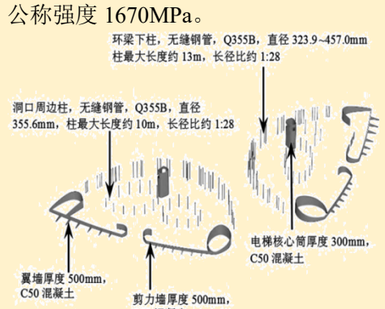
工程 报道

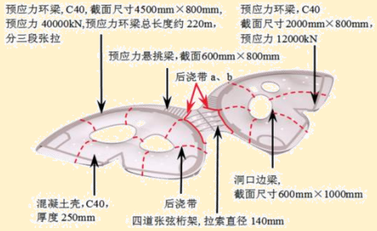
第十届中国花卉博览会世纪馆结构设计

作为上海花博园标志性场馆之一的世纪馆，形如一只五彩斑斓的蝴蝶，在核心区欲振翅高飞。这只蝴蝶东西向长约 280m，南北向长约 115m，建筑面积约 12000m²，建筑高度约 15m，是国内最大的屋顶花园，被 68 万株鲜花覆盖，已成为花博北园“网红”打卡地。“大蝴蝶”主色是红色的四季海棠，配色选用美女樱、百日草、同瓣草、香彩雀等鲜花，这些花都是工作人员经过前期多轮测试筛选确定的，较能适应本地气候，花期长，观赏效果佳。

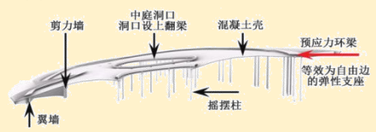
世纪馆屋顶为自由曲面预应力混凝土薄壳结构，支承在下部剪力墙和长细摇摆柱之上。典型混凝土壳体厚度 250mm，混凝土强度等级 C40。剪力墙厚度 500mm，电梯核心筒墙体厚度 300mm，混凝土强度等级 C50；长细摇摆柱为无缝钢管，直径 323.9mm~457.0mm，钢材材质为 Q355B。周圈沿剪力墙和摇摆柱顶部壳体设置预应力环梁，截面为 2000×800、4500×800，混凝土强度等级 C40；东、西区中庭洞口处的摇摆柱顶部设置了型钢混凝土上翻梁，截面尺寸为 600×1000，梁内型钢截面尺寸为 H600×300×45×45，混凝土强度等级 C40，钢材材质 Q355B。东、西区间中央通道处设置 4 道张弦桁架，拉索采用直径 140mm 的密闭索，公称强度 1670MPa。



世纪馆屋顶自由曲面壳体的找形方法为基于“薄膜原理”的逆吊找形法。结构在找形之前，首先将壳体的抗弯刚度进行折减，使其抵抗外部荷载时，壳体的面内刚度发挥主要作用，壳体的抗弯刚度发挥次要作用。然后，以建筑面为初始面，计算刚度折减后的壳体在标准荷载（1.0 恒荷载＋1.0 活荷载）作用下的竖向变形，并将变形后的形状作为结构的初始形状，重复迭代，直至壳体在外部荷载作用下，竖向位移不再发生明显变化。

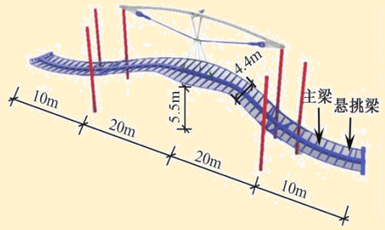


自由曲面依靠自身形状来抵抗外部荷载的能力与其自身的边界条件紧密相关。世纪馆壳体外侧为自由边界，下部为摇摆柱。摇摆柱无法为壳体提供侧向支撑，因此竖向荷载作用下，柱顶环梁承受环向拉力。柱顶混凝土环梁的抗拉承载力很低，混凝土开裂后其刚度将大幅削弱，无法有效提供约束刚度。为解决壳体自由边界的问题，在柱顶环梁内设置了预应力，由环向预应力的径向分力为自由边界提供水平力。



世纪馆的剪力墙较为平直，仅依靠其面外抗弯刚度抵抗上部壳体传递的水平力不合理。因此在剪力墙外侧增加了翼墙，翼墙作为剪力墙的面外支撑，能够提高剪力墙抗弯刚度。翼墙和剪力墙作为整个壳体的固定支座，为壳体提供竖向和侧向支撑，环梁预应力为壳体自由边界提供水平支撑，摇摆柱为壳体提供竖向支撑，整个体系构成完整的空间壳体结构。

