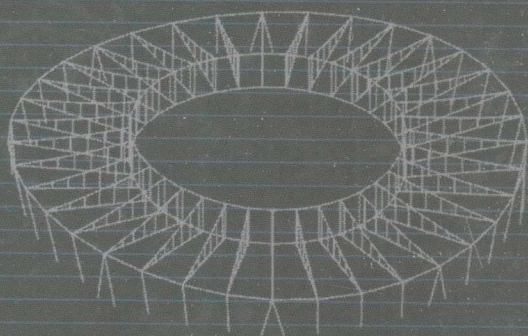
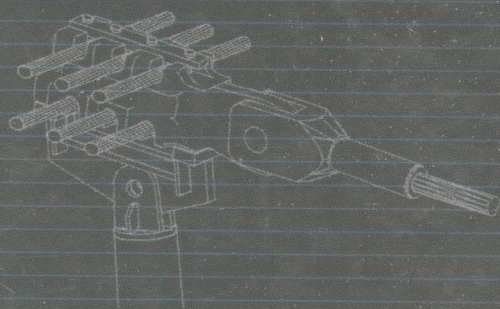


CABLE STRUCTURE SYSTEM,
DESIGN PRINCIPLE AND
CONSTRUCTION CONTROL



索结构体系、设计原理 与施工控制

郭彦林 田广宇 著



科学出版社

索结构体系、设计原理 与施工控制

郭彦林 田广宇 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书首先系统介绍了建筑工程中应用的索结构体系、设计原理、施工控制与工程应用等,包括张弦梁、弦支穹顶、索穹顶、张拉结构、索网、索拱、斜拉和悬吊结构、索桁架和预应力撑杆柱、车辐式结构等结构的组成特点、受力性能、设计理论以及典型工程应用等;然后重点介绍了索结构的找形分析方法和计算原理,幕墙和采光顶的索结构形式、设计理念及工程应用,索结构的动力性能、风致效应及断索分析,索结构施工张拉分析及施工控制方法、误差控制分析及索力测量方法;最后介绍了拉索(杆)与锚具设计、索材料特性及索节点的主要连接形式。

本书可作为高等院校本科高年级学生及研究生的教学用书,也可供索结构设计与施工技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

索结构体系、设计原理与施工控制/郭彦林,田广宇著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-042628-4

I. ①索… II. ①郭…②田… III. ①悬索结构-建筑工程 IV. ①TU351

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 277426 号

责任编辑:王 钰 / 责任校对:王万红

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京中科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 10 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 10 月第一次印刷 印张:31 1/2

字数:728 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈中科〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

索结构是一种亦古亦新的结构形式。在人类文明发展的数千年中,各种材质的绳索因其轻质、高强、纤细的特点,早已成为建筑工程不可或缺的要害。近年来,随着国内外建筑工程获得了前所未有的发展,古老的索结构再次焕发了新的活力,特别是张弦梁、弦支穹顶、索穹顶、索网、索拱及点支式幕墙为主要代表的索结构形式在大量工程项目中的广泛应用,不仅带动了对索结构性能、设计理论与施工张拉技术的创新研究,而且将建筑美学与结构科学推升到了新的高度。《索结构体系、设计原理与施工控制》正是在这样的背景下成稿,旨在总结与介绍新近发展及应用的索结构形式、设计原理与施工控制技术,希望能对建筑科学与技术进步有一定的促进作用。

索结构形式的多样化和索结构设计理论的发展,加速了索结构的工程应用。目前索结构的主要形式可归结为张拉结构以及由柔性拉索与刚性构件组成的杂交结构两类。工程上应用的索结构主要有张弦梁、弦支穹顶、索穹顶、索桁架、索网、索拱以及各种斜拉或悬吊结构等。索可以独自或者与其他刚性构件结合并锚固在刚度更大的结构上,如车辐式张拉屋盖、索穹顶、轮辐式摩天轮以及索网结构等;它也可以与一些刚性构件组成自平衡预应力结构体系,形成纤细轻巧的结构形式,如张弦梁以及预应力自平衡索桁架等。书中还介绍了索在高耸结构中的应用。

索结构的零应力态、初始态以及荷载态反映了其受力特点。初始态是索结构最重要的状态,找形分析理论为索结构初始态的确定提供了计算方法,并成为研究其荷载态的基础。相关计算理论、计算方法与计算机技术的发展,为索结构与施工过程的仿真分析提供了强有力的工具。此外,在张拉结构风致响应与抗风设计理论方面取得的研究成果也是推动索结构工程应用的重要动力之一。

与全刚性结构不同,索结构与施工张拉过程紧密相关,充分体现了结构与施工一体化分析的发展趋势。对不同形式的索结构要依据其设计初始态制定其张拉方法、张拉工艺以及张拉控制标准。在施工张拉前要进行张拉过程模拟分析,确定张拉分级、张拉顺序以及张拉关键阶段的“力”态与“形”态。特别是对一些复杂的索结构,在优选施工张拉方案的基础上,实现施工全过程仿真分析与结构设计的无缝对接已成为保证索结构安全的“必修课”。对于采用定尺定长设计及施工的索结构,施工环境温度与施工误差会直接影响其成型后的内力与变形。在对施工误差敏感性分析及施工误差控制分析的基础上,可结合施工误差对索结构整体受力性能的影响和结构可靠度理论确定不同类型拉索与刚性构件的施工误差控制标准,为索结构定尺定长设计及施工技术的应用提供依据。

