

# 城际快速列车隧道交会气动特性\*

张宝珍<sup>1,2</sup> 周安德<sup>1,2</sup> 孟令锋<sup>1,2</sup> 易晓丹<sup>1,2</sup> 唐明赞<sup>1,2</sup> 南喆<sup>1,2</sup> 熊小慧<sup>3</sup>

(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. 中南大学交通运输工程学院, 410075, 长沙)

**摘要** [目的] 城际快速列车在隧道内交会时产生的气动载荷和瞬时压力变化, 严重影响了列车行车安全和旅客乘坐气动舒适性。因此, 有必要对城际快速列车隧道交会时的气动特性进行研究。[方法] 基于空气动力学数值计算方法, 研究了某城际快速列车隧道内交会时的气动载荷和车内压力波动情况, 分析了列车表面压力变化、隧道壁面压力变化、各节车辆所受横向力变化, 以及车厢内压力变化。[结果及结论] 交会侧和非交会侧的列车表面压力幅值基本一致; 隧道壁面压力幅值基本沿隧道中部呈对称分布; 列车所受横向力和倾覆力矩近似与列车交会速度的平方成正比; 车内瞬时压力波动满足 1 s 内不大于 500 Pa 和 3 s 内不大于 800 Pa 的旅客乘坐气动舒适性要求。

**关键词** 城际快速列车; 空气动力学; 气动舒适性

**中图分类号** U451.3; U270.11

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2025.05.014

## Aerodynamic Characteristics of Intercity High-Speed Trains Meeting in Tunnels

ZHANG Baozhen<sup>1,2</sup>, ZHOU Ande<sup>1,2</sup>, MENG Lingfeng<sup>1,2</sup>, YI Xiaodan<sup>1,2</sup>, TANG Mingzan<sup>1,2</sup>, NAN Zhe<sup>1,2</sup>, XIONG Xiaohui<sup>3</sup>

(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. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, 410075, Changsha, China)

**Abstract** [Objective] The aerodynamic loads and instantaneous pressure changes generated when intercity high-speed trains meet in tunnels seriously affect the train operation safety and the passengers' aerodynamic comfort. Therefore, it is necessary to study the aerodynamic characteristics of intercity high-speed trains meeting in tunnels. [Method] Based on the numerical calculation method of aerodynamics, the aerodynamic loads and the pressure fluctuations inside certain intercity high-speed trains meeting in tunnels are studied. The pressure changes on the train surface and on the tunnel wall, the changes in

the lateral force cast on every train car, and the pressure changes inside the carriage are analyzed. [Result & Conclusion] The amplitudes of the train surface pressures on the meeting side and on the other side are basically the same. The amplitude of the tunnel wall pressure is basically symmetrically distributed along the middle of the tunnel. The lateral force and the overturning moment experienced by the train are approximately proportional to the square of the meeting speed of the trains. The instantaneous pressure fluctuations inside the train meet the passengers' aerodynamic ride comfort requirements that the pressure change is no more than 500 Pa within 1 s and no more than 800 Pa within 3 s.

**Key words** intercity high-speed train; aerodynamics; aerodynamic comfort

近年来,随着城市化进程的不断推进,城际快速列车能满足中心城区与新城,以及新城之间的出行需求,满足区域快速经济对城市轨道交通的要求,有效解决市民上班、购物、上学、回家等通勤出行要求<sup>[1-3]</sup>。随着列车行驶速度的不断提升以及城际隧道断面的不断缩小,列车在隧道内的气动特性问题越发突出<sup>[4]</sup>。城际快速列车在隧道内运行时,流动的空气受到隧道四周壁面的限制而剧烈压缩,压缩波沿着列车前行方向传播,隧道内的空气将产生瞬间的压力变化,并在隧道出口处发出强烈的空气爆破音,影响列车的运行安全性和旅客乘坐舒适性<sup>[5-6]</sup>。针对这些问题,国内外研究人员通过数值计算及试验方法,对列车的气动性能进行了相关研究<sup>[7-9]</sup>。但以上文献尚未分析车外压力波动对车内舒适性的影响,气动载荷系数的研究无法直接为列车动力学分析和乘客舒适性分析提供参考依据。

