

中低速磁浮接触轨动态检测系统设计与研究^{*}

涂俊 周文武 苏款 袁伟

(湖南凌翔磁浮科技有限责任公司, 410028, 长沙)

摘要 [目的]接触轨为中低速磁浮列车提供安全可靠电能,是磁浮轨道交通系统工程中的重要组成部分。接触轨的安装会影响磁浮列车的可靠运行,需对接触轨性能进行检测。[方法]采用理论分析方法,根据F轨与接触轨的相对位置关系,得到中低速磁浮接触轨动态检测系统常用的3个检测关键点——轨高、轨偏及硬点,并提出了轨高、轨偏及硬点的检测方法。根据理论分析结果对接触轨动态检测系统进行机械结构设计并制作样机,通过试验对中低速磁浮接触轨动态检测系统进行测试验证,并评价中低速磁浮接触轨动态检测单元的重复性精度指标。[结果及结论]中低速磁浮接触轨动态检测系统中采用的类似受流器结构可有效减振,提高硬点检测精度;中低速磁浮接触轨动态检测系统的轨高、轨偏检测精度可达到0.5 mm,满足常规设计精度要求的 ± 2 mm;轨高、轨偏重复检测精度可达到0.4 mm,硬点检测的重复检测精度可达到5g,均满足常规设计要求。

关键词 中低速磁浮交通;接触轨;动态检测;试验研究

中图分类号 TM922.6:U237

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.04.042

Design and Research of Dynamic Detection System for Medium-Low Speed Maglev Contact Rail

TU Jun, ZHOU Wenwu, SU Kuan, YUAN Wei

(Hunan Lingxiang Maglev Technology Co., Ltd., 410028, Changsha, China)

Abstract [Objective] Contact rail is an important component in maglev rail transit system engineering, providing safe and reliable electrical energy for medium-low speed maglev trains. The installation of contact rails can affect the reliable operation of maglev trains, so the performance of contact rails needs to be tested. [Method] By adopting a theoretical analysis method and based on relative position relationship between F rail and contact rail, three common detection key points of dynamic detection system for medium-low speed maglev contact rail are obtained, i. e. rail height, rail deviation and hard points. A detection method for rail height, rail deviation and hard points is proposed. According to theoretical analysis re-

sults, the mechanical structure of the contact rail dynamic detection system is designed and a prototype is made. The dynamic detection system for medium-low speed maglev contact rail design is verified through experiments, and the repeatability accuracy index of the dynamic detection unit for medium-low speed maglev contact rail is evaluated. [Result & Conclusion] The similar current collector structure used in the dynamic detection system for medium-low speed maglev contact rail can effectively reduce vibration and improve the hard point detection accuracy; the detection accuracy of rail height and rail deviation of the above-mentioned dynamic detection system can reach 0.5 mm, meeting the conventional design accuracy requirements of ± 2 mm; the repeated detection accuracy of rail height and rail deviation can reach 0.4 mm, and the repeated detection accuracy of hard point detection can reach 5g, both meeting the conventional design requirements.

Key words medium-low speed maglev transportation; contact rail; dynamic detection; experimental research

中低速磁浮轨道交通是我国近年投入的一种新的中等运能的轨道交通制式,具有建设成本低、运营维护简单、噪声小、爬坡能力强、环境污染小、不会发生脱轨、安全性高等优势^[1-2]。磁浮列车在运行过程中,需要通过受流器与接触轨的接触来获得电能。受接触轨安装精度、支撑定位刚度、接触轨轨道不平顺、靴轨接触刚度等因素的影响,受流器在接触轨上运行时会出现异常振动与滑靴偏磨等异常现象,从而对受流质量产生影响^[3-6]。因此,有必要对接触轨性能进行检测,从而确保接触轨的可靠性。

传统的接触轨检测方法是利用人工持轨道尺测量接触轨的几何参数,这种方法不仅效率低、工作量大,而且必须在列车脱离运行的状态下进行,不利于接触轨的评价管理和计划维修^[7]。

接触轨在制作和安装的过程中可能存在一定的误差,接触压力也会随着列车的行驶速度以及接

^{*} 湖南创新型省份建设专项经费资助(2020GK4064)

触轨面波纹的变化而变化。一般来说,接触正压力越大,机械磨损程度就越高;而正压力过小,接触电阻会有所增加,电蚀磨损也会呈现出增加的状态。因此,只有将靴轨接触正压力控制在合理范围内,才能切实保证车辆可以平稳运行^[8]。

