

# 国外大跨度索结构新工程

## New Foreign Project of Large Span Cable Structure

撰文 张毅刚 北京工业大学空间结构研究中心

国际薄壳与空间结构学会（IASS）连续举办了两次大会：一次是2011年9月在英国伦敦与国际桥梁与结构学会（IABSE）联合召开，收录论文800余篇；一次是2012年5月在韩国首尔与亚太薄壳与空间结构会议（APCS）联合召开，收录论文300余篇。它们实际上是围绕着国际上两个大的活动：伦敦奥运会和丽水世博会。会上交流了许多近年来建造和设计的大跨度索结构工程，笔者学习下来，颇受启发，选择了一些有特点的工程，与读者共勉。

### 1 伦敦奥林匹克体育场——“伦敦碗”

伦敦碗在奥运和残奥期间为80 000座位，赛后转换成25 000座，作为西汉姆联合足球俱乐部的主场。最初的概念设计是可折叠屋盖方案（图1），能轻易向下折为25 000座，也容易向上转换为55 000座，可以满足世界田径锦标赛的要求，然而由于造价过于昂贵被否定。还曾考虑过租赁临时看台方案，但最终采用了现在的方案，赛后拆除屋盖和上层看台。

屋盖挑篷采用A形柱支承外压缩环桁架，内张力环采用索，其间辐射布置双层径向索形成索网，屋面覆盖PVC膜材。30m高的灯塔A形柱立在内拉力环索上，设后稳定索和环向稳定索。为开幕式的需要，在外压缩环桁架上再布置A形柱，设后稳定索和辐射布置径向索与中央拉力环连接形成又一层索网（图2）。该结构体系受力清楚，体态轻盈，施工方便，剖面图中与“鸟巢”作了对比。特别值得一提的是，压缩环桁架采用法兰栓接，大大减少了现场焊接量，降低了碳排放。马道的布置还考虑了施工时可利用。

