

全国普通高等院校 土木工程类
实用创新型 系列规划教材

空间结构

张文福 主 编
王秀丽 副主编
尹德钰 主 审



科学出版社

www.sciencep.com

中国科学院教材建设专家委员会教材建设立项项目

全国普通高等院校土木工程类**实用创新型**系列规划教材



空 间 结 构

张文福 主 编
王秀丽 副主编
尹德钰 主 审

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书全面、系统地介绍空间结构的设计分析理论和工程实践成果。全书共五章,第一章主要介绍空间结构的概念、分类、组成和发展概况,以及空间结构设计方法和步骤;第二、三、四章分别介绍网架结构、网壳结构和悬索结构,编写思路为:结构选型—计算与分析—构造和设计,还对 ANSYS 在空间结构分析中的应用进行了简要介绍;第五章为其他空间结构简介,包括膜结构、张弦结构等一些新型结构。

本书可作为高等院校土木工程专业教学用书,也可作为研究、设计及施工单位的工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

空间结构 / 张文福主编. —北京:科学出版社,2005
(全国普通高等院校土木工程类实用创新型系列规划教材)
ISBN 7-03-015744-3

I. 空… I. 张… III. 空间结构-高等学校-教材 IV. TU399

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 065555 号

责任编辑:童安齐 何舒民 / 责任校对:耿 耘
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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2005年8月第一次印刷 印张:15 1/4

印数:1—3 000 字数:350 000

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:010-62136131 编辑部电话:010-62137026(HA03)

全国普通高等院校土木工程类实用创新型
系列规划教材

编 委 会

主 任 霍 达

副主任 (按姓氏笔画排序)

周 云 阎兴华 童安齐

秘书长 张志清

委 员 (按姓氏笔画排序)

白晓红 石振武 刘继明 何浙浙 何舒民

张文福 张延庆 张志清 沈 建 周 云

周亦唐 宗 兰 徐向荣 阎兴华 翁维素

傅传国 程赫明 韩建平 童安齐 雷宏刚

霍 达

前 言

空间结构是在建筑工程中得到广泛应用的一种结构形式,它不仅可以应用于跨度较大的体育馆、展览馆、大会堂、候车厅、航空港等大型公共建筑,还可以用于飞机装配车间、飞机库、单层工业厂房建筑中,也被广泛应用于中小型建筑工程中。

近几十年来,由于社会发展和经济建设的需要,我国的空间结构发展迅猛,新材料、新结构、新技术的不断涌现,促使空间结构的“更新换代”速度加快,这种发展对未来工程师的知识结构提出了更高的要求。为使高等院校土木工程专业的教学能更好地适应这种快速发展的需要,有必要重新编写一本教材,力图较全面、系统地反映空间结构的设计分析理论和工程实践成果。

与平面结构相比,空间结构的形式多样、内容丰富。本书在教学内容的取舍和编排方面均作了一些新的尝试,以更好地突出重点和难点,便于读者掌握空间结构分析与设计的要点。

全书共分五章。第一章为总论,主要介绍空间结构的概念、分类、组成和发展概况,以及空间结构设计方法和设计步骤,使学生对空间结构有一个总体的认识。第二~四章分别介绍网架结构、网壳结构和悬索结构。这三章是本书的重点内容,编写思路为:结构选型—计算与分析—构造和设计。在计算与分析方面,注重介绍一些基本概念清晰、工程实用的简化分析方法,还对 ANSYS 在空间结构分析中的应用进行了简要介绍。为了加深学生对有关理论和设计方法的理解和认识,书中安排了适量的计算与设计例题。第五章为其他空间结构简介,内容包括膜结构、张弦结构等一些新型结构,以反映空间结构的一些最新进展、拓宽学生知识面为目的。附录包括一些常用的设计资料。

本书的第一、二、四章和附录由张文福编写,第三和第五章由王秀丽编写。刘文洋等参加了部分文稿编排、插图绘制、例题解答工作。全书由张文福统稿。书中引用了国内外部分机构和文献作者的有关技术和图片资料;太原理工大学尹德钰教授在百忙之中对本书初稿进行了认真审阅,并提出许多宝贵意见,在此一并致谢。