东、西区基础独立设置，未形成整体。因此薄壳结构的支座产生的水平推力只能由东、西区的桩基和基础承担。基础的被动土压力较小，桩基水平抗侧力较低，仅依靠桩基抵抗全部的水平推力不合理且不经济。为减小东区和西区的基底水平反力，在东、西区设置了 4 道拉索，拉索与壳体构成钢-混凝土组合张弦桁架结构，通过在拉索中施加预应力减小东、西区产生的基底水平反力。



为避免人流在中央通道处汇集，在世纪馆东区和西区之间设置了连桥。连桥东西向长约 50m，桥面宽约 4.4m。连桥主梁截面□500×400×20×20，两侧悬挑梁截面采用变截面 H 型钢，截面 H100/300×150×6×10，材质均为 Q355B。连桥两端与展厅墙体连接，跨中设置 4 道拉杆，拉杆与中央通道处的张弦桁架连接。连桥两端约 1/4 处的位置与摇摆柱相连接。摇摆柱作为连桥的竖向支撑，连桥的水平刚度又可为摇摆柱提供面外支撑，减小了摇摆柱的计算长度，二者相辅相成。连桥上设置了调谐质量阻尼器（TMD），用以调节连桥的舒适度。

世纪馆依托蝴蝶造型、开敞空间、连续拱壳以及覆土屋面等非常规设计，以完全非标的曲面建筑成就独一无二的艺术美感。华东总院建筑师和结构师付诸专业与专注，以原创设计彰显出“中国设计”风采，助力花博会演绎生态文明建设成果，绘就花卉强国之梦。

华东建筑设计研究院有限公司 黄永强

中国钢结构协会
空间结构分会

中国工程建设标准化协会
空间结构专业委员会

中国土木工程学会
桥梁及结构工程分会

空间结构 简讯

2024 年第 3 期 总 201 期 2024. 09

SPATIAL STRUCTURES

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

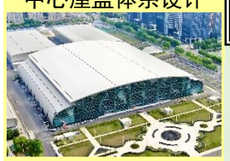
本期内容

第十二届全国膜结构技术交流会暨建筑膜材创新论坛在上海成功召开

第二十届空间结构学术会议召开通知

山水印章——雄安体育中心体育场设计

合肥滨湖国际会展中心屋盖体系设计



第十届中国花卉博览会世纪馆结构设计

学术 活动

第十二届全国膜结构技术交流会暨建筑膜材创新论坛在上海成功召开

2024 年 9 月 18~20 日，第十二届全国膜结构技术交流会暨建筑膜材创新论坛在上海成功召开，来自全国各地的高校、科研院所、设计施工单位等 260 余名代表出席会议。

开幕式由中国钢结构协会空间结构分会副秘书长李雄彦主持，空间结构分会理事长、北京工业大学教授薛素铎，协办单位代表叶峰灵先后致辞。中国产业用纺织品行业协会副会长祝秀森，分会前理事长张毅刚，分会副理事长、全国工程勘察设计大师李亚明和朱忠义，副理事长张其林、李中立，特邀专家贺明玄、郑方，安徽省钢结构协会专家委员会主任完海鹰，分会秘书长吴金志，膜结构副主任向阳、武岳、崔家春以及膜结构委员等共同出席开幕式。

大会邀请薛素铎理事长、张毅刚前理事长、李亚明大师、朱忠义大师、张其林教授、向阳副主任共同发布 24G543《膜结构》国标图集。主编单位技术负责人中国建筑标准设计研究院郁银泉大师通过视频热烈祝贺国标图集《膜结构》的正式发布。随后，《膜结构》国标图集编制组负责人向阳代表编制组对图集进行详细解读。

本次会议共邀请丁洁民大师、朱忠义大师等专家做了 15 个精彩的大会报告，同时组织了建筑膜材新工艺新技术研讨。李亚明、李中立等主持了大会报告。

闭幕式由空间结构分会副秘书长孙国军主持。分会领导向各单位赠送礼品答谢。分会前理事长张毅刚教授对本次大会的成功召开进行了总结，并对分会和行业的发展提出了希望。

学术 活动

第二十届空间结构学术会议召开通知

由中国建筑科学研究院有限公司、中国工程建设标准化协会空间结构专业委员会等主办，天津大学等承办的第二十届空间结构学术会议，定于 2024 年 11 月 8 日（周五）~11 月 10 日（周日）在天津举行。

