

横风下高速列车驶入隧道时瞬态气动性能研究

邓锸,杨伟超[†],尹荣申,张平平
(中南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410075)

摘要:针对列车高速驶入隧道时流场的三维、非定常及可压缩湍流等特性,建立了精细化的隧道-列车-空气三维 CFD 数值模型,对比分析洞口有无横风条件下列车驶入隧道过程中车体周边的瞬态流场结构、压力分布,并研究横风条件下车体的 5 项气动荷载(气动横向力、气动升力、倾覆力矩、偏航力矩和点头力矩)指标的瞬变特性以及风速和车速变化对其最大瞬变幅值的影响情况.研究表明:当列车在横风环境下驶入隧道,洞外部分车体两侧流场结构和压力分布差异显著,而洞内部分差异较小,从而引发列车进洞前后车体压差突变;列车在进洞过程中,车体的各项气动荷载均存在瞬变效应,且尾车同时呈现出倾覆、“上跳”、“蛇形”摆动以及“点头”等行为;风速变化对尾车偏航力矩变化幅值影响较显著,而车速变化对头车偏航力矩变化幅值影响较显著.

关键词:隧道;横风;高速列车;气动荷载;瞬变效应

中图分类号:U25

文献标志码:A

Study on Transient Aerodynamic Performance of High-speed Trains when Entering into Tunnel under Crosswinds

DENG E, YANG Weichao[†], YIN Rongshen, ZHANG Pingping
(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Considering the three dimensional unsteady compressible turbulent characteristics of the flow field when a high-speed train (HST) enters the tunnel, a refined 3D CFD numerical model of tunnel-train-air was built to analyze the transient flow field structure and pressure distribution in the process of HST entering into tunnel under the conditions of crosswind and without crosswind comparatively. The transient change characteristics of the five aerodynamic loads (i.e. aerodynamic side force, lift force, rolling moment, yawing moment and nodding moment) of the train body under crosswind and the influence of wind and vehicle speeds on its maximum variation amplitudes were studied. The main results can be summarized as follow: When a HST enters into tunnel under crosswind environment, flow field structure and pressure distribution on both sides of the train body outside the tunnel have an obvious dissimilarity, and it's smaller inside the tunnel, which causes the sudden change of the train body pressure difference before and after the HST entering the tunnel. In the process of HST entering the tunnel, there are transient change effects in various aerodynamic loads of the train body, and the tail carriage presents capsizing, "jumping", "snake-like" swing and "nodding" behavior at the same time. The change of the wind speed has a significant effect on the variation amplitude of the tail carriage yawing moment, while the change of the train speed has a significant

* 收稿日期:2018-10-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478474), National Natural Science Foundation of China(51478474);中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2019zzts291), Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University(2019zzts291)

作者简介:邓锸(1991—),男,湖南双峰人,中南大学博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail:15459220@qq.com

effect on the variation amplitude of the head carriage yawing moment.

Key words: tunnel; crosswind; high-speed train (HST); aerodynamic load; transient change effect

横风是影响高速列车运行安全的重要因素,由强横风诱发的列车失稳甚至倾覆等事故在世界各国均时有发生^[1-2]。近年来,国内外诸多学者以车体的气动荷载为指标,分别研究了横风条件下,高速列车在平地^[3]、路堤^[4-5]、桥梁^[6-7]以及挡风墙^[8]等不同基础设施上运行时的气动特性。结果表明,横风作用下,不同基础设施型式对应不同的流场结构和车体气动荷载特性^[9]。当列车由一种设施环境高速驶入另外一种设施环境时,车体周边的流场和气动荷载势必将发生突变,而这往往是导致列车发生安全事故的重要原因。

相对于挡风墙、路堤和桥梁等结构,隧道属于封闭结构,当列车由明线横风环境下的平坦地面高速驶入隧道时,车体气动荷载的变化将更为剧烈,而这又是我国大风地区列车运行常遇的情形。迄今为止,针对此类问题,国内仅有晋永荣^[9]和苗秀娟等^[10]学者对强横风环境下高速列车驶出隧道时的气动性能进行了研究,而对于强横风下列车高速驶入隧道时车体的气动荷载瞬变特性研究鲜有报道。

为此,本文针对高速列车驶入隧道过程中流场的三维、非定常及可压缩湍流等特性,拟采用 ANSYS ICEM CFD 软件建立隧道-列车-空气三维数值模型,然后导入 ANSYS FLUENT 进行计算求解,分析了洞口横风条件下列车高速驶入隧道过程中车体周边流场结构和压力的变化特性,以揭示列车在进洞过程中车体的气动力和气动力矩等参数的瞬变特性及相应的气动力学行为,并研究了风速和车速变化对气动荷载变化幅值的影响规律,以期为后续列车运行的舒适性和安全性评估提供参考。

1 数值模型

1.1 控制方程

针对本文所研究的工况特点,可知:1)列车高速突入隧道的过程中车体的位置时刻变化,属于瞬态问题;2)马赫数(Ma)约等于 0.3,可将气体视为可压缩流;3)列车周围流场雷诺数大于 10^6 ,处于湍流状态。根据文献[11]的论述,本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型来模拟列车周边流场结构的瞬态演化过

程。其控制方程包括连续方程、动量守恒方程(即 Navier-Stokes 方程)以及能量守恒方程,分别表示为:

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i T}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_r \quad (3)$$

式中: ρ 为空气密度; P 为空气压力; σ_{ij} 为应力张量分量,其中下标 i (或 j)=1,2,3依次表示 x,y 和 z 方向; u 为略去平均符号的雷诺平均速度分量; u' 为脉冲速度; T 为流体温度; k 为热传导系数; C_p 为比热容; S_r 表示由于流体粘性作用产生的热能。

1.2 模型概况

以我国高速铁路常用的 CRH3 型列车为研究对象,建立 3 节编组的简化模型,长约 76 m,如图 1 所示,车体表面设为无滑移壁面(Wall)边界条件。计算模型整体布置如图 2 所示(缩尺比例为 1:1),当列车处于初始位置时,车头鼻尖距隧道洞口 90 m;隧道两端外部大气场属于半无限空间,采用半柱体模拟,柱体直径约 380 m,长 250 m,入口端环境横风垂直于列车运行方向均匀分布($\beta_w = 90^\circ$)。大气场的外边界设为压力远场边界条件(Pressure-far-field),风速 V_w 和风向角 β_w 则通过给定 Pressure-far-field 边界中 Z 和 X 方向的马赫数 Ma 来确定。中间为隧道段,隧道长 400 m,隧道横断面按照我国高铁适用于时速 300~350 km 单洞双线的标准断面设置,净空面积为 100 m^2 。地面以及隧道壁面均设置为粗糙度 0.5 的固定壁面边界条件(Wall)。

