

市域列车隧道断面突变位置气动特性*

张宝珍^{1,2} 谢红兵^{1,2} 孟令锋^{1,2} 戴隆明^{1,2} 南喆^{1,2} 熊小慧³(1. 中车株洲电力机车有限公司, 412001, 株洲; 2. 重载快捷大功率电力机车全国重点实验室, 412001, 株洲;
3. 中南大学轨道交通安全教育部重点实验室, 410075, 长沙)

摘要 [目的] 为了确保列车运营安全性与旅客乘坐舒适性, 需研究市域列车过隧道内变截面位置(进站台、隧道内运行、过中间风井)时的气动力和车内压力变化规律。[方法] 以8节编组的市域列车为例, 建立数值计算模型; 开展隧道变截面处气动性能数值仿真研究, 分别对列车车体表面压力、隧道壁面压力、列车气动力、车内压力变化情况进行分析。[结果及结论] 列车车体表面压力、气动载荷的变化规律为: 列车进站时的表面压力和横向力 > 列车经过中间风井时的表面压力和横向力 > 列车在隧道内运行时的表面压力和横向力。车体表面压力幅值与列车运行速度的1.4~2.0次方呈线性关系; 隧道壁面压力与列车运行速度的1.79~2.10次方呈线性关系; 车体横向力与列车运行速度的1.8~2.0次方呈线性关系, 倾覆力矩与列车运行速度的1.6~2.0次方呈线性关系。市域列车气密性设计能满足隧道内变截面位置处, 车内压力变化不大于每3 s内压力变化800 Pa和每1 s内压力变化500 Pa的人体舒适性标准要求。

关键词 市域列车; 隧道变截面; 气动特性

中图分类号 U451.3; U270.11

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.12.039

Aerodynamic Characteristics of City Railway Train at the Sudden Variable Tunnel Cross-Section Positions

ZHANG Baozhen^{1,2}, XIE Hongbing^{1,2}, MENG Lingfeng^{1,2}, DAI Longming^{1,2}, NAN Zhe^{1,2}, XIONG Xiaohui³

(1. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., 412001, Zhuzhou, China; 2. The State Key Laboratory of Heavy-duty and Express High-power Electric Locomotive, 412001, Zhuzhou, China; 3. Key Laboratory of Traffic Safety on Track, Central South University, 410075, Changsha, China)

Abstract [Objective] In order to ensure train operation safety and passenger comfort, it is necessary to study the changing laws of aerodynamic force and pressure inside the city railway train when passing through the variable cross-section posi-

tions in the tunnel (entering the platform, running in the tunnel, and passing through the intermediate air shaft). [Method] Taking the 8-carriage city railway train as an example, a numerical calculation model is established. A numerical simulation study on the aerodynamic performance at the variable tunnel cross-section is carried out, and the changes in the train body surface pressure, tunnel wall pressure, train aerodynamic force, and pressure inside the train are analyzed respectively. [Result & Conclusion] The changing laws of train body surface pressure and aerodynamic load are as follows: the surface pressure and lateral force with train entering the station > the surface pressure and lateral force with train passing through the intermediate air shaft > the surface pressure and lateral force when the train runs into the tunnel. The train body surface pressure amplitude is linearly related to the 1.4~2.0 power of the train running speed; the tunnel wall pressure is linearly related to the 1.79~2.10 power of the train running speed; the train body lateral force is linearly related to the 1.8~2.0 power of the train running speed, and the overturning moment is linearly related to the 1.6~2.0 power of the train running speed. The air-tightness design of the city railway train can meet the human comfort standard requirements, namely the pressure change inside the car at the variable tunnel cross-section positions shall not exceed 800 Pa per 3 seconds and 500 Pa per 1 second.

