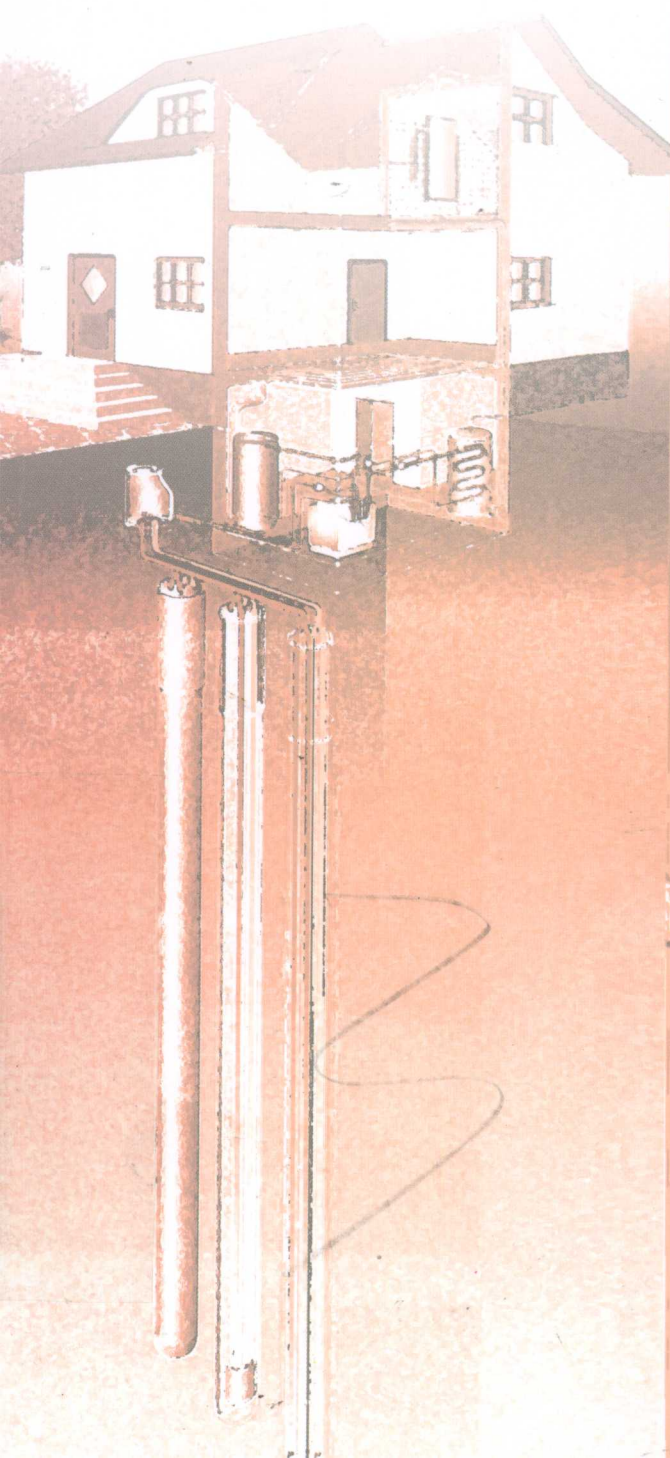


张祖刚 陈衍庆 主编
中国建筑工业出版社

高校建筑类专业参考书系

The reference book series for the major of architecture in universities

建筑技术新论



TU/75

2008

张祖刚 陈衍庆 主编
中国建筑工业出版社

高校建筑类专业参考书系

The reference book series for the major of architecture in universities

建筑技术新论



图书在版编目 (CIP) 数据

建筑技术新论 / 张祖刚, 陈衍庆主编. —北京: 中国建筑

工业出版社, 2007

(高校建筑类专业参考书系)

ISBN 978-7-112-09401-1

I. 建… II. ①张… ②陈… III. 建筑工程—工程技术—高等

学校—教材 IV. TU

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 144782 号

责任编辑: 陈 桦 吕小勇

版式设计: 付金红

责任校对: 陈晶晶 梁珊珊

高校建筑类专业参考书系

建筑技术新论

张祖刚 陈衍庆 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京广厦京港图文有限公司设计制作

北京市彩桥印刷有限责任公司印刷

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张: 31 1/4 字数: 758 千字

2008 年 1 月第一版 2008 年 1 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 42.00 元

ISBN 978-7-112-09401-1

(16065)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

《建筑技术新论》编委会

主 编：张祖刚 陈衍庆

编写人员：

第1章 同济大学 李国强、吴明儿、孙飞飞、罗永峰、陈素文

第2章 哈尔滨工业大学 李桂文、蔡洪彬、张岩、林学军

第3章 东南大学 柳孝图

第4章 清华大学 栗德祥、袁铁声、周正楠

第5章 重庆大学 周铁军、林岭

第6章 山东建筑大学 刁乃仁

第7章 西安建筑科技大学 赵西平、郭华、杜高潮、杨柳、万杰

第8章 华中科技大学 余庄

第9章 华中科技大学 余庄

第10章 欧洲建筑技术学院 黄琲斐

FOREWORD 前言

促进社会发展的基本动力是生产力，促进建筑发展的基本动力是建筑技术，建筑发展的历史说明了这一原理。近100多年来，建筑发展的历程充分说明了新技术、新材料、新结构、新设备、所起到的关键作用。特别是近几十年来，生态、能源、电子等新技术在建筑中的应用与发展，更加促进了建筑的迅速发展。正是由于这些新技术的迅速发展，才能使建筑发展符合当今世界自然进化的规律，即低耗高效，建立在可持续发展的基础之上。

