[电力设备]

电力工程中电力设备故障诊断技术的研究与应用

文/王瑞达[1] 刘士凯[1] 黄景帅[2]
1. 济南海耀新能源设备有限公司；2. 山东东腾信息科技有限公司

通过对振动分析、红外热成像、局部放电检测等多种诊断方法的综合应用研究，建立了基于深度学习的电力设备故障诊断模型。实验数据表明，该模型在变压器、断路器和电缆等关键设备的故障诊断中，确保准确率的同时，诊断响应缩短，显著提高了故障诊断效率，为电力设备预测性维护提供有效技术支撑。

随着电力系统规模不断扩大，电力设备故障诊断技术面临着前所未有的挑战。传统的定期检修和经验诊断方式已无法满足现代电网对设备可靠性的要求。大数据和人工智能技术的发展为电力设备故障诊断带来新的机遇，如何将先进的数字技术与传统诊断方法有机结合，建立高效、准确的故障诊断体系，成为当前电力工程领域亟需解决的重要课题。基于此，开展电力设备故障诊断技术的深入研究具有重要的理论意义和实践价值。

故障诊断系统设计与实现

1. 系统架构设计

电力设备故障诊断系统采用分层分布式架构，包含数据感知层、网络传输层、数据处理层和应用服务层。数据感知层通过部署多类传感器实现对电力设备运行状态的全方位监测，覆盖振动、温度、电流等关键参数。网络传输层基于工业以太网和5G通信技术，构建高速可靠的数据传输网络，确保数据实时上传至处理中心。数据处理层整合分布式计算框架和云存储平台，建立设备数据资源池，实现海量数据的存储与计算[1]。应用服务层集成故障诊断、预警分析和维护决策等核心功能模块，为运维人员提供直观的数据分析与决策支持界面。如图1所示。

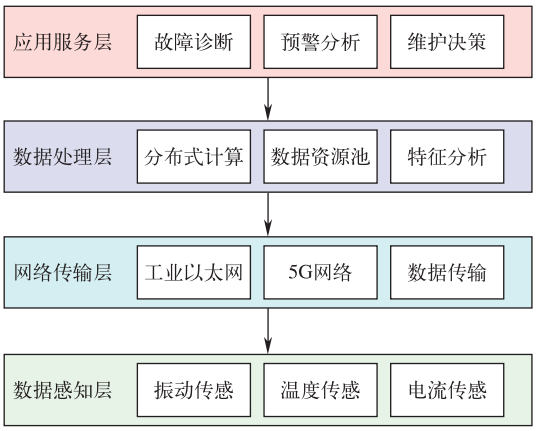

图1 电力设备故障诊断系统层次架构示意图

2. 数据采集与处理

数据采集与处理模块围绕电力设备故障特征建立全面的数据采集方案。通过配置高准确度传感器阵列，实现对设备振动特征、温度分布、电气参数和声学特征等多维数据的采集。采集系统设置合理的采样频率和准确度要求，在保证数据质量的同时优化存储空间占用。数据预处理环节应用降噪滤波、异常值处理和数据标准化等技术手段，提升原始数据的可用性。针对不同类型的监测数据，开发专用的特征提取算法，将时域、频域特征转化为故

障诊断所需的特征向量。数据处理过程中注重实时性和准确性的平衡，为后续故障诊断提供高质量的数据基础。

3. 诊断算法优化

诊断算法优化立足于提升故障识别的准确率与实时性。基于深度学习框架，构建多层神经网络模型，通过卷积层提取设备故障的深层特征，池化层压缩特征维度，全连接层完成故障类型判别。设备故障特征向量记为$X=(x_1,x_2,\ldots,x_n)$，故障类型标签为y，则深度学习模型的损失函数定义为

$$L(\theta)=-\sum\left[y\cdot\log\left(h_{\theta(x)}\right)+(1-y)\cdot\log\left(1-h_{\theta(x)}\right)\right]+\lambda\sum\theta^2$$