本次会议发言采取大会发言与分会场发言相结合的形式进行，大会发言将邀请在大跨空间结构领域具有丰富的实践经验和研究成果的专家学者，总结最新的研究进展，并针对热点难点问题进行深入交流。分会场发言采取特邀专题发言与投稿优秀论文专题发言的形式，由空间结构领域研究带头人与学术研究骨干力量就空间结构学术研究的前沿理论研究、实际工程经验等进行专题学术交流。

❖ 会议地点：

天津东凯悦酒店（天津市河东区卫国道 126 号）。

❖ 会议日程初步安排：

11 月 8 日	报到
11 月 9 日上午	上午开幕式、大会报告
11 月 9 日下午	大会报告
11 月 10 日上午	分组报告
11 月 10 日下午	分组报告、闭幕式、技术参观

会务组将于 2024 年 10 月上旬发出正式邀请函与会议日程详细安排。

请各位代表尽快填写《第二十届空间结构学术会议代表注册表》（详见二维码），计划发言的论文作者请务必在《注册表》中注明发言题目。

工程 报道

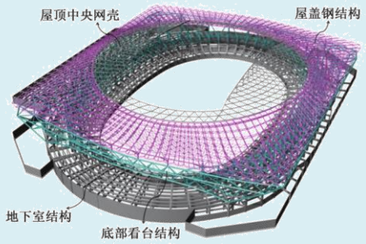
山水印章——雄安体育中心体育场设计

雄安体育中心位于雄安新区启动区东北部，它不仅是未来雄安新区重要的体育活动配套建筑群，更是疏解北京非首都功能、完善新区整体配套的重要一环。体育中心包括一座能够容纳 3 万人的综合体育场、一座能容纳 1 万人的体育馆和一座能容纳 2 千人的游泳馆。未来，这里能够承办国际与国内综合赛事，成为展示雄安新区体育事业发展成果的重要窗口。

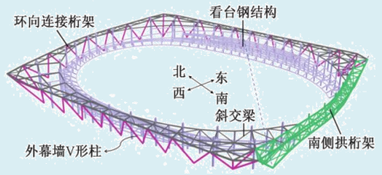
走进雄安体育中心，仿佛置身于一幅精美的山水画中。这里的建筑方案以“山水印章”为理念，运用中国传统造园手法与古典建筑意向，以中正有序的方式塑造体育场馆内外空间和形象。方与圆的几何形态强化了东方意境，蓝绿相融的色彩搭配塑造出宜人的尺度。建筑外立面仿照中式琉璃瓦的设计，以层层屋檐出挑的方式体现中华建筑形象的特点，生动诠释了东方美学与大型体育建筑的完美融合。

项目中体育场建筑面积约 9.7 万 m^2，其中地上四层面积 3.7 万 m^2，地下 2 层面积 6 万 m^2。体育场地上部分采用钢框架-支撑体系，主要由屋顶中央网壳、屋盖钢结构和底部看台钢结构组成；地下室混凝土结构采用框架-剪力墙体系。

为达到室内无直立柱的建筑效果，同时考虑下部结构对屋盖的承接作用，体育场设计中将下部结构的拓扑逻辑与屋盖对应，在径向上形成平面斜柱框架以保证结构的抗侧能力，在环向上利用外立面幕墙的造型特点，设置外围 V 形柱和斜交梁以提高结构整体的扭转刚度。

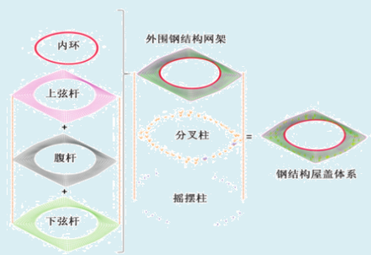


为了保证南侧敞开、通透的建筑效果，并支撑屋盖结构，设计中在南侧设置一榀拱形桁架，拱形桁架跨度为 143.9m。为了降低拱脚的水平推力，设计中进行了施工工序的优化，即考虑在看台钢结构和屋盖钢结构安装过程中，让拱桁架底部沿着跨度方向自由变形，而在屋盖和看台钢结构完成水平变形以后再进行滑移的锁死，传递后续使用过程中的荷载。

