

活塞风对地铁车站站台滑动门风压的影响^{*}

何磊¹ 王正鸿² 郭永桢¹ 邓保顺¹

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安;

2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 730099, 兰州//第一作者, 工程师)

摘要 基于有限体积法建立了地铁车站三维静态数值计算模型, 对列车阻塞隧道时站台滑动门所受的活塞风压进行了计算研究; 分别对单、双两种活塞通风条件下, 不同活塞风速、阻塞比、滑动门位置对滑动门所受风压的变化规律进行了分析。结果表明, 双活塞通风能够有效减弱活塞风对滑动门的风压; 单活塞通风条件下, 滑动门在最不利位置时, 需克服的最大风压约为 230 Pa。

关键词 地铁; 车站站台; 滑动门; 活塞风压

中图分类号 U231.5

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.03.014

Influence of Piston Wind on the Air Pressure of Metro Station Platform Sliding Door

HE Lei, WANG Zhenghong, GUO Yongzhen, DENG Baoshun

Abstract Based on the finite volume method, a three dimensional static numerical model of metro station is build to study and calculate the piston wind pressure on the platform sliding doors when a train blocks the tunnel. In single and double piston ventilation conditions, the changing laws of wind pressure related to the speed of piston wind, the block ratio and position of sliding doors are analyzed. The results show that the double piston ventilation will effectively weaken air pressure on the sliding doors. While in the condition of single piston ventilation and the worst door position, the maximum pressure on the sliding doors to overcome is about 230 Pa.

Key words metro; station platform; sliding door; piston wind

First-author's address China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China

当列车停靠站台时, 列车会阻塞隧道内活塞风的运动, 隧道内活塞风会因惯性作用, 继续向隧道前方运动, 受列车阻塞作用的限制, 作用在车尾的

活塞风会使车尾空气压力升高^[1]。如隧道后方有列车进入区间, 受后方车头的挤压作用, 会使前后两车之间的区间隧道内空气压力迅速升高, 此时, 受区间隧道内的高压与车站站台间压差的影响, 致使站台门受到活塞风作用的空气压力。该力作用在站台滑动门上, 会增加站台门的开、关阻力。若该阻力大于一定限值, 则会影响站台滑动门的正常启闭^[2]。但是, 考虑防夹人的安全问题, 《地铁设计规范》规定“每扇滑动门的最大动能不应大于 10 J; 每扇滑动门关门最后 100 mm 行程最大动能不应大于 1 J”。为给站台滑动门关门力提供设计依据, 本文采用数值计算方法对作用在滑动门上的活塞风压及其影响因素进行分析。

1 研究方法

针对该问题最为经济且高效的研究方法是数值仿真计算。为此, 本文采用有限体积法建立三维数值计算模型, 并采用一维 SES(地铁环控计算机模拟) 软件的计算结果、现场测试数据确定三维数值计算所采用的计算边界条件, 对滑动门上的活塞风压进行计算分析。

1.1 计算方法

由于普通地铁列车运行速度较低, 最大运行速度不超过 140 km/h, 远低于音速, 因此, 可近似假设隧道内活塞风为三维不可压缩黏性流体的湍流流动。现采用有限体积法建立离散方程:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho U\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \phi) - S$$

式中:

ρ ——空气密度;

t ——时间;

ϕ ——通用变量, 分别代表速度矢量 U 在 x 、 y 、 z

^{*} 陕西省重点研发计划项目(2018SF-393)

3 个方向的分量 u, v, w , 以及其它求解变量;

Γ ——广义扩散系数;

S ——广义源项。

本文计算采用二阶迎风空间差分格式,并选取标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型来处理湍流流动,应用壁面函数法处理近壁面区域。

