



拉索预应力 网格结构的

分析理论、施工控制与优化设计

■ 周 臻 孟少平 吴 京 · 著

Analytical Theory, Construction Control
and Optimal Design of Prestressed
Reticulated Structures



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

江苏省高校优势学科建设工程项目资助(PAPD)

中央高校基本科研业务费专项资金资助(3205003203)

江苏省自然科学基金资助(BK2010428)

拉索预应力网格结构的 分析理论、施工控制与优化设计

周 臻 孟少平 吴 京 著

东南大学出版社

· 南京 ·

内 容 提 要

本书结合作者近年的研究成果与工程实践,针对拉索预应力网格结构(Prestressed Reticulated Structures, PRS)的分析理论、施工控制与优化设计进行了较详细的介绍与讨论,主要包括:基于初弯曲单元的有限元分析理论、典型 PRS 结构的非线性静力稳定分析、PRS 结构的非线性地震响应及其半自动控制、PRS 结构基于时域分析的风振响应及其风振系数、PRS 结构考虑施工误差的可靠性分析、PRS 结构基于索初始变形的张拉全过程分析、PRS 结构基于张拉递推系统和结构响应观测的预应力施工控制、PRS 结构的全过程优化设计理论及模糊优化与可靠性优化方法、基于多向误差可调节节点的 PRS 结构模型试验。

书中针对提出的方法给出了具体的分析(求解)过程和工程(数值)算例,可供教学、设计和科研工作者参考使用,也可作为高等院校本科高年级和研究生相关课程的辅助教材。

图书在版编目(CIP)数据

拉索预应力网格结构的分析理论、施工控制与优化设计/
周臻,孟少平,吴京著. —南京:东南大学出版社,2013. 12

ISBN 978 - 7 - 5641 - 4645 - 0

I. ①拉… II. ①周… ②孟… ③吴… III. ①建筑结
构—钢结构—预应力结构—研究 IV. ①TU359

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 275495 号

拉索预应力网格结构的分析理论、施工控制与优化设计

著 者 周 臻 孟少平 吴 京

责任编辑 丁 丁

编辑邮箱 d. d. 00@163. com

出版发行 东南大学出版社

出 版 人 江建中

社 址 南京市四牌楼 2 号(邮编:210096)

网 址 <http://www.seupress.com>

经 销 全国各地新华书店

发行热线 025—83790519 83791830

印 刷 南京玉河印刷厂

网 址 <http://www.seupress.com>

电子邮箱 press@seupress.com

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 15.5

字 数 380 千

版 次 2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5641 - 4645 - 0

定 价 58.00 元



前 言

拉索预应力网格结构(Prestressed Reticulated Structures, PRS)是将现代预应力技术应用到传统空间网格结构中形成的一类新型、杂交的大跨空间钢结构体系,包括预应力网架、弦支穹顶、拱支网壳等典型结构型式。这一类结构由于具有受力性能好、跨越能力强、空间形体多样、资源消耗少等优点,近二十年来在世界范围内得到迅速发展,目前已广泛应用于体育场馆、会展中心、机场车站等重要公共建筑和飞机库、工业厂房等重要工业建筑,成为 21 世纪土木工程领域最具活力与应用前景的绿色承重结构体系之一。

拉索预应力网格结构的快速发展吸引了国内众多高校和科研机构的浓厚兴趣,围绕其结构体系开发、设计分析、施工建造和模型试验等开展了广泛的研究,取得了丰硕的成果,成功促进了该新型结构体系在国内的迅速推广和技术革新。作者所在的研究团队自 2000 年以来,有幸参与了哈尔滨国际会展中心、郑州国际会展中心、武汉长江防洪模型试验大厅等一些典型工程的设计、分析、施工监控及结构检测等工作,并结合工程实践开展了一些研究课题。本书结合作者近年的研究成果与工程实践,针对 PRS 结构的分析理论、施工控制与优化设计进行较详细的介绍与讨论。

本书共分十章。第一章主要回顾了 PRS 结构的发展、分类和一些典型的工程实践;第二章推导了考虑杆件初始弯曲影响的非线性梁单元、杆单元和悬链线索单元的刚度矩阵;第三章针对张弦拱桁架和弦支穹顶工程算例进行了考虑杆件初弯曲影响的非线性稳定分析;第四章采用初弯曲单元研究了弦支穹顶结构的非线性地震响应,给出了张弦拱桁架基于 MR 阻尼器的半主动控制分析结果;第五章基于风荷载随机数值模拟和时域分析方法,研究了拉索预应力球面网壳和柱面网壳的风振响应及其整体风振系数;第六章在考虑节点位置安装偏差与索长误差等施工误差的基础上,针对弦支穹顶数值算例的可靠性进行了参数化分析;第七章基于索初始形变分析理论,给出了 PRS 结构预应力张拉全过程的模拟方法和形态分析方法;第八章针对随机施工误差对张拉过程的不利影响,分

别构建了基于张拉递推系统的预应力施工方案决策方法,以及基于概率有限元和逆向神经网络技术的张拉方案动态调整方法;第九章在考虑预应力实施过程的基础上,给出了PRS结构的全过程优化设计模型与三级优化方法,并初步介绍了PRS结构的模糊优化设计方法和可靠性优化设计方法;第十章给出了一种多向误差可调节节点的概念与设计方,并针对设计制作的误差可调弦支穹顶结构模型进行了张拉控制试验与结构性能试验。

本书的很多工程实践和研究工作得到了东南大学郭正兴教授、冯健教授、舒赣平教授、罗斌教授,中冶建研院结构分公司曾滨总经理以及河海大学曹平周教授、王永泉博士等的指导和建议;部分软件计算、数据处理和图表绘制工作由研究生李志敏、冯玉龙、周志高、赵泳等协助完成;出版过程中东南大学出版社的丁女士给予了很大的支持与帮助。作者在此表示衷心的感谢。

