

# 柔性边界膜结构的设计及实例

胥传喜 陈楚鑫

(RIGHT TECH (S) PTE LTD)

**提要** 柔性边界的膜结构是膜结构中应用最为广泛的结构形式。介绍了其设计要点和细部设计的内容及做法，给出了两个设计实例。

**关键词** 膜结构 柔性边界 结构体系 细部设计 实例

## The Design of Cable- Edged Membrane Structure

Xu Chuanxi Stanley Tan C.S.

(RIGHT TECH (S) PTE LTD)

**Abstract** The cable-edged membrane structure is the most widespread structural style. It had been introduced that the design principle and the detailing for such type of membrane structure; two design examples had been presented.

**Key words** membrane structure cable edge structural system detailing example

柔性边界的膜结构是指以钢索等柔性材料为边界的一类膜结构。由于其边界为优美的弧形，加之造型自由，因而深得建筑师的喜爱。柔性边界膜结构的外形可以是马鞍形、伞形、波浪形，或者是将这些基本外形加以组合的自由造型。辅以钢索或桅杆等适当的内部支承，柔性边界的膜结构可以形成大面积的覆盖空间。图 1 所示为一些典型的柔性边界膜结构的实例。

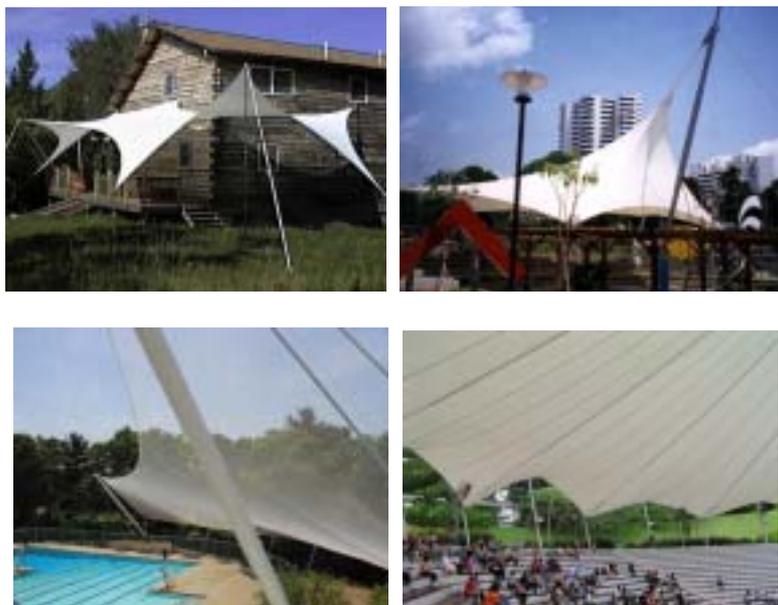


图 1 一些典型的柔性边界膜结构

本文将介绍柔性边界膜结构的设计要点、细部设计的内容及做法，并给出两个造型简单而又典型的结构设计实例。

## 1. 几何外形的优化与确认

在经过方案建议、方案明确及招标投标阶段后，中标的膜结构公司要进行膜结构的施工图设计。施工图设计的首项任务就是几何外形的优化与确认。

### 1.1 影响几何形状的参数确定

进入施工图设计阶段，需要在中标方案的基础上确定以下与膜面几何形状有关的参数：膜面分区及膜布经、纬分布方向，各找形基准点的空间坐标，伞形膜结构伞顶的具体位置及帽圈的大小，边索以及其它与膜面形状相关的加强索、脊索和谷索的具体位置及其相应的弧度，膜面的应力分布及大小等。

虽然膜结构可以形成大面积的覆盖空间，从方便膜面加工制作及安装的角度来看，大覆盖面积的膜结构应进行适当的分区，以减小单片膜面的面积。将膜面分区划块的另一个好处是万一以后发生膜材撕裂的情况，要拆卸下来修补或更换，操作比较方便。复杂曲面的膜面是由简单曲面组合而成的。对复杂造型的膜面进行分区时要考虑其曲面变化、排水安排及支承结构体系等因素。

柔性边界膜结构的找形基准点即膜角节点板的位置所在，与膜和支承结构的连接点位置及连接件的尺寸关系密切，应在查看有关图纸并经现场实际考察后，根据具体情况确定。

伞顶的位置影响到膜面的形状，帽圈的大小直接关系到伞顶处膜的应力大小和膜面焊接制作时的难易程度。为避免膜面应力在伞顶处过于集中及防止热合线过于密集，帽圈的尺寸不宜过小。

