

YUYINGLI SUOGAN JIEGOU LUNWENJI

预应力索杆结构 论文集

◆ 主 编 董石麟
副主编 钱若军 姚念亮
柯长华 袁行飞



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

TU323

6D

2006

YUYINGLI SUOGAN JIEGOU LUNWENJI

预应力索杆结构 论文集

◆ 主 编 董石麟
副主编 钱若军 姚念亮
柯长华 袁行飞



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

编 委

杨联萍 甘 明 朱忠义
周晓峰 邓 华 林智斌

预应力索杆结构论文集

主 编 董石麟

副主编 钱若军 姚念亮 柯长华 袁行飞

责任编辑 邹小宁

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路148号 邮政编码310028)

(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州好友排版工作室

印 刷 杭州富春印务有限公司

开 本 889mm×1194mm 1/16

印 张 25.75

字 数 744千

版 印 次 2006年12月第1版 2006年12月第1次印刷

印 数 0001—2000

书 号 ISBN 7-89490-342-6

定 价 48.00元

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)88072522

前 言

这本《预应力索杆结构论文集》主要是国家自然科学基金项目《新型预张力索杆结构的形体、抗振及施工成型技术研究》(项目批准号:50278086;执行年份:2003.01—2005.12)研究成果的汇编。参加本项目研究的有浙江大学、同济大学、上海市建筑设计研究院、北京市建筑设计研究院科技人员。本项目在总结国内外预应力索杆结构研究成果的基础上,采用理论研究、模型试验和工程推广应用相结合的研究方法对该类结构进行全面、系统、深入的研究,每年度召开一次总结交流和研究工作安排的会议,历时三年,共撰写完成学术论文或研究报告近60篇,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。

论文集共分五部分。第一部分是基础理论及研究综述。分别阐述了空间结构形式与分类的新方法,预应力空间结构分析理论、力法中的平衡方程和平衡矩阵理论的若干探索研究,索穹顶结构研究新进展等。第二部分是机构分析及形体研究。主要阐述了机构理论和机构类型判定的研究,索杆张力结构的形状确定和初始预应力确定研究,可展空间剪式铰结构几何学研究,若干形式空间索桁结构,张弦挑篷结构的理论分析和试验研究等。第三部分是预应力分布及结构性能研究。主要阐述了肋环型、葵花型、Kiewitt型、鸟巢型等多种索穹顶结构初始预应力分布确定的计算方法和优化设计、索杆张力结构施工全过程模拟分析和动力性能研究,大跨度空间结构风振响应和模态识别研究等。第四部分是工程应用。主要阐述了一些体育场馆和展览中心采用单向、双向张弦梁结构的设计和施工,新疆体育场、馆的设计研究,刚性屋盖索穹顶结构分析与特点等。第五部分是模型试验。着重阐述了肋环型、葵花型索穹顶结构施工张拉成形方法和结构性能的模型试验研究,大跨度环形平面空间索桁结构的模型试验。

希望本论文集的出版能引起有关科技界和工程界的关注,并对预应力索杆结构在我国进一步的研究开发和推广应用起到积极的促进作用。

董石麟
2006年12月

目 录

一、基础理论及研究综述

论空间结构的形式和分类	董石麟 赵 阳(3)
索穹顶结构体系的研究进展	詹伟东 董石麟(10)
平衡矩阵理论的探讨及一索杆梁杂交空间结构的静力和稳定性分析	
.....	张志宏 张明山 董石麟(22)
方法中的平衡方程的建立	钱若军 林智斌 桂国庆(33)
空间结构分析理论方法的概况	钱若军 林智斌 杨联萍(41)
索穹顶体系若干问题研究新进展	董石麟 袁行飞 陈联盟 等(47)
SOME ASPECTS OF THE APPLICATION OF DYNAMIC RELAXATION METHOD IN SPACE STRUCTURES	
.....	Zhang Zhihong Yuan Xingfei Dong Shilin(55)
可展结构概述	熊天齐 钱若军(63)

二、机构分析及形体研究

大跨度环形空腹索桁结构体系	冯庆兴 董石麟 邓 华(71)
张弦梁结构若干问题的探讨	张志宏 张明山 董石麟(78)
新型体育场挑篷结构的性能及工程应用研究	高博青 鲍科峰 夏锋林 等(84)
SHAPE FINDING OF INCOMPLETE CABLE-STRUT ASSEMBLIES CONTAINING SLACK AND PRESTRESSED ELEMENTS	
.....	H. Deng Q. F. Jian A. S. K. Kwan(92)
索穹顶结构的新形式及其初始预应力确定	袁行飞 董石麟(110)
一阶无穷小机构位移计算分析	林智斌 钱若军(117)
机构类型判定的研究	林智斌 钱若军 桂国庆(124)
可展空间剪式铰结构几何学研究(上)	
——基本可展单元分析与屋面设计	熊天齐 钱若军 林智斌 等(132)
可展空间剪式铰结构几何学研究(下)	
——基本结构形式与工程实例	熊天齐 钱若军 林智斌 等(139)

