



CFD数值模拟、能源系统仿真助力 国家速滑馆精细化设计

中国建筑科学研究院有限公司

建科环能科技有限公司

2022年 8月

国家速滑馆，又称“冰丝带”，是2022年冬季奥运会北京赛区唯一的新建冰上竞赛场馆，奥运会期间承担大道速滑比赛和训练。冬奥会后将成为举办滑冰、冰球和冰壶等国际赛事及大众进行冰上活动的多功能场馆。





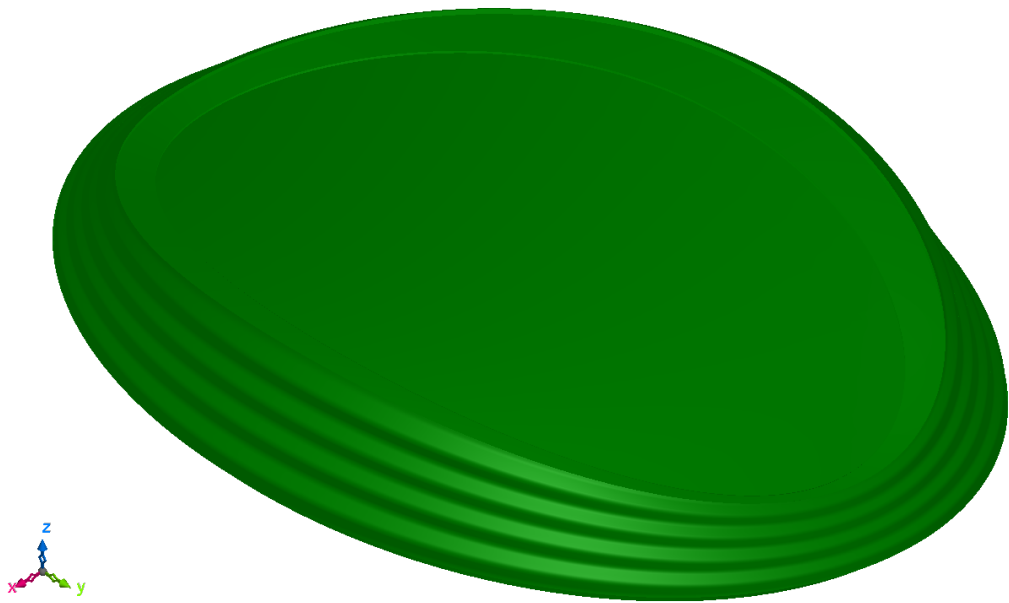
国家速滑馆，建筑面积约9.7万 m^2 ，地下2层，地上三层，建筑高度33.8m，可容纳观众1.2万人。

国家速滑馆设有一个大型冰场，分为4块，包括一个400m比赛大道速滑道，宽度5m+4m+5m；一个4m宽的练习大道速滑道；两个61m*30m的短道速滑冰场。冰面面积最大可达到1.2万 m^2 （全冰面工况），为国内目前最大的速滑比赛场馆。

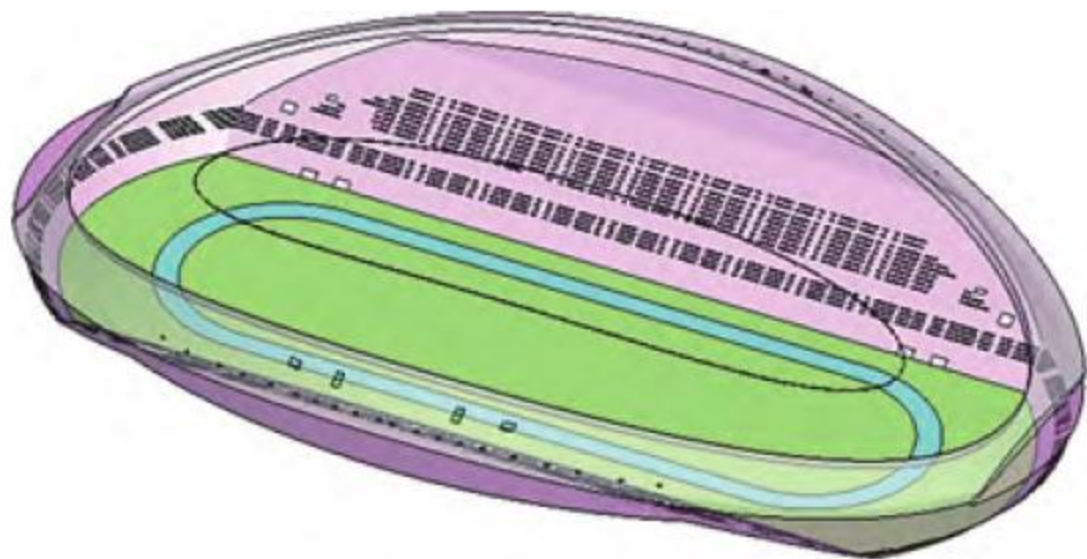


国家速滑馆建筑体量大，构造复杂，并含有一个大型冰面，馆内环境比较复杂。采用计算流体力学手段（CFD），对场馆末端空调系统方案进行模拟计算，分析观众席送风、场馆顶送风、冰面辐射对流、人员散热等共同作用下，场馆内流场、温度场分布情况，量化分析比赛区域、观众区域环境质量，为末端设计提供优化建议等。