鉴于此,本文基于某城际快速列车开展隧道内交会空气动力学仿真研究,通过空气动力学仿真计

\* 国家科技部创新方法工作专项项目(2019IM050100)

算,分析城际快速列车在隧道内交会时的列车表面压力波、隧道表面压力波、列车气动力和车内压力波动情况,进而研究城际快速列车的空气动力学性能和乘坐舒适性。本文研究可为城际快速列车提供动力学分析的气动载荷数据,也可为评估车内压力波动是否满足旅客乘坐舒适性要求提供借鉴与参考。

## 1 数值计算模型

### 1.1 计算模型

采用4节编组(Mc1-Tp1-Tp2-Mc2)的城际快速列车进行数值模拟计算,列车长度为101.4 m。城际快速列车数值计算模型,如图1所示。根据城际快速列车实际运营的双线隧道设计图可知,隧道断面面积为 $81.37\text{ m}^2$ 。双线运行隧道断面示意图如图2所示。

### 1.2 计算域

为模拟列车在隧道内运行和交会的全过程,将列车前端距隧道入口为50 m处作为初始计算步,双线隧道交会计算区域示意图,如图3所示。

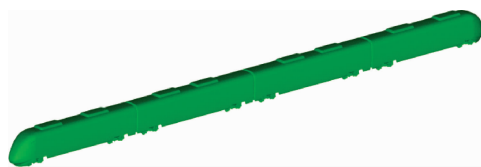
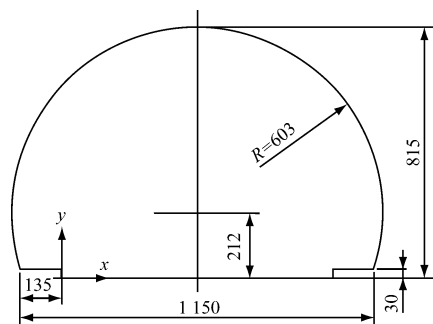


图1 城际快速列车数值计算模型

Fig. 1 Numerical calculation model of intercity high-speed trains

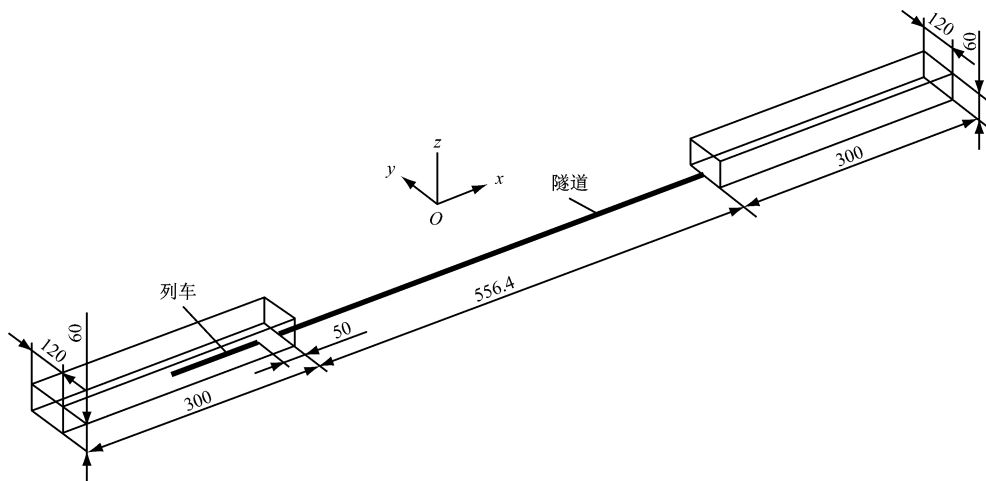


单位:cm

注: $R$ 为隧道盾构半径。

图2 双线运行隧道断面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a double-line operation tunnel cross-section



