

速度 160 km/h 列车通过隧道时 侧向气动力变化特征

贡晓东¹ 房明¹ 徐成州¹ 岳文志¹ 申少杰² 毕海权²

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司技术中心, 210031, 南京; 2. 西南交通大学机械学院, 610031, 成都)

摘要 [目的]我国某动车组以 160 km/h 的速度在明线运行时列车平稳性良好,但通过单线隧道时尾车出现周期性横向晃动的问题,需要对该动车组过隧道时列车气动特性进行深入研究。[方法]采用数值模拟方法,基于 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和滑移网格技术,建立了带有转向架的某动车组的三维可压缩瞬态仿真模型,研究了列车通过隧道时尾车表面压力变化情况;同时,在时域和频域内分析了列车侧向气动力特征的瞬态性质。[结果及结论]由于隧道壁面对空气流动的限制和列车尾绕流的作用,列车通过隧道时车体两侧存在压差并呈现出交替变化的特征,并且尾车侧向力交变特征更明显;列车所受侧向力具有低频周期性交变特点,主频约为 2.2 Hz,且在尾车刚进隧道时气动效应最强,侧向力波动幅度最大;列车侧向力变化值可作为车辆横向平稳性分析的边界条件。

关键词 动车组;尾车横向晃动;隧道;气动载荷;侧向力主频;尾涡脱落

中图分类号 U270.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.030

Characteristics of Lateral Aerodynamic Force Variation of 160 km/h Train Passing through Tunnels

BEN Xiaodong¹, FANG Ming¹, XU Chengzhou¹, YUE Wenzhi¹, SHEN Shaojie², BI Haiquan²

(1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China; 2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

Abstract [Objective] At a speed of 160 km/h, a certain EMU in China exhibits good stability when running on open tracks. However, when passing through single-track tunnels, the tail car experiences periodic lateral swaying issues. Thus, it is necessary to conduct an in-depth study on the aerodynamic characteristics of the train when passing through tunnels. [Method] Using numerical simulation methods, a three-dimensional compressible transient simulation model of a certain EMU with bogies is established based on the RNG $k-\varepsilon$ turbulent model and sliding mesh technology. The study fo-

cused on the variation surface pressure on the tail car when the train passes through tunnels. Simultaneously, the transient nature of the lateral aerodynamic force characteristics of the train is analyzed in both time and frequency domains. [Result & Conclusion] The research results indicate that due to the restriction of airflow by the tunnel walls and the effect of the train's wake flow, there exists a pressure difference on both sides of the train body with alternating characteristics when passing through tunnel. Furthermore, the alternation of lateral forces on the tail car is more pronounced. The lateral forces acting on the train exhibit low-frequency periodic alternation, with a main frequency of approximately 2.2 Hz. The aerodynamic effect is the strongest when the tail car just enters the tunnel, resulting in the largest fluctuation in lateral force amplitude. The variation in train lateral force can be used as a boundary condition for analyzing the vehicle lateral stability.

Key words bullet train; tail car lateral sway; tunnel; aerodynamic load; main frequency of lateral force; vortex shedding

我国某动车组在明线运行时平稳性良好,但其在经过隧道时尾车出现横向晃动、平稳性下降,甚至导致行车时触发列车平稳性报警的现象。相关研究认为尾车晃动是由列车在单线隧道内运行时列车尾旋涡脱落所产生的气动力导致^[1]。文献[2]对某 160 km/h 动车组在单线隧道内运行时列车尾横向晃动的问题,建立了相关的计算模型;提出了列车尾旋涡脱落引起车体涡激振动而导致列车尾横向晃动的机理。文献[3-4]表示列车进入单线隧道时,由于阻塞比大,入口效应明显,列车与空气的耦合作用变得更加强烈,同时会在列车尾形成许多旋涡,从而直接影响到列车行驶平稳性。文献[5]通过数值模拟的方式对二维和三维的头型做了研究,给出了不同头型下的空气阻力,并对该列车通过隧道时诱发的车体晃动进行了分析;同时研究了列车的受电弓、导流罩、裙板、转向架侧护板等部件