三、预应力分布及结构性能研究

肋环型索穹顶初始预应力分布的快速算法	董石麟 袁行飞(149)
索杆张拉结构的设计和施工全过程分析	张志宏 董石麟 王文杰(158)
索杆梁混合单元体系的初始预应力分布确定问题	张志宏 董石麟(164)

葵花型索穹顶初始预应力分布的简捷计算法.....	董石麟	袁行飞	(173)
弦支穹顶结构动力分析.....	张志宏 张明山	董石麟	(184)
大跨度索杆张力结构的预应力分布计算.....	蔺 军	董石麟	(191)
Kiewitt 型索穹顶结构自应力模态分析及优化设计	陈联盟	袁行飞 董石麟	(201)
环形平面葵花型空间索桁张力结构的预应力设计.....	蔺 军	董石麟 袁行飞	(208)
大跨空间网格结构风振响应主要贡献模态的识别及选取.....	陈贤川	赵 阳 董石麟	(217)
鸟巢型索穹顶几何构形及其初始预应力分布确定.....	董石麟	包红泽 袁行飞	(226)
鸟巢型索穹顶自振特性分析.....	包红泽	董石麟	(232)
拉索对索穹顶结构的敏感性分析.....	高博青	谢忠良	(237)
弦支穹顶初始预应力分布的确定及其稳定性分析.....	张明山 董石麟	张志宏	(244)
弦支穹顶结构的预应力优化.....	张明山 包红泽	张志宏 等	(251)

四、工程应用

某张弦梁屋盖结构的设计与施工.....	焦 瑜	宋剑波 周晓峰	等(267)
余姚国际塑料城会展中心屋面的风荷载研究.....	董 明	余梦麟 陈绩明	等(272)
余姚国际塑料城会展中心斜拉屋盖结构分析与设计.....	董 明	周晓峰 陈绩明	等(277)
新疆体育馆的设计研究.....	甘 明	章 阳 张 胜	(284)
新疆体育场环形斜拉结构研究.....	朱忠义	章 阳 柯长华	等(290)
全国农业展览馆中西广场展厅张弦桁架屋盖结构设计与分析	卫 东	王志刚 刘季康	等(298)
安福大厦双向张弦梁设计研究.....	张 胜	甘 明 范 波	(305)
大开口环形空间索桁架结构研究.....	朱忠义	柯长华	(311)
索桁结构的应用.....	杨联萍	曹国峰 姚念亮	等(319)
上海旗忠网球中心平面旋转开闭屋盖结构设计研究.....	林颖儒	徐晓明 林 高	等(325)
张力索在网壳结构工程中的应用(一).....	杨联萍	曹国峰 姚念亮	等(342)
张力索在网壳结构工程中的应用(二) ——结构体系的选择.....	杨联萍	曹国峰 姚念亮	等(352)
越南国家体育场结构设计研究.....	林颖儒	徐晓明 林 高	等(361)

五、模型试验

索穹顶结构有限元分析及试验研究.....	袁行飞	董石麟	(369)
大跨度环形平面肋环型空间索桁张力结构的模型试验研究.....	蔺 军	冯庆兴 董石麟	(379)
葵花型索穹顶结构的多种施工张拉方法及其试验研究.....	郑君华	董石麟 詹伟东	(387)
索穹顶的施工成形过程与分析.....	宋剑波	钱若军	(394)

一、基础理论及研究综述

论空间结构的形式和分类*

董石麟 赵 阳

(浙江大学空间结构研究中心, 杭州 310027)

摘 要 当前空间结构的发展方兴未艾、极具活力,新的空间结构形式不断涌现,传统的空间结构分类方法有时难以适应新的发展要求。本文提出一种以空间结构组成的基本单元进行分类的新的空间结构分类方法。组成空间结构的基本单元可归纳为板壳单元、梁单元、杆单元、索单元和膜单元等五种。根据国内外已建的空间结构工程,总结了33种具体的空间结构形式,它们均可由某一种单元或某两种、三种单元构成。文中还结合近年来空间结构发展中出现的一些新结构,对新的分类方法作了说明与讨论。
关键词 空间结构;结构形式;分类;结构单元

DISCUSSION ON TYPES AND CLASSIFICATIONS OF SPATIAL STRUCTURES

Dong Shilin Zhao Yang

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

Abstract The development of spatial structures is very active at present. New types of spatial structures are constantly emerging, so that the traditional method of classification for spatial structures is sometimes no longer suitable. This paper presents a new method of classification for spatial structures, which is based on the basic structural elements composing the structure. The basic elements for spatial structures include plate elements, beam elements, bar elements, cable elements and membrane elements. According to the practical spatial structures which have been constructed both in China and in other countries, 33 types of spatial structures are summarized, and all of them are found to be composed of one type of the structural element, or two or three types of the elements. On the basis of the new structural systems developed in recent years, explanations and discussions are made on the proposed method of classification.
Keywords spatial structures, structural type, classification, structural element

1 引 言

空间结构是一种具有三维空间形体,且在荷载作用下具有三维受力特性的结构,具有受力合理、自重轻、造价低以及结构形式多样化等特点。近二十年来,我国的大跨度空间结构得到了迅速发展,结构形式不断创新,并具有我国自己的特色。形态各异的空间结构在体育场馆、展览中心、航站楼、影剧院、车站、大型商场、飞机库、工厂车间、煤棚与仓库等建筑中得到了广泛的应用。

