文章编号：1008－8857(2025)03－0125－09 **DOI**: 10.13259/j.cnki.eri.2025.03.001

某超高层建筑玻璃幕墙塔冠空调气流组织及热舒适性研究

聂 喆，王海东，胡均瑶，施帆帆
（上海理工大学 环境与建筑学院，上海 200093）

摘 要：高大空间建筑内部温度分层现象明显，且叠加的透明围护结构受太阳辐射的影响较大。目前，针对高大空间建筑空调系统特别是其气流组织方案设计尚无现成的标准和方法作为参照，需采用个性化的设计以更好地满足室内热舒适性和空调系统节能低碳运行的要求。采用计算流体力学（CFD）模拟方法对某超高层建筑中 55 m 高透明塔冠的夏季制冷空调方案进行了比选，并综合考虑空气温度和太阳辐射对热舒适性的叠加影响。通过分析 4 种不同空调方案组合模拟结果，优化了空调气流组织方案。结果表明，采用侧送风与上、下送风结合的送风方式，可在满足室内热舒适性的需求下，使风机运行能耗最低，达到节能效果。研究为大面积透明围护结构高大空间建筑夏季空调设计提供了参考，也是运用 CFD 模拟方法辅助空调系统方案设计的有益尝试。

关键词：大空间；透明围护结构；CFD 模拟；热舒适性；太阳辐射
中图分类号：TU831 **文献标志码**：A

Airflow organization and thermal comfort analysis of glass curtain wall tower crown in a super-tall building

NIE Zhe，WANG Haidong，HU Junyao，SHI Fanfan
(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Significant temperature stratification occurs in the interior of tall, large-volume buildings, compounded by the impact of solar radiation on transparent enclosure structures. Currently, there are no established standards or methods specifically guiding the design of air-conditioning airflow organization for such large spaces, necessitating customized designs to better meet indoor thermal comfort requirements and achieve energy-efficient, low-carbon operation of heating, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were employed to evaluate cooling air-conditioning schemes for a 55-meter-high transparent tower crown in a super-tall building during summer, considering the combined effects of air temperature and solar radiation on thermal comfort. Analysis of four different air-conditioning scheme combinations led to an optimized airflow organization strategy. The results

收稿日期：2023－11－20
第一作者：聂 喆(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：土木工程(暖通)。E-mail：2455984708@qq.com

show that a combination of side supply and top-and-bottom supply airflow achieves the lowest fan energy consumption while maintaining occupant comfort, thus realizing energy savings. This research provides a valuable reference for summer air-conditioning design in large-volume buildings with extensive transparent enclosures and represents a beneficial application of CFD simulations in assisting HVAC system design.

Keywords: large space building; transparent enclosure; CFD simulation; thermal comfort; solar radiation

玻璃幕墙等透明围护结构是现代商业建筑普遍采用的立面形式。随着建筑功能业态的日趋复杂，高大空间建筑得到了更加广泛的应用。高大空间建筑跨度大、空间高，人员工作活动区域主要集中在下部，此时采用全室空调系统会造成资源的浪费，因此常采用分层空调系统进行室内温度调节[1–2]。透明围护结构和高大空间两个特征的叠加，使得建筑空调系统设计，尤其是负荷计算和热舒适保障方面面临双重挑战。

已有大量文献对高大空间建筑分层空调系统进行了探讨。Hu 等[3]针对典型分层空调地板水平侧壁送风系统(FSAS)下送上回和喷嘴侧壁送风系统(NSAS)中送下回对室内热环境的影响进行了研究。FSAS 主要通过热传导对室内传热，可以通过控制侧送风风口的面积提高室内热舒适性[3–4]。NSAS 则是通过热传导和热对流的共同作用，利用自然风提高室内热舒适性。但是使用该空调系统时，由于喷嘴送风与自然通风相互作用，气流耦合较为复杂，易使未占用区气流变得混乱[5–6]。Kessling 等[7]证明了辐射供冷的可行性。Xie 等[8]发现辐射板与侧面墙体的面积比对室内热舒适性有一定影响。综合来看，混合型集成空调系统使用较为普遍，且相对于单一气流组织形式送风具有一定优势[9]。相较于全空气系统(all air system，AAs)，辐射地板冷却和墙壁冷却与送风系统(radiation floor cooling and wall cooling combined with air supply system, RC/ASs)的结合可以使空气分布更加均匀[10]。辐射供冷置换通风系统可以通过控制送风温度和风速实现对室内热舒适性的调节[11]。另外，调节百叶风口的角度也可以改善室内热舒适性[12]。

