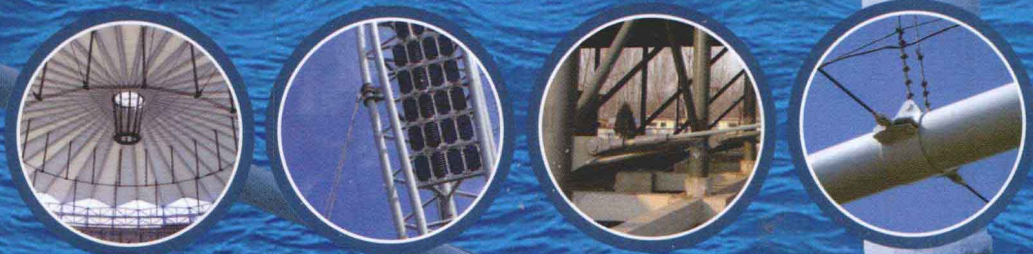


# 新型建筑索结构

## 设计与监测



张其林 主编

广东坚朗五金制品股份有限公司 组编  
东莞市坚宜佳五金制品有限公司



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 新型建筑索结构 设计与监测

张其林 主编

广东坚朗五金制品股份有限公司  
东莞市坚宜佳五金制品有限公司

组编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书分为6章。第1章介绍了索结构的发展及其分类；第2章为建筑用索构成；第3章为索结构设计计算的基本原则和方法；第4章为索结构地震反应分析；第5章为索结构的风荷载效应；第6章介绍了索结构的健康监测系统并重点介绍了索结构中索力测试的各类方法及其应用实例。

本书适合从事建筑设计和建筑索结构领域的读者参考使用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

新型建筑索结构设计及监测/张其林主编；广东坚朗五金制品股份有限公司，东莞市坚宜佳五金制品有限公司组编。  
北京：中国电力出版社，2012.5

ISBN 978 - 7 - 5123 - 3095 - 5

I. ①新… II. ①张…②广…③东… III. ①悬索结构—结构设计②悬索结构—监测 IV. ①TU351

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 107827 号

中国电力出版社出版发行

北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑：梁 瑶 联系方式：010-63412605

责任印制：蔺义舟 责任校对：闫秀英

航远印刷有限公司印刷·各地新华书店经售

2012 年 10 月第 1 版·第 1 次印刷

700mm×1000mm B5·14 印张·259 千字

定价：48.00 元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



经过近十几年来的研究、应用和发展,我国建筑索结构领域目前具备以下三个方面的特征:

(1) 结构体系日渐丰富,各类索结构体系包括张弦梁、斜拉索结构、弦支穹顶、索桁架、索网、索穹顶等均有较多的应用,相应的设计计算理论日渐成熟,关于建筑索结构的行业标准和地方规程也已编制出版或正在出版。

(2) 索产品的研发和应用也取得了重大进展和突破,如高强钢拉杆、密封钢绞线、Galfan 镀层钢绞线等已由相关企业研制成功并推向市场,相关企业标准、产品和行业标准也已颁布,告别了高端索产品完全依赖进口的历史。

(3) 索结构体系抗风、抗震等理论研究取得了较大的进展,索结构的施工控制、健康监测、性能检测等应用研究也获得了较多重视和应用。

本书结合作者自身工作,试图向读者展示我国建筑索结构在以上三个方面所取得的成就。本书第 1 章的建筑索结构体系和第 2 章的建筑用索构成由广东坚朗五金制品股份有限公司、东莞市坚宜佳五金制品公司负责撰写;第 3 章、第 4 章和第 5 章分别叙述了建筑索结构设计计算的基本原则和方法、地震反应分析、风荷载效应计算,主要基于同济大学近十多年来的研究和应用成果;第 6 章介绍了索结构的健康监测系统并重点介绍了索结构中索力测试的各类方法及其应用实例。

同济大学空间结构研究室历年毕业的博士和硕士们参与了本书的撰写,他们是任俊超博士(第 1、2、4 章)、罗晓群副教授(第 3 章)、宋杰博士和王洪军博士(第 4 章)、周颖博士和朱炳虎博士(第 5 章)、陈鲁博士和李大林硕士(第 6 章)。上海现代设计集团李亚明教授级高工、周晓峰高工、黄秋萍教授级高工、郑州大学童丽萍教授等分别是本书所列举的相关工程实例的设计或项目负责人。同时,广东坚朗五金制品股份有限公司白宝鲲总裁、东莞市坚宜佳五金制品有限公司尚景朕总经理对本书给予了大力支持。本书的撰写离开他们的工作是无法完成的。在此,作者对他们致以衷心的感谢。

