

膜结构的荷载态分析与结构设计

武 岳

胥传喜

(哈尔滨工业大学)

(RIGHT TECH(S) PTE LTD)

提要 由于膜结构特殊的力学特点，其结构分析与设计过程明显不同于传统结构。文章着重对膜结构荷载态分析中的一些主要问题进行了探讨，包括荷载取值、特别是风荷载的确定方法；荷载态分析的方法及需要注意的一些问题；常见的膜结构分析软件等等。在此基础上，还介绍了如何根据计算结果来判定结构性能的优劣，以及设计膜、索及索具等构件。

关键词：膜结构 风荷载 褶皱 构件设计

Structural Analysis and Design of Membrane Structures

Wu Yue

Xu Chuanxi

(Harbin Institute of Technology)

(RIGHT TECH(S) PTE LTD)

Abstract: Due to the unique mechanics characters, the analysis and design process of membrane structure is quite different from traditional structures. In this paper, some key problems of membrane structure analysis were discussed. The first question is how to determine the load case, especially for wind effects. Then, the structural analysis methods and some questions should be note were presented. It also introduced some design software of membrane structures. Moreover, it is recommended in this paper that the specified maximum displacement and stress of membrane structure, which can be used to assess the structural performance and select cable and membrane members.

Key words : membrane structure, wind load, wrinkling, member design

在通过找形得到结构的几何形状和相应的预应力分布后，接下来的工作就是对结构进行荷载态响应分析。荷载态分析的目的，是检查在各种荷载组合作用下结构的刚度是否足够、膜面的应力和变形是否在许可范围内。具体地讲，就是要保证结构的稳定并尽量避免褶皱的出现、保证膜材不会因变形过大而导致应力松弛或因应力过大而导致破坏，并保证结构在风、雪荷载作用下不会因变形或振动过大而影响结构的使用功能，等等。

1. 膜结构上的荷载及作用

在进行膜结构的荷载态响应分析时，需考虑以下荷载及作用：恒荷载、活荷载、雪荷载、风作用、预

张力、支承及边界构件的变形、地震作用以及温度变化的影响等等。

恒荷载通常就是膜材的自重。由于膜材自身的质量很轻（仅为 1kg/m^2 左右），恒载对膜结构的内力及变形的影响通常可以忽略。

由于膜结构表面一般不允许上人，检修、清洗也是由专业膜结构公司负责，实际工程设计中，一般不考虑活荷载。在非降雪地区，习惯上用 0.25 或 0.30 kN/m^2 的竖向荷载来检查膜面是否会因降雨而产生积水；即检查在此荷载作用下，变形后膜面的等高线有无近似的圆形区域出现。

在降雪地区，积雪对膜结构的影响是不容忽视的。由于膜结构多呈负高斯曲率曲面形式，结构上的雪荷载一般为非均匀分布；在计算雪荷载时需根据不同曲面形状、曲率变化来调整雪荷载的分布，以考虑雪荷载不均匀分布可能产生的不利影响。当膜面坡度大于 0.4 时，落雪一般会因重力而自动滑下而不产生堆积。风对积雪形式的影响也需要加以注意。研究表明，低温条件下当风速达到 $15\sim 20\text{m/s}$ 时，膜面几乎不存在积雪；但如果膜面存在“死角”，则在这些部位极易形成较深的积雪。另外，对于某些低矢跨比的膜结构，积雪的作用会导致结构表面趋于平坦，甚至在局部出现下凹，必须小心对待。

风作用或者按习惯说法风荷载是膜结构设计中的主要荷载。在计算风荷载时需要确定两个重要的参数，即风载体型系数和风振系数。由于膜结构的体型复杂，而各国荷载规范所能提供的风载体型系数又十分有限，对复杂体型的膜结构，国内外一般都通过风洞试验的方法来确定体型系数。风振系数的确定则更为复杂，目前无论是在工程上还是在理论研究方面都还没有提出切实有效的解决办法。有关这部分内容，将在下一小节中作更详细的阐述。

预张力是膜面维持其曲面形状并承受其它荷载的前提。预张力的分布及大小与膜面的形状有关，由找形确定。在作内力分析时，预张力参与所有荷载组合。

支承及边界构件的变形会导致膜面应力重分布。由于膜结构本身的质量很轻，地震作用的影响不是十分明显。在温度变化大的地区，还要考虑热胀冷缩对膜面应力的影响以及高温对焊缝强度的影响。

