

空间结构系列图书

索穹顶结构

陈志华 刘红波 闫翔宇 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

索穹顶结构/陈志华, 刘红波, 闫翔宇著. —北京:
中国建筑工业出版社, 2022.9
(空间结构系列图书)
ISBN 978-7-112-27658-5

I. ①索… II. ①陈…②刘…③闫… III. ①拱-工
程结构 IV. ①TU34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 130408 号

索穹顶结构是基于“张拉整体”概念提出的, 通常由内部的张拉整体索杆体系和周圈的刚性边界构成, 是目前结构效率最高也是技术最先进的大跨度空间结构体系之一。索穹顶结构具有自重轻、跨越能力大、构造简单、传力明确的优点, 越来越多地被用于大跨度公共建筑中。本书从索穹顶结构的关键构件和节点、结构的选型方法、分析与设计方法、力学性能、施工及监测方法、相关的试验研究成果以及在实际工程中的应用等方面进行了论述。本书的主要特点是: 结合天津理工大学体育馆椭圆形复合式索穹顶屋盖设计和施工过程, 以及以往研究中存在的问题, 对索穹顶结构进行了从构件、节点到整体结构的一系列理论推导、数值分析和试验研究, 得到了一些具有理论意义和工程价值的研究成果。

本书可供土木工程相关领域的设计和研究人员, 以及高等院校的教师、研究生、高年级本科生参考使用。

责任编辑: 刘瑞霞 辛海丽

责任校对: 张 颖

空间结构系列图书

索穹顶结构

陈志华 刘红波 闫翔宇 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

印刷

*

开本: 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张: 27 $\frac{1}{4}$ 字数: 677 千字

2022 年 9 月第一版 2022 年 9 月第一次印刷

定价: 98.00 元

ISBN 978-7-112-27658-5

(39859)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社图书出版中心退换

(邮政编码 100037)

编审委员会

顾问：蓝天 董石麟 沈世钊 马克俭 刘锡良 严慧 曹资
姚念亮 张毅刚 许立准

主任：薛素铎

副主任：（按姓氏拼音排序）

陈志华 高继领 韩庆华 胡鸿志 黄达达 李亚明 李中立
刘中华 罗尧治 吴金志 张其林 周观根 朱忠义

委员：（按姓氏拼音排序）

白宝萍 北村猛 蔡小平 崔家春 陈务军 高博青 耿笑冰
胡洁 韩更赞 郝成新 贺孝宇 雷宏刚 李凯 李明荣
李雄彦 刘枫 刘小光 刘宜丰 罗斌 罗兴隆 宁艳池
欧阳元文 瞿鑫 任俊超 孙国军 谭宁 王丰 王浩
王平 王雄 王秀丽 王元清 王泽强 王喆 吴一红
武岳 向阳 徐隼 薛海滨 杨建 叶峰灵 张秀华
赵伯友 赵忠秋 支旭东 钟宪华 朱勇军

序 言

中国钢结构协会空间结构分会自 1993 年成立至今已有二十多年，发展规模不断壮大，从最初成立时的 33 家会员单位，发展到遍布全国各个省市的 500 余家会员单位。不仅拥有从事空间网格结构、索结构、膜结构和幕墙的大中型制作与安装企业，而且拥有与空间结构配套的板材、膜材、索具、配件和支座等相关生产企业，同时还拥有从事空间结构设计与研究的设计院、科研单位和高等院校等，集聚了众多空间结构领域的专家、学者以及企业高级管理人员和技术人员，使分会成为本行业的权威性社会团体，是国内外具有重要影响力的空间结构行业组织。

