

# 中低速磁浮列车悬浮性能测试系统研究

杨 勇<sup>1</sup> 杨以霖<sup>2\*</sup>

(1. 湖南磁浮交通发展股份有限公司, 410014, 长沙;

2. 湖南凌翔磁浮科技有限责任公司, 410007, 长沙//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 目的:当前,根据悬浮控制器上传的数据开展的中低速磁浮列车悬浮系统性能评估实时性不够,为了达到中低速磁浮列车的悬浮性能评估的实时性,开展中低速磁浮列车性能测试系统的研制工作。方法:研制工作分为硬件研制和软件设计两部分进行。硬件部分采用高速 A/D (模拟/数字) 转换芯片采集多路传感器数据,并通过 FPGA (现场可编程门阵列) 灵活配置采样频率采集数据,采用卡尔曼滤波方法对采样数据进行滤波处理,同时内嵌一个 Wi-fi 模块,将 FPGA 采集处理的数据高速打包上发到软件部分,以满足实时性要求。软件部分采用 Labview 平台开发,软件平台实时接收 Wi-Fi 模块上传的传感数据,并将这些数据标定与滤波,计算出各类原始传感数据,最终在界面中显示各悬浮性能指标曲线。结果及结论:试验测试结果表明,研制的中低速磁浮列车测试系统能实时地对悬浮系统性能开展评估,满足中低速磁浮系统的需求。

**关键词** 中低速磁浮列车; 悬浮控制; 悬浮性能测试; 信息采集子系统

**中图分类号** U266.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.020

## Research on Medium-low Speed Maglev Train Levitation Performance Testing System

YANG Yong, YANG Yilin

**Abstract** Objective: The real-time performance evaluation of MLM (medium-low speed maglev) train levitation system based on the data uploaded by levitation controller is not timely enough. To achieve the real-time evaluation of MLM train levitation performance, the development and research work of a MLM train performance testing system is carried out. Method: The development and research work is divided into two parts: hardware development and software design. The hardware part uses a high-speed A/D (analog/digital) conversion chip to collect data from multi-route sensors, and the data is flexibly configured and collected at a sampling frequency through a FPGA (field-programmable gate array). The Kalman filtering

method is used to filter the sampled data, and a Wi-fi module is embedded to perform high-speed packaging and sending of the data collected and processed by FPGA to the software part, so as to meet the timeliness requirements. The software part is developed on the Labview platform, which receives the sensor data uploaded by the Wi-fi module in real-time, calibrates and filters the data, calculates various types of original sensor data, and finally displays the levitation performance index curves in the interface. Result and Conclusion: The testing results show that the developed MLM train testing system can carry out real-time evaluation of the levitation system performance timely and meet the requirements of MLM system.

**Key words** medium-low speed maglev train; levitation control; levitation performance testing; information collection subsystem

**First-author's address** Hunan Maglev Transportation Development Co., Ltd., 410014, Changsha, China

磁悬浮列车是一种通过电磁力实现列车的悬浮与导向,并通过直线电机实现列车牵引运行的新型轨道交通工具。与传统轮轨列车相比,磁悬浮列车具有建设维护成本低、噪声低、寿命长、爬坡能力强、选线灵活等优点。近年来,磁悬浮发展迅速,目前国内已建成并运营的中低速磁浮线路包括北京的磁浮线和湖南长沙的磁浮快线,在建的磁浮线路包括广东清远的磁浮旅游专线、湖南湘西的凤凰磁浮观光快线等。中低速磁浮线路最高运行速度均为 100 km/h,而长沙磁浮快线部分线路已于 2021 年 7 月提速至 140 km/h,并已运营<sup>[1-2]</sup>。

随着磁浮交通的发展,其核心悬浮系统也亟需一套完备的性能测试方法进行指导。但因磁浮交通运营线路少、运营时间短,导致其数据积累不足,在对中低速磁悬浮系统进行调试时,缺乏可靠的数据支撑以及完备、系统的评估方式。当前,悬浮系

