

CFD 在地铁站台空调系统设计中的应用

张 丹

(建研科技股份有限公司,北京 100013)

【摘要】以典型的北京地铁建国门站为研究对象,以 Navier-Stokes 方程为基础,引入了广泛应用的标准的 $k-\varepsilon$ 湍流模型,建立用于求解典型地下铁道站台内流场的计算流体力学模型。采用计算流体力学场模拟软件 ANSYS CFX 为计算工具,建立典型地铁车站的物理与数学模型,以试验测试与大量参考文献综合计算的活塞风结果为计算边界条件,模拟计算城市地铁空调系统的气流场,得出地铁站台典型断面的温度场、速度场以及候车区关键位置的空气温度与速度分布规律。

【关键词】地铁空调系统;CFD 模拟;温度场;速度场

【中图分类号】U239.5;U453.5 **【文献标识码】**A **【文章编号】**1674-7461(2014)03-0095-04

随着现在社会经济发展和城市化步伐的加快,交通拥挤成为现代化城市的重点问题,城市交通堵塞等现象在很大程度上限制了城市的可持续发展。与此同时,城市地下铁道因其运量大、快速便捷、安全准点、相对环境污染程度低以及综合经济效率高特点成为解决城市交通拥挤与堵塞问题的有效交通工具^[1-3]。随着对地铁空调系统研究的不断深入以及计算机的飞速发展,地铁空调数值模拟也得到发展。在地铁系统气流组织研究方面,计算机数值模拟技术得到了广泛应用,在此基础上开发出了一些隧道空气动力学软件,用于较复杂的隧道通风设计^[4-6]。

1 CFD 技术简介

1.1 ANSYS CFX 软件简介

本次模拟计算采用的软件 CFX 是英国 AEA 技术有限公司开发的 CFD 软件,兼有先进的求解器和强大的前处理和后处理功能。它同时包括结构网格、非结构网格和复合网格,用计算松弛技术和压力修正技术,先进的多方程联解法,使得模拟计算更可靠、快速准确;用了较完整的菜单交互操作和完整的模拟定义构成、模拟计算与分析、结果处理

系统,使其更直观、更便捷;在线帮助体系比较完善,在收敛和模拟计算上也有新发展。

1.2 控制方程和定解条件

空气流动控制方程,实际是对流扩散作用下的物理量(质量、动量和能量等)的守恒定律,可用统一的通用微分方程式(1)表示^[7]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi - \Gamma_{\phi} \text{grad}\phi) = S_{\phi} \quad (1)$$

式中, ϕ 代表速度、温度以及湍流参数等物理量,上式代表流体流动的动量方程、能量方程以及湍流动能和湍流动能耗散率方程。对于实际物理问题,需有定解条件才能封闭烟气流控制微分方程组,得出问题的解。本次模拟以列车进出站台一次间隔 3 分钟内的时均分布情况为计算目标,故简化为定常流动,所涉及定解条件只含边界条件^[8-9]。

2 典型地铁站台模型简介

2.1 几何模型描述

北京建国门地铁站位于建国门内大街与东二环交点处,是北京地铁一号与二号线的换乘车站,地铁站共有:A、B、C 三个出入口。车站形式为岛式车站,站厅布置在站台两端,根据该车站的空调负荷确定空调系统的送回风方案见图 1 所示。

【基金项目】“十二五”国家科技支撑计划“基于建筑信息模型综合规划设计技术研发应用”(2012BAJ09B04)

【作者简介】张丹(1987-),女,程序员。主要研究方向:工程设计软件开发。

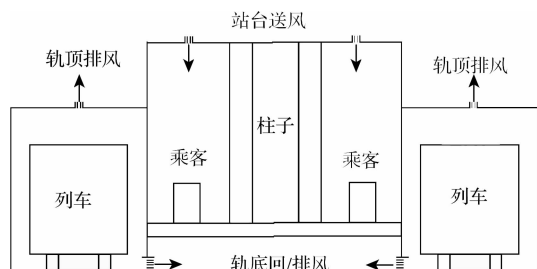


图1 建国门站一号线与二号线站台空调方案简图

站厅层设置送风口,尺寸为 $1\,500\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,一号线有10个,二号线有15个,回风口尺寸为 $400\text{ mm} \times 500\text{ mm}$,布置于人行出入通道两侧,站台层采用上部送风,轨顶排风以及轨底回/排风的气流组织形式,站台送风口尺寸为 $1\,500\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,一号线与二号线各有42个,轨顶排风口尺寸定为 $1\,000\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,各40个,位于轨道上方,轨底回/排风口尺寸为 $400\text{ mm} \times 500\text{ mm}$,各80个,均匀布置于站台板下方。