透明围护结构建筑的室内热舒适性与太阳辐射关系密切[13]。直射辐射在总太阳辐射中占比较大，且大部分建筑冷负荷都是由于阳光直射透过玻璃产生的[14–15]，因此可以通过设置窗帘、百叶等遮阳措施来降低太阳直射辐射[16]。另外，优化玻璃的光谱特性也是降低太阳辐射的一个重要方法[17]。低辐射涂层的双层玻璃通过改变玻璃的遮阳系数和透光率降低太阳辐射[18]。但在炎热地区，玻璃的温度可能高于室内空气温度，这将增加建筑冷负荷。因此，科研人员开发了一种具有选择性高发射率的透明辐射冷却(transparent radiation cooling，T−RC)膜，以降低建筑冷负荷[19]。在此基础上，Zhao 等[20]提出的半透明辐射冷却(semi-transparent radiative cooling，ST/RC)玻璃，对光具有选择透过性，可以减少室内余热。此外，窗墙比对透明围护结构的室内热环境也有一定的影响[21]。

透明围护结构和高大室内空间的叠加，使得空调系统节能和室内热舒适性对于气流组织的要求进一步提高。在设计过程中需同时考虑分层空调的气流特性和透明围护结构的太阳辐射得热，因此需要在依据标准规范的常规设计手段基础上，采取个性化的措施优化设计。本文针对成都某超高层建筑透明塔冠设计阶段面临的空调热舒适性的不确定性，充分考虑空调气流组织特性和太阳辐射对热舒适性的不利影响，采用计算流体力学(CFD)模拟方法评估了 4 种不同送风方案的可行性，以探究含透明围护结构的高大空间建筑热舒适性与室内空调设计的关系，为同类型建筑空调设计提供参考。

1 工程概况

某超高层建筑综合体位于四川成都天府新区。该建筑由塔冠和塔楼组成。塔冠部分位于超

高层建筑 89 层 433.5 m 处，为建筑观光区，其高度为 55.4 m，东侧与塔楼相接。塔冠区域平面近似为正方形，东西方向长 24.13 m，南北方向长 25.13 m。塔冠东侧墙体为混凝土墙体，与超高层建筑其他区域相连，其余三侧墙体结构均为玻璃幕墙。为了保证美观，部分玻璃幕墙未采取遮阳设计。塔冠内观光区域包含 4 层周边环廊及 3 层玻璃栈道，供游客游览与休息，环廊的边界设有 1.8 m 高的玻璃护栏，环廊与玻璃栈道通过楼梯上下相连。在夏季受太阳辐射和建筑高度影响，塔冠内观光区域温度可达 50 ℃，因而需要进行合理的气流组织设计来满足观光区域温度和热舒适性的要求。针对建筑的独特结构，本文基于 CFD 模拟进行不同气流组织方案的设计，找出最佳气流组织设计方案。塔冠区域平面图如图 1 所示。

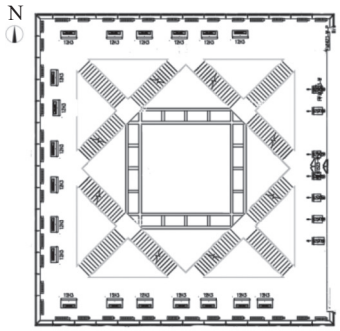


图 1　塔冠区域平面图

Fig. 1　Tower crown plan

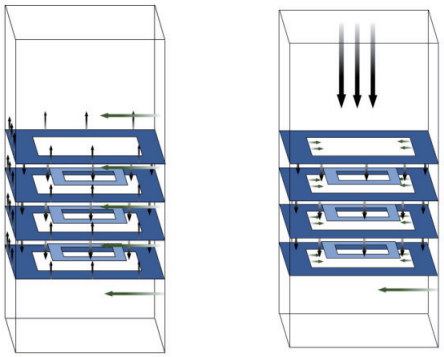
2　气流组织方案设计

本工程的塔冠具有位置高、空间大、通透性好等特点。塔冠内因受较强的太阳辐射而出现明显的热分层现象，因此普通高大空间的气流组织设计难以满足塔冠内热舒适性的要求。结合塔冠结构特点，考虑在人员活动区设置地板辐射供冷来承担主要辐射冷负荷，在环廊中心顶部设置下送风的风机盘管并在环廊外环设置上送风的风机盘管，在非透明围护结构的东墙设置侧送风，在塔冠顶部设置顶送风。基于上述设置，本文选择了 4 种不同风量、送风形式的气流组织设计方案，如表 1 所示。各方案气流组织示意图如图 2 所示。

表 1　气流组织设计方案

Tab. 1　Air distribution design schemes

方案	顶送风	侧送风	下送风	上送风	地板辐射供冷	送风量/($m^3 \cdot s^{-1}$)
1		√	√	√		68.20
2	√	√	√		√	103.59
3		√	√	√	√	86.81
4		√	√	√	√	67.40



