

高等学校土木工程专业规划教材  
GAODENG XUEXIAO TUMU GONGCHENG ZHUANYE GUIHUA JIAOCAI

# 大跨空间结构

## (第二版)

本教材编审委员会组织编写  
完海鹰 黄炳生 主编

高等学校土木工程专业规划教材  
大跨空间结构(第二版)

中国建筑工业出版社

高等学校土木工程专业规划教材

# 大跨空间结构

(第二版)

本教材编审委员会组织编写

完海鹰 黄炳生 主编

单 健 主审

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大跨空间结构/本教材编审委员会组织编写. 完海鹰, 黄炳生主编. —2 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2007

高等学校土木工程专业规划教材

ISBN 978-7-112-09332-8

I. 大… II. ①本…②完…③黄… III. 大跨度结构: 空间结构-高等学校-教材 IV. TU35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 099109 号

本书共分为 4 章, 主要阐述大跨空间结构中的网架结构、网壳结构和悬索结构的结构形式、特点和应用范围, 并围绕设计展开描述。此外, 对杂交结构、张拉结构、膜结构等一些空间结构体系也做了简要介绍。书后附有必要的设计选用表格。由于这是一门选修课程, 使用时可根据具体要求选择本书的部分章节讲授。

本教材可作为土木工程专业高年级学生教学用书, 也可供建筑工程设计人员和施工技术人员参考。

责任编辑: 朱首明 李 明

责任校对: 王 爽

高等学校土木工程专业规划教材

大 跨 空 间 结 构

(第二版)

本教材编审委员会组织编写

完海鹰 黄炳生 主编

单 健 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

北京密云红光制版公司制版

北京市书林印刷有限公司印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 10¼ 字数: 260 千字

2008 年 4 月第二版 2008 年 4 月第五次印刷

印数: 7901—10900 册 定价: 19.00 元

ISBN 978-7-112-09332-8

(15996)

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)

高等学校土木工程专业规划教材

编 审 委 员 会 名 单

顾 问：宰金珉 何若全 周 氏

主 任 委 员：刘伟庆

副主任委员：柳炳康 陈国兴 吴胜兴 艾 军 刘 平  
于安林

委 员：孙伟民 曹平周 汪基伟 朱 伟 韩爱民  
董 军 陈忠汉 完海鹰 叶献国 曹大富  
韩静云 沈耀良 柳炳康 陈国兴 于安林  
艾 军 吴胜兴 王旭东 胡夏闽 吉伯海  
丰景春 张雪华

## 第 二 版 前 言

本教材出版已经6年时间了,在这6年中,大跨空间结构作为一门反映现代结构现状与进展的学科,已经发生了许多变化,取得了喜人的成果。因此,本教材的再版就提到日程上来了。

这次再版修订工作,重点放在内容的更新上,对原有内容依据新规范做出了相应地修改,增补了近年来出现的新技术、新工艺、新结构的相关内容。主要有:第1章增加了近些年发展起来的新型结构型式——管桁架结构和张弦梁结构的相关内容;第2章按《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)对荷载组合进行了修改,增加了近年来应用较多的网架结构的移动支架法的介绍。根据近年来的教学体会,增加了螺栓球节点和焊接空心球节点的设计例题,以方便学生更全面的掌握网架结构的设计体系;第3章按《网壳结构设计规程》(JGJ 61—2003)对网壳结构的稳定计算和地震作用下网壳的内力计算进行了修改;删除了第4章三种悬索结构在荷载作用下的平衡方程和内力计算公式等内容,增加了悬索结构的有限元分析。此外,在教学过程中发现的第一版存在的缺点和错误,本版也都做了修改。

本书第1章的1.1、1.2、1.3.1、1.3.2节和第3章由合肥工业大学完海鹰教授编写;第1章的1.2.3节、第2章的2.4、2.5、2.6、2.7、2.11节和第4章的4.1、4.3节由南京工业大学黄炳生副教授编写;第2章的2.1、2.2、2.3、2.8、2.9、2.10节,第4章的4.2.2节由苏州城建环保学院方恬副教授编写,4.2.1、4.2.3、4.2.4、4.2.5节由河海大学张华博士编写。全书由完海鹰、黄炳生主编,由东南大学博士生导师单健教授主审。

书中的不足之处,恳请读者及把本书作为教材的师生提出宝贵意见,以便再版时修改。

## 第一版前言

本书是根据“土木工程专业系列选修课教材”编审委员会 1999 年 3 月南京会议审定的“大跨空间钢结构编写大纲”编写的。

全书围绕我国有关大跨空间钢结构工程方面的技术规程，以结构设计为主线，紧密结合工程实际。本书既可作为土木工程专业本科选修教材，也可供工程设计人员参考。

由于本课程学时少，教学内容较多，宜采用电化教学方式。第 1、第 2 章内容是教学的重点，第 3、第 4 章内容应讲清基本概念和基本方法。

本书第 1 章的 1.1、1.2、1.3.1、1.3.2 节和第 3 章由合肥工业大学完海鹰教授编写；第 1 章的 1.2.3 节、第 2 章的 2.4、2.5、2.6、2.7、2.11 节和第 4 章的 4.1、4.3 节由南京建筑工程学院黄炳生副教授编写；第 2 章的 2.1、2.2、2.3、2.8、2.9、2.10 节和第 4 章的 4.2 节由苏州城建环保学院方恬副教授编写。全书由完海鹰、黄炳生主编并统稿，由东南大学博士生导师单健教授主审。