当前，中国建筑的发展，缺少中国特色的建筑理论予以指导，更缺少的是物质基础，即建筑新技术、新材料、新结构、新设备的创新研究及其产品生产。在校学生所学习的建筑技术课程内容以及从事建筑设计工作的建筑师所掌握了解的建筑技术知识，尚不够先进或全面。我国是一个缺地、缺水的国家，中国人口占世界总人口的21%，但耕地仅占全球的7%，淡水资源亦仅占全球的7%。在2006年3月通过的我国国民经济和社会发展规划中，提出了“全面贯彻落实科学发展观”、“建设资源节约型、环境友好型社会”的战略思想和发展目标。为了更好地贯彻符合国情的建设发展方针政策，为了提供给建筑学专业学生和建筑师需要的比较系统的建筑新技术知识，我们组织编写这本《建筑技术新论》。

鉴于现代建筑的综性质，需要建筑多专业的合作共同来完成，建筑学专业学生和建筑师要具备全面的建筑各专业的基本知识，为此在中国建筑学会建筑师分会建筑技术专业组的大力支持下，我们特别邀请对建筑技术相关专业有深入研究的教授、学者分篇撰写。各篇的作者是：第1章“新结构”同济大学李国强教授等，第2章“新材料、新部品、新构造”哈尔滨工业大学李桂文教授等，第3章“建筑物理环境”东南大学柳

孝图教授，第4章“可持续建筑技术”清华大学栗德祥教授等，第5章“建筑安全设计”重庆大学周铁军教授等，第6章“建筑环境与设备”山东建筑大学刁乃仁教授等，第7章“建筑节能与节地”西安建筑科技大学赵西平教授等，第8章“建筑智能技术”，第9章“计算机辅助建筑性能设计”华中科技大学余庄教授，第10章“西方建筑技术发展”欧洲建筑艺术学院黄琲斐博士等。还需要提出的是，在这本书立项、编写和出版过程中，得到陈桦编辑的大力帮助与支持，此书各篇作者在校都有繁重的教学与研究任务，于百忙之中编写专题篇，在这里向他们以及责任编辑表示衷心的感谢。

这本书的内容，着重介绍近一时期的建筑新技术之情况，所举实例大都是本世纪前后的实践，它将有助于提高中国建筑的发展水平。但这是现阶段的成果，适合我国各地区的“低耗高效”的“适宜技术”等内容尚不够多，随着我国创新研究的进展，会不断补充这些新的内容，我们期待着。

张祖刚 陈衍庆
2007年3月

CONTENTS

目录

第1章 新结构	1
1.1 大跨度索膜结构	1
1.2 高层建筑钢—混凝土混合结构	10
1.3 玻璃结构	19
1.4 结构抗震新技术	37
第2章 新材料 新部品 新构造	53
2.1 墙体材料	53
2.2 屋面材料	61
2.3 门窗	66
2.4 地面材料	75
2.5 防水材料	77
2.6 防护材料	81
2.7 吸声、隔声材料	84
2.8 防火	87
2.9 相变材料	93
2.10 通风	94
第3章 建筑物理环境	101
3.1 建筑物理环境概述	101
3.2 热环境	106
3.3 光环境	117
3.4 声环境	127
3.5 空气环境	139
第4章 可持续建筑技术	151
4.1 可持续建筑基本概念	151
4.2 建设对环境的生态化补偿	157
4.3 围护结构体系设计	164
4.4 室内环境控制设计	166
4.5 能源优化策略	169
4.6 生态技术策略应用案例	170
第5章 建筑安全设计	189
5.1 建筑安全设计的内涵及外延	189

5.2	国内外发展现状	191
5.3	建筑灾害机理分析	194
5.4	建筑安全设计的策略	199
5.5	小结	223
第6章	建筑环境与设备	227
6.1	暖通空调新技术	227
6.2	室内空气环境控制技术	240
6.3	暖通空调节能与可再生能源技术	250
6.4	建筑节水新技术	264
6.5	建筑节能节电新技术	270
第7章	建筑节能与省地	279
7.1	建筑节能概论	279
7.2	建筑节能理论	283
7.3	节能建筑构造	293
7.4	建筑气候与节能	305
7.5	省地建筑	311
第8章	智能建筑技术	319
8.1	智能建筑的应用目标	320
8.2	智能建筑各子系统的介绍	326
8.3	智能建筑与绿色建筑的关系	333
第9章	计算机辅助建筑性能设计	345
9.1	计算机辅助建筑性能设计的发展趋势	345
9.2	计算机辅助建筑性能设计的方法	347
9.3	DOE简介	359
9.4	CFD模拟与建筑环境	370
第10章	西方建筑技术发展	383
10.1	低能耗节能建筑	383
10.2	被动式节能住宅	411
10.3	老建筑节能更新	436
10.4	太阳能在建筑中的利用	459
10.5	地热能利用	485

第1章 新结构

ONE

1.1 大跨度索膜结构

1.1.1 索结构

索通过拉力承受荷载, 不存在屈曲失稳, 极限承载力可以达到拉伸强度, 是一种效率很高的承载材料^[1]。高强度的索很久以前就被广泛地应用于桥梁结构中, 目前世界上绝大多数的大跨度桥梁都采用拉索。

索应用于建筑结构的史并不长。随着建筑物跨度的不断增加, 要求结构轻型, 承载效率高, 特别是体育场馆、会展中心、车站、机场等公共设施的增加, 索在建筑结构中得到了越来越多的应用, 结构形式也日益丰富^[2]。

(1) 索材料

索由一定数目的高强度钢丝经绞合而成, 也称钢丝绳。钢丝是索的最小单位, 由含碳量为 0.6% ~ 0.8% 的优质碳素钢经多次冷拔而成, 直径一般为数毫米, 抗拉强度可达 $1.6\text{kN}/\text{mm}^2 \sim 1.8\text{kN}/\text{mm}^2$ 。索的绞合方法通常是先将钢丝绞合成钢丝股, 再将钢丝股绞合成索。索以钢丝股的数目和每股中钢丝的数目进行分类, 截面规格用数字表示, 比如 7×19 表示该索由 7 股绞合, 每股有 19 根钢丝组成。

索也可用钢丝直接绞合, 比如规格 1×7 的索是由 7 根钢丝绞合而成的, 也被称为钢绞线。钢绞线的外面数层也有用 Z 字形或梯形截面的钢丝绞合而成的, 这样可提高防水性能。