单位:cm

图3 双线隧道交会计算区域示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the calculation area for the trains meeting in a double-line tunnel

### 1.3 计算网格

流场模拟列车和列车,以及列车在隧道内产生相对运动时,计算域基于分区对接的滑移网格方法,分别在列车与隧道,以及两列列车之间设定公共滑移边界。采用商业CFD(计算流体动力学)软件STAR-CCM对流场进行仿真分析。列车过隧道计算域分区示意图如图4所示。当列车向前运动时,区域2和区域3会和列车以同样的速度向前运

动,而区域1、区域4、区域5和区域6静止。静止区域和运动区域之间的边界定义为交换面,静止区域和运动区域之间的信息交换通过交换面进行。

为模拟流线型列车头型等较为复杂的车体结构,本文采用混合网格方法进行离散,列车模型滑移区域基于四面体网格进行离散,其他滑移区域基于棱柱网格进行离散,固定区域利用六面体网格单元进行离散。



①区域1,②区域2,③区域3,④区域4,⑤区域5,⑥区域6

注:图中带圈数字表示区域号。

图4 列车过隧道计算域分区示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the calculation area partition for a train passing through tunnel

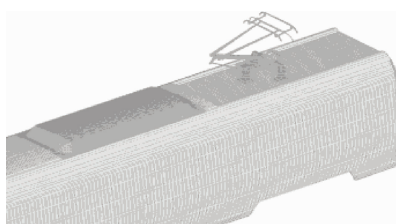
为确保网格离散对数值结果的影响尽可能小,采用3种密度网格(粗糙、中等、精细)进行网格无关性验证。3种网格密度下的头车气动升力系数对比,如表1所示。3种不同网格密度下,头车气动升

力系数的差异较小,粗糙网格的头车气动升力系数误差最大,为2.75%,小于网格无关性验证对比值3%。综合考虑计算精度和成本,选用中等网格进行后续工况的数值仿真分析。城际快速列车关键部位、隧道壁面及隧道口处的网格划分情况,如图5所示。

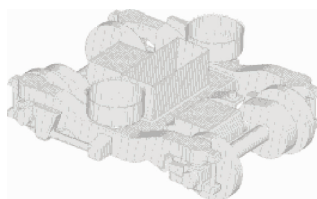
表1 3种网格密度下头车气动升力系数对比

Tab. 1 Comparison of head car aerodynamic lift coefficients under three grid densities

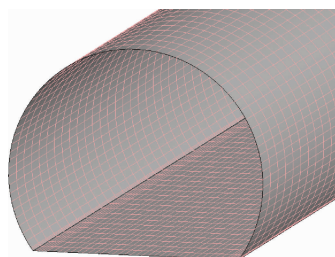
网格密度	网格数量/万个	头车升力系数	误差/%
粗糙	3 935	-0.120 4	2.75
中等	5 009	-0.123 8	—
精细	6 853	-0.122 1	1.37



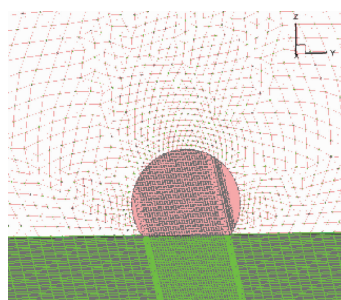
a) 受电弓平台



b) 转向架区域



c) 隧道壁面



d) 隧道口处

图5 城际快速列车关键部位、隧道壁面及隧道口处的网格划分情况

Fig. 5 Grid divisions of the key parts of intercity high-speed trains, the tunnel wall and the tunnel entrance

