

文章编号: 1671-7449(2024)06-0593-08

超导磁浮轨道光纤传感监测系统的设计与实现

杨晶¹, 王晨², 赵峻¹, 刘洪涛¹, 安国文², 贾平岗², 张樱子^{2*}

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司 磁浮研究所, 吉林 长春 130062;

2. 中北大学 省部共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 随着超导材料的发展, 超导列车技术发展迅速, 针对高温超导磁浮列车会在运行过程中对轨道系统造成影响以及强磁环境下传统电子学传感器难以实现稳定可靠测量的问题, 设计了基于光纤传感器的高温超导磁浮列车轨道监测系统, 以提高超导磁浮列车运行安全和稳定性。该系统主要包括传感器系统、数据采集及传输系统、智能化监测软件系统以及供电系统。监测系统提供实时可靠的连续性数据监测, 并由解调仪解算各通道传感器数据, 通过TCP协议经局域网上传至服务器, 由服务器上传至CCU(Central Control Unit)。该系统经过试验验证, 实现了多台服务器数据交互、指令发送、在线监测以及数据读取工作, 为高温超导磁浮列车可靠运行提供技术支持。

关键词: 光纤传感器; 数据采集; 实时监测; 超导磁浮列车

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-7449.2024087

引用格式: 杨晶, 王晨, 赵峻, 等. 超导磁浮轨道光纤传感监测系统的设计与实现[J]. 测试技术学报, 2024, 38(6): 593-600.

YANG Jing, WANG Chen, ZHAO Jun, et al. Design and implementation of optical fiber sensor monitoring system for superconducting maglev track[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(6): 593-600.

Design and Implementation of Optical Fiber Sensor Monitoring System For Superconducting Maglev Track

YANG Jing¹, WANG Chen², ZHAO Jun¹, LIU Hongtao¹, AN Guowen², JIA Pinggang², ZHANG Yingzi^{2*}

(1. Maglev Research Institute, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., LTD., Changchun 130062, China;

2. State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: With the development of superconducting materials, superconducting train technology is developing rapidly. Aiming at the problems that high-temperature superconducting maglev trains will affect the track system during operation and that traditional electronic sensors are difficult to achieve stable and reliable measurement under strong magnetic environment, a track monitoring system of high-temperature superconducting (HTS) maglev trains based on optical fiber sensors is designed to improve the operation safety and stability of superconducting maglev trains. The system mainly includes: sensor system, data acquisition and transmission system, intelligent monitoring software system and power supply and distribution system. The monitoring system provides real-time and reliable continuous data monitoring, and the sensor data of each channel is

收稿日期: 2024-03-05

基金项目: 中车十四五科技重大专项 (2021CCZ002-2)

作者简介: 杨晶(1991—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事车辆动力学及测试技术研究。E-mail: yangjing9495@163.com。

* 通信作者: 张樱子(1989—), 女, 讲师, 博士, 主要从事先进测试与系统集成技术研究。E-mail: zhangyingzi@nuc.edu.cn。

calculated by the demodulator and uploaded to the server through the TCP protocol via the local area network. The server then uploads the data to the central control unit (CCU). The system has been tested and verified to realize data interaction, command sending, online monitoring and data reading of multiple servers, which provides technical support for reliable operation of HTS maglev train.

Key words: fiber optic sensor megabytes; data collection; real-time monitoring; superconducting maglev train

0 引言

从发现超导现象至今,新型超导材料迅速发展^[1]。随着高温超导材料性能不断提升,实用型超导磁悬浮技术成为可能^[2]。其中,高温超导磁悬浮列车^[3](High Temperature Superconducting Magnetic Levitation, HTS Maglev)作为新型高温超导材料的主要应用场景迅速发展,磁悬浮列车摆脱了轮轨间粘着作用,利用电磁力实现列车与轨道之间无接触的悬浮和导向,再利用直线电机产生的电磁力牵引列车运行,具备运行速度高、爬坡能力强、转弯半径小、能耗低、噪音低、振动小、安全等优点^[4-5]。在超导列车行驶过程中,对应的轨道以及线圈系统监测对整车行驶安全尤为重要,而在实际工程应用中,往往需要列车运行在强电流及强磁场的环境中,而常规的电子学传感器在强磁环境下会出现电磁干扰导致难以监测等情况,面对此种情况,光纤传感^[6]提供了可靠的解决方案。

光纤传感器主要由光源、传输光纤、光电探测器和信号处理部分组成。其基本原理是将来自光源的光经过光纤送入传感头(调制器),使待测量参数与进入调制区的光相互作用后,导致光的性质(如光的强度、波长、频率、相位和偏振