1 检测原理与指标分析

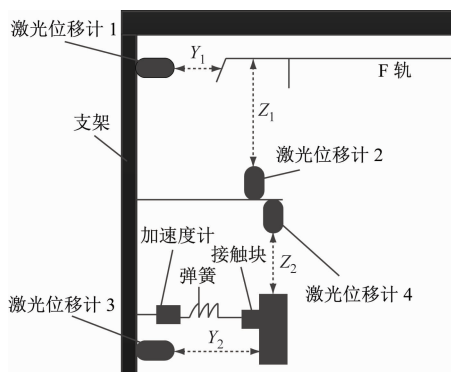
轨高值和轨偏值是接触轨空间形位参数的数值,是衡量接触轨空间位置关系的重要指标。硬点是指接触轨的局部突变。硬点会导致受流靴受到冲击力,且列车运行速度越高,硬点的影响就越明显。硬点是接触轨与受流靴磨损和撞击性损坏的一种结构的本征缺陷。硬点会影响受流靴与接触轨的接触与受流,常常引起火花或拉弧。检测项点与轨道一般偏差范围如表 1 所示。

表 1 检测项点与轨道偏差范围

Tab.1 Detection item points and rail deviation range

序号	检测项点	检测位置	轨道偏差范围
1	轨高值	接触轨顶面	$\pm 2 \text{ mm}$
2	轨偏值	接触轨侧面	$\pm 2 \text{ mm}$
3	硬点	受流器	$\leq 100 \text{ g}$

接触轨轨高值与轨偏值出现偏差反映出接触轨几何状态出现了偏差。接触轨检测原理如图 1 所示。



注: Y_1 —支架到 F 轨的横向距离; Y_2 —支架到接触轨的横向距离; Z_1 —激光位移计到 F 轨的垂向距离; Z_2 —激光位移计到接触轨的垂向距离。

图 1 接触轨检测原理

Fig.1 Contact rail detection principle

1.1 轨高检测

接触轨的轨高值反映接触轨在垂向于 F 轨的相对位置变化情况。

$$Z = Z_1 + Z_2 \quad (1)$$

式中:

Z ——轨高值。

$$\Delta Z = Z - Z_0 \quad (2)$$

式中:

ΔZ ——轨高偏离值;

Z_0 ——标准轨高值。

根据 ΔZ 的大小可以判断是否需要对接触轨进行维修和调整。

1.2 轨偏检测

接触轨的轨偏值反映接触轨在水平方向与 F 轨的相对位置变化情况。

$$Y = Y_2 - Y_1 \quad (3)$$

式中:

Y ——水平轨偏值。

$$\Delta Y = Y - Y_0 \quad (4)$$

式中:

ΔY ——轨偏偏离值;

Y_0 ——标准轨偏值。

1.3 硬点检测

硬点检测是接触网检测的重要组成部分。硬点的大小可以通过接触轨和受流靴之间的撞击加速度或者撞击力进行衡量。根据加速度计的输出值计算出受流靴的受力如下:

$$F = ma \quad (5)$$

式中:

F ——受流靴的受力;

m ——受流靴的质量;

a ——加速度计的输出值。

根据 F 值判断接触轨硬点对受流系统的影响。

2 检测设备结构设计

2.1 系统组成

接触轨动态检测系统主要由加速度计、激光位移计、激光开关、编码器、记录仪、终端设备等组成,其中加速度计、激光位移计、激光开关、编码器、记录仪以及支架构成检测设备。

2.2 机械结构设计

2.2.1 整体机械结构设计

接触轨动态检测系统结构如图 2 所示。该系统通过安装接口与动力设备连接,支架上安装有各类传感器。F 轨悬浮面安装有激光位移计,用于检测到悬浮检测面的垂向距离(Z_1);F 轨轨向安装有激

光位移传感器,用于检测到F轨侧面的水平距离(Y_1);接触轨上轨面安装有激光位移计,用于检测到受流轨上轨面垂向距离(Z_2);接触轨轨向安装有激光位移传感器,用于检测到接触轨外侧面的水平距离(Y_2);纵向加速度计用于检测本设备的纵向加速度(硬点),横向加速度计用于检测本设备的横向加速度(硬点);压紧轮安装机构确保受流轨检测压紧轮始终与受流轨接触。

