

建筑能够承受之轻

The Bearable Lightness of Building

撰文 李岩 CCDI中建国际设计

济南奥林匹克体育中心的建筑形态是当代建筑语境下的文化诠释，也是跨越多个专业合作的产物。体育建筑虽然体量宏大，但却在细部设计上力求贴近人的尺度。不论是体育场的空间折板网架体系，还是体育馆的大跨度弦支穹顶，都在建筑艺术与结构工程的双重意义上，轻盈而浪漫地展示着设计和建造技术的魅力。济南奥林匹克体育中心建筑群的整体造型源自对城市文脉的综合考量。这种仿生形态的出现，在摒弃象征主义的具象结果后，建筑师经过设计上的一系列调整推演，使其呈现在大众面前的是一种表达心理诉求的抽象的创意形式。西区的主体育场与东区三馆不仅实现了整体造型的平衡统一，也充分体现了对地方文化的尊重。

1 轻

奥体中心体育场采用空间折板网架体系，体育馆采用弦支穹顶，两者均用纤细的钢结构杆件或拉索解决大跨度罩篷及屋顶的支撑，既大大降低了用钢量，提高了整体性，又契合了造型的需要，将屋顶结构与建筑表皮有机地连为一体。从柳叶叶片造型到材料选用，以及近人尺度的杆件尺寸比例，尽量做到薄、细、精、巧、透，让接近和穿行于其中的人们更多地体会到空间的流动与细节中的人性化设计，削减了体育建筑带来的巨大尺度和厚重感。建筑内部公共空间特别是公共聚散的重要场所，通过空间形态的透视效果及钢结构构件营造出了细腻、轻盈的感受。