CRADLE



国家速滑馆三维数值模型



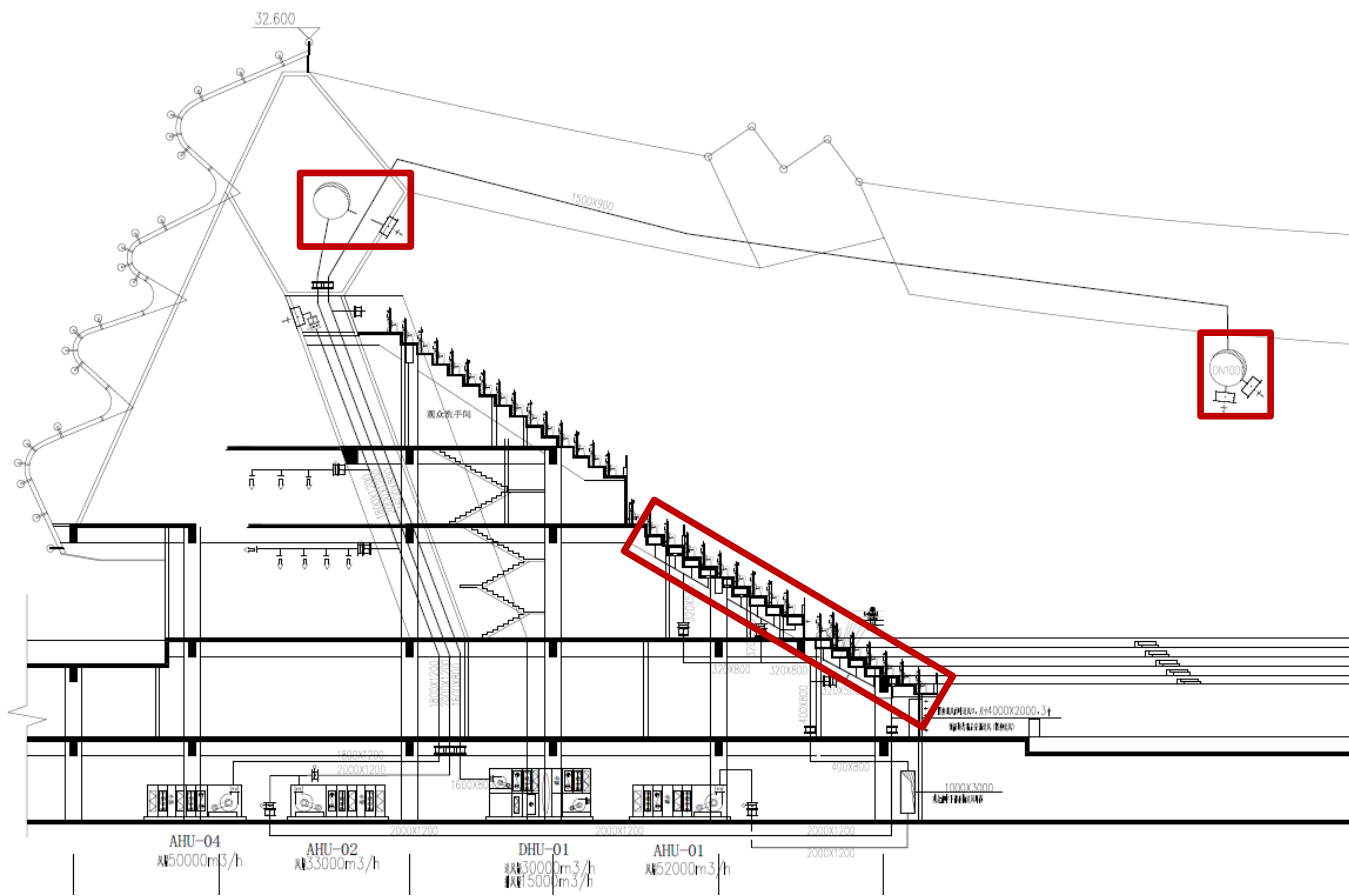
国家速滑馆三维数值模型



国家速滑馆空调系统方案设计为**正压送风**，室内维持**正压**。场馆内送风主要设计为三种：

- 场馆顶部除湿送风；
- 上部临时座椅观众席的侧送风，用于顶层观众制冷供暖；
- 中下部观众席的座椅送风。

送风口位置剖面如图所示。



末端风口布置及送风参数：

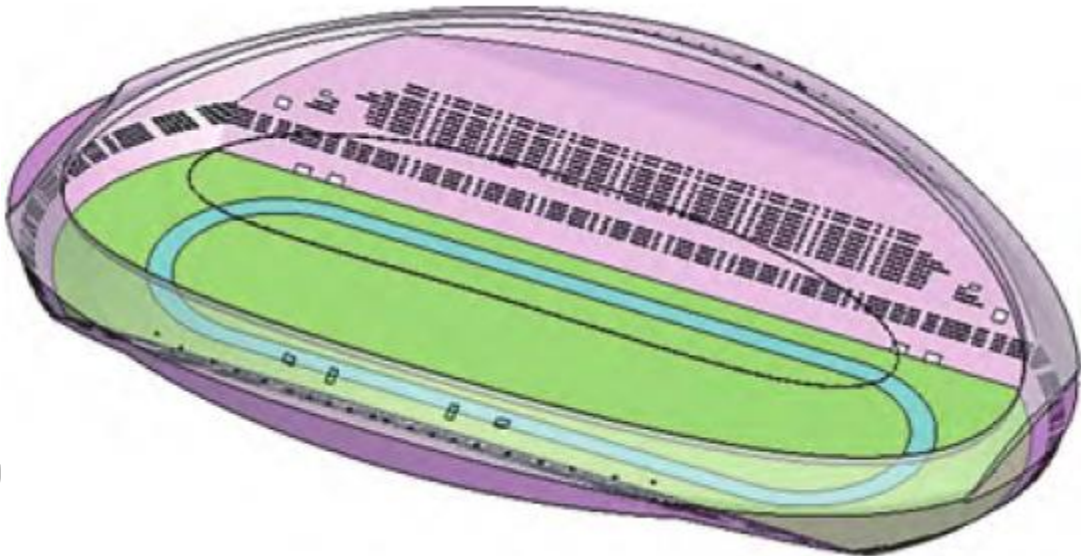
国家速滑馆场馆空调供暖送风

送风	风口类型	尺寸 mm	单个喷口风量 m³/h	喷口总数	送风温度 °C		送风湿度(g/kg)	
					冬季	夏季	冬季	夏季
场馆顶送风	球形喷口	315	1160	88	31	17	2.1	2.65
临时座椅送风	方形可调喷口	900*250	3300	40	19	16	2	10.4
观众座椅送风	台阶式旋流风口	130	50	8160	18	21	2	12.6

备注：冬季赛时工况，观众总人数约1.2万人，临时座椅0.4万，永久座椅0.8万。

表 运动员、观众散热量、散湿量计算条件

	运动强度	冬季室内温度 (°C)	显热 (W/人)	潜热 (W/人)	散湿量 (g/h人)
观众	静坐	20	84	25	38
运动员	重度劳动	20	168	239	356



场馆内细颗粒物主要考虑室内污染源（人员）影响，系统为正压送风，暂不考虑室外污染源。相关文献著作等对于人员在不同状态下产生的颗粒物数量、计数浓度和计重浓度的进行了系统的分析。

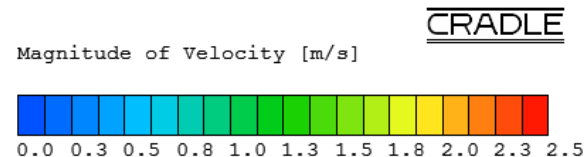
动 作	粒/(min.人)(≥0.5μm)	
	普通工作服	
立着	3.39X10 ⁵	
坐下	3.02X10 ⁵	
手腕上下移动	2.98X10 ⁶	
上体前屈	2.24X10 ⁶	
腕自由运动	2.24X10 ⁶	
头部上下左右运动	6.31X10 ⁵	
上体扭动	8.50X10 ⁵	
屈身	3.12X10 ⁶	
脚动	2.80X10 ⁶	
步行	2.92X10 ⁶	

名称	边界条件类型	细颗粒物（PM2.5）浓度（μg/m ³ ）
场馆顶送风	Fixed flow rate	15
临时座椅送风	Fixed flow rate	25
观众座椅送风	Fixed flow rate	25
出风	Natural Flow	--
冰面	Fixed temperature（-7℃）	--

