

列车运动对地铁车站公共区热环境的影响

于永波¹, 魏广宏¹, 李彪¹, 路肆鉴², 郝艳红², 安小诗³, 毛军²

¹北京市地铁运营有限公司机电分公司, 北京

²北京交通大学土木建筑工程学院, 北京

³北京市地铁运营有限公司地铁运营技术研发中心, 北京

Email: bjpar2004@163.com

收稿日期: 2020年9月9日; 录用日期: 2020年9月22日; 发布日期: 2020年9月29日

摘要

以北京地铁1号线某典型车站为研究对象, 考虑自然通风、机械通风、活塞风及不同空调控制系统的耦合作用, 通过对单列车正常行驶、减速进站、停站及加速驶离车站这一过程进行三维动态数值模拟计算及现场环境参数监测, 分析了列车运动对地铁车站热环境的影响。结果表明: 列车运动使得车站公共区的热环境参数产生较大幅度的波动; 列车减速进站及停站的过程中, 站台公共区域特别是靠近运动列车的候车区域温度明显上升, 且形成较大风速, 影响乘客候车舒适性; 采用下送上回的空调控制模式能有效的抑制乘客候车区域的温升, 但部分冷气会经由轨顶风道被抽入排风风道和被列车风卷吸至隧道内, 从而造成能量损失。该研究可为北京地铁1、2号线通风空调系统的设计方案和运行模式的优化提供科学依据。

关键词

列车运动, 地铁车站, 热环境, 通风空调

Influence of Train's Movement on Thermal Environment in Public Area of Metro Station

Yongbo Yu¹, Guanghong Wei¹, Biao Li¹, Sijian Lu², Yanhong Xi², Xiaoshi An³, Jun Mao²

¹Mechanical and Electrical Branch of Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing

²School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing

³Metro Operation Technology R & D Center of Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing

Email: bjpar2004@163.com

Received: Sep. 9th, 2020; accepted: Sep. 22nd, 2020; published: Sep. 29th, 2020

文章引用: 于永波, 魏广宏, 李彪, 路肆鉴, 郝艳红, 安小诗, 毛军. 列车运动对地铁车站公共区热环境的影响[J]. 交通技术, 2020, 9(5): 432-444. DOI: 10.12677/ojtt.2020.95053

Abstract

Taking a typical station in Beijing metro line 1 as the research object, considering the natural ventilation, mechanical ventilation, the piston wind and the coupling effects of different air conditioning control system, 3d dynamic numerical simulation and field monitoring on environment parameters were conducted in the process of single train moving, slow pit stop, stop, and accelerating left the station, and the influence of thermal environment in metro station train movement were analyzed. The results show that the train movement causes the thermal environment parameters in the station public area to fluctuate greatly. During the process of decelerating the train to enter the station and stop the station, the temperature in the public area of the platform, especially the waiting area near the moving train, rises obviously, and a large wind speed is formed, which affects the comfort of passengers. The lower air conditioning control mode can effectively restrain the temperature rise in the passenger waiting area, but some of the cool air will be pumped into the exhaust duct through the rail top duct and sucked into the tunnel by the train wind, thus causing energy loss. The research can provide scientific basis for the design scheme and operation mode optimization of the ventilation and air conditioning system of Beijing Subway Line 1 and Line 2.

Keywords

Train's Movement, Metro Station, Thermal Environment, Ventilation and Air Conditioning

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地铁的客流量大、人流密度高,且空间相对封闭、散热和排热比较困难,因此,地铁热环境问题比较突出,地铁车站的热环境也一直为人们所关注。特别是对于未安装屏蔽门的地铁车站,其车站热环境还受到列车风的影响,车站公共区域的空气温度、湿度、风速等热环境参数在列车风的作用下将产生变化,从而影响到车站通风空调系统对环境的调控作用以及乘客的舒适性。为此,深入分析列车运动对地铁热环境的影响是十分必要的。

目前,国内外研究人员在地铁热环境控制方面开展了诸多研究工作。Ming等[1]以武汉十里堡车站为例进行了研究,认为带风口屏蔽门的地铁车站可以利用活塞风带走隧道及站台余热;You等[2]通过FLUENT分析了活塞风的分流比率和吸风比率;Jia等[3]研究了自然通风模式及空调模式下站台的温度分布情况;Yuan等[4]分析了地铁侧站台的速度场、温度场以及优化通风方式,并对既有车站和改建车站进行了优化设计。虽然有关地铁活塞风效应、机械通风和空调系统的研究已取得了较多成果[5]-[10],但对地铁热环境问题的研究多偏重理论分析和简化计算,与现实情况的吻合程度不高。有些研究即使采用列车运动动态模拟,但是忽略了实际车站轨顶风管排风以及上下行隧道之间的横通道的分流作用,难以准确反映实际情况,考虑运动列车空调机组散热等影响车站公共区的热环境的研究则更少。考虑到北京地铁一号线运营的现实情况,其热环境问题比较突出,且沿线大部分地铁车站未安装屏蔽门,因此,以北京地铁一号线某典型车站为研究对象,采用现场监测与数值模拟相结合的方法对其热环境问题进行研究。

在数值模拟中建立该典型车站的全尺寸三维模型，考虑自然通风、机械风、活塞风及空调盘管冷风的耦合作用，针对单列车正常行驶、减速进站、停站及加速驶离车站的全过程进行非正常流动的计算，以分析列车运动对既有半封闭式屏蔽门系统的岛式站台的公共区域热环境的影响；并结合车站外、车站公共区、站台与隧道交界面、隧道内部的热环境状态参数的现场测试结果，分析车站内公共区的速度场、温度场的变化规律，为地铁车站热环境的改善提供科学依据。

2. 模型及边界条件

2.1. 物理模型

北京地铁某典型车站三维模型如图 1 所示。车站两端都有一段区间隧道与之相连，区间隧道之间每隔 30 米有隧道横通道相连，整个物理模型总长 600 m。为了研究列车运动过程中热环境参数的变化情况，从而分析乘客感知的环境状况，设定了 5 个典型测点，每个测点距离站台地面的高度为 1.6 m，测点位置如图 1 所示。

