



机械制动对短定子磁浮车辆 悬浮系统的影响研究

罗华军^{1,2}, 蒋毅^{1,2}, 朱跃欧^{1,2}, 宋丽伟^{1,2}, 洪远卓^{1,2}

(1. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 磁浮交通车辆系统集成湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412001)

摘要: 针对短定子磁浮车辆机械制动施加及缓解不良可能导致悬浮系统稳定性下降的问题, 文章分析了机械制动工作原理及制动夹钳与轨道接缝碰撞的作用机理, 建立了夹钳与轨道碰撞模型, 并结合运营线路开展试验研究。结果表明, 制动夹钳产生的冲击力与轨道接缝横向错台及车辆运行速度呈正相关。在机械制动或缓解不良工况下, 当轨道横向错台为3.0 mm、车辆运行速度低于80 km/h时, 悬浮系统稳定性好; 当车辆运行速度由80 km/h提高至140 km/h时, 最大瞬时冲击力与悬浮电磁铁最大悬浮力的比值由30%增至49%, 悬浮系统出现掉点、砸轨现象。基于上述规律, 文章提出将轨道横向错台控制在0.5 mm以内, 并适当增大复位弹簧刚度的优化方法。运营线试验结果表明, 优化后车辆在0~140 km/h速度范围内可稳定运行, 悬浮系统未出现掉点、砸轨现象。研究结果可为短定子磁浮车辆悬浮稳定性及轨道结构优化提供工程参考。

关键词: 短定子磁浮车辆; 机械制动; 悬浮系统; 制动夹钳; 缓解不良; 城市轨道交通

中图分类号: U237

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2026)02-0185-06

0 引言

短定子磁浮车辆作为一种新型轨道交通工具, 具有无接触运行、噪声低、维护成本低等优势, 近年来在城市轨道交通系统中得到广泛关注与应用^[1]。磁浮车辆制动系统包括电制动和机械制动2个子系统, 二者协同工作, 保障车辆安全运行^[2]。悬浮系统的作用是将车辆与轨道的间隙保持在8~10 mm内, 是实现车辆与轨道无接触运行的核心子系统^[3-5]。

机械制动子系统通过驱动制动夹钳夹紧F轨产生摩擦力, 实现车辆减速功能, 从而保证车辆安全运行^[6-7]。当机械制动子系统的制动夹钳与轨道接触时, 将对车辆悬浮系统产生冲击, 严重时会导致悬浮系统掉点、砸轨, 并对轨道和车辆产生较大冲击, 影响车辆运行的平稳性与乘坐舒适性, 甚至可能引发行车安全事故。文献[8]建立了制动器模型, 并与电磁铁模型、悬浮模

块相结合, 从理论上验证了制动器对悬浮系统稳定性存在影响, 但未给出相应的解决方法。文献[9]针对制动夹钳的异常状态, 提出了相应的检测方法以便于检修人员检修维护, 但未针对制动夹钳影响悬浮稳定性的问题提出有效的解决方法。因此, 有必要深入研究机械制动子系统对悬浮系统的影响机理, 并提出相应的优化对策, 以提升磁浮车辆的综合运行性能。

本文针对短定子磁浮车辆机械制动子系统对悬浮系统稳定性的影响开展研究。首先介绍机械制动基本工作原理, 并分析机械制动施加及缓解不良对悬浮系统稳定性的影响机理; 其次基于机理分析结果, 建立机械制动夹钳与轨道碰撞的仿真模型, 并在运营线路开展相关试验研究; 最后针对机械制动施加及缓解不良等工况对悬浮系统产生的不利影响, 提出轨道与制动夹钳的优化设计方法, 并通过试验验证其有效性。研究结果可为提升磁浮车辆运行安全性、稳定性及乘坐舒适性提供一定的理论依据与工程参考。

基金项目: 湖南省科技创新计划项目 (2024JK2038); 中国中车科技研究开发计划 (2024CCB206)

通信作者: 罗华军, 男, 正高级工程师, 中车资深技术专家, 主要从事磁浮车辆设计方面的研究; E-mail: 010200097516@crrecg.cc

引用格式: 罗华军, 蒋毅, 朱跃欧, 等. 机械制动对短定子磁浮车辆悬浮系统的影响研究[J]. 机车电传动, 2026(2): 185-190.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.020.

