

被动与主动复合节能技术在高性能展馆建筑中的应用

——以河南省科技馆新馆为例

顾勇

暖通高级工程师

2019年4月8日



同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司
TONGJI ARCHITECTURAL DESIGN (GROUP) CO., LTD.

目录

1 科技馆基本情况介绍

2 技术内涵总览

3 被动式节能技术

4 主动式节能技术

5 主被动复合节能技术

河南省科技馆新馆位于郑州市郑东新区白沙象湖规划区。新馆共5层，地下1层，地上4层，总建筑面积104 768 m²，其中，地下26 229 m²，地上78 539 m²，建筑高度43 m。



建筑设计创意灵感源于“河洛文化”意象，建筑形态宛如黄河与洛河交汇形成的自然造型，大气舒展、浑若天成；三个方向的延展态势、曲线勾勒与力度变化，既浓缩了中原历史文化的变迁，又犹如螺旋桨引擎和飞鸟展翼，强烈的科技感寓意着“郑州之腾飞、河南之崛起”。

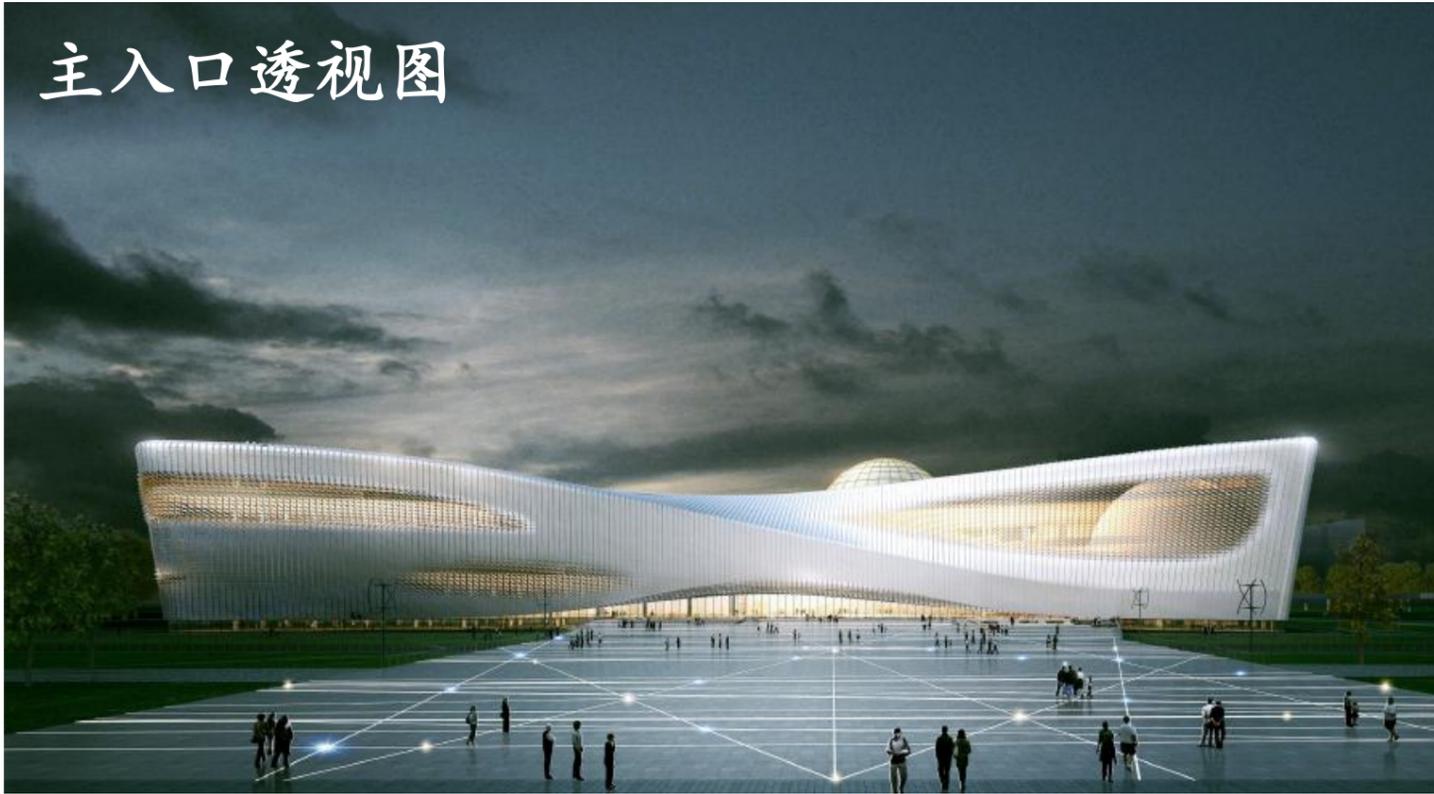


设计团队按河南省科技馆新馆设计任务书确定的建设目标：①“国际一流、国内领先”②“具备国际视野，彰显中国气质，富有河南特色，符合大众审美”。设计方案的定位是：一方面建筑方案要充分展示中原悠久的文化和灿烂的科技文明，同时要展现河南、郑州崛起的新气象、新态势，在此基础上打造一个世界级水准的科技馆，一个郑州未来的新地标。