(a) 方案1、3、4　　(b) 方案2

图 2　不同方案气流组织示意图

Fig. 2　Schematic diagrams of air distribution under different design schemes

3　理论介绍

由于设计方案涉及太阳辐射得热，人体会受到地面和墙体辐射的影响，从而影响人体对环境的热感觉，因此进一步对室内热舒适性进行对比。目前，预测平均体感指数 I_{PMV} 是被广泛接受的热舒适性评价指标，其计算式为

$$\begin{aligned} I_{\mathrm{PMV}} = {} & [0.303\exp(-0.036M)+0.027\,5]\times \\ & \{M-W-3.05[5.733-0.007(M-W)-p_{\mathrm{a}}]- \\ & 0.42(M-W-58.2)-0.017\,3M(5.867-p_{\mathrm{a}})- \\ & 0.001\,4M(34-t_{\mathrm{a}})-3.96\times10^{-8}f_{\mathrm{cl}}\times \\ & [(t_{\mathrm{cl}}+273)^4-(\bar{t}_{\mathrm{r}}+273)^4]-f_{\mathrm{cl}}h_{\mathrm{c}}(t_{\mathrm{cl}}-t_{\mathrm{a}})\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中：M 为人体能量代谢率，$\mathrm{W/m^2}$；W 为人体做的机械功，$\mathrm{W/m^2}$；p_{a} 为人体周围水蒸气分压，kPa；t_{a} 为人体周围空气温度，℃；f_{cl} 为人体服装面积系数；t_{cl} 为人体服装外表面温度，

℃；$\bar{t}_r$为环境平均辐射温度，℃；h_c为对流换热系数，W/(m^2·℃)。

I_{PMV}范围为−3 ～ 3。该评价指标分为 7 个层级。当I_{PMV}为 0 时，人员感觉适中；当I_{PMV}小于 0 时，人员感觉偏冷，且程度与数值大小成正比；当I_{PMV}大于 0 时，人员感觉偏热，且程度与数值大小成正比。

考虑到个体舒适体验的差异性，提出热环境下的预测不满意率I_{PDD}，它代表对特定热环境感到不适人员比例。I_{PMV}与I_{PDD}的关系为

$$I_{PDD} = 100 - 95\exp(-0.033\,53 I_{PMV}^4 - 0.217\,9 I_{PMV}^2) \quad (2)$$

平均辐射温度一般无法直接测得，需要通过空气温度、湿球温度、风速计算得到。室外空气综合温度为室外空气温度、太阳辐射和室内长波辐射等的综合热作用。室外空气综合温度的计算以建筑围护结构外表面的热平衡方程为基础[22]，即

$$q = q_s + q_c - q_r \quad (3)$$

式中：q 为围护结构外表面得热量，W/m^2；q_s为围护结构外表面太阳辐射得热量，包括太阳直射辐射、天空散射辐射和地面反射辐射，其中地面反射辐射相对于太阳直射辐射、天空散射辐射而言数值较小，可忽略不计，W/m^2；q_c为围护结构外表面对流换热量，W/m^2；q_r为围护结构外表面与环境长波辐射换热量，W/m^2。

太阳对透明围护结构的辐射传热量的一部分被玻璃吸收，另一部分则直接透过玻璃进入室内，成为室内热量[23]，可表示为

$$q_s = I(\rho_s + \tau_s) \quad (4)$$

式中：I为水平或垂直面上太阳辐射照度；ρ_s为透明围护结构对太阳辐射的吸收率；τ_s为透明围护结构对太阳辐射的透过率。

q_c计算式为

$$q_c = \alpha_e(t_{ao} - t_{wo}) \quad (5)$$

式中：α_e为围护结构外表面换热系数，W/(m^2·℃)；t_{ao}为室外空气温度，℃；t_{wo}为围护结构外表面温度，℃。

以室外空气综合温度为计算围护结构外表面得热量时的边界温度，则有

$$q = \alpha_e(t_{sa} - t_{wo}) \quad (6)$$

式中，t_{sa}为室外空气综合温度，℃。

忽略空气和环境长波辐射的热作用，则室外空气综合温度表达式为

$$t_{sa} = t_{ao} + \frac{\rho_s I + I\tau_s}{\alpha_e} \quad (7)$$

目前国内外研究中并无太阳辐射对透明围护结构内人体传热的研究。类似地，塔冠内人体接收到的平均辐射温度 t_r 可表示为

$$t_r = t_i + \frac{\rho_s I + I\tau}{\alpha} \quad (8)$$

$$\rho_w = \frac{C_{SHG}}{0.87} \quad (9)$$

式中：t_i为室内空气温度，℃，取室内设计温度 25 ℃；ρ_w为围护结构遮阳系数，为 0.52；τ为太阳辐射透射率，取 0.8；α为内表面换热系数，为 8.72 W/(m^2·℃)；C_{SHG} 为太阳得热系数，取 0.55。