1.2 三维数值计算模型

本文以西安地铁 1 号线某车站为案例,简化建立由站厅、岛式站台、隧道及活塞风井、区间隧道等组成的模型。其中,站台宽 9 m、高 3 m、长 120 m;站厅宽 17 m、高 3 m、长 138.4 m,站台层与站厅层通过楼梯口连通;列车简化为宽 2.8 m、高 3.8 m、长 118 m 的长方体;车站隧道前后两端与区间隧道相连,隧道截面为矩形,隧道共长 940 m;列车进、出站端均设置 4 m×5 m 的矩形活塞风井,可根据计算需要改变边界条件,实现单双活塞通风隧道系统的模拟。

为兼顾计算精度与速度,经过多次测试^[1]与网格无关解分析,站台两端区间隧道列车前进方向的网格为 0.2 m,车站区域隧道的网格为 0.1 m。由于壁面函数法处理近壁面区域需保证近壁面第一层网格内节点位于对数律成立区域,因此列车高度及宽度方向第一层网格取 0.04 m。此外,对活塞风井、车站与轨行区相连接的滑动门位置网格进行加密处理。所有网格均采用六面体结构化网格。站台层及隧道计划模型如图 1 所示。

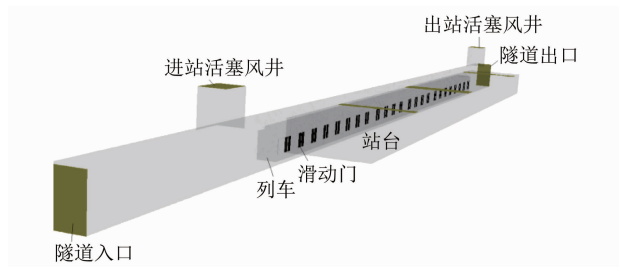


图 1 三维数值计算模型

1.3 边界条件

隧道两端与车站出站口采用压力边界条件。其中,为模拟隧道长度产生的阻力,隧道出口采用压力进口边界条件,通过调节压力进口边界静压参数,模拟不同区间隧道长度产生的活塞风阻力。通过改变列车尾端活塞风井边界条件类型为墙体边界条件或压力边界条件,以实现单双活塞隧道通风系统的模拟。列车尾端方向采用速度入口边界条件以模拟隧道内不同的活塞风速。

2 活塞风对地铁车站站台滑动门活塞风压的影响因素分析

当列车停靠站台,阻塞隧道时,滑动门上受到的压力是受隧道内空气压力与车站站台上的空气压力影响。而站台区域通常为大气压力,因而决定活塞门受压主要为隧道内受列车阻塞隧道形成的正压。该压力与隧道内阻塞比以及能够泄压的面积相关^[3]。

通过上述分析可知,活塞风作用在滑动门上产生的压力主要受隧道风井数量、阻塞比、活塞风速、滑动门位置的影响。

目前,地铁隧道常用活塞通风有单活塞通风与双活塞通风两种模式,通常采用净面积为 16~20 m² 的风井。本文以净面积 20 m² 风井建立模型进行分析。

地铁隧道阻塞比通常根据不同运营速度要求采用不同隧道阻塞比。常见隧道阻塞比有 0.50、0.40 和 0.27,以断面为 10.22 m² 的 A 型列车为例,所对应的隧道净空面积分别为 21.22 m²、26.54 m²、38.15 m²。

活塞风速受隧道阻塞比、列车运行速度、活塞通风形式等因素的影响,通常风速不会大于 10 m/s^[4-7]。为确定不同运营速度需采用的站台门压力校核值,本文分别对隧道内活塞风速为 6 m/s、8 m/s、10 m/s、12 m/s 的情况进行分析。

站台滑动门处于不同位置时,隧道内能够提供泄压的面积也不同。本文建立的模型中,站台滑动门宽度约为 2 m,滑动门行程约 1 m。本文对站台滑动门分别位于 0.9 m、0.6 m 时以及不同活塞风速条件下,滑动门上的风压进行计算分析,以确定滑动门所受的最大活塞风压。

