

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-674-05

列车越行时活塞风作用下气流分布分析

赖晓龙¹ 毕海权¹ 刘金¹ 李桂萍²

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 中国铁路设计集团有限公司 天津 300308)

【摘要】 当前, 地下车站因能极大程度上节省土地资源, 改善城市交通状况, 受到广泛关注。对于地下综合交通枢纽的屏蔽门开启频繁且时长较长, 当屏蔽门开启时, 在活塞风及室内热压综合作用下, 站内与轨行区之间气流交换对站内气流分布造成影响。以地下综合交通枢纽车站为研究对象, 利用CFD软件研究冬季一侧列车靠站屏蔽门开启另一侧列车越行时所引起的活塞风对站内气流分布的影响。结果表明: 列车120km/h越行, 车头到达设备房1后, 前方正压区使活塞风所造成的影响不断增大, 直至进站活塞风量达到最大值173.0kg/s, 而后随着列车车身负压区不断驶入轨行区, 导致活塞风量不断由站内流向轨行区, 直至达到最大值127.5kg/s。同时, 越行过程中活塞风对屏蔽门处上下车乘客所造成的局部最大风速为6.7m/s, 低于相关标准。

【关键词】 地下综合交通枢纽; 越行; 活塞风; 屏蔽门; 安全性

中图分类号 U453.5 文献标识码 A

Analysis of Airflow Distribution under Piston Wind Action during Train Overtaking

Lai Xiaolong¹ Bi Haiquan¹ Liu Jin¹ Li Guiping²

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

2. China Railway Design Corporation, Tianjin, 300308)

【Abstract】 At present, underground stations are widely concerned because they can greatly save land resources and improve urban traffic conditions. For the underground comprehensive transportation hub station, the shielding door is opened frequently and for a long time. When the shielding door is opened, the airflow exchange between the station and the rail area will affect the station's airflow distribution under the effect of tunnel piston wind and indoor thermal pressure. The influence of piston wind on the airflow distribution in the underground comprehensive transportation hub station is studied using CFD software in winter when the train on one side opens the shielding door on the other side. Results show that the train 120km/h more lines, the car arriving at equipment room 1, the car in front of the positive pressure area caused the influence of the piston wind is increasing until it stops the piston wind volume reached a maximum of 173.0kg/s, and then with the rolled rail line train body negative pressure zone area, cause the piston wind volume from the station to rail line area constantly, until the peak of 127.5kg/s. Simultaneously, the local maximum wind speed caused by piston wind to the passengers on and off the shielding door during overtaking is 6.7m/s, which is lower than the relevant standard.

【Keywords】 Underground comprehensive transportation hub; Overtaking; Piston wind; Shield door; Safety

作者简介: 赖晓龙 (1995.2-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 1429697465@qq.com

通讯作者: 毕海权 (1974-), 男, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2020-12-25

0 引言

随着我国社会经济高速发展,以及京津城际、京沪高铁、西成客专等具有标志性意义的高铁线路建成运行,一系列成果获得举世瞩目的关注^[1]。据统计,截止2020年8月,全国铁路运营里程达到14.14万公里,其中高速铁路运营里程已达到3.6万公里以上。同一时间,《新时代交通强国铁路先行规划纲要》正式发布,纲要明确,到2035年,全国铁路网运营里程达到20万公里左右,其中高铁7万公里左右^[2]。与此同时,城市地上可用空间资源不断减少,地下车站因能极大程度上节省土地资源,改善城市交通状况,受到社会各界的广泛关注^[3]。屏蔽门开启列车越行时,会导致隧道内的活塞风经屏蔽门进入站台,进一步加重站内热环境控制的能耗。有研究表明,站内热环境控制所需的能耗在整个车站能耗占比中有很大的贡献^[4]。并且,一侧列车靠站屏蔽门开启另一侧列车越行时也对乘客上下车造成一定的安全隐患^[5]。

