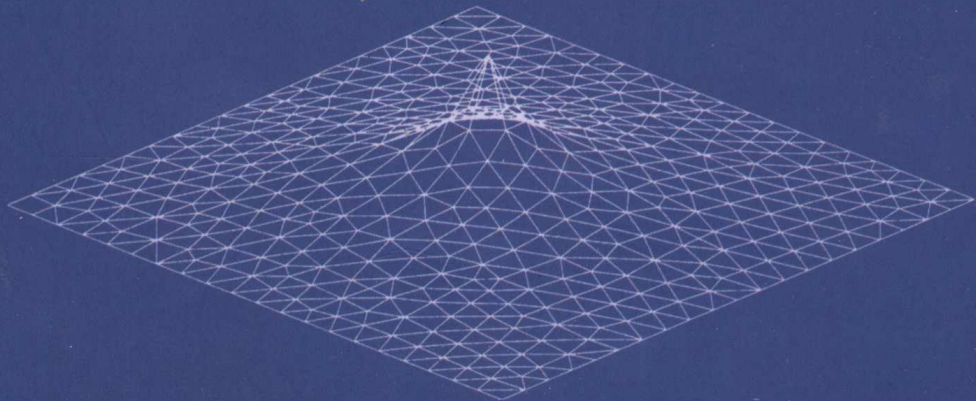
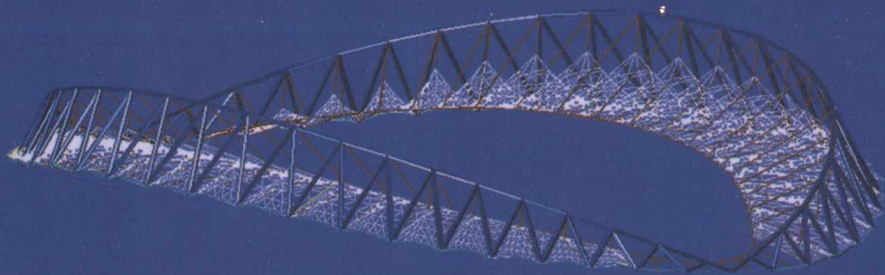
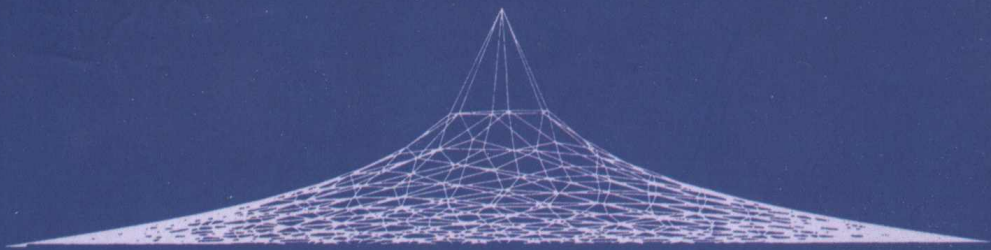


# 索和膜结构

张其林 编著



351.04  
3

同济大学出版社

# 索和膜结构

张其林 编著

同济大学出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

索和膜结构/张其林编著. —上海:同济大学出版社,  
2002.2

ISBN 7-5608-2358-0

I. 索… II. 张… III. 薄壳结构 IV. TU33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 079319 号

**索和膜结构**

作者 张其林 编著

责任编辑 方芳 责任校对 徐春莲 装帧设计 晓陆

---

出版发行 同济大学出版社  
(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)

经销 全国各地新华书店

印刷 江苏句容排印厂

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 9.75

字数 249600

印数 1—4000

版次 2002年2月第1版 2002年2月第1次印刷

书号 ISBN 7-5608-2358-0/TU·422

定价 16.00元

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

# 目 录

|                    |      |
|--------------------|------|
| 绪言                 | (1)  |
| 第一章 结构体系和基本定义      | (4)  |
| 1.1 概述             | (4)  |
| 1.2 结构体系           | (4)  |
| 1.3 分类和定义          | (12) |
| 1.4 形状确定问题         | (13) |
| 第二章 索的构成、材料及性能     | (15) |
| 2.1 索的构造和组成        | (15) |
| 2.2 索的材料           | (17) |
| 2.3 索的应力-应变关系      | (17) |
| 2.4 索的蠕变           | (18) |
| 2.5 索的疲劳           | (18) |
| 2.6 索的弯曲           | (19) |
| 2.7 设计取值           | (19) |
| 第三章 膜的材料及性能        | (20) |
| 3.1 膜材的种类          | (20) |
| 3.2 膜材的应力-应变关系     | (21) |
| 3.3 膜材的弹性常数测定试验    | (22) |
| 3.4 膜材的徐变和松弛特性     | (24) |
| 3.5 膜材的性能指标和设计取值   | (27) |
| 第四章 抗拉锚固           | (29) |
| 4.1 抗拉锚固类型         | (29) |
| 4.2 重力锚固体系         | (29) |
| 4.3 阻力锚固体系         | (30) |
| 4.4 抗拉桩体系          | (33) |
| 4.5 摩擦锚固体系         | (35) |
| 4.6 岩石锚固           | (37) |
| 第五章 索桁架的节点和构造      | (40) |
| 5.1 结构布置和刚度影响      | (40) |
| 5.2 主副索与支承结构的连接节点  | (41) |
| 5.3 索与索及与刚性压杆的连接节点 | (42) |
| 5.4 屋面和墙面板         | (44) |
| 5.5 索桁架的安装         | (44) |
| 第六章 单层索网的节点和构造     | (45) |
| 6.1 索网的形状、刚度和网格    | (45) |
| 6.2 索网格的节点构造       | (47) |

