

高速列车通过最不利隧道气动阻力数值分析

卫梦杰¹, 刘峰^{1,2}, 邸娟³, 杨斯涵¹, 马健斌¹, 陈大伟²

(1. 太原理工大学机械与运载工程学院, 030024, 太原; 2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 山东青岛; 3. 太原科技大学车辆与交通工程学院, 030024, 太原)

摘要: 为了探明高速列车与最不利长度隧道耦合作用下列车气动阻力变化规律,以某动车组为计算模型,基于滑移网格技术和计算流体动力学(CFD)理论,采用 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型对最不利隧道内8辆编组单车穿越和双车等速交会时的气动效应进行了三维数值模拟,并结合遂渝线上二岩隧道实测数据对计算方法的可靠性进行了验证。结果表明:①列车所受气动阻力变化与列车头尾部的压差变化有直接关系,压差的升高和降低会引起阻力的增大和减小。②在隧道内以时速300 km单车穿越和双车交会过程中,整车最大气动阻力分别发生在列车入隧道后3.1 s和2.8 s时刻,阻力系数分别达到1.37和1.49,且此时头车阻力在整车中占比最大,分别为34.67%和36.57%。③当列车头头交会和头尾交会时,尾车阻力占比最大,分别为56.79%和37.33%;当列车尾尾交会时,头车阻力占比最大,为44.62%,而尾车阻力此时接近为0。④列车行驶速度提高会引起气动阻力迅速增大,当列车时速从250 km提升至400 km时,隧道内单车穿越和双车交会整车气动阻力平均值分别增大了132%和150%。研究结果可为车隧设计提供一定的参考。

关键词: 高速列车;最不利隧道;气动阻力;列车交会

中图分类号: U260 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/jtuxb202401016 **文章编号:** 0253-987X(2024)01-0167-11

Numerical Analysis of Aerodynamic Resistance for High-Speed Trains Passing Through the Most Unfavorable Tunnel

WEI Mengjie¹, LIU Feng^{1,2}, DI Juan³, YANG Sihan¹, MA Jianbin¹, CHEN Dawei²

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111, China; 3. School of Vehicle and Transportation Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: This study aims to analyze the variation in aerodynamic resistance of high-speed trains under the combined effect of train movement and unfavorable tunnel conditions. An EMU (electric multiple units) is chosen as the calculation model to investigate the aerodynamic effects using sliding grid technology and computational dynamics theory (CFD). The $k-\epsilon$ two-equation turbulence model is employed to simulate the aerodynamic behavior of eight different train configurations crossing and intersecting within the most unfavorable tunnel. The proposed calculation method is validated by comparing it with the measured data of the Eryan tunnel on Suiyu line. The findings

收稿日期: 2023-05-16。 作者简介: 卫梦杰(2000—),男,硕士生;刘峰(通信作者),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(52002265);中国博士后科学基金资助项目(2022M712930);山东省博士后创新项目(SDCX-ZG-202203079)。

网络出版时间: 2023-07-31

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1069.T.20230728.1752.004.html>

reveal several important insights: ① The aerodynamic resistance experienced by the train is directly influenced by the pressure difference between the train's head and tail. Changes in this pressure difference will cause corresponding variations in resistance. ② During single-train crossings and double-train intersections at 300 km/h in the tunnel, the maximum aerodynamic resistance occurs at 3.1 s and 2.8 s after the train enters the tunnel respectively. The resistance coefficients reach 1.37 and 1.49, and the head train contributes the largest proportion of resistance, accounting for 34.67% and 36.57% respectively. ③ In head-head and head-tail intersections, the resistance exerted by the tail of train is the highest, comprising 56.79% and 37.33%, respectively. Conversely, in tail-tail intersections, the head of the train experiences the most significant resistance (44.62%), while the tail's resistance ratio is close to 0. ④ As the train's speed increases, the aerodynamic resistance rises rapidly. For instance, when the train speed increases from 250 km/h to 400 km/h, the average aerodynamic resistance for single-train crossings and double-train intersections increases by 132% and 150%, respectively. These research outcomes offer valuable insights for the design and engineering considerations involved in train-tunnel configurations.

Keywords: high-speed train; most unfavorable tunnel; aerodynamic resistance; train intersecting

截至2022年底,我国铁路运营里程达到15.5万km,已有17 873座铁路隧道投入营业,总长度约为21 978 km^[1]。我国高速铁路技术发展迅猛,取得了全世界瞩目的伟大成就^[2-4]。随着列车速度的不断提高,车体受到的气动阻力会显著增大,致使列车行驶过程中克服阻力所消耗的能量也越来越高。根据研究表明,当列车时速为200 km时,车体受到的气动阻力约占总阻力的75%左右;列车时速为300 km时,气动阻力约占总阻力的85%左右^[5]。此外,在车隧耦合过程中,列车表面的气动效应变化相较于明线运行时更为剧烈,其诱发的空气动力学现象会对乘坐舒适性、列车车体强度及运行安全等产生不可估量影响^[6-9]。因此,研究气动阻力的来源及如何减小气动阻力,对进一步降低高速列车行驶能耗、提高我国铁路发展安全性和经济性有着重要意义^[10]。

针对列车运行时所受到的行驶阻力,国内外学者利用模型试验、实车试验和数值模拟等手段开展了相关研究。贾永兴等^[11]利用一维特征线法研究了高速列车通过长大隧道时的阻力变化机理,得到了隧道长度、阻塞比、列车速度及长度等参数对车体受到阻力的影响规律。王英学等^[12]基于大涡模拟(LES)紊流模型,分析了列车在明线上运行时的气动阻力特性,并给出了阻力系数预测公式。赵晶等^[13]利用移动网格技术,模拟了高速列车进入隧道过程,发现车体所受阻力的最大值与列车运行速度及阻塞比具有一定关系。杨志刚等^[14]利用计算流体力学及抽样试验设计方法,发现了列车底部结构

参数会影响车底空气流速,进而影响车体受到的气动阻力。杜俊涛等^[15]通过三维数值模拟方法,研究了46种不同外形的列车在明线上运行时所受气动阻力,得到了列车阻力与头部外形参数在数值上的映射关系。杨永刚等^[16]通过数值模拟方法,发现隧道内的压力波会对列车阻力产生直接影响。

