

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)03-0184-05

基于径向基神经网络的水电站监控系统智能告警方法

杨赛,董懿,孔令超,尚云飞,李金生

(中国长江电力股份有限公司 乌东德电厂,云南昆明 650000)

摘要:水电站计算机监控系统长期运行于强电磁干扰、多源异构数据并发及工况瞬变的复杂工业环境中,导致传统监控方法虚警频发。为此,提出基于径向基函数神经网络(radial basis function neural network, RBFNN)的水电站监控系统智能告警方法。该方法首先采集了水电站监控系统中的设备状态数据、日志数据和配置数据,构建了包含输入层、隐含层和输出层的RBFNN故障诊断模型。其中输入层设置3个节点对应三类监控数据,输出层设置4个节点分别对应电气、机械、环境及其他监控部分的故障分类。通过参数寻优确定隐含层结构,并采用聚类方法确定基函数中心,使用最小二乘法优化网络权重,完成模型训练。实验依托某实际水电站监控系统展开,设计涵盖紧急至信息级的七级故障分类体系,并部署分层告警框架进行验证。结果表明,所提方法能有效抑制环境干扰引致的虚警,精准识别并分级呈现故障,仅在非关键性预警与信息级故障中各出现一次误判,显著优于对照方法。研究表明,所提方法能显著提升复杂工业背景下的故障辨识鲁棒性与告警直观性,为水电站监控系统的智能化运维提供了一种有效解决方案。

关键词:径向基函数神经网络;故障诊断;水电站;监控系统;智能告警

中图分类号: TP277;TN769

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)03-0184-05

Intelligent alarm method for hydropower station monitoring system based on radial basis function neural network

YANG Sai, DONG Yi, KONG Lingchao, SHANG Yunfei, LI Jinsheng

(Wudongde Power Plant, China Changjiang Electric Power Co., Ltd., Kunming 650000, Yunnan, China)

Abstract: The computer monitoring system of hydropower stations operates in a complex industrial environment with strong electromagnetic interference, concurrent multi-source heterogeneous data, and transient operating conditions for a long time, leading to frequent false alarms in traditional monitoring methods. To address this issue, an intelligent alarm method for hydropower station monitoring systems based on radial basis function neural networks (RBFNN) is proposed. This method first collects equipment status data, log data, and configuration data from the hydropower station monitoring system to construct an RBFNN fault diagnosis model comprising an input layer, a hidden layer, and an output layer. The input layer is set with three nodes corresponding to three types of monitoring data, and the output layer is set with four nodes corresponding to fault classification in electrical, mechanical, environmental, and other monitoring parts. The structure of the hidden layer is determined through parameter optimization, the centers of the basis functions are determined using clustering methods, and the network weights are optimized using the least squares method to complete model training. The experiment is conducted based on an actual hydropower station monitoring system, designing a seven-level fault classification system covering emergency to information levels, and deploying a hierarchical alarm framework for verification. The results show that the proposed method can effectively suppress false alarms caused by environmental interference, accurately identify and classify faults, with only one misjudgment each in non-critical early warning and information-level faults, significantly outperforming the control method. The research indicates that the proposed method can significantly enhance the robustness of fault identification and the intuitiveness of alarms in complex industrial backgrounds, providing an effective solution for the intelligent operation and maintenance of hydropower station monitoring systems.

Keywords: radial basis function neural network; fault diagnosis; hydropower stations; monitoring system; intelligent alarm

水电站作为清洁能源的重要来源,其安全性和运行效率越来越受到关注。水电站计算机监控系统作为保障水电站稳定运行的关键技术之一,其智能化程度直接影响到水电站的故障发现和处置能力。特别是在水电站运行过程中,因为监控数据量大且数据结构复杂,传统的监控方

式难以实时、准确地识别潜在故障^[1]。因此,研究水电站计算机监控系统智能告警方法,对于提高水电站故障自主诊断能力、缩短故障处理时间以及降低运维成本具有重要意义。当前,国内外已有很多学者针对计算机监控系统智能告警方法实施深入研究,并取得一定的成果。其中文献