由于索结构对荷载作用及受环境影响的敏感性,对重大工程施工成型后的索力评估及服役期间的索力监测是非常必要的。索力监测技术的发展不仅依赖于监测设备的研发,更需要深刻地理解各类索结构的受力特点与力学性能。索力测试方法及索力识别理论也是索结构健康监测领域最活跃的研究课题之一。

由于索结构“形”与“力”关联性极强、设计与施工具有不可分割性,本书把索结构体系、受力机理、设计理论与施工张拉技术融合在一起进行介绍,旨在加强它们之间的联系,并以此为例,使读者对结构与施工一体化分析有一定了解。

本书的主要内容如下:

第1章简要介绍各种索结构形式以及主要特点。

第2章详细介绍各种索结构的形式、构成特点、受力性能、设计理论以及典型工程应用。

第3章介绍索结构的找形分析方法及计算原理,包括平衡矩阵法、力密度法、动力松弛法和有限元方法等,并结合算例对找形分析过程进行了示范。

第4章介绍幕墙支承体系与采光顶的索结构形式、设计理念以及工程应用。

第5章介绍拉索(杆)与锚具设计、索材料特性以及索节点等主要连接形式。

第6章介绍索结构的动力性能、拉索的振动控制、索结构的风致效应分析以及断索分析等。

第7章介绍索结构施工张拉分析及施工控制方法、误差控制分析以及索力测量方法等。

书中吸纳了作者课题组近年来对索结构的部分研究成果,包括作者指导的研究生赵思远、郭宇飞、王小安、崔晓强、姜子钦、张晓燕、王高宁、朱博莉、符鹏鹏等的研究工作,还参考了国内外同行的研究成果与论著,在此一并致谢。特别要感谢赵思远博士对第6章成稿所做出的贡献,也感谢研究生郇志乾对书中部分插图的绘制及研究生章友浩对部分章节的校核。

由于作者的理论水平以及工程经验有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

江彦林

2014年6月

目 录

前言

第 1 章 索结构发展概述	1
1.1 索结构形式	1
1.2 索结构设计理论	9
1.3 索结构的施工张拉与控制	10
参考文献	12
第 2 章 索结构体系及工作机理	14
2.1 概述	14
2.2 张弦梁	18
2.2.1 张弦梁结构的组成特点	18
2.2.2 张弦梁结构的受力性能	25
2.2.3 张弦梁结构的工程应用	41
2.3 索穹顶结构	50
2.3.1 索穹顶结构的组成与体型	50
2.3.2 索穹顶的找形分析方法概述	54
2.3.3 索穹顶的静力性能	57
2.3.4 索穹顶的极限状态	65
2.3.5 索穹顶的动力性能	65
2.3.6 索穹顶的工程应用	68
2.4 弦支穹顶结构	72
2.4.1 弦支穹顶结构的组成与体型	72
2.4.2 弦支穹顶结构的边界条件	80
2.4.3 弦支穹顶结构的静力性能	82
2.4.4 弦支穹顶结构的动力性能	84
2.4.5 弦支穹顶结构的工程应用	87
2.5 单层索网结构	89
2.5.1 单层索网的结构形式	89
2.5.2 单层索网结构的静力性能	91
2.5.3 单层索网结构的动力性能	96
2.5.4 单层索网结构的边界条件	99
2.5.5 单层索网结构的工程应用	101
2.6 索拱结构	102
2.6.1 索拱结构的形式	102

2.6.2	索拱杂交结构的稳定性能	107
2.6.3	车辐拱结构的稳定性能	125
2.6.4	索拱结构的工程应用	132
2.7	斜拉结构与悬吊结构	135
2.7.1	斜拉结构的组成及受力特点	135
2.7.2	悬吊结构的组成及受力特点	138
2.7.3	斜拉与悬吊结构的工程应用	139
2.8	斜拉框架结构	143
2.8.1	斜拉框架结构的组成及特点	143
2.8.2	斜拉框架结构的工程应用	146
2.9	预应力撑杆柱	147
2.9.1	预应力撑杆柱的形式	147
2.9.2	预应力撑杆柱的力学性能	147
2.9.3	预应力撑杆柱的工程应用	159
2.10	自平衡预应力索桁架	160
2.10.1	自平衡预应力索桁架的形式	160
2.10.2	自平衡预应力索桁架的力学性能	161
2.10.3	自平衡预应力索桁架的工程应用	167
2.11	预应力钢桁结构	171
2.11.1	预应力钢桁结构形式	171
2.11.2	预应力受拉构件	172
2.11.3	钢管桁架下弦管内藏拉索的工作机理与计算模型	173
2.11.4	预应力钢桁结构的工程应用	176
2.12	车辐式屋盖结构	179
2.12.1	车辐式屋盖结构形式及力学性能	179
2.12.2	车辐式屋盖结构的工程应用	185
2.13	摩天轮	189
2.13.1	概述	189
2.13.2	结构形式及力学性能	190
2.14	其他复合结构	192
2.14.1	张弦刚架结构	192
2.14.2	张拉整体结构	194
2.14.3	索在高耸建筑中的应用	196
	参考文献	201
第3章	找形分析	205
3.1	预应力张拉结构的“三态”	205
3.2	结构几何稳定性分析与平衡矩阵理论	205
3.2.1	体系分类	206