由于时间限制、涉及内容广泛、作者水平有限,书中难免存在缺点错误,敬请读者批评指正。

目 录

| | |
|------------------------------------|------|
| 第一章 概 述 | (1) |
| 1.1 拉索预应力网格结构的发展 | (1) |
| 1.2 拉索预应力网格结构的分类 | (2) |
| 1.3 拉索预应力网格结构的工程实践 | (3) |
| 1.4 本书的主要内容 | (8) |
| 第二章 拉索预应力网格结构的有限元分析理论 | (11) |
| 2.1 考虑杆件初始弯曲的非线性杆单元 | (11) |
| 2.1.1 轴力与轴向变形的关系 | (11) |
| 2.1.2 切线刚度矩阵的推导 | (13) |
| 2.2 考虑杆件初始弯曲的非线性梁单元 | (15) |
| 2.2.1 内力与变形的关系 | (15) |
| 2.2.2 刚度矩阵的推导 | (17) |
| 2.3 两节点小应变悬链线索单元 | (19) |
| 2.3.1 基本假定与位移模式 | (19) |
| 2.3.2 应变关系 | (20) |
| 2.3.3 虚功增量方程推导切线刚度矩阵 | (20) |
| 2.3.4 索端力的计算 | (22) |
| 2.4 非线性分析的求解方法 | (23) |
| 2.4.1 Newton-Raphson 荷载控制法 | (23) |
| 2.4.2 弧长控制法 | (24) |
| 2.5 算例分析 | (25) |
| 2.5.1 铰接六角星穹顶算例 | (26) |
| 2.5.2 刚接六角星穹顶算例 | (28) |
| 2.5.3 单索结构算例 | (29) |
| 第三章 拉索预应力网格结构的非线性稳定分析 | (32) |
| 3.1 张弦拱桁架结构的非线性稳定分析 | (32) |
| 3.1.1 拉索初始预应力为零 | (33) |
| 3.1.2 不同初始预应力取值下的比较 | (38) |
| 3.2 弦支穹顶结构的非线性稳定分析 | (40) |
| 3.2.1 设计预应力下的结构非线性稳定分析 | (40) |
| 3.2.2 不同初始预应力状态下的比较 | (44) |
| 第四章 拉索预应力网格结构的地震响应分析 | (46) |
| 4.1 弦支穹顶结构的非线性地震响应分析 | (46) |
| 4.1.1 自振特性分析 | (46) |

| | | |
|------------|----------------------------|--------------|
| 4.1.2 | 非线性时程分析 | (47) |
| 4.2 | 张弦拱桁架结构地震响应的半主动控制 | (51) |
| 4.2.1 | 基本方程的建立 | (51) |
| 4.2.2 | LQR 最优控制求解 | (52) |
| 4.2.3 | 限界 Hrovat 半主动控制算法 | (53) |
| 4.2.4 | MR 阻尼器的逆向神经网络模型 | (54) |
| 4.2.5 | 张弦拱桁架的半主动控制 | (55) |
| 第五章 | 拉索预应力网格结构的风振响应分析 | (60) |
| 5.1 | 风速时程模拟与谱分析 | (60) |
| 5.1.1 | 谐波叠加法 | (60) |
| 5.1.2 | AR 法 | (63) |
| 5.1.3 | ARMA 法 | (65) |
| 5.1.4 | 风速模拟结果的谱分析 | (65) |
| 5.1.5 | 算例分析 | (67) |
| 5.2 | 拉索预应力柱面网壳的风振响应 | (71) |
| 5.2.1 | 算例说明及参数分析方案 | (71) |
| 5.2.2 | 拉索预应力柱面网壳的自振特性分析 | (73) |
| 5.2.3 | 计算说明及时程分析方法讨论 | (75) |
| 5.2.4 | 预应力对结构风振响应的影响分析 | (77) |
| 5.2.5 | 几何参数对结构风振响应的影响分析 | (79) |
| 5.2.6 | 结构参数对结构风振响应的影响分析 | (85) |
| 5.2.7 | 风荷载参数对结构风振响应的影响分析 | (88) |
| 5.3 | 拉索预应力球面网壳的风振响应 | (93) |
| 5.3.1 | 算例说明及参数分析方案 | (93) |
| 5.3.2 | 拉索预应力双层球面网壳的自振特性分析 | (94) |
| 5.3.3 | 预应力对结构风振响应的影响分析 | (96) |
| 5.3.4 | 几何参数对结构风振响应的影响分析 | (98) |
| 5.3.5 | 结构参数对结构风振响应的影响分析 | (102) |
| 5.3.6 | 风荷载参数对结构风振响应的影响分析 | (106) |
| 5.4 | 拉索预应力网格结构的整体风振系数 | (111) |
| 5.4.1 | 拉索预应力网格结构整体风振系数的概念 | (111) |
| 5.4.2 | 各类参数变化对拉索预应力网格结构整体风振系数的影响 | (114) |
| 第六章 | 拉索预应力网格结构的施工误差可靠性分析 | (118) |
| 6.1 | 基于有限元的概率设计技术 | (118) |
| 6.1.1 | 基于有限元的概率设计(PDS)简介 | (118) |
| 6.1.2 | 概率设计方法——蒙特卡罗模拟技术 | (119) |
| 6.1.3 | 概率设计方法——响应面法 | (120) |
| 6.1.4 | 平面张弦梁结构可靠性分析实例 | (122) |
| 6.2 | 基本随机变量的参数统计 | (124) |
| 6.2.1 | 施工误差 | (124) |
| 6.2.2 | 荷载的统计特性 | (126) |

