

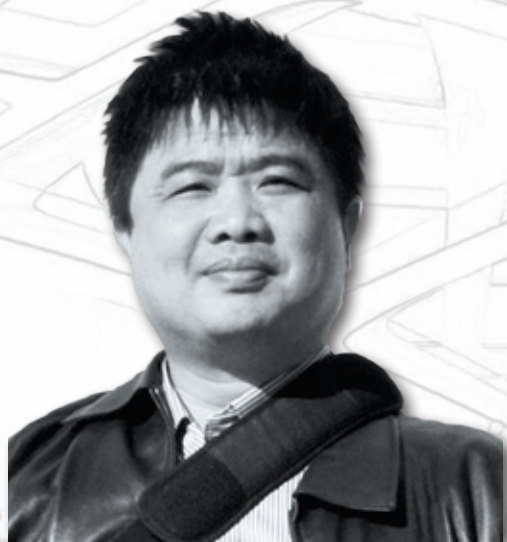
Structure

Architecture

『2013 建筑、结构巅峰对话：结构成就建筑之美』
2ND DIALOGUE OF ARCHITECTURE AND STRUCTURE

Unification of Architecture and Technology: Practice of Theater Design

建筑性与技术性的统一 ——观演建筑的设计实践



黄捷

Huang Jie / Chief Architect/ GDCIC

广州珠江外资建筑设计院有限公司董事及总建筑师

建筑设计：广州歌剧院、广州亚运城媒体村、广州辛亥革命纪念馆、武汉琴台大剧院及音乐厅、武汉中山舰博物馆、澳门东亚运动会体育馆、汶川博物馆及避灾广场、柳州工业博物馆等。

黄泰贇

Huang Taiyun / Vice President / GDCIC

广州珠江外资建筑设计院有限公司副院长兼执行总工程师

结构设计：广州歌剧院、广州亚运城媒体村、武汉琴台音乐厅、武汉中山舰博物馆、澳门东亚运动会体育馆、北京天桥演艺园区艺术中心等。



扫描二维码
可进入报告视频

1 一体化设计——结构的“建筑性”与“技术性”的统一

观演建筑是高层次的综合文化产物,是一座城市的文化“名片”,代表了城市发展的价值追求和文化品位。因此观演建筑设计创新就是要超越传统观演建筑模式,顺应时代的潮流,接受当代文化的信息,运用科技发展最新的成就,总体构思表达地域性与艺术性,创造富有时代感和感染力的艺术形象和观演空间。

观演建筑设计创新就是要打破束缚,启发思维,让建筑建立全面完整的人与自然的关系,设计中非线性系统的引入,将我们的视野从理性规则的建筑中解放出来,创作出与自然更接近的新型观演建筑形态。武汉琴台文化艺术中心、广州歌剧院、武汉万达秀场、长沙梅溪湖国际文化艺术中心等观演建筑的设计实践,就是走一条寻求基于自然环境、城市文化、现代科技的观演建筑的设计创新之路。

观演建筑中,结构体系扮演了重要的角色,也是其方案构思中不可或缺的重要元素。建筑形体与空间对于结构的“建筑性”要求常常需要挑战力学的基本原理与突破现有结构“技术性”的极限,实现和拓展建筑设计的创新空间。这就要求建筑师与结构师密切配合,一起寻求结构体系的可实施性以及高效合理性,使其“建筑性”与“技术性”都得到充分发挥,并能够完美结合。

