



排风系统对屏蔽门岛式地铁站台通风环境的影响

梁迦贺, 窦华书

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘要: 使用暖通领域软件 AirPak 3.0, 采用定常的三维 Navier-Stokes 方程和 RNG k -epsilon 湍流模型, 对屏蔽门系统岛式地铁站台通风环境进行了数值模拟。以实地测量的温度和湿度作为边界条件, 分别对送风流量相同但排风流量不同的通风环境进行数值模拟, 结果发现: 使用排风系统可以促进送风气流向站台中部扩散, 明显提升公共区域温度分布均匀程度, 减少局部高流速区及漩涡在人体呼吸作用的区域产生, 使平均空气龄下降 12%; 但是排风流量应该设置在合理的范围内, 当排风流量过高时, 通风气流会影响站台内空气分层。数值模拟结果表明, 合理地使用排风系统可以显著提升地铁站台的通风效果, 避免能源浪费。研究结果为有效利用能源提升车站候车环境质量提供一定理论依据。

关键词: 数值模拟; 台通风; 气流组织; 地铁站台; 温度分布

中图分类号: TU83

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2020) 07-0578-09

Impact of exhaust system on ventilation environment of island-type subway platform with screen door system

LIANG Jiahe, DOU Huashu

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The numerical simulation was carried out for ventilation environment of island-type subway platform with screen door system by using AirPak 3.0 HVAC software, with the steady three-dimensional Navier-Stokes equation and the RNG k -epsilon turbulence model. With the temperature and humidity measured in the field as the boundary conditions, the numerical simulation was carried out for ventilation environments with the same supply air flow but different exhaust air flows respectively. The result shows that the diffusion of air flow could be guided to the center of the platform by using exhaust system, to largely improve the uniformity of temperature distribution in public space, reduce the local high-velocity areas and vortices in the area of human breathing, and reduce the average air age by 12%. Nevertheless, the exhaust air flow should be set within a reasonable range. If the exhaust air flow is too high, the ventilation air flow would affect the air stratification in the platform. The numerical simulation results show that the ventilation of the subway platform could be improved dramatically by using exhaust system reasonably, so as to avoid energy waste. The research results provide a theoretical basis for improving the environmental quality of the station by using energy efficiently.

Key words: numerical simulation; platform ventilation; air distribution; subway-platform; temperature distribution

收稿日期: 2020-03-09 网络出版日期: 2020-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579224); 浙江省重点研发计划项目(2018C03046)

作者简介: 梁迦贺(1992-), 男, 辽宁沈阳人, 主要从事流体机械理论及应用方面的研究。

通信作者: 窦华书, E-mail: huashudou@yahoo.com

0 引言

地铁站屏蔽门系统可以阻断由地铁车辆进出站引起的活塞风以及地铁隧道风环境对站台产生的影响,降低粉尘对人体的侵害^[1],为候车乘客提供更好的安全保障,因此在地铁站的设计和建设中被广泛应用^[2]。同时,使用屏蔽门系统的地铁站公共区域整体环境相对密闭,站内空气无法直接与大气环境进行交换^[3],因此站内环境的维护及站内污染物的排出需要依靠地铁站通风系统完成。

随着计算机技术及相关理论的发展,基于计算流体力学的方法对室内环境进行分析和预测已经逐步成为相关研究中的主流,地铁站内部环境的研究也随之发展。国外应用数值模拟技术研究地铁站内部环境的较少,其工作主要集中在突发事故下的应对方案优化^[4]。国内应用数值模拟的研究开始于20世纪90年代。在早期的工作中,研究者通过数值模拟结果与实测环境进行比照,对应用CFD方法预测地铁站内部环境的准确性进行研究。其中比较有代表性的研究有:袁凤东等^[5-6]使用基于Fluent求解器的AirPak2.0软件对地铁岛式站台和侧式站台进行了数值模拟研究,通过与实测温度场进行比照,认为数值模拟能够较为准确地预测地铁站内的通风环境,应用于车站组织气流流动特性研究。在室内环境的数值模拟研究中,不同的学者对于湍流模型选择、物理模型简化及数值模拟边界条件设置等方面进行了深入探究,潘冬梅等^[7]对相关工作进行了系统的总结。同时,研究者们使用室内环境的技术指标对地铁站气流组织进行了数值模拟研究。其中,沈凯等^[8]利用不均匀系数等指标对地铁站站厅送回风方式的合理性展开了研究。高月芬等^[9]使用PMV-PPD等指标分析了岛式站台的热环境分布。李晓敏等^[10]使用欧拉气液两相流模型对地铁站厅内的阴湿环境进行了仿真。他们的研究表明,使用数值模拟的方法结合室内环境相关的技术指标对地铁站内环境进行分析,为提升室内组织气流设计的合理性提供了重要的理论依据。

在实际应用中,出于降低通风系统能源消耗的考虑,地铁站通风系统多运行于单送风模式。王迪等^[11]的研究表明,地铁站内颗粒物和人体代谢废物在地铁站内的积聚量较高,易引起候车乘客不适。有研究表明,地铁站、客运站等乘客流动密集型场所是流行性疾病集中传播的场所,而及时提升站内空气的更新能力可以有效降低疾病的交叉感染

率^[12-13]。因此,采用合理的通风方案,在节省能源消耗的同时降低地铁站内不良气流组织对人体的影响,有着较为重要的现实意义。本文使用AirPak3.0软件,对四种排风流量下的站台通风环境进行了三维定常数值模拟。通过对四种数值模拟结果的温度场、速度矢量场及平均空气龄分布进行对比分析,研究不同排风流量对站台公共区域通风效果的影响。本文的研究可为改善地铁站台公共区域气流组织分布,提升候车乘客舒适度提供一定的理论参考。

