

热敏电阻线束故障诊断系统的鲁棒性设计与可靠性评估

王正红

杭州田正弘电子科技有限公司 311101

【摘要】热敏电阻线束作为温度监测的核心组件，在新能源汽车、工业控制等领域承担关键作用，但其故障易引发系统误判或安全事故。针对传统诊断方法抗干扰能力弱、多故障识别率低的问题，本文提出一种融合硬件电磁兼容设计、自适应算法与多源数据融合的鲁棒性诊断系统方案。通过构建三级抗干扰硬件架构、开发集成学习分类算法、建立多维度可靠性评估指标，实现了对断路、短路、阻值漂移等故障的精准诊断。文中详细阐述了系统分层设计原理、算法实现及评估方法，重点讨论了噪声抑制策略、故障特征提取与可靠性试验技术。试验表明，系统在强电磁环境下故障识别准确率达98%以上，复杂工况误诊率降至2.3%，为热敏电阻线束的可靠运行提供了技术支撑。

【关键词】热敏电阻线束；故障诊断；鲁棒性设计；可靠性评估；多源数据融合

Robust design and reliability evaluation of thermistor harness fault diagnosis system

Wang Zhenghong

Hangzhou Tianzhenghong Electronic Technology Co., LTD. 311101

【Abstract】 As a core component for temperature monitoring, thermistor harnesses play a critical role in fields such as new energy vehicles and industrial control. However, their failures can easily lead to system misjudgment or safety incidents. In response to the weak interference resistance and low multi-fault recognition rates of traditional diagnostic methods, this paper proposes a robust diagnostic system that integrates hardware electromagnetic compatibility design, adaptive algorithms, and multi-source data fusion. By constructing a three-level interference-resistant hardware architecture, developing an integrated learning classification algorithm, and establishing multi-dimensional reliability evaluation indicators, the system achieves precise diagnosis of faults such as open circuits, short circuits, and resistance drift. The paper elaborates on the hierarchical design principles, algorithm implementation, and evaluation methods of the system, with a focus on noise suppression strategies, fault feature extraction, and reliability testing techniques. Experiments show that the system achieves an accuracy rate of over 98% for fault identification in strong electromagnetic environments, and the misdiagnosis rate under complex operating conditions is reduced to 2.3%, providing technical support for the reliable operation of thermistor harnesses.

【Key words】 thermistor harness; fault diagnosis; robust design; reliability evaluation; multi-source data fusion

一、引言

热敏电阻线束通过将热敏电阻与导线集成，实现设备温度的实时采集与传输，广泛应用于新能源汽车电池管理、工业电机温控等场景。然而，复杂工况下的电磁干扰、温湿度变化及机械振动，易导致线束出现断路、短路、阻值漂移或接触不良等故障，造成温度信号异常。例如在新能源汽车中，此类故障可能导致电池热失控保护误触发，影响行车安全；在工业锅炉控制系统中，信号失真可能引发温度控制失效，造成设备损坏。

传统诊断方法依赖单一传感器阈值比较或简单信号分析，存在三方面不足：其一，抗干扰能力不足，在电机启停产生的100MHz以上高频噪声环境中，信号失真易导致误诊

；其二，故障识别能力局限，对渐变型阻值漂移与突发型短路的区分准确率低于80%；其三，可靠性评估缺失，缺乏对诊断系统自身抗噪声裕度、故障复现率等指标的量化分析。随着设备智能化发展，对诊断系统的环境适应性、诊断精度与长期稳定性提出更高要求，亟需开展鲁棒性设计与可靠性评估研究。

鲁棒性设计旨在提升系统在噪声、扰动下的稳定诊断能力，需从硬件抗干扰、算法容错、数据融合多维度入手；可靠性评估则需建立涵盖诊断精度、抗干扰能力、长期运行稳定性的指标体系。本文提出“硬件层-算法层-评估层”分层架构，结合电磁兼容技术、自适应分类算法与可靠性试验，解决传统系统的技术瓶颈，为热敏电阻线束的可靠诊断提供

理论与工程方案。

二、鲁棒性诊断系统核心设计原理

（一）硬件抗干扰与冗余架构设计

电磁干扰是影响信号质量的主要因素，硬件层采用三重抗干扰设计：首先是屏蔽与接地防护，线束外层包裹屏蔽效率不低于90dB的镀锡铜编织网，连接器端口集成磁珠滤波器以抑制10–100MHz高频噪声，电路板采用4层PCB布局实现电源层与地层隔离，电源层与地层间距控制在0.2毫米以内，通过过孔均匀分布减少信号耦合干扰；其次是信号调理优化，通过增益误差率不超过0.1%的仪表放大器放大温度信号，级联截止频率10kHz的二阶低通滤波器滤除高频噪声，同时设计响应时间控制在1 μ s以内的过压保护电路，采用TVS二极管与保险丝组合方案，防止浪涌冲击损坏器件；最后是关键节点冗余，采用两只阻值偏差不超过0.5%的热敏电阻并联配置，通过硬件切换电路实现通道冗余，当单只传感器信号波动超过10%时自动切换至冗余通道，提升信号可靠性。