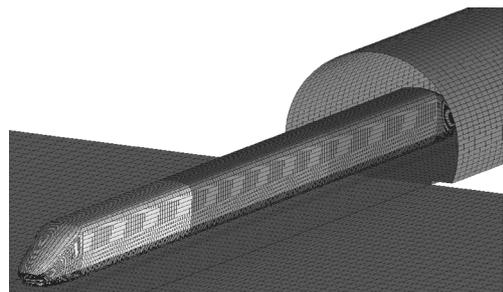


图 1 列车模型

Fig.1 Train model

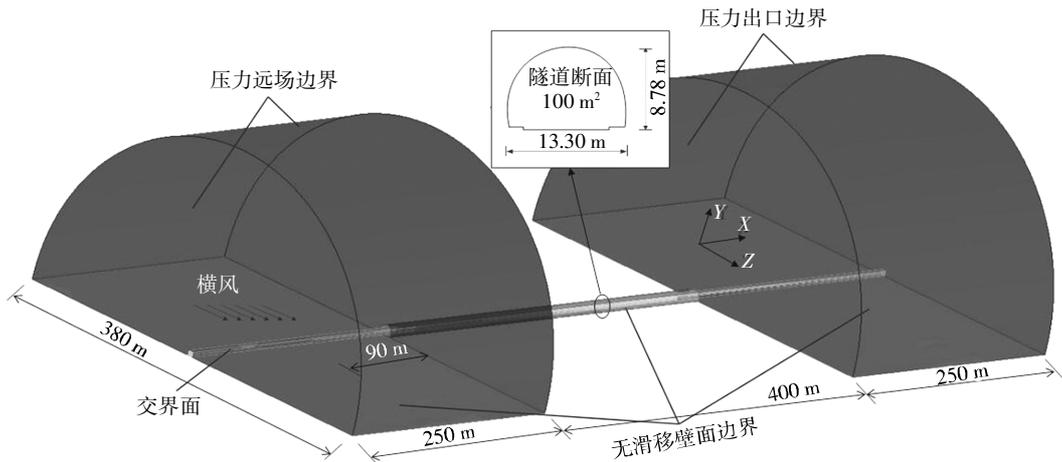
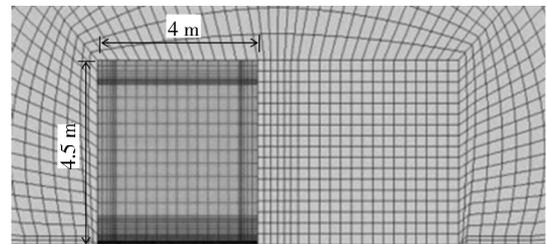


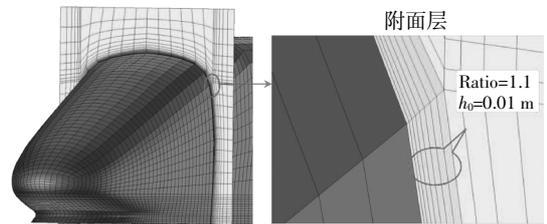
图 2 数值模型示意图

Fig.2 The illustration of numerical model

计算区域均采用结构化网格进行划分,结合滑移网格法(SMM)和动网格法(DMM)^[12],将整个计算区域分为静止网格区域和动网格区域两部分(如图 3(a))。其中,静止区域保持静止;动网格区域包含列车及附近的空气,其横截面尺寸如图 3(b)所示,运用铺层法实现列车与隧道间的相对运动。具体实现过程如下:动网格区域前后端边界始终保持静止状态。在计算过程中,区域最后端紧邻边界处的网格层被拉伸,当大于设定的尺寸时,自动分裂为两层;而区域最前端紧邻边界处的网格层被压缩,当小于设定的尺寸时,自动与其紧邻的网格层合并。列车表面网格及动网格区域内部的流体网格类型均设置为 Rigid,即这两部分网格单元整体向前移动,不会出现网格重建及尺寸变化。两个区域的流场信息通过 Interface 交换。由于本文主要关心列车周围流场情况,为准确模拟车身周围涡流的形成、脱落以及附面层效应,将紧贴车体表面的第 1 层网格厚度 h_0 设为 0.01 m,并按比率 1.1 扩展至第 8 层,相应的 y^+ 值处于 50~180 的范围内,第 8 层之后继续以较大比率扩展。列车运行方向的网格尺寸范围为 0.01~0.5 m,车身的网格尺寸约为 0.4 m,模型总网格单元数约 550 万,如图 3(c)所示。



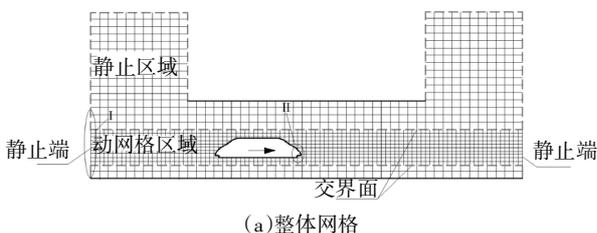
(b)局部网格 I



(c)局部网格 II

图 3 网格模型

Fig.3 The model of mesh



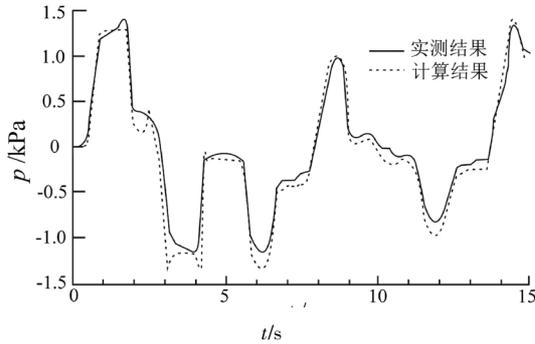
(a)整体网格

1.3 可靠性验证

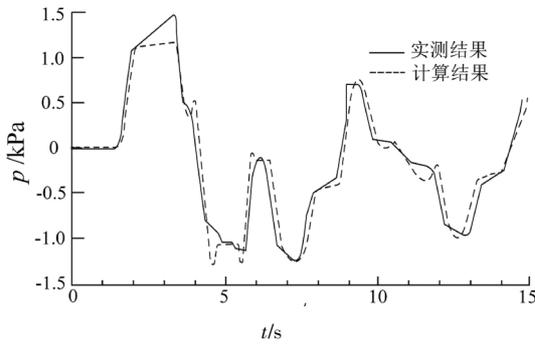
为验证本文数值计算方法的可靠性,首先依据文献 [13] 的实车试验场景,另建立 8 节编组(长 201.4 m)的列车模型和 1 005 m 的隧道模型(隧道入口端大气场长度取 350 m,列车初始位置及隧道断面仍与图 2 保持一致),提取隧道内某 2 个典型测点压力的数值计算结果与文献[13]中相应实测结果进行对比。其中,数值模型中的测点位置、隧道长度、隧道断面型式以及列车长度均与实车试验环境基本保持一致,洞口无横风作用。

如图 4 所示, $t = 0$ s, 列车车头鼻尖刚好抵达隧道口; $t = 14.5$ s, 列车刚好完全驶离隧道。其中,测点 1 和测点 2 分别距隧道入口 140 m 和 200 m,距轨面

高度均为 1.5 m;列车运行速度为 300 km/h.