| | | |
|------------|--------------------------|--------------|
| 6.2.3 | 抗力的统计特性 | (129) |
| 6.3 | 结构失效模式的定义 | (129) |
| 6.4 | 弦支穹顶算例分析 | (130) |
| 6.4.1 | 算例 1 | (130) |
| 6.4.2 | 算例 2 | (137) |
| 6.5 | 节点位置偏差对结构可靠度的影响 | (142) |
| 6.5.1 | 位移失效模式 | (143) |
| 6.5.2 | 强度失效模式 | (144) |
| 6.5.3 | 稳定失效模式 | (144) |
| 6.6 | 不同矢跨比下的参数化分析 | (145) |
| 6.6.1 | 位移失效模式 | (146) |
| 6.6.2 | 强度失效模式 | (146) |
| 6.6.3 | 稳定失效模式 | (146) |
| 6.7 | 节点位置偏差模拟方法 | (147) |
| 第七章 | 拉索预应力网格结构的张拉全过程分析 | (152) |
| 7.1 | 预应力效应的模拟 | (152) |
| 7.2 | 拉索预应力网格结构的刚度法理论 | (153) |
| 7.2.1 | 混合影响矩阵法 | (153) |
| 7.2.2 | 循环迭代逼近法 | (155) |
| 7.2.3 | 两种方法的比较 | (156) |
| 7.3 | 预应力施工阶段的力学分析 | (156) |
| 7.3.1 | 索分批张拉的分析 | (156) |
| 7.3.2 | 索多次张拉的分析 | (157) |
| 7.4 | 考虑施工过程影响的形态分析 | (158) |
| 7.4.1 | 拉索预应力网格结构形态分析概念 | (158) |
| 7.4.2 | 形态分析迭代代法 | (158) |
| 7.4.3 | 基于生死单元的施工过程仿真 | (159) |
| 7.4.4 | 考虑施工过程影响的形态分析迭代代法 | (159) |
| 7.5 | 工程算例分析 | (162) |
| 7.5.1 | 长江防洪模型试验大厅——拱支预应力网壳结构 | (162) |
| 7.5.2 | 深圳市游泳跳水馆——斜拉网格结构 | (165) |
| 7.5.3 | 弦支穹顶算例 1 | (166) |
| 7.5.4 | 弦支穹顶算例 2——常州体育馆弦支穹顶 | (169) |
| 第八章 | 拉索预应力网格结构的预应力施工控制 | (172) |
| 8.1 | 基于预应力张拉递推系统的拉索索力控制 | (172) |
| 8.1.1 | 索力递推系统 | (172) |
| 8.1.2 | 基于索力观测值的预应力施工方案决策 | (176) |
| 8.2 | 基于预应力张拉递推系统的结构位移控制 | (177) |
| 8.2.1 | 位移递推系统 | (177) |
| 8.2.2 | 基于位移观测值的预应力施工方案决策 | (178) |
| 8.2.3 | 基于索力—位移观测值的预应力施工方案决策 | (179) |

| | | |
|---------------------------|--------------------------|-------|
| 8.3 | 基于结构响应观测值的动态反馈控制 | (180) |
| 8.3.1 | 动态反馈控制思想 | (180) |
| 8.3.2 | BP神经网络 | (181) |
| 8.3.3 | 预应力实施全过程反馈控制方法的步骤 | (183) |
| 8.4 | 工程算例分析 | (186) |
| 8.4.1 | 基于张拉递推系统的控制算例 | (186) |
| 8.4.2 | 基于结构响应观测值的反馈控制算例 | (189) |
| 第九章 拉索预应力网格结构的优化设计 | | (196) |
| 9.1 | 考虑预应力实施过程的全过程优化设计 | (196) |
| 9.1.1 | 全过程优化设计概念与模型 | (196) |
| 9.1.2 | 预应力结构实施过程预应力施加次数与施加方案的讨论 | (198) |
| 9.1.3 | 优化模型求解的三级优化思路 | (200) |
| 9.1.4 | 各级优化方法 | (203) |
| 9.1.5 | 数值算例 | (207) |
| 9.2 | 拉索预应力网格结构的模糊优化设计 | (212) |
| 9.2.1 | 模糊优化模型 | (212) |
| 9.2.2 | λ -水平截集法 | (212) |
| 9.2.3 | 两阶段优化设计方法 | (212) |
| 9.2.4 | 数值算例 | (214) |
| 9.3 | 拉索预应力网格结构的可靠性优化 | (215) |
| 9.3.1 | 基于可靠度的结构优化数学模型 | (216) |
| 9.3.2 | 基于可靠度的结构的优化设计方法 | (217) |
| 9.3.3 | 基于 APDL 的 ANSYS 有限元优化技术 | (218) |
| 9.3.4 | 优化算例 | (219) |
| 第十章 拉索预应力网格结构的模型试验 | | (223) |
| 10.1 | 多向误差可调节节点 | (223) |
| 10.1.1 | 可调节节点概念 | (223) |
| 10.1.2 | 多向误差可调节节点构造 | (224) |
| 10.1.3 | 多向误差可调节节点性能 | (227) |
| 10.2 | 弦支穹顶结构模型设计 | (229) |
| 10.2.1 | 模型设计 | (229) |
| 10.2.2 | 构件设计 | (230) |
| 10.2.3 | 荷载设计 | (232) |
| 10.2.4 | 实验仪器及观测方案 | (232) |
| 10.3 | 弦支穹顶结构预应力实施过程控制试验研究 | (234) |
| 10.3.1 | 弦支穹顶结构预应力实施过程位移控制试验研究 | (234) |
| 10.3.2 | 弦支穹顶结构预应力实施过程索力控制试验研究 | (237) |
| 10.4 | 静力试验结果 | (238) |

第一章 概 述

近几十年来,作为大跨度、大空间结构形式设计的空间网格结构以其新颖的结构形式、优雅的结构造型和强大的跨越能力,在世界范围内被广泛地运用,并得到了迅猛的发展^{[1.1][1.2]}。这种结构形式为建筑结构跨越能力的提高和空间形体的多样性提供了充分的空间,目前被广泛地应用于体育馆、展览馆、影剧院、会堂、候车厅等公共建筑和飞机库、仓库、工业厂房等工业建筑。但是,随着人类物质文明和精神文明的不断进步,人们对空间结构自身的跨越能力及空间造型提出更多、更高的要求,而传统的较为单一的结构形式越来越难以满足需要。设计者们开始将几种不同的结构形式进行组合,这样衍生出的新型结构形式能够以一类基本结构的优点来弥补另一类基本结构的弱点。将空间网格结构与现代预应力技术相结合的一种新结构形式——拉索预应力网格结构,就是这样一种典型的结构形式^[1.3~1.10]。在空间网格结构中通过拉索引入预应力,可以多次利用材料的强度幅值,同时通过内力重分布,改善结构的受力状态,使结构产生反向变形,降低结构在使用荷载作用下的最大挠度,提高结构的刚度,从而带来显著的经济效益^[1.11~1.13]。

