

文章编号: 1674—8247(2023)06—0001—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.06.001

160 km/h 城际铁路地下车站屏蔽门列车风压数值分析

金旭炜¹ 蒋尧¹ 葛红斌² 黄进芳² 杨吉忠¹ 李连秀²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 福建兆翔机场建设有限公司, 厦门 361000)

摘 要:为探明城际铁路地下站站台屏蔽门列车风压特性,提出合理的列车风压设计建议值,以某城际铁路地下站为依托,建立列车高速过站空气动力学效应数值仿真模型,计算了多种工况下站内流场,得出了站台屏蔽门风压基本特性及分布规律,分析了列车速度、到发线停靠车等对屏蔽门风压的影响。研究表明:(1)初始压力波和列车经过时站台屏蔽门表面均出现较大的压力波动,列车经过时更为剧烈;(2)由于站台屏蔽门和隔离墙的阻隔,不同位置的站台屏蔽门承受的风压存在差异,过站侧正线最大,同侧到发线次之,对侧正线和到发线最小;(3)需考虑过站列车速度、到发线停靠列车等因素的影响。研究成果可应用于城际铁路地下车站工程设计。

关键词:城际铁路;地下车站;站台屏蔽门;快速过站;气动荷载

中图分类号:U231.4 **文献标志码:**A

Numerical Analysis of Train-induced Wind Pressure on Platform Screen Doors in Underground Station of 160km/h Intercity Railway

JIN Xuwei¹ JIANG Yao¹ GE Hongbin² HUANG Jinfang² YANG Jizhong¹ LI Lianxiu²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Fujian Panport Airport Construction Co., Ltd., Xiamen 361000, China)

Abstract: To ascertain the characteristics of train-induced wind pressure on the platform screen doors in underground station of intercity railway and propose reasonable design values for train-induced wind pressure, a numerical simulation model, based on an underground station of an actual intercity railway, was established for the aerodynamic effects when a train passes at high speed. The flow fields inside the station under a variety of conditions were calculated, revealing the basic characteristics and distribution patterns of wind pressure on the platform screen doors. The effects of train speed and the parking of train on the arrival and departure track on the wind pressure of the screen doors were examined. The study results show: (1) Significant pressure fluctuations occurred on the surface of platform screen doors when the initial pressure wave and the train passes, and more dramatic in the latter case. (2) Due to the barrier effect of the platform screen doors and partition walls, wind pressure on platform screen door varied at different locations, with the highest on the platform screen door of the main track at the platform side, followed by that on the platform screen door of the arrival and departure track on the same side, and the lowest on the platform screen doors of the main track and the arrival and departure track on the opposite side. (3) Factors such as the speed of passing train and the train parking on the arrival and departure track need to be considered. The findings of this study can be applied to the engineering design of underground train station

收稿日期:2023-01-04

作者简介:金旭炜(1971-),男,教授级高级工程师。

引文格式:金旭炜,蒋尧,葛红斌,等. 160 km/h 城际铁路地下车站屏蔽门列车风压数值分析[J]. 高速铁路技术,2023,14(6):1-6.

JIN Xuwei, JIANG Yao, GE Hongbin, et al. Numerical Analysis of Train-induced Wind Pressure on Platform Screen Doors in Underground Station of 160km/h Intercity Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6):1-6.

of intercity railway.

Key words: intercity railway; underground station; platform screen door; fast passing; aerodynamic load

列车通过隧道或在隧道内交会时会引起压力波动、活塞风等空气动力学效应,对隧道及列车内的人员和设备产生不利影响,影响运营安全性和舒适性。列车速度越快,气动效应越剧烈,危害也越严重。与普通隧道相比,城际铁路地下车站内空气流动通道较多,压力波和活塞风传播特性更为复杂,站内人员、设备多,更需要重视列车过站气动效应的影响^[1]。城际铁路地下车站一般设置有全封闭式站台屏蔽门,保障站台候、乘车人员的安全性与舒适性。列车高速过站情况时,站台屏蔽门将承受列车风压作用,长期作用下可能威胁屏蔽门结构安全。因此,工程设计中合理确定站台屏蔽门列车风压十分重要。

