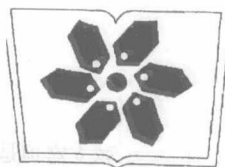


弦支穹顶结构

陈志华 著



科学出版社
www.sciencep.com



中国科学院科学出版基金资助出版

弦支穹顶结构

陈志华 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

弦支穹顶是基于张拉整体概念而产生的一种预应力空间结构,具有力流合理、造价经济和效果美观等特点。通过 2008 年奥运会和 2009 年全运会等大跨度体育馆的建设,弦支穹顶这一新结构体系的优势得到充分体现。本书从空间结构和弦支结构的论述开始,给出了弦支穹顶结构类型、分析设计理论、结构静动力特性、结构试验、节点形式和设计原则、结构施工分析和控制理论等一套完整的弦支穹顶结构研究成果及工程实践进展内容。本书有两个特色:一是从理论上提出了连续折线索单元;二是从实践上对近 20 项已建和在建弦支穹顶结构工程进行了总结。

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

弦支穹顶结构/陈志华著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-027179-2

I. 弦… II. 陈… III. 拱-工程结构-研究 IV. TU34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 060688 号

责任编辑: 鄢德平 刘凤娟 / 责任校对: 刘小梅

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2010 年 3 月第一次印刷 印张: 15 1/2 彩插: 2

印数: 1—2 000 字数: 300 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前言

1983 年我考入天津大学选择建筑结构作为自己的专业,之所以没有选择中学时喜欢的化学,是因为父母的建议;1987 年被推荐免试读硕士研究生,我之所以选择钢结构方向是因为一位老同学的参谋意见;1988 年导师刘锡良教授带我乘长途火车坐硬座去成都参加第四届空间结构会议,脚虽然肿胀得穿鞋都有些费力了,但精神上收获巨大,就这样我真正喜欢上了空间结构。

1990 年硕士毕业的时候,网架几乎成为空间结构的代名词,虽然设计网架对当时的设计院来说还有些难度,但是网架应用呈现无所不在、无所不能的鼎盛态势,因为一方面人们认识到网架代表着空间结构的各种优势;另一方面,设计院在图纸上一道线加一行字(详见厂家图纸)就能解决问题。结构体系上网架之后空间结构的下一步发展方向在哪儿?我去兰州参加第五届空间结构会议时,闪念出此问题,当时想到了用索代替网架下弦拉杆,还画了一个草图,但没有深入思考。经过两年设计院的工作,我又回到天津大学跟刘老师读博士,选择张拉整体为课题时才接上原来的闪念。

我在攻读博士期间完成的张拉整体雕塑塔给到访的国际薄壳及空间结构学会主席川口卫教授留下了良好的印象,经他努力举荐,我得以出国跟随他完成 Hosei 大学和日本文部省学术振兴会的两站博士后,期间更是与 Suspendome(弦支穹顶)结下了不解之缘,以至于刘老师劝我回国做第三站博士后及以后留天津大学工作到现在,都一直没有停止弦支穹顶的研究。

当代中国经济飞速发展,建筑结构新体系层出不穷,2008 年奥运会和 2009 年全国运动会使弦支穹顶成为新结构体系的一颗明星。凭借其合理的传力机制、美观的建筑效果和经济的工程造价,弦支穹顶结构已经得到中国科研、教学、设计、施工等业界的认可,在实际工程应用中,无论是数量上还是跨度上,都为世界之最。

伴随近二十项工程的应用,弦支穹顶结构的计算理论、分析方法和构造技术得到了快速发展,从最早天津弦支穹顶工程的技术讨论,到后来参加奥运会羽毛球馆、常州体育馆、济南奥体中心体育馆、三亚市体育中心体育馆、大连市体育馆和山东庄平体育馆的各个弦支穹顶的专家论证会,特别是在奥运工程如火如荼的建设期内,一周两次到羽毛球馆参加施工技术专项论证,我感觉有必要进行技术总结。因而结合近年来从事空间结构教学、科研和工程实践的工作,以完成的弦支穹顶结构研究成果为主进行总结,我写成本书。写作体例上基于工程实例来论述弦支穹顶结构的结构类型、分析设计理论、结构特性、结构试验、节点形式和设计、结构施工

