

新型悬浮架结构中低速磁浮列车提速运行稳定性研究^{*}

蔡文锋¹ 徐银光¹ 赵春发² 李 艳¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都;

2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都//第一作者, 高级工程师)

摘 要 以新型空气弹簧中置式悬浮架结构中低速磁浮列车为研究对象, 建立了考虑悬浮控制系统的车辆动力学模型。对列车在直线段快速运行时的动力学特性进行了分析研究, 目的在于研究中低速磁浮车辆提速运行情况下的安全性和稳定性。研究结果表明: 新型磁浮列车以最高 160 km/h 速度直向运行时, 车辆垂向平稳性仍属优秀级, 但横向平稳性指标大于 2.5。有必要对二系横向悬挂参数进行优化。将新型磁浮车辆的空气弹簧横向刚度减小到 150 kN/m 以后, 所有行车速度工况下车辆的垂向和横向平稳性指标均小于 2.5, 车辆运行平稳性指标属优秀级。

关键词 中低速磁浮列车; 悬浮架; 动力学; 稳定性

中图分类号 U237; U270.1[†]

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.09.008

Operational Stability of Accelerated Medium and Low Speed Maglev Train Equipped with New Bogie Suspension Structure

CAI Wenfeng, XU Yinguang, ZHAO Chunfa, LI Yan

Abstract A medium and low speed maglev train equipped with new bogie suspension structure of middle-mounted air spring frame is taken as the research object, and a vehicle dynamics model considering suspension control system is established. Through an analysis of the traindynamic characteristics during operation at straight line sections, the safety and stability of medium and low speed maglev vehicle is acceleration are studied. The research results show that when the new maglev train running in straight direction at the maximum speed of 160 km/h, the vertical stability of the vehicle is still at excellent grade, whereas the lateral stability index is larger than 2.5. So it is necessary to optimize the lateral suspension parameters of the secondary suspension system. After the air spring frame lateral stiffness of the new maglev vehicle is reduced to 150 kN/

m, the vertical and lateral stability indexes of the vehicle at all operational speed are all smaller than 2.5, and the operational stability of the vehicle is at excellent grade.

Key words medium and low speed maglev train; bogie suspension; dynamics; stability

First-author's address China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China

悬浮架作为磁浮列车实现悬浮、导向、牵引、制动的执行机构, 其性能很大程度上决定了磁浮列车的运行品质、动力性能和行车安全, 因而是 EMS(电磁悬浮型)中低速磁浮列车的关键技术之一^[1-3]。当前, 中低速磁浮车辆走行机构较多采用了类似于日本 HSST 型磁浮系统的技术方案, 但该结构仍存在车辆最大运行速度低、对车/轨耦合振动敏感、轨道精度要求高等一系列问题。相关研究表明, 磁浮列车与轨道、桥梁结构的耦合振动不仅降低了列车运行安全性和乘坐舒适性, 还带来了显著的结构振动噪声, 同时对悬浮架和轨道结构疲劳耐久性造成不利影响, 是当前中低速磁浮交通工程化及其提速应用所面临的主要瓶颈技术之一。为此, 国内有研究团队从释放悬浮架结构对悬浮控制点的机械耦合作用角度, 提出了一种可实现高速度目标值(160 km/h)、低动力作用的新型空簧中置式悬浮架结构^[4-5], 适应了当前中低速磁浮交通向市域快线推广的发展需求^[6]。本文基于我国中低速磁浮交通建设现状, 依据已有的研究成果, 简要分析比较了采用空簧中置式悬浮架的新型中低速磁浮车辆和 HSST 型磁浮车辆的走行部结构技术特点。在此基础上, 应用 SIMPACK、Matlab 等软件建立了新型中低速磁浮车辆动力学模型, 并考虑了悬浮控制系统

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200600); 中铁二院工程集团有限责任公司科技发展计划项目(KYY2017053(17-20))