1 模型与数值方法

1.1 站台模型与区域划分

本文以某屏蔽门系统岛式站台作为建模对象,地铁站台层三维模型如图1所示。站台公共区域尺寸为长123.50 m×宽11.55 m×高3.10 m,整体呈工字形。站台两端分别为地铁站设备间和风机控制室。站台层由10组共20根支柱支撑。垂直电梯位于站台中心。两组由自动扶梯和楼梯组成的乘客出入通道分别置于垂直电梯两侧,呈对称布置。出入通道下方为储藏间。屏蔽门系统将站台公共区域与地铁隧道隔离。

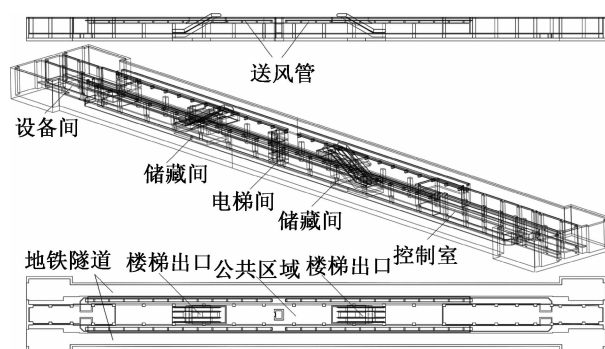


图1 地铁站台层三维模型

站台层公共区域气流组织形式为顶壁送风顶壁排风,由两组独立运行的组合式空调系统负责公共区域两侧的新风流量负载^[14]。送风口等距布置于公共区域顶壁两侧,回风口位于公共区域顶壁中央。站台公共区域平面示意图如图2所示,图中展示了单侧地铁站台送风口及排风口的位置以及公共区域的划分。两侧站台公共域共设送风口52个,排风口8个。

站台公共区域空间较大且各区域间没有明显间隔,本文将其划分为不同的区域并命名,以方便后文描述。各区域所在位置和命名如图2所示。其中,设备间两侧狭长的区域为E区;设备间至楼梯出口的区域为S区;楼梯出口两侧的区域为A区;电梯

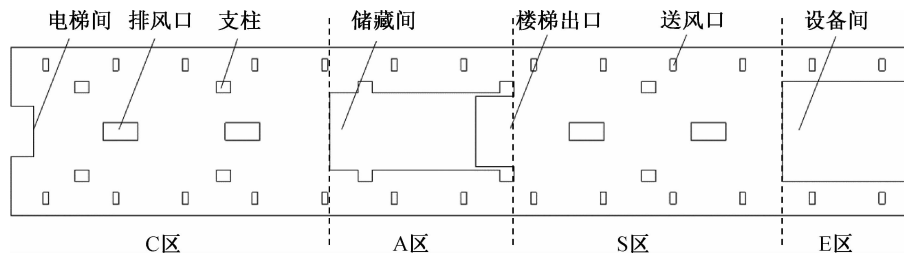


图2 站台公共区域平面示意图

间至楼梯下方储藏间的区域为C区。后文中,将站台公共区域简称为“候车区”。

1.2 边界条件与计算模型

本文以建模地铁站的冬季某日午间实测数据作为边界条件。测量当日,气象信息显示室外为多云的天气,实时温度为 11.0°C 。地铁站外实测温度为 13.0°C ,空气相对湿度为 65.0 RH 。站台内 1.80 m 高度处非送风口所在区域平均温度为 20.2°C ,以此作为计算域的温度初始化条件。连接站厅与站台的楼梯通道内温度为 18.8°C 。以此作为楼梯出口处的温度边界条件。

壁面边界条件方面,计算域内各壁面均设置为恒温壁面,壁面温度值取多点测量值的平均值。其中,天花板温度为 14.4°C ,地面温度为 15.1°C ,屏蔽门壁面温度为 16.6°C ,垂直电梯壁面温度为 14.4°C ,楼梯处设备间壁面温度为 16.6°C ,设备间壁面温度为 15.2°C ,公共区域内各支柱壁面温度为 14.9°C 。

送风边界条件方面,将送风口及排风口均简化为矩形风口^[15]。四个数值模拟工况的送风流量相同,单个送风口送风流量 $Q_{\text{in}}=0.576\text{ m}^3/\text{s}$,送风温度为 24.0°C 。其中工况1为地铁站实际运行的工况,即不开启排风系统的工况。工况2至工况4为使用排风的工况,工况2单口排风流量 $Q_{\text{out}}=1.152\text{ m}^3/\text{s}$,工况3单口排风流量 $Q_{\text{out}}=1.728\text{ m}^3/\text{s}$,工况4单口排风流量 $Q_{\text{out}}=2.304\text{ m}^3/\text{s}$ 。本文中不考虑站厅通风环境对站台公共区域的影响,因此将楼梯出口处简化为大气环境。对楼梯出口处的截面在水平方向上进行延伸,并将楼梯出口设置为自然出口,不给定出口压力及出口气流流速。同时,由于屏蔽门系统将站台公共区域与地铁隧道隔离,因此不考虑地铁活塞风及隧道环境对站台公共区域的影响。

站台公共区域为多射流并存的复杂流场,且气流流动状态基本为湍流。由于支柱及楼梯出口等站内设施的存在,使得站内空气流动更加复杂。采用传统的零方程湍流模型^[16]和一方程湍流模型无法

