构	气肋式膜结构	V		
		骨架支承膜结构	V+II(或 III)			
		张拉膜结构	V+III+IV			

1.3 大跨度空间结构的发展概况和研究历程

1.3.1 空间结构的发展概况

1. 早期空间结构

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就是一个原始的空间骨架,而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则有惊人的类似。其后,空间结构的发展比较缓慢。直至欧洲文艺复兴时代,出现的教堂建筑以砖石构成的穹顶,虽然又厚又重,但在某种程度上仍体现了空间作用。例如,位于意大利首都罗马万神庙是早期穹顶的典型代表(图 1.7),平面为圆形,直径 43.3m;古罗马的圣彼得大教堂砖石穹顶(图 1.8),其自重达 $6400\text{kg}/\text{m}^2$,直径 42m。

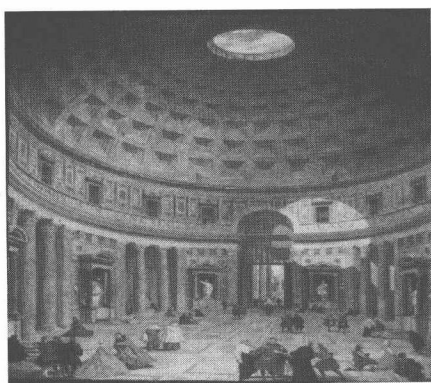


图 1.7 罗马万神庙



图 1.8 圣彼得大教堂

2. 当代空间结构的发展

空间结构近十几年来以其异乎寻常的速度发展起来,20 世纪人类的活动更加走向开放,人们已不再闭关自守,而是不断扩大大国与国、洲与洲以至全世界范围的交流。这种需求必然会影响人类建设的格局。在各种交流活动中,体育比赛无疑是一种最激动人心的方式。因此,奥林匹克体育竞赛馆、世界杯足球比赛场就在世界各地崛起。学术、文化、艺术与商业上的交流促使一些大城市建成了规模庞大的会议展览中心。此外,各种临时性与永久性的博览会,也要求提供上万平方米的面积。由于航空事业的发展,大规模的候机大厅与飞机库就本世纪诞生。体育场馆、娱乐中心、展览、会议厅、影剧院、车站、航空港、工业厂房、仓储、煤棚,以及飞机库这些建筑都毫无例外地要求一个大的活动空间,因而跨度大、自重轻、造型富于变化就成为这些建筑的共同特征,有时还要求所围护的空间能够随时开启与闭合。目前大跨度结构的建造和所采用的技术已成为衡量一个国家建筑水平的重要标志,许多宏伟而富有特色的大跨度建筑已成为当地的象征性标志和著名的人文景观。

(1) 薄壳结构

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,这应该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,大量的建筑使空间结构走向蓬勃发展的康庄大道。例如,丹麦建筑师 Jorn Utzon 设计的悉尼歌剧院(图 1.9)和我国的北京火车站(图 1.10),屋面均采用钢筋混凝土薄壳结构。薄壳结构的壳体很薄,壳体的厚度与中曲面曲率半径之比小于 $1:20$,当外荷载作用时,由于其曲面特征,壳体的主要内力——薄膜力沿中曲面作用,而弯曲内力和扭转内力较小。这样就可充分发挥钢筋混凝土的材料潜力,达到较好的经济效益。但是钢筋混凝土薄壳结构费时,同时大量消耗模板,大跨度结构在高空进行浇筑质量难以保证,最终造价并非真正经济,因此,人们采用钢筋混凝土薄壳的热情就大大减弱。