铁路地下车站列车过站气动效应研究方法主要有数值模拟、动模型试验和现场测试。黄颖^[2]采用CFD方法,建立了城际铁路四线双岛式地下车站气动效应仿真模型,分析了列车高速(160~250 km/h)通过车站或站内交会时站内及隧道内的气动效应特性,提出了站台屏蔽门、轨道排烟道等附属结构气动荷载取值建议;元慧^[3]等采用数值模拟方法,对城际列车快速通过地下车站的空气动力学效应进行模拟,分析列车速度和流线型长度对其瞬变压力的影响;孙海富^[4]对国内城际铁路车站正线站台门的设置标准进行了调研,结合仿真计算提出了城际铁路正线站台门的设置标准;鲁华伟^[5]采用模型试验和数值模拟方法,对广深港客运专线福田站列车高速通过时的气动效应及屏蔽门承压特性进行研究,得到列车越站速度、屏蔽门间距、通风井对屏蔽门承压的影响规律;柳润东^[6]等对某城际铁路地下车站开展了列车气动荷载特性试验研究,测试了隧道壁、轨旁砌体墙、站台屏蔽门及结构柱表面列车风压,得出了站内结构气动荷

载规律。综上所述,城际铁路地下车站一站场规模、站场布局、站台屏蔽门型式、列车过站速度等方面存在差异,列车过站时压力波的传播规律不同,站台屏蔽门气动荷载特性也不同。

本文采用数值模拟方法对某城际铁路四线双岛式地下站列车过站气动效应进行了计算,分析了站台屏蔽门压力波动规律和分布特性,提出了气动荷载设计值。

1 工程概况

某城际铁路以下穿隧道形式引入机场 GTC 负二层设地下站。站场规模为 2 台 4 线(含两条正线),采用双岛式站台布置,正线居中,线间距 6.5 m,两正线之间设隔墙,如图 1 所示。站台长 220 m,宽 13 m,高 1.25 m。站台两侧均设置全封闭式屏蔽门,如图 2 所示。线路主要运行 CRH6 型城际动车组,8 辆编组,长 201.4 m,宽 3.3 m,高 3.86 m。

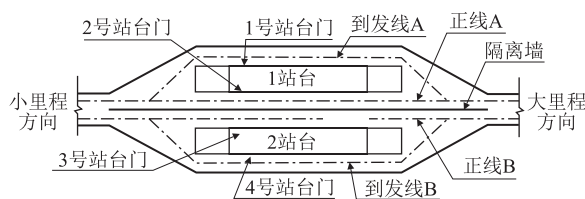


图 1 站台层平面布置图

2 数值计算模型

2.1 控制方程

列车在隧道内运行时,隧道内的空气流动是三维、粘性、可压缩、非定常的湍流流动。其控制方程组^[7]包括:

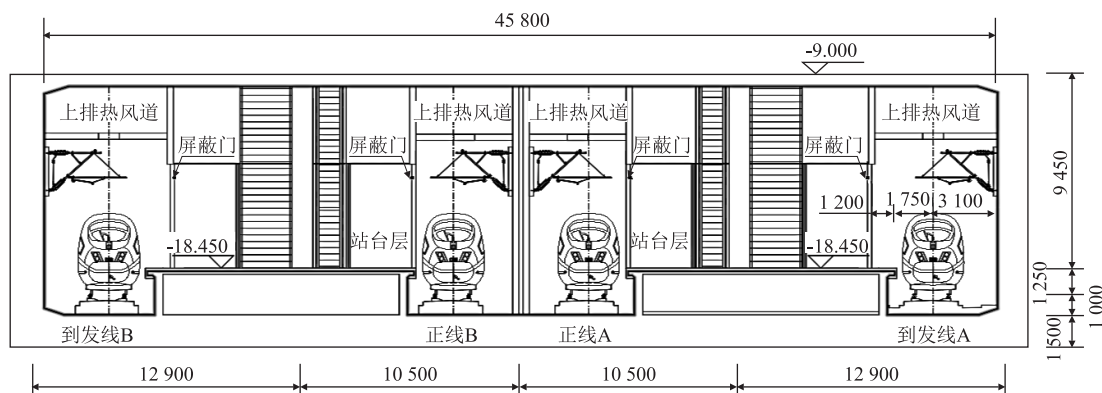


图 2 站台层剖面图

理想气体状态方程:

$$p = R\rho T \quad (1)$$

式中: p ——流体压力;

