

文章编号: 1671-6612 (2021) 06-809-06

铁路客运站房冬季复合气流供暖的数值模拟研究

刘跃登¹ 张济辞² 张涂静娃² 毕海权¹ 雷波¹ 余涛¹

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031)

【摘要】 大空间建筑冬季热风供暖易出现热气流上浮、垂直温差过大、舒适性差和能耗高等问题。为了抑制送风气流上浮,提出在原送风气流上部附加控制气流的复合气流送风方案,采用 CFD 数值模拟的方法对典型铁路客运站候车厅单一气流送风和复合气流送风的流场、温度场及节能性进行了分析,并进一步探讨了影响复合气流送风效果的因素。研究表明复合气流送风方案可将人员活动区的平均温度从 16.0℃提高至 18.3℃,节能率可达到 22.8%,具有较好的舒适性和节能性。在一定范围内,随着控制气流送风速度或送风角度的增加,人员工作区的平均温度提升不大,而平均速度大幅增加,改变控制气流的喷口尺寸则对人员活动区热环境的影响较小。

【关键词】 铁路客运站; 气流组织; 复合气流送风; 热舒适; 数值模拟

中图分类号 TU832 文献标识码 A

Numerical Simulation of Coupled Airflow Heating in Railway Stations in Winter

Liu Yuedeng¹ Zhang Jici² Zhangtu Jingwa² Bi Haiquan¹ Lei Bo¹ Yu Tao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Heating in large space buildings in winter always has problems of hot air floating, excessive vertical temperature difference, poor comfort and high energy consumption. In order to suppress the upward floating of the supply airflow, this paper proposes a coupled air supply scheme with an additional control airflow above the original supply airflow. The CFD numerical simulation method is used to study and analyze the velocity distribution, temperature distribution and energy saving of the single air supply and the coupled air supply of a typical railway station. The factors influencing the effect of coupled airflow are further analyzed. Results show that the coupled air supply scheme can increase the average temperature of the occupied zone from 16℃ to 18.3℃, and the energy-saving rate reaches 22.8%. The air supply scheme has better thermal comfort and energy saving. Within a certain range, when the air supply speed or angle of the control airflow increases, the average temperature of the occupied zone has not much improvement, while the air speed increases significantly. But changing the nozzle size of the control airflow has very few effect on the thermal environment of the occupied zone.

【Keywords】 railway station; air distribution; coupled air supply; thermal comfort; numerical simulation

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC0705000); 国家自然科学基金青年科学基金项目(编号: 51708453)

作者简介: 刘跃登(1996.7-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 592931161@qq.com

通讯作者: 余涛(1987.8-), 男, 博士, 讲师, E-mail: yutao073@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2020-12-20