3 计算结果

本节分别对阻塞比、活塞风速、滑动门位置、风井数量对各种滑动门所受活塞风压进行分析。

3.1 阻塞比对活塞风压的影响

阻塞比决定了阻塞情况下,活塞风通过停车位置的环状区域过风面积,因此影响着隧道内的空气压力。图 2 给出了单活塞通风、双活塞通风隧道内活塞风速为 8 m/s 时,不同阻塞比隧道内,滑动门即将关闭(打开)时受到的最大活塞风压。

由图 2~3 可见,无论是单活塞通风,还是双活

塞通风,随着隧道面积的增大,阻塞比减小,滑动门上的风压均能快速降低。当阻塞比较大时,车站轨行区进站端滑动门(门编号为1)上的活塞风压与出站端滑动门(门编号为24)上的活塞风压存在较大差异。当阻塞比为0.27时,由计算结果可知,车站24个滑动门上的活塞风压基本无差别。

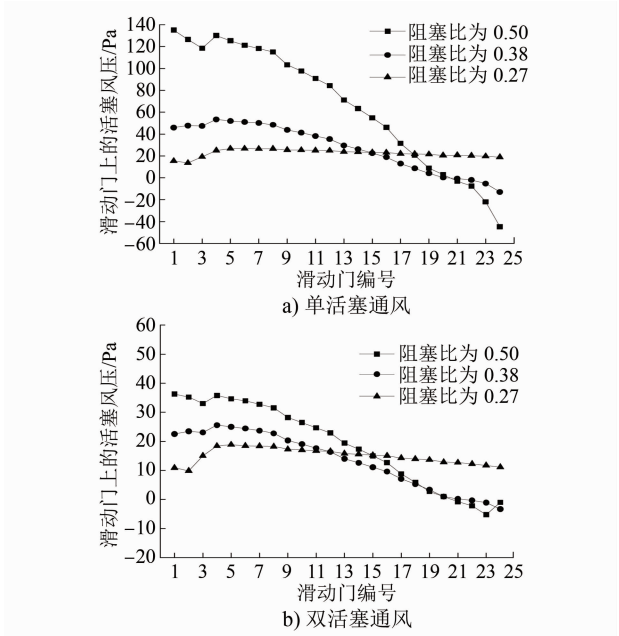


图2 不同类型的活塞通风对活塞风压的影响

对于双活塞通风,即车尾端活塞风井打开时,能够有效减小隧道内沿列车前进方向的活塞风压力梯度。

由图2可知,单活塞风、双活塞风作用在滑动门上的压力存在较大差别。边界条件相同时,单活塞通风条件下,滑动门所受活塞风压为130 Pa;设置双活塞通风后,滑动门上所受活塞风压最大仅为36 Pa。由此可见,在上述计算条件下,双活塞通风相比于单活塞通风能够有效降低滑动门上的活塞风压72.3%左右。

3.2 活塞风速对活塞风压的影响

隧道内活塞风速与隧道内设备所受风压密切相关。活塞风速通常与列车运行速度、隧道阻塞比、隧道通风系统形式均有关系。为探明活塞风速与滑动门上所受活塞风压间的关系,图3以阻塞比为0.5的隧道为例,给出了单活塞通风与双活塞通风隧道内,不同活塞风速条件下,车站滑动门的受力情况。由图3可知,站台上所有滑动门中,活塞风压最大的滑动门为最靠近车尾端的滑动门(门编号为1)。

从1号至24号滑动门来看,20号滑动门上没

有活塞风压作用。以20号滑动门为分界,前19扇滑动门受到活塞风的正压作用;靠近车头的后4扇滑动门受到的压力为负值,需要克服由站台流向轨行区的风压作用。由此可见,6B列车的地铁线路(24个站台门)中,不受活塞风压的滑动门位置大约为第20个滑动门处。