准确描述流场内的复杂流动和温度分布^[17]。站台公共区域存在大量墙壁,所以存在大范围的低雷诺数区域。Normal k -epsilon 湍流模型是基于气流流动为完全湍流情况下建立的模型,因此该湍流模型在本文工况并不完全适用。RNG k -epsilon 湍流模型^[18-19]在Normal k -epsilon 湍流模型的基础上添加了考虑低雷诺数流动的解析公式,使得该湍流模型可以更好地对复杂流场进行描述,在温度场和速度场的预测中都有较为广泛的应用^[20]。因此本文采用的控制方程为不可压缩流体的三维定常 Navier-Stokes 方程,结合 RNG k -epsilon 湍流模型进行数值模拟计算。

AirPak3.0 软件基于 Fluent 求解器开发,其假设空气均为不可压缩流体并忽略黏性力做功。在大气环境下各控制方程的浮力项符合 Boussinesq 假设。

1.3 网格划分及无关性验证

二方程湍流模型对网格的精细度要求较高,若将整个站台区域作为计算域将需要大量的网格。本文地铁站台在空间上具有对称性,因此选取站台一半的区域作为计算域,计算域简化示意如图3所示。计算域网格由 AirPak 软件内置模块生成,全局采用非结构网格。为保证近壁区域计算的准确性,给定墙壁位置较薄的初始网格厚度并控制网格生长率。同时对流动较为剧烈的风口处及楼梯出口处的网格进行加密,生成网格时提高壁面网格生成的优先级。

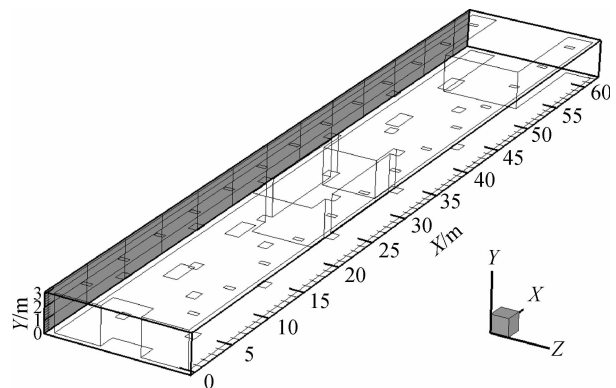


图3 站台计算域简化示意图

分别使用数量为 485.2 万、506.9 万、576.0 万和 729.4 万的网格进行网格无关性验证。选取站台公共区域某截面平均温度和截面温度标准差作为验证指标,验证结果如图 4(a)所示。网格数量从 506.9

万增长到 729.4 万的过程中,两个验证指标均没有明显变化。考虑到计算精度和后处理图像的精细程度,最后选择数量为 729.4 万的网格对站台公共区域进行数值模拟。计算域网格如图 4(b)所示。

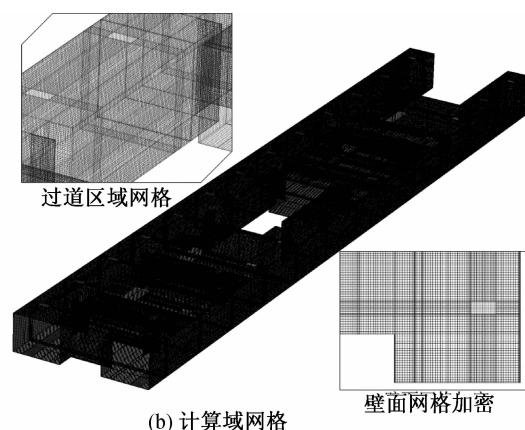
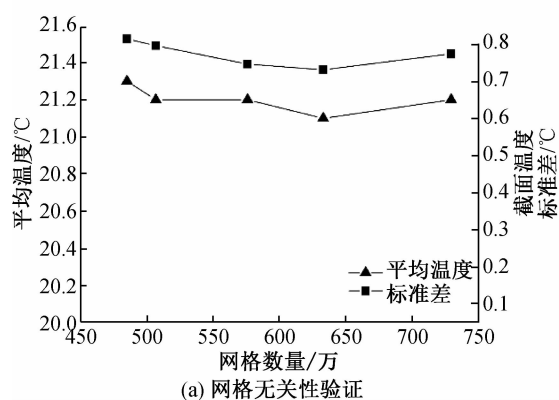


图 4 网格无关性验证及计算域网格

2 结果分析

2.1 公共区域温度分布

国内公共建筑和民用建筑的相关标准中规定,冬季室内环境温度应该在 $18.0 \sim 22.0^{\circ}\text{C}$ 之间,且人员活动区域不宜出现明显温度差。本文主要从候车区平均温度和候车区温度分布均匀程度两个方面来讨论不同排风流量对候车区温度的影响。

2.1.1 排风流量对水平截面平均温度及温度均匀程度的影响

四个工况下不同高度水平截面的温度平均值走势与温度标准差分布如图 5 和图 6 所示。在图 5 所示的数据中可以看出,四个通风工况下,候车区不同高度处的截面平均温度都在 $21.0 \sim 22.0^{\circ}\text{C}$ 之间,且随着截面高度的提升,截面平均温度呈现下降的趋势。截面平均温度在 $0.60 \sim 2.40\text{ m}$ 的高度内基本保持不变。对照不同工况的平均温度折线可以看出,随排风流量提升,不同高度处的各截面平均温度均有所提升。

