

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.049

侧风对低地板有轨电车安全性的影响研究

王铁成¹, 贾尚帅¹, 高众昆¹, 徐建波¹, 霍文彪¹, 姚忻¹, 陈建政², 池茂儒²

(1. 中车唐山机车车辆有限公司, 河北省轨道交通车辆高能级技术创新中心, 河北 唐山 063035;

2. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘 要:为研究侧风对低地板有轨电车的安全性影响, 该文以某型 70% 低地板有轨电车为研究对象, 阐述有轨电车的模块铰接关系, 在 SIMPACK 软件中建立有轨电车系统动力学模型。介绍 EN14067 标准规定的帽子风计算方法, 研究直线工况下有轨电车的平稳性、安全性与曲线工况下安全性的变化规律, 为侧风环境中有轨电车安全运营提供理论依据。研究结果表明: 侧风对横向平稳性、舒适度和倾覆系数影响较大。侧风风速越高, 各动力学性能指标越差。在风速小于 20 m/s 时, 该型有轨电车能够以最高运行速度 90 km/h 在直线正常运行。但是通过曲线时, 需要及时采取限速、停运等措施以确保行车安全。

关键词:有轨电车; 侧风; 安全性; 运行速度

中图分类号:U260.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)03-0249-07

Research on the Influence of Crosswind on the Safety of Low-Floor Trams

WANG Tiecheng¹, JIA Shangshuai¹, GAO Zhongkun¹, XU Jianbo¹, HUO Wenbiao¹, YAO Xin¹, CHEN Jianzheng², CHI Maoru²

(1. CRRC Tangshan Co., Ltd., Hebei High-level Technology Innovation Center for Rail Vehicles, Tangshan 063035, China;

2. State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To investigate the influence of crosswind on the safety of low-floor trams, a 70% low-floor tram model is taken as the research object. The articulated relationships among tram modules are described, and a dynamic model of the tram system is established in SIMPACK software. The calculation method for the "hat-shaped" wind profile specified in the EN 14067 standard is introduced. The variations in ride stability, safety under straight-line conditions, and safety under curved conditions are studied, providing a theoretical basis for the safe operation of trams in crosswind environments. The results show that crosswind has a significant impact on lateral ride stability, ride comfort, and the overturning coefficient. Higher crosswind speeds lead to poorer performance across all dynamic indices. When the wind speed is below 20 m/s, the tram can operate normally at its maximum speed of 90 km/h on straight tracks. However, when passing through curves, measures such as speed restrictions or service suspension should be promptly implemented to ensure operational safety.

Keywords: tram; crosswind; safety; operating speed

0 引言

低地板有轨电车是一种介于公交汽车与地铁车辆之间的新型城市轨道交通车辆, 具有灵活性强、维护容易、建设周期短、综合造价与运营成本较低等优势。有轨电车能够与汽车等车辆共享路权, 对城市建筑物影响较小, 在中小城市可以作为骨干公共交通系统或者旅游观光系统^[1-3]。长期以来低地板有轨电车的运行速度较低, 同时城市的风速通常较小, 因此有轨电车的侧风安全性问题显得不是特别严重^[4]。但随着国内铁路系统的

发展, 人们对于公共交通工具速度与舒适性的要求越来越高, 有轨电车的运行速度也随之提高; 而在一些沿海城市^[5]的强风环境下, 有轨电车的动力学性能受侧风影响的问题也日益突出。

目前, 大多研究都是针对高速列车的侧风安全性进行研究。刘静远^[6]结合空气动力学与系统动力学建立 3 节车编组列车模型。分析结果表明风载作用下气动安全性头车最大、尾车次之, 中间车最小, 且列车在 90° 风向角时侧风安全性问题最为严重。郭文华等^[7]建立车-桥耦合模型进行振动分析, 结果表明轮质量减载率是控制列车车

第一作者简介:王铁成(1986—), 男, 辽宁铁岭人, 正高级工程师, 博士研究生, 研究方向为轨道交通车辆, 2273932087@qq.com。

通信作者简介:徐建波(1991—), 男, 内蒙古自治区兴和人, 高级工程师, 本科, 研究方向为机车车辆, xujianbo.ts@crrecg.cc。

速阈值的关键指标。任尊松等^[8]研究了强侧风对高速列车运行安全性的影响,提出了不同侧风风速下的最高安全运行速度。公衍军等^[9]考虑5种风载荷对动车组侧风工况下曲线安全性进行了分析。HOPPMANN等^[10]对于列车通过桥梁和路堤的情况进行安全性分析,指出质量较轻的列车在风速大于25 m/s时,列车更有可能出现安全性问题。AITA等^[11]研究分析了TGC车辆的表面压力与周围流场。这些研究的对象都是高速列车,而有轨电车特殊的模块化设计、铰接结构以及悬挂参数都与高速列车有着很大的区别,因此有必要研究侧风对低地板有轨电车安全性的影响。

