

文章编号: 1005-0523(2025)04-0088-12



横风对高速列车逆向过岔安全性的研究

林凤涛¹, 许辉¹, 杨政达¹, 谭荣凯¹, 黄国胜², 伏松平²,
李强³, 王子旭⁴, 杜瑞廷⁵

(1. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 中国铁建电气化局集团有限公司, 北京 100043;
3. 中国国家铁路集团有限公司, 北京 100844; 4. 中国铁路西安局集团有限公司西安机务段, 陕西 西安 710000;
5. 浙江省永康市职业技术学院, 浙江 永康 321300)

摘要: 为了得到最适合用于高速列车在横风作用下过岔性能评估的安全性能指标, 同时提出高速列车横风作用下直逆向和侧逆向通过道岔时的运行安全域, 通过建立高速列车过岔气动力学模型和横风-列车-道岔耦合多体系统动力学模型, 深入探究了高速列车在横风作用下通过道岔时的安全性。研究表明: 在横风作用下, 迎风侧的压力显著提高, 在头车两侧面形成明显的压差, 使得头车在运行过程中更容易发生脱轨侧翻的情况; 在高速列车直逆向过岔时, 当所受横风风速不超过 15 m/s 时, 高速列车可以以 250 km/h 速度过岔; 当所受横风风速达到 20 m/s 及以上时, 高速列车直逆向过岔速度应小于 250 km/h; 在高速列车侧逆向过岔时, 当横风风速大于 15 m/s 时, 高速列车侧逆向过岔速度应小于 80 km/h。在横风作用下, 高速列车运行时头车更容易发生脱轨侧翻情况; 高速列车直逆向过岔且当横风风速达到 8 级及以上时, 列车过岔速度应小于 250 km/h; 高速列车侧逆向过岔且当横风风速达到 7 级及以上时, 列车过岔速度应小于 80 km/h。研究结果可以为高速列车在不同横风条件下过岔的平稳性及安全性提供参考。

关键词: 列车动力学; 高速列车; 横风; 过岔安全性; 气动性能

中图分类号: U270.11

文献标志码: A

本文引用格式: 林凤涛, 许辉, 杨政达, 等. 横风对高速列车逆向过岔安全性的研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(4): 88-99.

Research on the Safety of Crosswind on the Reverse Crossing of High-Speed Train

Lin Fengtao¹, Xu Hui¹, Yang Zhengda¹, Tan Rongkai¹, Huang Guosheng²,
Fu Songping², Li Qiang³, Wang Zixu⁴, Du Ruiting⁵

(1. School of Mechatronics & Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
2. China Railway Construction Electrification Bureau Group Co., Ltd, Beijing 100043, China;
3. China National Railway Group Co., Ltd, Beijing 100844, China;
4. Xi'an Locomotive Depot, China Railway Xi'an Bureau Group Co., Ltd., Xi'an 710000, China;
5. Zhejiang Yongkang Vocational and Technical College, Yongkang 321300, China)

收稿日期: 2024-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(52065021); 江西省领军人才项目(S2021GDKX1442); 江西省自然科学基金项目(20242BAB26086, 20224BAB204042); 国铁集团科技研究开发计划课题(N2024G028)

Abstract: In order to obtain the safety performance index that is most suitable for the performance evaluation of high-speed trains passing through turnouts under crosswind, the operation safety domains of high-speed trains passing through turnouts in straight and side reverse directions under crosswind are proposed. By establishing the aerodynamic model of high-speed trains passing through turnouts and the dynamic model of crosswind-train-turnout coupling multi-body system, the safety of high-speed trains passing through turnouts under crosswind was deeply explored. The results show that under the action of crosswind, the pressure on the windward side increases significantly, and the obvious pressure difference is formed on both sides of the head car, which makes the head car more prone to derailment and rollover during operation. When the high-speed train passes through the turnout directly and reversely, when the crosswind wind speed is not more than 15 m/s, the high-speed train can pass through the turnout at a speed of 250 km/h; when the crosswind speed reaches 20 m/s and above, the speed of the high-speed train should be less than 250 km/h. When the crosswind speed is greater than 15 m/s, the speed of the high-speed train side should be less than 80 km/h. Under the action of crosswind, the head car is more prone to derailment and rollover when the high-speed train runs. When the high-speed train passes through the turnout directly and reversely, when the crosswind speed reaches 8 and above, the speed of the train passing through the turnout should be less than 250 km/h. When the side of the high-speed train passes through the turnout reversely, when the crosswind speed reaches 7 and above, the speed of the train passing through the turnout should be less than 80 km/h. The research results can provide reference for the smoothness and safety of high-speed trains passing through turnouts under different crosswind conditions.

Key words: train dynamics; high-speed train; crosswind; turnout safety; aerodynamic performance

Citation format: LIN F T, XU H, YANG Z D, et al. Research on the safety of crosswind on the reverse crossing of high-speed train[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(4): 88–99.

随着中国高速列车的迅速发展,列车设计越来越倾向于高速化、轻量化,因此横风作用下高速列车运行安全性的问题不容忽视。横风轻则影响运行平稳性、乘坐舒适性,重则导致高速列车脱轨、倾覆^[1-2],高速列车过岔时的风致平稳性问题不容忽视。

近年来,国内外针对列车在横风环境下的气动性能研究开展了诸多研究和计算。国外通过数值模拟取得了许多研究成果,Mohebbi等^[3]采用数值仿真模拟的方法,对大风环境不同风向角下的列车周围流场结构进行了研究。Munoz等^[4-5]利用遗传算法结合数值模拟的方法,优化设计出通过隧道时气动性能更佳的高速列车头型。李明等^[6]通过数值模拟技术,通过对不同速度等级气动性能等参数进行综合评估,设计了一款优化的列车头型,使其安全运行时速高达500 km/h。于梦阁等^[7]运用数值模拟的方法,得到了高速列车在雨滴和空气的作用下空气动力学性能的变化趋势。苗秀娟等^[8]还原了大风环境下高速列车在路堤上运行的周围流场,得到

了不同路堤高度与高速列车气动性能之间的关系。王磊等^[9]在有无横风的两种情况下,对比研究了列车突入隧道内的列车风变特性和气动压力的变化趋势。梁习锋等^[10]在改进的延迟分离涡模型基础上,深入探究了横风对高速列车气动参数的影响。朱海燕等^[11]通过Fluent软件模拟深入研究了横风对列车在路堤上运行时的压力分布、气动力与运行安全等性能的影响。Xia等^[12]探究了在横风作用下,高速列车运行时的气动性能与列车车厢间隙之间的关系,得到尾车侧力与车厢间隙成正相关。综上,数值模拟是目前探究高速列车气动性能领域普遍认可的科学手段,因其计算精度高、成本低、效率高而被广泛应用。