书中的不足之处，恳请读者及把本书作为教材的师生提出宝贵意见，以便再版时修改。

# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第 1 章 概论 .....               | 1   |
| 1.1 空间结构的发展概况 .....          | 1   |
| 1.2 空间结构的特点与分类 .....         | 2   |
| 复习思考题 .....                  | 18  |
| 第 2 章 网架结构 .....             | 19  |
| 2.1 网架的形式与选型 .....           | 19  |
| 2.2 网架的高度与网格尺寸 .....         | 27  |
| 2.3 网架的整体构造 .....            | 28  |
| 2.4 荷载和作用 .....              | 30  |
| 2.5 网架结构的静力计算——空间桁架位移法 ..... | 33  |
| 2.6 网架在温度作用下的内力计算 .....      | 54  |
| 2.7 网架在地震作用下的内力计算 .....      | 57  |
| 2.8 网架的杆件与设计 .....           | 60  |
| 2.9 网架的节点与设计 .....           | 61  |
| 2.10 网架的支座节点 .....           | 74  |
| 2.11 网架的制作和安装 .....          | 80  |
| 复习思考题 .....                  | 90  |
| 第 3 章 网壳结构 .....             | 93  |
| 3.1 网壳结构的形式与选型 .....         | 93  |
| 3.2 网壳结构静力分析的有限单元法 .....     | 104 |
| 3.3 网壳结构的稳定性计算 .....         | 109 |
| 3.4 地震作用下网壳的内力计算 .....       | 114 |
| 3.5 网壳结构设计构造 .....           | 117 |
| 复习思考题 .....                  | 124 |
| 第 4 章 悬索结构 .....             | 125 |
| 4.1 悬索结构的形式和特点 .....         | 125 |
| 4.2 悬索结构的计算和分析 .....         | 129 |
| 4.3 悬索结构的设计和构造 .....         | 144 |
| 复习思考题 .....                  | 156 |
| 附录 管材的截面特性 .....             | 157 |
| 主要参考文献 .....                 | 165 |

# 第 1 章 概 论

## 1.1 空间结构的发展概况

### 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,人们需要更大的覆盖空间,如大型的集会场所、体育馆、飞机库等,跨度要求很大,达几百米或更大。而我们所熟知的平面结构刚架、桁架、拱、梁等,由于其结构形式的限制,很难跨越大的空间,为解决这一难题就需要空间结构。什么是空间结构呢?凡是建筑结构的形体成三维空间状并具有三维受力特性、呈立体工作状态的结构称为空间结构。空间结构不仅仅依赖材料的性能,更重要的是依赖自身合理的形体,充分利用不同材料的特性,以适应不同建筑造型和功能需要,跨越更大空间。较直观的例子是,平面拱就是依据自己的拱形结构,去吻合弯矩图,使得结构主要承受压力,充分发挥了混凝土或石材的受压性能,从而能跨越较大跨度。在自然界中,受力特性良好的空间结构比比皆是,如蛋壳、肥皂泡、蜂窝、蜘蛛网等。详细观察自然界的进化演变过程,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。计算机技术的广泛应用解脱了长期以来空间结构的形体研究在计算方法上的束缚,使寻求形体与受力的完美组合成为可能,由此十几年来,空间结构以异乎寻常的速度发展了起来。

### 1.1.2 空间结构的历史与发展

大跨度总是强烈地吸引着建筑师及工程师们,空间结构提供了一种既方便又经济的覆盖大面积的方法,由于其结构形式的优点及造型美观,常常为建筑师和工程师所采用。最早的空间结构要追溯到公元前 705 ~ 681 年,它是一组亚述柱浅浮雕,表现了半球形和带尖顶覆盖的建筑群。

空间结构的发展同建筑材料的发展密切相关。最早,人们用石头来建造穹顶,后来逐渐被更轻的砖石结构代替。中世纪人们使用木材来建造穹顶,那个时期的木穹顶有些还保存至今。在 19 世纪,人们认识了铁的轻质、高强的优点,这为建筑师们的发挥开创了新纪元。其中施韦德勒、亨内贝格、莫尔等对空间结构的发展及其结构特性理论研究做出了很大贡献。

罗马人用混凝土来建造穹顶,无筋混凝土穹顶必须做得非常厚实,如英国威斯敏斯特(Westminster)大教堂穹顶跨度达 18.3m,拱脚处厚度达 910mm。

在混凝土中加入钢筋提高了混凝土的受拉能力,从而开辟了结构工程的新领域。1912 年,由马克斯·贝格(Max Berg)设计的波兰洛兹拉夫(Wroclaw)市纪念大厅,是一个带肋穹顶,直径达 65m。1922 年,由瓦尔特·鲍尔斯费尔德(Walter Bauersfeld)建造的第一座钢筋混凝土薄壳穹顶,净跨 25m,厚 60.3mm,标志着建筑史上的惊人进步。法国巴黎的国家工业与技术展览中心采用此种结构,跨度已达 206m。我国在 20 世纪 60 ~ 70 年代也建造了一批钢筋混凝土薄壳结构,如新疆某机械厂金工车间,直径 60m。特别是五六十年代,钢筋混凝土薄壳发展迅速。然而钢筋混凝土薄壳费工费时,同时大量消耗模板,质量

难以保证,因而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。这一时期,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,如网架及网壳结构、索结构、膜结构以及它们的组合结构等。因而,在20世纪的最后25年里大跨空间结构逐渐占据了举足轻重的特殊地位,而且空间结构的发展水平已成为标志一个国家的建筑技术发展水平的重要指标。

