

# 膜结构技术

钱若军 聂世华 扬联萍

**【提要】** 本文从膜结构的发展、膜结构的结构形式、建筑膜材和膜结构设计的关键技术评述了膜结构技术。

## 一、膜结构的发展

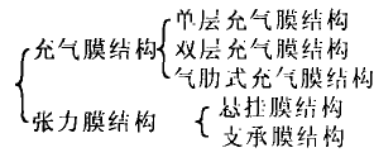
膜结构是张力结构的一种,它以具有优良性能的柔软织物为膜材,或是利用帆船原理,由膜内的空气压力支承膜面,或是利用钢索或刚性支承结构向膜内预施加张力,从而形成具有一定刚度、能够覆盖大空间的结构体系。膜结构有独特的特点和优越性。早在远古时代,人们利用树木的纤维和兽皮建造的帐篷,便是原始的膜结构。1970年日本大阪万国博览会许多空气膜结构的建造,标志着膜结构时代的开始。从此,在全世界范围内广泛开始了对膜结构的开发研制工作,再加上轻质高强膜材的出现,使膜结构从最初的临时性建筑开始迈向永久性建筑的行列。继1975年在美国建筑的永久性气承性空气膜结构庞提亚克的“银色穹顶”,80年又有几十座大型膜结构体育建筑,其中沙特阿拉伯吉大机场候机大厅的悬挂膜结构占地42万m<sup>2</sup>。

膜结构的发展最初主要以充气结构为主,但随着张力膜结构的发展,充气式膜结构除在特殊领域应用外,大部分已被张力膜结构所代替。张力膜结构是国外在近20年内逐步发展并已广泛应用的新型结构形式。目前只有美国、日本、德国、加拿大等国掌握了张力膜结构的设计、施工技术和膜材的制造工艺。一些举世瞩目的结构,如德国的慕尼黑奥林匹克体育场、美国的亚特兰大体育馆等,都采用了这种新型的张力膜结构。膜结构设计需要先进的分析、设计和裁剪技术,尤其是基于形态分析理论的初始形状的确定。所以膜结构的发展有数学、力学和工程学的基础,同时也需要新型建筑材料,甚至纺织物材料的交叉发展。另外,膜结构的发展还需要依赖于先

进的计算机辅助技术。因此,开展膜结构的研究可以推进结构工程学科及相关学科的发展,推进计算机技术在结构工程中的应用,推进新型建筑材料、纺织物材料的交叉发展。

## 二、膜结构的结构形式

自70年代以来,应用于各种大跨度体育建筑中的膜结构越来越多,膜结构的结构形式也在不断发展。膜结构的分类方法有多种,膜结构按其结构特点一般可分为二类:



空气膜结构是利用帆船原理,由空气支撑膜面;张力膜结构是利用钢索或骨架结构悬挂或支撑膜面。

膜结构最初是人们从帐篷结构中得到的启示发展而来的。这种结构或是利用索网将膜绷紧作为承重结构,或是利用桅杆将钢索和膜张挂起来。其中索网式膜结构现多用于70m以下中小跨度的体育设施;结构造形新颖随意,不需附加设备,应用较为广泛。从悬挂膜结构的力学特点知道,以两反向曲率形成的鞍形形状是膜结构最基本的稳定形式。马鞍形索网膜结构受力合理,形状稳定,和悬索结构的分析方法有相通之处,在我国推广应用有一定的基础。

骨架支撑膜结构以刚性支撑为骨架,面材采用膜材,充分发挥了不同材料的特性。以平板网架或曲面网壳作为支撑骨架而成的骨架支撑膜结构,不仅应用了已经成熟的网架、网壳设计技术,而且结构的构造也较简单,是一种很有推广