目前,列车活塞风所造成的站内空气流动影响的研究主要集中于地铁车站,相关的地下综合交通枢纽类车站研究较少,主要的研究方法包括现场测试、数值模拟和理论分析等。齐江浩通过现场测试对隧道活塞风特征进行分析^[6],崔景东、黄鹏及杨晖等学者通过数值模拟研究了活塞风对车站站内环境的影响^[7-9],罗忠等学者对隧道活塞风的理论计算及影响因素进行了分析^[10]。但在列车活塞风及室内热压综合作用下,屏蔽门开启时站内与轨行区之间的空气流动特性并不清晰,其空气交换量也不明确,导致一些地下车站设计中关于活塞风量的影响也仅仅是选取经验值,不利于车站的节能降耗。因此,本文以地下综合交通枢纽车站为研究对象,利用CFD软件研究一侧列车靠站屏蔽门开启另一侧列车越行时所引起的活塞风对站内气流分布的影响。

1 数值方法

1.1 控制方程

利用CFD软件研究一侧列车靠站屏蔽门开启另一侧列车越行时所引起的活塞风对站内气流分布的影响。实际中站内环境及轨行区空气流动是三维、非稳态、可压缩的湍流流动,由于列车周围诱导气流的速度小于0.3Ma,计算中可将流场视作不

可压缩流动。基于Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)^[11]方程的 $k-\varepsilon$ 湍流模型来求解空气流动,其控制方程为:

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho U) = 0 \quad (1)$$

(2) 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \text{div}(\rho U u) = \text{div}[(\mu + \mu_t) \text{grad } u] + S_{mx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \text{div}(\rho U v) = \text{div}[(\mu + \mu_t) \text{grad } v] + S_{my} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \text{div}(\rho U w) = \text{div}[(\mu + \mu_t) \text{grad } w] + S_{mz} \quad (4)$$

(3) 能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \text{div}(\rho U h) = \text{div}\left[\left(k + \frac{\mu_t c_p}{\sigma_t}\right) \text{grad } T\right] + S_e \quad (5)$$

(4) 湍动能 k 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \text{div}(\rho U k) = \text{div}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \text{grad } k\right] + S_k \quad (6)$$

(5) 湍动能耗散率 ε 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \text{div}(\rho U \varepsilon) = \text{div}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) \text{grad } \varepsilon\right] + S_\varepsilon \quad (7)$$

(6) 理想气体状态方程

$$p_{atm} = \rho R_g T \quad (8)$$

上述各式中: p_{atm} 为标准大气压, ρ 为密度, R_g 为气体常数, T 为流体温度, t 为时间, μ 为动力粘性系数, U 为速度矢量,其中 u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向的速度分量, e 为流体内能,能量方程中的 k 为流体导热系数, S_{mx} 、 S_{my} 和 S_{mz} 为流体源, S_e 为热源, S_k 、 S_ε 为用户定义的源项。

数值计算中采用二阶迎风空间差分格式以及隐式时间积分方案,同时应用壁面函数法处理近壁面流场区域以及选取Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型处理流场的湍流流动。

1.2 数值模型

本文以某地下综合交通枢纽车站为研究对象,整体几何模型如图1(a)所示,主要包含B0.5进站夹层、B1安检售票层,B2候车大厅层和B3站台层(大小里程端各有一咽喉区,之后与区间隧道相连)。站内每层公共区域都存在大面积的开口以及大量楼扶梯口,使得站内有较大的贯通区存在,

且最大净高处达到 26m。其中车站主体尺寸为 475m×175m×28m (X×Y×Z)，且屏蔽门开启侧站台长 450m，宽 11.3m，高 7.5m。如图 1 所示，采用 CRH6A-8 编城际车，车长 201.4m，列车从距车站 1210m 处以 120km/h 速度启动，之后越行过站。列车启动位置、行驶方向以及车站相对位置示意如图 2 所示。

