

文章编号: 1674—8247(2025)02—0083—04
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2025.02.013

磁浮列车悬浮电磁铁温度监测系统设计

王富斌

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要: 悬浮电磁铁作为磁浮列车的核心部件,其性能直接影响列车的运行安全与稳定性。针对行车速度、静浮时间及户外环境温度等因素导致的线圈升温问题,以及由此引发的悬浮电磁铁过热、表面裂纹等安全隐患,本文设计并实现了一种非接触式无源超高频射频测温系统。通过试验验证,本系统能够对磁浮列车悬浮电磁铁温度进行实时监测与精确定位,且在稳定性、响应速度和抗干扰等方面均表现良好的性能。

关键词: 磁浮列车; 悬浮电磁铁; 非接触式; 测温

中图分类号: U266.4 文献标志码: A

Design of a Temperature Measurement System for Suspension Electromagnets in Maglev Trains

WANG Fubin

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

83

Abstract: As a core component of maglev trains, the performance of suspension electromagnets directly affects the operational safety and stability of the trains. To address the coil temperature rise caused by factors such as train speed, static levitation duration, and ambient outdoor temperature, as well as the resulting safety risks including overheating and surface cracks in suspension electromagnets, this paper designed and implemented a non-contact, passive ultra-high-frequency (UHF) radio-frequency temperature measurement system. Experimental results demonstrate that the system is capable of real-time monitoring and precise localization of the temperature of suspension electromagnets in maglev trains, exhibiting excellent performance in terms of stability, response speed, and anti-interference capabilities.

Key words: maglev trains; suspension electromagnet; non-contact; temperature measurement

悬浮电磁铁是磁浮列车实现悬浮运行的重要部件,其结构性能直接影响磁浮列车的运行安全^[1]。在磁场的作用下,悬浮电磁铁受到指向轨道方向的悬浮力,通过调节电磁铁的电流,控制轨道与电磁铁之间吸引力的强弱,从而实现列车的动态稳定悬浮,因此悬浮电磁铁是磁浮列车运行安全监测中的重要研究对象^[2]。

近年来,国内外针对磁浮列车运行安全监测的研

究相对较少,中车青岛四方高速磁浮试验中心研发并部署了一套适应高速磁浮运营场景的灾害监测与防护系统,该系统全面覆盖运行环境、基础设施及客运环境等多个维度的监测内容,初步实现对自然灾害与磁浮系统内外界环境的监测和预警^[3-4]。然而,值得注意的是,悬浮电磁铁温度作为影响列车安全运行的关键因素,目前相关研究尤为不足,亟需进一步深入探索。

悬浮电磁铁采用走行风冷却,行车速度、静浮时

收稿日期:2025-03-24

作者简介:王富斌(1993-),男,工程师。

引文格式:王富斌.磁浮列车悬浮电磁铁温度监测系统[J].高速铁路技术,2025,16(2):83-86.

WANG Fubin. Design of a Temperature Measurement System for Suspension Electromagnets in Maglev Trains[J]. High Speed Railway Technology, 2025, 16(2):83-86.

间、户外环境温度等对线圈温升均会产生不同的影响,其温度场变化规律非常复杂^[5],长期处于高温下易出现线圈内部绝缘老化加快、线圈表面产生热裂纹等问题,影响悬浮电磁铁整体绝缘性能和使用寿命^[6]。长沙磁浮快线在前期试验阶段,悬浮电磁铁线圈出现了表面裂纹、流胶甚至过热等故障现象,通过对电磁铁进行一系列实验分析,主要原因是电磁铁电流过高造成线圈温度升高,还受通风不良和环境温度太高等因素影响,长沙磁浮快线通过对电磁铁电流进行监控,间接掌控电磁铁内部温度变化并及时作出预警和保护措施,有效地预防了电磁铁的发热、裂纹及流胶等故障^[7]。文献[7]还提出了一种在电磁铁内部预埋温度传感器,直接对电磁铁温度进行实时监控、预警并记录的监测方案,但由于现有磁浮列车电磁铁处于完全封装状态,已无法对其开展温度传感器预埋工作。

国内外针对列车关键部件的温度监测均有相关研究成果,且技术较为成熟。在传统的轮轨式轨道交通系统,高速铁路列车上主要使用接触式车载轴温探测系统和非接触式红外轴温探测系统^[8-9]。但是,轮轨车辆现有的轨旁轴温探测设备无法直接用于磁浮列车电磁铁温度监测,原因在于高速磁浮列车的悬浮电磁铁位于悬浮架内部,非接触式的红外线无法直接照射到电磁铁;接触式的车载轴温探测系统需要复杂的供电及传输系统,在磁浮列车上不易实现。

