

火车站候车厅不同回风形式的热环境研究

狄育慧¹, 徐子龙¹, 邓保顺²

(1.西安工程大学环境与化学工程学院, 陕西 西安 710048 2.中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 为了改善西安火车站候车厅内的热环境, 利用 CFD 模拟软件 Airpak 对两种不同气流组织方案下(上送上回, 上送下回)候车厅内速度场、温度场、热舒适性指标 PMV 及 PPD 的分布进行数值模拟, 通过对比分析, 验证不同方案下气流组织形式的特点。结果表明采用上送上回风形式下气流组织的均匀性更好, 为今后西安火车站改扩建在空调系统优化设计以及气流组织预测等方面提供借鉴和指导。

关键词: 候车厅; 气流组织; 温度场; 速度场; 热舒适性

中图分类号: TU834.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)05-0742-07

火车站是极具代表性的大空间建筑, 其空调设计日益受到人们的关注。传统的设计方法, 更多地依赖于经验, 往往由于缺乏对空调气流组织的研究而造成大量的能源浪费。然而合理的气流组织能使最小的通风量达到最佳的通风除湿效果。丹麦的Nielsen首次将CFD (Computational Fluid Dynamics) 技术应用于某通风房间空气流动模拟之后, CFD在暖通空调工程中的研究和应用有了更加全面和快速的发展^[1-2]。目前, 国内外关于大空间建筑室内气流组织方案的研究较为普遍^[3-6], 但大多数集中在不同送风形式下所营造的室内流场模拟分析, 而就同一建筑空间来说, 在相同送风方式不同回风口位置设置下, 对应气流组织是如何变化的却鲜有人研究。

西安火车站主楼候车大厅改建于1985年, 由于建成时间较早, 因此如何合理的对该空调系统进行局部结构的优化调整, 可能是更有利于达到舒适热环境的有效途径。利用CFD软件对原有空调系统和一种优化方案下的两种不同气流组织形式下进站广厅及候车厅内温度场、速度场以及热舒适度PMV (Predicted Mean Vote)、PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) 指标的分布特征进行数值模拟, 对比分析相应工况下候车人员的舒适情况, 为不久后西安火车站改扩建在空调系统优化设计以及气流组织预测等方面提供参考依据。

1 数学物理模型的建立

1.1 数学模型

模拟使用 CFD 软件 Airpak。该软件的研究更加具有针对性, 对大空间室内热环境、气流组织、热舒适性和室内空气品质 (IAQ) 等方面的研究尤为突出, 并且操作界面简单、快捷。

Airpak 中的湍流模型共有 4 种: 标准 k-ε 方程模型、RNG k-ε 模型、零方程模型、Indoor 零方程模型。对于大空间建筑来说, 内部空气流动通常为自然对流和强迫对流并存的混合对流形式, 且基本为湍流流动。然而根据相关研究^[7], 在实际工程中应用最为广泛的标准 k-ε 方程模型对该类大空间建筑不一定能取得满意的模拟结果, 而零方程模型相对其他湍流模型处理室内问题却更容易收敛并节约计算资源。因此在数学模型的选择上, 本文采用 Chen QY 等提出的室内零方程模型^[8]作为紊流模型。所谓零方程模型, 是指不需要微分方程而是用代数关系式把湍流粘性系数与时均值联系起来的模型^[9]。采用有限容积法作为离散方程, 为了对模型进行求解, 先进行如下假设:

1) 候车室内空气为不可压缩气体透明介质且符合 Boussinesq 假设, 即认为除密度外其他特性参数均为常数, 对密度的变化只在动量方程中计算浮升力时加以考虑; 2) 空气流动为准稳态的湍流流动, 忽略固体壁面间的热辐射; 3) 假定流场具有高紊流 Re 数, 流体的湍流粘性具有各向同性。

根据以上假设其控制方程为:

收稿日期: 2014-03-04

修改稿日期: 2014-09-24

基金项目: 陕西省科技厅攻关项目 (2013K11-31); 西安市城乡建设资助项目 (SJW2014002)

作者简介: 狄育慧 (1964-), 女, 博士, 教授, 主要从事建筑热环境及节能方向的教学与研究。E-mail: yuhui_di@163.com

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho U\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad (1)$$

其中: ρ 、 U 分别为密度、速度矢量; ϕ 为通用变量, 可代表 u 、 v 、 w 、 T 等求解变量, 当 $\phi=1$ 时即为连续性方程; Γ_{ϕ} 为广义扩散系数; S_{ϕ} 为广义源项. 室内流动零方程模型, 其紊流粘度的表达式如下所示^[7]:

$$\mu_t = 0.03874 \rho \nu L \quad (2)$$

其中: μ_t 为紊流粘度, ρ 为局部空气密度, ν 为当地时均速度, L 为当地距离面最近的距离, 0.038 74 为经验系数.