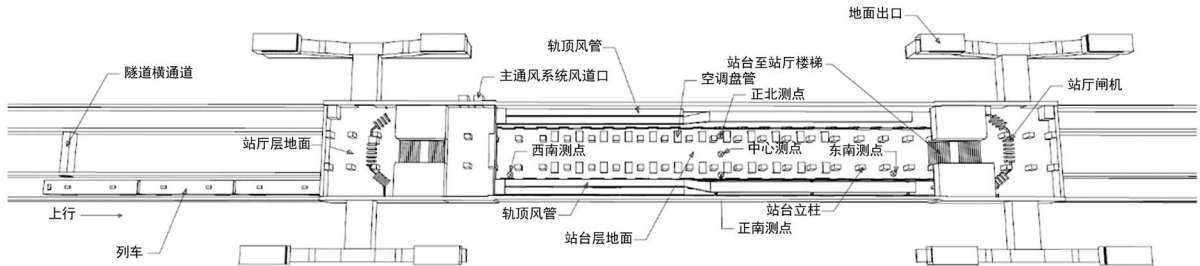


Figure 1. Station geometry model
图 1. 车站几何模型

车站的站台装有半高屏蔽门，通风空调系统的风口布置情况如图 2、图 3 所示。车站目前的环境控制系统主要形式为：车站通风空调系统、区间通风系统及列车通风空调系统同时运行。车站通风空调系统主

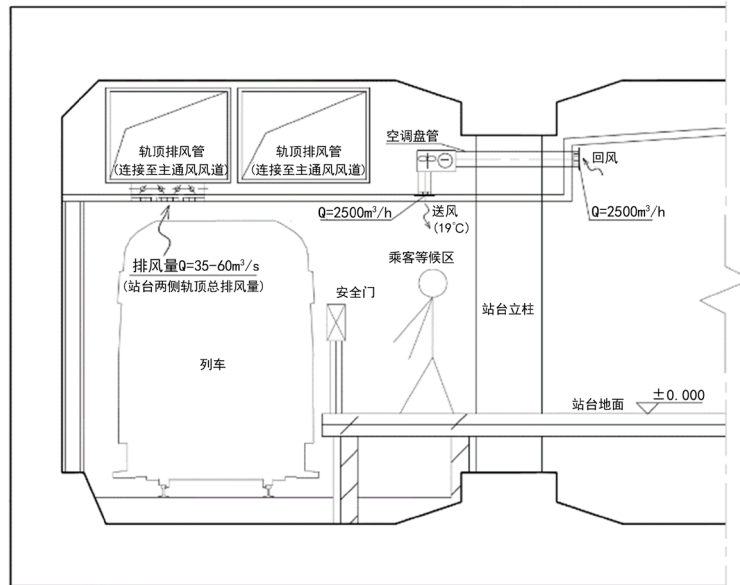


Figure 2. Side view of station-air outlet arrangement of ventilation and air conditioning system
图 2. 车站侧视图 - 通风空调系统的风口布置

要包括主通风系统和输送冷风的盘管装置,前者通过轨顶风管排出车站内的空气,后者采用向下输送冷风、上部回风的方式。图 3 给出了站台轨道上方变截面吊顶风管的三维模型,该风管下部有通向站台的开口,风管端部则连接至主风机风道。

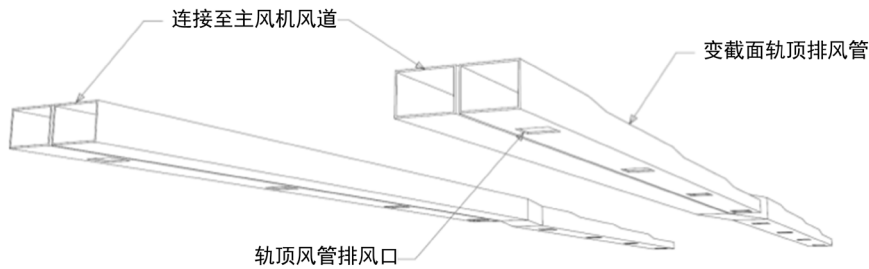


Figure 3. Three dimensional drawing of air duct on rail top of station
图 3. 车站轨顶风管三维图

2.2. 计算条件

由于空气流速较低,模拟地铁车站和隧道内空气的流动和传热特性时,不考虑空气的可压缩性。物理过程的控制方程为连续性方程、动量方程、能量方程;湍流数值模拟方法为 Reynolds 时均法,湍流模型选用标准的 k- ϵ 模型。

1) 初始条件。根据对北京地铁现实情况的调研,列车运行速度变化情况如图 4 所示。列车的平均运行时速为 40 km/h,即 11.11 m/s;制动加速度为 1 m/s^2 ,启动加速度为 0.83 m/s^2 。列车在 0~16.31 s 内匀速运行,第 16.31~27.42 s 减速到静止状态,在站台停靠 30 s;列车在第 57.42~70.8 s 内加速到 40 km/h,第 70.8~86 s 匀速驶离站台。设置车站初始环境温度 31.5°C ,室外初始环境温度 32°C ,隧道内初始温度 33°C 。

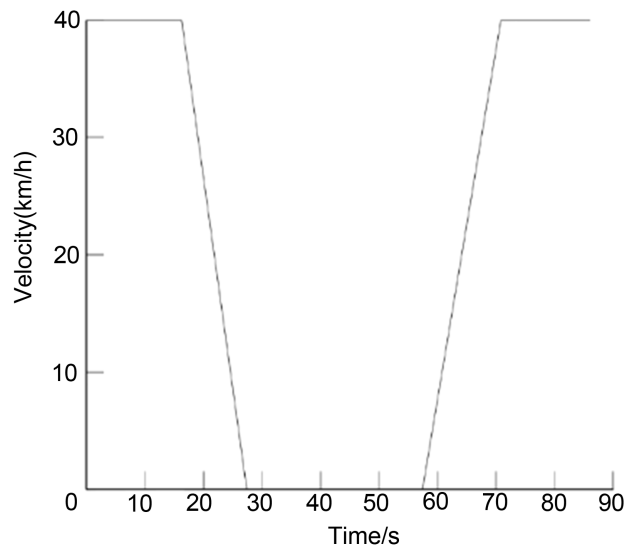


Figure 4. Time varying curve of train running speed
图 4. 列车运行速度时变曲线

2) 边界条件。隧道两端边界为自然流入流出条件;地面出口边界为自然流入流出条件;空调盘管的出风口温度为 19°C ,风速为 2.48 m/s ,其回风口的静压力为 0,初始温度为 31.5°C 。站台两侧上方轨顶风管与主通风系统的风道联通,总排风量 $35\sim 60 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据现场实测数据绘制的主通风系统风机的压力 -

