

迫导向机构对中低速磁浮车辆 曲线通过性能的影响^{*}

张 波^{1,2,3} 沈龙江^{2,3} 蒋忠城^{2,3} 舒 瑶^{2,3} 刘国云^{2,3}

(1. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都;

2. 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室, 412001, 株洲;

3. 中车株洲电力机车有限公司, 412001, 株洲//第一作者, 高级工程师)

摘 要 为研究迫导向机构对中低速磁浮车辆的影响,建立了精细化的四模块、五模块中低速磁浮车辆动力学模型。对比分析了四模块、五模块中低速磁浮车辆通过曲线线路时有、无迫导向机构的动态响应差异,以及迫导向机构在不同未平衡加速度下的作用机制。结果表明,当未平衡加速度较大时,迫导向机构发挥导向作用;反之,迫导向机构发挥抗导向反作用。抗导向时,四模块中低速磁浮车辆迫导向机构转臂受力较大时,可采取中间移动滑台拆分的方式降低受力。在横风等强激励下,迫导向机构对中低速磁浮车辆曲线通过性能具有积极意义。

关键词 中低速磁浮车辆; 迫导向机构; 曲线通过性能

中图分类号 U270.1⁺1; U292.91⁺7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.014

Influence of Forced Guiding Mechanism on Medium and Low Speed Maglev Vehicle Curve Passing Performance

ZHANG Bo, SHEN Longjiang, JIANG Zhongcheng, SHU Yao, LIU Guoyun

Abstract To study the influence of forced guiding mechanism on medium and low speed maglev vehicle, the refined dynamic models of both 4-module and 5-module medium and low speed maglev vehicles are established. The dynamic response differences when 4-module and 5-module medium and low speed maglev vehicles passing curve routes with or without the forced guiding mechanism are comparatively analyzed, the action mechanism of the forced guiding mechanism under different unbalanced accelerations is also studied. Results show that when the unbalanced acceleration is large, the forced guiding mechanism plays a guiding role; in the opposite condition, the forced guiding mechanism plays an anti-guiding reaction. When the anti-guiding is functioning, the rotating arm of the

forced guiding mechanism in 4-module medium and low speed maglev vehicle is subjected to a greater force, then the middle mobile slide can be split to reduce the force. Under strong disturbances such as crosswinds, the forced guiding mechanism has positive significance for the curve passing performance of medium and low speed maglev vehicles.

Key words medium and low speed maglev vehicle; forced guiding mechanism; curve passing performance

First-author's address State key laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China

磁浮列车是一种新型轨道交通工具,依靠电磁力实现列车的悬浮与导向。与高速磁浮列车不同,中低速磁浮车辆通过曲线线路时的导向力由U型电磁铁提供,无专门的导向电磁铁,同时增加了2个封闭的平行四边形迫导向机构以辅助导向。目前,关于迫导向机构如何发挥导向作用的研究较少。文献[1-3]分析了迫导向机构的静态运动学几何关系,但未考虑车辆真实运动过程中迫导向机构的动态特性。文献[4]认为迫导向机构将列车横向力均匀分配到各个模块上,使其沿曲线分布更合理,但迫导向机构在导向过程中的作用机制并未详细分析。文献[5]对比分析了四模块磁浮车辆有、无迫导向机构的动力学特性,但并未深入分析迫导向机构作用的条件与原理。文献[6]基于动力学分析方法分析了磁浮车辆的动态响应特性,但其研究重点不在迫导向机构上。

本文分别建立了四模块、五模块中低速磁浮车辆动力学模型,对比分析了取消迫导向机构前后磁浮车辆曲线通过性能的差异,详细阐述了迫导向机

^{*} 国家创新方法工作专项项目(2019IM050100);湖南省重点研发计划项目(2022WK2013);湖南创新型省份建设专项项目(2020GK2084)

构在车辆通过曲线线路时的作用原理,为中低速磁浮车辆迫导向机构设计提供支撑。

1 中低速磁浮车辆计算模型

本文采用 UM 磁浮模块分别建立了四模块和五模块中低速磁浮车辆动力学模型。整个模型的参考位置为车辆悬浮 8 mm 的状态。车辆的迫导向机构建模与实际结构一致,抗侧滚梁和吊杆在模型中作为独立刚体处理。抗侧滚梁相对于模块可绕垂向小幅摇头。滑台是本车辆结构中的特殊部件,移动滑台相对车辆仅有横向平移自由度,固定滑台相对车体无自由度。在滑撬面处建立了接触力元,当滑撬与轨道接触时,该力元产生摩擦力。两个长的转臂机构布置在车辆两端。四模块、五模块迫导向机构安装方式如图 1 和图 2 所示。