多年来，空间结构分会本着积极引领行业发展、推动空间结构技术进步和努力服务会员单位的宗旨，卓有成效地开展了多项工作，主要有：（1）通过每年开展的技术交流会、专题研讨会、工程现场观摩交流会等，对空间结构的分析理论、设计方法、制作与施工建造技术等进行研讨，分享新成果，推广新技术，加强安全生产，提高工程质量，推动技术进步。（2）通过标准、指南的编制，形成指导性文件，保障行业健康发展。结合我国膜结构行业发展状况，组织编制的《膜结构技术规程》为推动我国膜结构行业的发展发挥了重要作用。在此基础上，分会陆续开展了《膜结构工程施工质量验收规程》《建筑索结构节点设计技术指南》《充气膜结构设计及施工技术指南》《充气膜结构技术规程》等的编制工作。（3）通过专题技术培训，提升空间结构行业管理人员和技术人员的整体技术水平。相继开展了膜结构项目经理培训、膜结构工程管理高级研修班等活动。（4）搭建产学研合作平台，开展空间结构新产品、新技术的开发、研究、推广和应用工作，积极开展技术咨询，为会员单位提供服务并帮助解决实际问题。（5）发挥分会平台作用，加强会员单位的组织管理和规范化建设。通过会员等级评审、资质评定等工作，加强行业管理。（6）通过举办或组织参与各类国际空间结构学术交流，助力会员单位“走出去”，扩大空间结构分会的国际影响。

空间结构体系多样、形式复杂、技术创新性高，设计、制作与施工等技术难度大。近年来，随着我国经济的快速发展以及奥运会、世博会、大运会、全运会等各类大型活动的举办，对体育场馆、交通枢纽、会展中心、文化场所的建设需求极大地推动了我国空间结构的研究与工程实践，并取得了丰硕的成果。鉴于此，中国钢结构协会空间结构分会常务理事会研究决定出版“空间结构系列图书”，展现我国在空间结构领域的研究、设计、制

作与施工建造等方面的最新成果。本系列图书拟包括空间结构相关的专著、技术指南、技术手册、规程解读、优秀工程设计与施工实例以及软件应用等方面的成果。希望通过该系列图书的出版，为从事空间结构行业的人员提供借鉴和参考，并为推广空间结构技术、推动空间结构行业发展做出贡献。

中国钢结构协会空间结构分会 理事长
空间结构系列图书编审委员会 主任
薛素铎

2018年12月30日

前言

随着经济和社会的发展,人类对具有大跨度空间的建筑尤其是大跨度体育场馆的需求不断增长。基于“张拉整体”概念的索穹顶结构是目前结构效率最高也是技术最先进的大跨度空间结构体系之一,具有自重轻、跨越能力大、构造简单、传力明确等优点,越来越多地被用于大跨度公共建筑中,目前已经建成了十余座大型索穹顶结构工程,也有众多的中小型索穹顶在公共建筑的中庭等工程中得到了应用。

根据目前可查数据,全世界最大索穹顶结构跨度已突破 200m,而国内最大的索穹顶跨度刚刚突破 100m,为突破索穹顶结构在跨度上的技术瓶颈,得到跨度更大、性能更好的索穹顶结构形式,需要对索穹顶结构的受力机理进行深入的研究。本书结合天津理工大学体育馆索穹顶屋盖设计和施工过程,以及以往研究中存在的问题,对索穹顶结构进行了从构件、节点到整体结构的一系列理论推导、数值分析和试验研究,得到了一些具有理论意义和工程价值的研究成果。