2 实例解析

2.1 武汉万达秀场

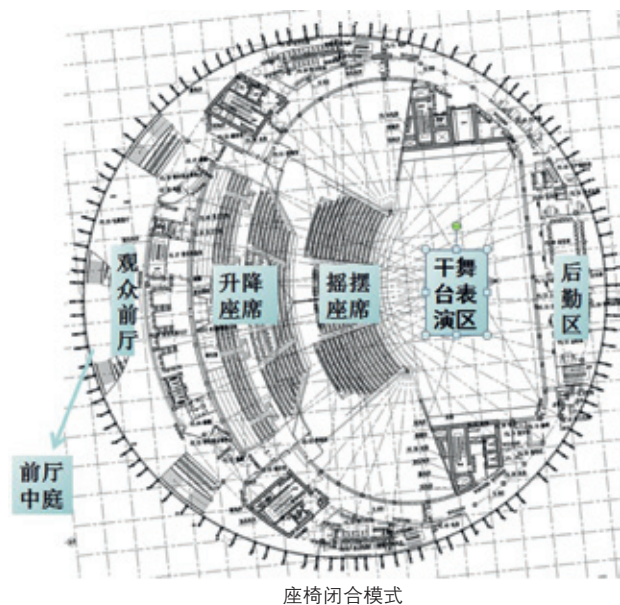
2.1.1 项目概况

观演建筑中新的演出形式和演出设施不断涌现,如专为特定演出剧目打造的秀场和音乐剧场。武汉万达秀场就是中国内地第一家水秀场,演出内容融合当地楚汉历史文化精华,采用高科技手段进行诠释(图1)。其舞台设备都是为演出量身定做,因追求震撼的表演效果和感官刺激而变化丰富,技术极其复杂,就如同一个工艺先进的“演出工厂”,代表了世界表演设施的最高科技水平。

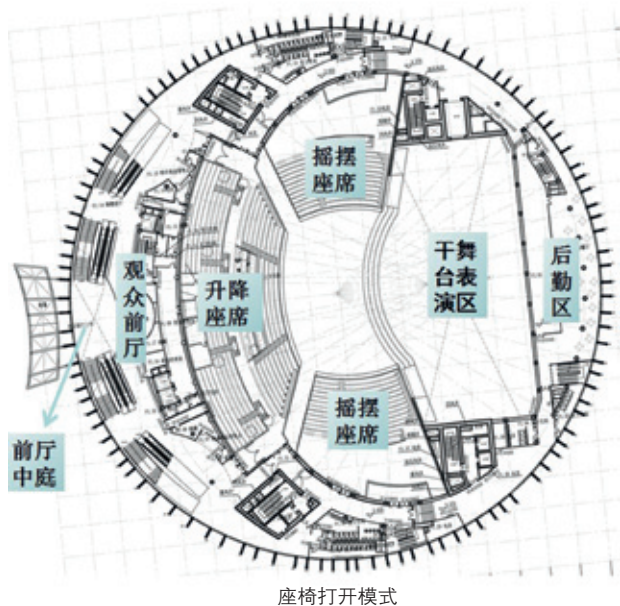
万达秀场建筑设计创意灵感来源于中国传统“红灯笼”造型,并采用现代手法与技术手段进行表现,以达到传统元素与现代技术的高度融合。红灯笼造型轻盈剔透的结构美可以通过三层挑高的大堂向上一览无遗,还



图 1



座椅闭合模式



座椅打开模式

图 2

能结合夜景照明完美展示。红灯笼与裙房屋顶的衔接处理手法神似中国传统建筑屋顶，裙房柱廊的片状柱壁上雕饰有中国传统纹样。汉秀剧场总建筑面积 84 296m²，其中地上为 26 880m²，地下为 57 416m²；建筑高度 59.8m，建筑平面直径 110m，主要包括一个 2 000 座的表演厅，厅内包括摇摆座席区、升降座席区、水舞台、干舞台等（图 2~4）。

秀场含 VIP 区总共约 2 000 个座椅，为世界上第一座采用移动座椅的水秀剧场。在演出开始时座椅处于闭合状态，在演出过程中结合节目的推进，前部区域座椅转动打开，后部区域座椅垂直降下，整体座椅呈现开启状态。围合在座椅中间的区域是演出水池，其储水量相当于 3~4 个奥运会标准游泳池，可以完成水面与陆地的瞬时转换（图 5）。水池中设有水下升降机等舞台特效设备等，系统非常复杂；舞台上空设有吊挂设备及舞台灯光系统等，完成演员从空中马道及栅顶降落或飞行等动作；舞台背景设有三块可分可合的移动 LED 屏幕，通过巨型机械设备完成表演动作。舞台机械及设备在控制系统的整体调控下做到协调一致，在空中、水池及地面上全方位地展现水秀演出。