1.1 拉索预应力网格结构的发展

预应力技术是一项古老的工艺,很多世纪以前,就在工程、工具和人们的生活中得到应用,如撑伞及锚锭帐篷时“绷紧”要求的张拉,木桶、木盆制造过程中“套箍”工序的预加压等都是人们对预应力技术的应用^[1.14]。

预应力技术最早在钢筋混凝土结构中得到了广泛的应用,其基本原理是在结构中引入初始应力,扩大构件的弹性工作范围,借此来提高结构的抗裂能力和刚度,从而改善结构的受力性能。由于预应力技术可以降低结构的内力峰值,调整内力性质,重复利用钢材的强度幅值,并可以高强钢材取代部分碳素钢材,因此在预应力钢结构发展的初期以平面体系为主的结构中,取得了省钢率 10%~20% 的经济效益,这为创建预应力钢结构学科和推动学科的深入与普及起到了奠基与先锋作用。现代预应力钢结构中利用预应力并发展成为一门工程学科,是在 20 世纪 50 年代前后的事情。1948 年前苏联的 M. Baxypknh 等工程师就建成一座预应力跨路钢桥,用桥面自重荷载就位的先后顺序在结构中引入预应力;1953 年比利时的 G. Magnel 教授在研究和试验的基础上,建造成布鲁塞尔飞机库大门的预应力双跨连续钢桥架;1953 年美国的威斯基建筑师设计并建造了著名的雷里竞技场(Releign Arena),它的双曲抛物面屋盖及流畅的建筑造型一时风靡国际^[1.15]。自此开始,预应力技术在钢结构中的应用便逐渐展开,经历了初创期、发展期和繁荣期三个阶段^{[1.16][1.17]}。

在预应力钢结构的初创期(二战后~1960 年前后),国际上兴建了一批预应力钢结构工

程,完成了一批预应力钢杆件和桁架的模型试验,但是绝大多数试验及工程都是在平面钢结构的体系中引入预应力进行的,如1953年,比利时马涅理教授(G. Magne)首次成功地设计并建造了布鲁塞尔机场飞机库双跨预应力连续钢桁架门梁结构(76.5 m+76.5 m),省钢率12%,降低造价6%。

直到预应力钢结构进入到发展期(20世纪60年代前后至80年代中期),电子计算机技术进入计算、设计(CAD)与制造(CAM)领域,解决了高难度计算与高精度加工问题,与此同时,网架与网壳新型空间钢结构体系不断涌现,这为预应力在空间钢结构中的应用奠定了基础,拉索预应力网格结构也在此期间得以迅速发展。例如,20世纪70年代,前苏联就建造过以支座位移法及拉索法引入预应力的平板网架。我国在80年代前后也研究和建造过一批预应力平板网架(网壳)结构,如80年代研造、延至90年代初兴建成功的四川攀枝花体育馆采用多次预应力圆形钢网壳屋盖,是国内外首次应用的多次预应力空间钢结构,省钢率达38%,为拉索预应力网格结构的深入发展做出了贡献。其后又兴建了西昌铁路体育中心多次预应力钢筒壳屋盖,省钢率28%,两者都是空间网格结构与拉索预应力技术相结合的成功典范。

从20世纪80年代末期开始,预应力钢结构的发展进入到繁荣期(80年代末期~21世纪),在此时期,拉索预应力网格结构也出现了多种新颖的结构形式。例如,将斜拉桥技术引入到预应力网格结构,形成了斜拉网格结构;从悬索体系延伸出来的吊索体系与空间网格结构的结合,又衍生出多种悬挂空间网格结构;由张拉整体结构概念与刚性空间网格结构结合,衍生出了大跨度张弦梁和弦支穹顶结构体系。这些新颖的拉索预应力网格结构体系具有优秀的静动力特性和良好的技术经济指标,且其造型具有丰富的时代气息,可以称得上是当代建筑结构学科中的最新成就。随着新材料(纤维拉索、纤维加强膜、特种玻璃、耐候钢材及压型钢板等)的大量涌现与新技术(计算机技术在设计、制造、施工中的应用以及锚固技术和张拉技术的创新发展等)的不断完善提高,可以预见,拉索预应力网格结构的发展前景将更为广阔。

1.2 拉索预应力网格结构的分类

传统的拉索预应力网格结构一般指现代拉索预应力技术与空间网格结构(主要为网架与网壳)相结合构成的预应力网格结构,通常按以下方法分类:

- (1) 按结构形式可分为拉索预应力平板网架结构和拉索预应力网壳结构。
- (2) 按预应力拉索布置形式可分为结构体内布索预应力空间网格结构和结构体外布索预应力网格结构。
- (3) 按预应力索的类型可分为直线布索预应力网格结构和折线布索预应力网格结构。
- (4) 按施工过程中预应力索施加预应力的次数可分为单次预应力网格结构和多次预应力网格结构。

随着拉索预应力技术在大跨度空间结构中实践应用的不断发展,拉索预应力网格结构的形式也不再仅仅局限于拉索预应力网架或拉索预应力网壳结构,而出现了越来越多的由不同类型的单一结构形式组合而成的杂交空间结构体系。组成杂交空间结构体系的各基本结构形式间通过拉索、吊索或撑杆等连接形成整体,从而大幅扩展了拉索预应力网格结构的

应用范围。近年来涌现出的几种典型结构体系包括:

(1) 斜拉网格结构:将斜拉桥技术及拉索预应力技术综合应用到网格结构而形成的一种形式新颖、协同工作的杂交空间结构体系。

(2) 张弦梁结构:将柔性索与刚性梁通过撑杆结合在一起,形成一种新颖的张弦结构,可称为张弦梁结构;如刚性梁为拱桁架梁,则可称为张弦拱桁架。

(3) 弦支穹顶结构:将单层网壳与高弧索通过竖向连接构件(撑杆)连接而成的一种极富创新性的杂交结构。

(4) 拱支预应力网格结构:拱结构通过预应力竖向吊杆悬挂空间网格结构,为空间网格结构提供弹性支座;在网格结构中还可设置预应力拉索,进一步改善网格结构性能。

1.3 拉索预应力网格结构的工程实践

目前在国内外已建成了多座拉索预应力网格结构实际工程,表 1.1~表 1.3 列出了近年来比较有代表性的一些拉索预应力网格结构工程。以下简要介绍几个比较典型的工程实例。

