

横风环境对偏载高速货运动车组 行车安全影响研究

李道权, 汪 诤

兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年5月17日; 录用日期: 2025年6月10日; 发布日期: 2025年6月17日

摘 要

本文以CRH2型高速货运动车组为研究对象, 基于多体动力学理论, 利用UM软件平台构建了高速货运动车组的动力学模型, 并进一步建立了横风环境下偏载工况的列车-轨道耦合系统模型。通过数值模拟与仿真分析, 系统研究了风速、货物偏移量及行车速度等关键因素对列车运行安全性的影响规律。研究结果表明: 脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力等安全性指标随车速、风速及货物偏移量的增加而显著恶化, 尤其在车速超过250 km/h、风速达17 m/s或偏移量超过0.6 m时, 多项指标超出安全限值, 表明横风与偏载的叠加效应严重威胁列车稳定性。此外, 轮重减载率与轮轴横向力对风速变化最为敏感, 而高风速下货物偏移量的增大会进一步加剧脱轨风险。本研究为高速货运动车组在复杂环境下的安全运行提供了理论依据, 建议实际运营中结合风速监测与装载控制以降低风险。

关键词

高速货运动车组, UM, 稳态横风, 偏载, 运行安全性

Research on the Impact of Crosswind Environments on Operational Safety of High-Speed Freight EMUs with Eccentric Loads

Daoquan Li, Zheng Wang

School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: May 17th, 2025; accepted: Jun. 10th, 2025; published: Jun. 17th, 2025

Abstract

This study investigates the CRH2 high-speed freight Electric Multiple Unit (EMU) as the research object.

文章引用: 李道权, 汪诤. 横风环境对偏载高速货运动车组行车安全影响研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(6): 167-176.
DOI: 10.12677/mos.2025.146486

Based on multibody dynamics theory, a dynamics model of the high-speed freight EMU was established using the UM software platform, with further development of a train-track coupled system model considering crosswind conditions and eccentric loading scenarios. Through numerical simulation and analytical methods, the research systematically examines the influence of key parameters—including wind speed, cargo displacement offset, and operating speed—on train operational safety. The results demonstrate that safety indices (derailment coefficient, wheel load reduction rate, and lateral wheel-rail force) deteriorate significantly with increasing speed, wind velocity, and cargo offset. Particularly when the speed exceeds 250 km/h, wind speed reaches 17 m/s, or the offset surpasses 0.6 m, multiple indicators exceed safety thresholds, revealing that the combined effects of crosswind and eccentric loading critically compromise train stability. Furthermore, the wheel load reduction rate and lateral wheel-rail force exhibit heightened sensitivity to wind speed variations, while increased cargo offset under high wind speeds exacerbates derailment risks. This study provides theoretical foundations for the safe operation of high-speed freight EMUs under complex environmental conditions. Practical recommendations include implementing real-time wind speed monitoring and enhanced cargo loading protocols to mitigate operational hazards.

Keywords

High-Speed Freight EMU, UM, Steady Crosswind, Eccentric Loading, Operational Safety

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 由于网络快速发展普及, 电商产业显著增长, 以至于快递运输行业需求增大。特别是在快件运输领域, 由于其具有小批量、高附加值、品类多样以及时效性强等特点, 对运输服务提出了更为严格的要求。高速货运动车组与低速普通列车和传统货运车辆不同, 由于轨道不平顺、车轮和轨道存在缺陷, 运行速度较高, 因此更容易受到横风环境的影响[1]。这些因素导致高速货运动车组车辆子系统存在较高的振动, 从而较大地影响列车的运行安全。我国幅员辽阔, 拥有丰富的自然资源, 地形地貌也十分多样且复杂。这使得高速列车的行进路线常常不得不穿越一些地理环境恶劣的区域。在这些复杂的自然条件下, 自然灾害所带来的环境变化对高速列车的运行安全构成了严重威胁。在横风作用下, 列车车体会受到气动升力、侧力和侧翻力矩的作用, 成为列车倾覆脱轨的主要原因之一[2]。