#### 1.4 测点布置

本次数值模拟中,在城际快速列车上共布置了38个测点,其中:头车布置15个测点;尾车布置15个测点;中车1和中车2交会侧壁面高度方向各布置3个测点,非交会侧(列车前进方向右侧)各布置1个测点。隧道壁面共布置40个测点。城际快速列车和隧道的局部测点位置示意图如图6所示。

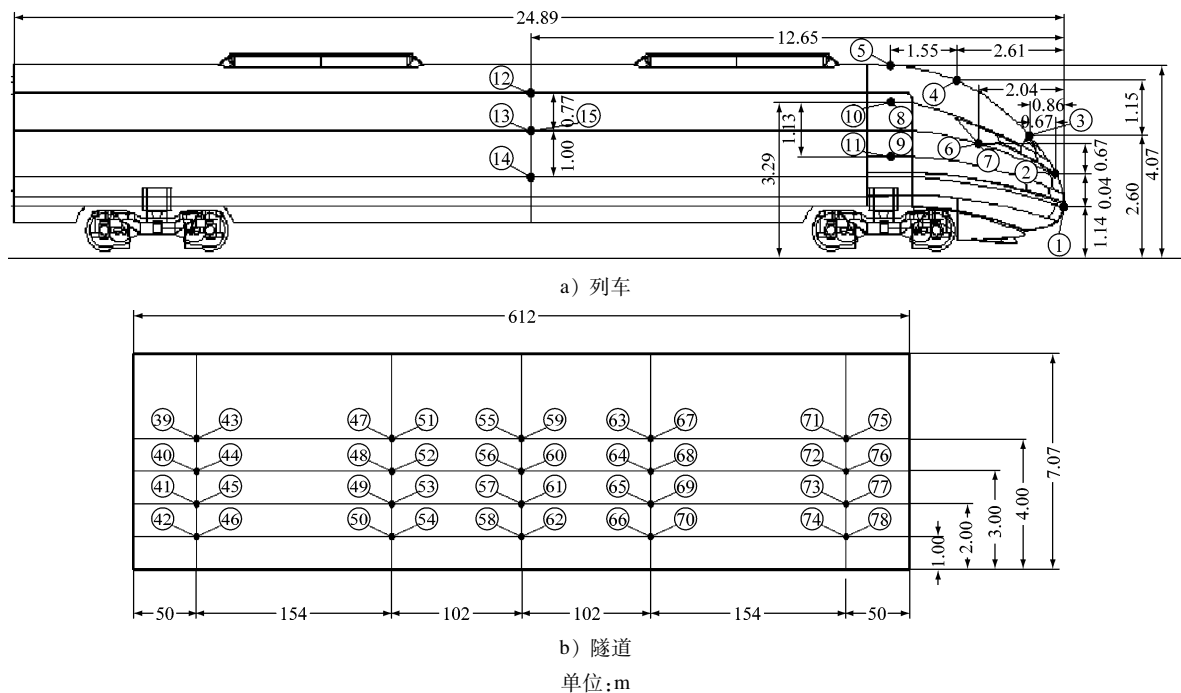
## 2 计算结果分析

### 2.1 算法验证

采用动模型试验获得的数据对数值计算方法

展开验证。动模型试验采用与真实列车缩比为1:16.8的列车模型,模型隧道长度为50 m,对应于840 m的实际隧道长度。基于3节编组列车模型(头车-中间车-尾车)及截面积为39 m<sup>2</sup>的隧道开展动模型试验,试验列车运行速度为160 km/h。动模型试验列车及隧道模型照片如图7所示。

不同测点处,列车及隧道表面压力的数值计算结果和动模型试验结果对比,如图8所示。列车车体表面压力和隧道壁面压力波形重合较好,两者幅值相差5.56%,可满足工程应用需求,验证了本次数值计算方法的有效性与准确性。



