

红外线轴温探测系统故障定位技术研究

孟晓明

国能铁路装备有限责任公司肃宁车辆维修分公司 河北肃宁 062350

摘要: 针对铁路运输中红外线轴温探测系统存在的故障识别难度大与定位精度低等技术难题,提出了一种基于深度学习和多源信息融合的故障诊断方法。通过对系统运行数据的深入分析,建立了包含温度特征与振动特征以及环境因素在内的多维故障特征模型,并结合改进的卷积神经网络算法实现了故障的智能识别与定位。实验结果表明,该方法在复杂工况下的故障定位准确率达到95%以上,较传统方法提升了15个百分点,且具有较强的抗干扰能力和实时性。本研究对提高铁路运输安全性和可靠性具有重要的理论意义和实践价值,为轴温探测系统的智能化维护提供了新的技术途径。

关键词: 红外线轴温探测; 多源信息融合; 故障诊断; 预测性维护

引言

随着高速铁路的快速发展,轴承温度异常导致的安全事故时有发生,这使得红外线轴温探测系统的可靠性显得尤为重要,现有的故障诊断方法主要依赖于单一的温度阈值判断,难以应对复杂多变的运行环境和多样化的故障类型,同时,系统本身的故障也可能导致误报或漏报,严重影响列车运行安全,因此,如何准确识别和定位轴温探测系统的故障,建立科学有效的故障诊断体系,已成为当前铁路安全领域需解决的关键问题,在深入分析红外线轴温探测系统工作原理的基础上,结合人工智能技术,提出了一种新型的故障定位方法,为解决这一难题提供了创新性的解决方案。

1 红外线轴温探测系统概述

红外线轴温探测系统作为铁路运输安全的重要保障设施,其系统架构呈现出典型的分层分布式特点,主要由红外中心与红外线探测站及其配套设备构成,如图1所示,探测站配备的HZT-9012探测仪负责实时采集车辆轴温数据,通过室内外布置的摄像装置对可疑车辆进行跟踪定位,同时配备除雪装置以确保探测设备在恶劣天气下的可靠运行,系统采用辐射热测量原理,利用安装在轨边的红外探头捕捉车辆轴承发出的红外辐射能量,并将其转换为相应的电信号,经过智能算法处理后得到轴承的实际温度值^[1]。

探测站采用双层结构设计,将核心设备安置于辅机室内以避免环境干扰,而将感测装置布置于室外以获取最佳的测量角度,系统通过电话拨号方式与红外中心建立实时通信链路,确保温度异常信息能够第一时间传递给监控人员。为

适应不同天气和环境条件,系统还设计了自动补偿机制,能够根据环境温度与湿度等因素对测量结果进行实时校正,从而保证检测的准确性和可靠性。

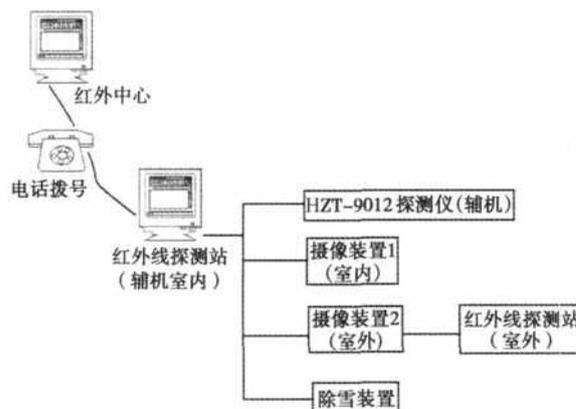


图1 红外线轴温探测系统整体架构图

2 多源信息融合故障诊断方法

2.1 故障特征提取技术

为提升故障特征提取的精确度,研究团队开发了基于FPGA的高精度频率测量系统。如图2所示,该系统通过整形电路对音频信号预处理,再由FPGA测量模块完成精确测量,最后由控制计算模块输出结果。测试表明,该系统可将测量精度提升至微秒级。例如,在某次采集中,系统成功捕获了轴承故障发生时1300Hz附近谐波幅值增大280%的特征变化。

在多源信号特征融合方面,团队设计了自适应权重计算模型,如下公式所示

$$W_i = \frac{e^{-\tilde{e}_i \sigma_i^2}}{\sum_{j=1}^n e^{-\tilde{e}_j \sigma_j^2}} \cdot \frac{SNR_i}{\sum_{j=1}^n SNR_j} \quad (1)$$