3.2.2 一阶无穷小机构及自应力模态	209
3.3 力密度法	214
3.3.1 力密度法基本原理	214
3.3.2 附加条件	218
3.4 动力松弛法	219
3.5 有限元法	224
3.5.1 支座移动法	224
3.5.2 节点平衡法	226
3.5.3 目标位置成型法	226
3.5.4 逐点去约束法	230
3.5.5 节点位移法	241
3.5.6 冷冻升温法	246
参考文献	249
第4章 幕墙支承结构与采光顶	251
4.1 概述	251
4.2 幕墙支承结构与主体结构之间的受力关系	251
4.2.1 主体结构变形对幕墙结构受力性能的影响	251
4.2.2 幕墙支承结构与主体结构之间受力相互独立	259
4.2.3 幕墙支承结构与主体结构之间协同受力	261
4.3 柔性幕墙支承结构	263
4.3.1 单层索网	263
4.3.2 拉索桁架	268
4.3.3 索网架结构	278
4.4 混合幕墙支承结构	280
4.4.1 拉索(杆)桁架+钢桁架	281
4.4.2 自平衡预应力索桁架+钢桁架	282
4.4.3 单层索网+钢框架(钢桁架)	284
4.5 采光顶	288
参考文献	294
第5章 拉索(杆)与锚具设计	296
5.1 概述	296
5.1.1 钢索的组成	296
5.1.2 钢拉杆	300
5.1.3 钢索的强度校核	302
5.1.4 钢索的防腐	304
5.2 索与索连接节点	305
5.3 索与杆连接节点	312
5.4 索与梁或桁架的连接节点	319

5.5	撑杆与梁或桁架的连接节点	323
5.6	锚固节点	324
5.7	施工张拉节点	327
5.8	拉索与膜材的连接节点	328
5.9	锚具	330
	参考文献	333
第6章	张拉结构动力性能	335
6.1	单索的动力性能	335
6.1.1	理想拉索的自由振动	335
6.1.2	抗弯刚度的影响	337
6.1.3	边界条件的影响	337
6.1.4	初始垂度的影响	338
6.1.5	集中质量的影响	341
6.1.6	索力与自振频率的关系	345
6.2	拉索的振动控制	346
6.2.1	振动控制措施	346
6.2.2	减振阻尼器	348
6.3	张拉结构动力性能以及风振效应	351
6.3.1	张拉结构的动力特性	351
6.3.2	风荷载特性	352
6.3.3	频域风振理论的局限性	354
6.3.4	基于时域的风振分析方法	355
6.4	索结构的气弹现象与索的受迫振动	363
6.4.1	索结构的气弹理论	363
6.4.2	索的受迫振动	364
6.5	张拉结构的断索分析	365
6.5.1	张弦梁结构	366
6.5.2	车辐式张拉结构	369
	参考文献	372
第7章	张拉结构施工分析与施工控制	374
7.1	概述	374
7.2	张拉结构构件的制作尺寸控制	375
7.2.1	拉索长度的计算	375
7.2.2	定尺定长设计与张拉施工	376
7.2.3	钢结构构件的制作尺寸	376
7.3	施工张拉模拟分析方法	378
7.3.1	正装法数值分析原理	379
7.3.2	倒拆法数值分析原理	381

7.3.3	计算收敛性问题的解决方法	381
7.4	张拉方案与张拉工艺	383
7.4.1	张弦梁	384
7.4.2	单层索网	398
7.4.3	拉杆(索)桁架	407
7.4.4	车辐式结构	411
7.4.5	索穹顶结构	421
7.4.6	索拱结构	424
7.5	施工张拉过程中“力”与“形”控制	429
7.5.1	基于可靠度指标的索长误差限值的计算方法	430
7.5.2	误差限值控制方法在车辐式结构中的应用	436
7.5.3	宝安体育场屋盖结构索长误差控制限值	439
7.6	施工环境温度的影响	444
7.6.1	车辐式结构施工环境温度影响	444
7.6.2	宝安体育场屋盖结构施工环境温度影响分析	458
7.7	施工与结构设计一体化	460
7.8	施工与服役期间的索力测试	464
7.8.1	直接测量法	464
7.8.2	频率法	465
7.8.3	磁弹效应法	466
7.8.4	基于静力性能的索力识别方法	468
	参考文献	489

