

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.05.004

中低速磁浮车辆悬浮故障工况动力学分析

张小平,李苗,马卫华,罗世辉

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:为研究中低速磁浮车辆电磁铁失效失去悬浮力时的故障工况对磁浮车辆动力学性能的影响,建立三悬浮架中低速磁浮车辆动力学模型,对直线运行和曲线通过性能的各项动态指标进行仿真分析。结果表明:电磁铁失效故障对平稳性指标和导向间隙影响较小,对悬浮间隙、悬浮模块点头角和通过速度影响较大;发生电磁铁失效故障时,直线路段需要限速 60 km/h 运行,R100 曲线路段需要限速 38 km/h 运行。

关键词:中低速磁浮车辆;故障工况;平稳性;曲线通过

中图分类号:U237; U270.1⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)05-0017-05

Dynamic Analysis of Suspension Fault Condition for Medium-Low Speed Maglev Vehicle

ZHANG Xiaoping, LI Miao, MA Weihua, LUO Shihui

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To study the fault condition of medium-low speed maglev vehicle in its electromagnet failure and suspension force loss and the influence on its vehicle dynamic performance, a dynamic model of medium-low speed maglev vehicle with three suspension frames was established, and the dynamic indexes of linear operation and curve passing performance were simulated and analyzed. The results show that electromagnet failure has little influence on stability index and guide clearance, but greatly affects suspension clearance, suspension module nod angle and passing speed. When electromagnet fails, vehicle speed should be limited at 60 km/h in the straight section and 38 km/h in the R100 curve section.

Keywords: medium and low speed maglev vehicle; fault condition; stability; curve passing

0 引言

磁悬浮列车与轨道之间无直接机械接触,不受传统轮轨系统黏着极限的限制,具有转弯半径小、噪声低、加速快和线路适应性强等特点^[1]。目前国际上已形成较为成熟的常导磁型和低温超导磁悬浮交通技术体系。

常导磁浮列车采用电磁悬浮系统。悬浮系统主要包括悬浮电磁铁、传感器和悬浮控制系统,依靠电磁铁通电后与 F 型轨道的磁极之间产生电磁吸力实现悬浮。随着磁浮列车技术的不断发展,国内外学者对常导磁浮车辆动力学进行了大量研究,文献[2-3]对磁浮车辆磁轨相互作用进行了理论分析,并提供了磁浮车辆/轨道系统动力学建模的方法,为我国磁浮车辆技术研究及其工程应用提供了参考与借鉴。文献[4]根据磁悬浮车辆动力学拓扑关系,给出了利用 SIMPACK 建立多体动力学模型的方法。文献[5]建立低速磁浮车辆

空间模型,根据其曲线通过动态响应,给出低速磁浮列车大、小半径曲线通过能力限制因素以及曲线设置建议。文献[6]分别采用弹簧阻尼法和悬浮控制法建立磁轨关系模型,分析两种磁轨关系对中低速磁浮车辆垂向动力学的影响。文献[7]考虑了线路不平顺对低速磁浮车辆的影响,根据动态响应给出了磁浮车辆线路不平顺的具体形式及变量限值。

对于中低速磁浮车辆而言,车辆和轨面之间的间隙与吸引力的大小成反比,不是自稳定系统,必须精确地控制电磁铁的悬浮力,悬浮系统故障可能会导致车辆无法运行。悬浮系统的典型故障有悬浮控制器故障、间隙传感器故障和悬浮电磁铁失效^[8]。发生故障时,故障部位可能失去部分或者全部悬浮能力,使磁浮列车直线运行性能和曲线通过能力变差,严重时可能会发生落车事故。因此对中低速磁浮车辆电磁铁失效导致电磁铁失去悬浮力的工况进行动力学仿真分析,研究其直

基金项目:国家自然科学基金项目(51875483;52102442)

第一作者简介:张小平(1996—),女,甘肃定西人,硕士研究生,研究方向为中低速磁浮车辆系统动力学,3497416361@qq.com。

线运行和曲线通过性能是否满足要求是非常必要的。本文考虑发生悬浮电磁铁失效故障时,该位置电磁铁不再提供悬浮力和导向力,对悬浮故障工况进行动力学仿真分析,从动力学角度对悬浮故障工况展开研究。

1 动力学模型简介

在多维动力学软件 SIMPACK 中建立中低速磁浮车辆动力学模型。本模型包括 3 个悬浮架结构,左右悬浮模块依靠两套抗侧滚结构进行连接,悬浮架结构呈“口”字型。动力学参数如表 1 所示,模型如图 1 所示。