ρ ——流体密度;

T ——绝对温度;

R ——摩尔气体常数。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (2)$$

式中: t ——时间;

div ——散度求解符号;

\vec{u} ——速度矢量。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \text{div}(\rho u_i \vec{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} u_i) - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (3)$$

式中: grad ——梯度求解符号;

u_i ($i = 1, 2, 3$)——速度。

能力守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \text{div}[\rho(E + p)\vec{u}] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_i} + u_i \tau_{ij} \right) \quad (4)$$

式中: x_i ($i = 1, 2, 3$)——坐标分量;

μ ——动力黏度系数;

E ——总内能, $E = u_i^2/2 + e$, 常温下, $e = c_v T$; c_v 为定容比热。

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (5)$$

式中: τ_{ij} ——切应力;

u_j ——动力黏性系数, 与流体物性和温度有关 [kg/(m·s)];

x_j ——坐标分量。

2.2 几何模型

计算模型采用重叠动网格实现列车与车站及隧道的相对运动, 计算区域分为固定的背景区域和移动的重叠区域。

区域全长 3 662 m, 包括小里程明线区(550 m)、小里程隧道(1 750 m)、小里程咽喉区(137 m)、站台区(328 m)、大里程咽喉区(137 m)、大里程隧道(210 m)、大里程明线区(550 m), 如图 3 所示。

重叠区域包括列车模型和列车周围的部分区域。列车模型以标准 CRH6 型动车组列车为参考, 忽略转向架、受电弓、车体连接部位等细部结构, 建立有一定表面粗糙度的车体模型。列车模型长 201.4 m, 横截面积为 2.738 m², 列车初始位置距隧道入口 50 m。

