

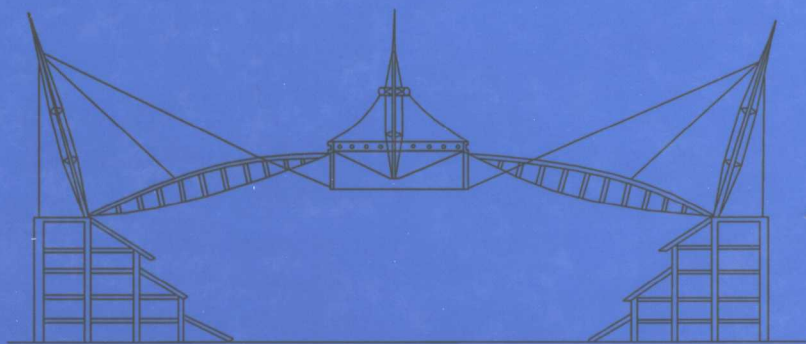


M

Modern Prestressed Steel Structures

# 现代预应力钢结构

□ 陆赐麟 尹思明 刘锡良 著



人民交通出版社  
China Communications Press

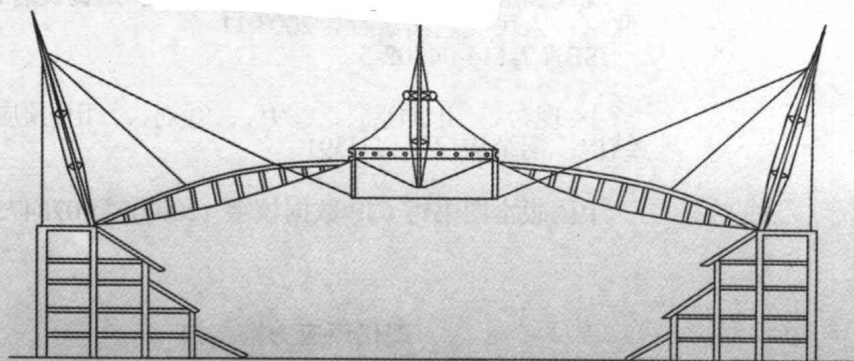


TU391  
L858

Modern Prestressed Steel Structures

# 现代预应力钢结构

□ 陆赐麟 尹思明 刘锡良 著



人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书是作者几十年科研、教学、设计、施工实践经验与工作的总结,尤其是作者创建的多次预应力钢结构理论及首建成功的多次预应力钢网壳大跨工程,是预应力钢结构学科在我国发展中的重要贡献。

本书内容丰富,涵盖广泛,共分五篇十九章,包括平面结构、空间结构、特种结构三大体系的理论、设计、试验及国内外工程实例介绍。

本书在选材上理论与实践并重,国内与国外兼顾,尽量做到前瞻、全面、系统、实用。本书既可作为科研、设计、施工、制造方面技术人员的专业参考书,又可作为高等院校、科研院所师生们的辅助教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

现代预应力钢结构/陆赐麟,尹思明,刘锡良著.  
北京:人民交通出版社,2003.11  
ISBN 7-114-04802-5

I.现... II.①陆...②尹...③刘... III.预应力  
结构:钢结构 IV.TU391

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第078473号

## 现代预应力钢结构

陆赐麟 尹思明 刘锡良 著

正文设计:姚娅妮 责任校对:刘 芹 责任印制:张 恺

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号 010-64216602)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷有限公司印刷

开本:787×980 1/16 印张:36.5 字数:624千

2003年12月 第1版

2003年12月 第1版 第1次印刷

印数:0001-4000册 定价:50.00元

ISBN 7-114-04802-5



## 21世纪结构工程领域重要著作书系

### 序 言

在过去的几十年乃至未来很长一段时间,我国已经进行并将继续进行着有史以来最大规模的基本建设,其中最引人注目的如大跨度桥梁、大型体育场馆、高层建筑、深埋地下空间结构、大坝结构以及新型结构等等,代表了我国结构工程学科的蓬勃发展和巨大成就。作为土木工程领域中一个重要学科体系,结构工程学科涉及面广、发展迅速、从业人员众多,在21世纪中,为开创具有中国特色、具有国际一流水平的土木工程领域的新纪元,结构工程学科必将在其中起到决定性作用。

