



市域快速列车隧道运行气动特性 仿真与试验研究

陈希隽¹, 张宝珍², 郑玄¹, 林东阳¹, 陈三猛²

(1. 广州地铁集团有限公司, 广东 广州 510220;

2. 中车株洲电力机车有限公司 产品研发中心, 湖南 株洲 412001)

摘要: 针对城市化进程中市域快速列车全隧道运行面临的空气动力学挑战, 文章聚焦列车穿越隧道时诱发的瞬态压力波动及隧道出口微气压波问题, 通过揭示复杂流场下的气动载荷分布规律, 构建了兼顾乘客乘坐舒适性与环境噪声控制要求的技术指标体系。综合运用基于多物理场数值模拟、列车空气动力学动模型试验系统以及实车动态测试, 系统开展了隧道内的气动性能仿真与试验研究。研究结果表明, 车体表面压力幅值与运行速度的2.0~2.2次方呈正相关, 其最大(正/负)压力峰值均低于车体疲劳强度阈值4 000 Pa。隧道壁面压力峰值位置相对固定, 同一截面压力波动一致性高达95%。隧道出口微气压波幅值随速度呈幂函数增长, 在研究工况下均低于环境噪声控制阈值。当列车动态气密指数为6 s时, 车内压力波动可满足舒适性要求, 具体表现为: 1 s内压力变化不超过296 Pa, 3 s内不超过645 Pa。研究结果表明, 在全隧道运行环境下, 市域快速列车的空气动力学性能可满足乘坐舒适性和环境噪声污染控制的要求, 为全隧道市域快速列车的优化设计与安全运营提供了可靠的科学依据。

关键词: 市域快速列车; 隧道; 空气动力学; 动模型试验; 气动力; 仿真

中图分类号: U266.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)02-0089-07

0 引言

随着城市化进程不断加速, 城市带、城市群的形成使人们的出行频率不断提高, 同时对出行效率的要求也越来越高, 急需“大运量、高速度”的出行方式及工具^[1-2]。市域快速列车是中心城和新城以及新城之间运行的公交化、大运量、高速度的快运列车, 能完美契合城市化进程中人们对出行的需求^[3-4]。市域快速列车在隧道运行时, 流动的空气受到隧道四周壁面的限制而受到压缩, 压缩波沿着列车前行方向传播, 隧道内的空气将产生瞬间压力变化, 并在隧道出口处发出强烈的空气爆破音, 影响旅客乘坐舒适性, 同时会引发附近建筑振动产生一系列环保问题^[5-6]。国内外对此问题通过数值计算和试验对列车气动性能和运行稳

定性进行了相关研究^[7-9]。文献[10]对变截面隧道内的空气动力学性能开展了数值分析研究, 分析了隧道截面减小率对马赫波传播的影响规律。文献[11]基于数值仿真分析与动模型试验, 研究了双线隧道中间位置孔洞的形状与尺寸对车外压力波动和安全门受力的影响。文献[12]基于数值仿真方法, 分析了动车组通过变截面隧道时的车外压力变化规律, 并运用动模型试验平台对该结论进行了试验验证。现有文献多围绕变截面隧道、双线隧道孔洞等特定场景展开研究, 针对全隧道环境下速度160 km/h市域快速列车的气动特性及隧道出口微气压波传播规律的研究尚不充分。本文以此为切入点, 通过数值仿真与动模型试验, 系统探究该速度等级下列车表面压力、隧道壁面压力及微气压波特征, 完善全隧道场景的气动性能研究体系。

通信作者: 陈希隽, 男, 正高级工程师, 主要从事城市轨道交通运营管理及技术研究; E-mail: chenxijun@gzmtr.com

引用格式: 陈希隽, 张宝珍, 郑玄, 等. 市域快速列车隧道运行气动特性仿真与试验研究[J]. 机车电传动, 2025(2): 89-95. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.010.

Citation: CHEN Xijun, ZHANG Baozhen, ZHEN Xuan, et al. Simulation and experimental study on aerodynamic characteristics of urban rapid trains in tunnel operation[J]. Electric drive for locomotives, 2025(2): 89-95. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.010.

