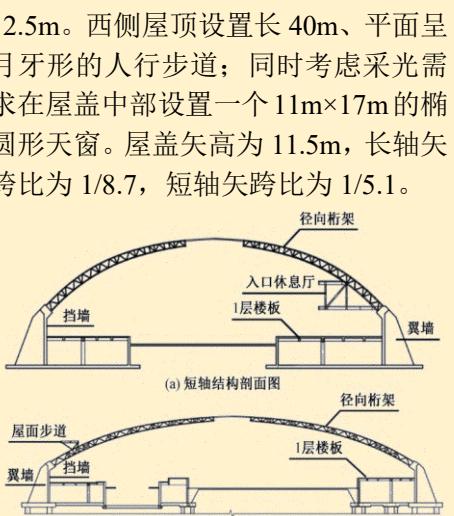


## 八角湾游泳馆大跨屋盖结构设计

八角湾国际体育中心位于烟台市八角湾中央创新区，项目包括1万座大型甲级体育馆、体商共建共享的全民健身中心以及可承载多种水上活动的游泳馆。其中游泳馆建筑面积为10727m<sup>2</sup>，平面呈椭圆形，屋盖尺寸为57.5m（短轴）×98m（长轴），结构高度为11.5m。地下设1层地下室，层高为6m；地上1层，层高为2~13m。

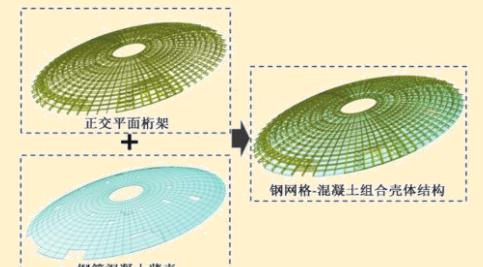


游泳馆地下室主要功能为设备机房，典型柱网尺寸为8.4m和9m，地上为开敞无柱的泳池区，地下部分采用钢筋混凝土框架结构，地上椭球形大跨屋盖支承于地下室挡墙上。±0.000标高处的入口休息厅采用钢桁架形式，从屋盖结构向内悬挑，悬挑长度12.5m。西侧屋顶设置长40m、平面呈月牙形的人行步道；同时考虑采光需求在屋盖中部设置一个11m×17m的椭圆形天窗。屋盖矢高为11.5m，长轴矢跨比为1/68~1/46，短轴矢跨比1/115~1/78。

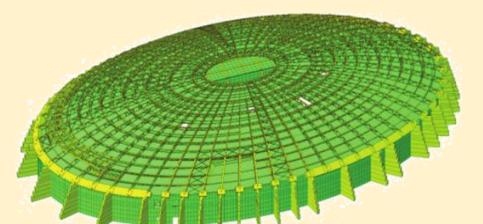


项目难点为椭球形大跨屋盖的结构设计，既要克服局部大悬挑、顶部开设大洞口等结构难点，又要满足屋盖人行步道舒适度和室内混凝土顶的建筑效果。结合混凝土薄壳与钢网格结构各自优点，创新性地提出了一种新型钢网格-混凝土组合壳体结构。在结构受力方面，混凝土薄壳面内受压性能优异但抗弯能力弱，钢网格面外抗弯能力强但稳定性差，两种结构组合后优势互补，组合壳体具有更高的刚度、承载力、稳定性；在施工工艺方面，钢网格施工完成后可以作为混凝土壳

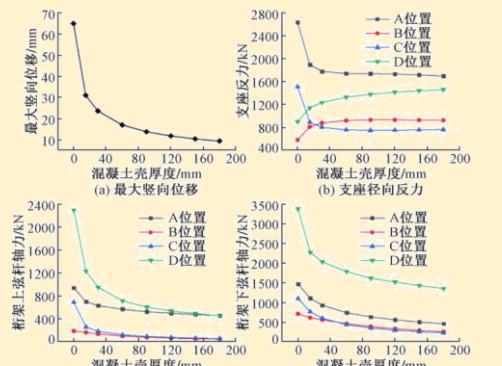
体施工的临时支撑，无需搭设施工脚手架等临时支撑体系，具有施工便捷、周期短、成本低的优点；在结构耐久性方面，下层混凝土薄壳可以作为上层钢网格的保护层，大幅提高钢结构的防火、防腐性能，后期维护具有较好的经济性。



