

文章编号: 1671-6612 (2021) 06-889-05

高大空间建筑新型复合气流供暖系统可行性研究

曾仕豪¹ 张济辞² 王胜男² 毕海权¹ 雷波¹ 余涛¹

(1. 西南交通大学 成都 610031;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031)

【摘要】 高大空间供暖系统常采用分层空调, 但浮力作用会导致送风热射流上浮严重, 造成大量热量浪费且活动区舒适性差。提出一种在送风热射流上部附加控制气流的新型复合气流供暖方案, 利用控制气流压制送风热射流以减弱其上浮。采用 CFD 数值模拟方法建立典型铁路客站候车厅喷口送风模型, 对冬季供暖时有无控制气流作用下的室内空气流动和热环境进行模拟分析。结果表明该复合气流方案能有效减弱送风热射流上浮, 使射流的垂直和水平射程分别增加 40% 和 70% 以上, 并将活动区平均温度提高到 18°C 以上。

【关键词】 高大空间建筑; 热风供暖; 复合气流; 数值模拟
中图分类号 TU83 文献标识码 A

Feasibility Study on a Novel Heating System Using Coupled Airflow in Large Space Buildings

Zeng Shihao¹ Zhang Jici² Wang Shengnan² Bi Haiquan¹ Lei Bo¹ Yu Tao¹

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

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

【Abstract】 Stratified air-conditioning system is widely used for heating in large space buildings, but the supplied airflow largely floats due to the buoyancy effect, with a large amount of heat wasted and poor thermal comfort in the occupied zone. This paper proposes, a novel heating system using another airflow above the supplied airflow, which can suppress the heating jet and reduce the ascent of the jet. CFD numerical simulation is adopted to build the model of air jet system in the waiting hall of a typical railway station, and the indoor air flow pattern and the thermal environment when heating in winter with and without the extra jet are analyzed. Results show the airflow ascent is suppressed effectively using this novel heating system. Both the vertical flow range and the horizontal flow range are increased by above 40% and 70%. The average temperature in the occupied zone is increased to 18°C.

【Keywords】 large space buildings; warm air heating; coupled airflow; 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: 曾仕豪 (1996.11-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: zengshihao96@163.com
通讯作者: 余涛 (1987.8-), 男, 博士, 讲师, E-mail: yutao073@swjtu.edu.cn
收稿日期: 2020-12-21

0 引言

随着我国铁路网的快速发展, 有近 800 座高铁客运站已开通运营, 候车室占客站面积可达 50% 以上^[1], 通常为高大空间, 大型和特大型客站高度可达 40m 以上^[2], 一些寒冷地区客站和中小型客站候

车室高度也都在 15m 以上^[3,4]。实际需要空气调节的一般为下部 2~3m 内的工作区域^[5], 所以候车室供暖空调系统常采用分层空调。

冬季分层空调系统普遍采用单排喷口进行供暖, 温差引起的浮力作用会使送风热射流弯曲上浮,

导致空间内存在较强的温度分层现象。Togari S 等人^[6]建立了预测大空间垂直温度分布的简化模型。王新伟^[7]主要研究了风口位置对供暖效果的影响。任艳莉^[8]研究了不同送风角度、速度、温度和间距下的室内空气组织。有调研显示冬季采用喷口侧送热风时，渗透风、热浮力等因素导致候车厅底部活动区温度偏低^[9]。也有案例表明通过调整送风速度及角度等难以保证活动区舒适性^[10]。Mostafa Rahimi 等^[11]提出利用机械装置将房间上部热空气送到活动区，谢方祥^[12]则研究了类似的热回收机制在铁路客站的应用情况。

送风热射流上浮会导致热量浪费以及活动区舒适性低，上述改进措施有助于提高活动区温度，但有可能导致室内风速过高，并且没有减弱送风热射流的上浮，也缺乏实际案例验证。

本文提出一种新型复合气流送风方案以解决上述问题，此前尚未有文章研究通过压制送风热射流来改善其供暖效果，下面对其原理作详细说明并对其可行性进行分析。

1 复合气流送风方案

常用于冬季供暖的单排风口送风方案，其送风热射流会有明显上浮，如图 1 所示。本文提出的新型复合气流送风方案的主要改变是在单独的送风热射流上方附加控制气流，并在上部开回风口，控制气流直接利用上部空气进行循环，示意图如图 2 所示。控制气流向下倾角更大，温度接近室内设计温度，不会发生明显上浮，在速度完全衰减前与送风热射流相遇，并混合为一股气流，下文称为混合气流。控制气流含有向下的速度分量，与送风热射流混合时起到压制作用，减弱送风热射流的上浮；混合后射流流量增大，对周围空气卷吸更强，受室内扰流的影响也会减少，以上作用都使混合射流可到达更低更远处。