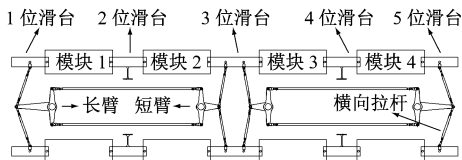


图1 四模块中低速磁浮车辆迫导向机构安装示意图

Fig.1 Diagram of 4-module medium and low speed maglev vehicle forced guiding mechanism installation

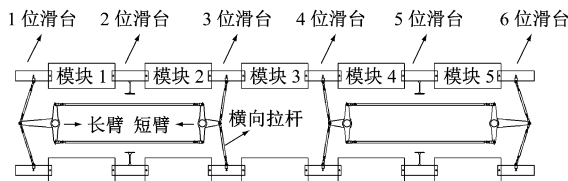


图2 五模块中低速磁浮车辆迫导向机构安装示意图

Fig.2 Diagram of 5-module medium and low speed maglev forced guiding mechanism installation

每个悬浮架有 4 对悬浮线圈,电磁力采用修正的 PID(比例-积分-微分)控制器。U 型电磁铁的悬浮电磁力 F_z 和导向电磁力 F_y 为:

$$\begin{cases} F_z = F \left(1 + \frac{2S}{\pi W_m} - \frac{2y}{\pi W_m} \arctan \frac{y}{S} \right) \\ F_y = F \frac{2S}{\pi W_m} \arctan \frac{y}{S} \end{cases}$$

式中:

S ——悬浮间隙;

y ——电磁铁横移量;

W_m ——极板宽度;

F ——电磁控制力。

四模块、五模块中低速磁浮车辆动力学模型,如图 3 所示。

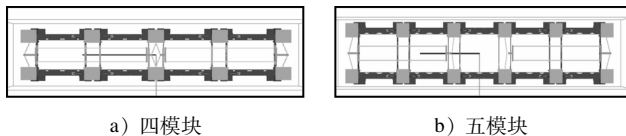


图3 中低速磁浮车辆动力学模型

Fig.3 Dynamic model of medium and low speed maglev vehicle

2 计算结果分析

迫导向机构可作为列车通过曲线线路时的辅助导向。本文主要研究小半径曲线条件下拆除迫导向机构对中低速磁浮车辆曲线通过性能的影响。选取以下 3 种计算工况:

1) 工况 1——曲线半径 100 m,车辆运行速度 40 km/h,线路超高率设置为 8%,缓和曲线设置为 60 m,此时未平衡加速度为 0.43 m/s^2 。

2) 工况 2——曲线半径 75 m,车辆运行速度 5 km/h,不设置超高,缓和曲线设置为 5 m,此时未平衡加速度为 0.26 m/s^2 。

3) 工况 3——曲线半径 75 m,车辆运行速度 40 km/h,线路超高率设置为 8%,缓和曲线设置为 60 m,此时未平衡加速度为 0.85 m/s^2 。

分析了 3 种工况下四模块、五模块中低速磁浮车辆通过曲线线路时的动态性能。

2.1 迫导向机构对五模块中低速磁浮车辆的影响

对于五模块中低速磁浮车辆,3 种工况下,固定滑台(2、5 位滑台)处空簧的横向位移大于移动滑台处;同一固定滑台下,端部悬浮架(1、5 号悬浮架)空簧的横向位移大于中间悬浮架(2、4 号悬浮架)。

图 4 和图 5 分别为 3 种工况下空簧与电磁铁的最大横向位移曲线。由图 4~5 可见,五模块中低速磁浮车辆空簧与电磁铁的最大横向位移一致,即工况 1、3 在拆除迫导向机构后,空簧与电磁铁的最大横向位移均增大,且两者的最大空簧横向位移均超过 26 mm 的限值;工况 2 在拆除迫导向机构后,空簧与电磁铁的横向位移反而均变小。