### 2 伦敦奥林匹克自行车馆——“炸薯片”（图3）

伦敦奥林匹克自行车馆是目前世界上最大的自行车馆之一，共6 000座位，部分沉入地下，建筑仅22m高。

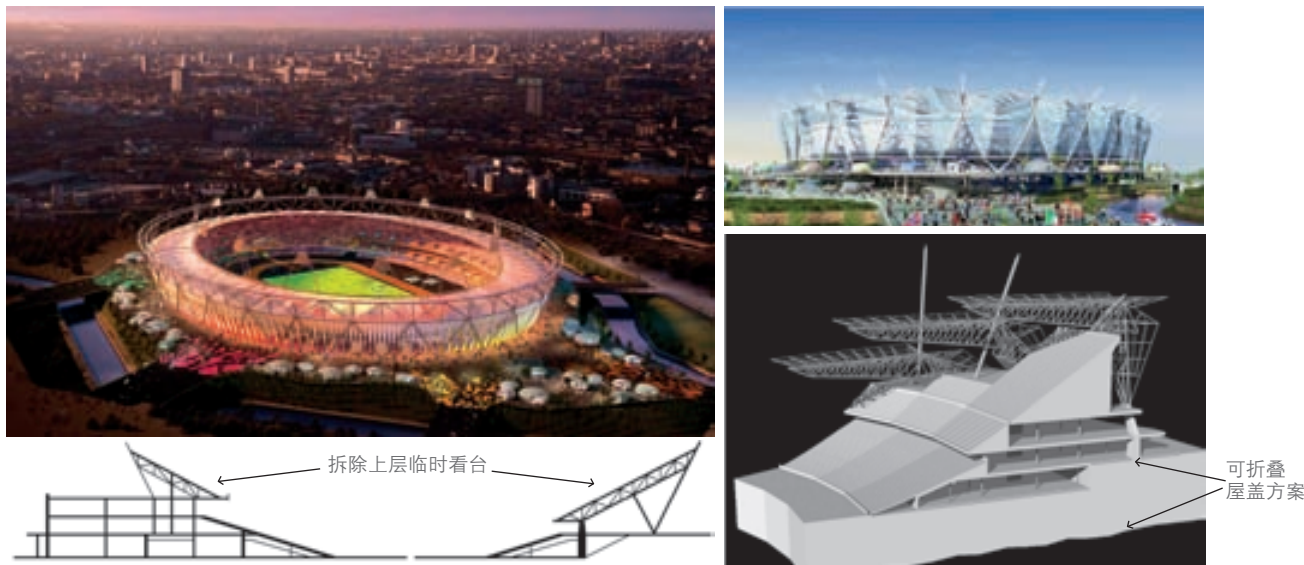


图1 伦敦奥林匹克体育场

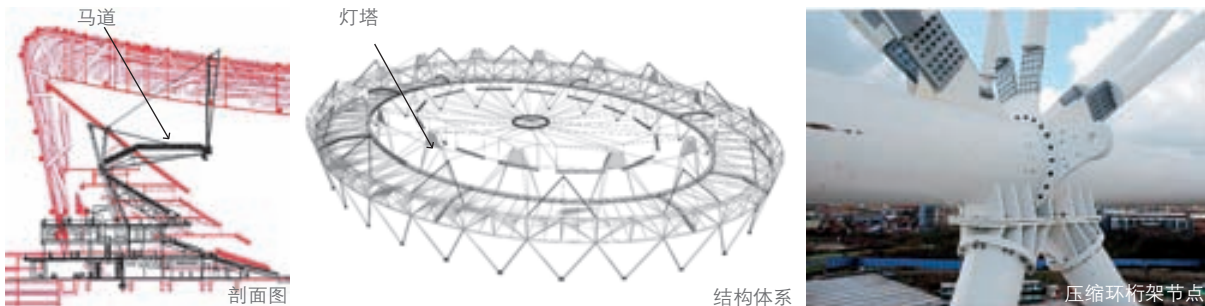


图2 伦敦奥林匹克体育场结构体系



图3 伦敦奥林匹克自行车馆

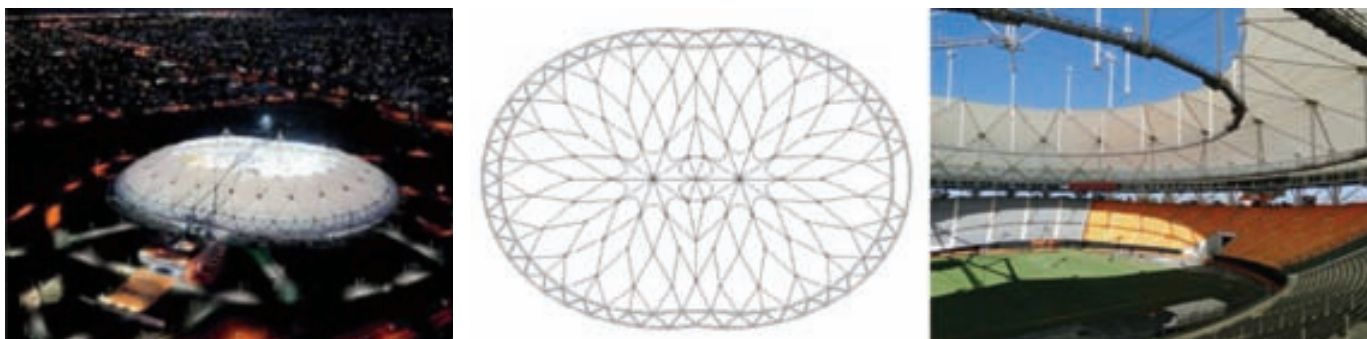


图4 拉普拉塔双星穹顶

两层座椅之间有一面玻璃墙，尽可能为场内提供了自然光线。通风系统 100% 纯天然，收集雨水用于冲厕和景观灌溉。屋盖采用传统的双曲抛物线索网，最高点与最低点落差 12m，周边钢压环法兰螺栓连接，与重型钢梁比节省钢材用量 1/3，且施工速度快。