1 数值仿真计算模型

1.1 数学模型

用于数值仿真计算的可压缩黏性流体，遵循质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒三大物理学基本规律，可根据其内在规律进行求解计算^[13]。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \tag{1}$$

式中： ρ 为空气密度； x_i 为列车三个方向流场的速度分量。

动量守恒方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \\ \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] \end{aligned} \tag{2}$$

式中： x_i 或 x_j 为 x 、 y 、 z 三个坐标分量； p 为压力； δ_{ij} 为克罗内克符号； μ 为空气动力黏度。

能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i \tau_{ij} \right) \tag{3}$$

式中： T 为热力学温度； E 为总能； K 为热传导系数。

1.2 数值计算模型

全隧道市域快速列车运行速度为160 km/h，采用8车编组进行数值模拟计算，列车总长度186 m、车宽3.3 m，如图1所示。

运营隧道采用盾构直径7.7 m的盾构机开凿，回填后隧道净空横截面积为39 m²，经过回填和衬套隧道壁



图1 数值计算列车模型

Fig. 1 Numerical calculation of train model

面后，隧道净空断面尺寸如图2所示。仿真计算采用的隧道长度根据标准EN 14067-5-2006-A1-2010“铁路应用 空气动力学 第5部分：隧道空气动力学要求与试验方法”计算得到列车不同速度下的最不利隧道长度。

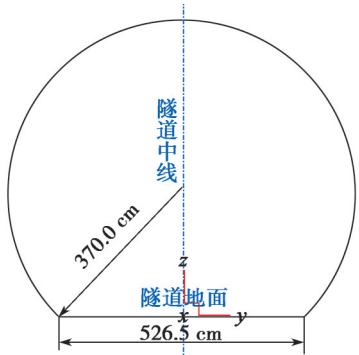


图2 39 m²单线隧道断面图

Fig. 2 Cross section of 39 m² single-line tunnel

1.3 数值计算区域

列车过隧道的计算空间区域示意如图3所示。为仿真列车隧道工况，选择列车头部距隧道进口50 m处为初始计算步，图3中，域1、域3为列车进入隧道之前的明线区域，域2为隧道区域。

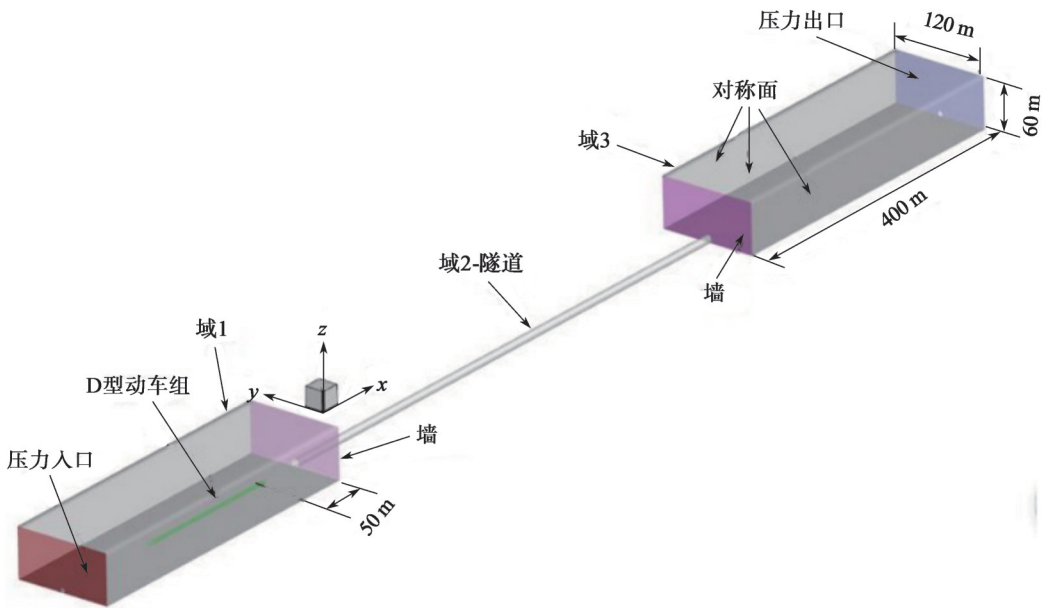


图3 列车过隧道计算空间区域

Fig. 3 Computational domain for train passing through tunnel

1.4 数值计算网格

由于列车与隧道之间存在相对运动, 计算空间区域运用分区对接网格方法, 地面与隧道采用六面体结构化网格进行离散, 列车外形采用四面体非结构化网格进行离散。两种网格之间的公共滑移界面用于数据交换, 其体离散网格总数均在4 000万以上, 如图4所示。