表 1.1 拉索预应力网架/网壳结构的工程应用^[1, 18]

| 工程名称 | 网格结构形式 | 平面尺寸(m)×厚度(m) | 预应力技术特征 | 用钢指标或省钢率 | 建成年份 | 设计单位 |
|--------------|-----------------------|-------------------------------|---|-----------------------------------|------|----------------|
| 上海国际购物中心楼层 | 正放四角锥组合网架 | 27×27 正方形截腰边一角,高 2 | 下弦平面下 20 cm 处增设四束高强度钢丝铸锚束 | 48 kg/m ² 32% | 1993 | 上海建筑设计研究院 |
| 攀枝花市体育馆 | 三向短程线型双层球面网壳 | 74.8×74.8 缺角八边形,矢高 8.89 | 八点支承,对角柱跨度 64.9 m,周边设八道预应力索,分两次建预应力值 700 kN | 49 kg/m ² | 1994 | 攀枝花建筑勘察设计院 |
| 广东清远市体育馆 | 六块组合型三向双层扭网壳 | 边长 46.82 正六边形,矢高 8.0 | 六点支承,对角柱跨度 89 m,周边设六道预应力索,每索建预应力值 1 600 kN | 44.3 kg/m ² | 1995 | 贵州工大设计院、清远市设计院 |
| 广东高要市体育馆 | 四块组合型三向双层扭网壳 | 54.9×69.3 | 四点(每边中点)支承,支承间共设四道预应力索,每索建预应力值 1 400 kN | 38.5 kg/m ² | 1995 | 贵州工大设计院 |
| 广东阳山市体育馆 | 双曲双层扁网壳 | 44×56 | 四角支承,周边共设置四道预应力索 | 43% | 1996 | 贵州工大设计院 |
| 郑州碧波园 | 对角线局部三层(变高度)八面锥网壳 | 80×80 (2.8~7.8)间等边八边形,矢高 18.5 | 四对边端支座间沿边界共设四道预应力索,每索建预应力值 700 kN | 43.5 kg/m ² 15%~20% | 1996 | 云光建筑设计咨询开发中心 |
| 广东新兴县体育馆 | 四块组合型三向单双层混合扭网壳 | 54×76.06 | 四点(每边中点)支承,支承间共设四道预应力索 | 28.2 kg/m ² 43% | 1997 | 贵州工大设计院 |
| 西昌铁路分局体育活动中心 | 矩形底球面网壳与外挑 1~6 m 柱面网壳 | 59.7×42.7×1.25 矢高 6.15 | 沿纵边七点支承,沿横向设置四道预应力索,分三次施加预应力 | 28.5 kg/m ² 28% | 1997 | 攀枝花建筑勘察设计院 |
| 江苏宿迁市文体馆 | 正放四角锥双层鞍形网壳 | 80×62.5×3 椭圆平面 | 周边独立柱支承,在拱向沿下弦设十一道预应力索 | | 1999 | 江苏省建筑设计研究院 |

表 1.2 拉索斜拉网架/网壳结构的工程应用^{[1.18][1.19]}

| 工程名称 | 网格结构形式 | 平面尺寸(m)×厚度(m) | 预应力技术特征 | 用钢指标或省钢率 | 建成年份 | 设计单位 |
|-------------------|--------------------|--------------------|--|-----------------------------------|------|---------------------|
| 北京亚运会综合体育馆 | 两块组合型人字剖面斜放四角锥柱面网壳 | 70×83.2 | 双塔柱,各柱向内至屋脊处设 8 根双索面单向拉索 | — | 1990 | 北京市建筑设计院 |
| 浙江大学体育场司令台 | 正放四角锥网架 | 24×40×1.2 | 四塔柱,每柱二根斜拉索及一根横向的水平索共 14 根拉索 | — | 1993 | 浙大空间结构研究中心 |
| 新加坡港务局(PSA)仓库 A 型 | 正放四角锥网架 | 4 幢 120×96 | 六塔柱,第柱四根斜拉索,每索由 4Φ48 不锈钢棒组成 | 35.2 kg/m ² 20%~30% | 1993 | 中国冶建研究总局 |
| 新加坡港务局(PSA)仓库 B 型 | 正放四角锥网架 | 2 幢 96×70 | 四塔柱,每柱四根斜拉索,每索由 4Φ48 不锈钢棒组成 | 20%~30% | 1993 | 中国冶建研究总局 |
| 太旧高速路旧关收费站 | 两块正放四角锥圆柱面网壳 | 14×64.718×1.5 | 独塔柱,共设有全方位布置斜拉索 28 根 | — | 1995 | 山西设计院 浙大空间结构研究中心 |
| 浙江黄龙体育中心体育场 | 两块正放四角锥圆柱面网壳 | 2 块 244×50×3 月牙形平面 | 两塔柱共四肢,各肢至内环设 9 根斜拉索,在网壳上弦靠内环梁设置 9 根稳定索,锚固在外环梁 | 80 kg/m ² (不含环梁) | 2000 | 浙江省设计院与中国建研院结构所 |
| 深圳游泳跳水馆 | 棱形主桁架,两侧各四道次桁架 | 120×80 | 沿主桁架对称布置 4 根桅杆,每根桅杆设置 4 根钢棒拉索 | 70 kg/m ² | 2001 | 澳 cox 公司与深圳华森公司 |
| 郑州国际会议中心 | 24 榀折叠桁架 | 直径 179 | 单根 110 m 高钢桅杆,设置 9 根斜拉索 | — | 2004 | 黑川纪章事务所与机械部第六设计院 |
| 广州大学城中心体育场 | H 型钢组成月牙形圆锥面网壳 | 悬挑 36 | 设置 8 根桅杆,每根桅杆设 10 根斜拉索 | 70 kg/m ² | 2006 | 广东省建筑设计研究院 |
| 天津泰达会展中心二期 | 立体钢管桁架 | 156×108 | 6 根格构式塔柱,每根塔柱设 6 根斜拉索 | 60 kg/m ² | 2007 | 天津市建筑设计研究院 |