与时俱进,一直是结构工程学科的主旋律。

首先是社会需求的变化,随着经济的发展和功能要求的提高,从最初的低层建筑、小型结构,发展到现在的高层建筑、跨河跨海桥梁、大型体育场馆与会展中心、越江隧道、巨型拱坝,这些都为结构工程提供了新的要求和发展契机,正是在大规模基础建设的推动下,结构工程学科取得了巨大进步。

在新世纪里,社会需求必将会对结构工程学科提出新的挑战,学科本身更将在不断创新和满足社会需求中获得进步。从传统的砌体结构、混凝土结构、钢结构,到现在的预应力混凝土结构、大跨空间结构,乃至预应力钢结构、钢—混凝土组合结构,实现了我们以前不能想像的建筑形式,优化了工程技术本身,为我们展现了结构工程学科广泛深入的应用空间。而且随着各个学科的不断深入研究,随着新材料、新技术、新理论不断发展,各种结构体系还将有新的发展。

21世纪的结构工程领域,对人才的要求有了更高的标准,专业技术人员应该具备完整的知识结构以适应现代工程科技发展的需要,在工程实践、

理论修养和计算能力等方面继续学习新知识、掌握新技术,加强分析问题、解决问题的能力,同时具备较强的创新能力。

科研工作者除了本身的科研与实践工作外,还应该致力于知识传播。因此本书系应该包括老一辈专家的成果和经验总结及新一代中青年专家的创新成就。编著一本好书用以影响一个领域,影响几代人,这也是作为学者的使命和历史责任。

欣闻人民交通出版社将组织出版“21 世纪结构工程领域重要著作书系”,并已经在过去两年中做了许多工作,甚感欣慰。他们的想法总结起来有以下几点:

(1)面向 21 世纪百年时间,收录这期间结构工程各专业领域中具有较大影响的重要著作,将其做成品牌书系,为专家学者和读者搭建一个写好书读好书的平台。

(2)面向最广泛的结构工程科研、技术人员及师生,面向工程应用,为科研实践与工程实践服务。

(3)倡导严谨务实,推动技术应用和学科进步,保证书系中各图书均为各领域研究与实践中的经典图书。

(4)本书系既包括国内专家的图书,又关注国外本领域重要著作,以达到提高与交流的目的。

这个书系的想法非常好,我相信会在土木工程领域产生重大影响,对结构工程学科的进步起到很大的推动作用,会为广大技术人员提供一批好书,帮助他们在工程实践中继续取得更大的成就。

中国工程院院士 大连理工大学

赵国藩

2003 年 4 月 13 日

# 代 序

预应力钢结构自 20 世纪 50 年代问世以来,历经初期探索 and 不断实践,特别在近 20 年来与高强钢索、纤维增强薄膜等新型材料和大跨空间结构结合之后,现已发展成为工程结构中的一棵奇葩。将预应力引入钢结构,能使钢材的拉、压强度同时得到充分利用,还能调节结构的刚度,有效节约钢材,增加结构稳定性,减少结构变形。预应力钢结构家族中的索膜体系、吊挂体系和网架网壳体系,还以其新颖奇巧的建筑造型,有着强烈的美感,在当前的大规模工程建设中有着相当广阔的应用前景。

在结构工程界,人们比较熟悉的是预应力混凝土结构,但对预应力钢结构的了解却并不普遍,甚至不清楚预应力钢结构为何物。我国过去的钢材供应长期短缺,钢结构很少使用,而现在则已完全不同。面对建筑钢材充分供应的大好形势,当前深感钢结构人才与技术的匮乏,以及理论与经验积累的不足。为了促进钢结构在中国的应用,发挥钢结构在工程建设中的特有优势,尤其是预应力钢结构这样崭新的发展方向,就必须加强宣传和介绍。所以本书的出版非常及时,本书既是结构工程师得以更新知识的继续教育教材,又是具体指导预应力钢结构设计施工实践的实用参考书,对于推进预应力钢结构技术在国内的应用定将起到重要作用。