针对横风工况下高速列车的运行安全性研究,Montenegro等^[13]对列车运行安全评估指标进行了详细介绍,并对列车在桥梁上运行的安全性进行了研究。Sun等^[14]基于轮轨垂向力,对无砟桥梁上的列车运行安全性进行研究。Diedrichs^[15-16]对大风下的行车安全性能进行详细研究,发现头车的倾覆力

矩远大于中车与尾车,在考虑大风环境下的行车安全时,应主要考虑头车的运行安全性。Liu等^[17]研究了现有强风条件下的振动舒适性评估方法的适用性,提出一种在大风条件下高速列车经过复杂地形段而引起的瞬时不适的新型评估方法。Liu等^[18]通过分析不同风速工况下列车动力学性能的变化趋势,得出了列车在变风速工况下的临界倾覆风速,提出了列车运行风速的安全域。张田等^[19]在可靠度理论的基础上,通过风洞试验得到了高速列车在桥梁上运行的失效效率,并与确定性分析方法比较。车桥系统的失效会随着列车的行车速度和平均风速的增加而增加,且拖车的失效概率最低。刘荣等^[20]在五质量模型的基础上,通过数值模拟的方法得出了在横风作用下不同参数及临界倾覆风速曲线对列车倾覆的影响。谢红太^[21]采用数值模拟方法,在 $k-\varepsilon$ 方程湍流模型的基础上,得到了列车速度与阻力之间的关系。

综上,在横风作用下,列车运行的安全性研究大多研究对象在于明线、曲线线路、路堤、隧道、高架桥等,且许多学者是在恒定风速为基础的前提条件下对列车气动性能进行研究,未考虑横风风速在列车运行过程中的变化因素。然而,在不同横风风速下,高速列车过道岔极易出现安全性问题。因此对高速列车逆向过岔的气动性能及动力学性能、安全性、平稳性进行研究是很有必要的。

1 模型建立

1.1 列车空气动力学模型

高速列车过岔气动力学问题属于流体力学的范畴。在此情况下,高速列车横风作用下的空气动力学控制方程可描述为:

1) 连续性方程:

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

2) 动量方程:

$$\rho u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \left(\mu + \mu_t \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

3) 湍动能方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = & -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ & \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

4) 湍动能耗散率方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + c_1 \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \\ & \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: u_i 和 u_j 分别为列车在 i 和 j 方向上的周围流场速度; x_i , x_j 均为坐标的分量; ρ 为空气密度; μ 为空气动力粘度; p 为压力; $\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$ 为湍流黏性系数, k 为湍流动能, ε 为湍流耗散率, c_μ 为湍流常数; c_1 、 c_2 、 σ_k 均为经验常数。

当列车中部的横截面不变时,列车流场的基本特征与模型长短无关^[22],因此,本文采用“动-拖-动”三编组列车模拟仿真实中八编组的CRH380B型高速列车几何结构(图1)。其中三编组列车的头尾车长均为25.02 m,中间车长24.00 m,列车宽3.26 m,车高3.64 m。依据参考文献[23],为了提高运算效率,忽略车体外表面的细节凸起物,保证车体表面的光滑性,同时省去列车走行部(转向架)、车顶受电弓等特殊组件。



图1 高速列车几何模型

Fig. 1 Geometric model of high-speed train

计算区域如图2所示,计算域截面积应大于车体截面积的100倍。计算域总长度为400 m,总宽度为100 m,总高度为40 m,车底距离地面0.376 m。计算区域前端面 $ABCD$ 和左侧端面 $ABFE$ 均定义为速度入口,并根据不同的工况确定其速度大小

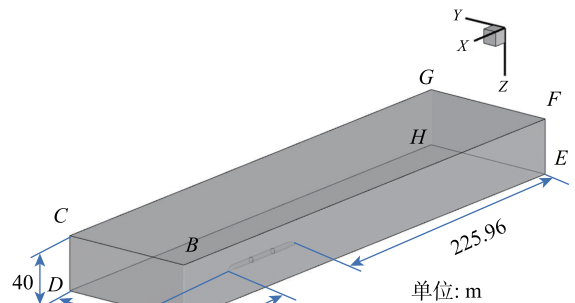


图2 横风工况下计算区域

Fig. 2 Calculation area under crosswind condition

和方向;计算域后端面 $EFGH$ 和右侧端面 $CDHG$ 皆为速度压力出口,将两端面相结合,且取一个标准大气压设定为出口边界压力;设定车体壁面为无滑移边界条件,以模拟车身与空气接触的摩擦作用;将计算域顶面设置为对称平面;地面 $AEHD$ 设置为无滑移动边界条件和移动壁面边界条件。

设置边界条件时,如图3所示,入口风采用合成风。其中列车以速度 U_{tr} 从右向左行驶;环境风以风向角为 α ,速度为 U_w 吹向车体侧面。当风向角为 90° ,即横风作用时,列车的运行状态最差。根据相对运动的原理,列车风速度为 $-U_{tr}$,来流方向为 $+X$ 方向。合成风速 U_s (由环境风速度与列车风速度矢量合成),与车身轴线呈 β ^[24-27]的夹角。

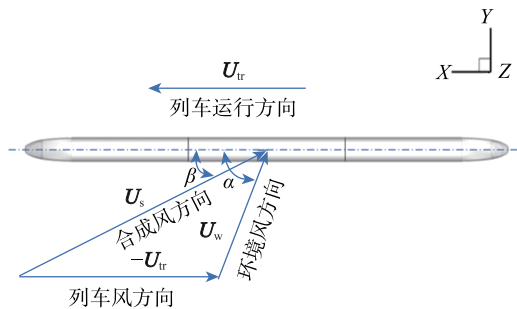


图3 风速合成示意图

Fig. 3 Wind speed synthesis diagram

对于通过岔区的高速列车,考虑直逆向和侧逆向两种情况,根据3种不同的横风风速工况,共设计6种不同的组合计算工况,如表1所示。

表1 工况计算参数表

Tab. 1 Working condition calculation parameter table

过岔方式	横风风速	列车运行速度/(km/h)
直逆向过岔	7级(15 m/s)	250
	8级(20 m/s)	250
	9级(25 m/s)	250
侧逆向过岔	7级(15 m/s)	80
	8级(20 m/s)	80
	9级(25 m/s)	80