2. 风荷载的确定与风洞试验

2.1 膜结构抗风设计的重要性

膜结构区别于传统结构的两个显著特点是轻和柔。轻，意味着结构自身的惯性力很小，地震作用的影响可以忽略不计，相比之下风对结构的影响更为重要；柔，意味着弯曲刚度很低，膜结构对外荷载的抵抗主要通过自身形状的改变来实现，即结构在荷载作用下会产生较大的变形，表现出明显的几何非线性特征。这些特点决定了膜结构是风敏感结构，抗风设计在膜结构的设计中占有特别重要的地位。

近年来，一些大型膜结构在强风作用下破坏的实例，也从另一个侧面证明了抗风设计的重要性。例如，美国佐治亚穹顶在建成 3 年后，于 1995 年的一次强风大雨袭击下，四片薄膜被撕裂，撕裂长度达 10 余米；加拿大蒙特利尔奥林匹克体育场的可开启式膜屋盖在 1999 年冬天的一场暴风雪之后，一块膜屋盖突然破裂；韩国为 2002 年世足赛建造的济洲岛体育场挑篷膜结构在 2002 年 6 月和 8 月先后两次在台风的袭击下出现膜材撕裂现象。国内的膜结构工程实践时间虽然不长，但也出现了一些工程在施工过程中膜材被强风撕裂的情况，图 1 所示即为一例。特别值得说明的是，以上这些实例在破坏发生时，当地的风速均明显低于设计风速。这说明无论是在国内还是国外，膜结构的抗风设计理论都还不够成熟、对某些情况下风作用的破坏机理尚不十分清楚。



图 1 国内某工程在施工中出现膜材被风撕裂

2.2 抗风设计参数的确定

由于膜结构的形体各异以及相关理论研究的滞后，目前在膜结构的体型系数和风振系数确定方面还没有一种普遍适用的方法。对于一些形状较为简单的膜结构，例如图 2a 所示的鞍形膜结构，在不同风向下的体型系数可参照图 2b 选用（图中 $f/L=1/12$ ，风向角 $=0\sim 90$ 度）[1]；文献[2]根据大量的参数分析（考虑跨度、矢跨比和预张力的变化），基本确定膜结构的风振系数在 1.8 左右。值得说明的是，由于膜结构的响应与荷载呈非线性关系，因此定义荷载风振系数在理论上并不完善，应该确定基于响应的风振系数。对于复杂体型的大、中型膜结构，需借助风洞试验来确定相应设计参数。