第 1 章 索结构发展概述

1.1 索结构形式

近十年来,索结构在结构形式、设计理论、施工技术以及工程应用等诸多方面获得了前所未有的发展。索作为一种常见的柔性受拉构件,早已在工程中得到了应用。古代的索一般为绳索,用来悬吊生产工具、木桥等。随着冶金技术的发展,铁索逐渐代替绳索,成为建筑和桥梁中的一种受拉构件。建于康熙年间的大渡河泸定桥(图 1.1)是其中比较著名的一座^[1],其中使用的索是用铸铁制作的,采用环环相扣的链接形成。西方工业革命促成了现代的钢铁冶炼及加工工艺新技术的发展,钢绞线制作的索成为桥梁工程最常用的构件,悬索桥与斜拉桥便成为大跨度桥梁中的常用形式。美国旧金山金门大桥(图 1.2)就是悬索桥的典型例子。

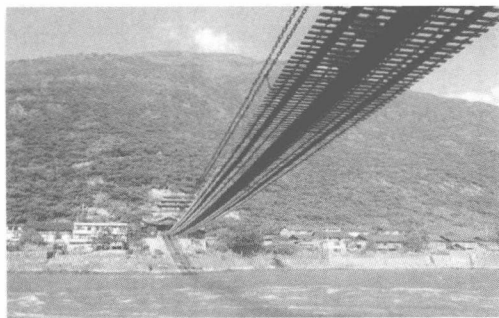


图 1.1 泸定桥



图 1.2 金门大桥

早期的索结构是不施加预应力的,索在自重和恒荷载作用下形成一定的形状,如在均布恒荷载作用下,索的形状为悬链线[图 1.3(a)]。如果仅是集中力作用,索的线形为折线[图 1.3(b)],由集中力作用位置与大小比例确定。随着预应力这一概念的出现和推

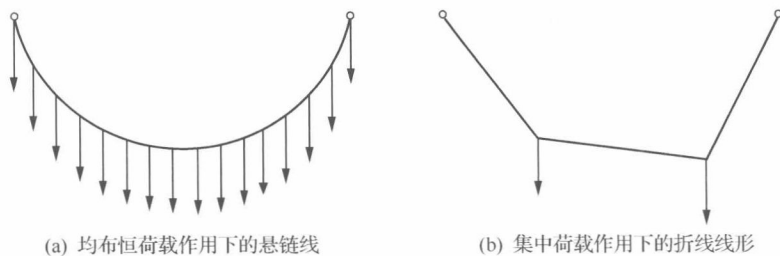
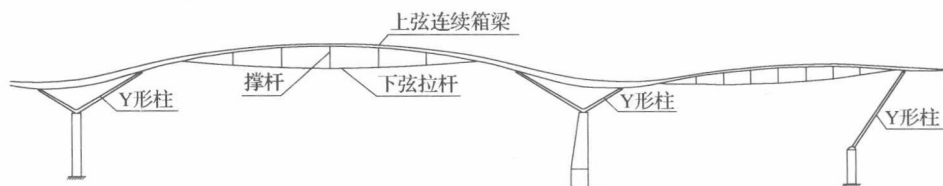


图 1.3 索的线形

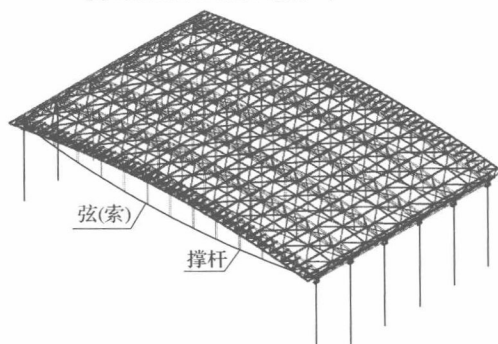
广,索的应用就不局限于桥梁工程中,在建筑工程中也有其发展空间。依据结构形式的不同,拉索施加预应力的作用大致有三种:一是减少及平衡外荷载产生的弯矩,如张弦梁结构;二是形成或者提高结构刚度,如单层索网结构、索穹顶和车辐式结构等;三是改变结构的受力性能,提高结构的承载效力,如索拱结构等。

在建筑工程领域,索结构主要应用在空间结构和大跨度结构中,除了能营造出新颖的建筑与结构造型外,节约材料也是显而易见的。利用拉索强度高的特点,可形成大跨度或超大跨度的轻型屋盖结构,也是索结构首选的原因之一。特别是近年来,借国内外举办大型体育盛会的契机,预应力单层索网结构、索桁架结构、弦支穹顶结构、索穹顶结构、张弦梁结构、斜拉和悬吊结构等在全类体育场馆中获得了大量应用,丰富了建筑结构的形,展示了其美观、轻巧的建筑风采。