本书可作为高等院校高年级学生的选修课教材和毕业设计参考书,也对研究、设计和施工单位的工程技术人员有参考价值,若诸多读者能从中获益,则编者幸甚。

由于本书涉及面广,书中论述难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

目 录

前言	
第一章 总论	1
1.1 空间结构的概念、分类及组成	1
1.1.1 空间结构的概念和特点	1
1.1.2 空间结构的分类	3
1.1.3 空间结构的组成	4
1.2 空间结构的发展概况	5
1.2.1 网架结构	5
1.2.2 网壳结构	6
1.2.3 悬索结构	8
1.2.4 膜结构	10
1.3 空间结构设计方法基础	12
1.3.1 荷载和作用的取值方法	12
1.3.2 荷载和作用取值的案例	21
1.3.3 极限状态与荷载效应组合	24
1.3.4 空间结构的设计步骤	25
思考题	29
第二章 网架结构	30
2.1 概述	30
2.2 网架结构选型	31
2.2.1 网架结构的分类	31
2.2.2 网架结构的形式	32
2.2.3 网架结构的选型	38
2.3 网架结构的计算与分析	44
2.3.1 静力分析的拟夹层板法	44
2.3.2 固有振动分析的拟夹层板法	57
2.3.3 网架结构竖向地震内力的实用计算方法	59
2.3.4 ANSYS 在网架结构分析中的应用	63
2.4 网架结构的设计与构造	70
2.4.1 网架结构的杆件设计	70
2.4.2 网架结构的节点设计及构造	71
2.4.3 网架结构的其他构造	90
思考题	92
第三章 网壳结构	93
3.1 概述	93

3.2 网壳结构选型	94
3.2.1 网壳结构的分类	94
3.2.2 球面网壳的形式与结构选型	97
3.2.3 柱面网壳的形式与结构选型	103
3.2.4 其他类型网壳的形式与结构选型	105
3.2.5 网壳结构选型小结	107
3.2.6 网壳结构工程实例	108
3.3 网壳结构的计算与分析	111
3.3.1 网壳结构计算方法简介	111
3.3.2 肋环型球面网壳的简化分析方法	111
3.3.3 网壳结构静力分析的拟壳法	115
3.3.4 球面网壳结构稳定性分析的拟壳法	117
3.3.5 网壳结构稳定性验算的规程方法	123
3.3.6 网壳结构地震内力简化计算的规程方法	124
3.3.7 ANSYS 在网壳结构分析中的应用	126
3.4 网壳结构的设计与构造	135
3.4.1 网壳结构的杆件设计	135
3.4.2 网壳结构的节点设计及构造	136
3.4.3 网架和网壳结构的防腐与防火	141
思考题	142
第四章 悬索结构	143
4.1 概述	143
4.2 悬索结构选型	143
4.2.1 悬索结构的主要形式	143
4.2.2 悬索结构形态稳定的实现	150
4.2.3 悬索结构工程实例	152
4.3 悬索结构的计算与分析	155
4.3.1 悬索结构力学分析基础	155
4.3.2 悬索结构的近似解法——能量变分法	160
4.3.3 正交索网的近似计算——能量变分法	165
4.3.4 悬索结构固有振动的简化计算	177
4.3.5 ANSYS 在悬索结构分析中的应用	186
4.4 悬索结构的设计与构造	190
4.4.1 钢索材料	190
4.4.2 钢索锚具及锚固节点构造	191
4.4.3 悬索结构的其他节点构造	194
4.4.4 悬索结构设计要点	199
思考题	202
第五章 其他形式空间结构简介	203
5.1 膜结构	203

5.1.1	膜结构的特点	203
5.1.2	膜结构的分类	204
5.1.3	膜结构的材料	206
5.1.4	膜结构分析的计算机技术简介	207
5.2	组合网架结构	209
5.2.1	组合网架的特点、形式与分类	209
5.2.2	组合网架结构的应用概况	210
5.3	斜拉网架结构	211
5.3.1	斜拉网架结构的特点	212
5.3.2	斜拉网架结构的形式	212
5.4	预应力网架结构	213
5.5	张弦梁结构	214
5.5.1	张弦梁结构的形式与分类	214
5.5.2	张弦梁结构的受力特点	215
5.5.3	工程实例	216
5.5.4	张弦梁结构的节点构造	217
5.6	索穹顶结构	218
5.6.1	索穹顶结构的形式和特点	218
5.6.2	索穹顶结构的节点构造	219
	思考题	221
附录	222
1	圆钢管截面特性表	222
2	周边简支网架拟夹层板法弯矩、挠度系数表	226
3	橡胶垫板的材料性能	229
4	网壳等效刚度计算公式	229
5	部分现行规范	231
参考文献	233

