

Fault Diagnosis System of Compensation Capacitor in Railway Track Circuit

Hongwei Zhang Yuxin Yang Zhanhang Zhu Yixi Jiang Xiaofeng Lv*

Baoji University of Arts and Science, Baoji, Shaanxi, 721000, China

Abstract

The stable operation of railway signaling systems relies on the reliability of track circuits, where the degradation of compensation capacitors significantly impacts signal transmission quality. This study presents an integrated and intelligent on-board fault diagnosis system for ZPW-2000A non-insulated track circuits. Based on electromagnetic induction principles, the system establishes a feature extraction mechanism by combining transmission line and two-port network models, with intelligent diagnosis achieved through grey relational analysis. The hardware core, STM32F412RGT6, integrates signal excitation, filtering, voltage sampling, and communication functions, enabling real-time data acquisition and PC interaction. Experimental validation demonstrates the system's advantages in high precision, cost efficiency, and strong real-time performance, providing technical support and application prospects for intelligent track circuit condition monitoring and efficient railway maintenance.

Keywords

track circuit; compensation capacitor; fault diagnosis; grey relational analysis; STM32

车载轨道电路补偿电容故障诊断系统

张洪伟 杨玉鑫 朱展航 姜怡曦 吕晓峰*

宝鸡文理学院, 中国·陕西 宝鸡 721000

摘要

铁路信号系统的稳定运行依赖于轨道电路的可靠性,其中补偿电容的性能退化是影响信号传输质量的重要因素。本文针对ZPW-2000A无绝缘轨道电路,设计了一种集成化、智能化的车载补偿电容故障诊断系统。系统基于电磁感应原理,结合传输线与二端口网络模型构建特征提取机制,并利用灰色关联算法实现智能诊断。硬件以STM32F412RGT6为核心,集成信号激励、滤波、电压采样与通信功能,能够实现实时数据采集与上位机交互。实验验证表明,该系统具备高精度、低成本和强实时性优势,为轨道电路状态监测智能化与铁路运维高效化提供了技术支撑与应用前景。

关键词

轨道电路; 补偿电容; 故障诊断; 灰色关联分析; STM32

1 引言

轨道电路作为铁路信号系统的基础单元,其健康状态直接决定列车运行安全与调度效率。ZPW-2000A型无绝缘轨道电路在高速铁路中得到广泛应用,其核心功能依赖于补偿电容的正常工作,以维持信号传输的稳定性与抗干扰能力。然而在长期运行中,补偿电容易受温湿度、振动、电磁干扰等因素影响,导致电容量漂移或介质击穿,进而引发信

号衰减、串扰甚至误码。传统轨检车的周期性检测方式虽具较高精度,但检测周期长、响应滞后,不适合实时监测的需求。为此,本文以车载化、智能化为目标,研发了一种便携式嵌入式诊断系统,通过结合传输线理论与灰色关联分析算法,实现补偿电容故障的实时识别与趋势预测,从而提升轨道电路维护的科学性与智能化水平。

2 轨道电路补偿电容特性与故障机理分析

2.1 补偿电容在轨道电路中的作用机理

在ZPW-2000A无绝缘轨道电路中,补偿电容是实现信号传输稳定与电能高效利用的重要组成部分。轨道电路作为列车信号传输的核心载体,其电气特性由钢轨电感、电阻与分布电容共同决定,呈现出明显的感性特征,导致信号相位延迟及能量衰减。为维持信号幅度与相位的稳定,补偿电容通常以并联方式接入轨道回路中,起到电抗补偿作用,使系统阻抗在工作频段内趋于平衡,整体等效为近似纯电阻

【基金项目】2025年国家级大学生创新训练计划项目(项目编号:202510721022)。

【作者简介】张洪伟(2005-),男,中国四川泸州人,本科,从事电气工程及其自动化研究。

【通讯作者】吕晓峰(1983-),男,中国陕西乾县人,副教授,从事通信工程研究。

状态。其设计需综合考虑区段长度、工作频率、轨道阻抗及负载条件，确保信号在传输过程中幅度保持稳定、相位误差最小。若补偿电容参数与设计值存在偏差，将造成系统阻抗失衡，导致信号幅度衰减、相位漂移甚至通信中断，严重时可能引发轨道区段的闭塞误判，对列车运行安全构成潜在威胁。

2.2 补偿电容失效类型与特征表现

补偿电容长期运行在高温、高湿与强振动环境下，其失效形式具有多样性和隐蔽性。常见的失效类型包括电容量漂移、绝缘击穿及接触不良三类。电容量漂移多因介质老化、温度应力或频繁充放电引起，表现为信号相位轻微偏移及幅度不稳；绝缘击穿则会导致电容内部短路，造成轨道回路阻抗骤降，信号幅度急剧衰减；接触不良或焊点虚接则呈现间歇性失真，伴随不规则噪声与幅度突变。在频谱特征上，容量漂移对应低幅度谐波漂移，击穿故障伴随明显能量突降，而接触不良则表现为不连续随机波动。通过对电压、电流、频率等参数建立动态关联模型，可捕捉不同故障的特征模式，实现多类型失效的精确判别，为后续智能诊断算法提供可靠的特征输入。