表 1.3 弦支穹顶结构的工程应用^{[1.20][1.21]}

| 工程名称 | 跨度(m) | 矢高(m) | 上部网壳结构形式 | 下部索杆结构形式 | 建成时间 |
|--------------|------------------|-------|-------------|------------------|------|
| 日本光球穹顶 | 35 | 14 | 球形单层网壳 | 仅外层布置 1 环 Levy 型 | 1994 |
| 日本聚会穹顶 | 46 | 16 | 球形单层网壳 | 仅外层布置 1 环 Levy 型 | 1997 |
| 天津市保税区商务中心大堂 | 35.4 | 4.6 | 球形单层网壳 | 6 环 Levy 型 | 2001 |
| 北京工业大学体育馆 | 93 | 9.3 | 球形单层网壳 | 6 环 Levy 型 | 2006 |
| 安徽大学体育馆 | 87.76 | 10.77 | 正六边形肋环型网壳 | 5 环 Gieger 型 | 2006 |
| 武汉市体育中心体育馆 | 长轴 135 短轴 115 | 9 | 椭圆抛物面双层网壳 | 3 环 Levy 型 | 2006 |
| 常州市体育会展中心体育馆 | 长轴 120 短轴 80 | 21.45 | 椭球形单层网壳 | 6 环 Levy 型 | 2007 |
| 济南奥体中心体育馆 | 122 | 12.2 | 球形单层网壳 | 3 环 Gieger 型 | 2008 |
| 连云港体育中心体育馆 | 78 | 7.8 | 倾斜球面(非对称结构) | 6 环索系双撑杆、双斜索 | 2009 |
| 辽宁营口体育中心体育馆 | 长轴 121 短轴 70 | 18 | 不规则半球球形双层网壳 | 2 环 Levy 型 | 2009 |
| 海南三亚市体育中心体育馆 | 76 | 7.6 | 球形单层网壳 | 3 环 Levy 型 | 2009 |

1) 攀枝花市体育馆^[1.22]

攀枝花体育馆平面呈八角花瓣形(图 1.1),周围用 8 个柱面相连,跨度近 65 m,曲边八边形外尚有 1.94~4.16 m 不等的悬挑。屋盖支承于标高 16.6 m 的 8 个混凝土圆柱顶上,相邻柱距 24.85 m,壳中心标高(节点球心)27.90 m。最大平面覆盖尺寸 74.8 m×74.8 m。网壳杆件用 16Mn 钢管,共计 4 633 根,另设 8 束钢绞线预应力高强拉索。节点球 986 个,其中大部分节点为鼓形螺栓球,少量(约 15%)为焊接空心球。8 个支座采用橡胶垫板减振并消除温度应力。16Mn 钢网壳设计用钢量为 35.00 kg/m²。后因 16Mn 钢管现货匹配不齐,改用以大代小的 A3 钢管,屋面荷载变为 4.25 kN/m²,实际工程用量增至 49.00 kg/m²。在结构选型时,进行了曲面平板网架、预应力混凝土边构支承的钢网壳、非预应力钢网壳、预应力钢网壳等多方案比较。分析表明,多次预应力钢网壳比非预应力钢网壳节约钢材 36.61%,比平板网架省钢 54.88%。最后决定采用按多次预应力组合式短程线型钢网壳方案。

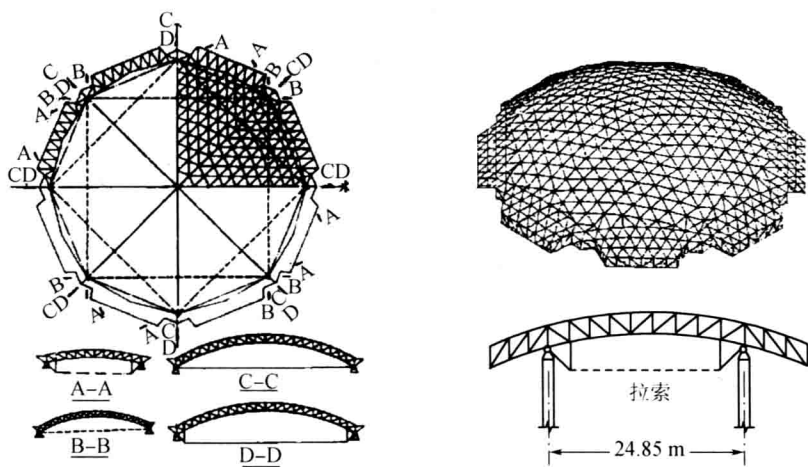


图 1.1 攀枝花体育馆拉索预应力网壳结构示意图^[1.22]

2) 广东省清远市体育馆^[1.23]

广东省清远市体育馆为正六边形平面,由六块单轴(径向轴)对称的双层扭网壳组合而成。如图 1.2 所示。它由通过中央三向网架及六条采光带连接形成整体。网壳高 2.8 m,系由 x_1 、 x_3 向直线桁架与 x_2 向曲线桁架交汇组成三角形网格,最大对角线长度为 93.6 m,组合扭网壳的双曲形式可由图中看出。为了降低结构的竖向挠度和内力,降低耗钢量,在支座处设置 6 道预应力拉索,拉索选用 4 根 $7 \times 7\Phi 5$ 的预应力钢绞线,建立预应力值 1 600 kN。通过计算和 1/10 模型试验分析,采用异钢种预应力方法,结构用钢量由 68.9 kg/m² 下降到 44.3 kg/m²,比原设计减少 35%,相对挠度为 1/450,取得了显著的经济效益。