态等)发生变化,成为被调制的信号光,再经过光纤送入光电探测器,将光信号转化为电信号,后经过信号处理还原出被测物理量^[7]。相比传统电子传感技术,光纤传感技术具有许多优点,主要表现在:灵敏度高^[8],抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀、本质安全,这使它可以方便有效地用于高温超导磁浮列车等强电磁干扰和易燃易爆等恶劣环境中^[9]。其测量速度快,可用于高速测量;且信息容量大,同一根光纤可以传输多路信号^[10-11]。基于光纤传感器以上优点,本文设计了高温超导磁浮列车轨道监测系统,包括传感器系统、数据采集及传输系统、智能化监测软件系统以及供配电系统,各个系统协同工作,实现对高温超导磁浮轨道监测,保障磁浮列车安全可靠运行。

1 系统方案

1.1 系统总体方案设计

本文设计了一套用于高温超导磁浮交通项目200 m试验线(如图1所示)的轨道及线圈监测系统,测量200 m试验线试验车在静止以及3种预设速度曲线(15, 10和5 m/s)下轨道及线圈系统应力应变、温度、振动、螺栓预紧力等参数的动态变化,从而检验轨道及线圈系统的可靠性及稳定性。

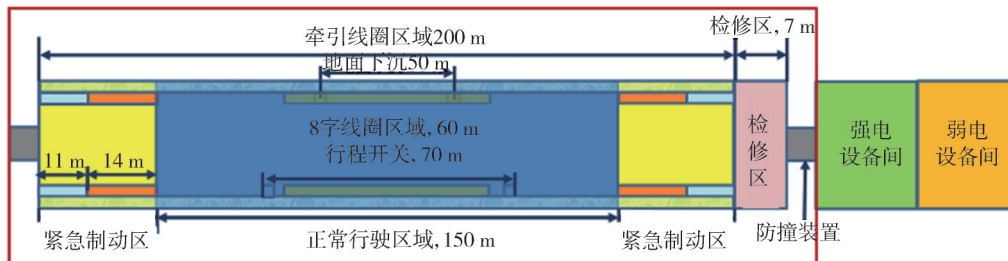


图1 200 m试验线轨道及线圈布置图

Fig. 1 Track and coil layout of 200 m test line

该系统针对高温磁浮交通项目200 m试验线的轨道及线圈系统进行性能监测。系统工作时所处的磁场环境为0.7 T(列车经过时会产生7 Hz的低频磁场波动);工作湿度范围为0%~90% RH;

信号采集设备工作温度范围为-10~60 °C。在此工况下,系统测试整个200 m试验线轨道及线圈系统的测试对象包括:轨道梁、涡流制动板、牵引线圈以及8字线圈。如图2所示,牵引线圈、8字

线圈、涡流制动板安装于轨道内侧，其中，牵引线圈覆盖整个 200 m 轨道，涡流制动板安装于轨道

两侧的各 25 m，8 字线圈仅在轨道中间 60 m 铺设。

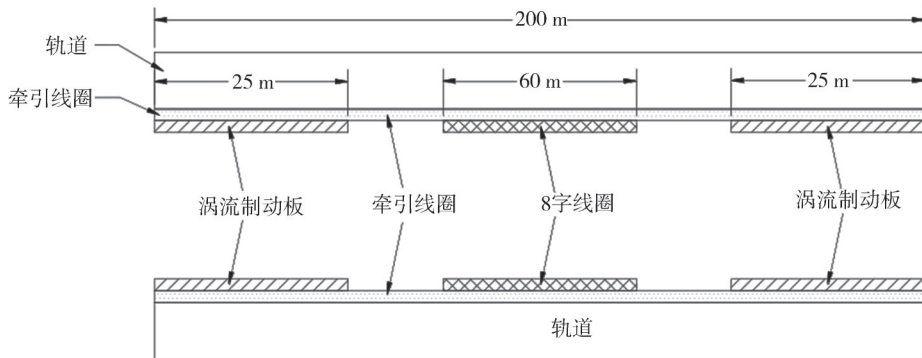


图 2 各测试对象位置示意图

Fig. 2 Location diagram of each test object

如图 3 所示，本设计方案中监测系统主要包含 4 个组成部分：传感器系统、数据采集及传输系统、智能化监测软件系统以及供配电系统。

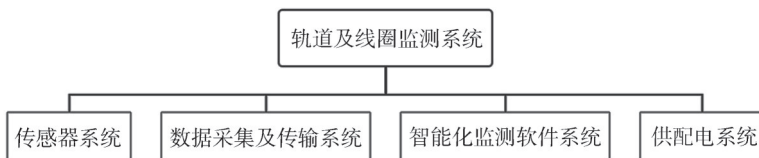


图 3 系统架构示意图

Fig. 3 System architecture diagram

整个系统由分布在不同位置的光纤传感器采集数据，所监测的指标包括高温超导磁悬浮列车轨道梁系统以及线圈系统，其中，轨道梁系统主要检测轨道梁的应力应变、温度、振动、螺栓预紧力以及位移；线圈系统主要监测涡流制动板的应力应变、温度参数，牵引线圈的应力应变、温度、振动以及 8 字线圈的温度振动参数。监测系统的测试对象以及各自的被测参数示意图如图 4 所示。