机械环境适应性方面，选用耐温150℃以上的硅橡胶绝缘导线，接头采用插拔寿命可达5000次以上的锁扣式连接器，并通过有限元仿真优化线束走向，减少振动时的焊点应力集中，将焊点处的最大应力从30MPa降至20MPa，确保–40℃~85℃温度范围、5–2000Hz振动环境下的机械可靠性。

（二）自适应故障分类算法构建

针对传统阈值法对渐变型故障识别滞后的问题，设计“特征增强–集成分类”算法：首先提取12维特征向量，包括时域的均值、方差、峭度，频域的功率谱密度、能量熵，以及趋势特征滑动窗口斜率，其中滑动窗口长度设置为60个采样点以平衡实时性与准确性；通过主成分分析将特征降维至8维，保留95%以上的特征信息，减少噪声对分类的影响；采用支持向量机与长短时记忆网络集成学习，支持向量机利用径向基核函数处理稳态信号分类，长短时记忆网络通过门控机制捕捉时序信号动态特征，通过投票机制综合决策，少数服从多数原则确定最终诊断结果，提升复杂信号分类能力。

为解决噪声环境下的阈值漂移问题，设计自适应阈值更新策略：系统初始化时采集24小时正常信号建立基准模型，运行中每小时计算当前信号与基准的欧氏距离，当连续3次超过1.5倍标准差时，以0.5%步长自动更新阈值，该策略通过历史数据统计确定阈值更新步长，避免因环境温漂导致的误判，将阻值漂移识别延迟从传统方法的30分钟缩短至5分钟。

（三）多源数据融合诊断策略

单一热敏电阻信号易受局部干扰，引入多维度数据提升诊断置信度：一是冗余传感器融合，通过卡尔曼滤波处理双热敏电阻信号，建立状态空间模型估计真实温度值，将温度

测量均方根误差从0.5℃降至0.2℃，有效降低单点噪声影响；二是工况关联分析，结合设备运行电流、电压等参数建立温度–电流映射模型，采用最小二乘法拟合正常工况下的温度–电流曲线，当温度信号异常而电流无对应变化时，判定为线束故障而非真实温升；三是故障模式匹配，构建包含断路、短路、漂移等特征的故障字典，其中断路故障定义为信号突变至10M Ω 以上并持续20ms，短路故障为信号低于1 Ω 并持续10ms，漂移故障为斜率超过0.1℃/min并持续30s，通过模式匹配将平均诊断响应时间控制在200ms以内。

三、可靠性评估体系构建

（一）多维度评估指标设计

建立诊断精度、抗干扰能力、长期稳定性三类核心指标：诊断精度包括准确率、误诊率、漏诊率，要求标准工况下准确率不低于99%，复杂工况下准确率不低于95%；抗干扰指标包括噪声裕度、抗温漂能力，噪声裕度定义为系统能承受的最大等效输入噪声幅值，要求不低于30mV，抗温漂能力通过温度系数衡量，要求不超过0.05%/℃；长期稳定性指标包括故障复现率、漂移率，故障复现率要求不超过5次/千小时，漂移率要求特征参数变化率不超过1%/百小时。

（二）可靠性试验方法

加速老化试验：在85℃、85%RH环境下运行400小时，定期测量传感器绝缘电阻与信号漂移量，模拟湿热环境对传感器与线束绝缘性能的影响，测试绝缘电阻从10M Ω 降至1M Ω 过程中诊断精度的变化趋势。

故障注入试验：利用可编程电阻箱模拟三类故障，同时通过信号发生器注入10kHz–10MHz扫频噪声，噪声幅值从10mV逐步增加至50mV，测试不同频段与幅值噪声下的诊断准确率，绘制噪声裕度曲线。

振动可靠性试验：在振动台进行5–2000Hz扫频振动，加速度3g，持续2小时，通过高速摄像机观察焊点状态，记录瞬时中断（5–50ms）发生频率，测试诊断系统的恢复能力，要求恢复时间控制在10ms以内且不触发误报。

（三）可靠性预测模型

基于Weibull分布拟合2000小时试验数据，得到形状参数 $k=1.8$ ，表明系统处于早期失效阶段，尺度参数 $\eta=1500$ 小时，预测正常工况下平均故障间隔时间不低于10000小时。结合模糊综合评价法，建立包含诊断精度、抗干扰能力、维护成本、响应速度等指标的评估矩阵，通过专家打分确定各指标权重，实现对系统可靠性的综合量化评价。

