

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.04.010

极端气候条件下城轨列车 制动性能优化方法研究

杨广武¹, 张帆², 刘琦³, 刘赛赛⁴, 刘森⁵

(1. 北京市轨道交通学会, 北京 100028; 2. 北京市地铁运营有限公司, 北京 100103;
3. 北京交通运输职业学院, 北京 102200; 4. 南京中车浦镇海泰制动设备有限公司, 南京 211800;
5. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东青岛 266111)

摘要: 为提升城市轨道交通列车运行的安全性, 抵御极端气候条件下带来的列车运行风险, 克服传统依赖轮轨黏着的制动方式效能大幅降低的不足, 针对城市轨道交通频繁启停、工况复杂, 特别是雨雪极端天气影响的特点, 研究高悬挂磁轨制动器在紧急制动工况下的振动产生机理与动态响应规律。基于“电磁吸附-摩擦制动”的工作机制, 通过模拟雨雪天气对线路的影响, 识别出其振动特征。建立“制动装置—转向架—车体”振动传递路径, 通过三轴加速度传感器采集不同工况下的垂向与横向振动数据, 结合平稳性与稳定性指标对车辆运行安全性及舒适性进行量化评估。研究结果表明: 在雨雪天气湿轨工况时, 高悬挂磁轨制动器振动加速度峰值小于 2.5 m/s^2 , 振动通过转向架—车体传递, 对车载电子设备使用寿命影响较小; 高悬挂磁轨制动器制动模式对车辆运行平稳性几乎无影响, 通过增加磁轨制动对保障城市轨道交通在各类复杂气象条件下高速、安全、舒适运营具有重要工程价值。

关键词: 轨道交通; 高悬挂磁轨制动器; 模态; 平稳性; 极端天气; 车辆制动

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)04-0093-07

Optimization of Braking Performance for Urban Rail Trains under Extreme Weather Conditions

Yang Guangwu¹, Zhang Fan², Liu Qi³, Liu Saisai⁴, Liu Sen⁵

(1. Beijing Society of Metros, Beijing 100028; 2. Beijing Metro Operation Co., Ltd., Operation Fourth Branch, Beijing 100103; 3. Beijing Vocational College of Transport, Beijing 102200; 4. CRRC Nanjing Puzhen Haitai Brake Equipment Co., Ltd., Nanjing 211800; 5. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111)

Abstract: To improve the operational safety of urban rail transit trains, mitigate train operation risks under extreme weather conditions, and address the significant performance decline of traditional wheel-rail adhesion-based braking methods, this paper investigates the vibration generation mechanism and dynamic response characteristics of high-suspension magnetic track brakes under emergency braking conditions. Based on its working principle of electromagnetic adhesion and friction braking, the vibration characteristics are identified by simulating the effects of rainy and snowy weather on the track. The vibration transmission path consisting of the braking device, bogie, and car body is established. Vertical and lateral vibration data under various working conditions are collected via triaxial acceleration sensors, and a quantitative evaluation of vehicle running safety and ride comfort is conducted based on ride smoothness and stability indices. The results show that under wet track

收稿日期: 2026-06-12 修回日期: 2026-07-08

第一作者: 杨广武, 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事轨道交通工程相关研究, ygw0066@sina.com

通信作者: 刘琦, 女, 硕士, 工程师, 从事轨道交通结构设计, 1457837906@qq.com

基金项目: 中国城市轨道交通协会科研项目(CAMET-KY-2026032)

引用格式: 杨广武, 张帆, 刘琦, 等. 极端气候条件下城轨列车制动性能优化方法研究[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(4): 93-99.

conditions in rainy and snowy weather, the peak vibration acceleration of the high-suspension magnetic track brake is less than 2.5 m/s^2 . Vibration is transmitted through the bogie-car body path and exerts a minor impact on the service life of on-board electronic equipment. The braking mode of the high-suspension magnetic track brake has little effect on vehicle ride smoothness. Adding magnetic track brakes is of great engineering value for ensuring the high-speed, safe, and comfortable operation of urban rail transit under diverse complex meteorological conditions.