综上所述,目前众多学者对列车通过最不利隧道工况下车体所受的气动阻力研究较少,而最不利隧道中压力波叠加引起的列车表面瞬态压力变化又最为严重^[17],因此研究最不利隧道下列车空气动力学问题是十分有必要的。同时当列车发生交会时,其诱发的压力波不仅具备单车压力波特性,而且具有两车相互交错通过时的压力波特性,致使其所带来的空气效应问题更为复杂^[18-19]。为此,本文以某动车组为计算模型,利用滑移网格方法,对列车在最不利隧道内穿越及交会两种工况进行了三维数值模拟,研究了两种工况下列车车体受到的气动阻力的变化规律,以期为高速列车设计及隧道建设提供一定的依据。

1 数值模拟

1.1 几何模型

本文采用的列车模型外形尺寸依照某高速列车1:1建立,为8节车厢编组形式,且头尾车外形一致。车身总长为212 m,宽度为3.15 m,高度为4 m。为了更真实地模拟车隧耦合作用引起的流场变化,列车保留了受电弓、转向架和风挡等基本附件,其中第二节车厢上装有降弓,第七节车厢上装有升弓。

单列车通过隧道工况下,隧道采用单线形式,净空面积为 70 m²;隧道内两车交会工况下,隧道为双线形式,净空面积为 100 m²。最不利隧道长度的选取参考 EN14067 标准^[20],其中单线隧道最不利长度及双线隧道最不利长度计算公式如下

$$L_{tu,sin} \approx \frac{L_{tr}}{4} \frac{c}{v} \left(1 + \frac{c}{v}\right) \tag{1}$$

$$L_{tu,dou} \approx \frac{c}{2} \left(\frac{L_{tr,A}}{v_A} + \frac{L_{tr,B}}{v_B}\right) \tag{2}$$

式中: L_{tr} 和 v 分别为列车长度和行驶速度;下标 A、B 分别代表交会过程中的两列车; c 为声速,取 340 m/s。当列车运行速度 v 为 300 km/h 时,对应的单线最不利隧道长度 $L_{tu,sin}$ 为 1 098 m,对应的双线最不利隧道长度 $L_{tu,dou}$ 为 866 m。

最不利长度隧道内单车穿越和两车交会时,列车与隧道的相对位置如图 1 所示。其中,隧道壁面上的测量点均布置在隧道中部,车体表面上的测点位于头尾部鼻尖处。

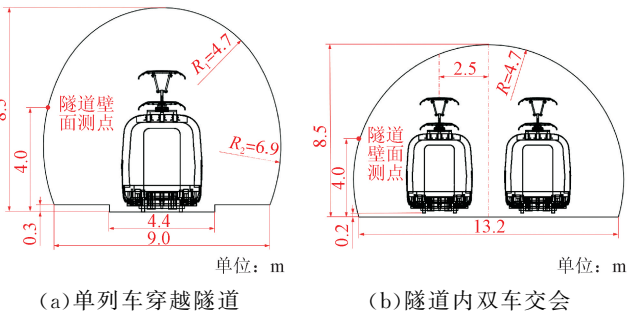


图 1 列车通过隧道断面图

Fig. 1 Cross-sectional view of the train through the tunnel

1.2 计算域及边界条件

在模拟列车与隧道的相对运动过程中,计算区域可以分为列车移动区域和隧道静止区域。通过滑移网格技术在二者相对运动区域设置网格公共滑移交界面,以实现区域间的数据信息交换。其中,计算主体区域由隧道内部场和隧道两端的外部场组成,两端外部场的左侧面和右侧面的边界条件分别为压力入口和压力出口,其余边界条件为壁面。依据所确定的列车组外形尺寸,外部场域的长度、宽度和高度分别设定为 500、120 和 60 m。此外,为了保证车隧耦合过程中流场充分发展,不被所设边界条件干扰,列车运动起点被赋在距隧道入口 50 m 处,计算开始时列车加速到设定速度进入隧道。隧道内两车交会工况下设置的计算区域如图 2 所示。列车通过单线隧道工况的计算域与之不同的地方仅在于列车 B 的存在和最不利隧道长度及截面形状。

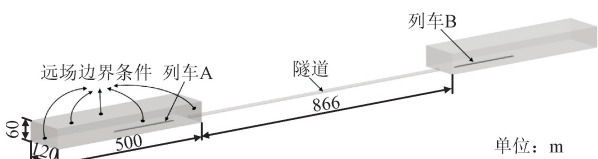
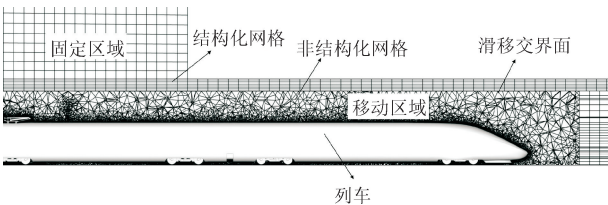


图 2 隧道内两车交会的计算区域

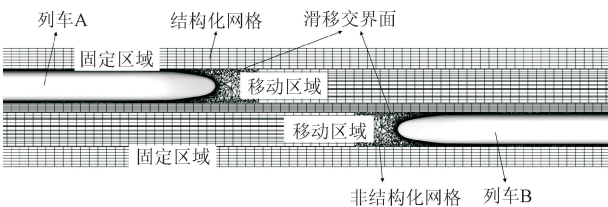
Fig. 2 The calculated area for the intersection of double-train in the tunnel