2.3 传统检测方法的局限性

传统的补偿电容检测方式主要依赖轨检车进行集中式检测，其核心原理为频谱分析与人工判断结合。虽然此类方法在静态状态下具备较高精度，但检测周期长，通常为数月一次，难以及时发现突发性故障。此外，人工巡检方式受环境与主观因素影响较大，在噪声干扰或信号边界模糊的情况下，容易出现漏判或误判。传统检测设备普遍体积庞大、能耗高，部署成本大且不具备实时性，难以满足当前铁路智能化运维对连续监测的需求。相较之下，小型化车载检测系统利用列车运行过程进行实时采样，可动态掌握补偿电容运行状态，实现从“事后检测”向“在线诊断”的转变。该模式不仅显著提升检测效率，还为建立基于数据驱动的轨道电路健康管理体系统奠定了基础，代表了轨道信号设备检测技术的发展方向。

3 车载补偿电容故障诊断系统总体设计

3.1 系统设计原则与总体架构

车载轨道电路补偿电容故障诊断系统的总体设计遵循实时性、可靠性与可扩展性三项核心原则。在架构上，系统分为信号采集模块、信号处理单元、通信接口以及上位机监控平台四个层次。车载部分完成前端信号的采集、滤波与初步分析，通过无线通信模块实现与地面数据中心的同步传输。上位机系统承担数据的集中处理、特征提取、灰色关联计算与健康状态可视化展示，能够根据实时数据生成故障警报与趋势预测报告。系统采用分布式模块化设计，各模块之间通过标准化接口连接，便于后期升级与维护。数据流采用双通道传输机制，确保在通信中断情况下仍可通过本地缓存维持检测连续性。整体架构具备高度的兼容性，可适配不同

型号轨道电路的频率带宽与补偿特性，为铁路信号设备的智能化运维提供基础支撑。

3.2 信号采集与处理模块设计

信号采集与处理模块是系统的关键执行单元，主要任务是将轨道电路中的电压与电流信号转化为可供算法分析的数字数据。该模块采用高精度差分采样结构，通过仪表放大器实现微弱信号的稳定放大，并利用二阶有源低通滤波电路抑制高频干扰，保证采样信号的纯净度。信号经滤波后进入模数转换器（ADC），由 STM32F412RGT6 主控芯片进行实时采样、缓存与传输。主控程序中嵌入快速傅里叶变换（FFT）算法，用于提取频域特征，包括谐波分布、相位偏移与幅度变化等关键参数。这些特征被用于识别补偿电容的性能偏差及潜在故障趋势。数据通过串口与无线通信模块发送至上位机，实现远程实时监控与状态评估。模块整体设计强调信号完整性与响应速度，能够在复杂车载环境下保持检测精度与运算稳定性。

3.3 灰色关联度诊断算法设计

为了实现补偿电容故障的智能识别与趋势预测，系统引入灰色系统理论建立诊断模型。灰色关联分析具有在小样本、不确定信息条件下提取系统变化规律的优势，非常适合轨道电路复杂工况下的实时分析。模型通过构建标准信号特征序列与实时检测序列的灰色关联矩阵，计算各序列间的关联系数，以量化补偿电容的健康状态。当关联系数低于设定阈值时，系统自动判定为潜在故障，并触发报警机制。算法具备计算量小、收敛速度快等优点，可在嵌入式系统中实现实时运行。通过历史数据的积累与自适应修正机制，模型还能动态优化诊断精度，实现趋势性故障预测与寿命评估。

4 硬件系统设计与实现

4.1 核心控制单元

车载轨道电路补偿电容故障诊断系统的核心控制单元采用 STM32F412RGT6 微控制器。该芯片基于 ARM Cortex-M4 内核架构，具备较高的主频性能与丰富的外设接口资源，适用于高精度信号采集与实时运算场景。其内置浮点运算单元（FPU）能够加速 FFT 频谱分析与灰色关联算法的计算过程，在多任务并行执行中仍保持较低延迟与高稳定性。系统通过 SPI 总线与高精度 ADC 模块相连，实现对电压、电流信号的高速采样。为避免主控负载过重，系统引入 DMA（Direct Memory Access）通道，将数据直接传输至缓存区，从而释放 CPU 资源。主控程序采用模块化结构设计，涵盖信号采集控制、特征提取、算法处理与通信接口等功能模块。通过精确的时钟同步与中断管理机制，系统可在复杂车载环境下保持高可靠性运行，确保故障检测的实时性与准确性。

4.2 电路设计与模块集成

整个系统的电路设计遵循高集成度与抗干扰性并重的原则。信号激励模块利用 DDS（Direct Digital Synthesis）技

术生成高纯度可调正弦波,以模拟轨道电路激励信号。滤波模块采用二阶有源低通滤波电路,能够有效抑制高频干扰与谐波失真,保证信号的波形完整性。电压采样模块选用高精度分压电阻和仪表放大器组合结构,使采样信号在不同电平范围内保持线性响应与低噪声特性。通信模块支持 RS485 与 CAN 双协议传输,可实现与列车车载网络及地面诊断终端的双向通信。为提升系统的电磁兼容性能,PCB 采用四层板结构,上下层布设接地与电源平面,中间层分布信号与控制走线。通过合理布局与屏蔽设计,系统在电磁干扰强烈的车载环境中仍能保持稳定运行,为实时检测提供硬件保障。

