

文章编号: 1671-6612 (2023) 02-180-07

高大空间复合气流送风供暖方式研究

许琳¹ 张济辞² 刘跃登³ 曾仕豪³

(1. 河南工业职业技术学院建筑工程学院 南阳 473000;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司 成都 610031;

3. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 高大空间建筑在冬季供暖过程中常采用喷口送风的方式, 容易出现送风热射流上浮、送风距离短、垂直方向存在热分层等现象。提出一种高大空间复合气流送风供暖方案, 利用一股等温气流压制送风热射流, 减弱热射流上浮。采用 Fluent 数值模拟的方法, 对铁路站房候车大厅有无控制气流作用下的室内气流运动情况及舒适性进行分析, 并采用单因素分析方法, 研究了不同因素对复合气流供暖送风效果的影响。结果表明: 控制气流送风角度和送风速度存在一定限值, 超过限值后压制效果明显增强; 控制气流喷口与送风气流喷口间距在 0.5m~1m 内, 控制气流的压制效果最好。

【关键词】 高大空间; 复合气流送风; 气流组织; 数值模拟

中图分类号 TU832 文献标识码 A

Study on a Air Supply Heating Mode Using Coupled Airflow in Large Space

Xu Lin¹ Zhang Jici² Liu Yuedeng³ Zeng Shihao³

(1.School of Architecture and Engineering,Henan Polytechnic Institute, Nanyang, 473000;

2.Railway Eryuan Engineering Group Co., Chengdu, 610031;

3.School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 In winter, the heating of large space often adopts the way of jet air supply, which is prone to serious floating of hot jet air supply, short air supply distance, and thermal stratification in the vertical direction. In this paper, a kind of air supply scheme for coupled airflow heating in large space is proposed, in which an isothermal airflow is used to suppress the air supply hot jet and reduce its floating. Using Fluent numerical simulation method to analyze the indoor airflow movement and comfort in the waiting hall of railway station with or without controlled airflow, and single factor analysis method is used to study the influence of different factors on the air supply effect of coupled airflow heating. The results show there are certain limits for the control of air supply angle and air supply speed, and the suppression effect is obviously enhanced when the limits are exceeded. When the distance between the control air flow nozzle and the supply air flow nozzle is within 0.5m~1m, the control air flow has the best suppression effect.

【Keywords】 large space; coupled air supply; air distribution; numerical simulation

0 引言

高大空间建筑的定义是建筑体积超过 10000m³, 高度超过 5m 的公共建筑^[1], 最显著的特

征就是垂直方向跨度大, 例如体育场馆、候车厅、大礼堂等。目前高大空间建筑普遍采用的是送风+地板辐射以及喷口送热风这些传统供暖方式, 存在

造价高昂、维修困难、送风气流严重上浮以及热量大量浪费等问题, 大空间内部会出现热分层, 造成活动区舒适性欠佳, 同时也没有相应的送风方案可以减弱热气流上浮导致的上述问题^[2-3]。张德伦^[4]研究了在分层空调单侧送风方式下, 高大空间建筑室内的气流分布情况。李庭逸^[5]等研究了在不同送风高度下, 玻璃幕墙建筑内气流组织情况。王蒙^[6]等对高大空间辐射板导流送风方式进行研究, 得到在总送风量和送风温度相同的情况下, 采用辐射板导流送风的气流组织效果较好, 热舒适性比较高。曾仕豪等^[7]对冬季供暖时有无控制气流作用下的候车厅内气流组织效果进行研究, 结果表明在送风热射流上部附加控制气流的方案可以使送风热射流的垂直射程可以增加 40%、水平射程增加 70%。刘跃登等^[8]提出的复合气流送风方案可将活动区平均温度提高至 18.3℃, 节能率达到 22.8%。

为解决分层空调系统冬季送风热气流严重上浮的问题, 本文提出一种高大空间复合气流送风供暖方案, 利用一股等温气流压制送风热射流, 减弱热射流上浮, 提高人员活动区的平均温度并减少空调能耗。本文通过进一步的对比分析, 提出不同送风气流参数对应的最佳控制气流送风参数范围。

1 复合气流送风方案

传统喷口送风供暖方式中, 受到浮升力与室内扰流作用, 空间内部四周容易形成下沉的冷空气, 造成送风热气流过早上浮, 送风距离短, 无法作用到人员活动区^[9,10], 如图 1 所示。由于热量无法送入活动区, 大量积累浪费在空间上部非活动区, 导致活动区局部温度较低、热舒适性较差。