表 1 中低速磁浮列车动力学模型主要参数

参数	数值
车体长度/m	10.0
车体宽度/m	2.8
车体高度/m	3.0
车辆质量/t	14.6
悬浮架质量/kg	981
轨距/m	1.7
最高运行速度/(km·h ⁻¹)	100
空簧力元水平刚度/(N·m ⁻¹)	167×10 ³
空簧力元垂向刚度/(N·m ⁻¹)	81×10 ³

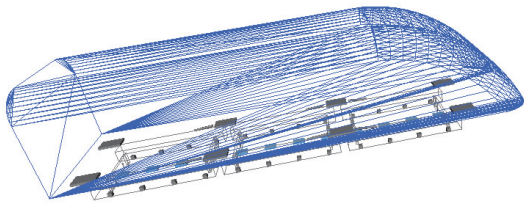


图 1 三悬浮架磁浮动力学模型

本文仿真所采用轨道谱为文献[9]所得到的功率谱,如式(1)所示。

$$s(f) = \frac{A(f^2+B \cdot f+C)}{f^4+D \cdot f^3+E \cdot f^2+F \cdot f+G} \quad (1)$$

2 悬浮故障工况介绍

对悬浮模块进行简化,受力分析如图 2 所示。对于单个悬浮模块,电磁铁失效故障包括单点和两点失效。两点失效故障发生时,单个悬浮模块没有足够的悬浮力支撑悬浮,很可能发生落车,需要依靠应急轮进行支撑。当应急轮装置运行

时,车辆同时失去导向能力,此时列车由各模块上的侧向导向滑橇导向,故本文仅讨论电磁铁单点故障工况。本文假设 1 位悬浮架左侧悬浮模块的 2 位电磁铁(记作 L12)失效,且该位不再提供悬浮力,悬浮力变为 F'_1 、 F'_3 、 F'_4 。

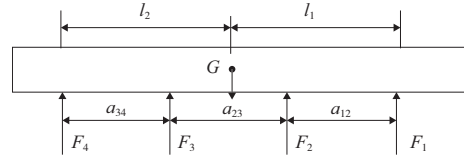


图 2 悬浮模块受力图

假设悬浮模块转动 θ 角,质心向下运动位移 z 。正常工况的悬浮模块运动方程如式(2)、式(3)所示,故障工况的悬浮模块运动方程如式(4)、式(5)所示。

$$m\ddot{z} = -F_1 - F_2 - F_3 - F_4 \quad (2)$$

$$J\ddot{\theta} = -F_1(z+l_1\theta) - F_2[z+(l_1-a_{12}\theta)] + F_3[z-(l_2-a_{34}\theta)] + F_4(z-l_2\theta) \quad (3)$$

$$m\ddot{z} = -F'_1 - F'_3 - F'_4 \quad (4)$$

$$J\ddot{\theta} = -F'_1(z+l_1\theta) + F'_3[z-(l_2-a_{34}\theta)] + F'_4(z-l_2\theta) \quad (5)$$

对于中低速磁浮车辆而言,悬浮电磁铁产生的力可以分解为两部分,垂向分力为悬浮力,横向分力充当曲线路段的导向力。对于垂向,中低速磁浮规定悬浮间隙为 (8 ± 4) mm,本文得到的动态响应结果为悬浮间隙波动值,不超过 ± 4 mm;对于横向,通过横向滑橇进行限位,本文规定横向不超过 15 mm。

3 故障工况动力学仿真

3.1 直线动力学分析

1) 车体振动加速度和平稳性指标

根据标准 GB/T 5599—2019 的规定,选取车体加速度测点,并根据公式对平稳性指标计算,平稳性等级如表 2 所示。将正常运行工况和故障运行工况分别记作工况 1 和工况 2。

表 2 车辆平稳性等级

平稳性等级	状态	平稳性指标
1 级	优秀	$W \leq 2.50$
2 级	良好	$2.50 < W \leq 2.75$
3 级	合格	$2.75 < W \leq 3.00$

运行速度选取 10 km/h 和 80 km/h,车体振动加速度随时间的变化如图 3 所示(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。由图 3 可知,发生电磁铁失效故障时,车辆系统会有较大的初始振动加速度,垂向振动更加明显。随着时间增加,波动值逐渐恢复到正常值范围,运行速度越大,振动加速度数值越大。