1.2 物理模型

西安火车站位于古丝绸之路起点的陕西省西安市, 建筑主体为南北朝向, 站房建筑面积 28 035 m², 南北 150 m, 东西 410 m, 包括主楼、售票厅、车站办公楼和行包房, 其中主楼建筑面积 16 411 m², 中心是高达 20 米的进站广厅, 东西两翼为大型普通候车室, 上下两层共四个, 每个候车室设计容纳人数 1 400 人, 其结构参数为: 5 200 mm×2 400 mm×850 mm. 空气调节区采用顶送球形喷口, 均匀布置在候车区域座椅两侧, 共 42 个, 进站广厅及普通候车厅送风口几何尺寸分别为 $\Phi 620$ mm 和 $\Phi 500$ mm; 4 个单层百叶回风口设在普通候车厅末端靠北墙下部, 距地面 1.3 m, 几何尺寸为 2 100 mm×1 600 mm. 夏季室内空调设计温度为 $26 \pm 2^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $50 \pm 10\%$. 图 1 为主楼建筑平面简图.

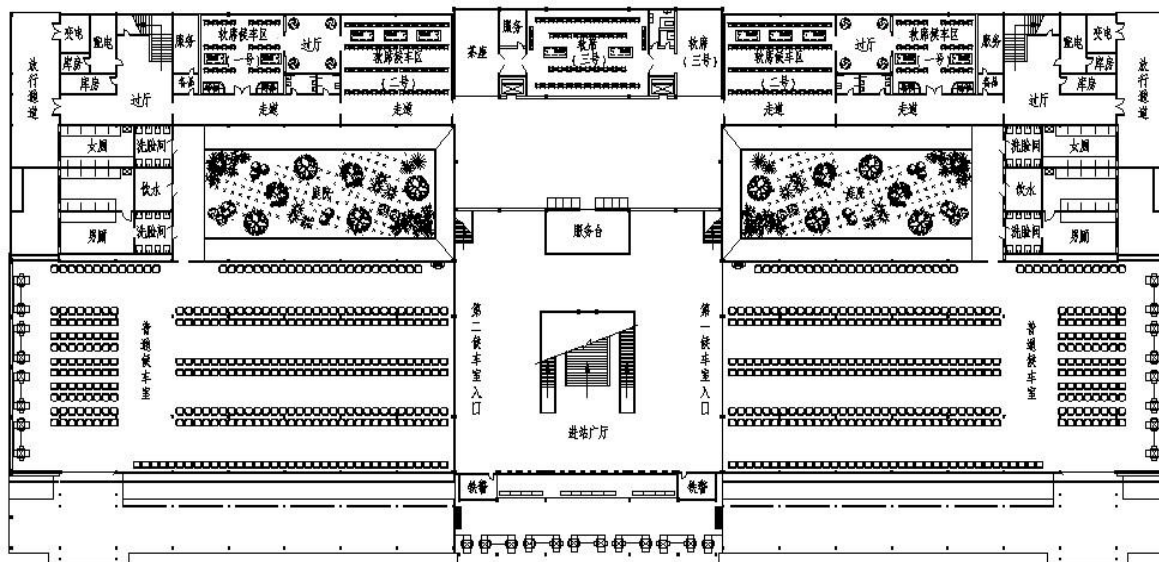


图 1 火车站主楼建筑平面简图

Fig.1 Main building architectural plane diagram of Xi'an Railway Station

为了分析整个候车厅以及进站广厅室内气流组织的基本特征, 以东侧候车大厅实际建筑尺寸数据为基础, 在建模过程中, 为了提高计算效率需进行如下简化:

1) 因为车站建成时间较早, 旅客在检票进站后通过进站广厅可直接进入一层普通候车大厅, 主楼整体分布并不是严格意义的规则图形, 为了便于模拟, 根据建筑对称的特点, 在不影响计算结果的前提下, 相应减少网格划分的数量, 并只对其建立半模型.

2) 普通候车厅末端靠北墙处共设有四个单层百叶回风口, 其中两两回风口外缘相聚较近, 分别将它们合并为一个回风口, 由四个简化成两个.

3) 主楼大厅中央直通二层的扶梯、步行楼梯以及工作人员办公室实际均采用独立的空调系统, 并不与进站广厅和普通候车区有直接的气流交换, 因此为了简化计算, 提高计算的精度, 将其分别简化为块.