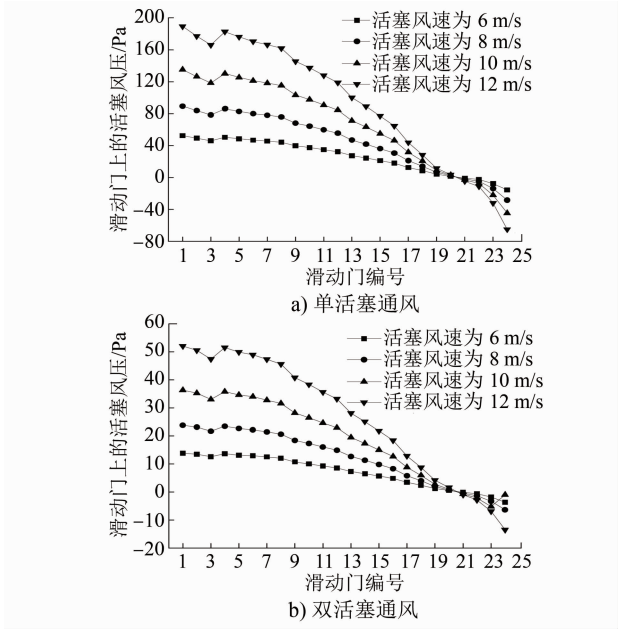


图3 活塞风速对活塞风压的影响

图4给出了阻塞比为0.5、采用单活塞通风的隧道在不同活塞风速下,车站第4个滑动门上所受的活塞风压。由图4可见,活塞风速越大,滑动门上承受的活塞风压越大,且作用在滑动门上的风压与活塞风速呈二次曲线关系。

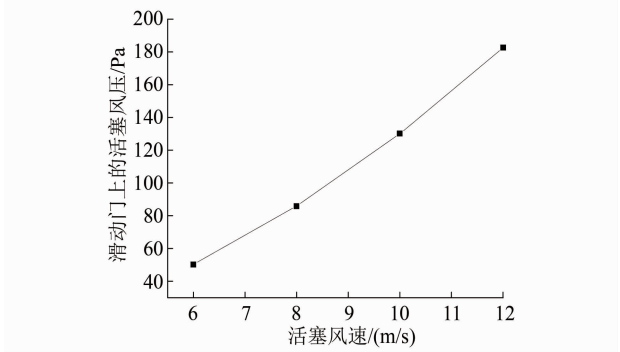


图4 活塞风速与滑动门上的活塞风压的关系曲线

虽然活塞风速与作用在滑动门上的活塞风压呈二次方数值关系,但是,由于活塞风速除与列车运行速度有关外,还与隧道、通风系统等条件相关。不同设计目标速度的线路所采用的隧道阻塞比不同,造成列车运行速度与隧道内的活塞风速并没有

明显的线型关系。因此,站台滑动门所受活塞风压并不与列车速度线型正相关。

3.3 活塞风井数量对活塞风压的影响

单活塞通风与双活塞通风相比,具有出地面风井少、节约占地的优势。然而,两种通风模式的隧道通风量差异较大,表 1 给出了西安某地铁线路采用单活塞通风与双活塞通风的换气量对比(SES 软件计算结果)。由表 1 可见,双活塞通风约为单活塞通风通风量的 2 倍。

线路	单活塞通风		双活塞通风	
	风井总排风量/(m³/s)	总进风量/(m³/s)	风井总排风量/(m³/s)	总进风量/(m³/s)
右线	313.6	386.9	618.5	641.8
左线	394.4	323.6	653.9	643.2

双活塞风井除改善隧道通风换气条件外,还能有效降低车站滑动门所受活塞风压。图 5 给出了 10 m/s、12 m/s 两种风速边界条件下,采用单活塞通风与双活塞通风时站台滑动门上的受力情况。由图 5 可知,采用双活塞通风的隧道,滑动门所受活塞风压比单活塞通风隧道能够减小约 72%。