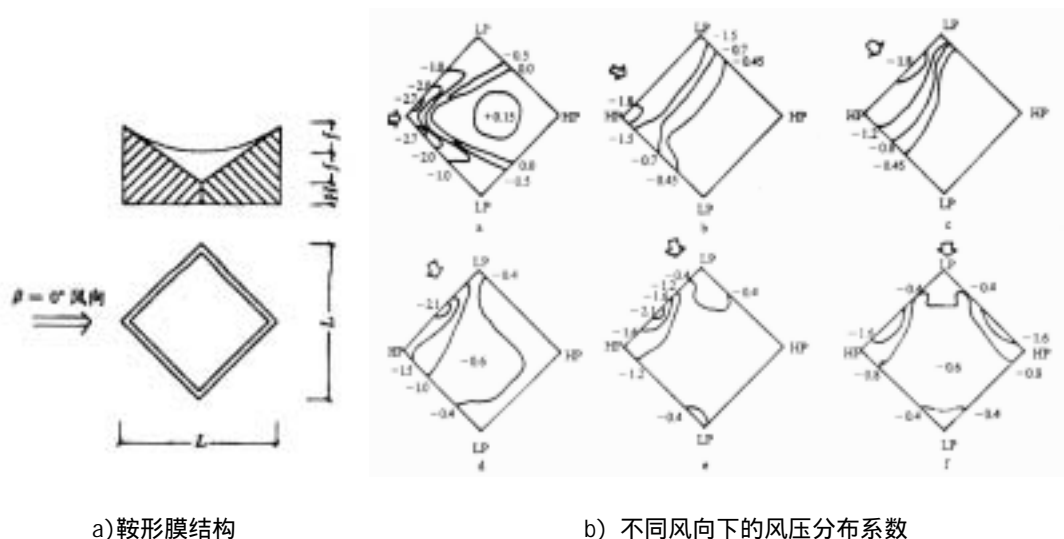


图 2 鞍形膜结构不同风向下的风压分布系数

2.3 膜结构的风洞试验

所谓风洞试验，就是将建筑物的缩尺模型置于一个特殊设计的管道内，用动力设备产生与实际情况近似的可控制的气流，并借助一定的测量仪器，获得所需的气动力信息。建筑风洞也叫做大气边界层风洞，它要求对来流的模拟要满足大气边界层的某些特征，如风剖面、湍流度等。风洞试验还要满足一系列的相似准则，如几何相似、雷诺数相似等[3]。实际上，要完全满足这些相似条件是不可能的，只能根据具体情况选择那些起决定作用的相似条件。

膜结构风荷载的确定包含对结构表面风压分布的预测，或者说是风载体型系数的确定，以及对结构在脉动风荷载作用下的动态响应的预测，或者说是风振系数的确定两部分。尽管风洞试验具有费用高、周期长、某些相似数无法准确模拟等缺点，但它仍然是目前研究钝体绕流的主要方法。目前的风洞测压试验技术已比较成熟，借助大气边界层风洞，通过对刚性模型表面动态风压的测量，所获得的结果，可以基本

满足结构设计的要求。由于膜结构在荷载作用下的位移较大，结构位形的变化必然会对其周围风场产生影响，从而改变其表面的风压分布。所以膜结构的风致动力响应过程是一个典型的流固耦合（风与结构相互作用）过程。对这一动力过程的风洞试验模拟必须采用气动弹性模型。气动弹性模型试验涉及到大量的相似参数和复杂的观测技术，技术难度大，目前国内外在这方面都还处于研究阶段。

随着计算机有限元技术的发展，一种将计算流体力学和计算结构力学结合起来，用计算流体力学来模拟结构周围的风场、用计算结构力学来模拟膜结构，再借助某些参数的传递来实现两者之间的耦合作用的所谓“数值风洞”技术受到了越来越多的重视。从理论上讲，这种方法具有较强的准确度和广泛的适应性。在实际操作上，还有很多技术问题有待于进一步探讨。

通过风洞试验，可以获得建筑物表面任一测点的净风压。将此压力除以一个特定的参考风压（通常选择梯度风压或建筑物檐口高度风压），得到一个无量纲系数，称为压力分布系数。值得注意的是，压力分布系数和风载体型系数是不一样的，即便是在同一个面上不同测点的压力分布系数也是不一样的。根据这些系数可以画出建筑物表面的风压等值线图。在实际工程中，为了应用的方便，通常采用一个面上压力分布系数的加权平均作为风载体型系数，以供设计参考。

3. 计算方法与分析软件

膜结构作为典型的柔性张拉结构，在力学性能上明显区别于传统的混凝土和钢结构等刚性结构。这主要表现在：膜不具有弯曲刚度，结构对外荷载的抵抗是通过改变自身形状来实现的；当作用于膜面上的荷载发生变化时，结构除产生弹性变形外还会产生较大的机构性位移，因此变形比较明显；膜结构属于动不定体系，其结构刚度主要是由初始预张力和互反曲面来提供的，结构刚度与变形相关，表现出明显的几何非线性特点；膜结构的自振频率较低，且振型频谱密集、相互耦合。这些力学特性决定了膜结构的计算分析具有不同于一般结构的特点，一些通用的工程设计软件无法直接用于膜结构的设计，必须采用专用的分析软件。

3.1 膜结构计算中的几个问题

1. 几何非线性问题

尽管膜结构的找形有不同的理论和方法，但荷载态的分析大都采用非线性有限元法，即将结构离散为单元和结点，单元与单元通过结点相连，外荷载作用在结点上，通过建立结点的平衡方程反复迭代求解。由于膜结构的求解问题具有小应变、大变形的特点，因此在推导有限元方程时需考虑位移高阶项对应变的影响，亦即考虑几何刚度的影响。

