



天津市科协资助出版

张弦结构体系

◆
陈志华 著



科学出版社

天津市科协资助出版

张弦结构体系

陈志华 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

张弦结构(弦支结构),是在传统刚性结构基础上引入张拉整体体系而产生的新型复合结构体系。与刚性结构相比,张弦结构优化了力流,提高了效能;与柔性结构相比,张弦结构具有初始刚度,降低了施工难度。本书从张弦结构体系的发展历程和分类入手,研究了拉索的基本特性,分别对张弦梁、张弦桁架、弦支穹顶、弦支筒壳、弦支混凝土楼板以及其他各类弦支结构形式的结构性能、分析设计方法、试验研究成果和工程应用进行了较为详细的论述。本书主要特色是:介绍了高钒索和封闭索,给出了各种拉索的膨胀系数,并系统阐述了张弦结构的各种形式。

本书可供土木工程相关专业的设计和研究人员、大学教师、研究生、高年级本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

张弦结构体系/陈志华著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-036201-8

I. ①张… II. ①陈… III. ①建筑结构-结构体系 IV. ①TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 304984 号

责任编辑:裴 育 / 责任校对:李 影
责任印制:张 倩 / 封面设计:科地亚盟

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 1 月第一次印刷 印张:20 1/2 插页:4

字数:402 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国的钢材总产量连续 16 年位居世界第一,国家鼓励建筑工程积极用钢的背景下,大跨度空间结构得到了快速发展。我从 1990 年硕士毕业开始思考弦支结构的概念,20 年来我国弦支穹顶结构逐渐走向成熟,期间产生的部分成果经过总结,于 2010 年在中国科学院科学出版基金资助下出版了专著《弦支穹顶结构》。

从 1998 年我的第三站博士后开始,张弦(弦支)结构开始在国内受到关注。张弦结构是在传统的结构上引入预应力,优化了结构的力流路径,提高了结构的效能,被认为是未来大跨度结构发展的主要方向之一。“张弦”和“弦支”两种名称的意义基本相同,平面结构中多用“张弦”,空间结构中多用“弦支”。1998 年我负责的博士后基金虽是空间结构,也使用了“张弦”的名称,依据某些行业规程提法,二者混用在一起,并且均涵盖了平面与空间的体系。以我为负责人并获得了 2011 年度国家科技进步二等奖的一项成果中,更是将“张弦”与“弦支”的概念统一起来。

目前,在工程界中亟需一本实用的书籍来系统地对现有张弦结构成果进行总结、归纳,以帮助更多的土建技术人员和学生来掌握张弦结构的分析、设计和施工方面的关键技术。因此,我汇总了近年来平面及空间张弦(弦支)结构的成果,写成本书。

全书共 9 章:第 1 章系统介绍张弦结构提出的背景及其分类;第 2 章介绍张弦结构中的核心构件——拉索的分类和基本特性,并着重论述拉索的抗力分项系数及其可靠度的计算方法,为拉索的设计计算提供了科学依据;第 3 章是在第 2 章基础上论述拉索膨胀系数的测定方法和原理,通过试验测出各种拉索的膨胀系数;第 4 和 5 章论述给出张弦梁和张弦桁架的基本概念、设计计算方法,并结合实际工程分别分析了张弦梁、张弦桁架的结构性能;第 6 章主要论述平面组合型弦支结构的分类、设计计算方法及其工程应用;第 7 章论述弦支穹顶结构的基本概念、静动力性能、结构稳定性、结构的节点形式和设计方法、试验研究以及工程应用情况;第 8 章论述弦支筒壳结构体系的概念、设计方法、试验研究及工程应用情况,并结合算例分析了弦支筒壳结构的静力性能、稳定性能和动力性能;第 9 章主要介绍其他弦支结构体系,如弦支刚架、弦支混凝土板、弦支拱壳等结构的形式和特点。