图 6 详细分析了 3 种工况下迫导向机构短臂的受力情况。由图 6 可见,工况 1 和工况 3 中迫导向机构短臂所受的纵向力、横向力最大值较为接近,工况 2 中迫导向机构短臂所受的横向力略大于

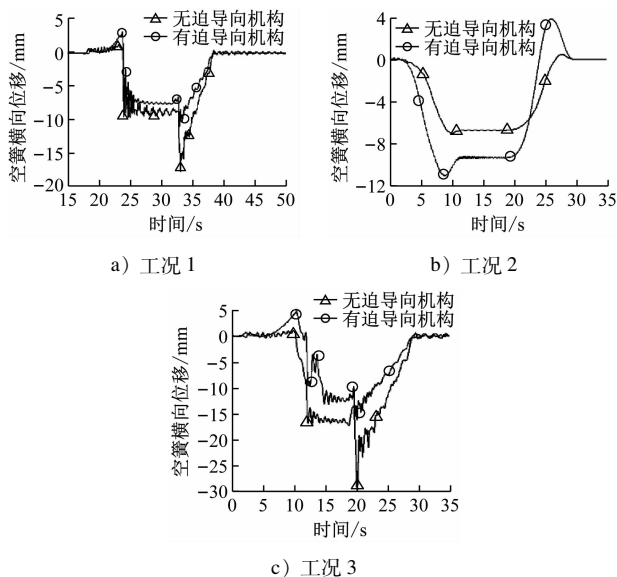


图4 五模块中低速磁浮车辆空簧的最大横向位移图

Fig. 4 Maximum lateral displacement of 5-module medium and low speed maglev vehicle air spring

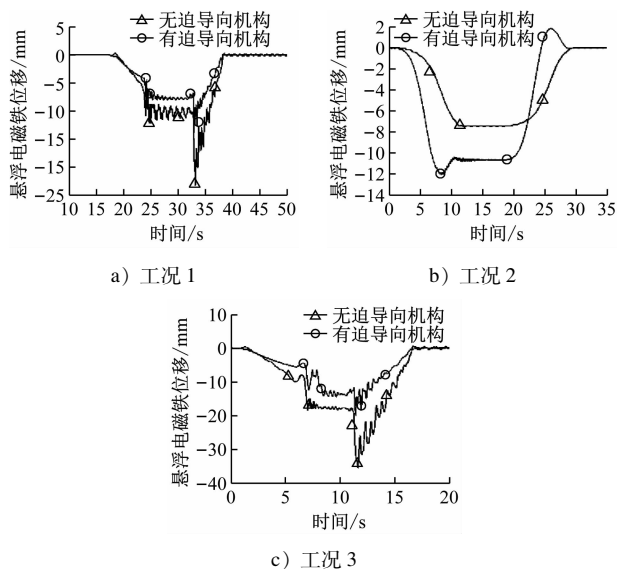


图5 五模块中低速磁浮车辆电磁铁最大横向位移图

Fig. 5 Diagram of maximum lateral displacement of 5-module medium and low speed maglev vehicle electromagnet

纵向力。

五模块中低速磁浮车辆迫导向机构在未平衡加速度较小时,发挥抗导向作用。此外,五模块中低速磁浮车辆迫导向机构可明显降低车辆通过曲线时产生的振荡,有利于提升车辆动态运行性能的稳定性。