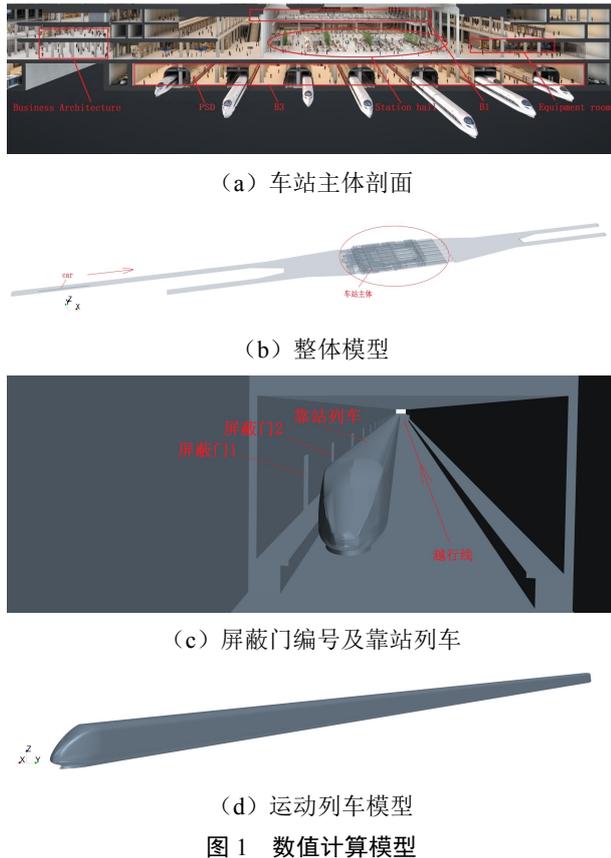


图 1 数值计算模型



图 2 列车行驶及车站相对位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of train running and station relative position

1.3 边界条件及数值网格

车站各层开口及四个隧道口皆采用 Pressure outlet 边界条件，其他表面皆为壁面边界条件，其中对于站内地面采用给定壁面热流量，其余壁面皆为绝热壁面。根据车站设计参数，冬季室外环境温度 -9℃，车站与周围建筑连通口处外部温度 18℃。站内诸如电扶梯、升降梯等设备散热量约为

3900kW，人员总散热量为 1600kW，地板辐射供暖指标为 144W/m²。

网格划分时，采用六面体网格，在壁面设置边界层网格，同时在局部开口和列车运行区域进行加密处理。如图 3 中的无关性验证所示，图 3 (a) 为时间步长 0.004s 时不同网格尺寸下屏蔽门处风量情况，图 3 (b) 为网格尺寸 0.3m 时不同时间步长下屏蔽门处风量情况。考虑到计算机运行能力和计算时间，选取列车网格尺寸 0.3m，时间步长 0.004s，总网格量为 1970 万。