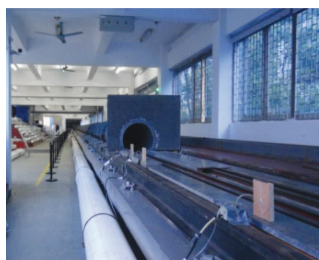
注:图中带圈数字表示测点编号。

图6 城际快速列车和隧道局部测点位置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the local measuring point positions on intercity high-speed trains and in the tunnels



a) 动模型列车



b) 动模型隧道

图7 动模型试验列车及隧道模型照片

Fig. 7 Photos of the dynamic model test train and the tunnel model

## 2.2 列车表面压力变化分析

假设城际快速列车分别以不同运行速度(160 km/h、200 km/h 和 220 km/h)在双线隧道中部交会时,列车表面的最大压力幅值(排除车头、车尾鼻尖位置1~7号测点),如表2所示(最大压力测点位置略有差异)。

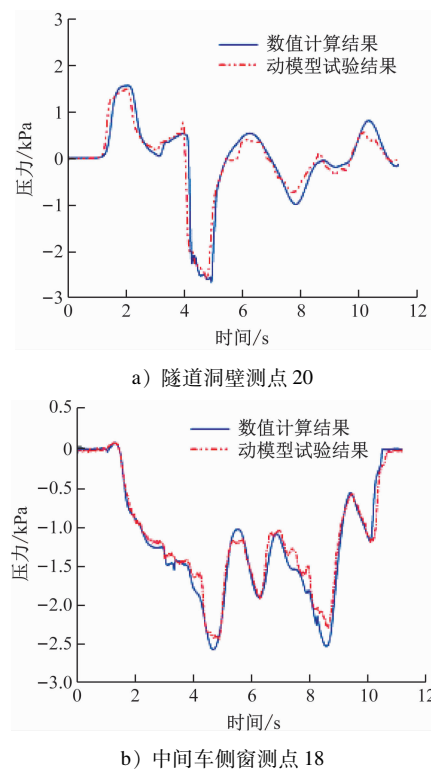


图8 不同测点处列车及隧道表面压力的数值计算结果和动模型试验结果对比

Fig. 8 Comparison between the numerical calculation results and dynamic model test results of the surface pressures of the train and the tunnel at different measuring points

表2 列车表面最大压力幅值

Tab.2 Maximum pressure amplitude on the train surface

列车运行速度/ (km/h)	最大压力幅值/Pa			测点位置
	正压幅值	负压幅值	峰峰值	
160	809	-1 118	1 927	头车测点 13
200	1 246	-1 774	3 020	尾车测点 13
220	1 784	-2 075	3 859	头车测点 1

城际快速列车在双线隧道内以不同运行速度交会时,车体表面压力(不考虑车头、车尾鼻尖位置测点)均小于车体气密载荷强度  $\pm 4\ 000\text{ Pa}$ 。中间各车测点压力峰值、幅值沿着列车长度方向有逐渐减小的趋势,尾车位置测点的压力波峰值和幅值相对较小。车体表面交会侧和非交会侧的测点压力幅值相差不大。随着列车运行速度的提升,列车表面的测点压力变化峰值和幅值逐渐增大。

### 2.3 隧道壁面测点压力分析

假设城际快速列车分别以不同运行速度(160 km/h、200 km/h 和 220 km/h)在双线隧道中部交会时,隧道壁面的最大压力幅值,如表3所示。隧道壁面测点压力在隧道长度方向上的变化曲线,如图9所示。

表3 隧道壁面最大压力幅值

Tab.3 Maximum pressure amplitude on the tunnel wall

列车运行速度/(km/h)	最大压力/Pa	测点位置
160	3 113	测点 59
200	3 319	测点 59
220	4 131	测点 59

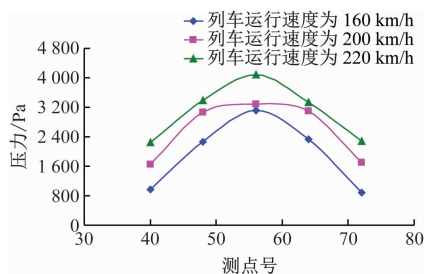


图9 隧道壁面测点压力在隧道长度方向上的变化曲线

Fig.9 Variation curves of the pressure at the measuring points on tunnel wall along the longitudinal direction of the tunnel