流量曲线如图 5 所示。风机的额定压力为 750 Pa，实际工作点的压力还取决于管道阻力率，实测值为 650 Pa，初始温度为 31℃。

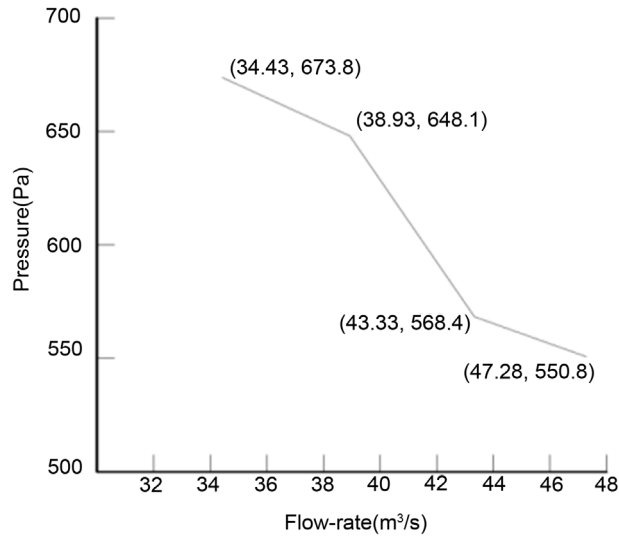


Figure 5. Pressure flow rate diagram of fan
图 5. 风机压力流动率图

3) 热源分布。经计算分析，人体热源影响甚微，故不作考虑。列车在各个阶段发热量均不相同。根据相关文献[11] [12]，列车每节车厢考虑辅机散热，车顶发热量为 60 W；同时，采用过程法计算可得各阶段的散热值，即：车底匀速行驶阶段产热 6 kW，减速阶段产热 2.6 kW，停站阶段产热 10.1 kW，加速阶段产热 6.2 kW，如图 6 所示。这些热值在数值模拟的不同时间段内加载于计算过程。

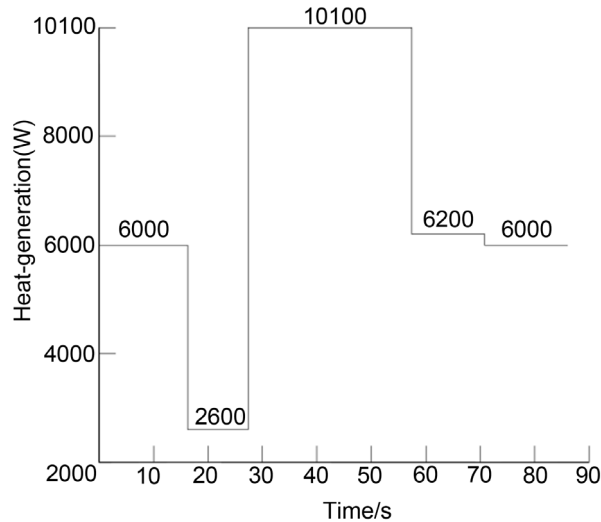


Figure 6. Heat production of each stage of train operation
图 6. 列车运行各阶段的产热量

4) 计算工况。为便于对比列车运动的作用。设置列车运动和静止两个典型工况：工况一，列车以图 4 的速度运动，且车站冷风盘管系统、主通风系统和列车通风系统均开启；工况二，无列车，冷风盘管系统、主通风系统均开启。

5) 网格划分。图 7 为网格划分示意图, 利用多嵌块“block in block”的方法增加网格密度, 在车站-隧道整体模型中嵌入车站区域, 车站区域中再嵌入站台, 形成“块中块”。通过多嵌块方法增加关注区域网格密度, 列车周围区域亦进行局部加密, 最终计算区域共生成 1325 万多个四面体网格单元。

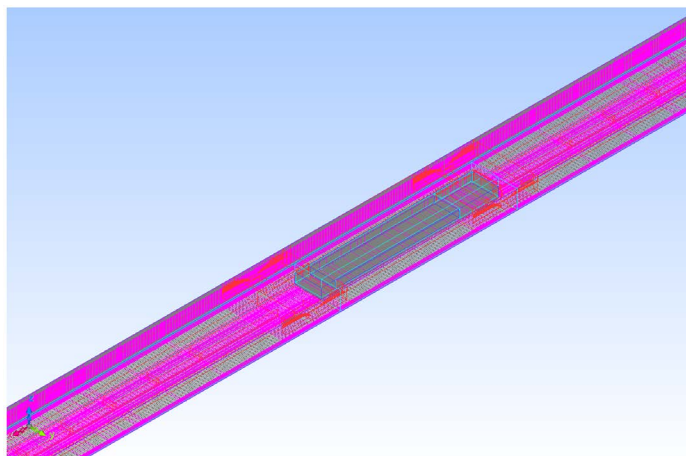


Figure 7. Grid division diagram
图 7. 网格划分示意图

3. 模拟结果与分析

列车运动引起的活塞风进入车站后会造成车站气流的紊乱, 改变车站的温度场、速度场分布, 影响乘客的舒适性。下面分析列车自上行方向进站的列车运动、列车停留在站台上两种工况下的站台热环境参数变化情况。