## 1.2 空间结构的特点与分类

平面结构的传力特点是有层次的,从次要构件向主要构件传力,如框架结构荷载从楼板依次传到次梁、主梁、框架柱,最后到达基础。结构或构件抗力,主要依赖截面尺寸和材料的强度。而空间结构的受力特点,是充分利用三维几何构成,形成合理的受力形态,充分发挥材料的性能优势。如网壳结构是三维空间结构,构件(杆件)都是作为整体结构的一部分,按照空间几何特性承受荷载,并没有平面结构体系中构件间的“主次”关系,大部分内力(薄膜内力)沿中曲面传递。又如悬索结构中,将外荷载转化为钢索的拉力,充分发挥了钢索拉力强的材性,从而大大减轻了结构自重。

空间结构发展迅速,各种新型的空间结构不断涌现,如网架结构、网壳结构、悬索结构、膜结构、张拉整体结构等,而它们的组合杂交结构更是花样翻新。空间结构可按刚性差异以及它们的组合来分成三类,即刚性空间结构、柔性空间结构和杂交结构。

### 1.2.1 刚性空间结构

#### 1. 薄壁空间结构

薄壁空间结构主要指薄壳结构,还可以包括平面结构组合成的空间结构如折板结构、空间拱等。薄壳结构的壳体都很薄,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都较小。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。

最早真正意义上的钢筋混凝土薄壳结构是由德国瓦尔特·鲍尔斯费尔德(Walter-Bauerfeld)博士于1922年建造的Carl Zeiss公司的天文馆,这是一个净跨为25m,壳体厚60.3mm的四支柱圆柱面壳体屋顶。我国最早的薄壳为1948年在常州建造的圆柱面壳仓库。由于这种结构形式能跨越大的空间,且造价较低,在当时的建筑发展水平上得到了建筑师和工程师们的青睐。

#### 2. 网架结构

网架结构是一种空间杆系结构,受力杆件通过节点有机地结合起来。节点一般设计成铰接,杆件主要承受轴力作用,杆件截面尺寸相对较小。这些空间交汇的杆件又互为支撑,将受力杆件与支撑系统有机地结合起来,因而用料经济。由于结构组合有规律,大量的杆和节点的形状、尺寸相同,便于工厂化生产,便于工地安装。网架结构一般是高次超静定结构,具有较高的安全储备,能较好地承受集中荷载、动力荷载和非对称荷载,抗震性能好。网架结构能够适应不同跨度、不同支承条件的公共建筑和工厂厂房的要求,也能适应不同建筑平面及其组合。1981年5月我国颁布的《网架结构设计施工规定》(JGJ 7-80),是对我国当时网架结构工程与科研成果的总结,有力地推动了我国平板网架的发展。目前,我国可以说是网架生产的大国,其年生产规模、建筑面积成为世界之最。

网架结构工程实践和理论研究向纵深发展,已对网架结构的一些特殊问题进行了探讨,如悬挂吊车问题、超大直径焊接球问题、疲劳问题等。网架结构的应用范围不断扩大,已涉及到大型公共建筑、工业厂房、大型机库、特种结构、装饰网架、扩建增层等不同领域。

我国从1964年在上海师范学院球类房网架工程开始,已建筑了为数众多的不同建筑类型、不同平面形式的网架结构。特别是最近几年,超大面积、超大跨度的网架结构不断涌现,如江阴兴澄钢铁有限公司兴建的轧钢车间一期工程采用3.5万 $\text{m}^2$ 网架,该车间全长396m,柱跨12m(局部抽柱处为24m及36m),车间内设置了中、重级工作制桥式吊车12台,如图1-1所示。首都机场(153m+153m)机库,总面积为(90×306) $\text{m}^2$ ,采用平板网架结构,只有大门中间有一个柱子;中梁下没柱子的四机位B747大跨度机库,采用了多层四角锥网架,在网架大门边梁和中梁采用大跨度空间桁架栓焊钢桥,如图1-2所示。

### 3. 网壳结构

网架结构就整体而言是一个受弯的平板,反映了很多平面结构的特性,大跨度的网架设计对沿跨度方向的网架刚度要求很大,因为总弯矩基本上是随着跨度二次方增加的。因此,普通的大跨度平板网架需要增加许多材料用量。网壳结构则是主要承受薄膜内力的壳体,主要以其合理的形体来抵抗外荷载的作用。因此在一般情况下,同等条件特别是大跨度的情况下,网壳要比网架节约许多钢材。网壳结构得到迅速发展的另外一个重要因素是,其外形美观,富于表现,充满变化,改善、丰富了人类的居住环境。辽宁省电视台彩电中心演播厅采用单层筒形网壳,跨度21m,长72m,如图1-3所示。

江西宜春体育馆根据建筑要求,设计成为一个由四个曲面组合而成,具有太空动感的“飞碟”造型体异形网壳。网壳的最大直径93m,网壳分为双层屋面壳、单层斜墙壳、外露装饰壳三部分,如图1-4所示。

### 4. 管桁架结构

管桁架结构是一种空间钢管结构,以钢管为基本杆系单元,通过焊接有机连接起来。管桁架结构是在网架、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。管桁架结构省去下弦纵向杆件和球节点,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。