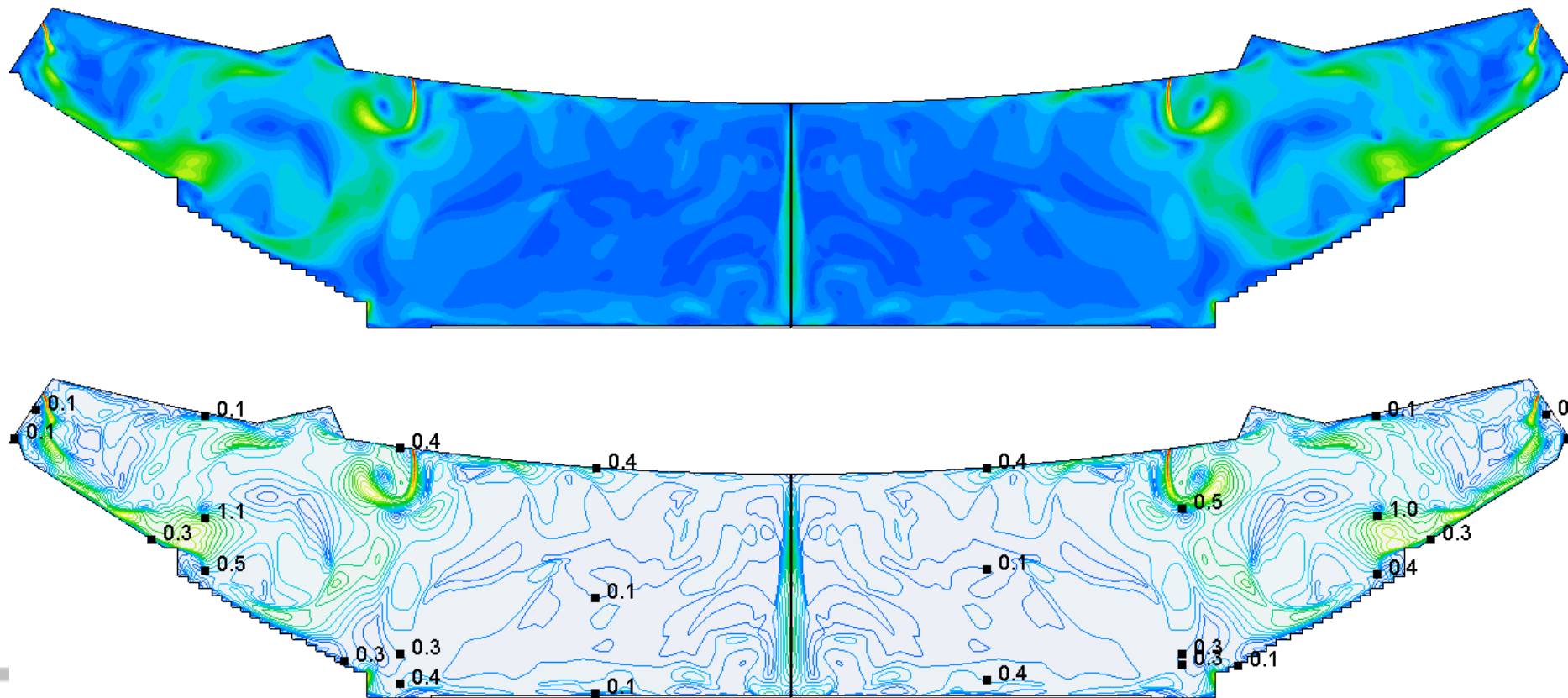


建立国家速滑馆**CFD计算模型**，对数值模型进行边界条件设置、网格离散划分，进而对场馆内环境进行模拟计算，结果如下。

File : afow_600.fld

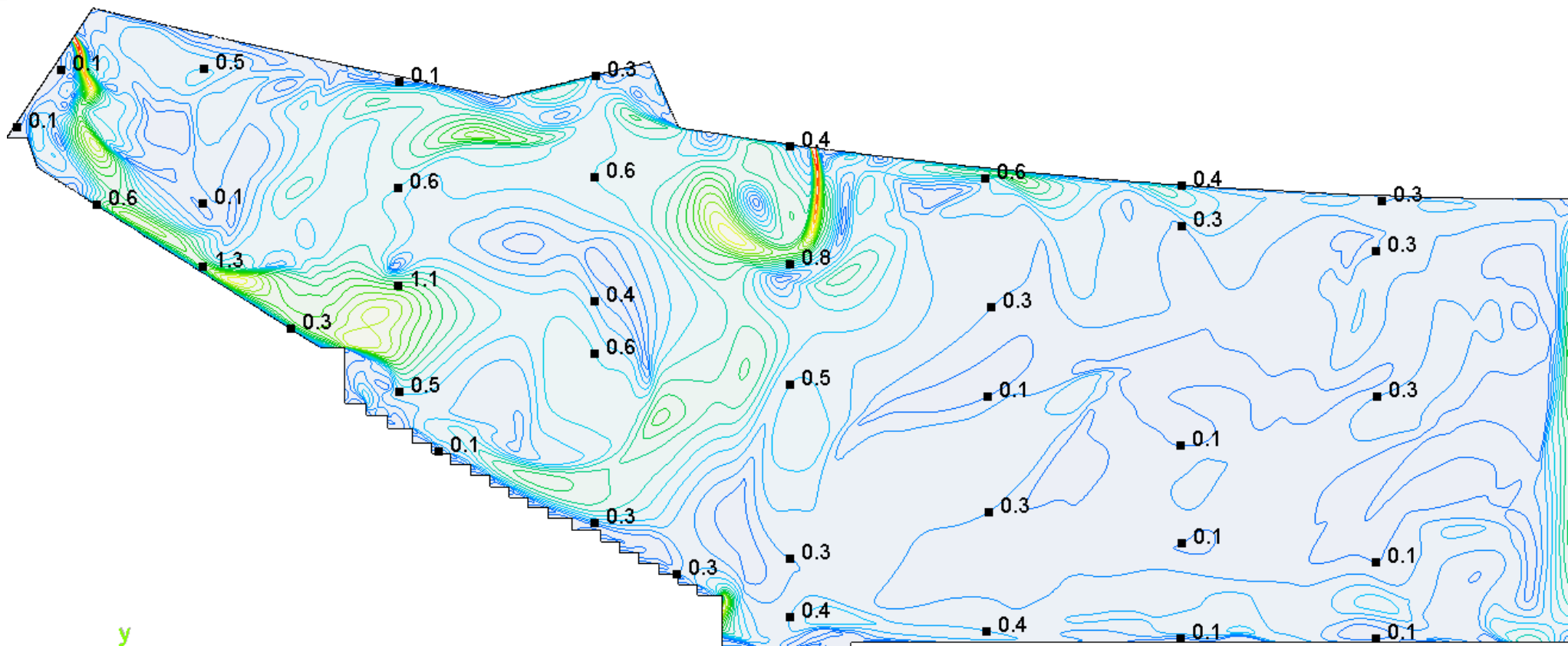


横截面处**速度场**
分布云图





横截面处速度场
分布云图
局部放大图

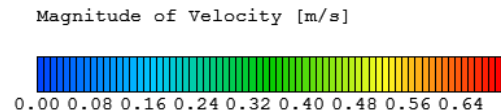
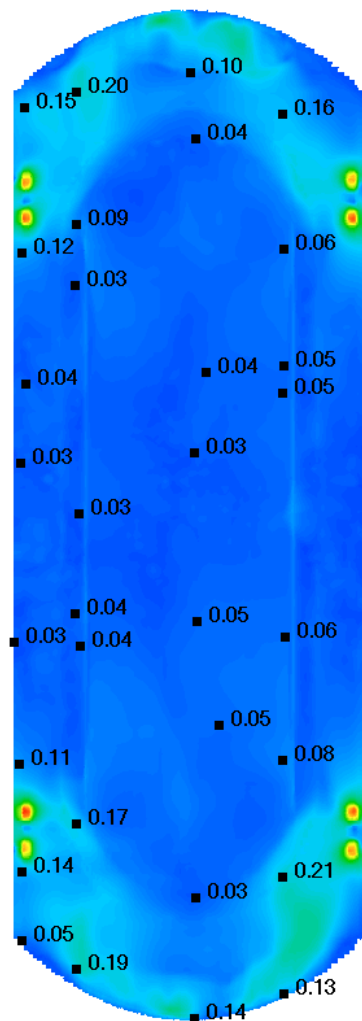
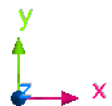


由图可知：

- 1) 临时观众席的空调送风逐步流入观众活动区域，能有效改善观众席的舒适性。
- 2) 永久观众席采用座椅送风，空调送风直接进入人员活动区，送风能有效改善人员活动区的空气品质，提高舒适性。
- 3) 场馆内空调送风，最终通过设置在两端的观众席空调回风口流出场馆。由图可知，空气逐步向回风口汇聚，越靠近回风口，流速越高。

File : 20200102_104.fld

运动员活动区 速度场分布云图 (距离冰面1.5m 高度处)



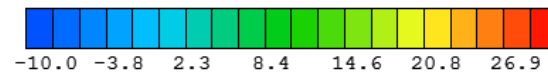
由图可知，当前计算条件下：

- 运动员环形赛道区的风速大部分维持在0.1m/s以内，平均风速约为0.15m/s，满足奥运会期间风速低于0.2m/s的要求。

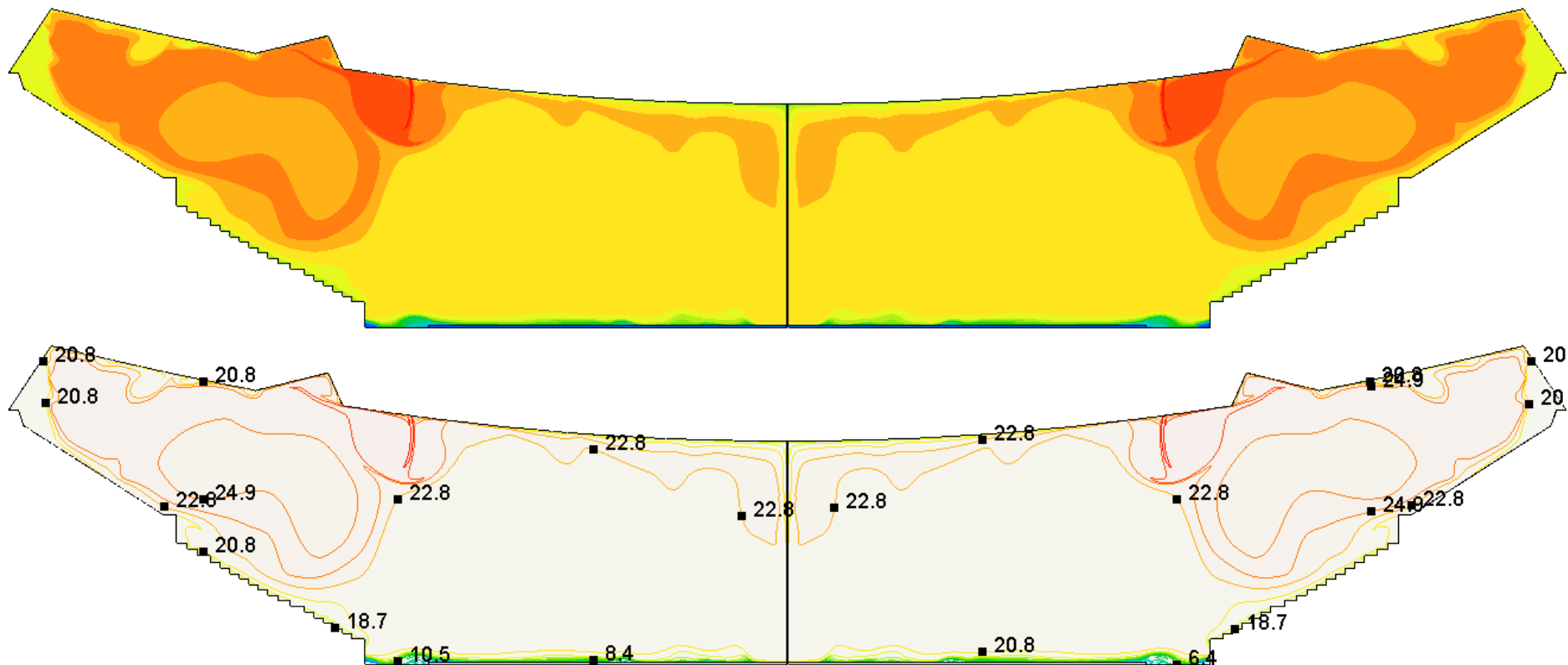
CRADLE

File : afow_600.fld

Temperature [C]