编著者

# 目 录



## 前言

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>第1章 索结构的发展及其分类</b> ..... | 1  |
| 1.1 索结构特点 .....             | 1  |
| 1.1.1 结构形式 .....            | 1  |
| 1.1.2 受力特点 .....            | 2  |
| 1.2 索结构发展 .....             | 2  |
| 1.2.1 发展概述 .....            | 2  |
| 1.2.2 国外索结构 .....           | 3  |
| 1.2.3 国内索结构 .....           | 10 |
| 1.3 索结构分类 .....             | 26 |
| 1.3.1 悬索结构 .....            | 26 |
| 1.3.2 斜拉结构 .....            | 31 |
| 1.3.3 张弦结构 .....            | 32 |
| 1.3.4 索穹顶 .....             | 34 |
| <b>第2章 建筑用索构成</b> .....     | 37 |
| 2.1 钢丝绳 .....               | 37 |
| 2.1.1 起源与发展 .....           | 37 |
| 2.1.2 捻法 .....              | 38 |
| 2.1.3 特点 .....              | 38 |
| 2.1.4 力学性能 .....            | 39 |
| 2.2 平行钢丝束 .....             | 40 |
| 2.2.1 制作及特点 .....           | 40 |
| 2.2.2 力学性能 .....            | 40 |
| 2.3 钢拉杆 .....               | 41 |
| 2.3.1 组成 .....              | 41 |
| 2.3.2 接头锚具 .....            | 42 |
| 2.3.3 调节特性 .....            | 42 |
| 2.3.4 力学性能 .....            | 42 |
| 2.3.5 设计方法 .....            | 43 |
| 2.3.6 表面处理 .....            | 44 |

|            |                        |           |
|------------|------------------------|-----------|
| 2.4        | 锌-5%铝-混合稀土合金镀层钢绞线拉索    | 45        |
| 2.4.1      | 特点                     | 46        |
| 2.4.2      | 密封钢绞线                  | 47        |
| 2.4.3      | Galfan 镀层钢绞线           | 47        |
| 2.4.4      | 性能比较                   | 50        |
| 2.4.5      | 工程应用                   | 51        |
| <b>第3章</b> | <b>索结构设计计算的基本原则和方法</b> | <b>60</b> |
| 3.1        | 基本概念和术语                | 60        |
| 3.2        | 索结构的通用非线性分析方法——有限单元法   | 61        |
| 3.2.1      | 直线索单元和悬链线索单元           | 61        |
| 3.2.2      | 找形分析的有限单元法             | 67        |
| 3.2.3      | 荷载态分析的有限单元法            | 69        |
| 3.2.4      | 施工过程分析的有限单元法           | 71        |
| 3.3        | “索杆体系”找形分析的两种特殊方法      | 72        |
| 3.3.1      | 索桁架找形的矩阵分析法            | 72        |
| 3.3.2      | 索网找形的力密度法              | 74        |
| 3.4        | “索梁体系”找形分析的两种情况        | 74        |
| 3.4.1      | 图纸几何为零状态几何             | 75        |
| 3.4.2      | 图纸几何为初始状态几何            | 75        |
| 3.5        | 工程实例                   | 76        |
| 3.5.1      | 概况                     | 76        |
| 3.5.2      | 初始状态确定                 | 76        |
| 3.5.3      | 施工过程跟踪的逆分析和正分析         | 79        |
| 3.5.4      | 施工误差分析                 | 83        |
| 3.5.5      | 动力特性计算                 | 85        |
| 3.5.6      | 荷载效应计算                 | 85        |
| <b>第4章</b> | <b>索结构地震反应分析</b>       | <b>90</b> |
| 4.1        | 抗震方法研究及其现状             | 90        |
| 4.1.1      | 抗震方法发展                 | 90        |
| 4.1.2      | 抗震设计现状                 | 92        |
| 4.2        | 自振特性分析                 | 93        |
| 4.3        | 反应谱分析                  | 94        |
| 4.3.1      | 模态质量参与系数的取值            | 94        |
| 4.3.2      | 振型分解反应谱的组合方法           | 94        |