2. 材料非线性与各向异性

基于以下原因，织物膜材从本质上讲是非线性的：经纬向纤维本身的性能是非线性的；纤维间的约束与经纬向应力比有关；涂层的性能是非线性的，并受时间的影响；由于编织，经纬向纤维在初始状态是松弛的，而涂层对纤维受拉变直又有约束作用。因此，膜材的应力—应变曲线在应力较大时呈现很强的非线性（如图 3 所示），同时呈现很强的正交异性性能，一些膜材的经纬向变形能力相差达 5 倍左右。

由于设计中所采用的预张力及工作应力远小于膜材的抗拉强度（通常预张力不超过 5%的抗拉强度，工作应力不超过 20%的抗拉强度），在设计应力范围内，可近似认为膜材是在线弹性范围内工作。计算中经纬向采用各自相应的弹性常数。

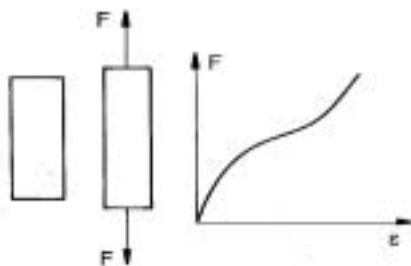


图3 典型的膜材拉伸应力 - 应变曲线

3. 徐变问题

徐变是指结构在高应力作用下，随着时间的推移在构件中产生的塑性变形。松弛则是指在构件两端固定的情况下，由于徐变变形而导致其应力随时间的增长而逐渐降低的过程。徐变和松弛是相互关联的，它揭示了材料的粘弹性力学性能随时间的变化规律。徐变的特点是：（1）开始阶段发展较快；（2）预应力越大，松弛损失就越大；（3）应力损失与构件材料有关；（4）与温度的高低有关。

国外一些实测资料显示，索结构由于徐变所导致的预张力损失可达到 10% - 25% 左右；膜面因徐变所导致的预张力损失随膜材的种类和品牌不同而不同。为消除由于徐变所带来的预张力损失，施工时，可对索和膜实施适当的超张拉；或者在结构施工一段时间后（通常为半年到一年左右），对结构实施二次张拉。对采用 PVC 膜材料的工程，二次张拉尤其有必要。

松弛不仅与材料的徐变效应有关，还与连接锚固处的滑移、支座移动、温度应力、反向荷载等因素有关。通过荷载效应分析，可以调整索和膜面的形状及初始预张力，避免因松弛而导致局部索或膜面退出工作，以保证结构的整体刚度。

4. 与支承结构的协同计算问题

膜结构通常是支承在下部钢结构上或直接与地锚相连。设计时不但要考虑膜自身的应力和变形，还要考虑下部钢结构和地锚的工作性能。换句话说，膜结构的设计应与钢结构和基础的设计同时进行。通常在设计膜结构时，将膜结构与下部支承结构分开计算，即先将支承点看作不动铰支座对膜结构做内力分析，然后再将膜结构计算的反力值施加到钢结构或基础上，计算下部结构。对于刚性支承体系的膜结构，刚性边界或支承构件在膜面张力作用下的变形会引起膜面张力损失；当支承点有可能产生较大位移时，也必须考虑其对膜结构内力分布的影响。这就需要将膜与下部支承体系一起进行整体计算。需要说明的是，下部支承结构并非越刚越好；相反，在某些情况下，下部支承结构的位移可以促使膜内的应力重分布，使应力趋于均匀，减少可能出现的应力集中或褶皱现象。

膜材自重较轻，地震对膜结构的影响较小，故一般可不考虑索、膜构件的地震作用。当下部支承结构在地震作用下有可能产生较大变形时，在膜结构设计中就必须考虑这一因素的影响。将膜与下部支承体系一起进行协同计算，有利于对膜结构进行抗震分析。

5. 褶皱的处理问题

褶皱是指膜材在单向拉应力状态下出现的平面外变形。膜面的褶皱可分为两种：一种是因膜面在一个方向上张力消失导致膜材松弛而产生，称之为结构褶皱；另一种是因膜材生产过程缺陷、热合不当或包装折叠不当而产生，称之为材料褶皱。结构褶皱是临时的，会随膜面重新受拉而消失，而材料褶皱是永久的。通常所说的褶皱是指前者，即结构褶皱。

