

DAKUADU

YUYINGLI GANGJIEGOU

SHIGONG JISHU

# 大跨度 预应力钢结构 施工技术

周黎光 刘占省 王泽强 等 著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DAKUADU

YUYINGLI GANGJIEGOU

SHIGONG JISHU

# 大跨度 预应力钢结构 施工技术

周黎光 刘占省 王泽强 等 著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 简 介

预应力钢结构是指索结构或以索为主要受力构架与其他钢结构体系组合的平面或空间杂交结构。该结构体系既充分发挥了预应力拉索高强度的性能,又提高了普通钢结构件的利用效率,既具有节约钢材的显著经济效益,又达到了跨越大跨度的目的。

本书系统介绍了预应力钢结构施工关键技术,结合实际工程应用详细介绍了典型的几种结构形式。全书包括 10 章:第一~三章分别介绍了预应力钢结构发展与种类、施工深化设计和施工仿真模拟。第四章是全书重点内容,针对各种结构形式,详细阐述了预应力钢结构的施工方法,主要总结了各种结构形式的总体施工思路,并对预应力施加方法进行了详细论述。第五章是介绍了施工监测的意义、要求、原则、内容、方法和采集系统等。第六~十章结合典型工程实例,重点介绍典型结构形式的施工关键技术。工程实例主要包括国家体育馆(张弦结构)、北京工业大学体育馆(弦支穹顶结构)、鄂尔多斯伊金霍洛旗索穹顶(索穹顶结构)、盘锦体育场(柔性索网结构)和营口体育场(斜拉结构),以上工程实例的预应力施工均由北京市建筑工程研究院有限责任公司完成。

本书可供土木工程相关专业的研究和设计人员、施工人员和管理人员施工,也可作为院校教师、学生等参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

大跨度预应力钢结构施工技术/周黎光等著. —北京:中国电力出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-5198-0026-0

I. ①大… II. ①周… III. ①大跨度结构—预应力结构—钢结构—工程施工 IV. ①TU758. 11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 274968 号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:王晓蕾 联系电话:010-63412610

责任印制:蔺义舟 责任校对:王开云

汇鑫印务有限公司印刷·各地新华书店经售

2017 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 10.5 印张·250 千字

定价:48.00 元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

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

# 前言

---

大跨度预应力钢结构是衡量一个国家建筑科技水平的重要标准之一，也是一个国家文明发展程度的象征，世界各国都十分重视预应力结构理论和技术研究、应用与发展。随着社会的发展，建筑结构不但要满足安全性和适用性的要求，还要兼顾美观和经济的功能。顺应时代的要求，大跨度预应力钢结构以其建筑外形灵活新颖，充分利用结构骨架形式和结构材料性能承力的特点，得到了广泛的研究和应用。

随着预应力钢结构的应用，人们越来越认识到预应力施加方法、施工仿真模拟等施工关键技术是预应力钢结构能否成功建造的关键。然而，关于预应力钢结构施工关键技术的研究，多以理论分析、某种结构形式或以某项工程为主，系统介绍与阐述，并结合大量实际工程实例进行深入分析的很少。北京市建筑工程研究院有限责任公司从事预应力钢结构方面的研究与工程应用已经有十余年，积累了大量预应力施工经验，完成了包括 2008 年奥运会体育场馆、国内大型公建、高铁站房等在内的 400 余项工程，包括在美国、印尼、阿布扎比等国际工程 10 余项。工程遍布全国各地 20 多个省、直辖市及自治区。作者一直希望能够结合完成的实际工程，把预应力钢结构施工关键技术进行系统的总结、提炼，并详尽地介绍给同行。

为此，我们根据国内外预应力钢结构发展与应用情况，结合研究院近十多年完成科研项目与实际工程，并以图文并茂的方式著成本书，展现给读者。本书系统介绍了预应力钢结构施工关键技术，主要包括施工深化设计、施工仿真模拟、施工方法及施工过程监测等几个方面，结合实际工程应用详细介绍了典型的几种结构形式。目前，大跨度预应力钢结构通常可分为以下几种形式：张弦梁结构、弦支穹顶结构、索穹顶结构、柔性索网结构和斜拉结构等。结合北京市建筑工程研究院有限责任公司完成的实际工程实例，介绍以上 5 种结构形式的施工关键技术。工程实例包括国家体育馆（张弦结构）、北京工业大学体育馆（弦支穹顶结构）、鄂尔多斯伊金霍洛旗索穹顶（索穹顶结构）、盘锦体育场（柔性索网结构）和营口体育场（斜拉结构）。

作者希望借此书为土木工程相关专业人员提供施工借鉴，积累预应力钢结构专业施工经验；为技术人员提供借鉴，编写和优化施工方案，提高施工质量，保证施工安全；为科研人员提供启发，使其了解预应力钢结构基础知识，为科研创新思路更加开阔；为学生了解预应力钢结构的类型及基本施工方法，激发学习兴趣，开拓就业思路。

本书为周黎光、刘占省、王泽强、司波、尤德清及徐瑞龙六位著写完成，编写过程中参考了大量宝贵的文献，吸取了行业专家的经验。但由于著写时间相对仓促，加之水平有限，疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正。读者在应用本书过程中，如遇到相关问题，欢迎与我们交流，联系邮箱：wzeq7902@sina.com。