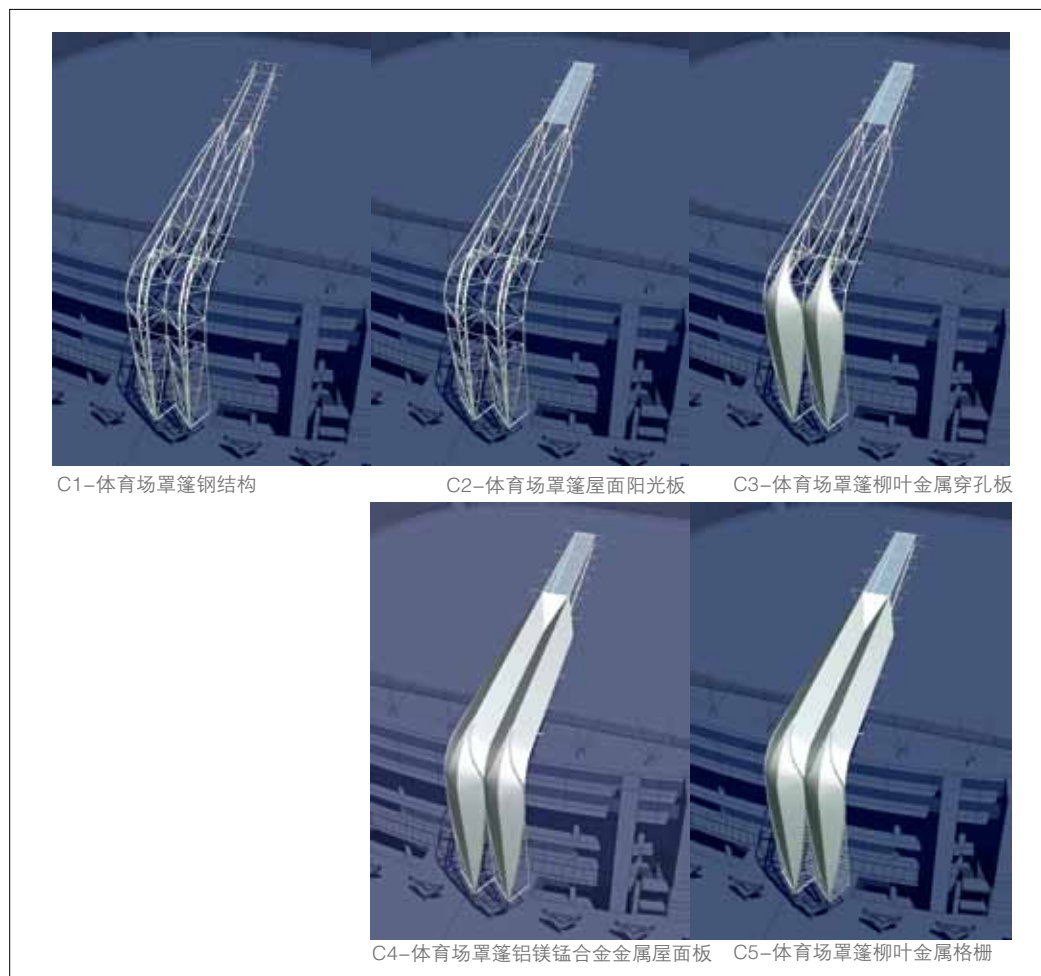
2 体育场：生长的罩篷

体育场罩篷形式的创造充斥着文脉演绎与功能理性的冲撞与交融，是对体育场这种大型悬挑桁架结构体系深入研究审视后的再发挥和再创造，很难说柳叶意向与空间折板体系孰先谁后，柳叶单元母题的产生也绝非为了柳叶而柳叶，正是基于形式与结构的完美结合才使得整个建筑更有机，更持久。



体育场夜景





随着现代建筑越来越注重人文关怀，体育建筑中的看台罩篷作为为观众遮风挡雨的永久设施已不可或缺。当今的体育建筑特别是体育场的形象往往由大跨度空间结构体系支撑的屋顶罩篷来决定，其覆盖形式也从单侧罩篷、两侧罩篷到全罩篷，而其结构形式从网架结构、空间桁架到悬索结构体系等五花八门，体育场馆完全摆脱了单调的看台背立面构筑物形象，开始具有了地方文化意蕴和先进结构所产生的美学。以备受世人瞩目的“鸟巢”和“水立方”为例，优美的空间钢结构编织体系和多面体结构本身构成了建筑的骨架与形象主体。