1.3 网格划分情况

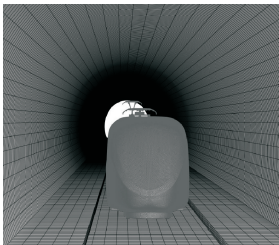
由于车体自由曲面结构的复杂性,对列车周围区域采用四面体非结构化网格进行离散,而对隧道区域采用六面体结构化网格进行离散。此外,列车运行时周围湍流具有一定的复杂性,因此为提高计算精度,对车体及隧道表面附近区域采用加密精细化的贴体网格进行离散,最小尺寸为 0.005 m, y^+ 值约为 360。计算模型网格划分质量如图 3 所示,其中图 3(a)、3(c)表示单车通过隧道工况,图 3(b)、3(d)表示隧道内双车交会工况。单车通过隧道工况下的隧道外域网格数约为 260 万,隧道内域网格数约为 1 570 万;隧道内双车交会工况下的隧道外域网格数约为 500 万,隧道内域网格数约为 3 270 万。



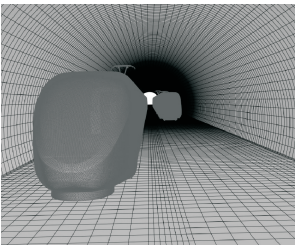
(a) 单车入隧纵剖面



(b) 列车交会水平剖面



(c) 单车入隧三维视图



(d) 列车交会三维视图

图 3 列车及周围隧道网格

Fig. 3 Meshes around the train and tunnel

1.4 计算方法验证

本文基于三维、可压缩、非定常 N-S 方程和滑移网格技术,对列车通过隧道时的气动效应进行数值模拟,采用工程上广泛应用的 $k-\epsilon$ 湍流模型,并采用二阶隐式格式对时间进行离散,采用二阶迎风格式对空间进行离散。为了验证所使用数值方法的正确性,利用遂渝线二岩单线隧道实车的试验结果与数值模拟结果进行了对照,试验工况为 8 辆编组的 CRH2C 型列车以 200 km/h 的行驶速度通过二岩隧道,隧道总长为 987 m,净空面积为 47.8 m²。车体及隧道表面测点布置情况如图 4 所示,关于试验装置更多细节可参考文献[21]。计算所采用的数值模型与实车试验完全一致。

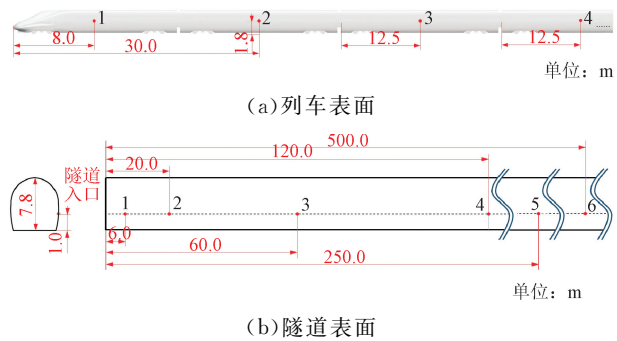


图 4 测点布置示意图
Fig. 4 Layout of measuring points

图 5 所示为距车头鼻尖 30 m 处列车表面测点和距入口 120 m 处隧道壁面测点的压力时程对比曲线。从图中可以看出两条曲线变化基本吻合,没有出现明显的偏差,车体表面测点计算结果和实测结果的压力负峰值分别为-2.12 kPa 和-2.26 kPa;隧道表面测点计算结果和实测结果的压力正峰值分别为 1.73 kPa 和 1.67 kPa。此外,在实际工程应用中,常用车厢 3 s 内压力变化幅值作为人体舒适度的评价标准^[5],而车内压力波动受车外压力变化主导。为此,表 1 给出了车体及隧道表面瞬变压力峰峰值的计算和实测结果,其中压力峰峰值表示最大

压力值与最小压力值之差。可以看出,列车表面测点压力相差的最大值为 6.05%;隧道表面测点压力相差的最大值为 8.52%。考虑到实车试验易受环境等因素制约,所以实车测试和数值计算之间会存在一定差异,由于上述偏差均在允许范围内,证明该数值计算方法是合理的。同时,本文所采用数值计算方法的可行性在高速列车过隧瞬变压力^[17]、带套衬结构隧道^[22]以及横风环境下两车交会^[23]工况中均已得到了验证。综上所述,本文所使用的计算方法能够较好地模拟车隧耦合下的空气动力学效应。

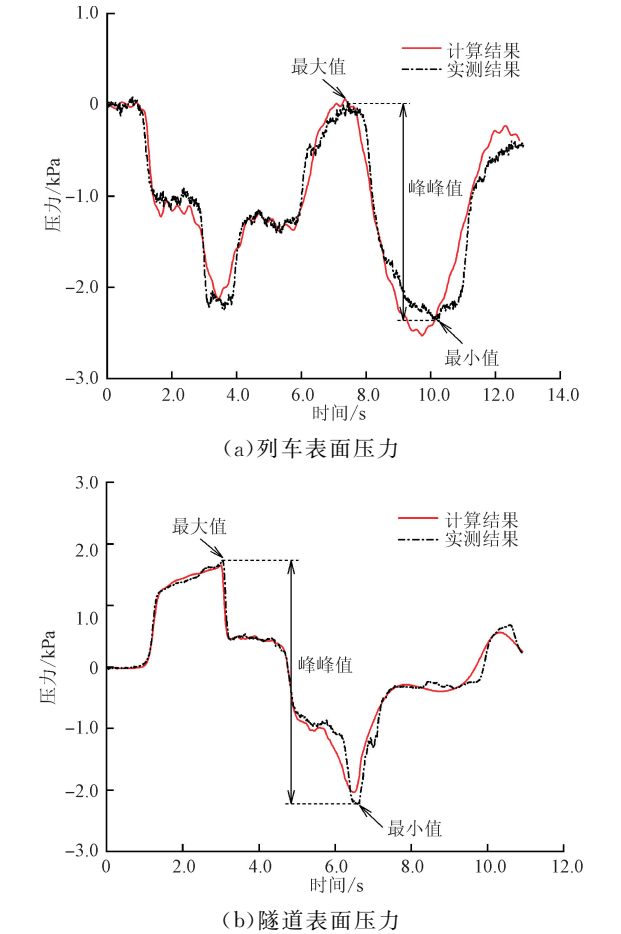


图 5 计算结果与实测结果的波形比较
Fig. 5 Waveform comparison between the numerical calculation and test results