|            |                           |            |
|------------|---------------------------|------------|
| 4.4        | 时程分析                      | 96         |
| 4.4.1      | 多遇地震下的弹性时程分析计算            | 96         |
| 4.4.2      | 罕遇地震下的弹塑性时程分析计算           | 97         |
| 4.5        | 抗震方法的比较分析                 | 98         |
| 4.6        | 工程算例                      | 99         |
| 4.6.1      | 斜拉结构                      | 99         |
| 4.6.2      | 索穹顶结构                     | 117        |
| <b>第5章</b> | <b>索结构的风荷载效应</b>          | <b>151</b> |
| 5.1        | 概述                        | 151        |
| 5.2        | 等效静力风荷载                   | 151        |
| 5.2.1      | 荷载—响应相关法 (LRC 法)          | 151        |
| 5.2.2      | 背景分量与共振分量的组合法             | 153        |
| 5.2.3      | 阵风荷载因子法                   | 153        |
| 5.2.4      | 惯性风荷载方法                   | 154        |
| 5.2.5      | 通用等效风荷载法 (Universal ESWL) | 154        |
| 5.3        | 风振系数的定义和计算                | 155        |
| 5.3.1      | 荷载风振系数                    | 155        |
| 5.3.2      | 效应风振系数                    | 156        |
| 5.3.3      | 非线性结构的风振系数问题              | 157        |
| 5.4        | 索结构风荷载效应的研究方法             | 158        |
| 5.4.1      | 基于随机振动理论的风振响应分析           | 158        |
| 5.4.2      | 流固耦合数值模拟方法                | 160        |
| 5.4.3      | 气弹模型风洞实验和现场监测             | 162        |
| 5.5        | 工程分析实例                    | 163        |
| 5.5.1      | 索网结构静动力特性计算               | 163        |
| 5.5.2      | 流固耦合数值模拟                  | 165        |
| 5.5.3      | 基于随机振动理论的计算分析             | 177        |
| 5.5.4      | 基于现行规范规程的设计计算             | 182        |
| 5.5.5      | 各类分析和设计方法所得结果比较           | 187        |
| <b>第6章</b> | <b>索结构的健康监测和索力测试</b>      | <b>189</b> |
| 6.1        | 概述                        | 189        |
| 6.2        | 结构健康监测系统                  | 189        |
| 6.3        | 单索索力测试的直接方法               | 190        |
| 6.3.1      | 千斤顶油压表和拉 (压) 力传感器         | 191        |

|                   |                     |            |
|-------------------|---------------------|------------|
| 6.3.2             | 三点弯曲法 .....         | 191        |
| 6.3.3             | 磁通量法 (EM 法) .....   | 193        |
| 6.4               | 单索索力检测的参数识别方法 ..... | 198        |
| 6.4.1             | 振动波法 .....          | 199        |
| 6.4.2             | 振动频谱法 .....         | 200        |
| 6.5               | 索力测试方法的比较 .....     | 207        |
| 6.6               | 索力测试及修正实例 .....     | 207        |
| <b>参考文献</b> ..... |                     | <b>212</b> |





## 索结构的发展及其分类

结构工程是一门古老的学科，几乎伴随了人类的整个文明发展史。近年来，全球化经济与科学技术所呈现的蓬勃发展态势为建筑业的欣欣向荣创造了契机。工程技术的日臻成熟、建筑形式的日益多样化、计算方法的逐渐改进，新型建筑材料的不断创新，使得大空间、大跨度公共建筑在世界各地星罗棋布。公共建筑可以成为丰富的结构形式与独特的建筑造型的有机组合，成为艺术审美和功能需求的完美产物。

其中，索结构家族作为空间结构的一个庞大分支，凭借优美的建筑造型和良好的结构性能，被广泛运用于大跨度、大柱网、大开间的体育馆、影剧院、展览馆、车站、候机厅、大型商场、工业车间和仓库等建筑中，越来越受到国内外工程界和科技界的广泛关注，是一类方兴未艾、发展前景广阔的结构形式。

### 1.1 索结构特点

索结构的主要优点体现在：通过索的轴向拉伸来抵抗外荷载作用，可以充分利用钢材的强度。当采用高强度材料时，可大大减轻自重，较经济地跨越很大的跨度，从而达到节省材料的目的，因此，索结构已成为大跨建筑的主要结构形式之一。另外，索结构便于建筑造型，适应多种多样的平面图形和外形轮廓，能较自由地满足各种建筑功能和表达形式的要求；悬索结构的另一特点是施工比较方便。由于钢索自重很小，屋面结构一般也较轻，因此施工安装时不需要大型起重设备，使得施工费用相对降低。索结构的这些特点使其在大跨房屋建筑中获得日益广泛的应用。