国外目前货运列车中心化偏移的研究成果, 对外公开发表的还比较少。Suda [3]等学者探讨了轨道车辆在施加牵引力或制动力矩时通过弯道的动力学特性, 对比了传统对称悬架与纵向非对称悬架车辆的动态表现。斯洛伐克的 Jagelčák [4]等人对货运车辆不同的装载方法进行了安全性分析。俄罗斯的 Turanov [5]研究了车辆在轨道不规则波运动下技术不对称货物分配的分析方法。彭永昭[6]研究了货物质量及重心位置对车辆运行安全的影响, 首先明确了货车装载工况参数体系, 包括货物质量、重心横向偏移量、纵向偏移量及重车重心高, 并定性分析了其对车辆安全的影响。池茂儒等[7]采用动力学建模方法, 构建了车辆系统在偏载工况下的模型, 以某高速车辆直线运行为例, 对比分析了不同偏载形式对行车安全性的影响趋势。蒋建政等[8]系统研究了货物偏载对高速货运动车组在直线线路上运行安全性的影响机制。罗天祺[9]以货运动车组为研究对象, 用 SIMPACK 多体动力学仿真平台构建了整车动力学模型。通过该模型深入分析了不同货物装载工况对列车运行特性的影响规律, 还对不同货物偏移量与车辆动力学性能影响关系进行分析。这些研究为高速货运动车组的优化设计和安全运行提供了理论支持。

在横风环境下，铁道车辆及高速列车运行的安全性问题受到了国内外学者的广泛关注。Wetzel 与 Proppe 等[10] [11]通过计算铁路车辆倾覆概率来分析其安全性，分析了设计和激励变量对车轮卸载的影响，并计算了这些变量对失效概率的敏感性系数，分析出影响最显著的关键因素，铁路车辆的动力学特性通过商业多体动力学软件 ADAMS/RAIL 进行模拟，其中风致力和力矩被建模为集中作用在车辆上的力和力矩。Xu 等[12]将风 - 车 - 轨相互作用视为一个耦合振动系统，建立了一种高效、准确的横向风作用下车辆 - 轨道动力学特性评估模型，通过验证的动力学模型，可以充分揭示横风对车辆 - 轨道动力学性能的影响。向俊等[13]研究了在横风作用下，建立了风 - 车辆 - 轨道系统耦合模型，对高速列车的动力学指标进行了分析。郗艳红等[14]深入研究了列车在横风作用下的气动特性及其对车辆轨道动力性能的影响，运用理论分析、模型实验、流体动力学数值模拟、多体动力学模拟实验等方法进行了深入研究。

综上所述，偏载高速货运动车组的运行特性，尤其是在横风环境下的运动特性，仍需深入研究。国内外发生过许多因横风导致的列车运行安全事故，这些事故凸显了横风下列车运行安全问题的严峻性。因此，系统研究横风环境下偏载高速货运动车组的运行特性，已成为当前轨道交通领域亟待解决的关键问题之一。

2. 高速货运动车组模型

机车车辆仿真分析可采用多刚体建模方法。在建模中，各组成部件均被视为理想刚体，其弹性变形效应可予以忽略。为简化研究工况，设定列车保持恒定速度运行，从而消除纵向动力学因素的影响。对于高速动车组单节编组的建模，其基本构成包括 1 个车体结构单元、2 个转向架构架组件以及 4 个轮对，总计 7 个空间运动刚体。每个刚体在运动学分析中需考虑横向位移、垂向位移、侧滚角、点头角及摇头角等 5 个独立运动变量，由此建立的系统动力学模型共包含 35 个广义坐标自由度。根据我国 CRH2 型动力学参数，如表 1 所列列车部分关键参数，建立如图 1 所示货运动车组模型。本文研究不平顺轨道谱采用中国无砟轨道谱，采用 LMA 型车轮踏面与中国标准 R60 (kg/m)钢轨进行匹配，其中钢轨轨底坡设置为 1/40 (rad)。这种轮轨型面组合能够准确反映我国高速铁路的轮轨接触特性。

Table 1. Main parameters of vehicle dynamics model

表 1. 车辆动力学模型主要参数

参数名称	数值	单位
车体空载质量	33,785	kg
构架质量	2700	kg
轮对质量	1869	kg
车体侧滚转动惯量	113,450	kg·m ²
车体点头转动惯量	1,571,360	kg·m ²
车体摇头转动惯量	1,467,580	kg·m ²
构架侧滚转动惯量	2190	kg·m ²
构架点头转动惯量	1480	kg·m ²
构架摇头转动惯量	2700	kg·m ²
轮对侧滚转动惯量	910	kg·m ²
轮对点头转动惯量	150	kg·m ²
轮对摇头转动惯量	910	kg·m ²

