

空间结构系列丛书

# 张力结构的 分析·设计·施工

钱若军 杨联萍

ZHANGLI JIEGOU DE FENXI SHEJI SHIGONG

东南大学出版社

空间结构系列丛书

# 张力结构的分析· 设计·施工

钱若军 杨联萍

东南大学出版社

## 内 容 提 要

本书全面、系统地介绍了张力结构的分析理论、设计方法与施工技术。全书分四篇共 16 章,第一篇讨论张力结构的基本概念、特点,结构的各种分类和工作机理;第二篇是张力结构的应用基础,探讨了张力结构的分析理论和计算方法;第三篇着重讨论张力结构的设计原理和准则,并给出了大量的构造详图;第四篇则介绍了国内外一些典型的工程实例。全书阐述了基础理论,也详尽地介绍了设计方法和构造要点。

本书可作为高等院校本科高年级学生及研究生的教学参考书,也可供科研、设计以及工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

张力结构的分析·设计·施工 / 钱若军,杨联萍著. —南京:东南大学出版社,2003. 8

(空间结构系列丛书)

ISBN 7-81089-145-6

I. 张... II. ①钱...②杨... III. ①张力—建筑结构—结构分析②张力—建筑结构—结构设计③张力—建筑结构—工程施工 IV. TU399

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 049661 号

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 江苏省南通市印刷总厂印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:31 字数:774千字

2003年9月第1版 2003年9月第1次印刷

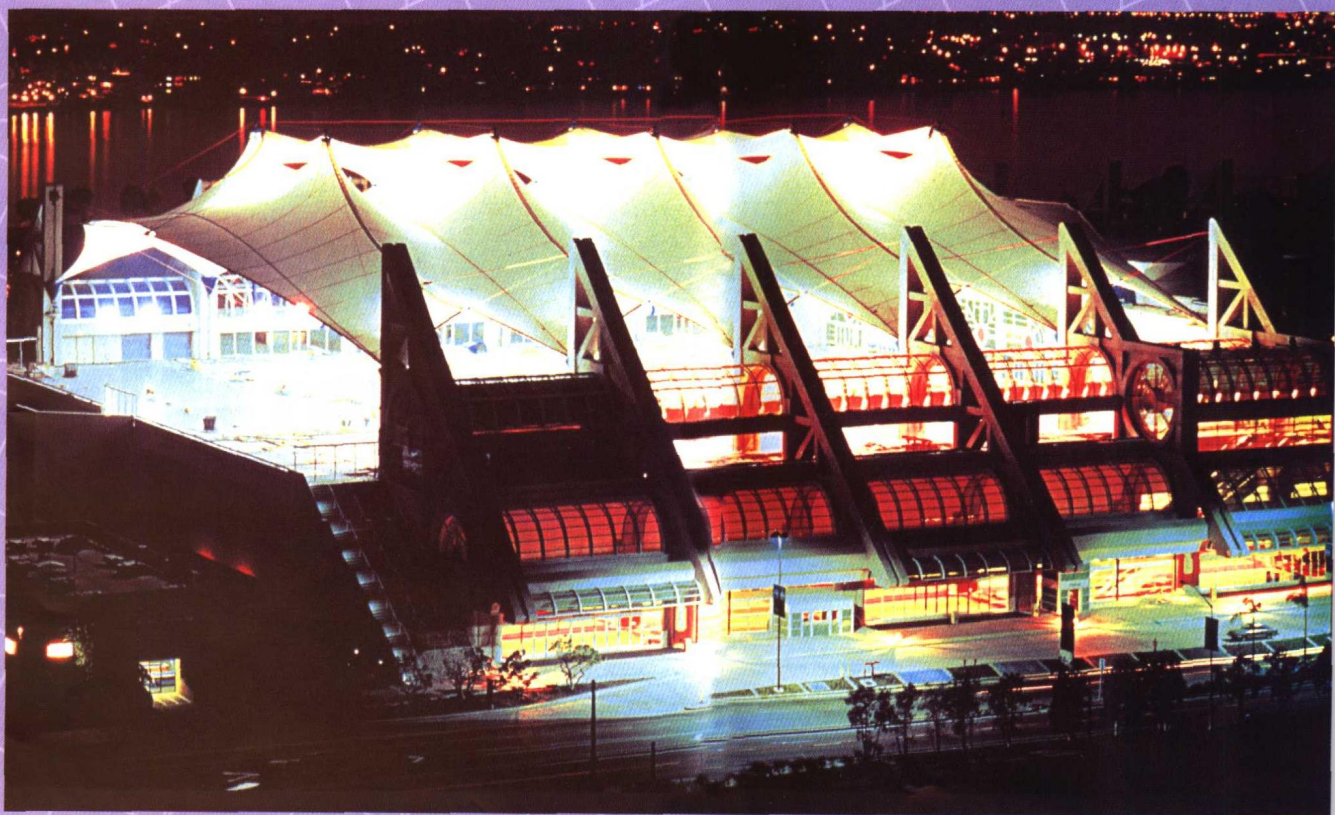
印数:1~3000册 定价:88.00元

(凡因印装质量问题,可直接向发行科调换。电话:025-3795801)