|                                |             |
|--------------------------------|-------------|
| 6.3 索网屋面构造 .....               | (48)        |
| <b>第七章 膜结构的连接构造 .....</b>      | <b>(49)</b> |
| 7.1 概述 .....                   | (49)        |
| 7.2 膜节点的类型和构造 .....            | (49)        |
| 7.3 膜边界的类型和构造 .....            | (54)        |
| 7.4 膜角点 .....                  | (58)        |
| 7.5 膜脊和膜谷 .....                | (61)        |
| <b>第八章 几何给定索杆体系的形状确定 .....</b> | <b>(64)</b> |
| 8.1 概述 .....                   | (64)        |
| 8.2 问题分类和公式描述 .....            | (64)        |
| 8.3 索杆结构形状确定的最小预应力方差原则 .....   | (67)        |
| 8.4 计算实例 .....                 | (68)        |
| 8.5 小结 .....                   | (68)        |
| <b>第九章 几何给定索梁体系的形状确定 .....</b> | <b>(71)</b> |
| 9.1 概述 .....                   | (71)        |
| 9.2 索梁结构形状确定的近似位移协调原则 .....    | (71)        |
| 9.3 索梁结构形状确定的精确位移协调原则 .....    | (72)        |
| 9.4 零状态几何给定的精确位移协调原则 .....     | (73)        |
| 9.5 应用实例 .....                 | (73)        |
| <b>第十章 索结构的稳定性能分析 .....</b>    | <b>(78)</b> |
| 10.1 初始平衡状态的稳定分析 .....         | (78)        |
| 10.2 工作状态的稳定设计 .....           | (79)        |
| 10.3 小结 .....                  | (85)        |
| <b>第十一章 索网形状确定的力密度法 .....</b>  | <b>(86)</b> |
| 11.1 曲面几何和力密度的关系 .....         | (86)        |
| 11.2 平衡曲面的求解 .....             | (87)        |
| 11.3 最小曲面的求解 .....             | (88)        |
| 11.4 数值算例 .....                | (88)        |
| 11.5 小结 .....                  | (89)        |
| <b>第十二章 索网形状确定的动力松弛法 .....</b> | <b>(90)</b> |
| 12.1 基本公式 .....                | (90)        |
| 12.2 求解平衡曲面和最小曲面的迭代方法 .....    | (91)        |
| 12.3 数值算例 .....                | (92)        |
| <b>第十三章 索网分析中的拉索单元理论 .....</b> | <b>(94)</b> |
| 13.1 概述 .....                  | (94)        |
| 13.2 拉索单元的位移函数 .....           | (94)        |
| 13.3 TL 坐标列式的拉索单元 .....        | (94)        |
| 13.4 UL 坐标列式的拉索单元 .....        | (97)        |
| 13.5 非线性平衡方程求解技术 .....         | (99)        |

|             |                       |              |
|-------------|-----------------------|--------------|
| 13.6        | 计算实例                  | (101)        |
| <b>第十四章</b> | <b>索网形状确定的特殊拉索单元</b>  | <b>(104)</b> |
| 14.1        | 预拉力给定的索网形状确定          | (104)        |
| 14.2        | 索段放样长度给定的索网形状确定       | (109)        |
| <b>第十五章</b> | <b>膜结构形状确定的应力密度法</b>  | <b>(114)</b> |
| 15.1        | 膜面几何和应力密度的关系          | (114)        |
| 15.2        | 膜结构平衡曲面的求解            | (116)        |
| 15.3        | 膜结构最小曲面的求解            | (116)        |
| 15.4        | 数值算例                  | (117)        |
| <b>第十六章</b> | <b>膜结构形状确定的动力松弛法</b>  | <b>(118)</b> |
| 16.1        | 基本公式                  | (118)        |
| 16.2        | 求解平衡曲面和最小曲面的迭代步骤      | (119)        |
| 16.3        | 帐篷形膜结构的形状确定           | (120)        |
| <b>第十七章</b> | <b>膜结构形状确定的有限膜单元法</b> | <b>(124)</b> |
| 17.1        | 基本假定                  | (124)        |
| 17.2        | 坐标系定义和坐标转换            | (124)        |
| 17.3        | 位移函数                  | (126)        |
| 17.4        | 几何条件                  | (127)        |
| 17.5        | 物理方程                  | (127)        |
| 17.6        | 平衡方程                  | (129)        |
| 17.7        | 迭代过程中皱折单元的处理          | (131)        |
| 17.8        | 计算实例                  | (132)        |
| <b>第十八章</b> | <b>膜结构裁剪的等效有限单元法</b>  | <b>(135)</b> |
| 18.1        | 概述                    | (135)        |
| 18.2        | 空间曲面展开平面的等效杆单元有限元法    | (135)        |
| 18.3        | 空间曲面展开平面的等效板单元有限元法    | (138)        |
| 18.4        | 考虑膜面应力释放的板单元有限元算法     | (141)        |
| 18.5        | 算例                    | (142)        |
|             | 参考文献                  | (145)        |

## 绪 言

索和膜结构中的主要受力单元是单向受拉的索和双向受拉的膜。我国是最早将索作为结构单元应用于工程中的。早在公元前 285 年,我国就出现了悬挂竹索桥梁,公元前 206 年建造了悬挂铁链桥,1703 年建造了由 9 根铁链悬挂的横跨大渡河的芦淀桥。西方工业革命产生了由铁绞线和钢绞线等新型高强材料组成的索。1824 年,法国建造并且存在至今的横跨 Rhone 的悬索桥就采用了连续的绞线索。20 世纪是产生绞线悬索和拉索桥梁杰作的世纪。1940 年建造的美国旧金山金门大桥(Golden Gate)具有 1280m 的主跨。目前,最长跨度的悬索桥梁是日本 1998 年建成的 Akashi-Kaikyo 桥梁,主跨长度 1991m。

索应用于房屋建筑结构的历史只有四十几年<sup>[1]~[7]</sup>。1953 年美国北卡罗里那州的 Raleigh 大剧院是最早采用双曲预应力索网屋顶的建筑(图 0.1)。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地出现在欧美、前苏联和我国。比较有影响的建筑结构有 1958 年的美国耶鲁冰球场和 1964 年的东京国际奥林匹克体育馆。然而,当时的这些建筑物虽然形式新颖,但结构体系还是传统的,因为这些建筑采用的还是预制、现浇或悬挂的混凝土重屋面,索网主要依靠屋面重量保持形状的稳定性和抵抗风吸力和避免颤振。