本书共分为 12 章。第 1 章对索穹顶结构的起源、分类和工程应用进行了简要介绍,帮助读者了解索穹顶结构的基本原理及目前的应用情况;第 2 章主要基于试验研究方法,对索穹顶结构的核心构件——拉索的弯曲性能、松弛性能、腐蚀性能等时变性能进行研究,并提出了两种索力识别方法;第 3 章主要介绍了拉索力学性能的数值模拟方法,对拉索的轴向拉伸性能、弯曲性能、松弛性能及断丝效应进行了详细的阐述;第 4 章详细阐述了索穹顶结构找形过程的基本原理并提出了适用不规则索穹顶结构的找形找力方法,通过算例验证了找形方法的可靠性;第 5 章介绍了索穹顶结构的有限元分析方法,并对连续折线索单元的基本原理进行了详细推导和论述;第 6 章主要描述了索穹顶结构的静力性能,对比分析了不同的索穹顶结构布置形式、边界条件、屋面做法对其静力性能的影响;第 7 章则针对索穹顶结构在地震、风等作用下的动力响应进行了研究;第 8 章介绍了索穹顶结构的节点类型及选型、节点适用材料和节点设计原则;第 9 章针对天津理工大学体育馆索穹顶屋盖的施工方法进行了模拟分析,阐述了不同来源的施工误差对索穹顶结构构件内力的影响;第 10 章论述了索穹顶结构施工监测和后续健康监测的监测方法及结果,并对监测结果进行了分析;第 11 章汇总了天津理工大学体育馆索穹顶屋盖模型试验的相关研究,包括缩尺模型的施工张拉试验、屋面荷载试验、不均匀雪荷载试验、温度效应试验以及断索试验等;第 12 章基于天津理工大学体育馆索穹顶屋盖实际工程及模型进行了断索分析,并基于有限元分析结果对不同的索穹顶构件进行了重要性评级。

本书可供土木工程、力学、建筑学等相关专业的研究生和从事相关专业的工程技术人员参考使用。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金、国家重点研发项目、住房城乡建设部科学

技术项目、天津市建设管理委员会科技项目资助以及其他相关横向研究课题的支撑，书中吸纳了作者课题组近些年来对索穹顶结构的部分研究成果，作者所在团队的研究生马青、余玉洁、王宵翔、韩芳冰、王鑫、楼舒阳、李毅、武晓凤、郭明渊、杨艳、郭刘潞等对本书内容的研究工作或书籍成稿做出了重要贡献，在此向他（她）们致以诚挚的谢意。同时本书参考了一系列国内外同行的研究成果和论著，在此一并感谢。

本书仅结合作者所熟悉的领域和取得的阶段性研究结果进行论述，内容远非全面，随着研究工作的不断深入，作者期望能对本书的内容进行充实和完善。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，希望读者发现后能够及时告知，以便今后改进。

陈志华
2022 年 4 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 张拉整体结构	1
1.2 索穹顶结构	3
1.2.1 索穹顶结构的概念	3
1.2.2 索穹顶结构的分类	4
1.3 索穹顶结构的工程应用	6
1.4 本章小结	9
第 2 章 拉索构件试验研究	10
2.1 引言	10
2.2 拉索抗弯性能试验研究	10
2.2.1 试验方案	10
2.2.2 试验结果分析	14
2.2.3 结构用索的有效弯曲刚度	15
2.3 拉索松弛性能试验研究	16
2.3.1 试验方案	16
2.3.2 试验结果分析	19
2.3.3 结构用索长期松弛值推算	24
2.4 拉索腐蚀性能试验研究	25
2.4.1 试验方案	25
2.4.2 盐雾环境下拉索腐蚀速率	27
2.4.3 拉索腐蚀后力学性能研究	33
2.5 三点弯曲法索力识别方法研究	36
2.5.1 三点弯曲法基本原理	36
2.5.2 三点弯曲法索力识别方法验证试验	36
2.5.3 试验结果及分析	38
2.6 基于标定思想的索力识别方法研究	40
2.6.1 频率法测索力基本原理	40
2.6.2 基于标定思想的索力识别方法基本原理	42
2.6.3 基于标定思想索力识别方法验证试验	45
2.6.4 试验结果与分析	48
2.7 本章小结	55