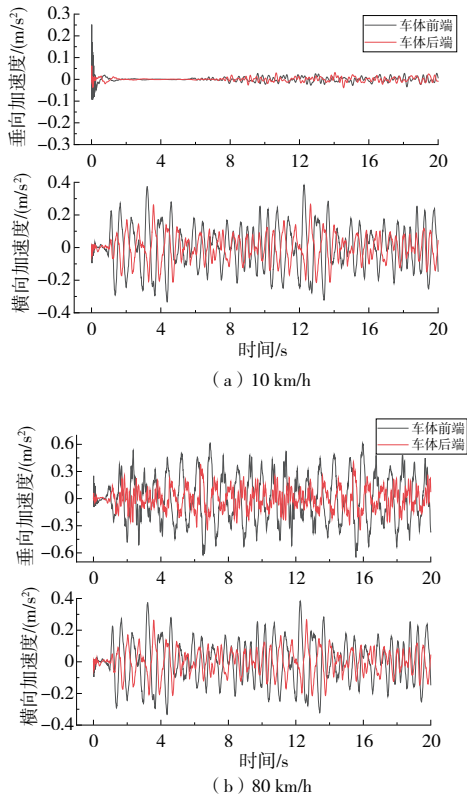


图 3 车体振动加速度

两种工况横向平稳性和垂向平稳性指标随速度的变化如图 4、图 5 所示。由图 4 和图 5 可知,横向和垂向平稳性指标随速度的增大而增加,两种工况下,平稳性指标均未超过 2.5,平稳性等级为优。故障工况平稳性指标更大,悬浮故障使车辆运行平稳性略有变差。

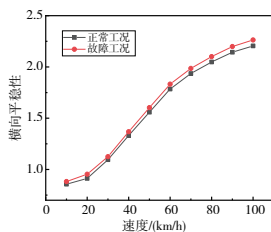


图 4 横向平稳性

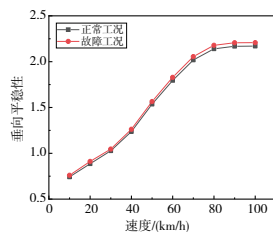


图 5 垂向平稳性

2) 悬浮模块点头角

两种工况一位悬浮架左右悬浮模块(记作 L1 和 R1)点头角随速度的变化如图 6 所示。由图 6

可知,悬浮模块点头角随速度的增大呈上升趋势。同一速度下,故障工况悬浮模块的点头角与正常工况相比数值更大,主要是因为 2 位电磁铁失效后,与其相邻的 1 位、3 位电磁铁及悬浮负担加重,悬浮模块会产生较大的点头角。

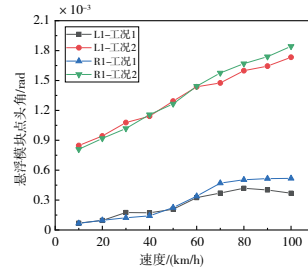


图 6 悬浮模块点头角速度变化图

3) 悬浮力和悬浮间隙波动值

列车运行速度设置为 50 km/h,悬浮力和悬浮间隙选取一位悬浮架左侧悬浮模块 1 位、3 位(记作 L11 和 L13)以及右侧悬浮模块 1 位、3 位(记作 R11 和 R13),悬浮力随时间的变化如图 7 所示。由图 7 可知,悬浮系统稳定后,两侧悬浮模块各个位置悬浮力大小并不相同,左侧模块靠近故障部位的 1 位、3 位电磁铁悬浮力较大,幅值分别为 14.5 kN 和 12.8 kN。左右侧悬浮模块通过前后两套防侧滚梁和吊杆相连,左侧 2 位电磁铁失效后,悬浮模块前端由于重力作用向下运动,通过防侧滚梁和吊杆将力传递到右侧前端悬浮模块,右侧 1 位、2 位电磁铁悬浮力为 10.5 kN,与正常工况悬浮力(9.5 kN)相比增大。

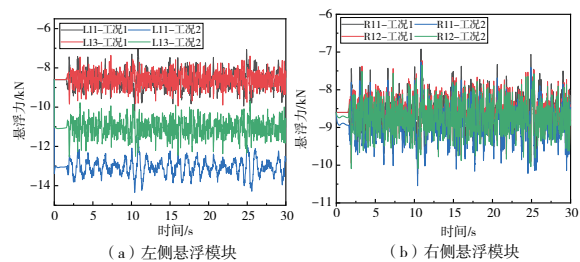


图 7 悬浮力时域图

两种工况左侧悬浮模块的 1 位、3 位悬浮间隙波动值随时间的变化如图 8 所示。由图 8 可知,故障工况时,与失效部位 2 位电磁铁相邻的 1 位、3 位电磁铁的悬浮间隙值较正常工况有所改变,悬浮间隙波动幅值增大,根据 1) 和 2) 的分析可知,故障工况会导致悬浮模块产生较大的点头角,导致悬浮间隙产生一定的变化,悬浮间隙波动幅值增大,更容易超过限值。