Citation: LUO Huajun, JIANG Yi, ZHU Yueou, et al. Research on impact of mechanical braking on levitation systems of short-stator maglev vehicles [J]. Electric drive for locomotives, 2026(2): 185-190.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.02.020.

1 机械制动基本工作原理

机械制动是通过控制制动夹钳运动,使内外侧制动闸片贴合F轨,实现机械制动功能^[7],制动夹钳结构如图1所示。机械制动施加时,单向作用液压缸内的油压增大,推动外侧和内侧制动闸片相向运动,同时通过复位导杆和止挡螺母压缩复位弹簧,使闸片夹紧F轨形成制动力^[10]。机械制动缓解时,释放单向作用液压缸内的油压,依靠复位弹簧的弹性恢复力,通过止挡螺母带动复位导杆和制动闸片反向作用,远离F轨^[11]。

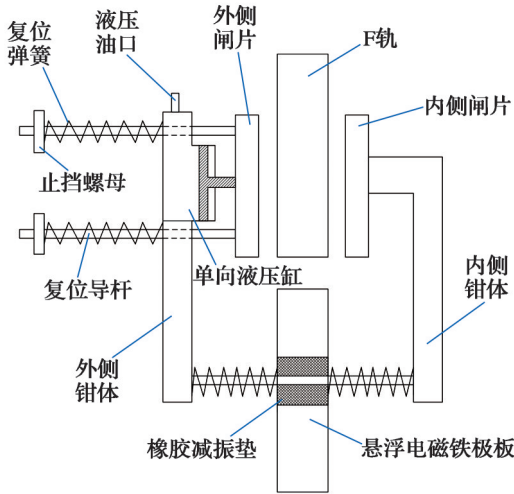


图1 制动夹钳结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of brake caliper

2 机械制动对悬浮系统的影响机理研究

2.1 机械制动施加对悬浮系统的影响机理

磁浮线路的轨道由多段F轨构成,且相邻F轨存在宽0~40 mm的轨缝^[12]。受制造与安装误差的影响,各轨缝处存在横向错台^[13],如图2所示。

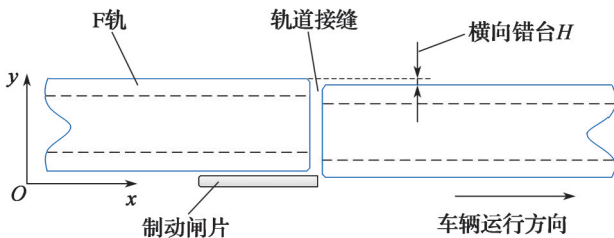


图2 轨道接缝横向错台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of lateral offset at track joints

车辆运行过程中,机械制动施加时,制动夹钳闸片与F轨制动面接触并产生制动力。当制动闸片经过轨缝位置时,制动夹钳闸片会与轨缝横向错台发生碰撞。由于存在摩擦力与旋转力矩,制动闸片与xy平面存在一个小夹角 α 。假定碰撞接触点为 $p(r_x, 0, r_z)$,碰撞示意图如图3所示。

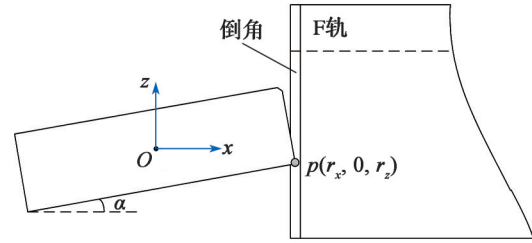


图3 轨道接缝与闸片碰撞示意图

Fig. 3 Schematic diagram of collision between track joint and brake pad

分析碰撞过程^[14],其力矩关系可表示为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M} &= \mathbf{r} \times \mathbf{F} \\ |\mathbf{F}| &= \frac{m_b \Delta v}{\Delta t} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为力矩,在x、y、z轴的分量分别为 M_x 、 M_y 、 M_z , N·m; $\mathbf{r}$ 为接触点相对质心的位置矢量,在x、y、z轴的分量分别为 r_x 、 r_y 、 r_z ; m ; $\mathbf{F}$ 为接触力,在x、y、z轴的分量分别为 F_x 、 F_y 、 F_z , N; m_b 为闸片质量, kg; Δv 为碰撞前后车辆运行速度的变化值, m/s; Δt 为接触时间, s。