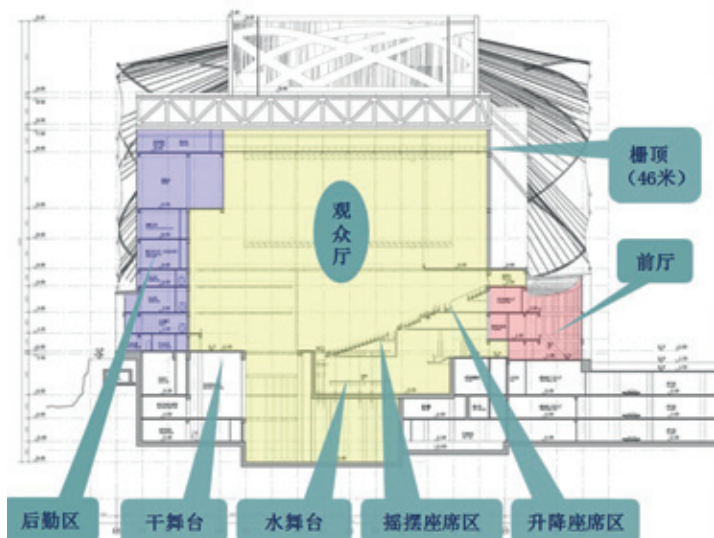


图 3



图 4

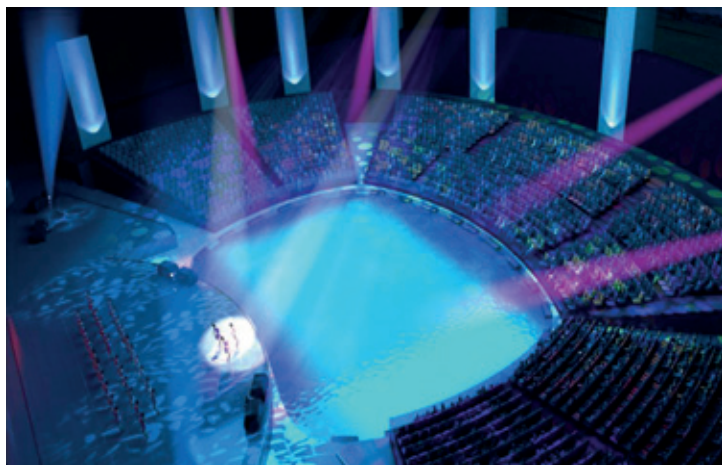


图 5

2.1.1.2 武汉万达秀场结构体系

主体建筑采用钢框架－钢筋混凝土多筒体结构。结构的核心受力体系为四个钢筋混凝土筒体及屋盖钢桁架，形成“板凳”形结构(图6)。如图7主体结构示意图所示，屋盖钢桁架协调四个混凝土筒体使之协同受力，同时吊挂下部格栅层、马道层等舞台功能楼层，钢桁架双向正交布置，与混凝土筒体通过多个抗震球型支座连接，桁架高度6m，双向间距6m，杆件采用H型钢。建筑裙楼采用钢框架结构，楼盖采用钢筋桁架楼承板，形成第二层次的受力体系；其中裙楼周边片状柱子平面外无支高度达20m，而受建筑效果限制柱子宽度仅有300mm，结构采用矩形钢管组成的钢格构柱，柱肢管内布置体内预应力拉索，利用拉索约束柱子的平面外失稳；前厅山墙无支高度27m，且承受索结构外幕墙径向索的拉力，结构采用柱面双向桁架结构。

本工程外皮的造型幕墙模拟中国传统的红灯笼造型，在裙楼以上采用了半透空的索结构幕墙，结合建筑造型及其空间构成元素(空间环、索、主体结构等)，结构采用了悬挂轮辐加单层曲面索网体系，其结构构型及其主要元素组成如图8所示。