本文以某70%低地板有轨电车为研究对象,基于多体动力学建立动力学仿真模型,计算侧风作用下有轨电车动力学性能,提出不同侧风风速下有轨电车限速要求,为在侧风环境下有轨电车的安全运行提供参考。

1 有轨电车动力学模型建立

有轨电车通常由固定的编组单元运行,某地区的有轨电车采用70%低地板结构,正常运行时为两列车连挂运行,每列车由三模块组成,前后对称,每列车三模块编组示意图如图1所示。

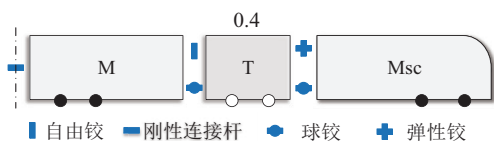


图1 每列车三模块编组示意图

Msc模块、T模块与M模块组成一列车,每模块设置1台转向架,Msc模块为带有简易司机室和1台动力转向架的车辆模块,T模块为带有1台无动力转向架及受电弓的车辆模块,M模块为带有1台动力转向架的车辆模块。Msc模块与T模块之间通过球铰与弹性铰相连,上部的弹性铰限制了两模块纵向、横向的运动,使得两模块之间可以发生摇头运动,以便于通过曲线。T模块与M模块之间通过球铰与自由铰相连,上部的自由铰限制了两模块横向自由度,使得两模块之间可以发生点头、摇头运动。两列车之间由刚性连接杆连接,对动力学性能影响基本可以忽略,因此在建模时只考虑三模块编组,所建立三模块有轨电车系统动力学模型如图2所示。

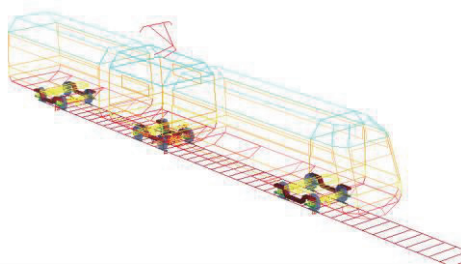


图2 三模块有轨电车系统动力学模型

为了增加模型的准确性,利用SIMPACK软件建模时考虑了牵引拉杆、二系横向止挡、二系垂向止挡、二系垂向减振器、二系横向减振器,每模块之间设有2个车间纵向减振器,动车转向架设有旁承。有轨电车采用新踏面与54E1工字轨匹配,等效锥度为0.08,模型中施加德国高干扰轨道不平顺激励,功率谱密度如图3所示。采用FASTSIM算法计算轮轨蠕滑力,轮轨摩擦因数为0.4。