收稿日期:2024-08-11;录用日期:2024-09-01

基金项目:中国长江电力股份有限公司资助项目(Z522302045);河南省科技攻关计划项目资助(242102240028)

作者简介:杨赛(1989—),男,本科,工程师,研究方向:监控自动化。

引用本文:杨赛,董懿,孔令超,等. 基于径向基神经网络的水电站监控系统智能告警方法[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(3):184-188. (YANG Sai, DONG Yi, KONG Lingchao, et al. Intelligent alarm method for hydropower station monitoring system based on radial basis function neural network[J].

Techniques of Automation and Applications, 2026,45(3):184-188.)

[2]提出一种水电站计算机监控系统智能告警策略,结合深度学习和规则推理技术。通过预处理监控数据,利用卷积神经网络构建诊断模型,结合历史数据训练后,利用专家经验校验和优化结果,提高告警准确性。但规则推理可能无法覆盖所有复杂情况。文献[3]针对电力调度监控一体化系统提出优化策略,旨在提升系统智能化和自动化水平。然而,数据交互复杂性可能导致告警信息冗余或冲突。文献[4]采用软件工程方法监控校园网,实现故障和异常信息的自动发送。但日志分析策略的不完善可能导致关键信息遗漏。文献[5]提出从子站到主站的全流程分布式解决方案,通过预处理和智能分析模块提升监控系统的智能化水平。然而,在主站层面,调控中心的智能分析模块负责监控信息的整合、逻辑推理和分层故障诊断。这一模块涉及复杂的算法和模型,对硬件和软件资源的要求较高。如果资源不足或配置不当,会导致智能分析模块的性能下降,影响告警的准确性和实时性。因此设计基于径向基函数神经网络的水电站计算机监控系统智能告警方法。

1 监控系统智能告警方法设计

1.1 计算机监控系统监控数据获取

获取水电站计算机监控系统监控到的设备状态数据、设备日志数据以及设备配置数据。其中设备状态数据的采集策略为“定时采集”,核心在于通过 SNMP 协议通讯模块实施轮询调度,从而周期性地获取设备的详细运行状态信息^[6]。其中轮询调度的具体流程如图 1 所示。

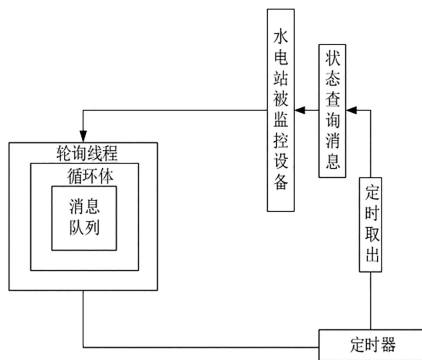


图 1 轮询调度的具体流程

Fig. 1 Specific process of polling scheduling

在日志数据的采集方面,采用定时推送机制,植入定时推送机制后,水电站计算机监控系统设备将在每天的特定时间,自动推送当日的监控日志数据至指定的存储位置。

对于设备配置数据的采集,由于这些数据通常不会频繁变动。因此,采用基于事件触发的主动推送程序^[7]。当工作人员对设备配置实施修改时,将触发本地事件,随后,水电站计算机监控系统设备将主动推送变更后的配置数据至指定的存储位置。

1.2 计算机监控系统故障诊断

设计基于径向基函数神经网络的故障诊断模型,参考 3 层前馈神经网络的结构,实施水电站计算机监控系统监控设备的故障诊断。3 层前馈神经网络结构图如图 2 所示。

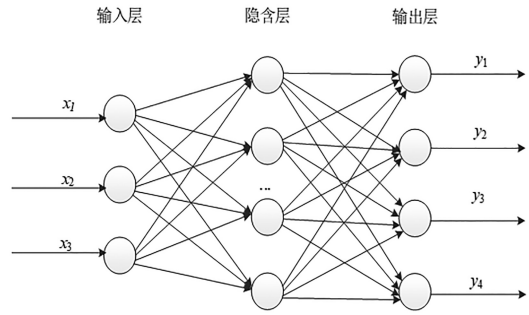


图 2 三层前馈神经网络结构图

Fig. 2 Structure diagram of a three-layer feedforward neural network

在该故障诊断模型的构建中,需要确定各层节点数。针对水电站计算机监控系统监控设备的运行特性。输入层共设置 3 个节点,分别对应获取的 3 种数据,包括设备状态数据、设备日志数据、设备配置数据。