通过以上简化, 根据候车厅实际建筑尺寸所建立的模型如图 2 所示.

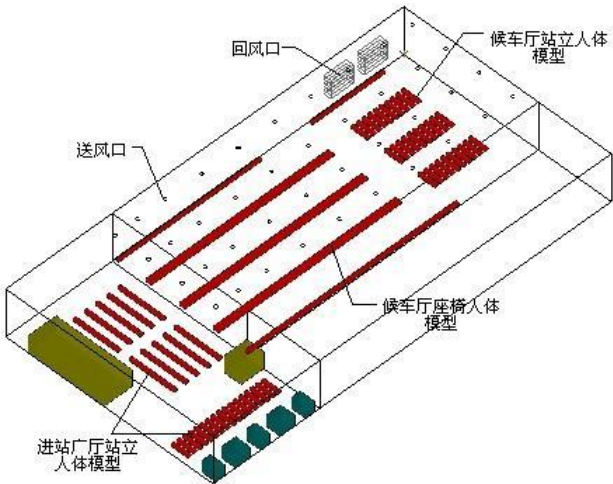


图 2 候车厅模型图
Fig.2 Waiting room model

1.3 边界条件

候车厅中具体设计参数根据设计过程中所选材料及设计规范选择,围护结构热流密度值见表 1.除表中所列参数外,其他房间之间由于温差为 0,所以热流密度不计.

表 1 围护结构热流密度
Tab.1 Heat flux of palisade structure

围护结构名称	夏季热流密度/ $\text{w} \cdot \text{m}^{-2}$	冬季热流密度/ $\text{w} \cdot \text{m}^{-2}$
北外墙	17.25	36.42
南外墙	11.32	23.55
楼板	8.7	18.4
地板	5.2	24.3

根据设计院提供的设计参数以及铁路候车厅设计规范要求,第一候车大厅、进站广厅的室内人员负荷及所需风量如表 2 所示.由室内负荷以及实际气流组织情况,一层东去候车厅所选用的空调系统送风参数如表 3 所示.

表 2 普通候车厅和进站广厅负荷统计表
Tab.2 Load list of the waiting room and audience hall

位置	面积 m^2	设备负荷 $\text{w} \cdot \text{m}^{-2}$	照明负荷 $\text{w} \cdot \text{m}^{-2}$	人员密度 $\text{人} \cdot \text{m}^{-2}$	新风量 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{人}$	新风总量 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
进站广厅	912	10	9	0.66	10	6 008
第一候车厅	1272	5	11	0.95	15	18 080

表 3 送风参数表
Tab.3 Air distribution parameter table

位置	装配高度 m	型号	尺寸 D mm	风量 Q $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	台数 台	温差 $^{\circ}\text{C}$	送风速度 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
进站广厅	5.44	AAHM20-4S	500×250	17 500	1	8	4.4
候车大厅	5.44	AAHM35-4S	600×300	86 500	3		5.2

1.4 气流组织方案

本文利用 CFD 软件 Airpak 建立候车厅建筑模型,针对最大负荷工况下,选取两种不同的气流组织形式进行模拟研究,通过模拟研究确定调整方案下的气流组织形式是否能够更好的满足人们对候车环境的热舒适性要求.

- 原有方案(上送下回):顶板喷口送风,下部回风,空调送风参数为 $T=18^{\circ}\text{C}$, $\varphi=50\%$.
调整方案(上送上回):顶板喷口送风,上部回风,空调送风参数为 $T=18^{\circ}\text{C}$, $\varphi=50\%$.

2 数值模拟结果分析

在模拟计算中, 为了更加清晰的描述模拟计算结果以及分析问题的方便, 选择垂直于 y 轴, 人员活动区域 (即高度 2 m 以下) 的水平面作为描述进站广厅和普通候车厅的代表性截面, 分别研究这两种方案下候车厅室内温度场、速度场以及 PMV/PPD 的分布情况.