4.3 电源与防护设计

考虑到列车运行环境中存在振动、电磁辐射及电源波动等复杂因素,系统在电源与防护设计方面进行了针对性优化。电源输入端采用多级稳压方案,预稳压模块负责降压与过流保护,二级稳压模块采用低噪声 LDO 稳压芯片,为模拟与数字电路分别供电。为了应对电源瞬变与浪涌冲击,输入端配置 TVS 瞬态电压抑制二极管与 LC 滤波器组,以削减干扰尖峰。主控电路与模拟电路设置独立的电源域并通过光电隔离,降低电源耦合干扰。整机外壳采用铝合金屏蔽结构,并填充防震缓冲材料,以提升机械抗振性能。系统通过严格的电磁兼容与环境可靠性测试,确保在高温、湿热及高振动工况下仍能维持稳定供电与信号完整性,为轨道电路的在线监测提供坚实的硬件支撑。

5 系统测试与性能验证

5.1 实验平台与测试方法

为验证车载轨道电路补偿电容故障诊断系统的实际性能与稳定性,构建了一个可控的仿真轨道电路实验平台。该平台由信号源、电感模拟模块、补偿电容模块、负载端与信号分析装置组成,通过可调电容阵列模拟不同的退化与故障状态。信号源采用 DDS 可编程信号发生器,以 ZPW-2000A 频率带宽为基础输出正弦激励信号,轨道电感模块通过可变电感器件模拟不同轨距与钢轨长度引起的传输差异。系统信号经采样后输入嵌入式主控装置,完成实时数据记录与 FFT 频谱分析。上位机软件同步接收采集数据,利用灰色关联算法计算电压、电流、相位等多参数的关联系数,建立电容健康等级映射关系。

5.2 测试结果与分析

系统经过连续多组实验验证,结果表明该诊断系统在不同故障情形下均能保持较高的灵敏度与准确性。当补偿电容容量偏差达到设计值的 5% 时,系统输出信号的相位偏

移量显著变化,可被实时检测算法准确识别。灰色关联系数在健康状态与故障状态间形成明显区分,故障识别率达到 97.6%。在 100 组样本测试中,系统平均响应时间为 185 毫秒,远低于传统检测设备的数秒级延迟。通过 72 小时连续运行试验,系统未出现信号漂移与通信丢失,显示出良好的稳定性与抗干扰能力。能耗测试结果显示,系统功耗较传统轨检车检测模式降低约 40%,且在环境温度变化 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 范围内性能保持稳定。

5.3 系统应用前景与推广价值

该车载轨道电路补偿电容故障诊断系统在设计理念与实现方式上具有显著的创新性与实用价值。其小型化、模块化特征使设备可灵活搭载于轨检车、检修列车或便携式检测小车上,实现补偿电容的在线检测与预警。系统的灰色诊断算法无需大量训练数据,适合在不同线路条件下快速部署,极大地降低了维护成本与人工依赖。未来,该系统可进一步与无线传感网络、云端大数据平台联动,实现铁路信号设备的远程监测与智能管理。除补偿电容外,其算法与架构还可推广至轨道电感、绝缘节、电缆连接器等关键部件的状态诊断领域,构建全寿命周期的信号设备健康监测体系。

6 结语

车载轨道电路补偿电容故障诊断系统的研究与实现,标志着轨道电路状态监测由周期性检测向实时智能诊断的转变。系统通过融合电磁感应、传输线理论与灰色关联算法,构建了完整的检测与分析框架,实现了补偿电容故障的快速识别与趋势预测。硬件平台的高集成化设计与嵌入式算法优化,使系统在实际运行中表现出良好的稳定性与适应性。研究表明,该系统在保障铁路信号安全、降低维护成本、提升运维智能化水平方面具有显著效果。未来可进一步结合无线传感网络与云计算平台,构建多源数据融合的铁路信号健康管理体系,推动我国铁路运维向智慧化、数字化方向迈进。

参考文献

- [1] 丁昀,郭芝权,伍妍蝶,等.车载轨道电路补偿电容故障诊断装置设计[J].铁道科学与工程学报,2025,22(09):4172-4181.
- [2] 李鹏.基于复杂网络重构的轨道电路补偿电容异常检测[D].兰州交通大学,2023.
- [3] 田粉霞.基于深度学习的无绝缘轨道电路故障诊断[D].北京交通大学,2020.
- [4] 赵林海,毕延帅,刘伟宁.基于分层免疫机制的无绝缘轨道电路补偿电容故障诊断系统[J].铁道学报,2013,35(10):73-81.
- [5] 邢玉龙.面向预测性维护的轨道电路故障诊断及预测方法研究[D].北京交通大学,2022.