管桁架结构类似于平面钢桁架,属于单向受力结构,但桁架的上弦由于增大宽度后,使原平面桁架起控制作用的上弦杆的稳定性得到提高,其各向稳定性相同,节省材料用量;桁架自身刚度大,施工方便,可单榀制作,适用于复杂多变的建筑形式;钢管截面封闭,由于管薄、回转半径大,对受压受扭均有利。钢管的端部封闭后,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。可见管桁架应用于大跨度空间结构中,不仅在建筑造型上容易实现,也具有合理的受力性能和较高的结构利用率。同时也可大大减少用钢量,降低工程造价。

管桁架结构中管节点是结构设计的关键。目前国内外对于管节点已有大量的研究,其中包括节点的构造、承载力和刚度(这些在《钢结构设计规范》GB 50017—2003中已有明确规定),施工的可操作性,特别是加工水平、制作安装误差等因素。另外,实际工程中交错焊缝的影响,残余应力、疲劳破坏等问题也在进一步深入研究中。

管桁架结构作为新型的空间结构形式,近几年来得到了迅速的发展,目前这种结构主

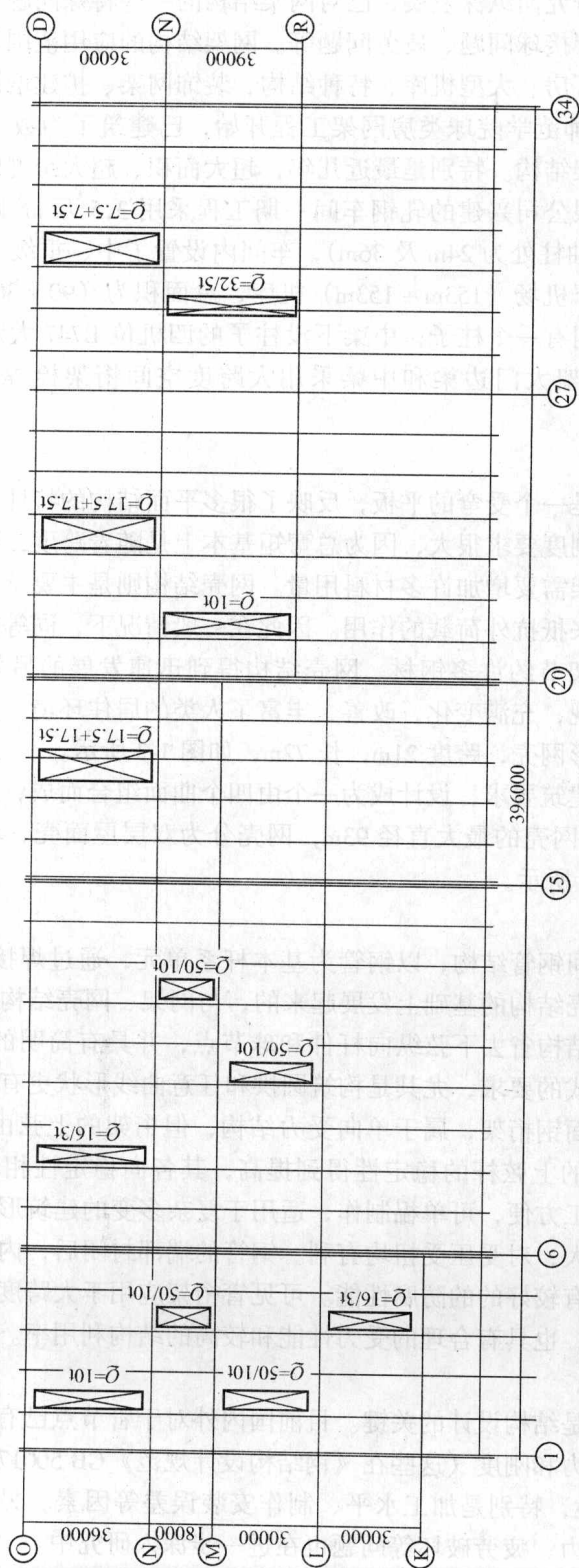


图 1-1 轧钢车间平面图

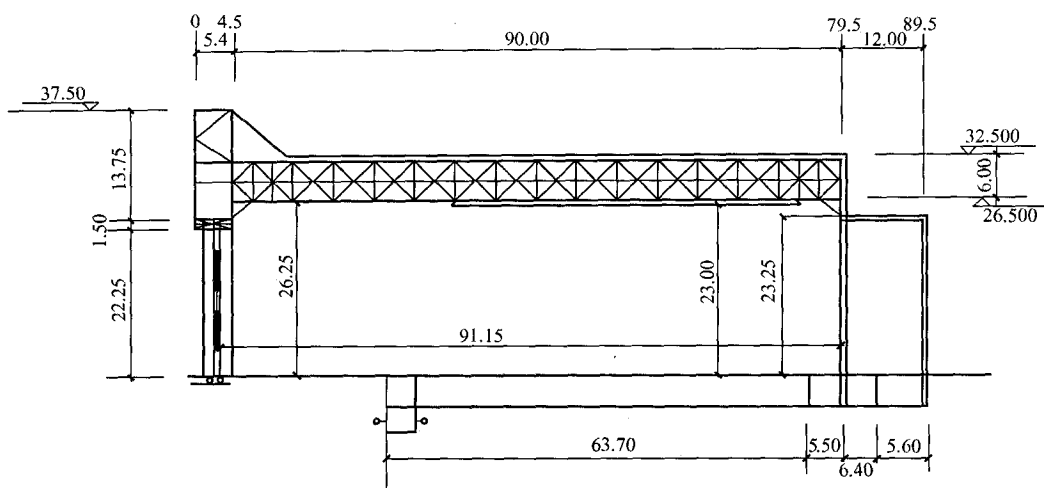
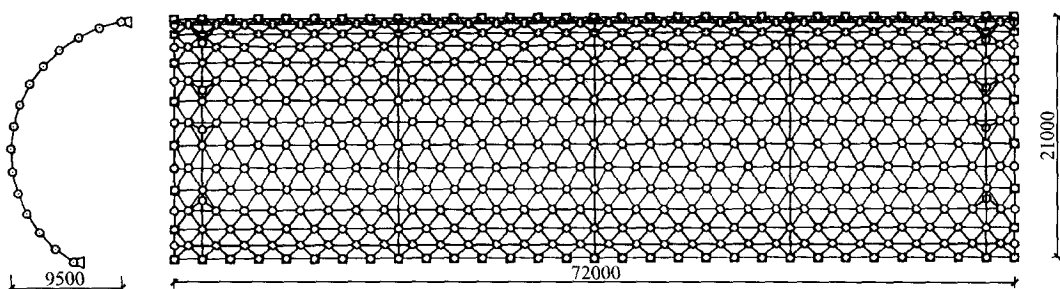