整个索结构幕墙体系可分解为以下6个部分组成，分述如下。

(1) 空间轮辐环管

塔楼建筑基本形体为直径110m、高60m的圆柱体。在空间上采用8个与大地夹角约为25°的斜平面去切割该圆柱体裙楼以上的部分，得到8个两两互为相交的水平投影直径为110m圆的空间椭圆。8个椭圆中心点均位于圆柱体中心线上，其中心点标高41~42m不等。各椭圆长轴约为60.5~61.2m不等，短轴为55m，椭圆周长为367~370.5m不等，椭圆最高点标高约为68m。8个椭圆两两相交后形成56个交点，56个空间网格(其中顶部、底部各8个三角形网格和中部40个四边形网格)，网格边长最大的空间长度约为40m。8个椭圆采用直径650mm的圆钢管，形成由8个轮辐环管空间相交的刚性骨架结构(图9)。

(2) 径向索及刚性撑杆

根据建筑视觉效果的要求，将每个椭圆轮辐环管150等分，等分点与圆柱体中心线上高度为82.75m的点相连，得到每个环上的150根径向斜索，整个结构共计1200根(图10)。所有径向索端部在空间上汇交于轮辐结构重心线上一点，径向索的内端部均锚固到主体结构构件上，由于主体结构的非规则外形，因此实际上径向索在空间上分布长度不等长。从上述原则可知，径向索与水平面的夹角沿椭圆轮辐环管下端至上端逐渐减小，底部最大为51°，顶部最小为15°。由于空间倾角及主体结构外形关系，1200根径向索的空间长度差别较大，长度约分布在5~30m之间不等，且径向索采用Φ24Galfan钢绞线裸索。