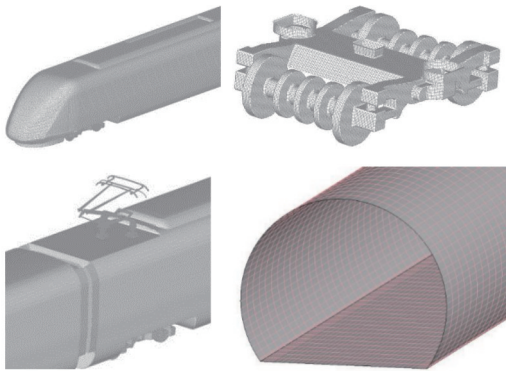


图4 主要位置网格离散图
Fig. 4 Discrete grid diagram of key positions

2 数值仿真计算

列车表面空气压力变化、隧道壁面空气压力变化、列车内压力变化等是评估列车隧道空气动力气动性能优劣的重要内容, 本文采用数值计算的方法, 对市域列车单车通过隧道的空气动力学性能进行研究, 为列车设计和制造提供科学依据。

2.1 列车表面压力变化规律

市域列车以不同速度经过39 m²单线隧道时, 列车表面最大压力及其出现的大致位置如表1所示(本文的空气压力均相对大气压而言)。列车以160 km/h速度运行时各车体中部位置压力随时间的变化曲线如图5所示。不同速度等级下头车中部位置的压力变化曲线如图6所示。

表1 列车表面最大压力幅值

Table 1 Maximum pressure amplitude on train surface

车速/ (km·h ⁻¹)	最大压力 负峰值/Pa	最大负压力 幅值点位置	最大压力 正峰值/Pa	最大正压力 幅值点位置
140	-2 406	尾车车门处	2 497	车头鼻尖处
160	-3 126	尾车司机室顶部	3 079	车头鼻尖处
180	-3 818	尾车车门处	3 840	车头鼻尖处
200	-4 604	尾车司机室顶部	4 619	车头鼻尖处

由表1可知, 列车表面压力峰值位置出现在车头鼻尖点, 此处受到的正压最大, 最大负压出现在尾车车门处和尾车司机室顶部位置, 该结论可为列车局部强

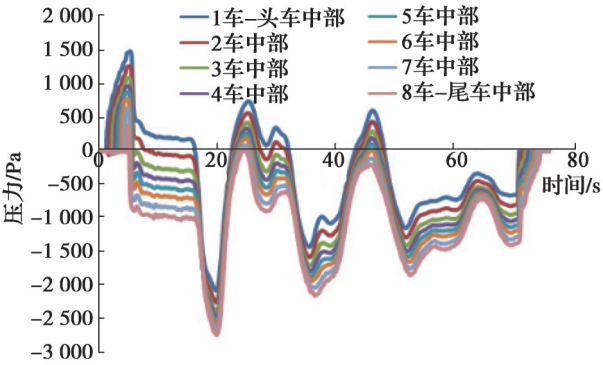


图5 车体中部外表面压力变化曲线
Fig. 5 Variation curve of pressure on outer surface of train body in the middle

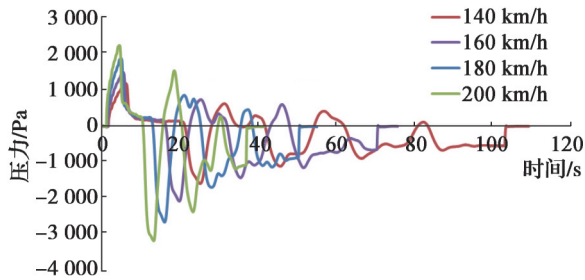


图6 头车中部外表面压力变化曲线
Fig. 6 Variation curve of pressure on outer surface of head car

度校核提供指导依据。由图5可知, 列车以160 km/h速度通过隧道的过程中, 车体表面受到的负峰值大于车体表面的正峰值, 且车体表面各处的压力变化规律大致相同。图6为不同速度下头车中部的压力变化时程曲线。从图6可看出, 列车运行速度越大, 车体表面压力峰值越大, 但车体外表面的压力变化规律大致相同。