张弦梁(或张弦桁架)与弦支穹顶结构是刚柔杂交结构,分别由刚性梁(桁架)和刚性网壳与索撑体系组成,其拉索的作用主要是通过刚性撑杆给刚性梁(桁架)、刚性网壳提供弹性支承,减少刚性梁(桁架)、刚性网壳的弯矩峰值,进而起到增加刚度、减少挠度的作用。张弦梁或张弦桁架在大跨度空间结构中应用非常广泛,如上海浦东机场1号航站楼^[2]和2号航站楼[图1.4(a)]、广州国际会展中心^[3][图1.4(b)]以及深圳会展中心等,其最大单向跨度达到126m。双向张弦梁或多向张弦梁也不乏工程应用实例,如国家体育馆屋盖,其双向跨度分别是144m×114m。双向张弦梁与单向张弦梁比较,后者为平面受力结构,前者为空间受力结构,因此可跨越更大空间。弦支穹顶结构也属于索承式结构,环索、斜索与撑杆共同形成空间索撑体系,用于支承刚性网壳,以大跨度、低用钢量著称。世界各国不少体育场馆采用了这种结构形式,近几年在我国也逐渐得到推广应用,如济南奥体中心体育馆^[4][图1.5(a)]、北京工业大学体育馆^[5][图1.5(b)]等。

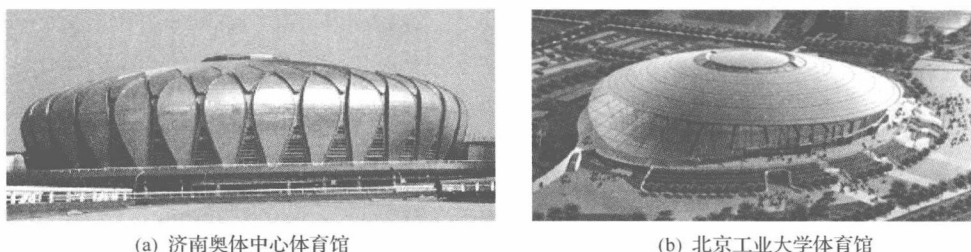


(a) 上海浦东机场航站楼(T2)



(b) 广州国际会展中心

图 1.4 张弦梁结构



(a) 济南奥体中心体育馆

(b) 北京工业大学体育馆

图 1.5 我国建成的典型的弦支穹顶结构

索穹顶结构是典型的张拉整体结构。张拉整体结构的概念最初来自美国著名建筑师 R. B. Fuller, 即由一组连续的受拉构件和一组不连续的受压构件通过一定的拓扑关系组合形成的新型空间结构, 受压构件是存在于“张力海洋中的孤岛”。Fuller 认为这种结构的承载效率最高, 受拉构件采用强度更高的拉索, 既节约材料又轻巧美观。基于这一概念, 人们发展了很多张拉整体结构的基本单元和建筑小品, 但是真正得以在建筑工程上应用的仅是索穹顶结构和车辐式结构这两种结构形式。首尔奥运会体操馆是第一个索穹顶结构, 跨度 120m, 由美国工程师 Geiger 设计, 这种类型的索穹顶被命名为肋环型或 Geiger 型, 如图 1.6 所示。此后, 美国工程师 Levy 设计了亚特兰大奥运会主体育馆的佐治亚索穹顶(Georgia Dome), 其形式与 Geiger 型不同, 如图 1.7 所示, 被命名为葵花型或者 Levy 型。无论是 Geiger 型还是 Levy 型索穹顶, 都是由脊索、谷索、斜索、环索、撑杆、内拉环以及外压环组成的结构体系。与 Geiger 型索穹顶相比, Levy 型索穹顶屋面上层脊索之间形成三角形网格, 所以整体性能较好, 承受非均布荷载的能力较强。

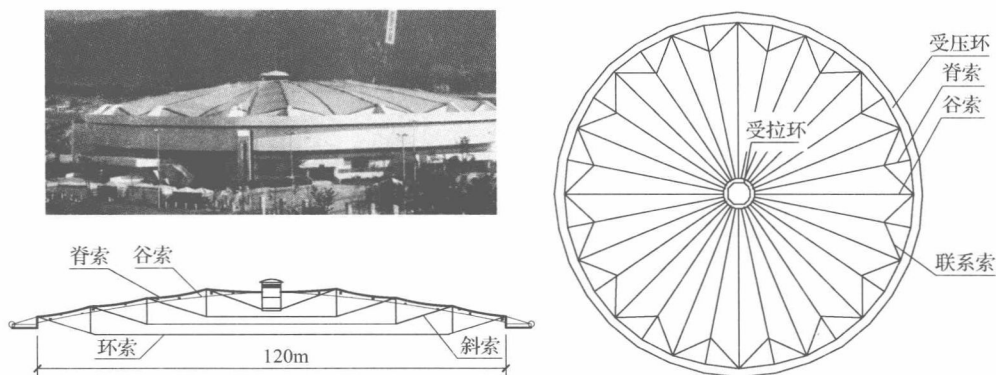


图 1.6 韩国首尔体操馆

车辐式屋盖结构是由径向索桁架、内拉环和外压环组成的自平衡索结构。径向索桁架沿环向辐射状布置, 拉索锚固在外压环与内拉环上, 由拉索张力结构提供刚度。整个结构只有外压环和撑杆是受压构件。北京工人体育馆[图 1.8(a)]、佛山世纪莲体育馆[图 1.8(b)]和深圳宝安体育场[图 1.8(c)]是我国车辐式屋盖结构的典型代表, 具有用钢量小、受力形式合理、施工速度快等优点^[6~8]。宝安体育场主体结构的用钢量仅为 $83\text{kg}/\text{m}^2$, 屋盖索系结构施工张拉周期仅两个月。除了上述体育场馆屋盖外, 摩天轮结构也可认为