如果钢丝不进行绞合而是直接进行平行集束, 由此构成的索称为平行钢丝束。

由于钢丝绞合后会留下一定空隙, 因此索的抗拉刚性以平行钢丝束为最好, 钢绞线次之, 钢丝绳最差, 而索的柔软性则正好相反。图 1-1 给出了以上 3 种索的截面形式。除此之外, 高强度钢棒在一些情况下可代替索承受轴向拉力。

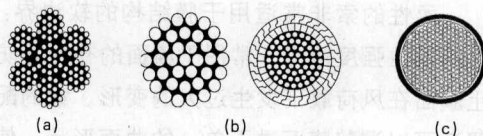


图 1-1 索截面

(a) 钢丝绳 7×19 ; (b) 钢绞线; (c) 平行钢丝束

(2) 索网结构

索网结构由两个方向的索经张拉形成稳定的索网格曲面, 可用于屋盖结构。为保证曲面的稳定, 曲面上任意一点两个方向的拉索具有相反的曲率, 即索网形成的曲面是一个负高斯曲面, 例如图 1-2 所示的马鞍形曲面。具有相反曲率的两方向拉索既可以有效地抵抗沿曲面法线方向的压力, 同样也可以有效地抵抗风吸力, 因此负高斯曲面具有很好的整体刚性。

索网曲面上的任意一点应满足两方向拉索经张拉后索张力的平衡条件。对于给定的边界条件和索的预张力, 可以通过平衡条件计算出曲面形状, 这个过程称为曲面的找形分析。图 1-3 为通过有限元计算找形得到的索网曲面形状。

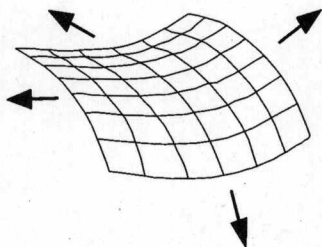


图 1-2 马鞍形曲面

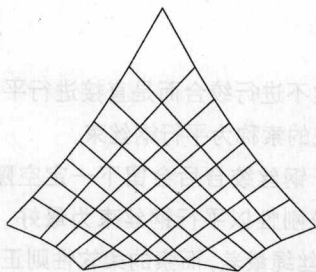


图 1-3 索网曲面计算例

(3) 索膜结构

柔性的索非常适用于膜结构的软边界；索的抗拉强度很高，常用于膜面的补强并防止膜面在风荷载下发生过大的变形。索的配置还可以调整膜面过于单一的曲面形状，使曲面形状富于变化，满足建筑对造型的要求。

图 1-4 是位于巴黎新商业区新凯旋门 (Grande Arche) 中的索膜结构。膜结构整体由众多的索悬吊于空中，寓意为浮云。索的连接处采用了很多可自由回转的铸钢节点，图 1-5 为典型连接节点。

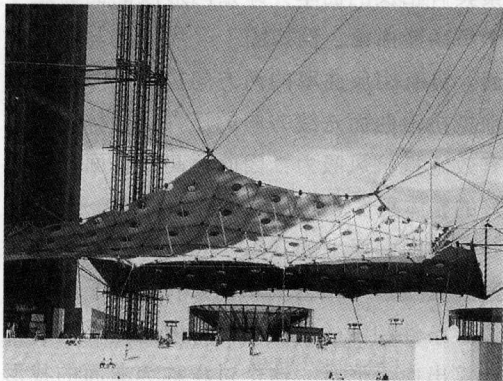


图 1-4 巴黎新凯旋门中的“浮云”

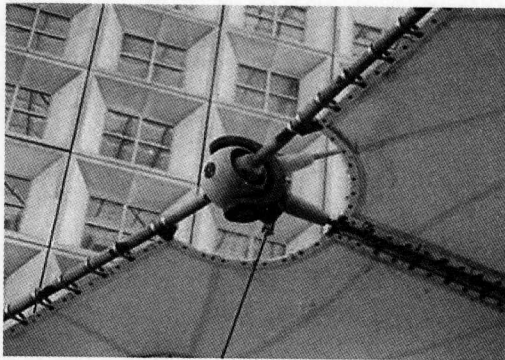


图 1-5 可自由回转的索节点

(4) 索杆结构

索杆结构指承受拉力的索和承受压力的杆组成的杆系结构，长度较短的索常常用直径的高强度钢棒代替。由索杆组成的杆系结构通常必须进行张拉施工，在索中导入一定大小的预张力。预张力的作用一方面提供此类杆系结构的初始刚度以保证结构的稳定，例如图 1-6 中长度 l 、预张力 T_0 的索在水平位置时具有初始刚度 $4T_0/l$ ，这种由内力引起的刚性称为几何刚性。预张力的另一重要作用是使索能够在预张力消失之前承受名义上的压应力。由于预张力使得索可以看作受压杆件，真正压杆数目大为减少，因此索杆结构是一种效率非常高的结构形式。

张拉整体结构是索杆结构的一种。严格意义上的张拉整体结构要求压杆之间互不接触，通过结构的预张力产生的几何刚度达到稳定，因此杆件总数可以少于 Maxwell 关于稳定结构的最少杆件数 ($n \geq 3d - 6$; n 为杆件数， d 为节点数)。图 1-7 是某一稳定的张拉整体结构模型，杆件数为 24，少于 Maxwell 要求的最少杆件数 30。这类张拉整体结构虽然杆件数可以做到极端的少，但由于预张力产生的几何刚性远小于弹性变形产生的弹性刚性，因此在荷载作用下结构整体会产生很大的变形，在建筑结构中应用不多。通过增加一些拉索或允许压杆接触可以构成形式多样的索杆结构体系，以满足建筑结构对结构刚度的要求。