2.1 上送上回方式室内气流组织模拟结果

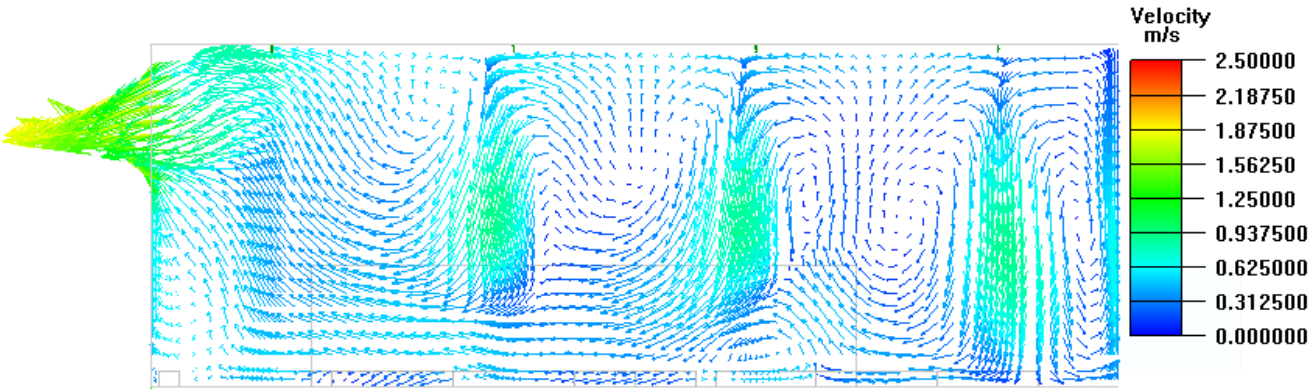


图 3 (a) Z=5.25m 上回风截面速度矢量分布
Fig.3 (a) Z=5.25m Section velocity vector distribution of the upper return air

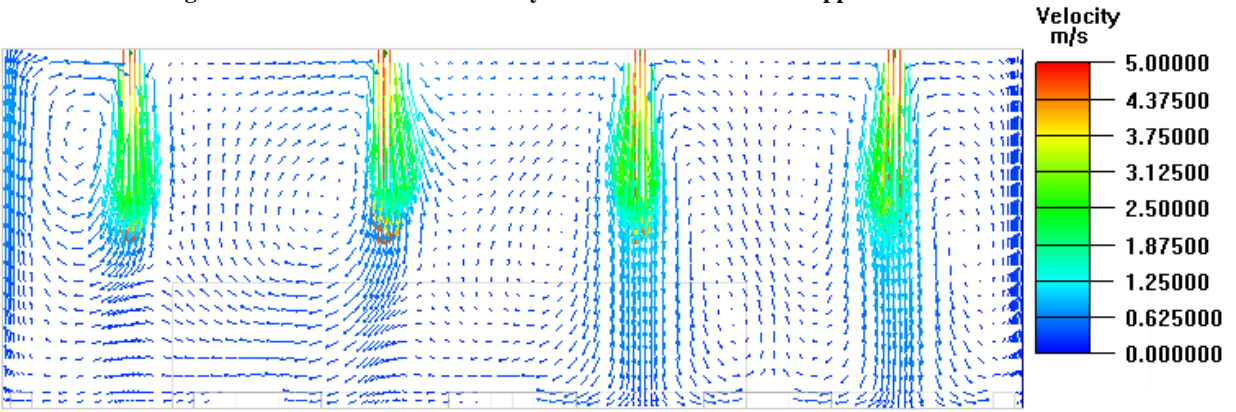


图 3 (b) Z=19.5m 上回风截面速度矢量分布
Fig.3 (b) Z=19.5m Section velocity vector distribution of the upper return air