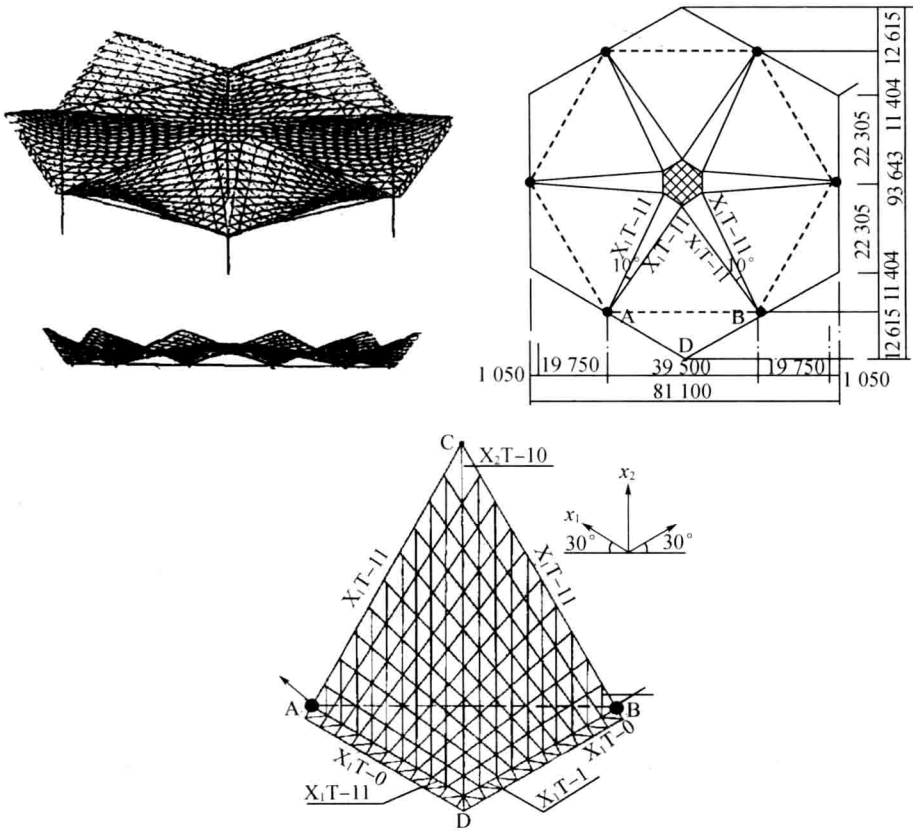


图 1.2 广东省清远市体育馆拉索预应力扭网壳结构示意图^[1.23]

3) 深圳市游泳跳水馆^[1.24]

深圳游泳跳水馆南北两端的辅馆和中部的馆共三个功能区块构成。从结构的角度来看,南北辅馆采用排架结构,跨度不大,结构分析较为简单。中部主馆区南北纵向平面尺寸为 117.6 m,东西向平面尺寸为 88.2 m,其根据功能划分为北端的跳水区和南端的游泳区。在主馆屋盖上端引入了四组斜拉桅杆系统,给建筑整体形态赋予时代气息(图 1.3)。主馆上部结构除看台采用钢筋混凝土结构外,支承柱和主馆屋盖均采用主次正交立体桁架的结构形式。结构布置时,在跳水区和游泳区分界区上方设置一鱼脊状梯形断面立体桁架(主桁架),主桁架分别由两端看台上的斜柱和中部四根斜柱支承。在主桁架两侧的跳水区和游泳

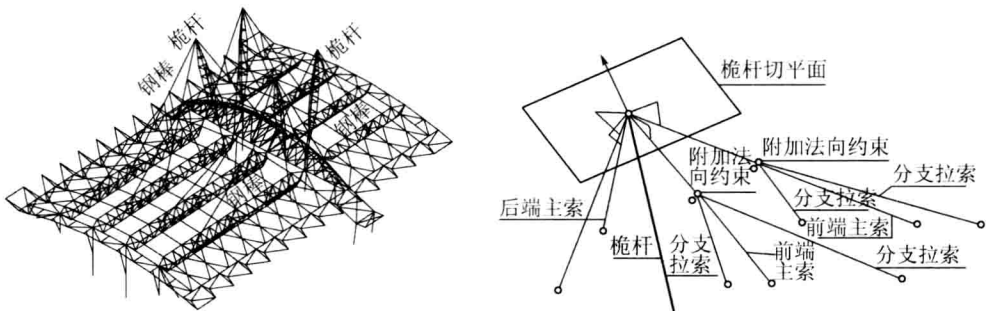


图 1.3 深圳市游泳跳水馆拉索斜拉网格结构示意图^[1.24]

区上方分别设置四道倒三角形断面立体桁架(次桁架),次桁架一端支承在主桁架下弦,另一端通过钢柱支承在辅馆的排架柱上。另外,在主桁架中部四根支承柱上方,设置四根桅杆,每根桅杆顶部设置两组斜拉索。每组拉索中一根(前端主索)连接在次桁架上,另一根(后端主索)与主桁架相连。前端主索与游泳区次桁架相连的桅杆拉索系统,设有分支拉索;前端主索与跳水区次桁架相连不设分支拉索。

4) 广州国际会议展览中心^[1.25]

广州国际会议展览中心主展览厅共 5 个单元,每个单元由 6 榀一端为固定铰支座、另一端为水平滑动支座的张弦桁架结构组成,如图 1.4 所示。每榀张弦桁架的中心间距为 15 m,跨度为 126.6 m。主檩条为 H500×200×10×16,檩距为 5 m。屋面支撑为 $\Phi 219 \times 6.5$,满堂布置。桁架截面为三角形,宽度为 3 m,高度为 2~3 m,桁架上弦为 $2\Phi 457 \times 14$ mm 的钢管,桁架下弦为 $\Phi 480 \times (19 \sim 25)$ mm 的钢管,桁架腹杆为 $\Phi 168 \times 6$ mm 和 $\Phi 273 \times 9$ mm 的钢管,撑杆为 $\Phi 325 \times 7.5$ mm 的圆钢管,撑杆高度为 3.537~10 m,拉索为 337 $\Phi 7$ 的挤包护层扭绞型拉索,拉索两端为冷铸锚。

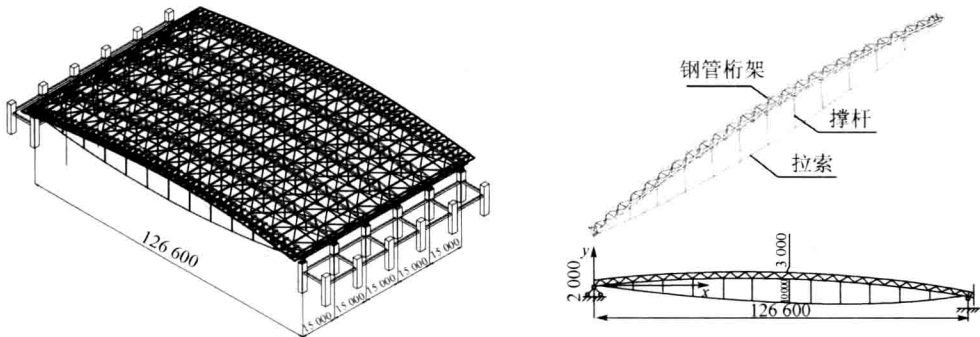


图 1.4 广州国际会议展览中心张弦梁结构示意图^[1.25]