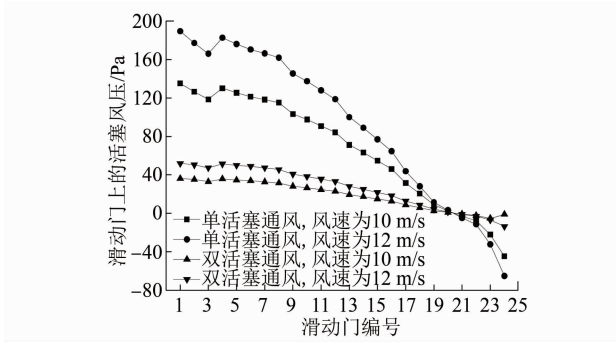


图 5 不同通风模式和不同风速对活塞风压的影响

3.4 滑动门位置对活塞风压的影响

列车停站时,站台滑动门开关过程中,由于滑动门处于不同位置时的隧道与车站间形成的联通面积不同,其泄压能力不同,因而在滑动门启闭过程中,门机的受力发生不断的变化。图 6 给出了滑动门关至 0.6 m、0.9 m 两个行程时,作用在滑动门上的最大活塞风压。

由图 6 可知,滑动门越接近全关位置,车门所受风压的绝对值越大。其中,车尾端滑动门所受风压为由隧道指向站台;车头端滑动门所受风压为由站台指向隧道。

滑动门启闭过程中,滑动门行程不同时,站台

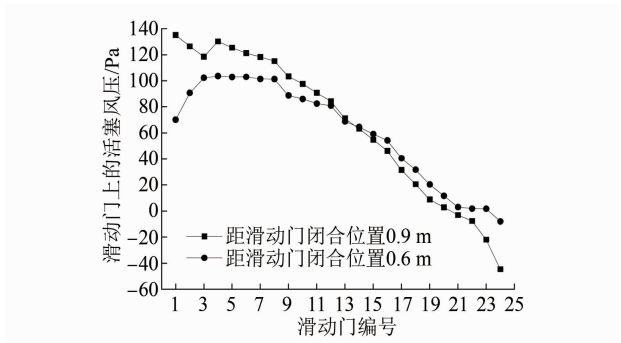


图 6 开关过程中滑动门位置对活塞风压的影响

上所有滑动门中所承受最大活塞风压的门位置(指门编号)也会发生变化。如图 6 所示,当滑动门接近闭合位置(距滑动门闭合位置 0.9 m)时,车尾第 1 个滑动门所承受的活塞风压最大;当滑动门处于半开状态(距滑动门闭合位置 0.6 m)时,车尾端第 4 个滑动门所承受的活塞风压最大。但需明确的是,不同车型,由于车门分布位置不同,也会造成上述规律发生变化。因此,在对滑动门所受的最大活塞风压进行校核计算分析时,应采用隧道内最不利行程位置,即所有滑动门中所受最大的活塞风压进行计算。

为确定最不利条件,经文献检索,并采用 SES 数值计算,结合多项工程实测数据分析,隧道内的活塞风速最大不会超过 12 m/s。当隧道采用单活塞通风、滑动门处于即将关闭或刚刚打开时,为最不利状况。由图 3~6 所示的单活塞通风,风速为 12 m/s 时车尾处滑动门所受的活塞风压约为 189 Pa。综合考虑隧道内断面可能被广告、设备、线缆等障碍物遮挡,取一定的安全系数 1.2,建议滑动门活塞风压校核计算时,采用 230 Pa 作为列车正常运行时滑动门开启/关闭需克服的活塞风压。

此处需要说明的是,隧道风机开启条件下,滑动门需要克服的风压本文未做相关研究。此外,由于列车通过轨行区时,列车车头产生的气动力会作用在站台门上,从而影响站台门结构受力,但是,由于滑动门此时并不会有开关动作,因此,该气动压力及疲劳载荷本文未做相关研究。

4 结语

本文对列车正常运行时,后方隧道有车进入条件下,车站滑动门所受活塞风压进行静态分析,得到如下结论:

(下转第 60 页)