2.2 数值模型描述

本模拟设定车站候车站台有效断面尺寸为 $120\text{ m} \times 12\text{ m}$;隧道尺寸为 $150\text{ m} \times 4.1\text{ m} \times 4.3\text{ m}$,列车尺寸为 $117\text{ m} \times 2.8\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ 。列车冷凝器位于列车顶部,制动电阻位于列车底部。人员站立于列车隧道边界半米之外,模拟中简化为尺寸为 $100\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1.7\text{ m}$ 的长方体。根据建国门站的空调系统负荷,车站一号线站台车站公共区总空调送风量为 $22.7 \times 104\text{ m}^3/\text{h}$,其中补充新风量为 $2.27 \times 104\text{ m}^3/\text{h}$,二号线站台车站公共区总空调送风量为 $18.45 \times 104\text{ m}^3/\text{h}$,其中补充新风量为 $2.27 \times 104\text{ m}^3/\text{h}$ 。根据站台形式构成及空调方案,建立的CFD模型如图2所示。

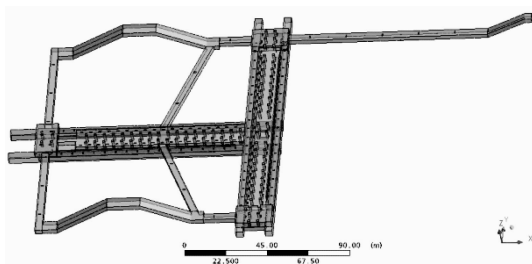


图2 建国门地铁站 CFD 模拟物理模型

2.3 数值模拟定解条件

2.3.1 站台各项发热量设定

根据站台各项热源发热量的计算方法计算出各项发热量结果设定见表1。

2.3.2 有关温度边界设定

根据空调要求,设定典型时刻空调室外计算干球温度为 32.1°C ;空调工况下送风温度: 21.336°C ;隧道空气温度: 35.779°C 。

2.3.3 有关速度边界设定

根据站台空调通风系统的送风回风量及各风口尺寸,各风口速度设定见表2。

隧道口处活塞风边界条件根据相关文献及实际测量,取典型模拟时刻活塞风量的平均值,给定速度边界条件见表3。

3 数值模拟结果分析

3.1 速度场分析

图3为站台送风口所在截面速度矢量分布图;图4为乘客候车平面呼吸高度线速度沿站台长度方向分布图。图中,速度单位均为 m/s 。

表1 模拟各热源项边界条件设置

	列车散热		客流散热	设备与照明
	冷凝散热	启动与制动散热		
一号线站台	286.935 W/m^2	333.552 W/m^2	539.6 W/m^3	55.3 KW
二号线站台	229.548 W/m^2	266.842 W/m^2	404.7 W/m^3	63.2 KW
备注	面热源位于列车顶部	面热源位于列车底部	体热源	根据情况确定

表2 地铁站各风口速度设定

	站厅送风 (m/s)	站台送风 (m/s)	站台底板 排风(m/s)	轨顶排风 (m/s)
一号线	1.946	1.946	3.084	0.394
二号线	1.499	1.499	2.621	0.320.9