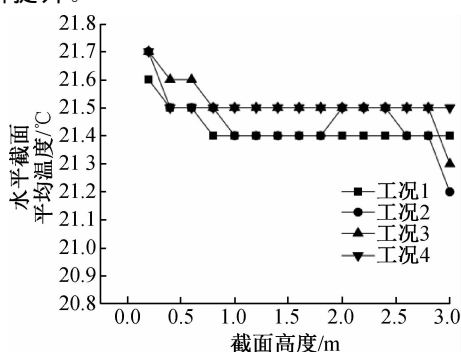


图 5 各工况水平截面平均温度走势

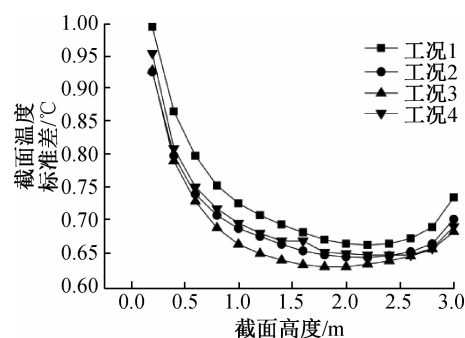


图 6 各工况水平截面温度标准差分布

截面温度标准差可以反映该截面上温度分布的离散程度,即温度分布的均匀程度。在图 6 所示的各工况截面温度标准差曲线图中可以看出,随时截面高度的提升,各截面的温度分布均匀程度有所提升。在 $0.20 \sim 0.40\text{ m}$ 的截面高度内,温度标准差数值高于 0.75°C ,说明候车区底部温度分布的不均匀程度较高。结合图 5 可知,虽然候车区底部平均温度较高,但整体温度分布不均匀程度也较高,说明候车区底部高低温区变化更加剧烈。随截面高度提升,各截面平均温度变化趋于稳定,截面温度标准差变化进入到一个相对稳定的区间,各截面温度分布趋于均匀。

在使用排风系统的工况中,各截面平均温度均有所提升,同时各截面温度分布均匀程度提高。值得注意的是,工况 3 与工况 4 水平截面平均温度变化幅度相同,且都高于工况 1 与工况 2,但工况 3 水平截面温度均匀程度要好于工况 4。这说明提高排风流量有利于提升站台公共区域温度和温度分布均匀程度,但排风流量的提升应该在合理的范围内,过

高的排风流量反而会使公共区域内温度分布均匀程度下降。

2.1.2 排风流量对垂直截面平均温度及温度均匀程度的影响

各工况垂直截面平均温度走势及截面温度标准差分布如图7和图8所示,各垂直截面均处于相邻送风口中间的位置。在图7中可以看出,各工况截面温度随位置变化的趋势相似,平均温度较高位置出现截面面积较小的A区和E区内。

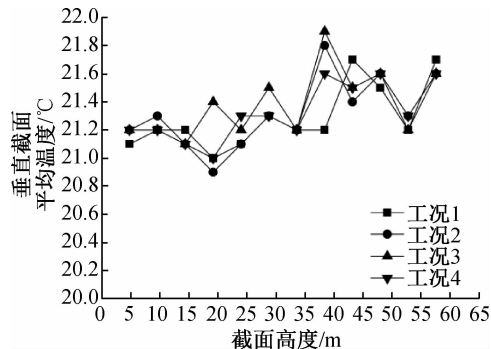


图7 各工况垂直截面平均温度走势

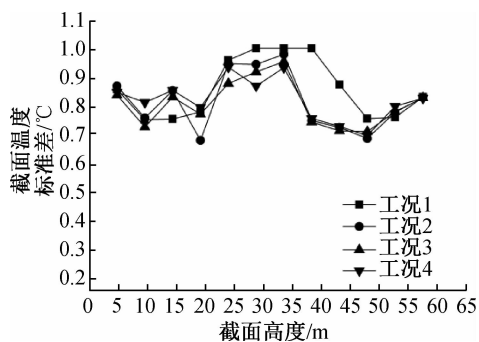


图8 各工况垂直截面位置温度标准差分布

相比于水平截面,图8中各垂直截面的温度标准差都处于较高的水平,说明在垂直截面上温度变化幅度较大。这是由于气流的康达效应,送风气到达地面后沿地面扩散,因此在送风口附近会形成一定范围的高温气流流动区。气流贴附地面流动的过程中,温度快速降低,同时流速不断下降直至康达效应消失,气流向候车区上方流动。因此在垂直截面上温度变化范围较大,截面温度标准差整体处于较高的水平。从图7和图8可以看出,虽然各工况截面温度平均值和截面温度标准差没有明显的变化规律,但是在开启排风的工况中,垂直截面标准差相对较低,这说明开启排风可以使垂直截面内温度分布更加均匀。

2.1.3 不同排风流量下候车区内温度分布云图

为了更清楚地看出不同排风流量对温度分布的影响,在Y轴高度分别为1.20 m和1.80 m截面处生成温度云图如图9(a)~(d)所示。在云图中可以看到,由送风气流产生的局部高温区出现在各送风口所在的位置。从云图上看,在四种排风工况的温度分布相似。送风口附近的温度较高,向候车区中部发展的过程中逐渐降低。从整体上看,S区和E区温度略高于C区。在图9(a)中,A区与S区送风口至楼梯出口的位置出现了大面积的高温区,低温区出现在C区靠近储藏间墙壁的位置。

在图9(b)和图9(c)中可以明显看出,随排风流量增加,截面位置温度分布均匀程度更好。同时,在图9(a)中S区内呈现的局部高温区也随之减小,区域温度峰值降低。在C区内,图9(a)中靠近储藏间