1.2 高速列车多体系统动力学计算模型

参照文献[28]中的数值模拟的方式,建立车辆系统动力学模型。通过SIMPACK软件对CRH380B型动车编组中各部分进行建模,并完成“动-拖-动”式三节列车的编组。同时,在轨道线路上施加不平顺激励,完成构建横风-列车-道岔耦合的多体系统动力学模型。多体系统动力学模型包括CRH380B

型动车模型和拖车模型。其中CRH380B型动车模型包括车体和转向架两个主体部分,为了方便计算不考虑每个部件的弹性变形,均假设为刚体。为提高计算效率简化了车辆某些建模参数,主要由4个轮对、8个轴箱、2个构架、2套电机牵引装置、2个枕梁系统和1个车体组成,该动车模型共存在19个刚体,62个自由度。拖车动力学模型主要由4个轮对、8个轴箱、2个构架、2个枕梁系统和1个车体组成,该拖车模型共存在17个刚体。车体、构架、轮对等组件各有6个自由度,轴箱(转臂)等组件只有1个点头自由度,共计50个自由度。通过车钩连接已建立好的动车和拖车模型,搭建三编组列车动力学模型。整车模型如图4所示,共计含有174个自由度。通过约束、铰接、力元等将车辆的各个子部件进行装配,车轮踏面采用S1002CN,以18号高速道岔为研究对象。采用实测的武广线轨道谱作为轨道激励参考。



图4 列车编组动力学模型

Fig. 4 Train formation dynamics model

由于各个部件均视作刚体,为了评估在横风作用下高速列车的运行安全性,本文将作用于列车表面的分布压力向车体某一点简化,得到作用于车体某一点的集中载荷,并将此集中载荷作为外加载荷施加于三节车质心位置^[29]。

1.3 数值计算方法验证

田红旗等^[30]通过风洞试验计算了高速列车在运行速度为270 km/h和横风风速为15 m/s环境下的气动力,本文模拟相同运行条件计算列车气动力,以验证本文模型的可靠性,计算结果如表2所示。由表2可知:数值计算与风洞试验结果的相对误差均在 $\pm 10\%$ 以内,证明模型与计算方法可用于

表2 数值模拟与风洞试验结果对比

Tab. 2 Comparison between numerical simulation and wind tunnel experiment results

列车气动力		风洞试验/kN	数值计算/kN	相对误差/%
头车	侧向力	36.1	33.3	-7.76
	升力	19.7	20.9	6.09
中间车	侧向力	16.5	15.1	-8.48
	升力	28.2	25.8	-8.51

模拟列车的气动特性,计算结果满足工程要求。

2 结果分析

2.1 高速列车表面压力分布

基于所建立的高速列车过岔气动力学模型开展了不同工况影响下的模拟仿真计算。图5和图6分别展示了9级横风作用下高速列车250 km/h直逆向过岔时的列车头车和尾车车体表面压力分布云图。如图5所示,当高速列车在运行过程中,受横风影响时头车表面形成的最大正压区或称之为驻点的区域不再是头车的车头鼻端处。在横风与列车风的共同作用下,最大正压区偏向于车体表面迎风

侧。这种现象将导致高速列车在运行过程中,头车承受更大的横向气动力和气动扭矩,更容易发生脱轨侧翻的情况。如图6所示,尾车表面压力分布特征与头车正好相反,这是由于横风气流流经车尾时随着车体截面积的减小、车身表面弧度的增大,气流流经尾车车头鼻端处时流速突然增大车体表面压力匀速减小,使得车体迎风侧逐渐形成负压区;同时在横风的绕流作用下,尾车背风侧形成了一系列漩涡,直接作用于尾车车体表面,增大车体表面压力,形成了正压区。

图7展示了9级横风作用下高速列车250 km/h直逆向过岔时的列车整车车身两侧压力分布云图

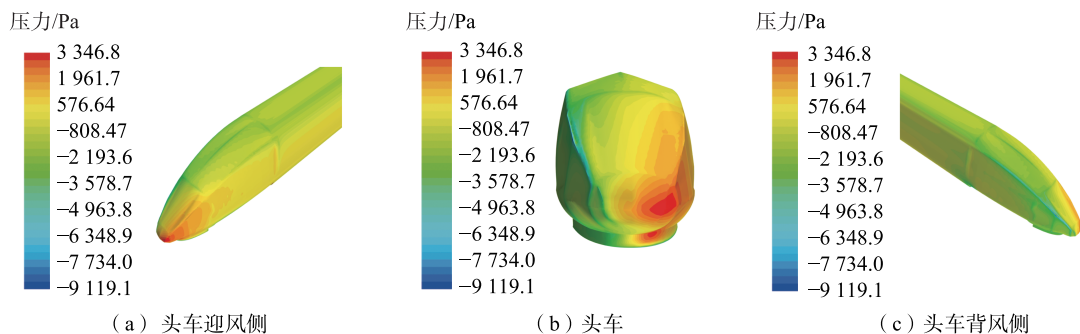


图5 高速列车头车表面压力分布云图

Fig. 5 The surface pressure distribution cloud diagram of the head car of the high-speed train