0 引言

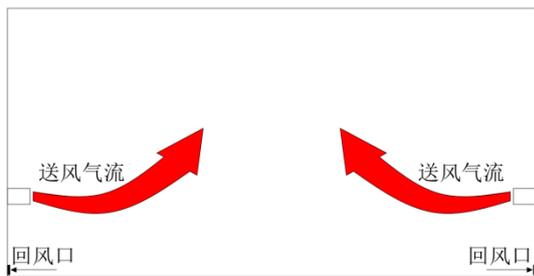
目前在大空间建筑空调设计中广泛采用的空

调技术是分层空调,与全室空调相比,分层空调在夏季空调供冷期可节省近 30%的冷量,但在冬季供

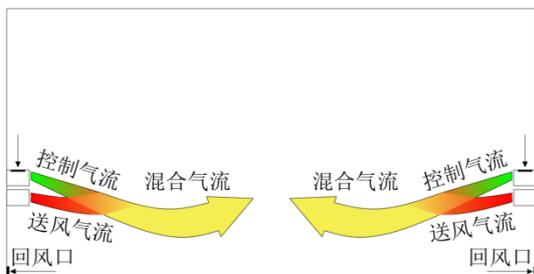
暖时,受浮升力影响容易出现“热气上浮,冷气下坠”现象。空调热风未能送到人员活动区就已上浮到上部非空调区,不仅难以满足室内舒适性要求,而且造成巨大的能源浪费^[1]。目前学者们对改善分层空调供暖效果的研究主要集中在调整送风参数^[2,3]和采用“地板辐射+喷口送风”的复合采暖方式^[1,4-6]对流场、温度场和节能效果的影响,但研究结果表明仅调整送风参数并不能很好地达到热舒适和节能的平衡,而采用地板辐射供暖则有造价高、热惰性大、预热慢和安装困难等问题,因而在铁路客运站的实用性受到限制。考虑到喷口送风热气流的上浮现象严重,本文提出利用与室内等温的射流压制送风气流上浮的复合气流送风方案,并采用数值模拟的方法分析典型铁路客运站候车厅采用复合气流送风方案的热舒适性和节能性,为该方案在工程上的应用给予指导。

1 复合气流送风方案

传统的分层空调系统常采用单一气流送风方案进行供暖,送风气流易受浮升力影响而严重上浮。为了抑制送风气流上浮,本文提出复合气流送风方案,即在原有的热风供暖喷口上侧使用复合气流装置,该装置以喷口送风的方式将从上部非空调区回收的空气送出,以达到压制送风气流的作,使送风气流能送至人员活动区,热量得以有效利用。不同送风方案的示意图如图 1 所示。



(a) 单一气流送风方案



(b) 复合气流送风方案

图 1 不同送风方案示意图

Fig.1 Schematic diagram of different air supply schemes

2 复合气流方案气流组织的评价方法

气流组织的好坏,不仅直接影响室内的空调效果,而且也影响空调系统的能耗量^[7]。本文主要从舒适性和节能性两个方面对复合气流方案气流组织效果进行评价。

2.1 舒适性评价

空气温度是影响热舒适的主要因素,它直接影响人体通过对流的显热交换,而气流速度对人体体温调节也有着重要作用,空气的流动速度过大可能导致有吹风感^[8]。本文定义外墙以内 1m、垂直方向上地面至 1.8m 的区域为人员活动区^[9],采用平均温度和平均速度评价人员活动区的舒适性,并结合《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》^[10]规定人员活动区的平均温度达到 18℃时满足温度舒适性要求。

2.2 节能性评价

考虑到实际工程应用中,复合气流送风方案在降低采暖供热量的同时也增加了风机的运行能耗,故本文引入实际节能率 λ 分析该方案的节能效果。

实际节能率 λ ^[11]:将采用复合气流送风方案后降低的采暖供热量等效为提供同等的热量热泵所需能耗,减去控制气流风机的运行能耗,对比单一气流送风时的采暖热泵能耗得到实际节能率,计算公式见 (1)~(4)。

$$\lambda = \frac{W_{1p} - W_{2p} - W_{fan}}{W_{1p}} \times 100\% \quad (1)$$

$$W_{1p} = \frac{W_1}{\varepsilon} \quad (2)$$

$$W_{2p} = \frac{W_2 - W_{fan} \times 0.8}{\varepsilon} \quad (3)$$

$$W_{fan} = \frac{L \cdot P}{\eta} \quad (4)$$

式中, W_1 和 W_{1p} 分别为单一气流送风方案下的采暖供热量和热泵采暖能耗, kW; W_2 和 W_{2p} 分别为复合气流送风方案下的采暖供热量和热泵采暖能耗, kW; ε 为热泵采暖平均能效比; W_{fan} 为风机功率, kW; L 为风机的风量, m^3/s ; P 为风机的全压, kPa; η 为风机的运行效率。

3 数值计算模型

为研究复合气流送风方案的具体效果, 本文采用 CFD 数值模拟的方法, 建立了典型铁路客运站候车厅模型, 对复合气流送风方案的热舒适性和节能性进行了分析。

3.1 几何模型

本文以中小型车站的候车厅为计算对象^[11], 长宽高分别为 100m、40m、16m。考虑对称性, 取其 1/4 进行建模, 长 50m、宽 20m、高 16m, 忽略喷口及回风口与同侧墙壁之间的间隔, 典型铁路客运站候车厅简化模型如图 2 所示。