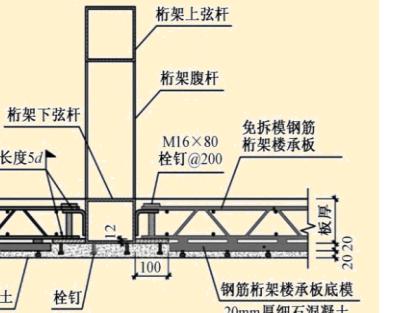
混凝土薄壳采用120mm厚C30混凝土，钢网格采用肋环型正交平面桁架，桁架杆件以热轧薄壁方钢管截面为主，经过网格尺寸比较分析，共设置环向桁架8榀、径向桁架58榀。综合考虑桁架内穿风管以及内部人员检修等需求，径向桁架采用根部高度1.25m、顶部高度0.85m的变高度桁架，短轴高跨比为1/68~1/46，长轴高跨比1/115~1/78。



钢-混凝土组合壳体结构中混凝土壳体厚度是影响结构性能的重要因素，通过对混凝土壳体厚度进行参数化分析，发现结构最大竖向位移、桁架弦杆轴力均随混凝土壳厚度增加大幅减小，并且壳体厚度在40mm以内时减小幅度较大，大于40mm时变化幅度逐渐减小。考虑桁架网格跨度、施工工艺以及室内强腐蚀环境等因素，本项目最终选用120mm厚混凝土薄壳。



为了保证混凝土壳体压力可以有效地传递，设计中桁架下弦杆截面高度与混凝土薄壳厚度保持一致。下弦杆的下翼缘板向两侧外伸耳板，耳板上设置抗剪栓钉，将免拆模钢筋桁架楼承板支承于钢耳板上，其中钢筋桁架的下弦钢筋与耳板焊接连接，上弦钢筋通过L形短钢筋与钢管连接，可以为后续工人绑扎钢筋和浇筑混凝土提供施工作业平台。待混凝土浇筑完成后，通过喷射混凝土工艺在下表面喷射20~40mm细石混凝土，保护下弦杆和耳板下表面，且同时保证混凝土下表面的完整性。



为了提高二次喷射混凝土与钢筋桁架底模的粘结性能，钢筋桁架底模制作时预埋短栓钉，并在喷射混凝土前挂1层3×50规格的防裂钢筋网片。整个混凝土壳体曲面由各网格平面拟合而成，按最大曲率处网格计算，平面与曲面最大误差为7.1%（最大处径向距离与网格尺寸的比值），这种“以平面代曲”的方式既可以大幅节约施工费用，又能满足建筑室内效果需求。



对屋盖结构进行静力分析得到结构动力特性以及水平、竖向位移，均满足规范要求；对屋盖结构进行了特征值屈曲模态分析、几何非线性稳定分析，发现钢网格-混凝土组合壳体相较于钢网格结构，考虑初始缺陷的几何非线性稳定安全系数约提高了3.7倍。同时对屋盖结构进行了双非线性稳定性分析，得到了考虑材料非线性的塑性折减系数为0.33。

中建西南院 刘宜丰 李秋稷



通讯地址：【100013】北京 北三环东路30号 中国建筑科学研究院建筑结构研究所 投稿邮箱：spast@cabrtech.com



2025年第3期 总205期 2025.09

SPATIAL STRUCTURES



## 本期内容

2025年度CECS空间  
结构专委会归口标准  
的质量提升及项目  
申报工作总结徐州体育场罩棚索承  
单层网格结构设计瑞丽国际文体中心  
体育场大悬挑罩棚  
结构设计八角湾游泳馆大跨  
屋盖结构设计