一座世界级的科技馆！



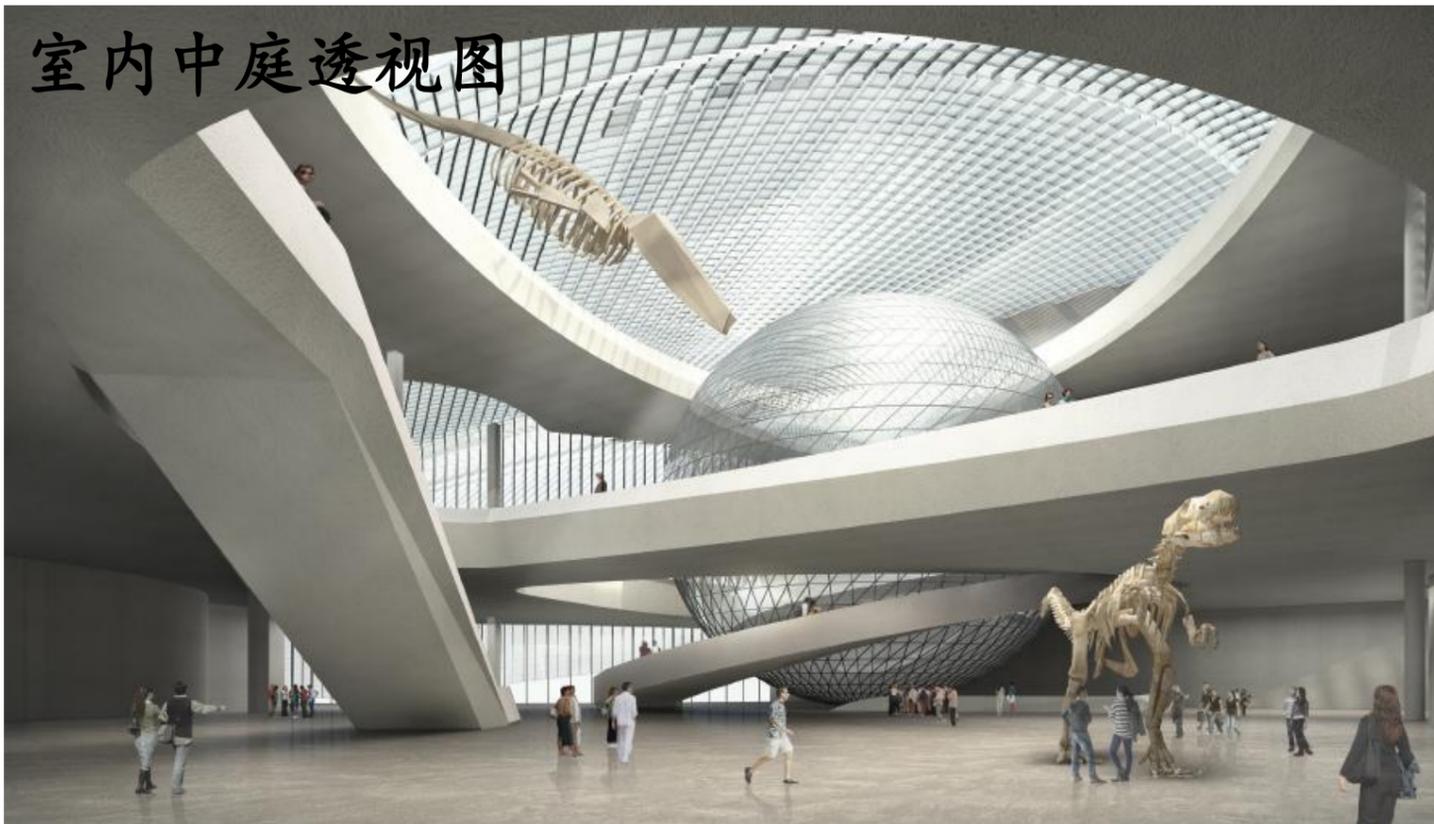
主入口透视图



沿象湖透视图

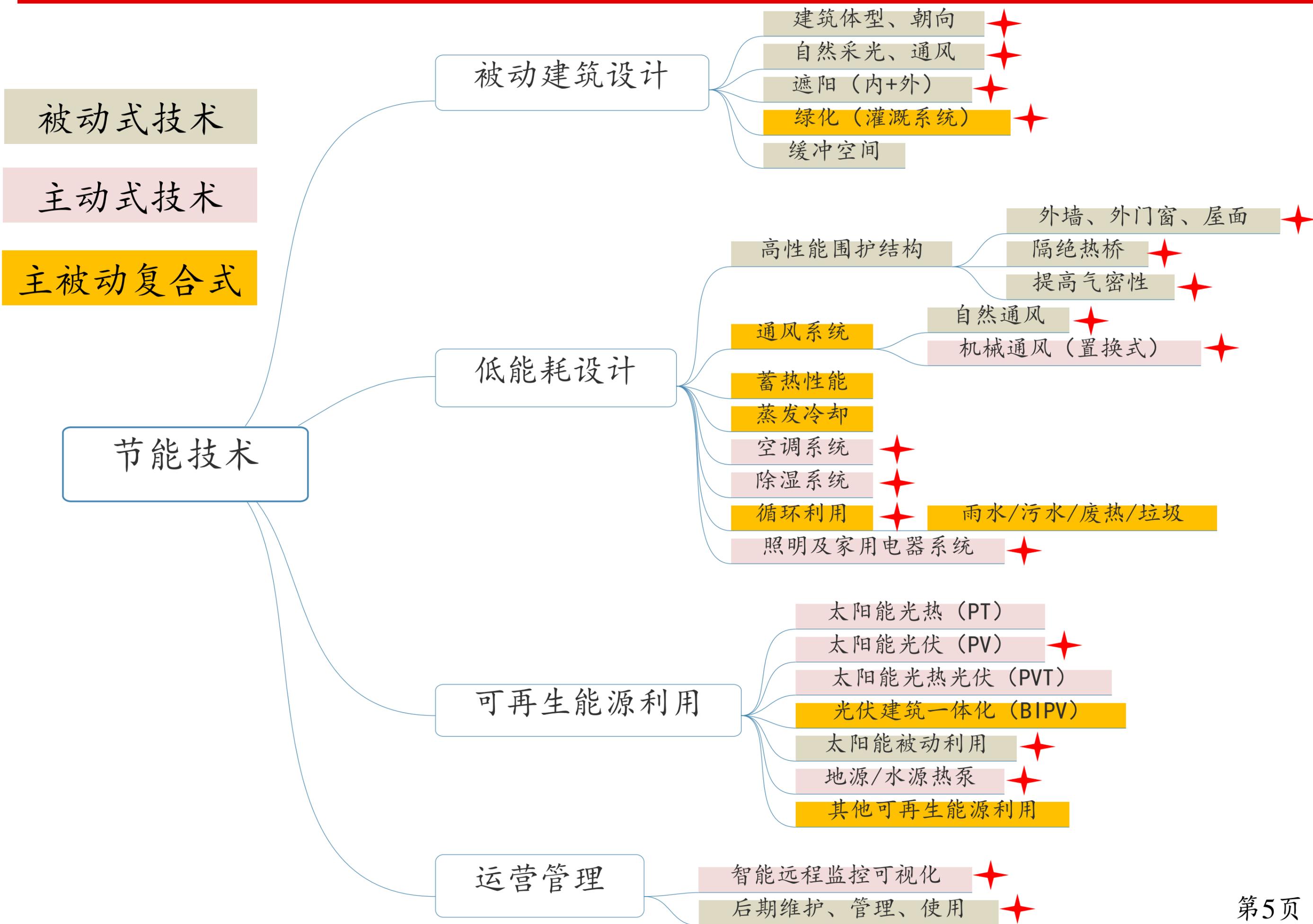


室内中庭透视图



公园透视图





- ◆ 3.1 建筑体型和朝向
- ◆ 3.2 建筑外立面的遮阳（采光、通风）
- ◆ 3.3 高性能围护结构

3.1 建筑体型和朝向

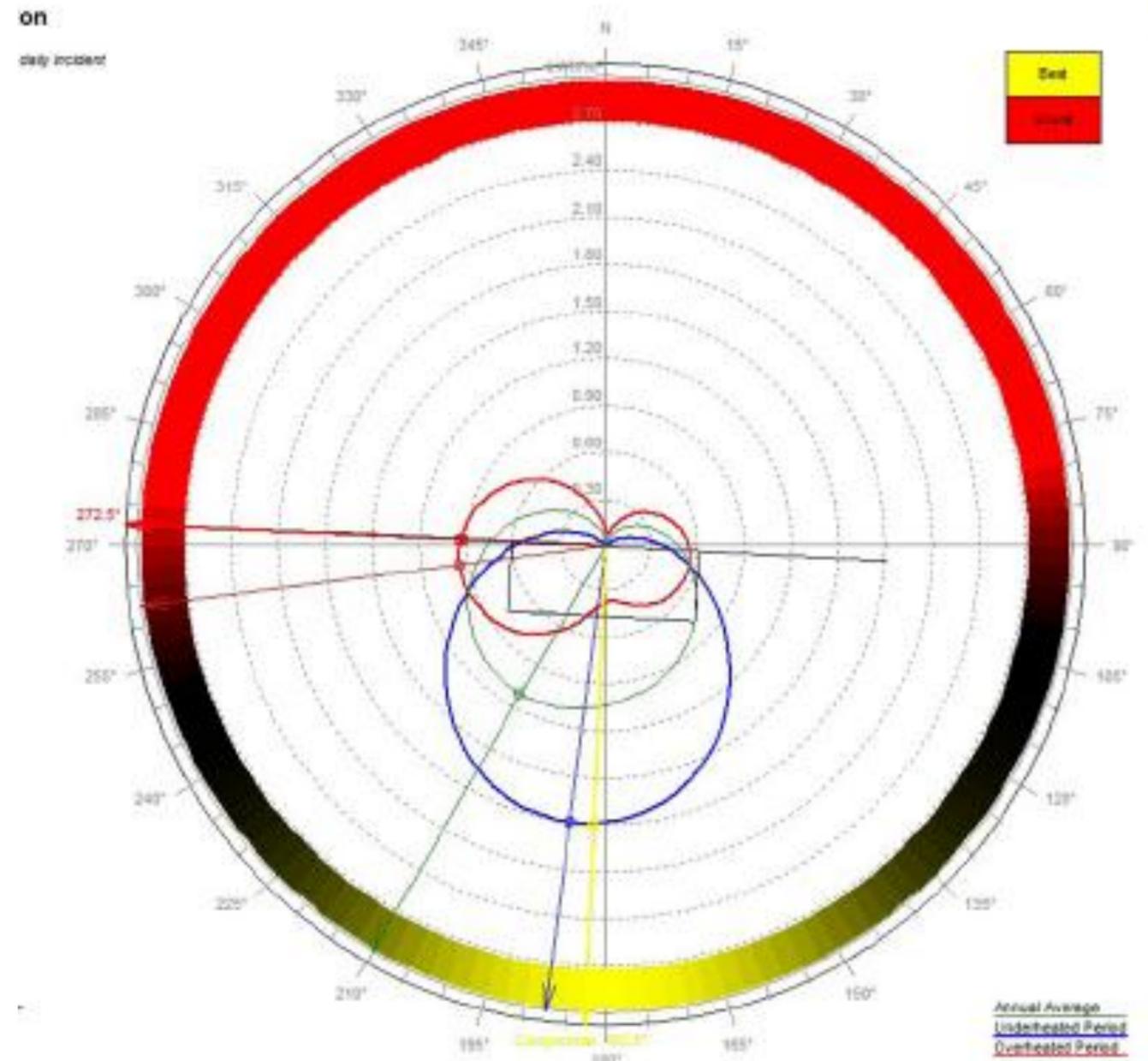
◆ 日照条件分析

郑州的最佳日照朝向为南偏西2.5°，在此情况下，可以最大程度截取冬季阳光，同时降低夏季太阳辐射入侵。

在建筑被动式设计中最有效的方案为：

1) **夏季:外遮阳设计**，能够覆盖大量在舒适区域之外的气候数据，最大限度提高舒适性。

2) **冬季:被动式太阳能利用**，覆盖了部分舒适区域之外的气候数据，但在提高舒适性上有一定的局限性，需要配合主动式设计预防严寒。

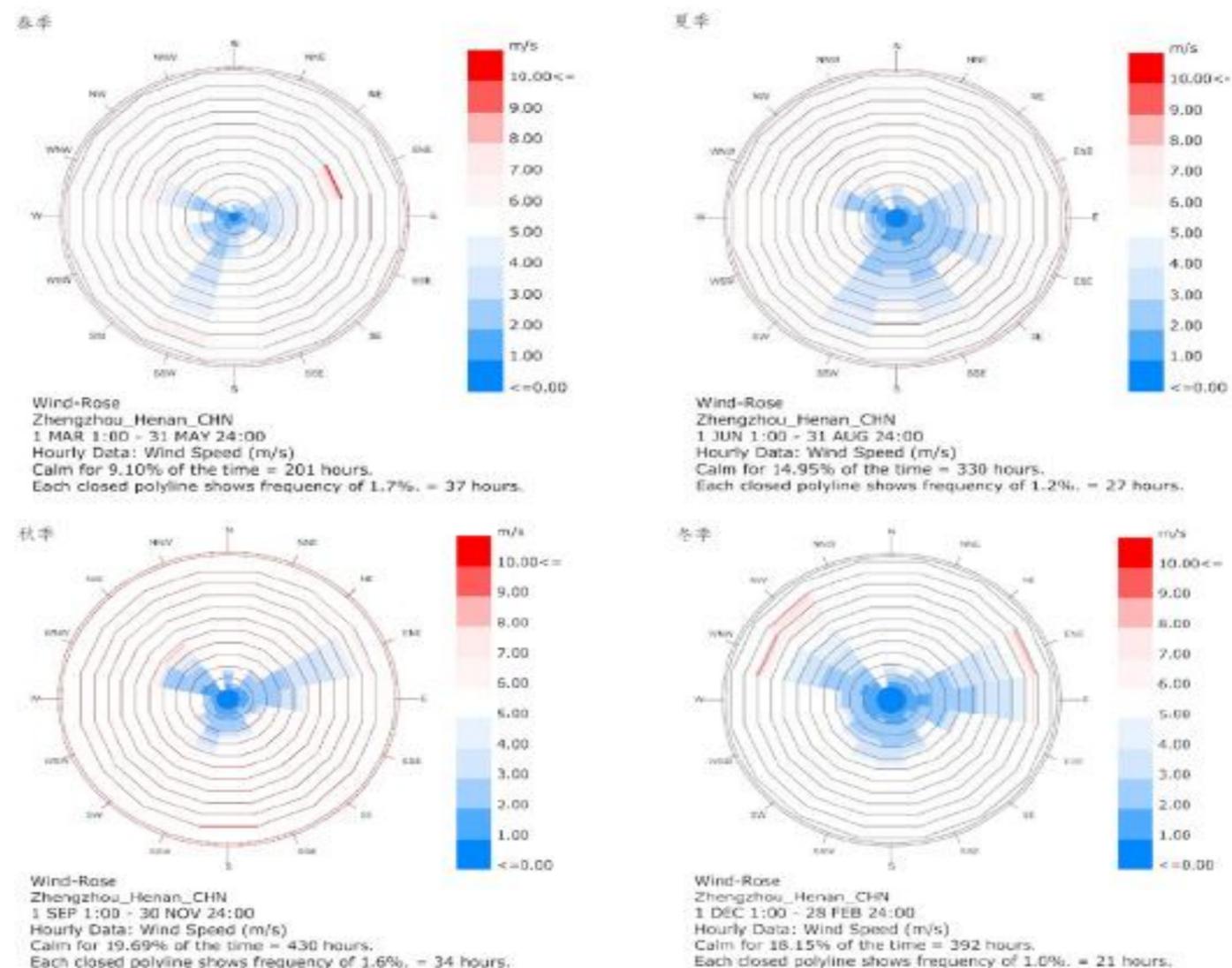


3.1 建筑体型和朝向

◆ 风环境分析

郑州全年主导风向为北偏东风，次主导为西南风。夏季主要盛行西南风和东南风。冬季，主导风向为西北风，次主导为东北风。