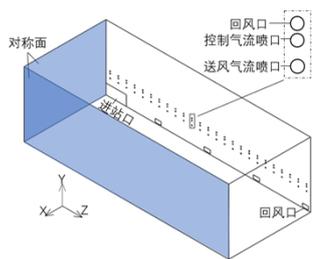


图 2 典型铁路客运站候车厅简化模型

Fig.2 Simplified model of waiting hall of typical railway station

3.2 边界条件

数值计算中, 边界条件的设定关系到计算结果的准确性^[7]。本文以拉萨气候参数作为计算条件, 并采用《实用供热空调设计手册》^[12]的计算方法, 计算得到典型铁路客运站热负荷为 84.33kW, 其中外墙及屋顶的热流密度分别为 -31.23W/m^2 和 -8.94W/m^2 , 将人员散热及照明负荷、设备负荷等简化地均匀加在地面上, 地面的热流密度为 35.32W/m^2 。出口边界设置为自由出流边界。入口边界设为速度进口, 其中将渗透风入口简化为进站口, 进风速度和温度分别为 0.18m/s 和 -7.6°C , 送风喷口的具体送风参数如表 1 和表 2 所示。

3.3 气流组织方案

针对典型铁路客运站单一气流送风方案进行气流组织设计计算, 具体参数见表 1, 单一气流送风方案记为工况 1。

表 1 单一气流设计参数

Table 1 Design parameters of single airflow

送风温度 $^\circ\text{C}$	送风速 度 m/s	送风 角度 $^\circ$	喷口 高度 m	喷口 间距 m	喷口直 径 mm	喷口 个数
30	4.92	15	4	2	250	25

通过对工况 1 的模拟计算, 得到了送风气流喷口上部的空气温度约为 20°C 。保证送风气流的送

风参数不变, 在送风气流喷口上部 1m 处设置等大小的控制气流送风喷口, 控制气流送风温度设为 20°C , 送风速度为 6m/s , 送风角度为 15° , 以此作为复合气流送风方案的基础工况, 记为工况 2。

考虑到复合气流送风效果受到很多因素的影响, 故在下一节对两种送风方案模拟结果进行分析的同时, 研究复合气流送风方案下, 控制气流送风速度、送风角度和喷口尺寸等三个方面对气流组织的影响, 具体控制气流参数如表 2 所示。

表 2 控制气流参数

Table 2 Parameters of control airflow

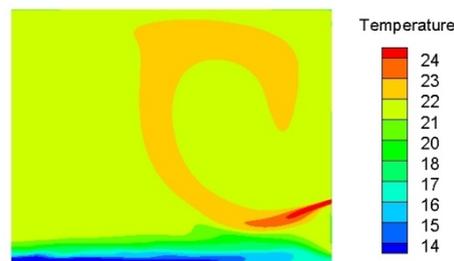
工况	温度 $^\circ\text{C}$	速度 m/s	角度 $^\circ$	喷口直径 m
2	20	6	20	0.25
3	20	4	20	0.25
4	20	8	20	0.25
5	20	6	15	0.25
6	20	6	30	0.25
7	20	6	20	0.2
8	20	6	20 </td <td>0.315</td>	0.315

4 模拟结果及分析

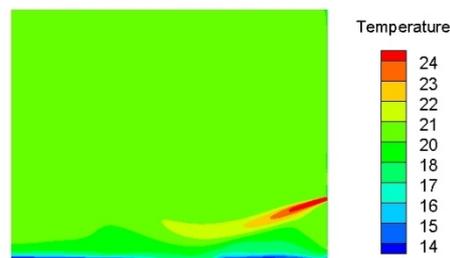
经过模拟计算得到了各工况在典型铁路客运站的气流组织状况, 通过对比分析进一步得到复合气流送风效果及影响因素的相关结论。

4.1 两种送风方案的效果对比

不同送风方案下 $Z=25\text{m}$ 剖面的温度分布如图 3 所示。



(a) 单一气流送风方案



(b) 复合气流送风方案

图 3 不同送风方案下 $Z=25\text{m}$ 剖面的温度分布

Fig.3 Temperature distribution of Z=25m under different air supply schemes

结合不同送风方案下垂直方向的温度分层情况（见图 4），单一气流送风方案下人员活动区的平均温度为 16℃，不满足活动区温度达 18℃的设计要求。采用复合气流送风方案能够减弱送风气流的上浮，送风气流的热量得以有效利用，人员活动区的温度显著增加，平均温度达 18.3℃，满足设计要求的同时有效降低了上部非空调区的温度，大空间的温度分层现象得到缓解。