本书主要作者陆赐麟教授是国内最早从事预应力钢结构研究的学者。他从 20 世纪 50 年代初到清华大学工作起就热衷于预应力钢结构技术,不久受派留学苏联,在著名的苏联中央建筑结构科学研究院深入进行这一领域的研究。60 年代初回国后,继续在清华大学工程结构试验室进行预应力钢结构的试验研究。直到现在,矢志不渝钻研和推广预应力钢结构已达半个世纪之久。他提出的多次预应力理论与方法,是对预应力钢结构学科做出的重要贡献,并被收入前苏联曼列尼可夫院士主编的《金属结构设计手册》中,多次预应力技术现已在国内的大跨度钢结构工程中得到成功应用。本书的第二作者尹思明高工就是多次预应力网壳屋盖的首位设计主持人。我们可以从本书看到作者对预应力钢结构的精辟分析与描述以及工程实践的经验总结,如果没有长期钻研积累所达到的深邃造诣,是很难做到这一点的。

陆赐麟教授当初和我一起进入清华土木系当助教,相知共识 50 年,他

在预应力钢结构上表现出来的对专业工作的执著追求与不懈努力,还有他  
为人的豁达与乐观,一直是我学习的榜样。现在读了这本书,又从中学到了  
许多新的知识。我们可以从预应力钢结构的经济、高效与形式上的绚丽多  
彩,感受到结构创新的魅力。

作为结构工程师,我们有幸生活在今天的中国,举世无双的建设规模提  
供了千载难逢的机遇,我们应该能为结构工程学科的发展做出应有的贡献。  
为此,我们需要努力学习,要摆脱多年来形成的结构设计惯于套着设计规范  
和现成模式描红的习俗,提倡结构体系的创新和新材料、新工艺的应用,取  
得结构功能与经济的高度统一。

清华大学教授 陈肇元

2003 年 8 月

## 作者简介



**陆赐麟(Lu Ci-Lin)** 北京工业大学教授。男,汉族,1929年2月生,浙江绍兴人。1952年毕业于天津大学(前北洋大学)后,入清华大学土木系攻读研究生。1955年在钢木结构教研室任讲师,1956年赴前苏联深造,1960年毕业于莫斯科建筑工程学院(现莫斯科国立建筑大学)研究生部,获博士学位。1980年调入北京工业大学土木系工作。

曾任中国钢结构协会理事,中国房屋钢结构协会副理事长,中国老教授协会土建专业委员会理事等职。现任中国钢协专家委员会委员,中国建筑钢结构委员会专家组成员,中国房屋钢协顾问,《钢结构》、《建筑钢结构进展》专业期刊编委等职。

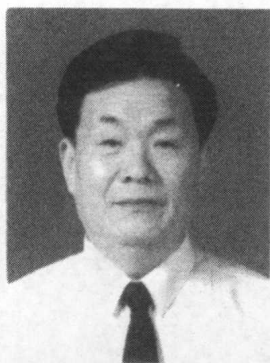
长期从事建筑钢结构的教学和科研工作。从20世纪50年代起对新兴的预应力钢结构学科进行广泛的研究与开发,在前苏联中央建筑结构研究院首次提出并成功地进行了多次预应力钢桁架理论及试验研究,其多次预应力理论及科研成果为前苏联1980年出版的《金属结构设计手册》全部采用,并为我国首建成功的攀枝花体育馆(1994年)和西昌铁路体育中心(1996年)两座多次预应力钢网壳屋盖提供了理论基础。50年代研究得出的预应力钢结构最佳结构体系的结论也在1988年汉城奥运会和1996年亚特兰大奥运会主赛场馆新型屋盖索穹顶结构体系中得到印证。在国内外会议及书刊上个人和领衔署名发表过科技论文近百篇,曾连续五年(1997~2001年)在专业期刊《钢结构》上发表《预应力钢结构技术讲座》系列文章。参编过《钢木结构》、《钢结构》等大专教材,参译过《建筑力学教程》、《金属结构》、《房屋与构筑物动力计算手册》等专业书籍。多次参加国内大型钢结构工程的技术评审及成果鉴定工作。