采集及传输系统传输至智能化监测软件系统，智能化软件系统对当前状态进行实时显示，针对不同情况可实现数据的存储以及数据处理，供配电系统为整个轨道及线圈监测系统提供电力。另外，为满足连续实时测试，面对当市电出现故障时，供配电系统提供临时供电，确保整个系统的连续可靠测试^[12]。

1.2 传感器系统安装与调试

传感器系统作为监测系统最重要的组成部分之一，其科学的构成有利于提高监测系统的完整性。作为在线监测系统最前端、最基础的子系统，高温超导磁浮列车轨道检测系统的传感器系统设计尤为重要，如图 5 所示，根据轨道和线圈系统的测试对象，传感器系统由七大类传感器构成，分别为：光纤光栅压力传感器、光纤光栅应力应变传感器、光纤光栅温度传感器、MEMS 光纤振动传感器、M30 光纤垫片传感器、M16 光纤螺栓传感器以及光纤光栅位移传感器，整个系统包括 7 类传感器，共计 217 只，分别位于轨道梁以及线圈系统的不同位置，根据传感器的类型将传感器分布于轨道梁、涡流制动板、牵引线圈以及 8 字线圈上。

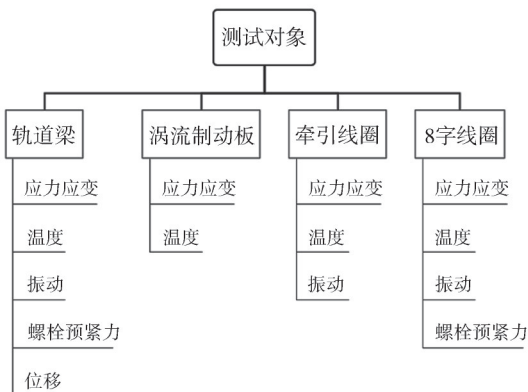


图 4 监测系统测试对象及各自的被测参数示意图

Fig. 4 Schematic diagram of test objects of the monitoring system and their measured parameters

当传感器系统监测到当前状态发生变化时，传感器开始响应外界变化，产生的数据经由数据

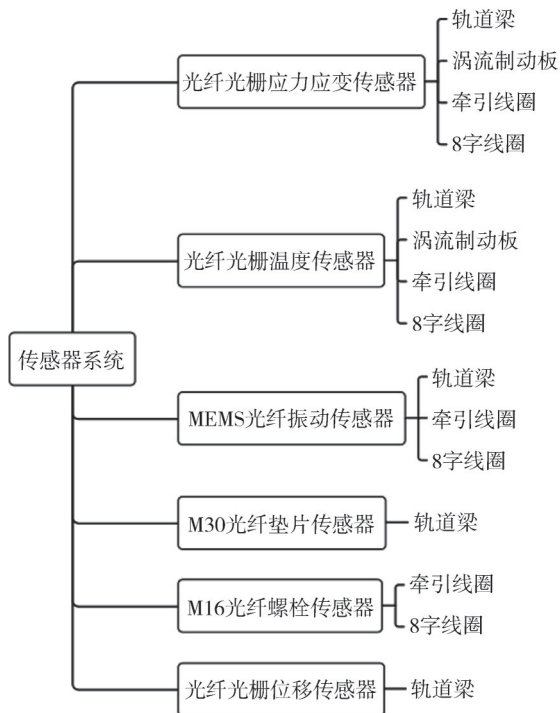


图5 传感器系统及其对应的测试对象示意图

Fig. 5 Schematic diagram of sensor system and its corresponding test object

1.2.1 应变传感器

系统设计中应变传感器通过AB胶粘接引脚安装于8字线圈表面、牵引线圈内侧与涡流制动板表面,用来监测布置的位置在列车经过时的应变,应变传感器输出物理量为微应变($\mu\epsilon = \epsilon \cdot 10^{-6}$)。应变方向规定为:应变传感器受到引脚安装轴线方向压缩形变时为正应变,受到引脚安装轴线方向拉伸形变时为负应变。安装时,应变传感器应与温度传感器组合使用,温度传感器为应变传感器提供温度补偿,按照之前调研仿真结果,安装在线圈的观测位置。如图6所示,在8字线圈中,传感器安装脚为水平横向安装(规定箭头方向为正应变)。在牵引线圈中,传感器安装脚为沿牵引线圈环径向安装(规定箭头方向为正应变)。注意安装时应提前预留好探头后端光纤的位置,避免后期因安装位置导致光纤过度弯折,影响光信号质量。

