

# 高速磁浮列车悬浮导向传感器故障定位系统研究\*

吉文<sup>1</sup> 袁建军<sup>1</sup> 佟来生<sup>2</sup> 梁潇<sup>3</sup> 黄海涛<sup>4</sup> 戴志杰<sup>5</sup> 朱莉莉<sup>1</sup>

(1. 同济大学磁浮交通工程技术研究中心, 201804, 上海; 2. 中车株洲电力机车有限公司, 412001, 株洲;

3. 湖南磁浮技术研究中心有限公司, 410014, 长沙; 4. 湖南磁浮交通发展股份有限公司, 410014, 长沙;

5. 上海致微医疗器械有限公司, 201907, 上海//第一作者, 工程师)

**摘要** 为解决上海磁浮示范运营线悬浮导向传感器故障检测和维修时间长、成本高的问题,对高速磁浮列车悬浮导向传感器的信号处理板和线圈柔性电路板进行了分析,利用信号发生设备产生输入信号至被测电路板,由信号采集设备通过串口通信传输到上位机系统与给定信号进行比较,根据比较结果,结合查故障字典来判断故障区域,从而实现悬浮导向传感器离线故障的定位。该方法能够对传感器板卡进行快速定位,提高了维修效率。研究结果对高速磁浮列车的维护工作具有一定的参考作用。

**关键词** 高速磁浮列车; 悬浮导向传感器; 故障定位系统

**中图分类号** U237.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.08.032

## Fault Location System of the Suspension Guidance Sensor for High-speed Maglev Train

Ji Wen, YUAN Jianjun, TONG Laisheng, LIANG Xiao, HUANG Haitao, DAI Zhijie, ZHU Lili

**Abstract** The suspension guidance sensor fault of Shanghai Maglev Demonstration Line needs longer inspection and maintenance time, leading to higher cost as the result. To solve this problem, the signal processing board and coil flexible circuit board of the suspension guidance sensor are analyzed, the input signal produced by signal generator is transmitted to the test circuit board, then transmitted to the host system by the signal acquisition equipment to compare with the given signal. Then, according to the result of comparison, the fault dictionary is used to detect the fault area, thus the offline fault location system of guidance sensor could conduct inspection, realize fast location of sensor boards and improve the efficiency of maintenance. The research results have certain reference value for the maintenance work of high-speed maglev train.

**Key words** high-speed maglev train; suspension guidance sensor; fault location system

**First-Author's address** Tongji University Maglev Trans-

portation Engineering Technology Research Center, 201804, Shanghai, China

高速磁浮列车悬浮导向传感器是磁浮列车悬浮系统的重要组成部分,其利用电涡流效应,传感器中的线圈产生激励电磁场,通过涡流磁场的变化来测量间隙值;将采集到的悬浮导向间隙转化为电信号传输至悬浮导向控制器内,悬浮导向控制器根据间隙信号动态调整电磁铁线圈中的电流,使磁浮列车稳定悬浮导向。

每个悬浮导向传感器产生 2 个相互独立的间隙信号(通道 A 与 B)、1 个加速度信号、1 个速度信号以及 1 个诊断信号。每个信号都通过各自的 1 个 RS 485 异步串行通信接口发送给悬浮导向控制器。悬浮导向传感器的信号传输如图 1 所示。

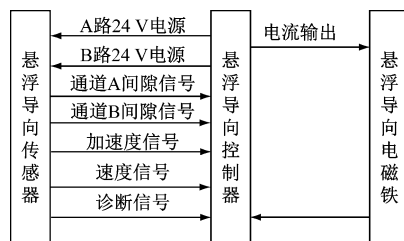


图1 悬浮导向传感器信号传输示意图

悬浮导向传感器安装在磁浮列车的底部。根据其在车辆上安装位置的不同,共有 4 种不同类型的 TSM(悬浮间隙测量单元),分别是 TSM1、TSM2、TSM3 和 TSM4。这 4 种类型的测量单元仅在激励频率上有所不同,其余特性完全一样。

悬浮导向传感器工作环境恶劣,需要经常维护与检测。目前,国内磁浮示范运营线传感器的故障检测和维修委托给德国某公司,维修成本较高且维修周期很长。为此,针对高速磁浮列车悬浮导向传

\*“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFB1200600);湖南省科技重大专项项目(2015GK1001)