分析等内容。

全书共分 10 章：第 1 章系统介绍了弦支穹顶结构提出的背景及其基本概念；第 2 章给出了弦支穹顶结构的非线性分析基础理论和作者提出的连续折线索单元分析方法；第 3 章是弦支穹顶结构形态分析方法的总结；第 4 章和第 5 章结合算例，分析了弦支穹顶结构的静动力特性及其稳定特性；第 6 章论述了连续折线索单元在弦支穹顶结构的静动力特性分析中的应用；第 7 章介绍了弦支穹顶结构的试验研究成果；第 8 章给出了弦支穹顶结构的节点形式和设计方法；第 9 章是弦支穹顶结构的施工模拟分析；第 10 章介绍了国内外已建的、在建的弦支穹顶结构工程和部分方案概况。

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。

本书能够获得中国科学院科学出版基金的资助出版，特别要感谢董石麟院士和沈士钊院士的推荐以及他们宝贵的写作建议。感谢导师刘锡良教授从大学、硕士、博士、博士后以及留校任教以来无私的教导、支持和帮助。感谢当代国际建筑设计大师川口卫教授十多年来在结构哲学方面孜孜不倦的教诲和工程概念创新上循序渐进的引导。

本书撰写过程中，天津大学博士生刘红波等同学参与了有关章节的素材收集、文字编辑和插图绘制工作，谨在此表示感谢。对本书中引用的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、同行专家、同事、家人、朋友和学生的支持，一并表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不当之处，恳请读者批评指正。

陈志华

2010 年 1 月于天津大学

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 空间结构形式的发展	1
1.1.1 空间结构的概念	1
1.1.2 空间结构的特点	1
1.1.3 空间结构的形式	2
1.2 弦支结构	3
1.2.1 弦支结构的概念及特点	3
1.2.2 弦支结构的分类	5
1.3 弦支穹顶结构	8
1.3.1 弦支穹顶结构的概念	8
1.3.2 弦支穹顶结构的特点	10
1.3.3 弦支穹顶结构的发展和应用现状	11
1.4 弦支穹顶结构的分类	16
1.4.1 按上层单层网壳形式划分	16
1.4.2 按上层构件连接形式划分	20
1.4.3 按下层拉索的类型划分	20
1.4.4 弦支穹顶结构分类小结	20
1.5 本书的主要内容	21
第 2 章 几何非线性有限单元法	23
2.1 空间杆单元刚度矩阵	23
2.1.1 基本假定	23
2.1.2 平衡方程的建立	23
2.2 空间梁单元	25
2.2.1 基本假定	25
2.2.2 弹性梁单元在随动局部坐标系中的切线刚度矩阵	25
2.2.3 弹性梁单元在单元局部坐标系中的切线刚度矩阵	27

2.3	索单元	28
2.3.1	间断索单元	28
2.3.2	连续折线索单元	29
2.4	总刚矩阵的集成与边界条件的处理	37
2.4.1	总刚矩阵的集成	37
2.4.2	边界条件的处理	38
2.5	非线性方程组的求解方法	38
第3章	弦支穹顶结构的形态分析	40
3.1	形态分析的基本概念	40
3.2	弦支穹顶结构的形态分析理论	41
3.2.1	找力分析方法	41
3.2.2	找形分析方法	43
3.2.3	找力算例分析	45
第4章	弦支穹顶结构的静力性能分析	49
4.1	弦支穹顶结构的预应力设计	49
4.2	弦支穹顶结构的基本静力性能	51
4.2.1	计算模型	51
4.2.2	基本静力性能分析	51
4.2.3	线性叠加原理的验证与应用	52
4.2.4	弦支穹顶结构静力性能的参数分析	54
4.3	弦支穹顶结构的稳定性分析	56
4.3.1	弦支穹顶结构的基本稳定性分析	56
4.3.2	弦支穹顶结构的稳定性参数分析	58
第5章	弦支穹顶结构的动力性能研究	76
5.1	弦支穹顶结构的基本动力特性	76
5.1.1	弦支穹顶结构的自振特性	76
5.1.2	参数分析	78
5.2	弦支穹顶结构的风振响应分析	84
5.2.1	风振分析的必要性	84
5.2.2	水平风力作用下结构响应	85
5.2.3	竖向风力作用下结构响应	96
5.2.4	小结	97
5.3	弦支穹顶结构的地震反应分析	98
5.3.1	弦支穹顶结构的地震反应特性	98