第 3 章 拉索构件数值模拟方法研究	56
3.1 引言	56
3.2 七丝钢绞线轴拉性能数值模拟	56
3.2.1 建模方法及模型参数	56
3.2.2 拉索轴向拉伸整体承载性能	58
3.2.3 拉索内部塑性应变分布	59
3.2.4 钢丝间接触力的变化	60
3.2.5 钢丝之间摩擦力对拉索轴向承载性能的影响	61
3.3 拉索抗弯性能数值模拟	62
3.3.1 半平行钢丝束半精细化有限元模型	62
3.3.2 半平行钢丝束弯曲过程半精细化数值模拟	69
3.3.3 钢绞线半精细化有限元模型	75
3.3.4 钢绞线弯曲过程半精细化数值模拟	78
3.4 拉索松弛性能数值模拟	81
3.4.1 拉索应力松弛数值模拟的基本思路	81
3.4.2 单根钢丝松弛数值模拟	83
3.4.3 钢绞线拉索应力松弛数值模拟	85
3.5 平行钢丝束断丝数值模拟	89
3.5.1 断丝恢复长度理论计算模型	89
3.5.2 半平行钢丝束半精细化有限元断丝模型	98
3.5.3 半平行钢丝束对称断丝模拟	99
3.5.4 半平行钢丝束半精细化有限元非对称断丝模拟	102
3.6 本章小结	108
第 4 章 索穹顶结构找形找力分析	109
4.1 索穹顶结构找形找力分析基本理论	109
4.1.1 平衡矩阵理论	109
4.1.2 自应力模态和预应力模态	110
4.1.3 结构几何可行性	111
4.1.4 索杆结构刚度矩阵	112
4.1.5 索杆结构的稳定性判断条件	113
4.1.6 索长误差敏感性矩阵	114
4.2 不平衡力迭代法	115
4.2.1 几何可行性判断	115
4.2.2 自应力模态求解	117
4.2.3 找形分析	118
4.2.4 算例	119
4.3 索穹顶结构不平衡力迭代法	120
4.3.1 初始几何形态可行的结构	120
4.3.2 初始几何形态不可行的结构	126

4.4	分块-组装机	131
4.4.1	几何调整	132
4.4.2	分块求解	132
4.4.3	整体组装机	132
4.4.4	算例	137
4.5	本章小结	142
第5章	索穹顶结构的有限元分析方法	143
5.1	引言	143
5.2	连续折线索单元形式与基本假设	143
5.3	连续折线索单元相关列式推导	144
5.3.1	单元刚度矩阵	144
5.3.2	单元质量矩阵与荷载列阵	149
5.4	连续折线索单元和间断索单元的对比分析	151
5.4.1	均布荷载作用下结构的静力性能	151
5.4.2	索穹顶结构在非对称荷载作用下的静力分析	153
5.4.3	小结	155
5.5	本章小结	155
第6章	椭圆形复合式索穹顶结构静力性能分析	156
6.1	椭圆形复合式索穹顶概念的提出	156
6.1.1	工程背景和概况	156
6.1.2	结构形式的确定	158
6.1.3	索穹顶方案比选	165
6.1.4	椭圆形复合式索穹顶	169
6.2	常用索穹顶结构形式静力性能对比	173
6.2.1	椭圆形复合式与 Geiger 式索穹顶对比	173
6.2.2	椭圆形复合式与 Levy 式索穹顶对比	175
6.3	边界状态对结构性能的影响	179
6.3.1	边界结构形式的影响	179
6.3.2	环梁与下部结构连接方式的影响	190
6.3.3	天津理工大学体育馆整体模型分析	193
6.4	屋面围护结构对索穹顶结构的影响	198
6.4.1	有限元模型	198
6.4.2	围护结构形式对索穹顶结构的影响	200
6.5	本章小结	203
第7章	椭圆形复合式索穹顶结构动力性能分析	205
7.1	自振特性分析	205
7.1.1	基本理论	205
7.1.2	索穹顶结构自振特性	206
7.1.3	参数化分析	208