考虑到夏季西南风和冬季东北风对冲，故在夏季自然通风的设计中侧重根据东南风布局风道。此外，应对西南方向的格局进行灵活可开闭性设计，过渡季导风，冬夏季阻风。



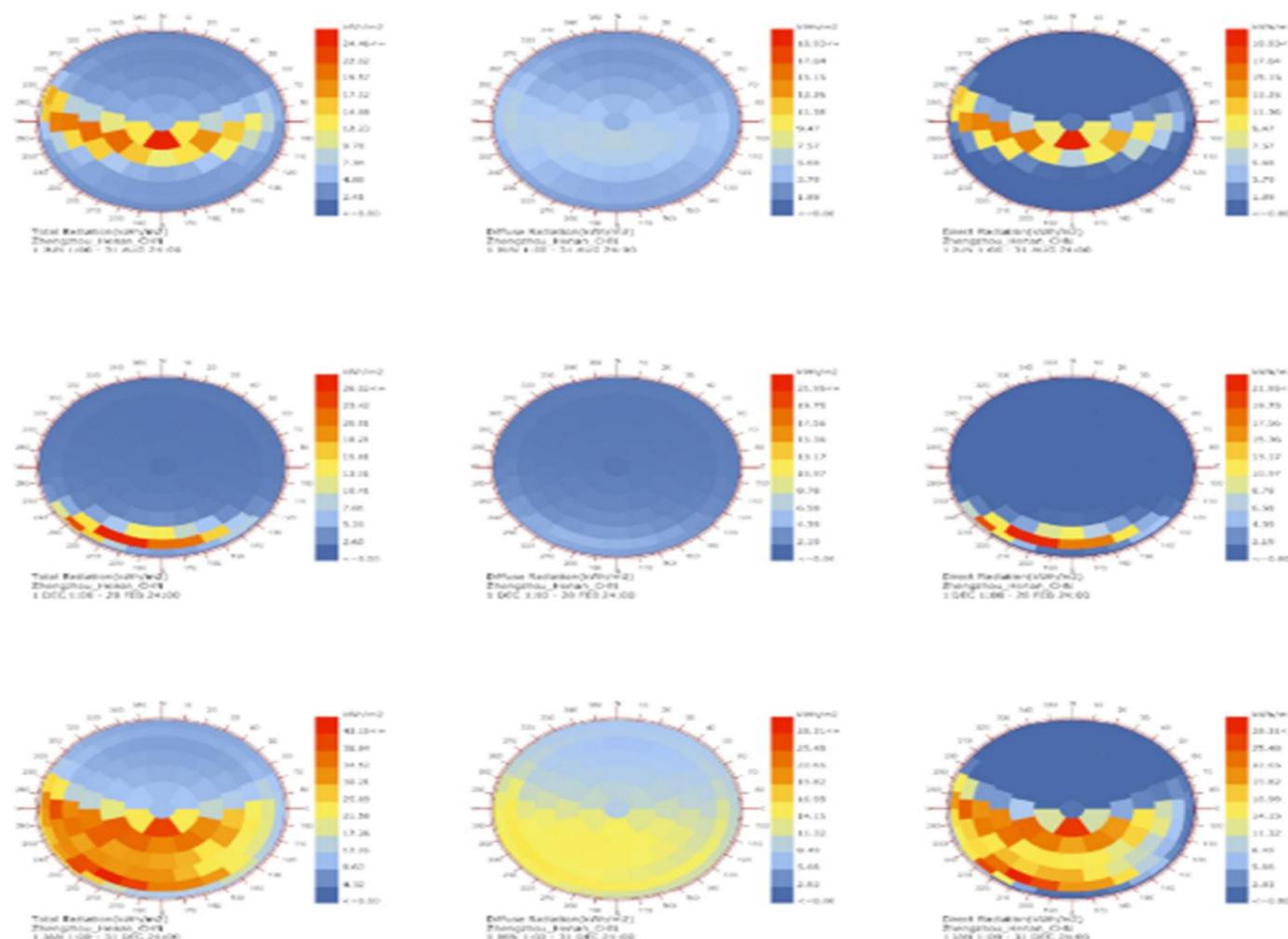
3.1 建筑体型和朝向

◆ 全年太阳辐射分析

郑州太阳辐射整体较为充沛，太阳辐射的月度变化较为规律，基本上随太阳高度角的增加而增加。在7月份雨季，随着云量增加，有一部分的太阳辐射会被反射或者散射，对日均太阳辐射产生一定的影响。

由于6、7、8、9月份温度较高，在建筑本体舒适性的设计上应阻隔太阳辐射。

11、12、1、2、3月份温度较低，且太阳辐射充沛的情况下，对建筑本体进行细部设计，充分利用太阳能。

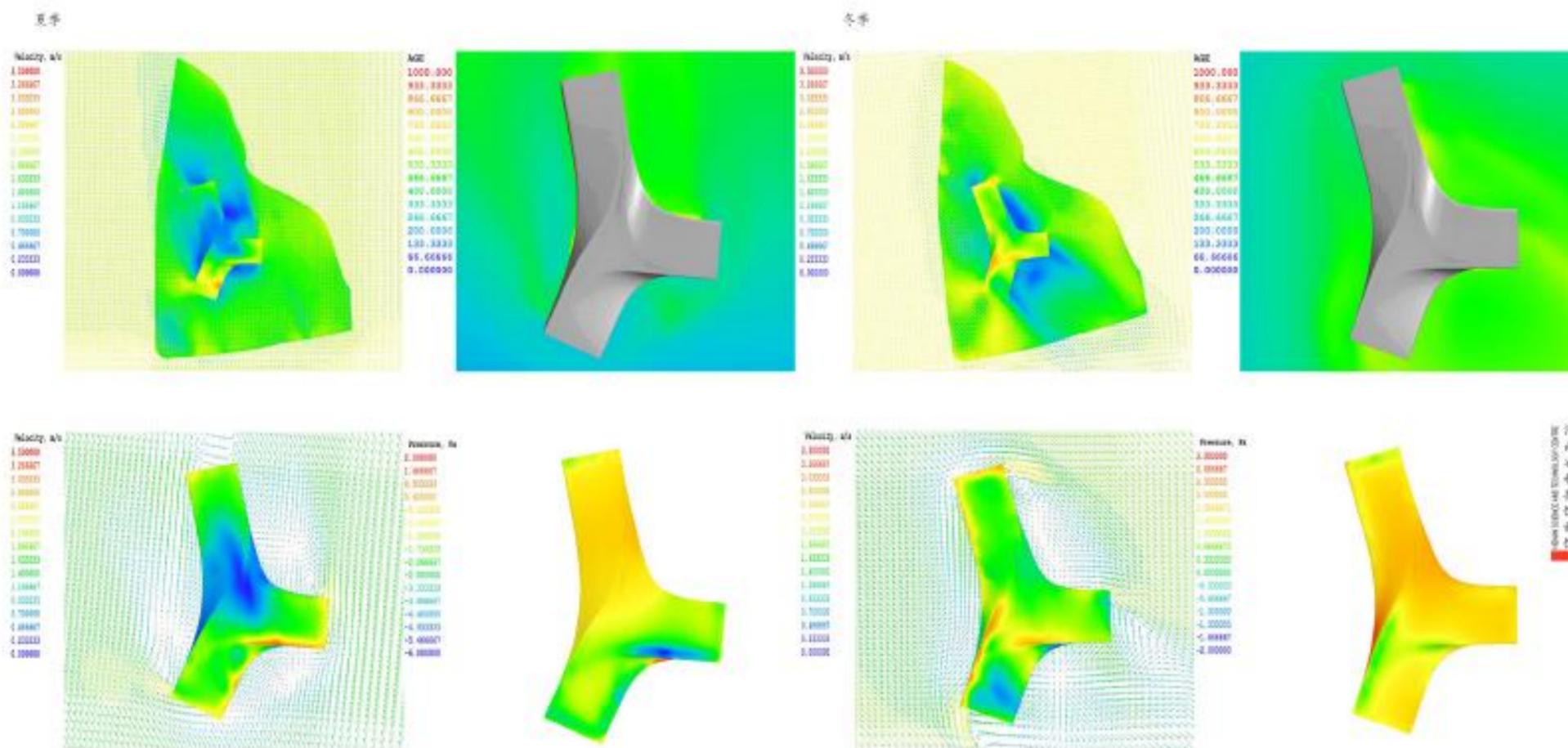


3.1 建筑体型和朝向

郑州夏季盛行东南风，为促进通风，建筑布局的设计在一定程度上贴合风道。经流体力学软件模拟，在主要人行区1.5m高度处，场地内风场流线顺畅，无气流死区，无明显的漩涡，风速保持在0.5-2.5m/s，基本符合人体舒适度要求。此外，地形对场地内建筑的自然通风有着较为明显的影响，在一定程度上降低了场地内的风速，但并没有形成明显的涡流或者阻碍。