## 作者简介



尹思明(Yin Si-Ming) 男,1934年11月生,四川岳池人,大学文化,教授级高工,一级注册结构工程师,原攀枝花市建勘院总工,享受国家特殊津贴。曾任省、市建筑学会理事、副理事长,省结委会委员。完成了数百项工程设计及审查,解决了多项重大工程的复杂技术攻关。填补了非圆形底无支撑装配薄壳和多次预应力钢网壳的空白,攻克了非线性弹性变截面板壳和伞形结构的难题,取得了有限元理论带肋非正交四边形薄壳元和预应力索单元的新成果。主持和参加了省“八五”重点科技攻关项目“大跨度预应力钢网壳的理论分析及试验研究”及其应用工程的设计,建成了国际首例多次预应力钢网壳屋盖,经鉴定属世界领先水平,1996年获省科技进步一等奖,全国建筑结构、空间结构优秀设计二等奖、一等奖。被授予市“有重大贡献科技工作者”称号并重奖。撰写了百余万字科技论文,多篇在全国、国际学术会议交流,十余篇刊登在国家重点科技期刊,多篇评为省、全国及美国 CISC 的优秀论文。

## 作者简介



**刘锡良(Liu Xi-Liang)** 1928年6月出生,1955年清华大学土木系钢结构研究生毕业。1982年赴德国不伦瑞克工业大学钢结构研究所做访问学者,近20年来经常出国参加学术活动和讲学。50年来长期从事钢结构及空间结构的的教学、科研及生产设计工作。

现为天津大学建工学院土木工程系教授、博士生导师。著书10余部,发表论文200余篇,培养博士生、硕士生近百名,获国家级科技奖两项。指导和设计施工上千座网架工程,如天津体育馆、天津科技馆等。1958年参加了南京大桥设计工作;1962年首先发明创造了焊接空心球节点网架,后来推广到全国;1979年写出国内第一本网架结构专著《平板网架设计》,该书对推广网架起了重大作用。近年来还参编和主编3种规范及规程,并指导开发了3个空间结构设计软件。曾任中国土木工程学会、中国钢结构协会理事,现任中国钢协和中国建筑钢结构委员会专家组成员,参加过多项国内大型钢结构工程技术评审及鉴定,具有丰富的实践经验及广博的专业知识。

# 前 言

预应力钢结构学科从诞生、发展至今已逾 50 年,由于学科的先进性、可靠性及经济性,使它由初始的撑杆梁形式衍生出预应力网格结构,吊挂结构,索网、索膜、索穹顶结构,张弦结构等现代预应力钢结构大家族。预应力钢结构学科从早期不被人们认知、被淡漠的状态,直至发展为现在国内外大型工程中乐于采用的现代结构形式,经历了漫长而曲折的道路。目前,预应力钢结构工程已进入土木建筑行业的各个领域,其发展前景方兴未艾。

作者三人都是预应力钢结构学科发展历程中的开拓者和参与者,亲身经历了学科发展中的各个过程。我们有的主持过理论的建立与试验研究;有的推动了学科的发展与结构创新;有的主持过结构的设计与工程实践。在前进的崎岖道路上有过攀登与跋涉,虽备尝创业的艰辛,但也感悟过胜利的喜悦。在走过了半个世纪的今天,我们愿将亲历目睹的经验与体会整理出来汇集成册,作为对学科发展的纪念和科技进步的贡献。

本书在选材上本着理论与实践并重,重点与一般互补,国内与国外兼顾,历史与发展呼应的精神,尽量体现内容先进、全面、系统和实用。使之既能作为科研、设计、施工、制造方面技术人员的专业参考书,又能作为高等院校、科研院所师生们的学习辅助教材。

本书内容涵盖广泛,从预应力钢结构学科的基本原理、基本杆件到预应力平面结构体系、空间结构体系、特种结构以及加固改建等,其中绝大部分源自自己的经验、概念和观点,如作者亲身负责的工程设计和施工,自己主导的科研理念和试验等等都全面、系统地反映在书中,对那些很少探索但又前景广阔的领域,我们亦不想忽略,例如对预应力轻钢结构方面虽知之不多,因其适用范围日益扩大,用量不断增长,书中亦不吝笔墨寄望来日开发。至于材料、锚具、施工工艺与设备等项虽属重要,但因时间、条件所限,本书暂缺,留待未来。

本书共分五篇十九章,全书由我统稿。根据分工我撰写了第 1~8 章和第 15~19 章,计 13 章,涉及全书五篇;尹思明高工撰写了第 9、10、13 三章;刘锡良教授完成了第 11、12、14 三章内容。