Key words city railway train; tunnel variable cross-section; aerodynamic performance

随着国内多个大型城市群的兴起, 以及城际线路大规模的规划与兴建, 市域列车给人们的出行提供了新的选择, 既能满足区域经济快速发展对城市轨道交通的需求, 又能有效解决人们上班、购物、上学、回家等通勤出行需求^[1-3]。但市域列车线路地下隧道的长度占比较大, 且隧道断面面积相对较小, 隧道内部气流容易受到壁面的限制与压缩, 引

* 国家科技部创新方法工作专项项目(2019IM050100)

起隧道内及车体内、外空气压力的急剧波动,进而严重影响列车的运营安全性及旅客的乘坐舒适性^[4-6]。国内外学者对列车隧道内空气动力学引起的相关问题进行了较为深入的研究^[7-8],但这些研究大部分是基于等截面隧道开展的,而隧道变截面处空气动力学研究仅限于进出隧道口的压力波动及出口微气压波动^[9-10],市域列车的气动性能缺少针对隧道内部断面突变位置的分析与研究。

基于此,本文采用数值模拟方法,针对某市域列车通过隧道内变截面位置处(进站台、隧道内运行、过中间风井)的空气动力学性能开展相关研究,以获得列车以不同运行速度通过隧道变截面位置时的车体表面压力、隧道壁面压力、气动载荷和车内压力变化规律。本文研究可为市域列车隧道内运行的车体强度、气密性设计和乘客舒适性分析提供数据支撑。

1 建立计算模型

1.1 几何模型与网格划分

本文以 8 节编组的市域列车为例,基于质量守恒方程、能量守恒方程、动量守恒方程和气体理想状态方程建立数值模型,并开展数值模拟研究。忽略转向架、受电弓等细部结构,车体和变截面隧道模型示意图如图 1 所示,隧道断面尺寸示意图如图 2 所示。

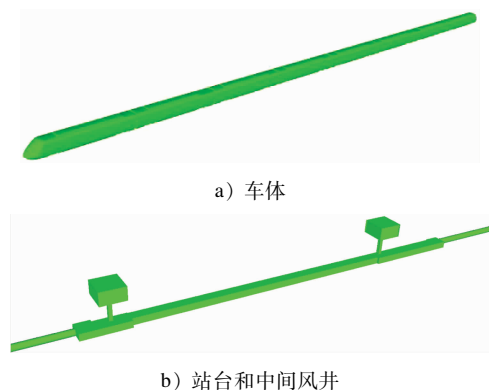


图 1 车体和变截面隧道模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the train body and variable cross-section tunnel models

基于滑移网格法模拟列车在隧道中的相对运动,利用分区对接的网格技术离散计算区域,隧道与地面通过六面体结构化网格离散,列车外形通过四面体非结构化网格离散。模型网格离散后,网格总数在 3 000 万个以上,并通过了网格无关性检查。

车头、转向架和隧道壁面网格划分示意图如图 3 所示。

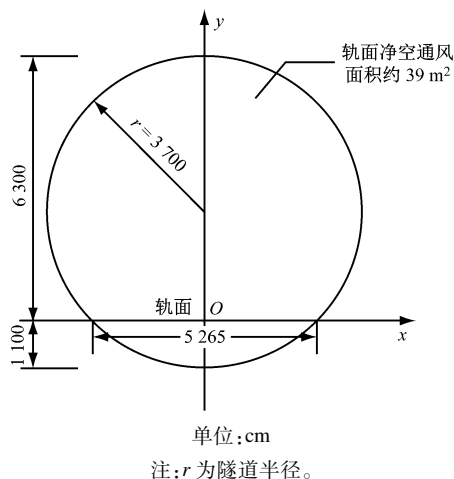


图 2 隧道断面尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tunnel cross-section dimensions