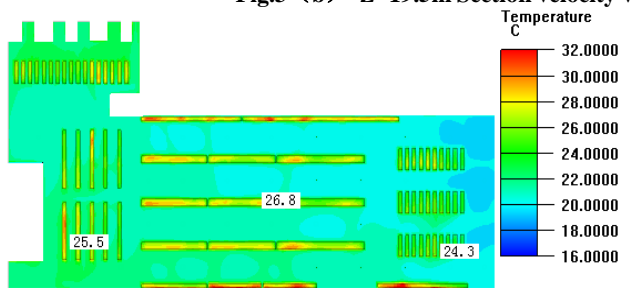


图 4 (a) 上回风截面温度分布
Fig.4 (a) Section temperature distribution

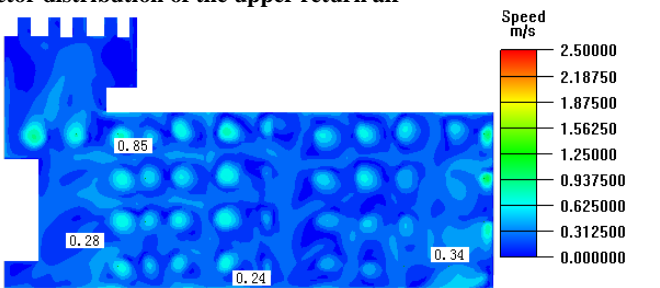


图 4 (b) 上回风截面风速分布
Fig.4 (b) Section velocity distribution

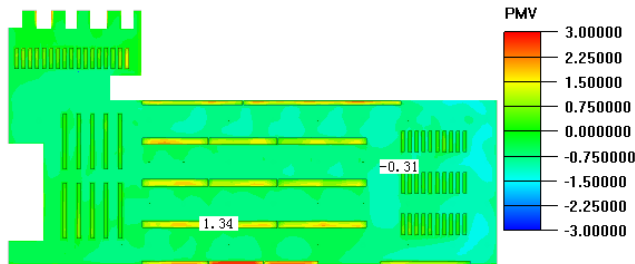


图 4 (c) 上回风截面 PMV 分布
Fig.4 (c) Section PMV distribution

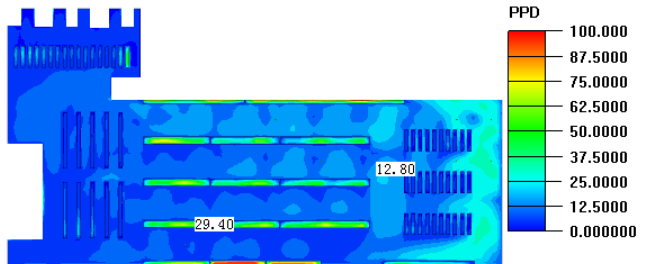


图 4 (d) 上回风截面 PPD 分布
Fig.4 (d) Section PPD distribution

上送上回截面图的温度值、风速值、PMV 以及 PPD 值如图 3~4 所示。图 3 和图 4 (b) 分别为过回风口、喷口的纵向截面 ($Z=5.25\text{ m}$, $Z=19.5\text{ m}$), 以及水平截面 $Y=1.5\text{ m}$ 处的风速分布图。从图 3 可以看出, 气流分布形式主要有涡流、贴附射流以及回流。喷口正下方气流有急剧下降, 由于回风口处于上部, 产生的涡流回流现象较为明显, 有利于调节候车厅中下部空气温度。比较明显的是, 候车人员活动区域正好处于两个涡流的回流区, 保证了该区域速度和温度的均匀性, 且速度在水平方向存在明显的衰减, 容易满足人体舒适性要求。如图 4 (b) $Y=1.5\text{ m}$ 风速平面图所示, 候车厅及进站广厅人员活动区域的大部分都能将气流速度控制在 0.3 m/s 以下, 对人体不会产生强烈的吹风感。但由于上喷口送风所产生的局部过冷以及上风口的设置使得喷口往下直吹风速衰减慢, 在喷口处风速较大, 同时造成中央喷口附近存在局部空气滞留区。图 4 (a) 为水平截面温度分布图, 除了南北面座椅靠墙区域温度略高外, 其他区域的温度基本维持在 $23^{\circ}\text{C}\sim 27^{\circ}\text{C}$, 基本符合设计要求。图 4 (c)、(d) 所示热舒适性指标 PMV 总体处于 -0.5 到 1.4 的范围以内, 即对应人体从“稍凉”到“稍暖”的热感觉, 在回风口及中央座椅附近区域不适感显著; PPD 分布平均值为 17.6% , 远离回风口区域不满意百分比较低, 中央座椅区域不满意百分比较高。

2.2 上送下回方式室内空气组织模拟结果

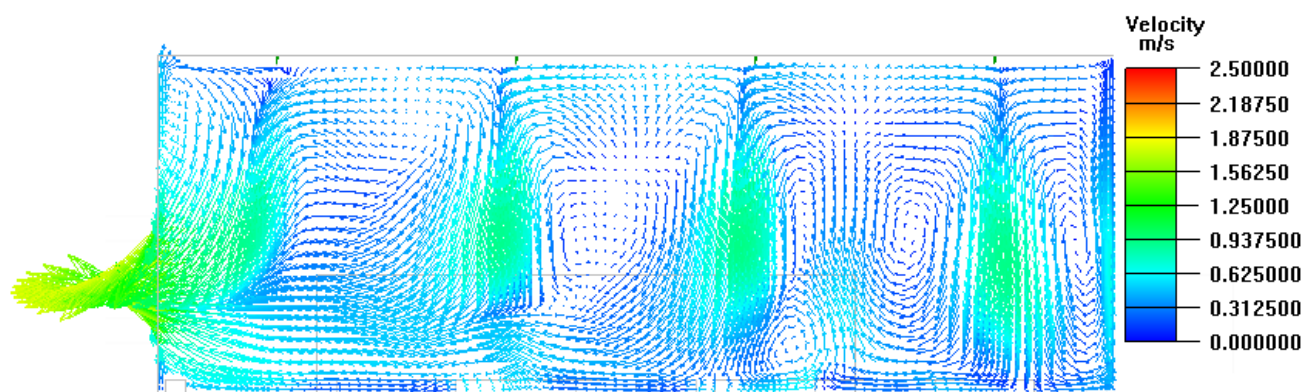


图 5 (a) $Z=5.25$ 下回风截面速度矢量分布

Fig.5 (a) $Z=5.25\text{m}$ Section velocity vector distribution of the lower return air