(a)测点 1



(b)测点 2

图 4 压力数据对比

Fig.4 Comparison of pressure data

分析图 4 中测点 1 和测点 2 的数据可知,实测值与计算值的波动规律以及峰值大小基本吻合.测点压力受列车冲击波、入口压缩波、入口膨胀波以及它们的反射波的交替作用而发生相应的变化,即压缩波引起测点压力上升,膨胀波引起测点压力下降.对于测点 1,数值计算的测点压力最大正峰值为 1.26 kPa,相应的实测值为 1.38 kPa,二者相差 9%;数值计算的测点压力最小负峰值为-1.42 kPa,相应的实测值为-1.25 kPa,二者相差 12%.对于测点 2,数值计算结果的最大正峰值为 1.26 kPa,相应的实测值为 1.45 kPa,二者相差 13%;数值计算结果的最小负峰值为-1.39 kPa,相应的实测值为-1.35 kPa,二者相差 3%.

此外,为进一步验证侧风条件下本文数值模型的可靠性,将 Schober 等^[14]采用 ICE3 型 1:15 缩尺模型(见图 5)进行风洞试验所得的尾车气动横向力和偏航力矩数据与本文相应的数值模拟结果进行对比(CRH3 型列车与德国的 ICE3 型列车外型基本一致).为确保二者流场雷诺数一致,对本文数值模型另作如下处理:将数值模型缩尺比例同样设置为 1:15;列车运行速度 V_l 和风速 V_a 分别设定为 0 km/h

和 78 m/s;模型侧面积 A 和特征高度 h 分别为 10 m^2 和 3 m;最后改变 β ,计算不同 $\beta(10^\circ、15^\circ、20^\circ、30^\circ、45^\circ$ 和 $60^\circ)$ 条件下尾车(对于静态列车模型,尾车的研究效果与头车一致)的气动横向力系数 C_z 和偏航力矩系数 C_{my} ,如图 6 所示.

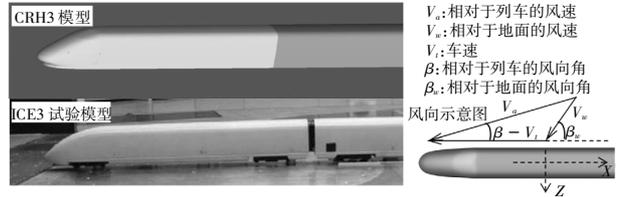
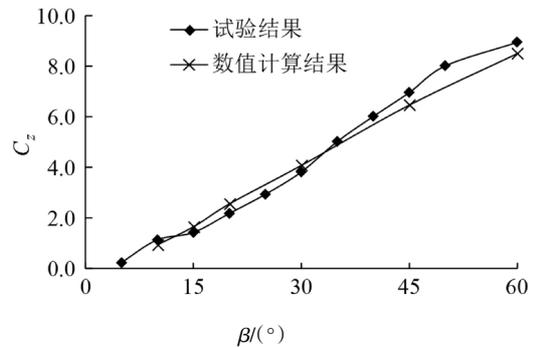
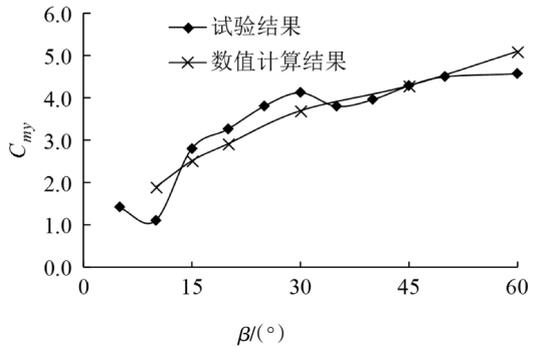


图 5 CRH3 型列车模型与 ICE3 型列车模型的尾车外型对比

Fig.5 Comparison of rear carriage shape between the CRH3 model and the ICE3 model



(a)气动横向力系数



(b)偏航力矩系数

图 6 气动荷载结果对比

Fig.6 Comparison of aerodynamic loads

由图 6 进一步分析可知:整体上,本文数值计算结果与 Schober 的试验结果变化趋势基本一致,即当风角 β 在 $0^\circ\sim 60^\circ$ 范围内递增时,二者尾车气动荷载也基本随之增大.尽管数值计算结果中个别数据与 Schober 的试验结果相差较大.如当 $\beta = 10^\circ$ 时,数值计算结果 C_{my} 比相应的试验结果大 41%.究其原因,可能是由于列车数值模型中忽略了转向架等细部构造,导致其底面积和侧面积增大.然而,其余

的数值计算结果与试验结果基本吻合,相差保持在 10%左右.

综上所述,无论隧道洞口是否有侧风作用,本文所建的数值模型及其计算结果均是可靠的.