在复杂边界条件下，室内气流呈湍流状态。标准 k−ε模型是典型的两方程模型，也是目前使用较广泛的湍流模型，已得到大量工程应用的验证，可靠性高，因此本文采用标准 k−ε模型进行数值模拟。涉及到的控制方程主要包括连续性方程、动量方程、能量方程，三者结合起来的通用形式为

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho U\varphi) = \mathrm{div}\left(\Gamma_\varphi \cdot \mathrm{grad}\varphi\right) + S \quad (10)$$

式中：ρ为空气密度，kg/m^3；φ为通量，可代表气流速度、温度、湍流动能、湍流耗散率，在连续方程中$\varphi = 1$；t为时间；U为气流速度；Γ_φ为各变量φ对应的扩散系数；S 为源项。

4 CFD 仿真方案对比

4.1 模型建立

基于塔冠实际设计尺寸在 CFD 仿真软件中进行建模。简化后的物理模型如图 3 所示。

4.2 网格划分

简化后的模型较为规则，结构简单，所以采用结构性网格进行网格划分和无关解校验，最终采用的网格数量为 179 万。

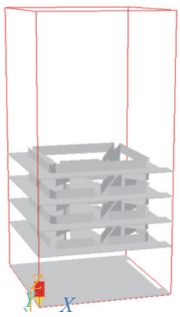


图 3　塔冠结构模型（隐藏围护结构）

Fig. 3　Tower crown structural model (enclosure hidden)

4.3　边界条件设置

基于塔冠对I_{PMV}和室内 25 ℃ 设计温度的要求，设置环廊吊顶内部风机盘管及侧送风温度为 15.5 ℃，立式风机盘管及顶送风温度为 19 ℃。地板辐射供冷的供、回水温度分别为 13、18 ℃。结合文献[24]中关于地板辐射供冷的测试结果，设置地板辐射供冷时地面温度为 23 ℃。采用基于斯蒂芬–玻尔兹曼定律提出的 IMMERSOL 模型对塔冠进行太阳辐射换热模拟。模型相关热物性参数如表 2 所示。

表 2　模型相关热物性参数

Tab. 2　Thermophysical parameters for the CFD model

参数	数值
室外温度/℃	31.8
太阳辐射强度/(W·m^{-2})	600
空气热导率/ [W· (m·K)$^{-1}$]	0.026 7
空气比热容/ [kJ· (kg·K)$^{-1}$]	1.005
空气密度/(kg·m^{-3})	1.225
玻璃幕墙传热系数/[W· (m^2·K)$^{-1}$]	1.7
玻璃幕墙太阳得热系数	0.45

5　结果分析

5.1　温度对比

图 4 为 4 种方案的塔冠观光区域温度对比。从图可以看出，塔冠内热分层现象明显。方案 1 未设置地板辐射供冷，因此人员活动区平均温度高于其他 3 种方案的值。塔冠内人员活动区域主要集中在底部，侧送风对底部区域影响较为明显。方案 2 顶送风对温度的影响有限，且由于各层玻璃栈道的阻挡，侧送风对环廊温度分布的影响也不及上送风对环廊温度分布的影响。

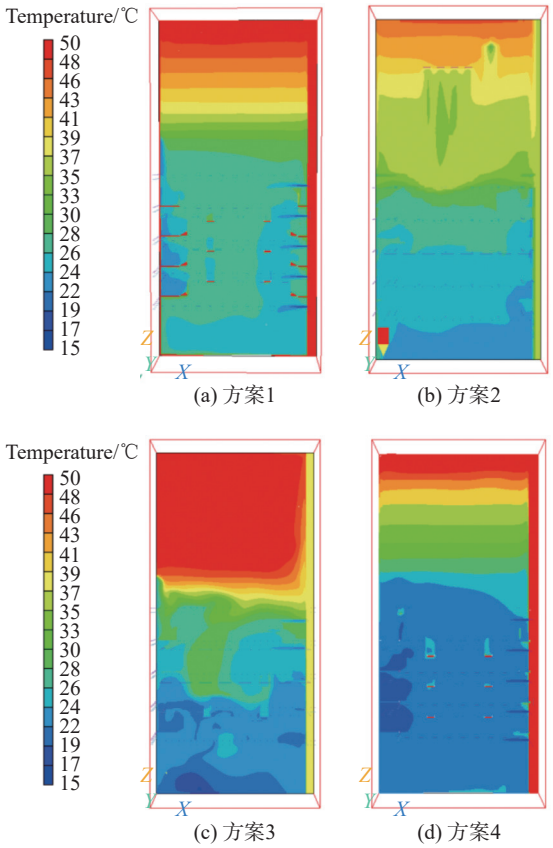


图 4　4 种方案塔冠观光区域温度对比

Fig. 4　Temperature comparison in crown observation area under four design schemes