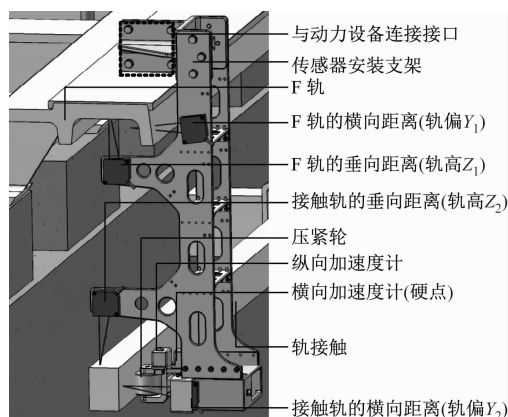


图2 接触轨动态检测系统结构

Fig. 2 Structure of contact rail dynamic detection system

2.2.2 硬点检测结构设计

硬点检测结构采用与受流器类似的平行四边形连杆机构+弹簧结构,用于保证压紧轮始终能与接触轨接触。

通过平面机构动态静力分析,求出各运动副的反力及确定维持原动件运动规律应加给机构的平衡力(或平衡力矩)^[9]。

面和面接触的运动副在接触部分的压强较低,被称为低副。每个低副中的反力有2个未知的要素,若一个机构中含有 P_L 个低副,则其反力的未知数目有 $2P_L$ 个,再加上一个未知的平衡力(或平衡力矩)。每个活动构件受力平衡时,可以列出3个平衡方程式;对由 n 个活动构件组成的低副机构,可以列出 $3n$ 个平衡方程式。为了使该机构受力可解,则有:

$$3n = 2P_L + 1 \quad (6)$$

在硬点检测结构工作行程中,影响压紧轮跟随性的最重要零件是弹簧,因此要对弹簧进行设计计算。为了增加设备的适用裕度,弹簧采用可调结构形式,实现对弹簧力的调节。硬点检测机械结构设计如图3所示。

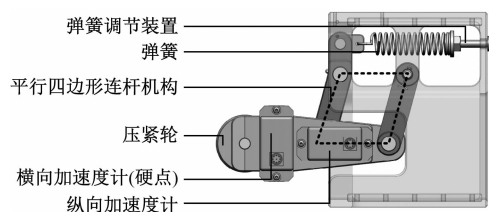


图3 硬点检测机械结构

Fig. 3 Mechanical structure of hard points detection

3 试验研究

3.1 试验目的与方法

设计试验平台,对中低速磁浮接触轨动态检测系统进行测试验证,并评价中低速磁浮接触轨动态检测单元的重复性精度指标。

分别对试验平台左侧与右侧的轨高、轨偏及硬点进行检测。同时,为了确保试验数据的准确性,在轨道行程内取54个点位,对各点位分别进行3次检测试验。试验平台如图4所示。将检测设备搭载在磁浮交通无人化综合检测车上,其作为动力设备可为接触轨动态检测系统提供动力来源。3次检测试验分别编号为NO.1、NO.2、NO.3。

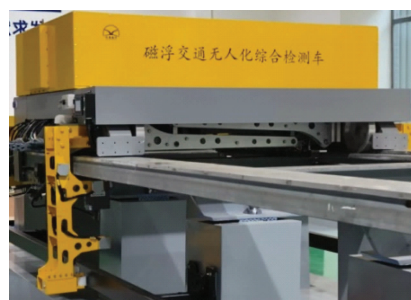


图4 磁浮交通无人化检测车

Fig. 4 Maglev transportation unmanned inspection vehicle

3.2 试验结论与分析

分别提取3次检测试验的测试数据,得到轨高试验结果、轨偏试验结果及硬点试验结果。轨高、轨偏采用比对法进行试验,用激光跟踪对需要检测的位置进行实测,采集14 m轨道范围内54个点位的数据,用检测设备对54个点位进行检测。由于检测数据具有较好的重合性,对3次试验所得的检测数据分别+3 mm、+6 mm、+9 mm后进行显示,得到拟合曲线如图5所示。硬点的检测采用重复检测方法进行试验。