当前,空间结构的发展方兴未艾、极具活力,新的空间结构形式不断涌现。长期以来对空间结构的形式与分类并没有统一的标准。习惯上将空间结构分为薄壳结构、网架结构、网壳结构、悬索结构和膜结构等五大类,但这一分类难以涵盖近年来空间结构发展中出现的新结构,特别是目前发展势头强劲的各类杂交空间结构或组合空间结构。也有(如文献[1])根据结构刚性差异将空间结构分为刚性空间结构、柔性空间结构和组合空间结构。但将所有由不同结构单元或不同材料组合

* 本文曾刊登在《土木工程学》,2004年第37卷第1期。

而成的空间结构均列为杂交结构或组合结构(习惯上由不同单元构成的结构称杂交结构,不同材料构成的结构称组合结构)显得过于笼统。本文试图从一个新的角度,即空间结构的基本组成单元,对空间结构的形式与分类进行讨论。

本文首先对习惯上的五大空间结构与三大空间结构作简要说明,然后提出空间结构按其组成的基本单元进行分类的方法,并归纳了 33 种具体的空间结构形式,同时结合国内外近年来空间结构发展中出现的一些新结构,对新的分类方法作了说明与讨论。

2 五大空间结构与三大空间结构

习惯上,通常将空间结构按形式分为五大类,即薄壳结构(包括折板结构)、网架结构、网壳结构、悬索结构和膜结构,称为五大空间结构,如图 1 所示。其中,膜结构可分为充气膜结构和支承膜结构,前者又可分为气囊式膜结构(囊中气压为 3~7 大气压,称高压体系)和气承式膜结构(膜内气压 1.003 大气压左右,称低压体系),后者又可分为刚性支承膜结构(支承在刚度较大的如拱、梁、桁架、网架等支承结构上,又称骨架式膜结构)和柔性支承膜结构(支承在脊索、谷索、边索、桅杆等刚度较大的支承结构上,又称张拉式膜结构)。

在五大空间结构的基础上,平板型的网架结构和曲面型的网壳结构可合并总称为网格结构(新的《土木工程名词》已正式推荐采用“空间构架”这一名词^[2],相当于英文的 Space Frame,这里仍根据习惯称为网格结构);而悬索结构与膜结构也可合并总称为张拉结构。这样,所有的空间结构又可归纳为三大空间结构,即薄壳结构、网格结构和张拉结构,见图 1。

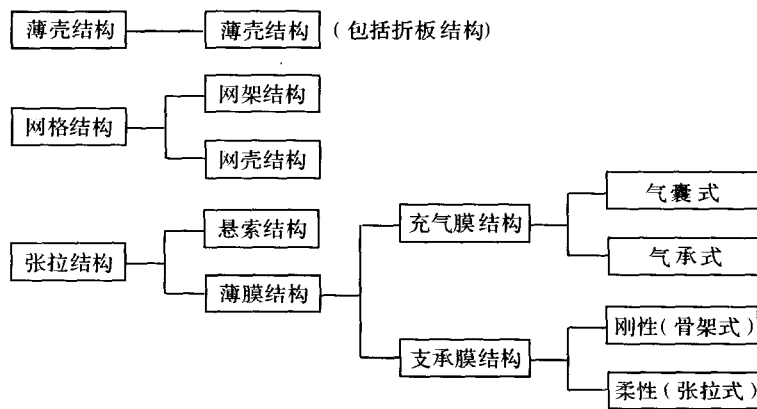


图 1 五大空间结构与三大空间结构

然而,以上分类方法难以涵盖近年来空间结构发展中出现的新结构,也难以充分反映新结构的结构构成及其特点。例如树状结构,构成简单明确,是典型的三维受力的空间结构,国外有些文献称之为直接传力结构,但显然不属于上述五大空间结构的任一类;又如张弦梁结构,由上弦刚性构件、下弦高强度拉索以及连接两者的撑杆组成,既可以理解成用刚性构件替换索桁架的上弦索而产生的结构体系,也可理解为用拉索替换普通桁架的受拉下弦杆而形成的结构体系,还可以理解为体外布索的预应力梁或桁架,而采用上述分类方法难以准确反映结构的构成及其特点。

3 按空间结构组成的基本单元分类

组成空间结构的基本单元可归纳为五种,即板壳单元、梁单元、杆单元、索单元和膜单元。从结

构理论的观点看,一种单元或多种单元的集成便可构成各种具体形式的空间结构。根据国内外已建的空间结构工程,我们归纳出了 33 种具体的空间结构形式,列于图 2。这些空间结构中,既包含了传统的薄壳结构、悬索结构,也包含了体现空间结构领域新成果的新型结构形式,如索穹顶结构、张弦梁结构。不难发现,这 33 种具体的空间结构,都可以用图 2 所示的某一种单元或某两种、三种单元集构成。