\* 通信作者

统的性能评估只能依靠控制器上传的数据开展,长沙磁浮快线列车的悬浮系统上传一组数据的时间为 100 ms,通常悬浮系统的振动频率为 30 Hz 左右,由此可见,悬浮控制器上传的数据远远达不到性能评估所需的数据实时性要求。为了形成一套完备可靠可用的评估方法,本文对悬浮性能测试系统进行研究,设计了一套性能测试系统,实时采集悬浮状态信息,并对悬浮性能进行检测分析。

## 1 悬浮性能测试系统

悬浮性能测试系统由信息采集子系统与信息处理子系统两部分组成。信息采集子系统将传感器信号采集进行处理,通过通信模块传输至上位机信息处理子系统。信息处理子系统主要进行数据的图形显示与悬浮性能分析。

与长沙磁浮快线悬浮采集系统不同,本文悬浮性能测试系统单独针对某一个悬浮点位进行数据采集分析,相较前者有着更快的采集速率、更大的存储量,而且可以根据悬浮点位的不同,随时调整位置以便进行数据分析调参。

### 1.1 信息采集子系统

信息采集子系统主要由电池、传感器,以及核心处理板组成,其结构框图如图 1 所示。

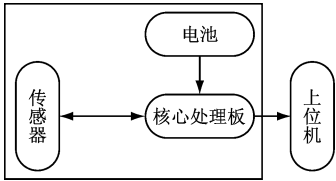


图 1 信息采集子系统组成图

Fig. 1 Diagram of information collection subsystem composition

在信息采集子系统中,电池为子系统供电,输出 48 V 电压,容量为 10 Ah,可为系统提供 10 h 的续航。传感器采集列车悬浮状态信息,如悬浮间隙、电磁铁竖向加速度、悬浮电流等,核心处理板将采集的信息处理并传输信息处理子系统,在信息处理子系统中进行存储显示与分析。

信息采集子系统实现对各点位悬浮状态信息的实时采集,辅助悬浮系统参数的调试与优化升级。为悬浮系统性能评估研究提供数据支撑。

信息采集子系统由承载的结构工装及 6 个传感器、核心处理板和电池组成。信息采集子系统安装在列车的转向架上,与悬浮电磁铁一起运动。其中

传感器安装在相应的测量位置,核心处理板和电池被金属外壳包裹,由承载的结构工装固定,传感器与核心处理板通过线束连接。整个工装结构小巧,易拆卸,且对电磁铁的起浮降落无影响。

传感器包括 2 个激光间隙传感器,4 个加速度传感器,以及 1 个电流传感器。2 个激光间隙传感器用来测量电磁铁的悬浮间隙;4 个加速度传感器中,各 2 个用来测量电磁铁的竖向加速度以及水平加速度;电流传感器用来测量电磁铁的电流。

核心处理器给传感器供电,应用高速 A/D(模拟/数字)转换芯片对传感器信号进行模数转换,采用 FPGA(现场可编程门阵列)对采样频率进行灵活配置,采用卡尔曼滤波方法对采样数据进行滤波处理。处理过后的数据同步输入到 SD 卡存储模块以及串口转 Wi-Fi 模块,进行本地存储以及将数据高速上发到上位机。

电池模块固定在工装上,可进行充放电。

### 1.2 信息处理子系统

信息处理子系统主要由上位机及软件组成。

上位机软件采用 Labview 平台开发,如图 2 所示,上位机软件与信息采集系统通信,接收信息采集系统发送的信息,并在 3 个界面中分别进行数据显示、性能显示,以及历史数据查看。

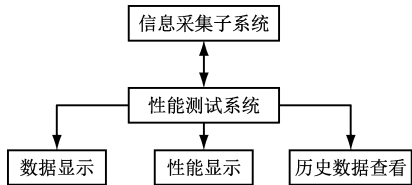


图 2 信息处理子系统功能图

Fig. 2 Diagram of information processing subsystem functionality

#### 1.2.1 数据显示

信息处理子系统与信息采集子系统通信连接后,可实时读取传感器测量数据。信息处理子系统将接收的数据进行标定与滤波,计算出各传感器原始测量数据,在界面中选取需要观察的传感器曲线进行显示,并同步存储。显示的数据曲线有悬浮间隙曲线、电磁铁振动曲线、电磁铁电流曲线等。