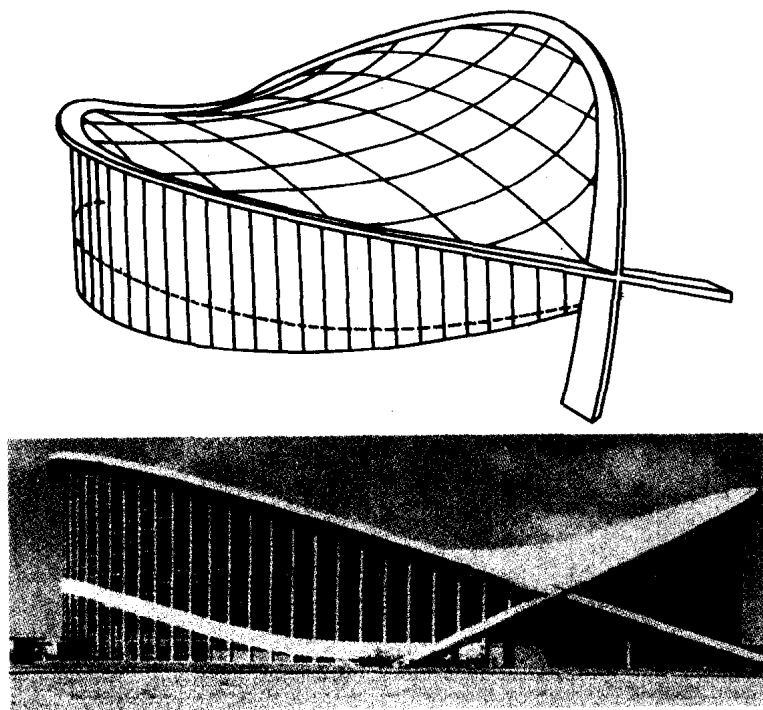


图 0.1 美国 Raleigh 大剧院

最早的、真正意义上的现代索和膜结构体系,可以认为是 1967 年 Frei Otto 为加拿大蒙特利尔展览会设计的德国大帐篷(German Pavilion,图 0.2),它通过支撑在不同高度桅杆上的预应力双曲钢索网覆盖了大片平面,以轻质透明有机织物片作为围护结构连接于索网下。预应力提供了索网形状稳定性和抵抗外部效应的刚度。1972 年,德国慕尼黑奥林匹克体育场是 Frei Otto 的另一个作品(图 0.3),它的一系列预应力索网覆盖了大约75000m<sup>2</sup>,最高的支撑桅杆高达 80m<sup>[8]</sup>。

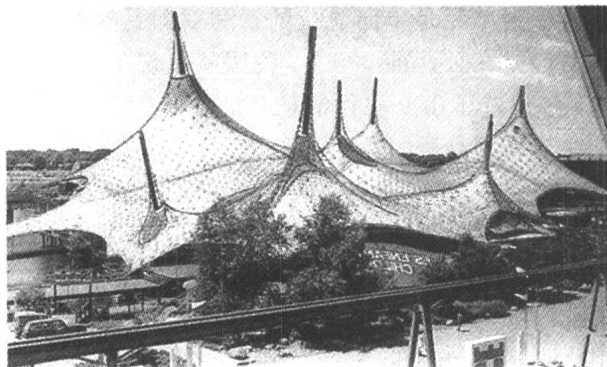


图 0.2 加拿大蒙特利尔展览会的德国大帐篷

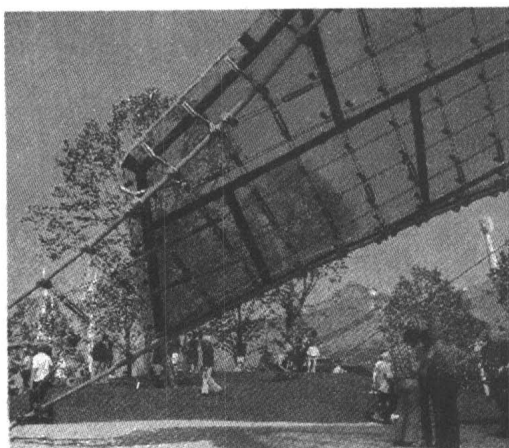
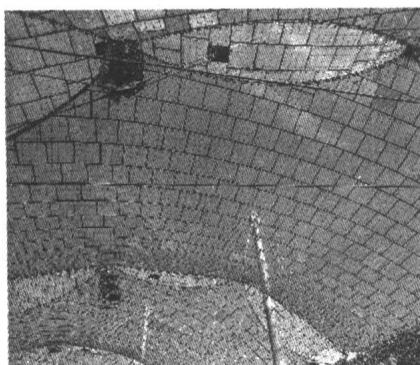


图 0.3 德国慕尼黑奥林匹克体育场



近三十年来,预应力索在结构体系中的作用和优势已为工程师所充分认识,各种新型索和膜结构体系得到了广泛的研究和实践。如今,索和膜结构已广泛应用于体育场馆、商场、大面积温室、公共建筑、厂房设施等各类土木建筑中。

索和膜结构的最大优点是它的经济性。结构的主要受力构件为高强度受拉索和轻质受拉膜材。在索结构中可以通过施加预应力合理地改变其他构件的受力分布,从而极大地提高了结构整体抵抗外部效应作用的性能,充分地发挥材料的潜能。膜结构可以轻易地跨越较大的跨度。一般而言,结构的跨度越大,索和膜结构的经济性越明显。

索和膜结构的第二个优点是建造和安装的简易性。技术工人可以在现场完成对索和膜的定位及安装。

索和膜结构的第三个优点是良好的抗火性。温度的增加只能慢慢地使索中预应力松弛,结构是逐渐失去张力而软化和坍塌的。因为首先损失的是索中预应力而不是钢材强度,所以,在火灾早期预应力索结构的抗火安全度比传统结构高。