的实际作用。鉴于速度提升后车辆动力学特性的变化主要体现在直线段上,重点开展了三节编组磁浮列车以最高 160 km/h 速度直向提速运行时的动力学仿真分析。本文结果可为后续进一步开展详细的提速磁浮列车-轨道系统动力相互作用研究,以及车辆、轨道结构优化设计提供参考。

1 新型悬浮架结构与列车技术特点

采用空簧中置式悬浮架的新型磁浮列车^[4-5]采用三节编组,列车总长约 29.4 m,车辆最大宽度 2.8 m;每节车辆装配有 3 个空簧中置式悬浮架单元,每台悬浮架通过 2 个中置式空气弹簧与车体相连;相邻悬浮架中心距 2.88 m,列车最高设计速度 160 km/h。表 1 为新型磁浮列车的主要技术参数。

表 1 新型磁浮列车主要技术参数

项目	数值
列车编组	+ Mc1-M-Mc2 +
列车长度/m	29.4
车体宽度/mm	2 800
车体长度/mm	9 850/9 700
车体高度/mm	3 500
悬浮间隙/mm	8
轨距/mm	1 900
悬浮架中心距/mm	2 880
空簧横向跨距/mm	1 928
最大悬浮能力/(t/车)	21.6
悬浮架个数/(个/车)	3

新型空气弹簧中置的“H”型悬浮架在结构上降低了电磁铁模块点头运动和摇头运动的机械约束,降低了同一模块前后悬浮控制点的机械耦合,有利于预防和控制磁浮车轨耦合共振。需要注意的是,相对于传统的 HSST 型中低速磁浮车辆空簧端置式“口”字型悬浮架,新型悬浮架的抗菱形变形能力减弱,而且未设置迫导向结构,这些可能会导致模块端部的横向位移增大。

2 基于三模块、空簧中置式悬浮架的中低速磁浮车辆动力学建模

2.1 新型中低速磁浮车辆机械结构动力学模型

磁浮车辆进行动力学建模时^[7-8],为了考虑防侧滚梁的作用,悬浮架分成左右两个悬浮模块,两

防侧滚梁之间通过吊耳连接。基于多刚体动力学理论,车体和悬浮模块均考虑为刚体结构,悬挂系统模拟为弹簧阻尼元件。其中,每个刚体均考虑 5 个运动自由度,即横向运动、垂向运动、侧滚运动、点头运动以及摇头运动;因此,每节车共有 35 个自由度。图 1 给出了建立的配置新型三模块、空簧中置式悬浮架的中速磁浮车辆机械结构动力学模型(参数说明略)。空气弹簧的参数如表 2 所示。

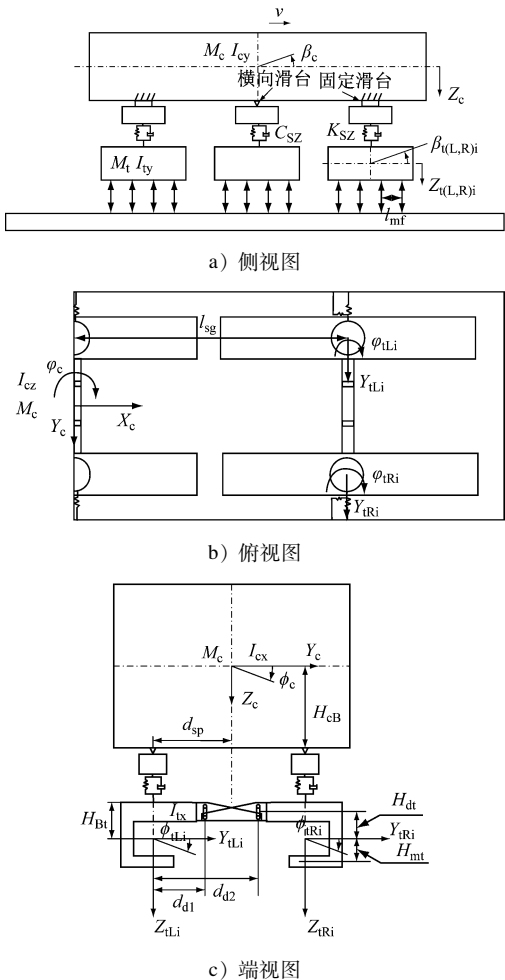


图 1 新型中低速磁浮车辆机械结构动力学模型示意图

表 2 车辆二系空气弹簧的悬挂参数

项目	数值
空气弹簧横向刚度/(kN/m)	350
空气弹簧垂向刚度/(kN/m)	160
空气弹簧横向阻尼/(N·s/m)	10 000
空气弹簧垂向阻尼/(N·s/m)	3 000