钱若军 聂世华 同济大学教授  
扬联萍 上海建筑设计研究所

价值的结构形式。

### 三、建筑膜材

膜结构建筑物所采用的薄膜材料,目前世界上大多采用涂层织物薄膜,它分为两部份:内部为基材织物,它主要决定膜材的力学特性,提供材料的抗拉强度、抗撕裂强度等;外层为涂层,它主要解决膜材的物理特性,提供材料的耐火、耐久性及防水、自洁性等。有时为了改进膜材性能可在涂层外面再加一层面层。这种面层不但能保护织物抵抗紫外线,而且能大大改善膜材的自洁性。国外常用的膜材一般为聚酯织物涂敷聚氯乙烯涂层膜材和玻璃纤维织物涂敷聚四氟乙烯涂层或有机硅树脂涂层膜材。基材织物的织法一般有平织、绞织等,其中最为常见的织法为平织。一般生产的膜材宽度为1.0~1.2米。形成膜结构的曲面,膜材需要拼接,一般拼接方法有缝合和热焊等,这要根据拼接要求和涂层材料的种类来确定要采用哪一种拼接方法最有效。在膜结构设计中,一般主要结构缝多采用热焊,非结构接缝采用缝合。

膜材是高强柔软织物的复合材料,合成纤维织物的构造使材料的应力平均分布在所有面积上,而不是集中一点上,膜材具有较高的抗拉强度,但抗压刚度和抗弯刚度几乎为零,并且具有很强的异向性和材料非线性,并且易发生徐变和应力松弛现象。因而在膜结构分析中,膜材的基本假定和力学模型建立以及对膜材力学特性的掌握、物理和力学参数的确定,形成了一个很重要的问题,这是进行膜结构分析的重要前提和保证。目前国际上各国对膜材物理、力学性能的要求,评价指标和相应的测试方法还不尽相同,归纳起来,主要有以下几个方面:

- (1) 膜构的厚度和质量;
- (2) 膜材的张拉性和张拉强度;
- (3) 膜材的抗撕裂性能及撕裂强度。

膜材的抗撕裂强度也是应用于膜结构的重要力学参数。膜材的抗撕裂强度就是在最大设计压力下,控制膜面撕裂传播的度量指标。选择撕裂

不传播的膜构实际上是困难的,因此需要在构造上采取一定措施,控制膜面撕裂传播。

膜材不仅必须具备较高的抗张拉、抗撕裂强度外,对膜材的徐变、疲劳、抗弯曲、抗磨损、抗腐蚀、吸水、耐久、防火、防水、自洁等方面的特性也有一定要求。

在膜结构的结构分析中,全面掌握膜材的材料特性,恰当地建立起膜材的基本假定和力学模型以及测定有关材料常数是进行结构分析的重要前提和保证。从材料的组成可知道膜材是复合材料,并且由于基树为合成纤维或玻璃纤维纺织而成的织物,膜构并非为弹性体。从大量的试验得到的膜材的 $\delta - \epsilon$ 曲线中,可以看到膜材具有很强的非线性和粘弹性,但以此进行膜结构分析是很困难的。所以,目前在膜结构的结构分析中,在膜材的实际应力范围内,仍假定膜材为线弹性体。

众所周知膜材为复合材料,由于复合材料弹性力学,材料呈各向异性,应按各向异性进行力学分析,但膜材织物多为平织,由纺织方法通常假定膜材为正交异性材料。正交异性材料在膜面内有一对互相垂直的主轴。在膜结构分析中,膜材主轴方向的确定是一个非常重要的问题。膜结构的初始形状,由于外荷载作用将发生变形,这时膜材的正交异性被破坏,但是由于膜材变形大而应变小,因而在膜结构分析中仍假定膜材保持正交异性且主轴方向不变。从弹性力学理论知道,二维正交异性体只具有4个独立的弹性系数,其应力应变关系用矩阵形式可表达为:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & & \\ d_{21} & d_{22} & \\ & & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在膜结构设计中,膜材的材料常数通常为张拉刚度 $E_t$ 剪切刚度 $G_t$ 。张拉刚度等于膜材的弹性模量乘以膜材厚度,即 $E_t = E \times t$ ,剪切刚度等于膜材的剪切模量 $G$ 乘以膜材厚度,即 $G_t = G \times t$ 。