启示：伦敦奥运场馆建设中清晰地传递着节俭、低碳的信息。不同于我国大规模采用现场焊接，伦敦场馆预制钢结构构件通过法兰螺栓连接，此种做法值得我们学习。

### 3 拉普拉塔双星穹顶（图4）

阿根廷拉普拉塔足球场 2003 年完成看台和屋面环梁，平面为 85m 半径相交的两个圆圈，中心距 48m，已开放使用，53 000 座位，提供给两个足球俱乐部分享。为迎接 2011 年美洲杯揭幕战启动屋盖的建设，屋盖结构采用双圆心的索穹顶，上弦径向索联方形布置，第一环增加了径向索，下弦 3 道环向索。周边压缩环采用三角形钢桁架（9m×13m）。索定长，用两个临时塔架，逐环安装。一期覆盖两个外圈的屋顶，可以保证比赛。二期根据需和和经济条件再覆盖内圈。设计中特别考虑到通常 PTFE 膜材透光率仅 16%，不足以保证天然草生长，覆盖采用新型膜材 UltraLUX，透明度提高到 24%。

启示：在不影响使用的前提下量力而行、逐步完善，该种思想非常可取。

### 4 Ishin 纪念公园竞技场（图5）

日本 Ishin 纪念公园竞技场为迎接 2011 年 9 月日本第 66 届山口体育节而建，固定座位 15 050 个，草地上坐 4 950 人。挑篷 200m×37m，带有 10° 倾角的新月形，标高 25~31m 缓慢弯曲。采用悬挂与悬挑相结



图5 Ishin 纪念公园竞技场



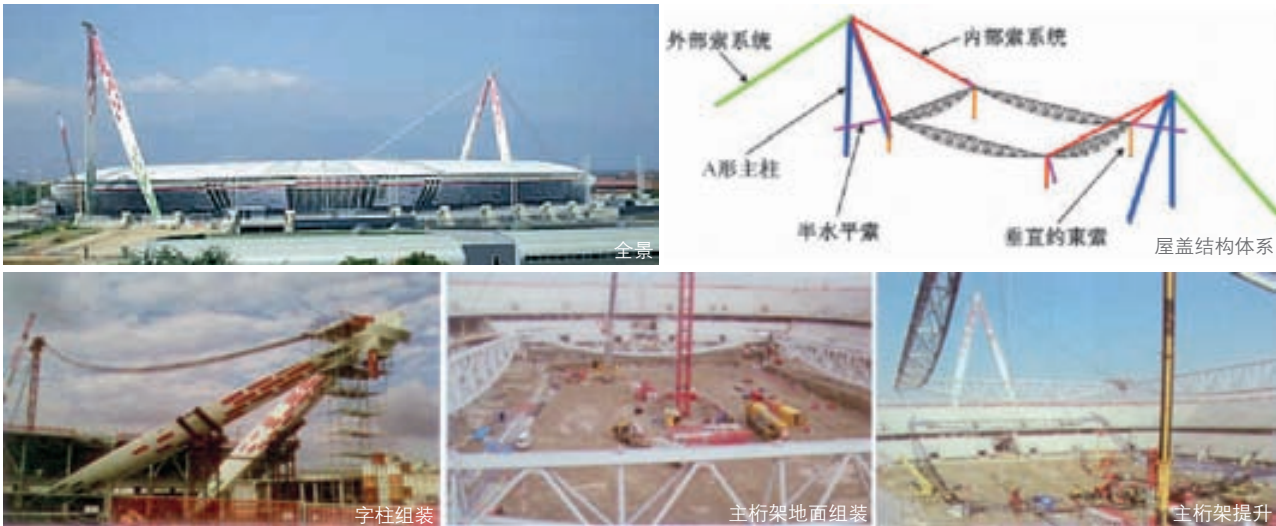


图6 新尤文图斯体育场屋盖结构



图7 捷克霍穆托夫竞技场

合的结构体系，屋盖由 24 榀 V 形柱 + 屋面梁 + 后背索 + 抗风索组成，悬挑端是桅杆 + 悬挂索 + 纵向主桁架，屋面是热浸镀锌铝锌合金钢板。桅杆高 56.2m，穿过圆孔与屋盖分离，以免桅杆承受屋盖地震作用，圆孔处采用拉索柔性连接。结构抗倒塌分析表明，倒塌模式是屋面梁的后背索拉断。