冬季盛行西北风，在主要人行区1.5m高度处，场地内风场流线顺畅，无气流死区，无明显的漩涡，风速保持在0.8-2.6m/s，基本符合人体舒适度要求。相较于夏季而言，冬季风速略微偏大，故在风速较大区域种植植被，对来风进行一定阻挡。

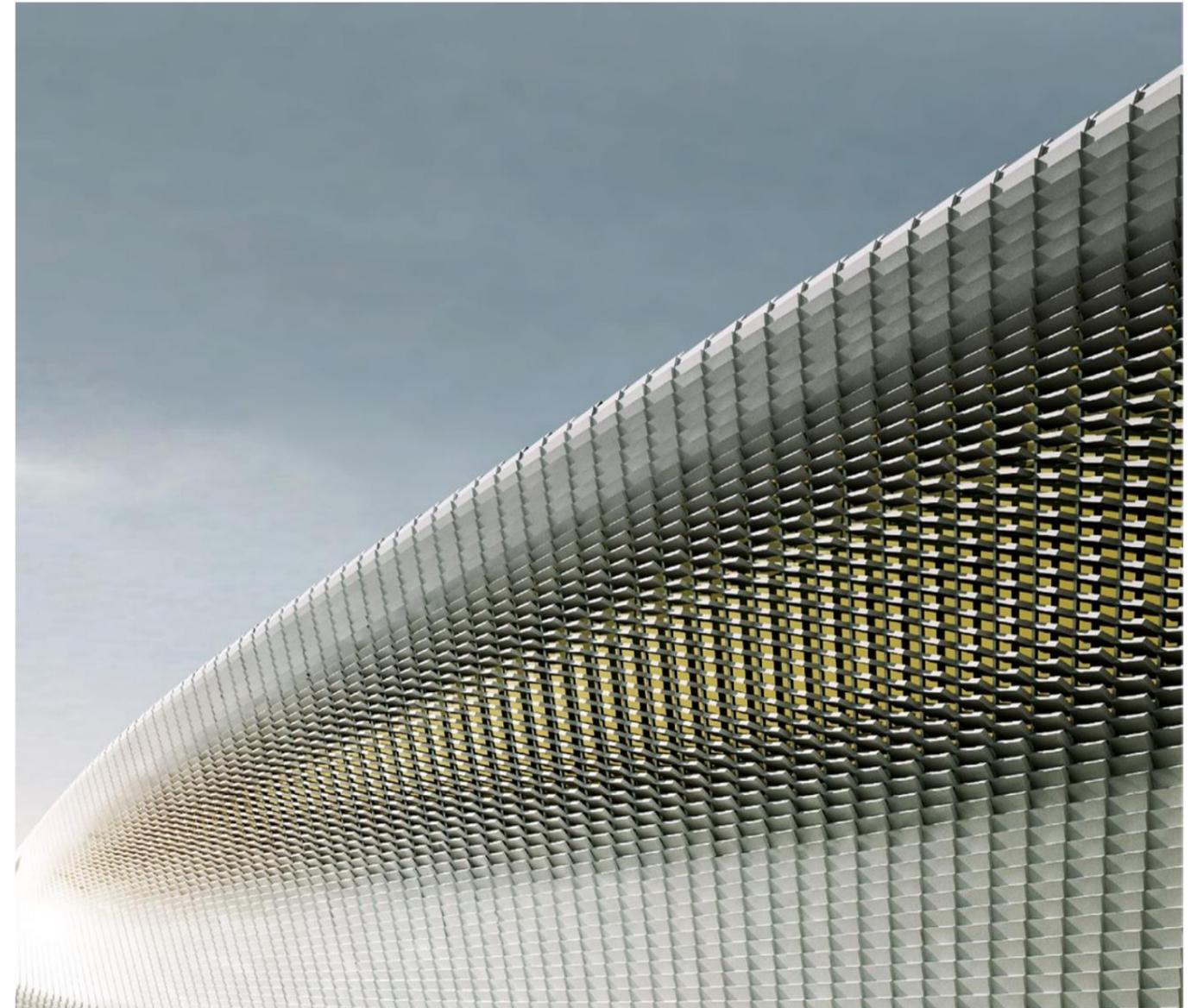
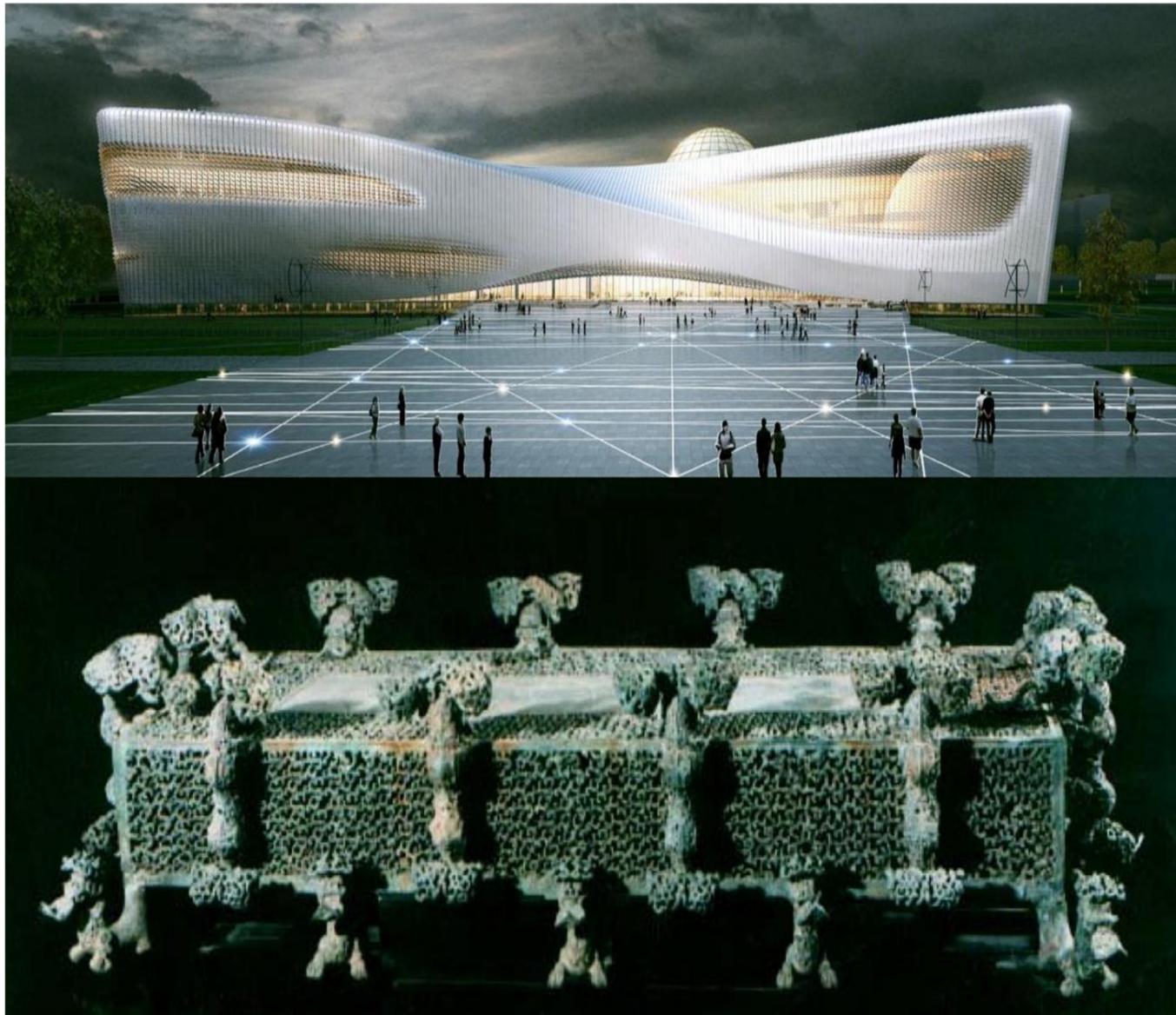
形态源于与场地风场的最大化契合，最小化能源使用，最舒适环境性能营造。



3.2 建筑外立面的遮阳

外立面采用阳极氧化铝板，纳米高科技防尘自洁涂层等应对北方多沙尘的气候。

建筑本身被当作一个“高科技展品”来塑造，具有艺术与技术完美融合的本体形态与丰富细节。一方面，建筑表皮源于中原灿烂铸造技术；另一方面，外表皮采用电动感应技术，根据不同光线调整开窗率以控制光线和通风。



3.3 高性能围护结构

(1) 屋面

普通屋面:采用155mm泡沫玻璃板,传热系数 $0.42 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

金属屋面:采用120mm岩棉,传热系数 $0.42 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

(2) 外墙

有背衬墙外墙:90mm 岩棉保温板+200mm 蒸压加气混凝土砌块(B07),平均传热系数 $0.47 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

无背衬墙外墙:120mm 岩棉保温板+饰面板,平均传热系数 $0.42 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

(3) 底面接触室外空气的架空或外挑楼板:楼板上选用100mm 岩棉+吊顶,传热系数 $0.48 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