本书的研究工作得到以下基金资助:中国博士后科学基金“张弦穹顶的静力性能研究”(中博基[98]9 号);国家自然科学基金“基于张拉整体概念的弦支结构体

系研究”(50008010)和“拉索膨胀系数及温度作用下弦支穹顶结构性能研究”(50778122)。

本书可供土建专业的科研、设计、施工和管理人员使用,也可作为高等院校土建专业空间结构方向研究生的教材和参考书。

本书的出版得到了天津市科学技术协会(天津市科协)的资助,在此表示感谢!在撰写过程中,天津大学刘红波博士,博士生严仁章、余玉洁,硕士生安琦、王哲、武晓凤、卜宜都、赵中伟等参与了有关章节的素材收集、文字编辑和插图绘制等工作;长江精工钢结构集团、北京建筑工程研究院、广东坚朗五金制品有限公司和中国巨力集团等企事业单位先后为本书提供了部分工程实例的图片和资料,谨在此表示感谢。对本书中所引用参考文献的单位与作者,特别是对空间结构领域的各位前辈,以及同行专家、同事、家人、朋友和学生的支持,一并表示衷心感谢。

由于笔者水平有限,书中难免有不当之处,恳请读者批评指正。

陈志华

2012年7月

目 录

前言

第 1 章 张弦(弦支)结构体系概述	1
1.1 大跨度结构	1
1.2 预应力钢结构	5
1.3 张弦(弦支)结构	7
第 2 章 拉索的基本特性	8
2.1 拉索的分类	8
2.2 拉索的基本特性	11
2.2.1 拉索的物理特性	11
2.2.2 拉索的抗力分项系数及其可靠度	15
2.3 拉索的防腐蚀研究及新型拉索	24
2.3.1 防腐原理	25
2.3.2 高钒索及封闭索	25
2.3.3 新型索的工程应用	30
第 3 章 拉索的膨胀系数	35
3.1 拉索膨胀系数的研究现状	35
3.2 拉索膨胀系数测定公式的确定	36
3.3 拉索膨胀系数的测定仪器	37
3.4 拉索膨胀系数的试验研究	41
3.4.1 试验方法	41
3.4.2 空气加热索膨胀系数试验研究	42
3.4.3 水域加热索膨胀系数试验研究	49
3.5 拉索膨胀系数的统计参数及其分布类型的确定	56
第 4 章 张弦梁	58
4.1 张弦梁结构的概念	58
4.2 张弦梁结构的预应力设计	59
4.2.1 设计原理	59
4.2.2 有限元应用	60
4.2.3 算例分析	61
4.3 张弦梁结构的风振特性研究	62
4.3.1 风的基本特征	62

4.3.2	时域分析法介绍	63
4.3.3	频域分析法介绍	64
4.3.4	算例分析	67
4.4	张弦梁索力测试的静力平衡法	72
4.4.1	常用的索力测量方法	72
4.4.2	静力平衡法	72
4.5	张弦梁结构的工程应用	74
4.5.1	国外工程应用	74
4.5.2	国内工程应用	75
第5章	张弦桁架	80
5.1	张弦桁架的概念	80
5.2	张弦桁架的预应力优化分析	80
5.2.1	优化分析概述	80
5.2.2	算例分析	81
5.3	张弦桁架的形态分析	83
5.3.1	形态分析概述	83
5.3.2	形态分析的内容与方法	83
5.3.3	算例分析	84
5.4	张弦桁架的静力性能若干问题分析	85
5.4.1	基本静力性能分析	85
5.4.2	线性叠加原理的验证	87
5.5	张弦桁架的极限承载力分析	88
5.5.1	特征值屈曲分析	88
5.5.2	考虑非线性的极限承载力分析	91
5.6	张弦桁架的动力性能分析	97
5.6.1	自振特性分析	97
5.6.2	自振特性参数分析	101
5.6.3	动力时程分析	103
5.7	张弦桁架的工程应用	107
第6章	平面组合型弦支结构体系	108
6.1	平面组合型弦支结构概述	108
6.2	双向张弦梁结构非线性静力分析	109
6.3	不同预应力水平对结构性能的影响	111
6.4	自振特性分析	112
6.5	平面组合型弦支结构的工程应用	114