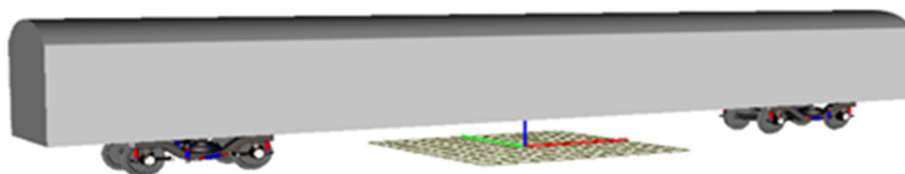


Figure 1. High-speed freight electric multiple unit dynamics model

图 1. 高速货运动车组动力学模型

只考虑横向偏载, 设货物质心高度和纵向距离与车体相同。图 2 展示了货物质心偏载的坐标示意图, 其中 X 轴正方向表示高速货运动车组的前进方向, Y 轴正方向为高速货运动车组前进方向的左侧, Z 轴正方向则是垂直于列车车体且向上的方向。

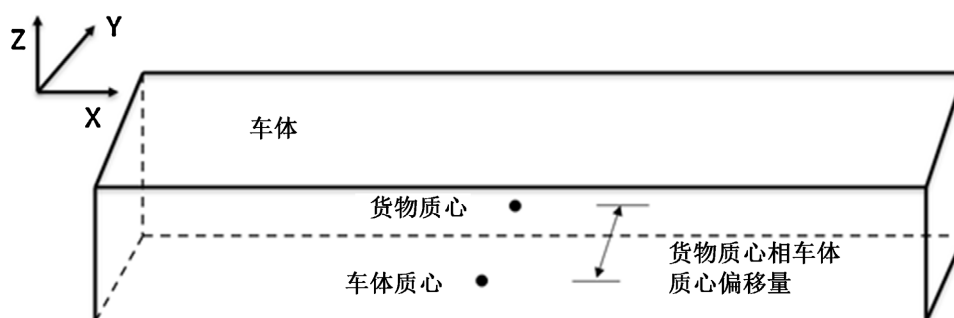


Figure 2. Schematic diagram of cargo center-of-mass offset relative to the vehicle body center-of-mass

图 2. 货物质心相对于车体质心偏移示意图

3. 定常稳态风载荷模型

自然风的形成源自于热力学定律所驱动的同高度间的压力差异, 这种自然现象对所有暴露在大气中的建筑物、桥梁以及行驶的车辆等都会产生力的作用。而且, 自然风不仅受热力学因素影响, 还受到力学因素的调控。这些因素错综复杂, 与太阳辐射、大气流动、地球自转以及大气摩擦等多种自然间的能量传递现象密切相关。因此, 为了深入探究风的特性, 我们有必要对其进行简化处理。

在列车运行由于横风导致的安全研究中, 风场的数值模拟主要采用两种方法[15], 对稳态风场假设以及动态风场进行模拟。当横风风速时间以及空间上保持恒定, 可将风速视为稳定状态。在由于偏载进行车辆进行动力学分析时, 稳态风载模型是主要研究方法, 该模型通过将恒定稳态风变化为等效风载荷并施加于车辆, 在仿真计算中将横风风速作为恒定参数处理。图 3 展示了稳态风载模型的示意图。

在横风条件下, 列车车体表面的压强分布呈现出非均匀特征, 这种不均匀性主要受车辆外形轮廓和几何高度等因素的影响。本研究重点对横风环境下偏载工况的高速货运动车组-轨道耦合系统的动态响应特性及其运行安全性分析。基于此, 研究将借鉴已有风致安全领域的研究成果, 采用简化的风载荷模型进行分析。具体而言, 本文将依据高速列车气动特性分布的相关研究成果, 将复杂的风载荷进行简化为等效的力和力偶, 作为偏载工况下高速货运动车组运行特性研究的边界条件输入。在货运动车组高速运行过程中, 强风对列车的空间作用效应可简化为五个空间力和力偶分量。风载荷力系 F_0 包括侧向力 F_y 、升力 F_z 、侧滚力矩 M_x 、点头力矩 M_y 和摇头力矩 M_z , 如图 4 所示。这些力系主要取决于合成风速、列车空气动力系数、空气密度以及列车最大横截面积等关键参数。

对列车进入稳态风场动态过程时, 车体所受的力系 F 可以用斜坡函数进行表示, 可表示为:

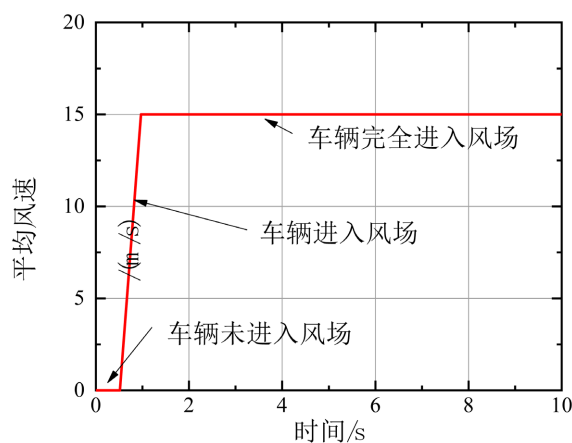


Figure 3. Steady-state wind seed model

图3. 稳态风速模型

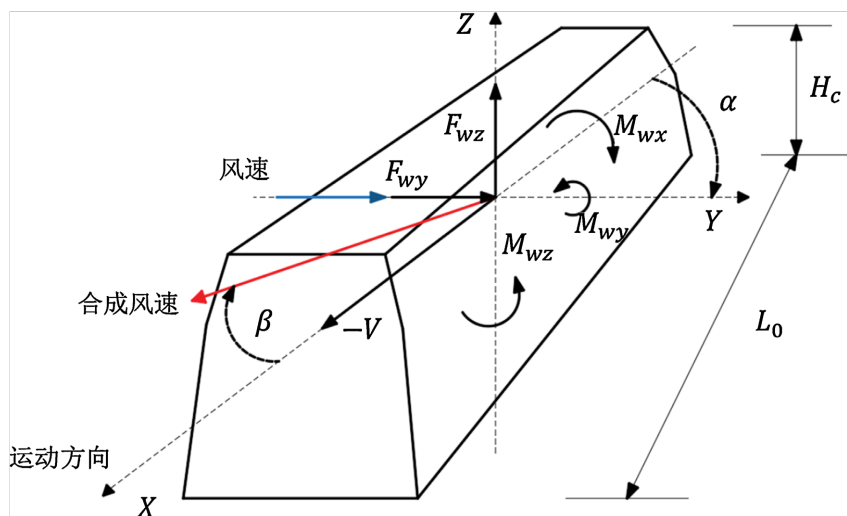


Figure 4. Aerodynamic load distribution diagram of high-speed freight EMU

图4. 高速货运动车组风载荷作用图

$$F = \begin{cases} \frac{\zeta}{l_0} F_0 & 0 \leq \zeta \leq l_0 \\ F_0 & \zeta > l_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ζ 为列车进入风场的距离, l_0 为列车的长度, F_0 为风载荷力系, 其中 $F_0 = \{F_y, F_z, M_x, M_y, M_z\}^T$ 。

各风载荷分量的计算公式如下:

$$F_y = 0.5 \rho A V_{res}^2 C_y(\beta) \quad (2)$$

$$F_z = 0.5 \rho A V_{res}^2 C_z(\beta) \quad (3)$$

$$M_x = 0.5 \rho A h V_{res}^2 C_{mx}(\beta) \quad (4)$$

$$M_y = 0.5 \rho A h V_{res}^2 C_{my}(\beta) \quad (5)$$

$$M_z = 0.5 \rho A h V_{res}^2 C_{mz}(\beta) \quad (6)$$

$$V_{res}^2 = U^2 + V^2 - 2UV \cos(\pi - \alpha) \quad (7)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{U \sin \alpha}{V + U \cos \alpha}\right) \quad (8)$$

式中: ρ 为空气密度, V_{res} 为作用在车辆上的等效风速, β 为合成风速侧偏角, A 为车体等效受风面积, h 为车体高度, C 为气动系数, 为 β 的函数, 参考文献[16], 本文采取高速列车 ICE2 风洞实验气动系数结果。

4. 横风环境下偏载高速货运动车组关键因素分析

横风环境对高速货运动车组偏载问题的影响, 主要体现在列车运行的安全性方面。为了确保列车在各种条件下的安全运行, 重点关注以下关键指标: 脱轨系数、轮重减载率、以及轮轴横向力。这些指标能够全面评估列车在复杂环境中的性能表现, 特别是在偏载情况下的动态响应。

4.1. 行车速度

在仿真计算过程中, 设定了列车质心横向偏移量为 ± 0.6 m, 以模拟实际运行中的偏移情况。风速设定为 15 m/s, 列车运行速度为 150~300 km/h。主要模拟较为极端的横风条件, 以便更全面地评估列车的运行安全性。基于上述条件, 计算得出了脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力和轮轨垂向力的各项指标最大值随车速的变化结果, 具体如图 5 所示。