F轨的碰撞接触位置位于倒角面,其单位法向量 $\mathbf{n} = (\cos 45^\circ, \sin 45^\circ, 0)$,若 $\alpha=0^\circ$,则

$$(F_x, F_y, F_z) = \mathbf{F}_n \cdot \mathbf{n} = (0.707|\mathbf{F}_n|, 0.707|\mathbf{F}_n|, 0) \quad (2)$$

实际工程中,制动夹钳闸片与xy平面存在夹角 $\alpha \neq 0^\circ$,则 $\mathbf{r}$ 可表示为

$$\mathbf{r} = (r_x, 0, r_z) = (0.5a, 0, 0.5a \sin \alpha) \quad (3)$$

式中: α 为制动夹钳闸片与xy平面间的夹角, rad。

此时力矩 $\mathbf{M}$ 可表示为:

$$M_x = I_x \dot{\omega}_x = -r_z F_y, M_y = I_y \dot{\omega}_y = r_z F_x, M_z = I_z \dot{\omega}_z = r_x F_y \quad (4)$$

$$I_x = \frac{m_b}{12} (b^2 + c^2), I_y = \frac{m_b}{12} (a^2 + c^2), I_z = \frac{m_b}{12} (a^2 + b^2) \quad (5)$$

式中: I_x 、 I_y 、 I_z 为闸片转动惯量在x、y、z轴的分量, kg·m²; $\dot{\omega}_x$ 、 $\dot{\omega}_y$ 、 $\dot{\omega}_z$ 为闸片角加速度在x、y、z轴的分量, rad/s²; a 为制动闸片长度, m; b 为制动闸片宽度, m; c 为制动闸片厚度, m。

闸片与F轨碰撞时,垂向冲击力 F_z 会传递至制动夹钳并进一步传递至悬浮电磁铁,对悬浮系统垂向加速度造成干扰。因为制动夹钳对闸片存在较强的约束,所以闸片作用到夹钳本体的z轴方向的力 F_z 主要由力矩 M_y 产生,如式(6)所示。

$$F_z = m a_z, a_z = \dot{\omega}_y r_x \quad (6)$$

式中: a_z 为制动闸片垂向加速度。

联立式(3)~式(6),可得

$$F_z = \frac{m r_z r_x F_x}{I_y} \approx 3 F_x \sin \alpha \quad (7)$$

考虑到闸片与F轨之间的摩擦因数 μ ,式(7)可改写为

$$F_z = \frac{m r_z r_x F_x}{I_y} \approx 3 F_x \sin \alpha + \mu |\mathbf{F}_n| \cos \alpha \quad (8)$$

由上述分析可知,因夹角 $\alpha \neq 0^\circ$,同时摩擦因数 $\mu \neq 0$,当轨道接缝横向错台 H 较大且车辆运行速度较高

时, 闸片与轨道碰撞产生的力 F_z 将在 z 轴方向产生较大的干扰力, 并通过悬浮电磁铁极板传递至悬浮传感器, 导致其检测到的垂向加速度信号受干扰, 悬浮系统的稳定性变差, 容易产生悬浮掉点、砸轨等故障。

2.2 缓解不良对悬浮系统的影响机理

机械制动夹钳正常缓解后, 其内侧和外侧制动闸片与F轨的表面间的距离之和应不小于15 mm, 如图4(a)所示。制动夹钳处于缓解状态时, 若制动闸片与F轨的轨表面之间的间隙过小或发生直接接触, 如图4(b)所示, 则为制动夹钳缓解不良现象。

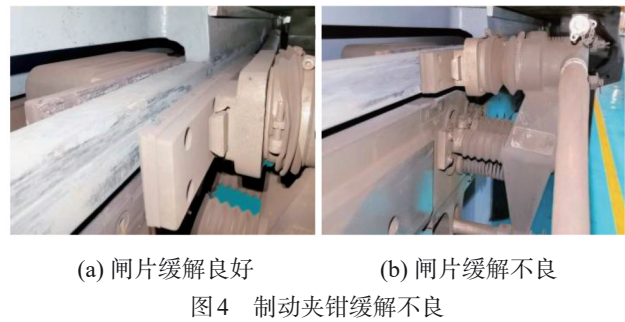


Fig. 4 Inadequate brake caliper release

当车辆在制动夹钳缓解不良状态运行时, 因轨缝横向错台的存在, 制动闸片在轨缝处不断冲击轨道。该振动冲击随速度提高而增大, 并随错台增大而加剧。振动冲击传递至悬浮传感器, 干扰垂向加速度信号, 直接影响悬浮稳定性; 振动冲击增大到一定程度后, 将引发悬浮掉点、砸轨等故障。