著者

2016 年 12 月 1 日

# 目 录

前言

第一章 预应力钢结构概述	1
第一节 张弦梁结构	2
第二节 弦支穹顶结构	6
第三节 索穹顶结构	10
第四节 柔性索网结构	14
第五节 斜拉结构	18
第二章 施工深化设计	23
第一节 深化设计概述	23
第二节 深化设计的基本步骤	24
第三节 基本结构体系的节点解决方案	27
第三章 施工仿真模拟	40
第一节 施工仿真模拟概述	40
第二节 施工仿真模拟方法	41
第三节 施工偏差与误差分析	45
第四章 预应力钢结构施工技术	56
第一节 张弦梁结构施工方法	56
第二节 弦支穹顶结构施工方法	61
第三节 索穹顶结构施工方法	63
第四节 柔性索网结构施工方法	66
第五节 斜拉结构施工方法	69
第五章 施工过程监测	73
第一节 施工监测概述	73
第二节 施工监测内容和方法	76
第三节 施工监测系统	78
第六章 张弦梁结构——国家体育馆	81
第一节 工程概况	81

第二节	施工深化设计 .....	83
第三节	施工方案 .....	84
第四节	施工仿真 .....	85
第五节	施工监测 .....	87
<b>第七章</b>	<b>弦支穹顶结构——北京工业大学奥运会羽毛球馆 .....</b>	<b>91</b>
第一节	工程概况 .....	91
第二节	施工深化设计 .....	92
第三节	施工方案 .....	95
第四节	施工仿真 .....	101
第五节	施工监测 .....	104
<b>第八章</b>	<b>索穹顶结构——鄂尔多斯索穹顶 .....</b>	<b>108</b>
第一节	工程概况 .....	108
第二节	施工深化设计 .....	110
第三节	施工方案 .....	113
第四节	施工仿真 .....	122
第五节	施工监测 .....	127
<b>第九章</b>	<b>柔性索网结构——盘锦体育场 .....</b>	<b>129</b>
第一节	工程概况 .....	129
第二节	施工深化设计 .....	129
第三节	施工方案 .....	132
第四节	施工仿真 .....	138
第五节	施工监测 .....	144
<b>第十章</b>	<b>斜拉结构——营口体育场 .....</b>	<b>146</b>
第一节	工程概况 .....	146
第二节	施工深化设计 .....	146
第三节	施工方案 .....	149
第四节	施工仿真 .....	153
第五节	施工监测 .....	156

## 预应力钢结构概述

大跨度预应力钢结构是衡量一个国家建筑科技水平的重要标准之一，也是一个国家文明发展程度的象征，世界各国都十分重视预应力结构理论和技术的研究、应用与发展。随着社会的发展，建筑结构不但要满足安全性和适用性的要求，还要兼顾美观和经济的功能。大跨度预应力钢结构顺应时代的要求，以其建筑外形灵活新颖，充分利用结构骨架形式和结构材料性能承力的特点，得到了广泛的研究和应用。

预应力钢结构是指以索结构或以索为主要受力构架与其他钢结构体系组合的平面或空间杂交结构。即在静定结构中，通过对索施加预应力，增加高强度索体赘余预应力，使其结构变为超静定结构体系，有效建立杂交结构的刚度，显著改善结构受力状态、减小结构挠度、对结构受力性能实行有效控制。该结构体系既充分发挥了预应力拉索高强度的性能，又提高了普通钢结构件的利用效率，既具有节约钢材的显著经济效益，又达到了跨越大跨度的目的。

预应力钢结构的组成元素为高强拉索。主要为高强度金属或非金属拉索，目前国内普遍采用的是强度超过 1450MPa 的不锈钢拉索和强度超过 1670MPa 的镀锌拉索；钢结构，包括各种类别的钢结构形式，如钢网架、钢网壳、平面钢桁架、空间钢桁架、钢拱架等。

预应力钢结构主要特点是：充分利用材料的弹性强度潜力以提高结构承载能力；改善结构的受力状态以节约钢材；提高结构的刚度和稳定性，调整其动力性能；创新结构承载体系，达到超大跨度的目的和保证建筑造型的美观。

预应力钢结构中高强度索体和普通强度刚性材料均能充分在结构中发挥作用，特别是索体在结构中性能的充分发挥，大大降低了用钢量，降低了施工成本和结构自重，具有显著的经济效益。预应力钢结构同非预应力钢结构相比要节约材料，降低钢耗，但节约程度要看采用预应力技术的是现代创新结构体系（如索穹顶和索膜结构等），还是传统结构体系（如网架、网壳等）。对前者而言，由于大量采用预应力拉索而排除了受弯杆件，加之采用了轻质高强的维护结构（如压型钢板及人工合成膜材等），其承重结构体系变得十分轻巧，与传统非预应力结构相比，其结构自重成倍或几倍地降低，例如韩国汉城奥运会主赛馆直径约 120m 的索穹顶结构自重仅有  $14.6\text{kg}/\text{m}^2$ 。

预应力结构的思想早在古代就产生了，如弓箭的张弦、木桶的铁箍等就是最古老的预应力结构。但是直到 20 世纪 50 年代，二次世界大战战后重建时期，由于材料匮乏资金短缺要求降低用钢量节约成本时，才出现了在传统钢结构中引入预应力的预应力钢结构学科。20 世纪 60 年代以后，传统钢结构体系中涌现大量新型空间结构体系，如网架、网壳、折板、悬索及索膜结构等，而且计算机技术得到了迅速发展，为解决高难度计算与高精度加工问题提供了保障。此时，预应力钢结构由初始的探索和试验阶段发展为标志当代先进工程技术水平的一门新兴学科。