2.2 隧道内壁面压力变化规律

列车以160 km/h通过隧道时, 隧道入口20 m处、隧道中部1 500 m处、隧道同一横截面不同高度的隧道壁面压力不随高度而变化, 压力变化规律几乎一致。列车以不同速度通过隧道时, 隧道壁面受到的最大负压和最大正压以及出现峰值点的位置距隧道入口的距离参数如表2所示。列车在最不利隧道长度条件下运行, 不同速度等级通过隧道引起的隧道壁面压力峰值大致处于相同的位置, 此规律可为隧道壁面的强度核算和设备安装提供指导依据。

表2 隧道壁面最大压力幅值与隧道入口的距离

Table 2 Maximum amplitude of pressure on tunnel wall and distance from tunnel entrance

车速/ (km·h ⁻¹)	负峰值/Pa	负峰值点 位置/m	正峰值/Pa	正峰值点 位置/m
140	-1 947	700	1 958	200
160	-2 692	700	2 481	200
180	-3 043	700	3 103	200
200	-4 074	700	3 725	200

2.3 车内压力变化规律

列车乘坐舒适性的主要衡量指标是车内压力波动，通过数值计算可得车外压力变化，而车外压力向车内

传递的压力幅值主要取决于列车的气密性。市域列车以不同速度通过最不利长度单线隧道时，不同动态气密指数下的车内最大压力变化幅值如表3所示。

表3 不同气密指数下车内1 s和3 s压力变化幅值

动态气密 指数/s	列车运行速度 140 km/h		列车运行速度 160 km/h		列车运行速度 180 km/h		列车运行速度 200 km/h	
	1 s 压力变化	3 s 压力变化	1 s 压力变化	3 s 压力变化	1 s 压力变化	3 s 压力变化	1 s 压力变化	3 s 压力变化
0	835	1 711	1 274	2 315	1 840	3 008	2 506	3 669
3	318	865	456	1 199	622	1 608	824	2 005
5	224	645	320	890	433	1 182	565	1 455
6	197	572	279	787	375	1 039	486	1 269
7	175	515	247	705	330	924	425	1 122
10	135	394	185	532	242	687	307	824

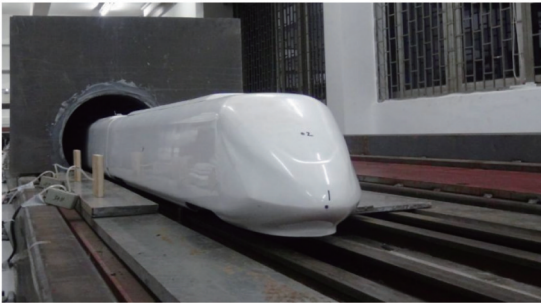
列车通过隧道时，根据国家铁路局发布的 GB/T 200 《高速电动车组整车试验规范》，满足人体舒适性要求时，车内压力瞬变幅值应小于 0.5 kPa/1 s 和 0.8 kPa/3 s。由表 3 可知，车速为 140 km/h 时，整车动态气密指数达到 5 s，车内压力波动能满足标准；车速为 160 km/h 时，整车动态气密指数达到 6 s，车内压力波动能满足标准，本项目能满足隧道内车内压力波动要求。

3 整车动模型试验研究

列车空气动力特性动模型试验系统能模拟列车和隧道、列车和地面之间的相对运动，克服了风洞试验装置不能模拟相对运动的缺点。本文采用该试验装置进行市域列车隧道空气效应动模型试验，对单列穿越隧道过程中的列车表面与隧道表面压力波传播规律、隧道洞口微气压波进行测试，为市域列车的设计和运营提供科学依据。