第一章 总 论

1.1 空间结构的概念、分类及组成

1.1.1 空间结构的概念和特点

单层建筑空间的覆盖和围合可采用平面结构或者空间结构来实现(图 1.1)。

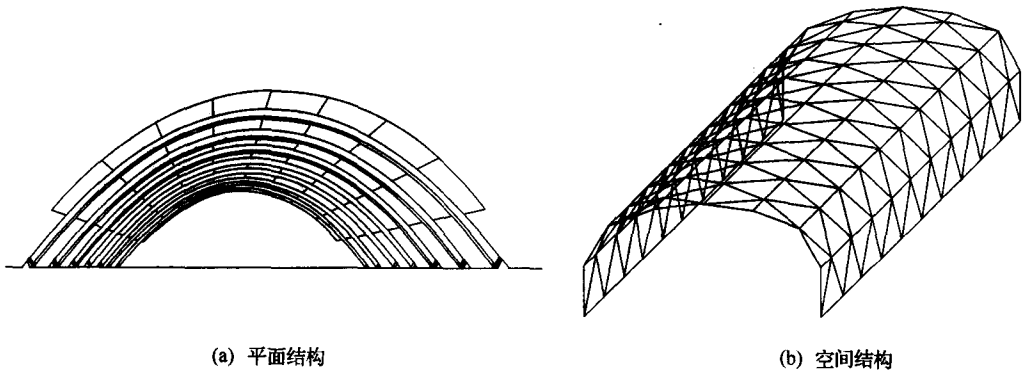


图 1.1 平面结构与空间结构

按承重构件的类型分,平面结构(plane structures)有三类(图 1.2):梁式结构(如实

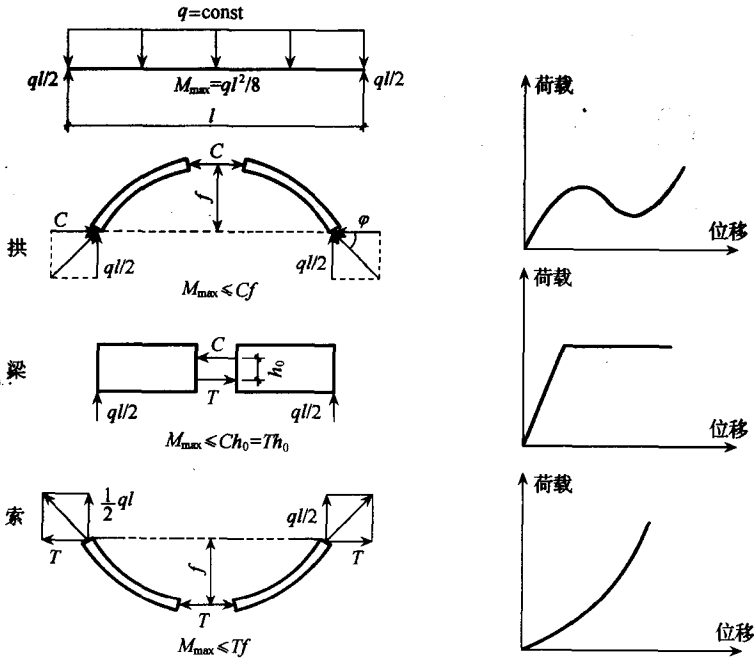


图 1.2 平面结构的承载机制与变形特点

腹梁、平面桁架等)、拱式结构(如实腹拱和桁架拱、门式刚架等)和索式结构(如平行索系)。平面结构的突出特点是承重构件采用平行布置方式,以承受平面内的荷载为主,具有二维受力特性,而平面外的荷载主要由附加的支撑体系承受。

所谓空间结构(space structures 或 spatial structures)是指其承重构件或杆件布置呈空间状,并在荷载作用下具有三维受力特性的结构。从分析、设计和施工角度讲,它是不能被分解为平面结构的。实际上,自然界有许多令人惊叹的空间结构,如蛋壳、海螺等是薄壳结构;蜂窝和放射虫的骨骼构造(图 1.3)是空间网格结构^①;肥皂泡是充气膜结构;蜘蛛网是索网结构;棕榈树叶是折板结构等。因此,从某种意义上来说,空间结构也是一种仿生结构。