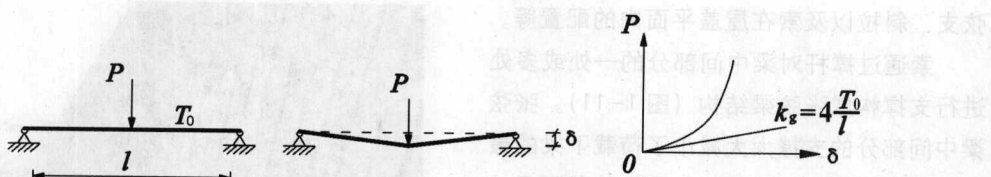


图 1-6 预张力 T_0 与初始几何刚度 k_g

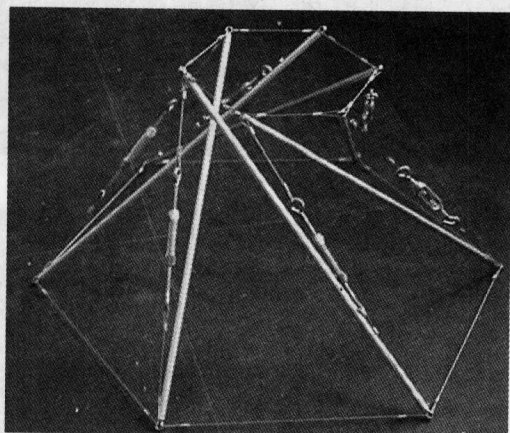


图 1-7 处于稳定状态的张拉整体结构(节点12, 索18, 杆6)

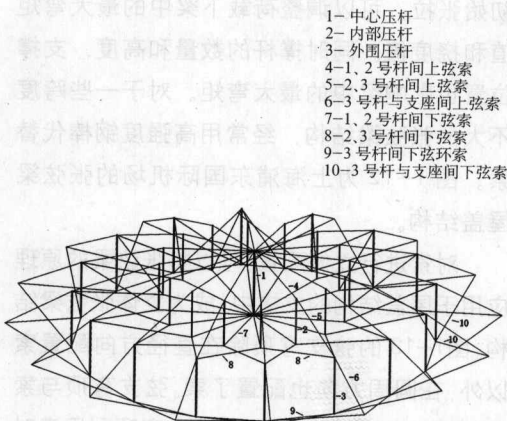


图 1-8 日本天城索穹顶中索与杆的配置

索杆结构的设计分析以及施工有较高的难度。结构的体型以及杆件的配置应保证拉索能有效张紧, 拉索张紧状态下结构有足够的刚度, 结构分析应包含结构预张力分析和张拉施工分析内容, 张拉施工时应进行有效地监测和控制。

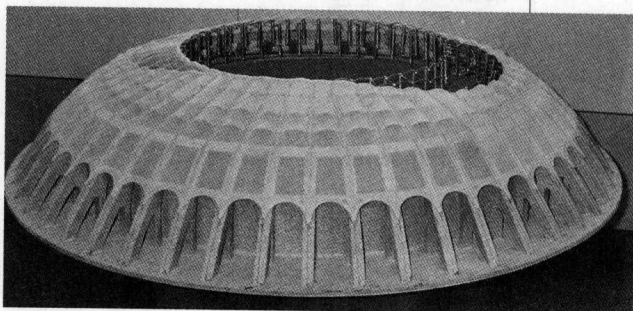


图 1-9 2002 年世界杯足球赛韩国釜山体育馆模型

索穹顶是张拉整体结构的一个应用实例, 目前全世界建有数座索穹顶, 索与杆的配置方法各有不同, 图 1-8 为日本天城索穹顶中索与杆的配置图。2002 年日韩世界杯足球赛场馆大量采用了索杆和索膜结构, 图 1-9 与图 1-10 是韩国釜山体育馆的结构模型, 采用撑杆、索和膜组合的张拉结构体系。釜山体育馆的平面为直径 228m 的圆形, 穹顶中间有 180m × 152m 的开口以满足草坪对阳光的需求。施工前对施工的每一步都进行过预先确定, 施工过程中对力和位移进行连续检测和控制。

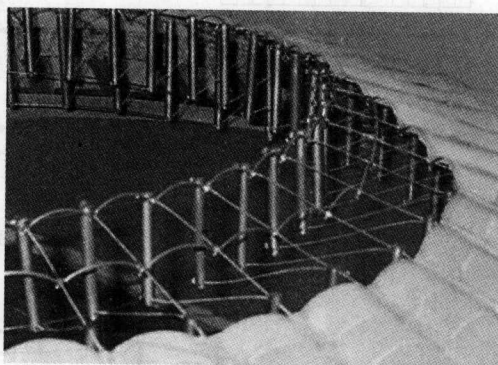


图 1-10 韩国釜山体育馆撑杆、索和膜组合的张拉结构

(5) 索与梁组合的结构

索与梁的组合可以分为索对梁或屋盖的

弦支、斜拉以及索在屋盖平面内的配置等。

索通过撑杆对梁中间部分的一处或多处进行支撑构成张弦梁结构(图1-11)。张弦梁中间部分的支撑大大减小了荷载下梁的最大弯矩和挠度,从而可以以较小的截面尺寸达到较大的跨度。通过对张弦梁中的索进行初始张拉,可以调整荷载下梁中的最大弯矩值和挠度值。同时撑杆的数量和高度、支撑位置也影响梁中的最大弯矩。对于一些跨度不大的张弦梁结构,经常用高强度钢棒代替索。图1-12为上海浦东国际机场的张弦梁屋盖结构。

对索进行立体配置,可以将张弦梁的原理应用于屋盖结构的支撑中,成为立体张弦梁结构。图1-13的弦支穹顶除在直径方向配置索以外,在圆周方向也配置了索。弦支穹顶与索穹顶属于不同的结构体系,弦支穹顶利用索对刚性屋盖进行补强,而索穹顶则是由索杆组成的柔性体系。

通过立柱或桅杆利用索对梁或屋盖进行斜拉,这种结构形式多用于运动场看台的悬挑屋面、扁平屋盖结构等,例如图1-14的吉林速滑馆采用了利用悬索和吊索的屋盖悬吊体系。利用索进行弦支或斜拉时,应考虑载荷在索和梁或屋盖上的分配,保证索和梁或屋盖协调工作。由于索处于单纯的拉伸状态,