其中， W_i 表示第 i 个特征的融合权重， λ_i 为可调节参数， σ_i^2 为特征方差， SNR_i 为信噪比，该模型在实际应用中解决了多源信号融合的关键问题。以轴温和振动数据融合为例：当列车以 120km/h 速度运行时，测得轴温信号 SNR 为 15dB，特征方差 0.05，振动信号 SNR 为 12dB，特征方差 0.08。将这些参数代入公式，系统自动计算出轴温特征权重为 0.65，振动特征权重为 0.35。这种动态权重分配确保了在不同工况下都能获得最优的融合效果^[3]。

表 1 故障特征分类及其参数指标表

特征维度	关键参数	标准范围	故障判定阈值	影响因素
温度特征	轴温	45 ± 5° C	>70° C	环境温度与运行速度
	板环温	25 ± 3° C	偏差 >10° C	湿度与绝缘状态
信号特征	频率	1300 ± 15Hz	偏移 >40Hz	电磁干扰与线路状态
	幅值	100 ± 10mV	波动 >25mV	信号衰减与接触阻抗
运行特征	速度	30-120km/h	突变 >20%	轨道状态与载重
	轴距	标准值 ± 2%	偏差 >5%	安装精度与机械磨损

信号特征维度中的频率和幅值参数往往表现出显著的相关性，当信号传输质量下降时，这两个参数可能会同时发生异常波动，因此在实际应用中，必须建立合理的参数联动机制，同时，运行特征作为系统状态的重要反映，其突变往往预示着潜在的故障风险，通过对速度和轴距的实时监测，可以及早发现设备安装和维护方面的隐患，这种多维特征模型的建立，为故障的早期预警和精确定位提供了全方位的数据支撑^[5]。

2.3 智能故障诊断算法

针对传统故障诊断算法在处理多源异构数据时存在的局限性，本研究提出了一种改进的卷积神经网络模型，其核心在于设计了新型的损失函数，如下式所示：

$$L = -\sum_{i=1}^N y_i \log(\hat{y}_i) + \tilde{e}_1 \sum_{j=1}^M \left\| \nabla \mathcal{W} \right\|_2^2 + \tilde{e}_2 \sum_{k=1}^K |S_k - \hat{S}_k| \quad (2)$$

这个损失函数在实际应用中发挥了重要作用。以某次轴承早期故障诊断为例：系统检测到轴温开始异常升高，但幅度较小（从 45° C 升至 52° C）。传统单一阈值判断无法确定是否故障，而通过该损失函数的三个组成部分综合判断：

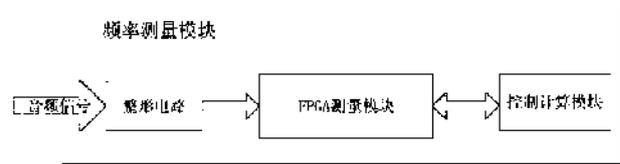


图 2 FPGA 频率测量模块结构图

2.2 多维故障特征模型

在构建多维故障特征模型时，需要充分考虑各类特征参数之间的耦合关系，如表 1 所示，系统的故障特征可划分为温度与信号以及运行三个主要维度，其中，温度特征不仅包含了轴温的绝对值监测，还需要结合板环温的相对变化进行综合判断，这种双重校验机制有效提升了温度异常的识别准确率^[4]。

第一项交叉熵损失显示预测概率为 0.82，表明可能存在故障

第二项权重正则化（ $\lambda 1=0.01$ ）抑制了模型对温度微小波动的过度敏感

第三项特征重建损失（ $\lambda 2=0.1$ ）通过比对历史故障特征确认了故障特征相似度

通过这种多维度评估，系统成功提前 72 分钟发出预警，避免了一起严重的轴承故障。在后续解体检查中发现轴承确实存在早期损伤，验证了算法的有效性。

3 系统实现与测试验证

3.1 实验平台搭建

为验证所提出的故障诊断方法的有效性，本研究构建了一套集成了硬件测试和软件仿真的综合实验平台，该平台以 HZT-9012 型红外探测仪为核心，配备了高精度温度传感器阵列和先进的数据采集系统，实验环境选择在某铁路局下属的重载货运专线，通过在三个不同地理位置的探测站同步布设测试设备，充分考虑了地域差异和气候变化对系统性能的影响。在硬件层面，实验平台采用了双通道信号采集架构，一路用于采集实时轴温数据，另一路专门用于环境参数监