5.3.2	地震反应的参数分析	104
5.3.3	小结	114
第 6 章	用连续折线索单元的弦支穹顶结构特性分析	116
6.1	连续折线索单元应用于弦支穹顶结构的静力分析	116
6.1.1	计算模型	116
6.1.2	预应力作用下的弦支穹顶结构	117
6.1.3	预应力与荷载共同作用下的弦支穹顶结构	120
6.1.4	稳定分析	123
6.1.5	小结	128
6.2	连续折线索单元应用于弦支穹顶结构的动力性能分析	129
6.2.1	地震时程响应分析	129
6.2.2	小结	133
第 7 章	弦支穹顶结构的试验研究	134
7.1	弦支穹顶结构模型试验研究	134
7.1.1	试验模型	134
7.1.2	观测方案	135
7.1.3	加载过程	137
7.1.4	试验结果分析	140
7.2	弦支穹顶结构实物静力特性试验研究	141
7.2.1	试验对象	141
7.2.2	试验加载制度	141
7.2.3	观测制度	143
7.2.4	加载过程	144
7.2.5	试验数据采集与处理方法	144
7.2.6	局部刚性弦支穹顶结构的试验结果及其与理论分析的对比	146
7.2.7	刚性杆弦支穹顶结构试验结果及其与理论分析的对比	150
7.3	弦支穹顶结构动力特性试验研究	153
7.3.1	弦支穹顶结构动力特性理论分析	154
7.3.2	模态试验激励方法及信号采集	161
7.3.3	试验模态分析预试验	162
7.3.4	第一阶段试验结果分析	163
7.3.5	第二阶段试验结果分析	165

第 8 章 弦支穹顶结构的节点	172
8.1 弦支穹顶节点设计原则	172
8.2 网壳节点	173
8.3 撑杆上节点设计	178
8.3.1 撑杆上节点设计原则	178
8.3.2 撑杆上节点形式	178
8.4 撑杆下节点设计	180
8.4.1 撑杆下节点设计原则	180
8.4.2 撑杆下节点形式	180
8.4.3 预应力钢结构滚动式张拉索节点	183
8.5 支座节点	184
第 9 章 弦支穹顶结构的施工模拟分析	187
9.1 弦支穹顶结构施工的特殊性	187
9.1.1 弦支穹顶结构的预应力施加方法	187
9.1.2 弦支穹顶结构施工模拟分析的必要性	187
9.2 弦支穹顶施工分析方法	188
9.2.1 弦支穹顶结构施工正分析方法	188
9.2.2 弦支穹顶结构的施工反分析方法	189
9.3 弦支穹顶施工滑移摩擦数值分析	190
9.3.1 考虑滑移摩擦的预应力张拉数值模拟方法	190
9.3.2 考虑滑移摩擦的算例分析	194
第 10 章 弦支穹顶结构工程实例	199
10.1 光丘穹顶	199
10.2 聚会穹顶	200
10.3 天津保税区商务中心大堂屋盖	201
10.4 昆明柏联商厦采光顶	203
10.5 天津博物馆贵宾厅	204
10.6 武汉体育中心体育馆	205
10.7 常州体育馆	207
10.8 2008 年北京奥运会羽毛球馆	210
10.9 济南奥林匹克体育中心体育馆	213
10.10 安徽大学体育馆	215
10.11 连云港体育中心体育馆	217

10.12	辽宁营口奥体中心体育馆	220
10.13	山东茌平体育馆	221
10.14	三亚市体育中心体育馆	224
10.15	渝北体育馆	226
10.16	深圳坪山体育馆	228
10.17	大连市体育馆	228
10.18	南沙体育馆及其他工程方案设计	231
参考文献		235

第1章 概 述

1.1 空间结构形式的发展

1.1.1 空间结构的概念

随着现代社会的发展和人们生活水平的提高,人们对大跨度空间的需求越来越多,代表性场所包括体育场馆、会展中心、博物馆、车站、影剧院、候机厅、飞机库、工业厂房、共享大厅和多功能活动中心等。传统的平面结构如梁、拱、桁架、刚架等,受其结构特性的限制,很难覆盖较大的空间。国际薄壳与空间结构协会(International Association of Shell and Spatial Structure, IASS)的创始人特罗哈(E. Torroja)有一句名言:“最佳结构有赖于其自身受力之形体,而非仅材料之潜在强度。”因此,要建造大跨度空间的建筑,应采用合理的结构形式,使其能充分发挥结构体系和结构材料的性能。空间结构(space structures 或 spatial structures)正是能够满足大跨度建筑要求的结构形式。它不仅受力合理,而且能做出各种优美的建筑造型,成为近年来大跨度建筑常用的结构形式。