1.2.2 载荷传感器

传感系统中载荷传感器通过胶粘附着于轨道梁表面,安装时应尽量保持粘接剂均匀涂抹于载荷传感器背面,适当按压传感器保持紧贴于背侧位置,同时预留好后端光纤走线位置,避免弯折过度。通过载荷传感器监测轨道梁的微应变,传感器封皮上的箭头方向为应变测量方向。输出物

理量为微应变($\mu\epsilon = \epsilon \cdot 10^{-6}$)。规定应变方向为载荷传感器受到沿封皮箭头负方向形变时为正应变,受到沿封皮箭头正方向形变时为负应变。如图7所示为载荷传感器和位移传感器示意图。

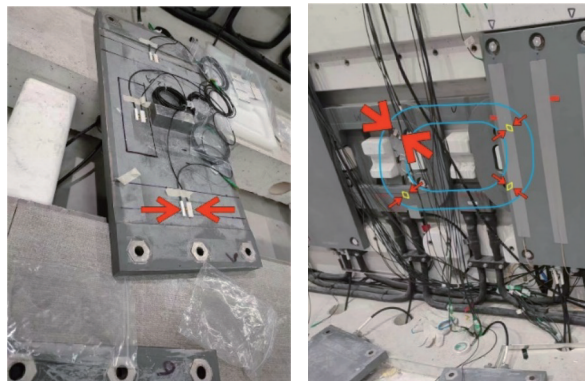


图6 牵引线圈及8字线圈安装示意图

Fig. 6 Installation diagram of traction coil and figure 8 coil



图7 载荷传感器和位移传感器示意图

Fig. 7 Schematic diagram of load sensor and displacement sensor

1.2.3 加速度传感器

传感系统中MEMS加速度传感器使用机械方式固定于轨道梁、8字线圈与牵引线圈上并保证加速度传感器的三轴输出与轨道坐标系一致。输出物理量为加速度(单位:G)。将位移传感器安装于第18片轨道梁分线箱侧,安装时采用螺栓固定于轨道梁外侧,安装好后及时对传感器校正并做好外部保护措施,避免其暴露在外侧的位置导致损害影响系统运行。该传感器输出物理量为位移(单位:mm)。监测车辆行驶中对轨道梁造成的位移,规定位移方向为:位移传感器测量结构拉伸为正位移,压缩为负位移。

1.2.4 垫片传感器

图8所示为垫片传感器示意图。将垫片传感器安装于轨道梁分线箱侧,安装时替换原来安装于轨道梁的螺母,采用力矩扳手将螺栓与其紧固,并将其接线端放置于内侧,避免因外力因素导致光路损坏,每只垫片传感器内均匀分布3个压力测量点,总压力为3个压力点的平均值,由此设计采集到的压力值相较于单一点位采集得到的压力值更加符合实际情况,有效避免了因为单一点位异常值导致的测

试数据不可靠的情况,其输出物理量为压力(单位:kN)。规定压力方向为沿垂直于传感器圆平面的轴方向,压缩为正,放松为负。

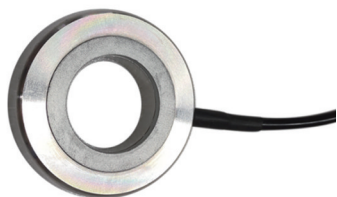


图 8 垫片传感器示意图

Fig. 8 Schematic diagram of gasket sensor

超导磁浮列车在工作状态下,8字线圈、牵引线圈以及涡流制动板会提供动力,根据经典物理学定律,列车行进时会产生反作用力,应变传感器主要监测列车运动时,8字线圈、牵引线圈和涡流制动板的形变程度,为列车安全运行提供保障,加速度传感器主要聚焦于轨道梁的振动信息,载荷传感器和位移传感器监测轨道梁的微应变以及微位移,垫片传感器监测轨道梁位移时的螺栓压力信息。

综上为整个高温超导磁浮轨道监测系统的传感系统设计,该传感器系统主要呈现测量精度高、量程大的特点;传感器系统稳定性好、可靠性高、环境适应性强,能够实现长期连续监测的要求;传感器与数据采集、通信设备具有良好的兼容性;传感器的安装与使用不易受被测对象的电气、电子和运行环境影响,抗环境干扰能力强。