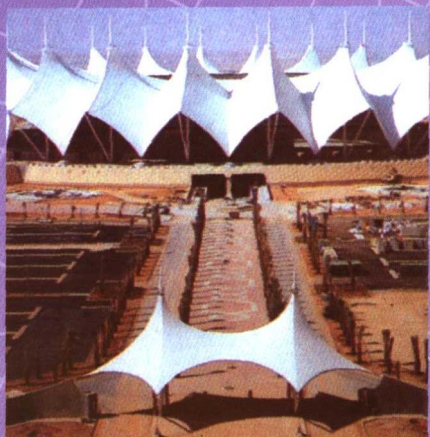


伦敦千年穹顶

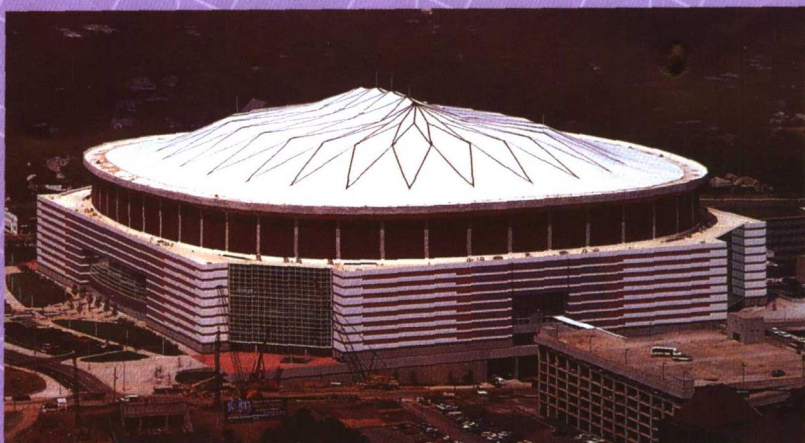


美国圣迭戈会议中心

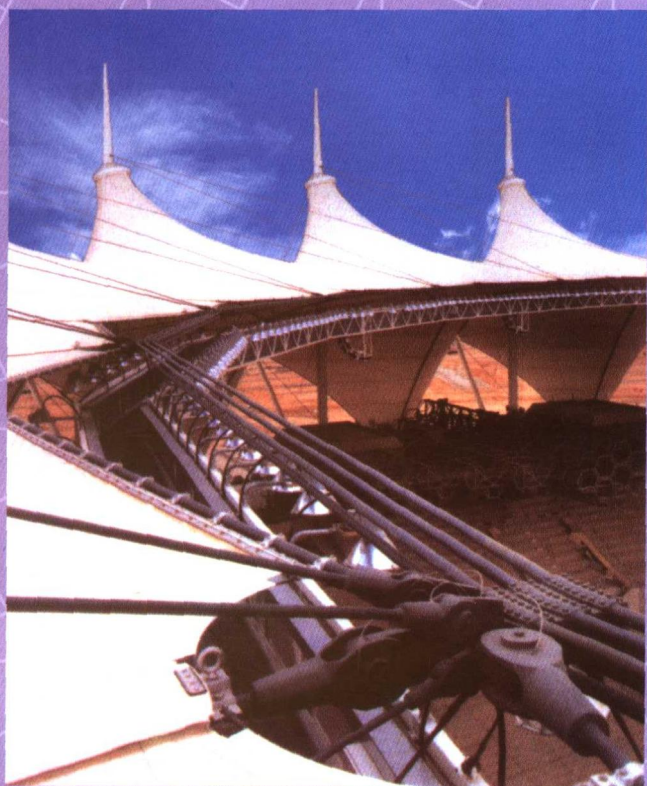




沙特利雅得国际运动场施工中



美国佐治亚穹顶



沙特利雅得国际运动场细节



美国佐治亚穹顶内景

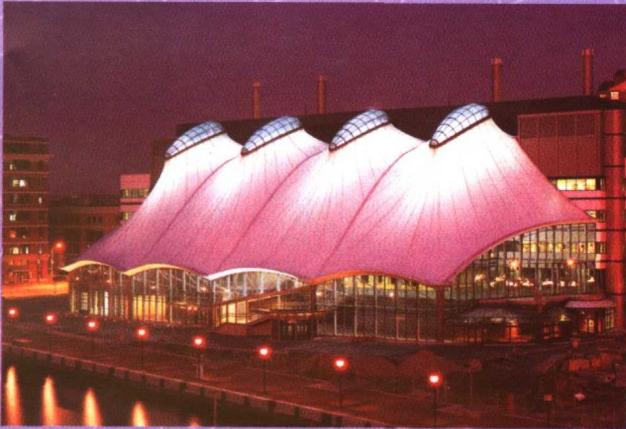




佛罗里达—汽车展厅夜景



La Sante 内景



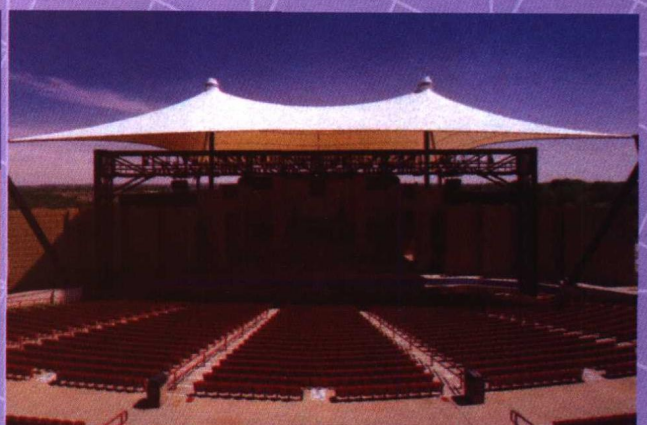
马里兰州哥伦布中心入口处



夏威夷 Kaahumanu Center