分析轨高、轨偏的实测值及试验值,分别提取3次试验中试验值与实测值偏差的最大值与最小值,

结果如表 2 所示,最大轨高和轨偏偏差分别为 0.473 mm 和 0.480 mm (检测精度可达到 0.5

mm),满足设计要求。

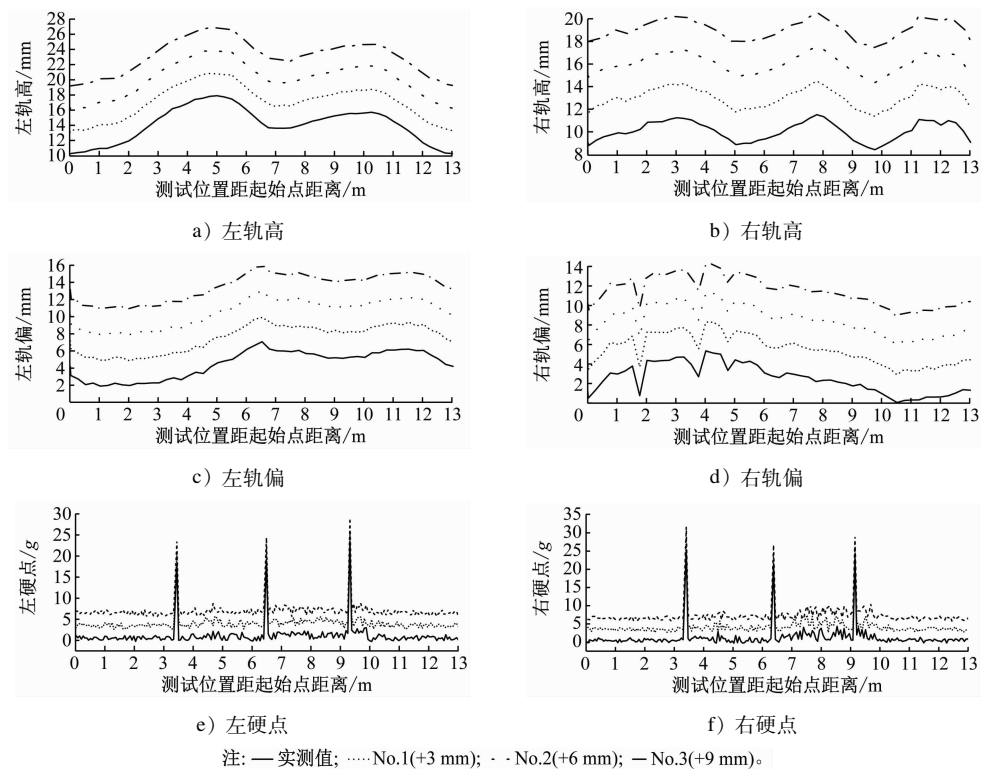


图 5 试验数据拟合曲线
Fig.5 Experimental data fitting curves

表 2 试验值与实测值偏差表

Tab.2 Deviation table between experimental and actual measured values

试验	左轨高/mm		右轨高/mm		左轨偏/mm		右轨偏/mm	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
No. 1	-0.177	0.180	-0.172	0.160	-0.179	0.198	-0.190	0.202
No. 2	-0.232	0.241	-0.076	0.069	-0.100	0.087	-0.210	0.241
No. 3	-0.197	0.254	-0.212	0.229	-0.133	0.170	-0.259	0.221

为分析相同位置轨高、轨偏及硬点的检测精度,对 3 次试验结果两两相减并进行对比,结果如表 3 所示。其中,轨高、轨偏的重复检测精度为 0.331 mm(重复检测精度可达到 0.4 m),硬点的重复检测精度为 4.01g(重复检测精度可达到 5g),满足设计要求。

4 结语

1) 通过理论分析研究,得到中低速磁浮接触轨动态检测系统常用的 3 个检测关键点,分别为轨高、轨偏及硬点,提出了轨高、轨偏及硬点的检测方法。

2) 对接触轨动态检测设备进行结构设计,完成

表 3 相同位置各参数的检测偏差与精度

Tab.3 Detection deviation and accuracy of each parameter at the same position

项目	左轨高/ mm	右轨高/ mm	左轨偏/ mm	右轨偏/ mm	左硬点/ g	右硬点/ g
No. 2-No. 1	0.099	-0.232	-0.272	0.08	2.29	-3.53
No. 3-No. 1	0.099	-0.09	-0.331	-0.09	-2.49	-3.78
No. 3-No. 2	-0.157	0.301	0.083	-0.16	2.32	4.01
检测精度	0.157	0.301	0.331	0.16	2.49	4.01