对于单一气流送风方案，调整送风温度为 28℃、送风速度为 8m/s 方可满足人员活动区温度达到 18℃的设计要求，但相比复合气流送风方案需要增加 30.8kW 的热量。热泵采暖平均能效比 ϵ 按 2.5 计算^[13]，控制气流风机全压为 258Pa，风量为 7.36m³/s，运行效率 η 取 72%，根据公式（1）~公式（4）可得到复合气流送风方案的节能率 λ 达到 22.8%，节能效果显著。

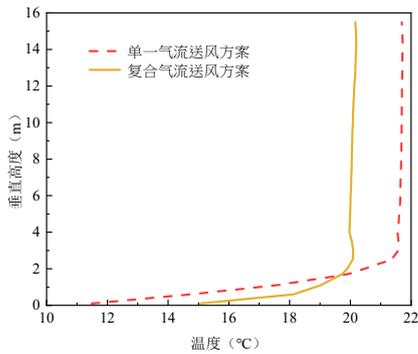


图 4 不同送风方案下垂直方向的温度分层

Fig.4 Vertical temperature stratification under different air supply schemes

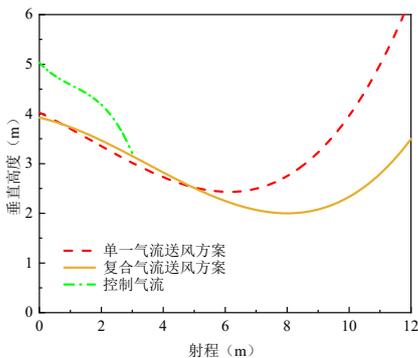


图 5 不同送风方案下 Z=25m 剖面的射流轴心轨迹

Fig.5 Trajectory of jet axis of Z=25m under different air supply schemes

为更直观的对比射流的运行轨迹，做出不同工况在 Z=25m 处的射流轴心轨迹，如图 5 所示。单一气流送风方案下送风气流自喷口射出后很快达到最大落差，采用复合气流送风方案后，送风气流受到控制气流的压制，送风落差和送风射程显著增大，射流得以更接近人员活动区进行热量交换。

4.2 复合气流送风效果的影响因素分析

复合气流送风效果受到很多因素的影响，保证送风气流的送风参数不变，分别研究控制气流送风速度、送风角度和喷口尺寸等三个方面对人员活动区热环境的影响。

4.2.1 控制气流送风速度的影响

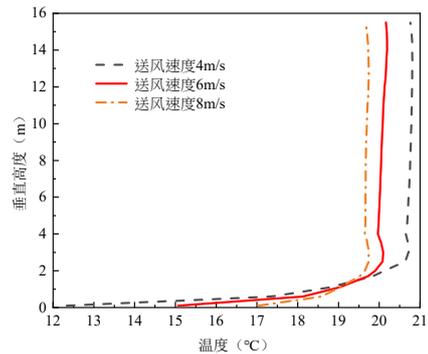


图 6 不同控制气流送风速度下垂直方向的温度分层

Fig.6 Vertical temperature stratification under different air supply speeds of control airflow

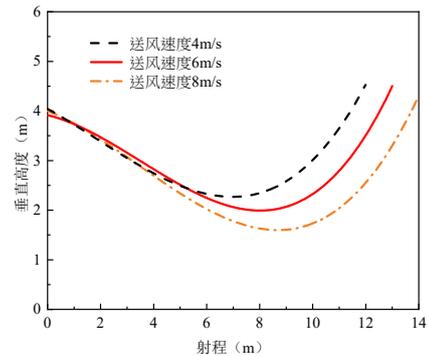


图 7 不同控制气流送风速度下 Z=25m 剖面的射流轴心轨迹

Fig.7 Trajectory of jet axis of Z=25m under different air supply speeds of control airflow