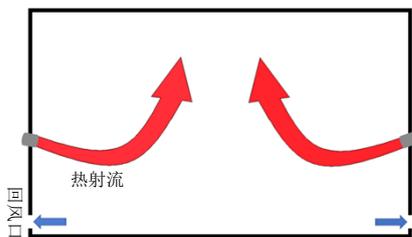


图 1 单排风口送风

Fig.1 Air supply using single nozzle

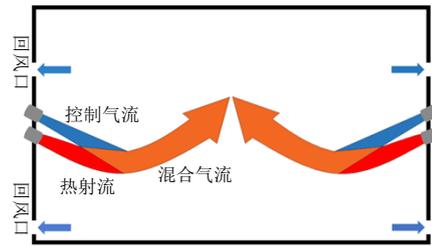


图 2 复合气流送风

Fig.2 Air supply using coupled airflow

通过在送风热射流上方附加控制气流，混合气流上浮更小，能覆盖更大的范围并充分将热量送入活动区，可以改善活动区舒适性和温度均匀性并减少热量浪费，同时避免单纯增大送风热射流速度导致部分区域风速过大的问题。

合理设计两风口的高度以及两股射流的送风参数，可以得到理想的压制效果和室内气流组织。调整两射流的速度以及角度也能一定程度上适应室内负荷以及气体流动的变化。

2 数值计算模型

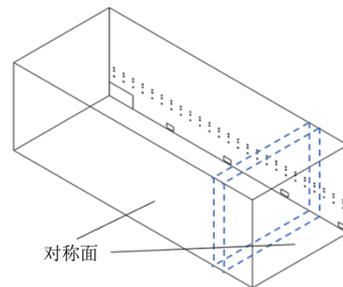


图 3 典型车站候车厅模型

Fig.3 Model of typical station waiting room

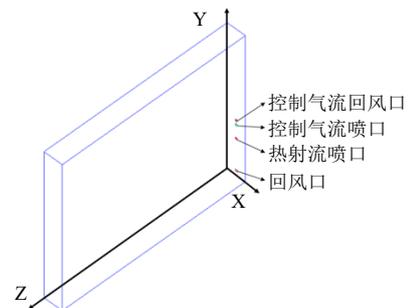


图 4 典型送风单元模型

Fig.4 Typical unit model of air supply

为进一步说明复合气流供暖方案的可行性，本文利用数值计算方法对两方案送风效果进行分析对比。几何尺寸参考西藏地区某铁路客站候车厅，

其 1/4 区域如图 3 所示。取候车厅中侵入冷风和射流都发展较充分的包含一个风口的典型区域建立几何模型, 长 20m、宽 2m、高 16m, 两喷口直径 0.25m, 送风热射流喷口中心距地面 4m, 控制气流喷口在上方 1.5m 处; 回风口为长 0.2m 的正方形, 中心距地面 0.5m, 控制气流回风口直径 0.25m, 在控制气流喷口上方 0.5m 处, 如图 4 所示。

文献[13]认为在研究流体汇流以及流动弯曲较大时 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型的计算结果更好, 故本研究采用该湍流模型, 壁面函数选用标准壁面函数。开启能量方程和重力项, 室内空气密度采用 Boussinesq 假设, 速度压力耦合选用 coupled 算法。

在 Fluent 中设置风口对面以及两侧面为对称边界, 喷口以及控制气流回风口为速度入口边界 (控制气流回风口速度为负值), 回风口为自由出流边界, 其余壁面为热流边界。按照节能设计标准^[4]选取相应参数, 室内设计温度取 18℃, 计算得到送风单元各壁面传热量, 并将渗透风以及室内发热量按一定比例分配到各壁面, 得到各壁面热负荷以及数值计算热流边界条件如表 1 所示。控制气流温度设为 18℃, 出口速度为 7.5m/s, 向下倾角 20°。