Keywords: rail transit; high-suspension magnetic track brake; modal analysis; ride smoothness; extreme weather; vehicle braking

极端雨雪天气会导致轮轨接触面结冰积雪,黏着系数骤降,传统列车制动系统性能大幅衰减,制动距离显著延长,极易引发追尾、脱轨等重大安全事故。通过增加非黏制动提高列车减速度、降低制动距离,保障车辆运行安全,逐渐获得行业青睐。磁轨制动作为一种重要的非黏制动方式,近年来,针对其吸力^[1-3]、温升^[4-5]、控制方法^[6-7]等有广泛研究,但对磁轨制动时车辆运行平稳性研究较少^[8-10]。

磁轨制动属于非黏制动,不受轮轨黏着性能影响,在列车很大速度范围内能提供较为稳定的制动力,且具有避免轮缘擦伤、提高车辆运行安全等优势。磁轨制动器分低悬挂和高悬挂两种:低悬挂磁轨制动器作为一种辅助制动装置已在有轨电车等低速列车中广泛应用;在高速列车领域,高悬挂磁轨制动器逐渐成为行业新选择。高悬挂磁轨制动器作为城市轨道交通领域关键的非黏着辅助制动装置,凭借其独特的结构设计和工作原理,在地铁、轻轨、市域快轨等多种交通方式中具有不可替代的作用^[11-13]。高悬挂磁轨制动器(简称磁轨)由电磁铁、气缸组件、横向拉杆、对中装置等组成,如图1所示。制动时,气缸充气推动电磁铁向轨面运动,同时电磁铁施加励磁电流与轨道产生吸力吸附至轨道表面。在车辆运动过程中电磁铁中极靴与轨道相互作用产生摩擦力,即磁轨制动力。缓解时,中断电磁铁励磁电流,同时打开气缸排气阀,

气缸内复位弹簧带动电磁铁向上运动使对中装置回到转向架相应位置内,实现磁轨复位。

高悬挂磁轨制动器悬挂于转向架下方,不与钢轨接触,既避免了日常运行中的磨轨损耗,又能确保通过道岔、小半径曲线时通行安全性。当制动触发时,气缸驱动装置快速落下,电磁铁瞬间通电吸附钢轨,通过底部机械与钢轨的滑动摩擦产生制动力,制动全程响应时间小于4 s,减速度可达 $0.25 \sim 0.40 \text{ m/s}^2$,能有效缩短25%~35%的紧急制动距离,制动力不受雨雪冰污、轨面油污等极端天气影响,成为黏着制动失效时的核心安全保障。

高悬挂磁轨制动器在城市轨道交通领域发挥无可替代作用:在城区地铁系统中,核心线站间距小、启停频繁,且早高峰满载超员工况常见,该装置可在主制动(电制动+空气制动)不足时补充制动力,提升停车准确性;在轻轨与现代有轨电车中,尤其是非独立路权、平交路口密集的运营场景,社会车辆、行人混行导致突发风险增多,高悬挂磁轨制动器的快速强力制动,可显著降低碰撞事故概率;在市域快轨系统中,因站间距大、运行速度高,仅依赖黏着制动难以满足安全规范要求,磁轨制动可有效缩短制动距离,而长大下坡路段(坡度>30‰)则能有效防止制动盘过热,避免制动性能衰减,进一步确保高速紧急制动时的安全性^[14-15]。

本文通过理论分析及试验测试,针对极端工况,特别是极端雨雪天气,深入探究磁轨制动对列车制动可靠性的影响。本文不仅关注磁轨制动装置本身的性能,更着重分析其对车辆整体运行平稳性的作用机制。通过精确获取相关影响数据,研究磁轨制动对车辆运行平稳性影响,为提升列车在极端天气下的运行安全提供可靠的参考依据。

1 制动装置方案设计与力学分析

1.1 结构设计

依托国内某列车转向架的安装接口尺寸与空间约束,进行高悬挂磁轨制动器结构的方案设计、接口匹

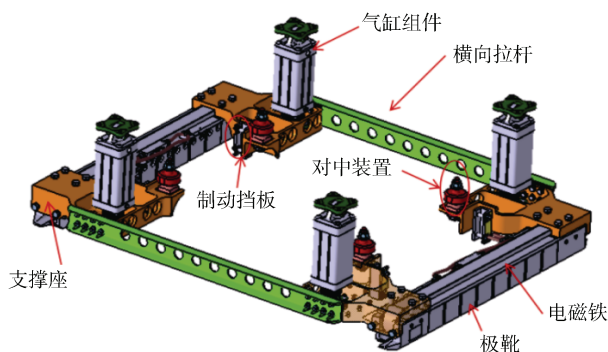


图1 磁轨三维示意

Figure 1 Three-dimensional schematic diagram of the magnetic track brake

配及布局规划,最终确定的磁轨结构形式如图 1 所示,产品主要技术参数与性能指标如表 1。

表 1 磁轨制动器主要技术参数
Table 1 Key technical parameters of the magnetic track brake

指标	参数	备注
额定电压/V	DC 110	(-30%, +25%)
额定电流/A	8.5	单个电磁铁
电磁吸力/kN	70	单个电磁铁
耐热等级	F(155℃)	GB/T 11021
防火要求	HL3	EN 45545-2
IP 等级	IP67	GB/T 4208
缓解间隙/mm	70	—