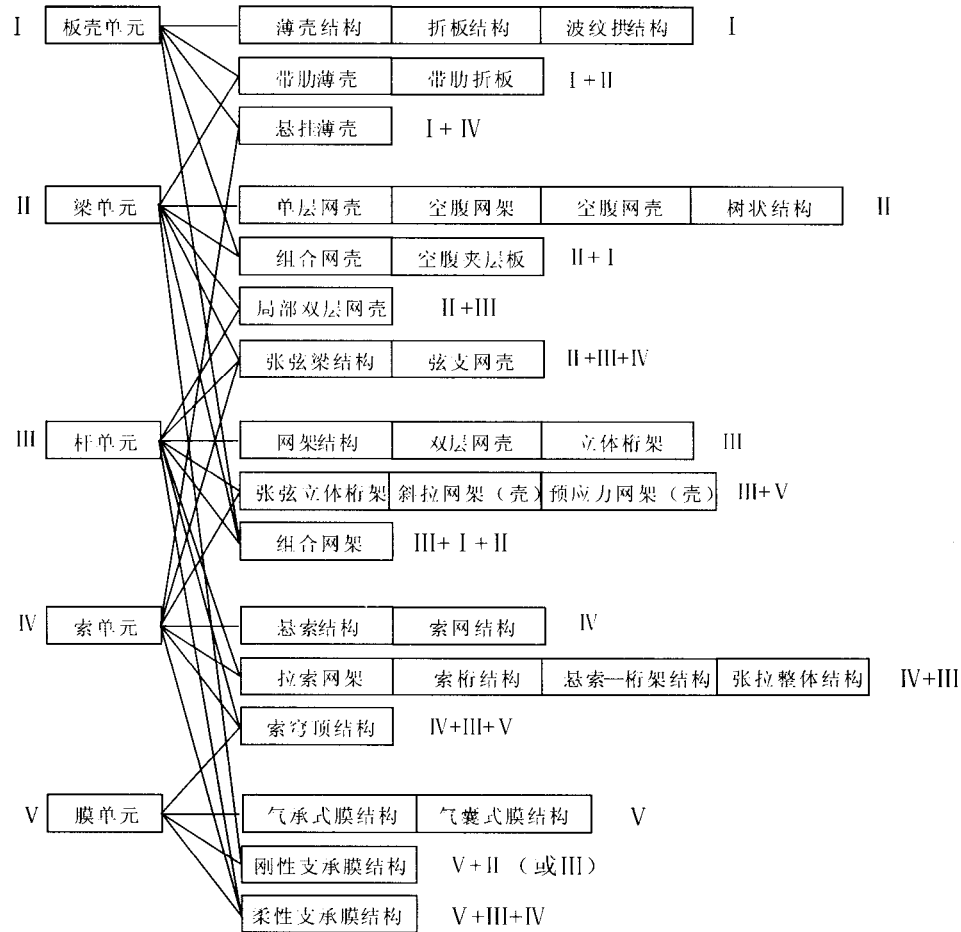


图 2 空间结构按基本单元组成分类

4 对空间结构按基本单元分类的说明与讨论

关于空间结构按基本单元分类,对照图 2 还可作如下诠释和阐述。

(1)图 2 所归纳的 33 种空间结构中,除支承膜结构外,没有包括边缘支承结构本身(如拱、横隔、环梁、边梁、立柱等)的基本结构单元。这样是为了使分类意义更加明确。如对于圆柱面薄壳,边梁往往是必要的结构构件,但从壳体本身看仍属于光面壳,边梁的作用显然不同于带肋薄壳中的加劲肋,因此若分类中包含考虑边梁的梁单元,反而容易造成分类的混乱。

(2)有些结构由相同的两种或三种单元所构成,在图 2 中以集成该结构的主要单元将其列入相应的位置。如带肋薄壳和组合网壳均由板壳单元和梁单元集成,带肋薄壳是在光面壳体的基础上设置加劲肋而形成,而组合网壳通常认为是在普通网壳的基础上考虑其上部屋面板的共同工作而形成,因此将带肋薄壳列入板壳单元为主的结构,组合网壳则列入梁单元为主的结构。

(3)随着计算机的广泛应用和现代计算技术的不断发展,空间结构的计算分析主要依靠计算机、采用有限单元法进行。对空间结构按其组成的基本单元进行分类,便于把结构的分类和结构分析的计算方法及分析程序结合起来。如对网架结构的精确分析,只要采用单一的杆单元的结构计算程序即可;而对由下弦杆、腹杆和混凝土带肋板组合而成的组合网架结构,则需要采用包含杆单元、板壳单元、梁单元三种单元的组合结构计算程序才能进行精确分析。余可类推。

(4)薄壳结构从其构成单元看包括光面壳和带肋壳。如北京火车站大厅、北京网球馆采用的光面的双曲扁壳结构,不同于无锡 702 所试验大厅的无脚手装配式带肋球面薄壳。前者只由一种板壳单元集成,而后者需由板壳单元和梁单元两种单元集成。

(5)新颁布的我国《网壳结构技术规程》^[3]明确规定,单层网壳应采用刚接节点,双层网壳可采用铰接节点。也就是说,同是网壳结构,单层网壳应由梁单元集成,而双层网壳可由杆单元集成。因此,按空间结构组成的基本单元分类,单、双层网壳分属两种结构。而在双层网壳基础上抽空(或在单层网壳基础上加强)而形成的局部双层网壳,则需由梁、杆两种单元集成,必要时还应采用一端刚接、一端铰接的梁单元。