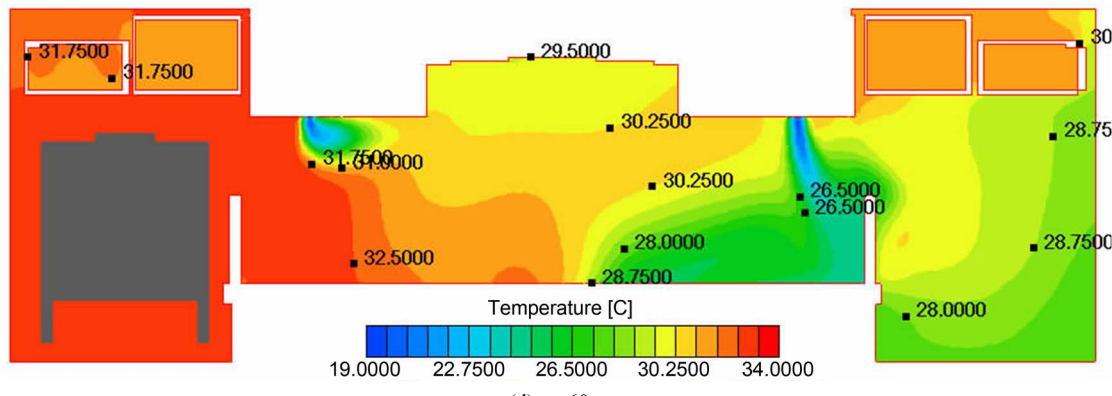
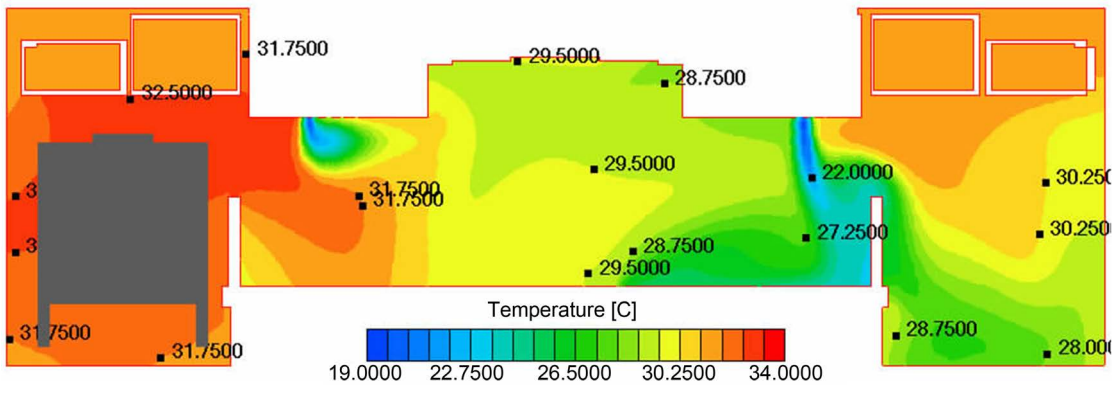
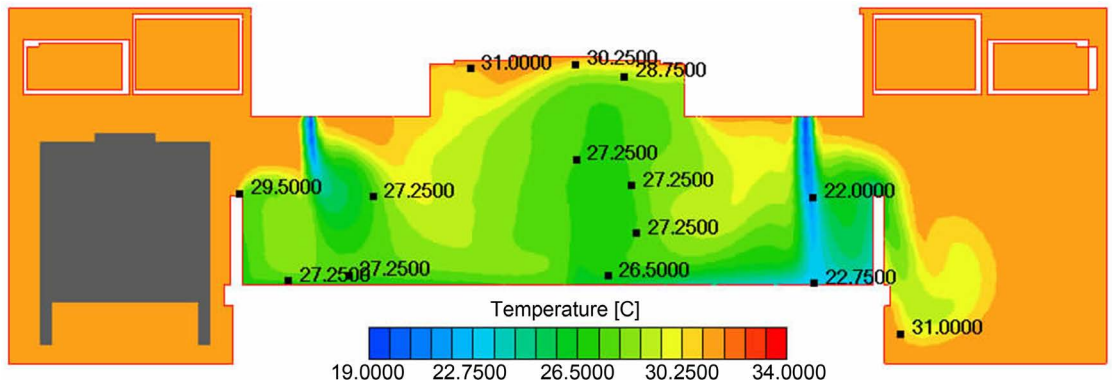
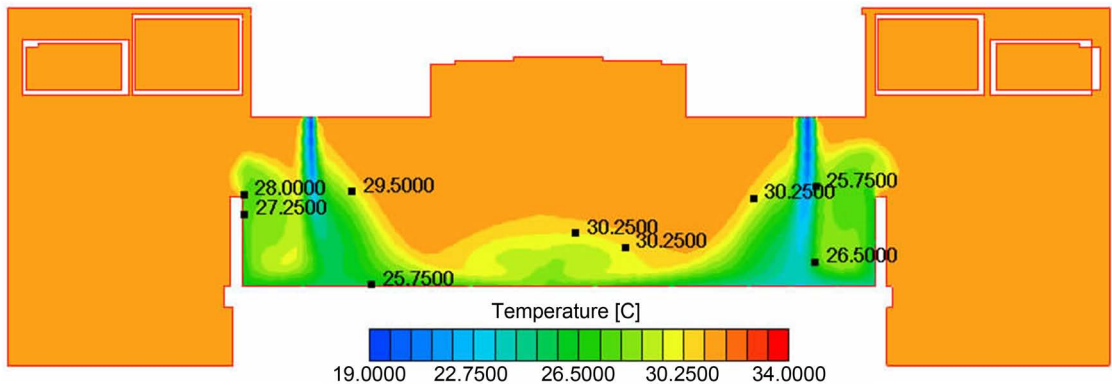
3.1. 列车运动工况

列车从隧道驶入车站、离开车站的过程, 空气的流动和传热均处于明显的动态变化中。因此, 需对不同时刻站台中部横截面上的温度及速度分布的情况进行对比分析。

3.1.1. 温度分布

图 8 给出了不同时刻站台中部横截面的温度分布图。由图可知, $t = 10\text{ s}$ 时, 列车尚在隧道内匀速行驶, 站台区域热环境主要受空调系统影响。 $t = 30\text{ s}$ 时, 列车开始驶近站台, 列车运动引起的活塞风影响到站台热环境, 且站台温度分布呈非对称形式, 靠近进站列车一侧区域的温度因受到列车散热的影响而高于另一侧区域的温度。 $t = 50\sim 60\text{ s}$ 时, 列车停靠站台, 列车诱导风的惯性作用及列车散热对站台的影响效果十分明显, 站台大部分区域温度均有所上升, 且靠近列车的乘客候车区域变化最为显著, 某些位置的温升超过 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度分布呈明显的非对称性。 $t = 80\text{ s}$ 时, 列车驶离车站, 在车尾区域和站台部分区域产生负压, 大量新风可通过地铁出入口和人行通道流入站厅和站台, 加之车站轨行区上方风管的排风作用, 空调盘管输送的冷风迅速扩散, 使站台公共区域温度恢复至 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

图 9 给出了站台典型数据监测点(位置参见图 1)的温度变化情况。由图 9 可知, 列车自上行方向行驶过程中, 西南测点首先受到列车活塞风的影响。该点的温度因活塞风将部分热量带入车站而有所升高, 随后因列车停站后受空调盘管冷风作用而温度下降, 在列车离开时因受列车尾流影响又有温升; 乘客候车区域的东西两侧区域温度变化较其他区域的变化更为显著。