图 1-2 首都机场机库剖面图 (单位: m)



网壳网格及支座布置图

图 1-3 辽宁电视台彩电中心彩电演播厅

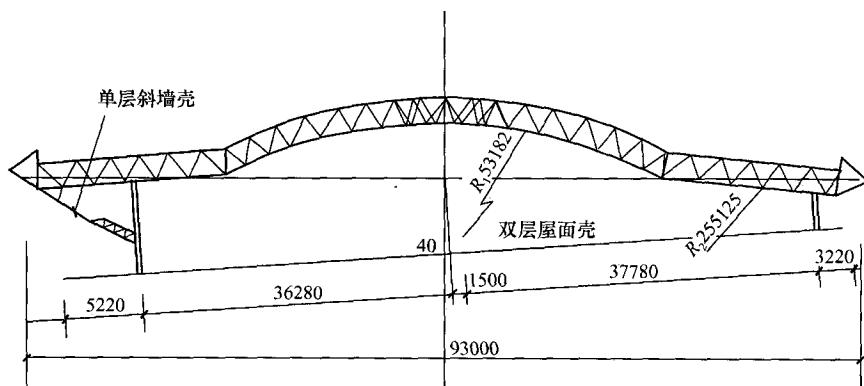


图 1-4 江西宜春体育馆网壳剖面图

要应用于一些大型的公共建筑中,在工业厂房柱及屋架、轻钢结构和住宅钢结构中应用潜力也很大。著名的日本关西国际机场候机大厅的屋架采用的就是倒三角形截面空间钢管相贯桁架结构,如图 1-5 所示。

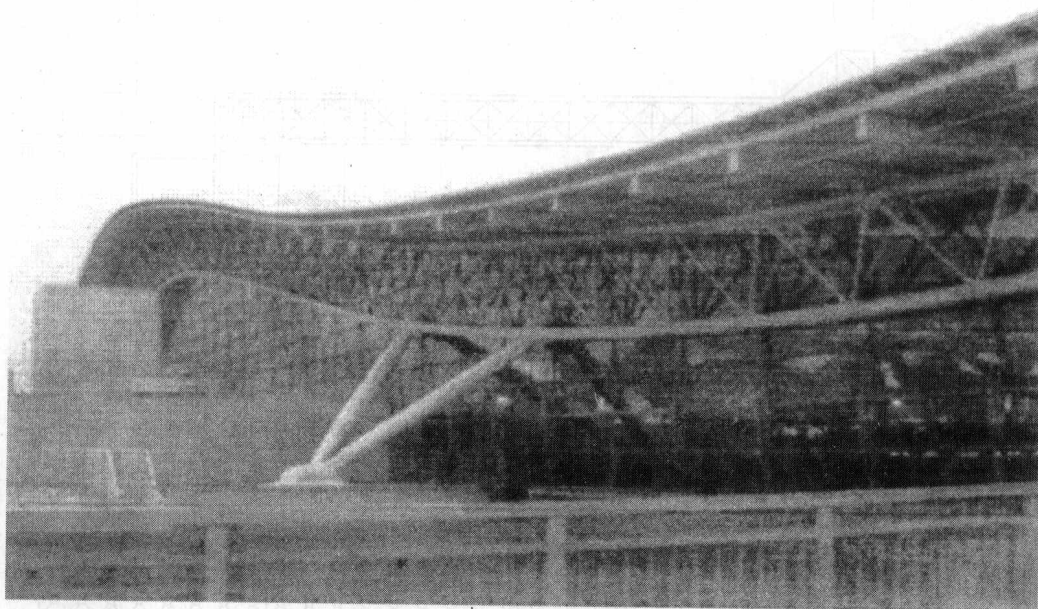


图 1-5 日本关西国际机场候机大厅

### 1.2.2 柔性空间结构

#### 1. 悬索结构

悬索结构通过索的轴向拉伸来抵抗外荷作用，而这些索的材料是由高强度钢丝组成的钢绞线、钢丝绳或钢丝束等，可以最充分地利用钢索的抗拉强度，大大减轻了结构自重。据统计，当跨度不超过 150m 时，每  $1\text{m}^2$  屋盖的钢索用量一般小于 10kg。索结构便于表现建筑造型，适应不同的建筑平面。特别是钢索与其他材料或与其他结构型式组合形成了空间结构新的增长点，大大丰富了空间结构范畴，如近 10 年来发展起来的索膜结构、张拉整体结构、索桁结构等。