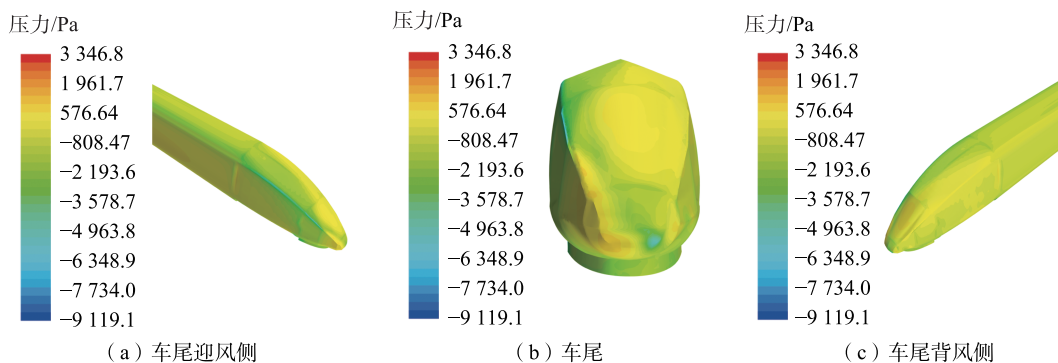


图6 高速列车尾车表面压力分布云图

Fig. 6 High-speed train tail car surface pressure distribution cloud map

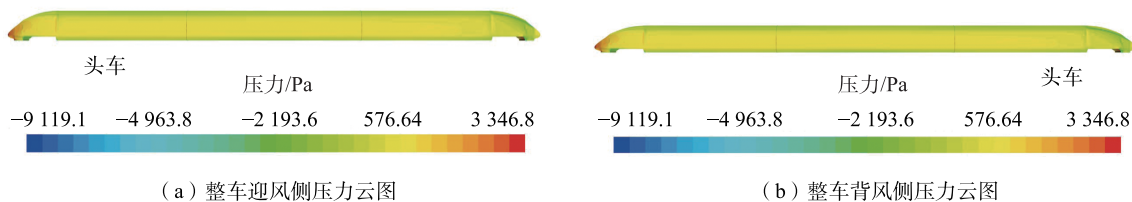


图7 列车车身两侧压力云图

Fig. 7 Pressure cloud on both sides of the train body

图。如图7(a)所示,在横风作用下,横向气流绕动车体时,在列车迎风面侧壁的作用下,头车和中间车迎风侧大部分区域为正压,仅在车尾部分出现负压,从列车侧面到顶面的过渡圆弧面上正压迅速减小并变为负压。图7(b)中列车背风侧由于分离流的产生及一系列漩涡的脱落,基本为负压,仅在车尾部分区域出现正压。由于列车两侧流场的不对称,使得车辆受到较大的横向气动力和气动力矩,且头车和尾车受到相反的气动力和气动力矩作用。

在横风作用下,高速列车周围两侧的外流场呈不对称分布,最大正压区在横风的影响下偏向了车头的迎风侧;头车表面压力受横风作用影响最大,相比于背风侧,迎风侧的压力在横风作用下显著提高,在头车两侧形成明显的压差,使得头车在运行过程中承受更大的侧力和力矩,更容易发生脱轨侧翻的情况。与此相比,列车车尾迎风侧形成的负压区域导致了列车车尾所受横向力的方向与头车相反。随着横风作用下气流的扰动,背风侧一系列漩涡的形成,使得列车背风侧表面纵向压力逐渐从负压增加到正压,在其表面出现了大面积的正压区域,从而使得车体两侧的压力趋向平衡。

2.2 横风下高速列车过岔气动性能分析

高速列车过岔通常分为直逆向过岔和侧逆向过岔。在直逆向过岔情况下,列车以正向速度通过道岔,即列车行驶方向与道岔直线方向一致。这种情况下,列车能够以较高的速度通过道岔,通常不会产生较大的冲击力和振动,对列车的运行稳定性和安全性影响较小。而在侧逆向过岔情况下,列车以侧向速度通过道岔,即列车行驶方向与道岔直线方向垂直。这种情况下,列车在通过道岔时会产生较大的瞬时冲击力和振动,因为车轮需要从直线轨道转向侧线轨道,转向过程中会产生较高的轮轨力,可能导致列车及其部件的振动加剧,甚至有可能增加脱轨的风险。为研究不同横风条件对列车气动性能的影响,在设计的计算工况下,分别模拟高速列车在遭受7~9级环境风影响下通过直逆向和侧逆向道岔。

图8为车速250 km/h时,列车直逆向通过道岔时气动载荷随风速变化的规律图。从图8(a)可以看出在模拟直逆向过岔过程中,整车、头车和中间车所受的气动侧力随着风速和列车运行速度的增加而增大,且头车的气动侧力都是最大的;当列车

行驶速度为250 km/h时,无论横风风速如何变化,尾车的气动侧力始终呈负值,表示侧力方向与横风方向相反。从图8(b)可以看出头车在列车运行速度为250 km/h时,无论横风风速如何,头车所受的气动升力均为负值,即向上的升力;尾车当风速大于15 m/s时,所受的数值均为负值,即向上的升力。从图8(c)可以看出当列车运行速度为250 km/h时,增加横风的风速,整车、头车和中间车的侧滚力矩也会随之增加;其中,头车所受的侧滚力矩最大,而与头车相比,尾车所受侧滚力矩的变化较小。

图9为车速80 km/h时,列车侧逆向通过道岔时气动载荷随风速变化的规律图。从图9(a)可以看出在模拟侧逆向过岔的过程中,由于列车在侧逆向过岔时的速度并不高,因此在相同的车速下,随着风速的增加,整车、头车、中间车以及尾车所受的气动侧力逐渐增大,且均为正值,表示侧力的方向与横风方向相同;值得注意的是,头车所受的气动侧力是最大的。从图9(b)可以看出在大多数情况下,由于侧逆向过岔中列车的运行速度并不高,头车所受的升力呈正值(即升力方向竖直向下),而尾车则呈负值(即升力方向竖直向上),这主要和升力的来源有关,升力的主要来源为头车和尾车流线型部分上下表面的压力差,头车上表面受到较大的正压作用,因此头车主要受向下的气动升力作用;而尾流对尾车流线型有“拖曳”的作用,导致尾车主要受到向上的气动升力作用。从图9(c)可以看出当列车运行速度为80 km/h时,增加横风的风速,整车及三节车的侧滚力矩也会随之增加;其中,头车所受的侧滚力矩最大,与头车相比,尾车所受侧滚力矩的变化较小。

通过动力学仿真及对试验数据的综合分析,发现当列车达速逆向过岔时,动车组的头车、中间车和尾车都会随横风风速的变化而变化,且影响程度不同。一般来说,横风对头车的影响最大,中车次之,对尾车的影响略小。

2.3 横风激扰下达速过岔安全性分析

我国《高速动车组整车试验规范》(铁运[2008]28号)规定,对于最高运行速度超过200 km/h的电动车组,轮轨垂向力的最大限值为170 kN。在欧美地区通常根据试验结果将横向力限制在轴重的0.4倍,以确保轨道的稳定性和安全性,日本在新干线铁路上也做出同样的规定将横向力最大值限制为