(6)空腹网壳是指不设斜腹杆的双层网壳结构,这类结构可由梁单元集成。椭圆形平面尺寸 142m×212m 的国家大剧院屋盖便是我国目前唯一的、也是跨度最大的空腹网壳结构。图 3 所示为该网壳结构具有 12500 个节点的计算模型图^[4]。

(7)树状结构属于仿生结构的一种,是近年来有所采用的新结构。它实际上是一种多级分枝的立柱结构,柱干和枝干都可由梁单元集成。深圳市文化中心前大厅采用了粗枝、中枝、端枝三级分枝的树状结构;国外的一个代表性工程是德国一高速公路收费站采用二级分枝的树状结构(见图 4)。

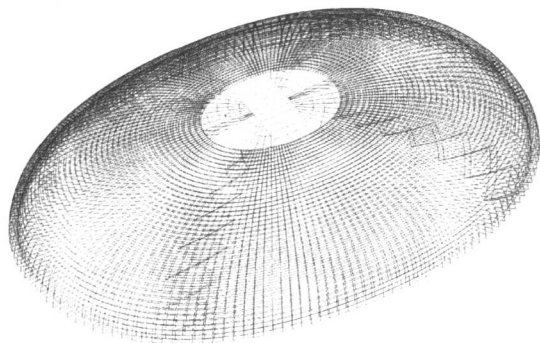


图 3 国家大剧院空腹网壳计算模型图

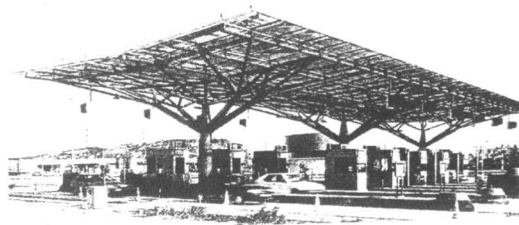


图 4 二级分枝的树状结构

(8)张弦梁结构是近年发展起来的一种大跨度空间结构形式,其上弦为承受弯矩和压力的梁,下弦为高强度拉索,中间设撑杆。这是一种比较简单的预应力结构,却是由梁单元、杆单元及索单元三种单元集成的空间结构。上海浦东国际机场航站楼 82.6m 跨度的办票厅屋盖,采用了我国目前跨度最大的张弦梁结构。

若将上弦梁改为立体桁架,张弦梁结构便成为带拉索的杆系张弦立体桁架,可使结构计算及构造得到简化。从其组成单元看,张弦桁架可由杆和索两类单元集成。2002 年建成的广州国际会议展览中心就采用了上弦为倒三角形断面钢管立体桁架的张弦桁架结构^[5],跨度达 126.6m(图 5)。黑龙江国际会议展览体育中心主馆屋盖结构也采用了类似的张弦立体桁架,跨度达 128m。

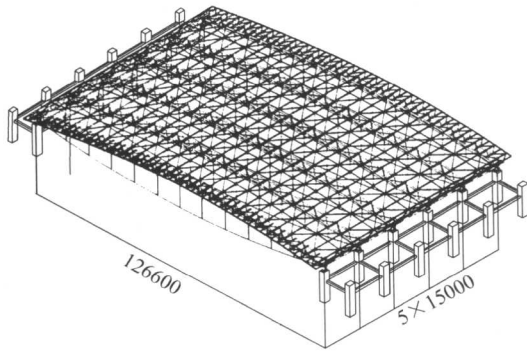


图5 广州国际会议展览中心张弦立体桁架

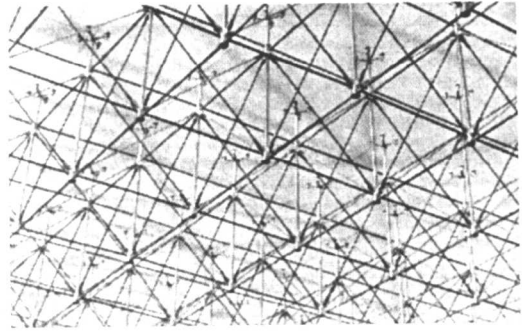


图6 深圳市民中心博物馆拉索网架

(9)将现代预应力技术引入空间网格结构便可构成预应力网格结构,对于网壳,通常的方法是在网壳的周边设置预应力索;而将斜拉桥技术及预应力技术综合应用到网格结构形成的杂交空间结构则为斜拉网格结构^[6]。单层网壳结构在工程中十分常见,但实际工程中为避免应力过于集中,预应力网壳和斜拉网壳都采用了双层网壳,故在图2中它们分别并入了由杆单元和索单元构成的预应力网架(壳)和斜拉网架(壳)这两种空间结构中。

