

· 国家自然科学基金项目成果 ·

**B**asic theory and general technology  
of tensile space structures

# 新型张力空间结构 基础理论与共性技术论文集



主 编 董石麟  
副主编 沈祖炎 傅学怡 钱若军  
罗尧治 袁行飞



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社

国家自然科学基金资助项目

# 新型张力空间结构基础理论与共性技术 论文集

主 编 董石麟  
副主编 沈祖炎 傅学怡 钱若军 罗尧治 袁行飞  
编 委 肖 南 邓 华 高博青 赵 阳 李元齐  
          张志宏 苏 亮 沈雁彬 许 贤

## 图书在版编目(CIP)数据

新型张力空间结构基础理论与共性技术论文集/董石麟主编. —杭州:浙江大学出版社, 2012.6  
ISBN 978-7-308-10005-2

I .①新… II .①董… III .①张力—空间结构—文集  
IV .①TU399—53

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第101920号

## 新型张力空间结构基础理论与共性技术论文集

董石麟 主编

---

责任编辑 孙秀丽  
封面设计 李 陈  
出版发行 浙江大学出版社  
(杭州市天目山路148号 邮政编码310007)  
(网址: <http://www.zjupress.com>)  
排 版 杭州大漠照排印刷有限公司  
印 刷 浙江印刷集团有限公司  
开 本 889mm×1194mm 1/16  
印 张 26  
字 数 825千  
版 次 2012年7月第1版 2012年7月第1次印刷  
书 号 ISBN 978-7-308-10005-2  
定 价 89.00元(精装)

---

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88925591

## 前 言

这本《新型张力空间结构基础理论与共性技术论文集》是国家自然科学基金重点项目《新型张力空间结构基础理论与共性技术》(项目批准号:50638050;执行年份:2007.01—2010.12)主要研究成果的汇编。参加本项目研究的有浙江大学、同济大学、中建国际设计顾问有限公司等单位的教师、科技人员和有关博士、硕士研究生。本项目在总结国内外张力空间结构科技成果的基础上,采用理论分析、模型试验和工程推广应用相结合的研究方法对该类空间结构进行全面、系统、深入的研究,每年度召开一次阶段总结交流和工作进度安排会议,历时四年,共撰写完成学术论文或研究报告 80 余篇,有关博士、硕士学位论文 51 篇,申请专利 7 项。入编本论文集的有 48 篇,其中部分论文已在国内外杂志或学术交流会上发表。

论文集共分四部分。第一部分是形态分析理论和成形技术。主要阐述了基于平衡矩阵分析的动不定结构形态分析理论,张力结构找形、找力分析理论与方法,基于几何位移计算理论对索杆张力结构的成形分析,张力结构施工成形方法和施工全过程的跟踪模拟,杆系机构的可动性和运动分岔分析,若干典型索穹顶初始预应力分布简捷计算方法,索穹顶结构体系研究新进展和论索单元构成的柔性空间结构与刚柔性组合空间结构等。第二部分是结构分析理论和设计技术。主要阐述了基于向量式结构力学的空间结构非线性及不连续行为的分析方法,空间结构流固耦合理论研究和应用综述,大型体育场馆设计整体结构分析的重要性,提出了六种新型张力结构创新体系、模型试验和工程应用,大跨度空间结构典型形体风压分布风洞试验研究综述。第三部分是结构抗火分析理论。主要阐述了大跨度空间结构抗火研究进展,弦支穹顶结构抗火反应分析,钢丝束索体高温下力学性能试验装置和试验研究等。第四部分是结构自适应可调节技术。主要阐述了张力结构位移限制下的索力和形态优化控制方法,双层球面网壳振动主动控制作动器位置优化,张拉整体结构的非线性主动控制,荷载缓和体系研究现状和具有缓和功能索穹顶的动力特性等。

希望本论文集的出版能引起有关科技工作者的关注,并对张力空间结构在我国持续的研究开发和推广应用起到积极的促进作用,为使我国从空间结构大国迈向空间结构强国推波助澜。

董石麟

2012 年 5 月

# 目 录

## 一、形态分析理论和成形技术

1. 论索单元构成的柔性空间结构与刚柔性组合空间结构 ..... 董石麟 赵阳(002)
2. 索穹顶结构体系若干问题研究新进展 ..... 董石麟 袁行飞(010)
3. 工程结构中的几何位移分析理论、方法和应用研究 ..... 钱若军 苏波 林智斌(019)
4. 弦支穹顶结构的形态分析问题及其实用分析方法 ..... 郭佳民 董石麟 袁行飞(029)
5. Levy 型索穹顶考虑自重的初始预应力简捷算法 ..... 王振华 董石麟 袁行飞(038)
6. 弦支穹顶施工张拉全过程分析 ..... 郭佳民 袁行飞等(046)
7. 张拉结构找形的多坐标系力密度法 ..... 向新岸 赵阳 董石麟(054)
8. 基于几何位移计算理论的索杆结构成形分析 ..... 苏波 钱若军 林智斌(064)
9. Finite Particle Method for Kinematically Indeterminate Bar Assemblies  
..... YU Ying ,LUO Yaozhi (069)
10. Force-finding of Tensegrity Systems Using Simulated Annealing Algorithm  
..... Xu Xian ,Luo Yaozhi (074)
11. Mobility and Equilibrium Stability Analysis of Pin-jointed Mechanisms with  
Equilibrium Matrix SVD ..... LU Jinyu ,LUO Yaozhi ,LI Na (085)
12. 具有外环桁架的肋环型索穹顶初始预应力分布快速算法 ..... 周家伟 董石麟 袁行飞(098)
13. 杆系机构的可动性和运动分岔分析 ..... 沈金 楼俊晖 邓华(107)
14. 铰接杆系机构的运动路径及其极值点跟踪——一种几何学方法 ..... 邓华 楼俊晖 徐静(117)
15. 杂交空间结构形状确定问题的探讨 ..... 张志宏 李志强 董石麟(125)