综合考虑材料、劳动力和运输成本,索和膜结构更明显优于传统结构。

索和膜结构的几何放样尺寸、初始状态的几何形状和预应力分布是经典结构力学和传统有限单元方法所很难求解的。近几十年来,已有很多力学和工程研究者在这一领域进行了大量的工作,提出了一系列数值理论和分析技术<sup>[1]~[29]</sup>。本书总结和归纳了索和膜结构形状确定和膜结构裁剪方面的研究成果。其中,部分内容是作者近几年的研究成果,并已用于实际工程的计算和设计。这一部分是本书的重点。

在地震、风等外部效应作用下,索和膜结构工作状态的分析和计算可以采用一般非线性有限单元方法<sup>[9]~[29]</sup>。考虑到在结构工作状态计算分析的基本理论方面,索和膜结构与传统结构并无本质区别,本书在这方面没有展开叙述。但是,索结构的稳定问题在设计计算中必须引起充分的重视,鉴于现行钢结构规范并无对索结构进行稳定验算的具体规定,本书第十章提供了稳定设计的两个基本方法。

迄今为止,索和膜结构在发达国家的应用相对较多。严格意义上的新型索和膜结构应用在我国还刚刚开始。为了便于设计人员参考,本书列出了索节点、锚固体系的构造措施和实用公式,这部分内容主要来自文献[1],[30]~[34]。膜材料及节点构造的内容主要来自文献[35]。

纵上所述,本书包含以下内容:

1. 索和膜结构的类型、定义、材料、连接节点、抗拉锚固体系及构造(第一至第七章);
2. 索杆和索梁体系的形状确定理论及稳定设计方法(第八至第十章);
3. 索网形状确定的分析方法(第十一至第十四章);
4. 膜结构形状确定的分析方法(第十五至第十七章);
5. 膜结构的裁剪理论(第十八章)。

张莉博士、罗晓群博士、苏庆田博士、丁佩民博士、白洪涛博士参加了本书的部分理论推导和例题计算;王建博士为本书例题的实施提供了图形编辑和显示工具;丁洁民教授提供了本书的部分工程实例;张晓光、陆秀丽工程师对部分实例进行了有益的探讨;法拉利公司上海办事处虞政先生提供了膜结构节点构造的参考书籍;对以上各位先生的帮助,作者表示真挚的感谢。

本书可作为大专院校教师、学生以及设计、施工和制作单位工程技术人员的教学和研究参考用书。

# 第一章 结构体系和基本定义

## 1.1 概述

按照结构形式,索和膜结构可分为悬挂体系、斜拉体系、张弦梁屋架、平面索桁架、单层索网、空间索网格、整体张拉结构和张拉膜结构。按照结构刚度,索和膜结构可分为刚性结构、半刚性结构和柔性结构。按照分析模型,索和膜结构可分为预应力索杆体系、索梁体系、索网体系和膜体系。

半刚性结构和柔性结构的工作机理和性能与传统刚性结构差别较大。可以对半刚性和柔性结构定义不同的工作状态,通过形状确定分析求解结构的预应力平衡状态,并在此基础上分析结构的加工放样状态和外荷载作用下的工作状态。

## 1.2 结构体系

### 1.2.1 悬挂体系

悬挂体系中屋面荷载由竖直平面内简单悬挂的索系承受<sup>[36],[37]</sup>。根据不同的屋面平面形状,可以采用不同的悬挂形式。图 1.1 所示为典型的平行、圆形和混合布置的悬挂屋面体系。

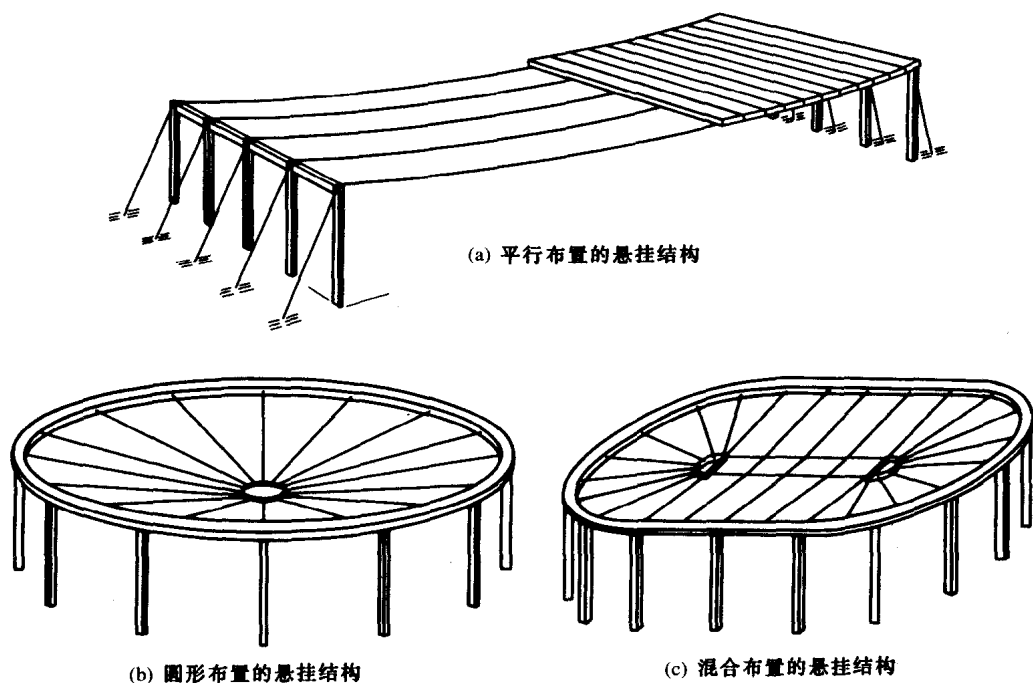


图 1.1 悬挂屋面体系

悬挂体系中的索系本身仅在单索竖直平面内存在刚度,在外荷作用下索系会产生刚体运动。所以,悬挂屋面必须采用很重的重屋面,或采用壳体屋面。显然,混凝土是悬挂屋面体系中最合适的屋面材料。屋面可以采用预制或现浇钢筋混凝土板。在现浇或安装混凝土屋面板前应尽量给索施加一定的预应力,以增加屋面刚度并防止施工完毕后混凝土开裂。对圆形屋面,可下拉中间的拉力环以给索施加预应力,在混凝土施工完毕后再释放下拉力。对于预制板情况,还可在浇灌预制板间拼缝前放置附加荷载以施加预应力,待板缝浇注凝固后再除去附加荷载。