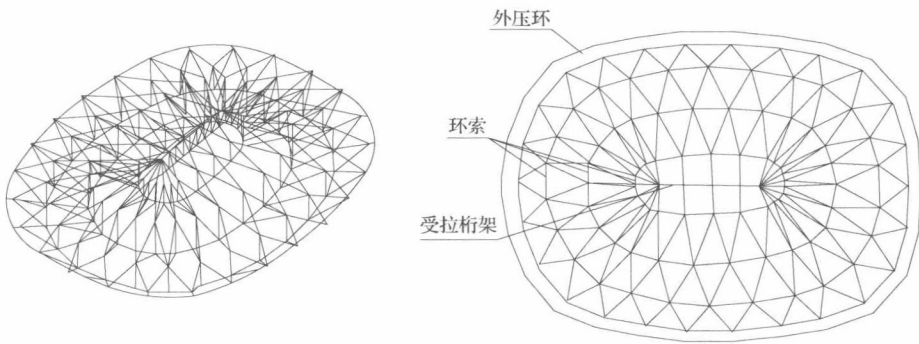
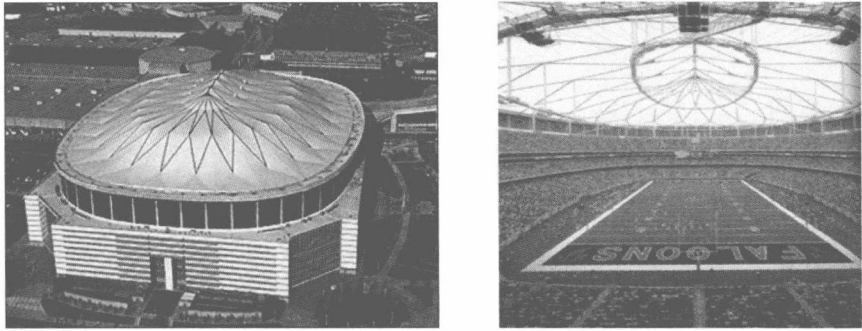
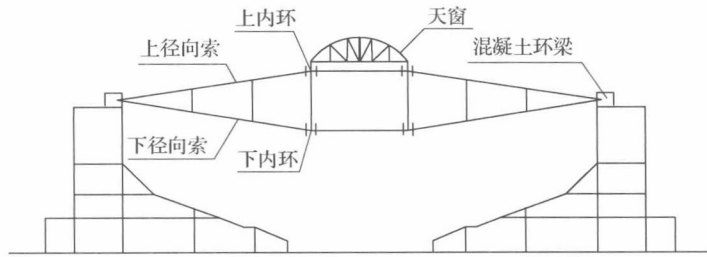
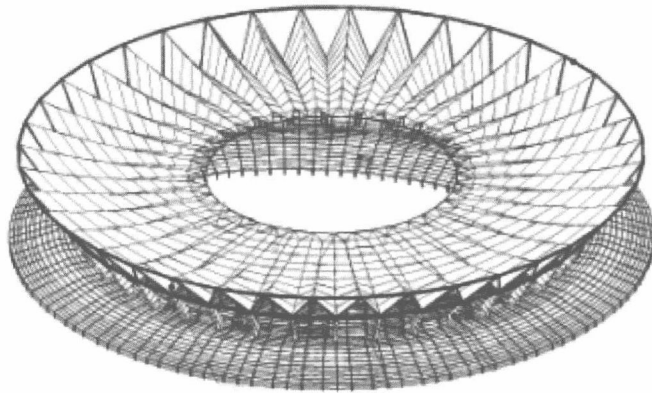


图 1.7 美国佐治亚穹顶

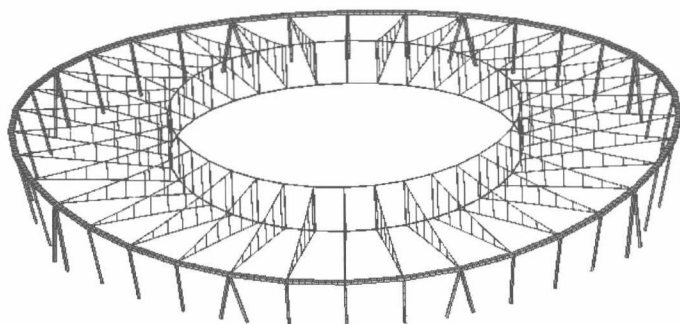


(a) 北京工人体育馆



(b) 佛山世纪莲体育场

图 1.8 车辐式屋盖结构



(c) 深圳宝安体育场

图 1.8 车辐式屋盖结构(续)