表 1 壁面热负荷以及热流密度值

Table 1 Heating load and heat flux of walls

壁面名称	热负荷 W	热流密度 W/m ²
风口所在墙	1491.5	-46.9
屋顶	849.3	-21.3
地面	1033.2	-26.0

室内负荷以及流场变化情况比较复杂, 喷口送风方案常通过调整送风角度以及送风速度来适应其变化, 以达到最佳送风效果。设置三个在送风速度和角度上互有差异的工况, 分别比较两种方案下的送风效果, 并分析不同工况下复合气流送风方案的可行性, 工况具体参数设置如表 2 所示。

表 2 不同工况送风热射流参数设置

Table 2 Supplied air jet parameters in different conditions

工况名称	送风速度 m/s	送风温度/℃	送风角度/°
工况 1	4.92	30	15
工况 2	5.86	28	15

工况 3	4.92	30	25
------	------	----	----

3 计算结果分析

3.1 工况 1

对两种方案进行数值模拟, 取 $X=1m$ 平面做出速度矢量图如图 5 和图 6 所示, 将该平面上具有相同 Z 值中速度最大的点作为射流轴心, 连接轴心点画出射流轴心轨迹, 两种方案下的射流轴心轨迹曲线如图 7 所示。

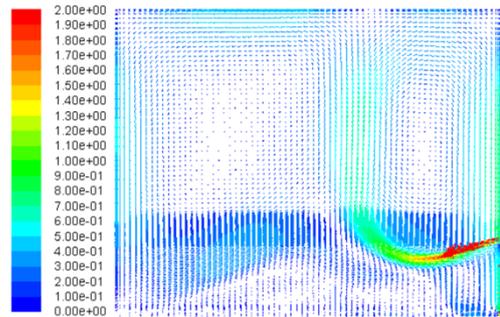


图 5 单排风口送风速度矢量图 (工况 1)

Fig.5 Velocity vector diagram of air supply using single nozzle (condition 1)

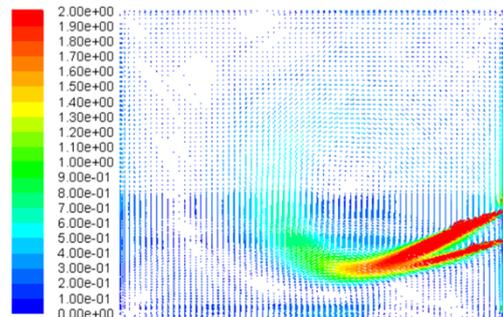


图 6 复合气流送风速度矢量图 (工况 1)

Fig.6 Velocity vector diagram of air supply using coupled airflow (condition 1)

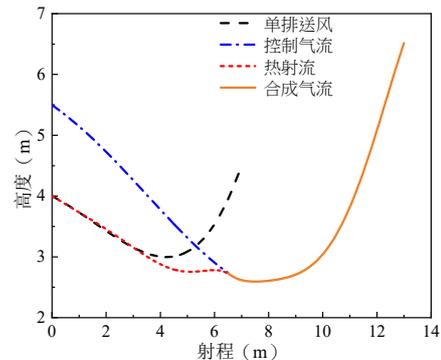


图 7 两种方案射流轴心轨迹曲线 (工况 1)

Fig.7 The jet axis locus curve of two schemes (condition 1)

取最低点与喷口中心点位置差值作为垂直射程和水平射程, 单排风口送风方案下垂直射程为

1m, 水平射程为 4.5m; 复合气流送风方案下垂直射程为 1.42m, 增加 42%, 水平射程为 8m, 增加 78%, 复合气流送风方案对射流射程改善效果明显。取距地面至 1.8m, 距外墙 1m 的空间为活动区, 计算得到单排风口送风方案下活动区平均温度约 17.0℃, 不满足设计要求; 其余空间平均温度为 18.9℃, 明显高于活动区, 热量浪费较多。复合气流送风方案下活动区平均温度为 18.0℃, 温度提高 1.0℃, 达到设计要求。

单排风口送风方案下送风热射流在浮力和室内扰流作用下严重上浮, 射流作用范围小, 热量难以到达活动区, 大部分堆积浪费在顶部, 导致底部平均温度较低。复合气流送风方案中射流上浮现象有明显减弱, 两股气流在约 $Z=6m$ 处混合为一股气流, 混合射流可以覆盖更远更低的范围, 将热量送入活动区。该方案下底部仍存在小部分区域因没有受到射流作用而温度较低, 但相对于单排风口送风时已有很大改善。