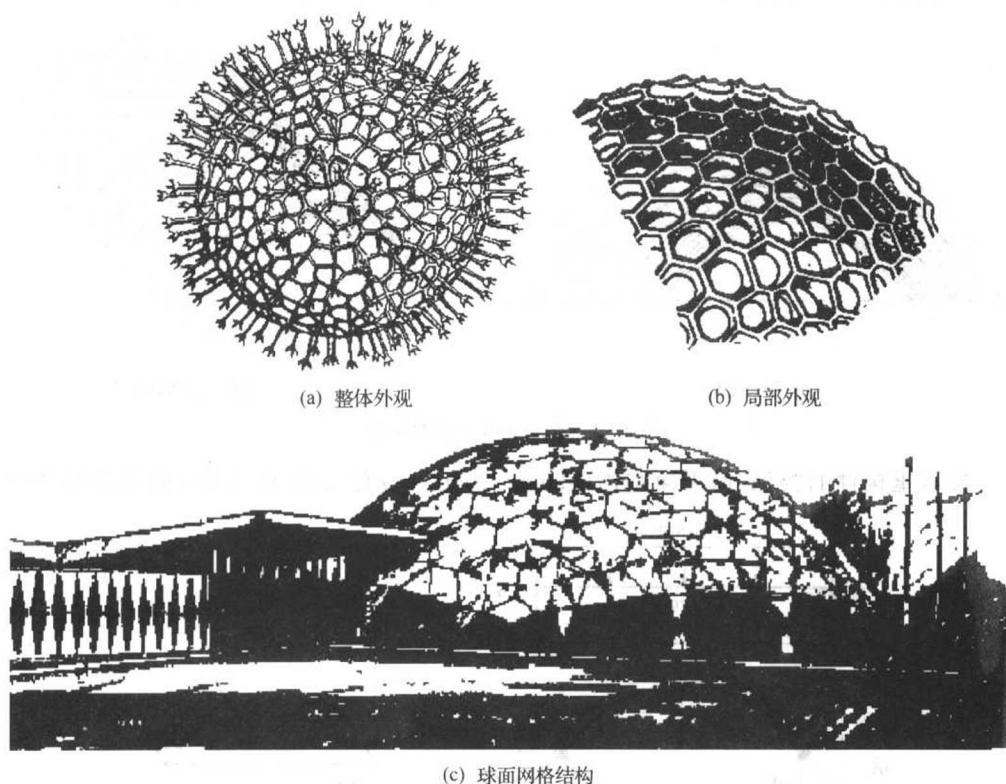


图 1.3 放射虫的骨骼构造与球面网格结构

与平面结构相比,空间结构的内力分布比较均匀,呈三维受力特点,具有受力合理、重量轻的优点,不但经济性好,而且整体刚度大,抗震性能也好。另外,空间结构的形式丰富多彩,千变万化,个性鲜明,为建筑师的自由建筑创作提供了丰富的想象空间,因此,空间结构一直是一种备受瞩目的建筑结构形式。

目前,空间结构在我国的应用十分广泛。在民用建筑中主要用于体育馆、展览馆、大会堂、候车厅、航空港等大型公共建筑,但对中小型民用建筑也适用;在工业建筑中则主要用于飞机装配车间、飞机库等建筑中。

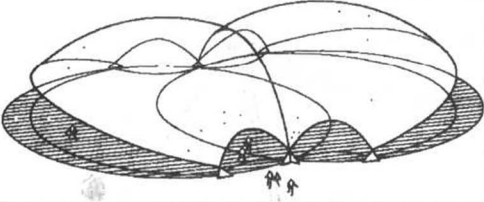
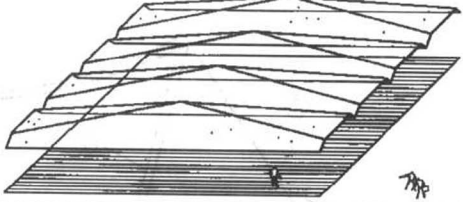
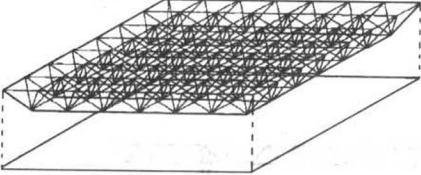
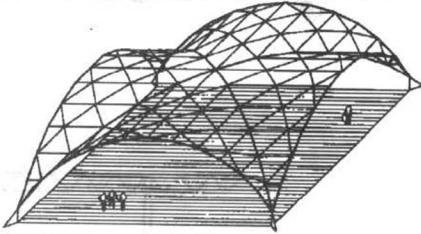
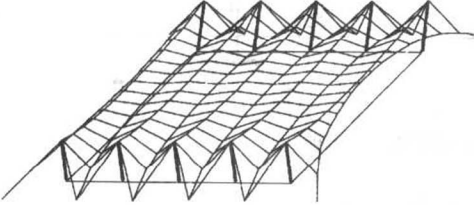