横截面处温度场分布云图

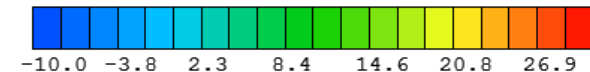




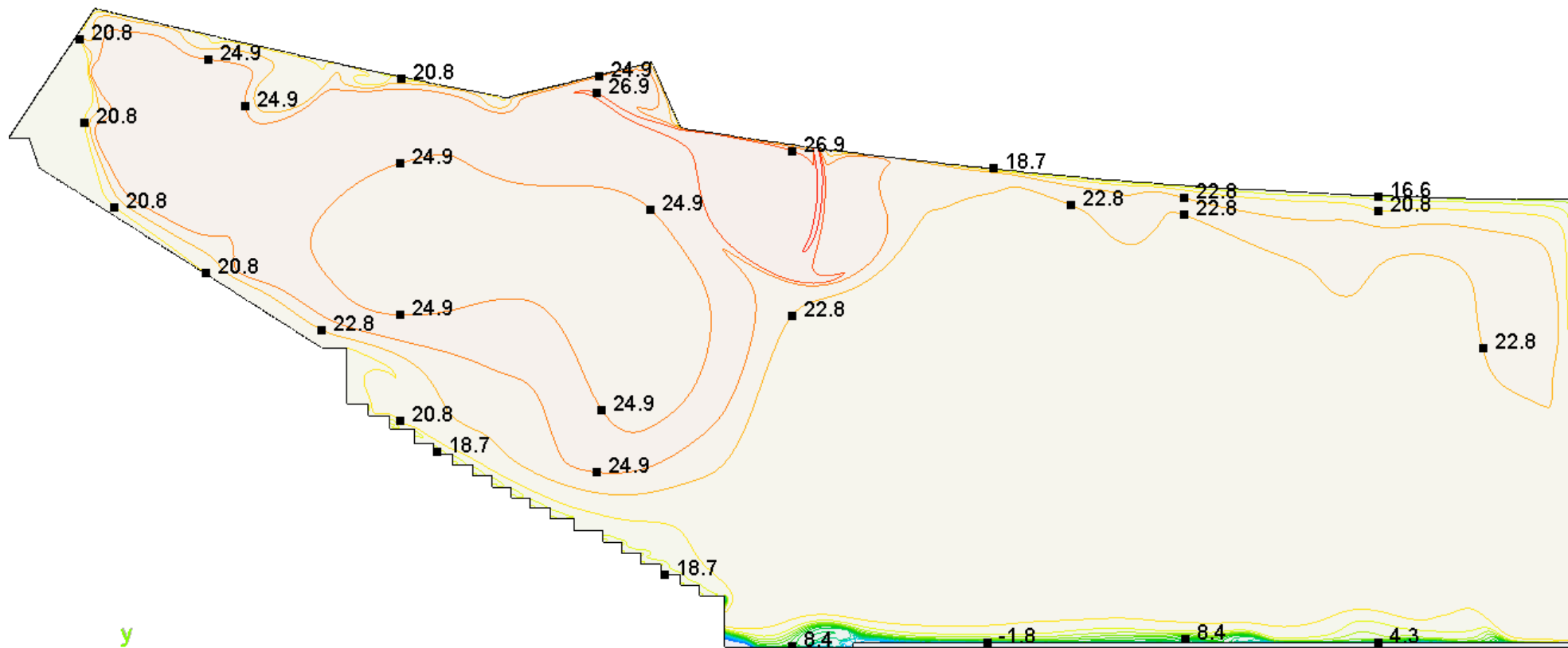
CRADLE

File : afow_600.fld

Temperature [C]



横截面处速度场
分布云图
局部放大图

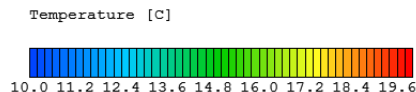
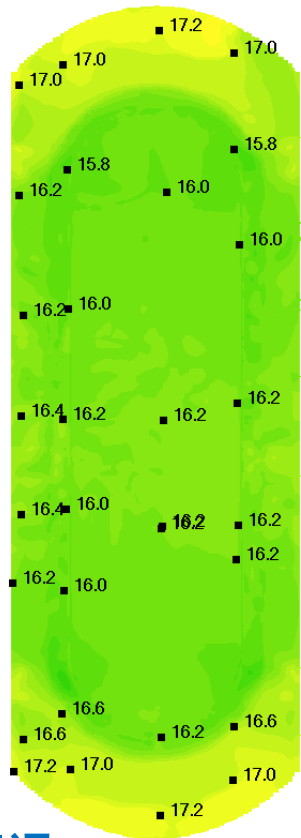


由图可知：

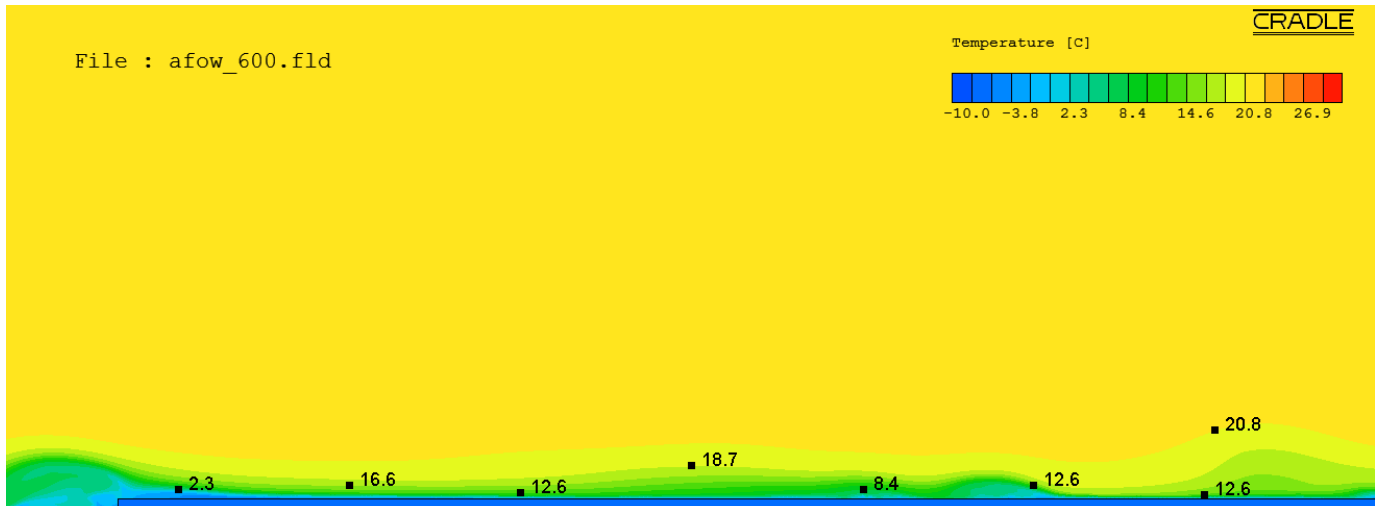
- 1) 临时观众席的侧送风、永久观众席的座椅送风均能有效提高观众席的舒适性。
- 2) 根据模拟结果可知，观众区域温度基本维持在 18°C 以上，局部高温区可达到 21°C 左右，舒适性较好。