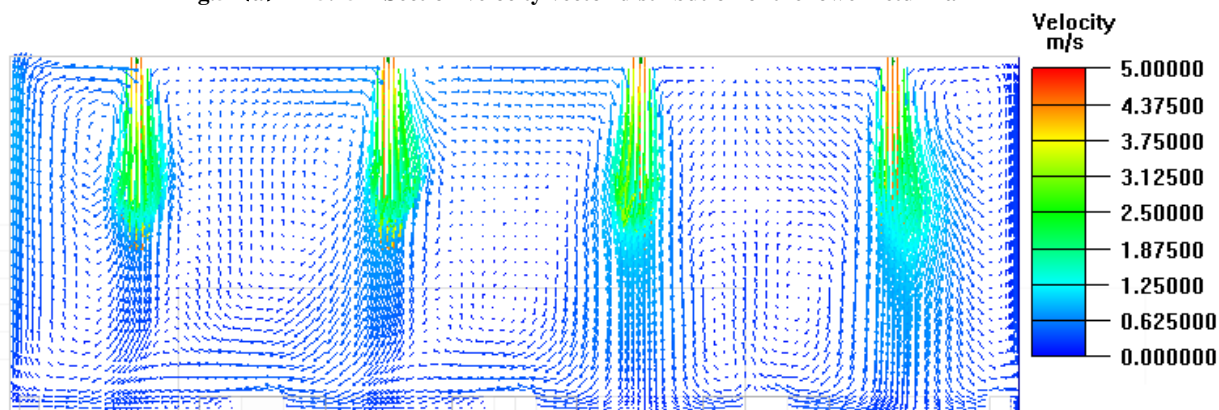


图 5 (b) $Z=19.5$ 下回风截面速度矢量分布

Fig.5 (b) $Z=19.5\text{m}$ Section velocity vector distribution of the lower return air