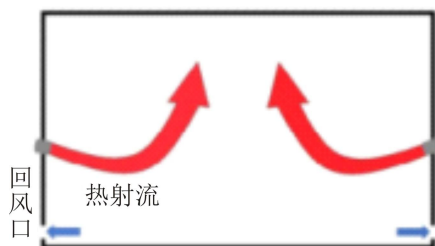


图 1 传统喷口送风

Fig.1 Traditional nozzle air supply

本文提出一种复合气流供暖送风方案, 利用一股等温气流压制送风热射流, 减弱热射流的上浮, 示意图如下图 2 所示。

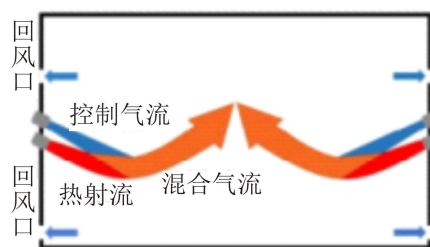


图 2 复合气流送风

Fig.2 Air supply using coupled airflow

相较传统喷口送风方式, 复合气流送风供暖方案是在送风气流喷口上方增加一个装置, 该装置回收空间上部空气并将其以一定角度向下喷出, 喷出射流称为控制气流。由于上部空气温度接近室内设计温度, 所以控制气流温度与周围环境温度接近, 不会像送风气流一样明显上浮。

两股气流都存在一定角度, 且送风气流会出现上浮现象, 所以两股气流在射出一段距离后便会相遇, 此时控制气流中向下的速度分量可以压制送风气流的上浮, 混合后的气流与周围环境温差小于原本的送风气流, 风量大于原本的送风气流, 受到的浮升力和室内扰流的影响也更小。在以上共同作用下, 复合气流送风方案中的混合气流上浮情况会弱于传统喷口送风方式中的送风气流, 混合气流能够到达更低更远的位置。

2 数值计算模型

本文以西藏拉萨地区某铁路客站候车厅为研究对象, 具体尺寸为 100m×40m×16m, 取其 1/4 部分进行建模, 即 50m×20m×16m, 其研究结果可推广至大型铁路客站候车厅。

通过对室内得热量及围护结构和冷风渗透耗热量的计算, 得到该典型客站候车厅冬季热负荷为 84.33kW, 单位面积空调指标为 84.33W/m², 通过实地调研得到了送风气流参数的范围值, 如表 1 所示。

表 1 送风气流参数范围

Table 1 Range of supply air flow parameters

送风温度/℃	送风速度/m/s	喷口高度/m	喷口间距/m	喷口直径/mm
26~35	3.32~14.8	3~6	1.5~3	230~400

2.1 模型的建立

在 Fluent 中设定沿候车厅长度方向为 X 轴，沿跨度方向为 Z 轴，沿高度方向为 Y 轴，具体尺寸为：50m (X) × 20m (Z) × 16m (Y)，如图 3 所示。

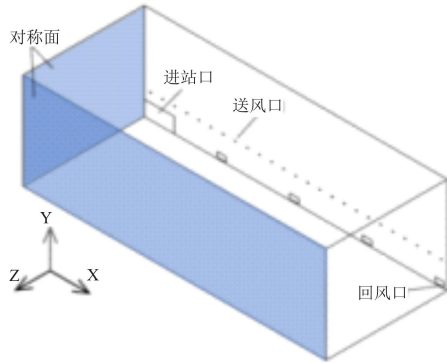


图 3 候车厅简化模型

Fig.3 Simplified model of waiting hall in typical railway passenger station

2.2 网格划分

完整候车厅模型尺寸大，网格数量多，计算时间长。为了更便捷地研究复合气流送风特性，选取候车厅中典型的送风单元，即仅包含一个喷口的区域进行建模如图 4 所示，这样可保证网格质量较高且数量不会过多。该送风单元 Z 方向为 20m、X 方向为 2m、Y 方向为 16m，控制气流喷口和热射流喷口直径大小一致，都为 0.25m。热射流喷口中心距地面 4m，控制气流喷口中心距地面 5.5m。下部回风口为尺寸 0.2m 的方形，风口中心距地面 0.5m；上部回风口为直径 0.25m 的圆形，风口中心距地面 6.0m，送风单元模型如图 4 所示，划分后的网格模型如图 5 所示。