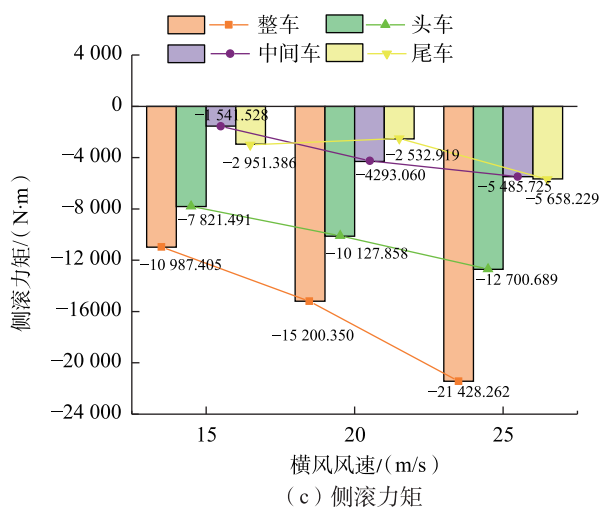
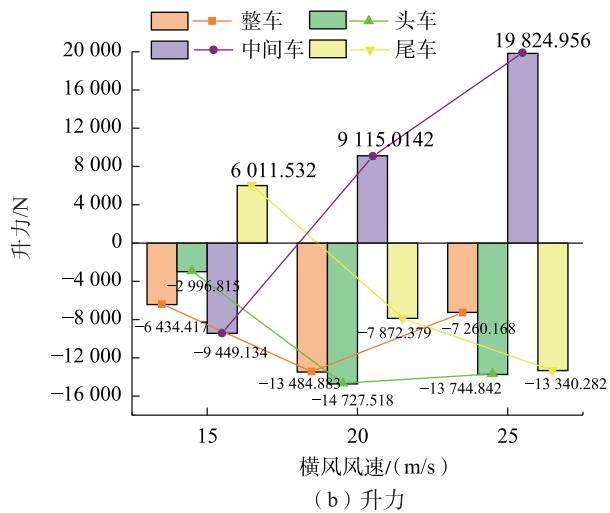
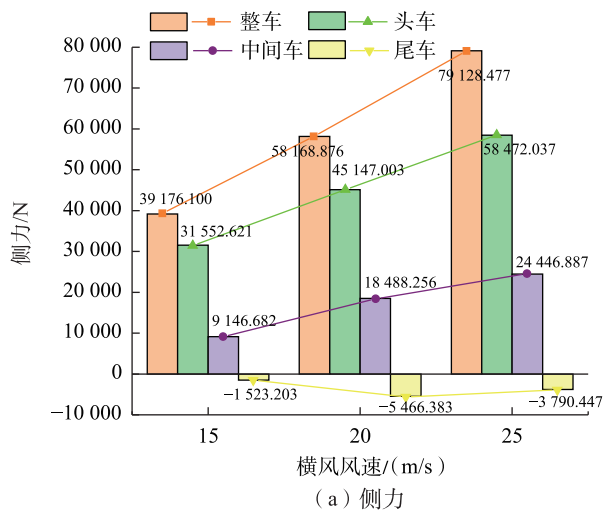


图8 高速列车达速直逆向过岔气动载荷随风速的变化规律

Fig. 8 The variation law of aerodynamic load of high-speed train passing straight and reverse turnout with wind speed

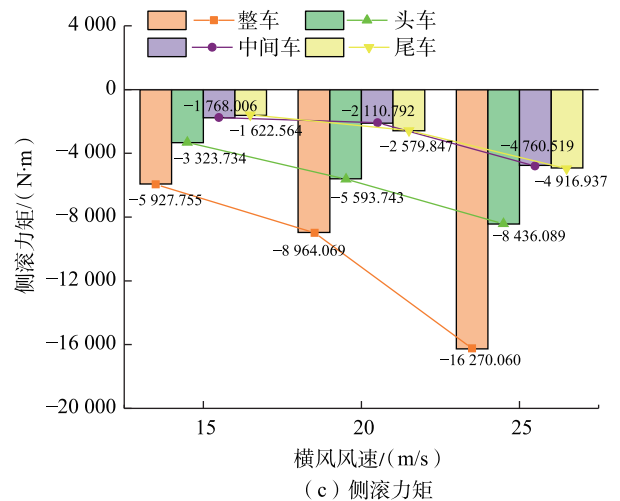
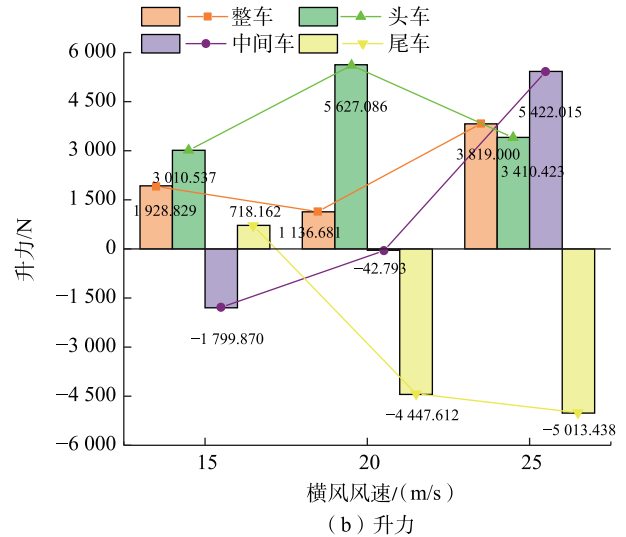
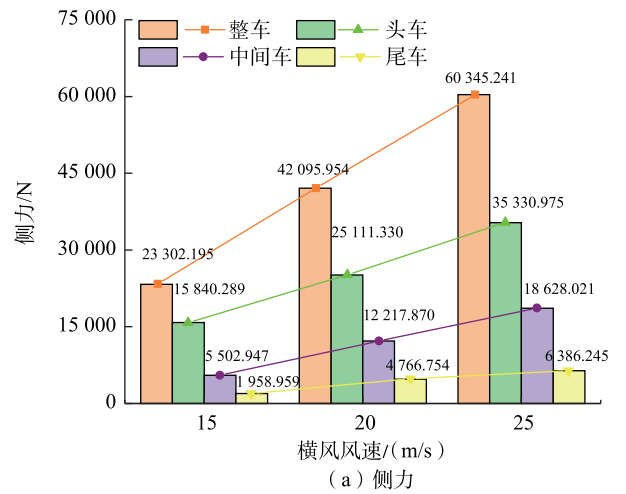


图9 高速列车达速侧逆向过岔气动载荷随风速的变化规律

Fig. 9 The variation law of aerodynamic load of high-speed train passing through the turnout on the speed side with wind speed

0.4倍的轴重。本文采用的CRH380B高速列车的最大轴重为17 t,可以计算得出轮轨横向力限值为68 kN;根据我国的最新标准《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》(GB/T 5599—2019)脱轨系数限值为0.8,轮重减载率限值为0.8。选取上述限值作为本节高速列车直逆向过岔的动力学安全指标。

图10为车速250 km/h时,列车直逆向通过道岔时各安全性指标随风速的变化规律。从图10中可以看出:在横风作用下,高速列车直逆向过岔时,轮重减载率是4种列车动力学性能评价指标中,最先出现超限的。在列车车速达到250 km/h,横风风速达到20 m/s时,头车轮重减载率达到了0.878,超过了0.8的安全限值。随后出现超限现象的是轮轨垂向力和轮轨横向力,均在列车车速达到250 km/h,横风风速达到25 m/s时,头车最大轮轨垂向力和最大轮轨横向力超限。相比较下,脱轨系数指标在安