模型输出层共设置 4 个,分别对应电气监控部分故障、机械监控部分故障、环境监控部分故障以及其他监控部分故障^[8]。

在隐含层节点数的确定中,为确定最优数量,首先使用经验公式(1)进行计算。

$$\begin{cases} G = \sqrt{J + \chi} + b \\ b \in [1, 10] \end{cases} \quad (1)$$

式中, J 指输入层节点数; b 是随机数; χ 是指输出层节点数。

在确定隐含层节点数的最佳范围后,针对此范围内的整数值分别实施试验。选择 30 种不同类型的水电站计算机监控系统故障数据,并对每组数据实施 500 次的网络训练与测试。根据试验结果绘制网络均方误差与隐含层节点数之间的变化曲线图^[9]。依据曲线中均方误差最小的点确定隐含层的最优节点数。

此外,由于所选取的故障特征值变量可能存在显著的数值差异,为了消除差异带来的误差并提升算法的收敛效率,在训练前对所有数据实施归一化处理。

$$\alpha = \frac{\alpha_i - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}} \quad (2)$$

式中, α_i 指的是训练数据; α_{\min} 指的是 α_i 中的最小值; α_{\max} 指的是 α_i 中的最大值。

在该故障诊断模型中,基函数的中心 D_{jk} 、基函数的宽度 δ_j 、输出层 D_j 与隐层间的连接权值 $\tilde{\omega}_{ij}$ 等参数必须通过训练来确定,具体训练步骤如下。

1) 确定基函数的中心 D_{jk}

a) 将训练样本集内的前 χ 个样本向基函数中心赋值,作为初值^[10]。

b) 按照最近的基函数中心对全部样本模式实施分组,也就是找出各学习样本 x^v 属于的基函数中心。对于全部样本模式及各基函数中心,满足下式的 x^v 属于 D_{ji} 的子样本集 e_j 。

$$\phi = \min \left[\sum_{l=1}^j (x^v_l - D_{ji})^2 \right] \quad (3)$$

式中, x_l^v 指第 l 个学习样本^[11]。

c) 重新计算 D_{jk} , 具体计算公式为

$$D_{jk} = \frac{1}{Z_j} \sum_{x^v \in \varepsilon_j} x^v \quad (4)$$

式中, Z_j 指的是子样本集 ε_j 内的样本模式数。

d) 当 D_{jk} 不再变化, 停止训练, 否则转向步骤 2。

2) 确定基函数的宽度 δ_j

具体公式为

$$\delta_j = \sqrt{\frac{1}{Z_j} \sum_{x^v \in \varepsilon_j} \sum_{l=1}^J (x^v - D_{jk})^2} \quad (5)$$

3) 确定连接权值 $\tilde{\omega}_{ij}$

通过最小二乘法求解下式来确定连接权值 $\tilde{\omega}_{ij}$

$$\min W = \frac{1}{2} \sum_{v=1}^q \sum_{j=1}^g (\beta_j^v - \sum_{i=1}^g \tilde{\omega}_{ij} K_j^v)^2 \quad (6)$$

式中, q 指输入模式数; g 指隐含层的最优节点数; W 指 $\tilde{\omega}_{ij}$ 的函数; β_j^v 指期望输出; K_j^v 指隐含层单元的输出^[12]。

通过训练后的故障诊断模型实施故障诊断。

1.3 故障智能告警

本次依据水电站实际生产需要及前人研究, 将诊断故障划分为 7 级故障, 分别实施告警。这一划分旨在更贴近水电站的实际运营情况, 确保在设备出现故障时, 能够迅速、准确地识别故障等级, 并依据不同的故障等级采取相应的处理措施, 以保障水电站的安全、稳定和高效运行, 具体如下:

一级故障(紧急故障)。这类故障直接影响水电站的安全运行, 会导致设备严重损坏或人身伤害。示例: 机组飞逸(转速达到 140% 额定转速以上)、停机过程中出现剪断销剪断、紧急停机按钮按下等紧急事故。

二级故障(严重故障)。这类故障对水电站运行造成较大影响, 但尚未达到一级故障的严重程度。示例: 重要设备如变压器、发电机等出现严重异常, 会导致性能下降或停机。

三级故障(重要故障)。这类故障对水电站运行有一定影响, 但通常不会导致马上停机。示例: 辅助设备如冷却系统、润滑系统等出现故障, 影响主设备的运行效率^[13-14]。

四级故障(一般故障)。这类故障对水电站运行影响较小, 但需要及时处理以防止故障升级。示例: 传感器数据异常、通信故障等。

五级故障(轻微故障)。这类故障对水电站运行几乎无影响, 但仍需记录并关注。示例: 个别指示灯不亮、非关键性参数波动等。

六级故障(预警故障)。这类故障是系统基于预测模型或历史数据发出的预警, 表明设备或系统可能即将出现故障。示例: 设备温度异常升高、振动加剧等趋势性变化。

七级故障(信息故障)。这类故障主要涉及系统的信息交互和数据处理, 不影响设备的实际运行。示例: 数据库连接失败、数据丢失或损坏等^[15]。

设计智能告警框架, 实现水电站计算机监控系统智能告警。该智能告警框架架构由用户层、应用层以及数据层构成, 具体架构设计如图 3 所示。

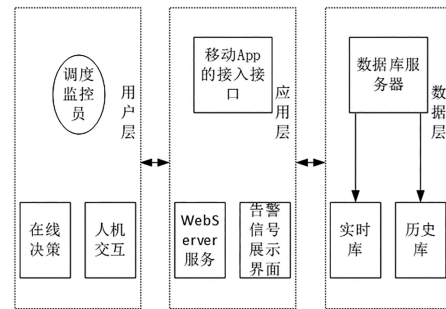


图 3 具体架构设计

Fig. 3 Specific architecture design

用户层的核心受众是调度监控员, 这一层级为水电站计算机监控系统的值班人员提供了操作与决策的平台。它接收用户的输入, 并即时展示处理后的结果。同时, 该层提供人机接口, 以便调度监控员实施修改和管理操作。

在应用层, 部署了 WebServer 服务以及告警信号展示界面, 并预留了移动 App 的接入接口。这些功能为用户提供了多样化的故障告警数据展示方式, 包括实时故障报警和故障统计分析等。

至于数据层, 主要负责对告警处理的底层数据实施封装。这些数据涵盖实时告警数据和历史告警数据。此外, 数据层还封装了对水电站计算机监控系统数据库的访问权限, 包括数据的存取和修改等操作^[16]。

告警信号展示界面是调度监控员面对和处理的界面。此界面分为三个窗口, 首先是位于底部的“全面信号窗口”, 它涵盖了所有信号; 接着是左侧的“待处理告警窗口”, 用于展示尚未被确认的故障告警; 最后是右侧的“未解决告警窗口”, 用于显示动作后未得到反馈的故障告警信号。每个窗口都支持标签化操作, 以便用户根据时间范围、厂站等条件灵活筛选历史信号^[17]。

充分考虑信息的直观性实施该监视界面的视觉设计。对于 1 至 7 级的不同故障告警信号, 采用“*”号数量来区分, 使之一目了然。具体来说, 1 级故障告警采用 1 个 * 表示, 2 级采用 2 个 * 表示, 3 级采用 3 个 * 表示, 4 级采用 4 个 * 表示, 5 级采用 5 个 * 表示, 6 级采用 6 个 * 表示, 而 7 级则选用采用 7 个 * 表示。