File : 20200102_104.fld

运动员活动区 温度场分布云 图（距离冰面 1.5m高度处）



File : afow_600.fld



冰面附近温度场分布云图（剖面图）

可知，冬季赛时工况，

- 场馆温度沿高度方向呈现明显的温度分层情况。
- 由于冰面为恒定低温区（-7℃），冰面附件温度较低，沿高度方向，温度快速升高。
- 运动员环形赛道区温度整体维持在16℃以上，满足奥运会期间温度高于16℃的要求。



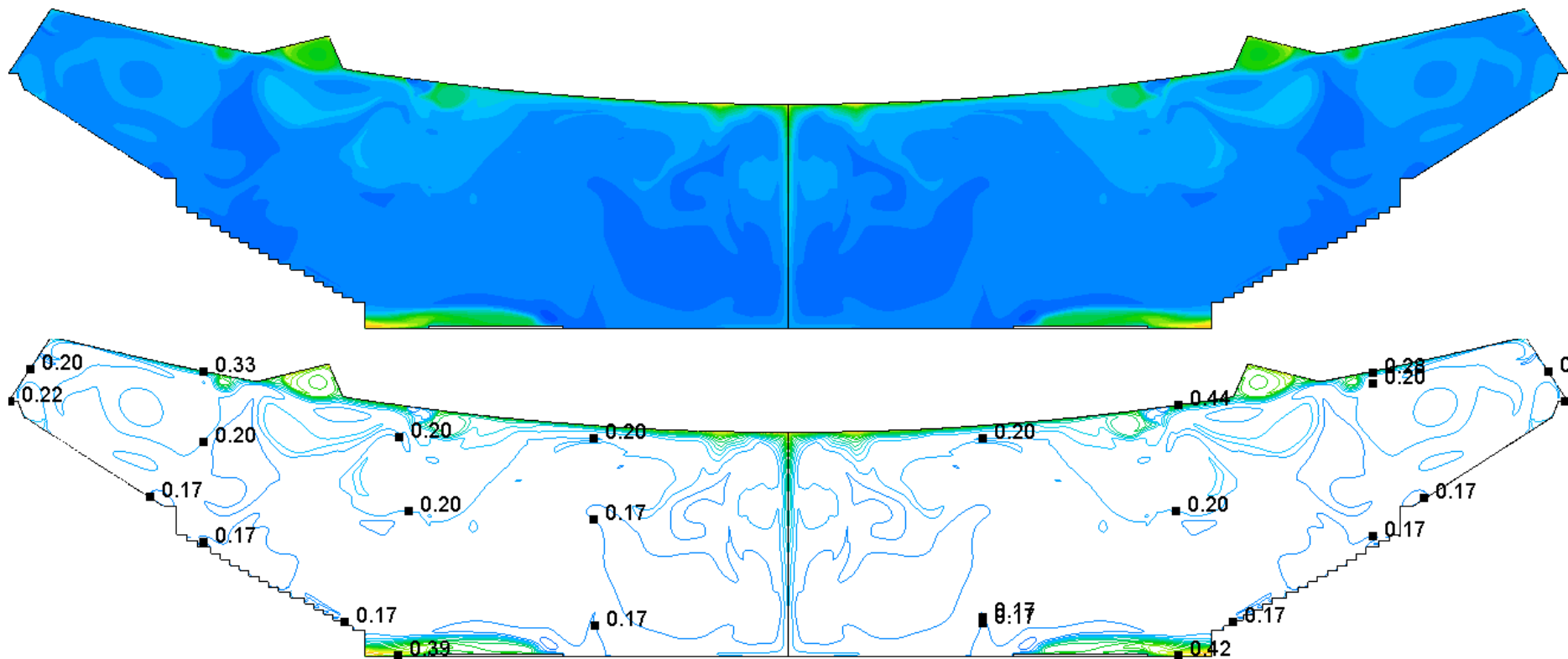
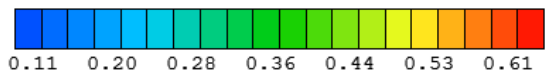
横截面处

相对湿度分布图

File : hw9_400.fld

Relative humidity

CRADLE



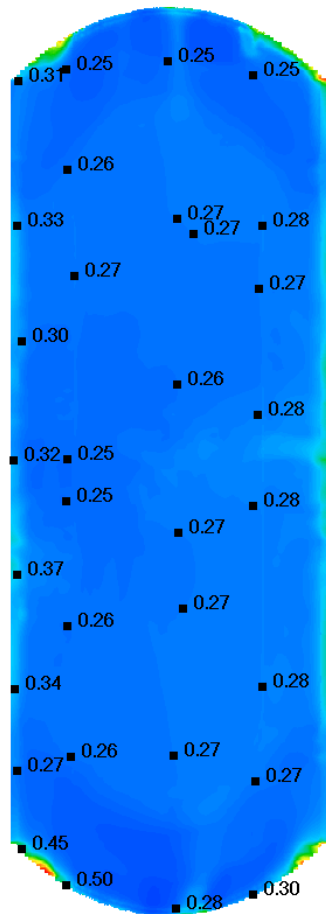
由图可知，冬季赛时工况，

- 场馆内相对湿度主要维持在20%左右；
- 观众区相对湿度基本在20%左右。

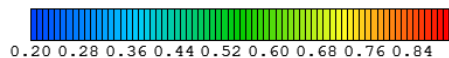


File : 20200102_104.fld

运动员活动区 相对湿度分布图 (距离冰面1.5m处)



Relative humidity



由图可知，冬季赛时工况，

- 由于冰面附近温度较低，相对湿度整体较高。
- 运动员环形赛道区相对湿度基本维持在30%以内。

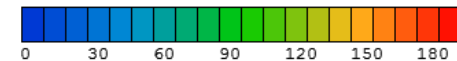


* OpenGL DisplayList MODE *

File : PM11152pm3_8207.fld
Cycle: 8207

CRADLE

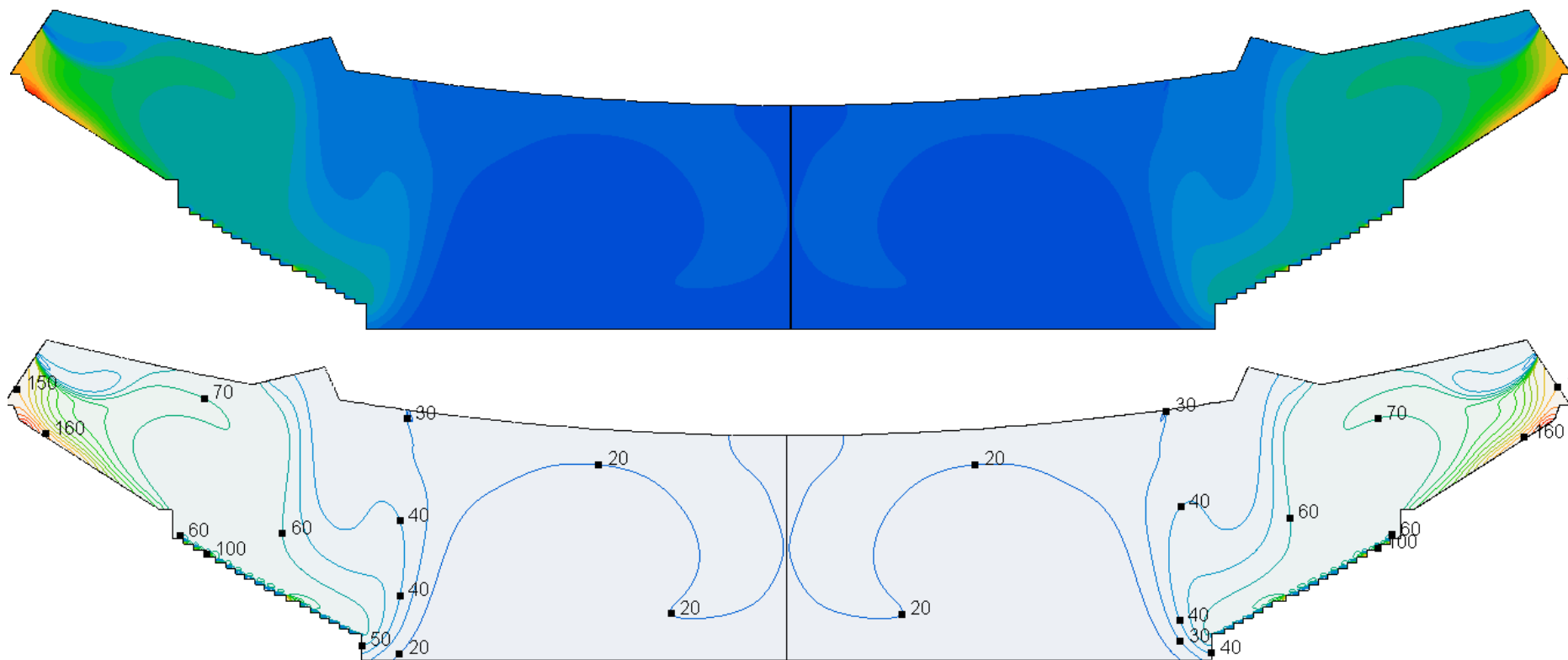
PM [CN01]