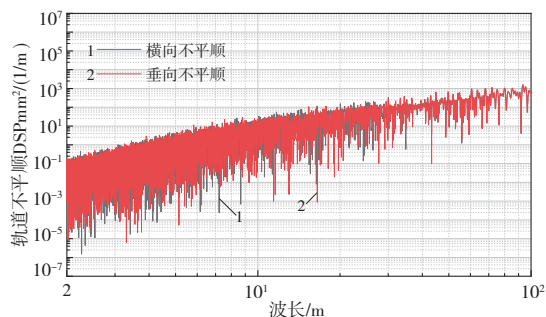


图3 轨道不平顺功率谱密度

2 侧风安全性计算方法

侧风施加EN14067—6《铁路应用—空气动力学—第6部分:侧风评估的要求与试验程序》^[12]规定的瞬态帽子风,侧风加载曲线如图4所示。

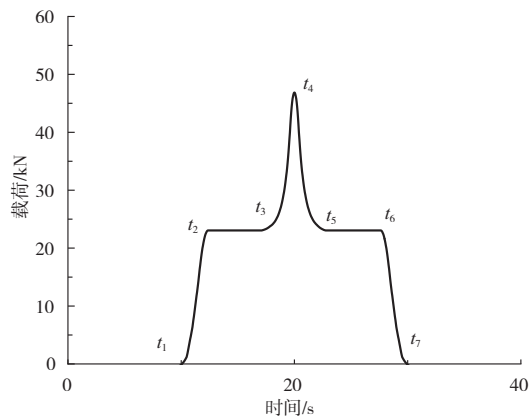


图4 侧风加载曲线图

按照侧风加载时间 $t_1 \sim t_7$ 分为无侧风阶段 ($0 \sim t_1$)、平滑加载阶段 ($t_1 \sim t_2$)、平均风阶段 ($t_2 \sim t_3$)、帽子风作用阶段 ($t_3 \sim t_5$)、平均风作用阶段 ($t_5 \sim t_6$) 与卸载阶段 ($t_6 \sim t_7$)。

作用在车体上的风载分为横向力 F_y 、升力 F_z 、侧滚力矩 M_x 、点头力矩 M_y 与摇头力矩 M_z , 这些力与力矩的大小和风速、车速等有关, 其计算公式为

$$F_i = \frac{1}{2} \rho A c_{Fi} \beta v_a^2 \quad (1)$$

$$M_i = \frac{1}{2} \rho A d c_{Mi} \beta v_a^2 \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度; A 为投影面积; c_{Fi} 、 c_{Mi} 分别为气动力、气动力矩系数; d 为轨面距风载作用点的距离; v_a 为合成风速; β 为合成风向角; $i=x, y, z$ 。

合成风速与合成风向角计算公式为

$$v_a^2 = (v_{tr} + v_w \cos \beta_w)^2 + (v_w \sin \beta_w)^2 \quad (3)$$

$$\beta = \arctan \left(\frac{v_w \cdot \sin \beta_w}{v_{tr} + v_w \cdot \cos \beta_w} \right) \quad (4)$$

式中: v_w 为风速; v_{tr} 为车速; β_w 为风速与列车速之间的夹角。 v_w 、 v_{tr} 与 v_a 之间的关系如图 5 所示。

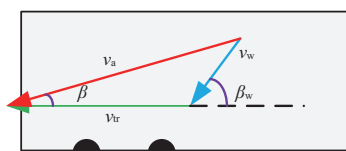


图 5 合成风速示意图

按照式(1)一式(4)计算风载荷, 然后通过 SIMPACK 软件的 Input Functions 模块生成 Excitations 激励, 再以软件自带的 u-Vector 输入到侧风力元。侧风力元为 93 号力元, 作用在车体上, 施加 5 个方向的风载荷。

3 有轨电车侧风动力学性能

通常要评定车辆系统的动力学性能主要包含稳定性、平稳性与安全性 3 个方面^[13-14]。而在侧风作用下, 需要重点关注的动力学性能指标有直线平稳性、直线安全性与曲线安全性。其中, 安全性指标有轮轴横向力、轮轨垂向力、轮质量减载率、脱轨系数与倾覆系数。空气动力学计算表明: 一般头尾车受到的风载荷最大、中间车受到的风载荷较小, 考虑到有轨电车三模块长度较短, 在三模块车体上施加相同的风载荷, 以计算的力学性能最差的模块为例给出结果。计算时设为空车

工况, 侧风角度取 90° , 这种情况下的侧风安全性最差。

3.1 直线动力学性能

1) 直线侧风平稳性

平稳性是评价车辆运行品质的关键指标之一, 通过设置不同侧风速度进行动力学仿真计算来分析其对低地板有轨电车平稳性指标值的影响。

有轨电车在直线运行时, 无风工况与不同风速工况 (5 m/s、8 m/s、12 m/s、15 m/s、20 m/s) 的平稳性指标如图 6—图 8 所示, 其中横线为对应指标的限值。从图中可以看出, 随着车速的提高, 不同风速下横向平稳性、舒适度的差别越来越大, 而垂向平稳性的变化较小, 这是因为帽子风载荷施加的横向载荷大于垂向载荷; 横向平稳性、垂向平稳性与舒适度随着风速、车速的提高而增大。其中, 风速 20 m/s 时, 车速必须小于 80 km/h 才能满足横向平稳性小于 2.5 的要求。由于有轨电车最大运行速度为 90 km/h, 因此有轨电车在最高速度运行时, 风速必须小于 8 m/s。