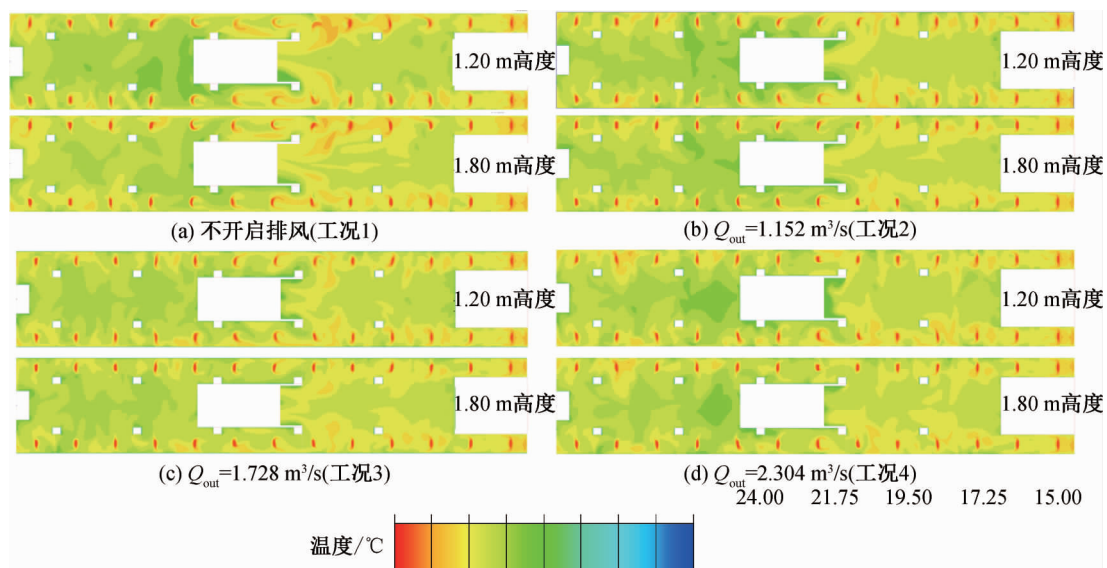


图9 水平截面温度分布云图

附近产生的局部低温区减小,且随排风流量增加,该区域平均温度呈上升的趋势。值得注意的是,工况4的排风流量较工况3高,但对照图9(c)和图9(d)可知,C区中部的温度分布向相反的趋势发展,低温区明显增加。

结合前述分析可知,使用排风系统并在一定范围内提升排风流量可以促进在送风口附近形成的高温区向排风口的位置发展,提升候车区中部的温度及温度分布均匀程度。当排风流量超过该范围时会起到相反的效果,局部低温区扩大,温度分布的不均匀程度增加。

2.2 公共区域气流组织形态

室内环境的速度分布和漩涡分布对人体都会产生明显影响。根据《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)规定,机械通风环境下,夏季室内风速应不大于0.30 m/s,冬季室内应风速不大于0.20

m/s。根据试验表明,风速高于0.50 m/s会使人产生明显的吹风感。同时,由于气流组织中涡的存在会使得污染物在漩涡出处聚集,并影响人的呼吸作用。因此在良好的气流组织中,应该避免漩涡在人体呼吸活动所处的区域内产生。本节中,通过速度矢量云图及漩涡分布来研究不同排风流量对公共区域气流组织形态的影响。

2.2.1 不同排风流量对候车区速度矢量分布的影响

在Y轴高度为1.55 m的截面上生成速度矢量图如图10(a)—(d)所示,后处理时设置速度矢量显示为均衡模式。根据速度矢量图的速度分布可知,各子图中流速最高的位置均出现在送风口所在的区域。由速度矢量可知,该处气流以较高的流速射向地面,并在送风口附近形成了小范围高流速区。对照速度标尺可知,送风口附近的气流流速高于0.50 m/s,人体处于该区域会产生吹风感。