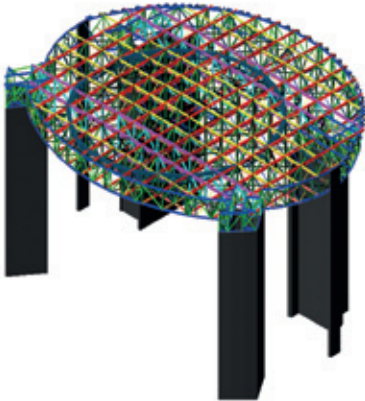


图6

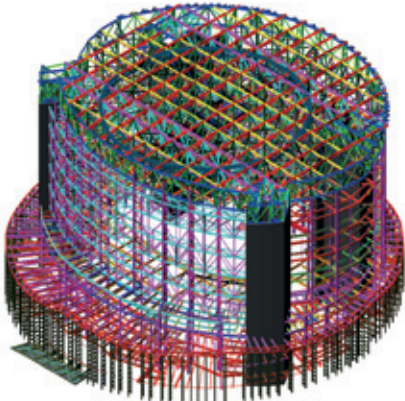


图7

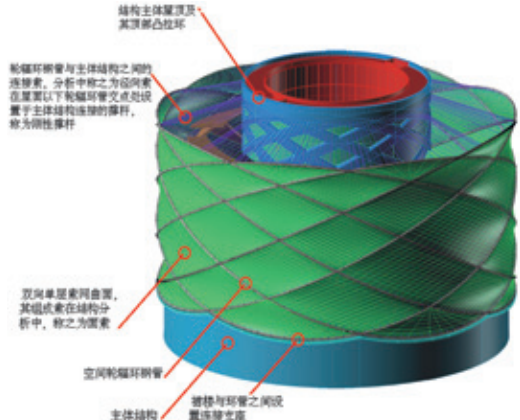


图8

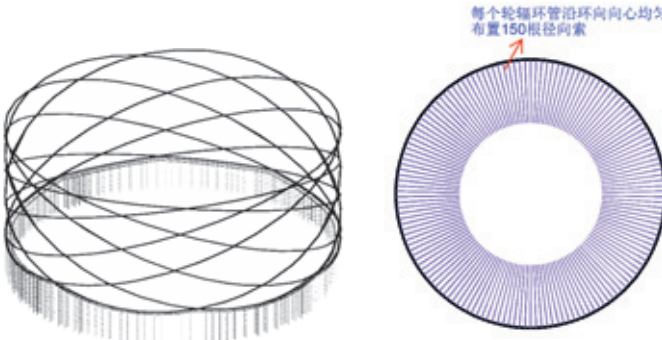


图9

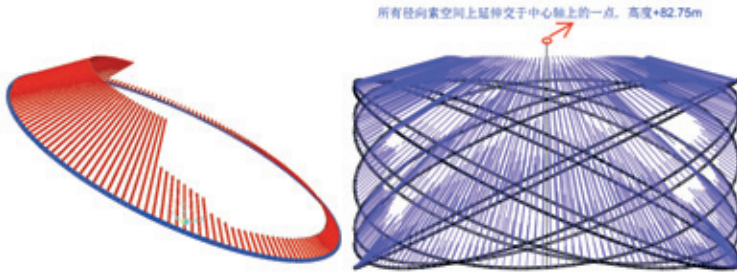


图10

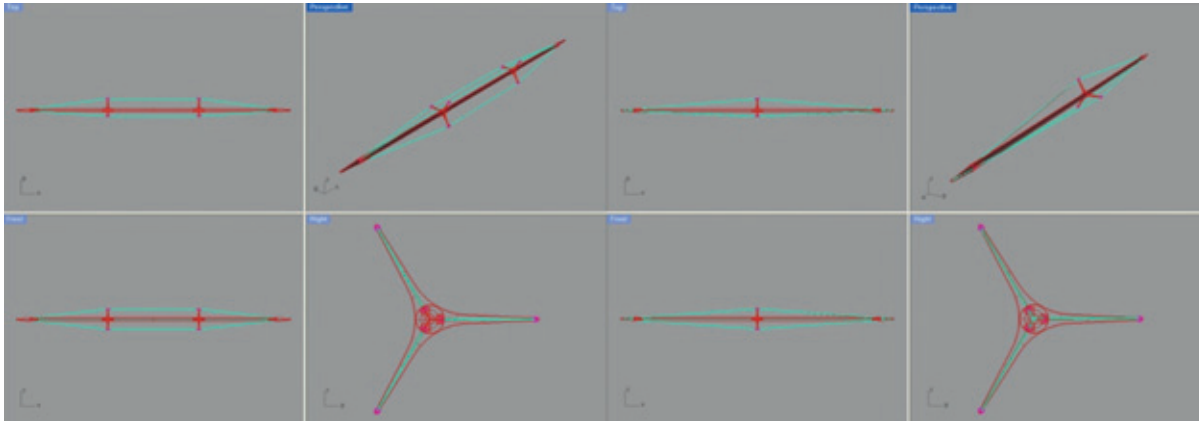


图 11

径向索作为轮辐环管结构与主体结构之间的连接，其主要作用有以下几点：

1) 将轮辐环管结构悬挂在主体结构上，将管的自重荷载传给主体结构，同时使自身在重力荷载下实现张紧，实现被动张拉。

2) 在单层曲面索网成形施工过程中，与轮辐钢管结构共同组成曲面索网的内部刚性边界，限制轮辐钢管结构由于面索的预张力作用而出现过大变形和屈曲。

3) 在正常使用阶段，在侧向荷载(风荷载)下，可靠地将侧向荷载传给主体结构，保证环管的空间稳定性。

为了提高幕墙结构在极限风荷载下的整体稳定承载力，在轮辐环管中下部交点处布置了 34 根刚性撑杆，其设置规律与径向索一致，均指向圆柱体中心轴高度 82.75m 处，撑杆长度分布在 5~20.5m 不等。长度较短的撑杆采用 $\Phi 219$ 圆钢管，长度较大的撑杆采用两段式或三段式张力撑，中心钢管 $\Phi 219$ ，体外布置 3 道预应力拉索(图 11)，提高刚性撑杆的稳定承载力。