空间结构是形态呈三维立体状态、在荷载作用下具有三维传力特性,即表现为三维空间工作的结构。空间结构是相对于平面结构而言的,一般来说,早期所采用的梁、拱、桁架等都属于平面结构,它所承受的荷载以及由此产生的内力和变形都可认为是二维的,即处于同一个平面内。空间结构的荷载、内力、变形则必须在三维空间内考虑,即作用于空间而非平面内。

1.1.2 空间结构的特点

空间结构与传统平面结构相比,具有以下特点:

(1) 自重轻。这是空间结构最主要的优点,由于结构构件呈空间分布,荷载作用下力的传递以轴向拉力或压力为主,构件中的材料强度可以充分利用,因而可以大幅节约材料,降低自重。而且,目前大部分空间结构都采用钢材和膜材等,这都使结构自重大大减轻。

(2) 工业化生产施工速度快。空间结构的构件通常可在工厂中预制,这些简单的预制构件非常适合标准化及商业化,不需要复杂的技术,在工地上就可以很快地安装起来。

(3) 刚度大、支承布置灵活。由于空间结构具有三维特性,所有构件都能充分受力。因此,空间结构能很好地承受不对称荷载或较大的集中荷载。此外,在结构

平衡及支承柱的布置上也有较大的灵活性,这些特点使空间结构特别适合在大跨度建筑中使用。

(4) 抗震性能好。自重轻使得地震反应小,刚度大且三维空间受力更使结构抗震性能大为改善。

(5) 造价低。轻质高强材料的采用以及大规模工业化生产,使其造价较低。

(6) 造型美观。为满足建筑上的需要,空间结构可以提供许多造型和形式。目前建筑艺术方面有一种趋势,即将结构外露作为建筑的一种直观表达形式,空间结构恰好能满足这样的视觉效果。

正因为空间结构的这些优点,使其在现代社会的各种大跨度建筑中得到广泛应用。

1.1.3 空间结构的形式

传统的空间结构主要包括薄壳、网架、网壳、悬索和膜结构五种形式。

1) 按结构主要单元特性划分(图 1-1)

- (1) 索结构,包括索网结构、斜拉结构和悬索结构。
- (2) 膜结构,包括张拉膜结构、气承式和气胀式膜结构。
- (3) 网格结构,包括网架结构、柱面网壳结构、球面网壳结构、特定形式的曲面网壳结构。
- (4) 壳体结构,包括筒壳结构、穹顶结构和特定曲面薄壳结构。
- (5) 折板结构,包括平行折板结构、斜交折板结构和多面体折板结构。
- (6) 组合网架结构。
- (7) 张拉整体结构。
- (8) 索穹顶结构。
- (9) 弦支穹顶等。

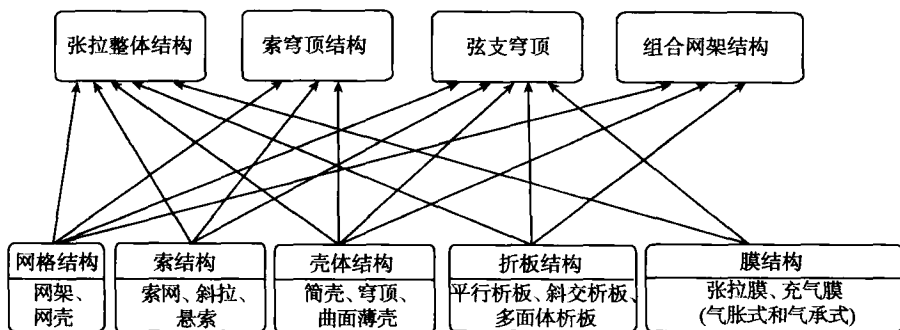


图 1-1 空间结构形式

2) 按照结构建筑材料划分

- (1) 石结构。
- (2) 砖结构。
- (3) 混凝土结构。
- (4) 钢结构。
- (5) 木结构。
- (6) 竹结构。
- (7) 铝合金结构。
- (8) 膜结构。
- (9) 塑料结构。
- (10) 纸结构。
- (11) 玻璃结构。
- (12) 冰结构等。