悬索结构是最古老的结构形式之一，在欧洲，至少从 16 世纪便开始了对悬索计算理论的研究。悬索结构的工程应用是从悬索桥开始的，众所周知的有美国金门大桥、日本明石海峡大桥、中国的江阴大桥等。然而，在 20 世纪悬索结构才在建筑工程中得到应用。到了 20 世纪 50 年代，悬索结构在建筑上的应用得到较大发展，主要原因有两方面，一是由于社会生活对大跨度的需求，另一方面是由于计算机技术的发展和新型建材的出现。目前，已建成不少具有代表性的悬索屋盖，主要用于飞机库、体育馆、展览馆、会堂等大跨建筑中，世界上第一个现代悬索屋盖是美国于 1953 年建成的 Raleigh 体育馆，采用以两个斜放的抛物线拱为边缘的鞍形正交索网。北京工人体育馆，1961 年建成，此馆圆形平面，下部屋盖结构由双层索、中心钢环和周边钢筋混凝土外环梁三个主要部分组成，悬索屋盖直径 96m，如图 1-6 所示。

悬索结构主要划分为单层悬索体系、双层悬索体系和索网体系。单层索稳定性差，其横向一般需要采取措施（如桁架、混凝土屋面等）加强刚度，以保证结构不发生机构性位

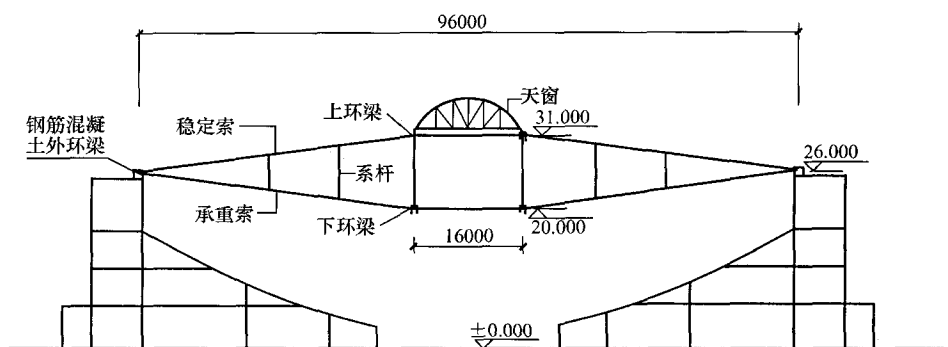


图 1-6 北京工人体育馆结构剖面图

移。国外跨度较大的单层悬索是前苏联的乌斯契—伊利姆斯克汽车库（圆形、直径  $D = 206\text{m}$ ），采用的是伞形悬索屋盖。双层悬索由承重索和稳定索组成，承重索承担上部荷载，稳定索可以保证在非对称荷载和变异荷载作用下整体结构的安全和稳定。北京工人体育馆采用了这种悬索形式（图 1-6 所示）。索网结构特别是预应力鞍形索网结构采用相互正交、曲率相反的两组钢索直接叠交，形成鞍形索网，其外形优美，易满足建筑造型要求，许多悬索结构采用了这种形式，加拿大卡尔加里滑冰馆，屋盖平面形状为椭圆形，长轴  $135.3\text{m}$ ，短轴  $129.4\text{m}$ ，建筑物底面形状为直径  $120\text{m}$  的圆形，鞍形双曲抛物面索网悬挂于环梁之间。

## 2. 充气结构

充气结构是利用薄膜内外空气压力差来稳定薄膜以承受外荷载。它是薄膜结构的一种形式，目前工程中薄膜材料常采用高强、柔软的织物复合材料，这种材料具有较高的抗拉强度，如 PVC 薄膜和聚四氟乙烯涂层玻璃纤维布（泰氟纶）等。PVC 薄膜价格便宜，但强度较低，不阻燃，耐火性差；而泰氟纶强度高，自洁性好，耐火性好，从实验和已有工程实例证明，其使用期超过 20 年。

充气式薄膜结构一般又可分为两类，即低压体系和高压体系。前者的薄膜承受  $100 \sim 1000\text{N/m}^2$  的压力，一般根据外荷载的变化适时调整内外气压差，如正常使用情况下为  $200 \sim 300\text{N/m}^2$ ，强风时为  $500 \sim 600\text{N/m}^2$ ，积雪时可达  $800\text{N/m}^2$ 。可以采用单层薄膜（图 1-7a, b），也可采用双层薄膜（内部充气）（图 1-7c, d），这两种方式既可采用正压方式（图 1-7b, d），也可采用负压方式（图 1-7a, c）。

高压体系，也称气肋式薄膜充气结构，它是由自封闭的膜材充以高压气体，与大气压有  $20 \sim 70\text{kN/m}^2$  的压差，形成可以传递横向力的管状薄膜构件。这种结构可以快速装拆，适用于重量轻、