3.1 气动特性试验模型

动模型试验台主要由隧道、轨道和车辆模型组成，本次试验设计的列车模型缩比为 1:16.8，列车模型采用头车+中间车+尾车的三车编组形式，隧道截面积为 39 m²，缩小比例后的隧道长度为 50 m，如图 7 所示。



(a) 列车动模型



(b) 列车 39 m²单线隧道模型
图7 动模型试验平台

Fig. 7 Dynamic model test platform

3.2 列车表面压力变化规律

列车以不同速度在 39 m²的隧道内运行时，车体表面测点压力变化幅值最大值和单向压力极值统计如表4所示。车体表面测点压力随列车运行速度变化曲线如图8所示。

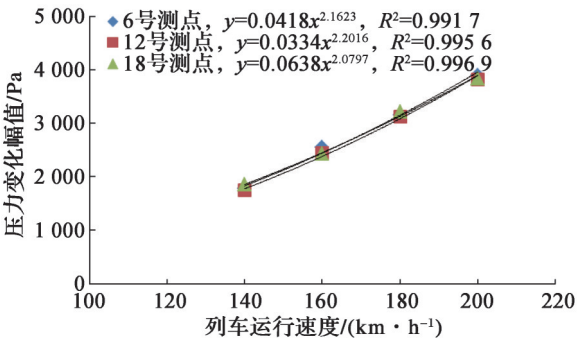


图8 车体表面测点压力随运行速度变化曲线

Fig. 8 Curve of pressure on car surface testing points varying with operation speed

随着动车组运行速度提高，动车组表面测点压力变化峰值和幅值随之增大，车体表面压力变化幅值近似与列车运行速度的2.0~2.2次方成正比。动车组分别以 140 km/h、160 km/h、180 km/h 和 200 km/h 单车通

表4 车体表面最大压力幅值和单向压力极值

测试参数速度	运行速度/(km·h ⁻¹)			
	140	160	180	200
压力幅值最大值	1 943	2 609	3 353	3 934
单向压力极值	-1 938	-2 508	-3 281	-3 750

过39 m²单线隧道时,车体表面最大单向压力极值分别为1 938 Pa、2 508 Pa、3 281 Pa和3 750 Pa,均小于车体疲劳强度指标4 000 Pa,能满足车体疲劳强度要求。

3.3 隧道表面压力变化规律

市域快速列车分别以不同速度通过断面积39 m²的隧道时,隧道壁面最大压力幅值如表5所示。列车以不同速度单车通过单线隧道时,隧道壁面测点压力对应距离隧道洞口距离的变化曲线如图9所示。

表5 隧道壁面最大压力幅值

车速/(km·h ⁻¹)	测点编号	隧道壁面最大压力幅值/Pa		
		正峰值	负峰值	峰峰值
140	4#	1 261	-1 259	2 520
160	8#	1 938	-2 158	4 096
180	9#	2 376	-2 459	4 835
200	9#	2 805	-3 309	6 114

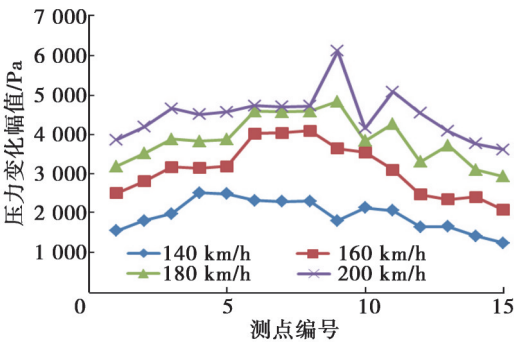


图9 隧道壁面测点压力沿距离隧道洞口距离的变化
Fig. 9 Pressure on tunnel wall testing points varying with distance from tunnel exits

由图9可知,靠近隧道洞口处测点压力变化峰值和幅值最小,随着动车组运行速度的提高,隧道壁面测点压力变化峰值和幅值增大,这一结论能指导隧道内安装附件进行适应性布置。

3.4 微气压波变化规律

市域列车以不同速度通过无附加结构的单线隧道时,距离隧道模型出口分别为0.595 m、1.190 m和2.976 m(对应实际隧道口距离为10 m、20 m和50 m)的3个测点微气压波幅值如表6所示。距离洞口不同位置测点微气压波幅值随速度变化曲线及微气压波幅值