1.2 理论计算及样机研制

简化极靴磁路,如图 2 所示。

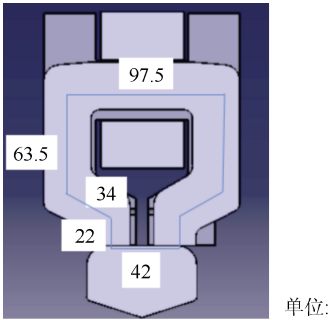


图 2 极靴磁路示意

Figure 2 Schematic diagram of the pole-shoe magnetic circuit

极靴磁动势表达式为:

$$NI = H_1 \times l_1 + H_0 \times l_0 = \frac{B_1}{\mu_0 \times \mu_r} \times l_1 + \frac{B_0}{\mu_0} \times l_0 \quad (1)$$

式中, NI 为磁动势, N 为线圈匝数, I 为线圈电流, H_1 、 H_0 分别为极靴、气隙的磁场强度, l_1 、 l_0 分别为极靴、气隙的磁链长度, B_1 、 B_0 分别为极靴、气隙的磁感应强度, μ_0 为真空磁导率, $4\pi \times 10^{-7}$; μ_r 为相对磁导率。

中间单个极靴对电磁吸力 F_1 为:

$$F_1 = \frac{B_1^2 A_0}{2\mu_0} = 6.73 \quad (2)$$

式中, A_0 表示中间极靴与轨道接触面积。

尾端件电磁吸力 F_2 为:

$$F_2 = \frac{B_2^2 A_2}{2\mu_0} = 10.72 \quad (3)$$

式中, B_2 表示尾端件磁感应强度, A_2 表示尾端件与轨道接触面积。

从而得出电磁铁组件电磁吸力为:

$$F = 8F_1 + 2F_2 = 75.3 \quad (4)$$

根据系统减速度要求,推算磁轨理论吸力不低于 70 kN,即项目内部确定的设计指标。结合工程化应用,对磁轨制动器方案进行适应性调整,制作原理样机,通过样机测试电磁吸力约 72 kN,样机符合开展车辆试验测试需求。

1.3 应力分析

用有限元方法建立高悬挂磁轨制动器完整结构数值模型,综合开展静强度与刚度仿真分析,系统校核其在典型载荷工况下的结构承载能力、应力水平及整体变形特性,确保满足吸力不低于 70 kN 的使用要求。在此基础上,施加 30 g 垂向冲击载荷进行极端工况模拟,计算关键承载部件的应力响应与变形规律,评估结构在强冲击下的安全性与稳定性。仿真得到的关键部件应力分布云图及主要数据结果如图 3 所示,可为结构优化、强度验证及工程应用提供可靠的理论依据与数据支撑。

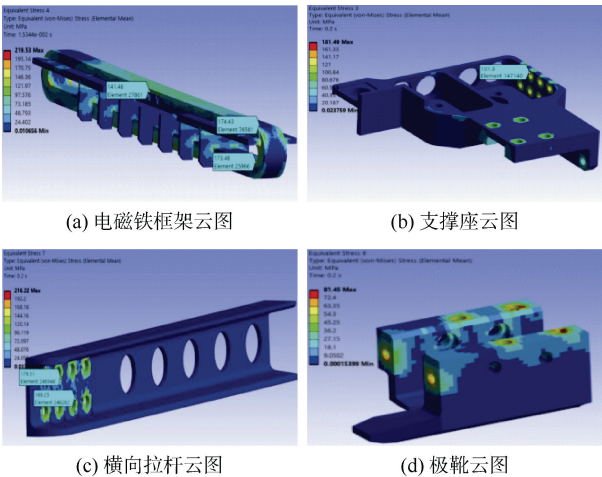


图 3 磁轨关键部件应力云图

Figure 3 Stress contour plot of key components of the magnetic track brake

2 振动特性研究

2.1 模态分析

高悬挂磁轨制动器气缸内部集成复位弹簧,用于实现电磁铁的可靠回位与姿态保持,提升系统在振动、冲击等复杂工况下的稳定性与响应一致性。复位弹簧采用预压缩安装方式,其初始安装载荷、预压缩量、刚度及装配约束等关键设计参数均经过匹配优化,初始参数详见表 2。为全面评估磁轨整体结构的动态特性,避免在列车运行激励频率范围内发生共振,采用有限元方法开展产品模态分析,计算得到固有频率及对