预应力钢结构技术在 20 世纪 50 年代传入我国,但由于技术条件的限制,仅局限于平面体系的预应力钢结构工程。80 年代,随着科技的进步与工业的发展,预应力钢结构技术走出平面钢结构体系,转向预应力空间钢结构体系,同时实现了计算机技术与空间结构相结合,衍生出许多新型的预应力空间钢结构体系,如预应力网架、预应力网壳、预应力立体桁架、预应力空间张弦梁等预应力空间钢结构体系。21 世纪以来,空间结构特别是大跨度空间结构在国内得到了巨大发展。由于 2008 年北京奥运会的举办,国内建设了国家体育馆、羽毛球馆、乒乓球馆、奥体中心综合训练馆、青岛帆船中心、奥体中心体育场改造等一批优质预应力奥运工程,进一步推动了大跨度预应力钢结构的发展。

目前,大跨度预应力钢结构通常可分为以下几种形式:张弦梁结构、弦支穹顶结构、索穹顶结构、柔性索网结构和斜拉结构。

## 第一节 张弦梁结构

张弦梁结构是基于张拉整体概念的一种高效的大跨度空间钢结构形式,由连续受拉构件(索或钢拉杆)和独立受压杆件(撑杆)共同支承上部受压结构而形成。张弦梁结构中,弦的预拉力使结构产生一定的反挠度,故整体上部结构在荷载作用下的最终挠度减小;撑杆对抗弯受压构件提供弹性支撑,改善后者的受力性能。张弦梁结构使压弯构件和抗拉构件取长补短,协同工作,受力非常合理<sup>[1]</sup>。张弦梁结构在 20 世纪 80 年代一经提出,即在国外的多个实际工程中得到应用<sup>[2-7]</sup>。

### 1. 张弦梁结构分类

根据各种张弦梁结构组成要素、受力机理及传力机制等的不同,将张弦梁结构分为平面型张弦梁结构和空间型张弦梁结构。

(1) 平面型张弦梁结构。平面型张弦梁结构是指其结构构件位于同一平面内,且以平面内受力为主的张弦梁结构,最典型的为单向张弦梁结构。平面型张弦梁结构根据上弦构件的形状可分为三种基本形状:直线形张弦梁、拱形张弦梁和人字形张弦梁。单向张弦梁结构由多榀张弦梁结构平行布置,用连接构件将每相邻两榀平面张弦梁结构在纵向连接而成,如图 1-1 所示。整体结构构造简单,运输和施工方便,造价较低,但结构侧向稳定性较差,必要时需要增加侧向稳定构件。

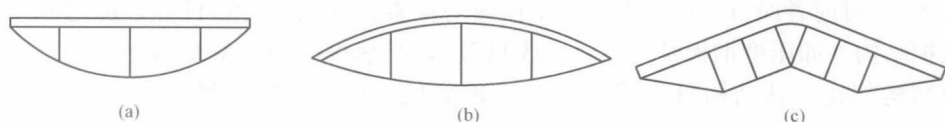


图 1-1 平面型张弦梁结构

(a) 直线形线张弦梁; (b) 拱形张弦梁; (c) 人字形张弦梁

(2) 空间型张弦梁结构。空间型张弦梁结构是以平面型张弦梁结构为基本组成单元,通过不同形式的空间布置索形成的以空间受力为主的张弦梁结构。为解决单向张弦梁结构侧向稳定性难以保证的缺点,学者提出了多种空间型张弦梁结构,又可细分为平面组合型张弦梁结构和不可分解的空间型张弦梁结构。

1) 平面组合型张弦梁结构。平面组合型张弦梁结构是将数榀平面张弦梁结构双向或多



向交叉布置而成，结构成空间传力体系，受力合理。主要有双向张弦梁结构、多向张弦梁结构和辐射式张弦梁结构，如图 1-2 所示。由于平面组合型张弦梁结构，构造形式简单，受力明确，且为空间自平衡体系，施工方便，因此，这种结构形式是目前国内应用最为广泛的张弦梁结构形式之一。

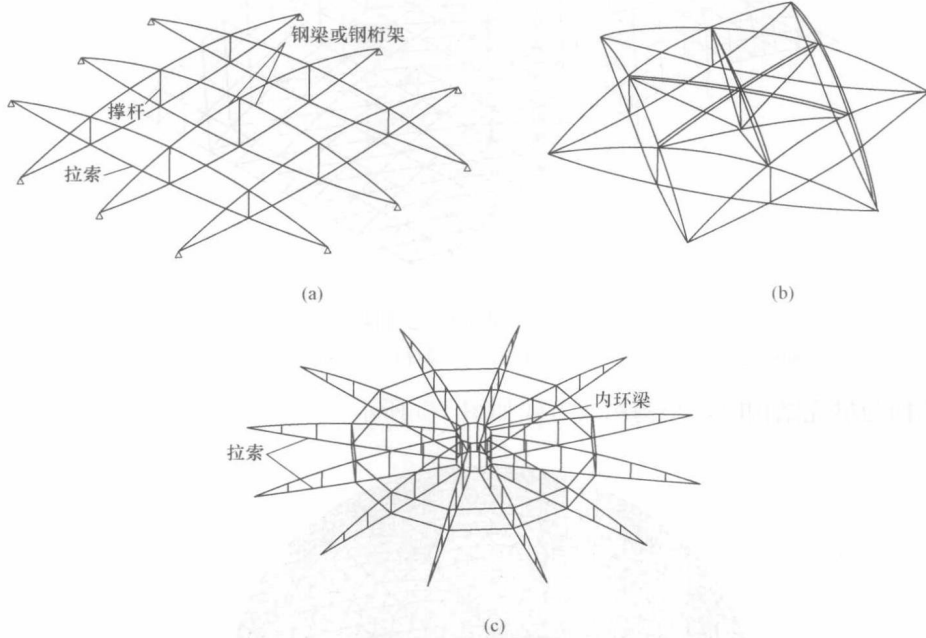


图 1-2 平面组合型张弦梁结构形式

(a) 双向张弦梁结构；(b) 多向张弦梁结构；(c) 辐射式张弦梁结构

2) 不可分解的空间型张弦梁结构。不可分解的空间型张弦梁结构，主要是上弦钢构件为整体空间受力体系，无法拆分为平面体系。不可分解的空间型张弦梁结构受力性能更好，刚度更大，适合跨度百米以上的屋盖结构。上部结构有网架结构、筒壳结构和拱壳结构等。