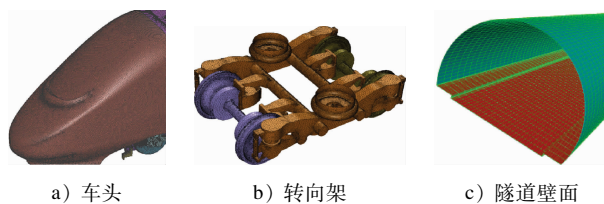


图 3 车头、转向架和隧道壁面网格划分示意图

Fig. 3 Mesh division schematic diagram of train head, bogie and tunnel wall

1.2 测点布置

本次数值计算中,列车共布置了 52 个测点。其中:头车和尾车分别布置了 11 个测点(T1—T11),位于头车鼻尖点、司机室侧窗、司机室前窗底部、司机室前窗顶部、列车流线型过渡区域、空调前侧、车身部位;头、尾车测点位置一致,头、尾车上测点 8 与测点 9 在列车两侧对称分布;中间 6 节车中,每节车在相同位置各布置 5 个测点(Z1—Z5),中间车测点 2 和测点 4 对称,如图 4 a)和图 4 b)所示。隧道内壁面测点布置在距离隧道底部 2 m、4 m 及列车顶部上方位置,共布置了 57 个测点(S1—S57),沿水平方向与两端隧道口距离为 50 m、100 m、150 m、200 m、250 m、300 m、500 m、700 m、900 m 及隧道中部位置,如图 4 c)所示。