应振型特征。产品整体初始模态分析结果如图 4 所示。

表 2 弹簧主要技术参数
Table 2 Key technical parameters of the springs

指标	预紧力/N	刚度/(N/mm)
内弹簧	638	18.2
外弹簧	1 270	13.8
仿真简化	1 908	32.0

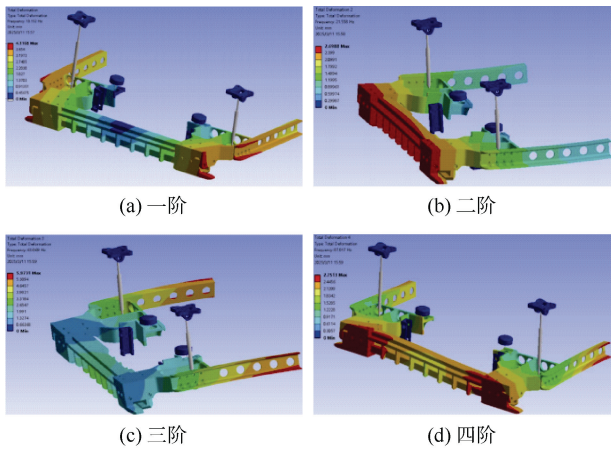


图 4 磁轨模态振型

Figure 4 Mode shapes of the magnetic track brake

2.2 试验测试

为准确获取高悬挂磁轨制动器在实际制动工况下的动态响应及模态特性，采用试验测试方法对磁轨结构开展模态试验研究。试验过程中，在磁轨关键受力部位及结构代表性位置布置三轴高精度加速度传感器，通过采集磁轨在制动工况下的振动响应信号，识别结构的固有频率、阻尼比及振型等关键模态参数，掌握结构在真实工作载荷下的动态特性。

根据磁轨制动力传递路径：电磁铁→支撑座→制动挡板→构架→轴箱，安装加速度传感器。具体布置位置、测点分布及安装方式如图 5 所示，各测点位置综合考虑结构对称性、受力特点及振动传递路径，保证测试数据的可靠性与代表性。通过对制动工况下的实测响应数据进行处理与分析，得到磁轨在实际工作状态下的模态试验结果。该试验结果可为有限元模型修正、结构动态性能评估及减振优化设计提供重要的试验支撑，确保高悬挂磁轨制动器在列车制动冲击及复杂振动环境下不发生共振失效，满足长期稳定运行的工程要求。

高悬挂磁轨制动器在缓解状态(与构架相对静止)及制动状态(电磁铁吸附轨道)的振动频率见表 3。结合高悬挂磁轨制动器结构，分析在两种状态下磁轨整体

沿垂向/横向刚体振动基本一致，即一阶、三阶频率基本不变；而受摩擦副、电磁力等影响，制动状态磁轨电磁铁刚度变化，其局部弯曲/扭转振动变化较大，反映为二阶、四阶频率差异较大。