加州 New Port of Entry

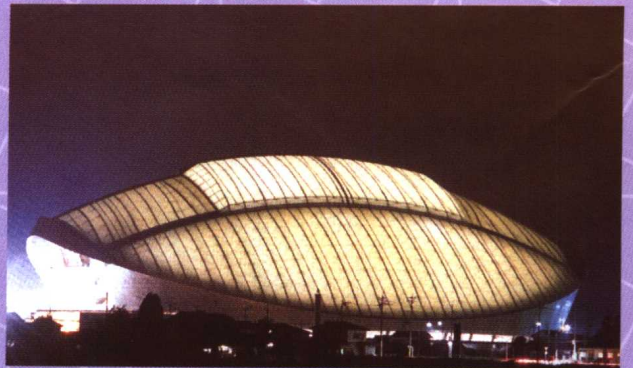


得克萨斯—圆形剧场

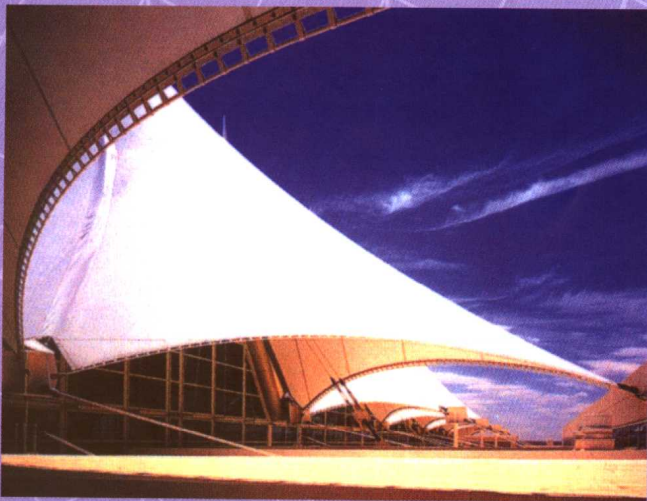




横滨八景岛



Odate Jukai Dome



美国丹佛国际机场局部



熊本平山町



美国丹佛国际机场夜景

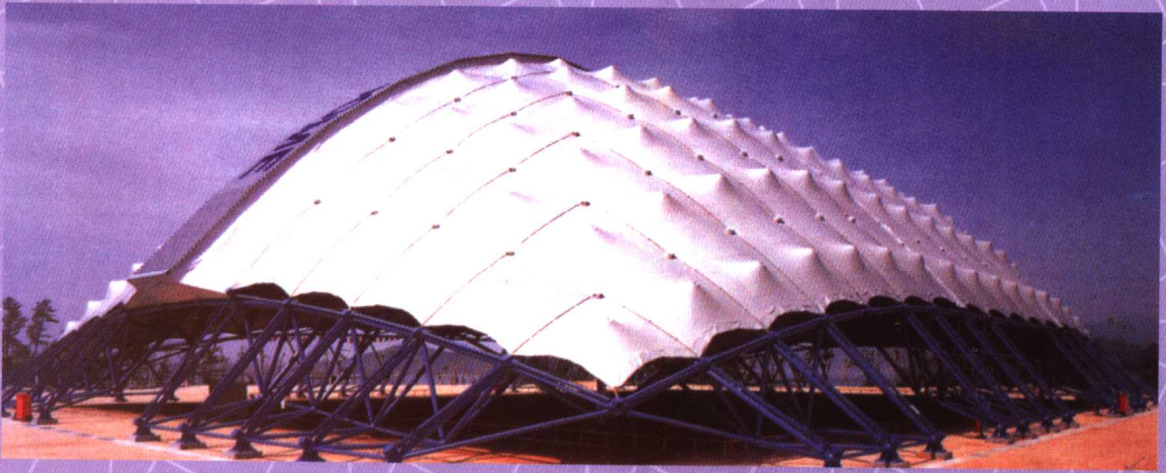




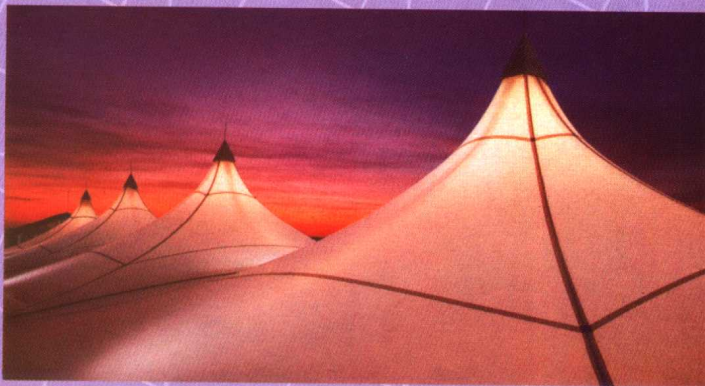
加拿大 Montreal Olympic



Akita Sky Dome



Marinepia Sports Dome



Clarksville 一商场(美国)