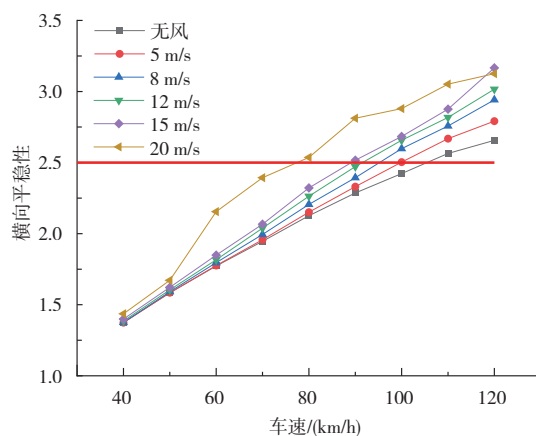


图 6 直线横向平稳性

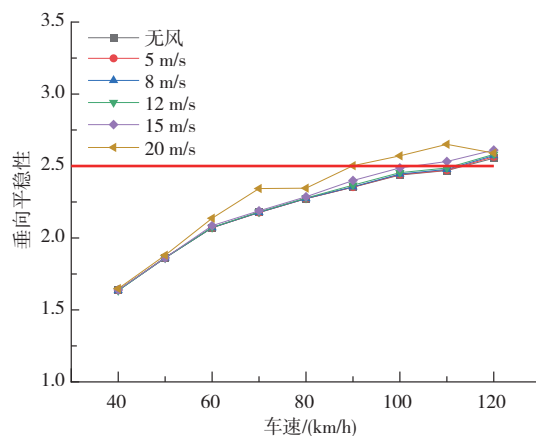


图 7 直线垂向平稳性

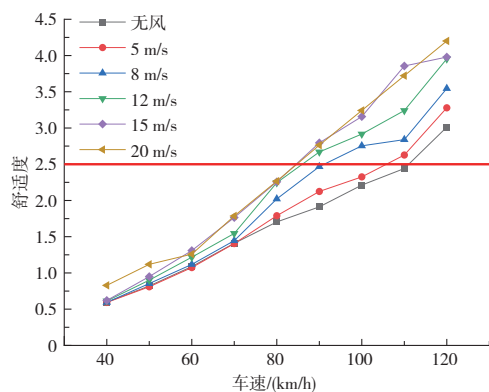


图8 直线舒适度

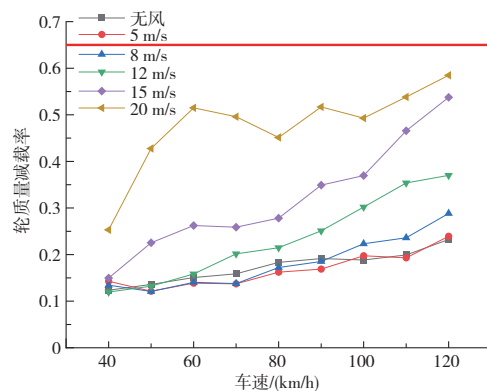


图11 直线轮质量减载率

2) 直线侧风安全性

计算无风工况与不同风速工况的直线安全性指标如图9—图13所示,其中横线为对应指标的限值。从图中可以看出,在有轨电车最高运行速度90 km/h以下,轮轴横向力、轮轨垂向力与轮质量减载率均未超标,而脱轨系数仅在风速20 m/s、车速90 km/h时超标。但从图13的倾覆系数来看,在风速20 m/s时车速不能超过80 km/h。在风速小于20 m/s时,有轨电车能够以最高速度在直线上正常运行。