参数	列车表面				隧道表面					
	头车	2 车	3 车	4 车	6 m	20 m	60 m	120 m	250 m	500 m
实测压力峰峰值/Pa	2 812	2 630	2 587	2 689	1 443	2 424	2 674	3 882	4 005	4 111
计算压力峰峰值/Pa	2 803	2 789	2 740	2 740	1 566	2 446	2 667	3 712	4 147	4 221
相对差/%	-0.32	6.05	5.91	1.90	8.52	0.91	-0.26	-4.38	3.55	2.68

表 1 车体及隧道表面瞬变压力峰峰值的数值计算与实测结果比较
Table 1 Comparison between the numerical calculation and test results of transient pressure peak-peak values on train body and tunnel surface
<http://zkxb.xjtu.edu.cn>

2 过隧定义及隧道内流场特性分析

2.1 过隧定义

图 6 所示为高速列车以 300 km/h 的速度通过单线最不利隧道的工况示意图。 $t=0$ 时,列车头部到达隧道入口; $t=2.55$ s 时,列车完全进入隧道;当 $t=6.24$ s 时,列车头部到达隧道中部; $t=15.72$ s 时,列车完全离开隧道。

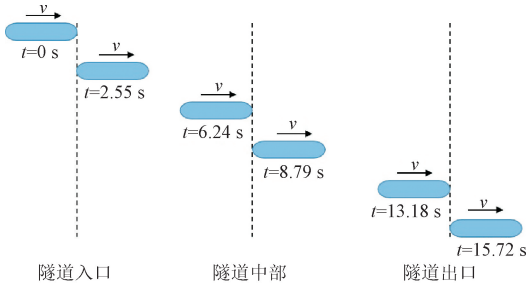


图 6 单列车通过隧道示意图

Fig. 6 The diagram of single-train through tunnel

图 7 所示为最不利隧道内两车以 300 km/h 的速度等速交会时的工况示意图。 $t=0$ 时刻,列车 A 与 B 同时进入隧道; $t=5.2$ s 时,A 列车头部与 B 列车头部在隧道中部开始交会; $t=6.46$ s 时,A 列车头部与 B 列车尾部开始交会; $t=7.75$ s 时,A 列车尾部与 B 列车尾部交会,随后两车开始分离。由于两车运行的对称性,车体表面在任意时刻所受到气动效应变化是相同的,所以本文取 A 车作为观测列车用以分析研究,取 B 车作为对向列车用以参照。

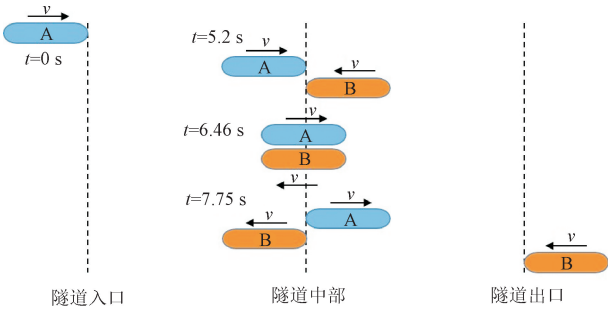


图 7 隧道内两车等速交会示意图

Fig. 7 The diagram of double-train intersecting at equal speed in the tunnel

2.2 隧道内流场特性分析

图 8 所示为单列车通过隧道过程中 4 个典型时刻的压力分布云图。从图中可以看出,在穿越隧道过程中,车头鼻尖基本都处于正压区。当列车进入隧道至头部鼻尖压力达到最大时,其前方正压区的范围逐渐扩大;当头车经过隧道中部时,车身及周围处于负压区;当列车即将驶出隧道时,车体表面压力逐渐恢复至明线运行状态,此时隧道内流场仍持续受到波系影响。

图 9 所示为隧道内列车等速交会过程中 5 个典型时刻的压力分布云图。从图中可以看出,当列车还未交会时,列车前方处于正压区;当两列车的头部即将交会时,其周围的空气被对向列车逐渐排开,所以列车头部周围逐渐呈现负压;当两车头尾交会后,观测列车头部逐渐摆脱对向列车的影响,所以其又重新处于正压区。此时两车车身仍处于交会状态,

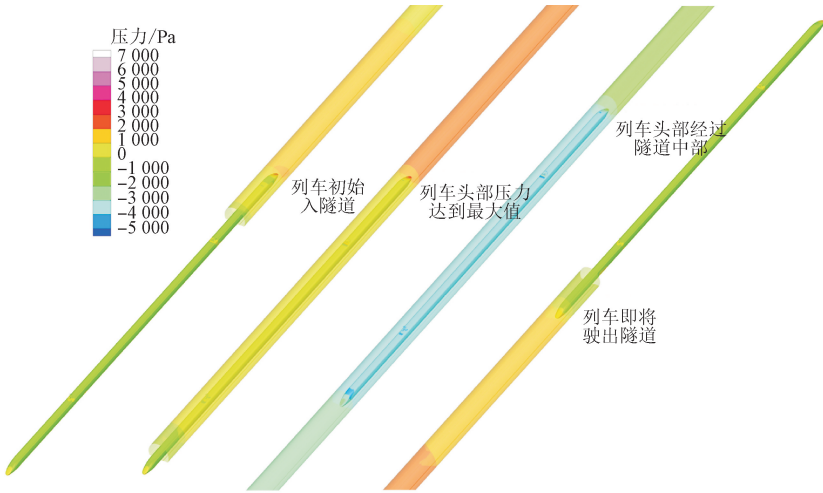


图 8 单列车通过隧道过程中车体及周围的压力分布

Fig. 8 Pressure distribution in and around the train body of single-train passing through a tunnel