风机输入功率与风机风量、压头之间的关系为

$$P = kQH \tag{11}$$

式中：k 为常数；P为风机输入功率，W；Q 为风机风量，m^3/h；H 为压头，m。

当风机转速 n 变化时，风机风量也将发生变化，即

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \tag{12}$$

式中：n_1、n_2分别为上一时刻、下一时刻风机转速，r/min；Q_1、Q_2分别为上一时刻、下一时刻风机风量，m^3/h。

风机输入功率与风机转速的关系为

$$\frac{P_2}{P_1}=\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \tag{13}$$

式中：P_1、P_2分别为上一时刻、下一时刻风机输入功率，W。

则风机风量与风机输入功率的关系为

$$\frac{P_2}{P_1}=\left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^3 \tag{14}$$

可见，减少送风量能降低能耗，达到节能的目的。根据《近零能耗建筑技术标准》[25]，公共建筑节能率计算式为

$$\eta_e=1-\frac{P_i}{P_c} \tag{15}$$

式中：P_i为方案 i 风机功率，W；P_c为对照组风机功率；η_e为公共建筑节能率。

以送风量最大的方案 2 风机功率作为对照，各方案节能率对比如表 3 所示。

表 3 各方案节能率对比

Tab. 3 Energy saving rate comparison under different design schemes

方案	送风量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	公共建筑节能率/%
1	68.20	71.46
3	86.81	41.14
4	67.40	72.45

在满足室内 25 ℃ 设计温度时方案 4 比方案 3 的送风量更小，说明合理的气流组织设计可以达到节能的效果。以能耗最高的方案 2 为基准来对比其余方案可以发现，方案 3 的公共建筑节能率为 41.14%，方案 1 的公共建筑节能率为 71.46%，而方案 4 的公共建筑节能率最终优化为 72.45%。

5.2 速度对比

由于气流组织设计不同，为满足室内温度场和I_{PDD}、I_{PMV}要求，送风量和送风方式在不同气流组织设计方案中有一定的差异。4 种方案塔冠观光区域速度对比如图 5 所示。受建筑结构的影响，方案 2 中设置顶送风会导致送风口距人员活动区域较远，因此为满足设计要求所需送风量最大。相较于方案 1，方案 3 中设置地板辐射供冷，

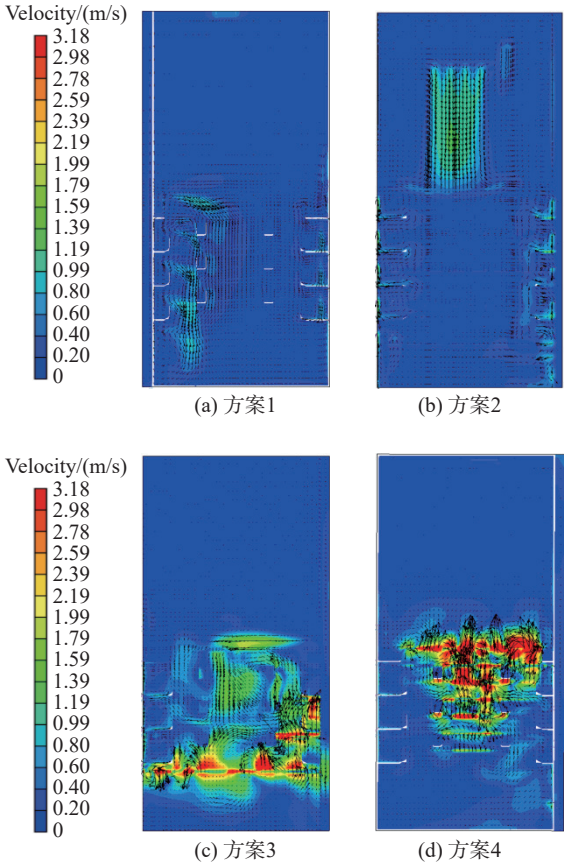


图 5 4 种方案塔冠观光区域速度对比

Fig. 5 Velocity comparison in crown observation area under four design schemes

室内供冷量增加，但为使塔冠内人员活动区域温度场稳定，两方案的侧送风风口布置和风口尺寸均不同。基于方案 3 的气流组织设计，优化上送风中风口位置，可在满足室内I_{PDD}、I_{PMV}要求的同时减小送风量，从而达到一定的节能效果。