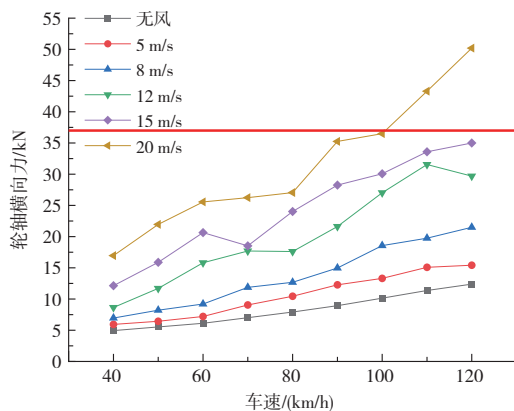


图9 直线轮轴横向力

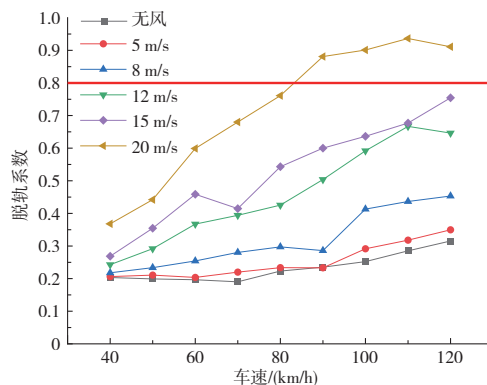


图12 直线脱轨系数

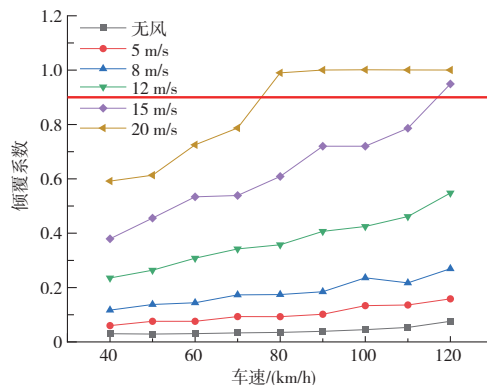


图13 直线倾覆系数

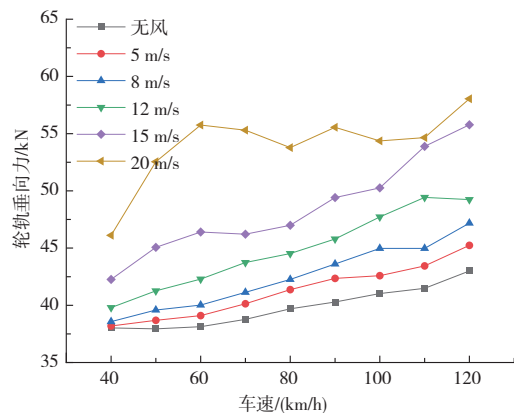


图10 直线轮轨垂向力

综上所述,在直线工况侧风载荷作用下,不能仅仅依据轮轴横向力、轮轨垂向力、轮质量减载率与脱轨系数指标来判断有轨电车的车辆安全性,应当以倾覆系数作为关键指标进行判断。因此,有轨电车运行在直线上时,可以将横向平稳性与倾覆系数作为侧风安全性评价指标。

3.2 曲线侧风安全性

在侧风条件下,低地板有轨电车在曲线上运行时的车辆安全性不仅与车速、风速有关,也与曲

线参数设置有关。而实际线路曲线参数条件众多,不利于曲线工况下侧风安全性研究,因此一般在直线路段上施加横向的未平衡离心加速度来等效曲线工况。本文设置 $0.05g$ 与 $0.1g$ 两种未平衡离心加速度的工况进行动力学计算。