### 1.2.2 斜拉体系

斜拉体系中屋面结构本身一般为刚性传统结构,如空间网架、平面桁架或梁系。斜拉索可以一端连接于伸高的桅杆或下置的立柱上,另一端连接于屋面结构;也可以两端连接于屋面结构的下弦节点上。图 1.2 所示为斜拉体系示意图。

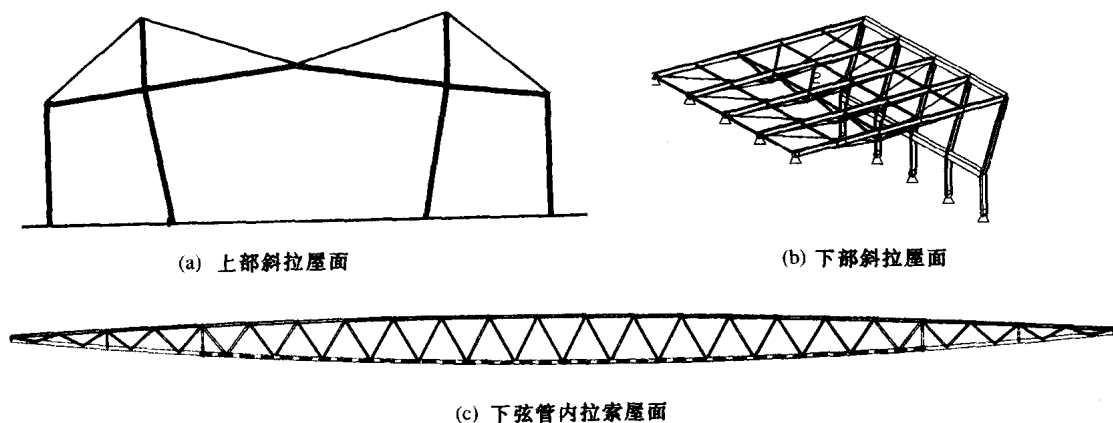


图 1.2 斜拉屋面体系

设置张拉索可以增加屋面结构的刚度,给屋面杆件施加预应力以优化外荷作用下杆件的内力分布,改善屋面的动力性能<sup>[38],[39]</sup>。

### 1.2.3 张弦梁屋架

张弦梁屋架中预应力索一般直接充当屋面结构的下弦,而结构上弦一般仍为刚性梁系或桁架<sup>[40]</sup>。图 1.3 所示为上弦采用组合截面钢梁、下弦采用预应力拉索的某国际机场候机楼屋架。图 1.4 为单层和多层张弦梁屋架。

张弦梁屋架实际上是一种刚性钢构件-柔性索的组合结构体系。注意到索一方面完全充当了下弦结构单元,另一方面又通过腹杆对上弦刚性构件施加了预应力,从而提高了上弦构件承载能力。所以,这种结构中刚性上弦截面可以比同等跨度传统屋架中的上弦截面小。

### 1.2.4 平面索桁架

张弦梁屋架中的预应力索只是屋架结构中的下弦,而平面索桁架的上下弦都为预应力索。索的上弦是受力主索,下弦是稳定副索。顾名思义,荷载主要由上弦主索承受,副索主

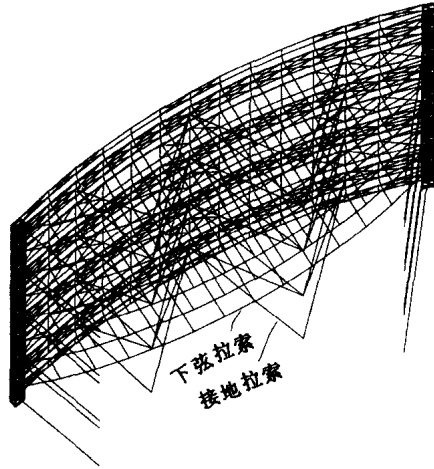
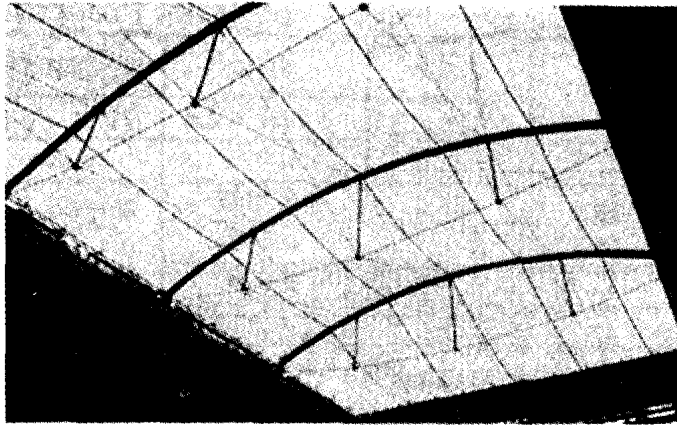
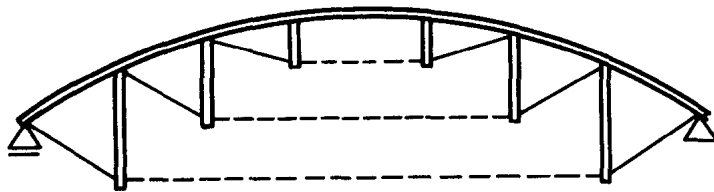