3 试验与优化

3.1 闸片与轨道接缝碰撞仿真试验

建立仿真模型, 对夹钳与轨道碰撞产生的悬浮系统的垂向干扰力进行研究, 仿真模型和参数分别如图5、表1所示。

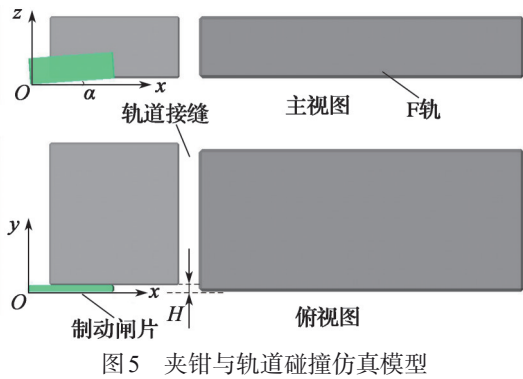


Fig. 5 Simulation model of collision between brake caliper and track

制动闸片与轨道接缝碰撞仿真结果如图6所示。仿真结果表明, 碰撞产生的垂向冲击力 F_z 与车辆运行速度 v 呈近似线性增长关系, 即随速度提高, 垂向冲击力

表1 仿真模型参数

Table 1 Parameters of the simulation model

物理量	数值
闸片质量 m_b/kg	2
运行速度 $v/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	0~140
闸片长度 a/mm	130
闸片宽度 b/mm	40
闸片厚度 c/mm	10
轨道接缝横向错台 H/mm	0.5~3.0
F轨磁极宽度 w/mm	220 ^[15]
F轨磁极高度 h/mm	97 ^[15]
摩擦因数 μ	0.4
闸片与 xOy 平面夹角 $\alpha/(\text{°})$	5

显著增大。同时, 垂向冲击力 F_z 与轨道接缝横向错台 H 之间也明显呈正相关, 随横向错台 H 增大而增加。进一步分析可知, 在较大横向错台条件下, F_z - v 曲线的斜率明显增大, 说明横向错台 H 会强化车辆运行速度对垂向冲击响应的影响程度。

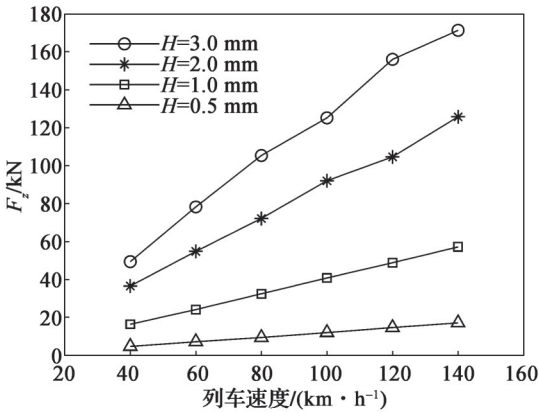


图6 碰撞仿真结果

Fig. 6 Collision simulation results

短定子磁浮车辆悬浮电磁铁的悬浮力一般为350 kN^[16]。当横向错台 $H=0.5$ mm时, 车辆在0~140 km/h速度范围内行驶, 闸片与轨道冲击产生的最大垂向冲击力 F_z 约17 kN, 约占悬浮力的5%; 当横向错台 $H=1.0$ mm时, 最大垂向冲击力 F_z 约57 kN, 约占悬浮力的16%。因此, 当轨道横向错台 $H\leq 1.0$ mm时, 车辆在0~140 km/h速度范围内运行, 垂向冲击力 F_z 相对于悬浮力的占比较小, 悬浮系统受到的垂向冲击干扰较小。

当横向错台 $H=2.0$ mm, 车辆运行速度 $v=40$ km/h时, 闸片与轨道冲击产生的最大垂向冲击力 F_z 约37 kN, 约占悬浮力的11%; 车辆运行速度 v 提高至120 km/h时, 最大垂向冲击 F_z 约105 kN, 约占悬浮力的30%; 车辆运行速度 v 提高至140 km/h时, 最大垂向冲击力 F_z 约126 kN, 约占悬浮力的36%。因此, 横向错台 $H=2.0$ mm且车辆运行速度 v 较高时, 悬浮系统受到的垂向冲击干扰力相对较大, 可能会造成悬浮系统稳定性下降, 引发悬浮系统掉点、砸轨。