因此,研究一种非接触式的无线无源测温系统,能够直观地掌握电磁铁温度变化从而及时作出应对措施,对预防电磁铁出现过热故障、保证列车悬浮稳定性具有重要意义。本文设计了一种非接触式的无源超高频射 UHF RFID 测温系统对高速磁浮列车悬浮电磁铁

温度进行监测和定位,并在中车青岛四方高速磁浮试验线上进行试验验证。

1 温度测量系统设计

1.1 UHF RFID 温度传感技术

无源超高频射频识别(UHF RFID)是一项利用射频信号耦合实现无接触信息传递,从而完成信息识别的技术,它具有通信速率快、阅读距离远、适应物体高速运动等优点^[10]。无源超高频射频识别技术与温度感知技术相结合形成 UHF RFID 感温标签,利用空间耦合电磁波的能量和信息,通过采集器和传感器之间的数据交换实现温度信息的读取和写入,具有无源无线测温、运维成本低、身份识别等优势,精度、误差、灵敏度等核心指标均经过第三方专业机构检测达到世界领先水平,可契合多种行业及场景应用。

1.2 电磁铁测温系统设计

本文采用 UHF RFID 感温标签开展磁浮列车悬浮电磁铁测温系统设计,在不影响悬浮电磁铁安全工作前提下,实现高速磁悬浮电磁铁温度无源无线实时监测,并在中车青岛四方高速磁浮试验线进行测试。

UHF RFID 感温标签基于特殊基材和天线进行设计,可以在包括金属表面在内的绝大多数应用场景下良好工作,并具有超过 220℃ 环境温度的耐温性能。将 UHF RFID 感温标签粘贴于悬浮电磁铁环氧层树脂表面,其标签内的温度传感芯片通过收集天线发射的电磁波能量工作,并以无线方式返回电磁铁的温度和身份标识信息至 UHF RFID 阅读器,最终将数据通过网管回传至中心设备。基于 UHF RFID 感温标签的测温系统如图 1 所示。

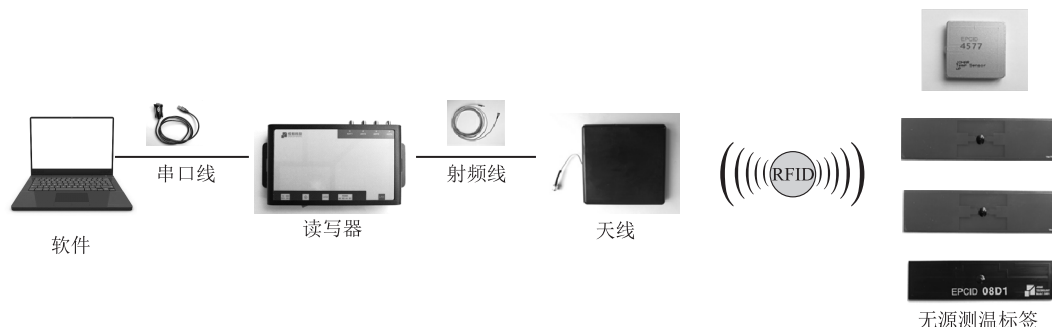


图1 基于UHF RFID感温标签的测温系统示意图

1.3 电磁铁测温系统特点

基于 UHF RFID 感温标签的测温系统在设计时充分考虑磁浮列车运行特点,结合监测系统功能、设备配置、系统独立性等需求,该系统的技术特点如下:

(1)无线测温:本方案将 UHF RFID 感温标签粘贴

于悬浮电磁铁环氧层树脂表面,在不影响列车运行及悬浮电磁铁安全工作的前提下,通过无线传输方式将电磁铁温度数据返回接收装置。

(2)无源标签:UHF RFID 感温标签内置无源低功耗温湿度传感芯片,芯片利用先进的超高频无线电波

能量收集技术获取 UHF RFID 电磁波获得能量,并将测量的温度信息、固有的用户信息等数据通过空口进行反馈。

(3) 身份识别:每块悬浮电磁铁对应粘贴 1 个 UHF RFID 感温标签,可提前将悬浮电磁铁的编号信息写入对应的 UHF RFID 感温标签,作为电磁铁的唯一身份标识。

2 电磁铁测温试验

2.1 传感器安装

感温标签:在布设标签之前对悬浮电磁铁进行依次编号,将编号后的身份标识信息提前写入对应的 UHF RFID 感温标签。每个悬浮电磁铁对应粘贴 1 个 UHF RFID 感温标签,为增强信号接收,在标签背面附加锡箔纸。