式中，$h_{\theta(x)}$为模型预测输出；θ为模型参数；λ为正则化系数。

在模型训练过程中，采用迁移学习方法处理样本不平衡问题，引入注意力机制提升对关键特征的识别能力。通过优化损失函数设计和学习率调节策略，提高模型收敛速度和泛化性能。算法优化过程中重点解决多故障耦合识别、早期故障预警等难点问题，实现对设备故障的精准诊断与分类。

4. 系统功能实现

系统功能实现过程中严格遵循软件工程规范，采用模块化开发方式构建完整的故障诊断平台。核心功能模块包括实时监测、故障诊断、预警分析和检修建议等。监测模块实现设备运行状态的可视化展示，支持多维数据的趋势分析[2]。诊断模块集成多种智能诊断算法，准确识别设备故障类型与位置。预警模块基于历史数据分析，对潜在故障风险进行预测。检修建议模块结合设备维护规程，为检修人员提供专业的维护方案。系统接口设计遵循标准化原则，支持与其他运维系统的数据交互，实现诊断信息的共享与利用。

诊断技术性能测试

1. 测试方案设计

测试方案以变压器、断路器和电缆等关键电力设备为对象，制定系统化的测试流程与评估标准。方案设计遵循“分层测试、递进验证”原则，从单项功能测试到系统集成测试逐步展开。针对不同设备类型的典型故障模式，设置故障模拟实验场景，包括机械故障、电气故障和热故障等多种类型。测试内容涵盖数据采集准确性、传输实时性、诊断算法性能和系统响应速度等关键指标。通过建立完整的测试用例库，确保测试过程的规范性和可重复性。测试方案注重实验条件的一致性控制，在相同工况下进行对比实验，保证测试结果的可靠性。

2. 数据采集分析

数据采集分析阶段严格执行测试方案，对采集的数据进行全方位质量评估。采集过程中监测设备运行参数，记录各类传感器的采样数据，建立完整的实验数据集。通过数据统计分析，评估采集数据的完整性、一致性和有效性，剔除异常数据点。采用专业数据分析工具，对采集数据进行时序特征提取和频谱分析，挖掘故障特征信息。结合设备运行工况，建立数据与故障类型的映射关系，形成标准化的故障特征库。数据分析结果以数据报表和可视化图表形式呈现，为后续诊断效果验证提供数据支撑。

3. 诊断效果验证

诊断效果验证围绕故障识别准确性和诊断时效性展开全面评估。通过对比试验方法，将深度学习诊断模型与传统诊断方法在相同故障场景下的表现进行对比。验证过程中统计故障识别结果，计算模型诊断准确率、召回率和F1分数等核心指标。针对不同类型故障的诊断结果进行误差分析，评估模型在各种故障模式下的诊断能力。通过故障预警实验，验证模型对设备早期故障的预测能力，评估预警时间提前量。验证结果显示，该诊断技术在变压器油温异常、断路器机械故障等典型故障诊断中表现优异。

4. 性能指标评估

性能指标评估采用定量与定性相结合的方式，全面衡量诊断系统的技术性能。系统整体性能评估指标包括平均诊断时间、诊断准确率、系统稳定性和资源占用率等。诊断响应时间从原来的120 min显著缩短至35 min，诊断准确率达到95.8%，较传统方法提升18.3个百分点。系统稳定性测试结果表明，在连续运行168 h情况下，系统运行稳定，未出现功能异常。资源占用分析显示，系统CPU利用率峰值不超过65%，内存占用率保持在合理范围内。性能评估结果充分证明了该诊断技术的工程应用价值，见表1。