全性评定中最为迟钝。

因此,在对横风作用下列车直逆向岔区行车安全运行速度进行评估时,采用轮重减载率作为最安全的评估标准。从图10可以得出,在高速列车直逆向过岔中,所受横风风速不超过15 m/s时,高速列车可达速过岔,即以250 km/h的速度通过直逆向道岔;当所受横风风速达到20 m/s,甚至更大风速时,即在横风风速达到8级以上时,高速列车不宜达速过岔,应提前减速过岔。由轮重减载率指标所选出的各横风风速下列车直逆向过岔的安全速度限值,同样满足于其他3种列车动力学性能评价指标。

图11为车速80 km/h时,列车侧逆向通过道岔时各安全性指标随风速的变化规律。高速列车侧逆向过岔时的动力学安全指标,较直逆向过岔,轮重减载率指标的安全限值由0.8变为了0.65,其余3个安全指标限值不变。从图11中可以看出:在横风作用下,高速列车侧逆向过岔时,当列车车速达到

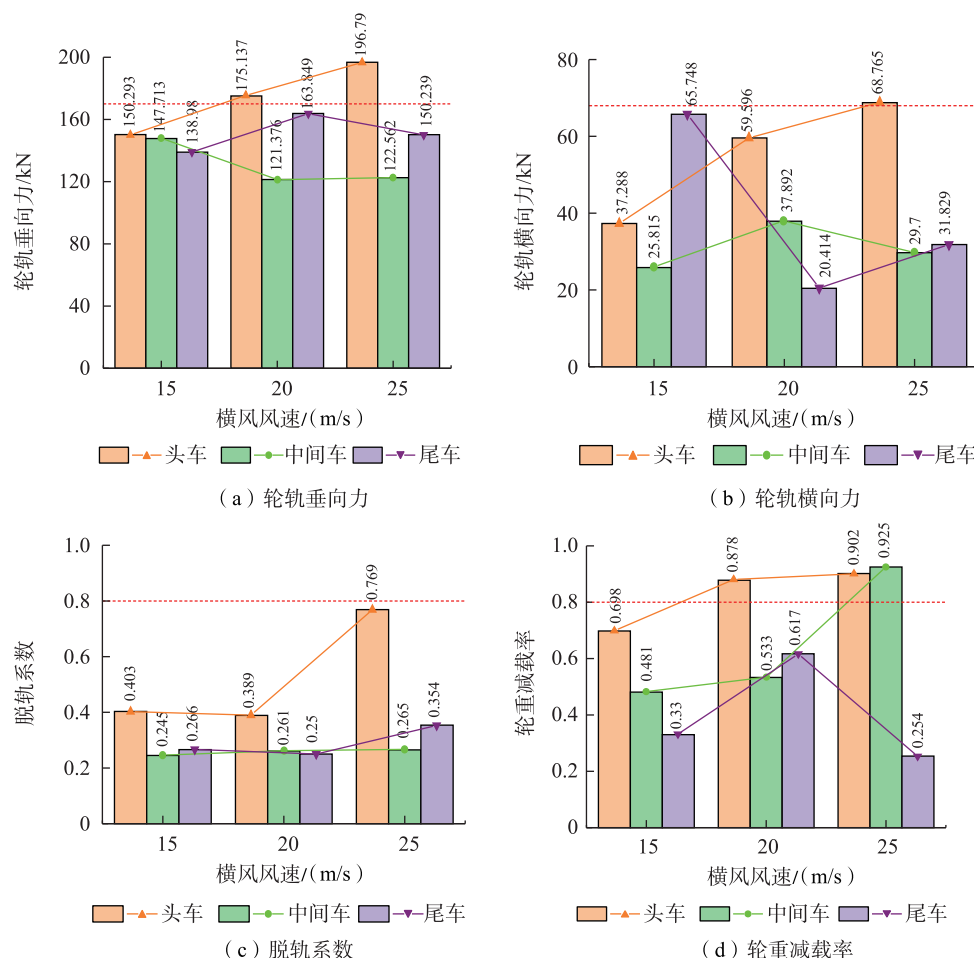


图10 直逆向过岔时不同安全性指标随风速的变化规律

Fig. 10 The variation law of different safety indexes with wind speed when crossing straight and reverse turnouts