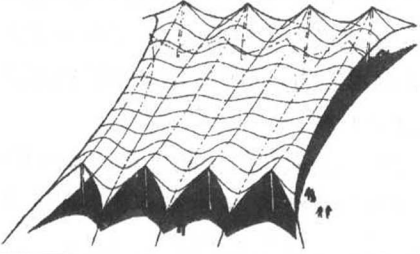
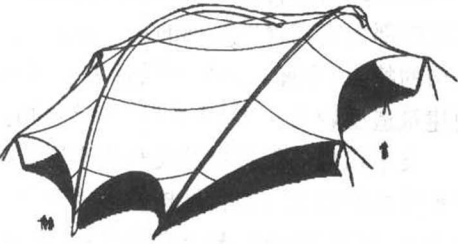
^① 空间网格结构是网架结构和网壳结构的总称。

1.1.2 空间结构的分类

空间结构包括：折板结构、薄壳结构、网架结构、网壳结构、悬索结构、膜结构以及杂交结构。本书将重点介绍网架结构、网壳结构、悬索结构的选型、分析和设计，对其他空间结构仅做简要介绍。

国内一般习惯按刚性差异以及它们的组合，将空间结构分成三类(表 1.1)：刚性结构(stiff space structures)、柔性结构(flexibility space structures)和杂交结构(hybrid space structures)。其中，杂交结构可通过刚性结构和柔性结构的有机组合获得，也可通过变更传统结构的特性得到。例如，将传统的柔索变更为具有抗弯刚度的桁架或者 H 型钢而形成的劲性索结构，就是其中的典型代表。杂交结构是未来空间结构的发展方向，其丰富的结构形式和内涵尚有待进一步的开发和探索。

表 1.1 空间结构的分类

刚性结构	薄壳结构 	折板结构 
	网架结构 	网壳结构 
柔性结构	悬索结构 	膜结构 
	索-膜结构 	索拱-膜结构 
杂交结构		

1.1.3 空间结构的组成

空间结构体系通常由屋盖结构、支承结构和基础这三部分组成(图 1.4)。

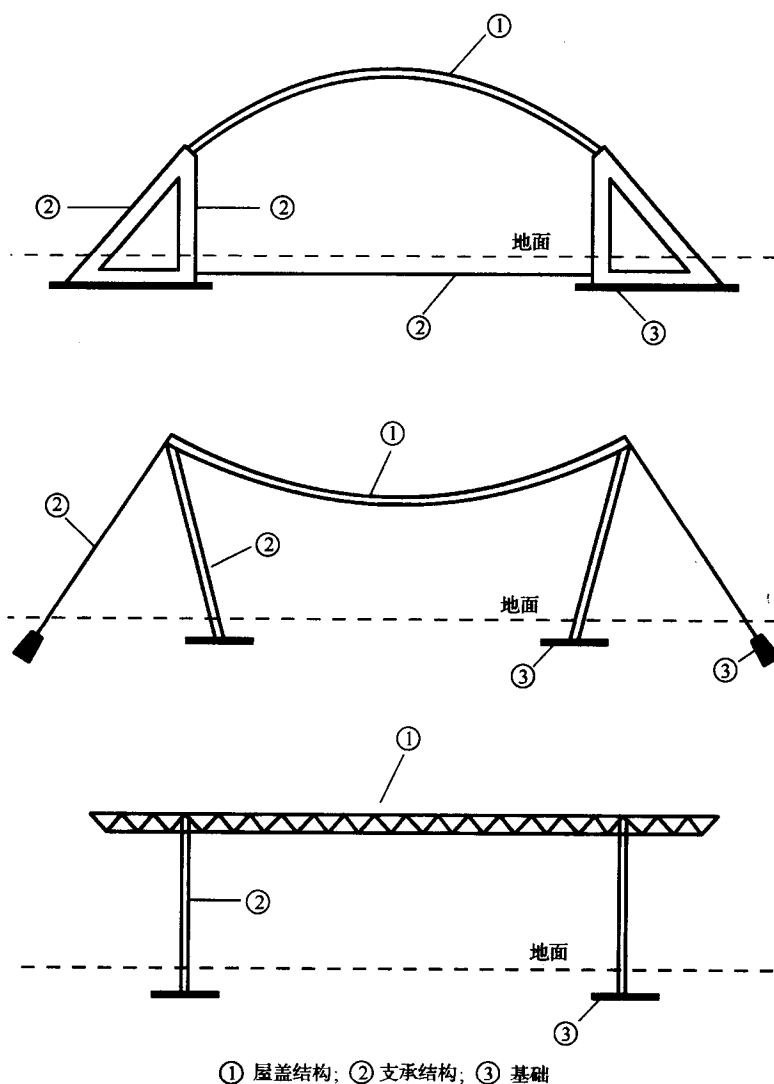


图 1.4 空间结构的组成

屋盖结构为直接承担屋面荷载的结构,是空间结构最重要的组成部分。屋盖结构既是建筑内部大空间得以实现的技术保证,也是构筑建筑内外形象的关键。了解各种类型空间结构的特点,掌握其选型和设计方法,提高灵活运用能力,进而将合理的结构形式与美观的建筑造型融为一体,是学习空间结构的深层意义所在。