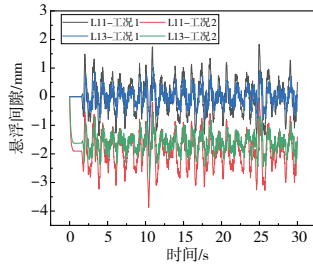


图8 悬浮间隙波动时域图

图9和图10所示为左侧和右侧悬浮模块悬浮间隙波动幅值随速度的变化。由图中数据可知,悬浮间隙波动幅值随速度的增大呈上升趋势,对比两种工况相同部位的悬浮间隙波动幅值,可以发现,故障工况时,同侧悬浮模块其余部位悬浮间隙波动幅值更大,当速度达到60 km/h时,1位悬浮点的悬浮间隙波动值超过限值。

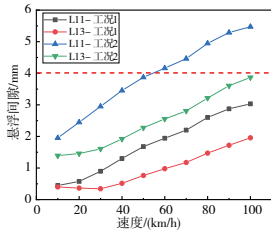


图9 左侧悬浮模块悬浮间隙波动幅值

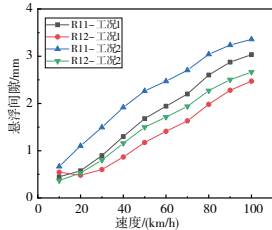
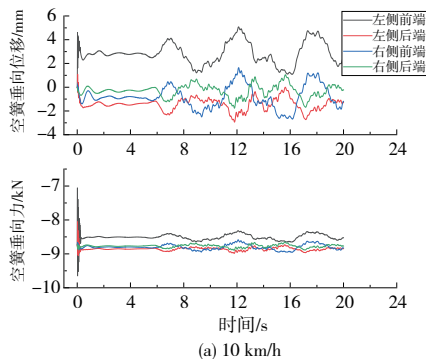


图10 右侧悬浮模块悬浮间隙波动幅值

4) 空簧垂向力与空簧垂向位移

空簧作为中低速磁浮车辆二系悬挂的关键部件,其性能会对车辆的舒适度和安全性产生影响^[10]。空簧垂向力和垂向位移随时间的变化如图11所示。由图11可知,空簧垂向力和垂向位移的初始波动值较大,随着时间增加,波动值逐渐恢复到正常值范围。系统恢复稳定后,当速度为10 km/h时,空簧垂向力最大值为8.9 kN,空簧垂向位移最大值为5.08 mm;当速度为80 km/h时,空簧垂向力最大值为9.95 kN,空簧垂向位移最大值为15.48 mm。速度越大,空簧垂向力和垂向位移波动值范围越大。



(a) 10 km/h

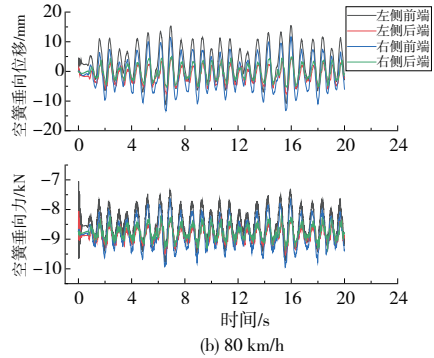


图11 空簧垂向力和垂向位移

3.2 曲线通过性能分析

本文所采用模型曲线最小半径100 m,根据标准TB 10630—2019^[11]的规定,曲线工况未平衡离心加速度不超过0.4 m/s²。设置曲线通过速度为30~40 km/h,曲线设置工况如表3所示。

表3 曲线设置工况

曲线半径 R/m	超高/mm	运行速度/(km/h)
100	178	30~40

1) 悬浮间隙

图12所示为曲线路段悬浮间隙波动幅值随速度的变化。由图12可知,曲线路段变化趋势与直线路段相同,故障工况曲线路段的悬浮间隙波动幅值高于正常工况;当曲线通过速度达到38 km/h时,悬浮间隙波动值超过4 mm,建议R100曲线路段通过速度不超过38 km/h。