2.3 边界条件

背景区域中除小、大里程明线区的空气界面设置

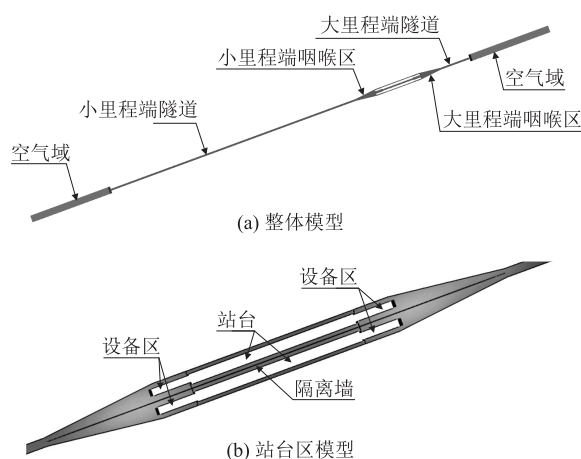


图3 车站及隧道模型图

为压力出口边界条件外, 其余均设为壁面边界条件。重叠区域中列车表面设置为壁面边界条件, 其余界面设为重叠网格边界条件, 如图 4 所示。

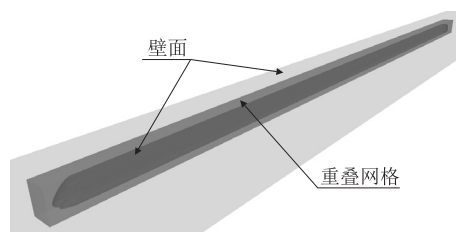


图4 重叠区域边界条件设置图

2.4 网格模型

采用六面体网格为主的网格模型来离散流场, 对列车经过区域的网格进行了加密, 网格尺寸为 0.2 m, 如图 5 所示。网格总数量约 2 300 万。

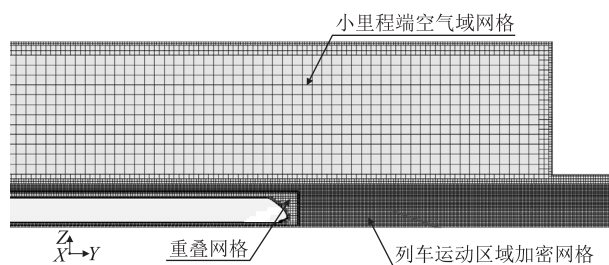


图5 列车及隧道入口处网格划分图

2.5 模型验证

为验证本文采用数值计算模型的准确性, 以京沪高速铁路西渴马 2 号隧道空气动力学现场测试数据为标准进行验证^[8]。该试验隧道位于京沪高速铁路德州至枣庄段, 隧道全长 1 005 m (不含两端洞口缓冲结构), 坡度为 3‰, 曲线半径为 7 000 m, 为双线隧道, 线间距为 5.0 m, 轨面以上净空面积为 100 m², 内部铺设

无砟轨道。两端洞口均设有 15 m 长顶部开口的斜切式洞门缓冲结构。试验列车为 8 辆编组的 CRH2 高速动车组,车体全长 201.4 m,鼻尖长 9.55 m,车身横断面积为 11.2 m²,试验车速由 220 km/h 逐级提速到 350 km/h。测试当地大气压强为 1.02 × 10⁵ Pa,平均温度为 8.9 ℃。

基于现场测试条件,建立模型算列车以 300 km/h 速度通过隧道时的气动效应,距隧道进口 140 m 处靠近列车侧隧道壁面附近离轨顶面 3.2 m 高处压力时程曲线如图 6 所示。可以看出,计算结果和测试结果中压力变化规律基本一致,仅在部分时间点的压力幅值存在差异,这是因为数值计算不能完全重现现场试验实际情况。总体来看,数值计算结果与现场测试结果吻合较好,说明采用的高速铁路隧道数值计算模型是可靠的。

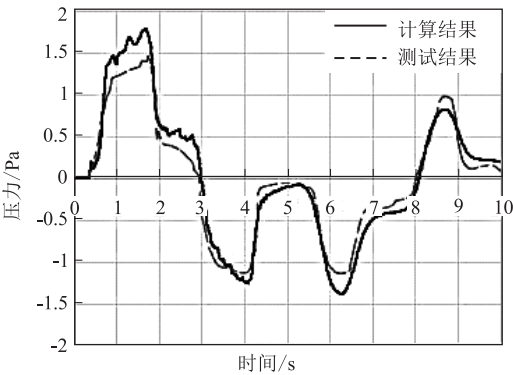


图 6 数值计算与现场测试压力曲线对比图

2.6 测点布置

本站共有 4 组站台屏蔽门,在每组屏蔽门纵向(线路方向)布置一组压力监测点,监测点距站台起点分别为 10 m、35 m、60 m、85 m、110 m、135 m、160 m、185 m、210 m,距站台面高度为 1.5 m。

3 计算结果及分析

3.1 站台屏蔽门表面压力波动规律

过站列车以 160 km/h 通过正线 A 时列车运行和隧道压力波传递位置如图 7(a) 所示, $t = 0.0$ s 时列车开始移动,其中粗点划线表示车头位置,细点划线表示车尾位置,细实线表示压缩波位置,细划线表示膨胀波位置,粗实线表示测点位置。2 号屏蔽门表面中部测点压力时程曲线如图 7(b) 所示。由图 7(b) 可知,时刻 1 测点的压力开始逐渐升高,这是由列车车头进入隧道时产生初始压缩波以音速向前传播至测点引起的;时刻 2 测点的压力逐渐降低,这是由车