日本万国博览会气球

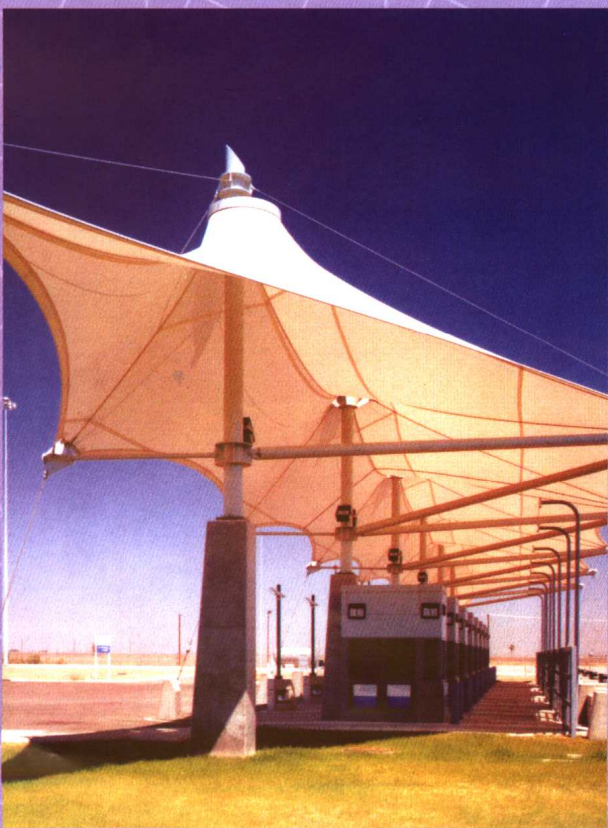




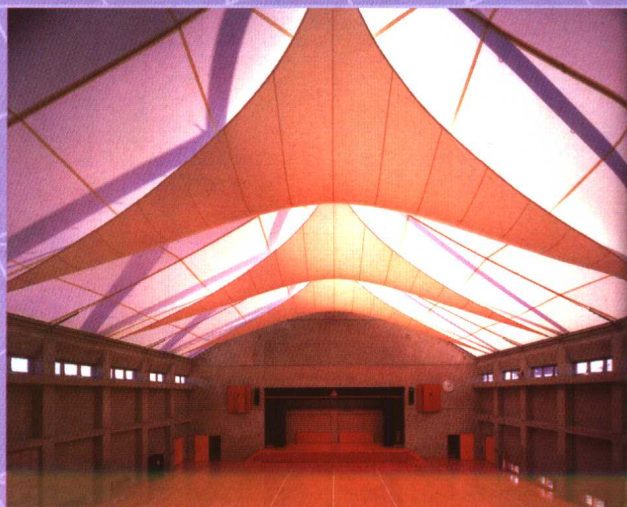
加州 New Port of Entry



Arabian Tower Hotel



加州 New Port of Entry



日本山村女子短期大学体育馆内景





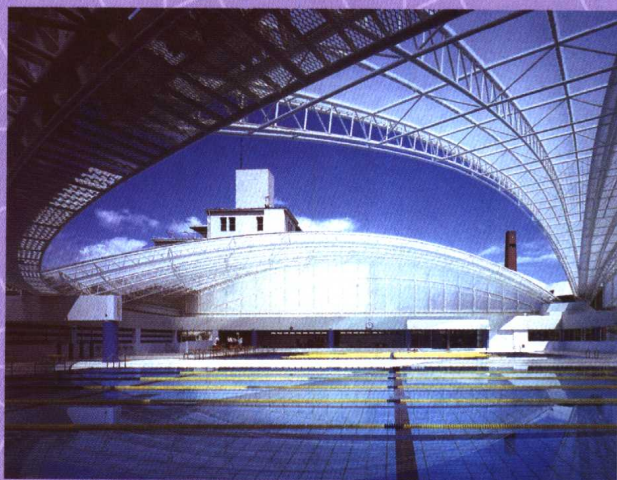
Iwase Sports Dome 外景



Todoroki Stadium 外景



Mukogawa Gakuin 屋盖关闭内景



Mukogawa Gakuin

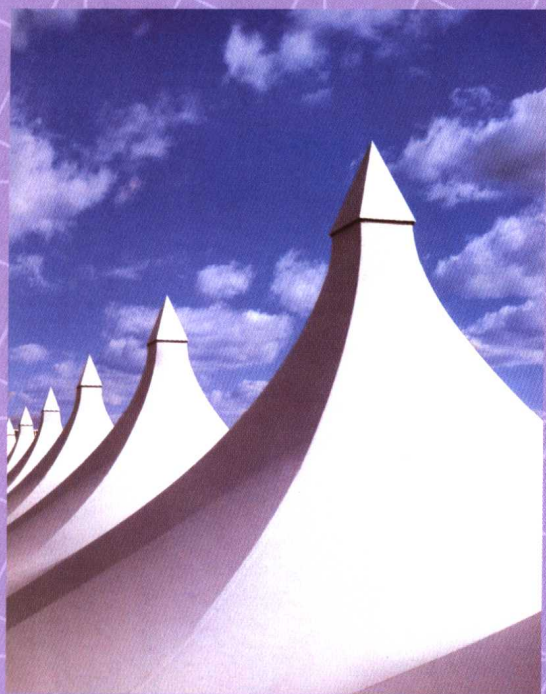


马来西亚国立体育场和游泳馆细部



日本万国博览会富士馆

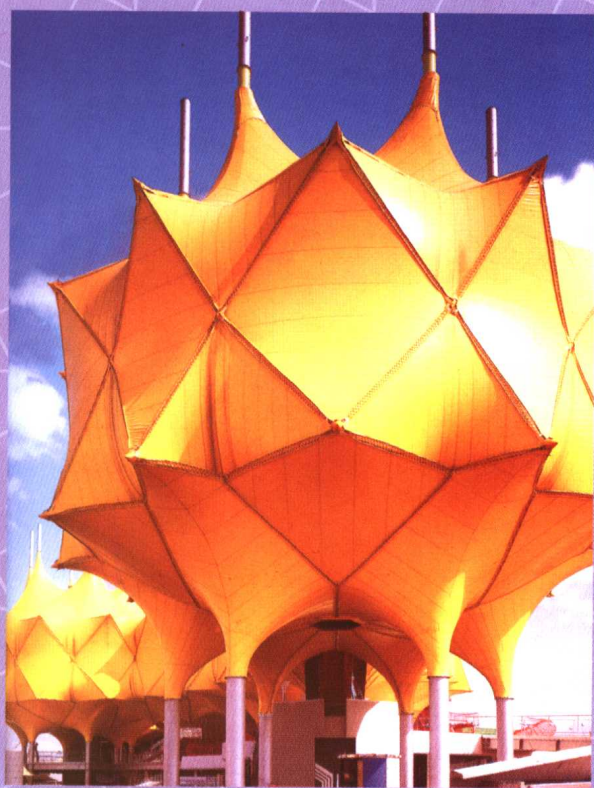




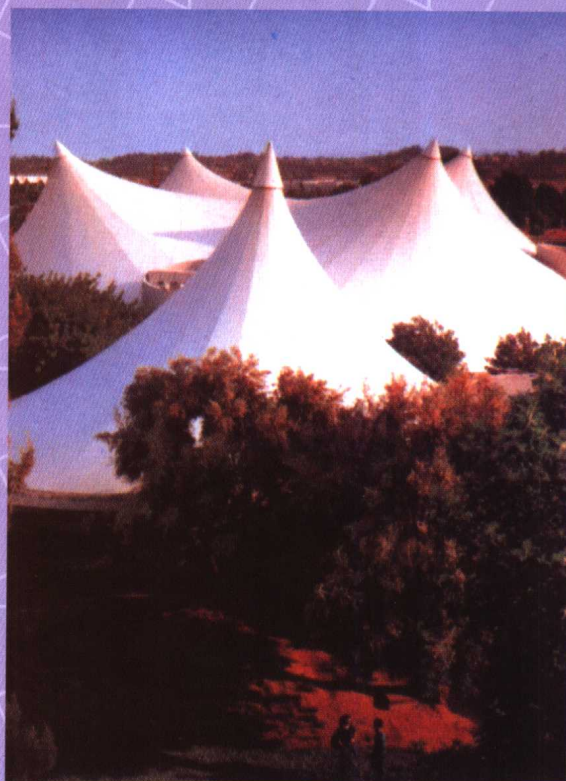
英国曼彻斯特一帐篷结构



慕尼黑某家庭卧室顶棚膜装饰



日本万国博览会电气通信馆