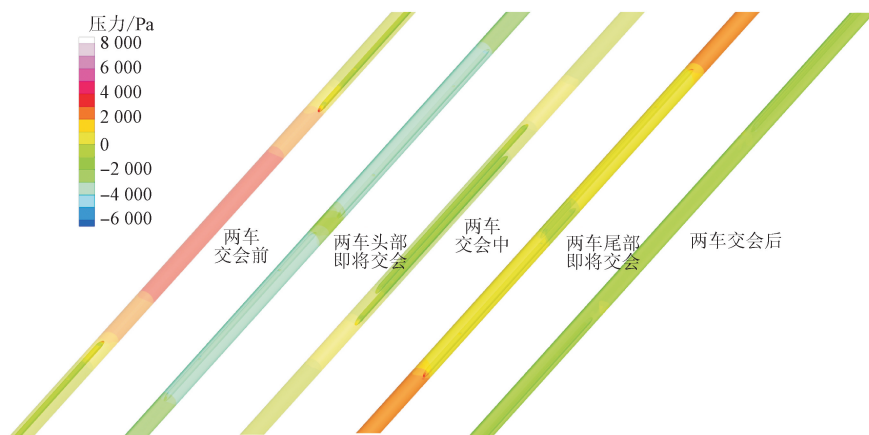


图 9 隧道内两车交会过程中车体及周围的压力分布

Fig. 9 Pressure distribution in and around the train body during the intersection of double-train in the tunnel

其周围的空气流速受到隧道几何空间的限制而逐渐增大,所以交会区域为负压区;当两车尾尾交会时,观测列车尾部逐渐摆脱对向列车的束缚,其周围的空气压力逐渐升高。至此,两车的交会过程完全结束。但值得注意的是,这仅仅是几何意义上的交会结束,车隧耦合过程产生的叠加波系仍会持续影响着车体表面压力及周围的空气流场。

3 列车过隧的气动阻力分析

3.1 气动阻力定义

根据欧洲标准化委员会(CEN)标准^[24],通常使用气动阻力系数来表征阻力,计算公式如下

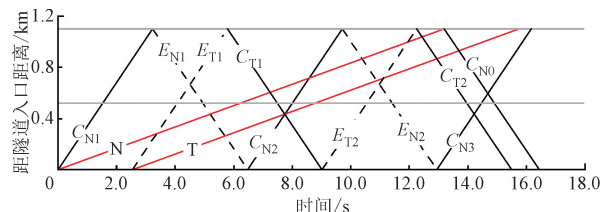
$$C_d = \frac{F_d}{0.5\rho A v^2} \quad (3)$$

式中: F_d 为气动阻力; ρ 为空气密度,取 1.225 kg/m^3 ; v 为列车运行速度; A 为列车最大迎风面积,取 12.6 m^2 。

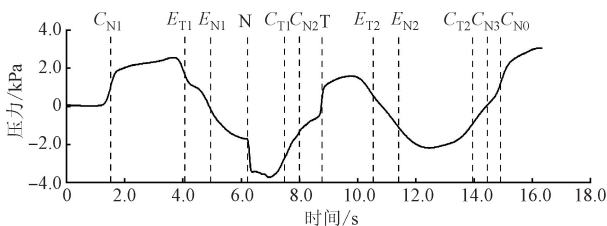
3.2 气动阻力分析

单列车通过最不利长度隧道过程中,隧道壁面测点压力、车体表面测点压力及整车气动阻力变化见图 10,其中隧道壁面测点位置距隧道入口 549 m。图 10(a)为车隧耦合下的波系传播图,其中“C”和“E”分别代表压缩波和膨胀波,图中用黑色实线和黑色虚线示出;“N”和“T”分别表示列车头部和尾部,图中用红色实线示出。 C_{N1} 表示车头驶入隧道时产生的压缩波; E_{N1} 表示 C_{N1} 传播至隧道出口时反射回来的膨胀波; E_{T1} 表示车尾驶入隧道时产生的膨胀波; C_{T1} 表示 E_{T1} 传播至隧道出口时反射回来的压缩波; C_{N2} 、 E_{N2} 、 C_{N3} 、 E_{T2} 、 C_{T2} 分别表示上阶段对应压力波在隧道洞口形成的反射波; C_{N0} 表示车头驶出隧道生成的压缩波。

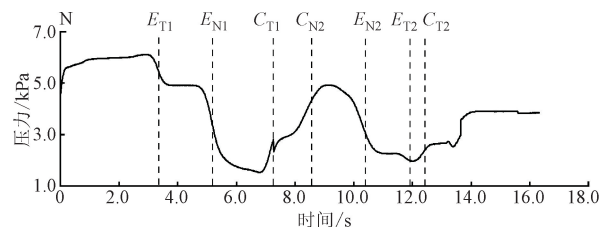
从图 10 中可以看出,车隧耦合产生的压缩波和膨胀波会使隧道内空气流场的压力发生剧烈变化。其中:当压缩波传至隧道壁面测点或车体表面测点时,会使该处的压力上升;膨胀波会使测点处的压力下降;在 $t=7.8 \text{ s}$ 左右,压缩波 C_{T1} 和 C_{N2} 共同作用于列车尾部,体现了最不利长度隧道中压力波的叠加特征。此外,当车头通过隧道壁面测点时该处的压力会迅速下降,车尾通过时压力会迅速上升,对应于图 10(b)中的 N 与 T 时刻。由于列车尾部处的空气出现分离和回流现象,形成复杂的尾部涡流,所以车尾鼻尖处的压力变化会存在一定范围内的波动。