## 二、结构分析理论和设计技术

1. 一种由索穹顶与单层网壳组合的新型空间结构及其受力性能研究  
..... 董石麟 王振华 袁行飞(136)
2. 流固耦合理论和应用述评 ..... 钱若军 董石麟 袁行飞(145)
3. 流体力学基本理论研究综述 ..... 韩向科 钱若军(150)
4. 环形张拉整体结构的研究和应用 ..... 袁行飞 彭张立 董石麟(156)
5. 索穹顶与单层网壳组合结构的模型试验研究 ..... 王振华 董石麟等(167)
6. 一种矩形平面弦支柱面网壳的形体及受力特性研究 ..... 董石麟 庞礴 袁行飞(177)
7. Added Mass Estimation of Flat Membranes Vibrating in Still Air  
..... LI Yuanqi ,WANG Lei ,SHEN Zuyuan ,TAMURA Yukio (183)
8. 大跨度空间结构典型形体风压分布风洞试验研究现状 ..... 李元齐 胡渭雄 王磊(197)
9. 改进的基于特征线理论的流体力学有限元法 ..... 韩向科 钱若军 袁行飞 林智斌(205)

10. 子午向几何缺陷冷却塔的结构性能分析 ..... 肖南 苗永志 赵文争(212)
11. 山西体育中心体育场结构设计 ..... 傅学怡 朱勇军等(221)
12. 山西体育中心体育馆、游泳馆、自行车馆结构设计综述 ..... 杨想兵 高颖等(229)
13. 江阴市民水上活动中心阶梯式肋环型网格结构设计 ..... 张志宏 李志强等(240)
14. 世博会国家电网企业馆结构分析和施工过程模拟 ..... 张志宏 李志强 袁行飞 董石麟(250)
15. 济南奥体中心体育馆弦支穹顶结构设计 ..... 张志宏 傅学怡等(257)
16. 济南奥体中心弦支穹顶结构施工张拉分析 ..... 李志强 张志宏等(267)
17. 新型阶梯式肋环型球面网格结构力学性能分析 ..... 李志强 张志宏 田珺 董石麟(277)

### 三、结构抗火分析理论

1. Experimental Study of the Mechanical Properties of Prestressed Steel Wire at Elevated Temperatures ..... WANG Yehua, SHEN Zuyan, LI Yuanqi (286)
2. 大跨度空间结构抗火研究进展 ..... 王烨华 沈祖炎 李元齐(293)
3. 钢丝束索体高温下力学性能试验研究 ..... 王烨华 沈祖炎 李元齐(302)
4. 新型高温材性试验装置的研究与应用 ..... 王烨华 沈祖炎 李元齐(308)
5. 弦支穹顶结构抗火反应分析 ..... 王烨华 沈祖炎 李元齐(313)

### 四、结构自适应可调节技术

1. 张拉整体结构的非线性主动控制 ..... 许贤 罗尧治 沈雁彬(320)
2. 张力结构位移限制下的形状调整强度优化分析 ..... 肖南 黄玉香 董石麟 肖新(328)
3. 双层球面网壳振动主动控制作动器位置优化 ..... 肖南 容里 董石麟(339)
4. 张力结构形状调整优化分析 ..... 肖南 肖新 董石麟(351)
5. 强震下弦支穹顶结构的动力失效探讨 ..... 张瑞 肖南(361)
6. 考虑温度效应的空间钢结构索张拉控制研究 ..... 娄荣 罗尧治 沈雁彬(369)
7. 基于模糊聚类的网架结构动力失效模式识别 ..... 张成 吴慧 高博青 汪毅俊(375)
8. 荷载缓和体系及其研究现状 ..... 黄刚 高博青(383)
9. 基于  $H_\infty$  理论的结构鲁棒性分析 ..... 张成 高博青 董石麟(388)
10. 钢结构柱脚抗剪键抗剪承载力计算 ..... 肖南 李莎 赵文争(396)
11. 北京北站张弦桁架结构模型试验研究 ..... 沈雁彬 郑君华 罗尧治(406)



## 一、形态分析理论和成形技术

# 论索单元构成的柔性空间结构与刚柔性组合空间结构

董石麟 赵 阳

(浙江大学空间结构研究中心, 浙江杭州 310058)

**摘 要** 组成空间结构的基本单元(即基本构件)有刚性基本单元:板壳单元、梁单元和杆单元,也有柔性单元:索单元和膜单元。以此为出发点,各种具体形式的空间结构可归属为刚性空间结构、柔性空间结构和刚柔性组合空间结构三大类。索单元是空间结构中最活跃的单元之一,由索单元构成的空间结构包括柔性空间结构和刚柔性组合空间结构两大类。本文提出了由索单元构成的空间结构的组成和分类方法,对 17 种具体形式的空间结构,简要讨论其结构特点和典型工程应用。文中还简要分析了索结构中预应力索的作用。

**关键词** 空间结构;索单元;柔性空间结构;刚柔性组合空间结构

## 一、引 言

索结构是一种古老而又充满活力的结构形式。索结构受力合理、自重轻、造价低、形体多样,可通过施加预应力改善结构形态,具有广泛的应用前景。建筑结构的发展总是伴随着建筑材料的革命和创新,索结构的发展也不例外。索材应用和发展的趋势大致为:麻绳、竹索、铁链、尼龙索、高强钢丝绳、高强钢绞线、钢棒、FRP 索等。