美国 La Verne 大学校园中心



# 前 言

张力结构是一种古老而又新颖的结构形式,作为一种古老传统的结构形式,它在古代就得到广泛而成功的应用;作为一种新颖的结构,它体现了各种先进的科学技术。可以说,张力结构的设计和建造综合反映了一个国家的基础理论、应用技术、材料科学、建筑设计施工等诸方面的水平。张力结构很容易设计,但很不容易设计好。由于张力结构可以充分发挥材料的强度,具有很高的结构效率,尤其适合于大跨度的空间结构,因此,自20世纪60年代以来张力结构就得到了广泛的应用,在国内外大跨度的体育建筑、交通建筑、会展中心等都有很多成功的范例,从而成为驰名世界的经典之作,有些建筑物也成为标志性的建筑。张力结构除了成功地应用于大跨度空间结构以外,它还以其优美的体形经常出现于中小跨度的建筑乃至建筑小品中,因此建筑师、结构师对于张力结构的青睐经久不衰。

广义地讲,张力结构包含了各种悬挂结构、张力集成体系和膜结构,国外尤其是一些技术发达国家的学者对各种形式的张力结构作了大量系统的研究,研究的范围涉及到数学、力学、结构理论、计算机方法、材料、施工等多个领域。研究的高峰出现在20世纪的六七十年代,研究的热点从单层的索结构到膜结构到张力集成体系。