(3) 主体结构上的刚性附属结构

轮辐环管上的径向索和刚性撑杆通过建筑周边的刚性附属结构与主体结构连接(图 12)。其中，平面后区布置空间双曲钢环梁，钢环梁则通过牛腿与主体结构柱连接。前厅山墙外布置 8 榀道空间双曲桁架，它们相互支撑，并与混凝土筒体及前区山墙结构连接，每一榀空间双曲桁架的空间走向与对应轮辐环管上径向索的走向一致，实际上是空间圆锥面上的双曲桁架，同时也是建筑视觉效果的一个重要组成元素。另外，由于上部的斜索终点高于主体结构屋顶，无法锚固到主体结构构件上，因此在主体结构屋顶上设置一个直径 58m 的圆形拉环，拉环位于屋面以上高度约 16m，由与轮辐环管一一对应的八道双曲钢箱梁组成，支承在主体结构屋盖桁架上。

(4) 轮辐底部与裙楼结构的连接支座

由于所有的径向索和刚性撑杆指向空间同一点，使轮辐环管属于理论上的瞬动结构，因此在轮辐环管底部和裙楼屋顶交接处设置了 41 个连接支座，为整个幕墙结构形成稳定的结构体系提供必要的边界约束。这些支座同时保证了面层索网张拉时底部轮辐环管具有充分的结构刚度和承载力。

(5) 双向单层曲面索网

在由前述 8 个椭圆轮辐环管相交形成的 56 个空间区格内，采用单层曲面索网结构，每个网格上双向布索，索间距约 1m，索网在张拉预紧后，自然往里凸，形成接近最小曲面的双曲抛物面，56 片双向单层索网和轮辐钢管共同形成整个外形的凹凸。结构采用双向等轴力索网(图 13)，索网间距约 1m，采用两根 $\Phi 18$ Galvan 钢绞线裸索并排布置，索预张力 40kN。

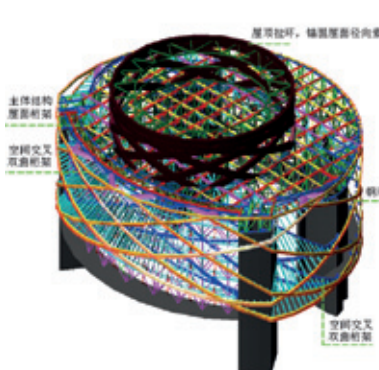


图 12

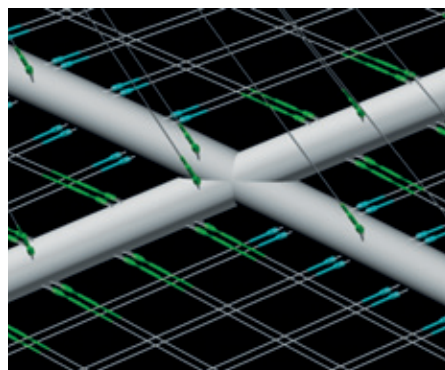


图 13



图 14

(6) 装饰金属碟片

面层索网的每个交点上通过不锈钢索夹布置直径 800mm 的圆形铝合金装饰碟片，内置 LED 装饰灯（图 14）。设置碟片后，整个灯笼幕墙透光率约为 50%。

整个索幕墙结构体系可概括为：椭圆形轮辐环管通过径向斜索和刚性撑杆悬挂在主体结构上，底端与裙楼拉结，单层马鞍形索网填充在环管网格中，径向斜索提供斜向上的拉力，椭圆形轮辐环管承受环向压力，裙楼提供向下的拉力，单层索网为环管提供竖向面内的稳定性并形成蒙皮效应，从而整体形成了张力空间结构。

2.2 长沙梅溪湖国际文化中心

2.2.1 项目概况

长沙梅溪湖国际文化艺术中心主要包括一个 1 800 座的大剧场，一个 500 座的小剧场（多功能厅），一个当代艺术馆，为整个项目配套的零售、餐厅和咖啡厅，以及为以上公共设施配套的设备用房、剧务用房、演出用房、行政用房、停车场等（图 15，16）。

本项目基地面积 8.8 万 m^2 ，总建筑面积 12.5 万 m^2 ，其中地下建筑面积为 5.1 万 m^2 ；建筑地下 1 层，局部 3 层；地上分三个单体，其中大剧场地上 5 层，局部 8 层，建筑总高度 52.12m；小剧场地上 3 层，建筑总高度 21.05m；艺术馆地上 4 层，建筑总高度 42.5m。