## 学术 活动

2025

年度

CECS

空间

结构

专委会

归口

标准

质量

提升

及

项

目

申

报

工

总

结

论

文

章

2025

年

度

CECS

空间

结构

专委会

归口

标准

质量

提升

及

项

目

申

报

工

总

结

论

文

章

2025

年

度

CECS

空间

结构

专委会

归口

标准

质量

提升

及

项

目

申

报

工

总

结

论

文

章

2025

年

度

CECS

空间

结构

专委会

归口

标准

质量

提升

及

项

目

申

报

工

总

结

论

文

章

2025

年

度

CECS

空间

结构

专委会

归口

标准

质量

提升

及

项

目

申

报

工

总

结

论

文

章

2025

年

度

CECS

空间

结构

专委会

归口

标准

质量

提升

及

项

目

申

报

工

总

结

论

文

章

2025

年

度

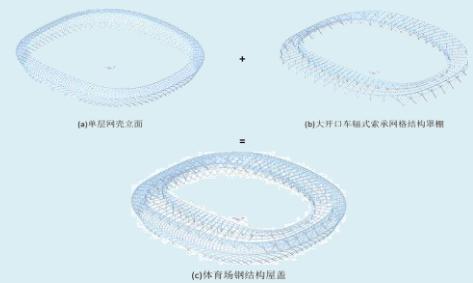
CECS

## 徐州体育场罩棚索承单层网格结构设计

随着江苏城市足球联赛的火爆，开赛至今，“苏超”已启用 20 座各具特色的专业化体育场馆。作为徐州队主场的徐州奥体中心由中国建筑西南设计研究院设计，以反映两汉文化特色的“玉、帛”为构思源泉，充分体现“化干戈为玉帛”的设计主题，不仅弘扬奥林匹克精神，而且生动地再现了徐州由昔日兵家必争之地向今日商贾云集之城转变的辉煌历程。

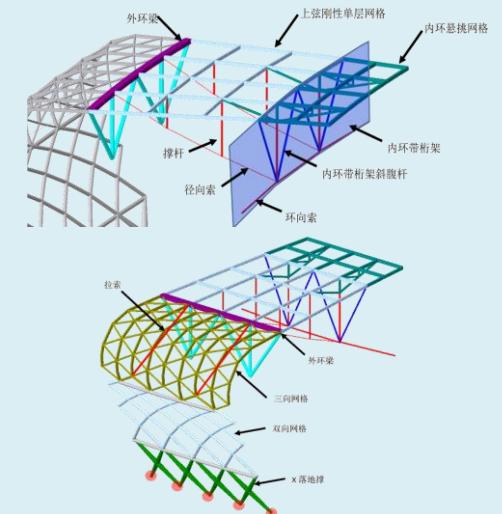


徐州市奥体中心位于徐州市区内东南方向的新城区汉源大道东侧，新市政府北面 2 公里处，包含有体育场、综合训练馆、球类馆、游泳跳水馆等场馆。其中体育场总建筑面积 53090m<sup>2</sup>，可容纳约 35000 人。其屋面造型饱满圆润，南北向外径约 263m，内径 200m，东西向外径约 243m，内径 129m，看台罩棚最大悬挑长度约 40m。



徐州奥体中心体育场立面采用单层网壳结构体系，罩棚采用大开口车辐式索承网格结构体系，两者共同构成了体育场的钢结构屋面。罩棚的大开口车辐式索承网格结构上弦为刚性单层网格，铰接于外环梁上，下弦为车辐式布置的张拉索杆体系，径向索锚固于外环梁上；沿环索设置连接环索和上弦单层网格的斜腹杆，形成内环带桁架；结合建筑采光带的需求，最内环设置内环悬挑网格；整个结构体系支承于柱及斜撑上，立柱及斜撑铰接支承于看台顶端，局部沿环向设弹性支座，以释放温度应力。紧密结合建筑立意与造型，体育场立面单层网壳结

构由 X 落地撑、双向网格、三向网格组成，与罩棚相交于外环梁，在网壳刚度较弱处设拉索以加强网壳。



该结构体系的受力机制如下：上弦为刚性单层网格，加之中部巨大开口的削弱，结构的竖向刚度和承载能力很弱；通过张拉下弦拉索可在撑杆中产生向上的支撑力，对上部单层网格形成弹性支撑，改善其受力状况；上弦单层网格形成一个宽度很大的压力环，且立面网壳的水平段受力上成为环梁的一部分，进一步增大了网格的水平刚度，可有效抵抗径向索在外环梁处产生水平力，形成自平衡结构体系。内环带桁架为刚度很大的竖向平面桁架，弥补中部巨大开口对结构的削弱，提高结构的刚度，加强整体性；内环悬挑网格形成环箍效应，加大了压力环的宽度，进一步提高结构的受力性能。该自平衡结构体系以张拉索杆为主要承重构件，充分发挥了拉索的高强材料特性，也大幅减小对主体结构的作用，可经济有效的跨越较大的跨度。