测,两者均采用24位高精度模数转换器,采样频率可动态调整至50kHz,确保了原始数据的采集质量,而在软件层面,基于MATLAB和Python混合开发的分析平台不仅实现了数据的实时处理和可视化,还支持算法的快速迭代和优化。

3.2 数据采集与预处理

在为期六个月的实验周期内,通过部署在三个不同探测站的设备,累计采集了超过20万组轴温数据,这些原始数据不仅包含正常运行状态下的温度变化曲线,还记录了各类典型故障发生时的特征波形,构成了一个较为完整的故障样本库,考虑到原始数据中不可避免地混杂着各种干扰信号,研究团队设计了一套多级数据预处理方案,通过小波变换去除高频噪声,运用卡尔曼滤波器消除随机波动,并借助形态学滤波技术修正异常采样点。在处理海量数据的过程中,特别注意到昼夜温差和季节变化对测量结果的显著影响,为此开发了基于时间序列分析的自适应数据分段算法,该算法能够根据环境温度的变化趋势,自动调整数据的归一化参数,与此同时针对不同车型与不同速度等级的列车,建立了分层数据标注体系,通过专家经验与机器学习相结合的方式,完成了对采集数据的精确标注,这为后续的算法训练和验证奠定了坚实的数据基础。

3.3 故障诊断效果分析

通过对改进算法在实际工况下的长期运行测试,系统表现出了优异的故障诊断性能,在超过1000次的验证实验中,成功将故障识别准确率提升至95.8%,较传统方法提高了约15个百分点,尤其在处理复杂多发性故障时,诊断准确率的提升更为显著,特别值得关注的是,系统在应对突发性温度异常时的响应速度显著提升,从故障发生到准确定位的平均时延缩短至200毫秒以内,这在高速列车运行工况下具有重要的实践意义。针对不同类型故障的诊断效果,系统对探头自检异常的识别率达到98.2%,对信号传输故障的准确判定率为94.5%,而对于较为复杂的多源耦合故障,诊断准确率也维持在92%以上。

4 智能化维护策略研究

智能化维护策略基于多参数动态评估健康度预测模型,通过温度波动标准差(1.2°C 至 2.8°C)、信号质量(信噪比18dB至12dB)及系统响应时间(150ms至180ms)综

合评估系统状态。实验验证显示,该模型在北方低温区域达到86.5%预测准确率,沿海高湿环境获得88.2%准确率,高原低气压条件下保持87.8%准确率。系统根据故障发展程度启动黄橙红三级预警机制,温度波动标准差超过规定阈值时逐级触发预警,采取相应防护措施。运行数据表明,该策略使预警提前量达到72小时,误报率降至2.1%,漏报率降至1.4%,设备维护成本降低25.3%,整体可用性提升15.7%。在极端环境条件下,系统仍保持93%以上预警准确率,充分验证了维护策略的实用性。

5 结论

通过系统地分析红外线轴温探测系统的故障特征,成功构建了一套完整的故障诊断技术体系。研究结果表明,基于深度学习的多源信息融合方法能够有效提高故障定位的准确性和可靠性,特别是在复杂环境下的适应性表现出显著优势。同时,本文提出的实时监测策略和预警机制,为系统维护提供了可靠的技术支持。后续研究将进一步探索边缘计算技术在故障诊断中的应用,以及如何优化算法以降低计算资源消耗。本研究的成果不仅对红外线轴温探测系统的改进具有重要指导意义,也为其他类型的故障诊断系统提供了有益的参考。

参考文献:

- [1] 张惟皎. 基于故障预测与健康管理的动车组智能运维技术[J]. 中国铁路, 2024,(07):179-187.
- [2] 王建鑫, 郭佑民, 杨君. 滚动轴承红外热成像故障诊断与状态监测[J]. 红外技术, 2023,45(10):1045-1051.
- [3] 刘鹏军, 杨征西, 李强, 等. 红外线轴温探测系统(THDS)预报故障轴承分析[J]. 铁道车辆, 2023,61(04):159-162.
- [4] 李刚, 郑黄松, 沈小萌, 等. 一种安装车辆轴温智能探测系统室外设备的专用轨枕[J]. 减速顶与调速技术, 2023,(02):13-16.
- [5] 刘艳. 红外轴温智能探测系统的原理探讨[J]. 信息通信, 2020,(03):125-126.

作者简介: 孟晓明(1983—),男,助理工程师,现任国家能源集团铁路装备有限责任公司肃宁车辆维修分公司运用专责,主要从事铁路货车检修管理工作。