城际快速列车在隧道中部等速交会时,靠近隧道洞口处的测点压力变化峰值和幅值最小,隧道壁面测点压力变化幅值基本沿隧道中部呈对称分布。城际快速列车在双线隧道内以不同运行速度交会

时,隧道壁面最大压力幅值分别为 3 113 Pa、3 319 Pa 和 4 131 Pa,均出现在隧道进口 59 号测点位置处。随着列车运行速度的提升,隧道壁面测点压力变化峰值和幅值均逐渐增大。

### 2.4 隧道交会列车气动力分析

城际快速列车在隧道内以不同运行速度交会时,各车所受横向力变化幅值与列车运行速度的关系曲线,如图10所示。列车在隧道内交会时,各车所受横向力随时间的变化规律一致,但其峰值和幅值大小略有不同。头车横向力峰值和幅值最大,尾车次之,中间各节车相差不大。随着交会时列车运行速度的增加,各节车所受横向力幅值随之增大,列车所受横向力幅值与交会时列车运行速度的平方成正比。

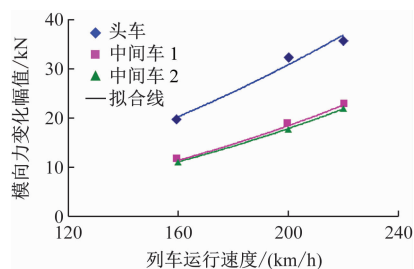


图10 交会时各车所受横向力变化幅值与列车运行速度的关系曲线

Fig.10 Relationship curves between the lateral force variation amplitude on meeting train during and the trains operating speed

### 2.5 车厢内压力变化分析

通过数值仿真计算获取车外压力变化值,再基于列车密封性能,可推算出车内最大压力变化幅值。假设列车车内的压力变化率和列车内外压差成正比关系,则有:

$$\frac{dp_i}{dt} = -\frac{1}{\tau}(p_i - p_e) \quad (1)$$

式中:

$p_i$ ——列车内部压力;

$t$ ——降压时间;

$p_e$ ——列车外部压力;

$\tau$ ——列车气密指数,可通过列车的气密性试验获得。

设  $\gamma = p_i - p_e$ ,则列车密封指数  $\tau$  可以表示为:

$$\tau = \frac{t}{\ln(\gamma_f/\gamma_0)} \quad (2)$$

式中:

$\gamma_f$ ——终止时刻压力差;

$\gamma_0$ ——起始时刻压力差。

列车静态气密指数可通过静态气密性试验获得。按照 UIC R 779-11:2005 *Determination of railway tunnel cross-sectional areas on the basis of aerodynamic considerations* 标准要求,列车动态气密指数一般为列车静态气密指数的  $1/3 \sim 1/2$ ,本项计算中取为  $1/3$ 。由此可推算出,列车动态气密指数设计值为 6 s,进而可以评估旅客乘坐气动舒适性。不同动态气密指数及列车运行速度下,车内 1 s 及 3 s 压力变化幅值,如表 4 所示。

表 4 不同动态气密指数及列车运行速度下车内 1 s 及 3 s 压力变化幅值

Tab. 4 Pressure change amplitude within 1 second and 3 seconds inside the train under different dynamic airtight indices and train operating speeds