当横向错台 $H=3.0$ mm, 车辆运行速度 $v=80$ km/h

时, 闸片与轨道撞击产生的垂向冲击力 F_z 约为 105 kN, 约占最大悬浮力的 30%; 车辆运行速度 $v=140$ km/h 时, 垂向冲击力 F_z 约为 171 kN, 约占最大悬浮力的 49%。因此, 当轨道横向错台 $H=3.0$ mm 且车辆运行速度较高时, 闸片与轨道的冲击力较大, 悬浮系统受到的垂向冲击干扰力大, 将导致悬浮系统失稳。

3.2 机械制动施加对悬浮系统的影响试验

研究团队在长沙磁浮快线开展制动施加对悬浮系统的影响试验, 线路横向错台 H 最大值约 3 mm。车辆以 ATO 方式运行, 最高运行速度约 140 km/h, 车辆减速过程中存在施加机械制动工况。试验里程约 300 km, 试验过程中, 通过 CAN 总线采集整车悬浮点的悬浮间隙、悬浮点垂向加速度信息, 同时采集列车运行速度和机械制动施加状态信息。通过分析列车运行速度和悬浮点状态的变化情况, 分析机械制动和车辆运行速度对悬浮点稳定性的影响。车辆在运营线路上按限速运行, 线路横向错台 H 最大值约为 3 mm。在运营线路上开展机械制动试验, 并同步采集悬浮系统数据。分析试验数据可知, 随着车辆运行速度提高, 机械制动施加对悬浮系统稳定性的影响增大, 主要表现为垂向加速度信号和悬浮间隙波动增大, 直至出现悬浮掉点、砸轨等故障现象, 如图 7 所示。

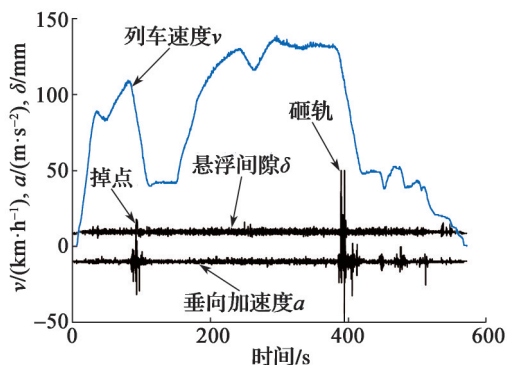


图 7 机械制动施加对悬浮系统影响情况

Fig. 7 Impact of mechanical braking application on the levitation system

进一步统计分析车辆运行数据可知, 当车辆运行速度低于 80 km/h 且机械制动施加时, 悬浮传感器检测到的垂向加速度信号较稳定, 波动范围为 $-30\sim 20$ m/s^2 , 表明悬浮系统稳定性较好, 如图 8 所示。当车辆运行速度高于 80 km/h 且机械制动施加时, 垂向加速度信号波动增大, 波动范围达 $-50\sim 50$ m/s^2 , 表明悬浮系统所受干扰增大, 悬浮系统出现掉点或砸轨的概率随速度增加而提高, 如图 9 所示。