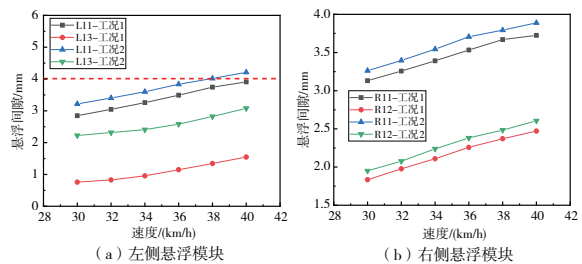


图12 悬浮间隙波动幅值

2) 导向间隙

图13所示为以速度40 km/h通过R100曲线路段时,悬浮模块导向间隙幅值随速度变化。由图13可知,以不同速度通过R100曲线路段时,其导向间隙均未超限。

3) 滑台横向位移

中低速磁浮车辆的滑台有固定滑台和移动滑台之分。当车辆通过曲线时,移动滑台可以实现

相应位置的悬浮架相对于车体发生横向位移,发生横向位移时,相应的悬浮架侧架以固定滑台为回转中心。移动滑台横向位移是衡量曲线通过能力的重要指标。图 14 所示为曲线路段两种工况下滑台位移随速度的变化趋势。图中结果表明,滑台横向位移随速度的增大而增加,两种工况滑台横向位移相差不大,故障工况对滑台位移影响较小。

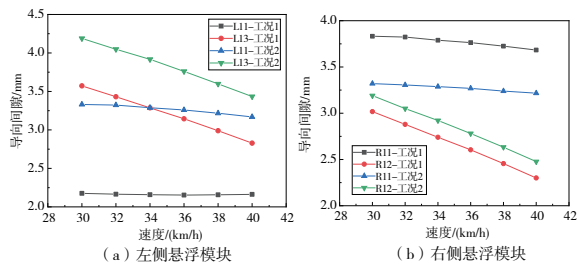


图 13 导向间隙

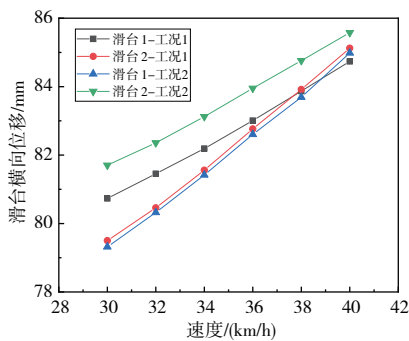


图 14 滑台位移

4 结语

本文以中低速磁浮列车为研究对象,通过动力学建模,分析磁浮列车电磁铁失效情况,设置正常工况和故障工况两种工况,进行动力学仿真分析,得出以下结论。

1) 电磁铁失效故障对横向平稳性和垂向平稳性影响较小,对悬浮间隙影响较大。直线路段,当速度达到 60 km/h 时,故障工况悬浮间隙波动值

超过限值。发生故障工况时,建议列车运行速度不超过 60 km/h; R100 曲线路段,当速度达到 38 km/h 时,悬浮间隙波动值超过限值,建议曲线路段列车运行速度不超过 38 km/h。

2) 电磁铁失效故障对悬浮模块点头角影响较大。

3) 曲线路段时,电磁铁失效故障对导向间隙和滑台横向位移影响较小。

参考文献:

- [1] 翟婉明,赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报,2016,51(2):209-226.
- [2] 翟婉明,赵春发. 磁浮车辆/轨道系统动力学(I): 磁/轨相互作用及稳定性[J]. 机械工程学报,2005,41(7):1-10.
- [3] 赵春发,翟婉明. 磁浮车辆/轨道系统动力学(II): 建模与仿真[J]. 机械工程学报,2005,41(8):163-175.
- [4] 邓永权,罗世辉,梁红琴,等. 基于 SIMPACK 的磁悬浮车辆耦合动力学性能仿真模型[J]. 交通运输工程学报,2007,7(1):12-15,20.
- [5] 赵春发,翟婉明,王其昌. 低速磁浮车辆曲线通过动态响应仿真分析[J]. 中国铁道科学,2005,26(3):94-98.
- [6] 王波,罗世辉,汪科任,等. 不同磁轨关系对中低速磁浮车辆垂向动力学性能的影响[J]. 机车电传动,2019(5):82-86.
- [7] 魏高恒,陈晓昊,罗世辉,等. 轨道高低不平顺对磁浮车辆动力学性能的影响[J]. 机车电传动,2019(4):56-60,66.
- [8] 武震啸,席卿浩,李艳,等. 中低速磁浮轨道运营风险和典型故障分析[J]. 西部交通科技,2018(2):150-153.
- [9] 张耿,李杰,杨子敬. 低速磁浮轨道不平顺功率谱研究[J]. 铁道学报,2011,33(10):73-78.
- [10] 许艺兰,马卫华,张硕,等. 双悬浮架磁浮列车二系悬挂参数优化研究[J]. 机车电传动,2022(1):65-70.
- [11] TB 10630—2019 磁浮铁路技术标准(试行) [S].

收稿日期:2023-02-22