传感器的信号处理板和检测线圈柔性电路板进行分析,提出一种离线的悬浮导向传感器的故障定位系统,实现了传感器故障的快速定位,大幅缩短了维修周期,节约了维修成本。

## 1 高速磁浮列车悬浮导向传感器故障定位系统工作原理

高速磁浮列车悬浮导向传感器故障定位系统采用离线测试方法,以上位机为中心,运用专用的信号激励设备、信号采集和处理设备,辅以电源、显示器及接口电路,完成对电路板故障的检测和诊断。根据电路板的工作原理,利用专用信号发生设备产生被测电路板所需的输入信号,经过接口电路输入到被测电路板,使其工作接近于实际工作状态;被测电路板产生的输出信号经过接口电路,由专用信号采集设备通过 RS 485 串口通信传输到上位机系统进行分析 and 处理。悬浮导向传感器故障定位装置结构如图 2 所示。

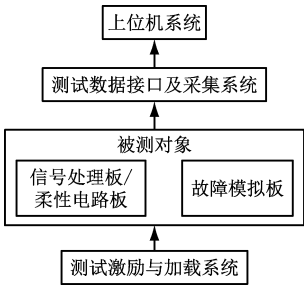


图 2 悬浮导向传感器故障定位装置组成结构

上位机系统通过电路板故障定位软件将采集到的电路板输出信号与给定的响应信号进行比较,判断电路板是否符合其工作原理。如果比较结果一致,则表明被测电路板正常;如果不一致,可根据比较结果,结合故障字典来判定出现故障的电路。

## 2 高速磁浮列车悬浮导向传感器故障定位系统的设计

### 2.1 测试激励与加载系统

传感器故障定位装置测试激励与加载系统能够控制悬浮导向传感器激励信号的产生与传送,可以根据预设的测试流程控制激励信号以驱动悬浮导向传感器。根据悬浮导向传感器的技术特点,激励信号分为两种类型:

1) 通用信号。信号的频率、幅值和加载时序能明确定义,如 24 V 电源、加速度信号、晶振信号等。

2) 专用信号。信号不能用明确的电信号予以定义,必须通过专用机构才能施加,包括间隙信号和速度信号。

如图 3 所示,将测试激励与加载系统设计成一套以 FPGA(现场可编程门阵列)芯片为核心的控制系统;通过配置相关的驱动电路,FPGA 软件控制可编程信号发生器,产生频率、幅值、时序等符合要求的通用激励信号,也可驱动专用机构实现传感器间隙信号、速度信号的激励与加载。

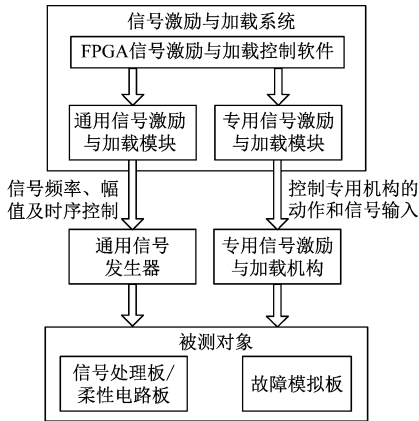


图 3 测试激励与加载系统

通用信号激励与加载模块用于那些频率、幅值、加载时序能事先明确定义的信号,如 24 V 电源、加速度信号、晶振信号等。模块与可编程信号发生器连接,按测试时序加载各类通用信号。

专用信号激励与加载模块用于间隙信号、速度信号的加载。间隙信号和速度信号是电感量,且对应相同的间隙值和速度值。每个传感器的电感变化量也各不相同,因此,无法用明确的电压或电流来定义间隙和速度,必须用专用机构施加间隙和速度激励信号。设计的专用信号加载机构如图 4 所示。

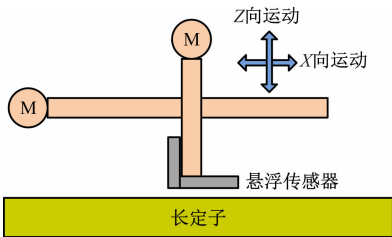


图 4 悬浮导向传感器专用信号加载机构

该机构由长定子、双轴位移机构和运动控制系统构成,长定子提供间隙信号检测基准面和速度信号齿槽面。双轴位移机构在 X、Z 两个轴向伺服电机的控制下运动,改变间隙值和速度值,提供专用