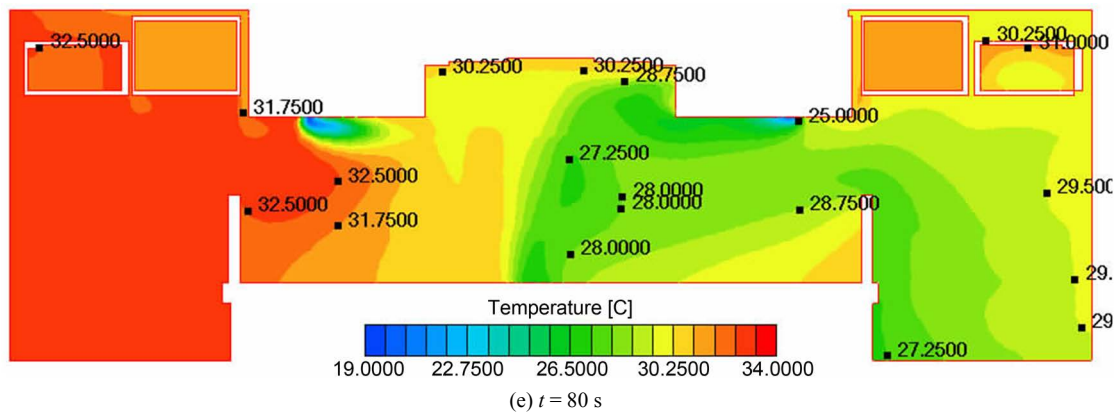


Figure 8. Temperature distribution of cross section in the middle of platform at different times

图 8. 不同时刻站台中部横截面温度分布图

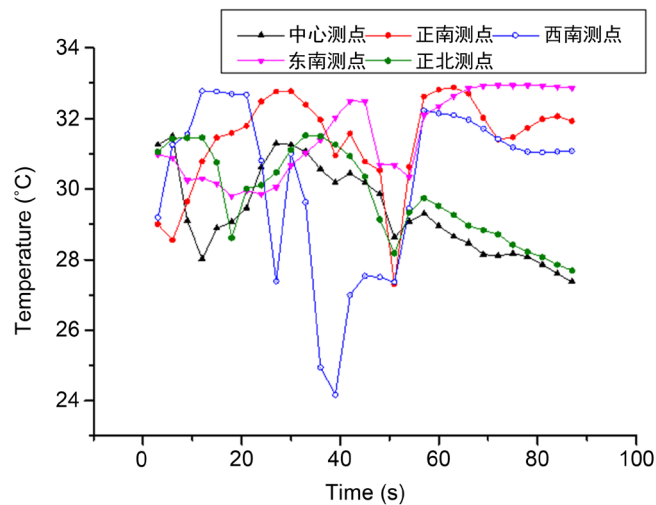


Figure 9. Temperature variation curve of different typical measuring points on platform

图 9. 站台不同典型测点温度变化曲线

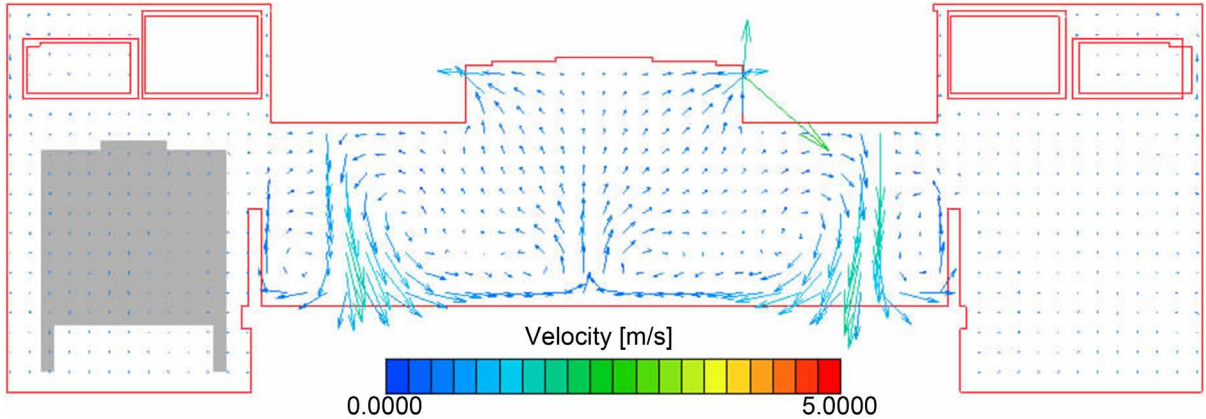
由图 9 可知，站台上最靠近列车上行进站处的西南监测点的温度受列车风的影响最为显著，波动幅度最大。在列车进站到完全停靠下来的过程中，第 40 s 的温度达到最低。其原因是：活塞风效应在隧道入口到车尾之间区域内形成较大风速，当列车减速进站、车速逐渐减小至低于该风速时，列车后面的空气由于惯性而在车尾产生“挤压”作用，使得局部区域的压力升高，在站台候车区上方的盘管与西南监测点附近的区域形成较强气流，混合了冷风的气流使得该点的温度明显下降。

可见，列车运动对站台区域的温度分布和变化均产生较为明显的影响，且不同位置的变化程度也并不相同。

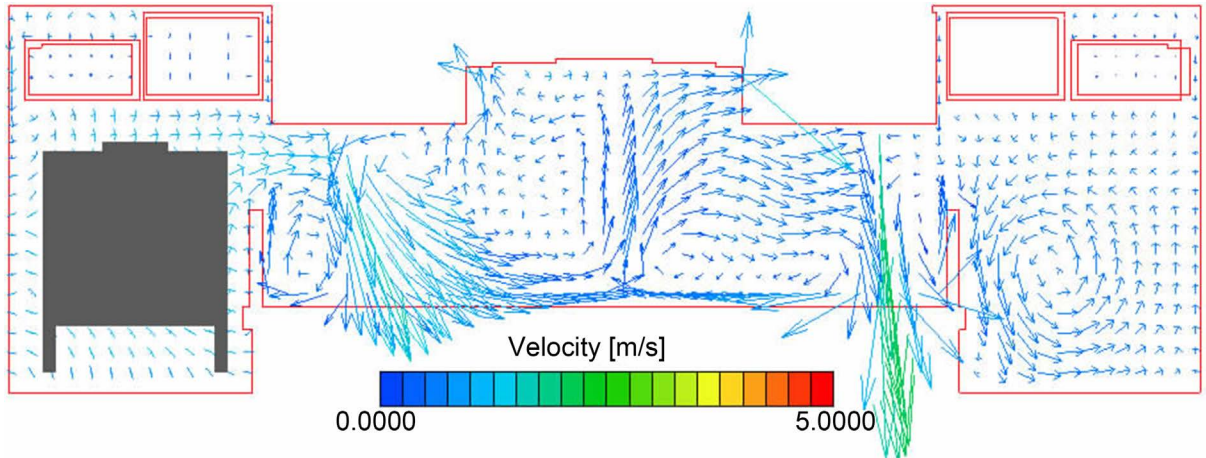
3.1.2. 站台中部横截面流速分布

风速是影响站台乘客舒适性的重要指标。图 10 给出了列车运动及进、离站过程中，站台中央区域处横截面的速度分布情况。由图 10 可知， $t = 10$ s 时，列车尚在隧道内匀速行驶，未进入站台区域。由于站台吊顶两侧空调盘管的作用，气流在站台中部交汇，在站台中部和半高安全门附近形成较为稳定的对称涡流，站台的速度场和温度场空间分布虽然不均匀，但均尚未受到列车风的影响。而随着列车驶入站台，当 $t = 30$ s 时，列车活塞风明显影响站台速度分布，涡流的对称形式被打破，在靠近列车一侧的乘客

