

# 室内变压器有载分接开关吊芯装置故障自动化监测方法

周利兴, 林华斌, 吴盈莹, 楼翔, 郑建吉

(宁波启新电气科技有限公司, 浙江 宁波 315500)

**摘要:** 为了提高室内变压器有载分接开关吊芯装置故障监测的准确性, 结合故障时异常振动特性, 提出室内变压器有载分接开关吊芯装置故障自动化监测方法。构建机械振动信号采集的空间解析式, 提取振动信号的空间特征向量; 计算有载分接开关时的过渡电路电压变化, 获取吊芯装置振动信号的时序特征; 构建装置故障自动监测模型, 归一化处理信号的故障阈值分量; 基于神经网络迭代训练学习, 实现吊芯装置故障自动化监测。实验结果可知: 通过振动信号能量分布可以较准确地区分故障特征, 该方法的故障监测误差小于  $10^{-5}$ , 监测准确性较高。

**关键词:** 室内变压器; 有载分接开关; 吊芯装置; 自动化监测

中图分类号: TP274; TN06 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)03-0171-05

## Automatic Monitoring Method for Fault of Hanging Core Device of Indoor Transformer On-load Tap-changer

ZHOU Li-xing, LIN Hua-bin, WU Ying-ying, LOU Xiang, ZHENG Jian-ji

(Ningbo Qixin Electrical Technology Co., Ltd., Ningbo 315500 China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of fault monitoring for core suspension device of indoor transformer on load tap changer, an automatic fault monitoring method for the core lifting device of indoor transformer on load tap changer is proposed in combination with the abnormal vibration characteristics during the fault. The spatial analytic expression of mechanical vibration signal acquisition is constructed, and the spatial feature vector of vibration signal is extracted. It calculates the voltage change of the transition circuit when the on load tap changer is operating, and obtains the time sequence characteristics of the vibration signal of the core lifting device. The automatic fault monitor model of the device is constructed, and the fault threshold component of the signal is normalized. Based on the iterative training and learning of neural network, the automatic fault monitoring of core lifting device is realized. The experimental results show that the fault characteristics can be accurately distinguished by the energy distribution of vibration signal, the fault monitoring error of this method is less than  $10^{-5}$ , and the monitoring accuracy is high.

**Keywords:** indoor transformer; on load tap changer; core lifting device; automatic monitoring

## 0 引言

室内变压器有载分接开关吊芯装置是电力设施综合检修中的必备检修项目。吊芯装置的控制开关被三面围挡, 其中的一面主要钢构架封板被围堵在装置内侧, 可以被应用于检修的空间很小<sup>[1]</sup>。综合检修模式在空间条件不满足时, 就会直接选择人工拆除钢构架封板。但是大型有载开关芯体重量最多可以达到 100 kg, 在狭小的主变平面上进行故障检修, 高空坠落的危险极大, 一旦检修人员有任何操作不当之处, 就会发生严重的事故, 造成人员伤亡<sup>[2-3]</sup>。因此需要研制一种室内变压器有载分接开关吊芯装置故障自动化监测方法。

文献[4]提出了基于模糊 Petri 网的有载分接开关故

障诊断方法; 文献[5]提出了基于驱动电机电流与振动信号的有载分接开关故障诊断方法。但这些方法没有考虑振动信号的时序特征, 获得故障监测结果准确性不足。

为此, 提出室内变压器有载分接开关吊芯装置故障自动化监测方法。

## 1 有载分接开关吊芯装置故障特征提取

### 1.1 构建机械振动信号采集的空间解析式

在室内变压器的有载分接开关中, 想要得到稳定的故障特征, 就需要采集非平稳状态下的装置机械振动信号, 并将其转换至空间坐标系中, 提取振动信号的空间特征向量。

构建三维空间坐标系, 根据延迟坐标法, 可以构建一维振动空间的时间序列  $\{f(m)\}$ , 通过时间序列获得重构的空间向量, 并求解状态向量:

\*基金项目: 国家电网公司科技项目 (5804DY170912)