我们将自己多年的实践经验与科研成果尽可能全面地整理出来奉献给读者,同时也对国内外一些先进的思想以及现代工程进行报导和介绍,向读

者展示更宽阔的视野。为了方便读者,对目前暂无标准名称的结构体系在书中统一了称谓,将一些章节中大同小异的计算分析方法精简了内容。但限于时间、条件及水平,书中难免仍存在不当与不足之处,诚恳欢迎同行与读者不吝赐教与指正。

在本书即将正式出版之际,衷心感谢曾与我们共同工作给予过支持与关心的专家和学长;也衷心感谢曾在本书出版过程中鼓励和支持过我们的同行与朋友。对在某些章节中直接参与了编写工作的天津大学老师陈志华、韩庆华、王小盾和参与了成文工作的北京工业大学博士生张国军以及四川刁元秀女士特表示谢忱。

最后应感谢我的老朋友、老同事清华大学陈肇元教授,我们几十年的相交与友谊使他成为我毕生专业工作的支持者与见证人,所以请他审阅本书并作序应该是真实的和顺理成章的。

**陆赐麟**

**2003 年 仲夏不眠夜**

**于北京工业大学建筑工程学院**

# 目 录

## 第一篇 总 论

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 第一章 绪论                                   | 3  |
| 1.1 预应力技术源于生活经验                          | 3  |
| 1.2 预应力钢结构的的发展历程                         | 6  |
| 1.2.1 初创期(二战后~1960年前后)——探索与前进            | 6  |
| 1.2.2 发展期(1960年前后~20世纪80年代中期)<br>——发展与突破 | 10 |
| 1.2.3 繁荣期(20世纪80年代末期~21世纪初)——繁荣与<br>创新   | 15 |
| 1.3 预应力钢结构的主要特点和经济效益                     | 20 |
| 1.3.1 预应力钢结构主要特点                         | 20 |
| 1.3.2 预应力钢结构的经济效益                        | 22 |
| 1.4 预应力钢结构的适用范围和开发前景                     | 26 |
| 参考文献                                     | 28 |
| 第二章 预应力钢结构设计基本原理和方法                      | 30 |
| 2.1 预应力钢结构的工作机理                          | 30 |
| 2.1.1 力的重复                               | 30 |
| 2.1.2 力的转移                               | 31 |
| 2.1.3 力的质变                               | 31 |
| 2.1.4 力的优选                               | 32 |
| 2.2 预应力钢结构的加载方案                          | 32 |
| 2.2.1 先张法                                | 33 |
| 2.2.2 中张法                                | 33 |
| 2.2.3 多张法                                | 34 |
| 2.3 多次预应力的特点和基本原理                        | 34 |
| 2.4 施加预应力的主要方法                           | 39 |
| 2.4.1 拉索法                                | 39 |
| 2.4.2 支座位移法                              | 41 |
| 2.4.3 弹性变形法                              | 43 |
| 2.5 预应力钢结构的设计计算原则                        | 45 |

|            |    |
|------------|----|
| 参考文献 ..... | 48 |
|------------|----|

## 第二篇 平面承重结构体系

|                                               |           |
|-----------------------------------------------|-----------|
| <b>第三章 预应力轴心受拉构件的计算和设计 .....</b>              | <b>53</b> |
| 3.1 拉杆结构构造特点 .....                            | 53        |
| 3.2 拉杆的受力与强度计算 .....                          | 55        |
| 3.2.1 先张法 .....                               | 55        |
| 3.2.2 中张法 .....                               | 57        |
| 3.2.3 强度验算 .....                              | 58        |
| 3.3 钢拉杆的整体稳定性 .....                           | 59        |
| 3.3.1 无隔板钢拉杆的临界荷载值( $n = 1$ ) .....           | 59        |
| 3.3.2 单隔板钢拉杆的临界荷载值( $n = 2$ ) .....           | 60        |
| 3.3.3 ( $n - 1$ )个隔板的拉杆临界荷载值( $n = n$ ) ..... | 61        |
| 3.4 应力松弛和内力损失 .....                           | 63        |
| 3.5 预应力钢拉杆设计算例和经济分析 .....                     | 65        |
| 3.6 预应力钢拉杆的试验研究和工程应用 .....                    | 68        |
| 参考文献 .....                                    | 73        |
| <b>第四章 预应力轴心受压构件的计算和设计 .....</b>              | <b>75</b> |
| 4.1 前言 .....                                  | 75        |
| 4.2 压杆构造与选型 .....                             | 75        |
| 4.2.1 杆件组成 .....                              | 76        |
| 4.2.2 结构选型 .....                              | 77        |
| 4.3 计算方法 .....                                | 77        |
| 4.3.1 静力法 .....                               | 78        |
| 4.3.2 能量法 .....                               | 78        |
| 4.4 另类预应力钢压杆的计算与分析 .....                      | 85        |
| 4.4.1 局部预应力钢压杆 .....                          | 85        |
| 4.4.2 平行索预应力钢压杆 .....                         | 89        |
| 4.5 预应力钢压杆的试验研究工作 .....                       | 90        |
| 4.6 预应力钢压杆的工程应用概况 .....                       | 93        |
| 参考文献 .....                                    | 94        |
| <b>第五章 预应力实腹梁 .....</b>                       | <b>95</b> |
| 5.1 拉索预应力梁的构造 .....                           | 95        |
| 5.1.1 简支梁的布索方案 .....                          | 95        |