2 计算结果分析

2.1 数值模拟方法有效性验证

为了验证数值仿真计算方法的准确性,通过动模型试验进行验证。本次试验设计的列车模型缩

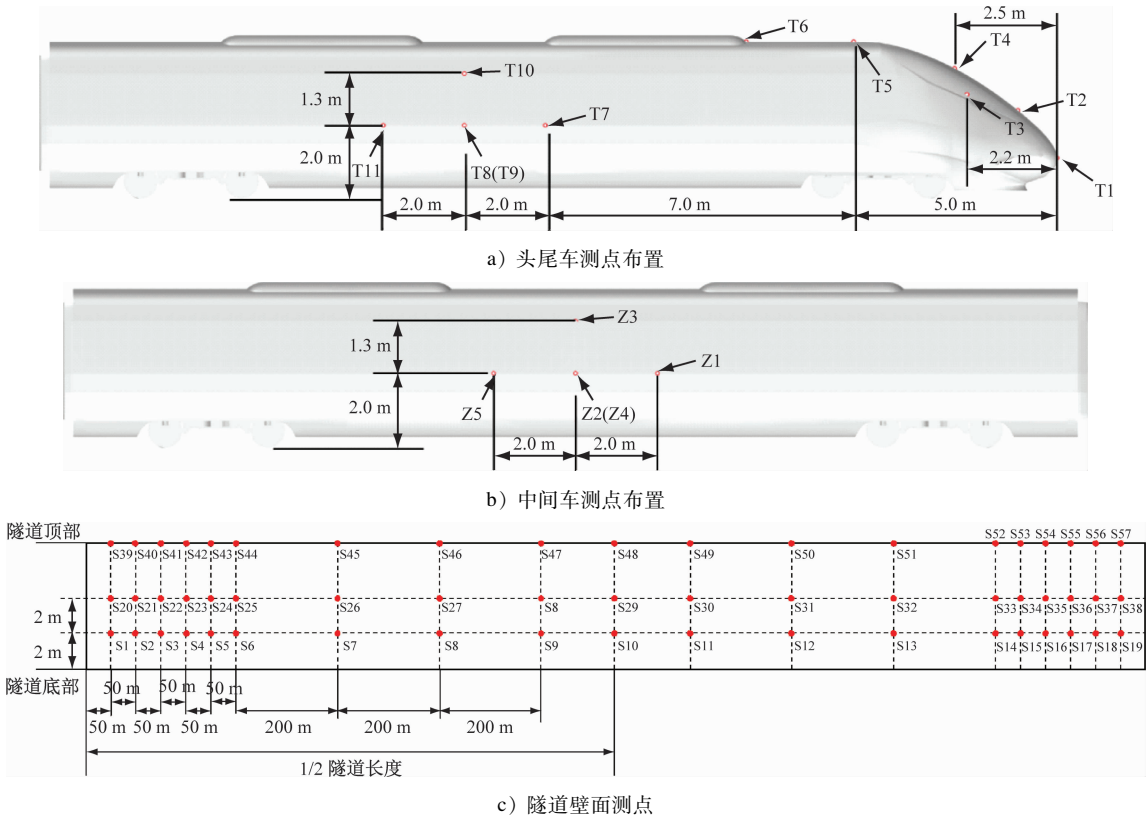


图 4 测点位置示意图

Fig. 4 Location diagram of measuring points

比为 1:16.8,列车模型采用头车 + 中间车 + 尾车的 3 节编组形式,隧道截面积为 39 m²。动模型试验照片如图 5 所示。车体及隧道表面压力的模拟值与动模型试验结果对比如表 1 所示。不同测点的模拟值与动模型试验结果压力时程曲线对比如图 6 所示。由表 1 和图 6 可知:模拟值与动模型试验结果的列车和隧道壁面压力相对误差均小于 4.5%;模拟值和动模型试验结果的压力波动曲线基本重合。由此可知,本文所提数值仿真计算方法具有一定的准确性和有效性。

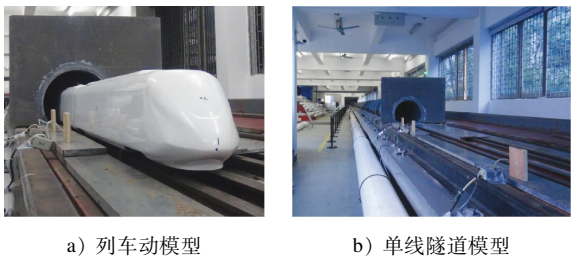


图 5 动模型试验照片

Fig. 5 Dynamic model test photos

2.2 列车车体表面压力变化分析

当市域列车运行速度为 160 km/h 时,在进入站

表 1 车体及隧道表面压力的模拟值与动模型试验结果对比

Tab. 1 Comparison between simulated surface pressure values of train body / tunnel and dynamic model test results

| 项目 | 列车表面压力/Pa | 隧道壁面压力/Pa |
|--------|-----------|-----------|
| 模拟值 | 2 207 | 2 712 |
| 动模型试验值 | 2 118 | 2 835 |
| 相对误差/% | 4.03 | 4.34 |

台(工况 1)、隧道内运行(工况 2)和经过中间风井(工况 3)这 3 种工况下,头车车体表面不同测点的压力时程曲线如图 7 所示。列车表面压力的变化规律基本一致。当列车在进站台和通过中间风井时,列车表面压力均有增大的趋势。当列车在出站台、尾车离开中间风井时,车体表面压力均有减小的趋势。车体表面压力变化幅值大小顺序为:列车进站时的表面压力 > 列车经过中间风井时的表面压力 > 列车在隧道内运行时的表面压力。3 种工况下,T3 测点处的车体表面最大压力分别为 1 600 Pa、1 143 Pa 和 1 184 Pa。3 种工况下,头车车身所受最大压力与列车运行速度之间的关系如图 8 所示。头车

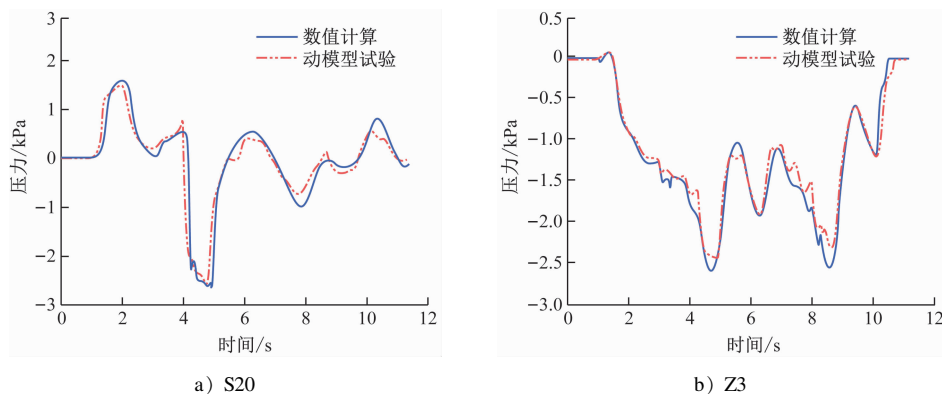


图6 不同测点的模拟值与动模型试验结果压力时程曲线对比

Fig. 6 Comparison of pressure time-history curves between simulated values and dynamic model test results at different measuring points