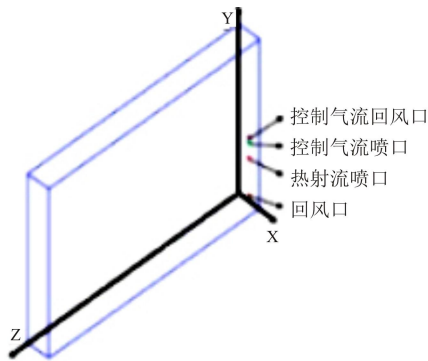


图 4 网格划分模型

Fig.4 Mesh generation model

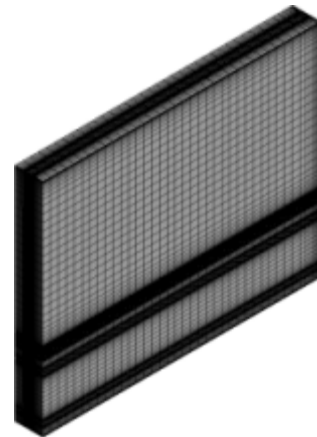


图 5 划分后的网格模型

Fig.5 Mesh model after division

送风单元模型共计 380928 个网格单元。对送风单元模型进行网格无关性验证，计算网格数分别为 257664、380928、553474。统计人员活动区平均速度和平均温度的变化情况，当网格数从 380928 增至 553474 时，平均温度和平均速度的变化率均小于 5%，因此认为在网格数为 380928 的基础上，再增加网格数量对计算结果的影响很小，故选取送风单元模型的网格数为 380928。

2.3 参数设置

本研究中候车厅外墙以及屋顶采用第二类边界条件，即等热流边界，根据热流密度公式确定墙体与屋面的热流密度分别为 -31.23W/m^2 和 -8.94W/m^2 。本文选择 Realizable k-ε 模型作为基本湍流模型。为保证计算结果准确，本文选用二阶迎风格式作为控制方程的离散格式，并选择求解过程灵活、效率高的 SIMPLE 算法作为求解离散方程组。

3 复合气流模拟研究

本文将单一气流送风温度 30°C 、送风速度 4.92m/s 作为典型工况，采用复合气流送风方案对其进行优化，设定复合气流送风方案中各影响因素的合理范围值，利用该候车厅模型研究不同因素改变对复合气流送风方案效果的影响，以舒适节能为目标，并对复合气流的匹配关系进行优化。

3.1 复合气流基本工况气流组织模拟研究

在原送风气流喷口上部 1.5m 处设置控制气流喷口，具体送风参数如表 2 所示。

表 2 送风参数表

Table 2 Air supply parameter table

送风参数	送风温度 ℃	送风速度 m/s	送风角度 °
送风气流喷口	30	4.92	15
控制气流喷口	20	6	20

3.1.1 气流运动情况

截取 $X=25\text{m}$ 剖面在不同工况下垂直方向的温度分层和射流的轴心轨迹图, 如图 6、图 7 所示。

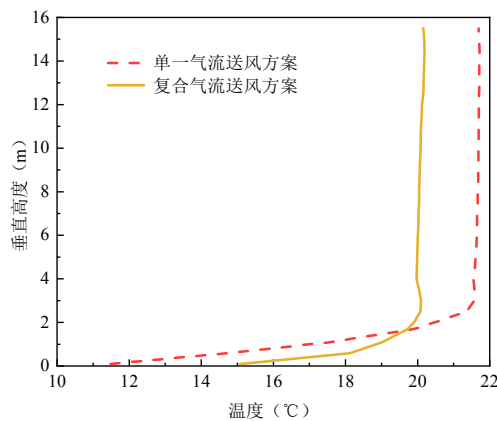


图 6 不同工况下垂直方向的温度分层图

Fig.6 Vertical temperature stratification diagram under different working conditions