第 7 章 弦支穹顶结构	116
7.1 弦支穹顶结构的概念	116
7.2 弦支穹顶结构的预应力设计	117
7.3 弦支穹顶结构的静动力性能分析	119
7.3.1 计算模型	119
7.3.2 基本静力性能分析	120
7.3.3 基本动力性能分析	122
7.3.4 弦支穹顶结构的风振和地震作用分析	125
7.4 弦支穹顶结构的稳定性能研究	126
7.4.1 弦支穹顶结构的基本稳定性能分析	126
7.4.2 弦支穹顶结构的稳定性参数分析	129
7.5 弦支穹顶结构节点设计	133
7.5.1 弦支穹顶节点设计原则	133
7.5.2 节点设计	134
7.6 弦支穹顶结构预应力张拉控制分析	141
7.6.1 考虑滑移摩擦的弦支穹顶结构张拉施工数值模拟	142
7.6.2 温度变化对弦支穹顶结构预应力张拉施工的影响	144
7.7 扁平椭球壳弦支穹顶	150
7.7.1 工程概况	150
7.7.2 扁平椭球壳弦支穹顶静、动力性能分析	151
7.7.3 扁平椭球壳弦支穹顶稳定性分析	159
7.7.4 屋盖与下部结构整体分析	165
7.8 预应力损失补偿措施	175
7.9 弦支穹顶结构的工程应用	177
第 8 章 弦支筒壳结构	203
8.1 弦支筒壳结构体系的组成	203
8.2 弦支筒壳结构的预应力设计	205
8.2.1 设计原理	205
8.2.2 算例分析	206
8.2.3 弦支筒壳与普通筒壳的力学性能比较	207
8.3 影响弦支筒壳力学性能的关键参数研究	208
8.4 弦支筒壳结构的稳定性研究	215
8.4.1 弦支筒壳结构的稳定特性	215
8.4.2 影响弦支筒壳稳定性能的关键参数研究	217
8.5 弦支筒壳结构的动力性能研究	222
8.5.1 弦支筒壳结构的风振特性研究	222

8.5.2	弦支筒壳结构的地震响应分析	232
8.6	不同极限状态下弦支筒壳结构的力学性能和可靠性能	239
8.6.1	算例和统计参数的选取	240
8.6.2	极限状态方程的建立	241
8.6.3	弦支筒壳整体稳定性及其可靠性研究	242
8.6.4	主要参数对弦支结构可靠性的影响研究	245
8.6.5	目标可靠度的确定	249
8.7	弦支筒壳结构的试验研究	251
8.8	弦支筒壳结构的工程应用	280
第9章	其他弦支结构	287
9.1	弦支刚架	287
9.1.1	门式刚架结构性能分析	288
9.1.2	弦支刚架结构性能分析	291
9.2	弦支混凝土楼板	292
9.2.1	弦支混凝土集成屋盖结构的预应力设计	294
9.2.2	预制钢筋混凝土板及其裂缝与强度控制	295
9.2.3	弦支混凝土集成屋盖结构的自振特性	296
9.2.4	参数变化对弦支混凝土集成屋盖结构力学特性的影响	297
9.3	弦支拱壳结构	299
9.3.1	弦支拱壳结构的基本概念	299
9.3.2	弦支拱壳结构的静力性能分析	300
9.3.3	弦支拱壳结构的稳定性分析	301
9.3.4	弦支拱壳结构的动力性能分析	303
9.4	弦支网架结构	303
9.4.1	弦支网架结构的概念及分类	304
9.4.2	弦支网架结构的性能研究	305
9.5	弦支钢丝网架混凝土夹心板	308
9.5.1	弦支钢丝网架混凝土夹芯板的提出	308
9.5.2	弦支钢丝网架混凝土夹心板拉索预应力设计	309
9.5.3	弦支钢丝网架混凝土夹心板的自振特性分析	312
9.5.4	弦支钢丝网架混凝土夹心板的裂缝控制	313
	参考文献	315

第 1 章 张弦(弦支)结构体系概述

1.1 大跨度结构

人类自有简单建筑活动以来,就一直向着更大跨度进行了不懈的努力。古罗马人创造的拱顶,把梁式建筑的有限跨度向前推进了一大步,但是由于在古代结构理论尚不完备且材料性能不足,更大跨度的结构一直没有出现。真正意义上的大跨度结构是从 19 世纪末开始的,当时由于新兴工业以及新技术革命的兴盛,在建筑上亟需大跨度、大空间结构来满足。1889 年巴黎世界博览会上的法国机械馆,跨度 115m,采用了三铰拱结构,可以说是近代建筑在大跨度上迈进的一大步,也是当时最大跨度的建筑物。进入 20 世纪后,一些大型公共建筑的出现,又促使大跨度结构向前发展,此时各种高强、轻质新材料的出现,以及结构理论的进步,都为大跨度结构的发展创造了充分的条件,并为人们在探索大跨度结构体系方面,积累了不少经验。