横截面处

细颗粒物 (PM2.5)

浓度分布云图



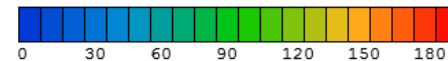


* OpenGL DisplayList MODE *

File : PM11152pm3_8207.fld
Cycle: 8207

PM [CN01]

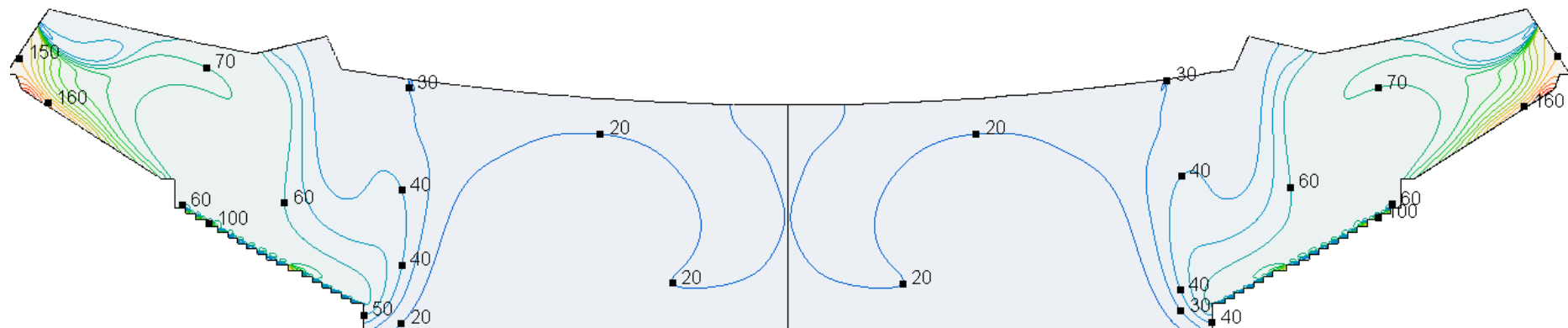
CRADLE



横截面处

细颗粒物 (PM_{2.5})

浓度分布云图



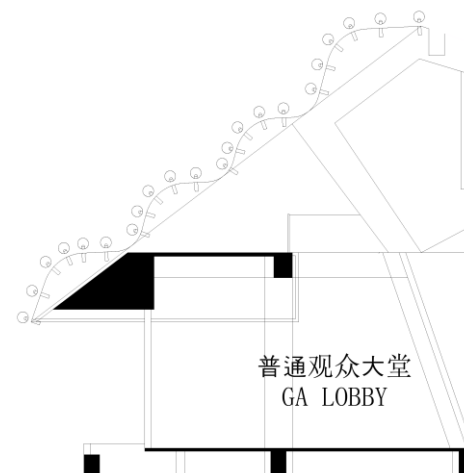
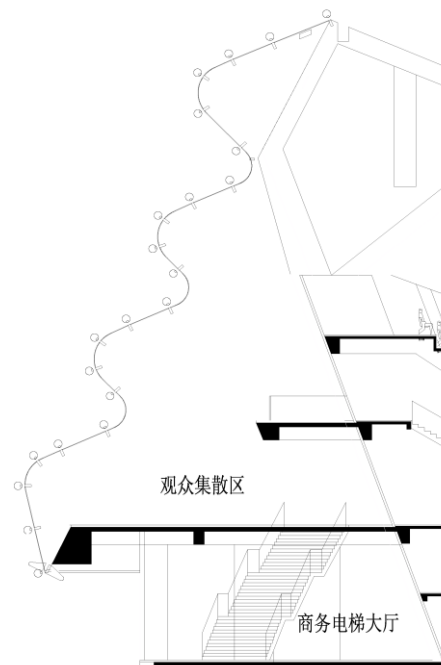
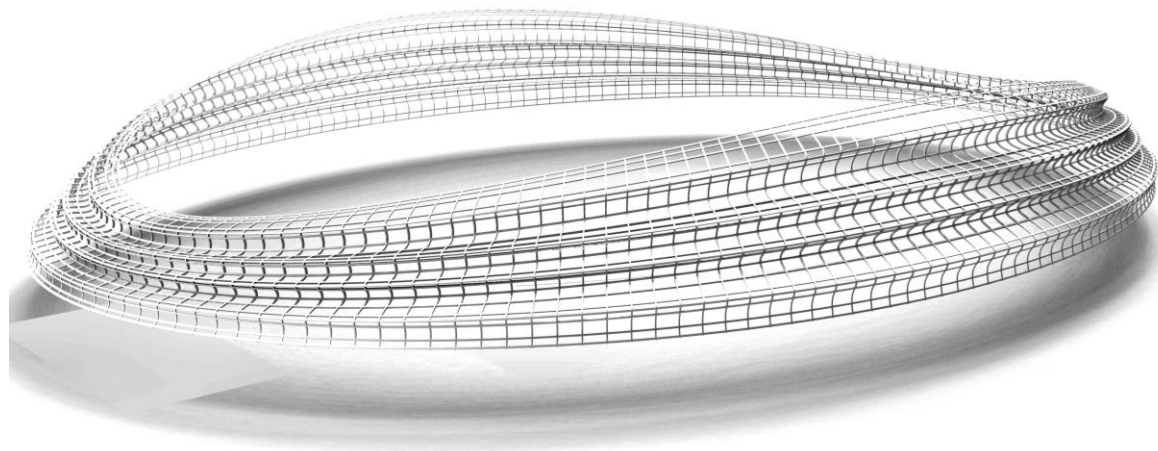
由图可知：

- 干净的空气由各风口射流进入场馆内，流入人员活动区，沿着流动方向，速度逐步衰减，干净空气的输入能有效改善场馆内空气质量。
- 永久观众席细颗粒物 (PM_{2.5}) 浓度基本维持在60μg/m³以内，运动员区整体在30μg/m³以内，空气质量较好。
- 临时观众席的空气流动性较差，细颗粒物 (PM_{2.5}) 浓度整体维持在140μg/m³左右，空气质量略差。建议后续采取相应措施，可适当调整风口位置、送风角度、送风方向等，提高临时观众席的舒适性。