随速度变化曲线如图10所示。

表6 单线过隧道时微气压波幅值

离隧道口 距离/m	列车运行速 度			
	140 km/h	160 km/h	180 km/h	200 km/h
0.595 (10 m)	14.0	22.4	30.5	41.6
1.190 (20 m)	7.2	12.3	15.6	19.5
2.976 (50 m)	3.8	5.2	6.3	7.7

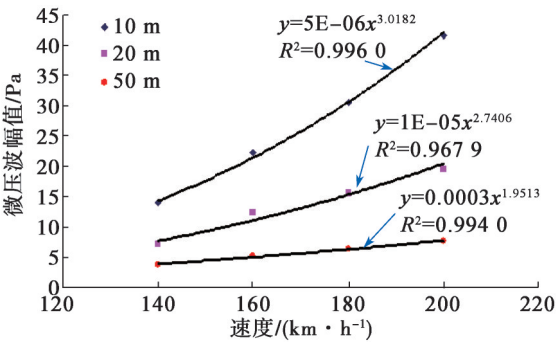


图10 微气压波幅值随速度变化曲线
Fig. 10 Amplitude of micro-pressure waves varying with operation speed

随着列车运行速度的提高,洞口微气压波幅值随之增大。距隧道出口10 m和20 m处微气压波幅值基本与车速的2.7~3.0次方成正比,距隧道出口50 m处微气压波幅值与车速的2.0次方成正比。洞口微气压波幅值随着距离洞口距离的增大而减小。当市域列车以不同速度通过单线隧道时,距隧道洞口20 m处的微压波幅值分别为7.2 Pa(140 km/h)、12.3 Pa(160 km/h)、15.6 Pa(180 km/h)和19.5 Pa(200 km/h),距隧道洞口50 m处的微气压波幅值分别为3.8 Pa(140 km/h)、5.2 Pa(160 km/h)、6.3 Pa(180 km/h)和7.7 Pa(200 km/h),微气压波幅值能满足相关标准要求,能有效缓解隧道出口的噪声污染。

4 整车试验验证

列车的空气动力学性能主要通过列车表面压力及车厢内部空气压力变化进行评估,采用基于整车动态线路试验,利用车载测试系统通过瞬态压力传感器测量列车单线运行(含隧道)时车厢内、外空气压力变化,对列车的空气动力学效应进行最终验证。根据列车运行时压力分布的特点,列车外部测点布置在司机室侧窗、变截面位置、司机室门边、车间风挡和中间车侧窗等位置。列车外部共布置12个测点,测点在车体两侧对称布置,车内共布置4个测点,测点位置如图11所示。

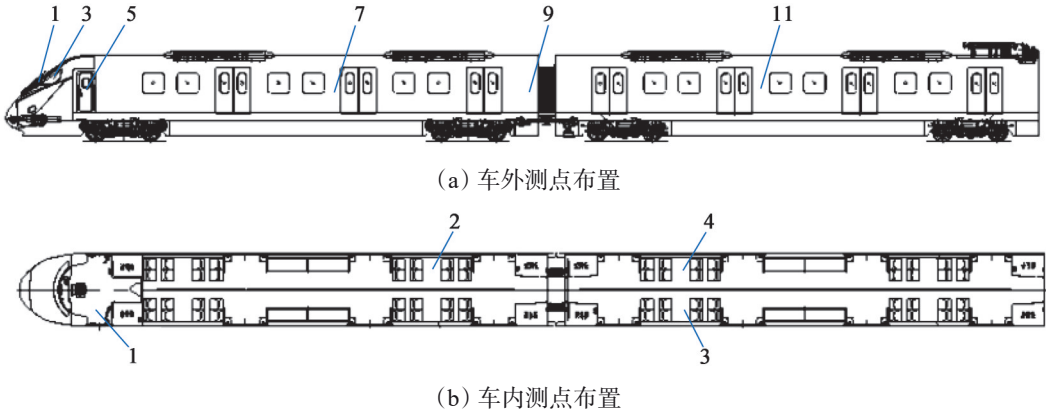


图 11 列车车内外压力测点布置

Fig. 11 Arrangement of pressure testing points inside and outside the train

在实际线路上进行空气动力学试验，其试验结果如表 7 所示。由表 7 可知，车内瞬变压力 1 s 最大值为 296 Pa，车内瞬变压力 3 s 最大值为 645 Pa，车内外压差最大值为 1 482 Pa。能满足列车最大车内外压差不大于 4 000 Pa、任意 1 s 内的最大压力变化不大于 500 Pa、任意 3 s 内的最大压力变化不大于 800 Pa 的要求，即能较好满足列车气密舒适性能以及车体气密强度的要求。