#### 1.1.1 结构形式

索结构是以一系列受拉的索作为主要承重构件，按一定规律组成各种不同形式的体系。索结构由三部分组成：索系、覆盖系统和支承系统。

(1) 索系是悬索屋盖中跨越水平距离、形成大空间的主要构件。它由一系列按一定规律布置的高强索及附件组成，起着形成屋面、承担屋面荷载并将其传至

支承结构的作用；

(2) 覆盖系统一般位于索系之上，由檩条、屋面板、保温防水材料组成，主要作用是形成一个保温、隔热、防水的面层，完成屋盖的建筑功能，也可由柔性的索膜体系组成。

(3) 支承系统是由圈梁或水平横梁、立柱或拱等构件组成，承受着悬索传来的荷载，并将其传向基础。支承系统的合理性、可靠性直接影响到整个屋盖结构的经济与安全。

### 1.1.2 受力特点

索结构中的索杆是拉力构件，强力拉紧而组成屋面系统。为了获得稳定的屋面，必须施加相当大的拉力才能绷紧。它不像传统结构（梁、板、框架等）那样，除承受拉力外，还要受压、受弯和受扭等。索结构在外荷载作用下，索杆内只产生拉应力，因此可以选用高强度钢材，以充分发挥其力学性能。

此外，索结构的特点使其呈现出大变位、小应变的力学特性，并对局部荷载敏感，结构的控制方程是非线性的。常规结构分析中的叠加原理因此失效，致使计算中必须考虑几何非线性问题。这一因素形成了索结构计算理论的特点，也增加了分析的难度。

## 1.2 索结构发展

### 1.2.1 发展概述

索结构是最古老的结构形式之一。以悬索体系作为承重结构有着悠久的历史。古代的帐篷式房屋就是悬挂屋盖的雏形。中国是世界上最早应用悬索结构的国家之一。我国人民早在 1000 多年前就已经用竹、藤等材料做吊桥跨越深谷。西汉的汉书已有关于中国古代悬索桥的描写。最著名的悬索竹桥是中国四川灌县的安澜桥。安澜桥全长 320m，有 8 个悬索塔，建于公元前 3 世纪。古铁索桥的桥面多是悬链曲线式。最早的水平桥面悬索桥是一座在中国西南地区建于明永乐八年（1420 年）的悬索桥。明朝成化年间（1465~1487 年）已用铁链建成霁虹桥。霁虹桥总长 113.4m，跨 57.3m，宽 3.7m，底部承重铁链 16 根（现存 14 根），栏杆左右各 1 根铁链（见图 1-1）。最著名的中国铁索桥是四川大渡河上的泸定桥，建成于 1706 年，全长约 110m，宽 2.7m，可并列两辆马车，由 9 根桥面铁链和 4 根桥栏铁链构成、每根铁链重达 1.5t，锚固在直径 20cm，长 4m 的锚桩上（见图 1-2）。该桥比美洲第一座跨度为 21.3m 的铁链桥早 100 多年。

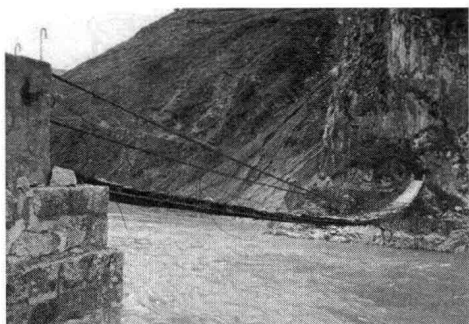


图 1-1 雾虹桥

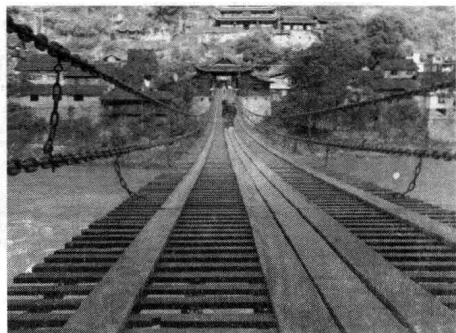


图 1-2 泸定桥

在欧洲,至少从 16 世纪便开始对悬索计算理论的研究,并在悬索桥、索道、输电线等方面进行了实践。欧洲第一座铁链吊桥是英国的蒂斯河桥,建于 1741 年,跨径 20m,宽 0.63m。西方工业革命产生了由铁绞线和钢绞线等新型高强度材料组成的索。1824 年,法国建造并且存在至今的横跨 Rhone 的悬索桥则采用了连续的绞线索。1855 年,美国建成尼亚加拉瀑布公路铁路两用桥。这座桥是采用锻铁索和加劲梁的吊车,跨径为 250m。第二次世界大战后,随着强度高、韧性好、抗疲劳和耐腐蚀性能好的钢材的出现,现代化的大跨悬索桥开始出现,并且自 20 世纪以来取得了可观的发展。20 世纪也成为陆续产生绞线悬索和拉索桥梁杰作的世纪。