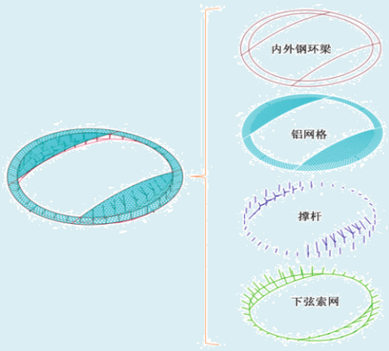


屋盖钢结构的外轮廓线接近矩形，平面尺寸约为 250m×214m。内场开洞亦呈矩形，平面尺寸约为 149m×88m。屋盖结构由外围钢结构网架和内侧张弦网壳两个部分组成，通过树形柱和分叉柱支承于底部看台钢结构上。

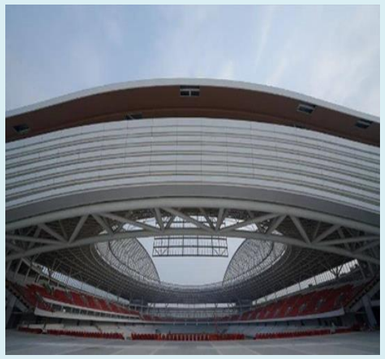
基于建筑上下表皮之间的空间逻辑关系以及建筑对竖向支承构件尽量少的要求，外围钢结构区域屋盖采用了空间双层异形网架的结构体系。其原则是充分利用建筑表皮曲面的空间特性形成足够大的面内刚度，从而在竖向支承构件较少的情况下也能实现建筑师所需求的悬挑。



体育场屋盖内侧部分采用铝合金张弦网壳的结构形式，以达到轻薄的特点，同时降低外围钢结构异形网架的受荷负担。铝合金结构具有自重轻、耐腐蚀程度高等特点，其连接采用板式节点。



分索式索承铝合金网壳体系底部索网的布置依托于顶部网壳的造型，由环索和 36 组径向索组成。环索呈东西低、南北高的马鞍形布置，高差约为 5m。为实现屋盖东西侧开扇的跨度，环索在 45° 角处由单束分叉为双索，该区域相应地设置双径向索和撑杆，形成“弦支穹顶”阶梯式的传力。整个张弦网壳以最外侧钢环梁为受压环，以环索为内拉环，形成一个自平衡体系，体系通过成品铰支座支承于外侧的钢结构异形网架。



雄安体育中心项目建设稳步推进，一场两馆钢结构施工已接近尾声，场馆建筑雏形初显，预计 2024 年底整体亮相。雄安体育中心的建成，生动诠释了东方美学与大型体育建筑的融合，无疑将为区域发展注入新的活力，对服务疏解北京非首都功能、完善雄安新区的整体配套，具有重要意义。

上海建筑设计研究院有限公司 徐晓明

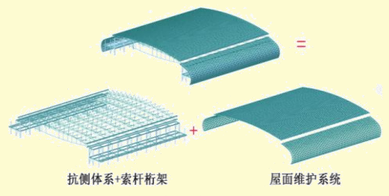
工程 报道

合肥滨湖国际会展中心综合馆屋盖体系设计

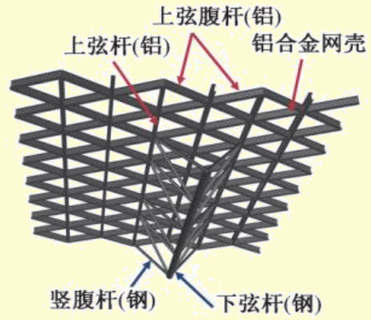
合肥滨湖国际会展中心位于合肥市滨湖新区，东邻庐州大道、西邻广西路、北邻锦绣大道，南为南京路，占地 58.62 公顷，总建筑面积约 45 万 m^2，其中室内展览部分建筑面积约 13 万 m^2，排名全国 14 位。

其中合肥滨湖国际会展中心综合馆为大跨度空间结构，建筑平面尺寸为 170m×192m，屋盖最高点建筑高度 36m，其中展厅尺寸为 144m×134m，主要功能为展览、展示及演出，展厅内部净高为 18m。在结构平面东、西部局部设两层夹层，夹层屋面呈弧形。两侧弧形屋面下部采用钢结构＋钢支撑体系，形成主体结构抗侧力体系；展厅上部屋盖跨度 144m，为大跨空间结构，采用钢-铝组合张弦空间桁架结构体系。