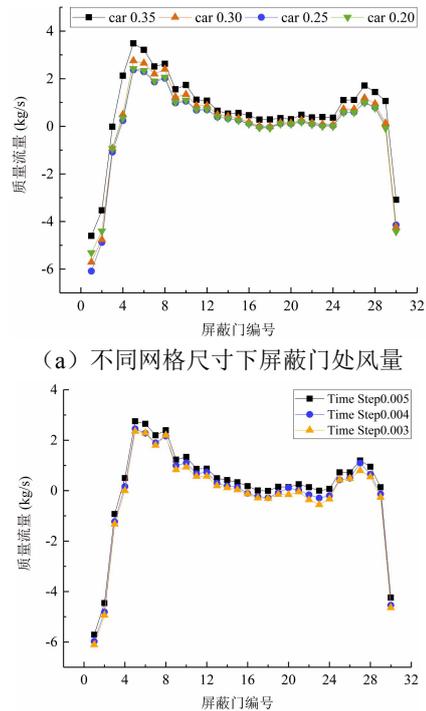


图 3 无关性验证

Fig.3 Verification of irrelevance

2 结果分析

图 4 所示为列车行驶至 $t=39.3s$ 和 $t=78.0s$ 时轨行区及站台 1.7m 高处风速大小分布云图。 $t=39.3s$ 时，列车部分进入图 2 中的车站处，在屏蔽门处所引起的风速大小主要分布在 1.3~6.7m/s，站台区域内的风速主要分布在 0.5~3.6m/s； $t=78.0s$ 时，列车行至图 2 中的远离车站处，在屏蔽门处所引起的风速大小主要分布在 0.9~1.9m/s，站台区域内的风速主要分布在 0.3~0.8m/s。同时结合图 5 中车站屏蔽门风量分布情况可知， $t=39.3s$ 时，屏蔽门处空气整体上是经屏蔽门流向站内， $t=78.0s$ 时，屏蔽门

处的空气整体上是经屏蔽门流向轨行区的。结合两时刻风速大小变化可知, 在图 4 所示的轨行区长度范围内, 随着列车的不断驶离, 屏蔽门处风速不断下降。可以预见, 当列车继续行驶至再远处时, 屏蔽门附近空气流动会趋于稳定, 活塞风对屏蔽门处气流分布的影响将可忽略不计, 且由于站内热量来源广以及众多开口导致热压作用显著, 空气经屏蔽门不断流入站内。

靠站列车有乘客上下车时, 若有越行列车通过其产生的诱导气流可能会对人员有安全隐患。对于

该种情况, 英国对此采用人员附近的平均风速作为判据: 以 11.1m/s 风速为站台安全风速 [12]。

《TB10623-2014 城际铁路设计规范》中规定“列车过站考虑最大侧风 15m/s 时, 线路中心线至站台安全标线距离为 2750mm” [13]。本文中, 越行车对屏蔽门处上下车乘客所引起的最大风速约为 6.7m/s, 且乘客上下车处距离越行车中心线 7.6m, 均低于相关判据, 即越行车所引起的活塞风对乘客上下车造成安全隐患的可能性较小。

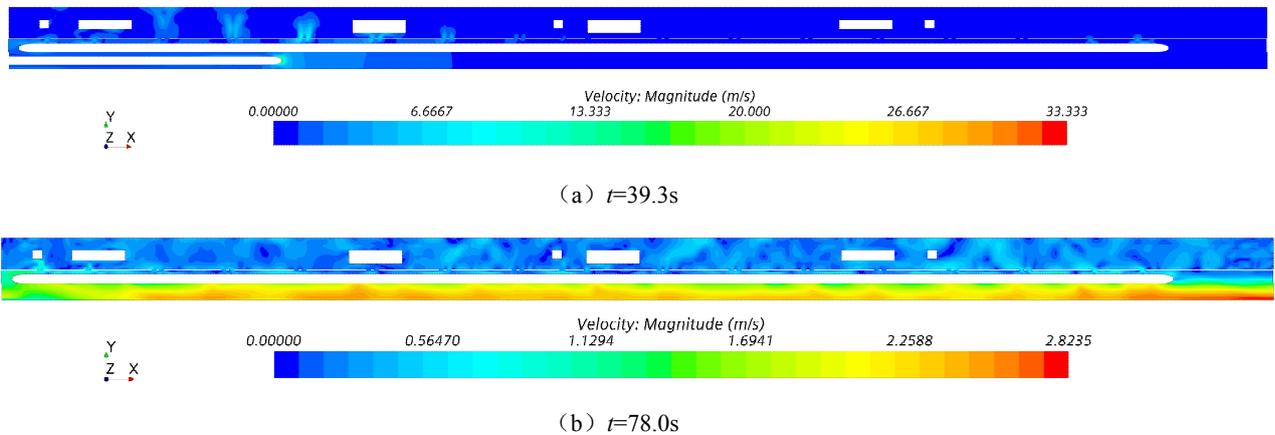
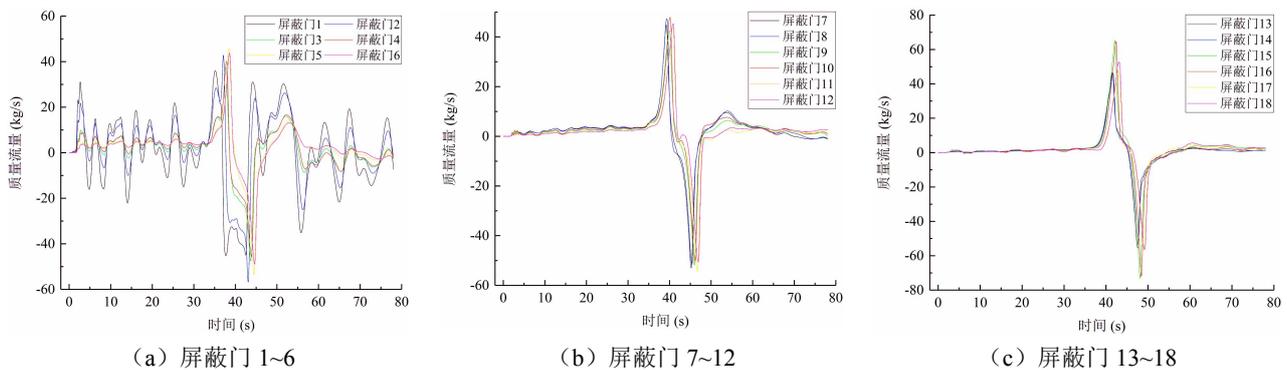