2.2 电磁悬浮控制模型

磁浮车辆采用分散独立控制的思想,每个电磁

铁模块设置 2 个独立的悬浮控制器,因此,电磁悬浮控制对象可以简化为单电磁铁悬浮系统。基于牛顿定律和电压-电流关系建立单铁的悬浮模型,建模方法见文献[9]。

由于电磁悬浮系统本身的不稳定性,选取一种基于状态观测器的 PD(比例-微分)控制模型^[10]。其基本控制原理与 PID(比例-积分-微分)控制相同,只是没有考虑间隙积分反馈控制,而该系数主要用于调节悬浮间隙静态误差,对确定工况的磁浮车辆动力学响应基本没有影响。电磁铁线圈电流的控制规律为:

$$\Delta i(t) = k_p \Delta \hat{\delta}(t) + k_v \hat{\delta}(t) + k_a \hat{\delta}(t) \quad (1)$$

式中:

δ ——悬浮间隙;

k_p, k_v, k_a ——间隙、间隙一阶导和间隙二阶导的反馈系数。

在实际系统中,单个电磁铁控制点的最大荷载为 750 kg,线圈匝数 $N = 360$,磁极有效面积 $A = 0.0185 \text{ m}^2$,稳定悬浮间隙为 8 mm,线圈额定电流为 30 A。根据计算,可得悬浮间隙的反馈控制参数为 6 000 ~ 15 000,悬浮间隙速度反馈系数为 80 ~ 170,间隙加速度反馈系数为 0 ~ 0.5。

2.3 磁浮轨道几何不平顺

本文仿真计算采用德国高速低干扰轨道谱进行时域反演生成的轨道不平顺空间样本,其中,高低不平顺样本的幅值范围为 $\pm 3 \text{ mm}$,轨向不平顺幅值范围为 $\pm 4 \text{ mm}$ 。

3 直向提速运行动力学仿真分析

3.1 车速 160 km/h 时新型磁浮车辆动力学分析

图 2 给出了车辆以 160 km/h 速度直向运行时的横向、垂向振动加速度的时间历程图。车体前、后端横向加速度波动范围在 $-0.9 \sim 0.8 \text{ m/s}^2$ 之间,横向加速度均方根值分别为 0.249 m/s^2 和 0.332 m/s^2 。车体前、后端垂向加速度在 $-0.6 \sim 0.5 \text{ m/s}^2$ 的范围内波动,均方根值分别为 0.111 m/s^2 和 0.161 m/s^2 。可见,当行车速度提高到 160 km/h 以后,车体的垂、横向振动加速度幅值仍小于 UIC 518 标准和《200 km/h 及以上速度级电动车组动力学性能试验鉴定方法及评定标准》规定的 2.5 m/s^2 限值。

行车速度 160 km/h 时新型磁浮车辆前后测点

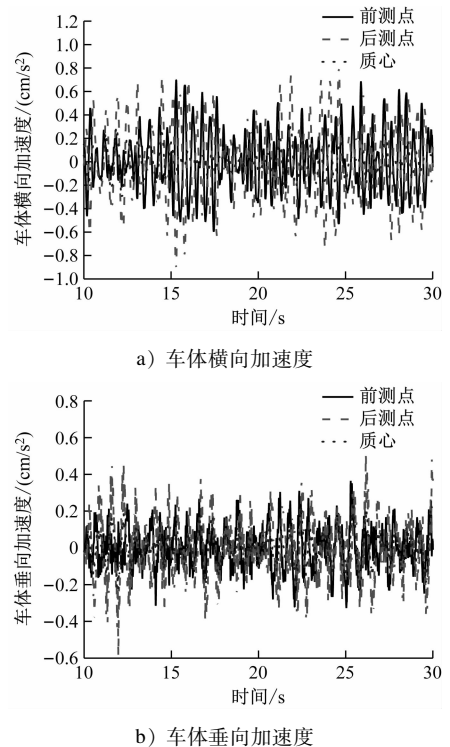


图 2 车体振动加速度响应($v = 160 \text{ km/h}$)