1) $0.05g$ 未平衡离心加速度下侧风安全性

有轨电车在 $0.05g$ 未平衡离心加速度作用下,无风工况与 5 种风速工况计算的安全性如图 14—图 18 所示。

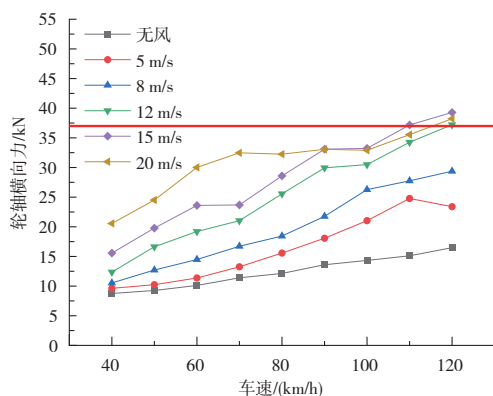


图 14 $0.05g$ 离心加速度下轮轴横向力

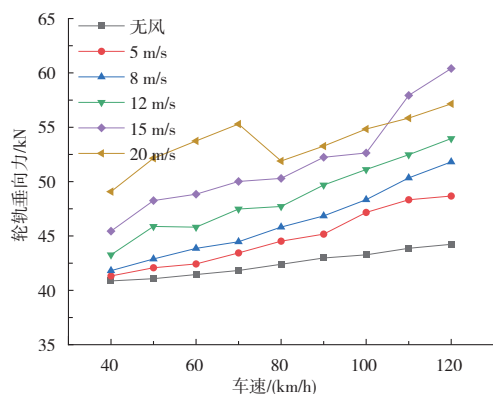


图 15 $0.05g$ 离心加速度下轮轴垂向力

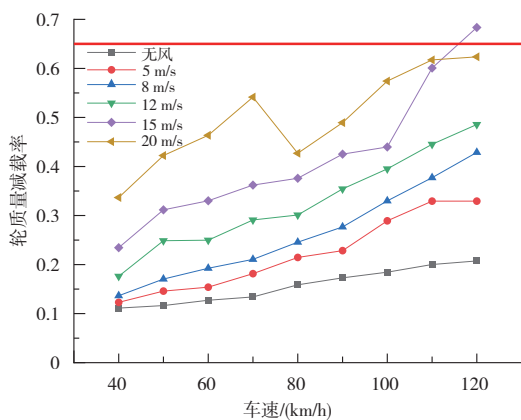


图 16 $0.05g$ 离心加速度下轮质量减载率

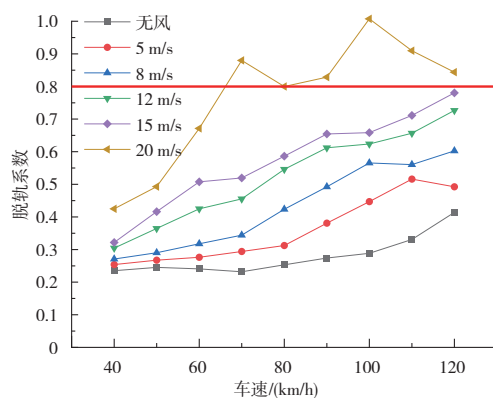


图 17 $0.05g$ 离心加速度下脱轨系数

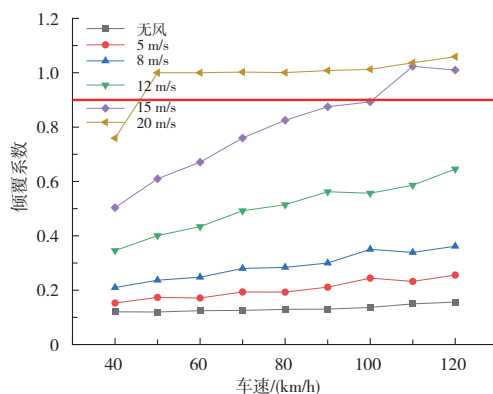


图 18 $0.05g$ 离心加速度下倾覆系数

从图 14—图 18 可以看出,当风速小于 20 m/s 时,列车在正常运行速度范围内,轮轴横向力、轮轴垂向力、轮质量减载率、脱轨系数与倾覆系数均满足要求。而在风速 20 m/s 时,车速必须小于 40 km/h ,这与直线工况下的结论一致。这也说明,可以将倾覆系数作为侧风工况判断有轨电车安全性的关键指标。