由于膜材呈正交异性,张拉刚度分纵向纤维方向张拉刚度  $E_{t1}$ 和横向纤维张拉刚度  $E_{t2}$ ,泊松比分纵向对横向泊松比  $\nu_1$ 和横向对纵向泊松比  $\nu_2$ ,剪切刚度独立。

目前,在膜材的研制开发方面已经取得了很大的进步,基本满足了作为永久性建筑材料的要求,但是膜材的防火性、自洁性、多样性等仍需进一步发展。

#### 四、张力膜结构的 Fine 分析

张力膜结构的全过程分析包括结构初始几何的确定;结构初始形状分析、结构内力-变形分析和剪裁分析。结构的初始几何的确定是指在满足一定几何边界条件和曲面成形法则的条件下,采用数学上的曲面拟合理论构造结构曲面;结构的初始形状判定分析是指在结构初始几何确定的基础上,求得一个满足力学平衡的结构初始形状;结构的内力-变形分析是指在预应力作用下得到一组满足力学平衡的、稳定的结构初始形状的基础上,确定膜结构的应力和位移;膜结构的剪裁分析也是结构设计的一个关键技术,剪裁分析就是确定二维膜材的剪裁下料图,然后据其通过拼接、张拉生成膜结构的曲面。

张力膜结构的初始形状分析、结构内力-变形分析的基础是非线性有限单元法。对索系常采用二节点直线空间铰结杆单元,而对膜常采用膜单元。

膜结构的荷载分析相对其他膜结构的关键技术来说,应该是最成熟的,也是国内外学者研究最多的领域。随着计算机性能的提高、有限元方法的不断完善和各种数值计算方法的改进,采用大位移小应变的正交异性膜单元对膜结构进行荷载分析应该不是困难的事情,但是应该注意到膜结构的有限元分析与其他结构的有限元分析的区别,由于膜材高度的非线性,采用稠密网格划分的低精度单元比采用稀疏网格划分的高精度单元进行有限元计算具有更高的精度。另外还应注意非线性方程组迭加收敛的条件和判断准则及褶皱

区的判断和处理。

#### 五、张力膜结构的形状分析

在膜结构设计中最基本的也是最困难的就是确定结构的初始几何形状,几何形体的好坏直接影响到结构的受力性能。国外在这方面做了许多工作,取得了一些结论。确定结构的初始几何形状有三类方法,几何分析法、物理模型法和计算机方法。由于张力膜结构变化灵活,形体复杂,几何分析法只能针对一些十分简单的外形。早期的膜结构研究者为了获得膜结构的几何形体,采用了皂膜比拟,形成极小的表面面积,或利用伸缩纤维或橡胶来确定形体。国内外以计算机为手段进行形体确定的方法,主要有力密度法、动力松弛法、杆长修正法、支座位移法、控制点逼近法、遗传算法、最小膜面积法、形函数确定初始形状法等。

按照 Heing Hessdorf 的说法,对这三类方法进行了对比,如图 1 所示,以水平轴线代表运用方法的相对难度,竖直轴代表使用方法的相对成本。从图上可以看出:在点 A 前运用几何分析法最优,在点 A 和点 B 之间运用计算机方法最优,模型方法对简单的张拉结构是不经济的。

上面提到的各种计算机成形技术其缺点是各自应用范围有限。针对张力膜结构作者提出一种新的计算机成形技术的基本原理,称之为比拟成形方法。比拟成形方法原则上能生成任意复杂的、满足特定边界条件的初始几何曲面。

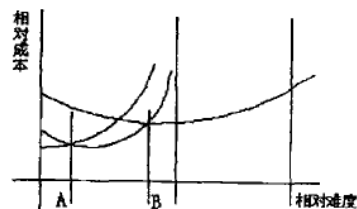


图1 三类找形分析方法对比

张力膜结构初始几何确定的基本思想是:由建筑师根据建筑外形设计的构想和建筑功能要求给出一组离散的控制点和控制曲线,按照张力膜结构几何性状特点,选择适当的数学模型,构造