### 5 新尤文图斯体育场

新尤文图斯体育场采用四根拉索悬挂在两侧 A 字柱上的钢屋盖体系，屋盖下部设有水平和垂直布置的稳定索。A 字柱高 79m，柱距 230m，屋盖支座标高 33m（图 6）。

该工程采用地面组装、整体提升的施工方案。巧妙的地方是：通过临时塔架将 A 字柱提升起来，将其内倾并挂上主受力索，然后提升主桁架，并通过将 A 字柱外倾使主桁架提升到位，有效地减少了辅助塔架和工装用索。期间精确地计算了 A 字柱倾斜角度，进行了施工模拟分析。

启示：这两个看似复杂的索结构体系受力清楚，结构轻盈，是精心设计、精心施工的好案例，我国的工程建设应该不再求快，而应求精了。

### 6 霍穆托夫竞技场（图 7）

捷克霍穆托夫竞技场冬季运动比赛大厅屋盖采用吊挂结构体系。拱跨度 120m，矢高 28m，采用直径

1 000mm 钢管。屋盖横向桁架跨度 71m，矢高 3.5m，高度 2m，间距 6.6m；纵向桁架 82.5m，形成整体空间作用。周边钢柱支承，保证体系稳定。大拱就位后，屋盖桁架采用吊挂安装，分片从中间向两边安装，最后连接支承柱，施加预应力。

## 7 克拉罗维镇玻璃音障（图 8）

捷克克拉罗维镇中心有公路穿过，设置玻璃音障长 180m，宽 20m，高 6.7m。结构体系为 9m 高柱支承的斜拉索网。采用不中断交通施工，中央梁先支承在临时支架上，在没有交通的一边安装。

## 8 Vchynice 村玻璃音障（图 9）

公路桥经过捷克 Vchynice 村，设置玻璃音障长 192m，宽 33m，高度 8.5m。采用张弦三铰拱结构。增加预应力索后，结构的总重量由 630t 减至 440t。

## 9 菲律宾音乐厅（图 10）

菲律宾音乐厅位于首都马尼拉西北侧 Barangay Duhat 镇。平面尺寸 227m×179m，50 000 座位，是世界上最大的无柱音乐厅。屋盖结构为张拉环 + 网壳 + 张弦桁架。由于矢跨比低，采用正交网格螺栓球网壳与 180m 张弦桁架结合，一方面可以约束张拉环，同时也提高网壳刚度。采用铅芯橡胶支座作为隔震系统。预计 2014 年 7 月建成，届时将举行 Ni Cristo(INC)100 周年纪念日仪式。

启示：吊挂结构、斜拉索网结构、张弦三铰拱、螺栓球网壳与张弦桁架结合这几种结构体系在我国应用较少，它们的共同特点是把柔性的索与刚性的结构组合起来形成性能更好的新体系，可以说这是今后索结构的发展趋势。