由于基础研究的深入与建筑结构相关的各种建筑技术的发展,从而形成了完善的分析、设计、制作、安装的能力。在这个领域中,德国、日本、英国、美国、加拿大、法国、意大利以及澳大利亚等国家取得了极为显著的成绩。我国的研究与设计人员在五六十年代也进行了引进研究和设计工作,成功地设计了如北京工人体育馆双层索结构、杭州体育馆马鞍形双曲抛物面预应力索网结构。80年代初期,成功地设计了四川省体育馆等。在这个时期前后,我国还设计了各种各样大大小小不同跨度的索结构。自70年代后半期,膜结构在世界各地兴起,在我国也迅速地得到推广和应用。膜结构成为张力结构中另一个新高点和新的热点。国外能够在这个领域中取得如此成功和进步,是与国外在这个领域中不断地研



究和总结分不开的,德国、日本、英国、美国、印度、匈牙利等国学者为张力结构贡献了很多著作。在我国,一些著名学者如朱振德、董石麟、刘锡良、张维嶽、金问鲁、沈世钊、曹资、尹德钰、刘善维、严慧、肖炽等教授进行了富有成效的研究并做出了显著的贡献,取得了很多引人注目的成果。近年来,吴健生、张其林等教授对张力膜结构进行了研究并取得了具有独创性的成果。朱思荣、徐荣熙、杨叔庸等杰出的工程师在他们颇具匠心的设计中体现了进取心、创造性和功力。