发展至今,常见的大跨度建筑结构主要有以下几种结构类型:梁结构、桁架结构、排架结构、门式刚架结构、拱结构、薄壁空间结构、网架结构、网壳结构、索结构、膜结构和各种复合结构等。

1) 梁结构

这是一种传统的、最简易、最原始的结构,构件通过受弯承担荷载,应力分布不均匀,需要选择既耐拉又耐压的材料,中大跨度的梁高度较大,单跨简支梁的高度比其他梁要大,如钢筋混凝土的梁高跨比为 $1/12 \sim 1/15$,预应力混凝土梁为 $1/17 \sim 1/21$,钢梁为 $1/15 \sim 1/24$ 。梁结构一般情况下多用于中小跨度的结构中,若用于跨度较大的结构则经济性较差。

2) 桁架结构

由实心梁发展到空腹梁,减轻了梁的自重、节约了材料,并可以加大跨度。在此基础上发展出桁架结构,具有很多形式,如三角形、拱形、半圆形、抛物线形、梯形、平行弦形等。桁架比空腹梁进了一大步,从其受力状态方面来看,各杆件都处于轴心受力状态,故适用于较大跨度的承重结构。钢筋混凝土桁架跨度可达 20m,预应力钢筋混凝土桁架可达 60m,钢屋架中如抛物线形的钢桁架可达 70m,甚至更大。

3) 排架结构

排架结构是由屋架或屋面梁、柱和基础连接而形成的结构形式,其中屋架简支

在柱顶,柱子底端嵌固于基础中。排架结构的纵向一般用连系构件和柱间支撑组成空间体系,形成稳定的结构。这种结构可工厂化生产,装配化施工,因而施工方便、造价较低,我国的单层厂房采用较多。排架结构跨度一般为9~36m,柱距一般在6m,也可用到12m。

4) 门式刚架结构

门式刚架结构是由柱与直线形、弧形或折线形横梁刚性连接而形成的结构形式。门式刚架结构与排架结构相比,在中小跨度的无吊车或仅有小吨位吊车厂房中使用,具有较好的经济指标。由于构件简单,室内简洁明亮,具有较大的空间,因此成为中小礼堂、食堂、商场、厂房、仓库等建筑的主要承重结构形式之一。

5) 拱结构

拱结构由拱圈和支座组成,是一种古老的结构形式。有史以来,人类就试图用拱结构去跨越一定的跨度,这是因为拱结构相比于桁架、梁式结构等具有更大的力学优点,在外荷载作用下主要承受压力,这充分发挥了诸如砖石、钢、混凝土等大量材料的抗压性能。拱结构在近代又得到更大的发展,按材料分有土拱、木拱、石拱、混凝土拱、钢筋混凝土拱、钢拱等;按轴线形状分有圆弧拱、抛物线拱、悬链线拱等;按截面形式分有实体拱、箱形拱、桁架拱等;按受力状态分有三铰拱、双铰拱、无铰拱等。房屋结构中拱结构采用的较少,一般用于大跨度公共建筑和储仓,在公路和铁路建设中应用也较多,是桥梁工程的基本结构形式之一。

拱的跨高比一般为5~8,个别情况也可用到12。拱肋相比于跨度可以做得十分细长。钢筋混凝土拱的肋高与跨度之比一般为 $1/30 \sim 1/40$,钢拱肋为 $1/50 \sim 1/80$ 。对于格构式钢拱其截面高度与跨度之比一般为 $1/30 \sim 1/60$ 。

到20世纪40年代,拱与薄壳开始结合在一起,形成了拱壳结构,1958年建成的巴黎国家工业与技术展览中心大厅,平面呈三角形,边长为218m、高48m,其屋盖即采用钢筋混凝土拱壳结构。其屋盖拱壳的拱身采用了钢筋混凝土装配式落地拱,上部为双层波形薄壁拱壳结构,拱壳壁厚仅为6cm,两层拱壳的总厚度为12cm,两层壳之间距离为1.8m,拱壳的折算厚度与跨度之比仅为 $1/1100$,远小于实际中蛋壳厚度与跨度之比,真实蛋壳的厚跨比约为 $1/100$ 。该拱壳总覆盖面积达 $9 \times 10^4 \text{ m}^2$,为当今世界上最大的钢筋混凝土拱壳结构。