3.3 夹钳缓解不良试验

通过减小车辆部分制动夹钳复位弹簧的刚度, 模拟制动夹钳缓解不良现象。在运营线路上, 车辆按限速运行进行试验, 同时采集悬浮系统数据, 以研究夹

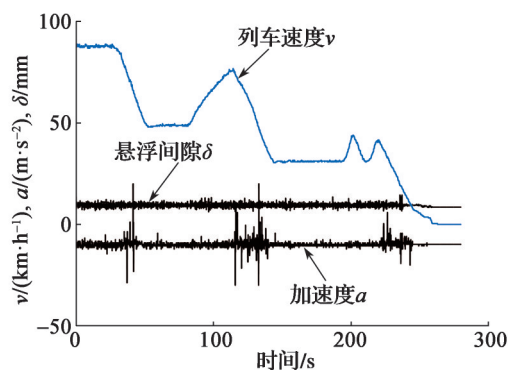


图 8 车辆运行速度低于 80 km/h 时悬浮系统的稳定性

Fig. 8 Stability of the levitation system at vehicle speeds below 80 km/h

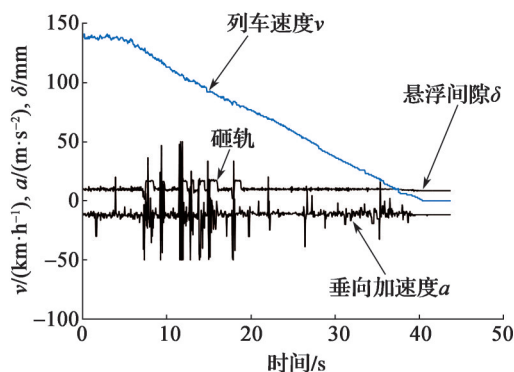


图 9 车辆运行速度高于 80 km/h 时悬浮系统的稳定性

Fig. 9 Stability of the levitation system at vehicle speeds exceeding 80 km/h

钳缓解不良对悬浮系统稳定性的影响。

试验数据统计分析表明, 制动夹钳缓解不良与机械制动施加对车辆悬浮系统稳定性的影响类似。当发生缓解不良现象时, 在车辆运行速度较低的情况下, 垂向加速度受到的影响较小, 悬浮系统稳定性较好, 不易出现掉点、砸轨故障; 当车辆运行速度较高时, 悬浮系统垂向加速度信号受到的影响较大, 悬浮系统出现掉点或砸轨故障, 如图 10 所示。

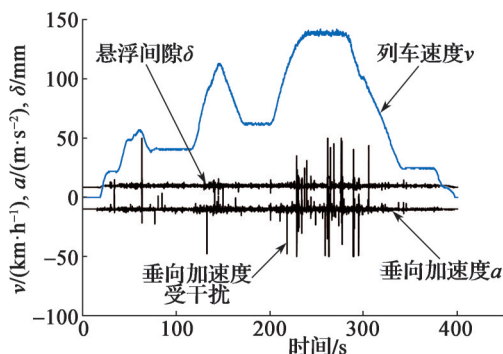


图 10 缓解不良对悬浮系统稳定性的影响

Fig. 10 Impact of inadequate release on the levitation system stability

3.4 优化方法与试验验证

综合机械制动施加和夹钳缓解不良的试验数据可知, 在机械制动施加和夹钳缓解不良工况下, 制动夹

钳与轨道接缝发生碰撞, 碰撞冲击对悬浮系统的垂向加速度信号造成干扰, 导致悬浮系统稳定性受到影响。

为提升悬浮系统稳定性, 提出对轨道接缝横向错台 H 的精度和制动夹钳复位弹簧进行优化, 以减小制动夹钳与轨道之间因碰撞对悬浮系统垂向加速度信号的干扰。试验前, 将运营线路的轨道横向错台调整为 $H \leq 0.5 \text{ mm}$, 同时适当增大制动夹钳复位弹簧刚度以提高其恢复力, 避免缓解不良的情况。优化后机械制动施加对悬浮系统稳定性的影响如图 11 所示。

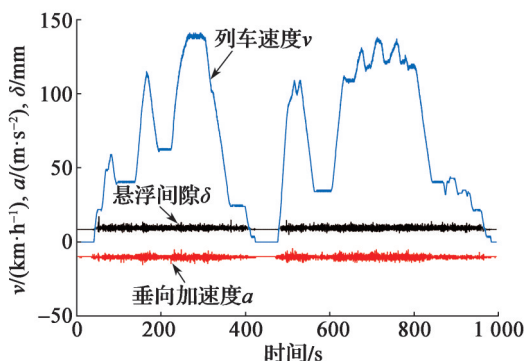


图 11 优化后悬浮系统试验数据

Fig. 11 Test data of the optimized levitation system

试验结果表明, 在优化轨道接缝横向错台 H 后, 机械制动施加工况下悬浮系统垂向加速度受到的干扰较小, 系统能持续稳定运行。同时, 因制动夹钳复位弹簧刚度提高, 试验过程中未出现缓解不良现象。采取 2 项优化措施后的试验数据显示, 悬浮间隙变化范围为 5~12 mm, 垂向加速度变化范围为 $-15 \sim 5 \text{ m/s}^2$, 悬浮系统整体运行状态良好, 未出现掉点、砸轨等异常情况。