长沙梅溪湖国际文化艺术中心项目的概念设计是：为长沙创造出一个全新的，彰显功能性、优雅性和创新性的文化和城市中心。扎哈·哈迪德建筑师事务所对这个文化艺术中



图 15



图 16

心的设计概念是以城市为本，致力创建一个由场地组成的延续流线网络和文化景区，以吸引四方八面的游客。围绕中心区域也就是“中心广场”的组合元素有 1 800 座大剧场、500 座小剧场（多功能厅）、当代艺术馆、零售、餐馆和咖啡厅的设施，连通性是这个方案的主要特点之一。每栋花瓣形建筑单体均可以通过独立的、由不同类型的使用者组织的各种流线进出。在这些流线之中，景观平缓地起伏并塑造出单独的入口区域和室内大堂，这种空间处理可以灵活地组织流线，并作为交通汇聚点以确保所有使用者可以到达（图 17，18）。

2.2.2 立面设计和建筑造型

长沙梅溪湖国际文化艺术中心建筑造型缘起于“梅花”，每个单体由“梅花”的花瓣衍生而来，大剧场为四片花瓣，艺术馆为三片花瓣，小剧场为一片花瓣，高高低低地散落在梅溪湖畔。选择恰当的外幕墙材料会更加突出建筑物的三维形态，三个单体建筑外幕墙材料为 GRC（玻璃纤维加强混凝土）板与玻璃的组合，大剧场与艺术馆屋面较为平整的区域采用铝单板屋面系统。建筑物的表皮根据建筑立面的朝向而做出不同的选择，大面的外墙采用 GRC