满足结构几何边界条件和一定光滑连续要求的结构初始曲面。比拟成形方法就是根据上述基本思想进行张拉膜结构的初始几何分析的。

众所周知,任何复杂的曲面都可以分解为数种简单的基本曲面,这些基本曲面都可由上面三类成形技术非常容易地生成。在几何上,有三种基本曲面:旋转抛物面(锥形面),图2;双曲抛物面(马鞍形面),图3;圆环旋转体曲面,图4。事实上,任何膜结构的外形可以看作这些简单曲面一种或其数种的组合。可以设想一个方形弹性膜,在其四边施加张力,然后移动膜的中心点,使其偏离初始曲面,这样就得到近似的旋转抛物面。如果改变中心点的移动方位,便可得到无数不同的近似旋转抛物面。如果移动方形膜材的边界而不是中心点,随着改变移动的边界点或线可得到无数不同形的近似的双曲抛物面。如果移动不同的点或线(边界或内部)就能得到综合锥面和抛物面的不同形式的曲面形状,如图5~7所示。例如,运用以上思路,很容易地生成如图8~9所示的曲面形式。

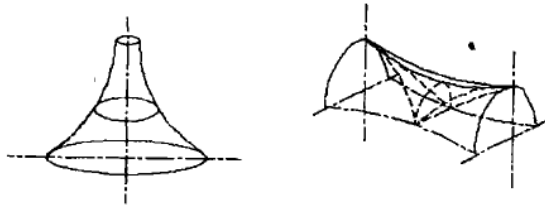


图2 旋转抛物面

图3 双曲抛物面

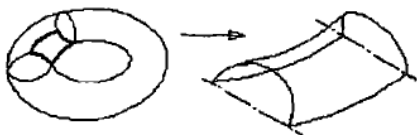


图4 圆环旋转体曲面

另外,还可以运用荷载来调整用以上方法生成的曲面形状。如在膜面上施加均布荷载来调整膜面的曲率,在边界上施加集中力或线性均布荷载调整边界的形状。这样就可以根据建筑师的设计和 functional 要求设计出任意形式的、满足各种边界条件的几何形状。

以上就是整个膜结构比拟成形方法的基本思路,其实现方法可以运用大位移大应变有限元分析方法和曲面及曲面块的表示。

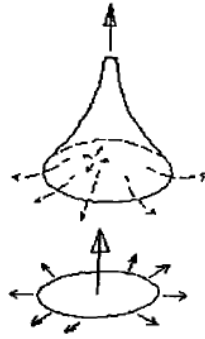


图5 张拉旋转抛物面

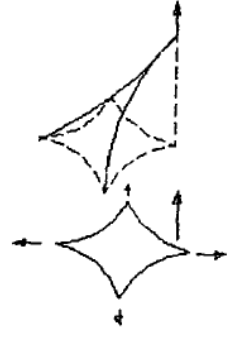


图6 张拉双曲抛物面

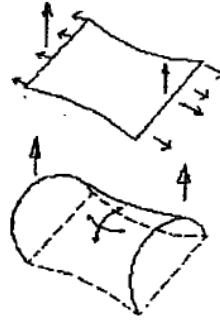


图7 张拉圆环旋转体曲面

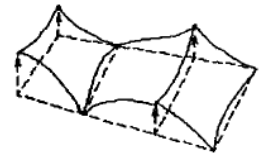


图8

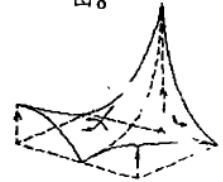


图9

## 六、曲面及曲面块的表示

索、膜结构的外表面具有复杂的曲面形状。在这一领域中已经发展了很多专门的曲面造型和曲面映象的生成技术。曲面的表达与曲线很类似,从某种意义上讲,曲面的表达是曲线表达方式的延伸。曲面的种类虽然繁多,但可将曲面分为两类:一类为规则曲面,另一类为不规则曲面。规则曲面有柱、锥、球、椭球、环、双曲面、抛物面、螺旋面等;不规则曲面有Coons曲面、Bezier曲面和B样条曲面等。