上部结构为网架结构时，结构构成方式如图 1-3 所示。

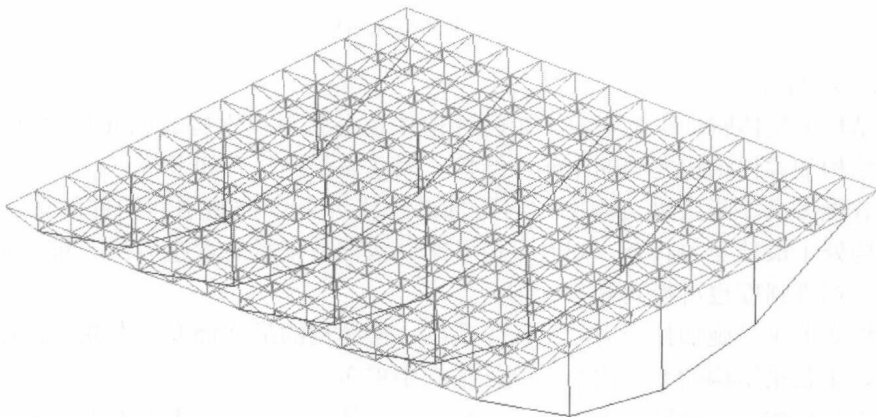


图 1-3 上部为网架结构

上部结构为筒壳结构时，结构构成方式如图 1-4 所示。

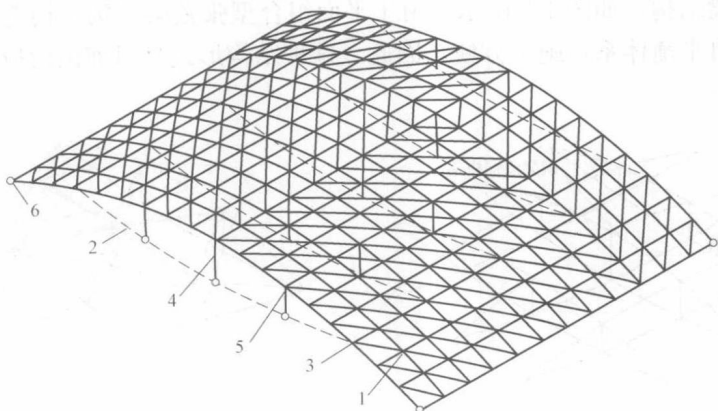


图 1-4 上部为筒壳结构

1—柱面网壳；2—拉索；3—锚固节点；4—撑杆；5—转折节点；6—支座节点

上部结构为拱壳结构时，结构构成方式如图 1-5 所示。

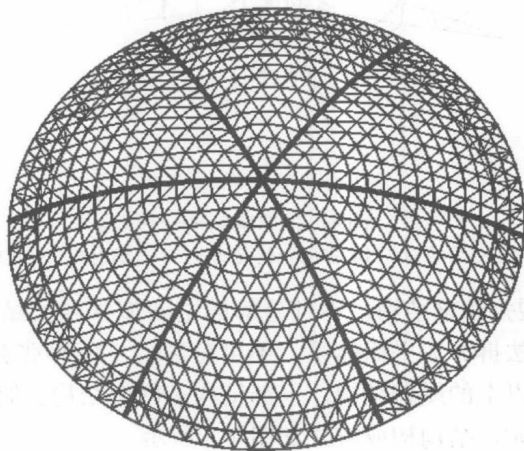


图 1-5 上部为拱壳结构

## 2. 张弦梁结构特点

张弦梁结构的整体刚度贡献来自上弦刚性构件及上弦与拉索构成的几何整体两个方面，是介于刚性结构和柔性结构之间的半刚性结构，因此该结构具有如下特点：

(1) 承载能力高。张弦梁结构中索内施加的预应力可以控制刚性构件的弯矩大小和分布，可使结构处于最佳受力状态。同时，由于刚性构件与张紧的索连接在一起，限制了结构的整体失稳，构件强度也可得到充分利用。

(2) 结构变形小。施加预应力后梁产生反拱，使结构的最终挠度大大减小，在同样的外荷载作用下，张弦梁结构的变形比单纯刚性构件小得多。

(3) 自平衡结构。当刚性构件为拱时，将在支座处产生很大的水平推力，而索的预应力可以平衡水平力，从而减小对下部结构抗侧性能的要求，并使支座受力明确，易于设计与

制作。

(4) 制作、运输、施工方便。张弦梁结构的构件和节点的种类、数量少,极大方便了该类结构的制作、运输和施工,同时,通过钢索的张拉力还可以消除部分施工误差,提高施工质量。

根据其结构形式特点,单向张弦梁比较适合平面形状为长方形或椭圆形屋盖,矢跨比在 $1/12\sim 1/8$ ,跨度在 $60\sim 120\text{m}$ 经济性能较好;双向张弦结构比较适合平面形状为正方形或长宽比为 $1.0\sim 1.2$ 的长方形屋盖;空间张弦梁适合于平面形状为圆形、椭圆形或其他多边形的屋盖。张弦梁上弦可为型钢梁、三角桁架和网架等;撑杆为单撑杆或V形撑杆,可采用圆管、矩形管或方管等;拉索可采用单索或双索,一般可选用PE拉索、高钒拉索及不锈钢拉索等。