4 结束语

本文研究了短定子磁浮车辆机械制动施加及夹钳缓解不良工况对悬浮系统稳定性的影响。研究表明, 制动夹钳与轨道接缝碰撞产生的垂向冲击力与轨道接缝横向错台及车辆运行速度呈正相关。当车辆运行速度由 80 km/h 提高至 140 km/h 时, 制动夹钳与轨道的垂向冲击力相对最大悬浮力的占比从约 19% 增至约 49%, 冲击力显著增大, 即悬浮系统受到的垂向干扰力显著增大。运营线试验结果表明, 当车辆运行速度低于 80 km/h 时, 制动夹钳与轨道碰撞产生的冲击对悬浮系统造成的干扰较小, 悬浮系统稳定性较好; 当车辆运行速度高于 80 km/h 且存在机械制动施加或夹钳缓解不良工况时, 轨缝处碰撞冲击可能导致悬浮系统出现掉点、砸轨等故障。通过将轨道接缝横向错台控制在 0.5 mm 以内并适当提高制动夹钳复位弹簧刚度, 可有效减小碰撞冲击。优化后车辆在 0~140 km/h 速度范围内运行稳定, 悬浮系统未出现掉点和砸轨现象。为进一步提高悬浮系统稳定性, 后续可从以下方面开展研

究: ①优化机械制动结构, 减少机械制动施加及夹钳缓解不良的情况; ②进一步优化悬浮控制算法, 提高悬浮系统对机械制动冲击的适应能力; ③针对磁浮交通的特殊性, 研究新的制动模式 (如电制动), 减少机械制动, 以降低机械制动对悬浮系统的不良影响。

参考文献:

- [1] 李希宁, 佟来生. 中低速磁浮列车技术研究进展[J]. 电力机车与城轨车辆, 2011, 34(2): 1-4.
LI Xining, TONG Laisheng. Technology research of medium and low speed maglev train[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2011, 34(2): 1-4.
- [2] 司丽, 杜慧杰, 杨永勤, 等. 中低速磁浮列车制动特性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(3): 83-84.
SI Li, DU Huijie, YANG Yongqin, et al. On the braking characteristics of medium and low speed maglev train[J]. Urban mass transit, 2019, 22(3): 83-84.
- [3] GB/T 39902—2021 城市轨道交通中低速磁浮车辆悬浮控制系统技术条件[S].
GB/T 39902—2021 Technical specification for the levitation control system of medium-low speed maglev vehicle of the urban rail transit[S].
- [4] 徐俊起, 林国斌, 荣立军, 等. 中低速磁浮列车悬浮控制技术成果及应用[J]. 铁道技术标准(中英文), 2022, 4(10): 34-39.
XU Junqi, LIN Guobin, RONG Lijun, et al. Research achievements and application of levitation control technology for medium-low speed maglev train[J]. Railway technical standard(Chinese & English), 2022, 4(10): 34-39.
- [5] 张佳欣, 韩羽菲, 刘帅. 磁浮列车单点电磁悬浮系统悬浮力优化计算[J]. 机车电传动, 2025(4): 23-30.
ZHANG Jiaxin, HAN Yufei, LIU Shuai. Optimized calculation approach of levitation force in single-point maglev system for maglev trains[J]. Electric drive for locomotives, 2025(4): 23-30.
- [6] 刘凯兰, 曾志权, 叶婧妍. 液压制动夹钳通用型组装机装设计[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022, 45(2): 90-93.
LIU Kailan, ZENG Zhiquan, YE Jingyan. Design of general assembly tooling for hydraulic brake clamp[J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2022, 45(2): 90-93.
- [7] 徐少亭, 孔德鹏, 王震, 等. 中低速磁浮车辆制动夹钳单元设计研究[J]. 现代城市轨道交通, 2020(1): 21-25.
XU Shaoting, KONG Depeng, WANG Zhen, et al. Research on design of brake clamp unit of medium and low speed maglev vehicle[J]. Modern urban transit, 2020(1): 21-25.
- [8] 迟振祥. 面向 EMS 型磁浮列车机械制动车轨耦合自激振动问题研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
CHI Zhenxiang. Research on the coupling self-excited vibration of the mechanical braking of the EMS maglev train[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [9] 朱跃欧, 廖看秋. 中低速磁浮列车制动夹钳状态检测方法研究[J]. 新型工业化, 2022, 12(11): 150-154.