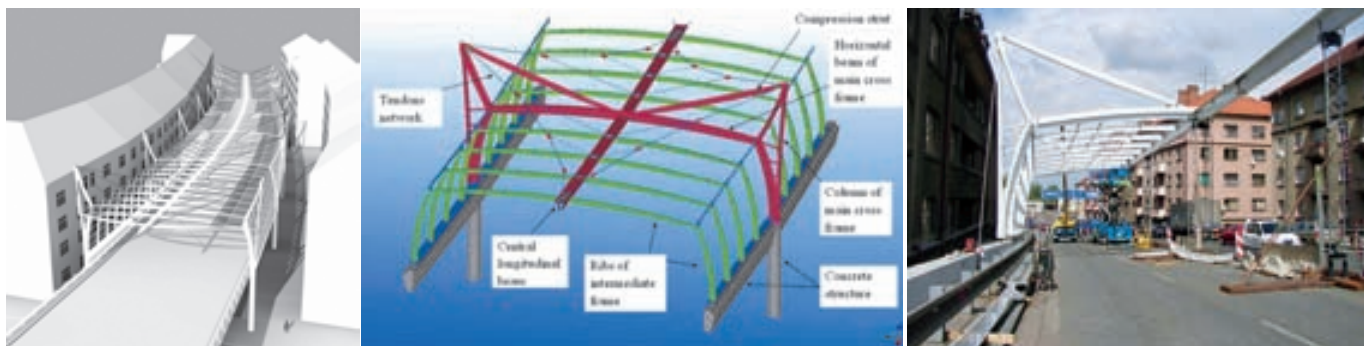


图 8 克拉罗维镇玻璃音障



图 9 Vchynice 村玻璃音障

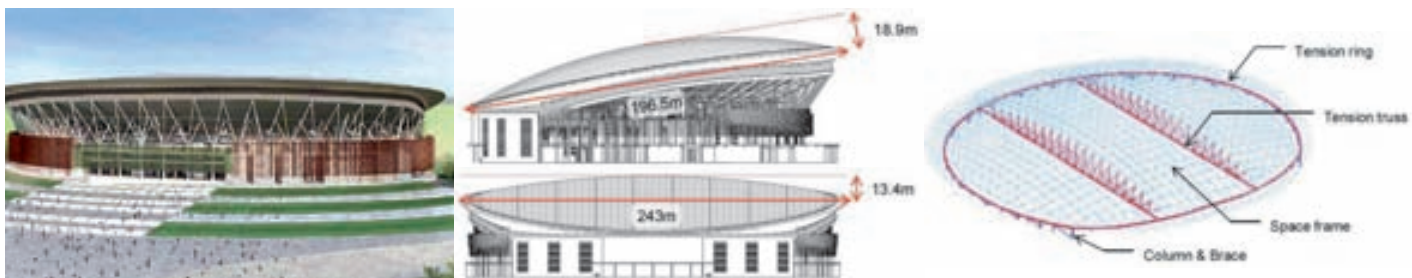


图 10 菲律宾音乐厅



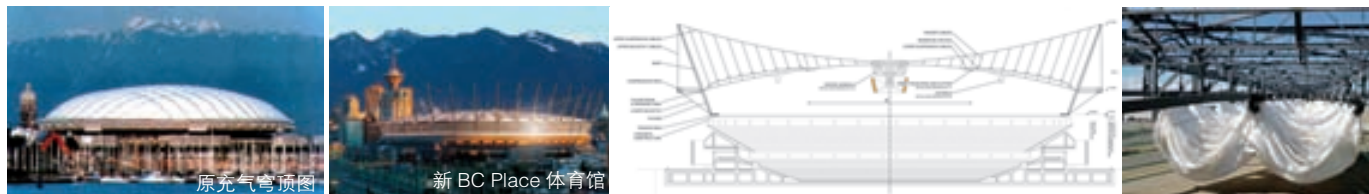


图 11 原充气穹顶与新 BC Place 体育馆结构



图 12 Batumi 夏季音乐厅

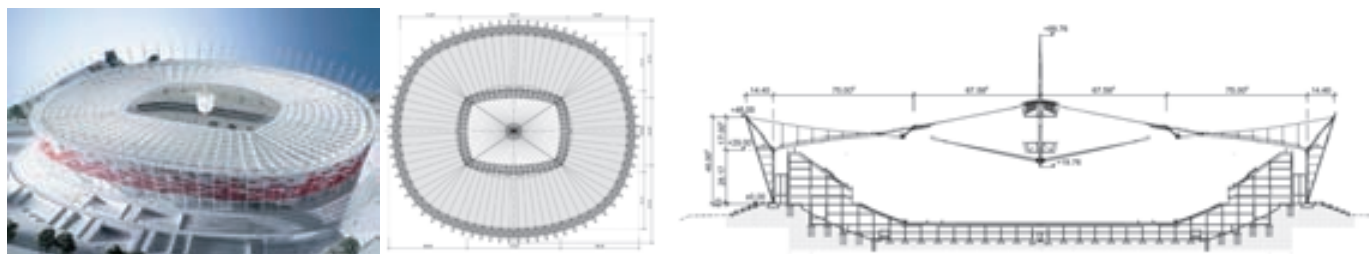


图 13 波兰国家体育场

## 10 温哥华 BC Place 体育馆（图 11）

加拿大温哥华 BC Place 体育馆 1986 年建成，227m×186m，可容纳 6 万人，曾是世界上最大的气承式充气圆顶体育馆。因膜材老化 2007 年曾被大风吹坏。2010 年奥林匹克冬季运动会后，原充气穹顶现在已更换为新的开合屋盖结构。混凝土结构以上高达 47.5m 的 36 根桅杆支承 36 根径向索桁架形成屋盖主结构。

采用性能更好的 PTFE 纤维膜做成充气垫，共 36 个，沿下弦径向索滑动构成伸缩式屋顶，跨度 70m，覆盖 8 500m<sup>2</sup>。永久荷载作用下的气垫内压是 500Pa，如果屋顶受到雪压将增加到 2 000Pa。收缩过程气垫首先放气，然后折叠缩回。最大担忧之一是收缩之前空气量不能完全放掉，为此上层膜设置 70mm 直径管，以便排风机抽气，保证折叠到最小的尺寸。

固定内环和伸缩式屋顶的过渡区是钢环桁架支承的玻璃顶，边缘有充气密封系统。