褶皱对膜结构的影响不仅体现在视觉效果上，对结构性能的影响也是不可忽视的。褶皱的出现将导致膜面预张力的重分布，从而使得膜面某些区域的应力低于设计值，而另一些区域的应力高于设计值。当膜面应力低于设计值时，将导致结构局部刚度降低，易产生微风振动；当膜面应力高于设计值时，将导致膜材产生较大的应变和徐变，甚至发生膜材局部撕裂。此外褶皱还会影响结构的美观和排水性能；因此应尽量避免膜材在正常使用状态（长期荷载组合）下出现褶皱。

在荷载态分析中，可以通过对单元主应力的计算来判别褶皱单元。设单元主应力为 σ_1 和 σ_2 ，且 $\sigma_1 > \sigma_2$ ，则：

- 1) $\sigma_1 > 0$ ， $\sigma_2 > 0$ ，单元正常工作；
- 2) $\sigma_1 < 0$ ， $\sigma_2 < 0$ ，单元退出工作；
- 3) $\sigma_1 > 0$ ， $\sigma_2 < 0$ ，单元为单向受拉。

对于第三种情况--单向受拉，可认为将出现褶皱。计算时可采用修改褶皱单元刚度矩阵的方法来减小或忽略褶皱单元对整体刚度矩阵的贡献。如果结构在荷载作用下产生较多褶皱，说明结构的刚度不足，找形得到的曲面存在“病态”。此时应回到找形阶段，对曲面进行修正，即通过修改局部区域的边界条件或调整预张力的方法来修正结构的刚度。

3.2 相关分析软件

膜结构分析软件可大致分为三种类型。第一类是单纯的找形软件，它们多数是从相应设计软件的找形部分分离出来的。像德国的 CADISI 相当于 EASY 的找形模块，意大利的 TensoCAD 相当于 Forten 找形模块，新加坡的 WinFabric/Lite 是 WinFabric 找形部分。这些软件可供建筑师用于找形概念设计。第二类软件包含找形及裁剪两部分，即不仅能找出形状还能确定裁剪线，并绘出膜材的下料图，但荷载态的分析要借助其它非线性软件完成。像英国的 Patterner 及新西兰的 Surface 等均属此类。第三类软件包括找形、荷载态分析及裁剪等全部内容，可生成直接供电脑控制的裁剪机器下料的数据，像德国的 EASY，英国的 inTENS，意大利的 Forten32，新加坡的 WinFabric 等。一些著名的膜结构公司如 Birdair 等拥有自己开发的专用软件。

一些常见的膜结构设计软件的主要特征及网址如表 1 所示。

表 1 常见的膜结构设计软件

名称	国家	找形模块	荷载分析模块	裁剪模块	网址
EASY	德国	力密度法	非线性有限元	测地线法	http://www.technet-gmbh.com/
inTENS	英国	动力松弛法	非线性有限元	测地线法	http://www.tensys.com/
Forten32	意大利	力密度法	非线性有限元	测地线法	http://www.forten32.com/
WinFabric	新加坡	力密度法、动力松弛法	非线性有限元	有限元法	http://www.me.com.sg/
Patterner	英国	动力松弛法	无	测地线法	http://www.patterner.co.uk/
Surface	新西兰	动力松弛法	无	测地线法	http://www.surface.co.nz/

4. 计算结果的分析

4.1 曲面病态的判定与调整

找形的目的是要得到既符合建筑师的外形构思，又符合边界约束和力学平衡的空间形状。但是并非所有通过找形得到的形状都是合理的，或是最优的。由于膜结构的形状与膜面内的应力之间存在相互制约的关系，因而如果在荷载态分析中出现褶皱过多或变形过大的情况，就说明膜结构的形状不合理，即存在“病态”区域或曲面是“病态”的。

1. “病态”曲面的判定

对于“病态”曲面的判定可以从几何、应力和刚度三方面来考察。

几何方面：主要是看外形是否尽可能接近建筑师的外形构思；是否存在较大范围的扁平域（扁平意味着几何刚度低，易产生积水或积雪）；曲面的曲率变化是否平缓（曲率的过大变化，将导致支承条件复杂且膜面应力集中），等等。