徐州奥体中心体育场结合建筑布局和美观要求，其大开口车辐式索承网格结构上弦采用肋环型布置的矩形管网格，下弦设 42 根径向拉索和一圈环索，径向采用直径 Φ90、Φ100、Φ127 的拉索，环索采用 6 根 Φ121 拉索。每

根径向索设 3 根撑杆支承上弦刚性结构，在环索处沿环向设 V 型斜撑杆，罩棚投影面积用钢量约 90kg/m<sup>2</sup>。



稳定性是大跨空间结构关注的重点，考虑几何非线性和材料的弹塑性，分析结构的荷载-位移全过程，可以从最精确的意义上来分析结构的稳定性问题。一般情况下，初始几何缺陷对结构的稳定承载力有较大的影响，设计时考虑结构初始形状的安装偏差、构件初始弯曲、构件对节点的偏心等影响，并对缺陷的敏感性进行了分析，缺陷大小分别取 L/300、L/500 和 L/1000（其中 L 是最大悬挑长度的两倍，缺陷按照特征值屈曲模态引入）。分析表明结构的稳定性很好，对缺陷不敏感，由强度控制。由于内环杆轴向压力大，面外刚度较弱，为稳定敏感区，首先失稳，稳定分析的最不利工况为 1.0 恒载+1.0 活载，极限承载力安全系数为 2.7。



体育场屋盖施工过程中，立面网壳和上弦刚性网格首先拼装，上弦刚性网格支承于临时胎架上；随后拉索在看台上布设拼装，然后提升安装至撑杆上；采用分两批张拉径向索的方式施加预应力，预应力分级张拉，张拉流程为：第一批径向索张拉 10%-第二批径向索张拉 10%-第二批径向索张拉 60%-第一批径向索张拉 60%-第二批径向索张拉 90%-第二批径向索张拉 90%-第二批径向索张拉 100%-第一批径向索张拉 100%-安装环索斜腹杆。张拉至约 60% 预应力时，刚性网格脱离胎架。张拉完成后，安装刚性屋面板。

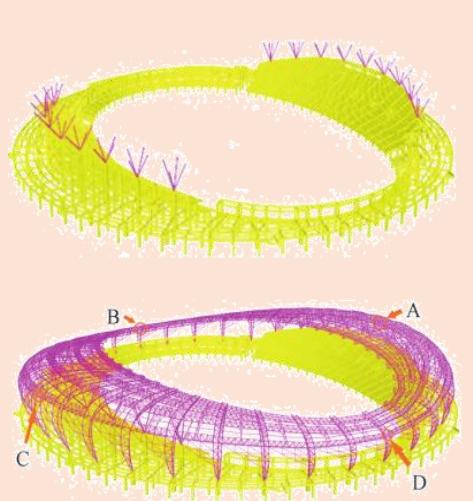
中建西南院 冯远 向新岸

## 瑞丽国际文体中心体育场大悬挑罩棚结构设计

瑞丽国际文体中心体育场位于云南省德宏傣族景颇族自治州瑞丽市。体育场看台的罩棚设计以轻盈的莲花花瓣作为表达形式，形成一组统一有序，韵律中富有变化的造型。体育场主要平面尺寸为 230.6m×230.6m，分为下部钢筋混凝土看台和上部钢结构罩棚屋盖。钢筋混凝土看台地上 1 层（局部 3 层），兼做钢结构罩棚支座，主要屋面建筑高度为 23.9m。



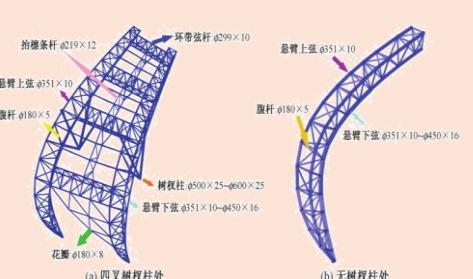
钢结构罩棚平面投影尺寸为 218.8m×218.8m，最大高度为 36.8m，周边花瓣落于标高 6.0m 的型钢混凝土柱上，悬挑部分由 18 根四叉树权柱支撑于型钢混凝土柱上，南北两侧因建筑功能受限未布置树权柱，靠环带桁架强连接形成整体，整个罩棚体系在环向上由 3~4 道环带箍成整体，形成稳定受力体系。图中 A~D 为位移控制点。