对车体气动力的影响规律。文献[6-7]利用延迟分离涡的数值方法模拟了 ICE2(德国国铁 402 号车组)缩尺模型的瞬态流场,并利用本征正交分解的方法,分析了尾流中流向涡对的涡街结构及 ICE2 尾涡结构的展向振荡主频。本文针对尾车横向晃动的问题,基于计算流体力学方法研究列车高速通过隧道时气动力的变化规律及尾车所受侧向力的频率变化特征。

1 几何模型

本文以某动车组为研究对象,列车模型采用 3 编组,其中头车和尾车均采用控制车建模,形状一致;中间车采用二等座车进行建模,模拟列车运行速度为 160 km/h。模型忽略了车灯、导流罩及受电弓等部件,列车底部保留简化的转向架模型。列车及隧道模型如图 1 所示。隧道按 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》,采用标准的单线隧道,隧道净空面积为 42.06 m²。

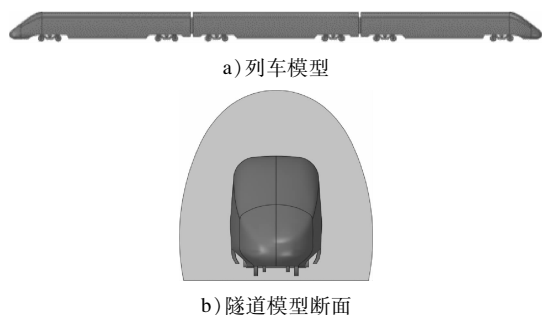


图 1 列车和隧道模型

Fig. 1 Train and tunnel models

2 数学模型

2.1 控制方程

列车在隧道内运行时,周围空气可视作三维、可压缩、非定常流动,本文结合 RNG $k-\varepsilon$ (两方程湍流)模型进行模拟计算,其控制方程的运输方程^[8]形式为:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}[\rho(u - u_i)\varphi] = \text{div}(\Gamma \text{grad } \varphi) + S$$

式中:

t ——列车运行时间;

ρ ——空气密度;

φ ——流场通量;

u ——流场速度矢量;

u_i ——列车运动速度矢量;

Γ ——扩散系数;

S ——源项。

2.2 计算模型及边界条件

本文采用滑移网格法以实现列车的运动,取头车鼻尖初始位置与隧道入口距离为 60 m,最不利隧道长度取 500 m。计算域尺寸及边界条件如图 2 所示:隧道入口和出口的计算域尺寸均为 80 m(宽)×220 m(长)×45 m(高);地面、隧道壁面、隧道出入口壁面以及列车表面均设置为无滑移壁面;大气边界条件均设置为压力出口。

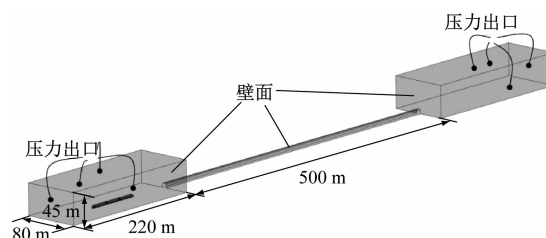
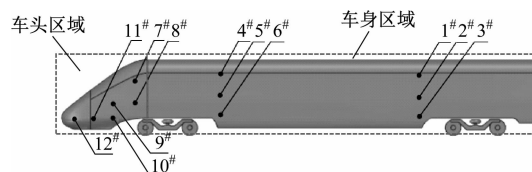