图 4 轨行区及站台 1.7m 高处风速分布

Fig.4 Wind speed distribution in the track area and platform at the height of 1.7m

屏蔽门处风量结果如图 5 (a) ~ (e) 所示, 屏蔽门编号位置见图 2(c), 可以看出, 屏蔽门 1-2、屏蔽门 14-15 和屏蔽门 29-30 的风量与其他位置是有明显差异的。这 6 个屏蔽门的差异主要体现在两方面: 一是它们的面积大小相对更大一些, 二是它们的位置分别位于靠站列车的车尾、车身和车头。虽然屏蔽门 1-2 的面积相对较大, 但是在靠站列车的阻塞作用下, 导致靠站列车车尾附近活塞风流动阻力较大, 造成该处风量反而较小; 相对地, 靠站列车车身及车头处由于越行车车身进入车站较多,

引起的活塞风流动较为稳定, 所以屏蔽门 14-15 和屏蔽门 29-30 处风量有明显增大。并且, 只有车尾及车头附近的几个屏蔽门处风量随越行车的行驶不断变化, 其他位于车身范围内的屏蔽门处风量变化相对较小, 仅在列车到达附近时会有突变。同时, 越行车在屏蔽门处所引起的最大进站活塞风量仅有 173.0kg/s, 对站内气流分布影响较小。因此, 可以认为, 由于列车越行所造成的站内气流分布变化是短暂且微弱的。