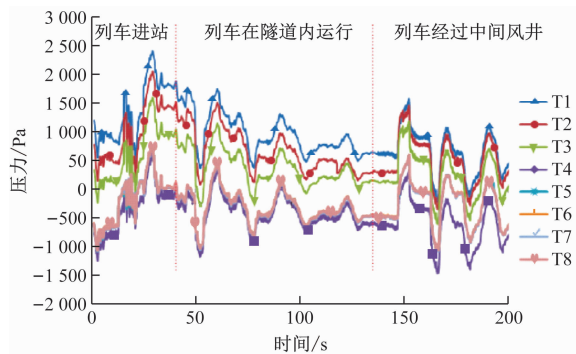


图7 3种工况下头车车体表面不同测点的压力时程曲线

Fig. 7 Pressure time-history curves at different measuring points on head car body surface under three working conditions

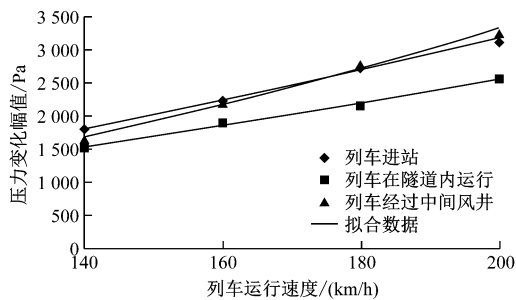


图8 3种工况下车身所受最大压力与列车运行速度之间关系的拟合曲线

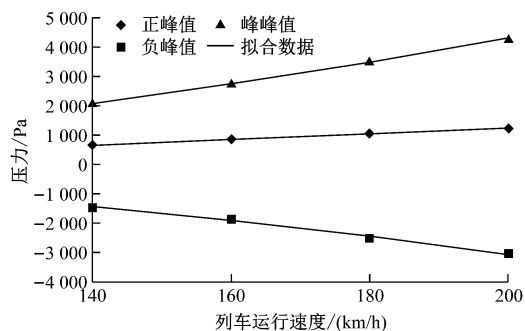
Fig. 8 Fitting curves of the relationship between the maximum train body pressure and train running speed under three working conditions

车体表面测点最大压力变化幅值均与列车运行速度呈1.4~2.0比例的线性关系。

2.3 隧道壁面压力变化分析

在进入站台、隧道内运行和经过中间风井这3

种工况下,隧道壁面测点压力与列车运行速度之间的关系如图9所示。市域列车以不同运行速度在隧道内运行时,隧道壁面测点压力随着列车运行速度的增大而逐渐增大,且均与列车运行速度呈1.79~2.10比例的线性关系。



注:正峰值指垂直于隧道壁面,指向隧道壁面向里的压力最大值;负峰值指垂直于隧道壁面,背向隧道壁面向外的压力最大值;峰峰值指正峰值与负峰值之差的绝对值。

图9 3种工况下隧道壁面测点压力与列车运行速度之间关系的拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of the relationship between tunnel wall pressure and train running speed under three working conditions

2.4 列车气动力变化分析

在进入站台、隧道内运行和经过中间风井这3种工况下,头车所受横向力与列车运行速度之间的关系如图10所示。随着列车运行速度的增加,头车所受的横向力逐渐增大,且均与列车运行速度呈1.8~2.2比例的线性关系。头车车体所受的倾覆力矩变化趋势与头车所受横向力一致,且均与列车运行速度呈1.6~2.0比例的线性关系。列车进入

站台时,尾车所受横向力最大,并且向头车方向依次递减,最大横向力分别为 23 415 N、25 724 N、30 767 N 和 44 615 N。头车受到横向力与列车运行位置之间的排序为:列车进站时头车受到的横向力 > 列车经过中间风井时头车受到的横向力 > 列车在隧道内运行时头车受到的横向力。