索结构的发展历史大致可分为:① 20 世纪以前为古代索结构,主要包括游牧民族帐篷、竹索桥、铁索桥等,如我国早在公元前 285 年建成的跨越四川岷江的安澜桥即为竹索桥,1703 年建成的跨越大渡河的泸定桥则为铁链桥;② 20 世纪中叶以后为近代索结构,其标志性结构为一般的悬索结构、索桁结构和索网结构,1953 年建成的美国北卡州瑞雷竞技馆所采用的鞍形索网结构是索结构在房屋建筑上的首次应用,我国在 20 世纪六七十年代也相继建成了北京工人体育馆(1961 年,圆形平面跨度 94m,双层车辐式悬索)、浙江省人民体育馆(1967 年,椭圆平面跨度 60m×80m,鞍形索网)等著名的悬索结构;③ 20 世纪 90 年代以后为现代索结构,其主要标志性结构为索膜结构、索穹顶、索杆张力结构、弦支结构等。

索单元是空间结构中最活跃的单元之一,由索单元构成的空间结构包括柔性空间结构和刚柔性组合空间结构两大类。本文提出了由索单元构成的空间结构的组成和分类方法,对 17 种具体形式的空间结构,简要讨论其结构特点和典型工程应用。文中还分析了索结构中预应力索的作用。

## 二、空间结构的形式与分类

近年来,我国空间结构蓬勃发展,建筑造型新颖、形式和种类繁多而独特,按传统的空间结构分类方法,即将空间结构划分为薄壳结构、网架结构、网壳结构、悬索结构和膜结构的分类方法已很难囊括和反映现有各种形式的空间结构。采用按板壳单元、梁单元、杆单元、索单元和膜单元共五种单元组成来分类各种形式的空间结构可避免传统分类方法的局限性,具有鲜明的开拓性,见图 1。

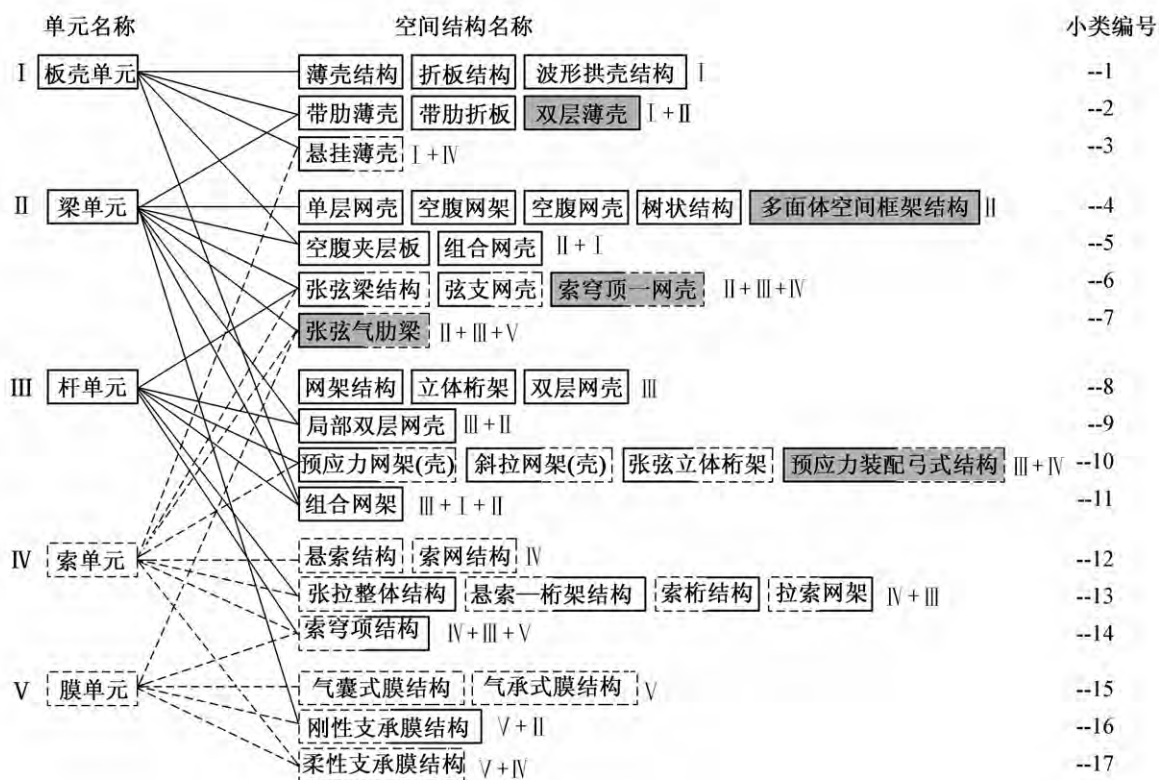


图1 空间结构按单元组成分类

### 三、索单元构成的柔性空间结构

由柔性基本单元组成的空间结构可称为柔性空间结构。由索单元构成的柔性空间结构可分为2小类，包括3种具体结构形式，其组成与分类见表1。应该说明，讨论具体空间结构形式时，没有包括边缘支承结构本身(如拱、横隔、环梁、立柱等)的基本结构单元。