|            |                  |            |
|------------|------------------|------------|
| 5.1.2      | 连续梁布索方案          | 96         |
| 5.1.3      | 梁的截面形式           | 96         |
| 5.1.4      | 梁的节点构造           | 97         |
| 5.2        | 预应力钢梁的弹性计算       | 99         |
| 5.3        | 预应力钢梁的刚度验算       | 102        |
| 5.4        | 预应力钢梁的塑性计算       | 103        |
| 5.4.1      | 荷载作用下的塑性受力       | 103        |
| 5.4.2      | 预应力态下的塑性受力       | 104        |
| 5.4.3      | 两种塑性受力状态的比较      | 105        |
| 5.5        | 预应力钢梁设计算例        | 105        |
| 5.6        | 弹性变形组合梁受力特点      | 108        |
| 5.7        | 支座位移法的预应力连续梁     | 112        |
| 5.8        | 预应力钢梁的试验研究工作     | 114        |
| 5.9        | 国内外工程应用实例        | 118        |
|            | 参考文献             | 120        |
| <b>第六章</b> | <b>拉索预应力钢桁架</b>  | <b>121</b> |
| 6.1        | 概述               | 121        |
| 6.2        | 桁架的形式            | 122        |
| 6.3        | 桁架的构造            | 123        |
| 6.4        | 单次预应力桁架的计算与设计    | 124        |
| 6.5        | 预应力立体钢桁架方案设计     | 127        |
| 6.5.1      | 结构的合理截面形式        | 128        |
| 6.5.2      | 桁架的几何尺寸和腹杆体系     | 128        |
| 6.5.3      | 布索方案的选择          | 129        |
| 6.5.4      | 加载方案与荷载划分        | 131        |
| 6.5.5      | 柱距及荷载力度          | 132        |
| 6.5.6      | 桁架构造方案分析         | 132        |
| 6.5.7      | 分析结论             | 134        |
| 6.6        | 多次预应力钢桁架的理论与试验工作 | 134        |
| 6.6.1      | 多次预应力工艺的适用条件     | 134        |
| 6.6.2      | 多次预应力桁架的加载与计算    | 135        |
| 6.6.3      | 多次预应力桁架合理形式探讨    | 140        |
| 6.6.4      | 多次预应力钢桁架模型试验研究   | 144        |
| 6.7        | 预应力钢桁架的试验研究与工程应用 | 150        |
| 6.7.1      | 试验研究工作           | 150        |