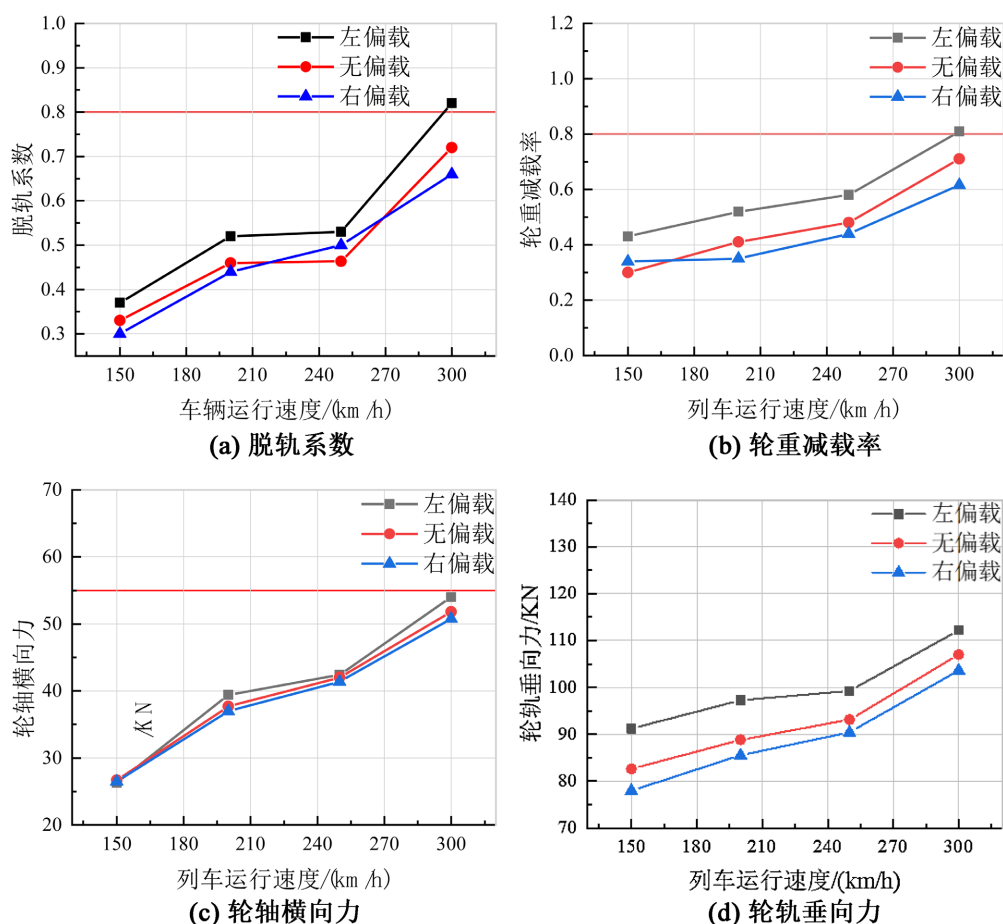


Figure 5. Influence of operating speed on freight EMU lateral load distribution under crosswind conditions
图 5. 横风作用下行车速度对偏载货运动车组的影响

根据图 5 的分析结果, 可以得出以下结论: 偏载高速货运动车组的脱轨系数和轮重减载率随着列车运行速度的增加而逐渐增大。在横风作用下, 当列车运行速度接近 300 km/h 时, 脱轨系数、轮重减载率以及轮轴横向力在左偏载货运动车组工况下均超出其各自的安全限值。此外, 当列车速度超过 250 km/h 时, 上述各指标随速度的提升呈现出显著加速增长的趋势。这表明, 在高速运行条件下, 左偏载货运动车组在横风环境中的动力学性能受到严重影响, 其安全性面临较大挑战。

4.2. 风速

为了深入分析风速对横风环境下偏载高速货运动车组运行安全的影响, 对横风条件下高速货运动车组在直线轨道上运行的多项脱轨评判指标进行了计算与分析。在计算过程中, 设定横风风速范围为 10 m/s 至 25 m/s 的横风, 车速为 250 km/h 的工况下, 对上述 4 项脱轨指标的最大值随风速的变化趋势进行了详细计算与分析。图 6 展示了在稳定风环境中, 各项脱轨指标最大值随风速变化的规律。