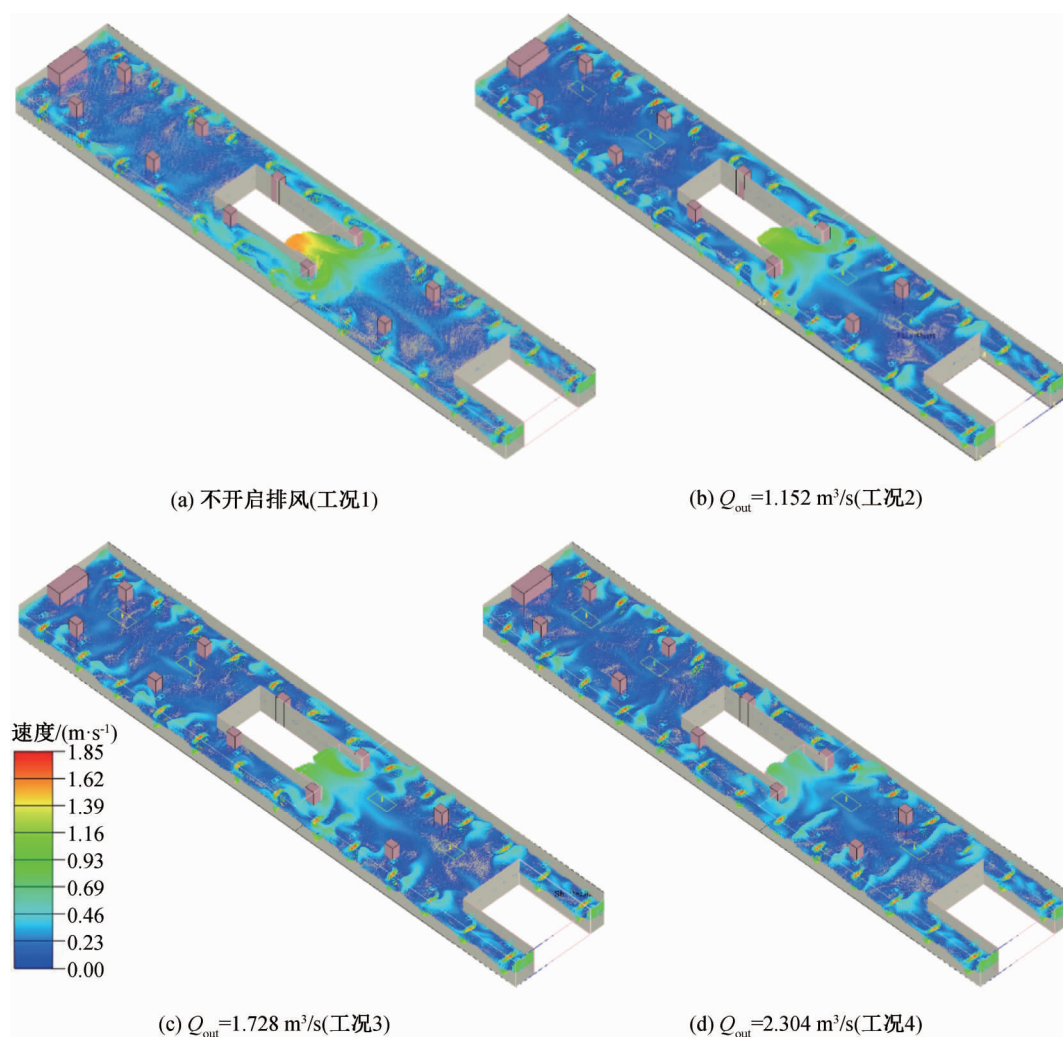


图10 水平截面速度矢量图

在图10(a)中,候车区内出现了明显的高低流速区分布。其中除送风口所在区域外,在A区和楼

梯出口处均出现了明显的高流速区,气流流速均高于0.50 m/s,流速最高的区域高于1.50 m/s。候车

区中部为低流速区,气流流速处于 $0.00 \sim 0.23 \text{ m/s}$ 之间。值得注意的是,在 C 区靠近储藏间壁面的区域内,气流几乎处于停滞的状态,且速度矢量分布稀疏,说明该区域气流对流换热效果处于较低水平。在前文中,该区域内形成了明显的局部低温区。

在使用排风系统的图 10(b)—(d)中可以看到,随排风流量增加,C 区和 S 区中部的气流流速明显提高,速度矢量密度提升。这意味着候车区中部气流对流强度有所增加。同时,随着排风流量的提升,由 C 区进入 A 区的气流流量以及由楼梯出口处流出的气流流量降

低,A 区和楼梯出口处的气流流速呈明显下降。

2.2.2 不同排风流量对漩涡分布的影响

图 11(a)—(d)为涡等势面的湍流耗散率云图,涡等势面基于 Q 准则 ($Criterion = 0.2$) 生成,该图可以清晰地展示出漩涡产生的位置。结合图 10 可知,送风气流由送风口流入候车区时,气流以射流的形式流入。此时气流的湍流耗散率处于较高的水平,气流动能快速下降,形成小范围的漩涡。当气流到达地面后向四周散开,气流流向发生改变,在地面处形成了较大范围的漩涡。

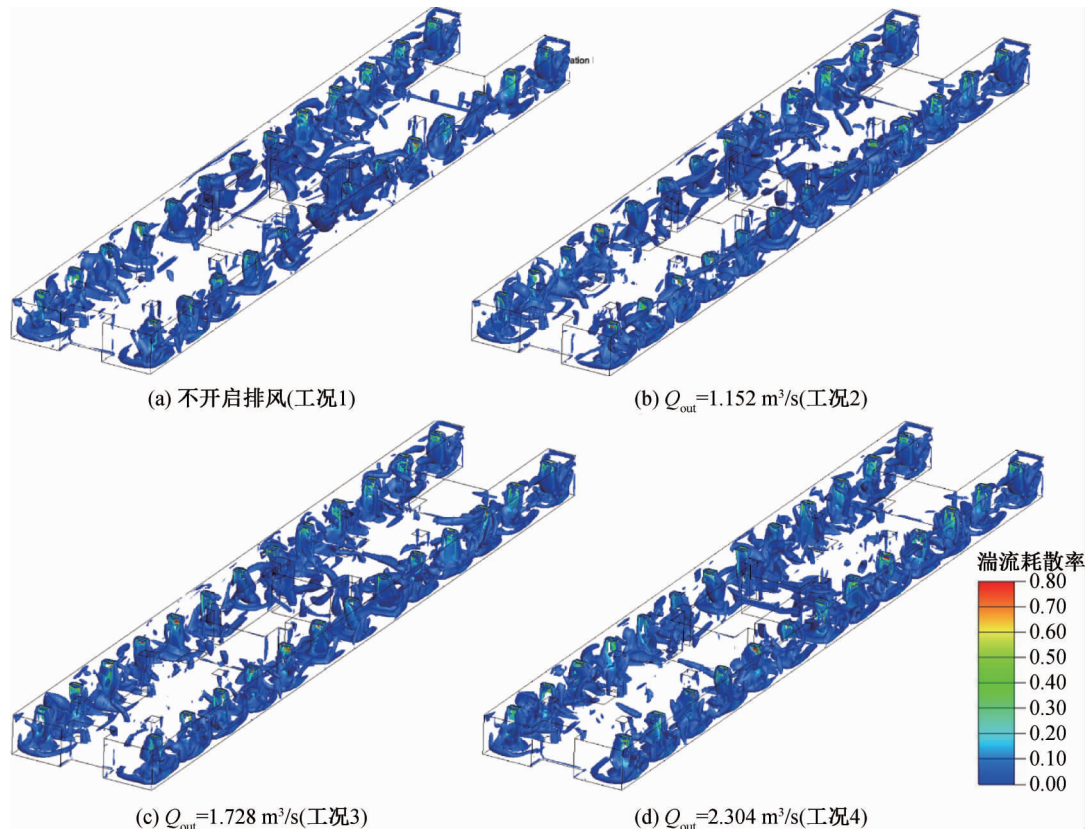


图 11 基于 Q 准则的涡等势面湍流耗散率云图

注意到图 11(a)中 A 区所在位置,由于 C 区气流流经 A 区时会对 A 区内的气流产生影响,涡等势面密集地出现在 A 区顶部,即人头部所在的高度范围内。在图 11(b)—(d)中,由于 C 区的排风流量提升,使得由 C 区进入 A 区的气流流量下降,对 A 区送风气流产生的影响降低,漩涡形成的位置逐渐下降。