3) 按照建造或使用方式划分

- (1) 开合结构。
- (2) 折叠结构。
- (3) 攀达穹顶等。

随着计算机技术、新型材料及空间结构分析设计理论的发展,空间结构形式近来得到快速发展,特别是在2008年北京奥运会和2010年上海世博会的机遇下,中国大跨度空间结构形式得到了极大丰富,出现了许多新型结构形式,如空腹网壳结构、空间索桁结构、鸟巢型结构(2008年奥运会国家体育场)、多面体空间刚架(2008年奥运会国家游泳中心)及弦支穹顶等。

1.2 弦 支 结 构

1.2.1 弦支结构的概念及特点

适用于建造大空间的拱、壳体 and 网壳等以受压为主的结构,在跨越较大跨度时,存在以下问题:① 支座水平推力较大,给下部支承结构的设计带来困难;② 稳定性对结构初始缺陷的敏感程度较大,构件材料强度利用率较低。解决水平推力和拱壳结构的稳定性成为结构技术的一个关键点。

张拉整体(tensegrity)是20世纪美国著名建筑师富勒(R.B.Fuller)提出的一种由一组不连续的受压杆件与一套连续的受拉单元组成的自应力、自平衡空间网格结构,它最大限度地利用了材料特性,从概念上讲能够利用尽量少的钢材建造超大跨度建筑结构,世界各国建筑结构领域的专家及研究院所一直在致力于将张拉整体结构应用于实际工程中。但由于建筑技术的限制,目前实际工程还没有建成真正意义

上的张拉整体大跨度结构,仅有一些雕塑作品和模型等,但这种拉压复合的结构概念为解决推力提供了一条途径。

作者于 1992 年在国内开展了张拉整体结构相关技术的研究,图 1-2 为作者于 1994 年完成的张拉整体雕塑,在随后的十余年间,又相继对三棱柱(图 1-3)和四棱柱张拉整体单元的结构特性和制作方法进行了研究,并进行了相关试验研究。在上述成果的基础上,作者 2005 年以塘沽拟建的 30m 高张拉整体塔雕塑为背景,完成了张拉整体塔结构模型试验,试验模型如图 1-4 所示。