天线:选择测试点位置安装天线,天线可安装在轨道梁壁上,安装高度与悬浮电磁铁平行,且无遮挡不影响信号传输。

2.2 数据传输

本系统工作频段为 860 ~ 960 MHz, UHF RFID 传感标签内置无源低功耗温度传感芯片,芯片利用先进的超高频无线电波能量收集技术获取 RF 电磁波获得能量,并将测量的温度信息、固有的用户信息等数据通过空口进行反馈。

当磁浮列车行驶经过测试点时,天线接收到 UHF

RFID 传感标签回传的信号后通过射频线连入读写器,最后通过 RS-485 协议连接网关,再通过通信专网将数据回传至中心系统。测量的数据包括时间信息、UHF RFID 传感标签标识信息(对应电磁铁编号)、温度信息等。天线安装示意如图 2 所示。

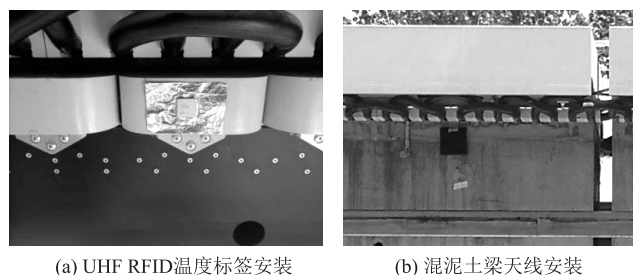


图2 天线安装示意图

2.3 测温标签性能测试

本系统选取了 5 种不同类型的感温标签读取温度,在开展试验之前,试验人员动态调整标签与天线之间的距离,获得各类标签的信号最大接收距离,如表 1 所示。当距离超过 3 m 时,系统仅能接收到方形陶瓷标签发送的温度数据,而其余 4 种标签处于信号无连接状态,超过射频信号接收范围。因此,由于试验场景限制和磁悬浮列车运行安全考虑,天线与标签安装位置较远,仅方形陶瓷标签在此距离下可以成功连接,因此,本系统采用方形陶瓷标签测试悬浮列车在试验线静浮和运行工况下的电磁铁温度。

表1 传输距离试验数据表

标签类型	陶瓷标签	陶瓷标签	PCB 标签	PCB 标签	陶瓷标签
尺寸/mm	13 × 9 × 5	21 × 17 × 2	84 × 22 × 2	100 × 27 × 1	30 × 30 × 5
最大距离	30 cm	30 cm	1.5 m	1.5 m	> 3 m
标签图片					

2.4 现场试验

静浮工况:磁悬浮车辆在试验线静止悬浮约 30 min,获取静浮工况下起始温度为 21.26 ℃,最高温度为 49.08 ℃,悬浮停止后温度保持稳步缓慢下降,如图 3 所示。本系统在监测过程中的数据采集频率为 5 次/s 且未出现数据丢失情况,表明本系统运行稳定、反应灵敏且能够抵抗列车及环境中的信号干扰。此外,测试过程中同步使用手持热成像测温仪直接照射悬浮电磁铁获取其温度数据作为对比,4 次温度数据的均差为 1.8 ℃,相对较小。

运行工况:天线固定在轨道梁壁上,在试验过程中磁悬浮列车共运行经过天线位置 4 次,获取悬浮电磁

铁的温度数据分别是 25.21 ℃、34.50 ℃、40.11 ℃、42.11 ℃,表明本系统在动态检测中响应速度灵敏且数据回传稳定。由于列车运行时出于安全考虑,无法采用手持热成像测温仪直接采集悬浮电磁铁温度,因此未做数据对比。

3 结论

针对磁浮列车悬浮电磁铁因温升引发的过热及表面裂纹等问题,本文设计了一种基于无源超高频射频识别(UHF RFID)技术的非接触式测温系统。试验结果表明,该系统能够实现对悬浮电磁铁温度的稳定监测与精确定位,且响应速度灵敏、抗干扰能力强,为磁