的横向平稳性指标值分别为 2.70 和 2.87,后测点超过了 2.75 并小于 3.00,处在评价指标的合格范围内;前后测点的垂向平稳性指标值为 2.04 和 2.12,小于 2.50,仍处于评价指标的优秀范围内。

图 3 给出了车速 160 km/h 时车辆第一位悬浮模块间隙、力及电流变化曲线。悬浮间隙在 $7.4 \sim 8.6 \text{ mm}$ 之间波动,导向间隙在 $-5.1 \sim 4.9 \text{ mm}$ 之间波动,均未超过其限值。悬浮力在 $-7.00 \sim -9.75 \text{ kN}$ 之间变化,波动量不超过 1.375 kN 。导向力在 $-0.68 \sim 0.78 \text{ kN}$ 之间变化,波动量不超过 0.73 kN 。同时,电流在 $24.3 \sim 31.4 \text{ A}$ 范围内变化,变化量不超过 3.55 A 。

3.2 行车速度对新型磁浮车辆动力学性能的影响

表 3 列出了新型磁浮车辆 60 ~ 160 km/h 时在直线段运行时的动力学响应指标值。基于表中统计值,图 4 给出了车辆横向和垂向平稳性指标值随行车速度的变化关系。

随着速度的提高,车辆各平稳性指标均呈总体增大的趋势。其中,在所有计算工况下,车辆的垂向平稳性指标值均小于 2.50,按 GB 5599—1985 其垂向舒适性均属于优级;当速度大于 100 km/h 以后,车辆横向平稳性指标值均大于 2.50,车速 160 km/h 时已超过 2.75,横向舒适性总体属于良好级。

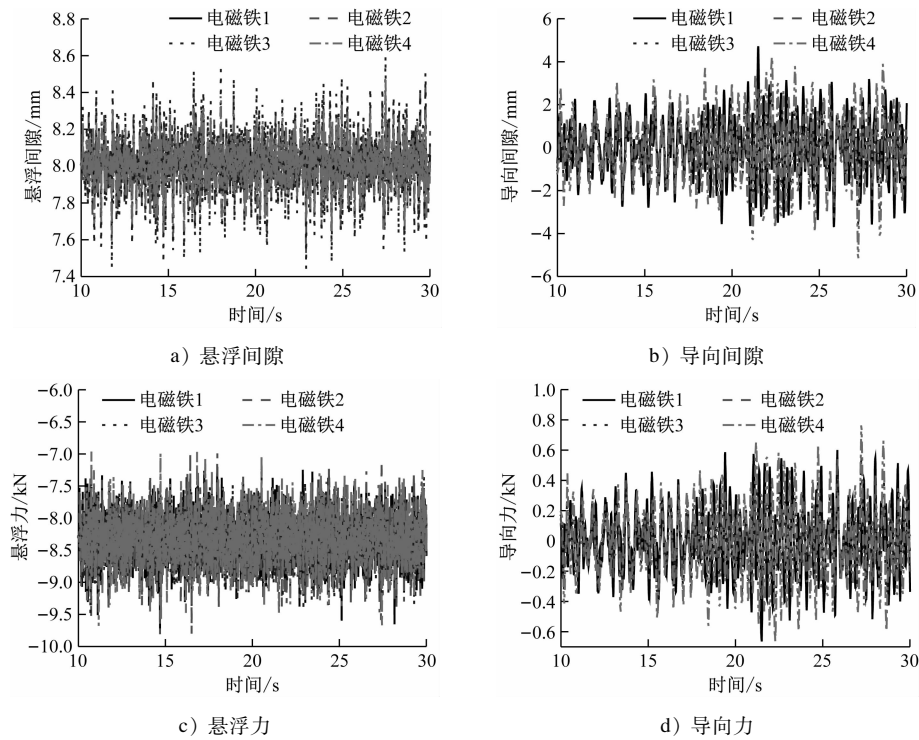


图3 车辆第一位悬浮模块间隙及力的变化($v=160\text{ km/h}$)