由于钢的强度很高,很小的截面就能够承受很大的拉力,20 世纪初就开始用钢索来悬吊屋顶结构。在 20 世纪 50 年代开始,悬索结构在房屋建筑方面才取得较大进展,主要用于飞机库、体育馆、展览厅、会堂、车站、商场等大跨建筑和某些厂房建筑中。大量代表性建筑的出现,一方面,是由于日益增长的建造大跨房屋的实际需要;另一方面,也是由于建筑材料、计算方法、建造技术等方面问题的不断获得解决,经验不断积累的结果。

### 1.2.2 国外索结构

1953 年美国建成的 Raleigh 体育馆拉开了现代悬索屋盖应用于房屋建筑的序幕。

Raleigh 体育馆采用以两个斜放的抛物线拱边缘的鞍形正交索网结构,其圆形平面  $92\text{m} \times 97\text{m}$ ,索网格  $1.83\text{m} \times 1.83\text{m}$ ,稳定索  $\phi 12 \sim \phi 19$ ,拱跨比 1/10;承重索  $\phi 19 \sim \phi 22$ ,垂跨比 1/9,钢筋混凝土拱截面尺寸  $4.27\text{m} \times 0.76\text{m}$ ,与地面呈  $21.8^\circ$ 角,如图 1-3 所示。这一新型建筑形式极大地冲击了传统的建筑设计思想和概念。随后,双曲索网结构如雨后春笋般出现在欧美、苏联等国家。

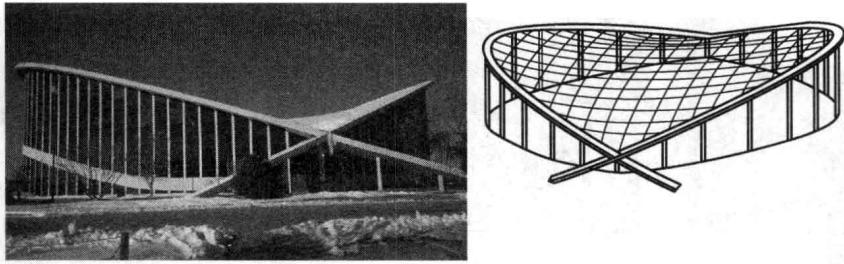


图 1-3 美国 Raleigh 体育馆

华盛顿杜勒斯机场候机楼建于 1958~1962 年间,是由 20 世纪中叶美国最有创造性的建筑师之一埃罗·沙里宁设计。该候机楼采用单层悬索体系,矩形平面 195.2m×51.5m,预应力索采用  $\phi 25$  圆钢,间距 3m,锚固于 15m 高的斜柱上,屋面采用预制轻质混凝土板,如图 1-4 所示。沙里宁运用象征手法设计的著名建筑,象征候机大厅将与飞机一起腾空翱翔。内部空间流动舒展,支撑结构布置在建筑的端部,顶棚和墙面全由玻璃覆盖。



图 1-4 华盛顿杜勒斯机场候机楼

1964 年落成的东京奥运会代代木体育馆是当代仿生建筑的杰出代表,这一个由瞬间的海浪漩涡而引发灵感的设计,其类似海螺的独特造型给人很强的视觉冲击。这座建筑采用的悬索结构来源于蜘蛛网的灵感,用数根自然下垂的钢索牵引主体结构各个部位,即悬挂在两个塔柱上的两条中央悬索及分列两侧的两片鞍形索网是屋盖结构的主要组成部分,劲性索采用高度为 0.5~1.0m 的工字钢。高耸的塔柱、下垂的主悬索和流畅的两片鞍形曲面组成了这座总面积达 20 000 多平方米的超大型雄伟别致的建筑物,成为建筑艺术的经典作品(见图 1-5)。日本建筑大师丹下健三设计的代代木体育馆是 20 世纪 60 年代的技术进步的象征,

它脱离了传统的结构和造型，被誉为划时代的作品。

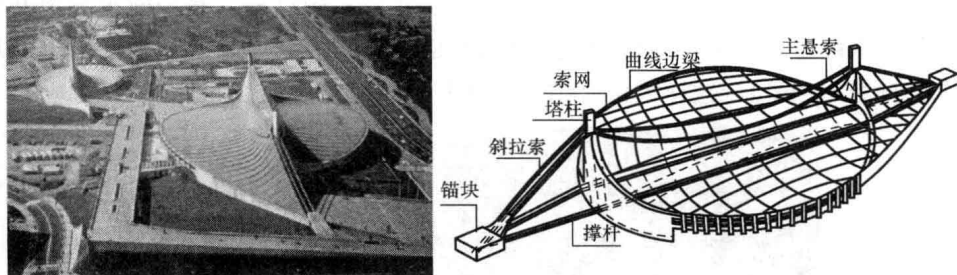


图 1-5 代代木体育馆

1966 年，瑞典工程师 Jawerth 首先在斯德哥尔摩滑冰馆中首先采用了一对承重索和稳定索组成被称为“索桁架”的专利体系（见图 1-6），这种平面双层索系结构很快在各国得以广泛应用。