支承结构不仅直接承受和传递屋盖结构荷载,还是屋盖结构能可靠工作的重要保证。支承结构的设置与屋盖结构的形式有关。对于平板网架结构,支承结构主要是为其提供竖向支承,而对于网壳、悬索和膜结构,支承结构还需为其提供水平推力或拉力支承,以维持

结构平衡和稳定,除非屋盖结构本身采取了针对性的约束构造,如增设拉杆、环肋等。

基础是埋于地下并保证上部结构全部荷载传至地基的结构部分。基础采用何种形式、提供何种反力,与上部结构有着密切关系。对于屋盖结构需要提供推力或拉力的情况,如果支承结构自身无法提供平衡力的话,就需要由基础来满足要求。因此,基础设计也是空间结构设计要考虑的一个重要方面。

1.2 空间结构的发展概况

在现实的三维世界里,任何结构物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,人们在许多场合把它们分解成一片片平面结构来进行构造和计算。与此同时,无法进行简单分解的真正意义上的空间体系,也始终没有停止其自身的发展。

这里仅介绍网架结构、网壳结构、悬索结构和薄膜结构的发展简况。

1.2.1 网架结构

我国的第一个网架结构是1964年建成的上海师范学院球类房屋盖(31.5m×40.5m)。经过近半个世纪的研究、开发与应用,网架结构已基本取代了传统的钢屋盖,成为我国建筑物屋盖中首选的一种空间结构形式。

网架结构的部分应用情况见表1.2、表1.3及图1.5。

表 1.2 国内网架结构的应用

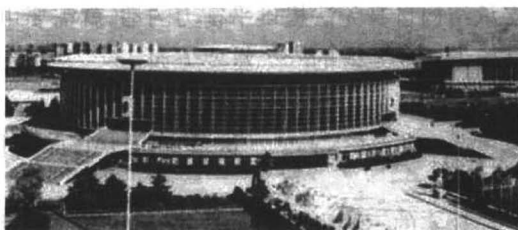
名 称	建成年份	屋盖跨度	结构类型
上海师大球类房	1965	32m×41m	角钢正交正放四角锥
首都体育馆	1967	99m×112m	正交斜放
上海体育馆	1973	D110m	三向正交斜放
深圳体育馆	1985	90m×90m	四支点正交正放
广州天河体育馆	1986	边长 62m	六支点三向
河北邯郸体育馆	1988	60m×75m	斜放四角锥
北京首都体育馆速滑馆	1990	两端半圆中心为矩形 72m×168m	梭形交叉桁架
广东顺德市容奇镇体育馆	1993	70m×70m	八块三角形折板式
南京江苏省游泳跳水馆	1995	长六边形 72m×78m	凸形斜放四角锥

表 1.3 国外网架结构的应用

名 称	建成年份	屋盖跨度	结构类型
美国洛杉矶加州大学体育馆	1966	92m×122m	工字钢正放四角锥
美国达拉斯 Reunion 体育馆	1980	126m×126m	正交斜放四角锥
香港体育馆	1982	94m×94m	正交正放四角锥
法国巴黎 Bercy 体育馆	1984	77m×126m	两向正交斜放交叉桁架
加拿大汉密尔顿贸易中心体育馆	1985	准椭圆平面 90m×124m	两向正交正放交叉桁架
美国拉斯维加斯 Thomas Mack Center 体育馆	1985	准椭圆平面 99m×114m	预应力空间桁架
美国丹佛会议中心	1986	72m×205m	三层网架



(a) 首都体育馆



(b) 上海体育馆

图 1.5 国内网架结构应用实例

1.2.2 网壳结构

目前,世界上跨度最大的单层网壳是 1996 年建成的日本名古屋穹顶,直径为 229.6m。

近 20 多年来,网壳结构在我国也得到了快速发展,各种网壳结构形式在我国都有所应用,既有双层也有单层,并且有组合网壳以及单双层混合网壳,还开发了预应力网壳、斜拉网壳等新的结构体系。杆件以钢管为最多,型钢和不锈钢也有应用。