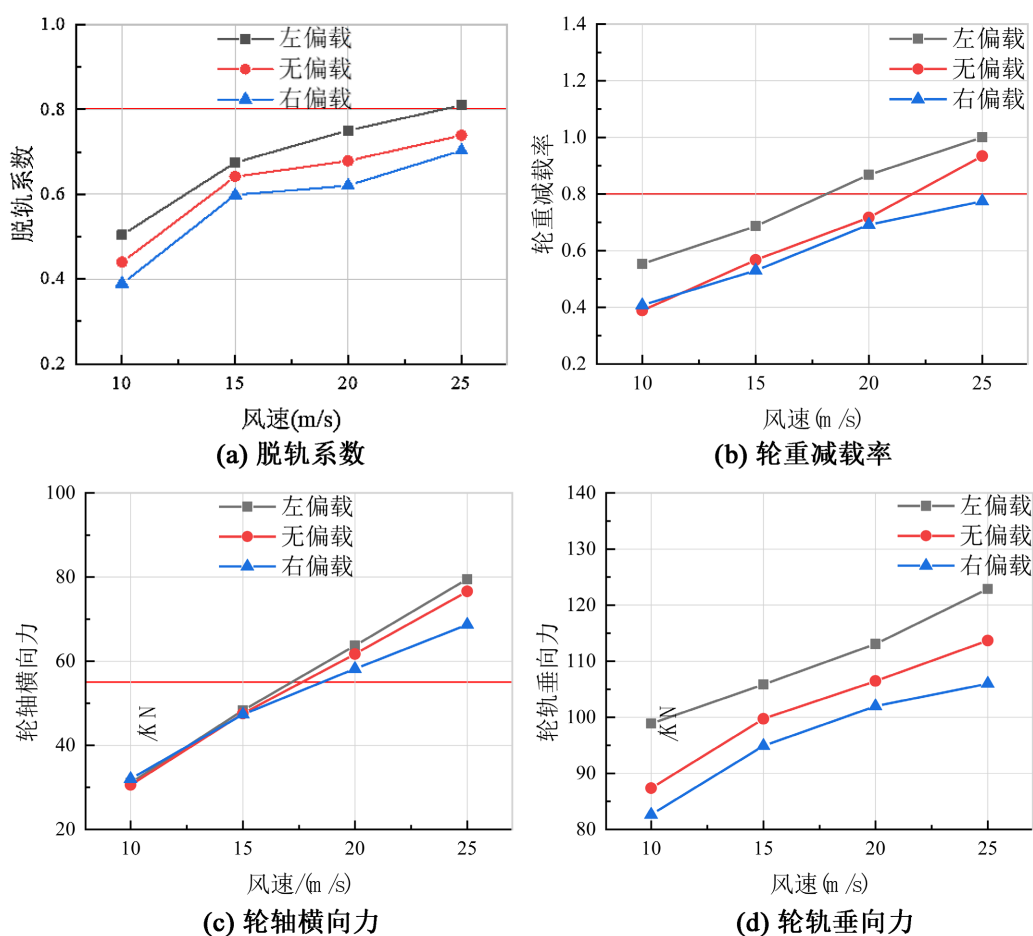


Figure 6. Impact of wind speed on eccentrically loaded freight EMUs under crosswind conditions
图 6. 横风作用下风速对偏载货运动车组的影响

由图 6 可知, 随着横风风速的增加, 高速货运动车组的各项动力学指标均呈现上升趋势。《铁路技术管理规程》[17]规定在风速大于 25 m/s 时, 动车组列车速度应低于 200 km/h, 可见无偏载货运动车组在 250 km/h 时, 轮重减载率和轮轴横向力均超出限值, 而左偏载货运动车组脱轨系数也超出限值, 运行安全性尤为恶劣。轮重减载率和轮轴横向力对风速变化尤为敏感, 当风速达到约 17 m/s 时, 偏载工况下

的轮轴横向力率先突破安全阈值, 随后轮重减载率及脱轨系数亦相继超出限定范围。在风速 20 m/s 的条件下, 高速货运动车组的各项指标普遍超出安全限值。由此可见, 风速对偏载高速货运动车组的影响显著, 尤其在风速达到 17 m/s、车速为 250 km/h 的工况下, 其安全性问题需引起高度关注。

4.3. 偏载量

为深入研究分析货物偏移量对横风环境下高速货运动车组运行安全的影响, 本节对横风作用下高速货运动车组在直线轨道上的四项评判指标脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力和轮轨垂向力, 随货物偏移量变化的规律进行了系统计算分析。根据上述分析可知, 在横风环境下, 左偏载对货运动车组的影响尤为显著。因此, 计算过程中, 本节设定货物偏移量的计算范围为 -0.8 m 至 0 , 研究在风速为 10 m/s、15 m/s 和 20 m/s 的横风状态下, 车速为 250 km/h 的条件下。通过计算与分析, 本节总结了在稳定风环境下, 四项安全评判指标的最大值随偏移量变化的规律, 如图 7 所示。