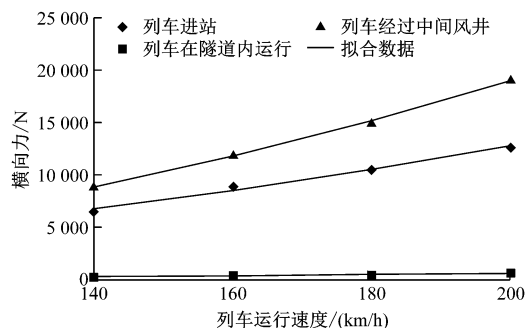


图 10 3 种工况下头车所受横向力与列车运行速度之间的拟合曲线

Fig. 10 Fitting curves between lateral force on the head train and train running speed under three working conditions

2.5 车内压力变化分析

通过数值模拟软件分析可以获得列车外的压力变化情况,再根据车辆气密性能(动态气密指数)推算出车内压力的变化情况,进而判断车内压力变化是否满足铁运〔2008〕28 号《高速电动车组整车试验规范》规定的每 3 s 内压力变化 800 Pa 和每 1 s 内压力变化 500 Pa 的旅客乘坐舒适度要求。当市域列车通过中间风井时(工况 3),不同动态气密指

数 τ 下,车内压力随时间的变化情况如图 11 所示。当列车运行速度为 160 km/h 时,不同动态气密指数下车内 1 s 内的压力变化和 3 s 内的压力变化如表 2 所示。

当列车运行速度为 160 km/h 时,工况 1 中, $\tau \geq 5$ s 能够满足气压变化下的人体舒适度标准;工况 2 和工况 3 中, $\tau \geq 3$ s 能够满足气压变化下的人体舒适度标准。本项目中,市域列车动态气密指数设计值为 6 s,市域列车气密性设计能满足隧道内变截面位置处的车内压力变化不大于每 3 s 内压力变化 800 Pa 和每 1 s 内压力变化 500 Pa 的人体舒适性标准要求。

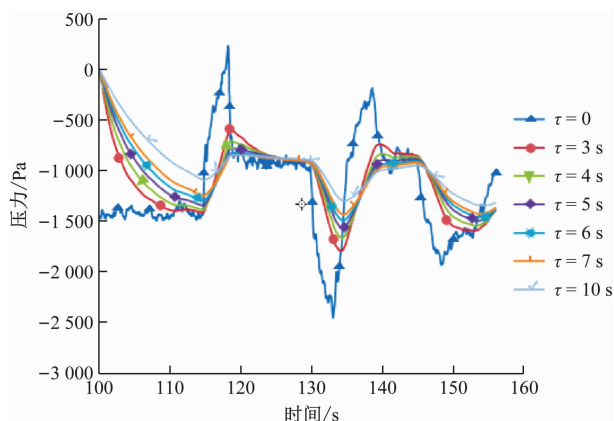


图 11 不同动态气密指数下车内压力随时间的变化情况(工况 3)

Fig. 11 Changes of pressure inside the train with time under different dynamic air tightness index (working condition 3)

表 2 不同动态气密指数下车内 1 s、3 s 内的压力变化情况(列车运行速度为 160 km/h)

Tab. 2 Pressure changes inside the train within 1 s and 3 s under different dynamic air tightness index (train running speed at 160 km/h)

| τ/s | 工况 1 压力变化/Pa | | 工况 2 压力变化/Pa | | 工况 3 压力变化/Pa | |
|----------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|
| | 1 s 内 | 3 s 内 | 1 s 内 | 3 s 内 | 1 s 内 | 3 s 内 |
| 3 | 429 | 998 | 239 | 626 | 305 | 700 |
| 4 | 336 | 834 | 187 | 509 | 239 | 585 |
| 5 | 27 | 714 | 154 | 430 | 196 | 500 |
| 6 | 234 | 623 | 136 | 377 | 166 | 436 |

3 结语

本文以市域列车通过隧道内变截面位置(进站台、隧道内运行、过中间风井)为例,开展列车的气动特性研究,主要获得以下结论:

1) 当列车运行速度为 160 km/h 时,3 种工况

下,车体表面最大压力分别为 2 207 Pa、1 897 Pa 和 2 247 Pa,车体表面测点压力变化幅值与列车运行速度呈 1.4 ~ 2.0 比例的线性关系。