样机制作,并开展了试验研究。试验结果表明:中低速磁浮接触轨动态检测系统可对接触轨进行轨高、轨偏及硬点的有效检测,对轨高、轨偏的检测精

度可达到 0.5 mm,对硬点的重复检测精度可达到 5g,为中低速磁浮接触轨检测提供参考。

3) 对接触轨的跟随压紧轮进行了平行四边形连杆机构设计,同时采用可调节弹簧力增大检测设备的适用裕度。

参考文献

- [1] 陈小鸿. 城市轨道交通新技术、新系统:长沙磁浮机场快线工程[J]. 交通与运输, 2016, 32(3): 1.
CHEN Xiaohong. Innovative technologies and systems in urban rail transit: the changsha maglev airport express line project[J]. Traffic & Transportation, 2016, 32(3): 1.
- [2] 黄冬亮. 160 km/h 中低速磁浮交通轨靴受流仿真研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 151.
HUANG Dongliang. Current collecting simulation of 160 km/h mid-low speed maglev rail collecting shoe[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(1): 151.
- [3] 李伟. 城轨车辆受流器与三轨的匹配研究与分析[J]. 技术与市场, 2016, 23(5): 48.
LI Wei. Research and analysis on matching between urban rail vehicle current collector and three rails[J]. Technology and Market, 2016, 23(5): 48.
- [4] 王文娇. 受流器与接触轨端部弯头接触特性分析[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(1): 34.
WANG Wenjiao. Analysis on contact characteristics between collector and third rail end[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2014, 31(1): 34.
- [5] 申琦. 160 km/h 受流器动态特性研究[D]. 北京:北京交通大学, 2022.

- SHEN Qi. Study on dynamic characteristics of 160 km/h current collector[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [6] 肖友庆. 接触轨线路靴轨关系的研究及改善分析[J]. 机电信息, 2018(15): 69.
XIAO Youqing. Research and improvement analysis on the relationship between shoe and rail of contact rail line[J]. Mechanical and Electrical Information, 2018(15): 69.
- [7] 封硕. 接触轨空间形位参数检测系统结构设计与研究[D]. 上海:上海工程技术大学, 2020.
FENG Shuo. Structural design and research of measuring system for spatial shape and position parameters of contact rail[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2020.
- [8] 周鹏. 接触轨安装精度对中低速磁浮列车受流的影响[J]. 智能城市, 2020, 6(8): 168.
ZHOU Peng. Influence of installation accuracy of contact rail on current collection of medium and low speed maglev train[J]. Intelligent City, 2020, 6(8): 168.
- [9] 李宁. 中低速磁浮列车侧向受流器设计与分析[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2006.
LI Ning. Design and analysis of lateral current collector for medium and low speed maglev train[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.

· 收稿日期:2023-06-02 修回日期:2023-08-20 出版日期:2025-04-10
Received:2023-06-02 Revised:2023-08-20 Published:2025-04-10
· 通信作者:涂俊,工程师,tujun0189@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 232 页)

- HE Liang, WU Hao, LI Siwen, et al. Identification of urban rail transit DC power supply system short circuit transmission fault based on EMD singular value entropy[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(9): 88.
- [6] 范馨予, 徐雪远, 邹霞. 基于 l1,2-范数和神经网络的非线性特征选择方法[J]. 信号处理, 2021, 37(9): 1644.
FAN Xinyu, XU Xueyuan, WU Xia. Nonlinear solution for l1,2-norm based feature selection and neural network[J]. Journal of Signal Processing, 2021, 37(9): 1644.
- [7] 刘重阳, 张祥, 刘勇. 不稳定燃烧状态多尺度峭度诊断方法[J]. 航空动力学报, 2023, 38(9): 2116.
LIU Chongyang, ZHANG Xiang, LIU Yong. Multi-scale kurtosis index diagnosis method of unstable combustion states[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(9): 2116.
- [8] 陈之恒, 宋冬利, 张卫华, 等. 基于 EMD 及改进 PSO_BP 的

- 电机轴承故障诊断[J]. 测控技术, 2020, 39(11): 33.
CHEN Zhiheng, SONG Dongli, ZHANG Weihua, et al. Fault diagnosis of motor bearing based on EMD and improved PSO_BP[J]. Measurement & Control Technology, 2020, 39(11): 33.
- [9] 周志华. 机器学习[M]. 北京:清华大学出版社, 2016.
ZHOU Zhihua. Machine learning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.

· 收稿日期:2023-02-10 修回日期:2023-03-22 出版日期:2025-04-10
Received:2023-02-10 Revised:2023-03-22 Published:2025-04-10
· 第一作者:徐潇,博士研究生,XuXiao@my.swjtu.edu.cn
通信作者:宋冬利,高级试验师,sdlcds@swjtu.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license