不同控制气流送风速度下的温度分层情况和射流轴心轨迹如图 6 和图 7 所示。随着控制气流送风速度的增加，控制气流对送风气流的压制作用有所增强，具体表现在送风落差、送风射程的增加和垂直温差的减小。从人员活动区的热环境来看（见

表 3), 除送风速度为 4m/s 的工况外, 其余两个工况的人员活动区平均温度均达到了 18℃ 以上, 当控制气流送风速度达到 8m/s 时, 人员活动区平均温度最高, 但平均风速也高达 0.48m/s, 舒适性欠佳, 而且送风速度过大还会导致风机能耗变高, 不利于节能。

表 3 不同控制气流送风速度下人员活动区的热环境

Table 3 Thermal environment of the occupied zone under different air supply speeds of control airflow

送风速度	Mean T (°C)	Mean V (m/s)
4m/s	17.5	0.24
6m/s	18.3	18.7
8m/s	0.30	0.48

4.2.2 控制气流送风角度的影响

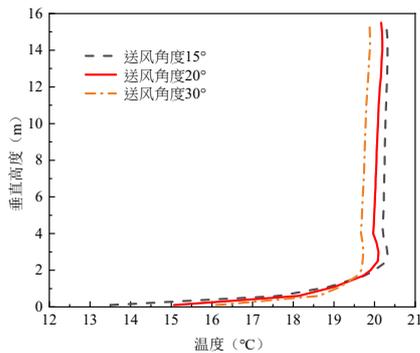


图 8 不同控制气流送风角度下垂直方向的温度分层

Fig.8 Vertical temperature stratification under different air supply angles of control airflow

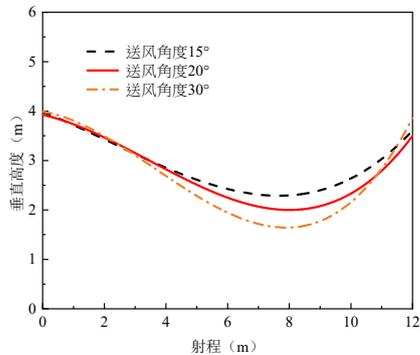


图 9 不同控制气流送风角度下 Z=25m 剖面的射流轴心轨迹

Fig.9 Trajectory of jet axis of Z=25m under different supply angles of control airflow

不同控制气流送风角度下的温度分层情况和射流轴心轨迹如图 8 和图 9 所示。加大控制气流的送风角度可增加送风气流的送风落差, 当送风角度

增大到 30° 时, 射流轴心的垂直高度降至 1.6m, 垂直温差也有明显降低, 控制气流的压制作用显著。从人员活动区的热环境来看 (见表 4), 随着控制气流送风角度的增加, 人员活动区的平均温度提升不大, 而平均速度大幅增加, 过大的风速会造成强烈的“吹风感”, 不利于人体热舒适。

表 4 不同控制气流送风角度下人员活动区的热环境

Table 4 Thermal environment of the occupied zone under different air supply angles of control airflow

送风角度	Mean T (°C)	Mean V (m/s)
15°	20°	30°
17.9	18.3	18.7
0.25	0.30	0.44

4.2.3 控制气流喷口尺寸的影响

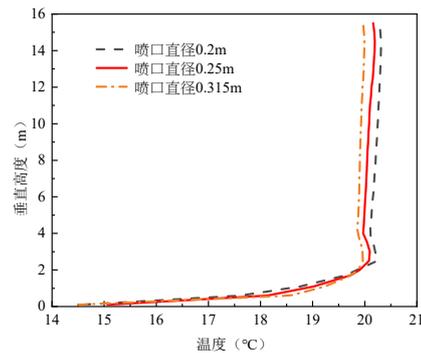


图 10 不同控制气流喷口尺寸下垂直方向的温度分层

Fig.10 Vertical temperature stratification under different nozzle sizes of control airflow