2 气动荷载计算

高速列车在运行过程中,描述单节车厢气动荷

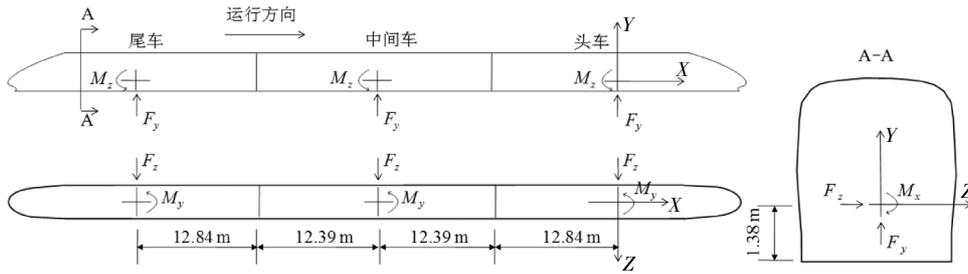


图 7 气动荷载加载点示意图

Fig.7 The diagram of aerodynamic loading point

5 项气动荷载时,将每节车厢沿车长方向划分为若干段(其中曲线车头车尾划分稍密),提取各工况中每段的迎风面、背风面、顶面和底面平均静压(Facet Average Static Pressure)时程数据,具体计算公式如下^[16]:

$$F_z = \sum_{i=1}^{i=n} (P_i^{uw} - P_i^{dw}) T_{hi} \Delta x_i \quad (4)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^{i=n} (P_i^{ls} - P_i^{rs}) T_{wi} \Delta x_i \quad (5)$$

$$M_x = \sum_{i=1}^{i=n} (P_i^{uw} - P_i^{dw}) T_{hi} \Delta x_i (T_{hi}/2 - H_0) \quad (6)$$

$$M_y = \sum_{i=1}^{i=n} x_i (P_i^{uw} - P_i^{dw}) T_{hi} \Delta x_i \quad (7)$$

$$M_z = \sum_{i=1}^{i=n} x_i (G_i - P_i^{ls} - P_i^{rs}) T_{wi} \Delta x_i \quad (8)$$

式中: F_z 、 F_y 分别为单节车厢所受的气动横向力和气动升力; M_x 、 M_y 、 M_z 分别为单节车厢所受到的分别绕 x 、 y 、 z 轴的气动力矩; P_i^{uw} 、 P_i^{dw} 、 P_i^{ls} 、 P_i^{rs} 分别为单节车厢第 i 段迎风面、背风面、顶面和底面的平均静压; Δx_i 为单节车厢第 i 段的纵向长度; x_i 为单节车厢中第 i 段中心与该节车厢力矩中心在 x 方向上的距离(当第 i 段中心位于该节车厢力矩中心的前方, x_i 取负值;反之, x_i 取正值); T_{hi} 、 T_{wi} 分别为单节车厢第 i 段对应的车厢高度和宽度; H_0 为单节车厢力矩中心距车厢底面的距离,如图 7,本文取 1.38 m; G_i 为单

节车厢中第 i 段所受的重力. 载指标主要有气动阻力 F_x 、横向力 F_z 、气动升力 F_y 、倾覆力矩 M_x 、偏航力矩 M_y 和点头力矩 M_z . 由于气动阻力 F_x 主要引起列车运行能耗升高,对行车安全性影响较小,故本文只针对其余 5 个指标展开研究. 图 7 给出了列车三节车厢的气动荷载加载点位置.

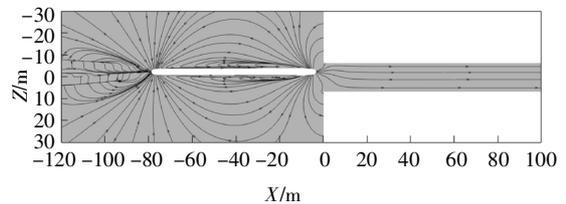
列车在运行时,车体表面受到气动压力和粘性力的共同作用^[15],但由于粘性力主要体现在对气动阻力的影响,对其余 5 个指标影响较小,故在计算这

节车厢中第 i 段所受的重力.

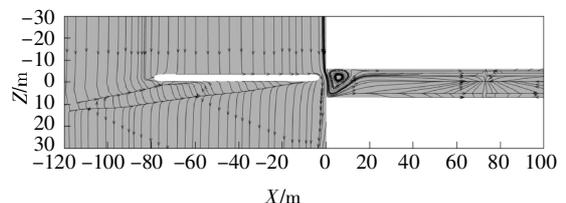
3 结果分析

3.1 流场结构

当列车由明线驶入隧道时,会形成 2 种主要的气流,即:列车风和列车进入隧道时的喷射流.当洞口存在横风时,横风将改变列车风和喷射流的流场结构,从而进一步影响车体压力及其气动力学行为^[17]. 现以轨面上方 1.5 m 高度处的水平面为例,对比分析 0 m/s 和 25 m/s 横风条件下 ($\beta_w = 90^\circ$),列车以 250 km/h 的速度驶入隧道过程中车体附近瞬态流场结构分布变化特性,如图 8 所示,其中 t 表示列车运行时刻(当列车处于初始位置时, $t = 0$ s).



(a) $V_w = 0$ m/s; $t = 1.25$ s



(b) $V_w = 25$ m/s; $t = 1.25$ s

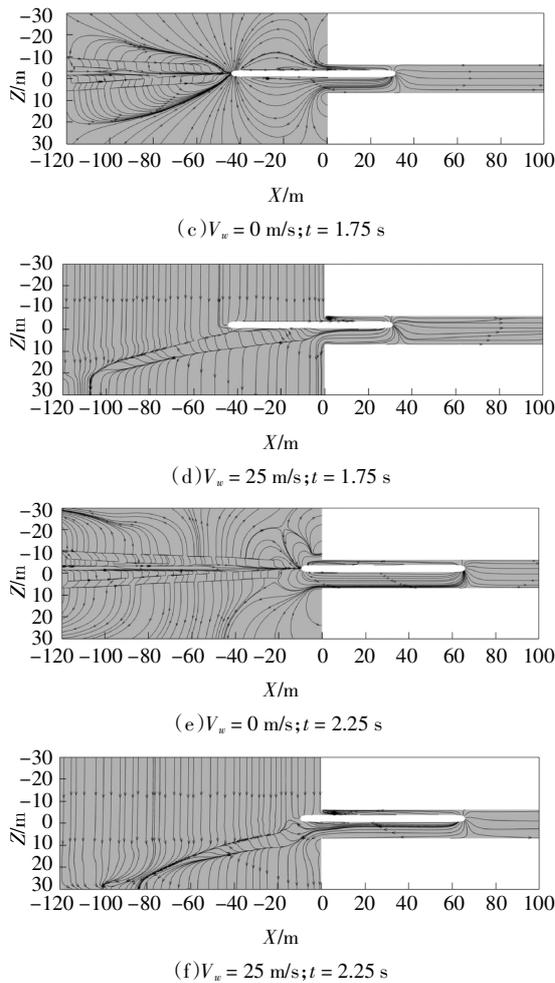


图8 流场结构对比

Fig.8 Comparison of flow structure

由图8分析可知:

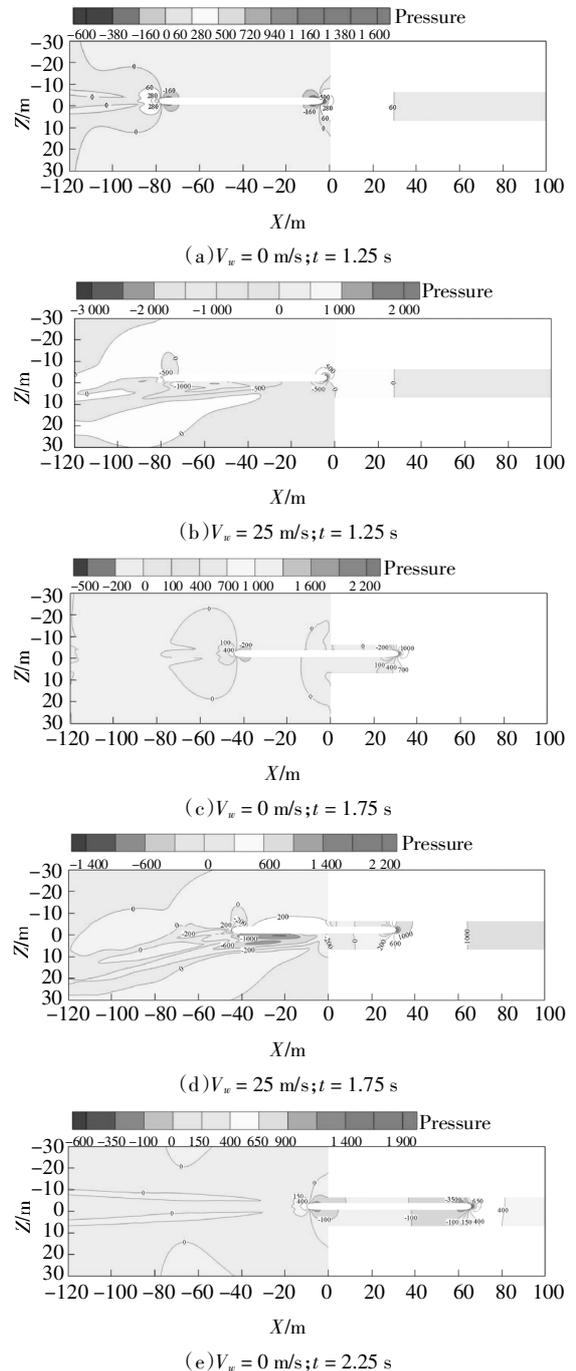
1)在洞口无横风条件下,当车头即将进洞时,车身两侧流场结构对称,主要表现为:气流从车头流向车尾形成以列车为中心的绕流,仅在车尾形成涡旋.随着列车逐渐进入隧道,由于列车对隧道内空气的排开作用,在隧道入口形成与列车运行方向相反的喷射流,考虑到双线隧道中列车与隧道中心并不重合等因素,可认为喷射流基本仍呈对称结构.当车尾抵达隧道入口时,车体绕流主要沿较宽一侧喷出隧道口,而列车行驶一侧相对狭窄,气流相对较少,并对尾涡流的对称性造成局部破坏.整体上,无横风条件下,列车驶入隧道时车体左右两侧的气流变化基本对称.

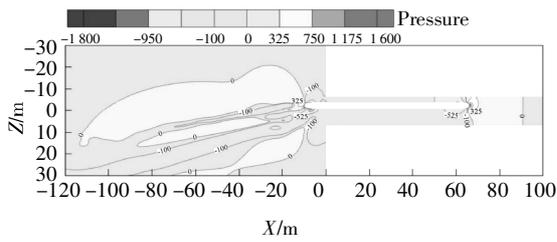
2)在洞口有 25 m/s 的持续稳定横风条件下,当车头即将进洞时,由于列车风和横风的联合作用,在 X 方向自车头至车尾附着一纵向涡流,在洞口也同时形成一个竖向的涡流,此涡流是列车进洞形成的喷射流和横风共同作用的结果,可对车头压力造成

一定的影响.随着列车驶入隧道,车头前方的涡流消失,附着车体的涡流不再是从车头开始,而是自隧道入口处开始,驶入隧道部分的车体附近无显著涡流,且车尾后侧涡流向背风侧偏转.当车尾即将抵达洞口时,车尾涡流区朝背风侧方向偏转更加显著,并呈现扭转趋势.

3.2 压力分布

车体左右两侧流场结构的不同必然会导致车体两侧附近气压的变化.图9给出了与图8对应的 $Y = 1.5 \text{ m}$ 平面上不同典型时刻车体周边瞬态压力分布变化.





(f) $V_w = 25 \text{ m/s}; t = 2.25 \text{ s}$

图 9 气动压力分布对比(单位:Pa)

Fig.9 Comparison of aerodynamic pressure distribution(unit: Pa)

由图 9 进一步分析可知:

1)当洞口无横风作用时,车体两侧压力场分布整体对称,且两侧压力值变化始终保持同步,不存在显著压差.其中明线条件下中间段车身附近压力基本稳定在 0 Pa 附近;隧道内条件下车体附近压力分布主要由车体位置、隧道壁面的限制、隧道内压缩波和膨胀波等多种因素共同作用,具体表现为:车头鼻尖处所受正压较高,头部近壁侧压力变化梯度较远壁侧稍大,但两侧压力分布仍基本对称.

2)在洞口有 25 m/s 的持续稳定横风作用下,当车头抵达隧道入口,在背风侧车体后约 2/3 范围内存在负压区,此负压区与流场涡流结构对应(见图 8 (b)和图 9(b)),负压值最低达到了-3 000 Pa.随着列车继续驶入隧道,进入隧道部分车体两侧压力趋于平衡;而明线条件下迎风侧仍为正压,背风侧仍为负压,且车体后方负压区逐渐变短.可见,车体两侧压差在沿列车运行方向上极不均衡.