(4) 地下车库与供暖房间之间的楼板:楼板上选用30mm 挤塑聚苯板(XPS),传热系数 $0.87 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

(5) 非供暖房间与供暖房间之间的隔墙:200mm 蒸压加气混凝土砌块(B07),传热系数 $1.01 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

(6) 外窗

a 本工程窗墙比:各朝向窗墙比不大于0.50。

b 选用隔热铝型材三玻双中空玻璃,整窗传热系数为 $1.90 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,太阳得热系数0.41,可见光透射比 ≥ 0.60 。

c 外窗的气密性6级,透光幕墙的气密性3级,外门的气密性4级。

(7) 透明外门的型材和玻璃选用与外窗相同

(8) 回填土地面:选用25mm 挤塑聚苯板(XPS),保温材料热阻 $0.69 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

(9) 供暖地下室与土壤接触的外墙:选用25mm 挤塑聚苯板(XPS),保温材料热阻 $0.69 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

(10) 热桥部位处理:采用外墙外保温,保温层贴至女儿墙顶。

- ◆ 4.1 室内环境调节系统
- ◆ 4.2 能源和设备系统
- ◆ 4.3 可再生能源（太阳能）
- ◆ 4.4 照明及家用电器系统
- ◆ 4.5 测量和控制系统

4.1 室内环境调节系统

◆ 空调通风系统:

- ① 气流组织设计（报告厅、球幕影院采用座椅送风上回风，巨幕影院侧送侧回，其余影院及展厅上送上回）；
- ② 考虑排风热回收（全热效率60%）；
- ③ 风机变频控制；
- ④ 新风比可调（最大新风比70~100%），过渡季节可实现最大新风量运行。

◆ 冷却塔免费供冷:

设置一台900 kW板式换热机组，在过渡季和冬季对内区办公、会议及后勤小空间存在供冷需求的区域，冷却塔可利用室外低温空气制备低温冷却水作为板换一次侧冷水供冷。

4.2 能源和设备系统-高效冷热源机组

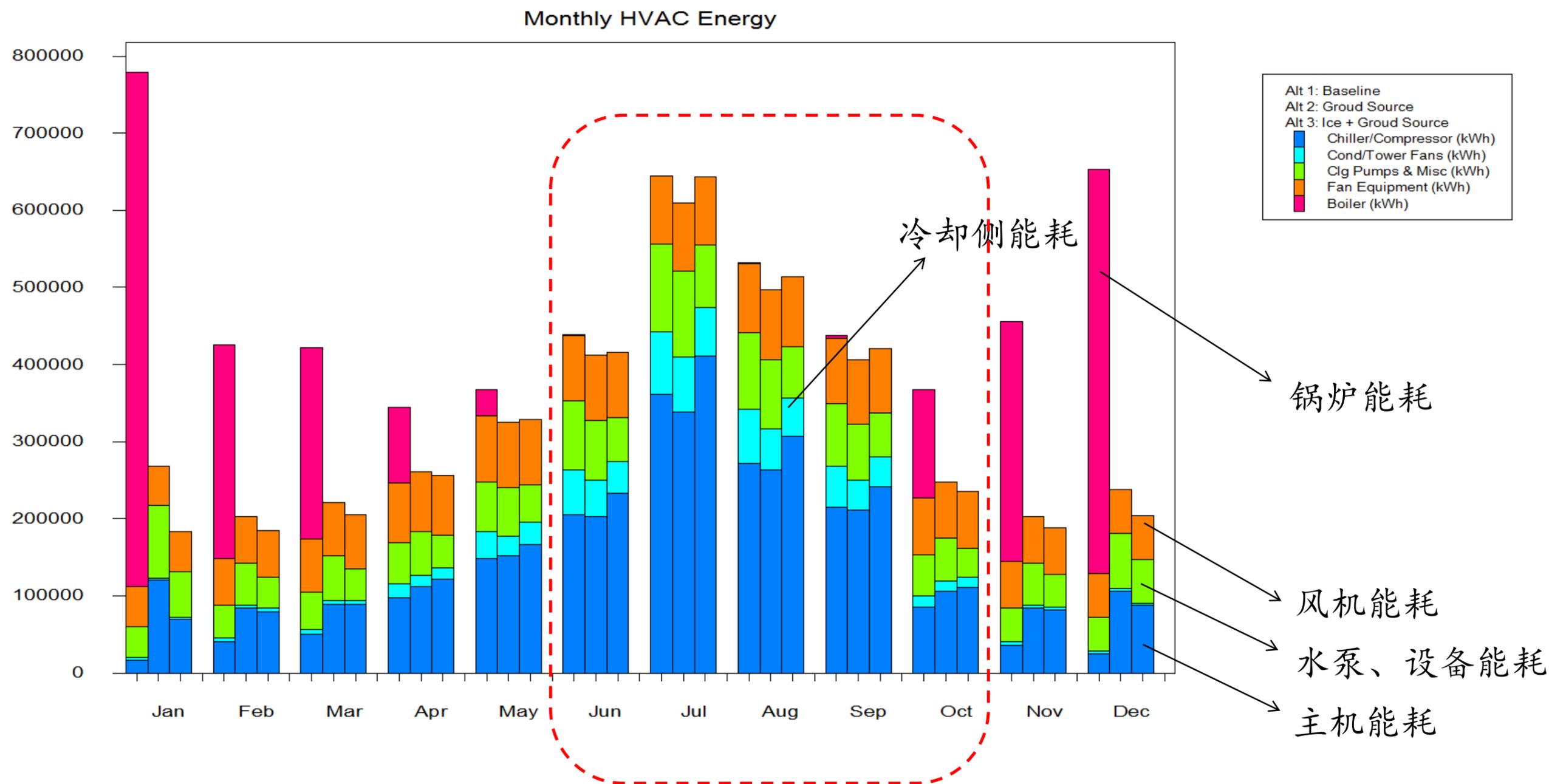
- ① 地源热泵机组采用热回收型，回收的冷凝热供生活热水预热；
- ② 冷热源机组能效COP高于国家现行标准6%；
- ③ 水泵考虑变频技术；
- ④ 冷热源机组采用R-134a环保冷媒；

表：冷热源方案比较

方案	冷源	热源
方案一（冷水机组+锅炉）	2×5 800 kW 离心式冷水机组； 3×2 009 kW 螺杆式冷水机组	3×2 100 kW 燃气真空锅炉
方案二（冷水机组+地源热泵+空气源热泵）	3×4 315 kW 离心式冷水机组； 2×2 009 kW 地源热泵螺杆机组 2×448 kW 空气源热泵螺杆机组	2×2 200 kW 地源热泵螺杆机组； 2×452 kW 空气源热泵螺杆机组
方案三（双工况冷水机组+离心式冷水机组+地源热泵+空气源热泵）	3×1 860 kW 双工况冷水机组； 1×4 219 kW 离心式冷水机组； 2×2 009 kW 地源热泵螺杆机组	2×2 200 kW 地源热泵螺杆机组； 2×452 kW 空气源热泵螺杆机组