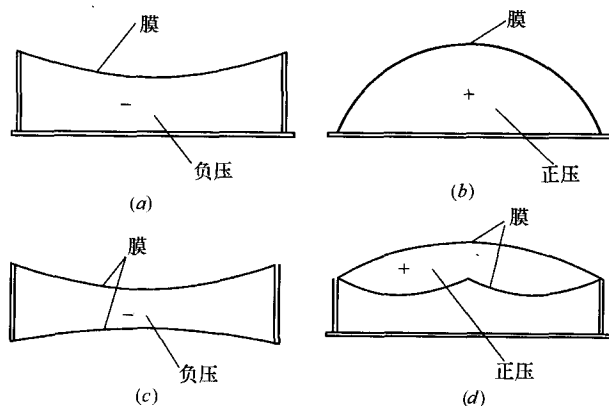


图 1-7 低压充气结构示意图

运输体积小的场合，特别适宜于索网和薄膜结构的支承构件。

充气膜结构自重轻，仅为其他结构重量的 1/10，因而容易跨越很大空间，适用于体育馆、展览会等大型公共建筑。图 1-8 是日本东京后乐园棒球场，直径达 204m，屋顶高 61m，总体积 140 万 m<sup>3</sup>。充气结构采用了透光性很好的膜材，白天大部分时间无须人工采光。充气结构由于自身重量轻、包装体积小、便于运输，因此它一直在应急建筑中显示优越性。然而，它隔热性差，冬天冷、夏天热，需要空调；充气结构抵抗局部荷载能力差，屋面会在局部荷载作用下形成局部凹陷，造成雨水淤积和积雪，可能导致屋盖的撕裂或翻转；此外，充气结构的维护很重要，需要不停地送风。

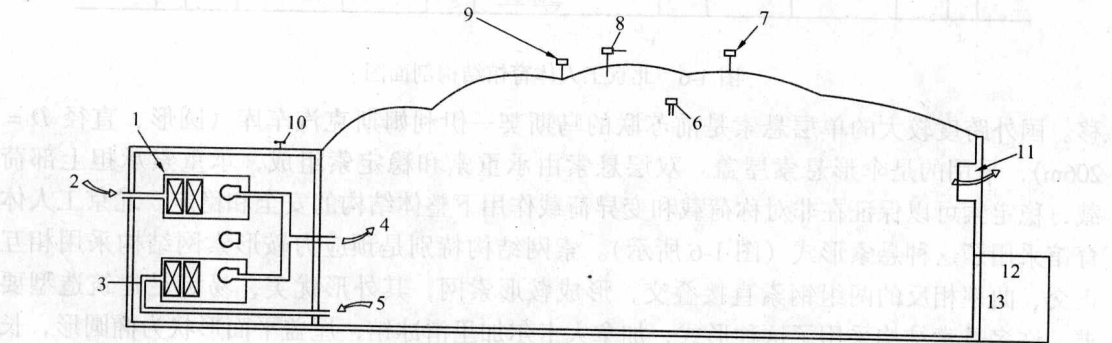


图 1-8 气承式充气结构原理图

- 1—加压专用空调器；2—室外空气；3—冷暖房专用空调器（兼化雪用）；4—进气口；5—回气口；6—室内温度计；7—室外温度计；8—差压计；9—积雪计；10—风速计；11—排气口；12、13—门

### 3. 张拉整体结构

现代张拉整体结构的研究工作始于 20 世纪 40 年代末期，美国建筑师 R·B·Fuller 根据自然界拉压共存的原理，首次提出了“张拉整体体系”（*Tensegrity Systems*）的概念。张拉整体结构是一组不连续的受压构件（钢压杆）与一组连续的受拉构件（预应力钢索）相互联系，不依赖于任何外力的作用，受拉索与受压构件自应力平衡，实现自支承的网状杆系结构。如图 1-9 所示。竖向压杆 1、2、3 是孤立的，横向位置的拉索施加预应力。这是一个高效率的结构，“少量孤立的压杆存在于拉索的海洋中”，与压杆过多或压杆过长的低效率结构形成了强烈反差。

张拉整体结构是空间结构领域的一种新型的结构体系，它的发展历史不太长，但速度

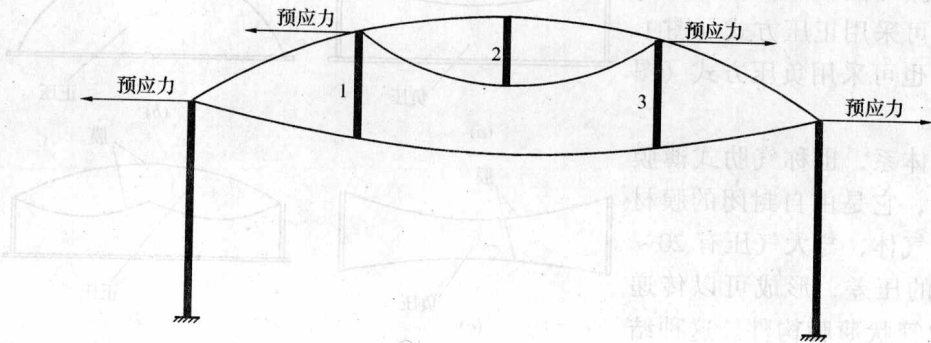


图 1-9 张拉整体结构示意图

很快。张拉整体结构具有构造合理、自重小、跨越空间的能力强的特点，它在实际工程中展示了强大的生命力和广阔的应用前景。图 1-10 是美国亚特兰大奥运会主体育馆采用的张拉整体结构，平面为  $240\text{m} \times 193\text{m}$  的椭圆形。