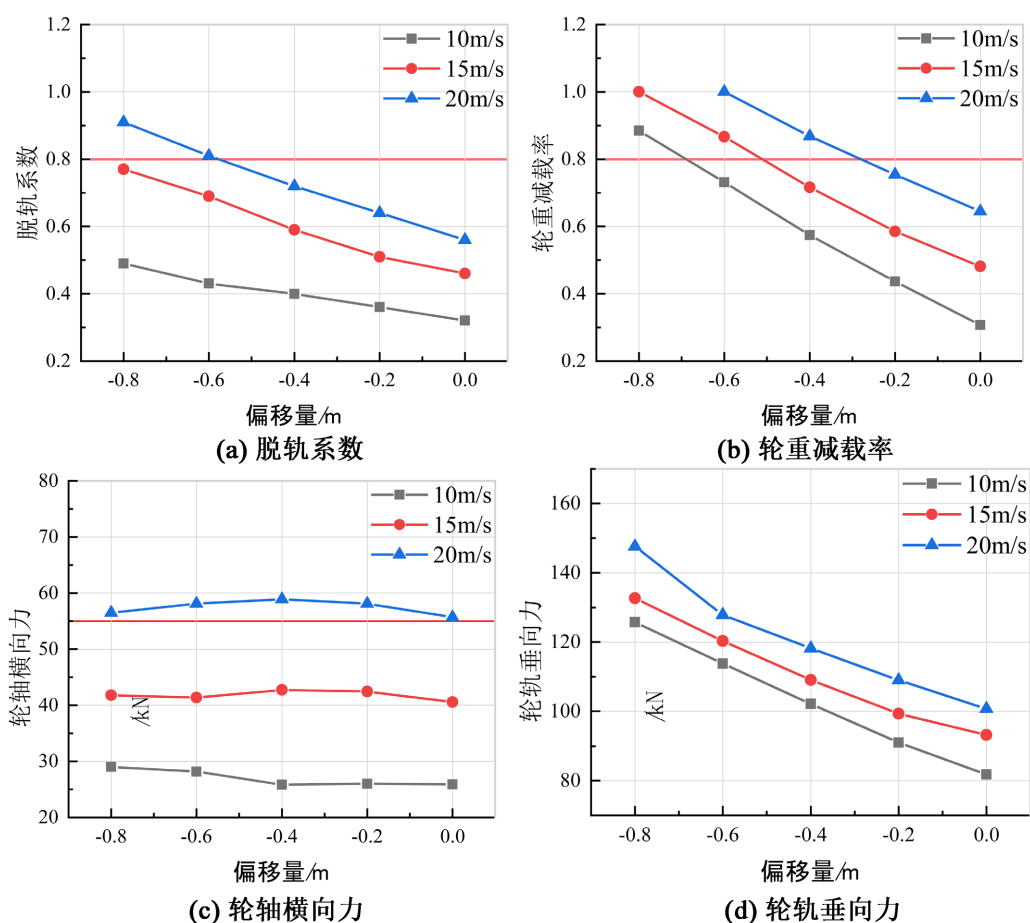


Figure 7. Effect of displacement offset on eccentrically loaded freight EMUs under crosswind conditions

图 7. 横风作用下偏移量对偏载货运动车组的影响

由图 7 可知, 在稳态横风作用下, 随着风速的增大和货物偏移量的增加, 高速货运动车组的各项动力学性能指标逐渐恶化, 进而导致列车安全性下降。具体而言, 在风速达到 20 m/s 时, 轮轴横向力普遍超出安全限值, 与此同时, 轮重减载率在货物偏移量约为 0.3 m 时即超出安全限值, 而脱轨系数则在偏移量达到 0.6 m 时开始超出限值, 显示出在高速条件下, 偏移量对脱轨风险的影响更为显著。在风速为

15 m/s 的情况下, 轮重减载率在货物偏移量约为 0.5 m 时超出安全限值, 而在风速较低 10 m/s 时, 尽管情况相对较好, 但当货物偏移量达到约 0.7 m 时, 轮重减载率依然会超出安全限值, 说明即使在较小的风速下, 过大的货物偏移量仍可能危及列车运行安全。综上, 风速与货物偏移量的叠加效应对高速列车的运行安全构成显著影响。因此, 在实际运营中, 应加强对货物装载状态的监控, 并结合实时风速数据, 实施相应的安全措施, 以确保列车在各种天气条件下的稳定运行。

5. 结论

本文是在建立的偏载高速货运动车组模型的基础上, 进一步构建了横风环境下偏载高速列车轨道耦合计算模型。详细研究分析了车辆运行速度、风速和货物偏移量对高速货运动车组各项性能指标的影响规律, 得出以下结论:

(1) 脱轨系数、轮重减载率、轮轨垂向力和轮轴横向力随着车速、风速和货物偏移量的增加而呈现近似线性增大。特别是在偏移量为 0.6 m、风速为 15 m/s 的工况下, 当列车运行速度接近 300 km/h 时, 左偏载货运动车组工况下的脱轨系数、轮重减载率以及轮轴横向力均超出了各自的安全限值。此外, 当列车速度超过 250 km/h 时, 上述指标随速度的提升呈现出显著的加速增长趋势, 表明高速运行时横风和偏载的叠加效应对车辆安全性的威胁进一步加剧。

(2) 《铁路技术管理规程》规定在风速大于 25 m/s 时, 动车组列车速度应低于 200 km/h, 无偏载货运动车组在 250 km/h 时, 轮重减载率和轮轴横向力均超出限值, 而左偏载货运动车组脱轨系数也超出限值, 运行安全性尤为恶劣。进一步, 当风速达到约 17 m/s 时, 偏载工况下的轮轴横向力首先突破安全阈值, 随后轮重减载率和脱轨系数亦相继超出限定范围。在风速为 20 m/s 的条件下, 高速货运动车组的各项指标普遍超出安全限值, 表明在极端风速下, 横风与货物偏载的叠加效应对车辆运行安全构成了严重威胁。

分析了横风与偏载叠加效应对高速货运动车组运行安全的影响机制, 为实际运营中结合风速监测与装载控制提供了理论依据。横风与货物偏载的叠加效应下, 车辆系统的稳定性显著恶化, 尤其是在高风速、高车速和较大偏移量的工况下, 列车运行的安全性面临严峻挑战。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家邮政局. 2020 年 11 月中国快递发展指数报告[EB/OL]. http://www.spb.gov.cn/xw/dtxx_15079/202011/t20201106_3411201.html, 2020-11-06, 2024-03-25.
- [2] Ji, Z., Yang, G., Liu, Y. and Jiang, Q. (2018) Analysis of Vertical Vibration Characteristics of the Vehicle-Flexible Track Coupling System under Wind Load and Track Irregularity. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, **232**, 2444-2455. <https://doi.org/10.1177/0954409718773014>
- [3] Suda, Y. and Grecik, J. (1996) The Mechanism of Enhanced Curving Performance of Unsymmetric Suspension Trucks under Acting Traction/Brake Torque. *Vehicle System Dynamics*, **25**, 629-640. <https://doi.org/10.1080/00423119608969225>
- [4] Jagelčák, J., Vrábel, J. and Fazekas, M. (2011) Loading and Cargo Securing Devices in Standard Forty Foot General Purpose Maritime Containers. *Doprava a spoje*, **2011**, 28-38.
- [5] Turanov, K. (2009) Analytical Basis of Technology Asymmetrical Allocation of Cargo Masses Common Centre in Wagons. *Transport Problems*, **4**, 77-86.
- [6] 彭永昭. 铁路货车装载工况对车辆运行安全影响的机理及仿真实验研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [7] 池茂儒, 张卫华, 曾京, 等. 偏载对转臂定位转向架运行安全性的影响[J]. 中国铁道科学, 2009(3): 83-87.
- [8] 蒋建政, 陈再刚, 罗天祺, 等. 货物偏载对高速货运动车组在直线线路上行车安全影响研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(6): 63-69.
- [9] 罗天祺. 货物载荷对高速货运动车组动态特性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2020.

-
- [10] Wetzel, C., Yalamas, C. and Proppe, C. (2007) On the Influence of Crosswind on the Overturning Stability of Railway Vehicles. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, **7**, 4050019-4050020. <https://doi.org/10.1002/pamm.200700772>
 - [11] Proppe, C. and Wetzel, C. (2010) A Probabilistic Approach for Assessing the Crosswind Stability of Ground Vehicles. *Vehicle System Dynamics*, **48**, 411-428. <https://doi.org/10.1080/00423114.2010.482158>
 - [12] Xu, L. and Zhai, W. (2019) Cross Wind Effects on Vehicle-Track Interactions: A Methodology for Dynamic Model Construction. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, **14**, Article 031003. <https://doi.org/10.1115/1.4042142>
 - [13] 向俊, 彭铁光, 赫丹, 等. 横风作用下高速列车-板式轨道系统空间振动分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6(4): 1-5.
 - [14] 郝艳红. 横风作用下的高速列车气动特性及运行安全性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2012.
 - [15] Carrarini, A. (2006) Reliability Based Analysis of the Crosswind Stability of Railway Vehicles. Ph. D Thesis, Technical University Berlin.
 - [16] Orellano, A. and Schober, M. (2003) On Side-Wind Stability of High-Speed Trains. *Vehicle System Dynamics*, **40**, 143-159.
 - [17] 中国铁路总公司. TG/01-2014 铁路技术管理规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.