2) 在不同列车运行速度下(140 km/h、160 km/h、180 km/h 和 200 km/h),隧道壁面的最大压力分别为 2 094 Pa、2 712 Pa、3 557 Pa 和 4 243 Pa。

隧道壁面压力随着列车运行速度的增大而逐渐增大,且均与列车运行速度呈 1.79~2.10 比例的线性关系。

3) 车体所受横向力随着列车运行速度的增加逐渐增大,且与列车运行速度呈 1.8~2.2 比例的线性关系;车体所受倾覆力矩与横向力变化趋势一致,且与列车运行速度呈 1.6~2.0 比例的线性关系。

4) 市域列车气密性设计能满足隧道内变截面位置处,车内压力变化不大于每 3 s 内压力变化 800 Pa 和每 1 s 内压力变化 500 Pa 的人体舒适性标准要求。

参考文献

- [1] 胡明伟, 吴雯琳, 赵千, 等. 城际轨道交通可达性与城市经济发展的关系分析[J]. 深圳大学学报(理工版), 2022, 39(3): 287.
HU Mingwei, WU Wenlin, ZHAO Qian, et al. Analysis on the relationship between accessibility of intercity rail transit and urban economic development[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2022, 39(3): 287.
- [2] 高伟, 林剑洋, 雷波, 等. 列车在城际铁路地下段越行过站时的屏蔽门气动压力变化规律[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(8): 52.
GAO Wei, LIN Jianyang, LEI Bo, et al. Platform screen door pneumatic pressure change law of train passing overtaking station of intercity railway underground section[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(8): 52.
- [3] 蔡涵哲, 马鹏, 江志彬, 等. 广州市域快速轨道交通 18 号线和 22 号线快慢车及共线运营下的线路通过能力分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(10): 98.
CAI Hanzhe, MA Peng, JIANG Zhibin, et al. Line passing capacity analysis of express/local train and collinear operation of Guangzhou urban rapid rail transit line 18 and line 22[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(10): 98.
- [4] 焦齐柱, 肖明清, 周俊超, 等. 基于乘员耳感舒适性的时速 600 km 磁悬浮单线隧道最优净空面积研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(12): 2993.
JIAO Qizhu, XIAO Mingqing, ZHOU Junchao, et al. Study on the optimal clearance area of a single line maglev tunnel with a speed of 600 km/h based on the ear comfort of passengers[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(12): 2993.
- [5] 潘美凤. CRH380 型高速动车组车辆气密性设计探讨[J]. 铁道车辆, 2020, 58(4): 18.
PAN Meifeng. Discussion of air-tightness design of vehicles in CRH380 high speed multiple units[J]. Rolling Stock, 2020, 58(4): 18.
- [6] LI X, ZHOU D, JIA L, et al. Effects of yaw angle on the unsteady aerodynamic performance of the pantograph of a high-speed train under crosswind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 182: 49.
- [7] 杨波, 施柱, 那艳玲, 等. 地铁中间风井前变速运行对乘客舒适性影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(6): 1555.
YANG Bo, SHI Zhu, NA Yanling, et al. Influence of running with varying velocity in front of the middle ventilating shaft of the subway on passenger comfort[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(6): 1555.
- [8] LI W, LIU T, HUO X, et al. Influence of the enlarged portal length on pressure waves in railway tunnels with cross-section expansion[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 190: 10.
- [9] 王磊, 骆建军, 李飞龙, 等. 高速铁路双线隧道内列车风分布及流场特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(4): 1346.
WANG Lei, LUO Jianjun, LI Feilong, et al. Train-induced wind distribution and flow field characteristics in high-speed railway double-track tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(4): 1346.
- [10] LU Y, WANG T, YANG M, et al. The influence of reduced cross-section on pressure transients from high-speed trains intersecting in a tunnel[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 201: 104161.
- 收稿日期:2022-11-03 修回日期:2022-12-26 出版日期:2024-12-10
Received:2022-11-03 Revised:2022-12-26 Published:2024-12-10
· 通信作者:张宝珍,高级工程师,zbz19880113@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821