图 2 计算域示意图

Fig. 2 Diagram of calculation domain

2.3 测点布置

尾车单侧表面压力测点布置如图 3 所示:两区域均布置 6 个测点;同时,在尾车另外一侧的相应位置布置对称测点,尾车共计布置了 24 个测点。



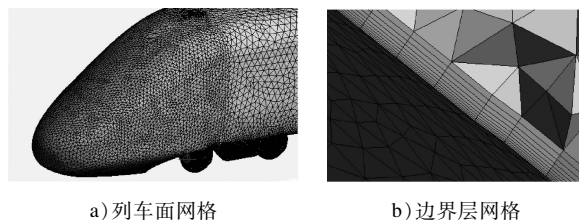
注:1#—12#为压力测点位置。

图 3 尾车表面压力测点布置示意图

Fig. 3 Layout diagram of pressure monitoring points on tail car outer surface

2.4 网格无关性及数值方法验证

图 4 为列车面网格和边界层网格。将列车表面的第 1 层网格高度设为 0.001 m,并按比率 1.2 扩展,其计算模型的总网格数为 1 780 万个。



a) 列车面网格

b) 边界层网格

图 4 列车面网格和边界层网格

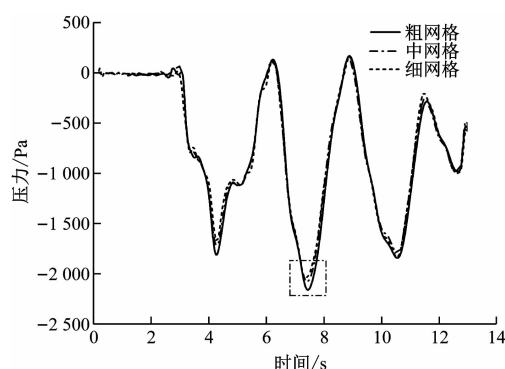
Fig. 4 Train surface mesh and boundary layer mesh

采用3种不同尺寸的边界层网格进行网格无关性验证。不同网格尺寸如表1所示。图5为不同网格尺度下1[#]测点压力变化对比。由图5可知:中网格和细网格之间误差很小,压力峰值的最大误差不超过1.6%,而粗网格与中网格之间的误差相对更大。综合考虑计算效率与计算精度,本文选用中网格进行模拟计算。

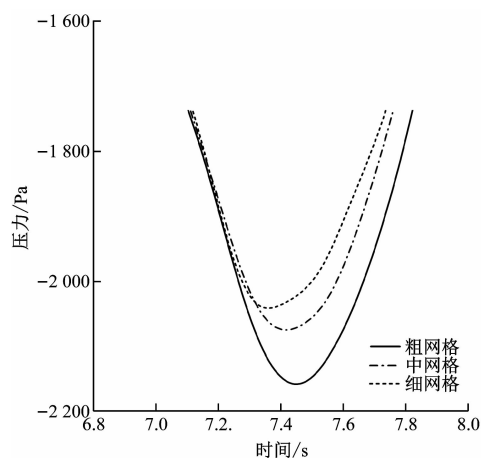
表1 不同网格尺寸

Tab.1 Different mesh scales

项目	第1层高度/m	加密区尺寸/m	单元数量/万个
粗网格	0.002 0	0.22	1 590
中网格	0.001 0	0.20	1 780
细网格	0.000 8	0.18	1 912



a) 压力变化对比



b) 压力变化局部放大图

图5 不同网格尺度下1[#]测点压力变化对比Fig. 5 Comparison of pressure changes at 1[#] monitoring point under different mesh scales

本文采用同样有尾涡交替脱落现象,并且具有交变气动力的圆柱绕流进行数值计算方法验证。表2分别对比了平均阻力系数 $C_{d,mean}$ 与能表征旋涡脱落特征频率的斯特劳哈尔数 Sr 。由表2可知:本文计算的 Sr 值与前人的结果误差很小。这证明本