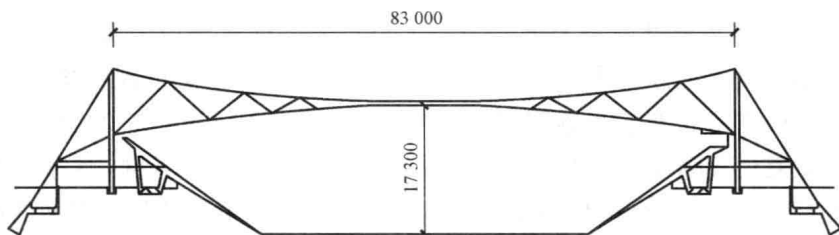


图 1-6 斯德哥尔摩滑冰馆

1967 年，苏联在列宁格勒建成列宁格勒纪念体育馆，其平面为圆形车辐式索桁架方案，直径 3m，索桁架的高跨比为 1/17，这在当时被列入世界上巨型体育建筑之一。为筹办第 22 届奥运会，前苏联又于 1980 年建成直径 160m 圆形车辐式索桁架列宁格勒比赛馆（见图 1-7），并在索桁架上弦铺设薄钢板，既作屋面防护，又使其成为与上弦索共同工作的索膜结构。



图 1-7 列宁格勒比赛馆

与此同时，在莫斯科也建成平面为椭圆形，长轴 224m，短轴 183m，覆盖面

积达  $38\,800\text{m}^2$ ，可容纳观众 4.5 万人的奥运会中心体育馆，如图 1-8 所示。该建筑采用了桁架式劲性索，并与屋面防护钢板组成索膜结构，是当时世界上几个巨型室内体育建筑之一，结构用钢量为  $126\text{kg}/\text{m}^2$ （其中，包括钢筋混凝土外环梁的配筋  $46\text{kg}/\text{m}^2$ ），这样大跨度结构屋盖其承重结构自重仅  $106\text{kg}/\text{m}^2$ 。



图 1-8 莫斯科奥运会中心体育馆

1972 年，德国慕尼黑奥林匹克主体育场由 45 岁的斯图加特建筑师拜恩施受 1967 年蒙特利尔世界博览会上德国馆一个小小的帐篷式结构的启发而创造，这个在世界建筑史上堪称杰作的大型建筑群，已经成为慕尼黑市现代建筑的代表。其新颖之处就在于它有着半透明帐篷形的棚顶，覆盖面积达  $85\,000\text{m}^2$ ，可以使数万名观众避免日晒雨淋。整个棚顶呈圆锥形，由 9 片鞍形索网，8 根平均高度 70m 的桅杆，长达 455m 的内边索及从桅杆顶端垂下用来吊挂各片索网的吊索组成。每一网格为  $75\text{cm}\times 75\text{cm}$ ，索网屋顶镶嵌浅灰棕色丙烯塑料玻璃，用氟丁橡胶卡将玻璃卡在铝框中，使覆盖部分内光线充足且柔和，如图 1-9 和图 1-10 所示。该结构首次采用铸钢节点，同时采用非线性分析进行设计计算。

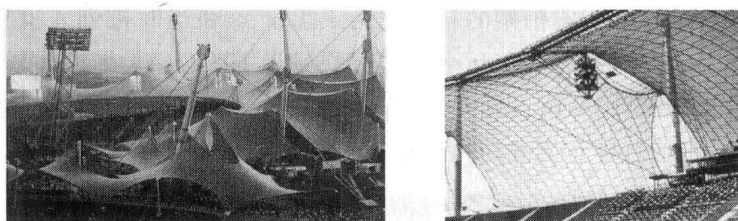


图 1-9 慕尼黑奥林匹克主体育场

1982 年建成的德国慕尼黑溜冰馆采用双层预应力鞍形索网结构，索网在中间悬挂于沿对称轴设置的钢拱，周边则与由带拉杆立柱支撑的边索相连。整个溜冰馆平面呈椭圆形，尺寸为  $87\text{m}\times 64\text{m}$ 。落地拱的跨度为 104m，由三角形截面的格构式钢管构成，如图 1-11 所示。双层索网是由  $\phi 11.5$  双根镀锌钢绞线组成，网格为 75cm，用铝合金夹具固定。边索采用  $\phi 60$  钢丝线。索网覆以木网格及白色透明的聚氯乙烯聚酯薄膜，使大厅具有良好的采光。