是一种竖直放置的车辐式结构,其结构形式分为柔性、刚性以及刚柔杂交的结构形式,主要承受风荷载的作用,如图 1.9 所示。

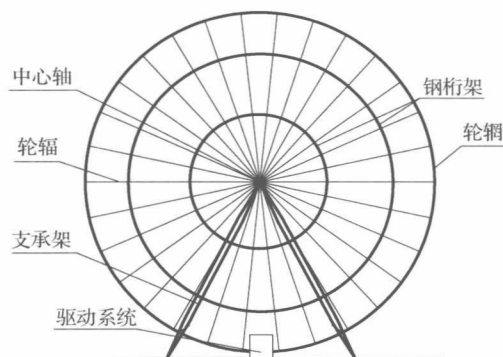
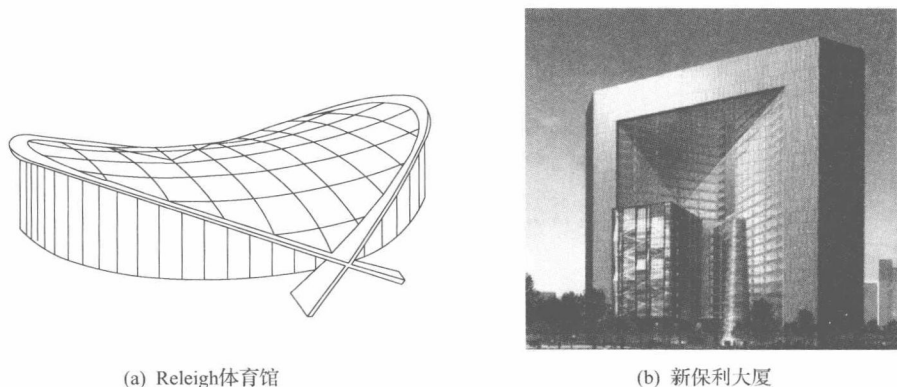


图 1.9 摩天轮结构

单层索网结构仅由拉索交织组成,但需要坚固的锚定结构。单层索网结构在水平方向展开形成大空间,可用于大跨度屋盖结构;在垂直方向展开形成大空间,作为点支式玻璃幕墙的支承结构。用作大跨度屋盖结构时,其屋面造型一般呈马鞍形,两个互相垂直方向的拉索具有符号相反的曲率,这样可以有效抵御竖直向下的恒荷载(及活荷载)以及竖直向上的风吸力。最为著名的单层索网屋盖结构是美国的 Releigh 体育馆[图 1.10(a)],其跨度达 91.5m,用钢量仅 $30\text{kg}/\text{m}^2$ 。我国的杭州体育馆(原浙江省体育馆)平面尺寸为 $80\text{m}\times 60\text{m}$,用钢量比 Releigh 体育馆更小,仅 $17.3\text{kg}/\text{m}^2$ [9]。应用在玻璃幕墙支承结构的单层索网一般呈平面形状,竖直方向的拉索主要承受玻璃的自重,水平方向的拉索抵御风荷载及地震等水平作用。北京新保利大厦[10][图 1.10(b)]以及北京中石油大厦[11]正立面幕墙采用了单层索网结构。

索拱结构是索与纯拱杂交形成的杂交结构。索的作用是约束拱的变形,削减弯矩峰值,增加结构刚度。依据拉索的布置形式,索拱结构可以分成弦撑式索拱结构、弦张式索拱结构以及车辐式索拱结构等,如图 1.11~图 1.13 所示。弦撑式索拱结构与弦张式索拱结构及车辐式索拱结构不同,前者与张弦梁结构类似,需要对拉索施加预应力,而后二