文所采用的数值计算方法,能准确地模拟钝体绕流中周期性的旋涡脱落。

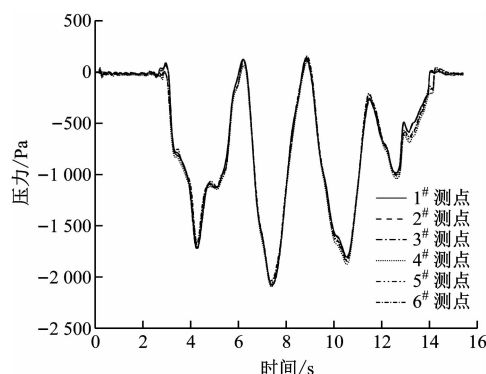
表2 $Re = 200$ 时圆柱绕流的阻力系数和斯特劳哈尔数Tab.2 Resistance coefficient and Strouhal number of flow around cylinder at $Re = 200$

项目	$C_{d,mean}$	Sr
文献[9]	1.320	0.198
文献[10]	1.320	0.196
本文	1.330	0.198

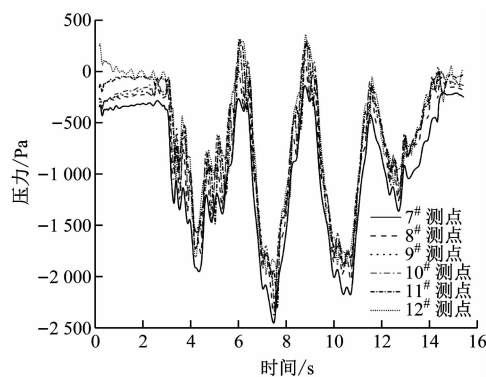
3 尾车气动特征

3.1 表面压力变化特征

尾车同侧压力变化如图6所示。其中,图6a)是客室同侧测点压力变化对比;尾车在3.2 s开始进入隧道,进隧道前各测点没有压力波动,测点压力几乎为零;进入隧道后,由于车尾进入隧道产生的膨胀波传播至客室表面导致测点压强开始下降,且压力波在隧道内不断反射和传播,导致测点压力持续剧烈波动,隧道内运行时客室区域基本处于负压;尾车在14 s左右离开隧道后,压力波影响消失,



a) 客室区域同侧测点压力变化



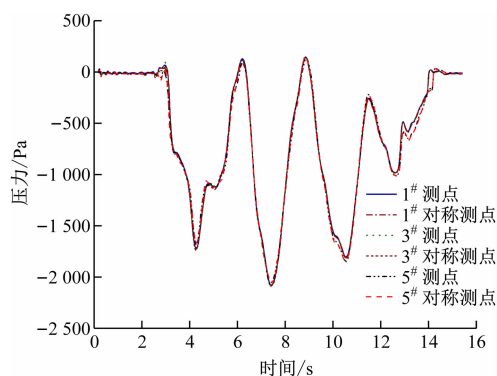
b) 司机室区域同侧测点压力变化

图6 尾车同侧压力变化

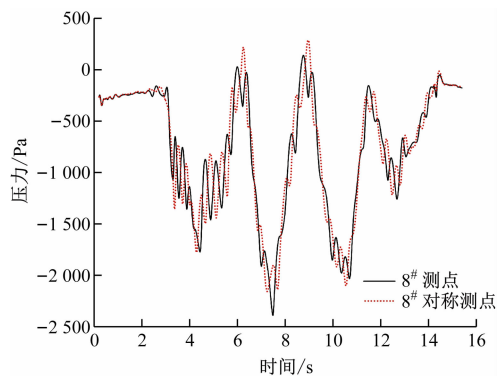
Fig. 6 Pressure change on the same side of tail car

各测点压力波动消失,测点压力恢复为零,由于各测点压力变化主要受压力波影响,且压力波在隧道内以平面波的形式传播,所以同一时刻压力波传播至客室不同测点所引起的压力波动是一致的,即客室不同测点之间几乎没有压差、客室侧面压力分布较为均匀。图 6 b) 是尾车司机室同侧测点压力对比:与客室测点(1[#]—6[#])压力相比,由于受到压力波影响,司机室区域测点压力变化趋势同客室区域测点变化趋势一致;司机室区域测点受列车隧道内运行时列车尾涡流的影响,其压力变化曲线会出现局部波动;同一时刻各个测点间存在明显的压差,并且负压幅值更大,这表明尾车司机室区域存在不同的压力梯度,尾车司机室表面压力分布并不均匀。