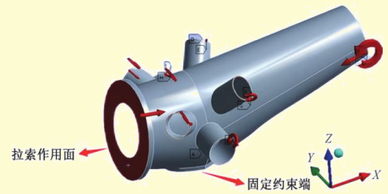
张弦桁架共 10 榀，每榀桁架中心间距 18m。上部组合桁架的下弦杆、腹杆、拉索采用钢构件，组合桁架上弦杆采用铝合金型材。考虑经济性，撑杆采用钢构件。屋面采用铝合金单层柱面网壳，既作为桁架水平支撑，又作为建筑围护系统。



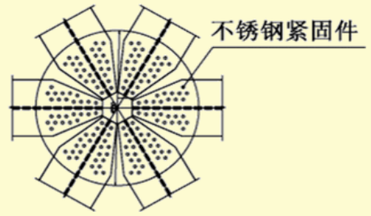
上弦桁架采用倒三角形断面空间管桁架，铝合金单层网壳网格采用正三角形网格。张弦桁架总高 17m，上弦桁架宽度 6m，厚度 4.5m，为跨度的 1/32；拱架矢高 10.5m，约为跨度的 1/14；张弦垂度 6.5m，约为跨度的 1/22。



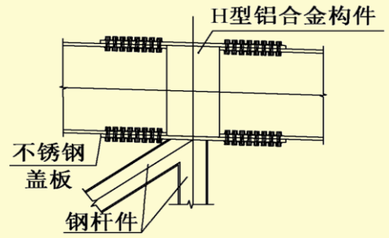
屋盖上部网壳采用 6064-T6 铝合金型材，构件采用工字形截面；桁架腹杆、下弦杆和撑杆均采用 Q355 圆钢管；拉索采用强度为 1570MPa 的 φ7×583 钢绞线。



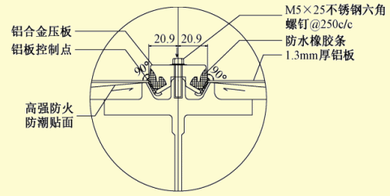
张弦桁架采用撑杆连接上弦桁架和下弦拉索，是自平衡体系，因此张弦桁架屋盖与框架柱采用一端固定铰支、一端滑动铰支的连接方式。张弦桁架支座处采用铸钢节点，此处汇交杆件较多，包括上部桁架四根竖腹杆、下弦杆、支座处连系杆和拉索，节点受力复杂。对张弦桁架支座的铸钢节点进行三维几何建模分析，铸钢节点的核心区域均处于线弹性状态。



铝合金结构对焊接热影响较为敏感，材性研究表明，铝合金焊接热影响区材料屈服应力 $f_{0.2}$ 降为母材屈服应力的 50%~75%。因此铝合金结构不宜采用焊接连接，在实际工程中，铝合金节点一般采用机械连接节点。铝合金网壳采用板式节点，通过紧固件将铝合金杆件上、下翼缘与上、下盖板连接。钢结构竖腹杆与铝合金上弦杆连接节点见下图，板式节点下端盖板兼作竖腹杆端板，与竖腹杆通过焊接连接，盖板采用不锈钢材质，以解决钢铝电化学腐蚀的问题。



张弦桁架在荷载作用下通过拉索内力的变化，不断调整结构位置和形态，以达到平衡状态，具有很强的几何非线性，桁架单元以受轴力为主，因此结构的承载力时常由稳定承载力控制。纯钢结构的张弦桁架结构体系，其失稳模态一般为结构整体的竖向失稳或侧弯失稳，钢-铝合金组合张弦桁架结构体系的失稳为桁架间支撑网壳的局部失稳，整个体系因上部铝合金网壳的平面内刚度较大，不会发生整体失稳。



屋面采用铝合金直立锁边一体化金属屋面，相较于一般钢结构屋面，铝合金一体化屋面构造简单，施工方便，外形简洁轻盈，能有效减小屋盖结构自重。

相较于钢结构张弦桁架＋支撑屋盖方案，合肥滨湖国际会展中心综合馆屋盖采用的钢-铝组合张弦空间桁架结构具有轻质、耐腐蚀性能强等优点。铝合金主结构与围护系统采用一体化设计，建筑表现简洁，防水性能好。同时，在加工制作方面，采用全数控加工，模块化、工业化制造，加工精度高，施工周期短。

上海建筑设计研究院有限公司 李亚明