2 智能告警测试

2.1 实验过程

利用设计方法实施某水电站计算机监控系统的智能告警, 测试其智能告警性能。实验水电站是一座综合利用型水电站。电站装机容量达到五万千瓦, 拥有多台发电机组和水库调度系统。该水电站的计算机监控系统负责实时监控电站的运行状态, 确保电站的安全、高效运行。

获取实验水电站计算机监控系统监控到的设备状态数据、设备日志数据以及设备配置数据。其中获取的部分

监控设备状态数据如表1所示。

获取的部分监控设备日志数据如表2所示。

获取的部分监控设备配置数据如表3所示。

利用设计的基于径向基函数神经网络的故障诊断模型实施实验水电站计算机监控系统监控设备的故障诊断。在该步骤中,参数设置情况具体如下:学习效率:0.1;训练误差指标:0.05。

表1 获取的部分监控设备状态数据

Tab.1 Status data obtained from partial monitoring devices

设备名称	运行状态	电流/A	电压/V	温度/°C
发电机组 001	运行中	1 200	4 000	60
变压器 002	待机中	0	0	25
水泵 003	运行中	50	380	35
断路器 004	闭合状态	—	—	—

表2 获取的部分监控设备日志数据

Tab.2 Log data obtained from partial monitoring devices

设备名称	日志时间	日志内容
发电机组 001	2022-10-23T10:05:00	发电机组 001 启动成功,进入运行状态。
水泵 003	2022-10-23T10:10:00	水泵 003 电流波动异常,已自动调整至正常范围。
断路器 004	2022-10-23T09:50:00	断路器 004 成功闭合,系统电流稳定。
变压器 002	2022-10-23T09:35:00	变压器 002 温度达到预设上限,启动散热系统。

表3 获取的部分监控设备配置数据

Tab.3 Configuration data acquired from partial monitoring devices

设备名称	配置改动
发电机组 001	额定功率可增加至 400 kW
变压器 002	容量增加至 1 250 kVA
水泵 003	关小进口阀门
—	—

利用设计的智能告警框架实现水电站计算机监控系统智能告警。

2.2 告警性能测试

首先测试设计方法的告警性能,其“全面信号窗口”告警情况如图4所示。

图4表明设计方法能够实现各种故障的告警,既表明了故障级别及内容,同时不同级别故障的告警信息颜色不同,一目了然。

所有信号		
告警序号	告警分类	故障告警信息
1	一级故障 (*)	机组005转速达到180%额定转速
2	五级故障 (*****)	指示灯012不亮
3	六级故障 (*****)	水泵024温度异常升高
用户	角色: 监控	

图4 “全面信号窗口”告警情况

Fig.4 "Comprehensive signal window" alarm condition

2.3 故障告警误判情况测试

接着测试设计方法运行后故障告警的误判情况。在该步骤的测试中,将文献[2]、文献[3]、文献[5]作为对比测试方法。

四种方法运行一段时间后7种故障的故障告警误判

数测试结果如图5所示。

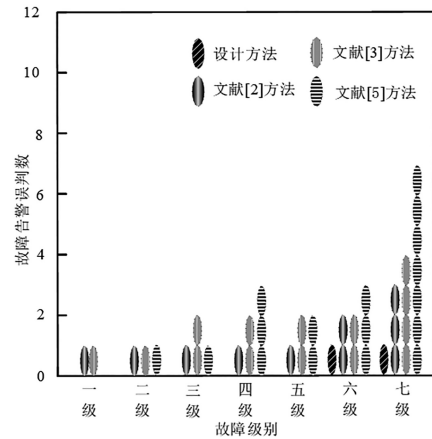


图5 7种故障的故障告警误判数测试结果
Fig.5 Test results of false alarm misjudgment for 7 types of faults