(a) 波系传播图



(b) 距隧道入口 549 m 处壁面测点的压力



(c) 车头鼻尖处测点的压力

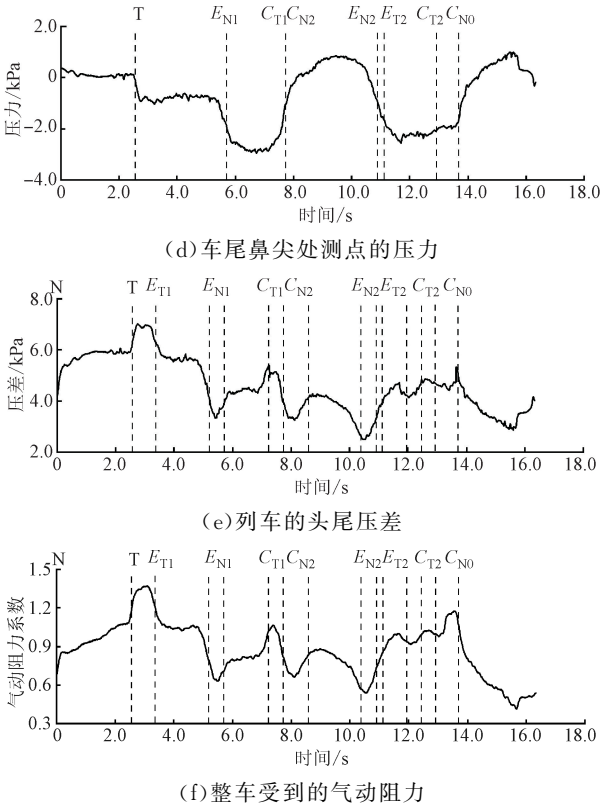
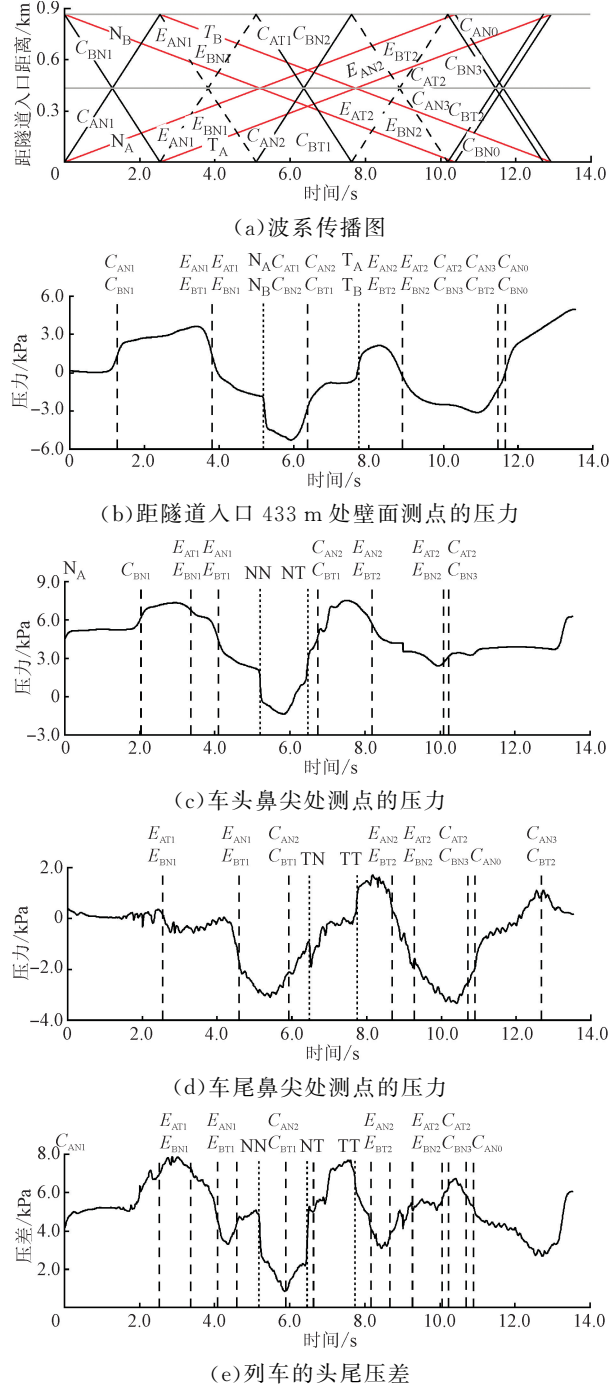


图 10 单列车通过最不利隧道时的压力和阻力的时间历程
Fig. 10 Pressure-resistance time history curve of single-train passing through the most unfavorable tunnel

当 $t=0$ 时,列车头部到达隧道,由于隧道内空气的流动空间受到壁面几何结构的限制,导致车头前方的空气被剧烈压缩,车头处的压力急剧升高,而此时车尾仍处于明线运行状态,尾部压力基本保持不变,所以列车头尾压力差上升,进而使车体受到的气动阻力急剧增大。随着列车车身逐渐进入隧道,列车受到的摩擦效应逐渐强烈,阻力缓慢地增大,直至列车全部进入隧道为止。 $t=2.55$ s 时,车尾进入隧道,其周围逐渐形成负压区,使得头尾压差进一步上升,所以列车的阻力又急剧增大。 $t=3$ s 左右,车头鼻尖处压力和整车阻力系数达到最大值,分别为 6.11 kPa 和 1.37。 $t=3.36$ s 时,列车头部遇到膨胀波 E_{T1} ,致使车头周围的空气压力降低,头尾车压差降低引起列车阻力随之减小。 t 为 5.19 s 和 5.7 s 时,列车头部和尾部先后遇到膨胀波 E_{N1} ,周围压力下降,引起头尾压差先降低后上升,所以列车阻力表现为先减小后增大。然后,列车在运行过程中,头尾部分别遭遇到 C_{T1} 、 C_{N2} 、 E_{N2} 、 E_{T2} 、 C_{T2} 和 C_{N0} ,致使头尾压差变化,相继引起车体的气动阻力变化。从分析中可以看出,列车头尾压差升高,其受到的气动阻力增大;头尾压差降低,气动阻力减小,所以头尾压差对列车的气动阻力变化起着主导作用。在 $t=$

10.56 s 时,整车气动阻力系数达到最小值,为 0.54。 $t=15.75$ s 时,列车尾部离开隧道,车体表面压力及气动阻力逐渐恢复至明线运行状态。

在最不利长度隧道内 A、B 两车交会过程中,隧道壁面测点的压力、A 车车体表面测点的压力及整车的气动阻力变化时间历程曲线如图 11 所示。其中隧道壁面的测点距隧道入口 433 m。图 11(a)为两列车通过隧道并发生交会过程中产生的波系传播图,图中由 A 车引起的压力波用下标字母 A 来表示,由 B 车引起的压力波用下标字母 B 来表示,其余表示方法与上述单车入隧工况相同。