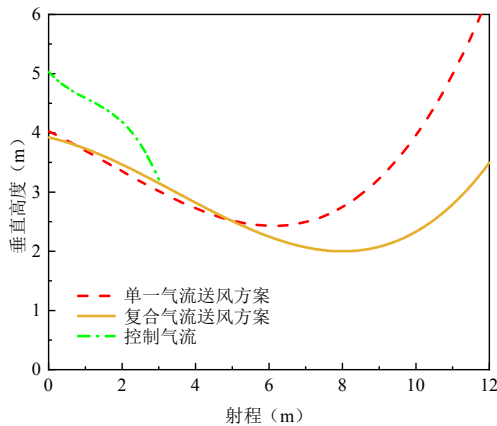


图 7 不同工况下射流轴心轨迹图

Fig.7 Axial trajectory of jet under different working conditions

结合图 6 和图 7, 可以发现在单一气流送风工况下, 热射流从喷口射出后的落差高度迅速增大, 导致上部非空调区温度上升, 加剧了大空间的温度分层。控制气流与送风热射流混合后, 射流与活动区的热量与动量交换增强, 活动区的温度显著增加, 同时上部非空调区域温度有所降低, 整个建筑

室内的垂直温差也有所降低。

3.1.2 舒适性分析

分析不同工况分别在 $Y=0.1\text{m}$ 、 1.1m 和 1.7m 平面的热舒适状况, 如表 3 所示。

表 3 不同工况下 $Y=0.1\text{m}$ 水平剖面的热舒适状况表

Table 3 Table of thermal comfort of $Y=0.1\text{m}$ horizontal profile under different working conditions

工况	Mean T (°C)	Mean V (m/s)	ADPI (%)	Mean PD (%)
单一气流送风	11.5	0.37	8.2	35.21
复合气流送风	15.1	0.51	21.54	37.15

观察表 2, 相比于单一气流送风工况, 复合气流送风工况在 $Y=0.1\text{m}$ 水平面的平均温度 (Mean T) 提高到 15.1°C , 相比单一气流工况增加了 3.6°C , 但两个工况的平均风速 (Mean V) 都较高, 复合气流送风工况的平均风速甚至达到了 0.51m/s 。复合气流送风工况的空气分布特性指标 (ADPI) 达到 21.54% , 该值越大说明感到舒适的人群比例越大。由垂直温差引起的不满意率值 (PD) 高达 37.15% , 这势必会加剧人在脚踝处的不舒适程度。

表 4 不同工况下 $Y=1.1\text{m}$ 水平剖面的热舒适状况表

Table 4 Table of thermal comfort of $Y=1.1\text{m}$ horizontal profile under different working conditions

工况	Mean T (°C)	Mean V (m/s)	ADPI (%)	Mean PD (%)
单一气流送风	17.6	0.16	68.91	11.53
复合气流送风	19.0	0.24	59.85	15.58

表 4 为不同工况下 $Y=1.1\text{m}$ 水平剖面的热舒适状况表, 类似在 $Y=0.1\text{m}$ 水平面的情况, 复合气流送风工况同样可以有效提高 $Y=1.1\text{m}$ 水平面的平均温度, 达到 19.0°C , 超过了 18°C 的设计温度, 但复合气流送风工况并没有在 ADPI 值和 PD 值上有所改善。

观察表 5, 发现单一气流送风工况的平均温度要比复合气流送风工况高, $Y=1.7\text{m}$ 水平面的平均温度越高意味着头脚的垂直温差越大, 人在站立时头部 ($Y=1.7\text{m}$) 与脚部 ($Y=0.1\text{m}$) 的垂直温差高达 8.4°C , 而在采用复合气流送风方案后, 人脚踝处的平均温度提高的同时, 人站立时头部的平均温度有所降低, 头脚垂直温差为 4.6°C , 舒适性效果

改善显著。但同样的，复合气流送风工况并没有很好的改善 $Y=1.7\text{m}$ 水平面的 ADPI 值和 PD 值，ADPI 值仅高了 1.22%，PD 值则高了 3.51%。

表 5 不同工况下 $Y=1.7\text{m}$ 水平剖面的热舒适状况表

Table 5 Table of thermal comfort of $Y=1.7\text{m}$ horizontal profile under different working conditions

工况	Mean T ($^{\circ}\text{C}$)	Mean V (m/s)	ADPI (%)	Mean PD (%)
单一气流送风	19.9	0.23	44.31	14.74
复合气流送风	19.7	0.33	45.53	18.25

人员活动区划分为候车厅外墙内 1m、竖直方向地上 1.8m 的范围内^[11]，以此分析不同工况下活动区整体的热舒适状况，具体如表 6 所示。

表 6 不同工况下活动区整体的热舒适状况表

Table 6 Table of overall thermal comfort of the activity area under different working conditions

工况	Mean T ($^{\circ}\text{C}$)	Mean V (m/s)	ADPI (%)	Mean PD (%)
单一气流送风	16.0	0.2	35.19	19.53
复合气流送风	18.3	0.3	49.03	22.42