|                                              |            |
|----------------------------------------------|------------|
| 6.7.2 工程应用 .....                             | 151        |
| 参考文献 .....                                   | 154        |
| <b>第七章 预应力大跨平面结构 .....</b>                   | <b>156</b> |
| 7.1 预应力拱架结构 .....                            | 156        |
| 7.1.1 拱架结构的力学特点 .....                        | 156        |
| 7.1.2 预应力索拱结构体系 .....                        | 157        |
| 7.1.3 支座位移法 Strarch 拱架结构 .....               | 159        |
| 7.1.4 其他预应力拱式结构 .....                        | 163        |
| 7.1.5 工程实例 .....                             | 163        |
| 7.2 预应力框架结构 .....                            | 165        |
| 7.2.1 结构图形及预应力方法 .....                       | 165        |
| 7.2.2 预应力效应及经济分析 .....                       | 167        |
| 7.2.3 预应力框架结构例证分析 .....                      | 169        |
| 7.3 吊挂结构 .....                               | 172        |
| 7.3.1 吊挂结构的特点 .....                          | 172        |
| 7.3.2 吊挂结构的类型 .....                          | 172        |
| 7.3.3 吊挂结构的设计原则 .....                        | 173        |
| 7.3.4 吊挂结构的工程实例 .....                        | 173        |
| 7.4 索绳结构体系 .....                             | 176        |
| 7.4.1 索弦屋盖结构(String Roof Structure)的应用 ..... | 177        |
| 7.4.2 索弦屋盖结构的构造 .....                        | 178        |
| 参考文献 .....                                   | 179        |

### 第三篇 空间承重结构体系

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| <b>第八章 预应力空间钢结构的特点与分类 .....</b> | <b>183</b> |
| 8.1 预应力空间钢结构的诞生与发展 .....        | 183        |
| 8.2 预应力空间钢结构的特点 .....           | 184        |
| 8.3 预应力空间钢结构的类型及典型工程 .....      | 186        |
| 8.3.1 传统结构型 .....               | 186        |
| 8.3.2 吊挂结构型 .....               | 191        |
| 8.3.3 整体张拉型 .....               | 194        |
| 8.3.4 张力金属膜型 .....              | 197        |
| 参考文献 .....                      | 200        |
| <b>第九章 预应力网架结构 .....</b>        | <b>201</b> |

|            |                              |            |
|------------|------------------------------|------------|
| 9.1        | 发展概况及工程应用 .....              | 201        |
| 9.2        | 预应力网架结构的分类和特点 .....          | 202        |
| 9.2.1      | 按施加预应力方法分类 .....             | 202        |
| 9.2.2      | 按网架结构形式分类 .....              | 203        |
| 9.2.3      | 按施加预应力次数分类 .....             | 203        |
| 9.3        | 预应力网架的布索方案 .....             | 204        |
| 9.3.1      | 布索原则 .....                   | 204        |
| 9.3.2      | 布索方案 .....                   | 204        |
| 9.4        | 预应力网架静力分析的有限元法 .....         | 206        |
| 9.4.1      | 空间杆单元的刚度矩阵 .....             | 206        |
| 9.4.2      | 空间直线索单元的刚度矩阵 .....           | 207        |
| 9.4.3      | 预应力网架的静力分析 .....             | 207        |
| 9.4.4      | 预应力对网架结构静力特性的影响 .....        | 208        |
| 9.5        | 预应力网架的抗震计算 .....             | 210        |
| 9.5.1      | 计算模型的基本假定 .....              | 210        |
| 9.5.2      | 振动方程及其求解 .....               | 211        |
| 9.5.3      | 动力特性分析 .....                 | 211        |
| 9.5.4      | 用振型分解反应谱法求地震反应 .....         | 212        |
| 9.6        | 预应力网架的杆件设计 .....             | 215        |
| 9.6.1      | 预张力分项系数和杆件组合内力设计值的确定 .....   | 216        |
| 9.6.2      | 预应力网架的杆件截面设计 .....           | 217        |
|            | 参考文献 .....                   | 218        |
| <b>第十章</b> | <b>预应力网壳结构 .....</b>         | <b>220</b> |
| 10.1       | 预应力网壳结构的发展概况、研究现状和工程应用 ..... | 220        |
| 10.1.1     | 发展概况 .....                   | 220        |
| 10.1.2     | 研究现状 .....                   | 220        |
| 10.1.3     | 工程应用 .....                   | 222        |
| 10.2       | 预应力网壳结构的分类和特点 .....          | 223        |
| 10.2.1     | 按建立预应力的方法分类 .....            | 223        |
| 10.2.2     | 按施加预应力的阶次分类 .....            | 225        |
| 10.2.3     | 按网壳曲面的外形分类 .....             | 225        |
| 10.2.4     | 按网格的形式分类 .....               | 228        |
| 10.3       | 网壳的预加应力体系及布索方案 .....         | 230        |
| 10.3.1     | 网壳的预加应力体系 .....              | 230        |
| 10.3.2     | 预应力网壳的布索原则 .....             | 230        |