本书旨在介绍和讨论张力结构当前的理论、技术和应用,从浩如烟海的文献中提炼出精要的部分,但又注意到理论上的系统性、完整性和技术发展的历程。由于张力结构的形式变化多端,因此作者致力于揭示张力结构的特点,从形态各异的结构中显示其神似之处。本书全面、系统地阐述了张力结构的分析理论和设计方法,理论性的讨论是作为应用基础,而对设计的讨论则侧重于原理和方法。以便于从“千变万化”中得到“千篇一律”的规律,再运用“千篇一律”的规律设计出“千变万化”的结构。设计是创造,从“从形、随形”到“无形”。

本书共分四篇,第一篇讨论张力结构的基本概念、特点和结构的各种分类;第二篇是张力结构的应用基础,探讨张力结构的分析方法;第三篇着重讨论张力结构的设计,并给出了大量的构造详图;第四篇则介绍了国内外一些典型的工程实例。全书阐述了基础理论,也详尽地介绍了设计方法和构造要点。本书可作为教学、科研、设计人员的参考书。

在长期的张力结构研究过程中,得到了国家自然科学基金委、上海市建设技术发展基金会的资助。河海大学胥传熹副教授、太原理工大学赵红华副教授分别对膜结构和梁柱的分析研究做出了突出的贡献,董明、胡宇峰、王春江等博士的杰出才华为本书增色生辉,邱枕戈工程师为本书做了大量的工作。本书在撰写过程中还得到了同仁和同学的大量帮助,在此聊表谢忱。由于作者的水平有限,谬误之处在所难免,敬请读者批评指正。

钱若军 杨联萍

2001年春于上海 枝经堂



# 目 录

## 第一篇 张力结构的基本概念

<b>1 张力结构的基本概念和特点</b> .....	3
1.1 概论 .....	3
1.1.1 结构概念 .....	3
1.1.2 预应力过程 .....	3
1.1.3 索自重影响 .....	4
1.1.4 稳定系统 .....	4
1.1.5 集成系统 .....	4
1.2 张力结构的发展简史 .....	5
1.2.1 张力结构发展的因素 .....	6
1.2.2 悬挂和斜拉结构的发展过程 .....	9
1.2.3 张力集成体系(Tensegrity System)的发展过程 .....	11
1.2.4 膜结构的发展过程 .....	18
1.2.5 稳定和平衡 .....	21
1.3 张力结构的特点 .....	22
1.3.1 结构的应力回路、刚度与预应力 .....	22
1.3.2 形状 .....	23
1.3.3 非线性和非保守性 .....	23
1.3.4 全张力状态和恒定应力态 .....	23
1.3.5 自平衡过程 .....	24
1.3.6 施工方法和过程 .....	24
<b>2 张力结构的分类、工作机理及选型</b> .....	25
2.1 概论 .....	25
2.2 悬挂和斜拉结构 .....	26
2.2.1 单索(Suspended Cable)体系结构 .....	26
2.2.2 索网(Cable Nets)结构 .....	27
2.2.3 索桁架(Cable Truss) .....	29
2.2.4 横向加劲单向索系结构 .....	31
2.2.5 双层悬索(Double Lager Suspended Cable)结构 .....	31
2.2.6 斜拉(Suspended Cable)结构 .....	33
2.2.7 帐篷(Tent)结构 .....	33



2.2.8	索杆(Cable Struct)结构(张弦桁架)	34
2.2.9	其他索杆结构	34
2.3	张力集成体系	36
2.3.1	概述	36
2.3.2	多面体几何、集成单元	37
2.3.3	单纯形张力集成单元的形状	40
2.3.4	极限几何态	42
2.3.5	工程结构集成单元	43
2.3.6	张力集成单元	45
2.3.7	张力集成单元的几何稳定性分析	47
2.3.8	张力集成单元的可刚化分析	48
2.3.9	索穹顶结构	50
2.3.10	平板型张力集成体系(索网架)结构	56
2.4	张力膜结构	61
2.4.1	概述	61
2.4.2	张力膜结构的组合形式	62
2.4.3	张力膜结构的曲面表示方法	66
2.5	张力结构的工作机理	66
2.5.1	悬挂和斜拉结构的工作机理	67
2.5.2	张力集成体系的工作机理	69
2.5.3	张力膜结构的工作机理	71
2.6	张力结构的应用和选型	71
2.6.1	悬挂和斜拉结构的应用和选型	72
2.6.2	张力集成体系(Tensegrity System)的应用和选型	73
2.6.3	膜结构的应用和选型	73
2.7	张力结构的设计要点	74