图 1.3 某国际机场候机楼的张弦梁屋架



(a) 单层张弦梁屋架



(b) 多层张弦梁屋架

图 1.4 单层和多层张弦梁屋架

要起稳定作用<sup>[41]~[46]</sup>。索桁架的几种典型形式见图 1.5 所示。

对于平面为梯形、圆形、椭圆形等形状的索桁架,还可采用不同的索桁架几何布置方案。图 1.6 显示了圆形屋面的平面索桁架布置图。

平面索桁架还可以垂直向布置作为围护结构的支承结构体系来抵抗水平向荷载的作

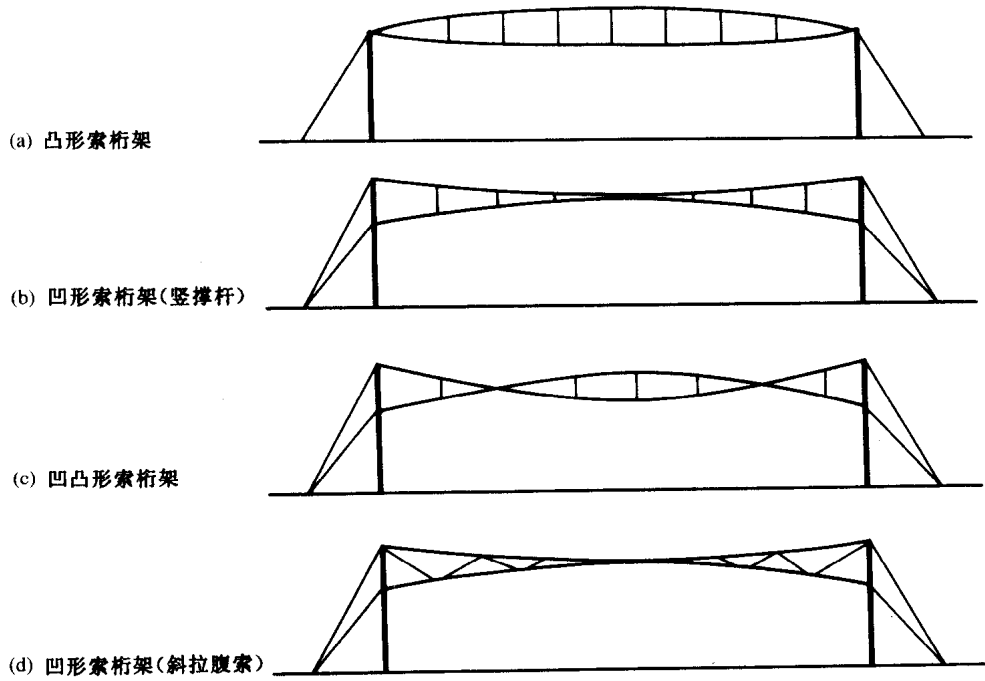
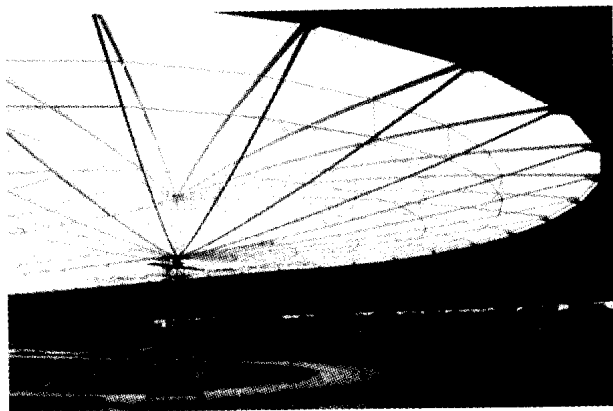
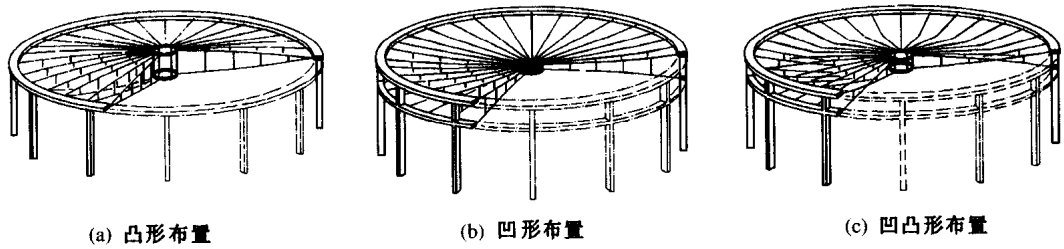


图 1.5 索桁架类型



(d) 凸形布置索桁架工程实例

图 1.6 圆形屋面中的平面索桁架布置图

用。点支式玻璃幕墙中广泛采用了这类结构<sup>[47]~[49]</sup>,见图 1.7 所示。

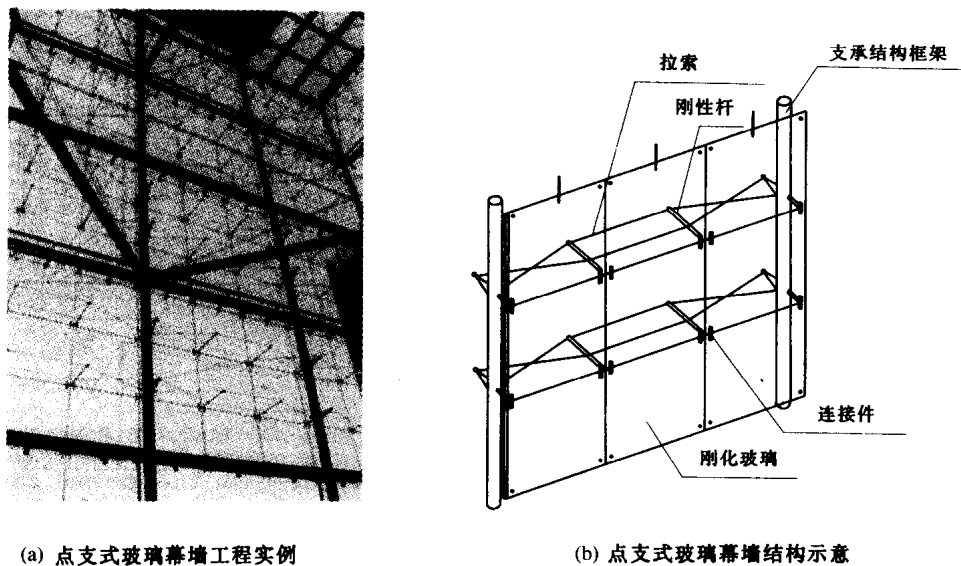


图 1.7 点支式玻璃幕墙中的支承结构体系

### 1.2.5 单层索网

单层索网中,受力主索和稳定副索在同一个层面内,但布置在不同的方向<sup>[50]~[71]</sup>。单层索网结构按其曲面形状可分为马鞍形和帐篷形,如图 1.8 所示。