#### 1.2.2 性能显示

性能测试界面显示振动幅度、悬浮间隙、单点功率三类曲线,并提取计算特定的悬浮性能指标。

在振动幅度界面中,可选取加速度曲线显示振动幅度。

在悬浮间隙界面中,可选取悬浮间隙曲线显示,计算超限率,并判断是否显红报警。超限率异常存在 2 种状态:一是列车静态悬浮(以下简称“静浮”)时,悬浮间隙偏差大于  $\pm 0.5\text{ mm}$ ;二是在列车运行时,动态悬浮间隙偏差超出  $\pm 4\text{ mm}$  范围的概率大于 1%。在这两种状态下,前者界面灯会显红报警,后者界面超限值会显示异常。

信息处理子系统可以根据测量的信息以及电磁铁的自身参数,计算出单个电磁铁的功率,并以曲线的形式显示出来。

1.2.3 历史数据查看

在历史数据显示界面中,可打开历史数据进行查看,选取传感器曲线进一步进行性能分析。

2 试验

以长沙磁浮快线中低速磁浮列车为研究对象,进行悬浮系统性能监测。信息采集系统装配在磁浮列车托臂上,传感器在固定位置采集数据,在信息处理子系统界面中可显示各悬浮状态信息的变化曲线<sup>[3]</sup>。

通过对某次试验过程中列车某点的数据进行采集,采集得到竖向加速度、悬浮间隙及单点功率,如图 3—图 5 所示。

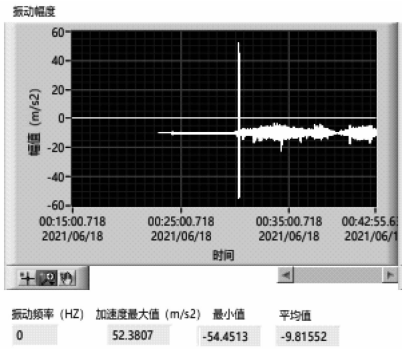


图 3 竖向加速度截图

Fig. 3 Screenshot of vertical acceleration diagram

在图 3—图 5 所示数据采集记录的时间段内,列车存在停车、静浮、起动等状态。整段数据时间长度为 20 min,在 00:24:12 处,列车启动静浮;在 00:30:03 处,列车从静浮状态进入运行状态;在 00:30:20 处,竖向加速度出现一次较大振幅变化,之后列车平稳运行;在 00:39:03 处,列车停车静浮;在 00:39:42 处,列车重新运行,直至此次记录结束<sup>[4]</sup>。