为了更加合理地选取冷热源方案，对3种冷热源方案的能耗以及经济性进行深入分析。

三个方案的月度空调系统能耗对比



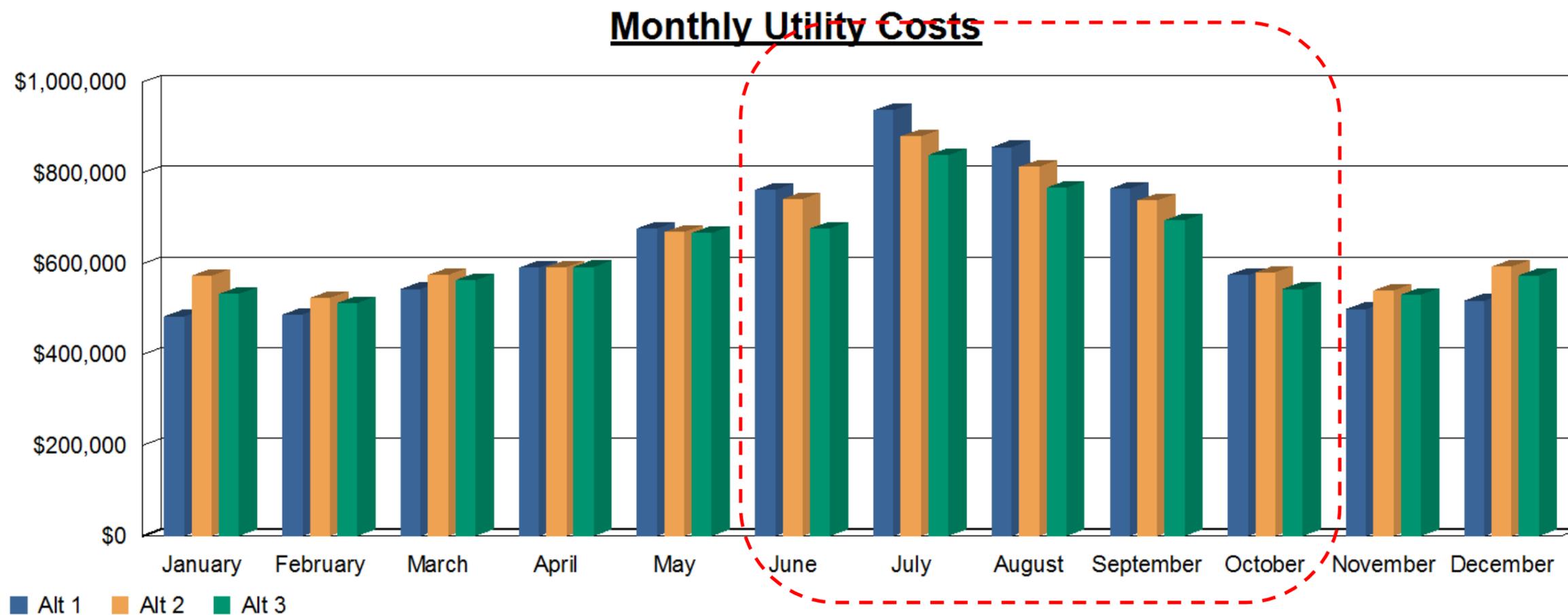
方案三能耗高于方案二，冰蓄冷不节能。

方案一采用燃气锅炉作为唯一热源，系统能耗高；

方案三采用冰蓄冷系统，由于主机耗电量较高，因此整体空调系统的能耗较方案二高；

3种冷热源系统方案中，方案一的能耗最高，方案三次之，方案二最少。

- 三个方案的月度经济性分析

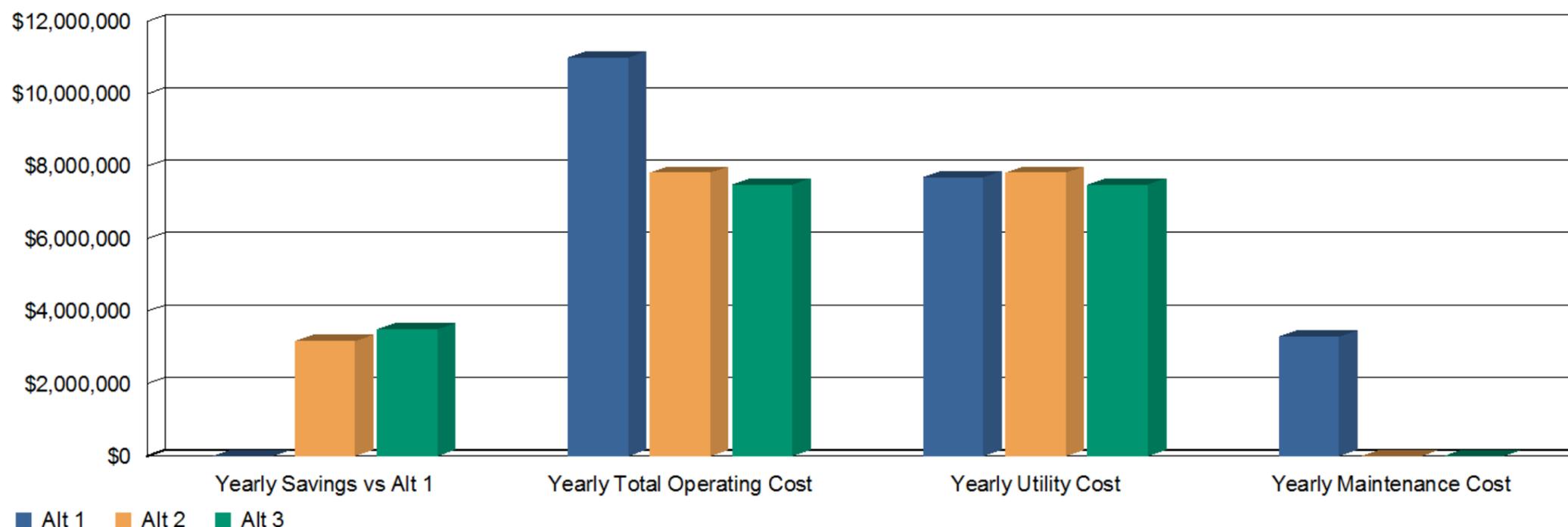


方案三运行费用低于方案二，冰蓄冷省钱。

从经济性角度分析，方案一的运行费用最高，方案二次之，方案三应用了冰蓄冷技术，可利用晚间低谷电价蓄冷，运行费用最少。

- 三个方案的年度运行费用对比

Annual Operating Costs



	相较于方案一节省的费用	年总运行费用			主机耗电量
	Yearly Savings vs Alt 1	Yearly Total Operating Cost (\$)	Yearly Utility Cost (\$)	Yearly Maintenance Cost (\$)	Plant kWh/ton-hr
Alt 1	0	11,001,360	7,701,359	3,300,000	0.915
Alt 2	3,175,776	7,825,583	7,825,583	0	0.812
Alt 3	3,501,918	7,499,440	7,499,440	0	0.963

方案三耗电量高于方案二，但更省钱。

郑州地区用电系统采用“分时计价”政策，但业主在施工图设计开始前告知设计方，当地分时电价的落地有很大困难，因此**最终选择方案二作为项目的冷热源。**

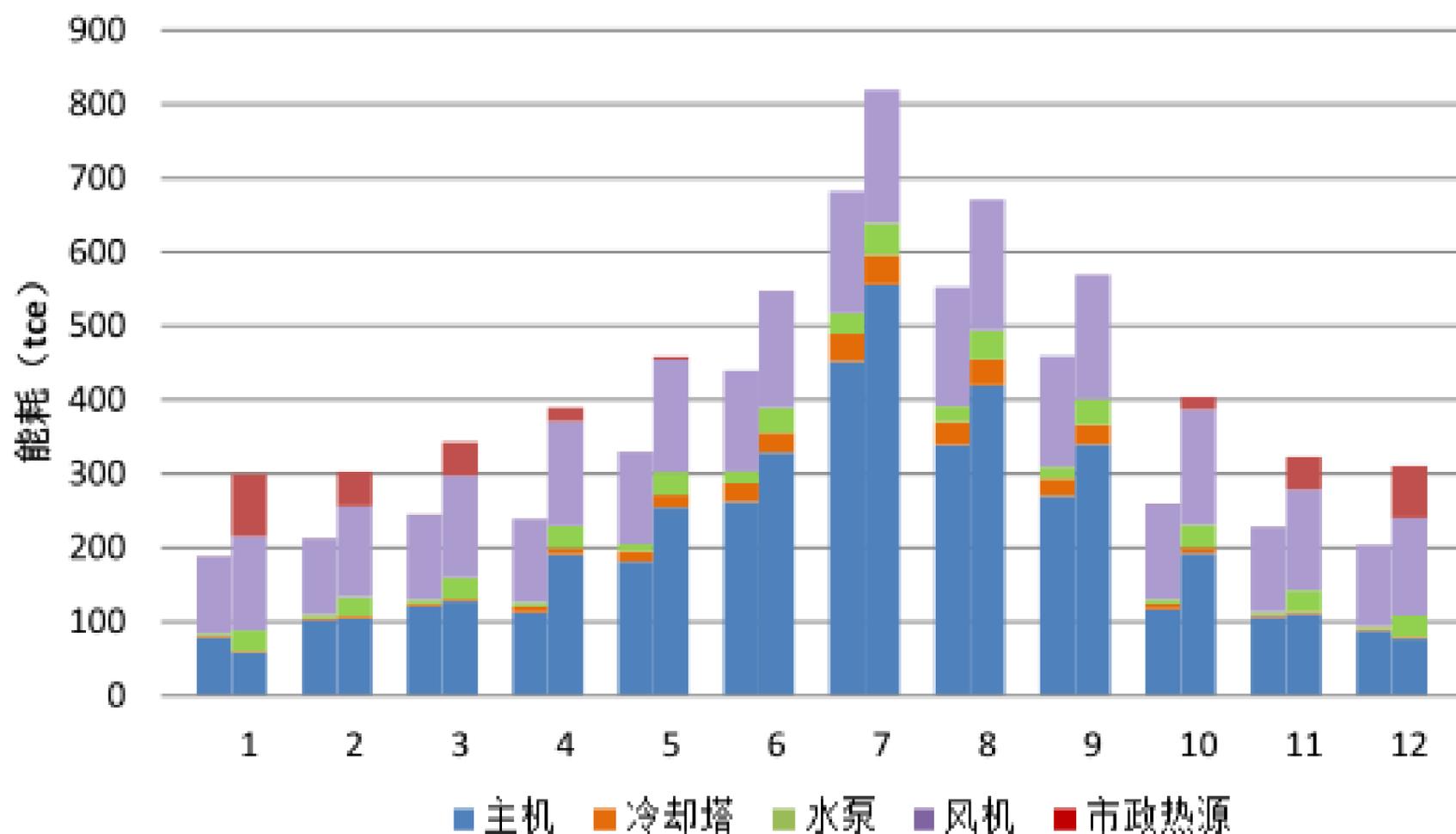
根据业主委托专业公司进行的**地理管热响应测试**，每延米钻孔冬季取热量为42.9 W/m，夏季散热量为59.6 W/m，考虑一定的安全裕量及成井率，在室外设置1000口100m深、双U地理管井，间距5m，地理侧制冷工况供/回水温度为30℃/25℃，制热工况供/回水温度为10℃/5℃。

表：冷热源方案比较

方案	冷源	热源
方案一（冷水机组+锅炉）	2×5 800 kW 离心式冷水机组； 3×2 009 kW 螺杆式冷水机组	3×2 100 kW 燃气真空锅炉
方案二（冷水机组+地源热泵+空气源热泵）	3×4 315 kW 离心式冷水机组； 2×2 009 kW 地源热泵螺杆机组 2×448 kW 空气源热泵螺杆机组	2×2 200 kW 地源热泵螺杆机组； 2×452 kW 空气源热泵螺杆机组
方案三（双工况冷水机组+离心式冷水机组+地源热泵+空气源热泵）	3×1 860 kW 双工况冷水机组； 1×4 219 kW 离心式冷水机组； 2×2 009 kW 地源热泵螺杆机组	2×2 200 kW 地源热泵螺杆机组； 2×452 kW 空气源热泵螺杆机组