6) 薄壁空间结构

薄壁空间结构主要以壳体结构为主,与前面介绍的梁、桁架、拱等结构不同,薄壁空间结构属于一种空间受力结构,曲面的厚度相较于其他尺寸要小得多。它能用最少的材料,获得最大的效果,可以充分发挥材料的力学性能。

壳体结构的曲面形式很多,球壳是最原始的一种,远在古罗马时代的拱顶即为此类。43m直径的潘松神庙也应用了球壳形式。双曲壳结构是现代才发展起来的一种壳体形式,其外形如同把一个球壳竖着在四面各切一刀,剩下中央部分壳体

即为双曲壳,它又可分为双曲扁壳与双曲抛物面壳。此外还有扭壳、双曲抛物面扭壳、筒壳、折板壳、幕结构等各种薄壁空间结构。

由于壳体结构的空间受力效果和极大的面内刚度,对于几十米或百米以上跨度的屋盖,仅需几厘米的壳厚即可。目前在世界范围内,薄壳结构已广泛地应用于大型屋盖中,如展览大厅、飞机库、大型工业厂房等。

因薄壳结构主要受压,故一般采用钢筋混凝土现浇工艺制作。由于高空现浇成型较困难,施工较为复杂,并且模板及脚手架的用料也极多,在推广应用中受到一定限制。

7) 网架结构

网架结构是近几十年发展起来的一种较先进的空间结构体系,也是现代大跨度结构的一大进展。该结构是由一系列上弦杆、下弦杆和腹杆按照一定规律组成的网格状空间结构形式,具有类似平板的外形,因此也称为平板网架。网架结构一般采用钢管制成,整体性好,可做成各种形式,承受各种不同荷载的作用。

这种结构形式的优点很多,如重量轻、整体性强、空间刚度大、抗震性能好等。网架杆件主要承受轴向力,所以它能充分发挥材料的强度。网架结构的构造高度仅为跨度的 $1/20 \sim 1/25$,其跨度可达 200m。网架结构适应范围广,可应用于如圆形、方形、多边形、矩形等各种形状的建筑平面中。

8) 网壳结构

网壳结构的外形类似于薄壳结构,只是壳面用网格状的杆件代替,既有网架结构的一系列优点,又能构成壳体那样的优美造型。网壳结构近年来发展较快,几乎取代了钢筋混凝土薄壳结构。网壳的外形和薄壳一样,有圆柱面网壳、球面网壳、椭圆抛物面网壳、双曲抛物面网壳。单层网壳需做成刚性的杆件体系,节点与杆件除传递轴向力外还需要承受弯矩,这是与网架结构的最大区别。但在受力较大、跨度较大时,为防止失稳,宜做成双层网壳。

9) 索结构

索结构原主要指悬索结构。“悬索”就是悬挂的绳索,简单地说,悬索结构就是把绳索的两端加以锚固,然后用此悬挂的绳索来承受荷载。悬索的概念形成历史悠久,清朝康熙年间我国在大渡河修建的泸定桥即为悬索桥,该桥的跨度为 104m,是有名的悬索铁桥,再如帐篷也是悬索结构的雏形。一千多年来,人们一直在不断地对悬索结构进行探索与改进,将悬索结构应用于屋盖结构是从 19 世纪末开始的,到 20 世纪 50 年代,各国对悬索结构的研究已趋向更为成熟阶段,早期的悬索结构多用于 60~100m 以上的大跨度建筑物中。近几十年来由于高强钢丝的出现,对于悬索结构的发展,提供了更有利的条件。

悬索结构最突出的优点是它所用的钢索只承受拉力,能根据材料的特性,合理地使用材料,从而节省钢材,减轻屋盖自重,有效地覆盖大范围空间。跨度在

100~150m时,使用悬索结构最为经济,跨度达到 300m 以上时,若设计合理其仍然能够实现经济合理。当然,悬索结构也有其不足之处,即在强风作用下,较为容易丧失稳定,因此在实际应用时其技术要求较高,并且要求具有相应的措施。