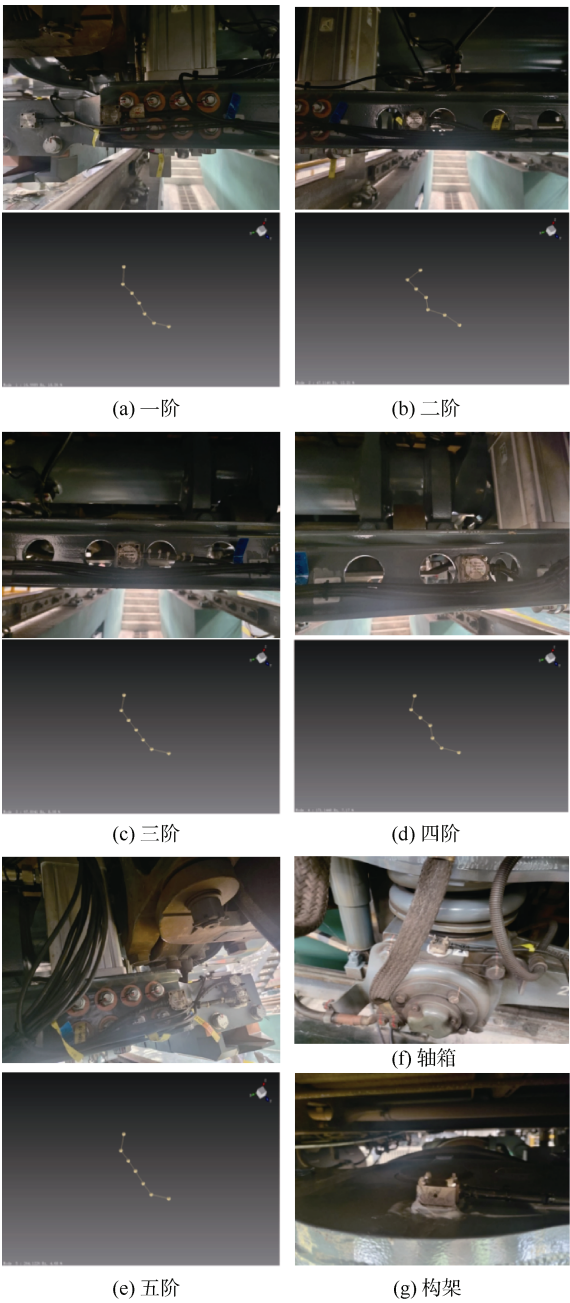


图 5 磁轨制动安装位置

Figure 5 Mode shapes during magnetic track braking

表 3 磁轨制动器振动频率

Table 3 Modes of the magnetic track brake Hz

名称	一阶	二阶	三阶	四阶	备注
仿真	18.15	21.56	63.87	87.02	缓解状态
试验	17	47	68	171	制动状态

对构架、轴箱测点 X 方向振动数据进行处理, 得出传递函数见图 6。对传递路径下振动传递率分析可知: 轴箱/构架传递路径在干轨状态下在 200~700 Hz 范围内振动传递率总体小于 1, 即构架振动会放大; 湿轨状态下 0~400 Hz 构架振动会降低, 400~1 000 Hz 构架振动会放大。20 km/h 速度时, 湿轨轴箱/构架传递率总体大于干轨, 且传递率在 0~600 Hz 普遍大于 1, 说明湿轨状态下磁轨制动有利于降低构架振动。

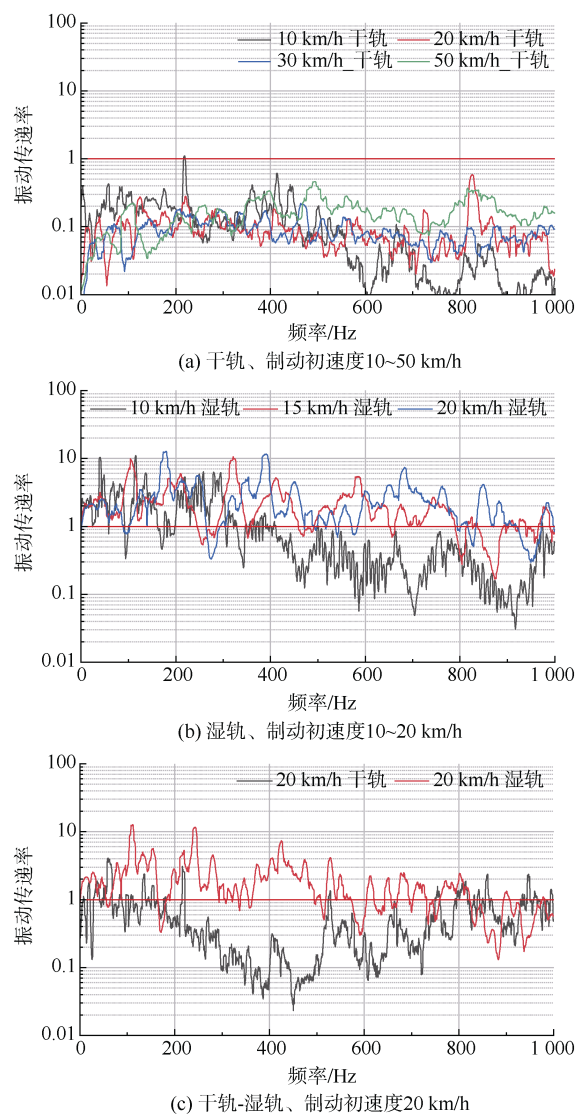


图 6 各工况轴箱/构架振动函数数据

Figure 6 Vibration data of axle box and frame under various operating conditions

3 车辆运行平稳性研究

3.1 运行平稳性

运行平稳性是衡量轨道交通车辆至关重要的综合性性能指标, 其核心意义在于科学评价车辆在实际运行

过程中产生的随机振动特性。对于列车而言, 平稳性直接关系到乘客的乘坐体验、生理感受等舒适性水平, 是衡量车辆设计水平与制造质量的重要标志。

运行平稳性本质上是对车体随机振动的量化评价, 其振动呈现明显的随机性、宽带性与复杂性。为实现科学、统一、可量化的评价, 国内外相关标准均建立了一套完整的评价体系, 包括不同的评价指标、计算方法、频率计权方式及评定等级。其核心思路基本一致, 即通过采集车辆在规定位置的振动信号, 经过频率计权、统计分析与数值计算, 最终形成能够直观反映舒适程度或振动水平的平稳性指标。