### 3. 张弦梁结构工程实例

张弦梁结构在全国农业展览馆新馆、中石油大厦采光顶、太原煤炭交易中心等多项工程中应用,如图1-6~图1-8所示。

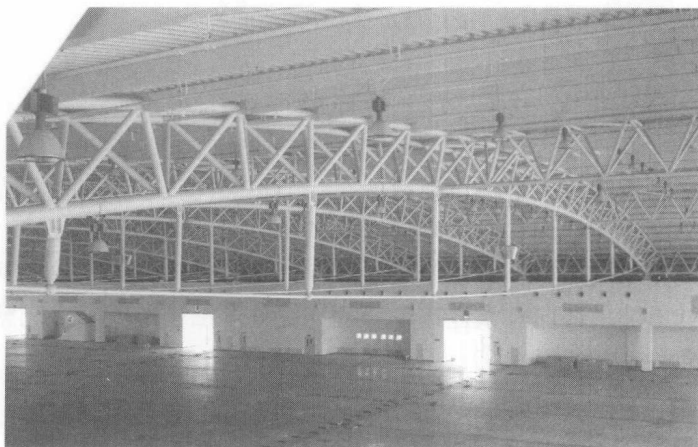


图 1-6 全国农业展览馆新馆单向张弦梁

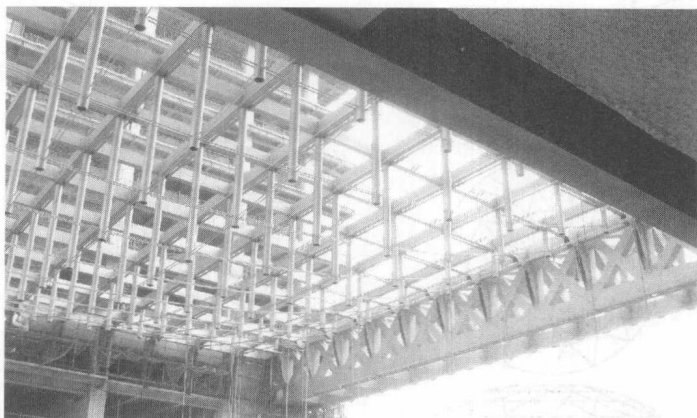


图 1-7 中石油大厦采光顶双向张弦梁

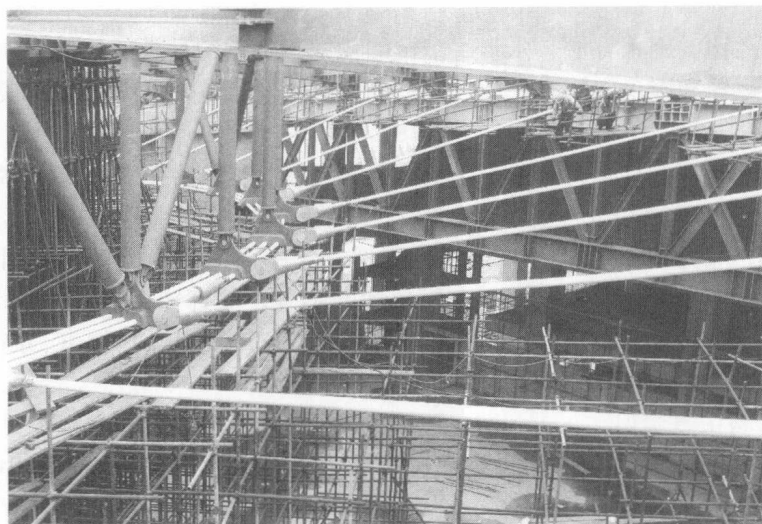


图 1-8 太原煤炭交易中心空间张弦梁

## 第二节 弦支穹顶结构

弦支穹顶结构是日本法政大学川口卫教授在综合单层网壳和索穹顶优点的基础上提出的一种新型预应力大跨度空间结构。弦支穹顶结构是由单层网壳和下部撑杆、拉索组成，各层撑杆的上端与单层网壳对应的各环节点铰接；撑杆下端由径向拉索与单层网壳的外一环节点连接；同一层的撑杆下端由环向拉索连接在一起，使整个结构形成一个完整的结构体系。其典型组成如图 1-9 所示。