值得注意的是,在图 11(d)中出现了向排风口处延伸的漩涡。这是因为排风流量进一步提升,使得大量气流向排风口处聚集,并带动候车区底部形成的低温气流向上流动。这解释了前文的温度云图上,在 C 区内靠近储藏间壁面的位置形成的局部低温区在工况 4 下扩大的原因。

结合速度矢量分布和漩涡分布云图可知,提高排风流量可以增强候车区内空气流速分布均匀程度,降低局部高速区的产生和由气流相互作用引起的漩涡对候车乘客的影响。但同时,过高的排风流量可能会改变候车区内的空气分层,造成不利影响。

2.3 不同排风流量对空气更新能力的影响

空气龄即新鲜空气自流入室内环境后至流经某点处所经历的时间。平均空气龄则是一定范围内,多股气流在某点的空气龄平均值。利用平均空气龄数值可以表示室内环境某处空气的新鲜程度,本文采用平均空气龄研究不同工况下气流组织对候车区内空气的更新能力。

在Y轴高度为1.20 m和1.80 m截面上生成的平均空气龄云图如图12(a)~(d)所示。各子图中,平均空气龄最低的位置均出现在送风口所在的区域,数值较高的区域主要集中在C区靠近储藏间

墙壁的位置。在图12(a)和(b)中,C区内都出现了大面积的平均空气龄高于201.25 s区域。同时,在图12(a)中的S区靠近设备间的位置也出现了平均空气龄较高的区域。

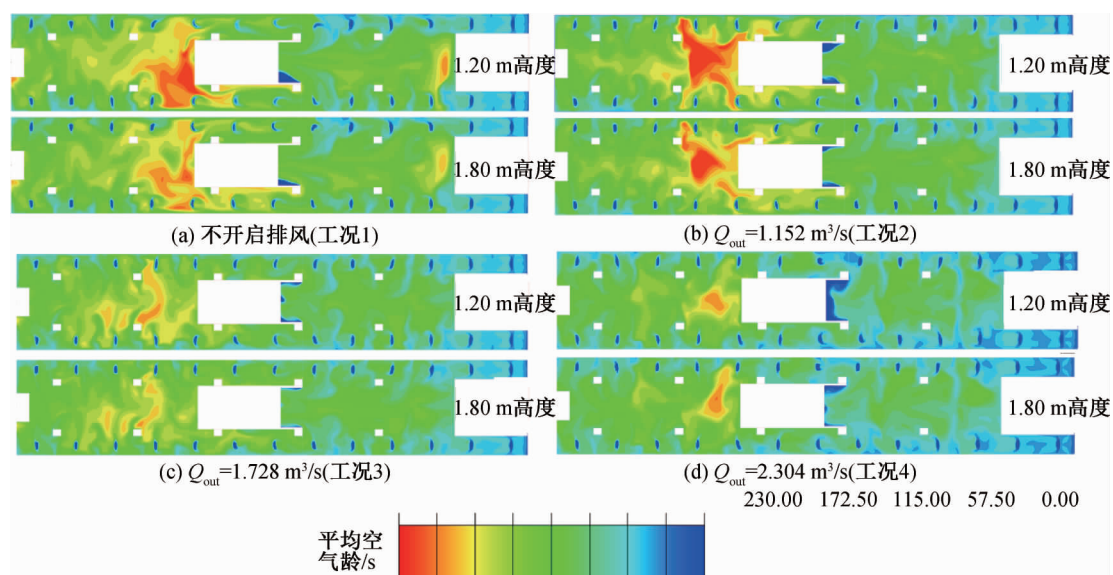


图12 水平截面空气龄云图

对照图12中各子图可以发现,各子图中送风口位置平均空气龄分布相似,但随着排风流量的增加,各子图中平均空气龄过高的区域逐渐减少。其中,图12(a)和(b)中平均空气龄最高的区域,在图12(c)和(d)中平均空气龄数值下降到172.50~201.25 s,且图12(a)中S区内平均空气龄数值高于172.50 s的区域在其他子图内消失。这说明提升排风流量对提升候车区内的空气更新能力产生了明显的作用。

图13和图14分别为Y轴高度为1.20 m和1.80 m处的水平截面平均空气龄均值折线图 and 平均空气龄标准差折线图。对照图13和图14中的数据可以看出,随着排风流量的提高,两个截面位置的平均空气龄均值呈下降的趋势。值得注意的是,工况3与工况4的截面平均值相同,但工况3的截面平均空气龄标准差略低于工况4。这说明当排风流量高于工况3时,提升排风流量对候车区空气更新能力的提升效果减弱。由于提升排风流量会使得排风系统的能耗增加,因此排风流量设置在合理的范围内,可以在提升候车区空气更新能力的同时避免能源过度消耗。