应力方面：主要是看是否有应力集中现象；应力分区不宜太多，相邻应力分区的应力值相差不宜太大。

刚度方面：主要是针对受荷状态而言，即受荷时是否因张力消失而出现褶皱，是否在风雪荷载下出现过大的变形。

2. “病态”曲面的调整

对于病态曲面，可考虑采用以下修改方法：

几何控制修改法：通过修改支承及边界条件来修改曲面几何，从而修正结构的刚度。

应力控制修改法：通过修改曲面的预张力分布及数值来修正结构的刚度。

综合修改法：同时修改支承及边界条件和膜面预张力，得到新的平衡曲面。

曲面的病态判别及修改，在某程度上，就是一个曲面优化的问题。这里的优化，要结合荷载态分析的结果（是否有张力消失，变形是否过大）来进行，所以说，找形与荷载态分析是个多次反复的过程。

4.2 位移控制和应力控制

膜结构具有较强的几何非线性，各项荷载效应无法进行线性组合。目前国内外习惯上都还采用基于安全系数的容许应力法设计膜结构。设计时需考虑不同的荷载组合，其中恒荷载、初始预张力参与所有的组合。

1. 位移控制

膜结构是通过大变形来适应外加荷载的。对于小品类膜结构而言，膜面的容许位移可以取大一些；而中、大跨度的膜结构，一般膜面较为扁平，过大的竖向位移易导致积雪积水，使膜面产生渍斑甚至结构倒塌；水平位移过大也易使人产生不舒适感。另外，要注意防止膜结构因大位移与周围其他物体产生摩擦或撞击导致膜面破裂。

2. 应力控制要求

在各种荷载作用下，膜面各点在经纬方向的最大应力应小于所用膜材的抗拉强度除以相应的安全系数。此外，还应保证在各种荷载组合作用下，所有索段均处于受拉状态；在长期荷载组合（恒荷载、初始预张力）作用下，所有膜片均处于张力状态。

5. 膜材、索及索具的设计

5.1 膜材的设计

膜材通常存在以下几种失效模式：膜材内的拉应力超过其经向或纬向抗拉强度，导致膜材被拉断；由于膜材接缝处或膜与其它结构的连接处的连接强度不足所导致的开裂；在膜材安装过程中或由于构造不当所导致的膜材撕裂。从结构角度讲，对膜材的选择就是要保证膜材的抗拉强度、连接强度和抗撕裂强度满足结构设计的要求。

对于第一种失效模式，可以通过增大膜材的安全系数来避免。通常在永久性荷载（如自重、预张力）作用下，膜材的安全系数取 8；对于风荷载起控制作用的组合，安全系数取 4；对于雪荷载，安全系数则取 5[4]。因为雪荷载通常会持续一段较长的时间，可以认为是一种半永久性荷载。由于膜材的经纬向抗拉强度及膜面在各个方向的应力并不相同，上述校核要按方向分别进行。

对于第二种失效模式，可在接缝计算时加大安全系数、保证必要的接缝宽度来避免。当采用焊接连接时，通常 PVC 及 PTFE 膜材的接缝宽度为 40 至 60 mm，小品中也有采用 25 mm 的；ETFE 膜材的焊接接缝宽度一般为 10 mm。具体宽度取决于膜面设计应力及焊接加工的质量；接缝强度还与温度相关，温度越高，

强度越低。除设计选定外，实际加工时还需试焊、测试接缝强度。

第三种失效模式，往往与应力集中有关，这也是设计和安装过程中尤其要注意避免的。由于膜材的撕裂强度仅为其抗拉强度的十分之一左右，从国内已有膜结构的工程经验来看，膜材撕裂是最易发生的工程事故。膜材安装过程中的临时固定措施不当是导致膜材撕裂的主要原因之一，此时的膜材已经展开但尚未绷紧，在阵风的作用下极易导致膜材撕裂。设计中所采用的构造措施不当，也是导致膜材内的应力集中并最终撕裂的原因之一。在膜面与其它构件的连接处容易产生应力集中，对这些部位应适当进行补强，即增加边界处膜的层数。此外，由于膜结构的变形比较大，在膜结构与钢结构的连接部位应保证具有足够的自由度；同时要防止膜面在风作用下与周围其它物体相碰撞或摩擦而使膜面受损。