激励信号。

### 2.2 测试数据接口及采集系统

悬浮导向传感器测试数据接口及采集系统是一套数据通信系统(如图 5 所示),能采集模拟信号或数字信号,并按预设的协议进行数据转换。

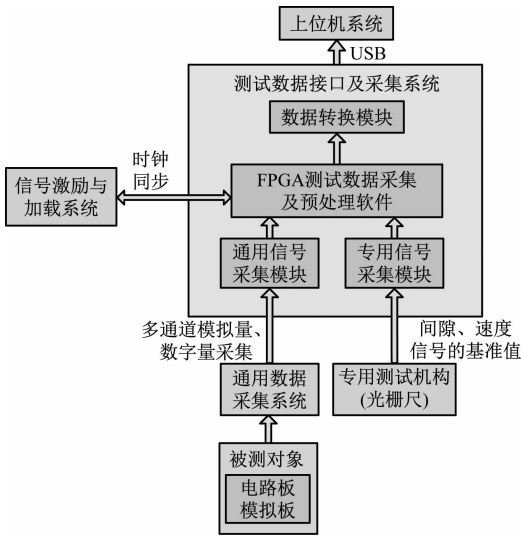


图 5 调试数据接口及采集系统

根据悬浮导向传感器的技术特点,需采集的数据分为两种类型:

1) 通用数据:是指被测电路板或故障模拟板上,各个预设的测点所采集到的信号;这些信号既有模拟量,又有数字量,软件既能识别模拟量,又能识别数字量。

2) 专用数据:是指悬浮传感器专用信号加载机构反馈的基准间隙和速度值。这些数据一般通过光栅尺获得。

将测试数据接口及采集系统设计成以 FPGA 芯片为核心的通信系统,通过配置相关的驱动电路,FPGA 软件通过通用数据采集系统得到通用数据,也可通过专用信号加载机构获得基准间隙、速度等专用数据。模拟量和数字量通道数量将根据故障定位装置的测点数和传感器板卡 I/O 接口数量设计,满足数据采集需要。

为了让测试数据和激励信号保持同步,在两个系统之间建立时钟同步关系,可以实现微秒级的时钟同步。测试数据接口及采集系统除进行通用数据和专用数据采集外,还要将这些数据进行封装,并通过 USB 串口向上位机发送测试数据。

### 2.3 上位机软件系统

悬浮导向传感器故障定位装置软件系统是一

套操作控制软件,具备故障辅助定位、自动检测、数据存储及故障分析定位功能,能辅助完成悬浮导向传感器板卡的故障定位以及测试功能。

悬浮导向传感器故障定位装置的软件系统本质上是一套工业测控软件系统,其结构、功能、性能均符合工业测控软件要求。悬浮导向传感器故障定位装置软件系统如图 6 所示。

软件系统以数据库和 .Net Framework 为技术基础,上层构建以下 4 个业务模块:

- 检测过程控制模块;
- 故障数据存储模块;
- 故障判定控制模块;
- 故障数据分析模块。

软件系统与定位装置下位机之间通过数据接口传递控制命令和测试数据反馈。

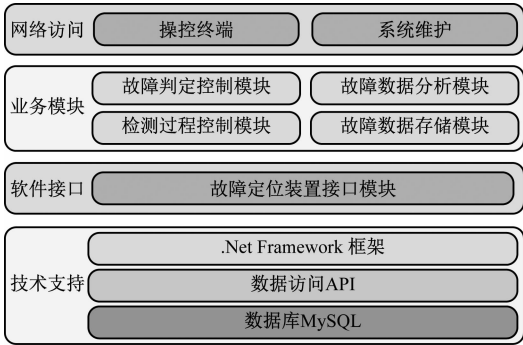


图 6 悬浮导向传感器故障定位装置的软件系统

### 2.4 测试故障模拟

为检验故障定位装置的故障诊断和定位效果,开发了故障模拟板。通过故障模拟板,可以人为设置故障类型,以检验故障定位装置的效果。故障模拟板能实现原板的基本功能,包括谐振电路、检波电路、调理电路、通信电路。故障模拟板能根据测试安排进行故障模拟,对测点的电气参数施加影响,使其偏离正常值而人为制造故障现象,以验证装置是否能正确检出故障点。

试验时,通过故障设置程序,将故障模拟板设置为某一路不输出 RS 485 信号且模拟信号处理板上通信电路的某个电阻、电容、485 通信芯片等损坏的情况。其他信号的给定都维持在正常值。通过测试,故障定位装置给出各电路的诊断结果如表 1。

查看通信电路测点的标准值和实测值,如表 2 所示。

因为电源、时钟、振荡电路、检波电路、信号调

表 1 故障模拟条件下各支电路输出一览表		
序号	电路名称	诊断结果
1	电源电路	OK
2	时钟信号电路	OK
3	振荡信号电路	OK
4	检波信号电路	OK
5	信号调理电路	OK
6	温度调理电路	OK
7	通信电路	Failure