网壳结构的部分应用情况见表 1.4、表 1.5 和图 1.6、图 1.7。

表 1.4 国内网壳结构的应用

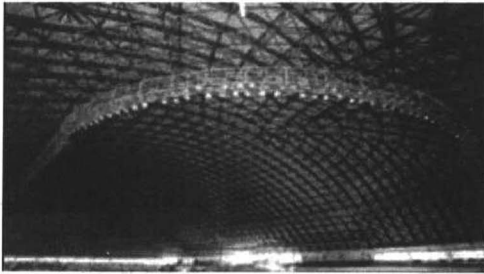
名称	建成年份	屋盖跨度	结构类型
天津人民体育馆	1956	52m×68m	双层联方型筒壳
郑州体育馆	1967	D64m	肋环型单层球壳
北京体育大学体育馆	1988	53m×53m	四块双向双层正交正放扭壳
北京石景山体育馆	1989	三角形边长 91m	双层三块三向扭壳
四川攀枝花市体育馆	1994	D60m 球壳,周边为筒壳	组合壳
广东肇庆市体育馆	1994	57m×57m	组合型椭圆抛物面网壳
四川德阳市体育馆	1995	菱形边长 75m×75m	HP 正交斜放
天津体育馆	1995	D108m	施威德勒穹顶

表 1.5 国外网壳结构的应用

名称	建成年份	屋盖跨度	结构类型
美国夏洛特体育馆	1956	D101m	肋环型单层球面
意大利罗马小体育馆	1957	D61m	RC 平行壳层型穹顶
美国休斯敦 Astrodome	1965	D196m	平行壳层型穹顶
墨西哥马达莱纳体育馆	1968	D140m	铝合金正交网格穹顶
美国新奥尔良 Superdome	1975	D207m	平行壳层型穹顶
美国弗拉格斯塔夫 Skydome	1977	D153m	胶合木平行壳层型穹顶
美国塔科马 Takoma Dome	1983	D162m	胶合木平行壳层型穹顶
日本神户世界纪念体育馆	1984	长圆形 68m×109m	中间筒壳,两端 1/4 球壳

续表

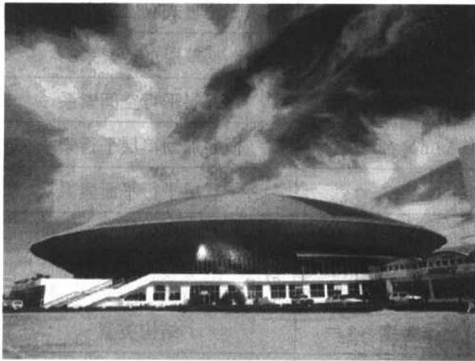
名称	建成年份	屋盖跨度	结构类型
加拿大卡尔加里速滑馆	1988	88m×198m	RC 联方网格
瑞典斯德哥尔摩球形体育馆	1988	D110m	正放四角锥网格球壳
加拿大多伦多 Ontario Dome Stadium	1989	D203m	开闭式, 中间筒形网壳, 两端 1/4 球壳
新加坡体育馆	1990	菱形 100m×200m	组合壳
西班牙巴塞罗那圣乔第体育馆	1992	弧边矩形 106m×128m	组合壳
日本福岗穹顶	1993	D222m	开闭式, 三块可旋转的球面三向壳层式网壳



(a) 黑龙江速滑馆



(b) 河南南阳鸭河口电厂干煤棚

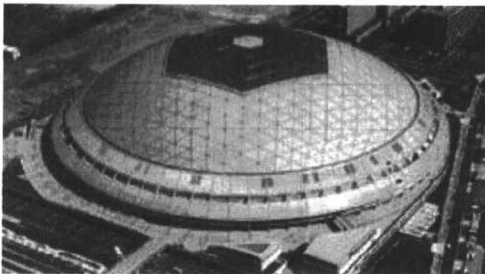


(c) 天津体育馆



(d) 石景山体育馆

图 1.6 国内网壳结构实例



(a) 名古屋穹顶



(b) 福岗体育馆

图 1.7 国外网壳结构实例

1.2.3 悬索结构

世界上第一座现代悬索结构是1953年建成的美国北卡罗来纳州雷里(Releigh)体育馆屋盖,采用以两个斜放的抛物线拱为边缘构件的马鞍形正交索网,其圆形平面直径91.5m;1983年建成的加拿大卡尔加里滑冰馆采用双曲抛物面索网屋盖,其圆形平面直径135m,迄今仍是世界上跨度最大的索网结构。