表：空调冷热源能效设置

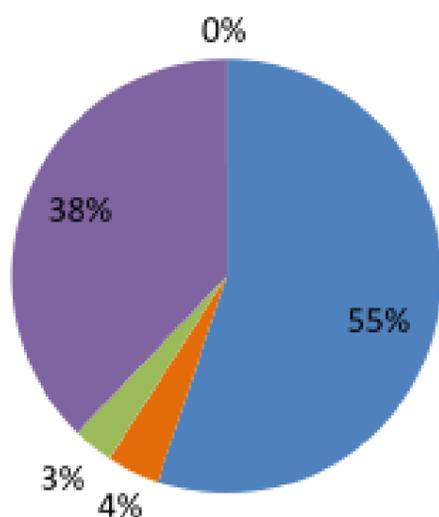
应用区域	设计建筑	参照建筑
独立运营影院	2台制冷量为 448 kW (制热量为 452 kW) 空气源热泵机组 (能效比制冷COP: 3.18, 制热COP: 3.0)	2台制冷量为 448 kW (制热量为 452 kW) 的空气源热泵机组 (能效比制冷COP: 3., 制热COP: 3.0)
	3台制冷量为 4 315 kW 的离心式冷水机组 (能效比 COP: 6.15)	3台制冷量为 4 315 kW 的离心式冷水机组 (能效比 COP: 5.80)
除独立影院以外部分	2台制冷量为 2 009 kW (制热量为 2 200 kW) 的定频螺杆式地源热泵机组 (能效比制冷COP: 5.83)	2台制冷量为 2 009 kW 的定频螺杆式水冷冷水机组 (能效比COP: 5.50)
	制热量 2200 kW 的定频螺杆式地源热泵机组 (能效比制热 COP: 4.80)	市政管网
网络机房等发热量大或有独立使用需求的房间	变冷媒流量多联空调系统 (制冷综合性能系数 IPLV (C) : 5.60~6.50)	变冷媒流量多联空调系统 (制冷综合性能系数 IPLV (C) : 3.75~3.90)



设计建筑与参照建筑月度能耗对比 (左:设计建筑;右:参照建筑, 参照建筑的设备能效均按国家节能规范要求)

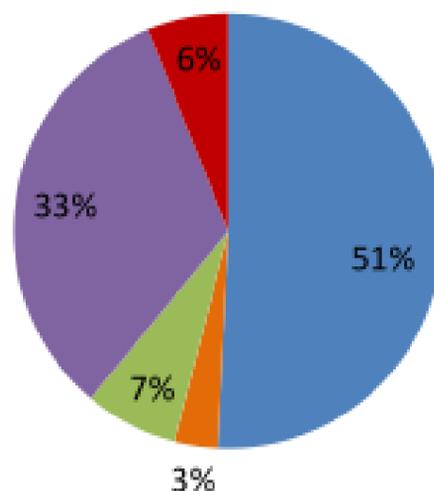
设计建筑

■ 主机 ■ 冷却塔 ■ 水泵 ■ 风机 ■ 市政热源



参照建筑

■ 主机 ■ 冷却塔 ■ 水泵 ■ 风机 ■ 市政热源



根据全年能耗占比图可知，设计建筑与参照建筑冷热源(主机、市政热源、冷却塔)能耗占比最高，分别占总能耗的59%和60%。其次为末端风系统，分别占总能耗的38%和33%。水泵能耗占比均最小，分别占总能耗的3%和7%。

表：空调系统能耗节能率

能耗种类	设计建筑		参照建筑		节能率 /%
	年能耗 (tce)	单位面积年能耗 (kgce/m ²)	年能耗 (tce)	单位面积年能耗 (kgce/m ²)	
冷热源	2 389.77	22.81	3 266.03	31.17	26.83
水泵	122.94	1.17	382.17	3.65	67.83
风机	1 524.84	14.55	1 787.58	17.06	14.70
合计	4 037.55	38.54	5 435.79	51.88	25.72

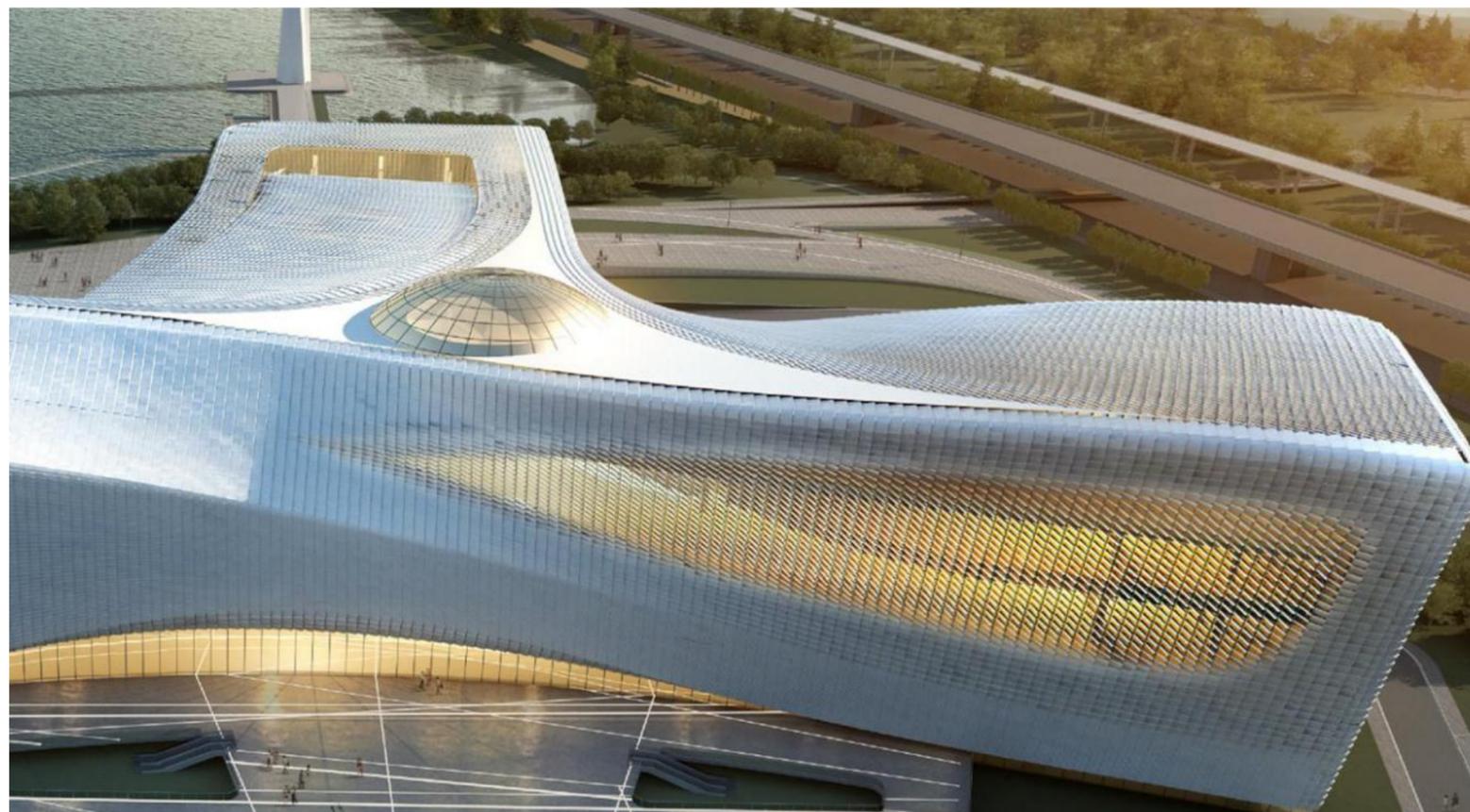
注:总建筑面积为104768.52m²。

设计建筑与参照建筑年度能耗对比显示，空调系统总节能率为**25.72%**。其中，空调冷热源系统能耗降低了26.83%，水泵能耗降低了67.83%，风机能耗降低了14.70%。

4.3 可再生能源

◆ 太阳能光伏发电系统

在科技馆屋顶北侧向阳面设置约**200 m²**的太阳能光伏发电板，太阳能发电容量约20 kW，其发电量用于顶层相应位置展厅的一般照明。太阳能发电不与市电并网，设置了防逆流装置，在展厅不用电时关闭太阳能光伏发电装置，以防止向电网倒送电。



◆ 光导光系统

设置了通风采光孔，提供地下空间通风采光、自然照明，使景观体验内外延伸。



4.4 照明系统

- 设置工作照明、展览照明、应急照明、景观及泛光照明等,一般环境采用**高效节能型灯具及光源**,有藏品的展览照明应采用波长和室温对藏品无损伤的光源。
- 照明控制,对于公共活动空间及大空间展厅采用**分布式智能照明控制系统**,对于设备机房等房间采用就地开关控制。
- 会议室采用高光效**LED格栅灯和LED筒灯**。
- 走廊、电梯前室、楼梯间、变电所、冷冻机房、空调机房采用**高光效LED灯具**。
- 地下车库照明采用**LED灯具**。
- 水泵房、厨房、卫生间等潮湿场所采用**防潮型灯具**。
- 设计中所选用**LED灯具、荧光灯、节能灯**均采用高品质、节能型、高显色灯管,并配以高功率因数的电子镇流器,要求功率因数大于0.9;金卤灯米用节能型电感镇流器、自带补偿电容,要求功率因数大于0.9。

4.5 测试及控制系统

为了提高设备的工作效率、节能和方便运行管理，采用楼宇设备自动控制系统（BAS）对空调和通风系统进行集中监控，通过**能量统计、台数控制、自动调节**等手段实现节能。

- **自控范围：**冷源（冷水机组）、热源（板换）、免费冷却水板换、空调机组（整体及末端变风量全空气）、新风机组、地下车库排风机、常规送排风机（如库房、设备用房、走道、卫生间用）、事故通风送排风机（如燃气厨房用）。
- **风机盘管采用三速开关手动控制，调节室温，并根据室温信号控制回水管上的电动二通阀的开关，调节系统流量；新风机组根据出风温度，调节机组回水管上的电动调节阀，以维持出风温度不变；空调机组根据送风温度，调节机组回水管上的电动调节阀，以维持室温不变；送风机根据回风温度变频，当室外空气焓值高于室内时，新风量根据室内CO₂浓度控制，但不得高于设计最小新风量，且不得低于设计最小新风量的50%；当室外空气焓值低于室内时，全空气系统最大可按70~100%新风比运行，排风量根据室内外空气压差进行调节。**
- **有空调需求的功能用房和空间设室温控制装置，可根据各自对室内温度的要求对室温进行独立调节。室温可控房间比例大于等于90%。**
- **变频多联机系统设备自带系统控制器，可就地或遥控。**
- **所有配套使用的系统运行需设置相应的联锁控制。**