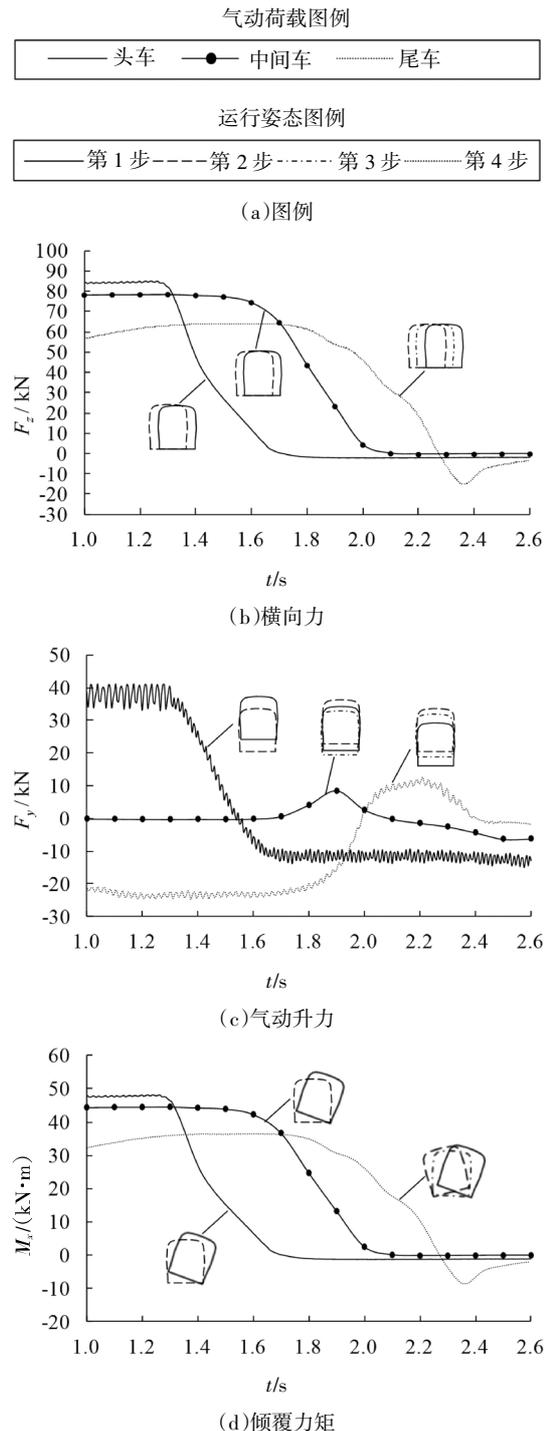
3.3 气动荷载

隧道内外环境差异不仅引起车体迎风侧和背风侧压力分布的改变,对整个车体所受的压力也将有重要的影响,进而会影响作用于车体的气动力和气动转矩等气动荷载指标.图 10 给出了在洞口 25 m/s 的恒定横风条件下($\beta_w = 90^\circ$),列车以 250 km/h 的速度驶入隧道过程中,三节车厢的气动横向力、气动升力、倾覆力矩、偏航力矩和点头力矩随时间的变化过程,同时分别给出了对应的气动荷载作用下头车、中间车和尾车在进洞时的运行姿态变化过程(图中 $t = 1.29 \text{ s}$ 时刻列车车头鼻尖刚好抵达隧道口, $t = 2.39 \text{ s}$ 时刻列车刚好完全驶入隧道).

从图 10 中分析可知:

1)对于气动横向力,列车进洞前,头车受到的横

向力最大,中间车次之,尾车最小;列车进洞时,头车和中间车的横向力直接突降至 0 kN,尾车则先迅速降至-15 kN,然后才恢复至零值附近,对应的尾车将发生一次整体反向横移的运动.由于倾覆力矩是通过横向力与力臂的乘积求得,故其随时间的变化特性与横向力相同,在此不再赘述,如图 10(d)所示,对应的尾车运行姿态在经历“右倾-左倾”变化后才恢复平稳.



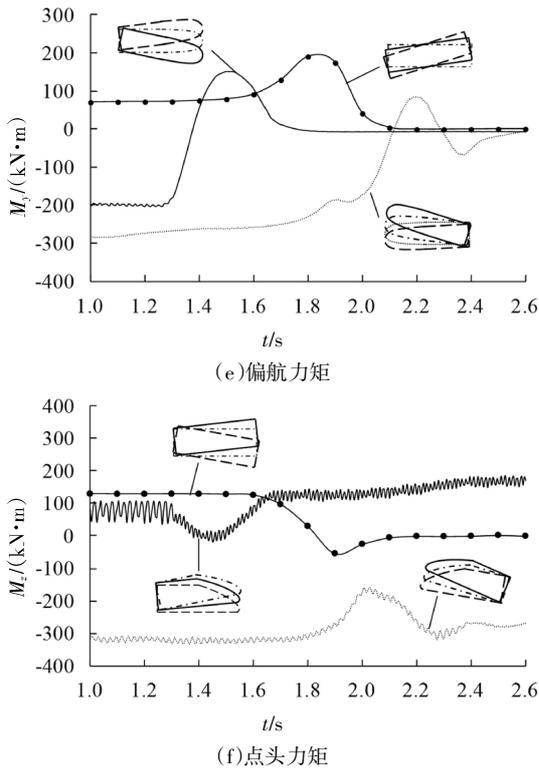


图 10 列车气动荷载及其对应的运行姿态
Fig.10 The aerodynamic load of train and it's corresponding operating pose

2)对于气动升力,列车进洞前,头车气动升力在 40 kN 附近持续大幅震荡,而尾车震荡幅度相对较小,中间车最为平稳;进洞时,头车气动升力直接突降,尾车和中间车气动升力将小幅上升后恢复零值,即中间车和尾车将先后相应地产生一个整体上跳的行为。

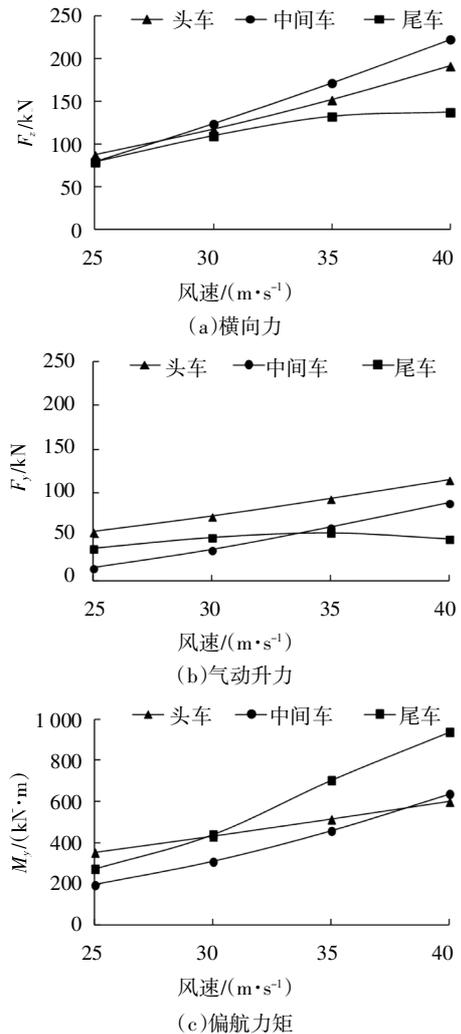
3)对于偏航力矩,当列车在明线运行时,中间车偏航力矩最高,头车次之,尾车最低;列车进洞时,三节车偏航力矩先后发生突增,且头车增幅最大,达 344 kN·m。这是由于列车在进洞过程中,隧道内部分车体所受横向力几乎为零,而洞外部分车体在横风作用下仍承受巨大横向力,横向力沿车厢纵向分布极不均匀,从而使偏航力矩突增,此时乘客将明显感觉车厢剧烈晃动,列车往往易因偏航力矩过大而发生脱轨事故。随着车厢完全进洞,头车和中间车的偏航力矩先后直接恢复至零值,而尾车的尾部将发生一次向迎风侧的反向摆动后才恢复平稳。