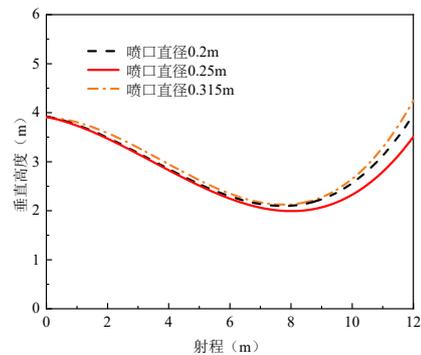


图 11 不同控制气流喷口尺寸下 Z=25m 剖面的射流轴心轨迹

Fig.11 Trajectory of jet axis of Z=25m under different nozzle sizes of control airflow

不同控制气流喷口尺寸下的温度分层情况和射流轴心轨迹如图 10 和图 11 所示。改变控制气流喷口尺寸对送风气流压制作用的影响不大, 射流轴

心的最大落差基本一致,但由于控制气流喷口的送风量随着直径的增大而增加,所以控制气流自喷口射出后沿程的卷吸量增大,与送风气流的混合作用加强,对比送风落差随着控制气流送风速度的增大而明显增加的结论,认为控制气流对送风气流的压制作用以动量压制为主,混合作用影响相对较小。

不同控制气流喷口尺寸下人员活动区的热环境如表5所示。当控制气流喷口直径从0.2m增至0.315m时,人员活动区的平均温度从17.9℃提升至18.6℃,平均速度从0.28m/s增至0.32m/s,增长较小,认为在一定范围内,改变控制气流的喷口尺寸对人员活动区热环境的影响不大。

表5 不同控制气流喷口尺寸下人员活动区的热环境

Table 5 Thermal environment of the occupied zone

under different nozzle sizes of control airflow

喷口直径	Mean T (°C)	Mean V (m/s)
0.2m	17.9	0.28
0.25m	18.3	0.30
0.315m	18.6	0.32

5 结论

本文通过数值模拟的方法,对典型铁路客运站候车厅采用复合气流供暖方案的效果进行了研究分析,结论如下:

(1) 相比单一气流送风,复合气流送风方案可将人员活动区的平均温度从16℃提高至18.3℃,节能率可达到22.8%,具有更好的舒适性与节能性。

(2) 在一定范围内,随着控制气流送风角度或送风速度的增加,控制气流对送风气流的压制作用越显著,但过大的送风角度或送风速度会导致人员活动区的风速过大,舒适性欠佳。

(3) 在一定范围内,改变控制气流的喷口尺寸对送风气流压制作用和人员活动区热环境的影响不大,认为控制气流对送风气流的压制作用以动量压制为主,混合作用影响相对较小。

参考文献:

- [1] 何列波.火车站候车厅冬季空调气流组织模拟研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [2] 杨德福.大空间分层空调对流热转移数值模拟研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [3] 李天一.合肥铁路客运南站空调气流组织的数值模拟研究[D].成都:西南交通大学,2013.
- [4] Chu G, Sun Y, Jing T, et al. A Study on Air Distribution and Comfort of Atrium with Radiant Floor Heating[J]. Procedia Engineering, 2017,205:3316-3322.
- [5] Peng S, et al. Study on load characteristics of different air conditioning systems in large space railway station[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019,238:012038.
- [6] 郝胜昌.基于数值仿真的某候车厅分层空调设计方案优化研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
- [7] 李琼.火车站空调气流组织的数值模拟与优化[D].北京:西南交通大学,2005.
- [8] 纪秀玲,李国忠,戴自祝.室内热环境舒适性的影响因素及预测评价研究进展[J].卫生研究,2003,32(3):295-299.
- [9] Standard 55-2017, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy[S]. ANSI/ASHRAE Approved, 2017.
- [10] GB 50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [11] 谢方祥.铁路客站上部空间冬季热空气利用的可行性研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [12] 陆耀庆.实用供热空调设计手册(第二版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [13] 李立山,毕海权,陈霖,等. EnergyPlus 对被动太阳房热环境模拟准确性研究[J]. 制冷与空调,2016,30(6):720-723.
- [14] Strelets M. Detached eddy simulation of massively separated flows[C]. Aiaa Fluid Dynamics Conference & Exhibit, 2001:1-18.