如图 3—图 5 所示,观察 3 个界面,可以看到数

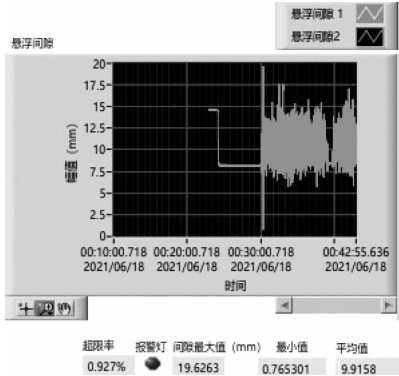


图 4 悬浮间隙截图

Fig. 4 Screenshot of levitation gap diagram

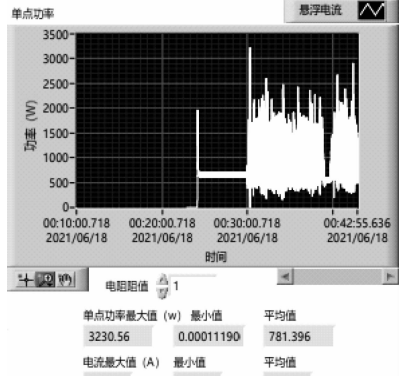


图 5 单点功率截图

Fig. 5 Screenshot of single point power diagram

据平缓段、数据正常波动段,以及数据异常波动段 3 段曲线,其参数数值如表 1 所示。在数据平缓段,即静浮状态,竖向加速度值为  $-1g$  ( $g$  为重力加速度),悬浮间隙值为 8 mm,电流值为 26 A;在数据正常波动段,即列车悬浮运行状态,竖向加速度值在  $-1g \pm 0.5g$  波动,悬浮间隙值在  $10\text{ mm} \pm 2.5\text{ mm}$  波动,电流值在  $26\text{ A} \pm 10\text{ A}$  波动;在数据异常段,竖向加速度值达到  $\pm 5g$ ,悬浮间隙最小值 0.8 mm,最大值 19.6 mm,电流值最小值 0,最大值 56.8 A(注:悬浮参数值由传感器实测值计算而来)。

表 1 性能参数数值表

Tab.1 Performance parameter values				
性能参数取值	竖向加速度/ ( $\text{m/s}^2$ )	悬浮间隙/ mm	单点功率/ W	悬浮电流/ A
最大值	52.4	19.6	3 230	56.8
最小值	-54.5	0.8	0	0
平均值	-9.8	9.9	781	26.8

性能测试界面中,悬浮间隙超限率为 0.9%,属于正常范围,但振动加速度最大值达到  $\pm 5g$ ,单点

功率最大值达到 3 230 W,悬浮电流最大达到 57 A,与平均值相差较大,结合图表信息,可判断在这次数据记录过程中 00:30:20 时刻处存在一次砸轨,之后列车恢复正常悬浮。

试验过后分析性能测试系统参数,进行悬浮控制参数调整,并在相同试验段重新进行试验。其调整过后的性能参数如表 2 所示。

表 2 调整后的性能参数数值表

性能参数 取值	竖向加速度/ (m/s <sup>2</sup> )	悬浮间隙/ mm	单点功率/ W	悬浮电流/ A
最大值	-4.98	13.98	1 189.86	34.99
最小值	-15.00	6.00	362.46	19.03
平均值	-9.80	10.00	762.12	27.58

观察控制参数调整过后的 3 个性能显示界面及表 2 可知,振动加速度振动幅度不超过 1g,悬浮间隙波动不超过 ±4 mm(除去静浮与停车状态),超限率为 0%,同时未存在砸轨现象,可判定在此次悬浮控制参数调整过后,悬浮性能提高。

3 结语

本文以测试中低速磁浮列车悬浮性能为研究目标,搭建了悬浮性能测试系统,获取实时悬浮状态信息,为中低速磁悬浮系统的调试提供了数据支持。

对悬浮控制系统性能的实时检测,能准确了解

悬浮系统在各种条件下的性能指标,包括不同速度、不同线路以及不同负载下的性能指标。通过对性能指标的检测和分析,既能为悬浮控制系统的优化提供依据,有利于提高列车的悬浮性能,又能提升磁浮列车乘坐的舒适性,加强磁浮列车在轨道交通领域的竞争力,促进磁浮列车技术的发展。这对加快推进磁浮列车技术的产业化具有一定意义。

参考文献

[1] 丁菁芳. 磁浮列车悬浮控制系统性能评价方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2018.  
DING Jingfang. Research on performance evaluation method of maglev train suspension control system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.

[2] 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, 22(9): 21.  
LIANG Xiao, CHEN Feng, FU Qingxiang. Key technical issues on 160 km/h medium-speed maglev transit system[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(9): 21.

[3] 汪俊杰. 数据驱动的磁悬浮列车故障检测与预测方法[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2020.  
WANG Junjie. Data driven fault detection and forecast for maglev trains[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2020.

[4] 侯磊,张文跃,高峰,等. 中低速磁浮列车悬浮控制系统可靠性分析及优化[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(7): 36.  
HOU Lei, ZHANG Wenyue, GAO Feng, et al. Reliability analysis and optimization of levitation control system of medium and low speed maglev trains[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(7): 36.

(收稿日期:2022-02-11)

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式阅读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