设计方法在各种故障类型下的误判数均低于其他对比方法。仅在六级故障与七级故障告警上出现过一次误判。这是由于BFNN是一种强大的神经网络模型,适用于处理复杂的非线性关系,因此具有更高的诊断准确性和更低的误判率。文献[2]、文献[3]、文献[5]中的方法均存在一定局限性,例如对特定故障类型的敏感性不足、对复杂关系的处理能力有限等,导致它们在某些故障类型下的误判率较高。

3 结论

设计了基于径向基函数神经网络的水电站计算机监控系统智能告警方法,在提升水电站监控系统的智能化和自动化水平方面发挥了显著作用。RBFNN以其特有的局部逼近特性和快速学习能力,有效地处理了监控数据中的复杂性和非线性关系,实现对水电站运行故障的诊断。并设计了智能告警框架,能够降低故障对水电站运行的影响。此外,该方法还减少误报的可能性,提高了整个监控

系统的效率。

尽管基于 RBFNN 的智能告警方法取得显著的成果,但仍需认识到技术的持续进步和优化的重要性。未来,将继续深化该研究,提升水电站监控系统的智能化和自动化水平。同时,也期待与其他领域的研究者和技术人员展开合作,共同推动智能电力事业的蓬勃发展。

参考文献

- [1]覃事河,段斌,周相,等.水电工程地质灾害实时监测预警系统设计及应用[J].人民长江,2023,54(10):105-112.
- [2]唐杰阳,唐凡,杨东,等.水电站计算机监控系统综合智能告警研究[J].中国水利水电科学研究院学报(中英文),2022,20(4):377-385.
- [3]刘泽锴,陆婷婷.电力调度监控一体化系统的信息告警优化研究[J].现代工业经济和信息化,2023,13(1):58-59.
- [4]LYU, CHUN W. The Research on the Campus Network Monitoring System Alarm[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 513-517; 2190-2193.
- [5]张永刚,庄卫金,孙名扬,等.大运行模式下面向监控的分布式智能告警架构设计[J].电力系统保护与控制,2016,44(22):148-153.
- [6]黄志华,高瑞民,张大涛,等.智能云平台搅拌桩监控系统及工程应用[J].建筑结构,2023,53(22):151-156.

(上接第183页)

5 结论

传统的故障录波数据分析只能在特定的平台上实现,本文应用的 QT 平台与其他开发环境相比最显著的优点在于它具有完善的跨平台体系,它能够使多个应用开发同在此环境下运行。利用 QT 的可跨平台特点,可以实现应用不同平台工作的技术人员都可以使用同样的工具来分析故障录波数据。本文基于哈尔滨光宇电气自动化有限公司所提供的故障录波数据,结合本文所研发的系统进行实例分析,实现了对该录波数据进行波形重现以及故障特征量分析,最终结果表明,本文设计的基于故障录波数据的变压器保护动作特性分析系统可以有效地诊断变压器故障类型,为变压器的稳定可靠运行提供了保障,也为相关电力企业供配电系统的运行维护提供了技术支持。

参考文献

- [1]邱艳,王鹏飞,孙云.一种基于 35 kV 变电站故障录波数据分析系统的研究与实现[J].电脑知识与技术,2021,17(21):156-157.
- [2]王英豪.基于故障录波数据的变电站继电保护动作正确性分析方法[J].家电维修,2025(10):137-139.
- [3]刘春鹏,王小攀.变压器故障检测与诊断技术研究现状[J].设备管理与维修,2020(17):152-153.
- [4]冯迅,云利军.嵌入式 Qt 实现串口数据读取的事件驱动方法[J].电脑知识与技术,2022,18(31):84-86.
- [5]于静,张伟.跨平台光伏电站数据转发系统设计[J].信息技术与信息化,2022(7):37-42.
- [6]刘艳芳,侯钰龙,李莹洁,等.基于 Qt 的跨平台液漏监测系统设计[J].电子器件,2024,47(1):274-278.