收稿日期: 2023-09-06

$$F_p(m) = \frac{f(m) + f(m+1) + \dots + f(m+p)}{m} \quad (1)$$

式中,  $F_p(m)$ 表示一维时间序列在  $p$  个空间维度下的状态向量;  $f(m)$ 表示最初的振动序列,  $f(m+1)$ 表示第一个维度,  $f(m+p)$ 表示第  $p$  个维度;  $m$ 表示向量的嵌入维数<sup>[6]</sup>。结合该状态向量, 可以提取指定区域内的信号特征。以三维特征为例, 指定球形区域的坐标为  $(x_i, y_i, z_i)$ , 则其三维坐标的坐标值分别为:

$$\begin{cases} x_i = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{n-1} x(m) \\ y_i = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{n-1} y(m) \\ z_i = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{n-1} z(m) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $x_i, y_i, z_i$ 分别表示三维坐标区域内  $x$ 轴、 $y$ 轴、 $z$ 轴的坐标值;  $N_i$ 表示振动信号在区域内采样点的数量;  $x(m), y(m)$ 和  $z(m)$ 则分别表示在不同坐标轴上的采样值<sup>[7]</sup>。在该球面下建立空间坐标解析式, 可以得到:

$$x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 = R_f^2 \quad (3)$$

式中,  $R_f$ 表示球面半径。通过以上公式, 可以提取完整的室内变压器有载分接开关信号空间坐标, 并建立相应的空间坐标系。

### 1.2 提取吊芯装置时序特征

有载分接开关开启和关闭时的过渡电路负载电流具有时序特征, 因此监测吊芯装置故障, 需要提取吊芯装置振动信号的时序特征。分析有载分接开关切换时的过渡电路时序, 其结构如图1所示。

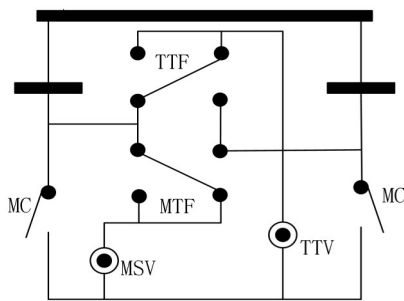


图1 有载分接开关切换时的过渡电路时序结构

在图1中, 共有五个切换节点, 分别为MC、TTF、MTF、MSV、TTV, 结合这些切换节点, 得到时序切换的步骤。在步骤1中, 需要保证左侧的MC节点为流通状态, 此时载流状态正常。在步骤2中, 断开该节点, 并保证电流经过MTF和MSV。步骤3需要断开MSV的过渡电路, 使其能够恢复到原有的电压值。此时恢复电压  $U_{hf}$  的计算公式为:

$$U_{hf} = I_f \times R_d \quad (4)$$

式中,  $I_f$ 表示有载分接开关过渡电路的负载电流;  $R_d$ 表示

负载电阻的阻值<sup>[8]</sup>。在步骤4中转换MTF的接触点, 并在步骤5内闭合MSV, 令其呈现出环流的路线。循环电流  $I_{xh}$  的计算公式为:

$$I_{xh} = \frac{U_h}{R_d} \quad (5)$$

式中,  $U_h$ 表示环路电压。当  $U_h = U_{hf}$ 时, 步骤6可以保证过渡断流转换时序的工作能够顺利完成, 此时TTV处于断开状态。步骤7和步骤8分别令TTV闭合、TTF开始转换时序, 负载电流也开始通过MSV和MTF。此时吊芯装置内部的时序, 完全以有载分接开关的过渡电路为核心<sup>[9]</sup>。根据上述吊芯装置有载分接开关切换不同步骤的过渡电路电压变化, 可知在主要支路的负载电流内, 过渡电压与循环电流成正比。基于提取的吊芯装置信号的时空特征进行装置故障的自动化监测。

## 2 设计装置故障自动化监测算法

### 2.1 建立装置故障自动监测模型

构建故障监测模型, 确定故障阈值。将吊芯装置的输出能量分为两类, 一类是机械状态正常(非故障状态)对应的期望值, 一类是机械故障状态的能量值, 使用能量分布的方式可以对机械故障状态进行进一步区分, 诊断出具体故障类型。

设置状态正常时的期望输出类型为  $A_1$ , 故障的输出类型为  $A_2 \sim A_n$ , 由此确定有载分接开关的机械状态输入量与振动信号之间的映射关系为  $A_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{i5}]$ 。通过上文提取的振动信号时间和空间特征, 可以得到振动特征向量。选择模型内的故障样本, 设置故障能量阈值, 并设置神经网络输入层节点、输出层节点的数量, 同时计算隐含层节点的数量, 构建故障监测模型。