7.2 地震响应分析	214
7.2.1 基本理论	214
7.2.2 索穹顶结构地震响应	222
7.3 风振响应分析	227
7.3.1 基本理论	227
7.3.2 索穹顶结构风振分析	228
7.3.3 参数化分析	236
7.4 本章小结	242
第8章 索穹顶节点设计	244
8.1 引言	244
8.2 索穹顶结构节点选型	244
8.2.1 撑杆上节点	244
8.2.2 撑杆下节点	245
8.2.3 支座节点	246
8.3 索穹顶结构节点设计	248
8.3.1 节点材料的选用	248
8.3.2 节点设计一般原则	249
8.3.3 耳板节点设计	250
8.3.4 索夹节点设计	253
8.3.5 螺杆节点设计	256
8.3.6 数值分析原则	261
8.3.7 防腐与防火	261
第9章 椭圆形复合式索穹顶结构施工模拟分析	263
9.1 引言	263
9.2 索穹顶结构的施工方法	263
9.2.1 既有索穹顶结构施工方法	263
9.2.2 既有索穹顶建造过程存在的问题	268
9.2.3 索穹顶多次顶升安装施工方法的提出	268
9.3 椭圆形复合式索穹顶结构施工工艺研究	272
9.3.1 索穹顶施工安装步骤	272
9.3.2 索穹顶施工全过程模拟分析	276
9.3.3 不同斜索张拉方式对比分析	282
9.4 索穹顶结构施工误差敏感性分析	284
9.4.1 环梁施工误差的影响与控制	284
9.4.2 拉索施工误差的影响与控制	286
9.5 本章小结	289
第10章 天津理工大学体育馆索穹顶结构监测	291
10.1 引言	291
10.2 天津理工大学体育馆索穹顶结构施工监测	292

10.2.1	施工监测关键参数	293
10.2.2	施工监测测点布置方案	293
10.2.3	施工监测结果与分析	294
10.3	天津理工大学体育馆索穹顶结构健康监测	299
10.3.1	健康监测测点布置方案	299
10.3.2	健康监测结果及分析	301
10.4	本章小结	306
第 11 章	椭圆形复合索穹顶模型试验	308
11.1	引言	308
11.2	模型设计	308
11.2.1	整体模型尺寸	308
11.2.2	构件和节点设计	308
11.3	施工张拉试验	315
11.3.1	试验内容	315
11.3.2	测点布置	315
11.3.3	试验结果	316
11.3.4	误差分析	317
11.4	静力性能试验	318
11.4.1	试验内容	318
11.4.2	测点布置	320
11.4.3	试验结果	320
11.4.4	误差分析	329
11.5	不均匀雪荷载试验	330
11.5.1	试验内容	330
11.5.2	测点布置	331
11.5.3	试验结果	332
11.5.4	误差分析	338
11.6	温度效应试验	338
11.6.1	试验内容	338
11.6.2	测点布置	339
11.6.3	试验结果	339
11.7	断索试验	346
11.7.1	试验内容	346
11.7.2	测点布置	350
11.7.3	试验结果	352
11.8	本章小结	369
第 12 章	椭圆形复合式索穹顶结构断索分析与评估	370
12.1	引言	370
12.2	天津理工大学索穹顶缩尺模型有限元分析	370

12.2.1	缩尺模型斜索 XS1D 断索有限元分析	370
12.2.2	缩尺模型环索 WH23 断索有限元分析	373
12.2.3	缩尺模型脊索 JS5C 断索有限元分析	377
12.3	天津理工大学索穹顶实际结构断索分析	380
12.3.1	实际结构斜索 XS1D 断索有限元分析	380
12.3.2	实际结构环索 WH23 断索有限元分析	383
12.3.3	实际结构脊索 JS5C 断索有限元分析	386
12.3.4	断索动态效应分析	389
12.3.5	断索动态效应影响因素	392
12.4	索穹顶结构构件重要性评级分析	396
12.4.1	典型构件破断分析	396
12.4.2	索穹顶拉索（撑杆）破断分析	405
12.4.3	拉索（撑杆）重要性评级	415
12.5	本章小结	418
	参考文献	419