表3 不同速度下新型磁浮车辆动力学性能指标值

行车速度/ (km/h)	前/后测点横向加 速度 RMS/(m/s^2)	前/后测点垂向加 速度 RMS/(m/s^2)	右侧第1位磁铁模块 横向间隙最大值/mm	前/后测点 横向平稳性	前/后测点 垂向平稳性
60	0.12/0.09	0.039/0.046	2.62	2.26/2.07	1.49/1.61
80	0.18/0.19	0.060/0.082	2.97	2.39/2.40	1.51/1.71
100	0.21/0.25	0.077/0.10	2.94	2.53/2.58	1.64/1.77
120	0.23/0.29	0.09/0.12	3.82	2.56/2.62	1.84/1.93
140	0.24/0.31	0.10/0.14	3.22	2.65/2.80	1.88/2.08
160	0.25/0.33	0.11/0.16	3.72	2.70/2.87	2.04/2.12

注:RMS——均方根值

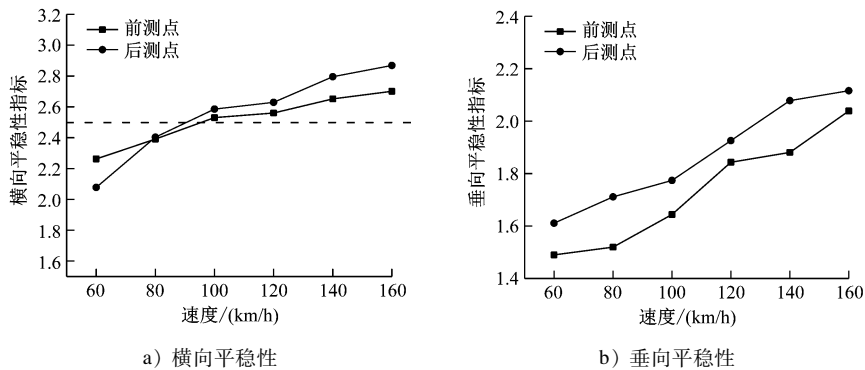


图4 车辆平稳性指标与车速度的关系

通过对比分析车速100~160 km/h条件下电磁铁悬浮、导向间隙计算结果,可以发现,悬浮间隙波动幅值随行车速度提高而基本不变,导向间隙随行车速度提高而微小变化。

由于计算中所使用的德国高速低干扰轨道谱的轨向不平顺大于其高低不平顺,因此,不同行车速度下磁浮车辆的垂向平稳性指标值总是小于其横向平稳性指标值,而且其横向平稳性指标随车速提高而逐渐增大,并超过 2.5 的平稳性优秀值。说明中低速磁浮车辆行车速度提高到 100 km/h 以后,需要对车辆的横向悬挂参数进行优化设计。

4 新型磁浮车辆二系悬挂参数优化

上文针对不同行车条件下磁浮车辆动力学分析结果表明,采用表 2 参数的新型磁浮车辆的横向平稳性较差,车速高于 100 km/h 以后运行平稳性达不到优秀级别,需要对空气弹簧悬挂参数进行调整。