图1-12 上海浦东国际机场的张弦梁屋盖结构

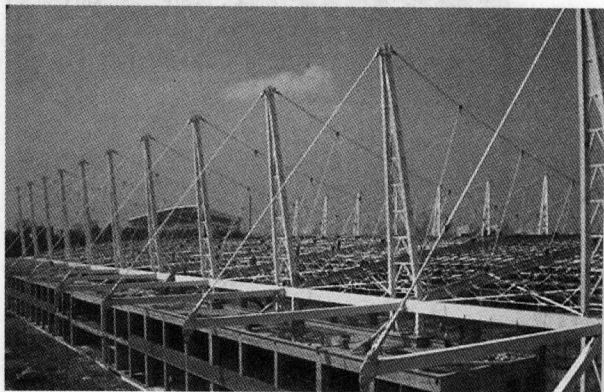


图1-14 吉林速滑馆悬吊式屋盖

索的初始徐变、连接处的松弛、温度变化引起的伸缩、施工顺序等都会对荷载的分配产生很大的影响。如何保证索和刚性的梁或屋盖协同工作,是设计的一项重要内容。

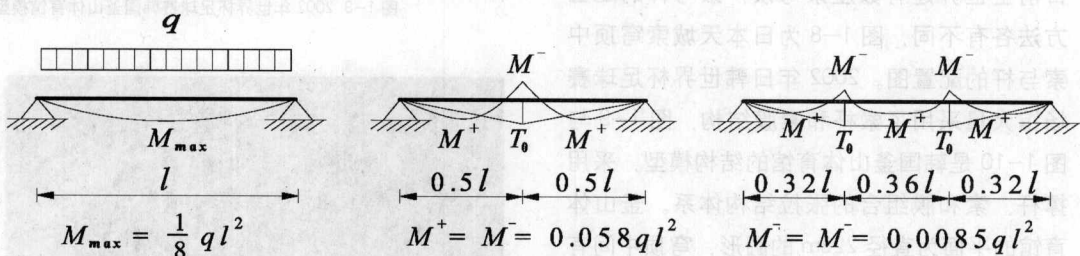


图1-11 张弦梁以及梁中弯矩

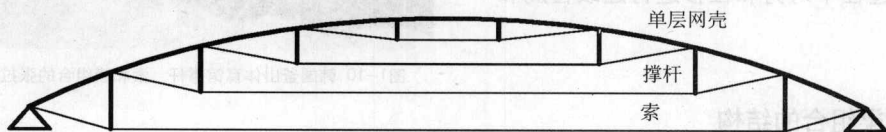
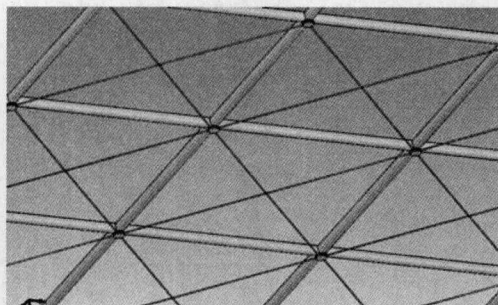
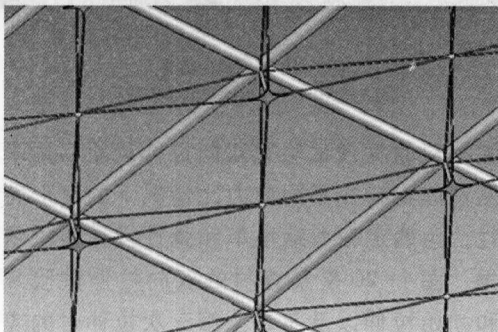


图1-13 弦支穹顶简图

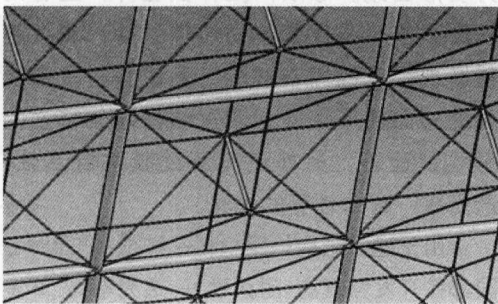
索还可以在屋盖平面内配置以提高屋盖的面内剪切刚度。比如正方形网格状结构, 在对角线方向配置纤细的拉索可保证格子视觉流畅性的同时又有较大的抗剪刚度(图 1-15a)。对于单层网格结构, 通过在网格交点处面外方向的撑杆配置斜向钢棒(图 1-15b), 或在网格中间设置飞杆并配置斜向拉杆和两方向拉索(图 1-15c), 可有效地提高单层网格的平面内剪切刚度和面外弯曲刚度。日本熊谷穹顶采用了图 1-15b 的体系, 利用直径 350mm 的钢管构成 10m × 10m 的格子, 配以直径 35mm 的拉杆, 建成了水平投影为长边 235m 短边 135m 的椭圆形单层穹顶。



(a)



(b)



(c)

图 1-15 单层网格中索的配置

(a) 平面内; (b) 平面外(单侧); (c) 平面外(两侧)