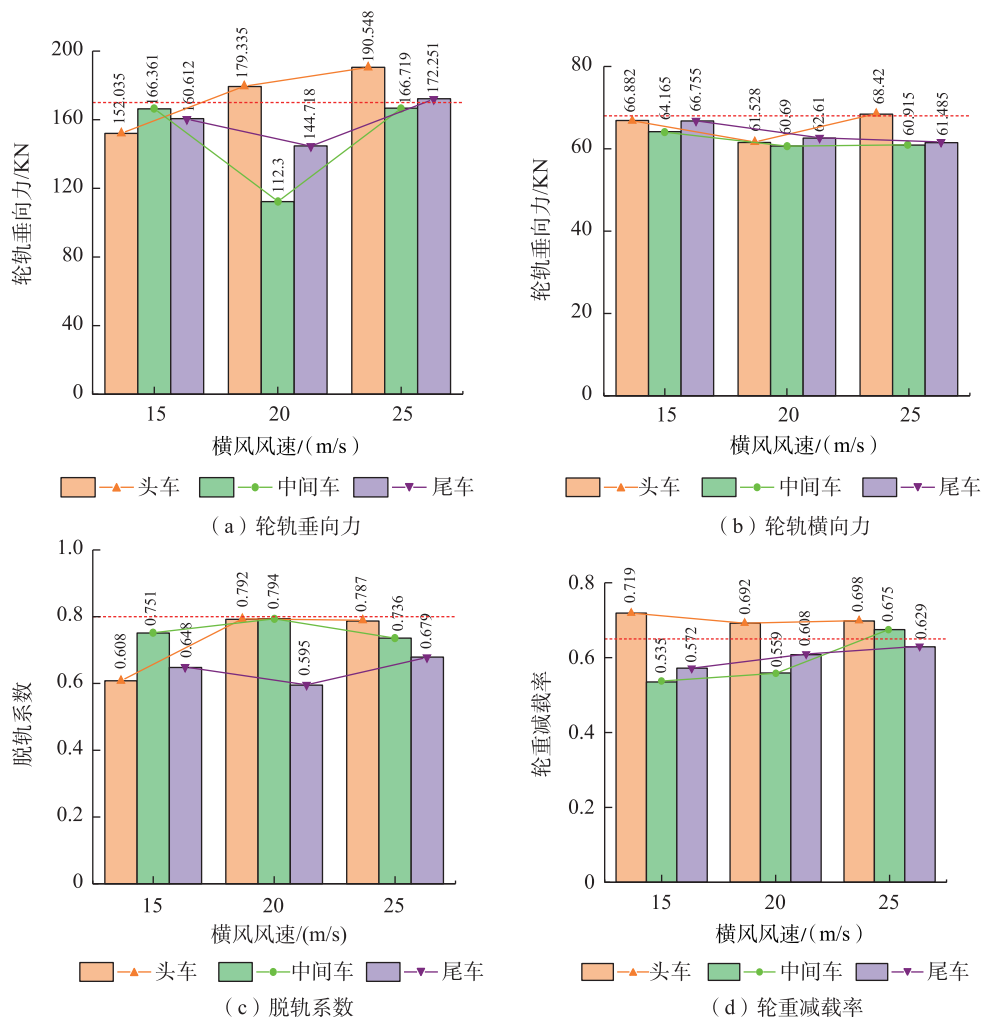


图 11 侧逆向过岔时不同安全性指标随风速的变化规律

Fig. 11 The variation law of different safety indexes with wind speed when the side passes through the fork reversely

80 km/h,横风风速达到 15 m/s 时,头车轮重减载率超限。相比较下,脱轨系数指标在安全性评定中最为迟钝。

因此,在对横风作用下列车侧逆向岔区行车安全运行速度进行评估时,采用轮重减载率作为最安全的评估标准。从图 11 可以得出,在高速列车侧逆向过岔中,受道岔线路曲率的影响,列车轮重减载率指标更为敏感易超限;为保证高速列车横风作用下侧逆向过岔安全性,高速列车在所选 3 个横风风速下皆不宜达速过岔,即在横风影响下,高速列车侧逆向过岔速度应小于 80 km/h。由轮重减载率指标所选出的各横风风速下列车侧逆向过岔的安全速度限值,同样满足于其他 3 种列车动力学性能评价指标。

综上所述,通过高速列车在横风作用下过岔性

能的评估研究分析,发现横风作用下,直逆向过岔和侧逆向过岔中,头车的列车动力学性能均是最差的。在高速列车直逆向过岔中,所受横风风速不超过 15 m/s 时,4 种列车动力学性能评价指标都在限值内,高速列车可以以 250 km/h 的速度通过直逆向道岔;当所受横风风速达到 20 m/s,头车轮重减载率达到了 0.878,超过了 0.8 的安全限值,高速列车不宜达速过岔,应提前减速过岔;在高速列车侧逆向过岔中,当列车车速达到 80 km/h,横风风速达到 15 m/s 时,头车轮重减载率达到 0.719,超过了 0.65 的安全限值,为保证高速列车横风作用下侧逆向过岔安全性,高速列车在所选 3 个横风风速下皆不宜达速过岔,即在横风影响下,高速列车侧逆向过岔速度应小于 80 km/h。

考查所有计算工况下列车的安全性指标的最

大值,并参考《高速动车组整车试验规范》(铁运[2008]28号)确定出高速列车安全运行的最高允许风速,如图12所示。

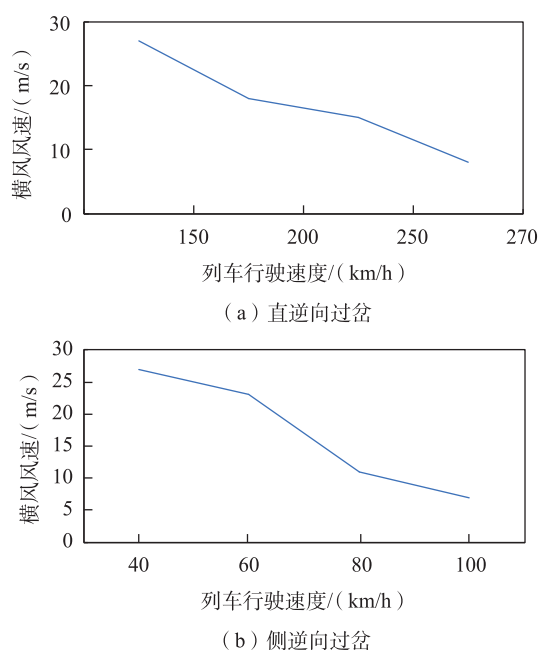


图12 高速列车逆向过岔运行安全域

Fig. 12 Safety domain of high-speed train running in reverse crossing

3 结论

本文在对高速列车横风作用下逆向过岔运行安全域的研究中,基于流体力学和多体动力学软件,建立过岔流域和CRH380B编组模型,采用仿真软件联合仿真的方法计算高速列车在横风作用下通过道岔时的安全性,得到以下结论。

1) 横风作用下高速列车逆向过岔时,整车的压力峰值点在头车鼻尖处且向迎风侧偏移使得头车在运行过程中承受更大的侧力和力矩,更容易发生脱轨侧翻的情况;尾车迎风侧出现负压区,且尾车在背风侧形成一系列漩涡。

2) 高速列车达速过岔时,在横风的作用下,列车头车的气动特性和气动载荷受横风风速的影响最大。

3) 在高速列车直逆向过岔中,所受横风风速不超过15 m/s时,高速列车可达速过岔,即以250 km/h的速度通过直逆向道岔;当所受横风风速达到20 m/s及以上时,高速列车不宜达速过岔,应提前减速过岔。

4) 在高速列车侧逆向过岔中,当横风风速达到7级及以上时,高速列车侧逆向过岔速度应小于

80 km/h,不宜达速过岔。

5) 本文计算路况仅仅只考虑了直线轨道情况,在未来的研究中,将增加考虑曲线半径、坡度等平纵断面等情况进行研究。

参考文献:

- [1] HOPPMANN U, KOENIG S, TIELKES T, et al. A short-term strong wind prediction model for railway application: design and verification[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(10): 1127-1134.
- [2] 田红旗. 中国恶劣风环境下铁路安全行车研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(6): 2435-2443.
TIAN H Q. Research progress in railway safety under strong wind condition in China[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(6): 2435-2443.
- [3] MOHEBBI M, ALI REZVANI M. Analysis of the effects of lateral wind on a high speed train on a double routed railway track with porous shelters[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2019, 184: 116-127.
- [4] MUÑOZ P J, GARCÍA J, CRESPO M A. Multi-objective aerodynamic optimization of high-speed trains in tunnels[C]//Las Palmas: 10th International Conference on Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial and Societal Problems, 2013.
- [5] MUÑOZ P J, GARCÍA J. Aerodynamic drag optimization of a high-speed train[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 204: 104215.
- [6] 李明, 刘楠, 王大海. 500 km/h 高速列车新头型设计及气动性能研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(18): 142-149.
LI M, LIU N, WANG D H. New head-type design and aerodynamic performance study of 500 km/h high-speed EMU[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(18): 142-149.
- [7] 于梦阁, 李海庆, 刘加利, 等. 强风雨环境下高速列车空气动力学性能研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(4): 185-192.
YU M G, LI H Q, LIU J L, et al. Study on the aerodynamic performance of the high-speed train under strong wind and rainfall environment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(4): 185-192.
- [8] 苗秀娟, 黄瑞鹏, 何侃, 等. 横风下路堤高度对高速列车

- 气动特性影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1081-1089.
- MIAO X J, HUANG R P, HE K, et al. Influence of embankment height on aerodynamic performance of high-speed trains under crosswind[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(5): 1081-1089.
- [9] 王磊, 骆建军, 李飞龙. 横风下高速列车突入隧道瞬变压力及列车风[J]. 振动与冲击, 2022, 41(3): 27-36.
- WANG L, LUO J J, LI F L. Transient pressure and train wind during high-speed train entering a tunnel under crosswind[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(3): 27-36.
- [10] 梁习锋, 邹涌, 刘宏康. 横风下列车平顺化对气动特性的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(9): 2498-2506.
- LIANG X F, ZOU Y, LIU H K. Effect of train smoothing on the aerodynamic characteristic under crosswind[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(9): 2498-2506.
- [11] 朱海燕, 王宇豪, 朱志和, 等. 横风下复线路堤高度对高速列车气动性能的影响[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(6): 181-193.
- ZHU H Y, WANG Y H, ZHU Z H, et al. Influence of double-track embankment height on aerodynamic performance of high-speed train under crosswind[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(6): 181-193.
- [12] XIA Y T, LIU T H, LI W H, et al. Numerical comparisons of the aerodynamic performances of wind-tunnel train models with different inter-carriage gap spacings under crosswind[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 214: 104680.
- [13] MONTENEGRO P A, CARVALHO H, RIBEIRO D, et al. Assessment of train running safety on bridges: a literature review[J]. Engineering Structures, 2021, 241: 112425.
- [14] SUN Z, HASHMI S A, DAI H Y, et al. Safety of a high-speed train passing by a windbreak breach under different wind speeds[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2022, 236(8): 899-906.
- [15] DIEDRICHS B. Aerodynamic calculations of crosswind stability of a high-speed train using control volumes of arbitrary polyhedral shape[C]//Milano: Proceedings of BBAA VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, 2008.
- [16] DIEDRICHS B. Aerodynamic crosswind stability of a regional train model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2010, 224(6): 580-591.
- [17] LIU D R, ZHOU W, ZHANG L, et al. Momentary discomfort of high-speed trains passing through complex terrain sections under strong wind conditions[J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 58(9): 1428-1450.
- [18] LIU D R, WANG T T, LIANG X F, et al. High-speed train overturning safety under varying wind speed conditions[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 198: 104111.
- [19] 张田, 张楠, 王少钦, 等. 基于可靠度理论的桥上列车横风安全性分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(17): 226-231.
- ZHANG T, ZHANG N, WANG S Q, et al. Crosswind safety analysis for a train running on a bridge based on reliability theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(17): 226-231.
- [20] 刘荣, 姚松, 许娇娥. 侧风下高速列车临界倾覆风速研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(11): 2643-2650.
- LIU R, YAO S, XU J E. Study on critical overturning wind speed of high-speed train under cross wind[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(11): 2643-2650.
- [21] 谢红太. 强侧风对时速350 km高速列车气动性能影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(3): 7-15.
- XIE H T. Influence of strong crosswind on aerodynamic performance of high speed train at the speed of 350 km/h[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(3): 7-15.
- [22] KHIER W, BREUER M, DURST F. Flow structure around trains under side wind conditions: a numerical study[J]. Computers & Fluids, 2000, 29(2): 179-195.
- [23] 于梦阁, 张继业, 张卫华. 平地上高速列车的风致安全特性[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(6): 989-995.
- YU M G, ZHANG J Y, ZHANG W H. Wind-induced security of high-speed trains on the ground[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(6): 989-995.
- [24] 李军, 张云飞, 高健博. 遭遇横风时高墩高架上的地铁车辆运行安全性[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 421-428.
- LI J, ZHANG Y F, GAO J B. Running safety of metro vehicle over high-pier viaduct under crosswind[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2019, 40(4):

- 421-428.
- [25] 王若平, 王雪钊. 车速及偏航角对汽车侧窗玻璃表面风噪声的影响[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(8): 22-29.
- WANG R P, WANG X Z. Influence of vehicle speed and yaw angle on wind noise of vehicle side window glass surface[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(8): 22-29.
- [26] CAI C S, HU J X, CHEN S R, et al. A coupled wind-vehicle-bridge system and its applications: a review[J]. Wind and Structures, 2015, 20(2): 117-142.
- [27] NIU J Q, ZHOU D, LIU T H, et al. Numerical simulation of aerodynamic performance of a couple multiple units high-speed train[J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(5): 681-703.
- [28] 于梦阁, 刘加利, 李田, 等. 强风雨环境下高速列车运行安全特性[J]. 机械工程学报, 2021, 57(20): 172-180.
- YU M G, LIU J L, LI T, et al. Operational safety characteristics of high-speed train under strong wind and rainfall environment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(20): 172-180.
- [29] 翟建平, 张继业, 李田. 横风下高速列车动力学参数的多目标优化[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(3): 80-88.
- ZHAI J P, ZHANG J Y, LI T. Multi-objective optimization for dynamics parameters of high-speed trains under side wind[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(3): 80-88.
- [30] 田红旗, 高广军. 270km·h⁻¹高速列车气动力性能研究[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(2): 14-18.
- TIAN H Q, GAO G J. The analysis and evaluation on the aerodynamic behavior of 270 km·h⁻¹ high-speed train[J]. China Railway Science, 2003, 24(2): 14-18.



第一作者: 林凤涛(1977—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 江西省“双千计划”科技创新领军人才, 江西省主要学科学术和技术带头人, 研究方向为列车安全技术等。E-mail: ecjtu411@163.com。



通信作者: 谭荣凯(1990—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为轨道车辆关键部件服役性能。E-mail: tanrongkai7@163.com。

(责任编辑: 吴海燕)