5.3 舒适性对比

室内热湿环境和气流组织设计的合理性可以通过I_{PMV}、I_{PDD}指标进行评价，ISO7730 标准中的评价标准为$-0.5<I_{PMV}<0.5$，$I_{PDD}<10\%$。计算热舒适性时，取人体负荷率为 0，人体服装面积系数为 1.1，平均辐射温度取 60.77 ℃。

图 6、7 分别为 4 种方案塔冠观光区域I_{PMV}、I_{PDD}对比。表 4 为各方案人员活动区域平均I_{PMV}、I_{PDD}。基于图 6 中I_{PMV}的模拟结果，方案 1～4 人员活动区域的平均I_{PMV}分别为 0.39、0.33、0.60 和−0.18，均满足室内热舒适性的要求。方案 1、2 和 3 人员活动区域I_{PMV}分布不均

表 4　各方案人员活动区域平均I_{PMV}、I_{PDD}

Tab. 4　I_{PMV} and I_{PDD} values in occupied zones under different design schemes

方案	人员活动区域平均I_{PMV}	人员活动区域平均I_{PDD}/%
1	0.39	12.2
2	0.33	26.4
3	0.60	57.2
4	−0.18	8.9

匀，部分区域人员感觉较热或较冷。由于在东侧墙体设置侧送风，方案 1 西侧部分区域I_{PMV}高于 0.5。方案 3 相较于方案 1 的送风量增加且设置地板辐射供冷右侧导致东侧区域 I_{PMV}低于 −1。方案 2 中设置顶送风使顶部热量随送风进入人员活动区域，因此人员活动区域的热舒适性虽好于方案 1 和方案 3 的，但方案 2 的能耗高于其他方案的。方案 4 人员活动区域I_{PMV}分布均匀，I_{PMV}也均在 0 附近，人体热舒适性良好，结果最优。