3 结论

本文对屏蔽门系统的地铁站岛式站台通风环境进行了三维定常数值模拟,在相同送风流量下设置不同排风流量。通过对通风环境的温度场、速度场

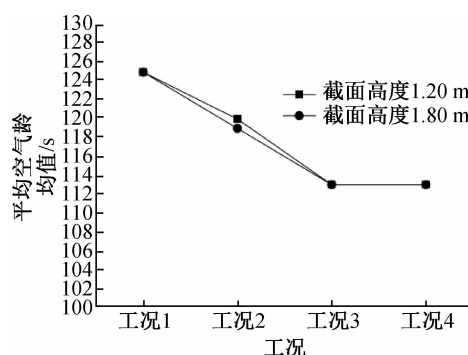


图13 截面平均空气龄均值折线图

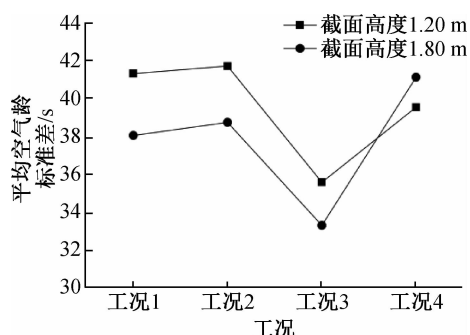


图14 截面平均空气龄标准差折线图

及空气更新能力进行分析,得出如下结论:

a) 送风流量和温度给定后,站台公共区域温度基本可以满足乘客需求。在一定范围内提升排风流量可以提高站台内温度分布的均匀程度,同时提升候车区中上层温度平均值,缩小在台内形成的局部低温区,有利于提升候车区内的舒适度。

b) 在两侧送风中部排风的气流组织形式中,提升排风流量可以使站台中部气流流速增加,提升站台中部空气对流强度,减少站台过道区域和出口区域形成的局部高流速区。同时,提升排风流量可以减少在乘客头部范围内形成漩涡,降低送风气流对乘客的不良影响。

c) 随排风流量的增加,站台空气更新能力有明显提升,送风气流在站台内各区域滞留时间都不同程度下降,有利于降低不良气体在站台内扩散并及时将人体代谢物排出站台公共区域,提升乘客的候车体验。

d) 应当注意的是,排风流量的提升应该在合理的范围内。当排风流量过高时,站台内温度分布不均匀程度会有所增加。同时,过高的排风流量会使站台底部的气流向站台上流动,扰乱站台公共区域的空气分层,影响候车区内的空气质量。另外,排风流量超过合理范围会消耗过多能源,对站台内空气更新能力没有明显提升。

参考文献:

- [1] 何生全,金龙哲,吴祥. 不同地铁环控系统可吸入颗粒物研究及防治[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(3): 128-132.
- [2] 孙增田. 屏蔽门系统在地铁中的应用前景[J]. 都市轨道交通, 2005, 18(2): 4-7.
- [3] Li Y, Leung G M, Tang J W, et al. Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment: A multidisciplinary systematic review[J]. Indoor Air, 2007, 17(1): 2-18.
- [4] Park W H, KIM D H, Chang H C. Numerical predictions of smoke movement in a subway station under ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(3/4): 304-309.
- [5] 袁凤东, 由世俊. 地铁岛式站台空调气流 CFD 模拟[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(1): 89-92.
- [6] 袁凤东, 由世俊, 杨向劲. 地铁侧式站台空调气流 CFD 模拟[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(3): 303-307.
- [7] 潘冬梅, 徐象国, 王怡琳, 等. 高大空间气流组织模拟: 文献综述[J]. 暖通空调, 2018, 48(1): 131-138.
- [8] 沈凯, 吴喜平, 宋洁, 等. 某地铁站不同送回风方式的气流组织数值模拟和分析[J]. 制冷技术, 2010, 30(1): 28-32.
- [9] 高月芬, 刘兆, 邹小全, 等. 某地铁屏蔽门系统岛式站台的室内环境分析[J]. 制冷与空调, 2018, 18(8): 47-50.
- [10] 李晓敏, 高峰, 王立军. 地铁站厅气流组织及温度分布的数值模拟分析[J]. 流体机械, 2019, 47(11): 85-88.
- [11] 王迪, 沈恒根. 上海市一号线地铁站空气质量调研分析[J]. 建筑热能通风空调, 2019, 38(8): 44-47.
- [12] Ampofo F, Maidment G, Missended J. Underground railway environment in the UK part1: Review of thermal comfort[J]. Applied Thermal Engineering, 2004, 24(5/6): 611-631.
- [13] 刘红敏, 连之伟. 室内环境污染与健康[J]. 建筑热能通风空调, 2002, 21(6): 47-49.
- [14] 鲜少华. 杭州地铁通风空调系统节能技术应用现状与展望[C] //浙江省科学技术协会. 2013 年浙江省暖通空调动力学术年会、杭州市暖通空调学术年会论文集. 杭州:中国学术期刊电子出版社, 2013: 129-134.
- [15] Nielsen P V. Description of supply openings in numerical models for room air distributions [J] ASHARE Transaction, 1992, 98(1): 963-971.
- [16] 王刚, 廉乐明, 胡松涛, 等. 零方程模型在大空间建筑热环境模拟中的应用[J]. 建筑热能通风空调, 2003(2): 1-3.
- [17] 刘庚, 刘磊, 张鑫, 等. 不同湍流模型模拟地铁站台气流组织比较[J]. 都市轨道交通, 2012, 25(2): 49-52.
- [18] Rohdin P, Moshfegh B. Numerical predictions of indoor climate in large industrial premises. A comparison between different $k-\epsilon$ models supported by field measurements [J]. Building and Environment, 2007, 42(11): 3872-3882.
- [19] Vrachopoulos M G, Dimokritou F K, Filios A E, et al. Airflow modeling analysis of the Athens airport train station[C]//Advances in Fluid Mechanics VI, 2006, Skiathos, Greece. Southampton, UK: WIT Press, 2006: 479-487.
- [20] Hussain S, Oosthuizen P H. Validation of numerical modeling of conditions in an atrium space with a hybrid ventilation system [J]. Building and Environment, 2012, 52(6): 152-161.

(责任编辑:康 锋)