1.3 数据采集及传输系统设计

数据采集及传输系统是联系传感器模块与监测软件系统的桥梁,包括传感器数据传输电缆/光缆、数据采集仪器、分线盒、终端盒等^[13]。系统使用两台 FT810 光纤传感分析仪(下称解调仪)对传感器信号进行采集与解算。数据采集频率为最高 2.5 kHz。每台解调仪包含两组 16 通道 MPO 光纤适配器,可同时接入两只 MPO 主线,接口为 MPO1 与 MPO2。根据测试点位不同须更换 MPO 主线对相应轨道梁传感器的解算。数据采集系统的安装拓扑结构以及设备安装与布线图如图 9 所示。

各轨道梁的传感器光路就近进入对应分线箱,在分线箱内通过光耦合器耦合或直接对插接入 MPO 主线。5 条轨道梁共计 10 只 MPO 主线通过线槽进入解调仪机柜与解调仪相连。两台解调仪获取数据后,通过有线局域网将各通道原始频

率数据上传并保存至同一机柜内的服务器中,该局域网设备包含 2 台解调仪、1 台服务器和 1 台千兆交换机。设备运行后解调仪自动与服务器进行校对。服务器获取数据后按照指定格式解析并以相应频率上传至指定 IP。

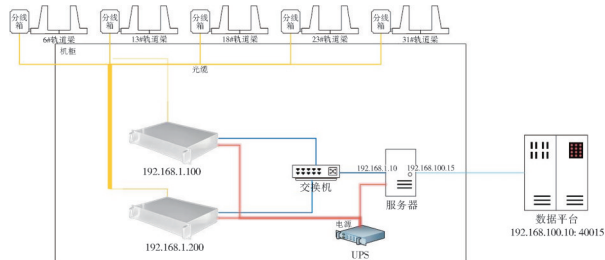


图 9 数据采集系统拓扑结构示意图

Fig. 9 Topology diagram of data acquisition system

所设计的数据采集及传输系统有以下优点: 1)传感器、采集仪与传输电缆/光缆具备可靠的连接,便于维护,传输电缆/光缆有可靠的防护且具备抵制温度变化或环境侵蚀等不利因素的能力; 2)数据采集仪器的稳定性、可靠性及环境适应性满足长期连续监测的要求,配备专门的机柜,安装位置应具备较大的空间且利于维护。

1.4 智能化监测软件系统

智能化监测软件系统是整个监测系统的核心,系统中各部位各类型传感器获取的监测数据只有经过处理与分析才能实现轨道梁系统和线圈系统的监测^[14]。本文设计的智能检测软件系统具备以下功能:数据的预处理和结合数据预处理分析结果和现场检查结果,可以按照要求进行相应数据的实时显示以及统计分析。软件的设计界面如图 10 所示。



图 10 智能化检测软件系统

Fig. 10 Intelligent detection software system

1.5 供电系统

为满足轨道梁监测系统的实时连续性检测,解决在市电出现故障时传感系统供电匹配问题,

本文设计的供配电系统主要包含不间断电源(Uninterruptible Power Supply, UPS)和直流配电组合,专门为数据采集及传输系统、传感器系统提供交直流电源。所设计的供配电系统在市电正常的情况下,市电对UPS进行稳压浮充,同时通过UPS给直流配电、信号调理组合、设备自检组合以及显控组合等设备供电;在市电断开的情况下,UPS可以短时间确保设备继续工作,满足系统测试结果保存、测试任务应急的任务^[15]。