表1 索单元构成柔性空间结构的组成与分类

分类号	组成单元	组成单元数	现有结构形式数	空间结构小类号
F1	索	1	2	12
F2	膜(为主)+索	2	1	17
			$\Sigma = 3$	

#### (一) 仅由索单元一种单元构成的柔性空间结构

包括悬索结构和索网结构2种具体结构形式。悬索结构主要指矩形平面单层单向悬索结构以及圆形平面辐射式单层悬索结构和双向单层悬索结构。这类单层索系结构中的索均为承重索，没有稳定索，因此需要通过屋面板的共同工作来保证其结构稳定性。1957年建成的美国华盛顿杜勒斯机场候机楼(平面尺寸51.5m×195.2m,图2)即采用了单层单向悬索结构。

索网结构系由相互正交、曲率相反的两组悬索直接叠交而成的一种负高斯曲率的曲面悬索结构，下凹方向的索为承重索，上凸方向的索为稳定索，通过建立适当的预应力构成自平衡结构体系，从而保证结构在预应力态和荷载态下具有足够的刚度和稳定性。1967年建成的浙江省人民体育馆(平面尺寸60m×80m,图3)就采用了这种索网结构，用钢量仅17.3kg/m<sup>2</sup>。



图2 华盛顿杜勒斯机场候机楼单层悬索结构



图3 浙江省人民体育馆索网结构

## (二) 由膜单元(为主)和索单元构成的柔性空间结构

现只有1种具体的结构形式,即柔性支承膜结构,支承在脊索、谷索、边索、吊索、撑杆(有时包括飞柱)等主要是柔性索系上。这类膜结构中膜材与支承索系的共同工作非常明显,设计计算时必须考虑索膜协同工作。代表性工程有:沙特阿拉伯哈吉航空港,由10组共210个平面尺寸45m×45m的锥体组成,总面积达420000m<sup>2</sup>;沙特阿拉伯利雅得体育场,外径288m,由24个锥状悬挑单体组成;美国丹佛新国际机场候机大楼,由17个双伞状单体组成,总覆盖面积约18000m<sup>2</sup>。近期的一个著名工程是为2010年上海世博会兴建的世博轴,世博轴屋顶包括6个独立的“阳光谷”钢结构和连续的张拉索膜结构(图4)。其中膜结构总长度约840m,最大跨度约97m,总面积约64000m<sup>2</sup>。膜结构的支承体系包括31个外侧桅杆、19个中间下拉点以及18个与阳光谷的连接点。

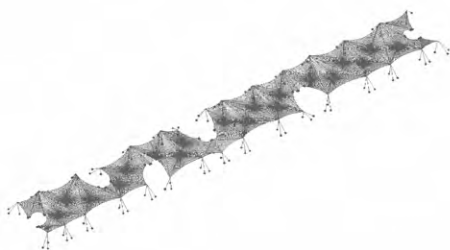


图4 上海世博会世博轴张拉索膜结构

## 四、索单元构成的刚柔性组合空间结构

由刚性基本单元和柔性基本单元组成的空间结构可称为刚柔性组合空间结构,它可充分发挥不同建筑材料的特点和优势,构成合理的结构形式。因此刚柔性组合空间结构是空间结构发展的一个重要趋向。由索单元构成的刚柔性组合空间结构可分为6小类,包括14种具体结构形式,其组成与分类见表2。

表2 索单元构成刚柔性组合空间结构的组成与分类

分类号	组成单元	组成单元数	现有结构形式数	空间结构小类号
RF1	索(为主)+杆	2	4	13
RF2	索(为主)+杆+膜	3	1	14
RF3	板壳(为主)+索	2	1	3
RF4	杆(为主)+索	2	4	6
RF5	梁(为主)+杆+索	3	3	7
RF6	梁(为主)+索+膜	3	1	10
			Σ = 14	

### (一) 由索单元(为主)和杆单元构成的刚柔性组合空间结构

有 4 种具体的结构形式,即张拉整体结构、悬索—桁架结构、拉索网架和索桁结构。

张拉整体结构(Tensegrity)是 20 世纪 50 年代由富勒(R. B. Fuller)提出的一种结构体系,该体系中的大部分单元是连续的张拉索,而零星单元是受压杆,犹如张力海洋中的孤岛。初期的张拉整体结构曾应用于 Snelson 的研究模型以及华盛顿 Hirshhorn 博物馆的雕塑(图 5)。真正用于工程实际要归结于 1986 年第一个索穹顶的建成。

悬索—桁架结构也称为横向加劲单层悬索结构,它实质上是一种单层单向的悬索结构,通过垂直于索跨度方向设置平面桁架系(图 6),强制将桁架两端施加拉力锚固在支承结构上,使悬索向下变位并产生预拉力,与桁架内力共同构成一自平衡体系,保证整体结构的刚度和稳定性。安徽省体育馆是我国有代表性的最早建成的悬索—桁架结构之一。

将普通网架的上下弦杆改用柔性拉索,受拉的斜腹杆也改用柔性拉索,只是受压的竖腹杆仍用劲性型钢,此时便构成所谓拉索网架,要使这种拉索网架成形、承载,必须先在上弦索施加适当的预应力。深圳市民中心采光顶在我国首次采用了拉索网架(平面尺寸 36m×45m,图 7)。