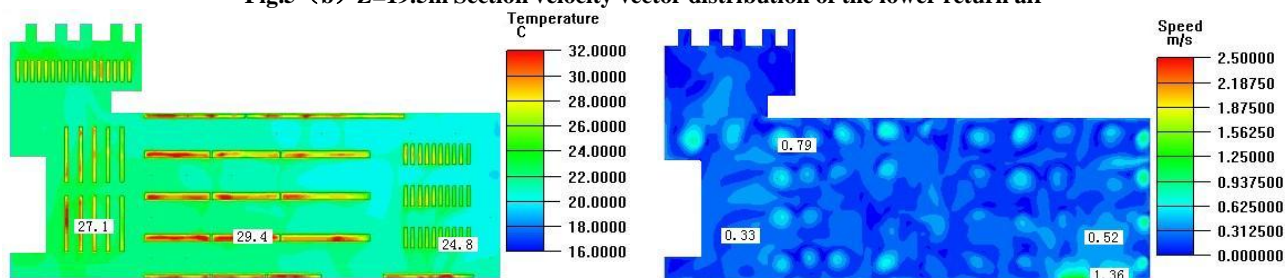


图 6 (a) 下回风截面温度分布

Fig.6 (a) Section temperature distribution

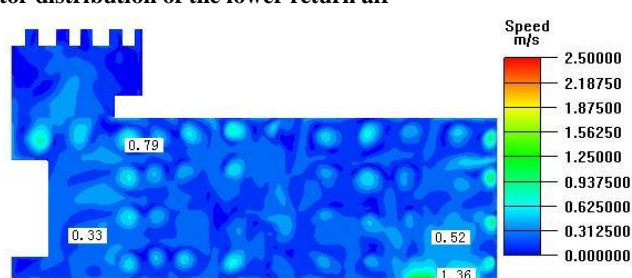


图 6 (b) 下回风截面风速分布

Fig.6 (b) Section velocity distribution

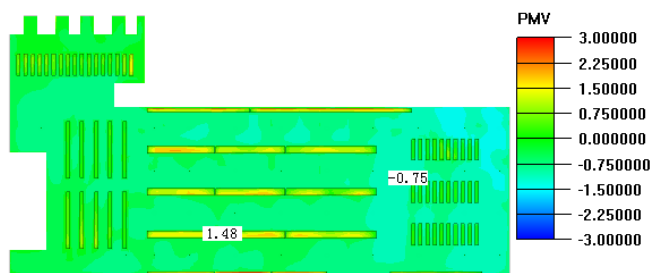


图 6 (c) 下回风截面 PMV 分布

Fig.6 (c) Section PMV distribution

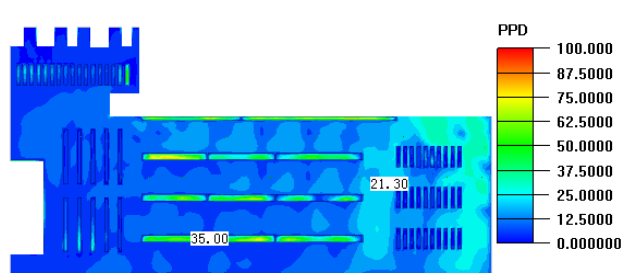


图 6 (d) 下回风截面 PPD 分布

Fig.6 (d) Section PPD distribution

上送下回截面图的温度值、风速值、PMV 以及 PPD 值如图 5~6 所示。图 5 和图 6 (b) 分别为过回风口、喷口的纵向截面 ($Z=5.25\text{ m}$, $Z=19.5\text{ m}$), 以及水平截面 $Y=1.5\text{ m}$ 处的风速分布图。从图 5 可以看出, 从喷口送出的高速射流大量进入候车区域后, 由于射流作用和房间下部出风口的卷吸作用, 在候车厅下部回流效果显著, 容易满足候车区新鲜空气的要求。但由于采用下回风的方式 (回风口底面标高 $Y=1.3\text{ m}$) 导致在人员活动区域范围内, 风速衰减慢, 在远离回风口处有一明显涡流区域, 气流分布较差, 速度分布不均匀。如图 6 (b) $Y=1.5\text{ m}$ 风速平面图所示, 候车厅及进站广厅人员活动的大部分区域风速也都大于 0.3 m/s , 在回风口附近最大风速接近 1.4 m/s , 很有可能在人员区域导致吹冷风感。图 5 (a) 为水平截面温度分布图, 可以看出进站广厅大部分候车区域温度达到 27°C 以上, 在中央座椅的局部区域温度最高达 29.4°C , 仅从温度场的角度看, 这一既有的气流组织形式已经无法满足当下人们对热舒适性的基本要求。通过图 5 (c)、(d) PMV 以及 PPD 的模拟结果可以清楚的看出, 整个候车区域的 PMV 值分布在 -0.8 到 1.5 之间, 即人体的冷热感有较为明显的差异性; PPD 分布平均值为 23.6% , 表明人们对该空调系统的不满意度已远远超过标准所推荐取 $\text{PPD} \leq 10\%$ 的范围, 在距离回风口较近区域不满意度百分比高。

3 两种不同工况模拟结果对比分析

根据 GB50189-2005 《公共建筑节能设计标准》中提供的《空气调节系统室内计算参数表》, 对于类似于火车站候车厅大堂、过厅类大空间的要求, 夏季空气调节室内设计温度范围为 $26^\circ\text{C} \sim 28^\circ\text{C}$, 室内风速应控制在 $0.15 \sim 0.3\text{ m/s}$ 之间; 在 ISO7730 国际标准中对热舒适性指标 PMV-PPD 的推荐值为: PMV 值在 $-0.5 \sim 0.5$ 之间, $\text{PPD} \leq 10\%$ 。

通过对比以上两种不同气流组织形式的模拟结果, 分别从温度场、风速场、热舒适性指标 PMV 及 PPD 值进行分析:

(1) 从温度场结果来看, 采用上送上回风时, 除南北靠墙处局部区域温度略高外, 其他区域的温度基本都控制在 28°C 以下, 在座椅两侧走道区域温度偏低, 但考虑到火车站候车厅自身人员密度随客流量峰值不断变化的特点, 温度偏低可以保证在出现客流超高峰时候车厅区域仍能保持较为有效的制冷环境; 而上送下回风气流组织形式下在中央座椅区域的温度显然已经无法满足设计要求, 其主要原因可能是因为在夏季冷气流有明显的沉降作用, 采用下回风方式使冷气流沉降效果更加显著, 因此射流距离有所下降, 导致冷气流无法完全到达人员活动半平面, 造成温度偏高。