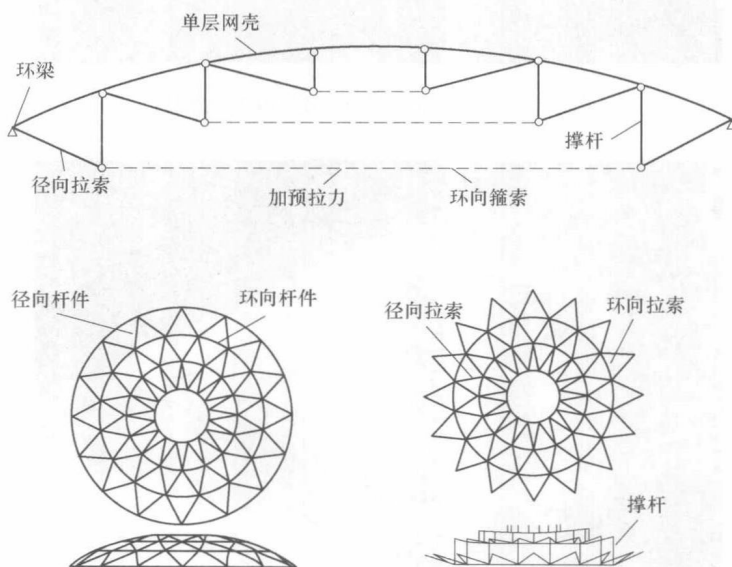


图 1-9 弦支穹顶结构体系示意图

## 1. 弦支穹顶结构分类

弦支穹顶结合索穹顶和单层网壳的优点，索和撑杆的作用在弦支穹顶上部网壳中产生与荷载作用反向的变形和内力，减小上部结构的荷载效应，并使杆件内力分布均匀，便于构件的统一和节点优化。通过调整环向索的预拉力，可以减小甚至消除穹顶对于下部结构的水平推力。根据上层单层网壳形式，弦支穹顶又可以分为肋环型弦支穹顶、施威德勒型弦支穹顶、联方型弦支穹顶、凯威特型弦支穹顶、三向网格型弦支穹顶和短程线型弦支穹顶，如图 1-10 所示。

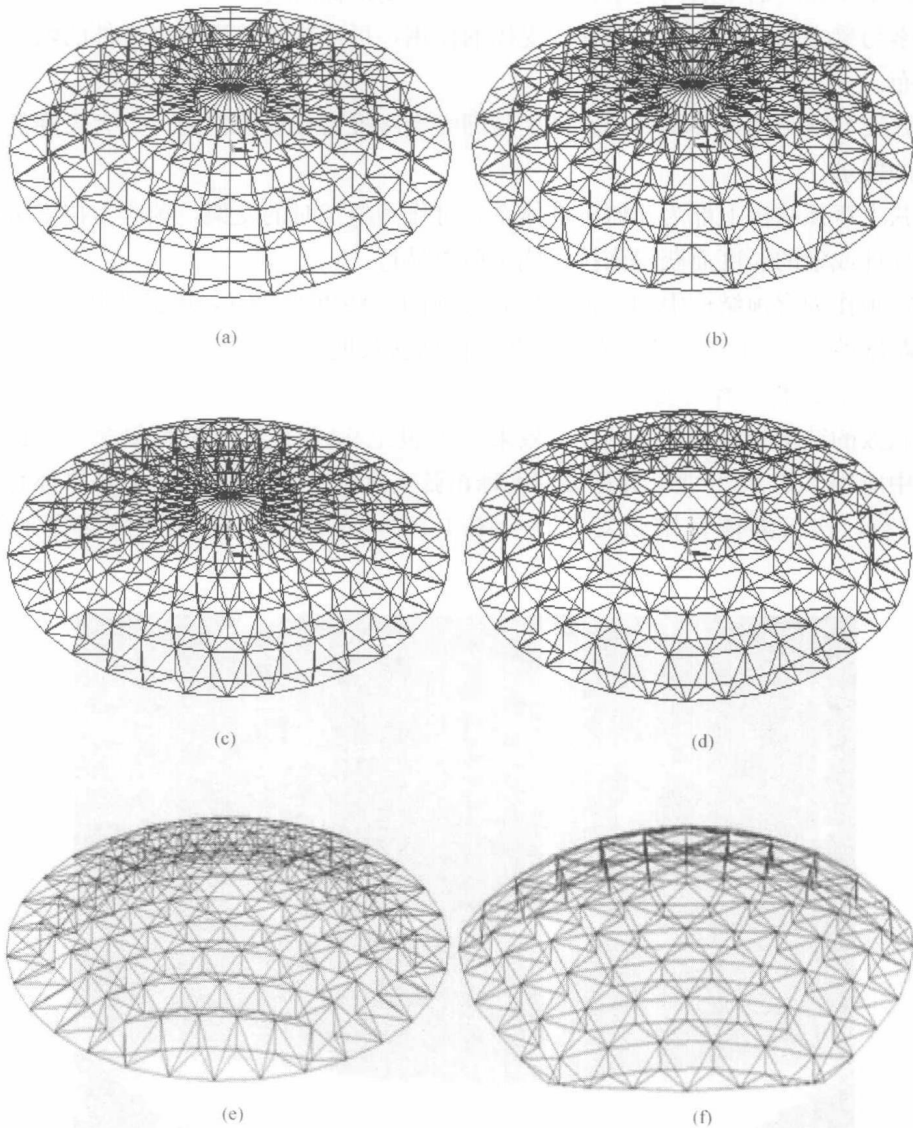


图 1-10 弦支穹顶形式

(a) 肋环型；(b) 施威德勒型；(c) 联方型；(d) 凯威特型；(e) 三向网格型；(f) 短程线型

## 2. 弦支穹顶结构特点

从结构体系看, 由于弦支穹顶结构是由单层网壳穹顶和弦支体系(张力结构)组合而形成的自平衡体系, 与单层网壳结构及索穹顶等柔性结构相比, 具有如下特点:

(1) 弦支穹顶结构是一种刚柔并济的预应力空间钢结构, 上部单层网壳的节点荷载通过撑杆传到强度高的预应力拉索中, 使结构内力转移到高强度材料中去, 从而可以有效节约钢材, 在降低结构自重的同时可以跨越更大的跨度。