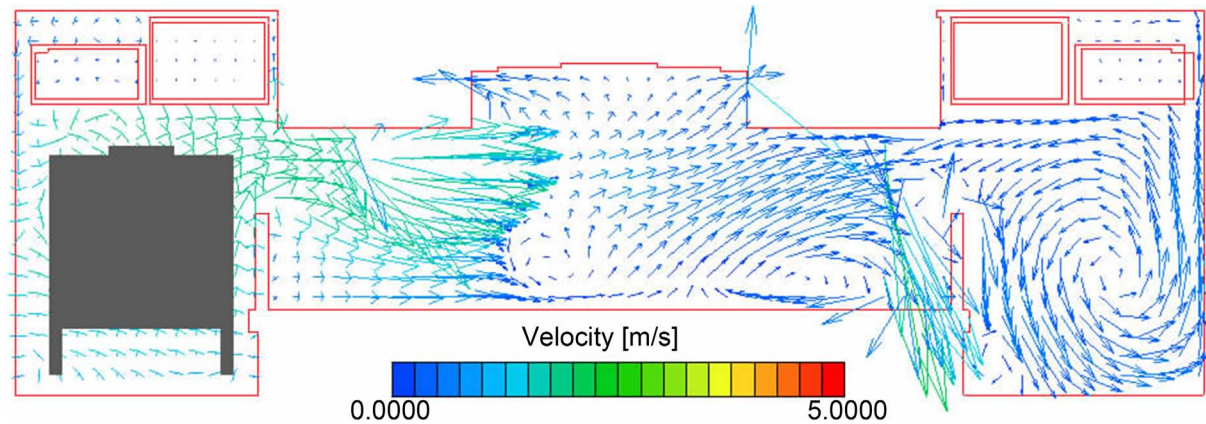
候车区域受到的影响尤为明显，不仅产生较为强烈的气旋，而且盘管向下输送的冷风亦以紊乱的形式扩散至其他位置。 $t = 50\text{ s}$ 时及以后，活塞风仍持续扰动站台速度场分布，形成指向无列车停靠的站台侧的横向气流；但随着列车停靠车站和活塞风减弱，站台流场受影响的程度有所减弱直至稳定下来。 $t = 70\text{ s}$ 时，随着列车离站，站台上的气流组织恢复正常，空调盘管系统的作用成为影响站台速度场分布的重要因素。



(a) $t = 10\text{ s}$



(b) $t = 30\text{ s}$



(c) $t = 50\text{ s}$

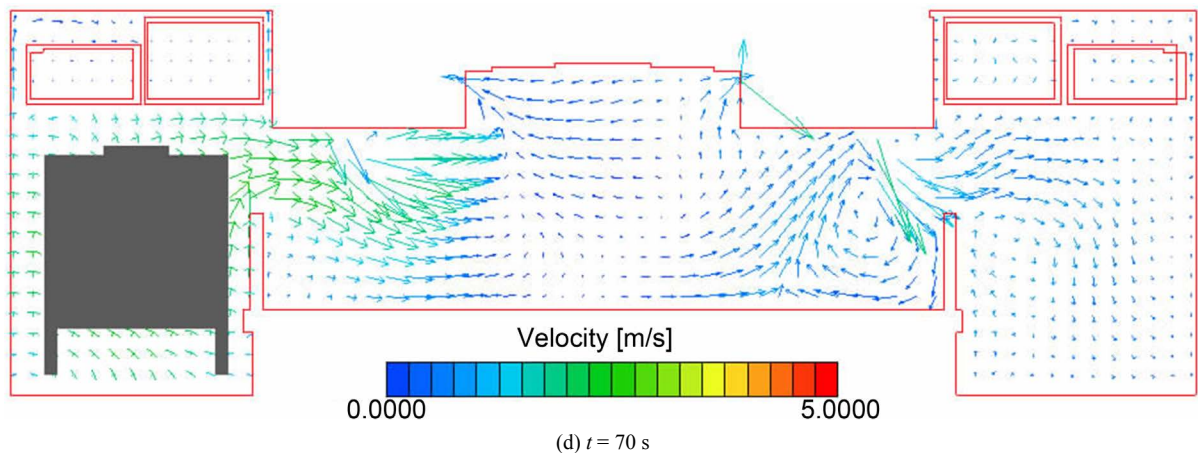


Figure 10. Velocity distribution of cross section in the middle of platform at different times
图 10. 不同时刻站台中部横截面速度分布图

图 11 是站台几个典型测点的速度变化曲线, 在列车运动过程中, 站台公共区域受列车运动的影响随时间而变化。其中, 靠近列车端的乘客候车区域的风速变化较大, 局部位置风速变化达到 4~5 m/s。列车进站前, 最初受到活塞风影响的是靠近列车进站端的西南区域; 列车减速进站时, 站台区域气流组织受到活塞风、机械通风作用的持续作用; 列车停车过程中, 站台公共区域空气仍处于流动状态, 且其风速分布趋向均匀。东南测点的情况正好与西南测点相反, 开始受列车风的影响较小, 列车离站时气流受到的影响则较大, 波动明显。

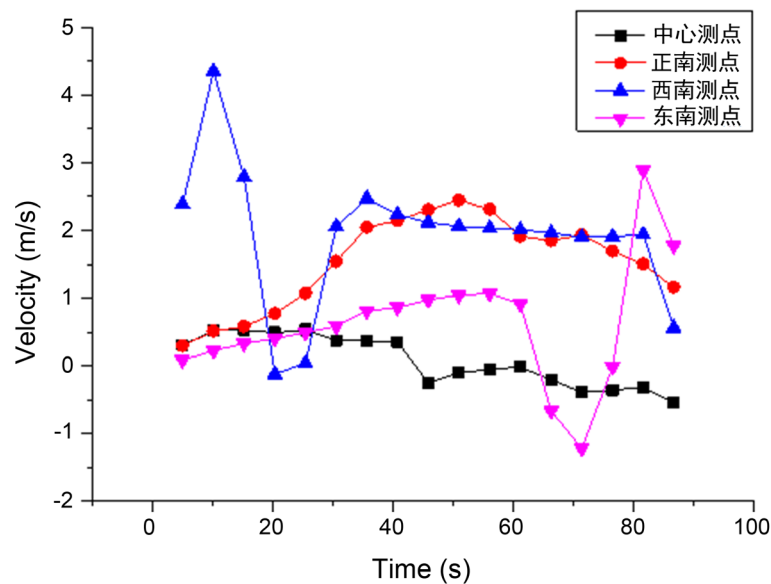


Figure 11. Velocity variation curve of different measuring points on platform
图 11. 站台不同测点速度变化曲线