索、膜结构的外表面通常可用不规则的Coons曲面、Bezier曲面和B样条曲面近似表示。

## 七、张力膜结构的裁剪分析

由于膜结构所构成的空间曲面是由二维膜材通过拼接、张拉而成,因此如何用二维膜材近似

拼接空间曲面是膜结构设计过程中的一个关键问题,即需要对膜结构进行裁剪分析。如果裁剪分析不当,将极大地改变膜结构中原来的应力分布,甚至出现褶皱。裁剪分析方法总的来说也分为三大类,即物理模型方法、几何模型方法、平衡模型方法。平衡模型方法以其灵活、迅速、准确的特点已成为膜结构裁剪分析发展和应用的主要方法。目前比较成熟的平衡模型方法主要有:力密度法、动力松弛法、离散超限变换投影法。由于裁剪分析与膜结构的形状、大小、曲率、材料性等许多因素有关,使上述各种方法的应用均受到一定程度的限制。裁剪分析中最棘手的问题是考虑初始预应力造成的膜材经、纬方向的伸长对裁剪下料的影响,膜结构是张力结构的一种,其整体刚度主要有初始预应力提供,而在裁剪分析过程中,要把膜材由预应力状态还原为无应力状态,而这时所对应的结构的整体刚度趋于零,据此建立的非线性方程组变为奇异方程组,这样无法求解。所以怎样把膜材由预应力状态还原为无应力状态是进行膜结构剪裁分析的关键技术,但这个问题至今还未得到很好的解决。

## 八、计算机技术

由于膜结构是建筑与结构的有机整体,因此在膜结构的设计过程中:结构工程师与建筑师更应密切配合,共同确定建筑造型、各组成部分几何和总体控制尺寸,同时进行结构分析,根据分析结果修正原始方案。所以膜结构的整个设计过程是建筑、结构方案的选择与结构分析计算的交叉反复,如果没有专用的计算机辅助设计系统作为设计工具,很难想象在短时间内能够得出最优方案。计算机辅助设计系统的应用,是膜结构设计方法发展的必然趋势。值此膜结构逐渐繁荣之际,开发一整套相应的计算机辅助设计软件,为设计人员提供强有力的设计工具,摆脱沉重的设计计算工作,更好地推广应用膜结构,具有现实意义和经济价值。膜结构是一种特殊的结构形式,其相应的计算机辅助设计系统必有特殊性。现就目前膜结构计算机辅助设计系统的开发情况

简要总结一下膜结构计算机辅助设计系统的基本组成。

(1) 前处理系统:主要定义膜结构的几何模型、材料特性、外荷载,并能从各个角度显示出结构的外形以验证几何形状的正确性,同时产生结构分析系统进行成形分析、荷载分析所需要的数据。目前多采用图形输入法输入结构的几何外形。图形输入法是直接输入结构的图形,而不是图形的几何数据,具有直观、形象的特点。图形输入法是以人机交互方式工作的,可以边输入边显示,有错即改 有漏就补,十分方便灵活。材料的特性主要包括膜材的经、纬两方向的弹性模量、最大允许应力,边索的弹性模量、最大允许应力,外荷载主要包括风荷载、雪荷载、自重等,另外还包括初始预应力值、受压构件的截面面积等。

(2) 结构分析系统:主要包括膜结构的找形分析和荷载分析两个模块,完成膜结构的找形、形状判定和内力分析,输出位移、应力和其他后处理系统所需要的数据文件。

(3) 后处理系统:主要包括显示模块和裁剪模块。显示模块应能从各个方向显示膜结构的线框图形和位移,并且能显示其实体模型,此外显示模块还应具有另一重要功能即应力的可视化,如采用应力彩色图和应力数值标注相结合的方式显示膜结构的应力,这样就非常容易找到应力异常区和褶皱区。裁剪模块的功能主要生成考虑由初始预应力引起的经、纬方向伸长和连接影响的裁剪下料图和诸如DXF、HPGL、IGES、STL等格式能被普通计算机辅助制造系统接收的数据文件,以便据此利用人工和计算机辅助制造系统进行膜材的剪裁操作。

