

高速公路电气设备故障诊断与智能化管理方法研究

罗国机

广东 佛山 528226

DOI:10.61369/ME.2025060018

摘 要： 介绍高速公路电气设备系统构成，包括供配电、照明、监控等系统，阐述常见故障模式。分析基于固定阈值预警机制、传统人工巡检的局限。讲述多源数据融合、考虑环境变量的模型等优化策略，及绝缘子检测、边缘计算节点部署等关键技术，还提及设备健康评估等内容。

关 键 词： 高速公路电气设备；故障诊断；智能化管理

Research on Fault Diagnosis and Intelligent Management of High-speed Road Electrical Equipment

Luo Guoji

Foshan, Guangdong 528226

Abstract： This paper introduces the components of the electrical equipment system on expressways, including power supply and distribution, lighting, and monitoring systems, and discusses common fault modes. It analyzes the limitations of traditional manual inspections and the fixed threshold early warning mechanism. The paper also discusses optimization strategies, such as multi-source data fusion and models that consider environmental variables, as well as key technologies like insulator detection and the deployment of edge computing nodes. Additionally, it covers equipment health assessment.

Keywords： expressway electrical equipment; fault diagnosis; intelligent management

引言

高速公路电气设备系统对高速公路的正常运行至关重要，其涵盖供配电、照明、监控等多个子系统，且各有复杂的运行原理和拓扑结构。随着交通行业的发展，2023年发布的相关交通设施维护政策强调了保障高速公路设备可靠性和安全性的重要性。然而，电气设备面临着短路、接地、老化等多种故障模式，传统的基于固定阈值预警机制和人工巡检模式存在局限性。为提高故障诊断的准确性和效率，多源数据融合的特征提取策略、考虑环境变量的自适应随机森林分类模型等新技术应运而生，这些技术将为高速公路电气设备的智能化管理提供有力支持，符合政策导向和行业发展需求。

一、高速公路电气设备系统特性及故障机理分析

（一）电气设备构成与运行特征

高速公路电气设备系统主要由供配电系统、照明系统、监控系统等构成。供配电系统为高速公路各类设备提供电力支持，其拓扑结构包括变电站、配电室等，确保电能稳定传输^[1]。照明系统保障高速公路在不同时段的可视性，其灯具分布和亮度设置需满足行车安全要求，运行特征与交通流量和环境因素相关。监控系统由摄像头、传感器等组成，具备实时监测交通状况的功能，其拓扑结构复杂，涉及数据传输和处理环节，运行时需保证数据的准确性和及时性，以实现高速公路的有效监控^[1]。

（二）典型故障模式及成因

高速公路电气设备常见故障模式包括短路故障、接地故障和设备老化等。短路故障通常是由于绝缘损坏、线路连接不当或过

载等原因导致电流异常增大，可能引发电气设备过热、烧毁甚至火灾等严重后果^[2]。接地故障可能是由于接地系统不完善、设备绝缘性能下降或外界因素影响，使电气设备的金属外壳带电，危及人身安全和设备正常运行。设备老化则是长期运行过程中，电气设备的元器件逐渐磨损、性能下降，这可能与工作环境的温度、湿度、灰尘等因素有关，导致设备出现故障的概率增加^[2]。

二、传统故障诊断方法局限性分析

（一）阈值判断法应用现状

基于固定阈值的预警机制在高速公路电气设备故障诊断中存在诸多局限性。在动态环境下，设备运行状态受多种复杂因素影响，如不同季节的温度、湿度变化，交通流量的差异等。这些因素导致设备的运行参数并非固定不变，而固定阈值无法灵活适应

这种动态变化。例如，夏季高温可能使电气设备的正常工作温度范围上移，但固定阈值无法及时调整，可能会误判设备故障，引发不必要的维护操作，增加成本且影响设备正常运行。同时，不同设备个体之间也存在一定差异，固定阈值难以对所有设备都适用，无法准确区分正常的个体差异和真正的故障状态，降低了故障诊断的准确性和可靠性^[3]。

（二）人工巡检模式效率瓶颈

传统人工巡检模式在高速公路电气设备故障诊断中存在诸多效率瓶颈。巡检周期长，无法及时发现设备的潜在故障，可能导致故障积累，增加维修成本和设备停机时间^[4]。盲区多，一些设备位置偏远或难以到达，容易被巡检人员忽略，这些未被检查到的区域可能隐藏着故障隐患。经验依赖性强，巡检人员的专业水平和经验参差不齐，对于故障的判断可能存在偏差，缺乏统一的标准和规范。而且人工巡检需要耗费大量的人力、物力和时间，效率低下，难以满足高速公路电气设备日益增长的维护需求。