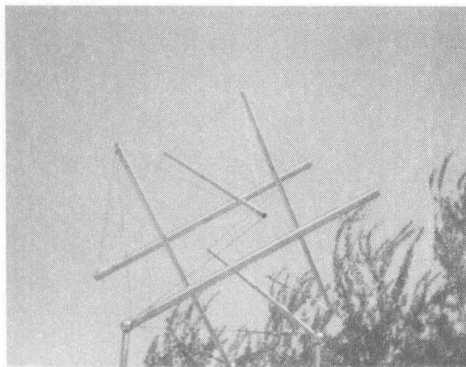


图 1-2 天津大学张拉整体雕塑

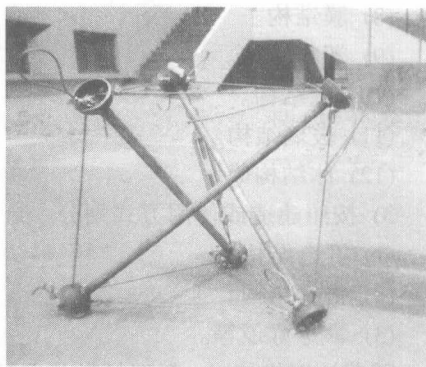


图 1-3 三棱柱张拉整体单元

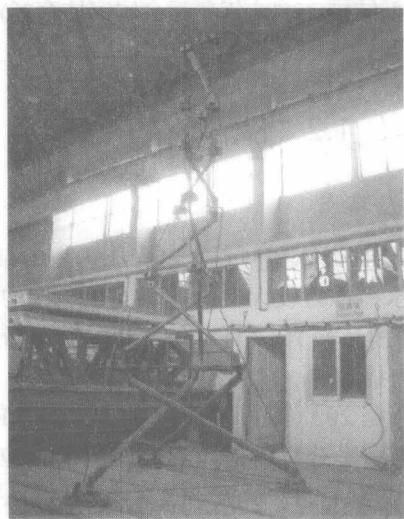


图 1-4 塘沽拟建张拉整体塔缩尺模型

日本大学斋藤公男 (M. Saitoh) 教授 1990 年提出了张弦梁 (beam string structure), 张弦梁结构是一种用撑杆连接抗弯受压构件(梁、拱)和抗拉构件(索)而形成的一种自平衡体系, 通过对下层索施加预应力可以使结构整体共同工作。下层索的预应力, 通过撑杆使梁产生与使用荷载作用时相反的位移, 从而部分抵消外荷载的作用。下层索与梁之间的撑杆对上层梁起到了弹性支撑的作用, 减小了上层梁的弯矩; 同时, 下层索负担外荷载对上层梁产生的外推力, 从而降低对边缘构件产生的水平推力, 整体结构形成自平衡体系。为了解决单层网壳结构水平推力和稳定性问题, 日本法政大学川口卫 (M. Kawagucki) 教授于 1993 年提出了由单层网壳和去掉上层索的索穹顶结构组成的 Suspen-dome, 与单层网壳结构相比, 它具有更高的稳定性, 且有效减小了支座的水平推力; 与索穹顶结构相比, 它不仅减小了周圈环梁的压力, 而且大幅降低了结构的施工难度。

作者在研究张拉整体过程中, 发现若将张拉整体的概念引入传统结构, 可有效解决稳定性、承载能力、构件材料强度利用率等方面的问题。在借鉴川口卫教授和斋藤公男教授研究成果基础上, 总结归纳出弦支结构体系 (cable supported structural system), 亦可称作张弦结构体系。弦支结构是利用拉索和撑杆组成的索撑体系来支承传统结构形成的一种预应力复合结构体系, 张弦梁结构是由下部张拉整体部分与传统梁结构相结合而形成的一种弦支结构形式, 亦称为弦支梁结构。

弦支结构的本质是用撑杆(“支”)连接上层受压构件(“结构”)和下层受拉构件(“弦”), 通过张拉结构的“弦”(通常是拉索), 在抗拉构件上施加预应力, 使结构产生反挠度, 从而减小荷载作用下结构的最终挠度, 改善上层构件的负担; 并且通过调整受拉构件中预应力, 减小结构对支座产生的水平推力, 使之成为自平衡体系。作者在提出弦支结构体系概念和研究弦支结构力学本质的基础上, 又相继将弦支的概念引入筒壳、混凝土板和拱支网壳等结构中, 提出了弦支筒壳结构(实用新型专利号 ZL200820075205.6)、弦支混凝土板结构(发明专利公开号 CN101285329)和弦支拱壳等新型弦支结构体系, 丰富了弦支结构的形式。

1.2.2 弦支结构的分类

随着弦支结构的不断发展和广泛应用, 其形式也越来越多。为了便于对这些结构形式进行归纳总结、分析设计及工程应用, 建立科学合理的分类方法是必要的。结合弦支结构的特点, 根据弦支结构上层节点刚性、上层结构类型和弦支结构的布置方式, 可将其分为三类体系。

1. 按照上层节点刚性划分

按照结构上层节点取刚接和铰接两种不同连接形式, 弦支结构分为弦支梁式结构和弦支杆式结构。顾名思义, 弦支梁式结构的上层构件之间的连接为刚接。构件既要承受压力, 还要承受弯矩和剪力, 属压弯构件。因此, 上层构件既包括直梁,

也包括曲拱。弦支杆式结构的上层杆件之间连接为铰接。杆件仅承受轴向力,没有弯矩和剪力的作用。按照这种定义,平常所说的张弦梁即为弦支梁式结构,而弦支桁架以及弦支网架即为弦支杆式结构。

2. 按照上层结构类型划分

按照上层结构类别,弦支结构分为弦支梁、弦支桁架、弦支穹顶、弦支混凝土楼板、弦支筒壳和弦支拱壳等。其中,弦支梁的上层结构为梁式结构;弦支桁架的上层结构为桁架结构;弦支穹顶的上层结构为穹顶结构;弦支混凝土板的上层结构为混凝土板;弦支筒壳的上层结构为筒壳结构;弦支拱壳的上层结构为拱支网壳结构。

3. 按照“弦支”的布置方式划分

按照“弦支”的布置方式,弦支结构分为平面弦支结构、可分解型空间弦支结构(又称为平面组合型弦支结构)和不可分解型空间弦支结构。其中,可分解型空间弦支结构主要包括双向弦支结构、多向弦支结构和辐射式弦支结构三类;不可分解型空间弦支结构主要包括弦支穹顶、弦支筒壳和弦支混凝土板结构等。