- ◆ 5.1 复合通风 (NV+MV)
- ◆ 5.2 循环利用

5.1 复合通风 (NV+MV)

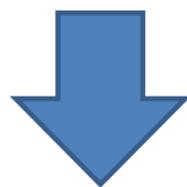
自然通风利用建筑物内外空气的密度差引起的热压或室外大气运动引起的风压来引进室外新鲜空气，达到通风换气的作用。它不消耗机械动力，同时，在适宜的条件下又能获得巨大的通风换气量，是一种经济的通风方式。

自然通风的优势

- 降低能耗
- 提高空间利用率
- 提高舒适度
- 经济且无设备噪音

自然通风的局限

- 依靠自然力
- 受室外空气品质制约



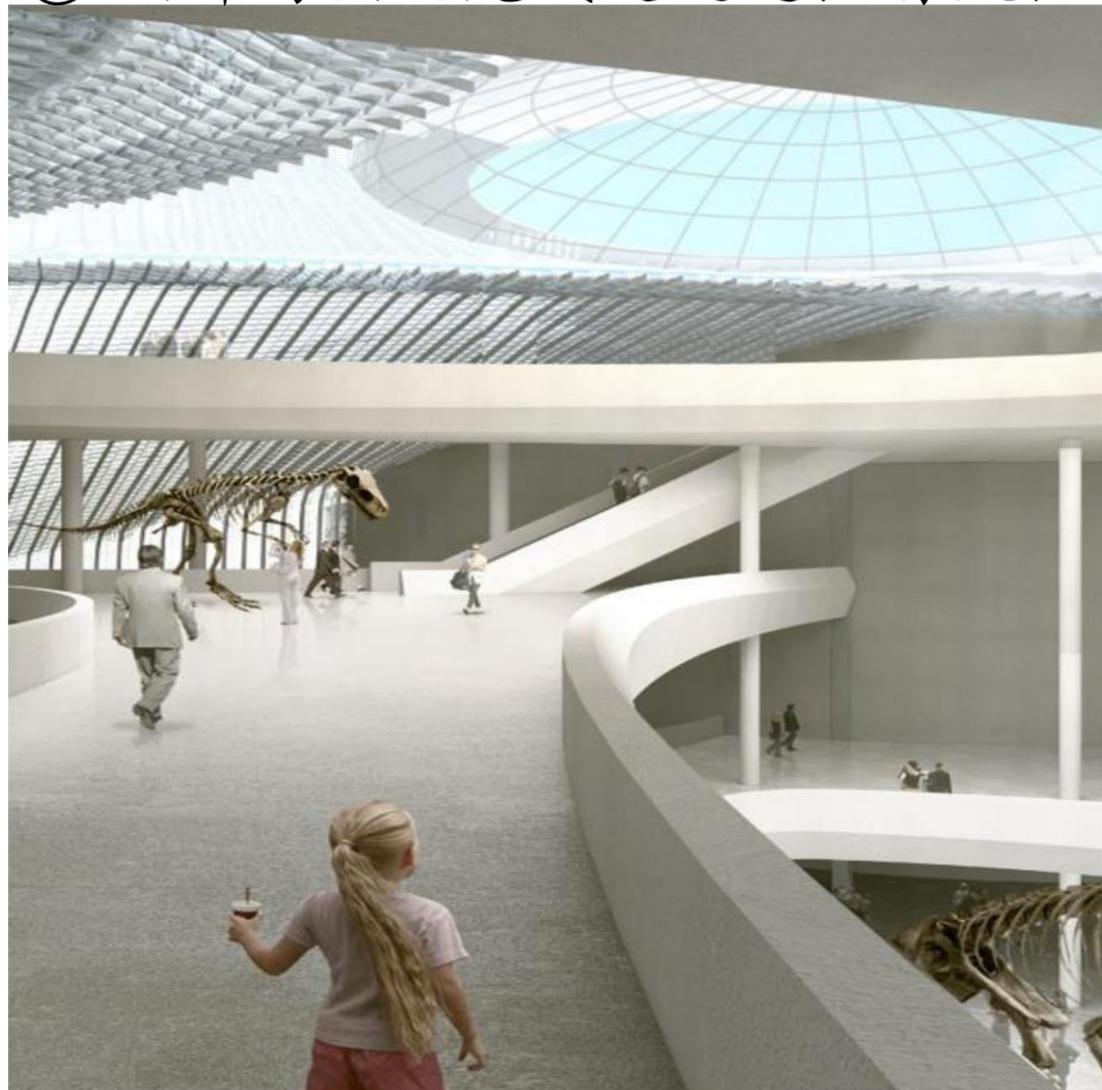
采用复合通风系统，即自然通风和机械通风在一年的不同季节或一天的不同气温下，在满足热舒适和室内空气质量的前提下交替或联合运行。

可增加自然通风系统的可靠运行，并提高机械通风的节能率。

5.1 复合通风 (NV+MV)

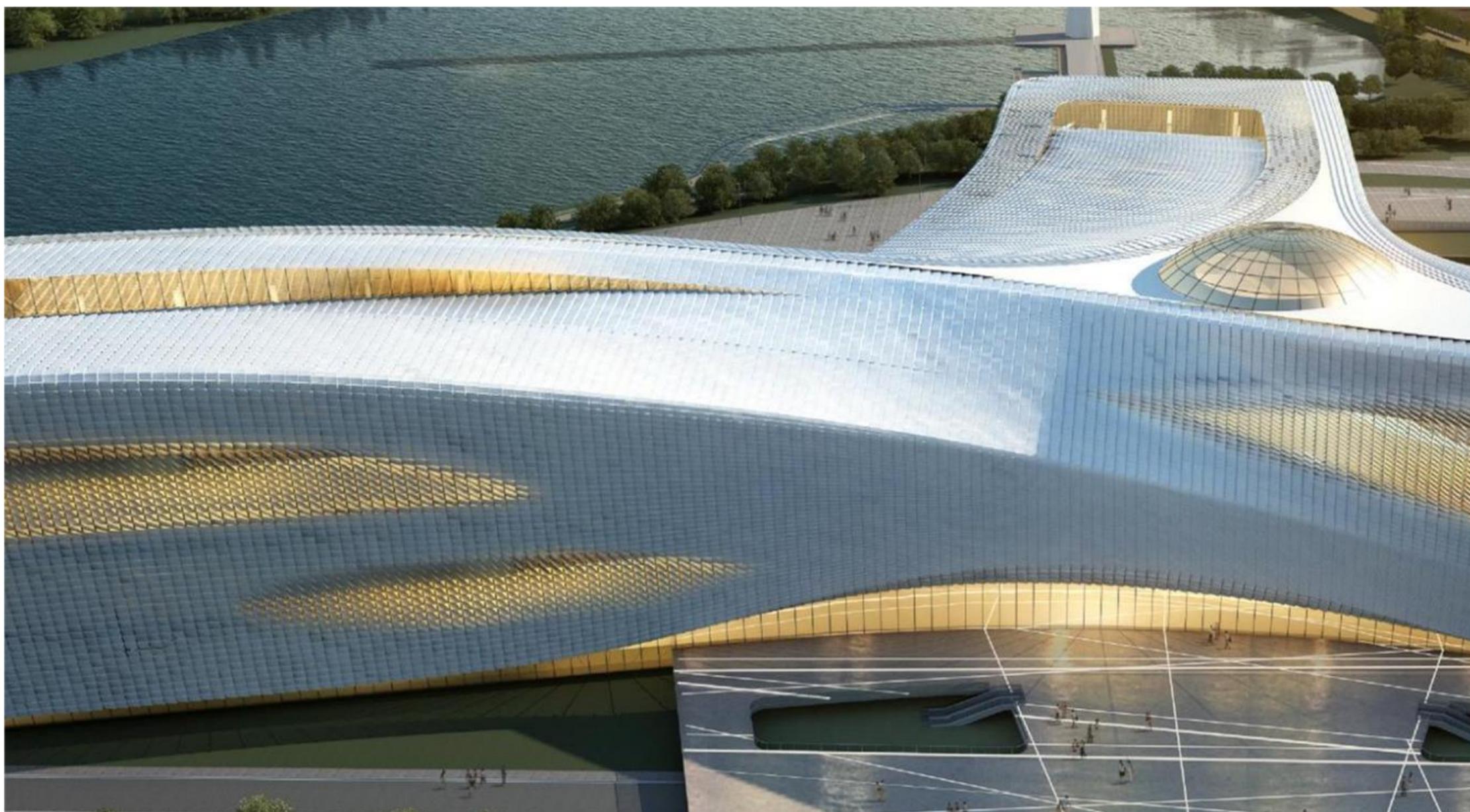
中庭是40米通高公共空间，作为售票、序展、科普、讲座、发布等复合功能大厅。
充分考虑能源高效运行：

- ① 采用全空气低速风管系统，空调系统采用分层送风，保证冷热量均匀分布，独立展厅的排风通过各自的空调箱热回收后排至屋顶，与中庭相通区域的排风经风平衡由中庭的电动天窗压出；
- ② 过渡季节或过渡气温时段屋顶电动天窗开启，利用烟囱效应自然通风；
- ③ 顶部与侧面光线通过遮阳有效控制。



5.2 循环利用

- ◆ 屋顶绿化系统，雨水收集系统；
- ◆ 虹吸排水系统，中水回用技术；
- ◆ 高渗水海绵场地。



谢谢!



同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司
TONGJI ARCHITECTURAL DESIGN (GROUP) CO.,LTD.