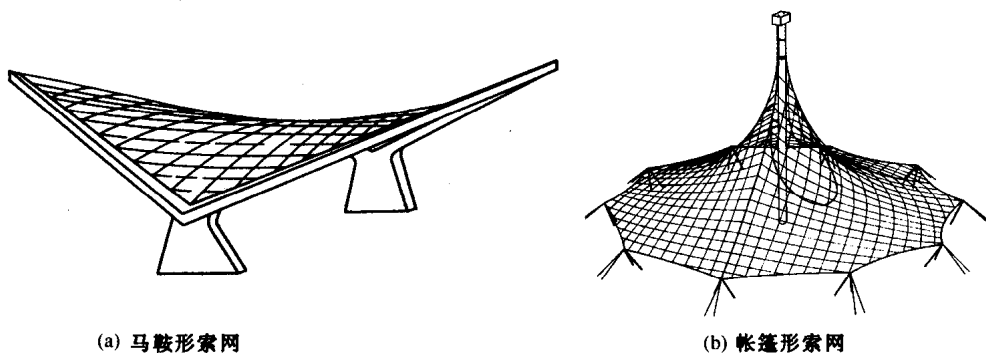


图 1.8 马鞍形索网和帐篷形索网

马鞍形索网的边界可以是软边界,也可以是刚性边界。帐篷形索网和软边界的马鞍形索网的构造和安装要比刚性边界的马鞍形索网复杂得多。

早期某些单层索网上的屋面也有采用现浇和预制钢筋混凝土板的。但同悬挂屋面不同,单层索网在预应力施加后形状是稳定的,所以,它可以采用包括波形钢板在内的各种轻质屋面板。

### 1.2.6 空间索网格

空间索网格是一种双层索网,或多向索桁架<sup>[1],[72]</sup>。较为经济和合理的索网格应该是两向、最多三向的凹形、凸形或凹凸形体系。索桁架的几何限制了索网格一般适用于圆形或椭圆形平面的屋面。图 1.9 给出了几种常用索网格。

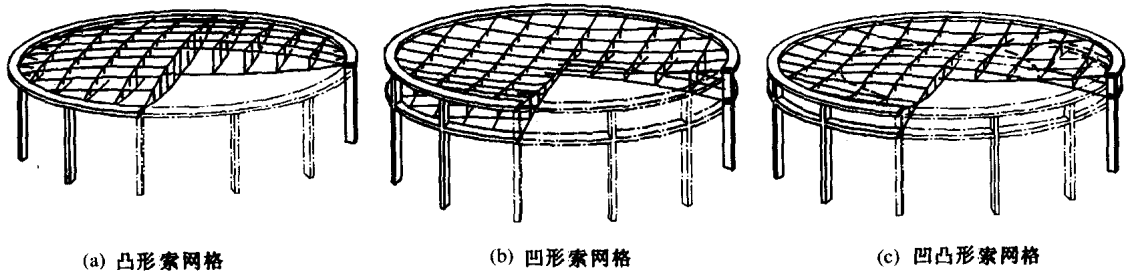


图 1.9 空间索网格体系

### 1.2.7 整体张拉结构

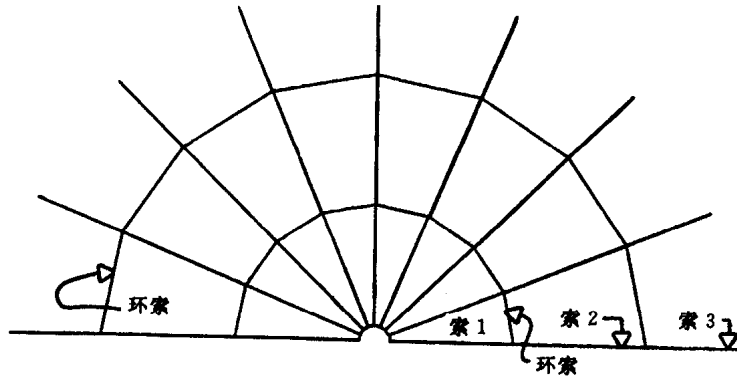
整体张拉结构是一种特殊的空间预应力索体系。同空间索网格不同,它既不是由两向或三向索桁架组成,也不是由两层索网组成。它的传力途径是空间多向和多层次的<sup>[73]~[94]</sup>。迄今为止所建成的为数不多的整体张拉结构只有两种类型<sup>[73],[74]</sup>: Geiger 索穹顶<sup>[75]</sup>和 Fuller 三角索穹顶<sup>[76],[77]</sup>,分别见图 1.10 和图 1.11 所示。

分析研究表明: Fuller 三角索穹顶似乎能生成较大的结构刚度,但造价较高且安装复杂。相比之下, Geiger 索穹顶是最简单的结构形式,对膜材尺寸误差不敏感,屋面形状的设计布置非常灵活,但在不均匀荷载及集中荷载下刚度会降低较多。