从活动区整体的热舒适状况来看，复合气流送风工况能显著提高活动区整体的平均温度，同时对 ADPI 值也有所改善，但平均风速偏高，考虑到近地面气流流动给活动区下部尤其是近地面区域 ($Y=0.1\text{m}$) 带来的扰动较大，故认为活动区平均风速 0.3m/s 可以接受。

3.2 不同因素对复合气流送风效果的影响研究

以下数值模拟计算是在送风热射流参数不变的前提下，采用单因素分析方法，研究不同因素变化对复合气流送风效果的影响。

3.2.1 控制气流送风角度的影响

针对典型送风单元，随着控制气流送风角度的增加，射流的垂直射程逐渐加大，但控制气流的送风角度大于 30° 时会导致射流的送风射程明显不足，而控制气流送风角度小于送风气流送风角度时，复合气流相互作用的效果不佳，控制气流的压制作用会大幅减弱。

现更改控制气流送风角度为 15° 和 30° ，以此研究控制气流送风角度对该候车厅活动区热舒适性的影响。截取 $X=25\text{m}$ 剖面在不同工况下垂直

方向的温度分层和射流的轴心轨迹图，如图 8、图 9 所示。

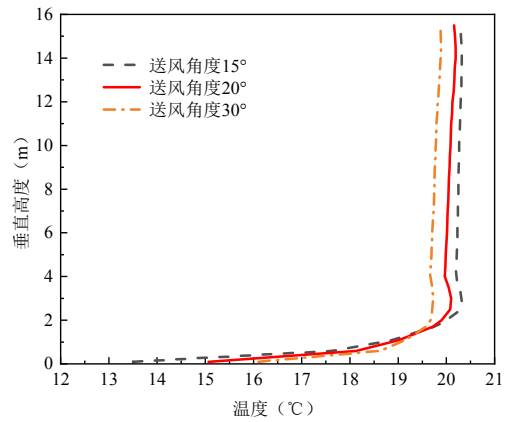


图 8 不同工况下垂直方向的温度分层图

Fig.8 Vertical temperature stratification diagram under different working conditions

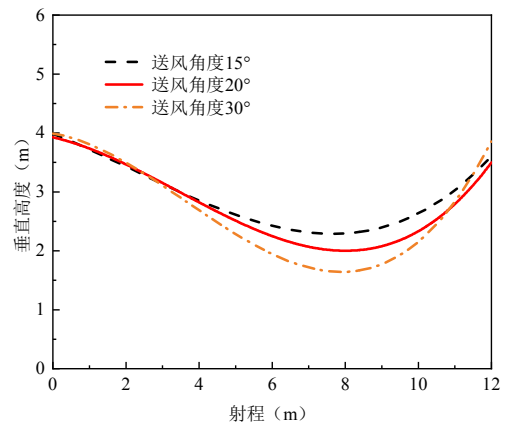


图 9 不同工况下射流轴心轨迹图

Fig.9 Axial trajectory of jet under different working conditions

随着控制气流送风角度的加大，送风气流越接近活动区，对温度分层的减轻效果就越明显。调整控制气流送风角度可以改变射流的垂直射程和水平射程，向下倾角越大，压制作用越强，垂直射程增大，而水平射程会减小。冬季供暖时送风气流同样会向下倾斜，当控制气流倾角小于送风气流倾角时，压制作用较弱。因此建议控制气流倾角略大于送风气流倾角，采用 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 为宜，过大的倾角虽然使射流更贴近活动区，但是会减少水平射程，并且可能导致活动区局部风速过大。

3.2.2 控制气流送风速度的影响

将控制气流送风速度更改为 4m/s 和 8m/s ，研究对复合气流送风效果的影响，截取 $X=25\text{m}$ 在不

同工况下垂直方向的温度分层和射流的轴心轨迹图, 如图 10、图 11 所示。

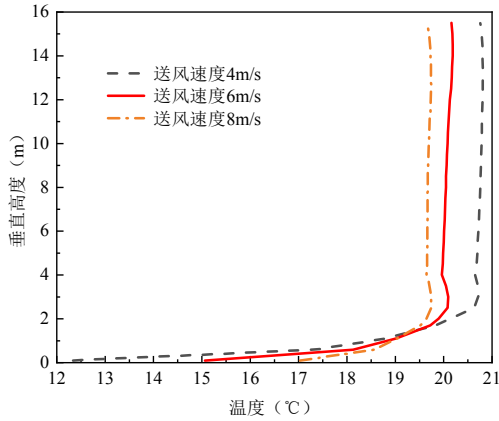


图 10 不同工况下垂直方向的温度分层图

Fig.10 Vertical temperature stratification diagram under different working conditions