平稳性指标 W 等级见表 4, 试验测试结果见图 7。由图 7 可知: ①随着列车制动初速度的提高, 制动过程中的冲击与振动响应相应增大, 平稳性指标最大值呈现明显上升趋势, 表明制动初速度对车辆运行平稳性具有显著影响; 速度越高, 车体振动越剧烈, 平稳性指标数值越大。②在相同制动初速度条件下, 采用空气紧急制动联合磁轨制动的复合制动模式, 其平稳性指标略高于单独采用空气紧急制动工况, 这是由于复合制动作用下制动力提升, 制动冲击略有增加, 车体振动响应小幅上升。③在列车施加磁轨制动后, 实测平稳性指标 W 始终小于 2.5, 依据相关标准^[16]评定, 车辆平稳性等级未发生改变, 仍保持在优良及以上水平,

表 4 平稳性指标等级

Table 4 Classification of ride smoothness index levels

平稳性等级	平稳性指标 W	评定
1 级	$W < 2.50$	优
2 级	$2.50 < W \leq 2.75$	良
3 级	$2.75 < W \leq 3.00$	合格

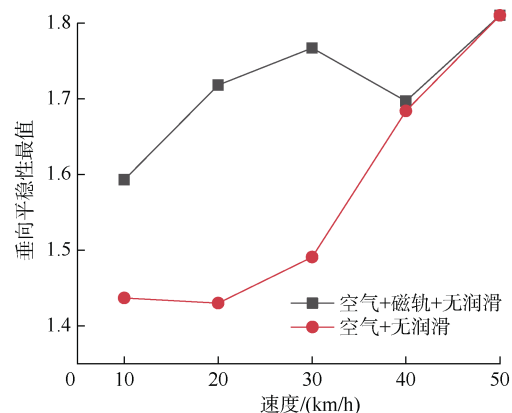


图 7 各工况平稳性最大值

Figure 7 Maximum ride smoothness index under various operating conditions

说明磁轨制动的介入虽使平稳性指标略有上升,但整体仍满足舒适度要求,对车辆平稳性无不利影响。

3.2 运行稳定性

运行稳定性是轨道交通车辆动力学性能中极为关键的评价内容,其核心目的在于评定车辆转向架在运行过程中是否出现难以迅速收敛、持续发散甚至不断加剧的横向振荡现象,即蛇行运动失稳。车辆在运行条件下,受轮轨蠕滑特性、悬挂系统刚度与阻尼配置等多种因素影响,可能导致转向架出现自激振动,表现为横向振幅持续增大、无法依靠自身结构阻尼快速衰减,严重时会影响车辆运行安全性,甚至引发脱轨风险。因此,运行稳定性不仅是车辆设计阶段必须重点校核的动力学指标,也是新车型式试验、现有车辆检修验收及线路运营安全评估中不可或缺的核心内容。

为了准确提取蛇行失稳对应的特征成分,避免线路激励、车体振动、结构局部振动等无关频率成分对判断结果的干扰,测试信号需要经过严格的滤波处理。采用轨道交通车辆转向架蛇行运动的典型频率区间 $0.5\sim 10\text{ Hz}$,滤除低频漂移、高频振动噪声以及结构局部模态振动。经过滤波后的构架横向加速度信号,能够真实反映转向架整体的横向动态行为,为稳定性判定提供准确的数据基础。

本次运行稳定性评价严格依据铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范执行^[16]。在测试过程中,如果构架横向振动加速度峰值连续出现6次及以上达到或超过 8 m/s^2 ,则判定该转向架发生横向失稳,运行稳定性不满足要求。该判定方法既能够有效识别真正的失稳工况,又能避免将瞬时冲击、轨道局部不平顺等偶然因素误判为失稳,具有较高的科学性与工程实用性。

本次试验获得的构架横向加速度峰值、超标次数、失稳判定结果等关键数据见图8。从试验结果看出,在所有测试工况、所有速度级位下,滤波后加速度最大值均保持在较低水平,未出现超过 2.5 m/s^2 的情况,依据GB/T 5599—2019标准判定,转向架运行稳定性良好,未发生横向失稳。这一结果表明,车辆悬挂系统参数匹配合理、转向架动态特性优良,轮轨接触关系稳定,具备足够的抗蛇行能力与阻尼衰减能力。