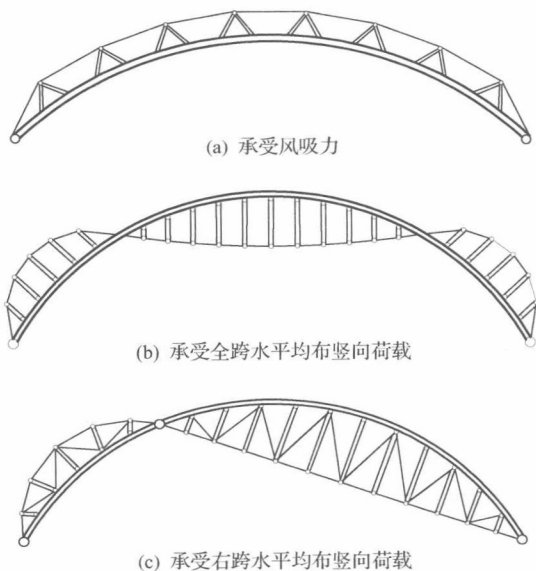
(a) Raleigh体育馆

(b) 新保利大厦

图 1.10 单层索网结构屋盖与幕墙支承结构

者的拉索一般不施加预应力,施工时以张紧为宜。这是因为前者拉索形状与拱在竖向均布荷载作用下的弯矩图形状一致,依靠拉索的预应力削减弯矩峰值,增加结构刚度。后二者的拉索在拱受荷变形时沿索线方向产生牵拉作用,简称为“拉扯作用”;尤其是车辐式拱的拉索一般呈辐射状布置,由拱上均匀分布的点汇聚到拱下方的索盘上。研究与分析表明^[12~14],这类索拱结构可以有效改善纯拱结构的缺陷敏感性,提高其承载力与刚度。德国柏林新中央火车站的站房[图 1.14(a)]和英国伦敦滑铁卢火车站站房[图 1.14(b)]均采用了弦撑式索拱结构^[12]。

斜拉与悬吊结构则将桥梁工程中的斜拉桥和悬索桥的设计概念引入建筑结构中,用拉索将大跨度屋盖结构吊起。拉索除了承受屋盖结构的部分自重外,还给屋盖提供了跨中弹性支承,能有效降低屋盖结构的弯矩,提高结构的刚度和承载力。北京奥体中心体育



(a) 承受风吸力

(b) 承受全跨水平均布竖向荷载

(c) 承受右跨水平均布竖向荷载

图 1.11 弦撑式索拱结构及主要用于承担的荷载工况

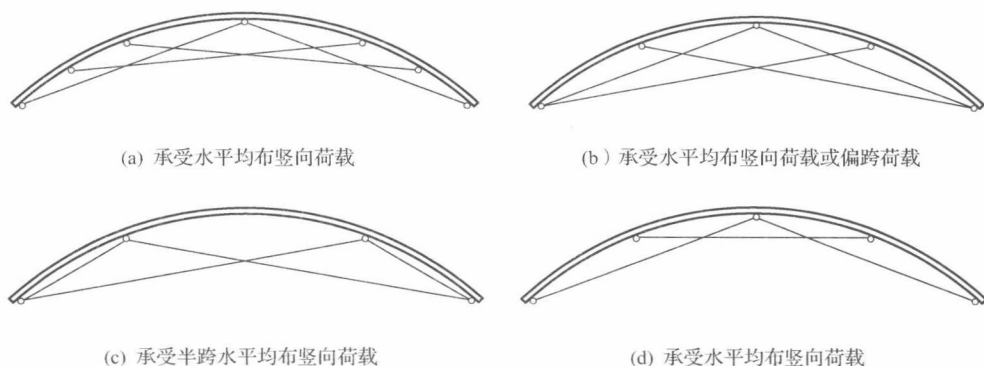


图 1.12 弦张式索拱结构及主要用于承担的荷载工况

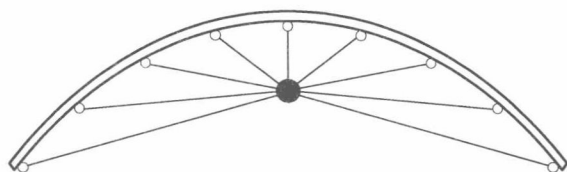
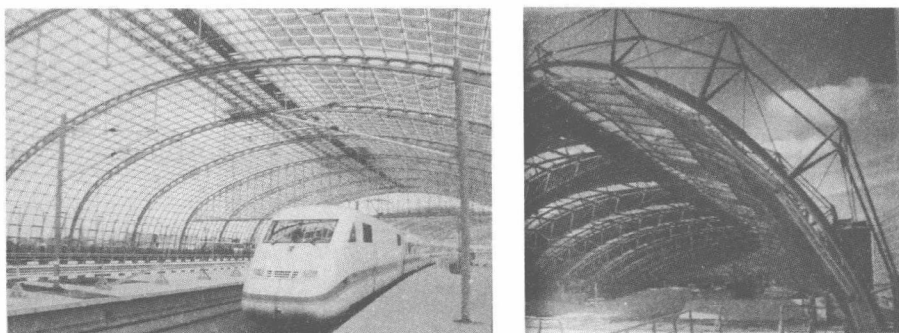


图 1.13 车辐式索拱结构



(a) 柏林新中央火车站

(b) 伦敦滑铁卢火车站

图 1.14 索拱结构

馆、北京朝阳体育馆、浙江黄龙体育场都采用了这种结构形式^[15~17]如图 1.15 所示。

还有很多其他的索结构类型,如自平衡预应力索桁架(图 1.16)、预应力撑杆柱(图 1.17)、预应力钢桁架结构(图 1.18)等。拉索作为现代钢结构中最为活跃的元素,在与传统的梁、柱、桁架、拱、网架、网壳结构杂交之后,充分发挥了各自的优点,产生了“1+1>2”的效果。

索作为一种轴心受拉构件,能够发挥材料高强度的特点,不存在受压构件的失稳问题,因而索结构的经济性较好。尤其是张拉整体屋盖结构,屋盖刚度除来源于拉索截面的贡献外,还源于索的张力作用。