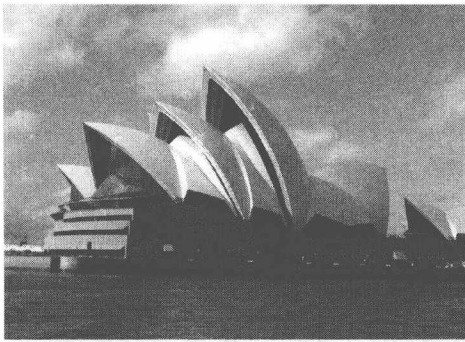


图 1.9 悉尼歌剧院

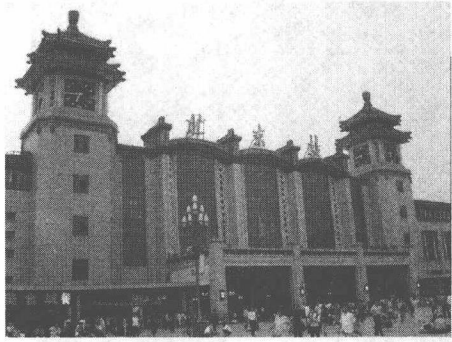


图 1.10 北京火车站

(2) 网架结构

20 世纪 50 年代,人们认识到使用钢材、钢索、增强纤维布的优点,空间结构得到迅猛发展。50 年代后期以杆件组成的空间网格结构崭露头角,其中平板形网架、曲面形网壳结构的杆件以钢、木或铝合金制成,通过节点组合成网状结构。我国从 1964 年在上海师范学院球类房第一次采用网架结构(平面尺寸为 $31.4\text{m} \times 40.5\text{m}$ 的正放四角锥网架)以来,已建成了为数众多的各种形式的网架结构。中国在空间结构领域获得了长足的进步,不论是工程应用或理论研究方面均在国际上占有一席之地,网架结构的应用范围与面积已位居世界各国前列。例如,北京燕山石油化工总公司东风化工厂的 4 个总面积为 $40\,000\text{m}^2$ 的主厂房也采用了 $18\text{m} \times 18\text{m}$ 柱网为基本单元的螺栓球节点网架。这些多跨大柱距的工业厂房采用网架结构都取得较好的技术经济效果。1967 年建造的首都体育馆(图 1.11),矩形平面尺寸 $99\text{m} \times 112\text{m}$,网架高 6m ,采用两向正交斜放网架,用钢量 $65\text{kg}/\text{m}^2$ 。这个大跨度网架的成功兴建大大推动了网架在体育建筑中的应用。上海体育馆(1973 年建成,见图 1.12),圆形平面, $110\text{m} \times 6\text{m}$ 的平行弦桁架,用钢量 $47\text{kg}/\text{m}^2$,这样万人级的体育馆乃是大跨度网架结构中的佼佼者。此后一些省市的主体体育馆几乎无一例外地采用了网架结构。为 1990 年在北京举行的第十一届亚运会所建设的 13 项大中型体

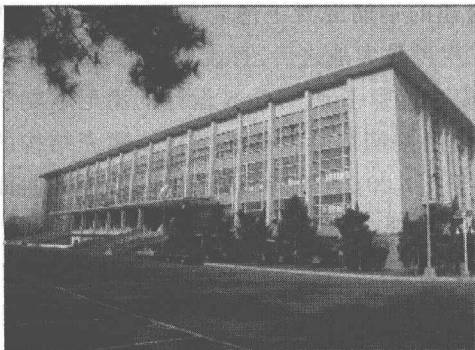


图 1.11 首都体育馆



图 1.12 上海体育馆

育馆中,有半数以上采用了网架结构,可见其影响之深远。首都机场四机位机库(1996年建成,图 1.13)(153+153)m \times 90m,采用三层斜放四角锥网架,焊接球节点平板网架,其跨度规模之大,在国际上是数一数二的,这是我国在钢结构方面的又一大殊荣。机场的钢结构屋盖由于建筑上的要求比较高,更是绚丽多彩。

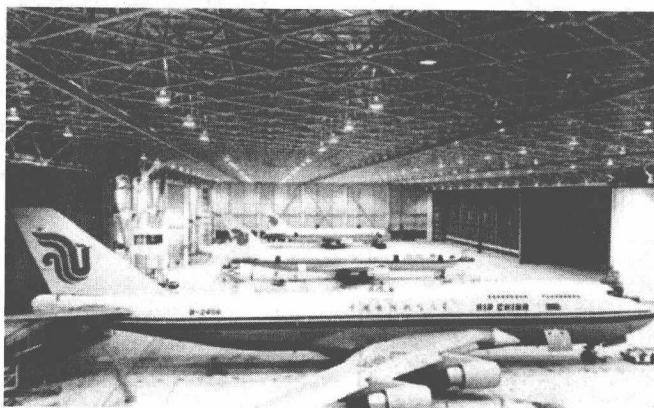


图 1.13 首都机场四机位机库

(3) 网壳结构

近年来,可能由于平板型网架的外形过于单调,失去了建筑师们的偏爱。另外,由于计算机的迅猛发展使曲面形网壳的设计与制作大为方便,因而在体育建筑中网壳的应用有逐步上升的趋势,在体育馆建设中颇有取代网架的趋势。1994年建成的天津市体育馆,放射状布置的正放四角锥双层球形网壳(图 1.14),直径有 108m,网壳厚度为 3m;北京石景山体育馆平面为三角形,边长 99.7m,屋盖由三片四边形的双曲抛物面双层网壳组成,支承在三叉形格构式刚架和钢筋混凝土边梁上(1989年建成,见图 1.15);为 1996年冬季亚运会建造的黑龙江速滑馆(图 1.16),主体结构采用由中央圆柱面与两端半圆球面组成的双层网壳,轮廓尺寸为 86.2m \times 191.2m,支承在下部三角形框架上,覆盖了 200m 速滑跑道。世界上跨度最大的单层网壳是 1996年建成的日本名古屋体育馆(图 1.17),圆形建筑的直径为 229.6m,支承在看台框架柱顶的屋盖直径则有 187.2m,采用边长约 10m 的钢管构成的三向网格,每个节点上都有六根杆件相交,采用直径为 1.45m 的加肋圆环,钢管杆件与圆环焊接,成为能承受轴向力与弯矩的刚性节点。2000年澳大利亚悉尼主体育场,可容纳 11 万人,为两个 220m \times 70m 的双曲抛物面网壳。2008年北京奥运会老山自行车赛馆位于北京石景山区老山街,屋盖采用双层球面网壳结构,结构鸟瞰图如图 1.18 所示,跨度 149.536m,矢高 14.69m,矢跨比约为 1/10。网壳支承于倾斜人字形钢柱及柱顶环形桁架之上,柱顶支承跨度为 133.06m,网格尺寸约 4m,网壳厚度 2.8m,为跨度的 1/47.5,屋盖以金属屋面板为主,中部设玻璃采光带,该网壳为目前我国跨度最大的双层球面网壳结构。