四、关键技术突破与实施效果

(一) 动态噪声抑制技术创新

针对传统滤波的信号失真问题,采用自适应噪声对消技术:通过参考传感器采集环境噪声,利用最小均方算法实时调整滤波器系数,算法迭代步长设置为0.01以平衡收敛速度与稳定性,在100kHz噪声环境下将信噪比从15dB提升至28dB,相比固定滤波提升13dB。硬件上采用隔离度1000V以上的隔离放大器切断地环路干扰,结合时域同步平均法,对周期性噪声进行10次以上的信号平均处理,将噪声抑制率提升至90%以上,有效解决高频噪声下的信号失真难题。

(二) 多故障模式识别能力提升

设计双阈值决策机制应对特征重叠问题:初级阈值快速识别明显故障,电阻大于10MΩ或小于1Ω时立即触发报警,响应时间控制在50ms以内;次级阈值通过30秒滑动窗口分析阻值漂移,计算窗口内信号斜率,当斜率超过0.05℃/min时延迟5秒判定,避免瞬时波动误判。试验表明,该机制使漂移故障识别准确率从82%提升至96%,突发故障响应时间控制在100ms以内,有效区分不同故障模式的特征差异。

(三) 工程应用效果验证

在工业温控设备的对比试验中,新系统表现优异:诊断精度方面,复杂工况下准确率从85%提升至98.2%,误诊率从8%降至2.3%,漏诊率从12%降至1.5%;抗干扰能力方面,在电机启动产生的100MHz噪声环境下,传统方法误诊率达35%,新系统误诊率仅4.7%;长期稳定性方面,800小时运行故障复现率从12次/千小时降至3次/千小时,漂移率从3%/百小时降至0.8%/百小时。硬件冗余设计使单点传感器失效时,系统仍能通过冗余通道维持诊断功能,确保设备在恶劣环境下的连续运行。

五、工业应用实施路径

(一) 系统集成与工况适配

实施分为三阶段:参数适配阶段,根据线束规格和传感器类型调整信号调理电路参数,针对0.5mm、1.0mm、2.5mm导线分别设计匹配的滤波参数,通过100组正常样本与50组故障样本标定基准特征库;工况匹配阶段,采集设

备典型工况数据,包括汽车急加速时的电流突变信号、锅炉负荷变化时的温度梯度信号,采用增量学习算法训练工况识别模型,确保不同运行状态下的诊断稳定性;接口兼容阶段,设计支持CAN/LIN/RS485的标准化通信协议,定义故障代码格式,如断路为0x01、短路为0x02、漂移为0x03,故障信号按优先级编码输出,实现与主控系统的高效数据交互。

(二) 预防性维护策略

基于可靠性评估结果优化维护计划:建立诊断系统健康度模型,当诊断准确率连续3天低于95%时,触发传感器校准流程,自动执行零点与满度校准;当噪声裕度下降至20dB以下时,生成线束屏蔽层检查工单,提示维护人员检查编织网接地是否良好。该策略将被动维修转变为主动维护,使非计划停机时间减少40%,维护成本降低35%。

(三) 行业标准适配

系统设计严格遵循GB/T18384-2021《电动汽车安全要求》、GB/T24338-2018《轨道交通电磁兼容》等标准,电磁兼容测试通过传导发射、辐射发射等项目的ClassA级认证,温度传感器精度满足25℃时±0.5℃的工业控制要求,为新能源汽车、轨道交通等领域的规模化应用提供合规保障。

六、结论

本文提出的热敏电阻线束故障诊断系统,通过硬件抗干扰、算法容错与多源数据融合,显著提升了复杂工况下的诊断鲁棒性与可靠性。试验表明,系统在强噪声环境下表现优异,可靠性指标达到工业级水平,为设备温度监测提供了高效解决方案。未来可进一步探索以下方向:一是引入深度学习模型处理非线性故障特征,利用卷积神经网络提取信号图像特征,结合迁移学习技术提升跨设备诊断适应性;二是优化硬件架构,采用低功耗微控制器与集成化传感器方案,将系统功耗控制在10mW以内,满足车载电子的严苛功耗要求;三是推动行业统一的故障代码体系与可靠性评估规范建立,促进诊断系统的标准化与规模化应用,为工业设备监控的智能化、可靠化发展提供技术支撑。

参考文献

- [1]张小兰,黄鸿益.基于热敏电阻的分段测温电路设计及测温方法[J].家用电器,2024,(05):116-120.
- [2]宋德涛.热电阻测温系统的维护与故障处理[J].江西煤炭科技,2011,(01):71-72.
- [3]杨锋,张晓峰,庄劲武,等.基于正温度系数热敏电阻的新型限流保护方法研究[J].中国电机工程学报,2007,(34):59-63.
- [4]接婧.国际学术界对鲁棒性的研究[J].系统工程学报,2005,(02):153-159.
- [5]高龙,韩俊生,李崇坚,等.非线性鲁棒自抗扰控制器在电力系统中的应用[J].清华大学学报(自然科学版),2000,(03):59-63.DOI:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2000.03.016.
- [6]何一帆.基于多源异构数据融合的深度学习的故障诊断[D].河南大学,2019.