尾进入隧道时产生的初始膨胀波以音速向前传播测点引起的;此后测点的压力不断地升高或降低,这是由初始压缩波和初始膨胀波在隧道及车站内往复传播至测点引起的。时刻 3 测点的压力先快速上升达到一个正压峰值,然后快速下降达到一个负压峰值,这是列车车头经过测点时产生的;时刻 4 测点的压力先快速下降至一个负压峰值,然后快速上升至一个正压峰值,这是车尾经过测点时产生的;时刻 3 至时刻 4 为车身经过测点,压力为负压,且以较小幅度不断变化。

由以上分析可知,列车快速过站过程中,站台门表面测点的压力将经历两次较大幅度波动,第 1 次为初始压缩波和膨胀波传播至测点,第 2 次为列车经过测点,第 2 次波动幅度明显大于第 1 次。

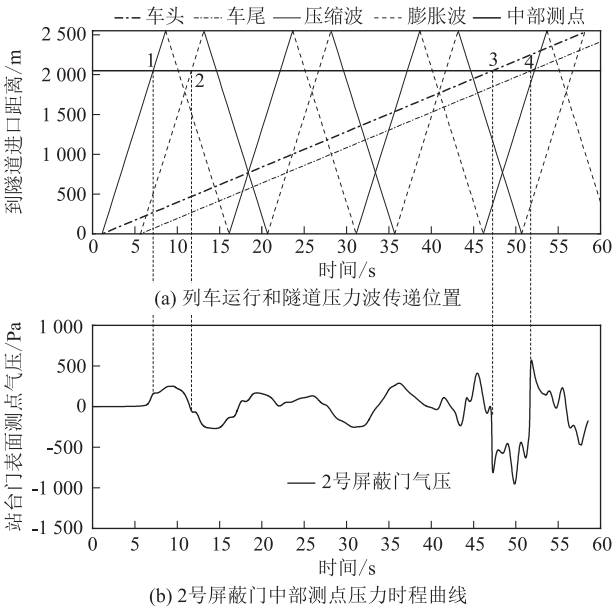


图 7 站台屏蔽门表面压力波动曲线图

3.2 站台屏蔽门列车最大风压值分布规律

3.2.1 横向分布规律

本地下站有 4 组站台屏蔽门,其中两组在正线侧,另外两组在到发线侧,列车以 160 km/h 从正线 A 通过时各组站台屏蔽门(站台中心测点)压力波动幅度如图 8 所示。由图 8 可知,2 号屏蔽门压力波动幅度最大,最大正压为 694 Pa,最大负压为 -1 344 Pa,1 号屏蔽门压力波动幅度次之,最大正压为 2 号屏蔽门的 66.4% (461 Pa),最大负压为 2 号屏蔽门的 54.5% (-732 Pa),3 号和 4 号屏蔽门压力波动幅值基本一致,最大正压为 2 号屏蔽门的 72.3% (502Pa),最大负压为 2 号屏蔽门的 34.5% (-464 Pa)。这是因为 2 号屏蔽门邻近正线 A,列车快速通过时车体周围强烈的

气动效应直接作用于此组站台屏蔽门,车头和车尾经过测点时压力波动幅度最大;1号屏蔽门与正线A之间有站台1阻隔,车体周围强烈的气动效应不能直接作用于1号屏蔽门,需通过正线A轨行区→咽喉区→到发线A轨行区传递至测点,由于断面净空面积变化和摩擦作用,压力波动强度传递过程逐渐降低;同理,3号、4号屏蔽门与正线A之间有隔墙和站台2阻隔,压力波动传递的距离更远,其幅值也更小。