2 整车试验及监测系统验证结果与分析

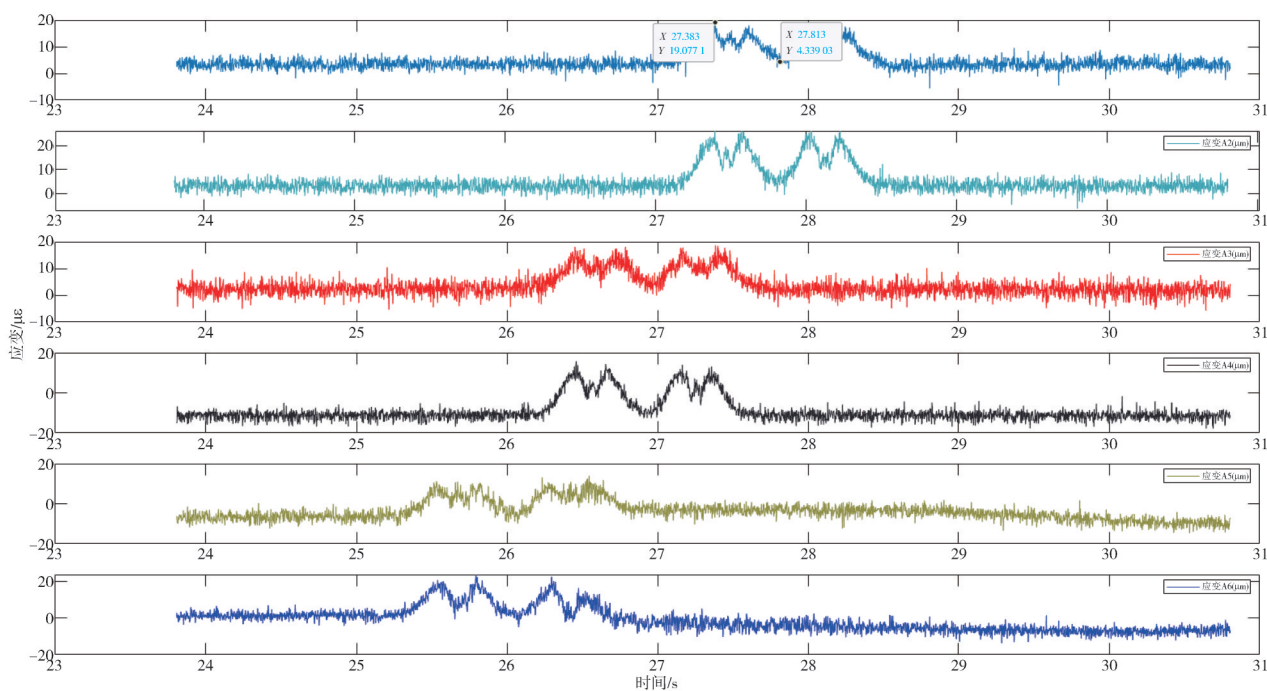
为验证所设计监测系统的性能,且考虑到电动悬浮试验车辆在运行过程中可能会对超导试验线的轨道梁、地面线圈等结构形成反馈作用,在轨道系统的关键部位布置高精度传感器,将测量数据经由传输链路发送至工控机服务器进行显示和分析,以研判试验车辆在动态运行过程中系统的运行状态。

试验对象为超导电动磁浮试验线的轨道及地面线圈监测系统。超导电动磁浮试验线的轨道及地面线圈监测系统共布置传感器217只,主要包括振动加速度、位移、应力应变、温度、螺栓传感器等类型,分布位置在第6片、第13片、第23片和第31片轨道梁。所有传感器通过10条(1#~10#)信号线路将数据传输至司控台前端工业机柜

中。按照测量实际环境,将10路信号分3次测量:第1组包括1#、2#、3#、4#,第2组包括5#、6#、7#,第3组包括8#、9#、10#。本次试验包含静态巡线测试和动态悬浮测试两部分内容,规定整备检修区为轨道线路的起始位置,试验车辆由整备检修区向涡流制动区行驶的方向为上行,反之为下行。超导磁浮试验线由牵引加速区、悬浮运行区和涡流制动区三部分组成,本次仅针对第1组开展了相关试验测试。其中,1#和2#线路的传感器布置在第6片轨道梁,属于牵引加速区域;3#线路的传感器布置在第31片轨道梁,属于涡流制动区域;4#线路的传感器布置在第23片轨道梁,属于悬浮运行区域。

在整车运行后,调整调试好的系统至运行状态,并将数据进行存储,经由整车试验,所设计的高温超导磁浮交通200 m试验线轨道及线圈监测系统可以安全可靠的运行。根据轨道梁、涡流制动板等不同元件材料的杨氏弹性模量,通过传感器测量获得的动态应变,计算得到应力的时域响应特性。

图11所示为轨道梁应变和应力的时域变化图,其中,A1~A6分别为布置在轨道梁内外两侧的应变传感器代号,其中A1~A6为安装在位于牵引线圈区域的6号轨道梁的载荷传感器,该传感器分布于轨道梁的内外两侧,实现对轨道梁应变监测,根据实验数据分析得到:



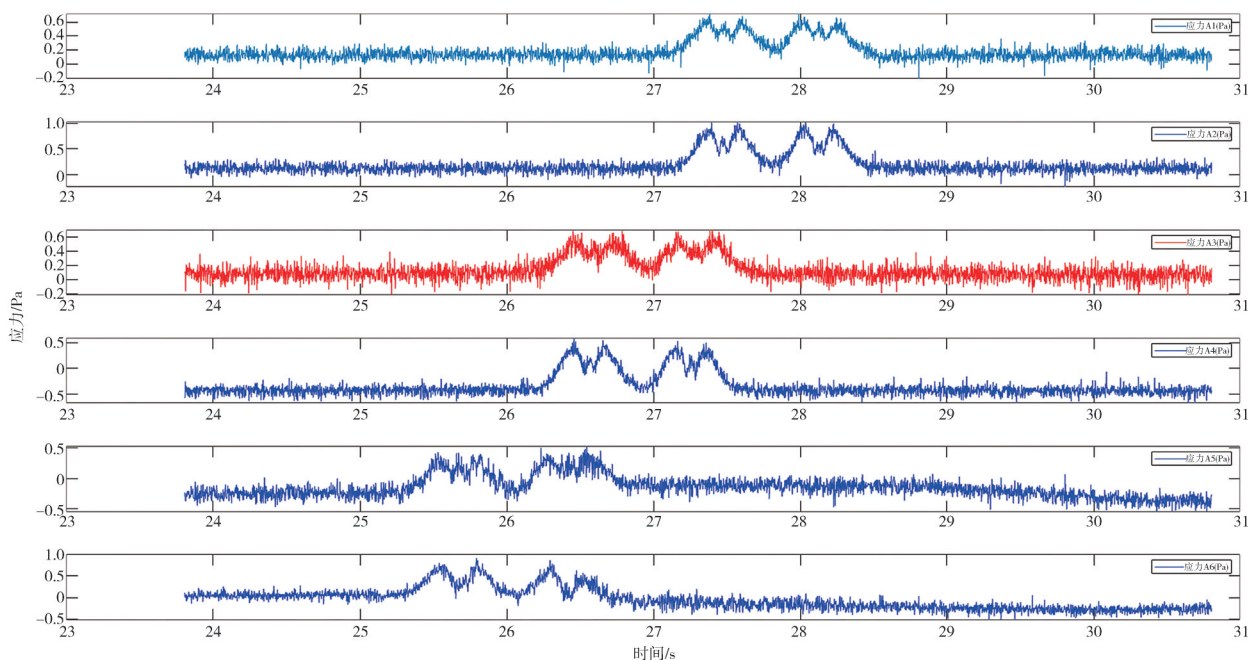


图 11 轨道梁应变和应力的时域分析图

Fig. 11 Time domain analysis diagram of track beam strain and stress

1) 超导试验车辆形成的电磁与机械作用对轨道梁应变产生了一定程度的反馈影响,静态/动态下轨道梁的应变响应范围分别为 $0\sim 5\ \mu\epsilon$ 和 $5\sim 20\ \mu\epsilon$, 应力幅值基本维持在 e^{-6} 次方数量级,对轨道梁形成作用力的影响程度很小;

2) 由于试验车辆包含 4 个走行轮对和 4 个车载超导磁体,且呈现 $2*2$ 矩阵形式排布,因而形成了具有相位差特征的双峰时域图像且内外两侧应力变化一致,传感器一致性较好。

3 结 论

高温超导磁浮交通 200 m 试验线轨道及线圈监测系统采用多系统集成,通过将光纤传感器在 200 m 试验线不同位置布置来实时采集整个轨道以及线圈系统的数据,通过较为完善的拓扑结构将数据高效可靠地传输至智能监测系统模块,所设计的智能监测模块可将采集回的数据进行分析处理。另外,根据实际工程应用,在供配电系统设计双供电以保证系统的可靠性,在市电供电情况下为传感器及 UPS 充电,当市电出现故障时,UPS 及时为整个系统提供电源,保证了系统的实时连续性检测。经过高温超导整车跑车试验,该系统可以实现系统监测,实时显示数据,采集存储以及数据分析,为高温超导磁浮列车在运行过

程中提供实时高可靠监测。

传感器 A1~A6 布置在牵引线圈区域的 6 号轨道梁上,内外两侧的安装确保可以全面监测到梁的应变情况。由于传感器均匀分布在轨道梁的两侧,这种对称的布局有助于捕捉到由于车辆运动而在梁上产生的不均匀应力分布。此外,车载超导磁体和走行轮按 $2*2$ 矩阵排布,这种特定的配置方式对应力和应变的分布产生了显著影响,尤其在磁体接近传感器的区域,可能会观察到应力集中现象。通过整车跑车试验,验证了本系统能够实时监测高温超导列车对轨道梁的作用力以及列车在上行下行过程中线圈系统的受力由于受力产生的形变和位移,通过与现有理论的对比,可以更好地理解超导磁悬浮车辆中电磁与机械作用的互动。超导磁体在运动中产生的磁场可以显著影响附近金属结构的应力状态。本研究的发现与此相符,显示轨道梁应变在静态和动态条件下的响应。此外,比较本研究使用的传感器数据与先前类似的超导磁悬浮实验结果,可以验证传感器布局的有效性和数据的一致性。