与膜面相连的索如边索、加强索、脊谷索等的弧度不仅影响到膜面的形状与覆盖面积，对索的内力影响也非常明显。同时，边索的弧度还影响到膜角点处膜布的宽度及节点板边线的夹角。工程应用上一般取边索弧形的矢跨比在 1/10 左右。

膜面的应力分布及大小，不仅影响到找形所得的形状，还关系到结构张成后的刚度。确定膜面应力时要考虑到所用膜材料的性能、张拉方法及实际张拉的难易程度。

### 1.2 膜面外形的优化与确认

在确定了与几何形状相关的上述参数后，需重新生成膜面形状，并对膜面进行荷载态分析；检查膜面是否有应力过于集中、变形过大，以及是否会出现积水积雪等现象，进行必要的修改和优化。

形状的修改、优化，需得到建筑师和业主的确认，并通报其它专业工种，以便协调、配合。

## 2. 柔性边界膜结构的结构体系设计

### 支承结构体系自身的稳定性

在膜结构中，膜是主要受力构件之一。尽管如此，膜结构的支承体系仍应满足其自身稳定性的要求。以图 2 所示的膜结构为例，为适应风载作用下的大变形，中间的桅杆底部做成铰接；虽然在张拉完成后，膜面及其边索与桅杆可组成结构体系，在桅杆顶部还是设置适当的拉索以保证支承体系自身的稳定性。这主要有两方面的考虑：一是为了在张拉膜面时，支承体系已经成型，以方便把握各控制点的空间位置及对膜面实施张拉；二是为了防止万一发生膜材撕裂，不至于引起结构整体倒塌的严重事故，更换膜面时施工也比较方便。如受条件所限不设稳定索时，宜将中柱设计成底部刚接的格构柱，确保中柱的稳定，如图 3 所示。



图 2 底部为铰接桅杆、顶部设拉索



图 3 中柱为底部刚接的格构柱

### 水平力的传递

在柔性边界的膜结构中，作用于膜面的荷载会以膜面张力的形式呈现，并主要通过边界索经膜角节点板传递到支承结构或基础，节点处的水平力往往很大。设计中应采用合适的构造措施以确保水平力的可靠传递。

虽然膜可以直接拉到地面（如图 4），但基于使用功能及安全方面的考虑，一般膜的边角不宜太低，因而常需在四周设立柱子作为支承点。为避免柱顶水平力在柱脚产生过大的弯矩，可将边柱的柱脚铰接，也就是将其做成撑杆，并设置拉地锚索以传递膜角节点板传来的作用力。此时，撑杆、锚索的倾角应合理设计，以保证传力最有效并保证在各种荷载组合下的稳定。如因场地所限不能设置锚索时，可采用组合式边柱。图 5 所示是两个组合式边柱的例子。



图 4 膜角直接拉到地面



图 5 膜角由组合式边柱支承

### 体系内力的自平衡

膜结构是一种张力结构，所有作用于膜面的外部作用都会以膜面张力的增减来体现。在布置膜结构的支承结构体系时，应尽可能将其设计成自平衡体系，以减少膜面张力对下部结构或地基的影响。

图 6 是为一座人行桥增建的膜结构顶盖。膜结构覆盖部分长度为 72m。膜面形状在两端头为拱支承，中间为马鞍形与伞形组合。设计者利用设置在桥两侧的斜杆和水平撑杆，加上两侧及桥底的不锈钢拉杆，连同上部的膜面组成一个整体系统，以平衡体系内的张力，从而将新建膜结构对原有桥梁的影响减到了最小。