表 7 车内外压力试验结果

Table 7 Experimental results of pressure inside and

outside the train			Pa
列车速度/ (km·h ⁻¹)	车内瞬变压力最大值		车内外压差
	1 s	3 s	
120	272	481	868
140	296	645	1 178
160	282	521	1 482

5 结论

本研究以解决 160 km/h 市域快速列车全隧道运行时的瞬时压力波动与空气爆破音问题为核心目标，构建了“最不利隧道工况仿真-多物理场动态验证”的全流程研究体系。通过对列车表面压力、隧道壁面压力、车内压力波动及洞口微气压波的多维度分析得出结论如下：

① 列车表面压力幅值与速度的 2.0~2.2 次方呈正相关，头车鼻尖处承受最大正压，尾车司机室顶部为最大负压区域，该结果为车体结构疲劳强度设计提供了精准载荷参数（安全阈值为不大于 4 000 Pa）。

② 隧道壁面压力峰值位置不随列车速度改变（负峰值固定于距入口 700 m 处，正峰值位于 200 m 处），同一截面不同高度压力波动一致性达 95% 以上，为隧道衬砌强度校核及设备安装提供了空间定位依据。

③ 在舒适性与环保性能方面，车内压力波动满足相关要求（160 km/h 时气密指数不大于 6 s，1 s 压力变化在 296 Pa），距隧道出口 50 m 处微气压波幅值不大于

7.7 Pa，低于环境噪声敏感点控制阈值。

④ 研究构建的动模型试验系统，突破了传统风洞试验无法模拟列车-隧道相对运动的局限，将气动参数测量误差控制在±5% 以内，提升了研究结果的工程可信度。但该研究未涉及双线隧道列车交会时的气动耦合效应，后续将重点关注列车交会工况下的气动力耦合规律，引入隧道壁面真实粗糙度参数及附属结构模型，以完善市域列车全环境适应性设计理论。

参考文献：

[1] 施毓凤, 叶霞飞, 周勇. 市域轨道交通线衔接模式评价方法研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 939-943.
SHI Yufeng, YE Xiafei, ZHOU Yong. Evaluation method for connecting mode of regional rail transit[J]. Journal of Chongqing jiaotong university(natural sciences), 2012, 31 (5): 939-943.

[2] 王悦欣, 方恒堃. 市域快速轨道交通合理站间距研究[J]. 都市快轨道交通, 2018, 31(4): 16-20.
WANG Yuexin, FANG Hengkun. Study on rational distance between stations of rapid rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2018, 31(4): 16-20.

[3] 穆礼彬. 市域快速铁路综合效益评价研究[J]. 铁道运输与经济, 2011, 33(9): 1-5.
MU Libin. Research on the comprehensive benefit evaluation of urban rapid railways railway[J]. Railway transport and economy, 2011, 33(9): 1-5.

[4] 周宇冠. 关于市域快速轨道交通的思考[J]. 铁道标准设计, 2012(9): 22-27.
ZHOU Yuguan. Thinking about regional rail rapid transit[J]. Railway standard design, 2012(9): 22-27.

[5] 陶伟明, 吴剑, 史宪明. 复杂艰险山区高速铁路隧道群空气动力学效应及缓解措施[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(2): 80-86.
TAO Weiming, WU Jian, SHI Xianming. Aerodynamic effects and alleviative measures of high speed railway tunnel group in complex and dangerous mountainous regions[J].