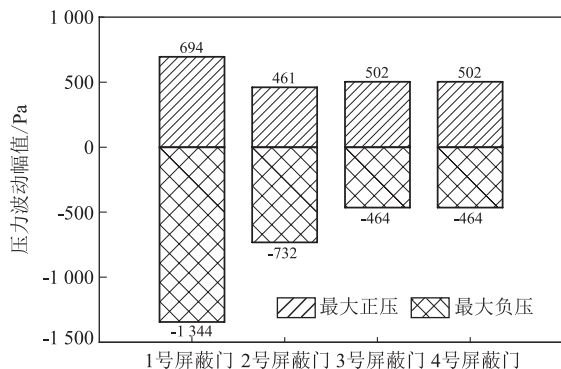


图8 各屏蔽门表面压力变化对比图

3.2.2 纵向分布规律

为分析站台屏蔽门压力波动幅值纵向分布规律,在2号屏蔽门距站台中心-100 m、-75 m、-50 m、-25 m、0 m、25 m、50 m、75 m、100 m处设置测点,压力波动幅值纵向分布如图9所示。可以看出,沿列车运行方向,各测点的压力波动最大正压和最大负压变化规律均为先增大后减小,站台中心左右侧75 m范围内压力波动幅度较大,最大正压为742 Pa(测点2),最大负压为-1337 Pa(测点5)。这是因为测点的最大正压出现在车头经过测点时刻,最大负压出现在车尾经过时刻,列车通过小里程咽喉区、站台轨行区(隔离墙与站台之间区域)和大里程咽喉区的过程相当于通过一个短隧道,这与列车通过简单隧道时壁面压力波动幅值分布规律是一致的。

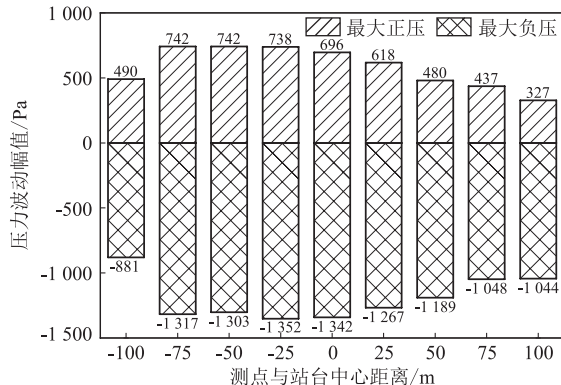


图9 2号站台屏蔽门压力波动幅值纵向分布图

3.3 列车速度的影响

不同过站速度时2号屏蔽门各测点压力变化幅值计算结果如图10所示。可以看出,列车过站速度从120 km/h提高到160 km/h,各测点最大负压逐渐增大;除站台端部测点外,其余各测点最大正压也逐渐增大。列车160 km/h过站时站台端部测点正压幅值低于140 km/h过站时的正压幅值,原因是车速不同,列车在经过时与压缩波及膨胀波的叠加抵消的地点、时刻均不同,因此屏蔽门上产生正压幅值或负压幅值的位置也不尽相同。

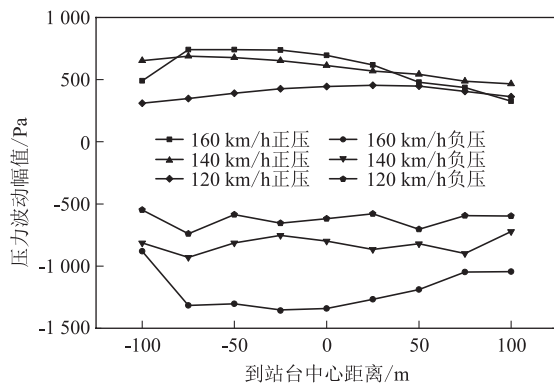


图10 不同速度过站时屏蔽门压力幅值图

总体来看,速度越高,列车快速过站时对屏蔽门表面产生压力荷载越大。160 km/h过站时站台屏蔽门表面最大正压比140 km/h过站时增加7.7%,比120 km/h过站时增加65%;最大负压比140 km/h过站时增加44.5%,比120 km/h过站增加83.3%。

3.4 到发线停靠列车的影响

到发线A、到发线B均停靠一列车时2号屏蔽门压力变化曲线如图11所示。由图11可知,到发线停靠列车后,2号屏蔽门表面测点压力变化规律不同,不同位置处的压力幅值均有增大,最大正压增加了135 Pa,约42%,最大负压增加了202 Pa,约增大了23%。这是因为两条到发线有停站车,站内空气流动空间减小,由于阻塞作用,压力波动也更加剧烈。