施加磁轨制动的复合制动工况下,构架横向振动加速度依然保持在安全范围以内,未出现明显上升或异常波动,说明磁轨制动装置的安装、结构刚度、作用力传递方式均不会对转向架的横向动态行为产生负面影响,不会破坏车辆原有的稳定性裕度,也不会诱发

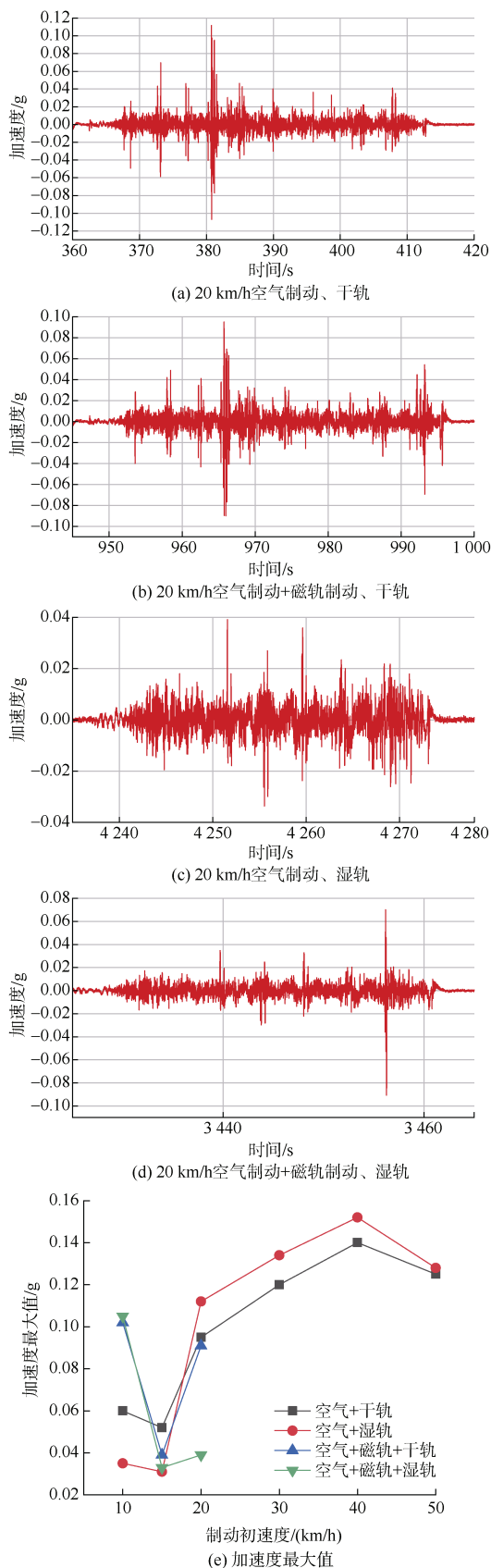


图8 各工况稳定性

Figure 8 Stability under various operating conditions

蛇行失稳。磁轨制动在提供辅助制动力的同时,保持了车辆运行稳定性,充分验证了结构设计、接口匹配、载荷传递路径的合理性与可靠性。为磁轨制动系统的装车可行性、运行安全性及长期使用可靠性提供了坚实的试验支撑,也为后续工程应用、线路运营及同类产品的设计提供了重要的参考依据。

4 结论

通过本文研究获得高悬挂磁轨制动器电磁吸力、结构应力分布及振动模态。首次结合地铁车辆测试,获得高悬挂磁轨制动时动力学特性、不同速度等级、干湿轨下车辆振动加速度数据,得出以下结论。

1) 磁轨制动器制动时振动频率与静态仿真结果基本一致,因此在现有车辆加装磁轨制动器,开展理论分析避免车辆共振有一定现实基础。

2) 在极端雨雪天气的雨雪湿轨工况下,磁轨制动器振动加速度峰值小于 2.5 m/s^2 ,车辆平稳性指标 W 始终小于 2.5,通过试验验证磁轨制动不会造成车辆横向失稳,运行稳定性符合轨道交通车辆标准要求。

3) 本研究揭示了高悬挂磁轨制动的振动传递规律,验证其工程适用性,为提升城轨列车极端气候适应性提供核心技术支持,对保障城轨列车在极端天气下的安全稳定运行具有重要意义。