- High speed railway technology, 2020, 11(2): 80-86.
- [6] 张志超, 杜健, 杜俊涛, 等. 速度 600 km/h 单列磁浮列车通过隧道时压力载荷特征研究[J]. 机车电传动, 2020(6): 15-19.
- ZHANG Zhichao, DU Jian, DU Juntao, et al. Research on pressure load characteristics of 600 km/h single maglev train passing through tunnel[J]. Electric drive for locomotives, 2020(6): 15-19.
- [7] 韦苏来, 徐红星. 减少市域列车滑行风险的措施分析与研究[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(增刊 1): 18-21.
- WEI Sulai, XU Hongxing. Analysis and research on the measures of reducing urban train slide risk[J]. Railway locomotive & car, 2019, 39(Suppl 1): 18-21.
- [8] 谢九勇. 金丽温铁路缙云至青田开行市域列车研究[J]. 铁道勘测与设计, 2020(3): 24-27.
- XIE Jiuyong. Research on the suburban train operation from jinyun to qingtian of Jinhua-Wenzhou railway[J]. Railway survey and design, 2020(3): 24-27.
- [9] 苏江. 120 km/h 地铁盾构隧道列车空气动力学效应数值模拟研究[J]. 城市建筑, 2016(35): 321-323.
- SU Jiang. Numerical simulation of train aerodynamic effect in 120 km/h metro shield tunnel[J]. Urbanism and Architecture, 2016(35): 321-323.
- [10] 杭恣. 高速铁路隧道设计参数对车-隧耦合气动效应的影响[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- HANG Min. On the study of effect of designed parameters of high-speed railway tunnels on aerodynamic effect of vehicle-tunnel coupling[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [11] 李文辉, 刘堂红, MARTINEZ-VAZQUEZ P, 等. 局部变截面铁路隧道的空气动力学效应[J]. 中南大学学报(英文版), 2022, 29(8): 2589-2604.
- LI Wenhui, LIU Tanghong, MARTINEZ-VAZQUEZ P, et al. Aerodynamic effects on a railway tunnel with partially changed cross-sectional area[J]. Journal of central south university, 2022, 29(8): 2589-2604.
- [12] HEINE D, EHRENFRIED K, KÜHNELT H, et al. Influence of the shape and size of cavities on pressure waves inside high-speed railway tunnels[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2019, 189: 258-265.
- [13] 任玉新, 陈海昕. 计算流体力学基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- REN Yuxin, CHEN Haixin. Computational fluid dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

Simulation and experimental study on aerodynamic characteristics of urban rapid trains in tunnel operation

CHEN Xijun¹, ZHANG Baozhen², ZHEN Xuan¹, LIN Dongyang¹, CHEN Sanmeng²

(1. Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510220, China; 2. Product Development Center, CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: This study addresses the aerodynamic challenges faced by urban rapid trains during full-tunnel operation, focusing on transient pressure fluctuations induced when trains pass through tunnels and micro-pressure waves at tunnel exits. By elucidating the distribution patterns of aerodynamic loads in complex flow fields, a technical index system was developed to harmonize passenger comfort and environmental noise control. A comprehensive approach integrating multi-physics numerical simulations, a dynamic model test system for train aerodynamics, and real-train dynamic testing was employed to conduct systematic aerodynamic performance simulations and experimental studies within tunnels. The findings indicate the following: a. The amplitude of pressure on the car body surface is positively correlated with the operating speed raised to the power 2.0-2.2, with the maximum pressure (positive/negative) peaks remaining below the train fatigue strength threshold of 4000 Pa. b. The positions of pressure peaks on the tunnel walls are relatively fixed, with a consistency of pressure fluctuations exceeding 95% at the same cross-section. c. When the train's dynamic airtightness index is 6 s, the pressure fluctuations inside the car can be effectively controlled to no more than 296 Pa within 1 s and no more than 645 Pa within 3 s, meeting passenger comfort requirements. d. The amplitude of micro-pressure waves increases with speed following a power function, all below the environmental noise sensitivity threshold under the study conditions. These findings validate that the aerodynamic performance of urban rapid trains in full-tunnel operation can reliably satisfy the requirements for passenger comfort and environmental noise control, providing a solid scientific basis for the optimal design and safe operation of full-tunnel urban rapid trains.

Keywords: urban rapid train; tunnel; aerodynamics; dynamic model test; aerodynamic force; simulation