图 7 为尾车对称位置压力变化。由图 7 可知:图 7 a) 为尾车客室区域 1[#]、3[#]、5[#]测点与其对称测点的压力对比,图 7 b) 为尾车司机室区域 8[#]测点与其对称测点压力对比。尾车车外瞬变压力主要受压力波影响,因此相互对称位置的压力波动规律基本一致,但始终存在一定压差,且压差呈现交替变化的特征。这是由于列车尾部空气旋涡脱落时会造成



a) 客室两侧测点压力变化



b) 司机室 8[#] 与其对称测点压力变化

图 7 尾车对称位置压力变化

Fig. 7 Pressure change in the symmetrical position of tail car

局部压力波动,当一侧旋涡脱落,该侧压力减小,与对称位置产生压差。由此可知,尾车司机室区域的瞬变压力除受压力波的影响外,还受列车尾涡脱落的影响;当尾车两侧空气旋涡交替脱落时,对称位置间就会产生交变压差,导致尾车通过隧道时受到瞬变的侧向力。

3.2 气动力变化特征

由于列车隧道通行时,尾车横向晃动风险最大,因此需重点分析尾车的侧向气动力。列车不同区域侧向力的时程曲线如图 8 所示。由图 8 可知:头车和中间车的侧向力较小,尾车侧向力较大且变化剧烈,侧向力最大幅值为 4 112 N,尾车在隧道内运行过程中侧向力幅值整体呈现出逐渐衰减的趋势,尾车离开隧道后侧向力基本消失。同时,发现尾车主要侧向力集中于司机室区域,而客室区域所受侧向力较小,这与测点压力分析结果一致。

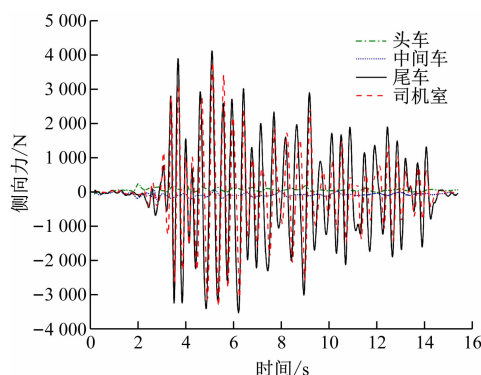


图 8 列车侧向力变化

Fig. 8 Change of lateral force on train

当列车尾空气旋涡周期性交替脱落时,在旋涡刚脱落的司机室一侧,其侧面空气流速要低于另外一侧。根据伯努利原理,空气流速高的一侧其压强更低,致使司机室旋涡脱落的一侧总压力更大。因此,尾车总是受到一个指向未脱落空气旋涡一侧的作用力,且侧向力交变频率与涡脱频率相同。尾车侧向力-频率曲线如图 9 所示,其侧向力的频率范围主要是 1.0 ~ 4.0 Hz,且存在一个单值主频 2.2 Hz,说明侧向气动力对车辆的作用主频率与列车尾空气旋涡脱落频率为 2.2 Hz。

4 结语

本文采用三维动网格数值计算方法,研究了 3 车编组模型列车通过隧道时尾车气动特性及侧向力变化特征规律,得出如下结论:

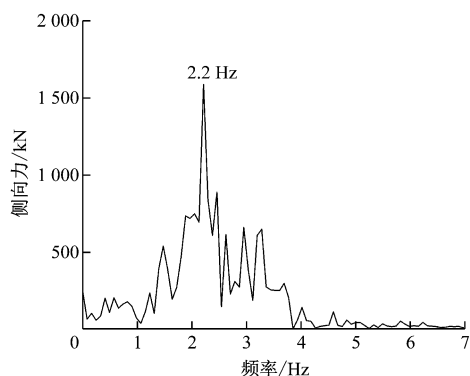


图9 尾车侧向力-频率曲线

Fig. 9 Lateral force to frequency curve of tail car

1) 当列车通过隧道时,尾车客室车身两侧压力对称分布,司机室受尾涡流动影响,司机室两侧压力不再对称,并且交替脱落的旋涡会使司机室对称位置产生交变压差。

2) 列车通过隧道时,头车和中间车侧向力较小,而尾车司机室受交替脱落空气旋涡影响,总是受到1个指向未脱落旋涡一侧的作用力。列车在速度为160 km/h的条件下,尾车所受侧向力的极值为+4 112 N和-3 495 N。

3) 列车以速度160 km/h通过隧道时,尾车所受侧向力为低频作用力,该频率由尾涡脱落特征频率决定,频率集中在1.0~4.0 Hz,且存在一个2.2 Hz的主频。

参考文献

- [1] 机车车辆研究所. 时速160公里动力集中电动车组(鼓形车体)过隧道尾车晃车问题分析报告[R]. 北京:中国铁道科学研究院集团有限公司,2020.
Locomotive and Car Research Institute. The lateral sway of the train tail car of the 160 km/h power centralized EMU (drum-shaped car body) passing through the tunnel[R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., 2020.
- [2] 姚远,许振飞,宋亚东,等. 基于涡激振动的动车组隧道内列车尾横向晃动机理[J]. 交通运输工程学报,2021,21(5): 114.
YAO Yuan, XU Zhenfei, SONG Yadong, et al. Mechanism of train tail lateral sway of EMUs in tunnel based on vortex-induced

- vibration[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(5): 114.
- [3] 马伟斌,张千里,刘艳青. 中国高速铁路隧道气动效应研究进展[J]. 交通运输工程学报,2012,12(4): 25.
MA Weibin, ZHANG Qianli, LIU Yanqing. Study evolvement of high-speed railway tunnel aerodynamic effect in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(4): 25.
- [4] 肖京平,黄志祥,陈立. 高速列车空气动力学研究技术综述[J]. 力学与实践,2013,35(2): 1.
XIAO Jingping, HUANG Zhixiang, CHEN Li. Review of aerodynamic investigations for high speed train[J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(2): 1.
- [5] SUZUKI M, NAKADE K, IDO A. Countermeasures for reducing unsteady aerodynamic force acting on high-speed train in tunnel by use of modifications of train shapes[J]. Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, 2009, 2(1): 1.
- [6] MULDT W, EFRAIMSSON G, HENNINGSON D S. Wake characteristics of high-speed trains with different lengths[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2014, 228(4): 333.
- [7] MULDT W, EFRAIMSSON G, HENNINGSON D S. Flow structures around a high-speed train extracted using proper orthogonal decomposition and dynamic mode decomposition[J]. Computers & Fluids, 2012, 57: 87.
- [8] 徐世南,张继业,熊骏,等. 地铁列车通过隧道时的气动性能研究[J]. 城市轨道交通研究,2016,19(9): 99.
XU Shinan, ZHANG Jiye, XIONG Jun, et al. Aerodynamic performance of metro vehicle passing through tunnels[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(9): 99.
- [9] ZHANG J, DALTON C. A three-dimensional simulation of a steady approach flow past a circular cylinder at low Reynolds number[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1998, 26(9): 1003.
- [10] LAM K, GONG W Q, SO R M S. Numerical simulation of cross-flow around four cylinders in an in-line square configuration[J]. Journal of Fluids and Structures, 2008, 24(1): 34.

· 收稿日期:2022-09-02 修回日期:2022-12-20 出版日期:2024-05-10
Received:2022-09-02 Revised:2022-12-20 Published:2024-05-10
· 通信作者:贾晓东,正高级工程师,benxiaodong1986@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

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com