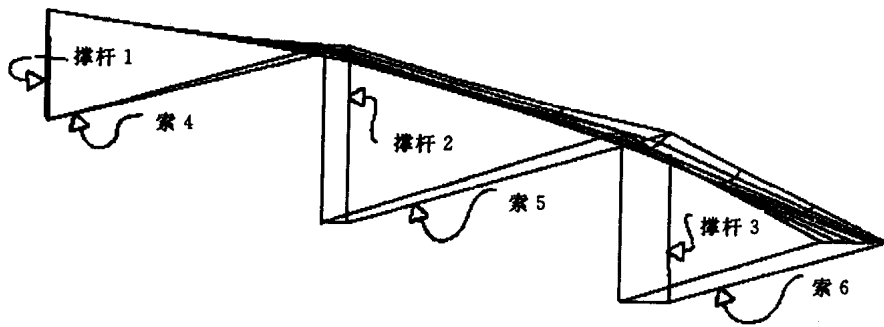
目前建成的所有整体张拉索穹顶都采用膜材作为屋面材料。其主要原因在于膜材是最轻的屋面材料。由于质轻特别适合索穹顶的结构特点,在大跨度情况下将有极大的经济效益。

### 1.2.8 张拉膜结构

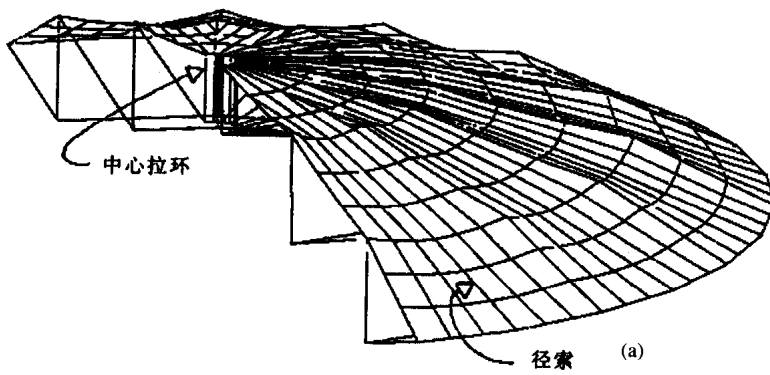
膜结构有三种类型:气承式或充气膜结构、框支式膜结构和张拉膜结构。气承式膜结构依靠膜曲面内外气压差来维持膜曲面的形状;框支式膜结构中膜面仅仅起框架结构的围护作用,框架结构可以是传统的刚性结构,也可以是前述各类索结构;张拉膜结构中膜曲面通过预应力维持自身形状,膜既是建筑物的围护体又作为结构来抵抗外部荷载效应。借助于若干个由刚性构件或索提供的支承点或支承线,张拉膜面可以覆盖较大的平面<sup>[95]~[108]</sup>。迄今为止,全世界已建成有影响的膜结构近百个<sup>[112]</sup>。其中,沙特阿拉伯的阿伯杜拉阿齐兹国王机场候机楼(1981)覆盖面积达 44 万  $m^2$ ,英国的千年穹顶(1999)覆盖面积达 8 万  $m^2$ 。近几年来,张拉膜结构在我国已进入了迅速发展阶段,图 1.12 给出了近期国内已建成的一个典型的张拉膜结构实例。



(a) 平面图



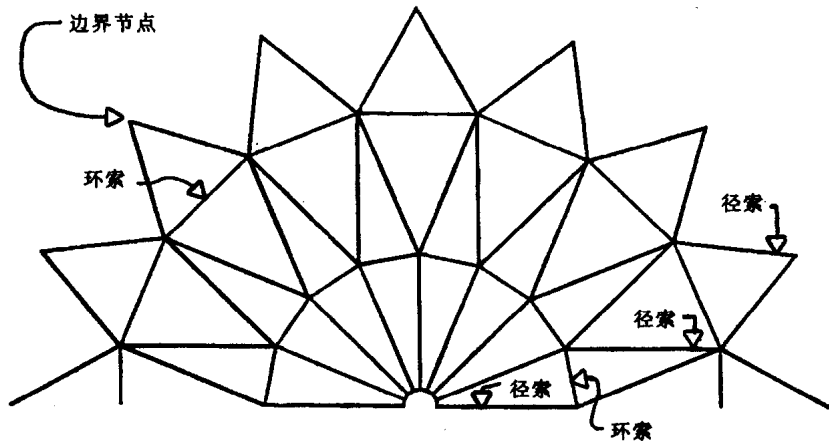
(b) 立面图



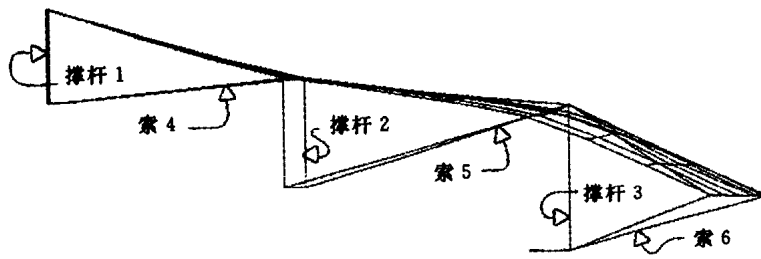
(c) 透视图

图 1.10 Geiger 索穹顶

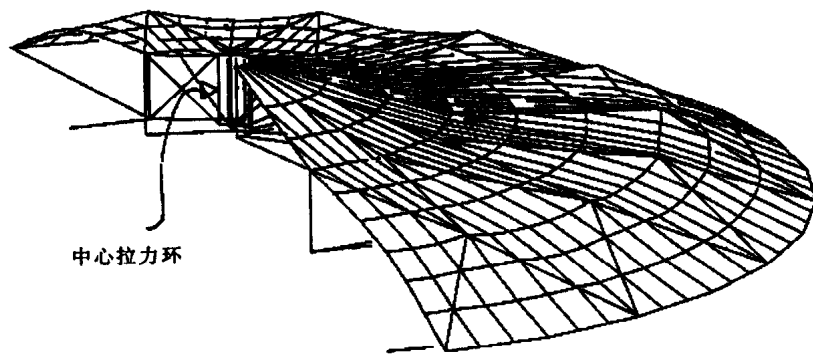




(a) 平面图



(b) 立面图



(c) 透视图

图 1.11 Fuller 三角索穹顶