由图 9~11 可知, 站台速度场受影响范围与温度场受影响范围基本保持一致, 表明地铁车站热环境参数变化时效是趋同的。在列车进站、停靠、离站的过程中, 受到活塞风影响最大的是靠近列车进站、出站端的区域即站台西南区域和东南区域, 局部流速变化超过 4 m/s。列车离站时, 车站站台以负压为主, 楼梯处有大量自然新流向站台实现通风换气。

3.2. 无列车运动的工况

为了更清楚地分析列车运动对站台公共区的热环境的影响,下面分析无列车运动、无列车停靠在站台的工况,并将两者进行对比。

3.2.1. 温度分布

不考虑列车运动,并设定站台上亦无列车停靠,开启空调盘管和车站机械通风系统后,站台中部横截面温度分布如图 12 所示。由图可知,同等条件下,若不考虑列车的影响,空调盘管输送的 19℃冷风较为稳定,且对热环境状态的影响非常显著,能使站台乘客候车区的温度维持在 23℃左右。尽管站台公共区的温度分布并不均匀,但基本介于 22℃至 26℃之间,因此,温度空调盘管及机械通风系统能够有效地改善站台区域的热环境状态,满足乘客对环境舒适度需求。

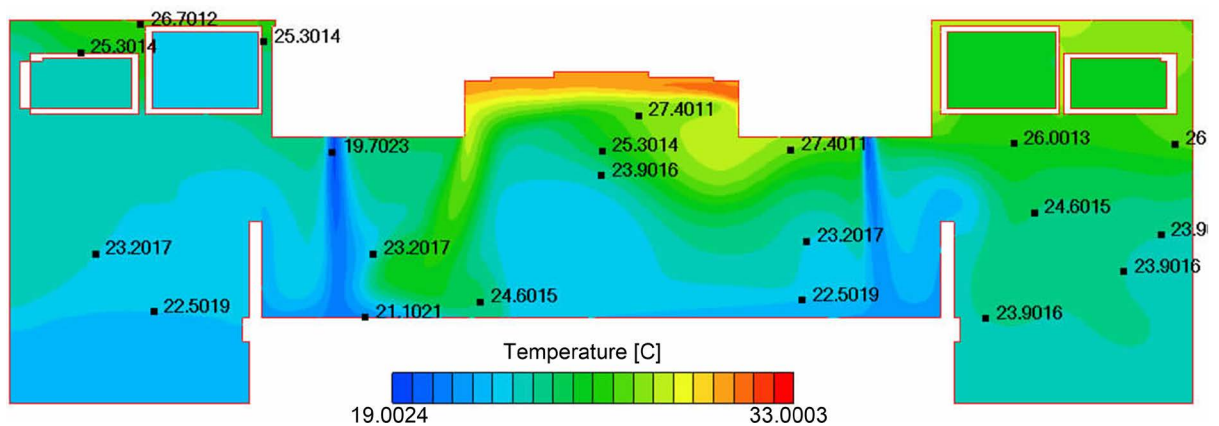


Figure 12. Temperature distribution of cross section in the middle of platform

图 12. 站台中部横截面温度分布图

3.2.2. 速度分布

图 13 为无列车运动工况的站台中部横截面速度矢量图。由图可知,空调盘管的出口射流较为稳定,到达人体平均高度(约 1.6 米)处的最大风速可达 3 m/s;站台顶部形成尺度较大的回流,回流风速可达 5 m/s,而站台候车区平均风速为 1~3 m/s。由于站台两侧轨顶风管均接入车站主通风系统,其管道阻力率和风量并不相同,故两侧轨顶风管排风口附近的流场并不相同,速度矢量图呈不对称分布。

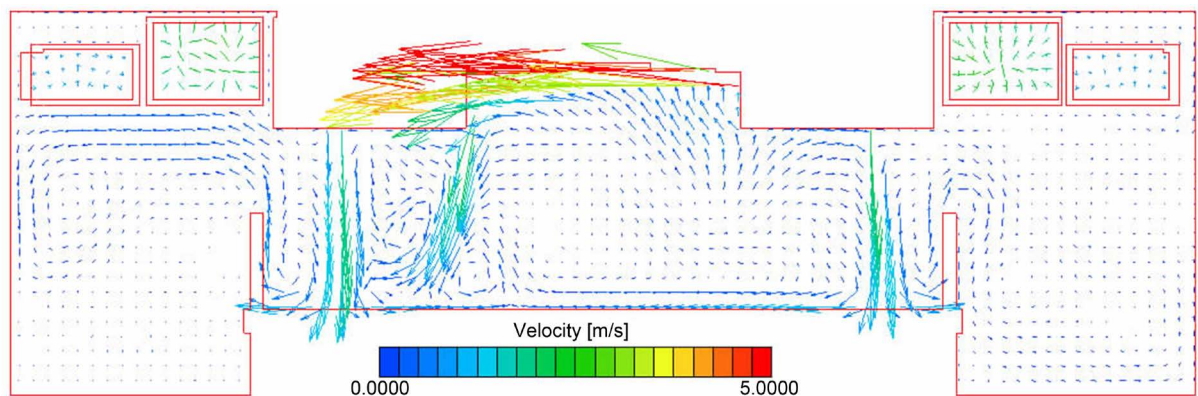


Figure 13. Temperature distribution of cross section in the middle of platform during balance

图 13. 平衡时站台中部横截面温度分布图

比较图 8 和图 12 以及图 10 和图 13, 对于采用非屏蔽门环境控制系统的车站, 列车运动引起的活塞风或列车风对其站台的温度分布和气流组织有显著的影响, 其作用超过了车站机械排风系统对流场的控制作用。

4. 热环境温度的现场监测与数值模拟的对比

涉及列车运动的非定常流动的数值模拟计算会耗费大量的时间和资源, 计算时间不宜过长。本文根据地铁列车进站、离站情况, 将计算时间控制在 100 s 以内。为了获得更多的环境参数数据, 在地铁车站现场对典型位置的温度进行了监测。