(10)拉索网架的上弦、下弦和斜杆均由预应力索或圆钢构成,只有竖杆采用铰接的劲性杆。通过预应力的施加,外荷载作用下的受力状态与预应力状态叠加后,网架中的大部分杆件处于受拉状态,杆件可按拉杆设计得比较纤细,结构显得十分轻巧。因此这是一种以索单元为主、必须通过施加预应力才能成形的网架结构。平面尺寸 $30\text{m}\times 54\text{m}$ 的深圳市民中心博物馆采光顶^[7],在我国率先采用了拉索网架(图6)。该结构中,上下弦均为拉索,斜腹杆为圆钢拉条,只有竖腹杆为可考虑拉压的一般杆件。

(11)悬索—桁架结构和索桁结构是比较容易混淆的两种均由索、杆单元集成的空间结构。悬索—桁架结构实际上是一种横向加劲的单层悬索结构体系,在平行布置的单层悬索上设置与索方向垂直的横向桁架,并通过桁架两端强制支座向下变位的办法使悬索产生预应力并保持其稳定性(见图7)。也有称之为横向加劲单曲悬索结构。长六边形平面尺寸 $72\text{m}\times 53\text{m}$ 的安徽体育馆就采用了这种结构^[8],1989年建成。

而索桁结构实际上是一种双层悬索体系,它上、下弦均为索,其中下凹的称承重索,上凸的称稳定索,索间的撑杆是劲性杆或构成纵向桁架。承重索和稳定索可以位于同一竖向平面内,也可以交错布置。由于这类结构的外形和受力特点类似于承受横向荷载的传统平面桁架,因此也称索桁架^[9]。1986年建成的吉林滑冰馆在我国最早采用了这种索桁结构(图8),平面尺寸 $59\text{m}\times 77\text{m}$,上、下弦索错开设置。索桁结构还可进一步拓展为大型环状的空间索桁结构体系^[10],特别适用于大型体育场的挑篷结构。如韩国釜山体育场,其各榀沿径向布置的索桁架的外端支承在直径 228m 的圆形环梁上,并由48根 λ 形混凝土柱支承;索桁架的内端与 $152\text{m}\times 180\text{m}$ 椭圆形平面的上、下内环索相连;从而形成中间大开口的环状结构。该体育场屋面采用膜材,1999年建成,图9(a)所示为其外景。其中的单榀索桁架由上弦索、下弦索、垂直索和立柱(撑杆)组成,见图9(b)。

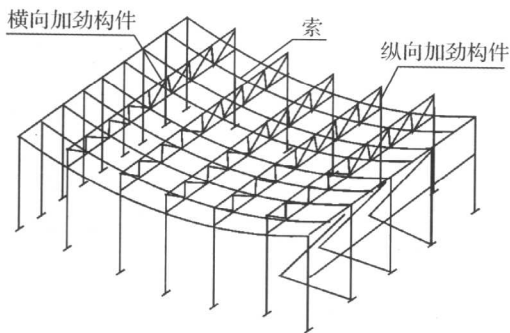


图7 悬索—桁架屋盖结构体系示意图

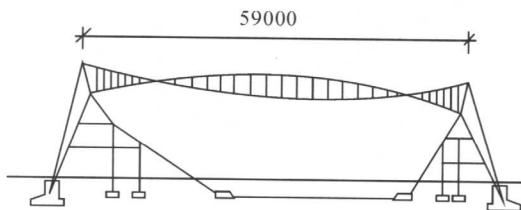
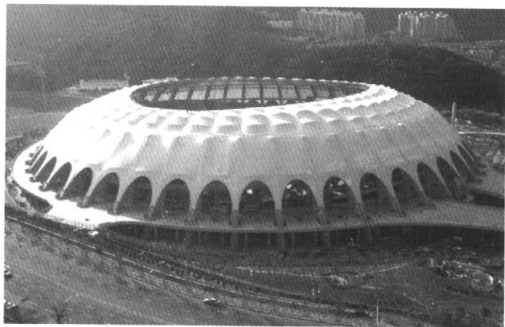
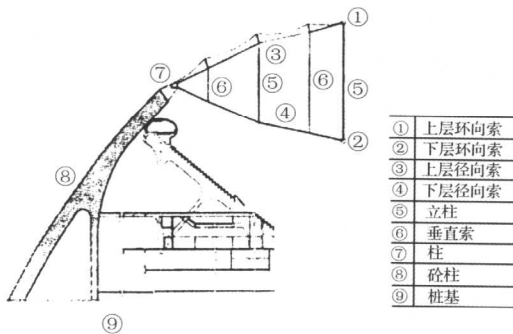


图8 吉林滑冰馆索桁结构



(a) 外景



(b) 单榀索桁架示意图

图9 韩国釜山体育场

(12)图2所列的33种空间结构又可分成五大类:第一类是由板壳单元或以板壳单元为主、其他单元为辅集成的空间结构3+3共6种;第二类是由梁单元或以梁单元为主、其他单元为辅集成的空间结构4+5共9种;第三类是由杆单元或以杆单元为主、其他单元为辅集成的空间结构3+4共7种;第四类是由索单元或以索单元为主、其他单元为辅集成的空间结构2+5共7种;第五类是由以膜单元或以膜单元为主、其他单元为辅集成的空间结构2+2共4种。这五类空间结构与图1所示的薄壳结构、网架结构、网壳结构、悬索结构和膜结构五大空间结构,在一定程度上有相关性和对应性。