三、智能故障诊断关键技术研究

（一）基于机器学习的诊断模型构建

1. 特征工程优化方法

多源数据融合的特征提取策略与降噪处理算法是特征工程优化的关键。对于多源数据，需综合考虑不同数据源的特点，提取全面且有代表性的特征。采用主成分分析等方法对高维特征进行降维处理，减少冗余信息，提高模型效率^[5]。同时，针对数据中的噪声问题，设计有效的降噪处理算法。例如，小波变换可在时频域对信号进行分析，去除噪声干扰，增强特征的准确性和稳定性。通过这些策略和算法，能够优化特征工程，为后续基于机器学习的诊断模型提供更优质的输入，提高故障诊断的准确性和可靠性。

2. 动态权重诊断模型

考虑环境变量的自适应随机森林分类模型是动态权重诊断模型中的重要部分。该模型能够自适应地调整决策树的权重，从而提高诊断的准确性。在构建模型时，首先需要收集大量的电气设备故障数据以及相关的环境变量数据。然后，利用这些数据对随机森林模型进行训练，通过不断调整决策树的权重，使模型能够更好地适应不同的环境条件和故障类型。在实际应用中，该模型可以实时监测电气设备的运行状态，当检测到异常时，能够快速准确地诊断出故障原因，并提供相应的维修建议。这不仅可以提高故障诊断的效率和准确性，还可以减少维修成本和停机时间，提高高速公路电气设备的可靠性和安全性^[6]。

（二）图像识别技术的绝缘子故障检测

1. 红外成像特征提取

在绝缘子故障检测中，红外成像特征提取至关重要。通过对绝缘子红外图像的分析，可获取其温度分布等关键信息。利用卷积神经网络强大的特征提取能力，能够自动学习到绝缘子在不同故障状态下的红外成像特征。首先对采集到的红外图像进行预处理，包括去噪、增强对比度等操作，以提高图像质量。然后将处

理后的图像输入卷积神经网络，网络通过卷积层、池化层等结构逐步提取图像的特征。这些特征能够反映绝缘子的温度变化模式以及可能存在的故障区域。通过大量的训练样本对网络进行训练，使其能够准确地识别出绝缘子的故障特征，为后续的故障诊断提供有力依据^[7]。

2. 多模态数据融合检测

实现可见光与红外图像的特征级融合识别技术是多模态数据融合检测的关键。通过对可见光图像中绝缘子的外观、颜色、纹理等特征，以及红外图像中绝缘子的温度分布特征进行提取⁸。利用特征融合算法，将两种模态下的特征进行融合，使得融合后的特征能够更全面地反映绝缘子的状态。例如，融合后的特征可以同时包含绝缘子表面的物理特征和热特征，从而提高故障检测的准确性和可靠性。这种特征级融合技术能够有效克服单一模态图像在绝缘子故障检测中的局限性，为智能故障诊断提供更有力的支持。

四、智能化管理系统架构设计

（一）边缘-云端协同架构

1. 边缘计算节点部署

边缘计算节点部署是智能化管理系统架构设计中边缘-云端协同架构的关键部分。对于高速公路电气设备故障诊断与智能化管理，需设计包含数据预处理和本地推理的终端设备配置方案。在边缘计算节点，应合理配置计算资源和存储资源，以满足数据预处理的需求。通过对采集到的电气设备数据进行实时处理，去除噪声和异常值等干扰因素，提高数据质量^[9]。同时，具备本地推理能力的终端设备能够在边缘节点快速对一些常见故障模式进行判断，减少对云端的依赖，提高故障诊断的及时性和准确性，提升整个智能化管理系统的性能和效率^[9]。

2. 5G 通信协议优化

在边缘-云端协同架构下的5G通信协议优化对于高速公路电气设备故障诊断与智能化管理至关重要。通过优化5G通信协议，可建立低时延高可靠的数据传输通道技术规范。5G技术的高速率、低时延和高可靠性特性能够满足电气设备实时数据传输需求，确保故障诊断的及时性和准确性。优化过程需考虑多方面因素，如网络切片技术的应用，可根据不同业务需求划分网络资源，保障电气设备数据传输的优先级和质量。同时，对5G协议中的物理层、MAC层等进行针对性优化，提高数据传输效率和稳定性，为智能化管理系统提供坚实的通信基础^[10]。