4)对于点头力矩,列车进洞前,头车持续在 100 kN·m 附近大幅震荡,且头部整体呈上翘姿态,尾车震荡幅度相对较小,中间车最平稳。进洞时,头车点头力矩经历一个波谷,相应的头车头部将产生一个点头行为;尾车则经历一个波峰后才恢复平稳,相应的尾车尾部也将产生一个点头行为。

综上所述,列车由明线横风环境快速驶入隧道的过程中,车体的各项气动荷载均表现出显著的瞬变效应。在风速为 25 m/s 且车速为 250 km/h 的运行条件下,相对于中间车和尾车,头车变化幅值最大,这将严重威胁其运行安全性;而尾车由于气动荷载突变作用,引起连续“右-左”倾覆、“上跳”、“蛇形”摆动以及“点头”等行为同时发生,也将在一定程度上降低其乘坐舒适性和运行安全性。

3.4 影响因素分析

由上述分析可知,列车驶入隧道时气动荷载的瞬变幅度将严重影响列车运行的安全性,而影响气动荷载的主要因素有风速和车速。下面进一步分析风速和车速的变化对气动荷载的影响情况,图 11 给出了不同风速下 (25 m/s、30 m/s、35 m/s、40 m/s) ($\beta_w = 90^\circ$) 列车以 250 km/h 的速度驶入隧道过程中各节车厢气动荷载最大波动幅值,图 12 给出了在 25 m/s 的横风环境下,列车以不同车速 (200 km/h、250 km/h、300 km/h、350 km/h) 驶入隧道时各节车厢的气动荷载最大波动幅值。



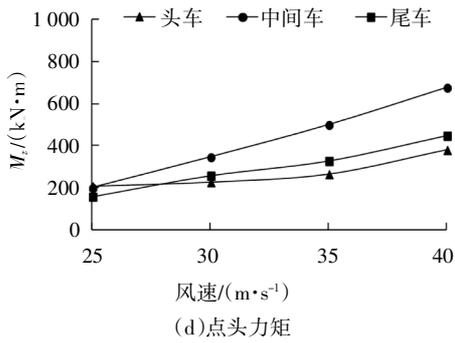


图 11 不同风速下气动荷载突变幅值

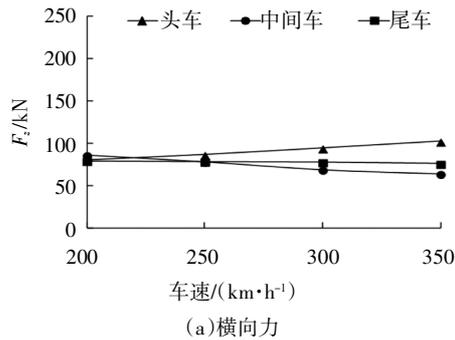
Fig.11 The transient variation amplitude of aerodynamic load under different wind speed

由图 11 和图 12 分析可知:

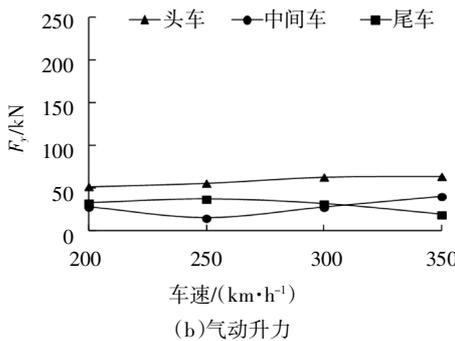
1)对于气动横向力最大波动幅值,随风速增大,三节车厢均随之增大,但尾车在风速达到 35 m/s 以后增大并不显著;若风速不变,车速增大,仅头车增大,而中间车和尾车呈微弱减小趋势。

2)对于气动升力最大波动幅值,随风速增大,头车和中间车随之增大,而尾车增大趋势并不明显;若风速不变,车速增大,头车和中间车微弱增大,尾车仍呈减小趋势。

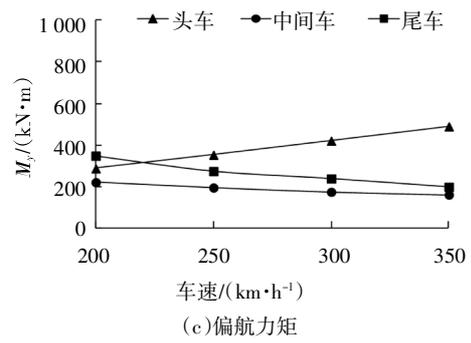
3)对于偏航力矩最大波动幅值,随着风速增大,三节车均随之明显增大,且以尾车增大最为显著(当风速为 40 km/h 时,达 937 kN·m);若风速不变,车速增大,三节车偏航力矩突变幅值变化趋势与横向力相似,但头车增大尤为显著。



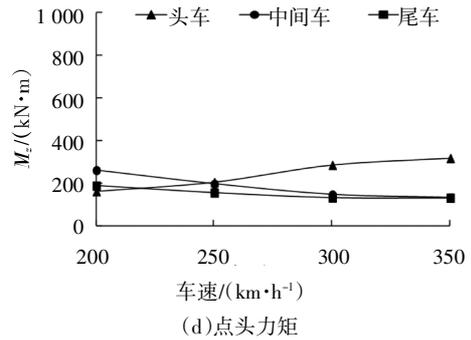
(a)横向力



(b)气动升力



(c)偏航力矩



(d)点头力矩

图 12 不同车速下气动荷载突变幅值

Fig.12 The transient variation amplitude of aerodynamic load under different vehicle speed

4)对于点头力矩最大波动幅值,随着风速增大,三节车也均有所增大,且中间车增大较为显著(当风速为 40 km/h 时,达 674 kN·m);若风速不变,车速增大,三节变化趋势仍与横向力相似。