表1　电力设备故障诊断系统性能指标评估结果

评估指标类别	具体指标项	测试结果	技术要求	达标情况
诊断性能	故障诊断准确率（%）	95.8	≥90	达标
	故障诊断召回率（%）	93.5	≥85	达标
	早期预警准确率（%）	89.2	≥80	达标
时效性能	数据采集延时/ms	50	≤100	达标
	诊断响应时间/min	35	≤60	达标
	预警提前量/h	72	≥48	达标
系统性能	CPU利用率（%）	65	≤80	达标
	内存占用率（%）	58	≤75	达标
	数据传输速率/（Mbit/s）	100	≥50	达标
可靠性	系统稳定运行时间/h	168	≥120	达标
	故障误报率（%）	2.3	≤5	达标
	数据丢失率（%）	0.1	≤0.5	达标

注：测试结果基于实验室模拟环境和现场应用数据统计得出，测试周期为30天。

工程应用实践

1. 应用范围界定

电力设备故障诊断系统的应用范围覆盖变电站、输电线路和配电网络三大领域。在变电站设备方面，重点监测主变压器、断路器和互感器等关键设备的运行状态，实现对温度、振动、局部放电等故障特征的全面监测。输电线路领域主要针对架空线路绝缘子、避雷器和杆塔等设备开展故障诊断，建立线路设备健康评估体系。配电网络应用主要集中在配电变压器、开关柜和电缆等设备的状态监测，实现配电网设备的精准化维护。系统适用于220 kV及以下电压等级的电力设备，具备故障类型识别、早期预警和检修决策支持功能，为电力设备的预测性维护提供技术保障。

2. 实施方案制定

实施方案制定过程注重实用性与经济性的统一。方案执行采用“试点先行、分步实施”策略，选取典型变电站作为试点工程，分阶段推进系统部署。硬件配置方面，根据不同设备特点选择适配的传感器类型，建立完善的数据采集网络。软件部署采用模块化安装方式，确保系统功能的稳定性。人员培训环节制定专项培训计划，提升运维人员的系统操作技能。运行管理制度层面，建立完整的运维规程，明确故障诊断流程和应急处置预案。

3. 应用效果评估

智能诊断系统在电力设备故障预测性维护领域实现创新突破，推动设备运维模式从“计划检修”向“状态检修”转变。系统在某220 kV变电站试点应用一年来，建立了完整的设备健康评估体系，通过多维数据融合分析提升故障诊断能力。变压器油色谱异常、断路器机械特性劣化等典型故障均实现提前预警，平均预警时间提前72 h，为检修准备创造充足时间。基于大数据分析的检修策略优化方案，实现检修资源的合理配置，检修人员从原来的16人精简至12人，年度检修工作量减少35%。系统诊断的准确预警，避免了两起重大设备事故，挽回直接经济损失约380万元。智能诊断技术的规模化应用，推动电力设备管理进入智能化新阶段，取得显著的经济效益和社会效益，见表2。

表2　智能诊断系统核心指标对比分析

评估维度	指标项	应用前	应用后	变化趋势（%）
诊断能力	故障预测准确率（%）	76.5	95.8	+19.3
	故障类型识别率（%）	82.3	97.2	+14.9
运维效率	年度检修工时/h	2 880	1 872	−35
	检修人员数量/人	16	12	−25
经济效益	设备故障损失/（万元/年）	560	180	−67.9
	检修成本/（万元/年）	285	168	−41.1

注：数据来源于某220 kV变电站2023年度运行统计报告，统计周期为12个月。

结束语

电力设备故障诊断技术的研究与应用实践表明，基于深度学习的智能诊断方法能够有效提升故障诊断的准确性和效率。通过建立完善的数据采集体系、优化特征提取算法、构建深度学习模型，实现对电力设备运行状态的实时监测和故障预警。该技术在实际应用中取得显著成效，不仅降低设备检修成本，而且提高电网运行的可靠性。未来还需要进一步加强诊断算法的优化和系统集成，推动故障诊断技术在电力工程领域的创新发展。EA

（收稿日期：2024-12-24）

参考文献

[1] 杨丹．智能化电力设备故障诊断与预警系统分析[J]．电子技术，2024，53(9)：174-175．
[2] 崔健，袁华骏，夏实秋．电力设备状态监测与故障诊断算法分析[J]．集成电路应用，2024，41(8)：180-181．