表3 本模拟隧道活塞风边界条件设置

	列车进站口 (m/s)	列车进站口对口 (m/s)
一号线	0.695	0.104
二号线	0.556	0.083

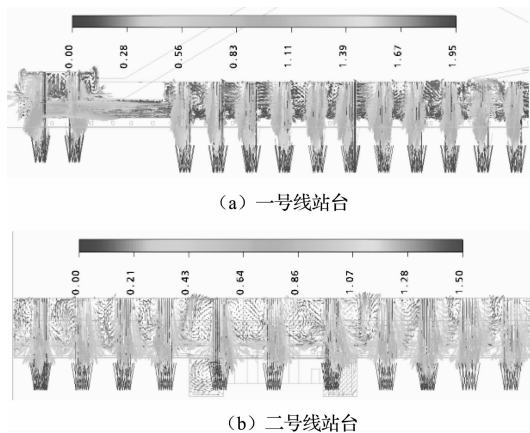


图3 送风口截面速度矢量图

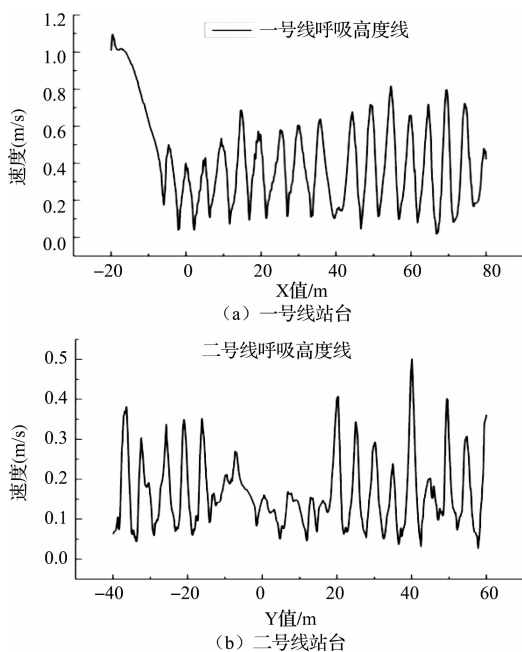


图4 乘客候车平面呼吸高度线沿站台长度方向速度变化图

由图3、4分析可知,由于送风口均匀布置,风口间距相等,各送风口的出风速度也相等,一号线与二号线站台送风区域气流混合较为均匀,不存在明显的气流“死区”,一号线站台除了列车进站端附近局部区域受列车进站活塞风影响空气流速达到 0.8 m/s 之外,人体脚踝高度线沿站台长度方向速度分布波动很小,在 $0.1\text{ m/s} \sim 0.2\text{ m/s}$ 之间波动,由于列车发车频率的不同,典型模拟时刻以内一号线站台候车区气流速度受活塞风影响相对二号线较大,二号线站台大范围区域人体脚踝高度线沿站台长度方向速度波动在 $0.1\text{ m/s} \sim 0.3\text{ m/s}$ 范围内。

3.2 温度场分析

图5反映了站台人员呼吸高度平面(即高出站台地面 1.65 m 平面)的温度分布图;图6为站台人员呼吸高度平面与站台中部对称面交线温度分布沿站台长度方向的变化情况。图中,温度单位均为 $^{\circ}\text{C}$ 。

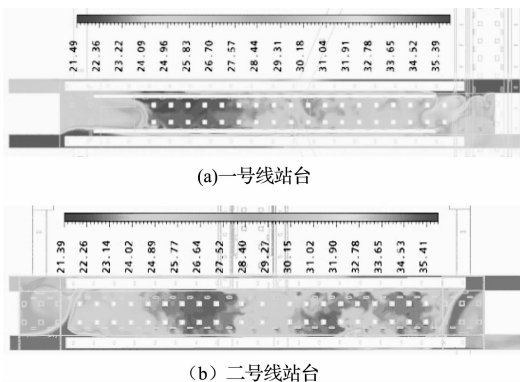


图5 站台人员呼吸高度平面温度分布图

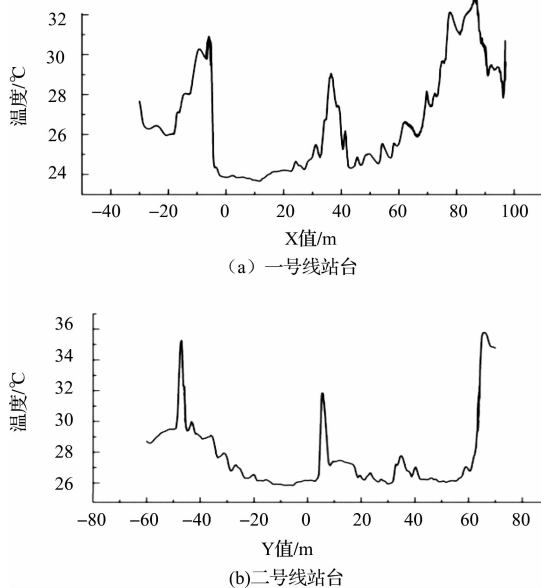


图6 站台对称平面呼吸高度线沿站台长度方向温度变化图

由图5、6分析可知,建国门地铁站调出站台地面 1.65 m 平面一号线与二号线站台温度分布均介于 $24.5 \sim 35.4^{\circ}\text{C}$ 之间。在乘客候车区的人员平均呼吸高度平面,大部分区域温度可以维持在 $26 \sim 28^{\circ}\text{C}$ 范围之内,在列车进站方向活塞风对乘客候车区带来的升温较大,影响长度为约 20 m 。