3.2 工况 2

对两种方案进行数值模拟, 取 $X=1m$ 平面做出速度矢量图如图 8 和图 9 所示, 两种方案下的射流轴心轨迹曲线如图 10 所示。

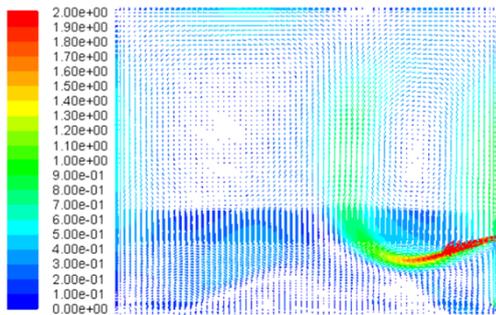


图 8 单排风口送风速度矢量图 (工况 2)

Fig.8 Velocity vector diagram of air supply using single row nozzle (condition 2)

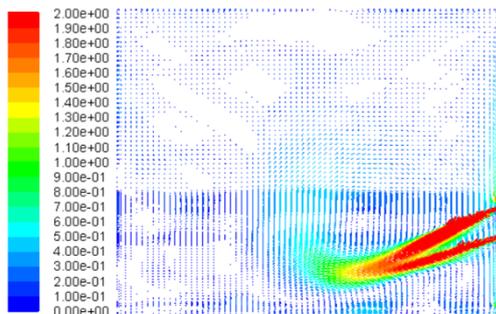


图 9 复合气流送风速度矢量图 (工况 2)

Fig.9 Velocity vector diagram of air supply using coupled

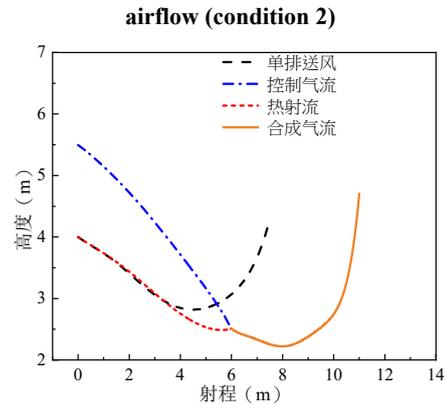


图 10 两种方案射流轴心轨迹曲线 (工况 2)

Fig.10 The jet axis locus curve of two schemes (condition 2)

单排风口送风方案下活动区平均温度为 17.4℃, 射流垂直射程为 1.22m, 水平射程为 4.5m; 复合气流送风方案下活动区平均温度为 18.0℃, 提升 0.6℃, 射流垂直射程为 1.79m, 增加 47%, 水平射程为 8m, 增加 78%。

对于单排风口送风方案, 提高送风热射流速度会使上浮现象有一定减弱, 也对活动区舒适性有一定改善, 但是效果不明显。工况 2 中采用复合气流送风方案同样能有效地减弱送风热射流上浮, 使射流覆盖更大范围活动区, 改善其舒适性。

3.3 工况 3

对两种方案进行数值模拟, 取 $X=1m$ 平面做出速度矢量图如图 11 和图 12 所示, 两种方案下的射流轴心轨迹曲线如图 13 所示。

单排风口送风方案下活动区平均温度为 17.2℃, 射流垂直射程为 1.59m, 水平射程为 4m; 复合气流送风方案下活动区平均温度为 17.8℃, 提升 0.6℃, 射流垂直射程为 2.59m, 增加 63%, 水平射程为 6m, 增加 50%。

对于单排风口送风方案, 增大送风热射流向下倾角可以使垂直射程增加, 但受到室内扰流的影响更强, 水平射程反而减少, 上浮情况更加严重, 送风热射流末端几乎垂直上浮。工况 3 中采用复合气流送风方案时送风热射流向下倾角较大, 两射流混合位置较远, 混合前送风热射流已出现上浮现象, 且控制气流速度衰减过多, 起到的压制作用比较弱。射流最低点在原本送风热射流范围内, 而不是两股射流汇合后, 该工况下, 复合气流送风方案对送风效果改善较小。

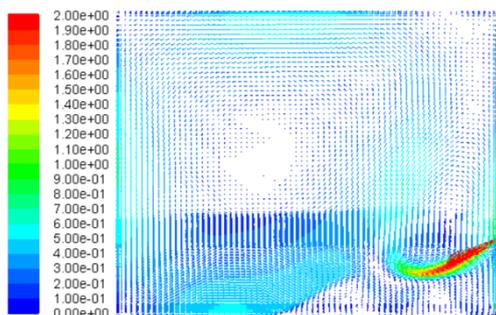


图 11 单排风口送风速度矢量图 (工况 3)