目前国外(主要是美国)大跨度结构中又出现了一种悬挂式结构,1972 年在美国明尼苏达州建造的联邦储备银行即采用了这种悬挂结构,其基本原理与悬索桥相同,把 16 层的办公楼悬挂在 100m 跨的空中。

10) 膜结构

膜结构是 20 世纪 40 年代发展起来的一种新型大跨度结构,它是由多种高强薄膜材料及加强构件通过一定方式使其内部产生一定的张力以形成一定的空间形状以作为覆盖结构,并能承受一定的外荷载。由于膜结构主要采用了轻质的膜材料,结构自重轻,适合运用在大跨度空间结构中。膜结构于 1946 年首先在美国出现,当时是作为雷达站,外形为圆拱体状,直径很小仅 15m,到 1956 年美国才正式建造一座充气式仓库。

膜结构按支承方式不同,可分为充气膜结构、悬挂膜结构、骨架支承膜结构和索膜结构。充气膜结构有两种结构形式,一种是将膜做成一个封闭的空间,向内鼓入空气,利用内外空气压力差,使结构具有一定的刚度来承受外荷载;另一种是将膜材料做成半圆形状的圆筒,向圆筒内充入空气,将这些半圆形的圆筒组成各种形状的屋盖。

上述每种结构形式都有其自身的受力特征和适用范围,表 1-1 给出了部分大跨度结构的受力特征和适用技术条件。

表 1-1 大跨结构形式的主要受力特征与适用范围

结构类型	受力特征	结构参数	适用条件
桁架结构	弯	高跨比:1/10~1/5、1/14~1/10	跨度:6~70m
刚架结构	弯	截面高跨比:1/20~1/15;矢跨比:1/10~1/5	跨度:12~100m
拱结构	压	矢跨比:1/8~1/5	跨度:18~200m
球壳结构	压	厚度:50~150mm;矢跨比:1/5~1/2	跨度:30~200m
扁壳结构	压	厚度:60~80mm;矢跨比:1/8~1/5	跨度:3~100m
筒壳结构	压	厚度:50~100mm;矢跨比:大于 1/8	跨度:6~100m
扭壳结构	拉/压	厚度:20~80mm	跨度:3~70m
折板结构	弯	厚度:30~100mm;高跨比:1/15~1/8	跨度:6~40m
网架结构	弯	高跨比:1/20~1/10	跨度:6~120m
网壳结构	压	矢跨比:1/10~1/8(筒壳)、1/7~1/2(球壳)	最大跨度:100m
悬索结构	拉	垂跨比:1/20~1/10	最大跨度:200m(建筑)
膜结构	拉	厚度:0.45~1.5mm	最大跨度:160m(索膜充气)

1.2 预应力钢结构

在空间结构,尤其是空间网格结构的不断发展和应用中,一些带有预应力拉索的空间网格结构逐渐显现出其在跨越空间和结构效能方面的优势,并逐渐得到认可和应用。预应力钢结构是在设计、制造、安装、使用过程中用人为方法引入预应力以提高结构强度、刚度、稳定的钢结构。典型的大跨度预应力建筑钢结构有斜拉网格结构、张弦结构、索穹顶结构、悬索结构、吊挂结构、索网结构和索膜结构等。预应力钢结构通常是通过在钢结构中引入高强度的拉索并给拉索预先施加预应力,以改变传统结构的内力与变形分布、抵消荷载作用下的内力与变形,从而提高结构的承载能力,降低结构的内力与变形峰值,达到降低结构建造成本的目的。