图 5 张拉整体雕塑

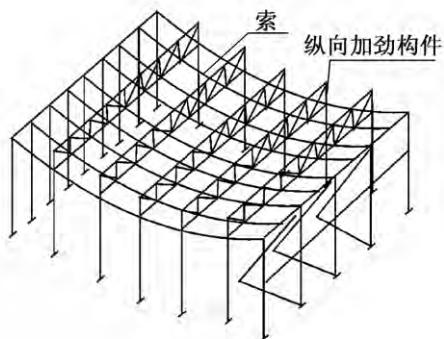


图 6 悬索—桁架结构

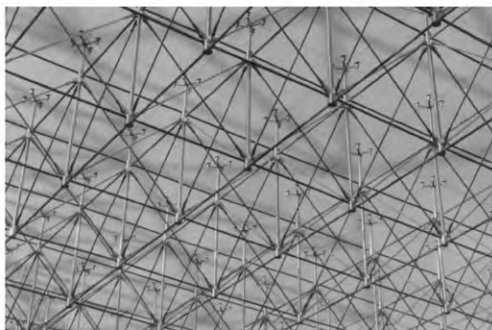


图 7 深圳市民中心采光顶拉索网架

将双层索(向下凹的为承重索,向上凸的为稳定索)布置成普通桁架的形式,索间设置受压撑杆(受拉时也可设置拉索),当承重索(或稳定索)施加预应力后,便可构成自平衡的有预应力的索桁结构。为改善索桁结构的平面外刚度,承重索和稳定索可错位半格设置,1986 年建成的跨度 59m 的吉林冰球馆,即采用了上下索错位布置的索桁结构(图 8)。除应用于矩形平面,索桁结构还可推广应用于环形平面的大型体育场建筑,世界上著名的工程有:马来西亚吉隆坡室外体育场、韩国釜山体育场、德国斯图加特体育场、南非开普敦 2010 世界杯体育场(图 9)等。我国在广东佛山也已建成支承在周围环形桁架上的世纪莲体育场,目前已完成设计的温州乐清体育场则采用了月牙形非封闭环形平面索桁结构,图 10 所示为该结构的计算模型。



图 8 吉林冰球馆索桁结构模型



图 9 南非开普敦体育场环形平面索桁结构

## (二) 由索单元(为主)和杆单元、膜单元构成的刚柔性组合空间结构

现只有 1 种具体的结构形式,即索穹顶结构。索穹顶是一种支承于周边受压环梁上的张拉整体结构,完全体现了富勒关于“压力的孤岛存在于拉杆的海洋中”的思想,具有极高的结构效率。1986 年建成的汉城奥运会体操馆(直径 120m)和击剑馆(直径 90m)索穹顶,由美国工程师盖格尔(Geiger)创建,是一种肋环型穹顶。1995 年勒维(Levy)提出了葵花型索穹顶,可改善肋环型索穹顶辐射向平面桁架系的平面外刚度,应用于同年建成的亚特兰大奥运会主赛馆——椭圆平面 192m×240m 的乔治亚穹顶(图 11)。我国已研究并提出了 Kiewitt 型、混合 I 型(肋环型和葵花型重叠式组合)、混合 II (Kiewitt 型和葵花型内外式组合)、鸟巢型等多种形式的新型索穹顶,同时对肋环型、葵花型索穹顶提出了初始预应力分布的快速算法,对一般索穹顶提出求解整体自应力模态的二次奇异值法,为索穹顶预应力设计提供了创新的分析方法。索穹顶在我国的工程应用刚刚开始,跨度还比较小,图 12 所示为浙江金华晟元集团标准厂房中庭所采用的平面尺寸 19m×17m 的索穹顶结构,施工中的鄂尔多斯伊金霍洛旗体育馆设计采用了直径 71m 的索穹顶结构。

## (三) 由板壳单元(为主)和索单元构成的刚柔性组合空间结构

现只有 1 种具体的结构形式,即悬挂薄壳结构。单向单层悬索在挂混凝土屋面小板的同时另加适量超载,灌缝形成整体后,再把超载卸去,即可构成预应力悬挂薄壳结构。对鞍形索网结构,在挂板、灌缝后可对承重索施加预应力,也可构成悬挂薄壳结构。1988 年建成的加拿大卡尔加里冰球馆采用了鞍形索网悬挂薄壳(椭圆平面 135.3m×129.4m,图 13)。

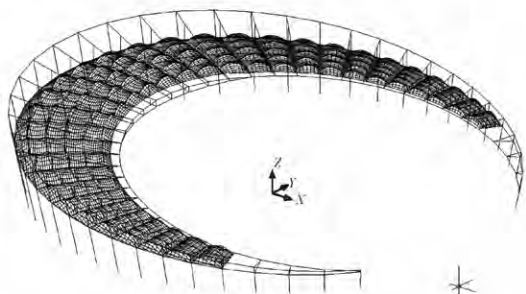


图 10 乐清体育场环形索桁结构计算模型



图 11 乔治亚穹顶



图 12 金华晟元集团标准厂房中庭索穹顶结构

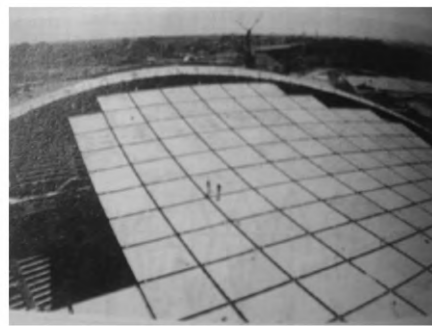


图 13 卡尔加里冰球馆悬挂薄壳结构

## (四) 由杆单元(为主)和索单元构成的刚柔性组合空间结构

有 4 种具体的结构形式,即预应力网架(壳)、斜拉网架(壳)、张弦(立体)桁架和预应力装配弓式结构。

预应力网架(壳)一般通过在网架下弦的下方或双层网壳的周边设置外露的预应力索,从而起到改善结构内力分布、降低内力峰值、提高结构刚度的作用,可节省用钢量。1994 年建成的清远体育馆采用六块组合型双层扭网壳,六边形平面,对角线长 93.6m,在相邻六支座处采用了六道预应力索。1995 年建成的攀枝花