2) $0.1g$ 未平衡离心加速度下侧风安全性

有轨电车在 $0.1g$ 未平衡离心加速度作用下,无风工况与 5 种风速工况计算的安全性如图 19—图 23 所示。

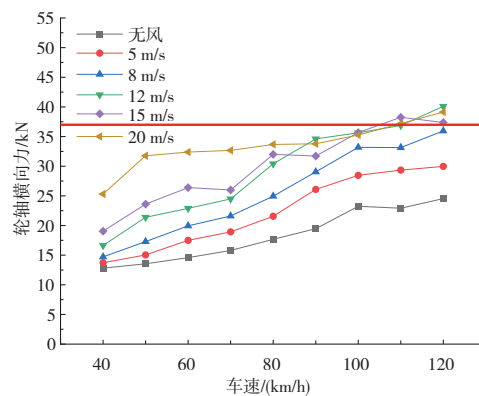


图 19 $0.1g$ 离心加速度下轮轴横向力

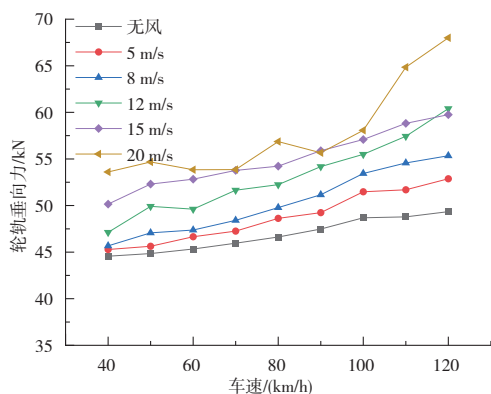


图 20 0.1g 离心加速度下轮轨垂向力

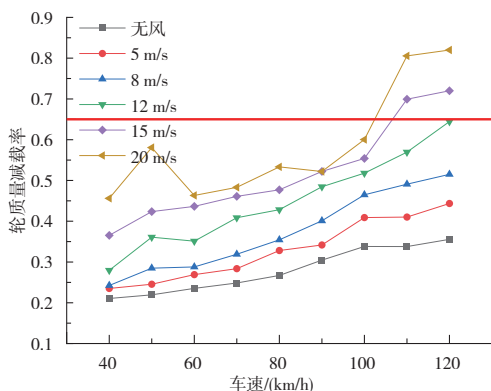


图 21 0.1g 离心加速度下轮质量减载率

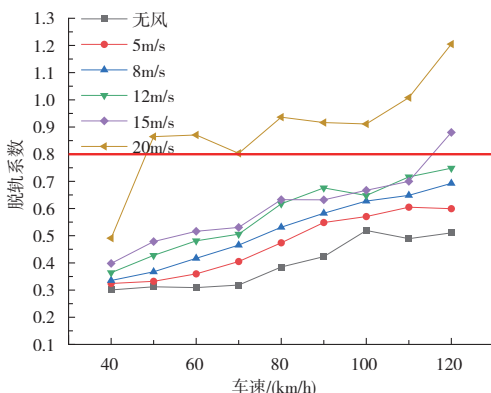


图 22 0.1g 离心加速度下脱轨系数

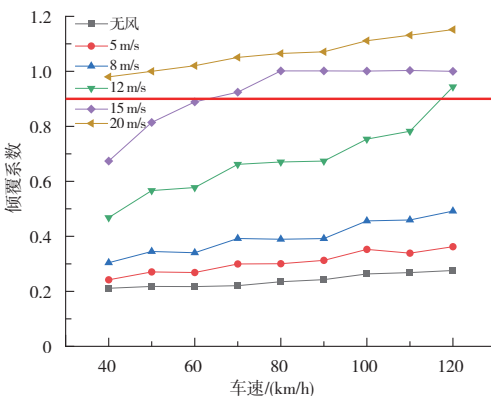


图 23 0.1g 离心加速度下倾覆系数

从图 19—图 23 可以看出,当风速小于 15 m/s 时,列车在正常运行速度范围内,轮轴横向力、轮轨垂向力、轮质量减载率、脱轨系数与倾覆系数均满足要求。而在风速 15 m/s 时,车速必须小于 50 km/h;风速 20 m/s 时,受倾覆系数限制有轨电车需要进一步降速甚至停运。

4 结语

本文通过对 70%低地板有轨电车进行侧风安全性的计算分析,提出了不同风速下有轨电车的最高安全运行速度,研究了风速与车辆限速的对应关系,为有轨电车安全、平稳运行提供了运维依据。研究表明:

1)有轨电车运行在直线上时,横向平稳性与舒适度指标受侧风影响较大,垂向平稳性受侧风影响较小。可以将横向平稳性与倾覆系数作为侧风安全性评价指标;

2)侧风风速越高,有轨电车受到的风载荷越大,各动力学性能随之恶化,但在风速小于 20 m/s 时,该型 70%低地板有轨电车能够以最高运行速度 90 km/h 正常运行;

3)相同风速下,有轨电车未平衡离心加速度越大,各个安全性指标越大,其中倾覆系数变化最为显著,因此在有轨电车通过曲线时侧风安全问题最为严重,需要有轨电车及时采取限速、停运等措施以确保行车安全。

参考文献:

- [1] 苗彦英. 低地板有轨电车车辆技术特征[J]. 城市交通, 2013, 11(4): 39-43.
- [2] 秦国栋, 苗彦英, 张素燕. 有轨电车的发展历程与思考[J]. 城市交通, 2013, 11(4): 6-12.
- [3] 罗世辉. 大连低地板有轨电车的动力学性能[J]. 机车电传动, 2001(3): 28-31.
- [4] 何利英. 有轨电车旅行速度影响因素分析及提升实践[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 208-212.
- [5] 陈晓, 蒋必凤, 黄小琴, 等. 三亚有轨电车对周边街区影响分析与提升策略研究[J]. 城市公共交通, 2023(2): 51-55.
- [6] 刘静远. 不同侧风作用下动车组列车气动特性及安全性分析[D]. 北京: 北京建筑大学, 2022.
- [7] 郭文华, 洪新民, 陈春霞. 侧风下高铁列车交会运行时车—桥耦合振动[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(4): 48-56.
- [8] 任尊松, 徐宇工, 王璐雷, 等. 强侧风对高速列车运行安全性影响研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(6): 46-50.
- [9] 公衍军, 杨东晓. 基于 Simpack 的车辆侧风安全性仿