- ZHU Yueou, LIAO Kanqiu. Research on condition detection method of brake caliper of medium and low speed maglev train[J]. The journal of new industrialization, 2022, 12(11): 150-154.
- [10] 胡乃琳, 唐刚, 宋瑞, 等. 中低速磁浮列车制动系统的研究[J]. 铁道机车与动车, 2023(8): 7-11.
- HU Nailin, TANG Gang, SONG Rui, et al. Research on brake system of medium and low speed maglev train[J]. Railway locomotive and motor car, 2023(8): 7-11.
- [11] 高小波, 段继超, 张青. 中低速磁浮车辆制动系统选型研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2023, 46(2): 29-32.
- GAO Xiaobo, DUAN Jichao, ZHANG Qing. Study on brake system selection of medium-low speed maglev train [J]. Electric locomotives & mass transit vehicles, 2023, 46 (2): 29-32.
- [12] 敖建安, 魏高恒, 马卫华, 等. 轨道精度对中低速磁浮列车-轨排-桥梁动力作用影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(11): 2738-2747.
- AO Jianan, WEI Gaocheng, MA Weihua, et al. Influence of geometry accuracy of track structure on dynamic performance of the coupled medium-low speed maglev train-rail-bridge system[J]. Journal of railway science and engineering, 2020, 17(11): 2738-2747.
- [13] 王勇. 基于中低速磁浮轨排特征的线型校正方法研究[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(4): 30-34.
- WANG Yong. Research on alignment correction method based on the track panel characteristics of medium and low speed maglev[J]. Journal of railway engineering society, 2024, 41(4): 30-34.
- [14] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学- II [M]. 8 版. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- Harbin Institute of Technology. Department of Theoretical Mechanics. Theoretical mechanics- II [M]. 8th ed. Beijing: Higher Education Press, 2016.
- [15] 李伟强. 中低速磁浮交通的磁浮轨排设计及铺装技术要点[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(5): 187-191.
- LI Weiqiang. Design and laying technical points of maglev transport rail of medium and low speed maglev transit[J]. Urban mass transit, 2021, 24(5): 187-191.
- [16] 李海涛, 张文跃, 洪远卓, 等. 快速磁浮列车磁轨关系及导向能力优化研究[J]. 现代交通与冶金材料, 2025, 5(2): 8-15.
- LI Haitao, ZHANG Wenyue, HONG Yuanzhuo, et al. Research on the magnet-rail relationship and optimization of guidance ability of the rapid maglev vehicle[J]. Modern transportation and metallurgical materials, 2025, 5(2): 8-15.

Research on impact of mechanical braking on levitation systems of short-stator maglev vehicles

LUO Huajun^{1,2}, JIANG Yi^{1,2}, ZHU Yueou^{1,2}, SONG Liwei^{1,2}, HONG Yuanzhuo^{1,2}

(1. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Maglev Transportation Vehicle System Integration, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: This paper addresses potential stability degradation in the levitation systems of short-stator maglev vehicles, caused by mechanical braking application and inadequate braking release. Based on an analysis of the operating principle of mechanical braking and the interaction mechanism between the brake calipers and track joints, a caliper-track collision model was established, and experimental research was performed based on a commercially operated line. Analysis results show that the impact force generated by the brake calipers is positively correlated with both lateral offsets at track joints and vehicle speeds. Under mechanical braking application and inadequate braking release conditions, the levitation system remains stable when lateral offsets at track joints are kept below 3.0 mm and the vehicle speed is below 80 km/h. As speed increases from 80 km/h to 140 km/h, the ratio of the maximum instantaneous impact force to the maximum suspension force of the levitation electromagnet rises from 30% to 49%, leading to levitation dropout and track striking. Based on the above findings, an optimization method is proposed: control lateral offsets within 0.5 mm at track joints and appropriately increase the reset spring stiffness. In experiments on the commercially operated line, the optimized system maintained stable vehicle operation at speeds up to 140 km/h, without levitation dropout or track striking. These results provide engineering reference for further optimizing levitation stability control and track structure for short-stator maglev vehicles.

Keywords: short-stator maglev vehicle; mechanical braking; levitation system; brake caliper; inadequate braking release; urban rail transit