时间轴^[25]。从图 13 可以直观看出,经过处理后,在不同运行速度下列车气动阻力总体变化规律基本一致,并且随着车速提高,车体受到的气动阻力也相继迅速增大。

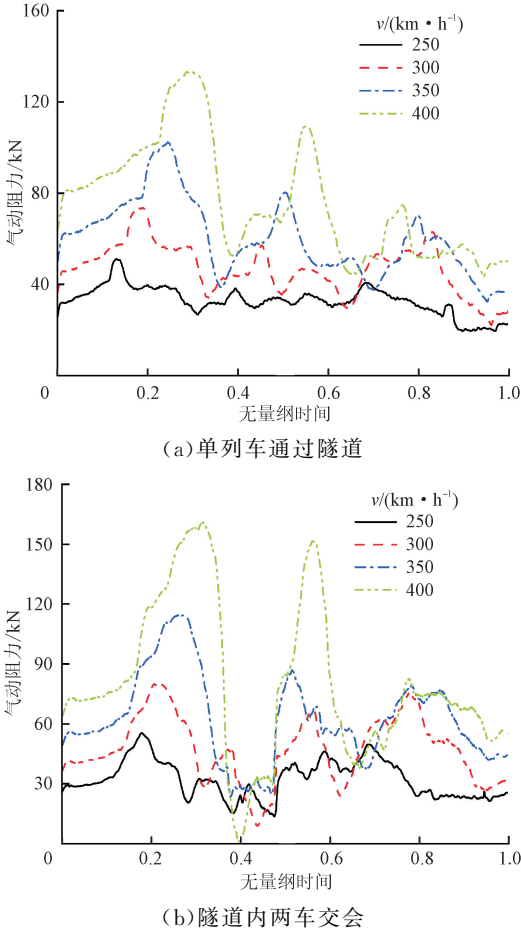


图 13 列车以不同速度运行时气动阻力的时间历程
Fig. 13 Aerodynamic resistance-time history curves for trains running at different speeds

图 14 所示为列车气动阻力的特征值随速度的变化关系,其中阻力峰峰值表示最大阻力值与最小阻力值之差。从图中可以看出,随着列车时速从 250 km 提高到 400 km,列车车体表面气动阻力正峰值在单车入隧工况下从 51.1 kN 增加至 133.3 kN,涨幅为 161%;在交会工况下从 55.5 kN 增加至 160.9 kN,涨幅为 189%。阻力峰峰值在单车入隧工况下从 19.4 kN 增加至 43.2 kN,涨幅为 184%;在交会工况下从 32.2 kN 增加至 80.6 kN,涨幅为 284%。阻力平均值在单车入隧工况下从 32.9 kN 增加至 76.4 kN,涨幅为 132%;在交会工况下从 32.2 kN 增加至 80.6 kN,涨幅为 150%。由此可见,当列车行驶速度提高时,车体受到的气动阻力会迅速增大。

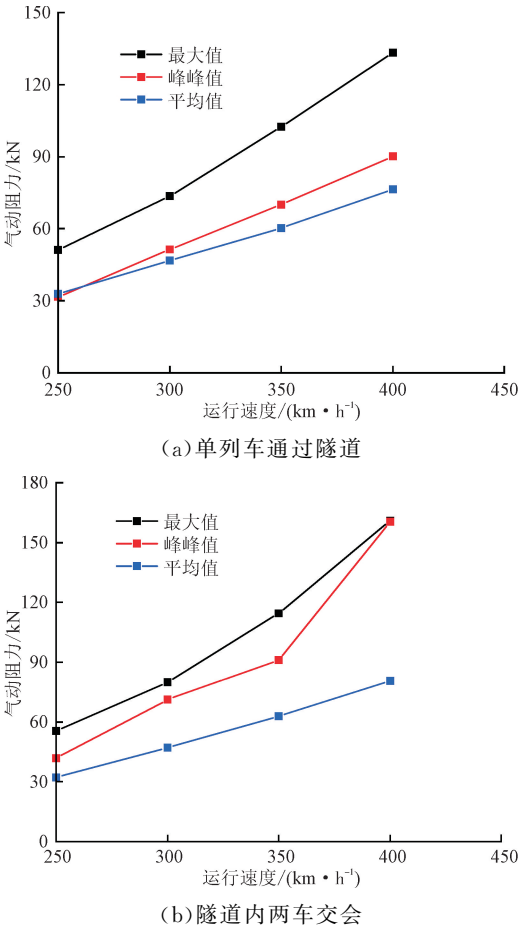


图 14 气动阻力特征值随列车运行速度变化规律
Fig. 14 The law of aerodynamic resistance characteristic value changing with train running speed

5 结 论

本文针对最不利长度隧道内单列车穿越和两车交会两种工况进行了数值模拟,分析了列车气动阻力变化机理,得到的主要结论如下。

(1)在车隧耦合作用下,车体受到的气动阻力与头尾压差密切相关。头尾压差升高则气动阻力增大,压差降低则气动阻力减小。

(2)在隧道内以时速 300 km 单车穿越和双车交会过程中,整车最大气动阻力分别发生在列车入隧后 3.1 s 和 2.8 s 时刻,阻力系数分别达到 1.37 和 1.49,且此时头车阻力在整车中占比最大,分别为 34.67% 和 36.57%。

(3)当列车头头交会和头尾交会时,尾车阻力占比最大,分别为 56.79% 和 37.33%,而头车阻力均表现为负值;当尾尾交会时,头车阻力占比最大,为 44.62%,而尾车阻力此时接近为 0。

(4)列车通过隧道时的行驶速度对车体受到的

阻力有着显著影响。当列车时速从 250 km 提升至 400 km 时,隧道内单车穿越和双车交会整车气动阻力平均值分别增大了 132% 和 150%;气动阻力正峰值分别增大了 161% 和 189%;气动阻力峰峰值分别增大了 184% 和 284%。

参考文献:

- [1] 巩江峰, 王伟, 黎旭, 等. 截至 2022 年底中国铁路隧道情况统计及 2022 年新开通项目重点隧道概况 [J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(4): 721-738.
GONG Jiangfeng, WANG Wei, LI Xu, et al. Statistics of railway tunnels in China by the end of 2022 and overview of key tunnels of projects newly put into operation in 2022 [J]. Tunnel Construction, 2023, 43(4): 721-738.
- [2] 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): 1-12.
XIAO Jingping, HUANG Zhixiang, CHEN Li. Review of aerodynamic investigations for high speed train [J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(2): 1-12.
- [3] 丁叁叁, 陈大伟, 刘加利. 中国高速列车研发与展望 [J]. 力学学报, 2021, 53(1): 35-50.
DING Sansan, CHEN Dawei, LIU Jiali. Research, development and prospect of China high-speed train [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(1): 35-50.
- [4] 熊嘉阳, 沈志云. 中国高速铁路的崛起和今后的发展 [J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(5): 6-29.
XIONG Jiayang, SHEN Zhiyun. Rise and future development of Chinese high-speed railway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(5): 6-29.
- [5] 田红旗. 列车空气动力学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007: 156-302.
- [6] 杨国伟, 魏宇杰, 赵桂林, 等. 高速列车的关键力学问题 [J]. 力学进展, 2015, 45(1): 217-460.
YANG Guowei, WEI Yujie, ZHAO Guilin, et al. Research progress on the mechanics of high speed rails [J]. Advances in Mechanics, 2015, 45(1): 217-460.
- [7] VARDY A E. Generation and alleviation of sonic booms from rail tunnels [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering and Computational Mechanics, 2008, 161(3): 107-119.
- [8] RAGHUNATHAN R S, KIM H D, SETOGUCHI T. Aerodynamics of high-speed railway train [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(6/7): 469-514.
- [9] LIU Tanghong, WANG Lei, LI Li, et al. Pressure waves acting on wall of a tunnel and their impact on the tunnel's structural safety [J]. Journal of Central South University, 2021, 28(10): 3223-3237.
- [10] 田红旗. 中国高速轨道交通空气动力学研究进展及发展思考 [J]. 中国工程科学, 2015, 17(4): 30-41.
TIAN Hongqi. Development of research on aerodynamics of high-speed rails in China [J]. Engineering Sciences, 2015, 17(4): 30-41.
- [11] 贾永兴, 景璟, 梅元贵. 单列高速列车通过隧道空气阻力数值模拟研究 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(4): 193-200.
JIA Yongxing, JING Jing, MEI Yuangui. Numerical simulation on air resistance of high-speed train passing through tunnel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(4): 193-200.
- [12] 王英学, 张子为, 袁俊祥. 列车在隧道内气动阻力系数分析 [J]. 铁道工程学报, 2022, 39(11): 75-80.
WANG Yingxue, ZHANG Ziwei, YUAN Junxiang. Analysis of aerodynamic drag coefficient of the train in tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(11): 75-80.
- [13] 赵晶, 李人宪. 高速列车进入隧道的气动作用数值模拟 [J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(1): 96-100.
ZHAO Jing, LI Renxian. Numerical analysis of aerodynamics of high-speed trains running into tunnels [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(1): 96-100.
- [14] 杨志刚, 毛懋, 陈羽. 高速列车底部结构参数对气动阻力作用规律 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 1055-1064.
YANG Zhigang, MAO Mao, CHEN Yu. Influence laws between underbody structure parameters of high speed train and aerodynamic drag [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(7): 1055-1064.
- [15] 杜俊涛, 田爱琴, 聂双双, 等. 高速列车阻力、升力与头部外形参数映射关系研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(6): 1017-1024.
DU Juntao, TIAN Aiqin, NIE Shuangshuang, et al. Research on the mapping relations between the drag and lift properties and the shape parameters of a high-speed train [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(6): 1017-1024.
- [16] 杨永刚, 杜云超, 梅元贵. 单列高速列车通过隧道空气阻力特性数值模拟研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(11): 2755-2763.
YANG Yonggang, DU Yunchao, MEI Yuangui. Numerical simulation of aerodynamic drag of single high-

- speed train passing through a tunnel [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, 15 (11): 2755-2763.
- [17] LIU Zhao, LIU Feng, YAO Shuanbao, et al. Research on numerical simulation of transient pressure for high-speed train passing through the most unfavourable length tunnel [J]. *Transportation Safety and Environment*, 2023, 5(3): tdac059.
- [18] 梅元贵, 周朝晖, 许建林. 高速铁路隧道空气动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 23-29.
- [19] 梅元贵, 李绵辉, 郭瑞. 高速铁路隧道内列车交会压力波气动载荷分布特性 [J]. *中国铁道科学*, 2019, 40(6): 60-67.
- MEI Yuangui, LI Mianhui, GUO Rui. Aerodynamic load distribution characteristics of pressure wave when trains passing each other in high-speed railway tunnel [J]. *China Railway Science*, 2019, 40(6): 60-67.
- [20] European Committee for Standardization. Railway applications-aerodynamics: part 5 requirements and assessment procedures for aerodynamics in tunnels; CEN-EN 14067-5 [S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2013.
- [21] NIU Jiqiang, ZHOU Dan, LIU Feng, et al. Effect of train length on fluctuating aerodynamic pressure wave in tunnels and method for determining the amplitude of pressure wave on trains [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 80: 277-289.
- [22] 刘峰, 姚松, 杨明智, 等. 高速列车通过带有套衬结构隧道气动效应分析 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(11): 4363-4369.
- LIU Feng, YAO Song, YANG Mingzhi, et al. Analysis on aerodynamic effect of high-speed train passing tunnel with lining structures [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(11): 4363-4369.
- [23] 刘峰, 姚松, 张洁, 等. 动车组横风环境下的交会气动效应 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(1): 307-313.
- LIU Feng, YAO Song, ZHANG Jie, et al. Aerodynamic effect of EMU passing by each other under crosswind [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(1): 307-313.
- [24] European Committee for Standardization. Railway applications-aerodynamics: part 4 requirements and test procedures for aerodynamics on open track; CEN-EN 14067-4 [S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2013.
- [25] 陆意斌, 王田天, 张雷, 等. 时速 400 km 不同编组列车通过隧道时的气动载荷 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(5): 1855-1866.
- LU Yibin, WANG Tiantian, ZHANG Lei, et al. Aerodynamic loads of trains with different formations passing through and intersecting in tunnels at 400 km/h [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(5): 1855-1866.

(编辑 杜秀杰)