（二）大数据处理平台

1. 实时数据清洗机制

在大数据处理平台的实时数据清洗机制中，构建基于时间窗口的异常数据过滤与修复模型至关重要。该模型需考虑时间维度对数据的影响，通过设定合适的时间窗口，对进入系统的数据进行实时监测。对于不符合正常数据模式的异常值，依据时间窗口内的其他相关数据进行分析和判断。利用数据的关联性和时间序列特征，识别可能的错误原因。通过算法对异常数据进行过滤，

将明显错误的數據排除在后续处理流程之外。同时，对于一些可修复的数据，根据其在时间窗口内的上下文信息进行合理修复，确保数据的准确性和完整性，为后续的电气设备故障诊断和智能化管理提供可靠的数据基础。

2. 多维信息融合存储

面向设备全生命周期管理的时空数据库架构在多维信息融合存储方面具有重要意义。该架构需考虑设备运行过程中产生的多种信息，包括时间序列数据和空间位置信息等。对于时间序列数据，要设计合理的存储结构以高效处理不同时间粒度的数据，同时确保数据的完整性和准确性。在空间信息存储上，结合地理信息系统相关技术，实现设备位置与相关属性信息的有效关联。通过建立数据索引和分区策略，提高数据查询和检索的效率，以便快速获取所需的设备信息，为后续的故障诊断和智能化管理提供坚实的数据基础。

（三）智能运维应用模块

1. 设备健康状态评估

设备健康状态评估是智能化管理系统的关键部分。对于高速公路电气设备，需综合多方面因素进行评估。通过传感器采集设备运行数据，如温度、电压、电流等。利用数据分析技术挖掘数据中的特征信息，以判断设备是否存在异常。同时，结合设备的历史运行数据和故障记录，建立设备健康状态评估模型。该模型可对设备当前的健康状况进行量化评分，为运维人员提供直观的判断依据。此外，考虑设备的剩余寿命预测，通过对设备老化趋势、磨损程度等进行分析，将其纳入设备健康状态评估体系，以便提前规划维护策略，降低设备故障对高速公路运营的影响。

2. 动态运维策略生成

动态运维策略生成部分主要聚焦于开发基于强化学习的任务优先级调度算法。强化学习通过智能体与环境的交互来学习最优策略。在此系统中，智能体为算法主体，环境包含电气设备运行状态及相关任务信息。算法首先要定义状态空间，涵盖设备故障类型、严重程度、运维资源情况等。然后确定动作空间，例如不同的维修任务安排和资源分配方式。通过不断接收环境反馈的奖励信号，如维修效率提高、设备故障率降低等，来优化策略。最终实现根据设备实时状态和任务需求，合理安排运维任务优先级，提高运维效率，确保高速公路电气设备的稳定运行。

五、总结

智能诊断算法显著提升了故障识别准确率。通过先进的算法模型和数据分析技术，能够更精准地定位电气设备故障，减少误判和漏判情况，为快速修复提供了有力支持。管理平台在运维成本控制上展现出重要实践价值。它整合了资源管理、故障预警和维修调度等功能，优化了运维流程，提高了工作效率，降低了人力、物力和时间成本。展望未来，数字孪生技术在设备全生命周期管理中具有广阔应用前景。它可以实现设备虚拟模型与物理实体的精准映射和实时交互，为设备的设计、运行、维护和升级提供更全面、精确的决策依据，推动高速公路电气设备管理向智能化、高效化方向发展。

参考文献

[1] 叶富根. 面向红外图像的电气设备热故障诊断研究 [D]. 华东交通大学, 2023.
[2] 冯爽爽. 基于红外技术的变电站关键电气设备故障诊断研究 [D]. 西南石油大学, 2022.
[3] 赵岩. 基于深度学习的电气设备红外图像识别与热故障诊断 [D]. 华北电力大学 (保定), 2022.
[4] 王雅雯. 融合非平衡故障文本与监测数据样本集的电气设备故障诊断研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
[5] 陶诗涌. 燃料电池系统故障诊断与混合动力系统能量管理方法研究 [D]. 西南交通大学, 2021.
[6] 尹承波. 浅析园林绿化智能化管理方法 [J]. 科学与信息化, 2022(9): 193-195.
[7] 蔡义. 高速公路信息化与智能化管理的发展研究 [J]. 运输经理世界, 2021(32): 64-66.
[8] 王维力. 油库设备检修的智能化管理方法 [J]. 当代化工研究, 2021(18): 133-134.
[9] 王保柱. 油库设备检修的智能化管理方法 [J]. 化工管理, 2021(22): 70-71.
[10] 朱得斌. 高速公路机电设备智能化管理研究 [J]. 河南建材, 2024(8): 141-144.