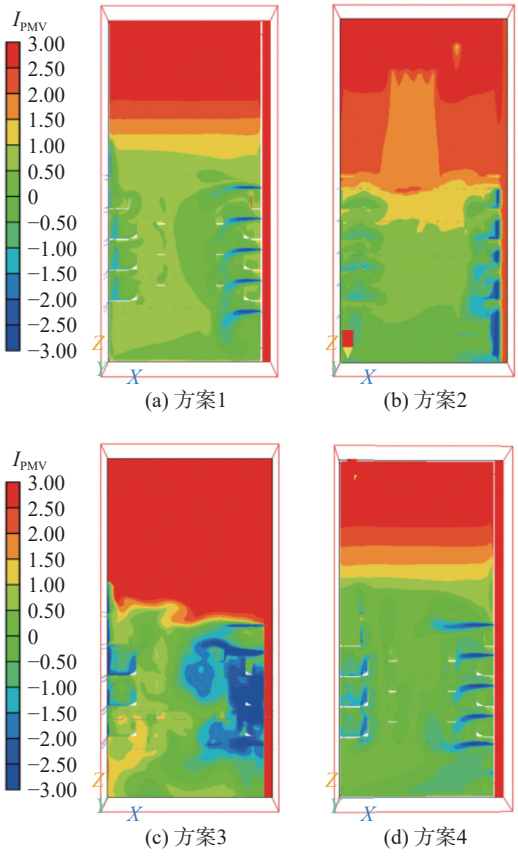


图 6　4 种方案塔冠观光区域I_{PMV}对比

Fig. 6　I_{PMV} comparison in crown observation area under four design schemes

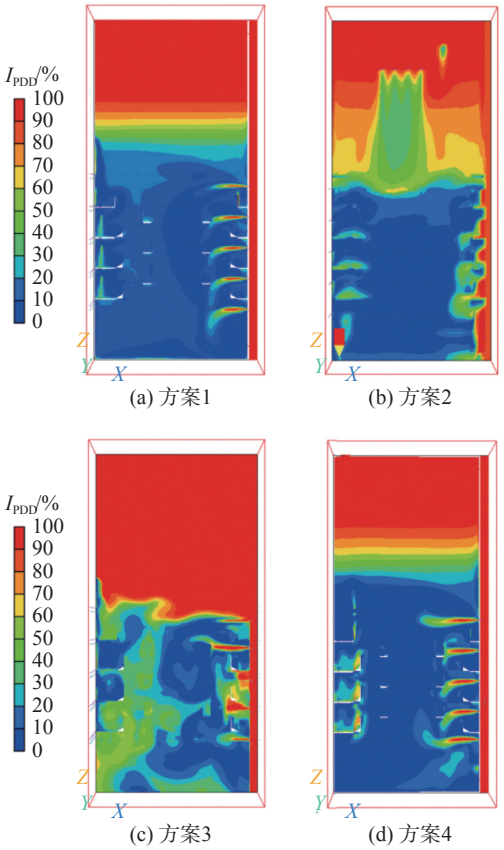


图 7　4 种方案塔冠观光区域I_{PDD}对比

Fig. 7　I_{PDD} comparison in crown observation area under four design schemes

从图 7 可以看出，当−0.5<I_{PMV}< 0.5 时，I_{PDD}<10%。方案 3 人员活动区域平均I_{PDD}为 57.2%，远超过 10%，未能满足塔冠热舒适性要求。方案 2 人员活动区域平均I_{PDD}约为 26.4%，相对于方案 3 的较好，但仍然不满足I_{PDD}小于 10%的要求。方案 1 和方案 4 人员活动区域平均I_{PDD}较为相近，且方案 4I_{PDD}小于 10%。结合I_{PMV}的情况，认为方案 4 塔冠热舒适性最佳。

6　结论

本文通过 CFD 模拟对超高层建筑透明塔冠内的气流组织设计方案进行了对比，从热环境营造和空调系统能耗两个方面，优化了夏季制冷空调气流组织设计方案。主要结论为：

（1）对于此类建筑，由于人员活动区域占整

体空间的比例很小，采用分层空调送风系统更接近于个体化的局部送风，空调应尽量减少对非人员活动区域的冷风扩散，特别是避免采用顶送风的全室空调形式，从而实现更好的节能和热舒适效果。

(2)透明围护结构显著增加了太阳辐射得热量，不仅增加了空调系统负荷，而且对人体热舒适性产生不利影响，特别是针对本研究中因建筑外观造型需求无法采用遮阳的情况，只能通过降低室内空气温度来避免太阳辐射造成的辐射温度过高，以保障人员的热舒适性需求。

(3)通过冷辐射地板带走室内因太阳辐射引起的冷负荷，使室内I_{PMV}、I_{PDD}满足评价指标要求。因此，采用室内热舒适性参数I_{PMV}、I_{PDD}时，充分考虑太阳辐射的室外空气综合温度是十分必要的。

参考文献：

[1] 王海东, 李倩, 牟宇. 大空间建筑喷口侧送风分层空调负荷特性研究 [J]. 暖通空调, 2022, 52(4)：138－145.

[2] 彭晓娟. 高大空间公共建筑暖通空调系统设计要点分析 [J]. 中国建筑装饰装修, 2022(6)：96－98.

[3] HU H, WANG H D, ZOU Z J, et al. Investigation of inter-zonal heat transfer in large space buildings based on similarity: comparison of two stratified air-conditioning systems[J]. Energy and Buildings, 2022, 254：111602.

[4] 刘海燕, 周前, 宋艳苹, 等. 高大空间建筑空调气流组织模拟分析 [J]. 河南城建学院学报, 2020, 29(1)：77－82.

[5] WANG X, YANG Y C, XU Y K, et al. Prediction of vertical thermal stratification of large space buildings based on Block-Gebhart model: case studies of three typical hybrid ventilation scenarios[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 41：102452.

[6] 刘锋, 王志欣, 田忠浩, 等. 某博物馆高大空间气流组织及节能设计研究 [J]. 青岛理工大学学报, 2020, 41(4)：72－80.

[7] KESSLING W, HOLST S, SCHULER M. Innovative design concept for the new Bangkok international airport, NBIA[C]//Proceedings of the Fourteenth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates. Richardson: Energy Systems Laboratory, 2004: 269－277.

[8] XIE X, XIA F, ZHAO Y Q, et al. Parametric study on the effect of radiant heating system on indoor thermal comfort with/without external thermal disturbance[J]. Energy, 2022, 249：123708.

[9] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2009 ASHRAE handbook: fundamentals[M]. Atlanta: ASHRAE, 2009.

[10] ZHUANG B Y, SHI J, CHEN Z Q. Numerical study on indoor environment and thermal comfort in train station waiting hall with two different air-conditioning modes[J]. Building Simulation, 2021, 14(2)：337－349.

[11] CHENG S Y, CHEN Z Q. Study on indoor comfort of floor radiant cooling and displacement ventilation system in large space[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 238：012078.

[12] 赵晓蓉. 高大空间百叶风口气流组织分析 [J]. 安装, 2021(6)：40－42.

[13] CARMODY J, SELKOWITZ S, LEE E S, et al. Window systems for high-performance buildings[M]. New York: W. W. Norton & Company, 2004.

[14] SALAMEH T, EL HAJ ASSAD M, TAWALBEH M, et al. Analysis of cooling load on commercial building in UAE climate using building integrated photovoltaic façade system[J]. Solar Energy, 2020, 199：617－629.