2.2 迫导向机构对四模块中低速磁浮车辆的影响

对于四模块中低速磁浮车辆,3种工况下,空簧的横向位移有如下共同特征:固定滑台处空簧的横

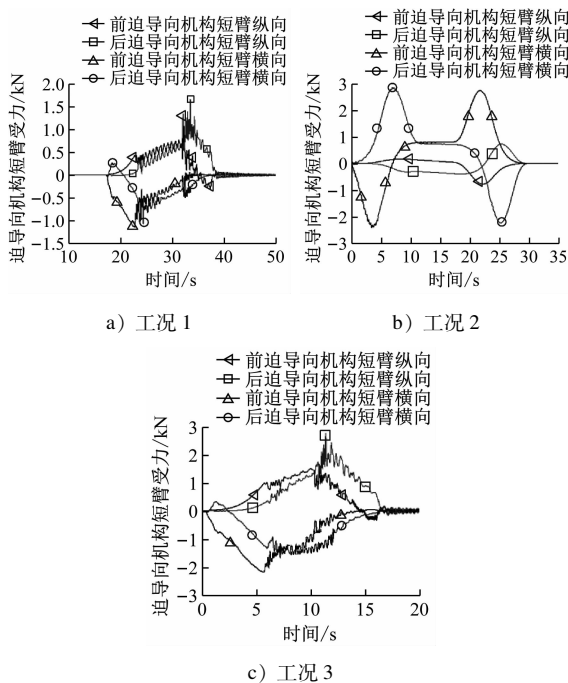


图6 五模块中低速磁浮车辆迫导向机构短臂受力图

Fig. 6 Force diagram of the short arm of 5-module medium and low speed maglev vehicle forced guiding mechanism

向位移大于移动滑台;同一固定滑台下,端部悬浮架(1、4号悬浮架)空簧的横向位移大于中间悬浮架(2、3号悬浮架),且3位中间移动滑台位置处空簧的横向位移大于1、5位端部移动滑台。

电磁铁与空簧的横向位移特征基本一致,2位和4位固定滑台附近电磁铁的横向位移较大;同一悬浮架,电磁铁越靠近固定滑台,其横向位移也越大。

图7和图8分别为3种工况下空簧最大横向位移及电磁铁最大横向位移曲线。由图7~8可见,工况1和工况3,即拆除迫导向机构后,空簧和电磁铁的横向位移均变大。这说明磁浮列车通过曲线时,迫导向机构发挥辅助导向作用,符合实际情况。但工况2却截然相反,拆除迫导向机构后,空簧和电磁铁的横向位移反而均变小,此时迫导向机构并不利于通过曲线线路。

图9详细分析了3种工况下迫导向机构短臂的受力情况。由图9可见,工况1和工况3下,迫导向机构短臂所受的纵向力、横向力最大值较为接近,最大值约为2~3 kN;工况2下迫导向机构短臂所受的横向力明显大于纵向力,且最大值约达到6 kN。

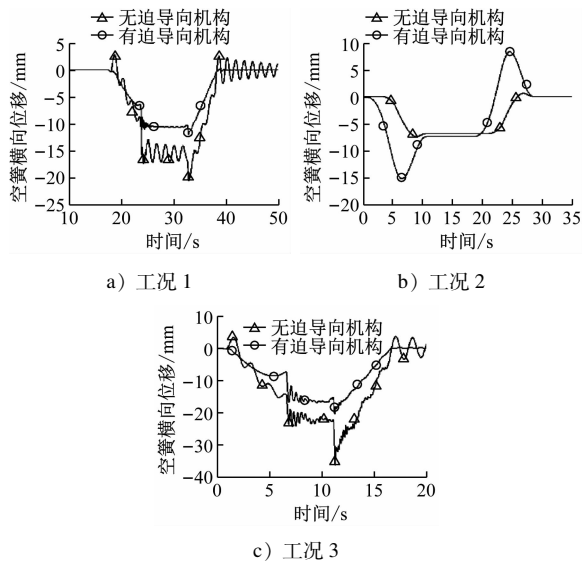


图7 四模块中低速磁浮车辆空簧最大横向位移图

Fig. 7 Diagram of maximum lateral displacement of 4-module medium and low speed maglev vehicle air spring

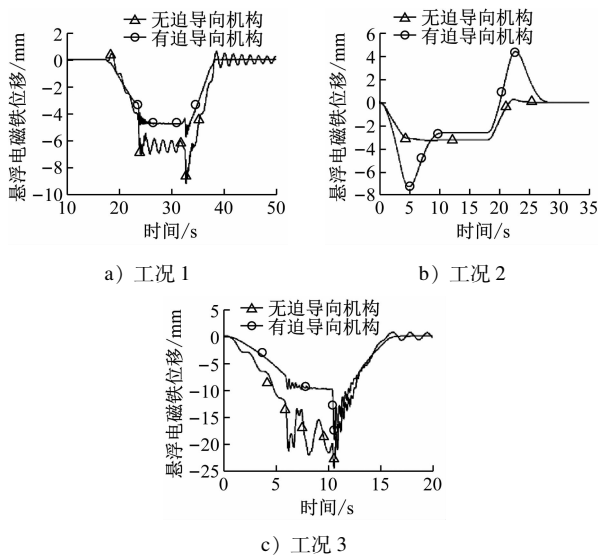


图8 四模块中低速磁浮车辆电磁铁最大横向位移图

Fig. 8 Diagram of maximum lateral displacement of 4-module medium and low speed maglev vehicle electromagnet