(2) 通过对下部拉索施加预应力, 可使上部网壳产生与荷载作用方向相反的变形, 从而使结构变形小于相应的单层网壳结构, 索穹顶结构变形储备更大。

(3) 索与梁之间的撑杆起到了弹性支撑的作用, 可以减小单层网壳杆件的内力, 调整体系内力分布。

(4) 弦支穹顶结构最外侧径向索产生与网壳支座推力相反的作用力, 大大降低了结构对边界条件的要求。

(5) 弦支穹顶结构上部为几何不变体系, 可作为施工时的支架, 预应力拉索可以简单地通过调节杆件或索的长度而获得张拉, 施工简单易行。

弦支穹顶作为穹顶结构中的一种, 具有穹顶的一些重要特点, 因此也用于穹顶工程中, 矢高宜取跨度的  $1/5 \sim 1/3$ , 造型有穹隆状、椭球状及坡形层顶等。

## 3. 弦支穹顶结构工程实例

由于高效的结构效能和优美的建筑效果, 20 世纪 90 年代弦支穹顶概念一经提出, 就得以在工程中应用。如 2008 北京奥运会羽毛球馆弦支穹顶(图 1-11), 山东茌平体育中心体育馆(图 1-12), 连云港体育馆弦支穹顶(图 1-13), 重庆渝北体育馆弦支穹顶结构(图 1-14)等。

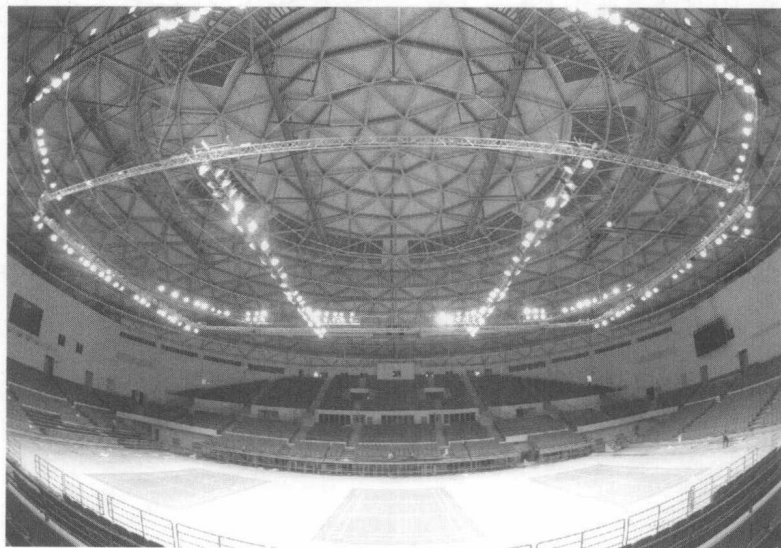


图 1-11 2008 北京奥运会羽毛球馆



图 1-12 山东茌平体育馆

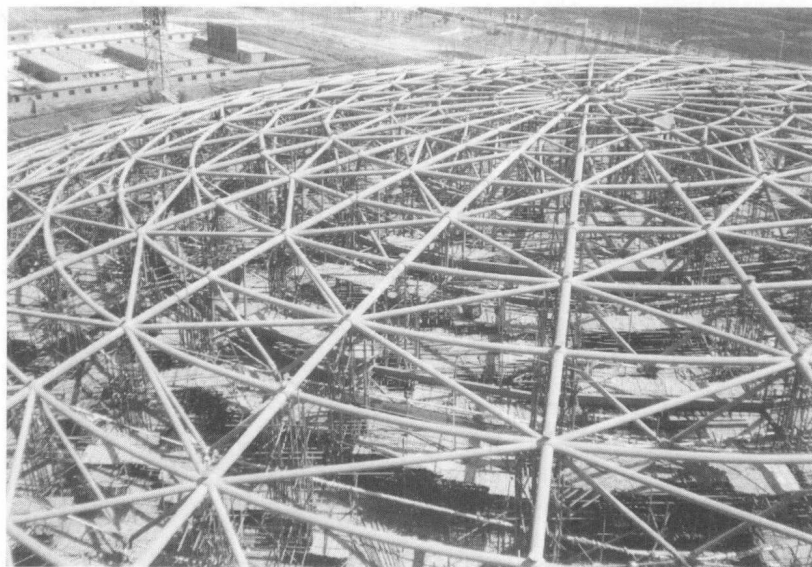


图 1-13 连云港体育馆

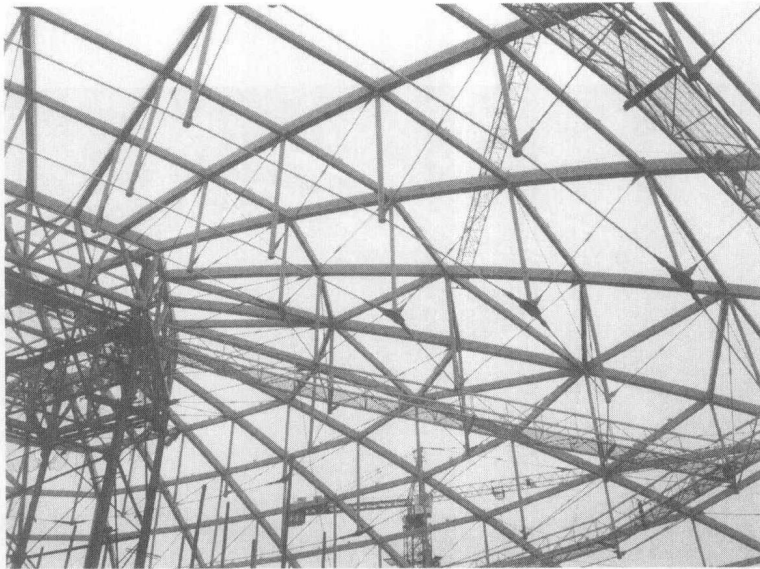


图 1-14 重庆渝北体育馆

### 第三节 索穹顶结构

索穹顶结构是由美国工程师 D. H. Geiger 根据张拉整体结构思想而设计开发的。它是一种大跨度空间柔性结构体系，主要由拉索、压杆、受拉环和受压环所组成，如图 1-15 所示。这种结构构思巧妙、外形轻盈、受力合理，可以满足人们各方面的追求，具有广阔的发展前景。