1) 平面弦支结构

平面弦支结构是指单向弦支结构,主要包括弦支梁和弦支桁架。将数榀平面弦支构件平行布置,通过连接构件将相邻两榀平面弦支结构在纵向进行连接,形成实际工程的整体结构体系(图 1-5)。整个结构由上层构件、撑杆、弦以及纵向连接构件组成,屋面荷载由各榀构件单向传递,整体结构呈平面传力。

单向弦支结构比桁架节点少,所以整体结构具有构造简单、运输方便和造价低等特点。该结构较适用于矩形平面。

2) 可分解型空间弦支结构

可分解型空间弦支结构(平面组合型弦支结构)是指结构可以拆分为多榀平面弦支构件的组合,受力时呈空间结构受力特征。每榀构件都是平面的,根据各榀构件的组合方式可以将可分解型空间弦支结构分为双向弦支结构、多向弦支结构和辐射式弦支结构三类。

(1) 双向弦支结构。

双向弦支结构是将数榀弦支平面构件沿横、纵向交叉布置(图 1-6)而成。结构也是由上层构件、撑杆和弦组合而成。因为上层构件交叉连接,侧向约束相比单向弦支结构明显加强,结构呈空间传力。但相比单向弦支结构,节点处理较复杂。该形式较适用于矩形、圆形和椭圆形平面。

(2) 多向弦支结构。

多向弦支结构是将数榀平面弦支构件多向交叉布置而成(图 1-7)。结构呈空间传力体系,受力合理。但相比单向、双向弦支结构,其制作更为复杂,较适用于多

边形平面。

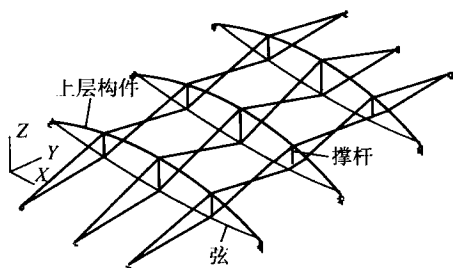


图 1-5 单向弦支结构

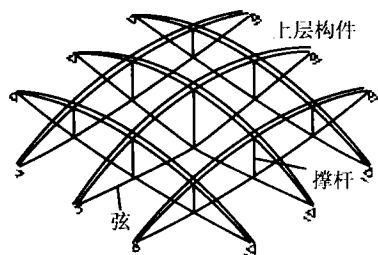


图 1-6 双向弦支结构

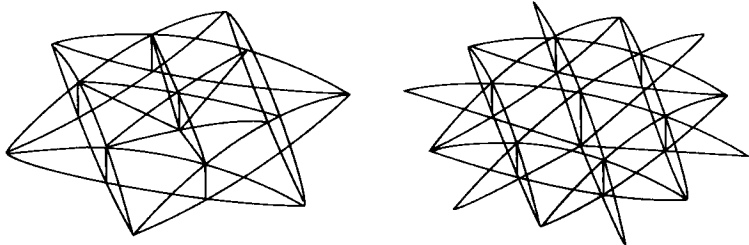


图 1-7 多向弦支结构

(3) 辐射式弦支结构。

辐射式弦支结构由中央按辐射式放置各榀平面弦支构件,撑杆同环向索或斜索连接(图 1-8)而成。辐射式弦支结构具有力流直接、易于施工和刚度大等优点。

3) 不可分解型空间弦支结构

不可分解型空间弦支结构是结构不可以拆分为多榀平面弦支构件的弦支结构,主要包括弦支穹顶、弦支筒壳(图 1-9(a))、弦支网架和弦支混凝土板结构(图 1-9(b))等。

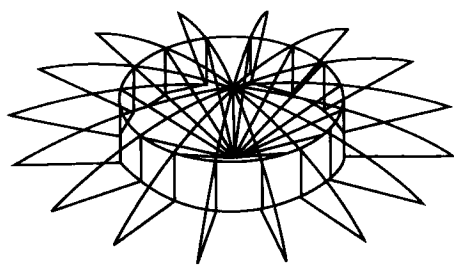


图 1-8 辐射式弦支结构

在上述弦支结构体系的类型中,弦支穹顶结构是应用最为广泛和最为成功的形式之一。自弦支穹顶结构概念的提出至今十余年的时间,已在国内外近 20 项大型工程中得到应用。并且随着对弦支穹顶结构力学特性研究的深入,其跨度也逐渐增大。目前已建工程中,弦支穹顶结构的跨度已达到 122m。因此在弦支结构中,弦