图 14 是车站站台上典型位置的温度监测结果。该图记录了 15 分钟内列车 4 次进、出站过程中监测点温度的时变曲线波动情况。由图 14 可知, 热环境参数受列车进站、离站的影响呈现出周期性的变化。由于每次进、离车站的时长不尽相同, 因此, 每次列车运动对于站台热环境的影响也不完全一致, 例如, 4 次进、离站的西南监测点的温度峰值相差约 1℃, 温差。此外, 各监测点受影响的情况也相差较大, 靠近列车一侧候车区域温度变化明显。例如, 列车进站端的西南监测点和列车离站端的东南监测点的温度变化最为明显, 温差可达 2℃~4℃, 而站台中心监测点的温度在 1℃ 的范围内波动。在站台中部乘客候车区, 由于空调盘管系统的作用, 有效抑制了这一区域的温升, 温度呈现幅值较小的波动变化。这一变化规律与数值模拟结果较为吻合。

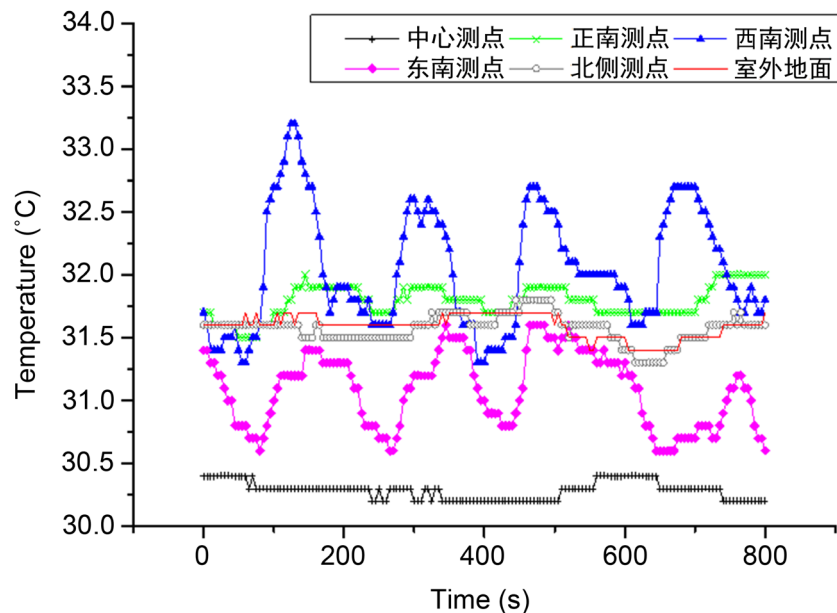


Figure 14. Measured temperature variation curve of different typical measuring points of platform

图 14. 站台不同典型测点实测温度变化曲线

将现场监测数据与数值模拟结果进行对比, 根据图 9 与图 14 可知, 典型监测点的温度变化的趋势基本相近。实际上, 影响站台的热环境变化规律的扰动因素较多, 数值模拟未在列车停站时设置半高安全门的开启, 未考虑空调列车内与站台的冷热交换以及客流等因素对站内热环境的影响, 因此, 模拟结果与现场监测数据很难完全一致, 但变化趋势的一致性验证了数值模拟方法的适用性和数值模拟计算结果的正确性。现场监测点的数量有限, 而数值模拟可获得全域流场的物理量值, 因此, 将现场监测与数值模拟方法结合起来分析车站热环境的动态变化规律是必要和可行的。

5. 结论

1) 地铁列车在匀速行驶、减速停靠、加速驶离的各阶段中, 站台公共区的温度和风速的变化均有所不同, 靠近列车一侧乘客候车区的变化比较明显, 而站台中部中心区域的则变化较小。

2) 地铁列车在驶入车站时, 靠近列车一侧的乘客候车区域的空气温度明显升高, 且在列车停靠站台的 30 s 内, 部分区域相对温升超过 3℃, 气流速度超过 4 m/s, 会直接影响乘客的舒适性。

3) 空调盘管采用下送上回的模式虽能有效抑制乘客候车区温升, 但部分冷气会越过站台的半高安全门扩散至隧道; 另有部分冷空气在车站机械通风系统的作用下流入轨顶风管并经风亭排至室外。因此, 系统存在冷量损失问题。

4) 分析运动列车对地铁热环境的影响, 宜采用数值模拟与现场监测相结合的方法。

对于采用非屏蔽门系统的地铁车站, 空调季车站主通风系统如何与空调盘管系统匹配运行还有待进一步探讨。

基金项目

北京市地铁运营有限公司科技项目(C19L01030, C19L00180)。

参考文献

- [1] 明廷臻, 龚廷睿, 杨威, 等. 带风口屏蔽门地铁车站自然通风特性的数值模拟[J]. 暖通空调, 2017(7): 94-98 + 74.
- [2] 由世俊, 薛鹏, 张欢. 基于动网格的地铁活塞效应非稳态气流模拟[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014(2): 168-173.
- [3] 杨晖, 贾力, 杨立新. 列车运动对地铁站台空气温影响的数值分析度分布动态[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(1): 37-44.
- [4] Yuan, F. and You, S. (2007) CFD Simulation and Optimization of the Ventilation for Subway Side-Platform. *Tunneling and Underground Space Technology*, **22**, 474-482.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.10.004>
- [5] 谷雅秀, 翟彤, 潘嵩. 长春地铁热环境与热舒适实测分析[J]. 都市快轨交通, 2019, 32(5): 25-32.
- [6] 管宏宇, 鹿铭理. 胡松涛地铁车厢夏季热环境模糊综合评价[J]. 青岛理工大学学报, 2019, 40(5): 29-66.
- [7] 邓保顺. 北方地区屏蔽门系统地铁初期冬季热环境分析[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(12): 84-89.
- [8] 曾逸婷, 赵蕾. 地铁车站环境热舒适与通风空调系统节能策略研究进展[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(3): 178-183.
- [9] 朱培根, 韦炜致. 列车运行速度对安全门地铁站台热环境的影响研究[J]. 建筑热能通风空调, 2018, 37(11): 47-50, 58.
- [10] 杜赛赛, 许耕昕. 北京地铁夏季热环境调查研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2017(28): 2082-2083.
- [11] 茂又弘道, 刘红星. 地铁内的发热及热负荷计算[J]. 隧道译丛, 1993(8): 16-25.
- [12] 刘晶. 地铁热环境影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2003.