(2) 对比速度矢量分布发现, 在人员活动区域, 下回风方式下的气流分布较为紊乱, 并伴有局部涡流现象, 而采用上回风的气流组织形式就能在一定程度上解决这一问题。从风速表来看, 上送上回风在整个候车区域形成的速度场比较理想, 基本都小于 0.3 m/s , 但也存在风速小的地方, 特别是候车厅中部喷口附近区域出现局部空气滞留区, 会对除湿效果有一定的负面影响, 建议适当调节送风速度; 上送下回风在回风口周围区域风速较大, 最大值达到 1.36 m/s , 该值已远远超出了控制范围, 会使人产生明显吹风感。

(3) 结合 PMV 和 PPD 对比人体热舒适性指标可以看出, 两种工况下的模拟结果都不能很好满足候车厅人体区域热舒适性的要求。在中央座椅区域 PMV 值均接近 1.5 即热感觉普遍偏暖, 下回风回风口部分区域 PMV 值超过 -0.5 , 说明有明显的热感觉冷点和热点。PPD 值显示大部分区域人们对热环境不满意的百分数都超过 10% , 在座椅区域甚至达到 30% 左右, 都表述为偏离舒适范围。

4 结 语

本文通过 CFD 技术对两种不同气流组织方式下火车站候车厅室内热环境进行了数值模拟,分别得到候车厅内温度场、速度场、PMV 以及 PPD 值,经过对比分析表明调整方案,即上送上回风的气流组织形式相比上送下回风所营造的气流均匀性更好一些,并且在一定程度上能够起到改善候车环境温度的作用。

参考文献 References

- [1] NIELSON P V. Prediction of airflow and comfort in air-conditioned spaces [J].ASHRAE transactions 81,1975(11):247-251.
- [2] BAKER A J,RICHARD M KLESON,ELLIOTT B GORDAN. Computational fluid dynamics a two-edged sword [J].ASHRAE Journal,1997(8):5-51.
- [3] Berglund L. Interrelationship between temperature and humidity and perception of air quality and comfort [J].Proc Clime 2000,2001(7):1-6.
- [4] 张傲.体育馆下送风气流组织模拟研究及其优化[D].西安:西安建筑科技大学,2010.
ZHANG Ao. Numerical simulation and optimization on under-floor air supply system in a gymnasium building[D].Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology,2010.
- [5] 陈晓春,朱颖心,王元.零方程模型空调通风房间气流组织数值模拟的研究[J].暖通空调,2006,36(8):19-24.
CHEN Xiaochun, ZHU Yingxin, WANG Yuan. Airflow simulation in air-conditioned and ventilated rooms with zero-equation mode[J].HV & AC,2006,36(8):19-24.
- [6] 谭良才,陈沛霖.高大空间恒温气流组织设计方法研究[J].暖通空调,2002,32(2):1-4.
TAN Liangcai, CHEN Peilin. Design method of air distribution of constant temperature air conditioning systems in high and large spaces[J].HV & AC,2002,32(2):1-4.
- [7] 赵彬,李先庭,马晓钧,等.体育馆类高大空间的气流组织设计难点及对策[J].制冷与空调,2002,4(2):10-14.
ZHAO Bin, LI Xianting, MA Xiaojun, et al. The difficulty and solution of indoor airflow pattern designing for gymnasium[J].Refrigeration & Air-conditioning,2002,4(2):10-14.
- [8] JELENA S,CHEN Q Y. Validation of zero equation turbulence model for complex indoor airflow simulation[J].ASHRAE Trans,1999(105):414-427.
- [9] 陶文铨.数值传热学[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2001.
TAO Wenquan.Numerical heat transfer[M].2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press,2001.

Study on different forms of return air indoor thermal environment in the large space of Xi'an Railway Station

DI Yuhui¹, XU Zilong¹, DENG Baoshun²

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048,China;

2. China Railway First Survey and Design Institute Group co., LTD, Xi'an, 710043,China)

Abstract: In order to improve the Xi'an railway station waiting room within the demands of thermal comfort, CFD simulation software -Airpak were used to numerically simulate the two different air distributions scheme (up-inlet and up-outlet, up-inlet and down-outlet), with waiting room of velocity field, temperature field, thermal comfort index PMV and PPD. Through comparison and analysis, verify the feasibility of the optimization scheme of air distribution organization was verified. The results show that the up-inlet and down-outlet on the uniformity of air distribution organization is better. Results in the paper provide reference and guide for the future reconstruction of Xi'an railway station in air conditioning system optimization design and air distribution forecasting.

Key words: waiting room; air distribution; temperature field; velocity field ;Thermal comfort

(本文编辑 沈波)