4 结论

建立了城际铁路四线双岛式地下车站气动效应数值仿真模型,计算分析了不同工况下站台屏蔽门表面压力波动,得出主要结论如下:

- (1) 正线站台屏蔽门压力将有两次较大的波动,第1次为列车进入隧道时产生的压力波传播至测点,第2次为列车通过测点,第2次波动幅值大于第1次。
- (2) 过站侧正线屏蔽门压力波动幅度最大,到发

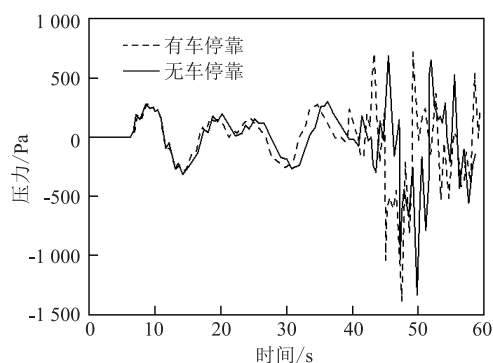


图 11 到发线停车时屏蔽门压力波动曲线图

线次之,对侧正线和到发线最小,需重点关注列车风压对正线侧屏蔽门的影响。

(3) 列车过站速度越高,压力波动幅度越大,120 km/h、140 km/h、160 km/h 过站时站台屏蔽门最大风压分别为 739 Pa、931 Pa、1 352 Pa。

(4) 到发线有车停靠时,正线侧屏蔽门最大正压、最大负压将分别增加 42% 和 23%,需考虑停靠车的影响。

参考文献:

- [1] 牛建青,金旭炜,杨吉忠,等. 成都至自贡高速铁路引入天府机场方案分析[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(2): 80–85.
NIU Jianqing, JIN Xuwei, YANG Jizhong, et al. Scheme Analysis of Introducing Chengdu-Zigong High-speed Railway into Chengdu Tianfu International Airport [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(2): 80–85.
- [2] 黄颖. 城际铁路隧道及地下车站空气动力学效应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
HUANG Ying. Study on Aerodynamic Effects of Intercity Railway Tunnel and Underground Stations [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

- [3] 元慧,周丹,孟石,等. 城际列车越站瞬变压力数值仿真研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(1): 200–207.
YUAN Hui, ZHOU Dan, MENG Shi, et al. Numerical Simulation Research of Transient Pressure of Inter-city Train through Station [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(1): 200–207.
- [4] 孙海富. 城际铁路正线站台门设置标准研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(12): 21–25.
SUN Haifu. Research on the Setting Standard of Platform Door for Main Line of Intercity Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(12): 21–25.
- [5] 鲁华伟. 大型地下客站列车高速越站屏蔽门承压分析[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(7): 66–69, 39.
LU Huawei. Analysis of Metro Screen Door Pressure on Condition of Train Crossing Large Underground Station in High Speed [J]. Building Energy & Environment, 2021, 40(7): 66–69, 39.
- [6] 柳润东,邢星,潘永琛,等. 地下高铁站列车气动荷载特性试验研究[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2022, 12(2): 10–14.
LIU Rundong, XING Xing, PAN Yongchen, et al. Experimental Study on Aerodynamic Load Characteristics of Trains in Underground High Speed Railway Station [J]. Railway Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health, 2022, 12(2): 10–14.
- [7] 蒋尧,金旭炜,周丹,等. 隔离墙长度对高速列车过站气动效应的影响[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(10): 73–78.
JIANG Yao, JIN Xuwei, ZHOU Dan, et al. Influence of the Partition Wall Length on Aerodynamic Effect of High Speed Train Passing Station [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(10): 73–78.
- [8] 刘峰,姚松,刘堂红,等. 高速铁路隧道壁面气动压力实车试验分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(10): 2018–2024.
LIU Feng, YAO Song, LIU Tanghong, et al. Analysis on Aerodynamic Pressure of Tunnel Wall of High-speed Railways by Full-scale Train Test [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(10): 2018–2024.