全年逐时动态负荷：

国家速滑馆，单体异形、高大空间场馆。

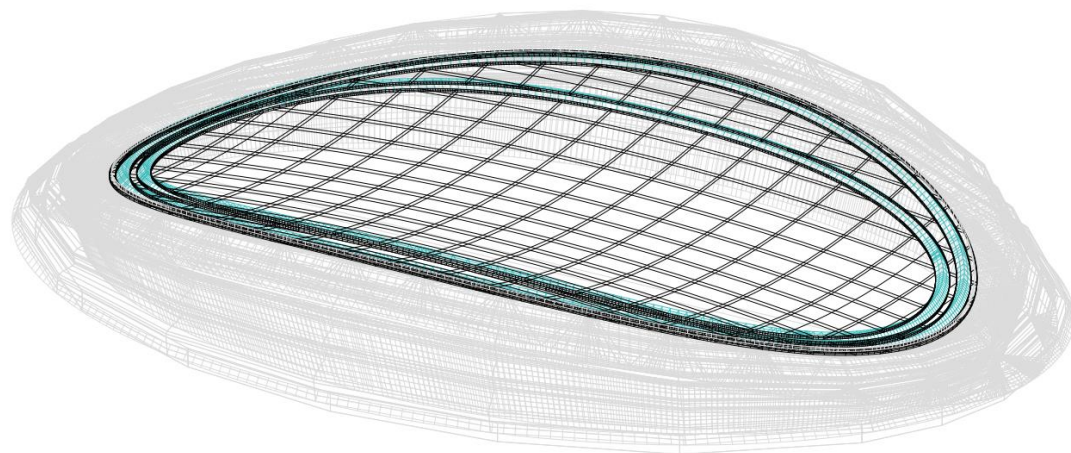
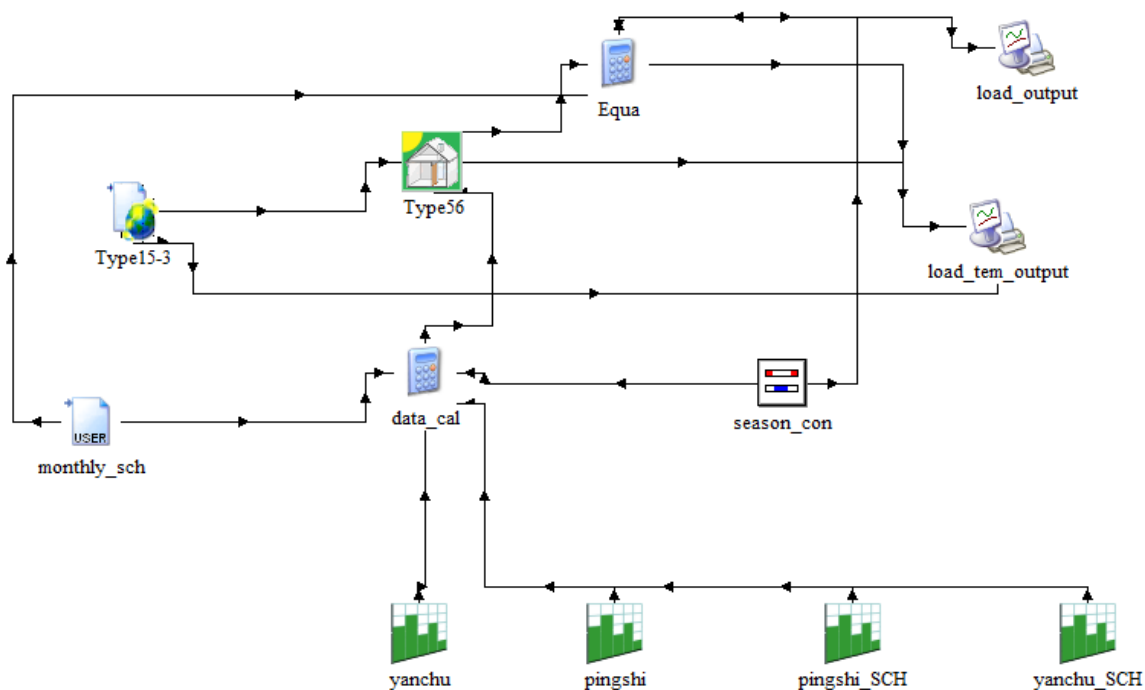
- 以“冰丝带”为设计理念，呈现出椭圆形平面、“马鞍形”造型。
- 侧面围护结构以玻璃幕墙为主，建筑外形非常复杂，整个外围护结构以复杂曲面为主。



全年逐时动态负荷：

主要功能房间室内设计参数

	夏季		冬季		新风量/(m ³ / (人·h))	PM2.5 日平均 质量浓度/(μg/m ³)
	温度/℃	相对湿度/%	温度/℃	相对湿度/%		
比赛大厅赛道(奥运赛时)			≥16	≤30	100	≤35
比赛大厅观众席			≥16		20	≤35
观众入口大厅	≤26	≤60	≥18		20	≤35
办公室,会议室,运动员、贵宾、媒体、赞助商用房等	≤24	≤60	≥20	≥40	30	≤35



全年逐时动态负荷：

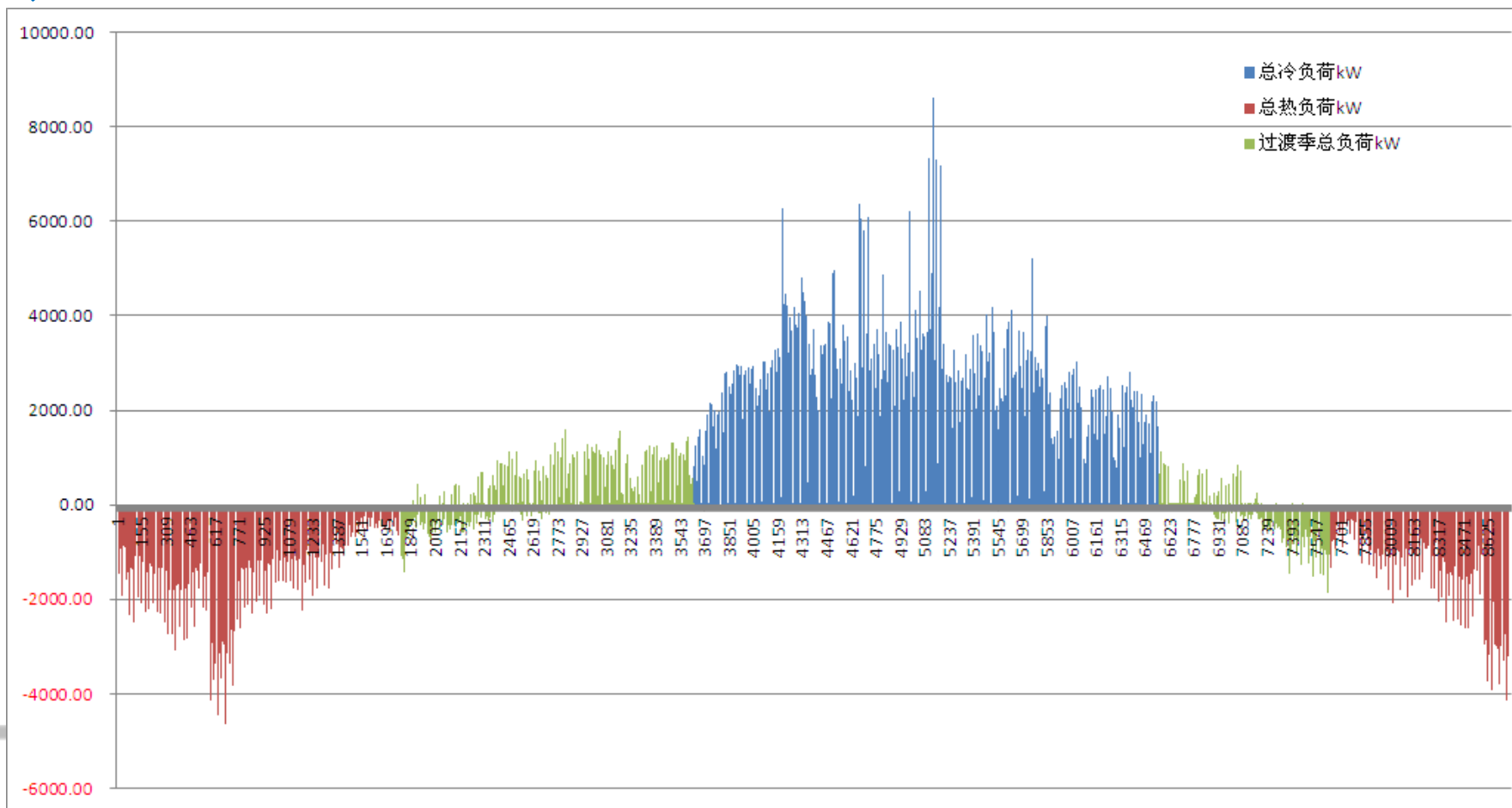
空调季6月1日~9月30日，供暖季11月1日~3月31日，过渡季4月1日~5月31日、10月1日~10月31日。

根据建筑模型、建筑分区、供暖空调运行时间、围护结构热工性能、室内设计参数、内外区人员在室率、设备使用率、照明使用率，选择北京市典型气象年室外参数。

全年动态逐时负荷计算结果
曲线如右图所示。

除过渡季外，

- 全年累计冷负荷为 **383.57** 万kWh；
- 全年累计热负荷为 **155.35** 万kWh。



能耗模拟计算和优化:

冷热源系统模拟计算的核心是反映主要能耗设备的参数变化，并根据设备的部分负荷特性和变工况特性，计算逐时设备能耗。空调总冷负荷8500kW，总热负荷11200kW。

冷源

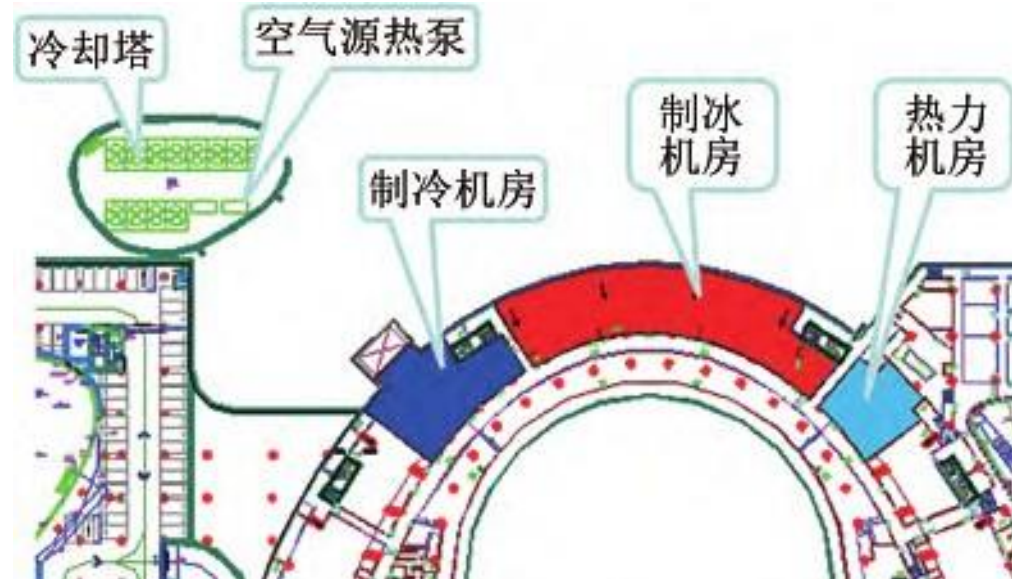
- 冷源选择3台高性能变频离心式冷水机组，单台制冷量2813.6kW，采用大温差冷水系统，供回水温度为5°C/13°C。

热源

- 热源由市政热力提供一次热水，二次侧供回水温度为60°C/45°C。

辅助

- 观众入口大厅采用空气源热泵机组作为值班供暖热源，低温热水地板辐射供暖，设计热负荷为450kW，供回水温度为50°C/40°C。

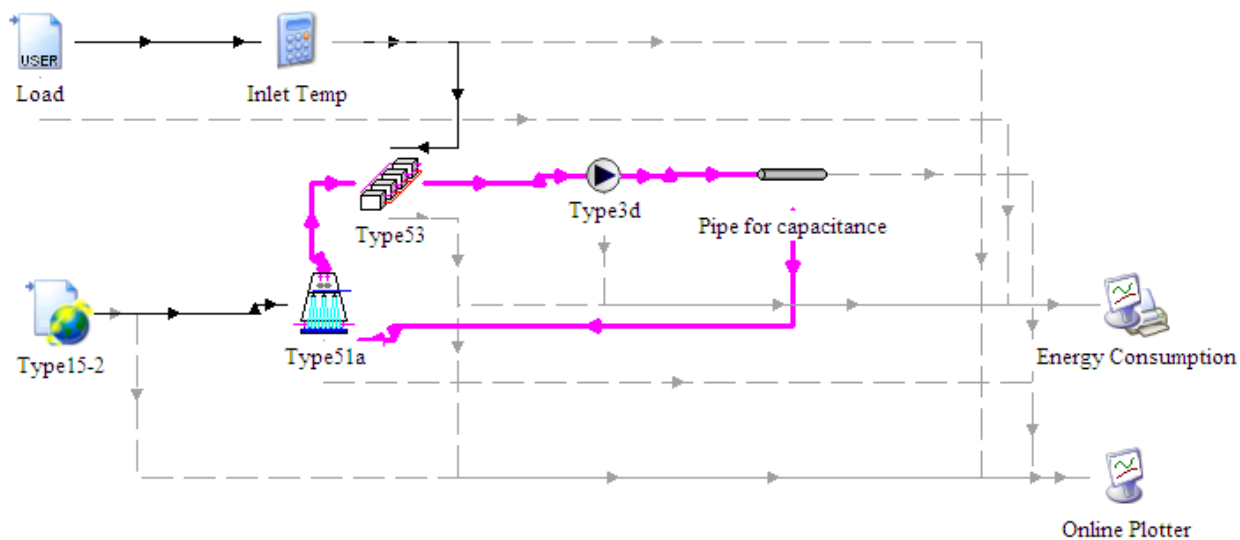


本项目设计中采用的能源系统节能优化措施：

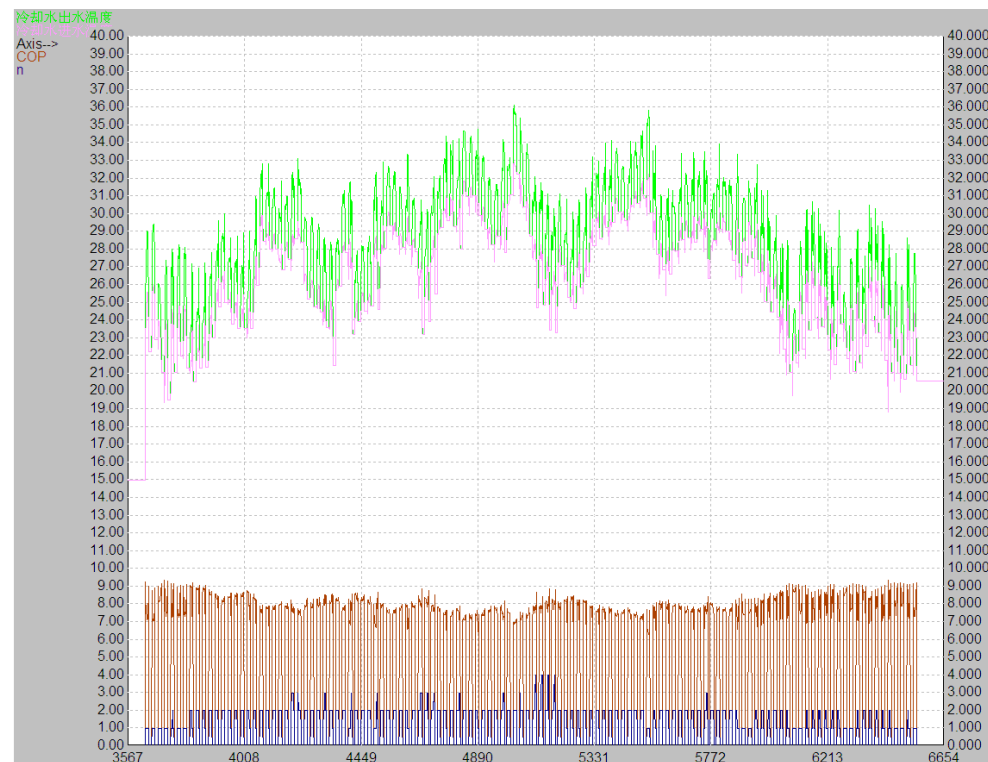
- 采用高性能离心变频冷机，COP为5.9，IPLV>8.1，均高于规范规定（COP限值5.495，IPLV限值8.06）。采用冷机群控优化控制等节能措施。
- 冷水泵采用大温差运行，耗电输热比并有较大提升。
- 观众入口大厅采用空气源热泵+地板采暖和供冷。采用的高能效值的热泵机组，且夏季采用15℃供水温度，系统性能高于常规系统。
- 在制冰主机的冷凝端设置废热回收利用的热泵机组，为转轮除湿机组提供再生用热水。
- 全空气系统空调机组部分采用一次回风全空气变风量空调系统，其风机采用变频风机，可在部分负荷时根据回风温度和送风压力，调节风机转速。部分新风机组、排风机组以及新风热回收机组采用变频控制，根据监测的CO₂浓度和最小新风量要求调节风量；过渡季监测室外温度，采用分阶段变频控制风量。

能耗模拟计算和优化：

为了分析该项目暖通空调设计方案的节能效果，在建筑全年逐时负荷计算的基础上，采用动态模拟计算软件TRNSYS17中建立冷热源系统动态仿真模型。



制冷机采用了TYPE53模块，模拟并联的多台型号相同的冷水机组，可以反映机组自身变工况、变负荷率调节性能。



机组COP的逐时变化曲线

能耗模拟计算和优化:

供暖空调系统能耗汇总

能耗		基准建筑能源系统	设计建筑能源系统	节能量	节能率
制冷机	kWh	628756	572913	55843	8.9%
冷却塔	kWh	39648	39648	-	
冷却水泵	kWh	92751	92751	-	
冷冻水泵	kWh	110665	82852	27813	25.1%
市政供热系统	kWh	750561	750561	-	
风系统	kWh	416978	373839	43139	10.3%
除湿再生加热	kWh	195416	143128	52288	26.8%
地板供暖空气源热泵	kWh	90687	73722	16964	18.7%
总能耗	kWh	2325462	2129415	196047	8.4%

知
道
創
造
物
質

谢 谢

THANKS