图 1-16 为法国卢浮宫的玻璃金字塔结构。拉杆在各个方向上的配置有效地增加了玻璃支撑的网格体系的刚性, 使得结构晶莹剔透(图 1-17)。

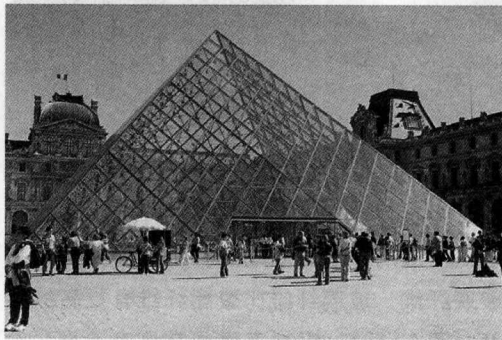


图 1-16 卢浮宫玻璃金字塔

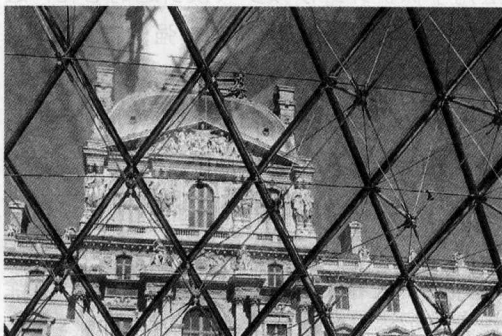


图 1-17 玻璃支撑格子中的拉杆

1.1.2 膜结构

从古代游牧民族用于栖息便于移动的小型帐篷(Tent), 到现代马戏团巡回演出的大型帐篷, 膜结构的历史悠久。与传统的帐篷相比, 现代建筑用的膜结构(Membrane Structure)不仅可用于大型集会、展览会等临时性建筑, 还大量用于体育场馆、会议中心等永久性建筑。膜结构的材料也从古代的动物毛皮、橡胶制品, 发展到现代的纤维织物。膜结构以其造型优美多变、室内明亮、重量轻、易于跨越很大的空间等其他结构形式无法比拟的特点, 越来越受到人们的喜爱(图 1-18)。

(1) 膜材料

目前绝大多数的建筑用膜材料是由纤维



图 1-18 2005 年日本爱知世博会主题音乐馆

编织而成的, 组成织物的纤维有聚酯纤维和玻璃纤维, 玻璃纤维比聚酯纤维有更高的强度 (图 1-19)。织物表面通常涂有涂层, 涂层用于保护纤维以减少气候引起的老化, 避免异物划伤。涂层还具有较强的自洁作用, 保证膜材料表面的清洁。常用的涂层有聚氯乙烯 (PVC) 涂层和聚四氟乙烯 (PTFE) 涂层。PVC 涂层一般用于聚酯纤维膜材 (称为 PVC 膜材), 由于 PVC 涂层在太阳光照射下易发生老化, 影响透光性和自洁性, 因此 PVC 膜材寿命一般在 10 年以内。目前常在 PVC 涂层表面再涂上聚偏氟乙烯 (PVF)、聚二氟乙烯 (PVDF) 等面层, 可以使涂层寿命和自洁性能得到较大提高。PTFE 涂层一般用于玻璃纤维膜材 (称为 PTFE 膜材), PTFE 化学稳定性和自洁性能都比较好, 因此 PTFE 膜材的使用寿命长, 可达 20 年以上, 常用于永久性建筑。

膜材料的厚度一般为 $0.3 \sim 1.2\text{mm}$, 单位面积的自重大约为 $1.0\text{kg}/\text{m}^2$ 。膜材的抗拉强度很高, 1cm 宽的中等强度的膜材可承受一名普通成人的体重。膜材料根据织物纤维的方向分为经向 (Warp) 和纬向 (Filling), 一般情况下两方向的力学特性存在差别。未使用过的膜材料第一次拉伸后发生较大的残余变形, 表现出比较强的黏弹特性, 以后的拉伸过程应力变形曲线趋向稳定并且表现出弹性特性, 因此膜结构的荷载效应分析中通常将膜材料假定为各向异性 (经向和纬向) 的线性弹性材料。

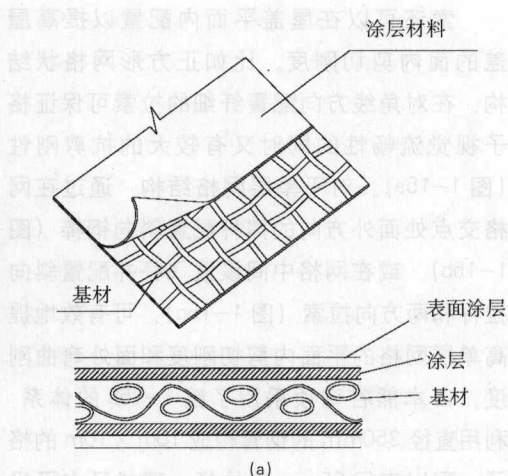


图 1-19 膜材料的组成

(a) 示意图; (b) 编织前的玻璃纤维

膜材料的材性试验有双向拉伸试验, 用来测试膜材料在不同应力比情况下的变形特性, 为确定裁剪缩小率和弹性模量提供依据。图 1-20 是某膜材的双向拉伸试验片和初始拉伸以及第二、第三次拉伸时的应力变形曲线。除双向拉伸试验外, 还有用于测试膜材强度的单向拉伸试验、测试膜材撕裂强度的撕裂试验、测试膜材抗弯能力的弯曲疲劳试验、测试膜材老化特性的耐候试验等, 另外还有测试膜材自洁性、透光率、耐火性等试验。

用于建筑结构的膜材料品种很多, 同时各国都在开发强度高、耐久性好、透光率高、环境污染少的新型膜材料。比如可以回收利用的植物纤维膜材、高透光率 ETFE 膜材等。

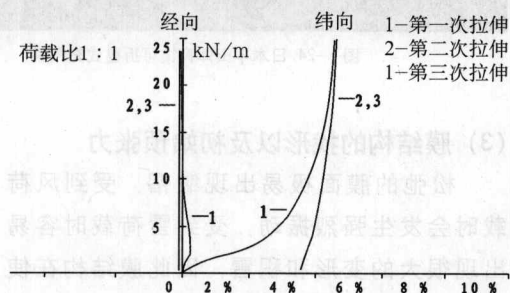
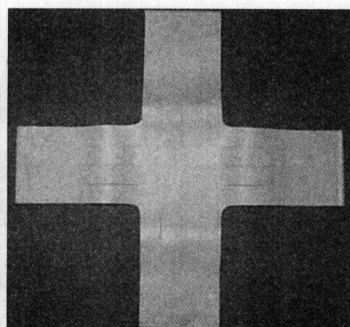


