



# 印度尼西亚Tenggarong Madya体育场膜结构

## Membrane Structure of Tenggarong Madya Stadium, Indonesia

撰文 宋小兵 李中立  
北京中天久业膜建筑技术有限公司

图1 鸟瞰

### 1 工程背景

印度尼西亚Tenggarong Madya体育场是印尼第一座采用膜结构体系的大跨度体育场。该工程膜覆盖面积约1.5万平方米，可同时容纳5万余名观众参观比赛，体育场下部土建结构由雅加达建筑事务所MANAJEMEN KONSTRUKSI设计，为钢筋混凝土框架结构（图1）。

体育场呈双轴对称布置，分为南北向两个看台，长轴长232.93米，短轴长211米。体育场最主要的受力构件钢结构主拱断面形式为菱形，沿主拱方向断面尺寸渐变，拱中间截面最大高度3.5米，端头最小截面高为1.685米。菱形断面的四根弦杆均为双向弧形圆管，前后弦杆为 $\Phi 329.3 \times 12.7$ ，上下弦杆为 $\Phi 273 \times 12.7$ 。两看台上的钢结构主拱通过左右两侧的钢筋混凝土柱连在一起，将两个完全独立的体系衔接起来，构成了一个有机的整体，平面投影呈规则的“枣核”状（图2）。

体育器械和相关设施均布置在“枣核”内部。在“枣核”外部，与主拱方向垂直布置了30榀平面桁架，相邻两榀平面桁架间距约8米，平面桁架最大悬挑长度达32.42米。平面桁架弦杆的管径最大为 $\Phi 329.3 \times 12.7$ ，最小为 $\Phi 219.1 \times 9.5$ 。该平面桁架后端与钢筋混凝土框架柱的连

接分为两部分：一是通过两个抗震球型支座支撑在钢筋混凝土框架柱顶上；二是在平面桁架后端与框架柱脚间设置下支撑（图3）。在相邻两平面桁架之间布置5道弧形钢管，一方面增大钢结构体系及膜面的刚度，能有效地抵御外部荷载作用；另一方面可以使膜篷盖的造型更丰富，形成波浪起伏式膜单元造型。考虑到平面桁架抵抗水平力的能力较差，侧向刚度不足，水平位移较大，在六个跨间布置了水平拉杆，水平拉杆采用 $\Phi 30$ 圆钢，每跨10根。膜单元的前后端是柔性钢索，钢索选用高强镀锌钢绞线，外包白色PE保护套。

体育场屋顶膜篷盖为有组织排水，除边跨外，在每榀平面桁架上弦末端均布置集水漏斗，将膜面上的水沿排水管线有组织地导入地下排水系统。另外，在看台范围内沿钢结构主拱方向布置检修马道，以备安装和检修灯光音响之用。

### 2 结构体系受力分析及其传递途径

整个篷盖结构由钢索、膜、钢结构主拱、平面桁架及支撑系统组成，属于典型的索膜组合式结构体系。以平面桁架为界，将整个膜篷盖分为29个膜单元（单侧看台），单个膜单元面积最大可达400平方米，通过前后端的钢索和

设置在平面桁架上弦之上的张拉结构施加预应力而成形。作用在膜面上的荷载沿两条途径向下传递：一是以线荷载的形式直接作用在与之相连的平面桁架的上弦；二是荷载先传到与膜直接相接触的弧形管和前后端边索上，然后再传递到平面桁架的上弦。然后，作用在平面桁架上弦的荷载将以集中力的形式传递到前端主拱和后端钢筋混凝土框架柱上。

平面桁架后端与钢筋混凝土框架柱连接分为两种形式：一种形式是通过两个抗震球型支座支撑在钢筋混凝土框架柱顶上，将膜篷盖结构所受到的荷载以轴力的形式传递到下部土建结构上；另一种形式是在平面桁架后部与钢筋混凝土框架柱脚之间设置支撑杆件，该支撑杆件与混凝土柱脚采用销节点，只承受轴力。

主拱和平面桁架二者互为依存关系。一方面，平面桁架为主拱提供了必要的侧向支撑，减少了主拱的计算长度；另一方面主拱作为平面桁架的一个支承作用点，平面桁架将膜上荷载通过主拱传递到地面土建结构，直至基础。