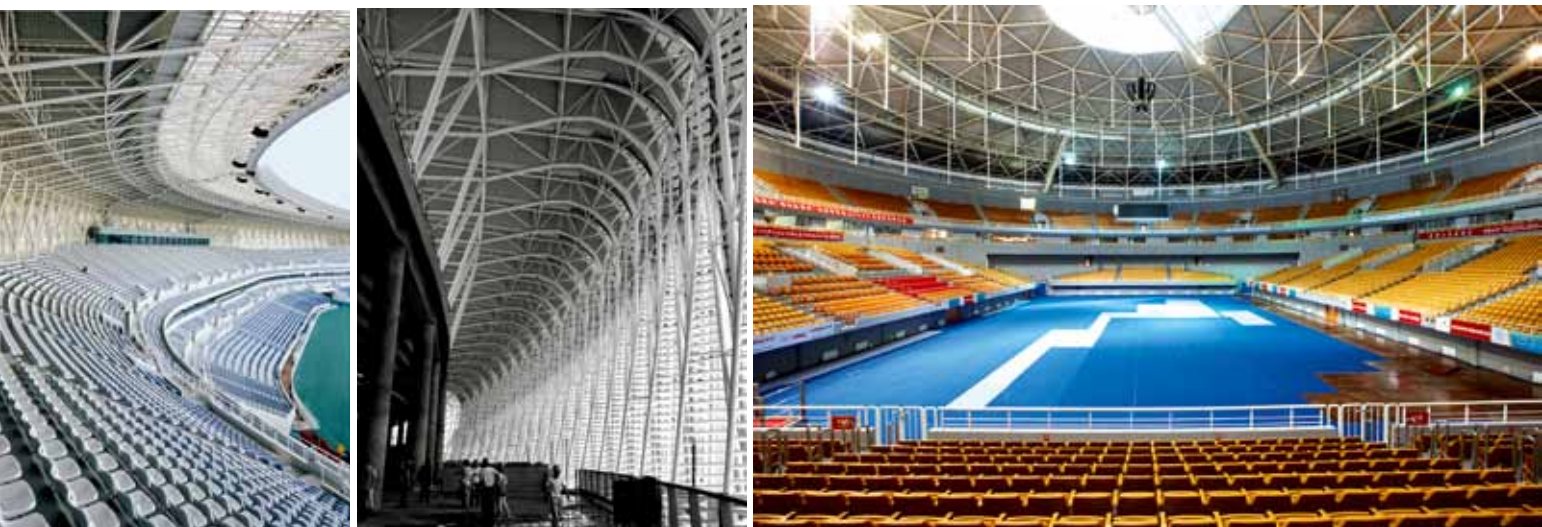
3 体育场：钢结构空间折板网架体系

伴随着罩篷形式和结构体系的相互影响，体育场的围护结构呈现出一种“演进”的关系。最终确定的顶棚形式是在多轮比选之下的优化方案。“柳叶”的两个折面与叶脊的结构形态启发了外部围护单元与屋面罩篷所形成的连续空间折板体系，不仅让结构的整体性得到提升，也使得用钢量大大下降（为国内同等级体育场罩篷用钢量的 $1/2 \sim 1/4$ ），使罩篷更加轻盈。

体育场上部钢结构悬挑罩篷为空间折板网架体系，下部为混凝土看台及功能用房，平面近似椭圆，长轴约360m，短轴约310m，结构宽度约88m。为解决下部混凝土结构分缝过多带来的各混凝土结构单元之间相对振动的振型对上部钢结构的不利影响，下部混凝土结构设置了4条永久缝，划分为4个结构单元，东、西两个罩篷分别支撑于东西两个独立的结构单元上。

上部钢结构为2片独立的折板式钢管桁架结构支撑于东西两个看台的混凝土结构单元上。外环的支座支撑于室外6m平台的“Y”型混凝土柱上，外围护结构采用穿孔板，为达到“柳叶”效果，结构的立面采用符合柳叶形状的折板结构，体现了建筑外形的文化意境。

在结构设计中，对地震环境进行了审慎分析：风洞试验、连续倒塌模拟、结构屈曲变形分



析以及特殊节点的受力研究，以保证混凝土与钢结构的整体受力均衡，节点有效简洁。

传统意义上的折板结构体系源自20世纪六七十年代的混凝土建筑。在济南体育场，建筑师与结构工程师巧妙地拓展了“折板”的建构意义，用折板式钢管桁架结构代替了厚重的混凝土，精细的杆件和半透明的表皮不仅贴近建筑母题，更是将体育建筑带入“轻逸”的境界。

4 体育场：柳叶——半透明帷幕

济南奥体中心建筑群多处流露出对自然的抽象演绎，可以理解作为一种文化印象，也可以看做对生命形态的尊重和传递。作为建筑表皮的“柳叶”造型，为竞技场披上一层半透明的帷幕，形成一片片可呼吸的表皮——日换星移的光影和时辰变化让“柳叶”染上不断变幻的色彩，是这座建筑最为动人之处。

济南奥林匹克体育中心体育场运用“柳叶”母题的有机重复序列讲述了一个生命形态的故事。设计师们在结构构成时考虑柳叶叶片的结构形态，表皮选材时考虑柳叶形态的抽象表意，功能定位时考虑柳叶形态的使用感受，将其合为一体形成了结构+表面+功能的综合表现。

体育场及其周边广场向公众提供了一个半透明帷幕下的剧场型公共空间，混合着一些观赏与被观赏的体验，并将光、风、温度的感官体验与速度、变换的运动感受交织在一起，呈现出别样的戏剧效果。当人们在柳叶内侧环廊上活动时，可以透过表皮隐约地感受城市背景；当人们在柳叶外侧的广场中活动时，可以依稀地透过柳叶看见内侧环廊上人群的活动。

决定表皮穿孔板孔率效果的过程包含了多维度的考虑。从建筑的不同高度来看，柳叶上端和罩篷交界处的低孔率完成了建筑竖向表面向第五立面的有力转折，使形体转角更加结实、肯定；柳叶下端近人尺度范围内的高孔率满足使用者视线可以穿越较虚的半透明表皮，也让建筑更好地呼吸。在不同距离接近建筑，孔率的变化也会带来从实到虚的意外感受。在不同时间观赏建筑，孔率的变化让光影有更多变幻，建筑的情绪更加丰富。