(13)通过图2的连线可以知道,杆单元是五种单元中最活跃的单元。在所有33种空间结构中,16种结构含有杆单元;其次是14种结构含有索单元,13种结构含有梁单元;再其次是9种结构含有板壳单元,5种含有膜单元。

(14)图2还给人们以启迪,图中可以增加新的连接线,补缺、伸长右侧的各个空位,可进一步发展、开拓、创造新的空间结构。

5 结 语

本文提出了空间结构按其组成的基本单元进行分类的方法,为空间结构的分类提供了一条新的思路。根据国内外已建的空间结构工程,归纳了33种具体的空间结构形式,这些结构均可由板壳单元、梁单元、杆单元、索单元及膜单元五种单元中的某一种单元或某两种、三种单元构成。这一

分类方法具有两个明显的特性。一是实用性,因为这一分类方法与结构分析的计算方法与计算机程序有机结合起来,在计算机应用日益广泛、空间结构分析主要依靠计算机完成的今天,这一特性无疑具有积极的意义。另一个特性是开放性,任何新的空间结构体系均可在这一分类的框架中找到适当的位置,同时该分类也启发人们去不断创新、开发出新的空间结构形式。

参考文献

- [1]肖焱,李维滨,马少华.空间结构设计和施工[M].南京:东南大学出版社,1999
- [2]蓝天,刘枫.中国空间结构的二十年[A].第十届空间结构学术会议论文集[C].北京:中国建材工业出版社,2002,1-12
- [3]JGJ 61-2003.网壳结构技术规程[S].中华人民共和国行业标准,北京:中国建筑工业出版社,2003
- [4]浙江大学空间结构研究中心.国家大剧院网壳结构分析计算初步报告[R].2000
- [5]陈荣毅,董石麟.广州国际会议展览中心展览大厅钢屋盖设计[J].空间结构,2002,8(3):29-34
- [6]董石麟.预应力大跨度空间钢结构的应用与展望[J].空间结构,2001,7(4):3-14
- [7]姚裕昌,冯若强,等.玻璃采光顶在大跨度屋盖中应用的实践与探索[A].第十届空间结构学术会议论文集[C].北京:中国建材工业出版社,2002,788-796
- [8]谢永铸,陈其祖.安徽省体育馆“索一桁架”组合结构屋盖设计与施工[J].建筑结构学报,1989,10(6):71-79
- [9]沈世钊,徐崇宝,赵臣.悬索结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,1997
- [10]冯庆兴,董石麟,邓华.大跨度环形空腹索桁结构体系[J].空间结构,2003,9(1):55-59

索穹顶结构体系的研究进展*

詹伟东 董石麟

(浙江大学空间结构研究中心, 浙江 杭州 310027)

摘 要 索穹顶结构是过去二十年间发展起来的一种新型空间结构形式。本文先对 6 个索穹顶结构工程实例作了简单的介绍, 然后回顾了国内外对索穹顶结构在结构形态、静力和动力特性、施工成形技术和实验模型等方面的研究现状。最后指出了索穹顶结构的研究方向。

关键词 索穹顶结构; 工程实例; 研究进展

ADVANCES IN CABLE DOME STRUCTURAL SYSTEMS

Zhan Weidong Dong Shilin

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

Abstract Cable Dome is a new type of spatial structural forms developed in the past twenty years. Firstly six existing cable dome engineering examples are introduced in this paper, then research advances such as structural morphology, static and dynamic behavior, technology of construction and model experiments are reviewed in all references obtained. At last cable dome's research orientations are given in this paper.

Key Words Cable Dome; engineering examples; research progress

1 引 言

索穹顶(Cable Dome)结构是由拉索和压杆及膜组成的自应力空间结构体系, 是最近十几年发展起来的一种新型的空间结构形式。这种结构体系具有受力合理、自重轻、跨度大和结构形式美观新颖等特点, 是一种结构效率极高的全张力体系。

索穹顶结构体系来源于著名的建筑大师 R. B. Fuller 于 1962 年在他的专利中提出的一种由三角形网格的索网和嵌于其间的部分压杆构成张拉整体的结构思想, 而这种思想在之后的很长时间内并没有在实际的工程中得到实现^{[1][2]}。到 20 世纪 80 年代, 美国著名结构工程师 D. H. Geiger 发展了 R. B. Fuller 的张拉整体结构的拓扑形式, 重新构造了一种用连续受拉索和不连续受压桅杆组成的预应力空间结构体系, 即索穹顶结构, 并首次将这种结构形式应用于 1988 年汉城奥运会体操馆和击剑馆。此后, 美国工程师 M. P. Levy 和 T. F. Jing 对 D. H. Geiger 索穹顶中索网平面内刚度不足和易失稳的特点进行了改进, 将辐射状脊索改为联方型, 消除了结构内部存在的机构, 并取消起稳定作用的谷索, 成功设计了 1996 年亚特兰大奥运会的主体育馆佐治亚穹顶(Georgia Dome)。这是目前已经建成的两种具有代表性的索穹顶结构, 它们的建造向人们展示了这种新型结构的独特魅力, 并引起了世界各国的工程界和学术界的广泛关注。