Fig.11 Velocity vector diagram of air supply using single row nozzle (condition 3)

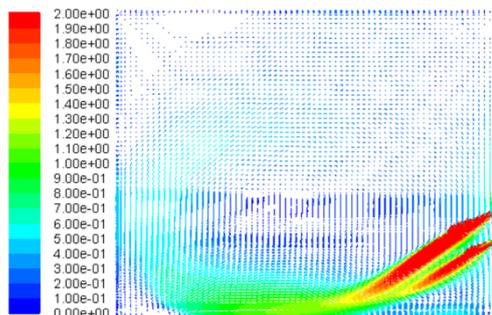


图 14 控制气流送风角度 25°速度矢量图 (工况 3)

Fig.14 Velocity vector diagram of control airflow of 25°(condition 3)

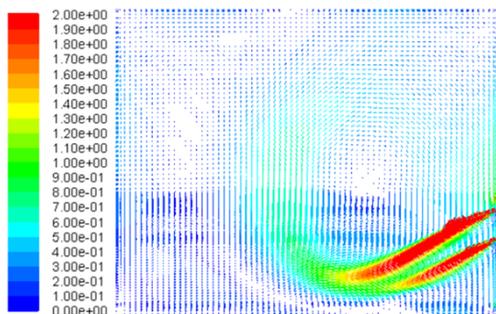


图 12 复合气流送风速度矢量图 (工况 3)

Fig.12 Velocity vector diagram of air supply using coupled airflow (condition 3)

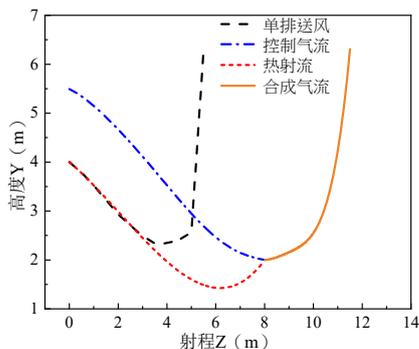


图 13 两种方案射流轴心轨迹曲线 (工况 3)

Fig.13 The jet axis locus curve of two schemes (condition 3)

工况 3 中, 复合气流送风方案下控制气流送风角度设为 20° 时活动区温度没有达到设计要求, 若将其改为 25°, 其余条件不变, 计算结果做出速度矢量图如图 14 所示。该方案下活动区平均温度为 18.7℃, 提升较多, 但射流直接进入活动区, 导致活动区风速过大, 同样不满足要求。复合气流送风方案要达到好的效果, 不仅需要调整好控制气流的参数, 也需要保证送风热射流参数在一定合理范围内, 后续研究有待进一步深入。

4 结论

目前高大空间供暖常采用的分层空调系统存在送风热射流严重上浮这一问题, 本文提出的复合气流送风方案能有效减弱上浮程度, 提高活动区温度。本文选取某典型站房送风区域进行了数值模拟分析, 得到如下结论:

(1) 单纯利用分层空调进行供暖效果不佳, 在浮力作用下送风热射流过早上浮, 难以覆盖活动区, 大量热量浪费在上部空间。通过调整送风角度、速度、温度等能小幅提高活动区平均温度, 但仍达不到设计要求, 并且对射流覆盖范围的提升不大。

(2) 增设一个控制气流的复合气流送风方案能够有效减弱送风热射流的上浮以及受室内扰流的影响。对一定送风参数范围内的送风热射流, 增设控制气流都能使送风热射流射程增加, 覆盖更大范围, 垂直射程提高 40% 以上, 水平射程提高 70% 以上。热量能得到更有效利用, 活动区温度可提高到 18℃ 以上, 达到设计要求。

参考文献:

[1] 宋歌, 刘燕, 朱丹丹, 等. 铁路客运站用能现状及其影响因素分析[J]. 暖通空调, 2013, 43(4): 85-90.
 [2] 张涛, 刘晓华, 李凌杉, 等. 高铁客运站供暖空调系统设计、运行现状及研究展望[J]. 暖通空调, 2019, 49(06): 25-31, 16.
 [3] 邹志胜, 李国富, 朱建章. 天津火车站空调系统设计[J]. 暖通空调, 2010, 40(5): 32-35.
 [4] 刘尧. 铁路站房高大空间公共区自然采光与空调能耗权衡判断[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.