悬索结构在我国的发展始于20世纪50年代后期。我国第一座现代悬索结构是1961年建成的北京工人体育馆,形式为圆形轮辐式双层悬索,直径94m。1967年浙江省人民体育馆建成,椭圆平面马鞍形双曲抛物面正交索网结构,长径80m,短径60m。这两座建筑无论从规模大小还是技术水平来看,在当时都可以说是达到了国际上的先进水平。但此后我国悬索结构的发展停顿了一段时间。改革开放以后,这种形式丰富的结构才得到了进一步的发展。

悬索结构的部分应用情况见表1.6、表1.7和图1.8、图1.9。

表 1.6 国内悬索结构的应用

名称	建成年份	屋盖跨度	结构类型
北京工人体育馆	1961	D94m	轮辐式双层索
浙江人民体育馆	1969	60m×80m	HP 单层正交索网
四川成都城北体育馆	1979	D61m	轮辐式双层贯穿索
山东淄博市体育馆	1986	38m×54m	单层平行索系
吉林滑冰馆	1987	59m×77m	双层平行空间索系
安徽省体育馆	1989	六边形 53m×72m	横向加劲单层平行索系
江苏无锡县体育馆	1993	43m×44m	双层平行平面索系

表 1.7 国外悬索结构的应用

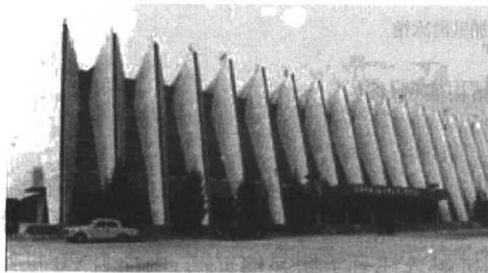
名称	建成年份	屋盖跨度	结构类型
美国雷里体育馆	1953	准椭圆形 92m×97m	鞍形单层正交索网
乌拉圭 Montuideo 体育馆	1957	D94m	轮辐式单层索
日本东京驹泽体育馆	1964	八角形对角线 94m	HP 索系
意大利热那亚体育馆	1965	D162m	轮辐式双层索
瑞典 Johauneshov 滑冰馆	1965	跨度 95m	平行双层平面索系(索桁架)
美国加州奥克兰-阿尔麦达体育馆	1966	D128m	轮辐式单层索
美国纽约 Madison 广场文体中心	1967	D123m	环向加劲轮辐式单索
德国慕尼黑奥林匹克体育馆中心	1971	74 800m ²	帐篷式单层正交索网
美国 Hampton 体育馆	1975	D98m	轮辐式空间双层索
意大利米兰体育馆	1976	D126m	鞍形单层索网
加拿大卡尔加里滑冰馆	1988	D135m	单层正交索网



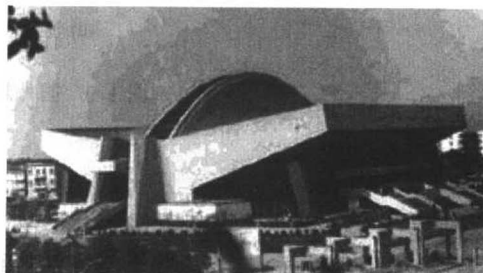
(a) 北京工人体育馆



(b) 浙江省人民体育馆



(c) 吉林滑冰馆

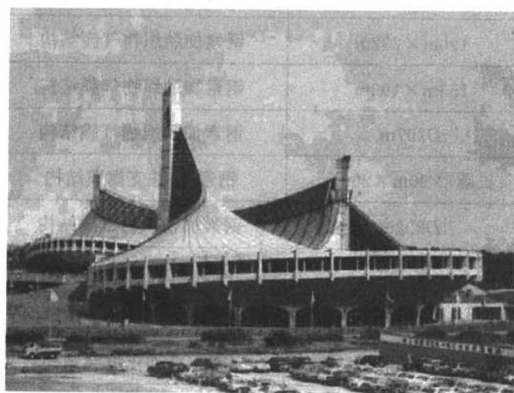
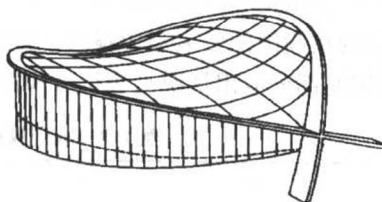


(d) 四川体育馆

图 1.8 国内悬索结构实例



(a) 北卡罗莱州雷里体育馆



(b) 东京代代木体育馆



(c) 耶鲁大学冰球馆

图 1.9 国外悬索结构实例