预应力原理的应用已有千百年的历史,如雨伞、帐篷、晾衣服时用的绳子等,但是工程师自觉地将预应力技术应用到现代钢结构工程中以节约材料、提高刚度和承载力是近 60 年的事情。1953 年,比利时 Magnel 教授在理论分析和试验研究的基础上,成功设计并建造了首个双跨预应力连续钢桁架结构——布鲁塞尔机场飞机库。1956 年,预应力钢结构课题开始列入我国国家研究技术,当时哈尔滨工业大学进行了预应力钢屋架及钢梁的研究,并主持了预应力输煤钢栈桥的设计与试验工作。随后,利用吊点代替支点出现了斜拉预应力钢结构,如 1972 年建造的慕尼黑奥运会主赛场馆。随着工程师对预应力钢结构静动力性能研究的深入,人们逐渐认识到预应力钢结构高效的结构性能和良好的经济指标,因此在 20 世纪 80 年代,国内外建造了一批典型的预应力钢结构工程,如 1988 年建造的汉城奥运会主赛馆——索穹顶结构,1990 年北京亚运会主赛馆——斜拉结构。20 世纪 90 年代前后,预应力技术与传统结构相结合,衍生出许多新型预应力钢结构,如日本的川口卫教授提出的 Suspen-dome Structure(弦支穹顶结构)、斋藤公男归纳总结出的 Beam String Structure(张弦梁结构)等。随着科技进步、工业发展,20 世纪末期在大量新材料、新技术、新理论的推动下,预应力钢结构领域中产生了一批张拉结构体系,它们受力合理、节约材料、形式多样、造型新颖、应用广泛,成为建筑领域中的最新成就。

近年来,在国内已经有许多学者在预应力钢结构方面做了大量卓有成效的工作,天津大学刘锡良和陈志华在 20 世纪 90 年代末期对弦支穹顶结构和张弦梁结构的研究工作奠定了国内弦支结构体系的基础;哈尔滨工业大学沈世钊、范峰等早期对于双向悬索结构的研究工作是有重要意义的;浙江大学董石麟、罗尧治等也对索穹顶等预应力钢结构进行了深入的研究;北京工业大学张毅刚、张爱林对弦支结构的研究做出了重要贡献;北京交通大学杨庆山和同济大学张其林对预应力索

膜结构进行了系统的分析研究。

在张弦(弦支)结构的工程应用方面,中国建筑西南设计研究院冯远、中国航空工业规划设计研究院葛家琪、北京建筑工程研究院秦杰、东南大学郭正兴以及长江精工钢结构集团和东南网架等众多设计施工单位的专家、学者起到了重要的推动作用。

根据预应力钢结构中杆件类别的构成,将预应力钢结构分为三类,即刚性预应力钢结构、刚柔混合预应力钢结构、柔性预应力钢结构。其中刚性预应力钢结构的构件全部为刚性构件,典型的结构形式包括以支座位移法引入预应力的预应力网架结构、以重力引入预应力的钢棒式吊挂结构以及以细长钢梁承担拉索角色的钢梁预应力钢结构(日本的代代木体育馆,如图 1-1 所示);刚柔混合预应力钢结构的构件类型包括刚性的梁、杆和柔性的拉索,典型的结构形式包括斜拉结构、张弦(弦支)结构、索桁结构、索穹顶结构、悬索结构和拉索式吊挂结构等;柔性预应力钢结构的构件全部由柔性的索、膜构成,典型的结构形式有索网结构和索膜结构。预应力钢结构的分类示意如图 1-2 所示。