索穹顶结构体系大量采用预应力钢索而较少使用压杆, 能够充分利用钢索的抗拉强度, 并使用薄膜材料作为屋面, 所以结构自重相当轻, 并且结构单位面积的平均重量和平均造价不会随结构跨度的增加而明显增大, 因此该结构形式非常适合于大跨度建筑的屋盖, 能满足体育场馆和展览厅等大跨度建筑的要求, 是一种有广阔应用和发展前景的大跨度空间结构形式。

* 本文曾刊登在《浙江大学学报》工学版, 2004 年第 38 卷第 10 期。

2 索穹顶结构的工程实例^[3,4,5]

到目前为止世界上已建成多座索穹顶结构建筑,主要分布在亚洲的韩国和中国台湾、北美洲的美国以及南美洲的阿根廷。按照建成时间顺序,它们分别是汉城奥林匹克体操馆和击剑馆(韩国,1986),伊利诺斯州立大学红鸟竞技场(美国,1988),太阳海岸穹顶(美国,1989),佐治亚穹顶(美国,1992),台湾桃园体育场(中国台湾,1993),以及 La Plata 体育馆(阿根廷,2000)。这些建筑的索穹顶屋盖结构主要由盖格尔事务所(Geiger Associates)和魏德林格尔事务所(Weidlinger Associates)设计的。据报道,日本、墨西哥和沙特阿拉伯等地也有索穹顶结构建筑。目前中国内地尚没有索穹顶结构的工程实例。

2.1 汉城奥林匹克体操馆和击剑馆

汉城奥林匹克体操馆和击剑馆是世界上第一个索穹顶结构建筑(图1),是1988年汉城奥运会的主要比赛场馆,两者形状均为圆形,都由16根辐射状索桁架组成。其中体操馆直径为120m,是个多功能的体育馆,能容纳15000个观众,膜材覆盖面积为11310m²。击剑馆直径为93m,膜材覆盖面积为6793m²。

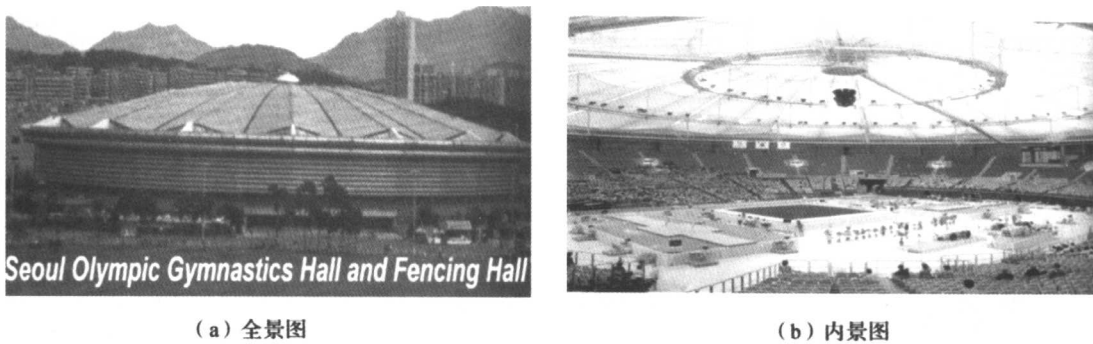


图1 汉城奥林匹克体操馆

2.2 伊利诺斯州立大学红鸟竞技场

美国伊利诺斯州立大学的红鸟竞技场是美国本土第一个索穹顶结构体育馆(图2),也是世界上第一个非圆形顶的索穹顶结构体育馆。体育馆的屋顶使用半透明和保温的特氟隆材料,伞状的折顶形式通过24个飞杆将脊索撑起而形成峰顶,拉直的谷索形成峰谷。除了脊索使用了普通钢索外,屋顶结构的其余索部件都采用7根一束的预应力钢索。外斜索与主环索及飞杆间的连接件均为钢铸件。该体育馆呈椭圆形,其长轴为91m,短轴77m。

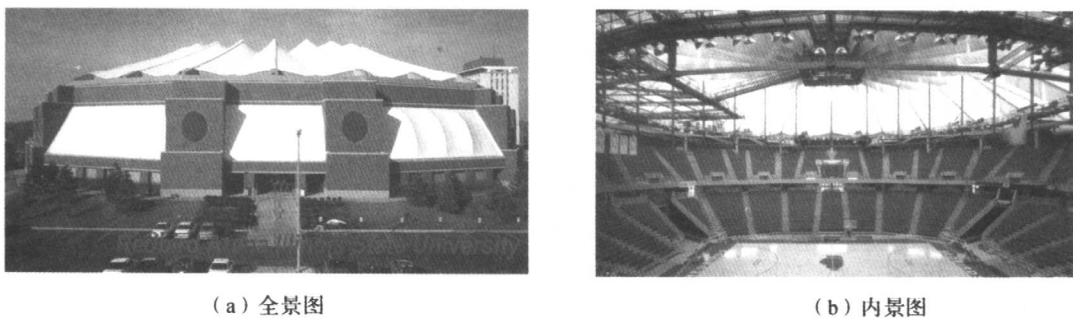


图2 伊利诺斯州立大学红鸟竞技场