动态气密 指数/s	$v = 160 \text{ km/h}$ 时 车内压力变化 幅值/Pa		$v = 200 \text{ km/h}$ 时 车内压力变化 幅值/Pa		$v = 220 \text{ km/h}$ 时 车内压力变化 幅值/Pa	
	1 s 内		1 s 内		1 s 内	
	3 s 内	3 s 内	3 s 内	3 s 内	3 s 内	3 s 内
6	159	287	187	396	209	429
7	139	255	169	356	184	394
8	123	228	155	325	166	365
9	111	208	143	301	150	340

当列车动态气密指数为 6 s 时,城际快速列车以不同运行速度  $v$  (160 km/h、200 km/h 和 220 km/h) 在隧道内交会时,车内 1 s 压力变化幅值分别为 159 Pa、187 Pa 和 209 Pa,车内 3 s 压力变化幅值分别为 287 Pa、396 Pa 和 429 Pa,能满足车内 1 s 瞬变压力变化小于 500 Pa,以及车内 3 s 瞬变压力变化小于 800 Pa 的旅客乘坐舒适性要求。列车车厢内的压力变化峰值、幅值及车内 3 s 压力变化率均随着动态气密指数的增大而降低。

### 3 结语

本文基于城际快速列车开展隧道交会空气动力学仿真分析,研究车体表面压力、隧道表面压力、列车气动力和车内压力波动情况,全面研究城际快速列车空气动力学性能和乘坐舒适性。主要获得以下结论:

1) 城际快速列车的车体表面压力(除车头、车尾鼻尖位置)均不大于车体气密载荷强度  $\pm 4\,000 \text{ Pa}$ 。中间各车测点压力幅值沿着列车长度方向逐

渐减小,尾车位置测点的压力波峰值和幅值相对较小。车体表面交会侧和非交会侧测点压力幅值相差不大。随着列车运行速度的提高,列车表面的测点压力变化峰值和幅值明显增大。

2) 城际快速列车在隧道中部等速交会时,靠近隧道洞口处的测点压力变化峰值和幅值最小;隧道壁面测点压力变化幅值基本沿隧道中部呈对称分布。随着列车运行速度的提升,隧道壁面测点压力变化峰值和幅值逐渐增大。

3) 城际快速列车在隧道中部等速交会时,各节车辆所受横向力随时间变化规律一致,但其峰值和幅值大小有所不同:头车横向力峰值和幅值最大,尾车次之,中间各节车辆相差不大;随着交会时列车运行速度的增加,各节车辆所受横向力幅值随之增大,列车所受横向力幅值与交会时列车运行速度的平方成正比。

4) 当城际快速列车动态气密指数为 6 s 时,以不同列车运行速度在隧道内交会时,能满足车内 1 s 瞬变压力变化小于 500 Pa,以及车内 3 s 瞬变压力变化小于 800 Pa 的旅客乘坐舒适性要求。列车车厢内的压力变化峰值、幅值及车内 3 s 压力变化率均随着动态气密指数的增大而降低。

### 参考文献

- [1] 李智基. 城际铁路到发线有效长度优化方案研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(7): 93.  
LI Zhiji. Study on the optimization scheme for the effective length of arrival-departure track for intercity railway[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(7): 93.
- [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] 李俊哲. 市域(郊)铁路停车线设置间距研究[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(6): 108.  
LI Junzhe. Spacing of a suburban railway parking line[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(6): 108.
- [4] 常卫平, 刘剑. 城际与地铁贯通运营及车站改造研究[J]. 山西建筑, 2022, 48(20): 127.  
CHANG Weiping, LIU Jian. Study on intercity-metro link operation and station renovation[J]. Shanxi Architecture, 2022, 48(20): 127.