图6 利用两侧及桥底拉杆与膜面组成整体系统

## 2.4 结构单元的重复与组合

利用某种基本外形的结构单元加以组合,是形成大面积的覆盖空间的行之有效的方法。如覆盖面积达四十余万平方米的沙特阿拉伯哈吉机场膜结构候机大厅(The Haj Terminal, Jeddah, Saudi Arabia, 图 7a)就是由 210 个悬挂伞形膜结构单元组合而成;许多体育场的看台膜结构也是由多个同一结构单元组合而成,如上海八万人体育场、威海体育场、郑州航海体育场(图 7b)等。设计时需注意膜面的热合线在连接处要对齐,以形成连续、流畅的视觉效果,参见图 8。



a. 沙特阿拉伯哈吉机场

b. 郑州航海体育场

图7 用同一结构单元组合成大面积的覆盖空间



图8 单元组合时膜面热合线对齐

## 3. 细部设计

### 3.1 膜与索的连接

在柔性边界的膜结构中,索的应用形式可以是形成膜边界的边索,帮助大面积膜面传递荷载的加强索,辅助形成曲面形状的脊索和谷索,以及维持支承结构体系稳定的结构稳定索和锚地拉索等。

边索与膜的连接可以是索穿在膜边的“裤套”内,也可以通过“U型”夹板相连;加强索以及脊索和谷索可以在膜布外也可以在膜布内,具体连接构造参见第四讲中的相关内容。

### 3.2 索及索具的选用

索及索具对膜结构的美观影响很大,应尽可能选用制作精美、耐久性能好的不锈钢制品,如图 9。索及索具的最小破断力应满足机械强度的要求,具体安全系数参见第三讲中的介绍。



图9 不锈钢索及索具

### 3.3 张拉节点及膜角节点板

为适应膜面在风作用下的变形及满足对膜面实施张拉和二次张拉的需要，张拉节点应有足够的转动自由度和张拉调节量。图10为一些张拉节点的构造示例。

膜角节点板由不锈钢材料或普通钢板制成，可以是一片节点板加上与之配合的夹板组成，也可以由两片形状、大小相同的板组合而成。节点板的形状与角度要与膜面在角点处的空间形状相匹配，同时传力途径明确、简洁，满足机械强度的要求。有关节点板设计的内容可参见第五讲。



图10 张拉节点构造

### 3.4 伞形膜面帽圈的形式及伞顶装饰

伞形膜结构的帽圈形式有浮动式与固定式之分。浮动式帽圈的伞形结构膜顶部可作小幅度的摆动及转动，能更好地适应荷载作用下的变形。固定式帽圈通常也做成在竖向可调节，以便通过顶升帽圈给膜面施加预张力。第四讲中已给出帽圈的常见做法。

伞顶应视具体情况设置相应的防雷装置，并进行适当的装饰，以起美化作用。图11是一些伞顶装饰做法。



图11 伞顶装饰

### 3.5 膜面开洞的处理

应尽量避免在膜面开洞。当必须在膜面开洞时，应采取适当的措施，以保证开洞处膜面张力的可靠传递，同时视情况做好防水处理。图 12 为一些膜面开洞的情况，图 13 为笔者设计的一种膜面开洞的具体做法，洞口处下方为一环形铝合金板，上方为用铝合金角钢制成的同样大小的圆环，用螺栓将膜布夹紧。膜面的张力在洞口处通过圆环传递，上面的角钢可阻止雨水从洞口处流入。