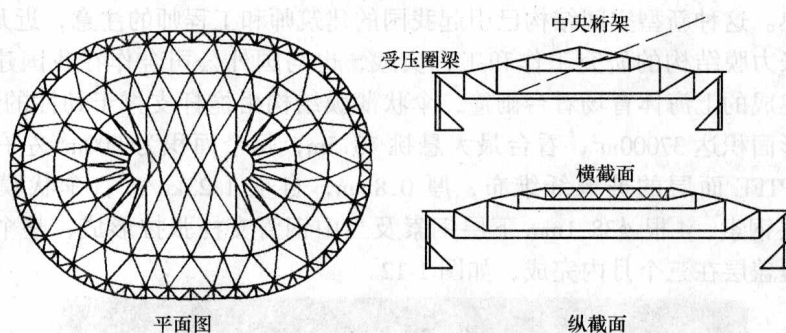


图 1-10 张拉整体结构

#### 4. 薄膜结构

薄膜结构是张拉结构的一种，它以具有优良性能的织物为膜材，利用钢索或刚性支承结构向膜内预施加张力，从而形成具有一定刚度、能够覆盖大空间的结构体系。这种可以称之为张力膜结构是国外在近 20 年内逐步发展并已广泛应用的新型结构形式。一些举世瞩目的结构，如德国的慕尼黑奥林匹克体育馆、美国的丹佛国际机场候机大厅等都采用这种新型的张力膜结构。图 1-11 是丹佛国际机场候机大厅，它打破了传统模式，首先在机场候机大厅上采用了膜结构。大厅长  $247\text{m}$ ，宽  $67\text{m}$ ，以 17 个帐篷的单元组成。单元间距  $18.3\text{m}$ ，由两排相距  $45.7\text{m}$  的立柱支承。屋盖设置了脊索与谷索，分别承受向下的荷载（如结构自重与雪荷载）与向上的荷载（如风吸力）。作为膜的织物就在脊索、谷索与边索



图 1-11 丹佛国际机场候机大厅

间张紧成双曲面。膜结构设计需要先进的分析、设计和裁剪技术，同时需要新型建筑材料，甚至纺织物材料的交叉发展，还需要依赖于先进的计算机辅助技术。目前，张力膜结构的设计、施工技术和膜材的制造工艺只有少数几个发达国家（如美国、日本、德国等）发展比较成熟。这种新型空间结构已引起我国的建筑师和工程师的注意，近几年来，许多学者致力于张力膜结构的研究工作和工程实践，也与国外公司合作在我国建成了不少工程，如我国建成的上海体育场看台雨篷，伞状薄膜结构由桅杆支撑于劲性的钢网架之上，屋盖水平投影面积达 37000m<sup>2</sup>，看台最大悬挑 73.5m，每个面积为 500m<sup>2</sup> 左右的伞状膜结构采用涂覆 PTFE 面层的玻璃纤维布，厚 0.8mm，自重 1.23kg/m<sup>2</sup>，伞状膜结构由 4 根  $\phi 25.4\text{mm}$  上层钢索、4 根  $\phi 38.1\text{mm}$  下层钢索及当中钢管支柱张拉形成，整个索支撑桅杆结构和薄膜覆盖层在三个月内完成，如图 1-12。

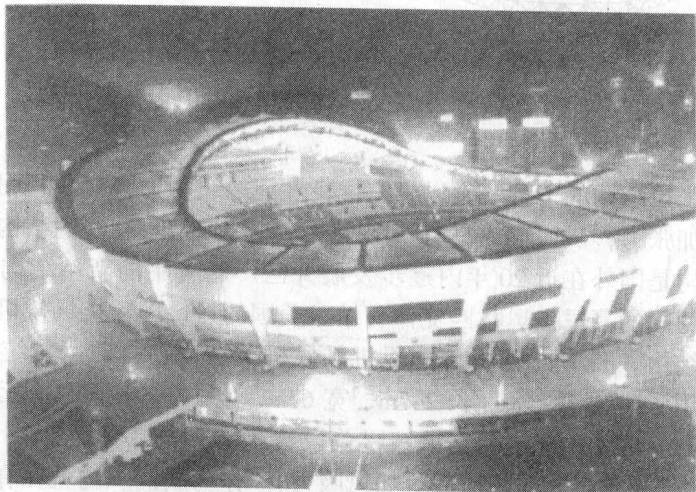


图 1-12 上海体育场

1.2.3 杂交空间结构

杂交空间结构是将不同类型的结构进行组合而得到的一种新的结构体系。这种组合不是两个或多个单一类型空间结构的简单拼凑，而是充分利用一种类型结构的长处来抵消另一种与之组合的结构短处，使得每一种单一类型的空间结构形式及其材料均能发挥最大的潜力，从而改善整个空间结构体系的受力性能，可以更经济、更合理地跨越更大的空间。

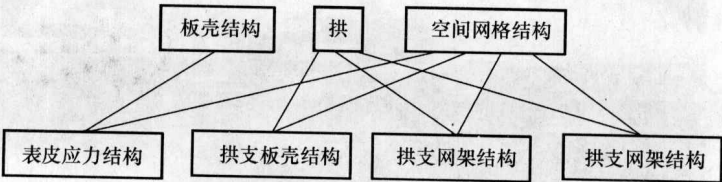


图 1-13 刚性结构之间组合

杂交空间结构可以是刚性结构体系之间的组合，如拱与网格结构组合形成的拱支网架结构、拱支网壳结构等（图 1-13）；柔性结构体系之间的组合，如悬索与薄膜组合而成的