参考文献

- [1] 邹晓宇,高立群,丁福焰,等.关于极靴磨耗对磁轨制动器吸力特性影响的研究[J].铁道机车车辆,2023,43(4):83-87.
Zou Xiaoyu, Gao Liqun, Ding Fuyan, et al. Study on attractive force characteristics of magnetic track brake under influence of pole shoes wear[J]. Railway Locomotive & Car, 2023, 43(4): 83-87.
- [2] 高立群,丁福焰,王立宁,等.磁轨制动器吸力特性研究[J].铁道机车车辆,2022,42(1):56-59.
Gao Liqun, Ding Fuyan, Wang Lining, et al. Study on attractive-force characteristics of magnetic track brake[J]. Railway Locomotive & Car, 2022, 42(1): 56-59.
- [3] 王立超,王立宁,范志军,等.磁轨制动静态吸力试验规范研究[J].中国铁道科学,2025,46(6):173-178.
Wang Lichao, Wang Lining, Fan Zhijun, et al. Study on the static attractive force test specification for magnetic track brakes[J]. China Railway Science, 2025, 46(6): 173-178.
- [4] 王立宁,高立群,韩晓辉,等.高悬挂磁轨制动器温升特性[J].铁道机车车辆,2025,45(2):79-85.
Wang Lining, Gao Liqun, Han Xiaohui, et al. Temperature rise characteristics of high suspension magnetic track brake[J]. Railway Locomotive & Car, 2025, 45(2): 79-85.
- [5] 李江波,袁文琦,王明星,等.磁轨制动器励磁线圈耐热等级分析[J].铁道机车车辆,2022,42(2):75-78.
Li Jiangbo, Yuan Wenqi, Wang Mingxing, et al. Heat resistance grade analysis of the excitation coil of the magnetic

- rail brake[J]. Railway Locomotive & Car, 2022, 42(2): 75-78.
- [6] 吴明超,吴佳楠,吴慧鹏,等.基于磁轨制动摩擦特性的有轨电车紧急制动控制优化方法[J].城市轨道交通研究,2025,28(3):192-195.
Wu Mingzhao, Wu Jianan, Wu Huipeng, et al. Tram emergency braking control optimization method based on magnetic rail braking friction characteristics[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(3): 192-195.
- [7] Kocbay E, Steininger A, Pavicsics A, et al. Analysis of frictional sliding contact in magnetic track brakes: a simplified methodology[J]. Pamm, 2025, 25(4): e70052.
- [8] Ebner B, Plöchl M, Edelmann J. Stability behaviour of a basic magnetic track brake model: Influences of system parameters and motion-induced eddy currents[J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 113(25): 34265-34289.
- [9] Avramov K, Ebner B, Edelmann J, et al. Self-sustained oscillations of a magnetic track brake frame[J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 113(10): 11121-11142.
- [10] 王明星,焦记楠,杨磊,等.摩擦条件对磁轨制动器极靴材料与钢轨材料间摩擦因数的影响[J].机械工程材料,2022,46(1):85-90.
Wang Mingxing, Jiao Jinan, Yang Lei, et al. Effect of friction condition on friction coefficient between pole shoe material of magnetic rail brake and rail material[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2022, 46(1): 85-90.
- [11] 李培署,王明星,张笑慰.浅谈磁轨制动对轮轨黏着的影响[J].铁道车辆,2022,60(4):26-29.
Li Peishu, Wang Mingxing, Zhang Xiaowei. Influence of magnetic rail brake on wheel rail adhesion[J]. Rolling Stock, 2022, 60(4): 26-29.
- [12] 张龙平.磁轨制动器应用于地铁车辆的可行性探讨[J].铁道车辆,2019,57(10):31-32.
Zhang Longping. Feasibility discussion of application of the magnetic track brakes on metro vehicles[J]. Rolling Stock, 2019, 57(10): 31-32.
- [13] 牛玉国,刘小刚,夏志远,等.北京地铁首都机场线地铁车辆国产化磁轨制动器的研制[J].铁道车辆,2022,60(2):89-92.
Niu Yuguo, Liu Xiaogang, Xia Zhiyuan, et al. Research and development of domestic magnetic track brake for metro vehicles of Beijing subway capital airport express[J]. Rolling Stock, 2022, 60(2): 89-92.
- [14] 王明星,袁文琦,李敬,等.磁轨制动器施加时的能量过程分析[J].铁道机车车辆,2020,40(4):26-29.
Wang Mingxing, Yuan Wenqi, Li Jing, et al. Energy process analysis of magnetic track brake in operation[J]. Railway Locomotive & Car, 2020, 40(4): 26-29.
- [15] Ebner B, Tippelt D, Edelmann J, et al. Active mitigation of self-excited vibrations of a magnetic track brake[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2647(15): 152007.
- [16] GB/T 5599—2019. 机车车辆动力学性能评定和试验鉴定规范[S].

(编辑:王艳菊)