## 11 Batumi 夏季音乐厅（图 12）

Batumi 夏季音乐厅位于格鲁吉亚首都第比利斯，椭圆状 147m×105m，9 000 座。固定的舞台屋盖为钢桁架系统，有 3° 倾斜，覆盖 5 500m<sup>2</sup>，8° 外倾的周边柱支承压缩环。7 900m<sup>2</sup> 伸缩式膜屋顶跨度 83m，29 根径向索跨越压缩环和舞台口的弧形钢桁架，增加了柔软剂的单层 PVC 膜位于径向索下，膜收起过程沿径向索滑动进入膜库，冬季膜需要存储和密封在膜库里。膜库端 15 根索降低 1.60m，形成折叠式的山脊和山谷线，用于排水并提高刚度。

## 12 波兰国家体育场（图 13）

波兰国家体育场位于华沙，平面尺寸 280m×245m，覆盖近 70 000m<sup>2</sup>，55 000 座，为主办 2012 年欧洲杯足球赛而建。碗结构周围 72 根柱支承下压缩环，替代上压缩环的是斜杆。辐射布置索桁架的径向索互相交叉，增加倾斜，提高刚度。固定屋盖 54 000m<sup>2</sup>，采用 PTFE 膜覆盖看台，内边缘 10m 宽为热增强玻璃屋顶 4 000m<sup>2</sup>；外部上径向索连接到张力环，支承 10m 宽悬挑玻璃顶和悬挂伸缩式膜。内部下径向索只用 4 组索（每组 3 根），在草地上空对角线布置，使遮挡场地上空的结构数目最少。开合屋盖 11 000m<sup>2</sup>，用 PVC 膜沿着 60 根内部上径向索跨越中央的枢纽和张力环之间，覆盖草坪。

启示：随着膜材性能的改进，采用悬挂伸缩式膜实现屋盖开合的工程逐渐增多，但目前我国还没有实践。值得一提的是，这 3 个工程都位于北方，对寒冷地区使用膜结构有借鉴作用。

## 13 Khan Shatyr 娱乐中心（图 14）

Khan Shatyr 娱乐中心位于哈萨克斯坦首都阿斯塔纳市，那里气候极端，气温从 -40℃ 到 +40℃。娱乐中心内游客可以购物、看电影及享受用餐，设有慢跑的路径、微型高尔夫。在最高的独立屋顶上是热带的沙滩和温暖的泳池。