在进行初步设计时，建筑方案是按16米跨间距布置三角桁架来考虑的，将三角桁架的两个下弦支在后排混凝土框架柱的牛腿上，并在两相邻三角桁架间布置纵向联系桁架，计算结果表明在有三角桁架的混凝土框架柱顶的节点

反力相当大，这就会导致下部混凝土框架结构的梁柱断面尺寸过大，造成材料的极大浪费，很不经济。方案经过优化调整为8米跨间距布置平面桁架，且支在前后双排框架柱之间，这样柱顶的结点反力大幅减少，受力更加合理。

### 3 典型节点

节点设计是膜结构设计过程中一个很重要的环节，节点的连接构造除了要保证安全可靠、受力合理、易于安装等要求外，由于存在预张力的施加，钢结构之间、索与钢结构之间、索与膜之间等均存在连接问题。因此，其节点设计和一般钢结构相比，有其自身的特点和难度。就本工程而言，以下两处的节点设计是比较有代表性的。

#### 3.1 平面桁架上弦张拉结构的设计

关于平面桁架上弦的张拉结构的设计有两个方案可以选择（图4）：

比较方案1与方案2，不难发现，二者的张拉方式是一样的，都是通过张拉螺杆进行预张力施加的。张拉螺杆通过内嵌滑块与铝合金夹具连接，并在铝合金夹具内可沿着平面桁架方向产生微小滑移，减少由施工误差造成的不利影响，铝合金夹具的主要作用就是将膜面承受的荷载通过张拉螺杆有效地传递到平面桁架上。为便于安装和施加预张力，铝合金夹具统一按1.2米长的规格进行铸造，保证铝

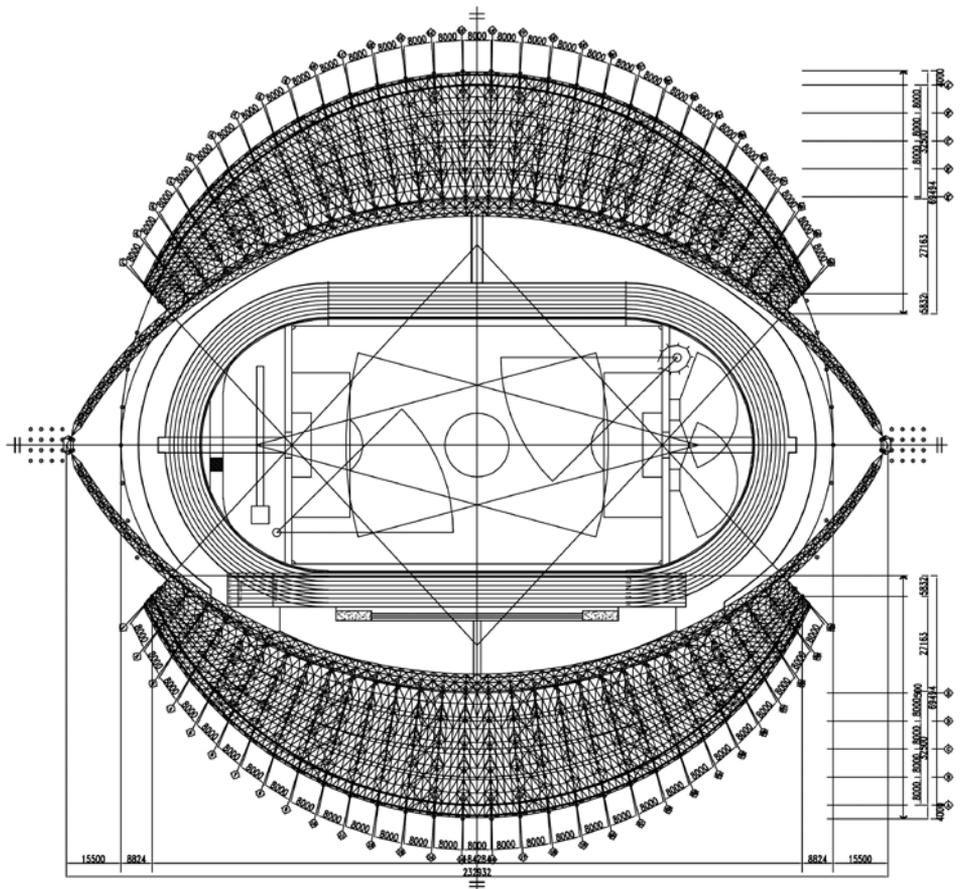


图2 平面