[15] JAVANROODI K, MAHDAVINEJAD M, NIK V M. Impacts of urban morphology on reducing cooling load and increasing ventilation potential in hot-arid climate[J]. Applied Energy, 2018, 231：714－746.

[16] YAO J. An investigation into the impact of movable solar shades on energy, indoor thermal and visual comfort improvements[J]. Building and Environment, 2014, 71：24－32.

[17] SHEN H, TAN H W, TZEMPELIKOS A. The effect of reflective coatings on building surface temperatures, indoor environment and energy consumption— an experimental study[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(2−3)：573－580.

[18] SOMASUNDARAM S, CHONG A, ZHANG W, et al. Energy saving potential of low-E coating based retrofit double glazing for tropical climate[J]. Energy and Buildings, 2020, 206：109570.

[19] YI Z T, LV Y Y, XU D, et al. Energy saving analysis of a transparent radiative cooling film for buildings with roof glazing[J]. Energy and Built Environment, 2021, 2(2)：214－222.

[20] ZHAO B, WANG C Y, HU M K, et al. Light and thermal management of the semi-transparent radiative cooling glass for buildings[J]. Energy, 2022, 238：

121761.
[21] YU J H, LIU Y, XIONG C, et al. Study on daylighting and energy conservation design of transparent envelope for office building in hot summer and cold winter zone[J]. Procedia Engineering, 2015, 121：1642－1649.
[22] 李涛, 刘青霞, 尤靖楠, 等. 室外综合温度的时空变化特征及影响因子分析 [J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2023, 55(6)：905－911.
[23] 张佳明. 建筑太阳辐射作用下围护结构的传热计算优化研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
[24] 李常河, 李永安, 刘学来, 等. 地板辐射供冷系统地面温度的确定 [J]. 低温建筑技术, 2005(2)：94－95.
[25] 住房和城乡建设部. GB/T 51350—2019 近零能耗建筑技术标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 1－135.

信息

国内首座天然气全链条深冷处理厂投产

7 月 3 日，国内首座天然气全链条多工况深冷处理厂——西南油气田盐亭天然气处理厂全面投产。这是目前国内技术路线最长、工艺最复杂、功能最齐全、产品种类最多的天然气处理厂，标志着我国在非常规天然气综合利用领域达到国际领先水平。盐亭天然气处理厂年处理量可达 20 亿 m^3。该厂利用超低温深冷技术，通过逐级降温，使来自天府气区的致密气中不同组分在各自的冷凝点下液化分离，实现商品天然气、乙烷、稳定轻烃、液化天然气(LNG)等 7 种产品的规模产出。

全国首批规模化绿氢耦合生物质绿色甲醇在洮南产出

7 月 15 日，上海电气洮南市风电耦合生物质绿色甲醇一体化示范项目投产仪式在吉林省洮南市举行，标志着我国在绿色氢基燃料领域取得重大突破。作为国内首个规模化商业运行的绿色甲醇项目，洮南项目首期年产能达到 5 万 t，实现了从研发生产到应用全链条闭环，技术指标达到全球领先水平，是国内首个通过欧盟国际可持续发展与碳认证(ISCC)全流程认证的绿色甲醇项目，成功斩获国际市场的“通行证”。

浙江金七门核电 1 号机组核岛建设全面启动

8 月 10 日，中核集团浙江金七门核电 1 号机组核岛混凝土浇筑启动，标志着中核集团在浙江第三个核电基地机组建设全面拉开帷幕。金七门核电位于浙江省宁波市象山县，规划建设 6 台百万 kW 级压水堆核电机组。其中，1、2 号机组于 2023 年 12 月 29 日获国务院常务会议核准，采用具有我国完全自主知识产权的三代核电华龙一号机型，单台机组额定容量为 120 万 kW，设计运行寿命 60 年。全部建成后，机组装机约为 720 万 kW，预计年发电量达到 550 亿 kW·h，预计可减少 CO_2 排放约 4 500 万 t。

世界首台套 660 MW 超超临界双拱型燃煤机组投运

8 月 27 日，世界首台套 660 MW 超超临界双拱型燃煤机组全部成功投运，标志着我国在高效清洁煤电技术领域实现重要突破。该机组攻克了无烟煤高效清洁燃烧的技术难题，采用煤层气启停及助燃，相较于传统燃油点火，在同等耗材下 CO_2 排放量减少了 53%，氮氧化物、硫化物等污染物排放量下降超过 90%，每年可节约电、煤成本 7 200 余万元。它专为难着火、难稳燃、难燃尽的无烟煤设计，通过独特的双拱结构，让煤粉在炉膛内的燃烧更高效、更均匀和更充分，是针对劣质煤发电的先进燃煤机组。

（王　波）