- [7]阴艳超,冯嘉胜,易斌,等.面向流程制造的数字孪生车间可视化监控系统研究[J].系统仿真学报,2024,36(1):120-130.
- [8]范宝华.广播电视高山发射台站自台监控系统智能化改进[J].电视技术,2022,46(9):3.
- [9]段志霞,赵娜,宋洁.基于微积分控制的智能灌溉动态监控系统设计[J].农机化研究,2024(5):206-209,215.
- [10]李海岳.贝叶斯优化辅助分类 GAN 的变压器故障诊断方法[J].电子设计工程,2024,32(7):58-62,67.
- [11]李浩然,余伊伦,王子滔.一种基于卷积神经网络的配电网主站告警窗口的图像识别方法[J].电子器件,2023,46(3):836-840.
- [12]林凌云,陈青,金磊,等.基于知识图谱的变电站告警信息故障知识表示研究与应用[J].电力系统保护与控制,2022,50(12):90-99.
- [13]邵将,刘珂,白雨鑫,等.矿山瓦斯监控界面多目标视觉告警编码形式研究[J].包装工程,2022,43(4):52-59.
- [14]崔小军,徐光平,徐俊,等.基于混合神经网络的锅炉燃烧设备故障智能检测方法[J].自动化技术与应用,2025,44(9):44-48.
- [15]王先磊,钟义安.基于城市轨道交通全自动运行场景的乘客信息系统车地无线网络智能监测技术研究[J].城市轨道交通研究,2023,26(2):103-105.
- [16]杨京渝,严文交,罗隆福,等.风储联合发电系统三站合一智能监控系统设计与实现[J].电力系统保护与控制,2022,50(17):167-177.
- [17]陈昭,梁涛,邓裕华.基于嵌入式阵列摄像机的目标区域信息监控系统设计[J].自动化技术与应用,2025,44(10):164-167.

- [7]郑虹,林晓春.基于 Qt 的嵌入式图形用户界面设计与实现[J].电机与控制应用,2025,52(10):1108-1114.
- [8]霍鹏程,冯国军,唐金锋,等.基于 QT 的 TTE 网络规划配置软件设计[J].微电子学与计算机,2025,42(11):59-65.
- [9]杜影,郑义,石家勇,等.基于 QT 的跨平台数据管理接口设计[J].计算机测量与控制,2025,33(3):213-218.
- [10]朱远胜,张金鑫,韩珊珊.基于 Qt 的电力系统常用数据分析的设计与实现[J].信息技术与信息化,2017(8):52-55.
- [11]张鸿博,熊军华,蔡晓峰.基于高倍过采样与加窗插值 FFT 的电力谐波分析[J].电力系统保护与控制,2024,52(5):105-115.
- [12]程天.基于故障录波数据的继电保护动作特性分析[J].仪器仪表用户,2024,31(8):61-63.
- [13]张小雄.光伏电源接入电网的故障特性及继电保护研究[J].电子元器件与信息技术,2025,9(6):28-30.
- [14]邵芳.基于监督机器学习的配电网电力智能运维检修研究[J].自动化技术与应用,2024,43(11):169-173.
- [15]王磊磊,李明,刘兴华,等.光伏并网对配电网继电保护影响特性分析[J].电气应用,2024,43(9):84-89.
- [16]李强.电力变压器过热区域的智能红外图像定位方法[J].自动化技术与应用,2025,44(12):101-105,158.
- [17]黄露.考虑继电保护动作特性的直流微电网暂态稳定性分析[D].青岛:山东科技大学,2020.
- [18]高宗宝,高国强,黎宏飞,等.一起 500 kV 变压器故障分析及仿真[J].电力科技与环保,2025,41(6):1005-1015.
- [19]刘建锋,董倩雯,田书欣,等.基于 ReliefF-mRMR 漏磁场特征优选和改进 LSSVM 的变压器绕组早期故障诊断[J].电测与仪表,2025,62(11):198-209.
- [20]栾云飞,张禄亮,季天瑶,等.基于直方图和余弦相似度的光伏电站主变压器励磁涌流识别[J].电测与仪表,2025,62(7):181-189.
- [21]王俊俊,姚晖,张波,等.基于故障录波数据的串联电抗器故障特征分析及反演模型研究[J].高压电器,2025,61(7):115-122.