## 第二篇 张力结构的应用基础

3	基于连续化假定的悬索结构静力分析方法	79
3.1	概论	79
3.1.1	基于连续化假定的悬索结构静力分析方法概述	79
3.1.2	索的抗弯刚度的影响	79
3.2	自重作用下索的计算	80
3.2.1	索长的计算	80
3.2.2	悬链线	81
3.2.3	抛物线	84
3.2.4	直线	85
3.2.5	拉索	85
3.3	单索的计算	86
3.3.1	集中荷载下的单索	86



3.3.2	温度变化及支座移动的影响	89
3.3.3	分布荷载下的单索	89
3.4	索桁架的计算	91
3.4.1	索桁架的平衡方程和协调方程	92
3.4.2	均布荷载作用下索桁架的计算	93
3.5	单层预应力索网	95
3.5.1	曲面几何	95
3.5.2	平衡方程	95
3.5.3	几何方程	96
3.5.4	物理方程	96
3.5.5	双曲抛物面索网结构的特征	96
3.5.6	椭圆底平面双曲抛物面索网	97
<b>4</b>	<b>张力结构静力分析的有限元法</b>	<b>100</b>
4.1	索单元	100
4.1.1	概述	100
4.1.2	基本方程	101
4.2	几何条件	102
4.2.1	单元的几何	103
4.2.2	应变的描述	103
4.2.3	两节点直线单元应变	104
4.2.4	五节点直线单元应变	105
4.2.5	曲线单元应变	105
4.2.6	空间梁单元应变	107
4.2.7	薄膜单元应变	113
4.3	物理条件	114
4.4	非线性空间两节点铰接直线单元	115
4.4.1	单元的剖分和坐标系的建立	115
4.4.2	位移模式、几何条件及物理条件	116
4.4.3	有限元基本方程	117
4.5	非线性空间两节点铰接曲线单元	120
4.5.1	单元的剖分和坐标系的建立	120
4.5.2	位移模式及几何、物理条件	121
4.5.3	有限元基本方程和单元刚度矩阵	124
4.5.4	初始力向量与不平衡力向量	126
4.6	非线性空间五节点铰接单元	127
4.6.1	单元的剖分和坐标系的建立	127
4.6.2	位移函数	128
4.6.3	几何关系和物理关系	129
4.6.4	平衡方程	131



4.6.5	切线刚度矩阵 .....	133
4.7	非线性空间薄膜单元 .....	134
4.7.1	基本假定、单元剖分和坐标系的建立 .....	134
4.7.2	位移函数 .....	135
4.7.3	几何条件和物理条件 .....	137
4.7.4	有限元方程及单元刚度矩阵 .....	139
4.7.5	整体坐标系中的有限元基本方程 .....	140
4.7.6	应力矩阵 .....	140
4.8	非线性空间梁单元 .....	141
4.8.1	单元的剖分和坐标系的建立 .....	141
4.8.2	几何和物理条件 .....	142
4.8.3	位移函数 .....	142
4.8.4	应变矩阵及刚度矩阵 .....	143
<b>5</b>	<b>张力结构动力分析的有限元法 .....</b>	<b>147</b>
5.1	张力结构动力分析的基本原理和方法 .....	147
5.2	动力分析的有限元基本方程 .....	148
5.3	结构的阻尼特性 .....	149
5.3.1	阻尼及阻尼比 .....	149
5.3.2	空气共振的影响 .....	151
5.3.3	阻尼矩阵 .....	152
5.4	结构的自振特性 .....	153
5.5	单元的惯性特性 .....	154
5.5.1	等价质量矩阵 .....	154
5.5.2	空间铰接杆等价质量矩阵 .....	155
5.5.3	等截面空间梁单元等价质量矩阵 .....	156
5.5.4	薄膜单元等价质量矩阵 .....	157
5.6	工程抗震分析 .....	158
<b>6</b>	<b>体系结构的形态分析 .....</b>	<b>160</b>
6.1	几何稳定性分析概述 .....	160
6.2	结构体系平衡方程 .....	161
6.3	平衡矩阵子空间与结构稳定性的关系 .....	162
6.3.1	平衡矩阵 $A$ 的列空间 .....	163
6.3.2	平衡矩阵 $A$ 的行空间 .....	163
6.3.3	平衡矩阵 $A$ 的化零空间 .....	163
6.3.4	平衡矩阵 $A$ 的左化零空间 .....	164
6.4	机构体系的几何稳定性判定 .....	164
6.4.1	稳定的类型 .....	164
6.4.2	平衡矩阵与几何稳定性 .....	165