5.2 索及索具的设计

膜结构用索一般为高强钢丝组成的半平行钢丝索、钢绞线、钢丝绳等。半平行钢丝索是由若干高强度钢丝并拢经大节距扭绞而成，能够充分发挥高强钢丝的强度，弹性模量也与高强钢丝接近，多用于大跨度建筑和重要建筑中。钢绞线是由若干钢丝捻绞在一起而成，由于各钢丝之间受力不均匀，其抗拉强度和弹性模量都要低于半平行钢丝索。钢丝绳是由若干股钢绞线沿同一方向缠绕而成，其强度和弹性模量又略低于钢绞线；其优点是比较柔软，适用于需要弯曲且曲率较大的构件，在一些中小型膜结构中应用较多。

对于索的性能的评估主要有抗拉强度、伸长率、屈服强度和化学成分等几个方面。通常，高强钢丝的抗拉强度为 $1470 \text{ N/mm}^2 \sim 1860 \text{ N/mm}^2$ ，伸长率为 $5\% \sim 6\%$ 。对于半平行钢丝索和钢绞线，其弹性模量约为 $1.9 \times 10^5 \text{ Mpa}$ ；钢丝绳的弹性模量视构造及成型工艺不同大多介于 $0.7 \sim 1.1 \times 10^5 \text{ Mpa}$ 之间，经过预张拉处理后的可达 $1.4 \sim 1.7 \times 10^5 \text{ Mpa}$ 。

索的防腐处理一般有三种方式：钢绞线镀锌、裹以树脂防护套、表面喷涂。镀锌有电镀和热蘸镀两种方式，镀锌厚度约为 $25 \sim 40$ 微米，防护有效期与所处环境的恶劣程度有关。树脂防护套形成一个密封的隔离层阻止了索与外界环境的接触，所用材料多为高密度聚乙烯（PE）。表面喷涂也是为了形成一种隔离层，所用材料是矿脂化合物或合成蜡，融化后喷涂。对于膜结构用索，国内多采用镀锌钢绞线或镀锌钢丝绳；当钢绞线、钢丝绳外露时，则需采用 PE 护套或其他方式防护。国外膜结构用索多为不锈钢索。

索具是连接索与其它结构的重要构件，其力学性能必须保证：在索破断拉力的作用下没有明显屈服；在各种荷载组合和环境变化下，确保安全可靠；在动荷载反复作用下不会出现疲劳失效，也不会导致索端头的局部疲劳失效。

膜结构用索具可采用热铸（如巴氏合金、锌铜合金等）或压接（如套环、异型螺杆等）。索具应作表面镀锌处理，并应进行超声波探伤。索具与索的连接处应进行密封处理，还应保证索具与索连接部分的强度不小于索抗拉强度的 95% 。由于不锈钢材料的强度高，用其做成的索具小巧、精致、耐久（见图 4），条件许可时应优先选用。



图 4 常用不锈钢索具

索和索具的强度校核多采用容许应力法。对于索，安全系数一般不小于 2.0 ，即索的抗拉破断力应不小于其最大工作应力的 2.0 倍。索具的安全系数一般不小于 2.2 。

6. 结语

本文着重对膜结构荷载态分析中的一些主要问题进行了探讨，包括荷载取值、特别是风荷载的确定方法；荷载态分析的方法及需要注意的一些问题；常见的膜结构分析软件等。事实上，与传统结构的分析一样，设计人员对计算结果的分析与评判，往往比计算分析本身更为重要。文章后半部分介绍了如何评判计算结果，以及膜、索及索具等构件的设计方法。

参考文献

- [1] 赵臣，陆钦年，沈世钊. 双曲抛物面鞍形屋面风压分布的实验研究. 哈尔滨建筑工程学院学报. 1991(1)
- [2] 沈世钊，武岳. 大跨度张拉结构风致动力响应研究进展. 同济大学学报. 2002，30(5): 533-538
- [3] E. Simiu and R. H. Scanlan. Wind Effects on Structures—An Introduction to Wind Engineering. The 3rd Edition, John Wiley & Sons, INC. 1995
- [4] R.E.Shaeffler (Edited), Tensioned Fabric Structures, A Practical Introduction, Published by the American Society of Civil Engineers, 1996, New York