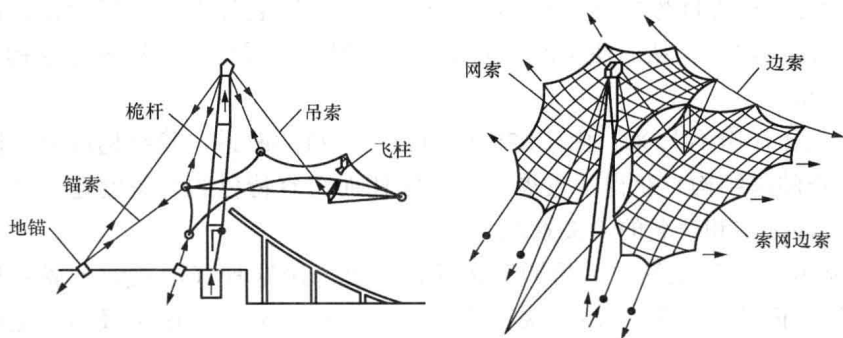


图 1-10 慕尼黑奥林匹克主体育场结构形式

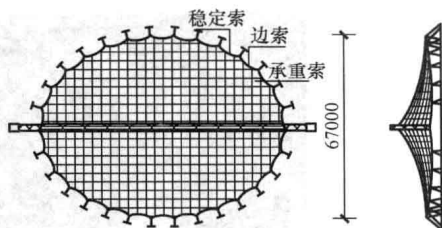


图 1-11 德国慕尼黑溜冰馆

1983 年建成的加拿大卡尔加里滑冰馆是继 Raleigh 体育馆后的又一个预应力索网结构，该体育建筑为目前世界上最大跨度的索网结构，如图 1-12 所示。其平面为椭圆形，长轴 135.3m，短轴 129.4m，采用单层双曲抛物面索网屋盖，承重索的垂度为 14m，采用一对  $12 \times \phi 15$  钢绞线，稳定索的拱度为 6m，采用  $19 \times$



图 1-12 加拿大卡尔加里滑冰馆

φ15 钢绞线。索网的网格为 6m，覆以 6m×6m 的轻混凝土大型屋面板。板缝间以现浇混凝土灌注，从而使屋面形成壳体。边缘构件采用弧形混凝土结构，形成巨大的环梁。

20 世纪 70 年代以来，由于结构使用织物材料的改进，膜结构或索—膜结构（用索加强的膜结构）获得了发展，许多宏伟而富有特色的大跨度建筑已成为当地的象征性标志和著名的人文景观。

1988 年东京建成的“后乐园”棒球馆，也采用这种气承式索—膜结构，其近似圆形平面的直径为 204m（见图 1-13）。除此之外，应用了极为先进的自动控制技术，而且采用双层膜结构，中间可通热空气融雪；中央计算机自动监测风速、雪压、室内气压、膜和索的变形及内力，并自动选择最佳方法来控制室内气压和消除积雪。

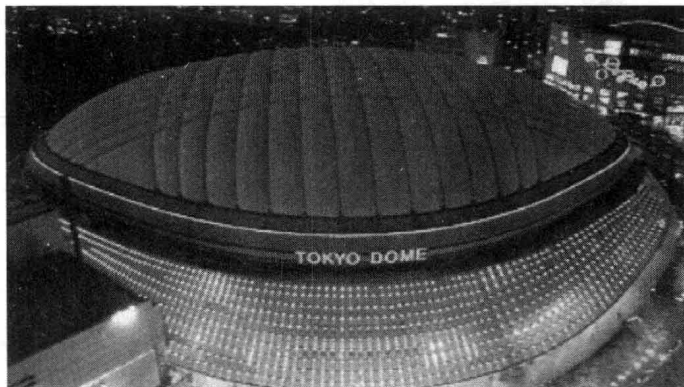


图 1-13 东京棒球馆

1986 年，索穹顶结构首次成功地应用于汉城奥运会体操馆和击剑馆，在国际工程界引起了巨大的轰动。汉城奥运会体操馆和击剑馆采用盖格（Geiger）体系索穹顶，包括径向上弦索（脊索）+环向下弦索+斜索和竖向撑杆。其中，膜材通过设在相邻脊索间的谷索张紧，如图 1-14 所示。