对比工况2和工况3,曲线半径相同的条件下,通过提高列车运行速度来增大未平衡加速度时,迫导向机构受力反而变小。这说明在工况2未平衡加速度较小时,迫导向机构类似于一个支撑反力结构。在车辆通过曲线时不仅不能起到导向作用,反而会阻碍车辆导向。这种强力抵抗作用会导致迫导向机构短臂受力增大,存在结构安全隐患。当增大未平衡加速度时,迫导向机构释放了支撑反力作用,转而引导车辆通过曲线,此时迫导向机构受力恢复正常。

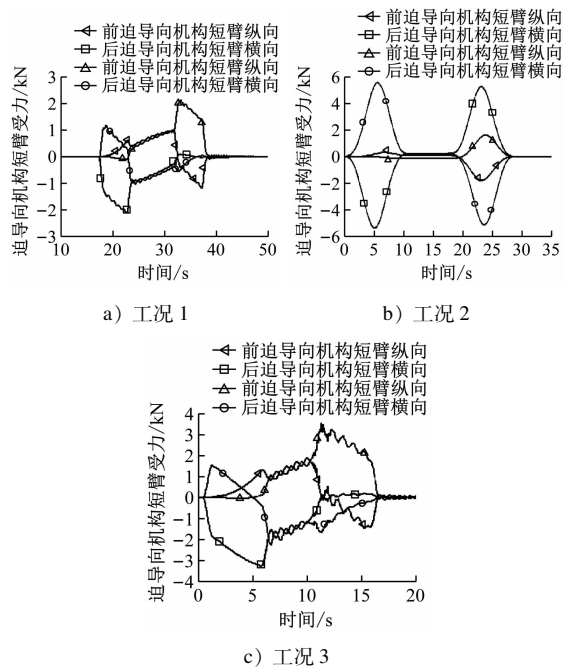


图9 四模块中低速磁浮车辆迫导向机构短臂受力图

Fig. 9 Force diagram of the short arm of 4-module medium and low speed maglev vehicle forced guiding mechanism

由此可见,对于四模块中低速磁浮车辆,迫导向机构的作用取决于车辆未平衡加速度的大小:当未平衡加速度较小时,迫导向机构发挥抗导向作用,拆除迫导向机构反而有利于车辆通过曲线线路;当未平衡加速度较大时,迫导向机构发挥迫导向作用,迫导向机构受力正常,拆除迫导向机构使得车辆曲线通过性能变差。

四模块中低速磁浮车辆前、后迫导向机构同时与3位滑台连接。磁浮车辆通过曲线时由于3位滑台的牵制作用,导致靠近3位滑台的迫导向机构短臂横向受力过大。五模块中低速磁浮车辆迫导向机构在未平衡加速度较小时,尽管仍发挥抗导向作用,但迫导向机构短臂并不存在受力过大的问题。这是由于五模块中低速磁浮车辆有中间模块的缓冲作用,释放了前、后迫导向机构的约束力。因此,从结构上而言,五模块设计比四模块更加合理。

2.3 中间滑台拆分对迫导向机构的影响

受五模块中低速磁浮车辆的设计思路启发,为了释放前、后迫导向机构的耦合,考虑将3位滑台拆分为2个滑台,具体如图10所示。

中间滑台拆分后,相当于在3、4位滑台间增加了1个虚拟模块,这样可有效释放前、后迫导向机构的约束,实现了前、后迫导向机构的解耦。对应修改

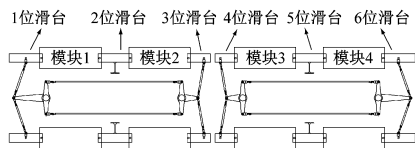


图10 四模块中低速磁浮车辆中间滑台拆分后迫导向机构安装示意图

Fig. 10 Diagram of forced guiding mechanism installation of 4-module medium and low speed maglev vehicle after intermediate slide split