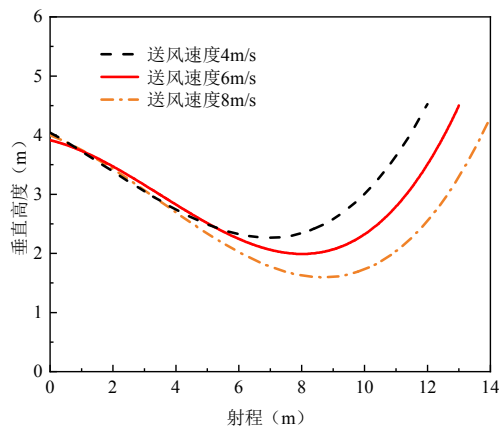


图 11 不同工况下射流轴心轨迹图

Fig.11 Axial trajectory of jet under different working conditions

随着控制气流送风速度从 4m/s 增大到 8m/s 时, 送风气流被控制气流压制的现象也就越明显, 射流落差增大, 送风射程增加。控制气流送风速度增大至 8m/s 时, 射流轴心的垂直高度降至 1.6m, 活动区温度因射流的扰动增强而提高并变得更加均匀, 同时上部非空调区温度有所降低, 有效抑制了垂直温度分层。

增大送风速度会增强控制气流压制作用, 使垂直射程和水平射程都增大, 提升活动区温度, 但是也会增大活动区风速。控制气流送风速度存在一个临界值, 超过临界值后对室内扰流影响较大, 压制效果明显增强, 但也会使活动区风速过大。在本文

研究对象中控制气流送风速度临界值约为 8m/s, 选取 6m/s 左右为宜, 更小的速度会使活动区平均温度和平均风速均降低。

3.2.3 控制气流喷口与送风气流喷口间距的影响

研究控制气流喷口与送风气流喷口间距设置为 0.5m、1.5m 和 2m 对复合气流送风效果的影响, 截取 X=25m 剖面在不同工况下垂直方向的温度分层和射流的轴心轨迹图, 如图 12、图 13 所示。

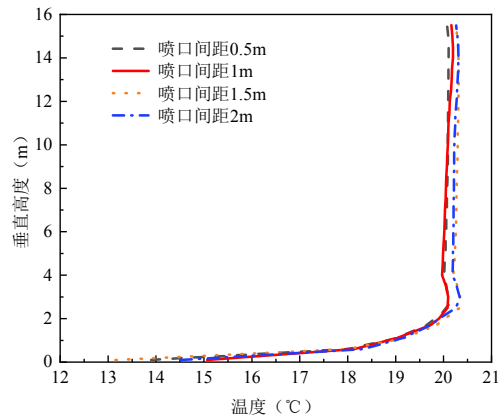


图 12 不同工况下垂直方向的温度分层图

Fig.12 Vertical temperature stratification diagram under different working conditions

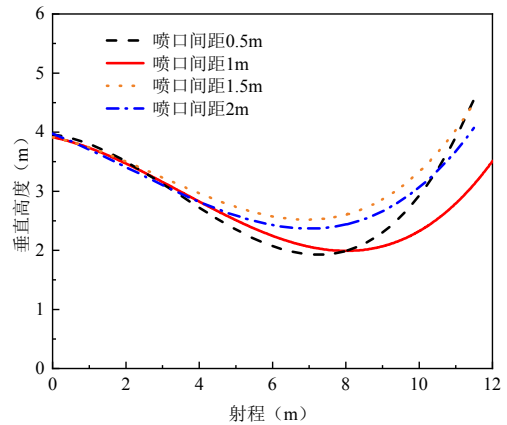


图 13 不同工况下射流轴心轨迹图

Fig.13 Axial trajectory of jet under different working conditions

当喷口间距为 0.5m 和 1m 时射流的送风落差最大, 喷口间距为 1.5m 和 2m 时射流的送风落差则相对较小。喷口间距为 1.5m 和 2m 时上部非空调区的温度要略高, 但也只是 0.2°C 左右的差异, 差别很小。