以行车速度 160 km/h 工况为例,仿真分析了空簧横向刚度对车辆平稳性的影响。图 5 为新型磁浮车辆横向、垂向平稳性指标值随空气弹簧横向刚度的关系曲线。

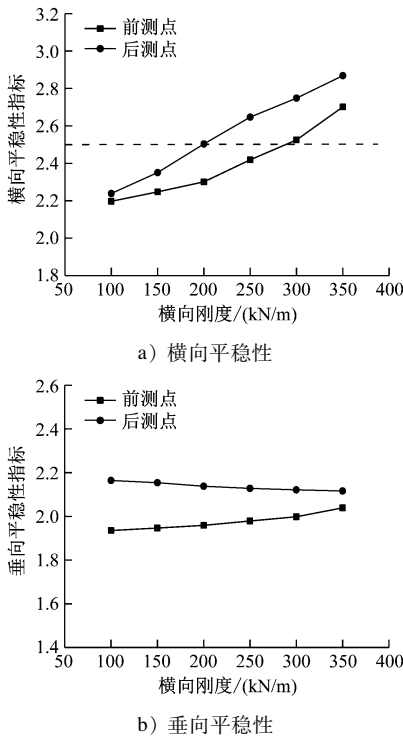


图 5 车辆横向、垂向平稳性随空簧横向刚度的变化

图中可见,车辆横向平稳性随着空簧横向刚度的增大而增大,后测点垂向平稳性随空簧横向刚度的增大而略微减小,前测点垂向平稳性随空簧横向刚度的增大而略微增大。当空簧横向刚度取 150 kN/m 时,车辆横向平稳性指标已经小于 2.50;如果进一步降低空簧横向刚度,直向运行车辆的平稳性没有明显改善,而空簧横向刚度越小,曲线通过时

空簧的横向变形越大,空簧结构设计则更加困难。因此,建议新型磁浮车辆的空簧横向刚度取 150 kN/m,若要进一步提升磁浮车辆运行平稳性,建议提高横向减振器阻尼值。

5 结论

根据仿真得到的新型悬浮架结构中低速磁浮列车 AW2(额定荷载)工况在不同速度下直向运行时(不考虑轨道弹性变形)的车辆动力学响应数据,可得到以下结论:在 60 ~ 160 km/h 行车速度范围内,车体横向和垂向加速度最大值、电磁铁悬浮间隙变化量和横向间隙均不超过相应的规定限值,车辆运行是安全的。行车速度主要影响磁浮车辆的运行平稳性,车辆横向和垂向平稳性指标随行车速度的提高呈增大的趋势。当空气弹簧横向刚度为 350 kN/m 时,所有行车速度工况下车体的垂向平稳性指标值均小于 2.50,垂向舒适性均属优秀;但是,当行车速度为 100 km/h 及以上时,车辆横向平稳性指标值均大于 2.50,车速 160 km/h 时已超过 2.75,横向舒适性达不到优秀。将新型磁浮车辆的空气弹簧横向刚度减小到 150 kN/m 以后,所有行车速度工况下车体的垂向和横向平稳性指标均小于 2.50,车辆运行平稳性属优秀级。

参考文献

- [1] 彭奇彪,罗华军,佟来生,等.中低速磁浮车辆悬浮架的技术特征[J].电力机车与城轨车辆,2012(6):7.
- [2] 李云锋.中低速五转向架磁悬浮列车走行机构研究与理论设计[D].长沙:国防科学技术大学,2007.
- [3] 杨新斌.中低速磁浮交通技术[M].上海:同济大学出版社,2017.
- [4] 宗凌潇.时速 140 km 新型中低速磁浮列车走行机构研究分析[D].成都:西南交通大学,2016.
- [5] 武震啸.中低速磁浮车辆曲线通过性能研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [6] 梁潇,陈峰,傅庆湘.160 km/h 中速磁浮交通系统的关键技术问题[J].城市轨道交通研究,2019(9):21.
- [7] 贺光.EMS 型中速磁浮列车动力学建模与导向能力研究[D].长沙:国防科学技术大学,2016.
- [8] 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(3):94.
- [9] 张钲.磁浮列车悬浮系统的数字控制技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2004.
- [10] 李云钢,常文森,龙志强.EMS 磁浮列车的轨道共振和悬浮控制系统设计[J].国防科技大学学报,1999,21(2):93.

(收稿日期:2019-11-19)