体育馆, 缺角八边形平面  $74.8\text{m} \times 74.8\text{m}$ , 采用双层球面网壳, 在相邻八支座处设置八榀平面桁架, 其下弦选用了预应力索(图 14)。采用预应力网架(壳)比非预应力网架(壳)可节省钢材用量约 25%。

斜拉网架(壳)在网架或双层网壳的上弦之上设置多道斜拉索, 相当于在结构顶部增加了支点, 减小结构的跨度, 从而提高结构刚度。而且斜拉索尚可施加预应力, 改善结构内力分布, 节省钢材耗量。20 世纪八九十年代斜拉网架(壳)在我国已开始获得推广应用。代表性的工程有: 1993 年建成的新加坡港务局仓库采用 4 幢  $120\text{m} \times 96\text{m}$  六塔柱、2 幢  $96\text{m} \times 70\text{m}$  四塔柱斜拉网架, 1995 年建成的山西太旧高速公路旧关收费站采用  $14\text{m} \times 65\text{m}$  独塔式斜拉双层网壳, 2000 年建成的杭州黄龙体育中心体育场采用月牙形  $50\text{m} \times 244\text{m}$  双塔柱斜拉双层网壳(图 15)。正在建设中的浙江大学紫金港校区文体中心则采用了斜拉索网悬吊单层网壳结构(图 16), 是一种新颖的空间杂交结构体系。

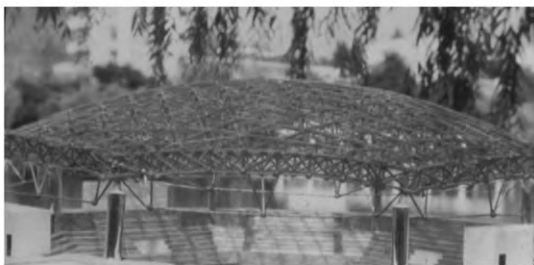


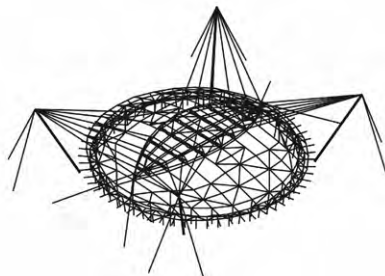
图 14 攀枝花体育馆预应力网壳模型



图 15 杭州黄龙体育中心体育场斜拉网壳



图 16 浙江大学紫金港校区文体中心



以立体桁架替代张弦梁的上弦梁便构成张弦立体桁架。2002 年建成的广州国际会议展览中心便采用了跨度为  $126.6\text{m}$  张弦立体桁架(图 17), 2008 年建成的奥运会国家体育馆则采用  $114\text{m} \times 144\text{m}$  双向正交的张弦桁架(平面桁架)结构。预应力装配弓式结构是利用逐段伸展预应力装配法来建筑大跨度结构的。早年这种弓式结构曾用于小型机库。1994 年建成了跨度  $45\text{m}$  的北京钓鱼台国宾馆室内网球场弓形屋盖, 其中段在纵向可开启(图 18)。这种预应力装配弓式结构特别适用于可装拆的临时性仓库建筑和舞台建筑, 曾建成跨度达  $130\text{m}$  的构筑物, 施工安装方便。



图 17 广州国际会议展览中心张弦立体桁架



图 18 钓鱼台国宾馆室内网球场预应力装配弓式结构

### (五) 由梁单元(为主)和杆单元、索单元构成的刚柔性组合空间结构

有 3 种具体的结构形式,即张弦梁结构、弦支网壳和索穹顶—网壳结构。

张弦梁结构(Beam String Structure, BSS)早年从日本引进,后在我国推广应用发展甚快。我国采用大跨度的张弦梁要首推上海浦东国际机场航站楼,有 4 跨,其中最大跨度是 82.6m 的办票大厅(图 19)。由于张弦梁本身是一种自平衡的平面结构体系,除竖向反力外,可做到不对支座产生水平推力,从而可减轻下部支承结构负担。应关注的是张弦梁平面外的稳定性问题,须采用侧向支撑体系或其他措施予以保证。

弦支网壳(Suspen-dome)通常由上层单层网壳、下层若干圈环索、斜索通过竖杆连接构成,是一种自平衡的空间结构体系。弦支网壳具有单层网壳和索穹顶两种结构体系的优点。日本最早在 1993 年建成直径 35m 的弦支光球穹顶,此后在 1997 年又建成直径 55m 的聚会穹顶。我国早期的弦支网壳要首推 2001 年建成的跨度 35.4m 的天津港保税区商务中心大堂。而今已广泛应用,建筑平面不仅有圆形的,而且有椭圆的、多边形的、矩形的。2009 年建成的 122.2m 跨全运会济南奥体中心体育馆,是当今世界上最大跨度的弦支网壳结构(图 20)。建设中的深圳新火车站无站台柱雨篷采用了国内外首创的四边形环索弦支柱面网壳结构体系,总覆盖面积达 68000m<sup>2</sup>。



图 19 上海浦东国际机场候机楼张弦梁结构



图 20 济南奥体中心体育馆弦支穹顶结构

索穹顶—网壳结构是我国自己提出的一种新的空间结构体系,由索穹顶的索杆体系与单层网壳组合而成,施工时无需满堂红脚手架,可在自平衡的索杆体系上安装单层网壳,并与索杆体系连成整体协同工作。当前索穹顶—网壳尚无工程实例,但已研究、提出了闭口与开口的十多种索穹顶—网壳的结构构造方案,并进行了 5m 直径的实物模型试验(图 21)。索穹顶—网壳的一个重要特点是可以采用刚性屋面体系,避免索穹顶仅由膜材构成的柔性屋面体系带来的不足。2009 年全运会济南体育馆评审时,索穹顶—网壳曾是一个遴选的方案(图 22),后因种种原因未被采用,而选用了国内已有成熟设计与施工经验的弦支穹顶。