5) 长江防洪模型试验大厅^[1.26]

长江防洪模型试验大厅采用拱支预应力网壳结构体系,该结构示意图如图 1.5 所示。结构体系由双层圆柱面网壳部分和提篮拱部分构成。网壳部分分为 $A_1 \sim A_5$ 五个区,提篮拱部分分为 $G_1 \sim G_4$ 四个区。各区网壳在结构上相互脱开,网壳在结构整体四周通过滑动支座支撑于柱上。提篮拱布置在网壳相交处,通过竖向吊杆悬挂网壳,并对吊杆进行预张拉使其具有足够刚度,为网壳提供有效的竖向支撑。为减小网壳在荷载作用下的挠度,在网壳下弦南北向布置水平预应力拉索;在提篮拱下弦(南北向和东西向)布置水平预应力混凝土拉杆,以减小拱脚处的水平推力。各区网壳均为 $90 \text{ m} \times 99 \text{ m}$ 跨,99 m 跨方向为一圆弧曲线,矢高 1.6 m,网格形式为正放四角锥。网壳沿南北向跨中厚度为 5 m,边缘厚度约 2.24 m。网壳节点为焊接空心球与螺栓球混用。滑动支座采用盆式橡胶支座。提篮拱跨度 120 m,矢高 45.5 m,拱桁架厚度为 3.5 m。提篮拱的两个分支拱均为采用相贯焊节点的格构式桁拱,每个桁拱横截面都为由 4 个钢管(弦杆)构成的梯形。拱脚弦杆最下部 2 个节间内灌 C40 混凝土。结构共采用 38 根水平拉索和 104 根竖向吊杆,拉索和吊杆均采用 55 束 1 670 MPa 低松弛 5.3 mm 钢丝组成的半平行高强钢丝束。南北向预应力混凝土拉杆截面为 $0.8 \text{ m} \times$

0.8 m,采用4束7根1 860 MPa低松弛15.2 mm无黏接钢绞线;东西向拉杆截面为0.5 m×0.5 m,采用1束7根无黏接预应力钢绞线,张拉控制应力均为 $0.5f_{ptk}$,即930 MPa。混凝土均为C40。拉索和吊杆锚具采用冷铸镦头锚。

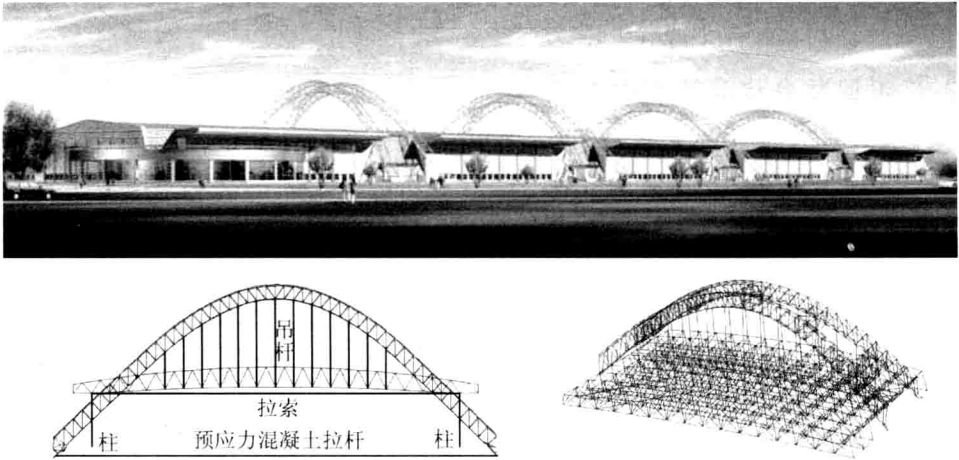


图 1.5 长江防洪模型试验大厅拱支预应力网壳结构示意图^[1.26]

6) 常州体育馆弦支穹顶^[1.20]

常州市体育会展中心体育馆作为2010年第十七届江苏省运动会的主要场馆之一(图1.6)。整个屋盖形状为椭球形,平面投影的椭圆长轴为120 m,短轴80 m。椭球形屋盖的矢高21.45 m。整个屋盖曲面面积为9 360 m²,覆盖面积为7 502 m²。屋盖采用弦支穹顶结构,由上部的椭球形单层网壳和下部索杆体系构成。该弦支穹顶上部单层网壳中心部位的网格形式为Kiewitt型(K8)、外围部位的网格形式为Levy型。网壳杆件采用圆钢管,除支座节点外,所有节点均采用铸钢节点。该结构下部索杆体系为Levy型,共设6环,其中环索和径向索均采用成品钢丝束索;撑杆采用圆钢管,上端与网壳节点铰接,下端与环索索夹固接。

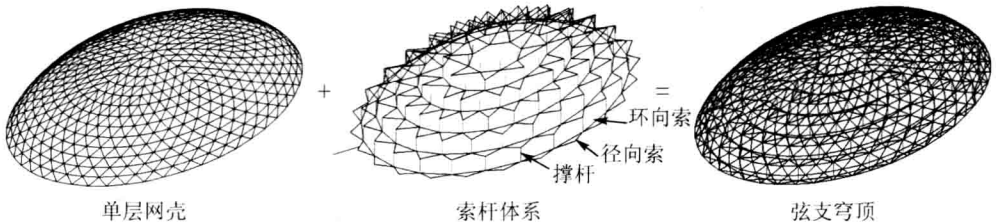


图 1.6 常州体育馆弦支穹顶结构示意图^[1.20]

1.4 本书的主要内容

本书结合作者近年的研究成果和参与的工程实践,针对拉索预应力网格结构的分析理论、施工控制与优化设计进行较详细的介绍与讨论,主要包括九个方面: