

## 1. 江河汇景观步行桥

江河汇景观步行桥位于杭州钱江新城二期核心区，京杭大运河与钱塘江交汇处。桥梁横跨运河，连接汇西地块、中隔堤绿道与汇东地块。项目以杭州刺绣“穿针引线”为设计意象，通过建筑化的连接系统重构被千年水道割裂的城市空间，成为区域地标。

桥梁采用 Z 形空间异型三跨连续系杆钢拱结构，总长 660m。东拱跨 156m，西拱跨 145m，中拱跨 158.5m，景观平台南北桥长各约 74.7m。东西侧桥跨及景观平台标准段桥宽 8m（通行宽度 6m），中央平台宽 21~27m。三跨拱结构差异化跨度组合产生流动平衡的空间韵律。



东、西主梁分别以单侧锚固方式悬吊于倾斜主拱，形成自平衡体系。主梁在中央玻璃观景平台处通过四道横梁连接，将两侧悬吊系统融合为整体，并经平台两侧吊杆悬吊于中拱。结构及行人荷载通过空间多角度吊杆传递至三跨主拱，最终由拱墩将竖向荷载传至桩基础。桥面采用无支撑漂浮设计，实现开放、轻盈的视觉效果。



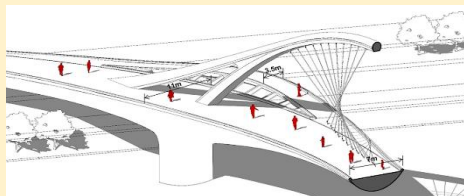
## 2. 东莞滨海湾新区慧眼桥

慧眼桥位于东莞滨海湾新区交椅湾板块，龙涌河道入海口，与广州南沙海港区隔海相望，南部紧邻深圳海洋新城，是滨海景观活力长廊慢行系统的重要组成部分。

项目场地拥有十分开阔的视野，方案设计以眼眸为意象，寓意临海远眺，放眼大湾区，迎接机遇与挑战。桥梁采用三跨连续梁拱组合体系，跨径布置(70+85+70)m。桥梁平面采用 S 形

## 景观慢行桥——建筑携手桥梁共舞

圆曲线布局，使得造型充满活力与灵性。变截面鱼腹形钢主梁与分肢钢拱肋通过空间扭索面吊杆相连。两侧主墩处反对称布置外挑观景钢步道，在桥面形成丰富的错层活动空间。



通过分肢拱肋、空间扭索面吊杆的结构设计，桥拱内辐射状拉索侧布置交错，在拱圈中央围合成近似圆形的景窗。设计团队针对桥位的太阳轨迹与场地观景点进行了深入研究，每当夕阳西下时在西岸远眺，可观赏到落日恰好进入桥拱景窗中心，形成“以日为眸”的壮美景象。



## 3. 济南腊山河云影桥

济南腊山河是城市西部重要的生态廊道，云影桥坐落于腊河南端水系之上，以环形几何形态将岸线、水系与步行系统有机整合。云影桥平面呈圆环形，分为底层人行桥面和顶层雨棚。结构呈外圈单侧悬挑，底层桥面直径 34.2m，最大跨度 32m，桥面标准段宽 4.1m。顶部雨棚直径 36m，最大悬挑达 5.65m，雨棚至桥面高差 5.4~6.9m。



建筑方案的核心诉求是实现视觉通透性与最小化环境影响，结构设计需在确保承载性能的前提下，尽可能消隐构件对视线与通行的干扰。初始双排柱列方案中，内外两列钢柱形成视线遮挡，桥端入口处通行宽度受限，且桥面弧形钢梁因需同时承担桥面荷载与雨棚传力而截面偏大，难以实现预期的轻薄效果。



针对上述问题，结构体系进行了系统性优化。首先取消外圈柱列，仅保留内圈单排 12 个支承点承载环形悬挑雨棚，并在顶棚钢梁平面内增设支撑系统以提升整体性与面内刚度，雨棚与柱顶采用铰接节点。然而，单排直柱铰接体系面临整体扭转刚度与水平刚度不足的问题，若通过增大柱截面解决，又将造成对内侧视野的干扰。



将直柱转化为 V 形斜柱是关键突破。V 形斜柱将悬臂柱的抗弯模式转化为轴力传力模式，构件截面显著减小，柱底与柱顶均可采用铰接节点。从结构体系角度看，V 形斜柱作为斜腹杆，与顶棚环梁（上弦）、桥面钢梁（下弦）共同构成闭合的环形桁架，整体刚度与跨越能力系统性提升。桥面钢梁不再独立承受大跨度弯曲，自身截面亦进一步减小。

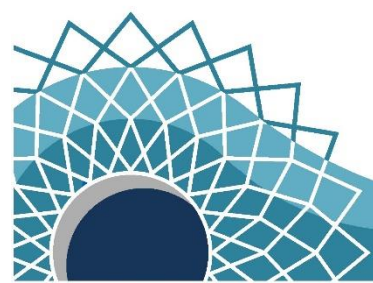


在支座布置方面，将桥面钢梁向两岸延伸，每侧增设一排支座，将单跨简支体系转化为三跨连续体系，有效控制变形挠度、降低最大弯矩、改善振动舒适度。至此，初始方案中视线遮挡、通行受限、桥面厚重三个核心问题均得到解决。

节点设计遵循传力清晰原则，V 形斜柱两端均采用铰接节点，避免引入次弯矩。施工采用工厂分段加工、现场拼装方式，顶面钢梁整体提升，临时支撑在斜柱安装后拆除，流程组织有序。

当结构选型与建筑意图高度契合时，技术问题与美学追求共同指向完整的解决方案，结构本身即成为建筑表达的有力语言。

整理自 iStructure、桥梁网、同济设计市政院 | 桥梁院等网络资料



## 学术 活动

## 第十三届全国膜结构技术交流会在深圳成功召开

## 本期内容

第十三届全国膜结构  
技术交流会在深圳  
成功召开大湾区文化体育中心  
——以结构为笔，  
塑山海之形景观慢行桥——  
建筑携手桥梁共舞

2026 年 3 月 27~29 日，第十三届全国膜结构技术交流会在深圳成功召开，来自全国各地的膜结构企业、高校、科研院所、设计施工单位等 300 余名代表出席会议。

开幕式由空间结构分会副秘书长、北京工业大学李雄彦教授主持，空间结构分会理事长、北京工业大学教授薛素铎，中国钢结构协会秘书长李庆伟，支持单位代表王维强先后致辞。分会前理事长张毅刚，全国工程勘察设计大师郁银泉、王立军、丁洁民、侯兆新、孙一民，副理事长张其林、李中立，特邀专家贺明玄、郑方、王载，安徽省钢结构协会专家委员会主任完海鹰教授，中国钢结构协会科技事务部主任邱林波，分会秘书长吴金志，向阳、武岳、崔家春、王平等膜结构资深专家等共同出席开幕式。

薛素铎教授在致辞中表示，膜结构融合多学科与绿色建造，兼具大跨度、轻量化等多重优势，是建筑业转型、践行“双碳”战略的重要技术载体。本届大会以“技术创新引领、绿色低碳赋能、产业协同发展”为主题，契合行业趋势与国家战略。大会汇聚膜结构行业全链条精英，设置主旨报告、技术展示等多元环节，聚焦新型膜材等核心热点，搭建高端交流平台。

李庆伟秘书长指出，我国膜结构行业正迎来战略机遇期，“双碳”战略、城市更新、文旅融合、智能化发展带来多重发展新契机。中国钢结构协会期待业界同仁以本次交流会为契机，开拓创新、务实奋进，共同推动我国膜结构事业迈向更高水平，为空间结构行业高质量发展贡献智慧与力量。

王维强董事长呼吁各单位坚守初心、深耕技术，以优质作品与服务助力行业发展，坚信在各方携手下，中国膜结构行业必将迎来更辉煌的未来，并预祝大会圆满成功。

大会邀请李庆伟秘书长、薛素铎理事长、张毅刚前理事长、郁银泉大师、王立军大师、丁洁民大师、侯兆新大师、贺明玄首席专家共同发布《广联达膜结构工程造价软件》和《膜结构加工制作标准》。

随后，《膜结构加工制作标准》主要编制专家李中立代表编制组对标准进行详细解读。广联达工程造价软件针对 2023 年新实施的《膜结构消耗量标准》进行全面响应，AI 组价、AI 质控，让膜结构工程的成本控制更简单、更高效。

本次会议共邀请薛素铎教授、王立军大师、孙一民大师、丁洁民大师等专家做了 19 个精彩的大会报告，同时组织了 10 个青年学者与研究生专题报告和建筑膜材新工艺新技术研讨。张毅刚、郁银泉等主持了大会报告。

闭幕式由空间结构分会秘书长、北京工业大学吴金志教授主持。分会前理事长张毅刚教授进行会议总结，对大会的成功召开给予了充分肯定，会议针对城市更新、智能建造、新应用场景进行了广泛深入的交流。结合今年两会“发展智能建造、培育现代化建筑产业链、推进好房子建设”的理念，指出膜结构行业要积极面对“由粗放扩张向科技赋能、服务全生命周期”的挑战与机遇，相信在政策导向、行业协会引领和膜结构同仁的共同努力下，我国膜结构的发展将再迈上新台阶。

大湾区文化体育中心位于广州市南沙区，粤港澳大湾区黄金内湾，总占地面积 68 万 m<sup>2</sup>。核心建筑包含一座可容纳 6 万人的主体育场、一座 2 万座体育馆以及一座 4 千座游泳跳水馆，三座主馆呈“C”字型布局，面朝大海。

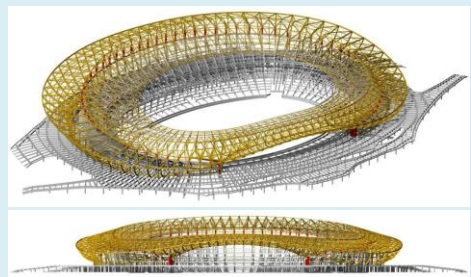


建筑方案整体灵感来源于宋代传统帆船的船体形态。综合体育场的屋顶如扇面打开，形成具有韵律感的叠瓦形态，以扇为礼，迎八方来客，营造出兼具中国式浪漫庄重与造型优雅的岭南建筑场景。层层观海平台逐级向海面延伸，构成“以天为幕，以海为席”的壮丽画面。东侧看台朝向海面处设有 150m 宽的“海景之窗”，可遥望海景与深中通道，视觉效果震撼。



综合体育场的总建筑面积约 18 万 m<sup>2</sup>。平面南北方向长约 420m，东西方向宽约 400m。其中钢罩棚南北方向长约 360m，东西方向宽约 280m。屋面钢罩棚最大悬挑长度为 62.5m，结构最高点标高约 63.5m，看台顶支承屋盖柱柱距约 12m。

根据建筑造型，下部结构采用混凝土框架体系，屋面钢罩棚采用带弯弧背杆的锥体加强悬挑平面桁架体系。钢罩棚与看台顶上的支承混凝土直柱铰接，钢罩棚尾部与异形弯弧背杆铰接。东侧面海的 154m 跨大开口造型采用小倾角折角拱桁架结构跨越。



针对“以天为幕，以海为席”的建筑构思提出的高低看台、立面大开口、马鞍形屋盖及通透格栅曲面幕墙等复杂形态，台风多发区、滨海深厚软土等地形及气候条件，结构方案重点考虑建筑幕墙一体化设计，适应高风压的钢罩棚及大开口拱架结构选型，滨海深厚软土地区土—结构共同工作，以及适应快速高效建造要求的结构及基础选型等核心关键问题。

### 1. 屋盖抗风设计

本项目屋盖为悬挑钢罩棚，其造型对风荷载较为敏感，风荷载取值无法直接套用规范。项目团队采用 1:100 的大缩尺比例模型进行风洞试验，并与广东省《建筑结构荷载规范》中关于钢罩棚后部通风及后部封闭造型相关体型系数规定进行对比，体型系数分布存在极大差异。规范中檐口体型系数最大，根部较小，而根据风洞试验结果，体型系数极大值出现在屋脊处。

其原因在于，本项目悬挑钢罩棚有明显的下探造型，与规范中悬挑端上抬的造型存在一定的差异，从而在屋脊处形成明显的兜风效应，导致屋脊处体型系数增大。由于风洞结果所得风吸大值向尾部偏移，整体风吸力并未减小，但整体风致弯矩有所降低，背撑撑杆轴力可减少 38%，表明本项目建筑悬挑端造型对抗风有利。

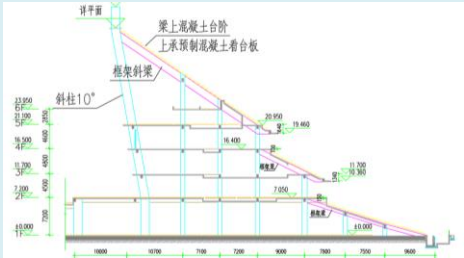
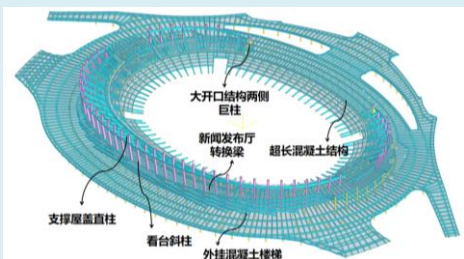
### 2. 基于“随形建构”的复杂造型公共建筑的建筑—结构—幕墙一体化设计

外露结构作为建筑外观表现的重要组成部分，与建筑造型进行一体化设计可更好体现建筑美学。结构选型综合考虑建筑观感和逻辑性、弯弧背杆利用、抗风性能、整体稳定、结构经济性等因素，结构创作亦为建筑创作的有机组成部分。根据建筑造型，本项目结构选型主要集中在大悬挑钢罩棚、渐变弧形格栅幕墙和大跨度拱形开口建筑。

### 3. 下部混凝土看台结构选型

常规体育场的混凝土结构根据地地震烈度情况及建筑高度采用框架结构或框架—剪力墙结构。本工程地处深厚软土地区 and 地震重点监测防御区，框架—剪力墙结构方案的剪力墙基底剪力远大于框架结构对应位置的剪力，对软土地区桩基的抗水平力提出较高要求。

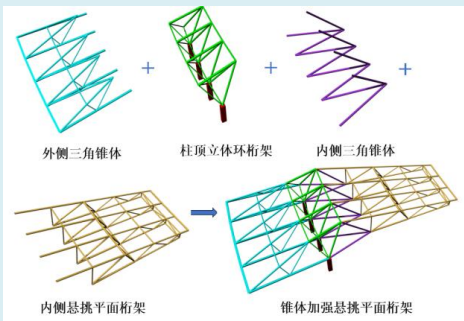
同时，建筑平面可设置剪力墙的位置有限且分布不均，仅能在局部楼梯或电梯处设置，导致结构刚度不均匀，整体结构层间位移比增大，扭转效应加剧。在中震和大震分析中，取消剪力墙、采用适宜刚度设计的框架结构更能体现结构性能的均质化。因此，本工程主体结构确定采用框架结构，既有利于结构刚度的均匀布置，且对建筑功能的布置无过多限制。同时，框架结构体系更适用于现场大规模标准化和快速化施工。



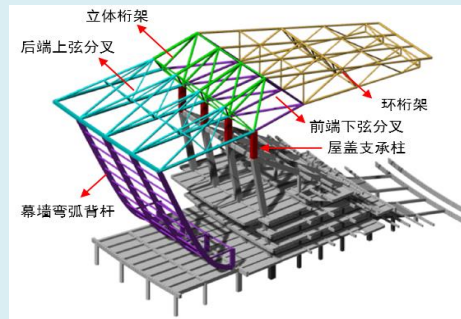
### 4. 钢罩棚结构选型

钢结构屋盖下部结构采用单圈的环向直柱支承屋面，支承屋盖柱柱距为 10.5m~12m，柱高为 2m~8m。

经多体系计算比选，综合考虑建筑抗风性能、刚性屋面、建造效率、结构经济性、整体逻辑性等因素，项目采用带弯弧背杆的锥体加强悬挑平面桁架结构作为实施方案。

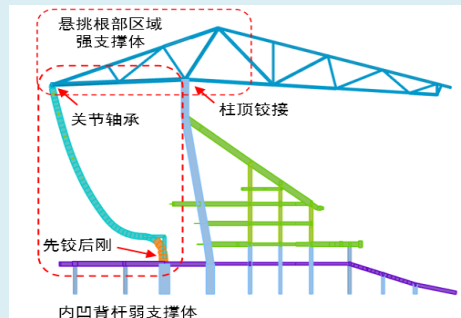


该结构方案具有以下特点：①下弦和上弦均有交叉体系，结构整体韵律感强；②由于交叉弦杆的存在，结构整体刚度得到改善；③利用大结构概念，整体杆件较少，悬挑刚体外移，受力可控；④下弦人视范围杆件较小，建筑观感较佳；⑤背侧与幕墙连接处形成较强的三叉交汇形结构，刚度得到保证。



### 5. 弯弧背杆结构选型

在西侧高看台区域，钢结构屋盖的悬挑长度最大，在支撑柱内侧悬挑长度为 62.5m，外圈跨度 34m，导致柱顶受力不平衡，难以直接利用柱顶单支点支撑整个屋盖系统。为此，将幕墙弯弧竖向主立柱作为钢结构屋盖的背杆，形成桁架平面内混凝土柱与背杆双支点的支杆形式，柱顶均采用铰接连接。



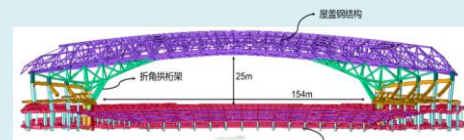
幕墙主弯弧立杆在恒、活荷载为主的工况下受拉；在风为主的向上荷载作用下受压，杆件内凹造型与结构受力逻辑不相符，并具有类弹簧效应。为考察弯弧背杆的整体受力性能可靠性，在仅考虑屋面荷载的情况下与直线背杆方案进行分析对比，周期增加 3%左右，其恒、活和恒、风标准组合下的挠度分别增大 12.5% 和 235%。恒、风组合工况下挠度的显著增加进一步说明弯弧背杆方案的压弯性能大幅度降低，但由于该组合下挠度远低于规范限值，在本项目仍有极强的适用性。

弯弧背杆钢结构选型与设计需重点关注抗压稳定性、抗拉刚度、与幕墙的匹配度等。项目开展了多方案比选，主要是针对以下方面进行不同形式的组合与分析对比：①支承屋盖直柱铰接和刚接；②背杆与柱顶铰接或者刚接；③屋盖与斜看台加不同形式的斜撑；④背杆顶部与屋盖连接节点设置适当刚度的弹簧和阻尼；⑤背杆顶部与屋盖设置受压单元。最终确定背杆顶部与桁架端部采用关节轴承连接，底部采用先较

后刚连接，屋盖在风吸力作用下背杆底部弯矩较刚接方案减小 15%，同时避免背杆柱顶出现较中较，弱化整体刚度。

### 6. 大开口结构选型

本项目东侧 154m 大开口结构，在跨度方向承受重力荷载引起的推力和大跨度屋盖引起的柱顶支座反力。在垂直跨度方向主要承受内外不平衡弯矩引起的立体环桁架扭矩作用。因此，该结构的主要考虑因素包括整体刚度传递、二道防线、抗风能力、拱脚推力、建筑形态表皮契合度等。



若大开口结构下弦基于合理拱轴线设计，屋面竖向刚度远超规范需求，刚度冗余较大，另一方面，合理拱结构将产生较大水平推力，对软土地区桩基础水平力设计不利。为此，采用一种小倾角大开口折角拱结构方案对大开口结构进一步优化，对端部下弦的合理拱轴线进行弱化内倾，同时进一步加大端部支承折角拱结构的双叠合柱间距，具有以下优势：①控制落地结构角度，使其主要承担降低支座拔力和承担结构二道安全防线的的作用；②弱化整体拱刚度，柱脚水平推力和楼板应力较完美拱方案降低 1/3，降低灌注桩水平力负担，适用于深厚软土地基；③屋盖支座最大拔力由 18000kN 降低至 11000kN，显著减小支座尺寸；④大开口钢结构刚度弱化后，最大构件直径可从 1.5m 优化至 1.2m，更符合建筑效果要求。

分别从支承屋盖框架柱的轴力、剪力和弯矩，对下部结构扭转效应等方面进行多点多向地震响应分析。考虑多点激励效应时，内力效应沿 X 方向和 45° 方向较 Y 方向大。一致输入下的基底剪力大于多点输入。非一致激励对钢屋盖的影响较小。

本项目结构方案设计充分结合复杂建筑形态、场地地形条件及技术形势等核心要素进行技术创新，解决设置弯弧立杆的锥体加强悬挑平面桁架结构、深厚软土地区复杂结构与场地土—结构共同工作分析等技术难题，多项技术创新均基于解决工程问题而提出，适度的结构创新为建筑赋予新的生命力，荣获国际知名建筑与设计媒体 Dezeen 评选的 2025 年度中国十大最佳建筑项目。

### 7. 结构主要分析结果

本工程属于超限大跨空间结构。在恒、活标准组合下，屋盖西侧看台处最大竖向位移为 -460mm（向下），挠跨比为 460/62500=1/136<1/125，满足要求；在大开口处，竖向最大位移为 221mm，挠跨比为 221/154000=1/697<1/400，满足要求。在恒载+风载工况下，屋盖西侧看台处最大竖向位移为 442mm（向上），挠跨比为 1/141<1/125，满足要求；在大开口处，竖向最大位移为 136mm，挠跨比为 1/1132<1/400，满足要求。

由于本项目屋盖体系为带弯弧背杆支撑的锥体加强悬挑平面桁架，低阶稳定

主要表现为局部稳定。采用 Pushdown 法对结构在恒、活作用下进行几何非线性+材料双非线性分析，得到屋盖的竖向极限承载力。在 1 倍荷载下，屋盖处于弹性状态；在 2 倍荷载下，西侧看台支座上方的钢结构出现塑性铰，与钢结构屋盖极限承载力的荷载-位移曲线在 1m~2m 区域产生转折吻合；在 3.68 倍荷载作用下，在西侧高看台上方出现塑性铰。此时，塑性铰均处于第 1 阶段，可继续受荷，极限承载力应大于 3.68。

选用三组三向地震波进行分析，同时考虑重力二阶效应及大变形，罕遇地震作用下结构塔楼最大顶点位移 X 向为 164mm、Y 向为 161mm，塔楼最大层间位移角 X 向为 1/52，Y 向为 1/60，均小于 1/50，满足“大震不倒”抗震设防要求。根据弹塑性分析结果，除首层个别框架柱出现中度损伤外，其余普通框架柱均处于无损伤~轻度损伤的状态。部分框架梁达中度损伤，其余框架梁均处于无损伤~轻度损伤状态。屋盖钢结构在大开口处部分构件发生屈服，其余基本处于无损伤的状态。

分别从支承屋盖框架柱的轴力、剪力和弯矩，对下部结构扭转效应等方面进行多点多向地震响应分析。考虑多点激励效应时，内力效应沿 X 方向和 45° 方向较 Y 方向大。一致输入下的基底剪力大于多点输入。非一致激励对钢屋盖的影响较小。

本项目结构方案设计充分结合复杂建筑形态、场地地形条件及技术形势等核心要素进行技术创新，解决设置弯弧立杆的锥体加强悬挑平面桁架结构、深厚软土地区复杂结构与场地土—结构共同工作分析等技术难题，多项技术创新均基于解决工程问题而提出，适度的结构创新为建筑赋予新的生命力，荣获国际知名建筑与设计媒体 Dezeen 评选的 2025 年度中国十大最佳建筑项目。



广东省建筑设计研究院集团股份有限公司 罗赤字、林景华、区彤等