(a) 屏蔽门 1~6

(b) 屏蔽门 7~12

(c) 屏蔽门 13~18

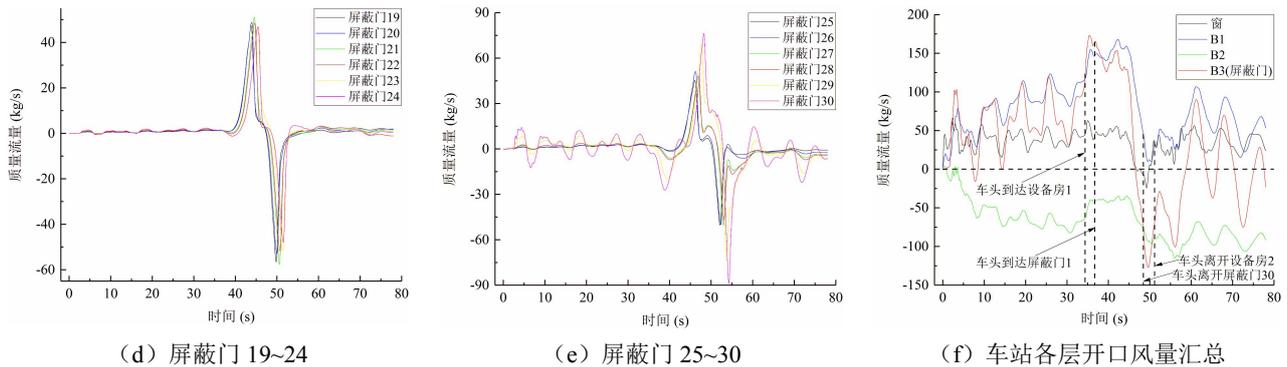


图5 车站部分开口处风量分布

Fig.5 Mass flow distribution at the opening of some stations

图5(f)为整个越行过程中车站各层开口风量汇总。对屏蔽门处风量而言,其正值表示空气经屏蔽门流入站内,其他开口处风量正值表示空气经相应开口流出车站。可以看到,列车车头到达设备房1之前,站内空气流动受活塞风作用影响微弱,此时站内空气在热压作用影响下,通风量达到110kg/s左右,形成明显的热压自然通风流动,整体气流分布呈现出由车站底部的屏蔽门和B2层开口进风,而后经B1层开口及窗户流出车站。由于车头前方的活塞风形成正压区,在车头到达设备房1之后,随着列车的行驶,活塞风所造成的影响不断增大,直至车头到达距离屏蔽门1不远处时,进站活塞风量达到最大值173.0kg/s,而后列车车身不断驶入车站轨行区,车身附近诱导气流形成负压区,导致活塞风量不断由站内流向轨行区,直至达到最大值127.5kg/s。而后随着车头驶离设备房2,站内气流受活塞风影响逐步减少,其流动状态逐步由屏蔽门出风变化为屏蔽门进风,直至恢复为自然通风。

3 结论

本文利用CFD软件研究冬季一侧列车靠站屏蔽门开启另一侧列车越行时所引起的活塞风对站内气流分布的影响,主要结论如下:

(1)越行车引起的活塞风对屏蔽门处上下车乘客所造成的最大风速为6.7m/s,即越行车所引起的活塞风对乘客上下车造成安全隐患的可能性较小。

(2)越行车在屏蔽门处所引起的最大活塞风量为173.0kg/s,且其对站内气流速度分布影响较小。因此,可以认为越行车所造成的站内气流分布

变化是短暂且微弱的。

(3)站内气流状态分为三个阶段:①车头到达设备房1之前,活塞风作用影响微弱,站内空气在热压作用影响下,形成明显的热压自然通风流动,整体气流分布呈现出由车站底部的屏蔽门和B2层开口进风,而后经B1层开口及窗户流出车站。②车头到达设备房1之后,车头前方正压区使活塞风所造成的影响不断增大,直至进站活塞风量达到最大值173.0kg/s,而后随着列车车身负压区不断驶入轨行区,导致活塞风量不断由站内流向轨行区,直至达到最大值127.5kg/s。③最后随着车头驶离设备房2,站内气流分布受活塞风影响逐渐降低,其流动状态也逐步由屏蔽门出风变为屏蔽门进风,直至恢复为自然通风。

参考文献:

[1] 阴悦.我国高速铁路对社会经济发展的影响研究[J].现代商业,2015,(23):143-144.
 [2] 本刊编辑部.新时代交通强国铁路先行规划纲要[J].铁道技术监督,2020,48(9):1-6,24.
 [3] A Mukhtar, M Z Yusoff, K C Ng. The potential influence of building optimization and passive design strategies on natural ventilation systems in underground buildings: The state of the art[J]. Tunneling & Underground Space Technology, 2019,92:103065.
 [4] W Hong, S Kim. A study on the energy consumption unit of subway stations in Korea[J]. Building and Environment, 2004,39(12):1497-1503.
 [5] 王乐.活塞风对地铁安全门系统环控通风效果的影响分析[D].西安:西安建筑科技大学,2010.