(下转第 92 页)

计可提高结构稳定性,减少对轨道交通桥梁周围环境的变形影响。

## 参考文献

- [1] 李恒一,王志杰,何晟亚,等. 地铁基坑下穿铁路桥的桥墩保护设计方案合理性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(7): 180.  
LI Hengyi, WANG Zhijie, HE Shengya, et al. Rationality study on pier protection and design scheme of metro foundation pit under-crossing railway bridge[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(7): 180.
- [2] 张永涛,杨钊,李德杰,等. 桥梁大型沉井基础建造技术发展展望[J]. 桥梁建设, 2023, 53(2): 17.  
ZHANG Yongtao, YANG Zhao, LI Dejie, et al. Developments and prospects of large bridge open caisson foundation construction technology[J]. Bridge Construction, 2023, 53(2): 17.
- [3] LAI F, ZHANG N, LIU S, et al. Ground movements induced by installation of twin large diameter deeply-buried caissons: 3D numerical modeling[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(9): 2933.
- [4] 邓友生,万昌中,闫卫玲,等. 大型圆形沉井结构应力及其周边沉降计算[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 502.  
DENG Yousheng, WAN Changzhong, YAN Weiling, et al. Stress of large cylindrical caisson structure and its adjacent settlement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 502.
- [5] LIU Y, ZHANG Q, LIU R, et al. Numerical simulation and field monitoring of deformation characteristics of TRD composite supporting structure for deep foundation pit in quaternary stratum: a case study in Qingdao[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(5): 2691.
- [6] 施洲,李佳奇,秦搏聪,等. 大型沉井基础初沉阶段受力特性及开裂控制[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(2): 9.  
SHI Zhou, LI Jiaqi, QIN Bocong, et al. Mechanical characteristics and cracking control of large caisson foundation in initial sinking stage[J]. China Railway Science, 2021, 42(2): 9.
- [7] 陕耀,肖蔚雄,马伟叁,等. 软土地区钢套管钻孔灌注桩施工对临近高速铁路基变形影响研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(7): 2372.  
SHAN Yao, XIAO Weixiong, MA Weisan, et al. Influence of developed Benoto piling on deformation of adjacent high-speed railway subgrade in soft soil area[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(7): 2372.
- 收稿日期:2024-09-10 修回日期:2024-10-10 出版日期:2025-05-10  
Received:2024-09-10 Revised:2024-10-10 Published:2025-05-10  
• 第一作者:陈伟,工程师,819634337@qq.com  
通信作者:曹占林,博士研究生,2210741@tongji.edu.cn  
• ©《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
- 
- (上接第 86 页)
- [5] 李文辉,刘堂红,周苗苗,等. 变截面隧道与典型缓冲结构气动效应缓解效果对比分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(5): 1572.  
LI Wenhui, LIU Tanghong, ZHOU Miaomiao, et al. Comparative analysis on aerodynamic mitigation effects between tunnels with variable cross-section and typical tunnel hoods[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(5): 1572.
- [6] 尹小春,卢耀辉,赵宏星,等. 隧道工况下高速列车动态气密性数值分析方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2022, 43(5): 52.  
YIN Xiaochun, LU Yaohui, ZHAO Hongxing, et al. Numerical analysis method for dynamic air tightness value of high-speed train [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2022, 43(5): 52.
- [7] 熊小慧,耿语堂,董天韵,等. 隧道内高速列车与轨道附加板气动交互特性研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(5): 1930.  
XIONG Xiaohui, GENG Yutang, DONG Tianyun, et al. Study on aerodynamic interaction between high-speed train and track accessional panels in tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(5): 1930.
- [8] 马冰冰,王宗昌,周新喜,等. 动车组通过隧道车内外瞬变压力实车试验[J]. 中国高新技术, 2022(6): 86.  
MA Bingbing, WANG Zongchang, ZHOU Xinxi, et al. Real train test on transit pressure internal and external vehicle when high-speed train travels through tunnels[J]. China High-Tech, 2022(6): 86.
- [9] PARK J. Investigation of low damped carbody oscillation for Korean high-speed EMU experimental train[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2022, 236(1): 109.
- 收稿日期:2023-03-04 修回日期:2023-04-25 出版日期:2025-05-10  
Received:2023-03-04 Revised:2023-04-25 Published:2025-05-10  
• 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