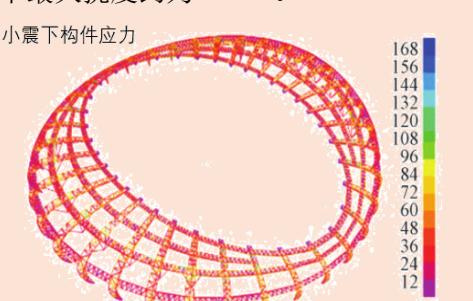
方案比选阶段通过对比四叉树权柱与 V 形树权柱的模态特性，发现 V 形树权柱第 1 周期远大于四叉树权柱第 1 周期，同时第 2 周期为扭转周期，V 形树权柱的体系刚度较小，扭转变形不易控制，最终采用了四叉树权柱的结构体系，能较好地控制结构刚度，控制扭转变形。

100 年一遇风压为 0.35kN/m<sup>2</sup>，地面粗糙度类别为 B 类。结构在 X 向风

荷载作用下钢结构罩棚 X 向最大位移为 45mm，在 Y 向风荷载作用下钢结构罩棚 Y 向最大位移为 29mm，均满足规范层间位移角限值 1/250 的要求，同时 Z 向最大位移为 75mm。



抗震设防烈度为 8 度，设计基本地震加速度为 0.30g，场地类别为 III 类，设计地震分组为第三组。钢结构罩棚属于重点设防类（乙类），抗震等级和抗震构造措施等级均为二级。上部结构水平地震剪力对应的剪重比为 11.8%，多遇地震下的最大位移角为 1/312。钢结构罩棚悬挑最大长度在东西侧中部，悬挑最大距离为 26.2m，恒载、活载作用下，最大挠度也出现在此位置。恒荷载下最大挠度约为 101mm，活荷载作用下最大挠度约为 28mm，竖向地震作用下最大挠度约为 24mm。

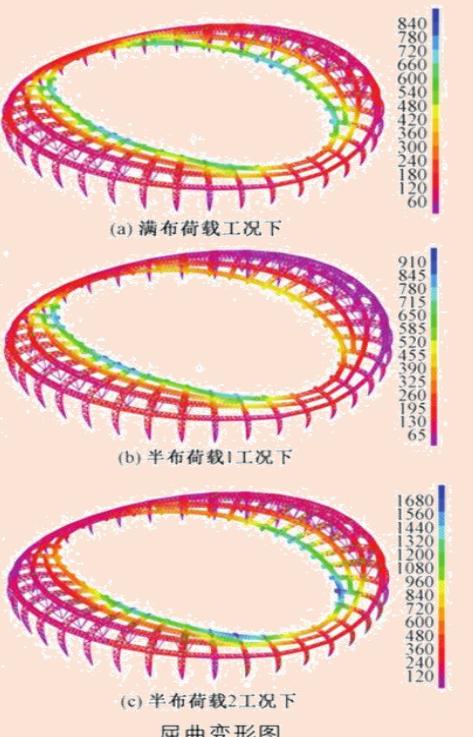


对整体模型进行罕遇地震下的弹塑性时程分析，罕遇地震作用下结构的最大位移角为 1/82。根据罕遇地震下的时程分析应力计算分析结果，钢结构罩棚杆件损伤程度较轻，大部分均未进入屈服状态；关键构件（四叉树权柱）的应力较低，最大约为 150MPa，满足大震不屈服性能要求。



网壳的稳定性按考虑几何非线性

和材料非线性的荷载-位移全过程分析，初始几何缺陷分布采用结构的最低阶屈曲模态，缺陷最大值按跨度的 1/300 取值。屈曲分析采用的荷载工况为：1.0 恒荷载+1.0 活荷载（满布荷载）；1.0 恒荷载+1.0 活荷载（半布荷载）。各加载工况下按弹塑性全过程分析的安全系数均大于 2.0。



对钢结构罩棚各类关键节点进行优化设计、有限元分析，整体处于弹性状态，满足大震下节点不屈服的性能目标。完善了节点的尺寸和构造，保证施工的可行性和便捷性。



对钢结构罩棚的关键部位树权柱和环带桁架分别采用拆除构件法进行抗连续倒塌分析，虽然拆除的构件附近会发生应力和位移的波动，但波动范围不大，构件承载力仍有较大富余度，结构体系具有良好的抗倒塌能力。

云南省设计院 王博 葛雄