- 真计算方法[J]. 机械,2016,43(2):56-59.
- [10] 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.
- [11] AÏTA S, TABBAL A, MESTREAU E, et al. CFD aerodynamics of the French high-speed train[J]. SAE Technical Paper Series,1992(1):920343.
- [12] EN14067-6 Railway applications Aerodynamics Part6: Requirements and test procedures for cross wind assessment[S].
- [13] 罗仁,石怀龙. 铁道车辆系统动力学及应用[M]. 成都:西南交通大学出版社,2018.
- [14] 张天周. 柔性车体与构架对车辆运行平稳性的影响研究[J]. 机械制造与自动化,2023,52(6):50-53.

收稿日期:2024-03-12

(上接第 228 页)

通过特征提取与 XGBoost 算法相结合的方法,设计了一个电机故障诊断模型。测试结果显示,该模型性能优秀,准确率、精确度、召回率和 F_1 指标相较其他主流模型均有明显提高。

参考文献:

- [1] 余锋. 煤矿机电设备检修管理系统安卓客户端的设计与应用[J]. 信息与电脑(理论版),2019,31(21):78-80.
- [2] 窦桂东,白艺硕,王均利,等. 基于深度学习的矿井滚动轴承故障诊断方法[J]. 工矿自动化,2024,50(1):96-103,154.
- [3] 陈其. 注意力机制结合 CNN 卷积网络的滚动轴承复合故障诊断[J]. 机械制造与自动化,2023,52(5):134-138.
- [4] 陈鹏. 基于振动信号的滚动轴承故障诊断方法综述[J]. 轴承,2022(6):1-6.
- [5] RODRIGUEZ - RODRIGUEZ J I, NUNEZ - MATA O, GOMEZ-RAMIREZ G. Motor bearing failures detection by using vibration data[C]//2022 IEEE 40th Central America and Panama Convention (CONCAPAN). Panama, Panama. IEEE,2022:1-6.
- [6] 吴国沛,余银犬,涂文兵. 永磁同步电机故障诊断研究综述[J]. 工程设计学报,2021,28(5):548-558.
- [7] 李政,汪凤翔,张品佳. 基于图像融合与迁移学习的永磁同步电机驱动器强泛化性故障诊断研究[J]. 中国电机工程学报,2024,44(12):4933-4944.
- [8] 刘林密,崔伟成,李浩然,等. 基于卷积神经网络的滚动轴承故障诊断方法[J]. 计算机测量与控制,2023,31(9):9-15.
- [9] 李博文,张斌,吕晓明. 煤矿机电设备智慧检修系统研究与应用[J]. 中国煤炭,2023,49(11):87-91.
- [10] 姬广龙,孙丹,王珍珍,等. 关于 MQTT 通信协议的分析与研究[J]. 物联网技术,2023,13(1):63-66.
- [11] 熊风光,陈霖,韩慧妍,等. 基于 MQTT 协议的轻量化文本信息分发技术研究[J]. 计算机技术与发展,2024,34(2):90-97.
- [12] 熊群毓. 大数据时代 MySQL 数据库的应用分析[J]. 信息与电脑,2023,35(14):209-212.
- [13] CHEN T, GUESTRIN C. XGBoost: a scalable tree Boosting system[C]// Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2016:785-794.
- [14] 马东,何毅斌,李铭,等. 基于 CEEMD-PCA-XGBoost 的滚动轴承故障诊断方法[J]. 机电工程,2023,40(2):186-194.
- [15] 赵兵朝,张晴,王京滨,等. 基于 SSA-XGBoost 模型的地表下沉系数预测研究[J]. 矿业研究与开发,2024,44(2):89-95.
- [16] ZHANG X L, HAN P, XU L, et al. Research on bearing fault diagnosis of wind turbine gearbox based on 1DCNN - PSO - SVM [J]. IEEE Access, 2020, 8:192248-192258.
- [17] 杜浩飞,张超,李建军. 基于 SENet-ResNext-LSTM 的风机轴承故障诊断[J]. 机械强度,2023,45(6):1271-1279.

收稿日期:2024-03-06