表 2 通信电路故障诊断结果报告				
参数	被测传感器型号	串行数据传输波特率/(bit/s)	测试点编号	实测情况波特率/(bit/s)
悬浮间隙	TSM-1	700	T811	697
悬浮间隙	TSM-1	650	T812	无信号
速度	TSM-1	875	T813	655
加速度	TSM-1	875	T814	871

理电路输出均正常,由此可以判断 FPGA 的输入信号是正确的,故障仅发生在 FPGA 输出到 RS 485 通信电路这条支路上。

### 3 结语

本文依据上海磁浮工程示范线的实际运行情况,提出了一种离线的悬浮导向传感器故障定位系统,实现了传感器故障的快速定位,大幅缩短了维修周期,节约了维修成本。

### 参考文献

[1] 赵悦,沈青松,佟玉军. 电路板的测试技术[J]. 辽宁工学院学报. 2003,23(2):19.

(上接第 143 页)

### 4 结语

采用基于冗余编码系统的 CRC 校验方法,可实现冗余编码系统与非冗余编码系统的正常通信,提高系统的通信兼容性,并且有效保证了对传输过程中的错误信息和系统的随机性失效的检出率。目前该方法已成功应用于 ATP、ATS 等多个安全产品中。

### 参考文献

[1] 张俊峰. 城市轨道交通信号 ATC 系统的选择策略[J]. 铁路通信信号工程技术,2013,10(3):40.  
[2] 曹杰,汪明新,孙军峰. 一种基于冗余编码的变量签名唯一

[2] 湛仪. 电路板自动测试系统的设计与实现[D]. 北京:北京交通大学硕士学位论文,2006.  
[3] 朱大奇. 电子设备故障诊断原理与实践[M]. 北京:电子工业出版社,2004:23.  
[4] 王德合,尹光. 数字电路板故障诊断探讨[J]. 电子工程师, 2001,27(1):44.  
[5] 蒋邦方. 通用自动测试系统硬件分析和软件设计[J]. 通信与广播电视,2000(4):50.  
[6] 韩雪峰,黄炎,杨涛. 基于 PCI 总线的高速数据采集接口的设计与实现[J]. 微计算机信息,2005(12):71.  
[7] 邓素萍. 串行通信 RS232/RS485 转换器[J]. 国外电子元器件,2001(7):62.  
[8] 任晓东,文博. 基于神经网络的电路板故障诊断专家系统的研究[D]. 北京:电子工业出版社,2003.  
[9] 王承. 基于神经网络的模拟电路故障诊断方法研究[D]. 成都:成都电子科技大学,2005.  
[10] ZHOU X L, YU S T, MAO X J, et al. On-board diagnosis of the drive circuit of an electronically controlled injector[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2008, 222(5):815.  
[11] SEVGI L. Synthetic radar-signal environment: computer generation of signal, noise, and clutter[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2007, 49(5):192.  
[12] SAWAN M, MOUNAIM F, LESBROS G. Wireless monitoring of electrode-tissues interfaces for long term characterization [J]. Analog Integrated Circuits & Signal Processing, 2008, 55(1):103.  
[13] CHAKRABARTY S, RAJAN V, YING J, et al. A virtual test-bench for analog circuit testability analysis and fault diagnosis [C]// Autotestcon 98. IEEE Systems Readiness Technology Conference. IEEE, 1998:337.

(收稿日期:2019-04-25)

性安全保证方法[J]. 铁道通信信号,2015,51(9):55.  
[3] 李刚,丁佳,梁盟磊等. 安全编码预编译器的设计与实现[J]. 计算机工程,2011,37(3):230.  
[4] 赵希权,曾志新,李勇. 循环冗余校验在单片机无线通信中的应用[J]. 微计算机信息,2005(增刊):69.  
[5] 李继东,王博,袁晨光. 在通过程中用 C 语言实现 CRC 校验[J]. 内燃机与动力装置,2009(S1):43.  
[6] 马群,王会燃. 基于查表法的嵌入式系统 CRC 算法研究[J]. 软件导刊,2014,13(10):51.  
[7] 陈红,谢勤岚. 用查表法实现微处理器的快速 CRC 计算[J]. 交通与计算机,2003,21(3):73.  
[8] 董高云,孙军峰. CRC 查表法的推广及其在 iLOCK 联锁系统中的应用[J]. 铁路计算机应用,2015(1):40.

(收稿日期:2018-07-24)