仿真模型,仿真分析发现:3种工况下,空簧与电磁铁的横向位移变化规律一致。本文重点关注中间滑台拆分后工况2下迫导向机构短臂的受力情况。

由图6b)和图11可知,中间滑台拆分后,短臂受力最大值降低约4kN,极大地改善了短臂受力过大的问题。本文采用的拆分滑台方案仅针对短臂受力过大的问题,未考虑整车尺寸及其质量控制。实际设计时,可采用增加滑台横向阻尼等方式缓解短臂受力过大的问题。

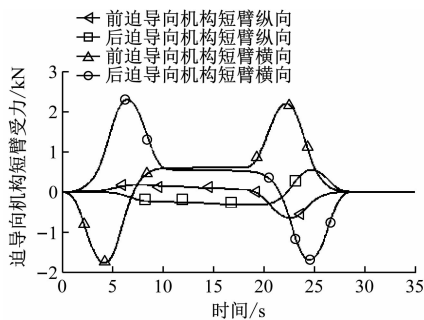


图11 四模块中低速磁浮车辆中间滑台拆分后迫导向机构短臂受力图

Fig. 11 Force diagram of forced guiding mechanism short arm of 4-module medium and low speed maglev vehicle after intermediate slide split

3 结论

1) 迫导向机构作用原理与未平衡加速度有关。当未平衡加速度较大时,迫导向机构发挥导向作用,拆除迫导向机构后车辆曲线通过性能变差;当未平衡加速度较小时,迫导向机构发挥抗导向作用,拆除迫导向机构后车辆曲线通过性能变好。

2) 当未平衡加速度较小时,迫导向机构类似于一个支撑反力结构,在车辆通过曲线时阻碍车辆导向;且四模块中低速磁浮车辆由于前、后迫导向机

构耦合以及转臂存在受力过大的风险,中间滑台拆分可有效解决该问题。

3) 迫导向机构可明显降低车辆通过曲线线路时的振荡,有利于提升车辆动态运行性能的稳定性。

4) 车辆运行时,迫导向机构不宜取消,实际线路可能遇到横风等激扰情况,未平衡加速度很难控制在合理范围内,此时迫导向机构可有效发挥导向作用,保证磁浮车辆的安全性。

5) 需进一步研究确定迫导向机构从抗导向转变为迫导向时的临界未平衡加速度,为磁浮车辆运行速度控制提供参考。

参考文献

- [1] 蒋海波,罗世辉,董仲美,等. 低速磁浮列车迫导向机构的研究[J]. 内燃机车,2007(4):16.
JIANG Haibo, LUO Shihui, DONG Zhongmei, et al. Study of forced steering mechanism of low-speed maglev train[J]. Diesel Locomotives, 2007(4):16.
- [2] 赵志苏,尹力明,罗昆. 磁悬浮列车转向机构运动分析与设计[J]. 机车电传动,2000(6):24.
ZHAO Zhisu, YIN Liming, LUO Kun. Motion analysis and design for yawing mechanism of maglev vehicle[J]. Electric Drive for Locomotive, 2000(6):24.
- [3] 伍砺研,佟来生,罗华军,等. 五悬浮架迫导向机构曲线通过研究[J]. 电力机车与城轨车辆,2013(3):25.
WU Ligan, TONG Laisheng, LUO Huajun, et al. Research on geometrical curve negotiating of forced steering mechanism of five-truck maglev vehicle[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2013(3):25.
- [4] 卜继玲,傅茂海,严隽毫,等. 常导吸引式低速磁悬浮车辆动态曲线通过性能研究[J]. 铁道学报,2001(1):30.
BU Jiling, FU Maohai, YAN Junmao, et al. Study on dynamic performance of the low-speed EMS maglev car in curve negotiation[J]. Journal of the China Railway Society, 2001(1):30.
- [5] 王洪坡. EMS型低速磁浮列车/轨道系统的动力相互作用问题研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2007.
WANG Hongpo. Vehicle-guideway dynamic interaction of the EMS low speed maglev vehicle[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [6] 李冠军,郭庆升,李茂春,等. 导向机构对四悬浮架中低速磁浮车辆运行影响研究[J]. 机车电传动,2020(6):101.
LI Guanjin, GUO Qingsheng, LI Maochun, et al. Research on influence of guiding mechanism on operation of medium and low speed maglev vehicle with four suspension frames[J]. Electric Drive for Locomotive, 2020(6):101.

(收稿日期:2022-04-22)