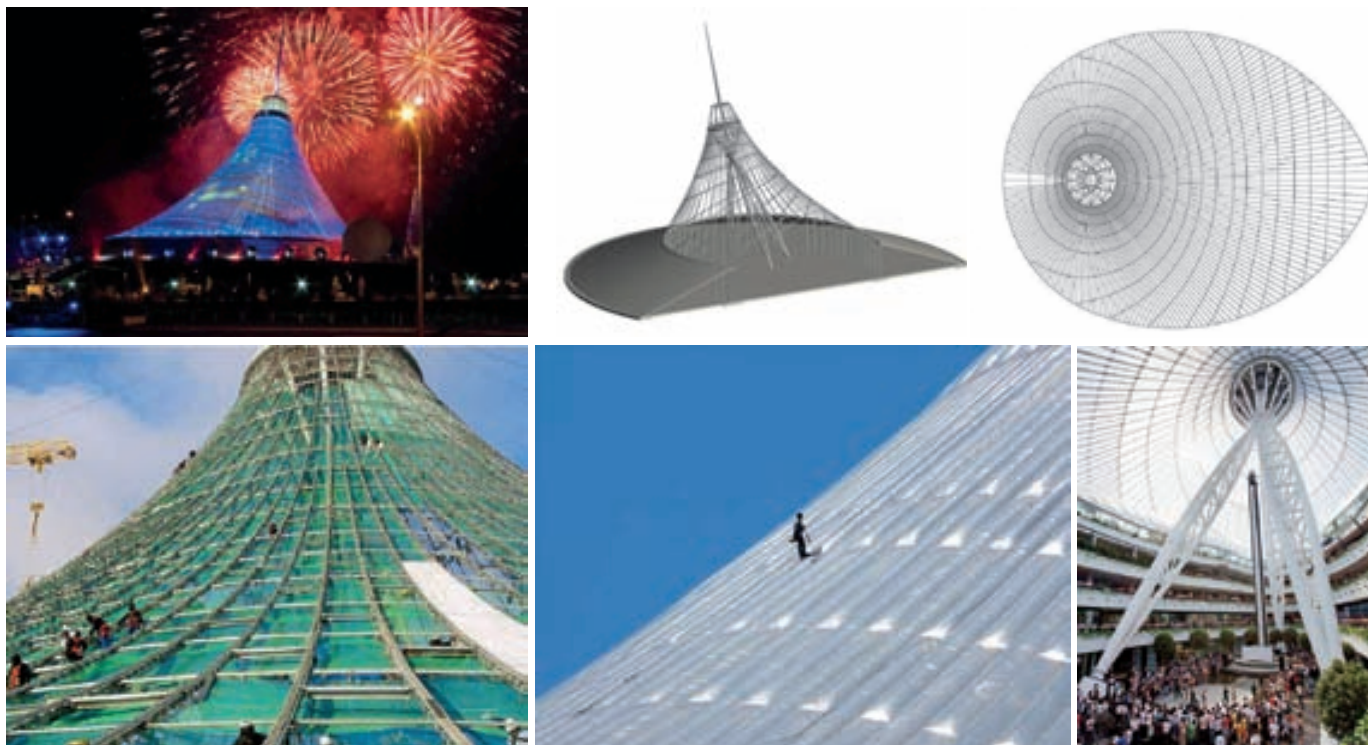


图 14 Khan Shatyr 娱乐中心



图 15 覆盖伦敦某街区方案

该结构长轴 140m，短轴 120m，中央三脚架 150m 高，屋顶表面积 19 000m<sup>2</sup>。从高度 70m 至 125m，成对使用 192 根 38mm 直径径向索，辅以环向索抗扭，外表面使用 ETFE 完全透明膜气枕。索与膜需要相对较高的预应力以控制变形，约需提高 10%~20%，控制索最大变形 800mm，铝框设计需适应变形。顶环直径 20m，采用 150mm 厚钢板，顶部结构设百叶以保证通风。低温下 ETFE 会变硬，设计中须注意。

启示：这是覆盖超大空间、构建人工环境的一个成功案例。国际上已有不少学者在探讨构建 500~1 000m 超大空间的可行性，图 15 是用索与膜覆盖伦敦某街区的方案。我国也应该多专业联合开展探索性研究，以迎接未来的挑战。AT



#### 作者简介

张毅刚，北京工业大学空间结构研究中心主任，教授，博士生导师，钢结构、空间结构专家。