本文通过整体的系统设计与先前研究的对比分析以及严格的统计和误差处理,深入探讨了超导磁悬浮车辆在运动中对轨道梁的影响。传感器的优化布局和数据处理方法确保了测量结果的准确性和一致性。实验结果不仅揭示了超导磁体和

机械负载如何共同作用于轨道梁,还为未来的超导交通系统设计提供了重要的实验数据和理论支持。未来的研究可进一步探索不同操作条件下的应力分布,以优化轨道设计和提高系统的整体性能。

参考文献:

- [1] 白全巍. 智能化监测与控制技术在深基坑施工中的应用探讨[J]. 智能建筑与智慧城市, 2024(1): 75-77.
BAI Quanwei. Exploration of the application of intelligent monitoring and control technology in deep excavation construction [J]. Intelligent Building and Smart City, 2024(1): 75-77. (in Chinese)
- [2] 况卓林, 李素贞. 基于分布式光纤声振传感的索结构监测[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(9): 197-205.
KUANG Zhuolin, LI Suzhen. Cable structure monitoring based on distributed fiber optic acoustic vibration sensing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(9): 197-205. (in Chinese)
- [3] 陈苑冰, 叶青, 吕佩洁, 等. 基于IIR的智能传感器实时监测系统设计[J]. 电子制作, 2024, 32(1): 56-60.
CHEN Yuanbing, YE Qing, LÜ Peijie, et al. Design of intelligent sensor real time monitoring system based on IIR [J]. Practical Electronics, 2024, 32(1): 56-60. (in Chinese)
- [4] 张成雷, 汪振众, 张国建, 等. 铁路高边坡变形自动化监测新技术研究[J]. 现代信息技术, 2023, 7(24): 92-99.
ZHANG Chenglei, WANG Zhenzhong, ZHANG Guojian, et al. Research on new technologies for automatic monitoring of high slopes deformation in railway [J]. Modern Information Technology, 2023, 7(24): 92-99. (in Chinese)
- [5] 范晓, 韦强, 林浩立, 等. 永磁悬浮列车磁路设计与仿真研究[J]. 现代城市轨道交通, 2023(12): 60-67.
FAN Xiao, WEI Qiang, LIN Haoli, et al. Design and simulation research of magnetic circuits for permanent magnet levitation train [J]. Modern Urban Transit, 2023(12): 60-67. (in Chinese)
- [6] 张明亮, 杨新梦, 刘丽茹, 等. 高温超导磁悬浮列车振动特性分析及其参数可行域研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(18): 30-38.
ZHANG Mingliang, YANG Xinmeng, LIU Liru, et al. Vibration characteristics and parameter feasible region of a type of HTS maglev [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(18): 30-38. (in Chinese)
- [7] 刘昊. 基于光纤干涉降频技术的高速测量系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [8] TOMITA M, 周贤全. 超导磁悬浮技术及研发动态[J]. 国外铁道机车与动车, 2023(3): 42-46.
TOMITA M, ZHOU Xianquan. Superconducting magnetic levitation technology and its research and development trends [J]. Foreign Railway Locomotive and Motor Car, 2023(3): 42-46. (in Chinese)
- [9] 任静, 胡晓轩, 孔宁, 等. 船舶智能感知车间的网络构建及系统应用[J]. 造船技术, 2022, 50(6): 76-83.
REN Jing, HU Xiaoxuan, KONG Ning, et al. Network construction and system application of ship intelligent sensing workshop [J]. Marine Technology, 2022, 50(6): 76-83. (in Chinese)
- [10] 刘筱萌, 张瞳. 环境监测数据采集与传输系统的设计与应用[J]. 机械设计与制造工程, 2022, 51(12): 49-53.
LIU Xiaomeng, ZHANG Tong. Design and application of environmental monitoring data acquisition and transmission system [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2022, 51(12): 49-53. (in Chinese)
- [11] 谯继贤. 基于分布反馈光纤激光器的局部放电超声检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
- [12] 魏明慧. 高温超导块材的温度敏感性及其监测系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [13] 孔二帅. 基于高温超导材料的新型高场线圈电磁设计及研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- [14] 谢文彬. 超导材料的发展和前景研究[J]. 佳木斯职业学院学报, 2018(2): 269-270.
XIE Wenbin. Research on the development and application prospect of superconducting materials [J]. Journal of Jiamusi Vocational Institute, 2018(2): 269-270. (in Chinese)
- [15] 黄嘉楠. 快速铁路大跨度连续梁桥施工控制及可靠性研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2015.