图 1-20 某膜材双向拉伸试验片和拉伸变形曲线

(2) 膜结构的分类

膜结构根据其支撑形式，可分为骨架膜结构、张拉膜结构和空气膜结构^[3]。

骨架膜结构通过压板和螺栓等将膜面固定于刚性支撑边界上，例如钢梁边界、混凝土边界和木边界等，单枚膜宽度较大时可在膜面中央配置拉索进行补强。骨架膜结构膜面的基本形状由骨架决定，膜材充当屋面材料为建筑物内部提供明亮的空间，同时膜屋面重量轻可使骨架结构跨越很大跨度，因此骨架膜结构常用于大跨度空间结构，例如：体育馆的穹顶、大型购物中心的屋盖等。骨架膜结构中膜面的曲率变化不大，刚性边界使得膜面在外载下不易发生很大的变形，因此骨架膜结构比较适合在风荷载或雪荷载较大的地区使用。

图 1-21 是位于多雪地区的大型木结构穹顶，屋面采用外层和内层的双层 PTFE 膜面。外层膜厚 0.8mm，用于承受荷载，而内层膜厚 0.35mm。积雪时通过在双层膜间吹入温风使积雪融化，保证屋盖的透光性，还可以防止膜面内侧的结露。

张拉膜结构没有连续的刚性支撑边界，

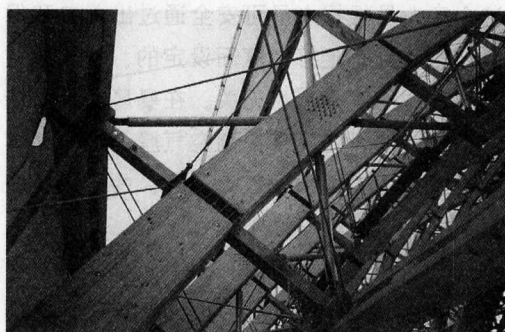


图 1-21 施工中的日本大馆穹顶 (PTFE 双层膜)

膜的边界通常连接在柔性的拉索上，索与膜面通过张拉形成丰富多彩的曲面形式 (图 1-22)。张拉膜结构通常由桅杆等提供高度不等的支撑点，膜面上的荷载通过索传递到支撑点，再由桅杆等传到基础。张拉膜结构的膜面形状富有变化，能充分展示膜结构的无穷魅力，但由于缺乏刚性支撑，外荷载下膜面极易发生很大的变形，对膜面形状的设计、拉索的配置等有很高的要求。特别是台风经常光顾的地区，膜面形状不合理会导致局部风压过大，张拉膜结构出现大变形、局部撕裂甚至发生整体破坏。

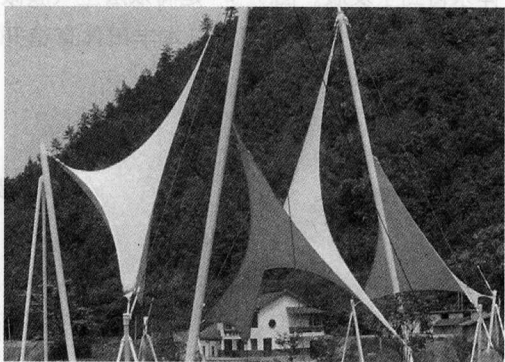


图 1-22 张拉膜结构

空气膜结构按工作原理可分为气承式和气胀式两种结构形式。

气承式空气膜结构的室内空间是封闭的,通过送风机或抽风机使得室内空间的大气压大于或小于外部的大气压,从而支撑膜面或张紧膜面,实际使用中以送风形式较多。正常情况下气承式空气膜结构的内外气压差大约为 200Pa (约为 1 个标准大气压的 $1/500$),这个压力是根据人员可安全通过出入口和保证充气膜具有足够刚度而设定的,一般与空气膜结构的实际大小无关。在暴风或大雪情况下通过增大内压来提高空气膜结构的整体刚度以防止膜面出现过大大变形,由于内压较高,此时应限制人员的出入。

气胀式空气膜结构采用开放的室内空间,在由膜面形成的密闭空间中充气使得膜面张紧,例如管式空气膜和双层空气膜(图 1-23)。气胀式空气膜结构形状多变且室内无需密封,但空气内压高于气承式结构。无论是气承式还是气胀式空气膜结构,为保证空气气压的稳定而进行的日常维护和控制,是此类结构设计中的一项重要内容。

大型气承式空气膜结构以其前所未有的明亮的内部空间,简洁的屋面形式,低廉的造价和便利的施工性,在 20 世纪 70 年代到 80 年代广为建造。20 世纪 90 年代以后,大规模永久性气承式空气膜结构因日常维护的复杂性已很少建造,而气胀式临时性建筑,以及空气膜与其他结构形式组成的新型结构体系得到了发展。图 1-24 是将双层空气膜做成可以折叠的形式,用于日本丰田体育馆开闭式屋盖结构中。

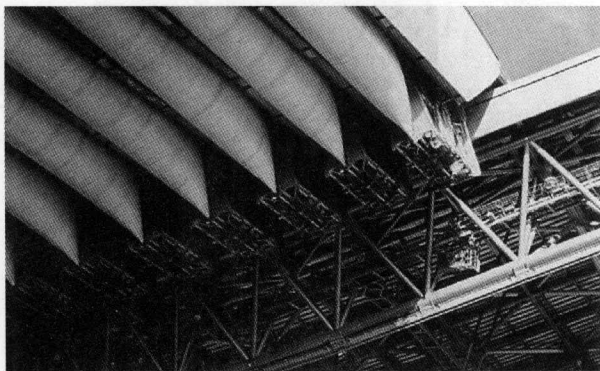


图 1-24 日本丰田体育馆可折叠式充气膜

(3) 膜结构的找形以及初始预张力

松弛的膜面极易出现皱褶,受到风荷载时会发生强烈振动,受到雪荷载时容易出现很大的变形和积雪,因此膜结构在使用时膜面各处都必须保持张紧的状态。骨架膜结构和张拉膜结构通过施工将预先缩小了的膜面拉伸到固定位置从而张紧膜面;空气膜结构则通过空气的压力张紧膜面。膜面一般情况下为曲面,但是并非所有的曲面都能通过边界的张拉或气压使其张紧,膜结构的找形分析就是通过力学的平衡关系寻找能够被张紧的曲面。