随后，美国工程师 M. Levy 继承张拉整体的构想，并采用 Fuller 最初的三角形网格构想，设计了 Hyper Tensegrity 索穹顶，1996 年美国亚特兰大奥运会主馆——“佐治亚穹顶”（Georgia Dome，1992 年建成）即为其代表作。佐治亚穹顶采用椭圆形索—膜结构，其准椭圆形平面的轮廓尺寸达 192m×241m（见图 1-15）。由联方形索网、3 根环索、桅杆和中央桁架构成，膜材张紧在菱形上弦索上，呈双曲抛物面形状。整个结构有 156 个全焊接节点，各自分布在 78 根桅杆的两端，其用钢量不到 30kg/m<sup>2</sup>。该结构为目前世界上最大跨度的体育馆屋盖结构，被评为 1992 年全美最佳设计。



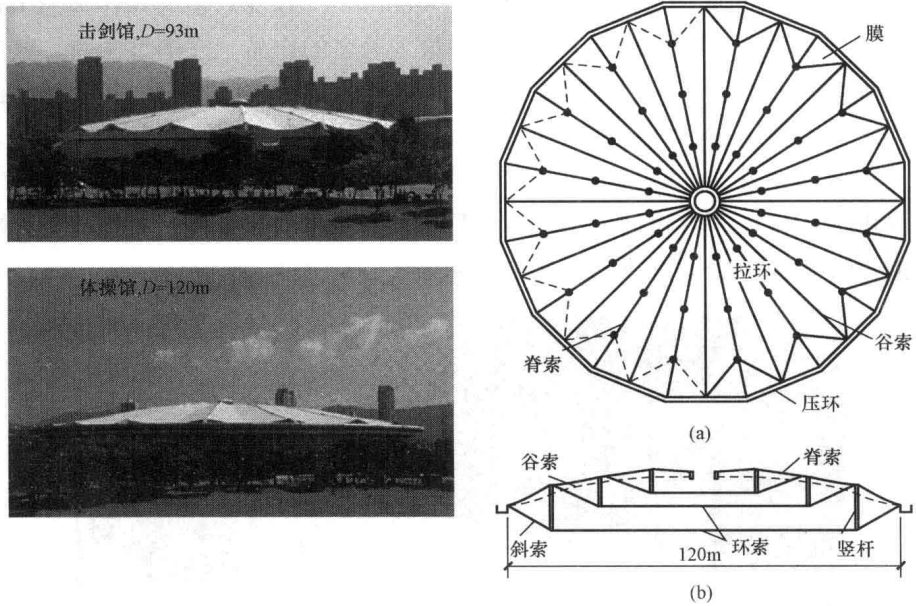


图 1-14 汉城奥运会体操馆和击剑馆

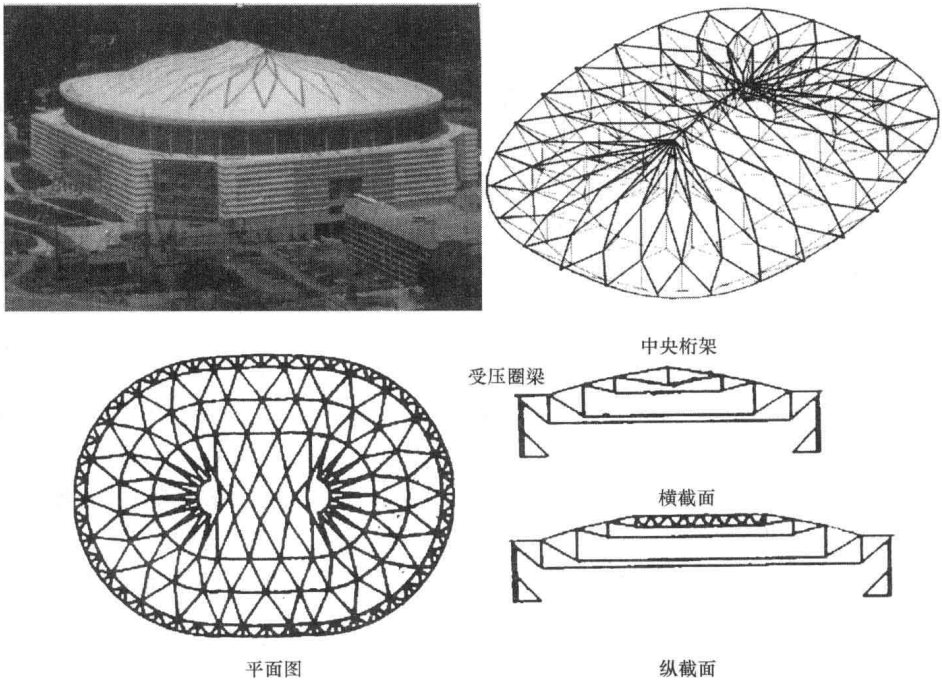


图 1-15 佐治亚穹顶