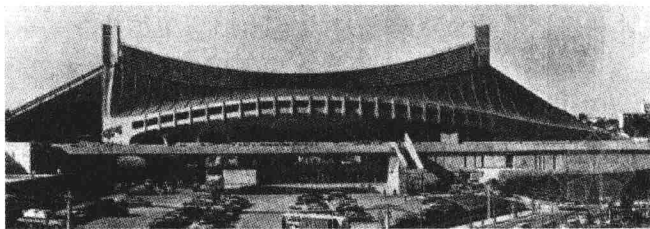


图 1-1 日本的代代木体育馆

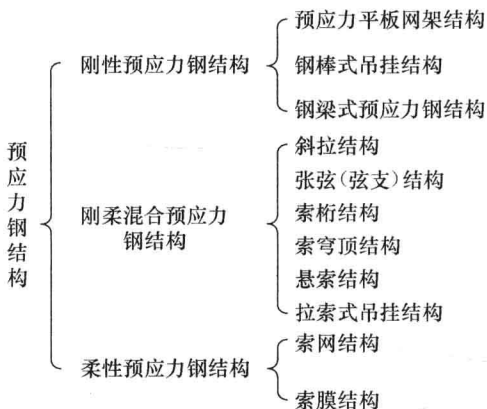


图 1-2 预应力钢结构分类示意图

1.3 张弦(弦支)结构

张弦(弦支)结构作为预应力钢结构的一个分支,在传统刚性结构的基础上引入柔性的预应力拉索,并施加一定的预应力,从而改变了结构的内力分布和变形特征,优化了结构的性能,使得结构能够跨越更大的跨度,在工程中已得到了广泛的应用。天津大学钢结构研究所从1998年开始,在研究张弦梁、张弦桁架和弦支穹顶的结构性能基础上,研究和归纳了这三种结构的本质:即用撑杆连接上部压弯构件和下部的受拉构件,通过在受拉构件上施加预应力,使上部结构产生反挠度,从而减小荷载作用下的最终挠度,改善上部构件的受力状态,并通过调整受拉构件的预应力,减小结构对支座产生的水平推力,使之成为自平衡体系,并将这种自平衡体系称为张弦(弦支)结构体系。该研究所在研究张弦结构体系本质的基础上,相继提出了弦支筒壳结构、弦支拱壳结构、弦支混凝土楼板结构、弦支钢丝网架混凝土夹芯板结构等多种弦支结构,丰富了张弦结构体系的内容。目前,张弦结构体系已在大型的体育场馆、会展文化中心、重大交通枢纽、大型厂房等国家重要基础设施建设工程中得到了广泛的应用。

张弦结构作为一种刚柔结合的复合大跨度建筑钢结构,与传统的梁、网架、网壳相比,其受力更为合理;与索穹顶、索网结构、索膜结构相比,施工过程简单,并且在屋面结构选材方面张弦结构也较索穹顶结构更为容易。张弦结构体系根据上部刚性结构的不同主要分为:张弦梁、张弦桁架、张弦刚架、弦支穹顶、弦支筒壳、弦支混凝土楼板等其他弦支结构。其中张弦梁、张弦桁架和张弦刚架在结构体系中均为平面型受力构件,属于平面型弦支结构;将平面型弦支结构组合形成一种空间弦支结构,此时结构的受力具有空间特性,可提高结构的承载能力,解决平面弦支结构的平面外稳定问题。

第2章 拉索的基本特性

拉索作为张弦(弦支)结构体系的核心构件,是一种柔性构件,不同于其他刚性构件。它是依靠预先对其施加预应力从而在结构中仅能承受拉力荷载。拉索的存在改变了力流在结构内部的分布,从而优化了结构的性能。拉索特性的改变对结构的性能能产生较大的影响。

2.1 拉索的分类

拉索从用途上可分为建筑结构用索和桥梁用索;从索体材料的构成要素进行分类,大致可分成四类:钢丝绳、钢绞线、钢丝束和钢拉杆。

1. 钢丝绳

钢丝绳主要由绳芯、绳股和钢丝三个基本元件组成。钢丝绳索体通常有单股钢丝绳、密封钢丝绳、多股钢丝绳,见图 2-1。

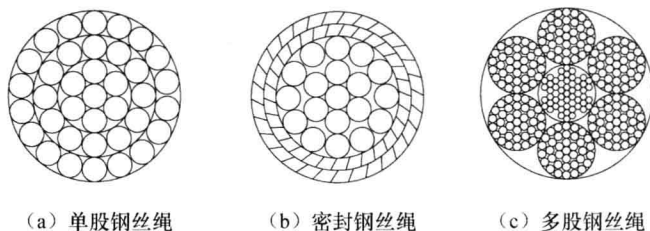


图 2-1 钢丝绳索体截面形式

常用的也有以下几种方法:

- (1) 按结构可分为:单捻(股)钢丝绳、双捻(多股)钢丝绳、三捻钢丝绳。
 - (2) 按绕制方法可分为:同向捻、交互捻、混合捻。
 - (3) 按丝与丝的接触状态可分为:点接触、点线接触、线接触、面接触。
 - (4) 按股的断面形状可分为:圆股钢丝绳、异型股钢丝绳。其中,异型股钢丝绳主要包括三角股钢丝绳、椭圆股钢丝绳和扇形股钢丝绳。
 - (5) 按钢丝表面状态可分为:光面钢丝绳、镀锌钢丝绳、涂塑钢丝绳。
- 使用时,钢丝绳会发生伸长,其伸长分为弹性伸长和结构性伸长。钢丝绳的预