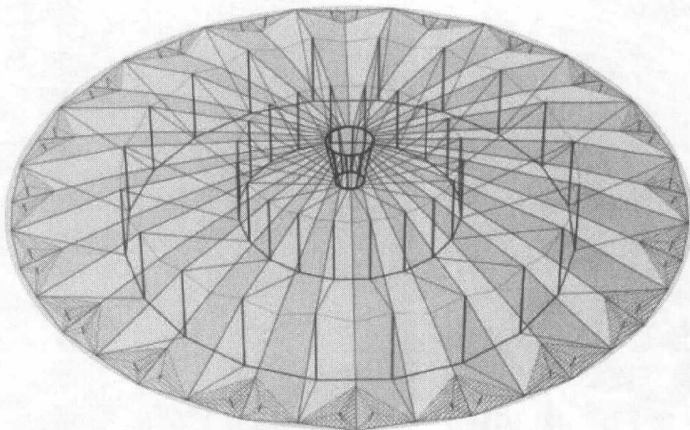


图 1-15 索穹顶结构体系效果图

#### 1. 索穹顶结构分类

索穹顶结构在 1988 年韩国汉城奥运会体操馆（直径 120m，用钢重量仅为  $13.5\text{kg}/\text{m}^2$ ）和击剑馆（直径 90m）工程中应用。它由中心内拉环、外压环梁、脊索、谷索、斜拉索、环



向拉索、竖向压杆和扇形膜材所组成,如图 1-16 所示。

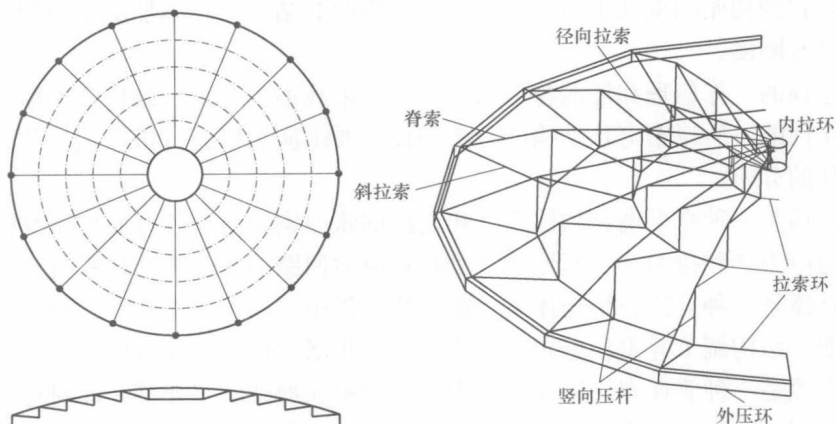


图 1-16 索穹顶结构布置图

索穹顶是一种结构效率极高的全张体系,同时具有受力合理、自重轻、跨度大和结构形式美观新颖的特点,是一种具有广阔应用前景的大跨度结构形式。

索穹顶主要包括两种类型:Levy 型索穹顶(图 1-17)和 Geiger 型索穹顶(图 1-18)。

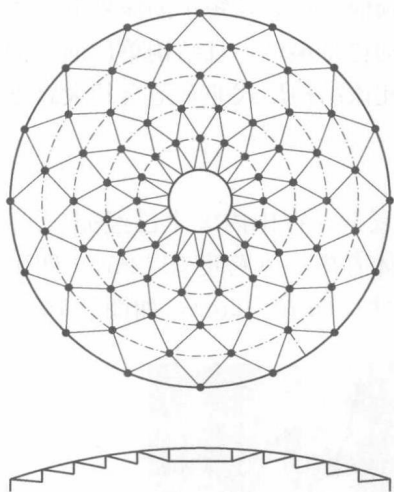


图 1-17 Levy 型索穹顶

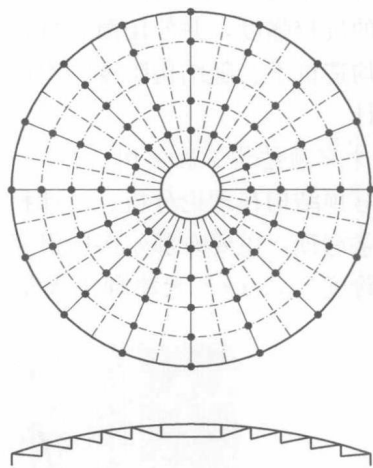


图 1-18 Geiger 型索穹顶

## 2. 索穹顶结构特点

索穹顶作为一种全张力、自平衡结构体系,在实际应用中从装配到成形再到独立承载必须经历三种结构状态,即零状态、初始态、荷载态。在零状态下结构不存在人为施加的预应力,零状态下的索穹顶严格地说应该不能称之为结构,而应当是一种机构。在初始态下结构因为引入了预应力,具备了一定的刚度能够形成一种稳定的结构。在荷载态下结构承受预应力和外部荷载的双重作用,通过众多的应力回路不断调整预应力分布状态及结构几何外形,重新达到一种稳定的平衡状态。基于上述工作机理,索穹顶结构具有以下特点:

(1) 索穹顶是一种全张力结构体系。整个索穹顶结构除少数几根压杆外都处于张力状态,只要结构不发生松弛,索穹顶便不会发生弹性失稳。