图 21 索穹顶—网壳结构试验模型



图 22 济南体育馆索穹顶—网壳结构方案

### (六) 由梁单元(为主)和索单元、膜单元构成的刚柔性组合空间结构

现只有 1 种具体的结构形式,即张弦气肋梁。张弦气肋梁(Tension + air + integrity = Tensairity)是在张弦梁结构中用充气肋来替代竖杆而构成的空间结构体系。2004 年 IASS 学术会议上首次对张弦气肋梁有

所报道。2007年已建成张弦气肋梁结构试点工程,应用于瑞士蒙特立克斯车站汽车库(图23)。法国的一座桥梁也采用了这种张弦气肋梁结构。张弦气肋梁是一种全新的空间结构体系,在我国尚无工程实例,其结构理论、分析方法、构造措施和应用前景是值得进一步研究和探讨的。



图 23 瑞士蒙特立克斯车站汽车库张弦气肋梁

## 五、索结构中预应力索的作用

在索单元构成的各类空间结构中,预应力索起着至关重要的作用,主要体现在以下方面:

- (1) 利用高强度索作为主要受力构件可降低材料耗量。
- (2) 可多次分批施加预应力(多阶段设计、施工),材料可反复受力。
- (3) 改善结构的内力分布,降低内力峰值。
- (4) 提高结构的刚度和稳定性。
- (5) 通过预应力形成全新的结构体系,建立结构刚度。没有预应力就没有索穹顶、索桁结构等结构体系。
- (6) 通过预应力来装配结构还是一种施工装配手段,如预应力装配弓式结构。

## 六、结 语

(1) 由索单元构成的空间结构包括 3 种柔性空间结构和 14 种刚柔性组合空间结构。

(2) 中国有跨度最大  $114\text{m} \times 144\text{m}$  双向张弦结构(国家体育馆)、 $122\text{m}$  弦支穹顶(济南奥体中心体育馆),覆盖面积最大  $97\text{m} \times 840\text{m}$  索膜结构(上海世博轴),首个预应力装配弓式结构(国宾馆网球馆),首次提出、试验、设计了矩形平面多跨连续弦支柱面网壳(深圳新火车站无站台柱雨篷),首次提出、试验索穹顶—网壳(济南奥体中心体育馆方案)。

(3) 中国有 30 多家特级钢结构制造厂,10 家一级索膜结构制造厂,全球最多。有索结构、膜结构、预应力钢结构等国家规范规程,可指导设计与施工。

(4) 中国已成为索结构大国,现在正处于迈向索结构强国的最好时期。

## 参考文献

- [1] 董石麟. 空间结构的发展历史、创新、形式分类与实践应用. 空间结构, 2009, 15(3): 22 - 43.
- [2] 董石麟. 中国空间结构的发展与展望. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 38 - 51.
- [3] 董石麟, 赵阳. 论空间结构的形式与分类. 土木工程学报, 2004, 37(1): 7 - 12.
- [4] 董石麟, 罗尧治, 赵阳等. 新型空间结构分析、设计与施工. 北京: 人民交通出版社, 2006.

# 索穹顶结构体系若干问题研究新进展

董石麟 袁行飞

(浙江大学空间结构研究中心, 浙江杭州 310027)

**摘要** 对索穹顶结构的若干问题最新研究成果进行了汇总和探讨, 主要内容包括索穹顶结构体系的改良和创新、结构初始预应力确定、施工成形分析、模型试验和敏感性分析, 并提出了结构动态设计、新体系新材料应用、流固耦合、气动形态优化与控制、自适应可调节技术等进一步研究方向, 为深化该体系研究和实际工程应用提供理论基础。

**关键词** 索穹顶; 结构新形式; 初始预应力; 施工分析; 试验研究; 结构敏感性

## Advances in Research on Cable Domes

DONG Shi-lin, YUAN Xing-fei

(Space Structures Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Advances in research on cable domes, such as new forms, prestress design, construction analysis, experimental research, structural sensitivity, are introduced and discussed. Some topics worthy further research are proposed, which include dynamic design, application of new system and new material, interaction of fluid and structures, optimization and control of aerodynamic shape, adaptive technology. The work here will provide a good reference for design and application of cable domes.

**Key words:** cable dome; new structural form; initial prestress; construction analysis; experimental research; structural sensitivity

## 一、引言

自 1962 年美国建筑师 Fuller<sup>[1]</sup> 根据自然界拉压共存的原理首次提出“张拉整体体系 Tensegrity”这一概念后, 人们对各种形式的张拉整体结构进行了研究。其中有 Vilnay<sup>[2]</sup> 提出的网格穹顶, Emmerich<sup>[3]</sup> 提出的双层张拉整体网状结构, Motro<sup>[4]</sup> 提出的双层网格结构等。但迄今为止, 只有索穹顶结构才真正在大跨空间结构中得以实现。

索穹顶结构是美国工程师 Geiger 根据 Fuller 的张拉整体结构思想开发的一种新型预张力结构, 最早应用在汉城奥运会的体操馆和击剑馆<sup>[5]</sup>。作为一种受力合理、结构效率高的结构体系, 它同时集新材料、新技术、新工艺和高效率于一身, 并以其构造轻盈、造型别致、尺度宏伟、色彩明快等美学特征和经济的造价受到了建筑师的青睐。继汉城体操馆和击剑馆之后, Geiger 和他的公司又相继建成了红鸟体育馆和太阳海岸穹顶。由美国工程师 Levy 等人<sup>[6]</sup> 设计的乔治亚穹顶是 1996 年亚特兰大奥运会主赛馆的屋盖结构, 这个目前世界上最大的屋盖结构曾被评为全美最佳设计。之后, 他们又成功设计了圣彼得堡的雷声穹顶和沙特阿拉伯利亚德大学体育馆的可开启穹顶, 这些工程实践显示了索穹顶结构强大的生命力和广阔的应用前景。