综上所述,风速变化对各节车厢气动荷载变化幅值的影响程度明显大于车速变化的影响。随着车速或风速的变化,在各项气动荷载中,又以偏航力矩的变化最为显著。当车速不变,随着风速增大,尾车偏航力矩变化幅值增大最为显著,又因列车运行安全性在很大程度上受偏航力矩变化的影响^[18],故风速变化对尾车运行安全影响较突出;而当风速不变,随车速增大,头车偏航力矩变化幅值增大最为显著,即车速变化对头车运行安全影响较突出。

4 结论

1)对于流场结构,在洞口横风作用下,洞外部分车体两侧流场结构差异明显,背风侧附着—纵向涡流。随着列车驶入隧道,附着车体的涡流在隧道入口处开始消失,驶入隧道部分的车体附近无显著涡流,车头处流场仍呈源流特性。当车尾即将抵达洞口时,车尾涡流区朝背风侧方向偏转更加显著,并呈现扭转趋势。

2)对于压力分布,在洞口横风作用下,当车头抵达隧道入口,在背风侧车体后约2/3范围内存在负压区。随着列车继续驶入隧道,洞内部分车体两侧压力仍趋于平衡,而洞外部分车体两侧压差显著,车体两侧压差在纵向上极不均衡。

3)高速列车由明线横风环境驶入隧道的过程中,车体的各项气动荷载均表现出显著的瞬变效应。其中尾车在气动荷载大幅瞬变作用下,同时产生较显著的连续“右-左”倾覆、“上跳”、“蛇形”摆动以及“点头”等行为。

4)风速变化对尾车偏航力矩变化幅值影响较显著,而车速变化对头车偏航力矩变化幅值影响较显著。

参考文献

- [1] BAKER C, CHELI F, ORELLANO A, *et al.* Cross wind effects on road and rail vehicles[J]. *Vehicle System Dynamic*, 2009, 47(8): 983—1022.
- [2] LI X Z, XIAO J, LIU D J, *et al.* An analytical model for the fluctuating wind velocity spectra of a moving vehicle [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2017, 164: 34—43.
- [3] CHELI C, CORRADI R, ROCCHI D, *et al.* Wind tunnel tests on train scale models to investigate the effect of infrastructure scenario [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(6/7): 353—362.
- [4] TOMASINI G, GIAPPINO S, CORRADI R, *et al.* Experimental investigation of the effects of embankment scenario on railway vehicle aerodynamic coefficients [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2014, 131: 59—71.
- [5] ZHOU D, TIAN H Q, THOMPSON M, *et al.* Numerical and experimental investigations of the flow around a high-speed train on an embankment under side wind conditions [J]. *The Aerodynamics of Heavy Vehicles III*, 2015, 79: 113—130.
- [6] 李永乐, 杨怿, 吴梦雪, 等. 侧向风作用下桥上列车交会过程的空气动力学特性[J]. *中国铁道科学*, 2015, 36(2): 37—44.
LI Y L, YANG Y, WU M X, *et al.* Aerodynamic characteristics in the process of two trains passing each other on bridge under cross wind action [J]. *China Railway Science*, 2015, 36(2): 37—44. (In Chinese)
- [7] BOCCIOLONE M, CHELI F, CORRADI R, *et al.* Crosswind action on rail vehicles: wind tunnel experimental analyses [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(5): 584—610.
- [8] 李田, 张继业, 张卫华. 横风下高速列车通过挡风墙动力学性能[J]. *铁道学报*, 2012, 34(7): 30—35.
LI T, ZHANG J Y, ZHANG W H. Dynamic performance of high-speed train passing windbreak in crosswind [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, 34(7): 30—35. (In Chinese)
- [9] 晋永荣. 大风下高速列车单车出隧道空气动力效应数值模拟初探[D]. 兰州: 兰州交通大学机电工程学院, 2014: 39—58.
JIN Y R. A preliminary research on numerical simulation of aerodynamic effect when high-speed train out from tunnel under strong wind condition [D]. Lanzhou: School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, 2014: 39—58. (In Chinese)
- [10] 苗秀娟, 张雷, 李志伟, 等. 强横风下列车出隧道时的瞬态气动性能[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(3): 958—964.
MIAO X J, ZHANG L, LI Z W, *et al.* Aerodynamic performance of train passing out tunnel under cross-wind [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(3): 958—964. (In Chinese)
- [11] YANG W C, DENG E, LEI M F, *et al.* Flow structure and aerodynamic behavior evolution during train entering tunnel with entrance in crosswind [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2018, 175: 229—243.
- [12] 谷正气, 杨滨徽, 龚旭, 等. 会车瞬态气动特性分析与研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2010, 37(6): 27—31.
GU Z Q, YANG B H, GONG X, *et al.* Analysis for transient aerodynamic characteristics of two automobiles passing each other [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2010, 37(6): 27—31. (In Chinese)
- [13] 刘峰, 姚松, 刘堂红, 等. 高速铁路隧道壁面气动压力实车试验分析[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2016, 50(10): 2018—2024.
LIU F, YAO S, LIU T H, *et al.* Analysis on aerodynamic pressure of tunnel wall of high-speed railway by full-scale train test [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2016, 50(10): 2018—2024. (In Chinese)
- [14] SCHOBER M, WEISE M, ORELLANO A, *et al.* Wind tunnel investigation of an ICE 3 endcar on three standard ground scenarios [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2010, 98: 345—352.
- [15] 缪晓郎. 高速列车空气压力波作用下横向振动分析[D]. 成都: 西南交通大学机械工程学院, 2014: 37—38.
MIAO X L. Lateral vibration analysis of high speed train under the air pressure wave [D]. Chengdu: School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 2014: 37—38. (In Chinese)
- [16] 邓镔. 横风环境下高速列车突入隧道时气动特性及行车安全研究[D]. 长沙: 中南大学土木工程学院, 2017: 45—46.
DENG E. Study on aerodynamic characteristics and traffic safety of high-speed train burst into tunnel under crosswind environment [D]. Changsha: School of Civil Engineering, Central South University, 2017: 45—46. (In Chinese)
- [17] KHIER W, BREUER M, DURST F, *et al.* Flow structure around trains under side wind conditions: A numerical study [J]. *Computers & Fluids*, 2000, 29(2): 179—195.
- [18] 孙建成. 大风下高速列车进出防风明洞及隧道口的气动特性数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州交通大学机电工程学院, 2015: 89—92.
SUN J C. Numerical simulation research on the aerodynamic characteristics of high-speed trains entering and exiting the anti-wind open cut tunnel and the tunnel portal under strong wind [D]. Lanzhou: School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, 2015: 89—92. (In Chinese)