图 17



图 18

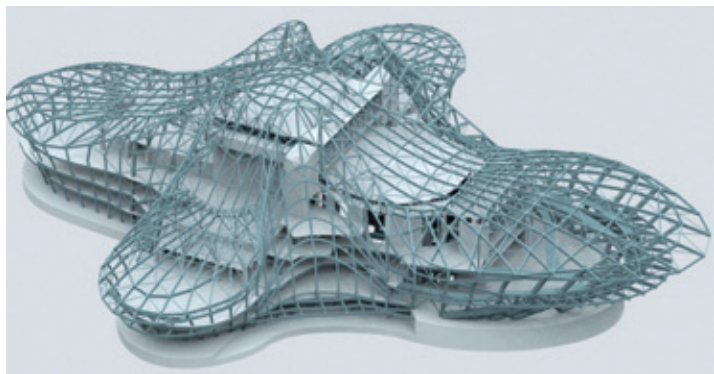


图 19

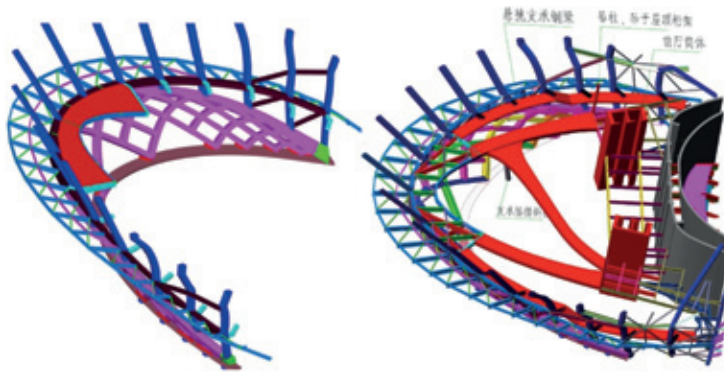


图 20

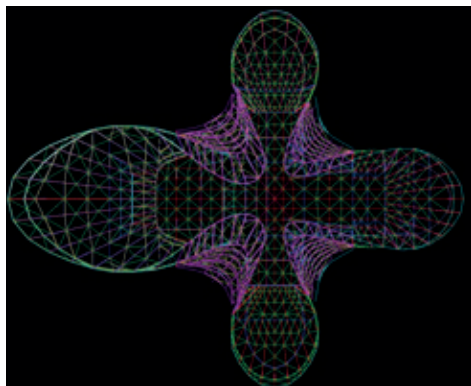


图 21

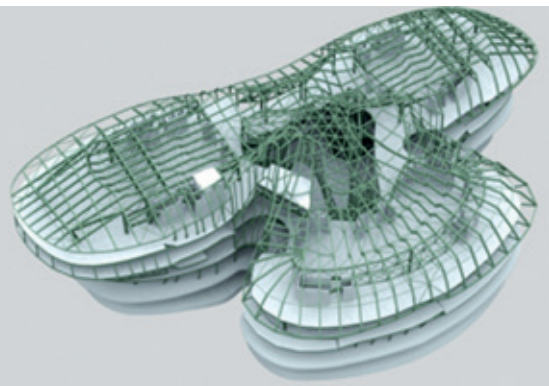


图 22

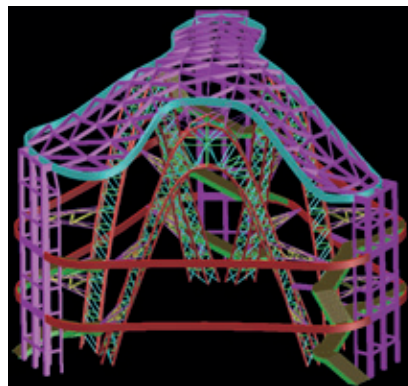


图 23

板，以减少在长沙炎热的夏天对热量的吸收；玻璃幕墙主要应用在露台、天窗、中庭采光顶及局部外墙等位置。在中庭大面积采光顶的位置，建筑幕墙之间适当增加遮阳系统以调节室内环境的舒适度。

2.2.3 长沙梅溪湖国际文化中心结构体系

大剧院内部主体结构采用钢筋混凝土框架－剪力墙结构。外皮结构根据随形布置的原则，结构完成面与建筑完成面的距离恒定为 1m，在结构允许的条件下，屋盖钢构及周边钢柱随外皮转折，周边斜柱与地面的夹角最小仅 37° ，外皮钢柱或网壳同时也是主体结构楼盖的柱，是一个钢与混凝土高度混合、共同工作的体系，实现结构与建筑的高度统一（图 19）。

前厅蜂窝结构是结合建筑师的造型要求和结构受力合理性融合而成的，结构为双曲面单层网壳结构，杆件采用双向弯扭的箱形截面。网壳顶部设置箱形钢环梁，起到环箍约束的作用，同时利用 11m 标高的外挑露台，在楼盖中设置水平支撑，局部铺钢板，形成水平环箍；同时利用网壳顶室内大跨度连廊将水平拉力传递给内部主体结构剪力墙筒体，室内连廊采用钢箱梁结构。几部分构件相互约束、协同受力，构成了自身稳定的具有充分竖向承载和水平抗侧能力的结构体系（图 20）。

屋盖结构采用随形布置的单层网格钢结构（图 21）。其中四个半椭圆平面的屋盖类似于肋环形网壳的布置，径向与外皮钢柱对应布置径向主梁，环向布置次梁，屋面满堂斜支撑。观演区则为双向正交梁格体系。屋盖主要受力构件采用 H 型钢，梁高 500~900mm。

美术馆采用钢框架－钢筋混凝土剪力墙体系，楼盖采用钢梁＋钢筋桁架楼承板体系。屋盖采用随形弯折的双向梁格体系，中庭天窗采用双曲面单层网壳（图 22）。中庭落地拱采用空间桁架拱结构，拱顶支承天窗单层网壳，拱中部设置桁架牛腿支承大跨度楼盖梁和楼梯，楼盖也为拱提供了平面外的稳定支承（图 23）。

3 关于复杂建筑形体的结构设计的思考

（1）三维数字建模技术和结构分析技术的发展，使结构设计得以突破常规的体系和形式，更能适应创新建筑设计外观和功能的要求。

（2）因受制于建筑形体等初始条件的限制，这些结构虽然形式上能满足建筑的需要，却不一定是经济合理、受力性能优秀的先进结构体系。

（3）要实现形式与功能完美统一的建筑结构，需要建筑师在方案创作阶段运用一定的结构思维，并与结构工程师紧密配合，真正做到一体化设计。