国外有关索穹顶方面的研究很大一部分是在张拉整体结构体系研究基础上进行的。我国在这方面的研究相对滞后,最初的报道始于 20 世纪 90 年代,随后天津大学<sup>[7,8]</sup>、同济大学<sup>[9-13]</sup>、浙江大学<sup>[14,15]</sup>等对索穹顶结构开展了研究,也取得了一些初步成果,主要有结构体系判定、自应力模态确定、有限元计算、结构的静力性能分析等,这些研究成果为人们了解这类新型结构奠定了基础。但应该指出的是该阶段研究以吸收、消化国外研究成果为主,创新性较少,研究不够深入,离实际工程的设计和应用尚有距离。

浙江大学空间结构研究中心近年来对索穹顶结构的体系改良和创新、结构初始预应力确定、施工成形分析、模型试验和缺陷敏感性等问题进行了研究,取得了一系列研究成果。本文基于课题组近年来的研究工作,对索穹顶结构若干问题最新研究成果进行了介绍,并提出了进一步研究方向,为深化该体系研究和实际工程应用提供理论基础。

## 二、体系改良和创新

任何结构形式的提出—应用—发展的过程都是不断改良和创新的过程,索穹顶结构也不例外。索穹顶结构是自平衡的预应力空间结构。与传统结构体系不同的是,索穹顶结构通常存在内部机构,为保证施加预应力后的体系是可行的,必须先判定其几何稳定性。另外,对这样的几何形体施加不同的预应力,可形成不同承载能力和工作特性(刚度、频响特性)的结构。通过形体研究,寻求既几何稳定,又有良好工作特性的新型索穹顶结构形式是索穹顶结构改良和创新所追求的根本目标。

Geiger 设计的肋环型穹顶和 Levy 设计的葵花型穹顶是索穹顶结构现有的 2 种形式。尽管 Levy 穹顶较好地解决了 Geiger 穹顶存在的索网平面内刚度不足、容易失稳的缺点,但它在构造上仍然存在脊索网格划分严重不均的缺点。尤其是结构内圈部分由于网格划分密集大大增加了杆件布置、节点构造和膜片铺设等技术的复杂性。

在综合考虑结构构造、几何拓扑和受力机理的基础上提出了几种新型索穹顶结构形式<sup>[16]</sup>: Kiewitt 型穹顶(图 1)、鸟巢型穹顶(图 2)和混合型穹顶(图 3、图 4)。其中混合 I 型(图 3)为肋环型和葵花型的重叠式组合,混合 II 型(图 4)为 Kiewitt 型和葵花型的内外式组合。

与传统索穹顶结构相比,新型索穹顶结构具有如下特点:脊索布置新颖,网格划分均匀;刚度分布均匀,降低预应力水平;节点构造简单,施工操作方便;使柔性薄膜和刚性屋面的铺设更为简便可行;鸟巢型穹顶的脊索沿内环切向布置,连接两边界的脊索贯通,可省去内上环索。这些新型索穹顶形式的提出大大丰富了现有索穹顶结构的形式,使这一结构更具生命力。

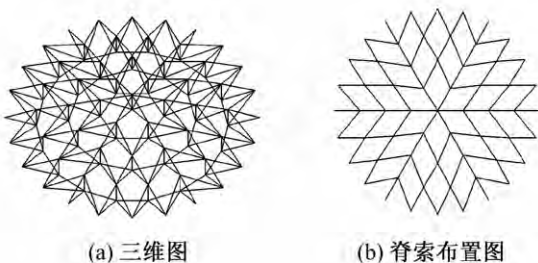


图 1 Kiewitt 型索穹顶

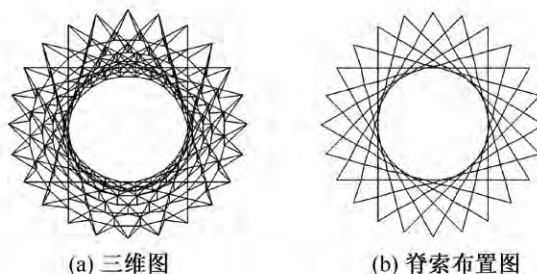


图 2 鸟巢型索穹顶

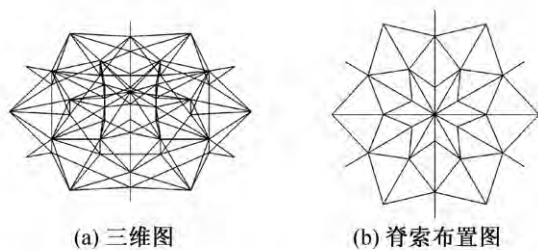


图 3 混合 I 型索穹顶

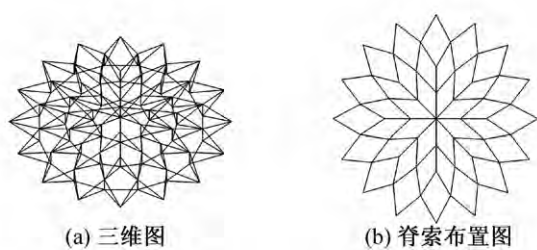


图 4 混合 II 型索穹顶