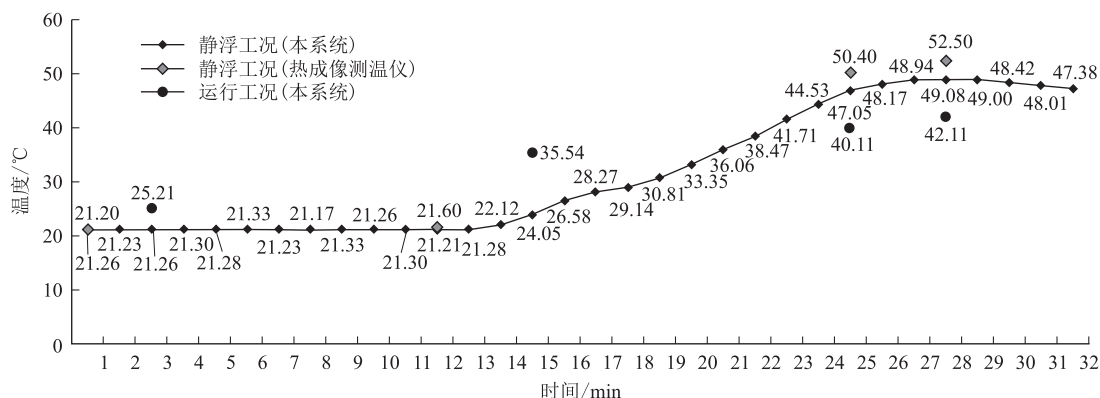


图3 静浮工况和运行工况下的悬浮电磁铁温度图

浮列车悬浮电磁铁的温度状态监测以及后续预防应对提供了一种稳定便捷的技术解决方案。

参考文献:

- [1] 薛齐豪, 刘放, 梁成, 等. 磁悬浮列车悬浮电磁铁结构优化方法研究[J]. 机械设计与制造, 2020(5): 202-205.
XUE Qihao, LIU Fang, LIANG Cheng, et al. Research on Suspension Electromagnet Structure and Optimization Method[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(5): 202-205.
- [2] 周磊, 肖绯雄. 长定子中低速磁浮轨道动力学分析与结构优化[J]. 机械设计与制造, 2013(1): 107-109.
ZHOU Lei, XIAO Feixiong. Dynamic Analysis and Structure Optimization of Long Stator of Medium and Low Speed Maglev Track[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(1): 107-109.
- [3] 侯圣杰, 刘先恺, 汤凯谊, 等. 高速磁浮交通环境与灾害监测预警系统方案研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(1): 7-11, 38.
HOU Shengjie, LIU Xiankai, TANG Kaiyi, et al. Study on Plan of High-speed Maglev Traffic Environment and Disaster Monitoring and Early Warning System[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(1): 7-11, 38.
- [4] 孟占国, 李云峰, 滕辉, 等. 高速磁浮灾害防护系统研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(6): 34-39.
MENG Zhanguo, LI Yunfeng, TENG Hui, et al. Research on High-speed Maglev Disaster Prevention System[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(6): 34-39.
- [5] 刘少克. 磁悬浮列车用混合悬浮电磁铁温度场建模与仿真[J]. 机车电传动, 2011(6): 32-34.
LIU Shaoke. Modeling and Simulation of Temperature Field for Mixing Suspension Electromagnet of Maglev Train[J]. Electric Drive for Locomotives, 2011(6): 32-34.
- [6] 佟来生, 李海涛, 张文跃, 等. 磁浮列车悬浮电磁铁温度场分析与散热优化研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2022, 45(4): 13-18, 24.
TONG Laisheng, LI Haitao, ZHANG Wenyue, et al. Temperature Field Analysis and Heat Dissipation Optimization of Suspension Electromagnet for Maglev Train[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2022, 45(4): 13-18, 24.
- [7] 黄海涛, 李志国. 长沙磁浮列车电磁铁的应用研究[J]. 技术与市场, 2021, 28(1): 39-40.
HUANG Haitao, LI Zhiguo. Study on Application of Electromagnet in Changsha Maglev Train[J]. Technology and Market, 2021, 28(1): 39-40.
- [8] 顾晓辉, 杨绍普, 刘文朋, 等. 高速列车轴箱轴承健康监测与故障诊断研究综述[J]. 力学学报, 2022, 54(7): 1780-1796.
GU Xiaohui, YANG Shaopu, LIU Wenpeng, et al. Review of Health Monitoring and Fault Diagnosis of Axle-box Bearing of High-speed Train[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(7): 1780-1796.
- [9] 韩志远, 盖建宝, 李晓锋, 等. 动车组轴温报警故障分析及优化[J]. 中国铁路, 2023(10): 39-44.
HAN Zhiyuan, GAI Jianbao, LI Xiaofeng, et al. Fault Analysis and Optimization of EMU Axle Temperature Alarm[J]. China Railway, 2023(10): 39-44.
- [10] 李润德. 超低功耗无源超高频射频识别芯片射频/模拟前端设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
LI Runde. Design of RF/analog Front-end of Ultra-low Power Passive UHF RFID Chip[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.