5 体育馆：荷的寓意

以荷为主题的东区体育馆由球顶金属屋面及双向空间曲面外围护系统构成，屋面中心有外凸的风帽，整个屋面呈圆球形；外围护曲面体由36个大小花瓣造型和36块玻璃曲面体组成，花瓣围绕体育馆排列，规则有序，组成主馆的建筑效果。训练馆、热身馆以体育馆为中心南北对称分布，屋面成折扇形效果。

钛锌板0.9mm厚，采用多自由度调整安装结构，重点解决用平板拟合空间面造型问题。大、小花瓣正面采用瓦片状钛锌板平锁扣咬合系统。交叉柱室外侧采用横向钛锌板立边咬合系统。大花瓣和小花瓣造型采用600mmx300mm菱形平面钛锌板板块搭接而成，错落有致、咬合紧密。由它们拟合成的花瓣曲面光滑顺畅，紧凑自然。

大花瓣侧面为通透的玻璃采光幕墙系统，为避免框架式幕墙龙骨与花瓣侧面钢结构杆件重叠或纵横交



错，采用点支式玻璃幕墙系统。为拟合花瓣侧面的多维空间曲面，将玻璃设计成三角形分格，使装饰面更加平滑。另外为满足消防排烟要求，在每个大花瓣侧面25m标高处设置8个三角形电动烟感开启窗。

半隐框玻璃幕墙位于体育馆大花瓣之间部位。幕墙横框为铝合金型材，通过转接件固定在后面的横拉杆上，型材室外表面采用氟碳喷涂处理，室内表面采用粉末喷涂处理。玻璃配置采用6mm+12A+6mm中空双钢化玻璃，其中内外片均为6mm钢化玻璃，中空层为12mm。为满足消防排烟要求，在每片玻璃幕墙14m标高处设置4个梯形电动烟感开启窗。另外，在玻璃幕墙每条横向玻璃分格线上有突出玻璃面380mm、宽300mm的机翼形装饰遮阳百叶。

从内视角度看，在每个横向分格处均设计有钢结构横拉杆，玻璃横框通过转接系统固定在拉杆前面，由于玻璃竖向分格较小（分格高约950mm），所以竖向不设龙骨，这样从室内看，横向龙骨与钢结构横拉杆平行，隐藏在拉杆前面，竖向无龙骨，避免了幕墙龙骨与钢结构杆件的纷繁交错，给人视觉上通透、明快、简洁的感觉。

6 体育馆：弦支穹顶

体育馆采用弦支穹顶结构体系。主馆南北长约236m，东西宽约170m，圆形屋顶跨度直径122m，是目前世界上最大跨度的弦支穹顶结构。设计过程中曾经对多种屋顶结构形式进行探索研究，包括索穹顶、弦支穹顶、单层网壳、双层网壳。对于不同结构形式的造型与结构性能进行了多方面综合比较与判断，从造价、施工难度、科技含量等多角度考虑，最终选择了弦支穹顶。后又对弦支穹顶的不同布局方案进行了多次模拟比较，将弦索配以Kiewitt型和葵花型混合的单层网壳，于是得到了最终的实施方案。用极纤细的杆件和拉索完成大跨度屋顶的支撑，在馆内仰视屋面并不感觉其重量和压迫，结构轻盈纤细。

弦支穹顶由上部单层网壳和下部索杆张拉体系组成，单层网壳采用Kiewitt型和葵花型内外混合布置，索杆张拉体系为肋环型布置。弦支穹顶支承于1.5m×1.0m钢筋混凝土环梁，其支座与钢筋混凝土柱顶及外围交叉钢管柱汇交，共36个。弦支穹顶结构具有较大的竖向刚度及良好的抗震性能，是世界空间结构发展的里程碑和制高点。这一结构体系再次契合了济南体育中心“轻盈”的设计命题。



作者简介

李岩，CCDI中建国际设计集团副总经理。主要项目：济南奥林匹克体育中心、纽约联合国总部规划设计、联合国主集会大厅和会议大楼改造设计、纽约时代广场1600Broadway高级住宅、哈佛大学Widener主图书馆改造、哈佛大学商学院Hawes Hall、波士顿学院法学院总体规划、缅因州立大学总体规划、社区中心设计、沙特阿拉伯麦加圣地开发、明尼阿波利斯东河园区总体规划。