越站速度的牵引模拟,并根据模拟牵引速度曲线分别量取了 3 种速度下快车在道岔处的列车最高速度,统计如表 5 所示。

表 5 不同越站速度快车在道岔处的速度统计表

快车过站速度/(km/h)	道岔处快车速度/(km/h)
60	75
80	93
100	108

由表 5 可知,越站速度达到 80 km/h、100 km/h 时,快车在道岔处的速度为 93 km/h、108 km/h,该处的限制速度至少高于 100 km/h、115 km/h 才能保证行车安全。由此可见,越站速度大于 80 km/h 时,快车过岔时的限制速度将达到或超过一般 9 号道岔的安全允许速度,不利于行车安全。

因此,考虑到 9 号、12 号道岔对慢车侧向过岔运输效率的影响,以及快慢车追踪安全和道岔处快车的行车安全等因素,建议选用大号码道岔。

4 结语

越行站是城市轨道交通快慢车运行模式中需

重点研究的技术问题,关系到前期工程投资及后期运营效率及安全。本文对越行站站型、道岔号码及快车越站速度等重点问题进行了分析,以期类似快慢车模式下越行站的设计提供有益的参考。

参考文献

[1] 谭小土.城市轨道交通快慢车运行组织研究[D].成都:西南交通大学,2011.

[2] 陈晓峰.上海轨道交通 16 号线快慢车运行方案研究[J].城市轨道交通研究,2014(5): 68.

[3] 中铁第四勘察设计院集团有限公司.台州市域铁路 S1 线一期工程初步设计 第三篇行车组织与运营管理[R].武汉:中铁第四勘察设计院集团有限公司,2016.

[4] 梁创佳.轨道交通市域线越行站配线设计研究[J].都市快轨交通,2014(3): 5.

[5] 孙元广,史海欧.市域线快慢车组合运营模式研究与实践[J].都市快轨交通,2013(2): 14.

[6] 刘昊.城市轨道交通车站线路设计关键参数及站台间隙研究[D].北京:北京交通大学,2009.

[7] 王锋.关于地铁车站站台限界的探讨[J].铁道标准设计,2009(2): 81.

(收稿日期:2018-04-17)

(上接第 56 页)

- 1) 双活塞通风相比于单活塞通风能够有效降低站台滑动门启闭过程中所需克服的活塞风压。
- 2) 滑动门位置越接近闭合状态,滑动门所承受的活塞风压越大。
- 3) 相同活塞风速条件下,隧道阻塞比越大,站台滑动门开门所需克服的风压越大。
- 4) 目前设计时速分别为 100 km/h、120 km/h、140 km/h 时所采用的隧道阻塞比通常为 0.50、0.40、0.27,虽然列车运行速度提高,列车输送给隧道内空气的动能增大,但由于隧道断面的增大,不同列车速度条件下,活塞风作用在滑动门上的风压并不会单调递增。根据最不利条件下的分析结果,建议滑动门开门过程中需要克服的最大风压按 230 Pa 考虑。

参考文献

[1] 何磊,雷波,毕海权.屏蔽门开启时地铁站内空气流动规律分析[J].铁道建筑,2013(12): 39.

[2] 罗燕萍,李林林,饶美婉.高密度行车时隧道风压对屏蔽门开关的影响[J].城市轨道交通研究,2015(4): 42.

[3] 杨伟超,彭立敏,施成华,等.地铁活塞风作用下屏蔽门的气动特性分析[J].郑州大学学报(工学版),2009(2): 120.

[4] 沈翔,吴喜平,董志周.地铁活塞风特性的测试研究[J].暖通空调,2005(3): 103.

[5] 齐江浩,赵蕾,王君,等.地铁隧道活塞风实测及特征分析[J].铁道科学与工程学报,2016(4): 740.

[6] 王峰,赵耀华,胡定科.地铁隧道活塞风的简化计算[J].铁道建筑,2012(5): 41.

[7] 董书芸.北方城市地铁活塞风对地铁环境的影响规律及其有效利用[D].天津:天津大学,2008.

(收稿日期:2018-04-25)

《城市轨道交通研究》欢迎投稿

投稿网址:tougao.umat1998.com