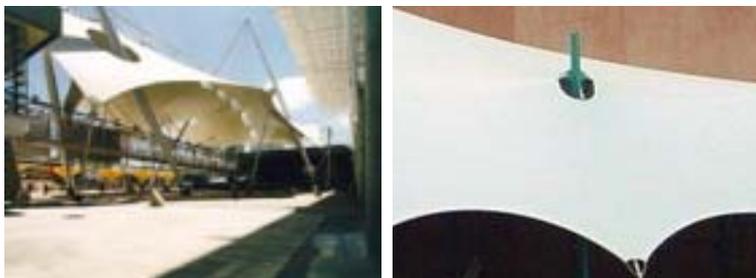


图 12 膜面开洞

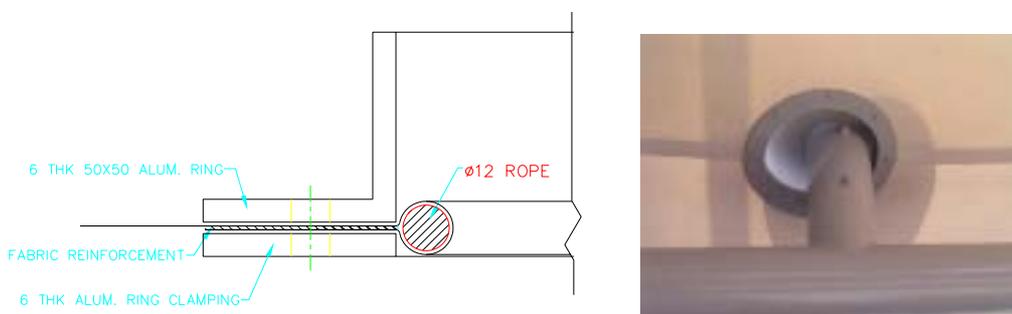


图 13 膜面开洞具体做法

### 3.6 裁剪应变补偿的修正

正如在第五讲中所提及的，在柔性边界的膜结构中，靠近边索处的膜在沿索的方向很难张拉，伞形膜在帽圈处沿环向也难以切实有效地施加预张力。当采用统一的百分率对膜布进行应变补偿（预缩）时，需对这些特定部位的补偿率作出修正，或者说进行反向补偿。另一方面，膜材的热合应采用张拉焊接。对膜片分块小、热合缝密集的区域，要考虑因热合造成的膜材收缩对补偿率的影响。

## 4. 设计实例

膜结构在工程中的实际应用可分为两大类：一类是造型各异的膜结构小品，一类是跨度不等的膜结构屋盖。当然也有少数用于竖向围护结构的例子。作为示例，下面仅并给出两个造型简单而具代表性的膜结构设计实例。

### 4.1 马鞍形曲面膜结构设计实例

某公寓翻新工程要在其游泳池旁的儿童游戏场上建一膜结构小品。基于安全考虑，要求该结构的柱子及拉地锚索尽可能少。最后选定采用两个高点、两个低点共四个角点的马鞍形曲面，由一根中柱支承。

这类马鞍形膜小品在工程中应用较多，常用的尺寸多在 3m×3m 至 5m×5m 之间。设计这类小品时，在几何方面需要确定其平面尺寸、高点及低点的空间坐标、边索的弧度等。如果当地防火规定许可，选用较为柔软的 PVC 膜材料，会比较容易张拉。

本工程膜面投影尺寸为 8m×8m，采用日本产 SKYTOP FGT-800 PTFE 膜材。高点与低点的高差为 1.4m，即膜面的矢高为 0.7m，矢跨比为 1:16。边索的弧度取 7%；采用力密度法找形，取经纬向的力密度为 2 kN/m。

支承结构由一根中柱、四根杆件加四根拉索组成。将膜面荷载态分析所得结果施加于支承体系上，进行结构内力分析和构件设计。中柱及杆件选用镀锌圆钢管，直径分别为 168.3 及 141.3。拉索采用直

径 14mm 的 1X19 G316 不锈钢索，边索为直径 10mm 的 1X19 G316 不锈钢索，配以不锈钢索具。中柱与尺寸为 500X500X25 的底板焊接，并通过膨胀螺栓固定在下方的混凝土梁上。

根据找形结果进行裁剪设计。裁剪线沿两高点对角连线布置，膜面共分为四片，两两对称。膜布的应变补偿率经向为 0.5%，纬向为 2.5%。考虑到张拉的实际可能性，对靠近膜角节点板及边索处膜布的应变补偿率进行修正。

图 14a 为结构的三维视图，图 14b 为建成后的照片。



a. 结构三维视图

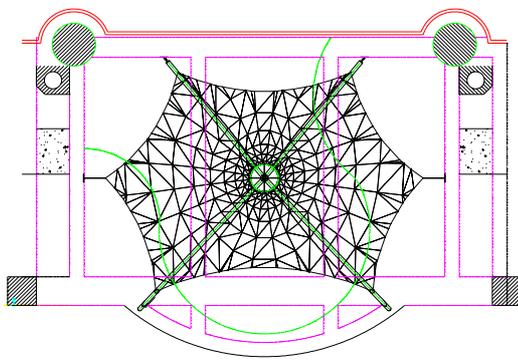
b. 建成后的结构

图 14 马鞍形曲面膜结构小品

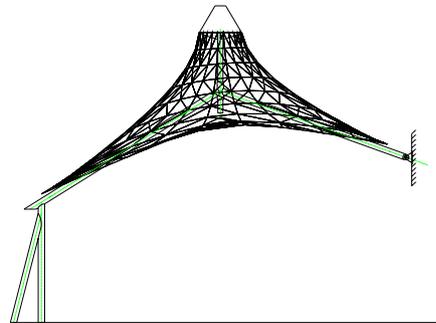
#### 4.2 伞形曲面膜结构设计实例

本例为在一建筑物门厅屋盖上新建的膜结构顶盖。现场三面为墙壁，一面开敞，平面尺寸为 10mX12m。改造后的屋顶将作为儿童活动场地。因布置滑梯、爬竿等需要，要求中间部位的膜及支承构件距楼面的最小高度为 4.6m。