3.3 空调区域舒适性分析

由PD的计算公式^[10]可知,根据前述计算所得典型位置的空气温度和空气流速,可得出相应位置

的人员不满意率。图7给出了乘客候车平面人员呼吸高度处人员不满意率随站台长度变化的分布情况,图8给出了站台中心人员呼吸高度线上人员不满意率随站台长度变化的分布图。

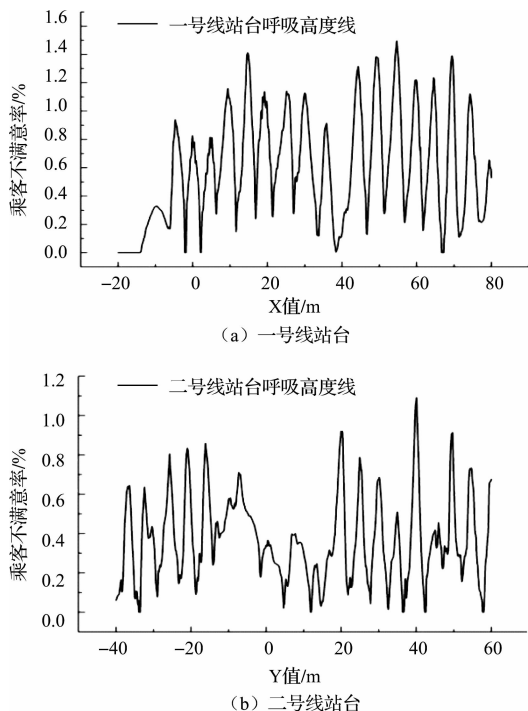


图7 乘客候车平面呼吸高度线沿站台长度方向乘客不满意率变化图

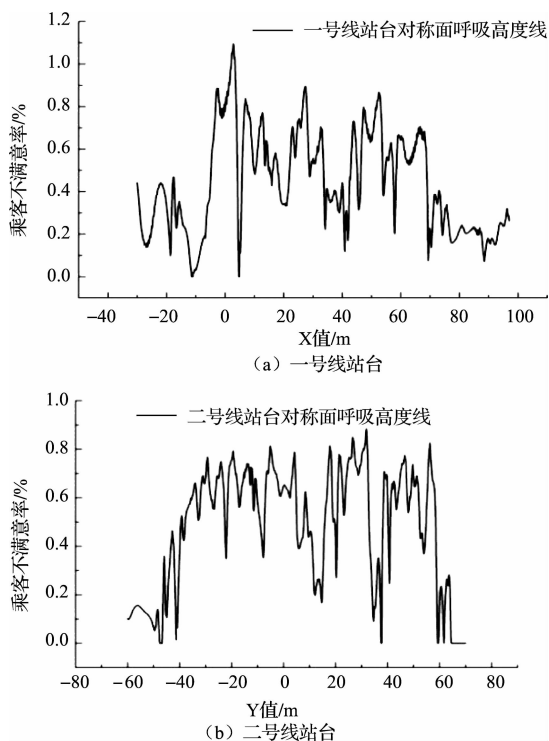


图8 站台对称面呼吸高度线沿站台长度方向乘客不满意率变化图

温度相同时,由于冷吹风引起的不满意率随平均风速的增大而增加;平均风速相同时,不满意率随温度的增加而减少。由图7、8分析可知,站台对称面及乘客候车平面呼吸高度线沿站台长度方向的人员不满意率呈明显的波动形式。除送风口下方部分区域外,人员的不满意率都在可以接受的范围内。

4 结论

通过对典型的建国门地铁站进行简化模型,应用计算流体力学软件 ANSYS CFX 建立三维数学物理模型,给出合理边界条件,分析轨道交通枢纽内采用通风与空调系统的混合系统气流温度场、速度场分布、人员舒适性问题,得出如下结论:

(1) 地铁站内气流分布相互影响、相互作用,通过通道和地下换乘厅及楼梯等气流相作用,设计方案下采用通风空调系统的地下站台温度比设计温度偏低,送风温度可在前述温度的基础上有所提高或相同送风温度的条件下适当降低送风量。空调系统以牺牲能耗为代价可换取环境更低的温度分布,总体而言温度场和速度场及人员的舒适性均在可接受范围内,可获得比较满意的速度和温度场和满足乘客的短暂的舒适性要求。

(2) 地铁进站时隧道活塞风对站台温度场及速度场都有扰动,使在靠近列车进站端乘客候车区域温度及速度都有所增加,但总体而言,活塞风对整个候车站台乘客热舒适性的影响不大。

(3) 地铁内热源的分布影响气流的分布,列车停靠与人员候车区域,温度高于其他区域,越往非候车区域温度呈降低,并在同一时间段具备相同的变化趋势。

(4) 采用数值模拟方法(CFD)可以很好地对复杂的轨道交通枢纽的通风与空调系统的气流组织进行预测与分析,起到对空调通风系统方案的优化设计,从而为设计出合理的气流组织和提高人员的室内舒适性提供参考。

参考文献

- [1] 张庆贺,朱合华,庄荣等. 编著地铁与轻轨[M]. 北京:北京人民交通出版社,2002.
- [2] 潘海啸等. 城市交通方式和多模式间的转换[M]. 上海:同济大学出版社,2003.
- [3] 王冬梅,姜帆. 城市大型客运交通枢纽国民经济效率分析[J]. 数量经济技术经济研究,2003(7):40~43.

- [4] Ming-Tsun Ke, Tsung-Che Cheng, Wen-Por Wang. Numerical Simulation for Optimizing The Design of Subway Environmental Control System [J]. *Building And Environmental*, 2002, 37: 1139-1152.
- [5] Shih-cheng HU, Jen-Ho Lee. Influence of platform screen doors on energy consumption of the environment control system of a mass rapid transit system; case study of the Taipei MRT system [J]. *Energy Conversion and Management*. 2004, 45: 639 ~ 650.
- [6] Chan Young Yoo, Yong Hyun Chung, Jeong Hee Han. Asbestos exposure among Seoul metropolitan subway workers during renovation of subway air-conditioning systems [J]. *Environment International*, 2003, 29: 931 ~ 934.
- [7] 陶文铨. 数值传热学(第二版) [M]. 西安交通大学出版社, 2001.
- [8] 杨向劲, 地铁侧式站台空调方案 CFD 模拟 [D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [9] 王峰一, 地铁岛式站台通风 CFD 模拟 [D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [10] 巨永平, 马九贤. 气流运动及其热舒适关系研究的进展与评述 [J]. *暖通空调*, 1999, 29, 17-30.

Application of the CFD Simulation Technology for Designing Subway Air Conditioning System

Zhang Dan

(CABR ECHNOLOGY CO. LTD, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: This research mainly introduces air conditioning system of the typical Beijing Jianguomen underground rail transportation hub for study. Based on Navier-Stokes equations and widely used standard $k-\varepsilon$ turbulence model, it established computational fluid dynamics model for solving the flow field in urban underground rail transportation hub. Use computational fluid dynamics field simulation software ANSYS CFX as calculation tool, it established the physical and mathematical model of underground rail transportation hub. The boundary condition sets based on lots of literature. Based on the results of simulation, temperature and velocity distribution of typical sections can be displayed. The simulation also shows temperature and velocity of key location.

Key Words: Subway Air Conditioning System; CFD Simulation Technology; Temperature Field; Velocity Field

(上接第 79 页)

BIM Design and Estimated Cost in Jiuquan City Museum Project

Yan Wenkai, Liu Jiyu, Huang Weihua, Ha Xin, Zhang Yidan, Yang Xuanfeng

(China Academy of Building Research Architectural design institute, Beijing 100013, China)

Abstract: By two years of technical training and the accumulation of experience, several typical project have been completed that from the start of design to operational. Designers have mastered 3D design skills and experience, including Pipeline Integration, Building Energy Analysis and Virtual Roaming. BIM Center gathered BIM project implementation experience gradually, and sought a way that best BIM collaborative design solutions in the traditional design. Combined the Jiuquan project, this paper explored the relations and significance about the model of design and estimate, discussed the feasibility of project practice and analyzed its application value.

Key Words: Teamwork; Component Classification; Model of the Standard