两喷口间距会影响控制气流产生压制作用前的损耗量, 距离越小损耗量越少, 压制效果也越好。

但是距离过小也会导致两股射流过早相遇,容易使活动区局部风速过大,建议两喷口间距在 0.5m~1m 内选取。

3.3 复合气流匹配关系的优化

本节将研究送风气流参数更改为送风温度 30℃、送风速度 4.92m/s、送风角度保持 15° 不变的情况下,活动区的平均温度随着控制气流送风角度、送风速度的增大而变化的情况,如图 14 和图 15 所示。

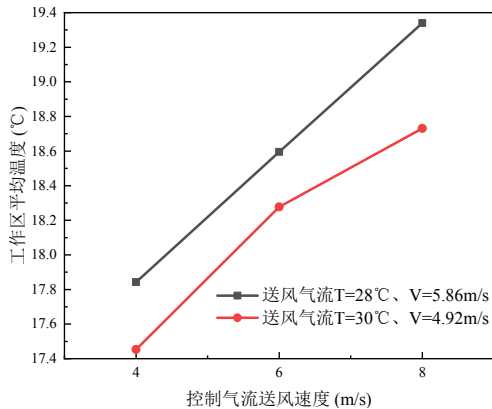


图 14 不同控制气流送风速度下活动区平均温度的变化
Fig.14 Change of Mean V in active area under different control airflow velocity

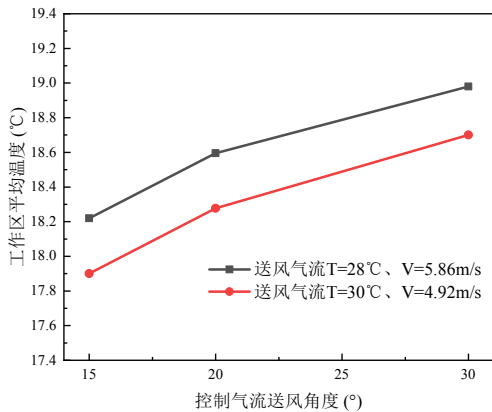


图 15 不同控制气流送风角度下活动区平均温度的变化
Fig.15 Change of Mean V in active area under different control airflow angle

在设计工况下,活动区的平均温度随着控制气流送风速度的增大或送风角度的提高而升高。若送风气流温度升高或者送风速度减小,气流受到浮升力以及室内扰流影响更大,为避免出现严重上浮的情况,应适当加大控制气流送风角度以及送风速度,选择范围如表 7 所示。

表 7 不同送风气流参数对应的最佳控制气流送风参数范围表

Table 7 Table of optimal control air supply parameters corresponding to different air supply parameters

送风气流送风参数	控制气流送风角度范围	控制气流送风速度范围
送风气流温度增加或送风速度减小	20° ~30°	6m/s~8m/s
送风气流温度减小或者送风速度增大	15° ~20°	4m/s~6m/s

4 结论

本文通过数值模拟的研究方法,对高大空间候车厅复合气流送风供暖方式进行了研究,分析了多种因素变化对其送风效果的影响,并优化了复合气流的匹配关系,主要得到以下结论:

- (1) 控制气流送风角度和速度对控制气流压制效果有明显影响。控制气流速度以及送风气流速度存在一定限值,超过限值后压制效果明显增强,但会导致活动区风速过大,造成强烈的“吹风感”。
- (2) 控制气流喷口与送风气流喷口间距在 0.5m~1m 内,控制气流的压制效果最好,喷口间距在一定范围内的变化对活动区热环境的影响也较小。
- (3) 针对复合气流匹配关系的优化研究,以送风气流的送风温度 30℃、送风速度 4.92m/s 为标准,整理出了不同送风气流参数对应的最佳控制气流送风参数范围。
- (4) 复合气流送风方案对一定尺寸范围内候车厅都有较好的适用性,可以使活动区平均温度提高到 18℃ 以上,但部分情况下活动区平均风速可能过大,送风气流和控制气流的协同优化还需要进一步研究。

参考文献:

[1] 范存养.大空间建筑空调设计及工程实录[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.
[2] 陈杰,亢燕铭,叶筱,等.碰撞射流与混合通风系统对高大空间供暖效果的影响[J].东华大学学报(自然科学版),2017,43(2):254-259.
[3] 侯利.高大空间建筑供暖通风空调技术应用[J].模型世界,2022,(2):49-51.

(下转第 209 页)