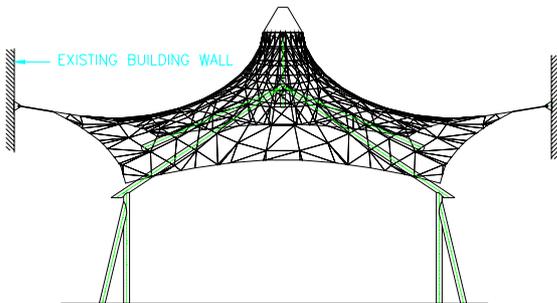
采用伞形膜结构。在楼面开敞面边缘的混凝土梁上设两个“人字形”立柱用以支承斜杆，加上支承于对面墙内混凝土柱上的另两根斜杆，交在一起以支承中部的帽圈。在斜杆一端设张拉节点，加上设于两侧墙内混凝土横梁上两个节点共有六个张拉节点。帽圈直径取 900mm，边索的弧度取 10%；经纬向的力密度为 3 kN/m。找形后的膜面及支承结构如图 15 所示。



a. 平面图



b. 剖面图



c. 立面图

图 15 找形后的膜面及支承结构

伞形膜结构的裁剪线通常沿伞的经向布置。为使膜面整洁，裁剪线宜均匀分布。适当减小各裁剪片的最大宽度可提高膜材的利用率，但热合工作量会增加。一般控制伞顶处热合缝的间距不小于 100mm，以方便加工操作。

本例采用 SKYTOP FGT-800 PTFE 膜材，膜面被剖分为 16 个裁剪片。经向应变补偿率为 0.7%，纬向为 3.5%。考虑到张拉的可能性及热合收缩的影响，伞顶帽圈处纬向反补偿率为 100%，边索处取 85% 的纬向反补偿；反向补偿的范围取为 1m，即反向补偿率从起始处的最大值逐渐变化到 1m 处为 0。焊缝宽度为 50mm。伞顶帽圈处的连接构造如图 16 所示。图 17 为建成后的部分照片。

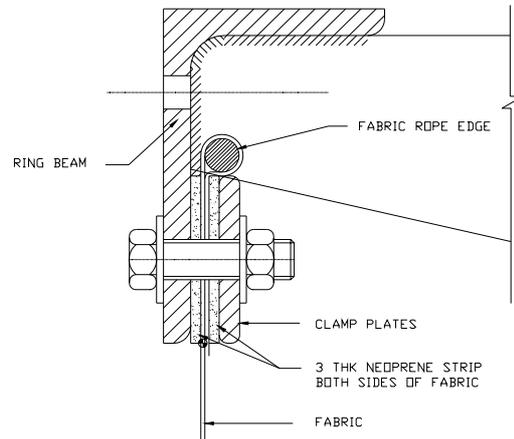


图 16 帽圈处的连接构造

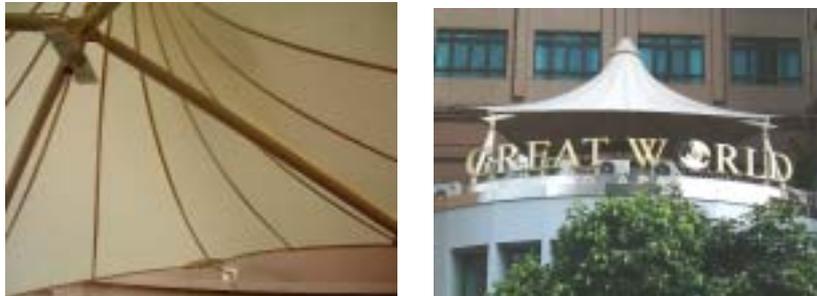


图 17 建成后的照片

## 5. 结语

本文主要介绍了柔性边界膜结构的设计要点尤其是支承体系的自身稳定性、水平力的传递、体系内力的自平衡等内容；给出了一些构造做法，并给出两个造型简单而具代表性的实例。复杂造型的膜结构是由简单造型组合而成，本文内容可供实际工程参考。