膜结构计算机辅助设计系统的总体框图如图10所示。

## 九、结束语

从国外的实践来看,由于材料科学的迅猛发展,新的优质建筑膜材不断出现,再加上膜结构特有的柔顺的曲面、广阔的空间、半透明的室内

环境,使得膜结构具有强大的生命力,其应该是21世纪空间结构发展的主流。国外一些发达国家应该说已掌握了膜结构的设计、制作和施工的全过程,但是仍有一些尚未解决的问题摆在广大膜结构设计者面前,如膜建筑的隔声问题,由于很多大跨度膜建筑都位于繁华的闹市区,而单层膜材只能隔声10分贝,所以仅靠单层膜材的隔声性能不可能解决这个问题。再如膜建筑内部环境问题,有时需要黑暗的内部环境,而有时需要明亮的内部环境,这两个相互矛盾的要求使很多业主放弃了膜结构。另外还有屋顶膜材的融雪问题、

隔热问题、积灰问题、膜材多样化问题等。膜结构的找形分析和剪裁分析是特别需要继续研究和探讨的问题。在中国,膜结构还处于起步阶段,但作者相信前景是光明的。

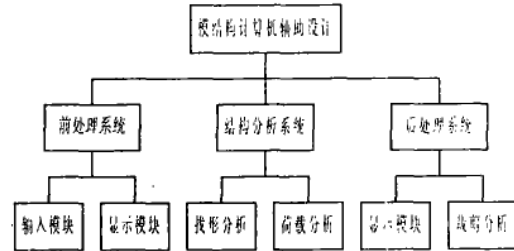


图10 膜结构计算机辅助设计系统的总体框图

### 参考文献

- 1、蓝天、郭璐 膜结构在大跨度建筑中的应用,《建筑结构》1992年第6期;
- 2、蓝天 膜结构的发展及其在中国的应用前景,《第八届空间结构学术会议论文集》,1997年;
- 3、李中立、吴健生、黄达达 膜结构找形受荷与剪裁分析,《第八届空间结构学术会议论文集》,1997年;
- 4、阐明 空间结构辅助设计系统的实现,《第五届空间结构学术会议论文集》,1990年;
- 5、顾承、何广乾、林春哲 杂交空间结构的生成原则及其CAD系统的开发,《第七届空间结构学术会议论文集》,1995年;
- 6、高振锋、沈祖炎、钱若军 张力膜结构几何形体的探讨,《第六届空间结构学术会议论文集》,1992年;
- 7、吴健生、邓乐天、刘文彬 应用有限元法进行膜结构剪裁分析,《第六届空间结构学术会议论文集》,1992年;
- 8、胥传喜、钱若军 张力膜结构的非线性有限元分析,《第六届空间结构学术会议论文集》,1992年;
- 9、钱若军 张力结构形状判定述评,《新型空间结构论文集》,1992;
- 10、钱若军、张德峰 索网结构外形判定的控制点逼近法,《新型空间结构论文集》,1992年;
- 11、蓝天 空间结构的十年——从中国看世界,《第七届空间结构学术会议论文集》,1992年;
- 12、郭璐 膜材的力学模型和物理、力学性能试验分析,《第五届空间结构学术会议论文集》,1990年;
- 13、蓝天、郭璐 膜材力学性能试验研究,《第七届空间结构学术会议论文集》,1992年;
- 14、钱若军 预应力索网结构的内力判定,《全国索结构学术交流会论文集》,1991年;
- 15、周坚、钱若军 加筋张力膜结构曲面几何研究,《全国索结构学术交流会论文集》,1991年。

## 通知

近来,我们收到部分读者的来信,反映不能正常收阅《OVM通讯》。我们编辑部寄给一些单位资料室或个人的《OVM通讯》因“地址不详或迁移新址不明”等原因被部分退回。为使读者能及时收到本刊,请不能正常收阅本刊的单位和个人的来信或发E-mail(lzovmco@public.lzptt.gx.cn、ovmtx@263.net、ovmtx@163.net)确认贵处的详细地址、邮政编码、单位名称(或个人姓名)、联系方式(电话、传真、E-mail),以便我们更好地为读者朋友服务。

《OVM通讯》编辑部

一九九九年四月