以封闭的空间曲线为边界张成的曲面中面积最小的曲面,数学上称为最小曲面,最小曲面对应于力学上的等张力曲面,比如由肥皂膜张成的曲面(不计自重时)。等张力曲面上任意一点都可以以相同的张力张紧,曲面稳定,是膜结构中使用最多的曲面。计算机技术还未发达的 20 世纪五六十年代,膜结构的曲面形状依靠实验方法确定,用的最多的是测量给定边界的肥皂膜形状。20 世纪 70 年代以后,利用有

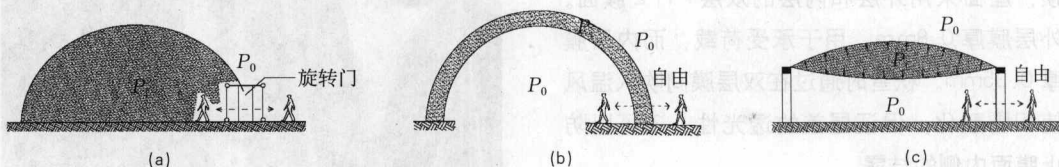


图 1-23 空气膜结构原理

(a) 气承式空气膜; (b) 管式空气膜; (c) 双层空气膜

限元等方法通过计算机就可以计算出要求的曲面形状,图1-25为一例。

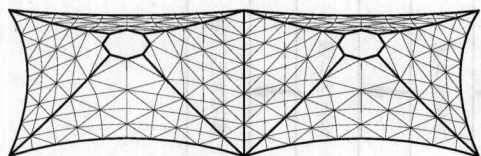


图1-25 有限元法计算得到的曲面形状

膜结构的初始预张力是指张拉施工完成以后膜面的应力值,表示膜面被张紧的程度。单位宽度(每米)的膜面上初始预张力一般为数千牛顿,初始预张力过小会导致膜面出现皱褶、强风下变形过大、易积水等,而初始预张力过大则会增加张拉施工难度。随着膜结构完成年数的增加,因膜面松弛,初始预张力会逐渐减少,膜结构设计时应考虑这个因素,设置必要的调整装置以便日后进行二次张拉。

(4) 膜结构曲面的近似展开、裁剪和张拉施工

除了一些特殊的曲面(例如圆锥面),一般的曲面无法展开成为平面。膜结构曲面一般为不可展曲面,但构成曲面的膜材料是平面的,因此必须采用近似的方法将膜结构的曲面展开为平面,这个过程称为曲面的近似展开。曲面的近似展开中最常用的是测地线法。测地线是指连接曲面上两点间距离最短的线段。测地线法是在膜面上找出沿一定方向间隔一定距离的多条测地线,将相邻的两条测地线之间的曲面近似地取作平面,由此将膜面展开成一系列的平面(图1-26)。膜面上的拼接线影响膜面的视觉效果,因此测地线的配置应充分考虑建筑的要求。图1-27是上海F1赛车场看台荷叶状巨大遮阳伞中膜面拼接线形成的叶茎效果。

膜面曲面经过近似展开成为一系列平面,在对膜材进行裁剪以前,必须进行缩小处理使得膜面安装后能够张紧。缩小率是膜结构制作中非常重要的一项参数,关系到膜面是否合理张紧、有无局部应力集中和膜面是否出现皱褶

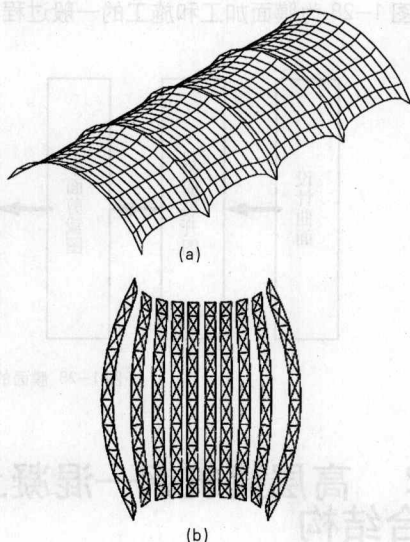


图1-26 曲面的平面展开
(a)曲面; (b)平面展开图

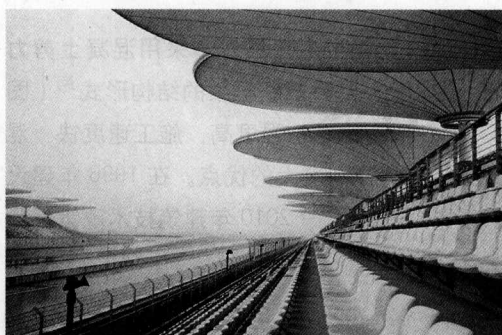


图1-27 上海F1赛车场看台膜面拼接线形成的图案

等。缩小率决定时应考虑膜材的双向拉伸试验结果、膜张力松弛特性、张拉施工过程等因素。特别是PTFE膜材,拉伸刚度大不易张拉,对缩小率有更高的要求。

膜面展开后的平面形状经缩小后即可进行裁剪。膜材供货时通常被卷成具有一定幅度的一卷,裁剪时注意纤维方向并进行合理的排列以减少废料。目前比较先进的裁剪方法是通过计算机控制进行自动激光裁剪。

裁剪得到的膜片在工厂进行拼接后形成具有一定大小的整块膜片。膜片之间的拼接方法有缝合和焊接等,缝合适用于无法焊接的膜材或荷载较小的连接,焊接是目前应用得最多的工厂连接方法。拼接得到具有一定大小的膜块运至现场,进行逐块的张拉施工。