分解去噪阈值的信号分量, 同时保留其前六个包络结构, 可以得到有载分接开关振动故障信号的每一段能量值:

$$f(q) = \int_{t_1}^{t_0} |F_i(t)|^2 dt \quad (6)$$

式中,  $f(q)$ 表示某一段有载分接开关吊芯装置振动信号的能量值;  $t_0$ 和  $t_1$ 分别表示能量值分解前后的时间段;  $F_i(t)$ 表示每一个分段的故障振动信号。据此对各个分段的能量进行归一化处理, 可以得到:

$$m(q) = \frac{F(q)}{\sum_{i=1}^n F(q)} \quad (7)$$

式中,  $m(q)$ 表示经过归一化处理后的分段故障能量熵;  $F(q)$ 表示振动故障信号在该分量下的能量值。

由此完成装置故障自动监测模型的构建, 利用该模型实现故障自动化监测。

### 2.2 故障自动化监测实现

结合上文中的方法,可以对室内变压器有载分接开关的吊芯装置进行故障自动化监测,算法流程如图2所示。

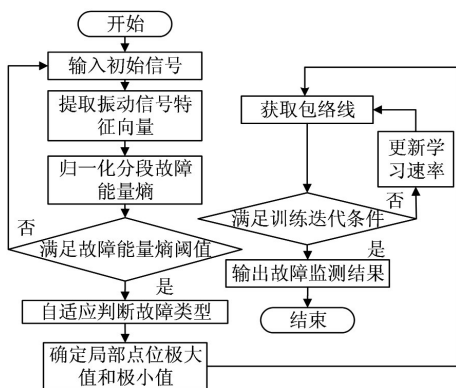


图2 算法流程

如图2所示,将输入的吊芯装置的振动初始信号转换到空间坐标系中,提取信号的空间特征,然后计算时序电压,获得振动信号的时序特征;根据信号特征,基于神经网络构建故障监测模型,计算不同故障信号的能量熵,设定判断阈值,通过不断自动化迭代学习,实现故障的自动化监测。

通过局部点位的极大值以及极小值,可以更好地获取分解信号在噪声作用下的包络线,同时判断包络局部故障分量是否满足训练迭代条件<sup>[10]</sup>。

$$\begin{cases} f_k(t) = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ki}(t)}{M_k} \\ u_k(t) = \frac{\sum_{i=1}^n u_{ki}(t)}{M_k} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $f_k(t)$ 和 $u_k(t)$ 分别表示有载分接开关振动信号分量局部点位的极大值与极小值; $f_{ki}(t)$ 和 $u_{ki}(t)$ 则分别表示第*i*个信号分量; $M_k$ 表示信号分量的个数。当 $f_k(t)$ 小于 $u_k(t)$ 时,表示该训练迭代条件得到满足,可以输出故障监测结果<sup>[11-12]</sup>;否则更新学习速率,继续训练。由此完成室内变压器有载分接开关吊芯装置的故障自动化监测方法。

### 3 实验研究

#### 3.1 装置结构

文章研究的室内变压器有载开关吊芯装置,如图3所示,以实现室内变压器有载开关吊芯的自动故障监测。本实验以测试故障监测结果的准确性为目标,判断其是否能够在信号能量超出故障阈值时自动对检修的工作人员发出监测警报。

在如图3所示的装置示意图中,共有11个主要的组成部分。其中,组成结构1表示滑轮组,用于调整装置的前进方向;组成结构2为钢丝绳,其中的一段固定在吊芯

上方,另一端与滑轮组相连;组成结构3为上支撑臂,组成结构6为下支撑臂,组成结构4为上下支撑臂之间的固定螺栓;组成结构5为电动绞盘,内部包含自锁和带挂钩装置;组成结构7为千斤顶的固定螺栓,结构8为千斤顶,其中安装了刹车系统,用于对超出限定值的动作进行制定与调整;组成结构9为装置的底座,是整个装置的受力固定装置;结构10为旋转螺丝,结构11为横梁以及固定螺栓,其用于对上下支撑臂与底座之间的联通。

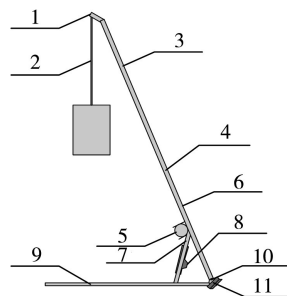
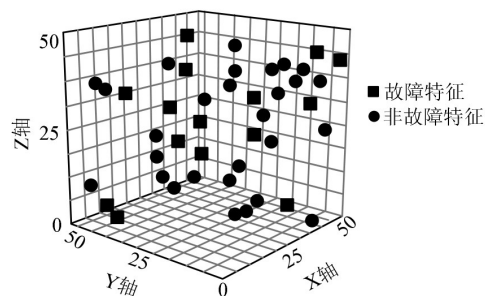


图3 装置示意图

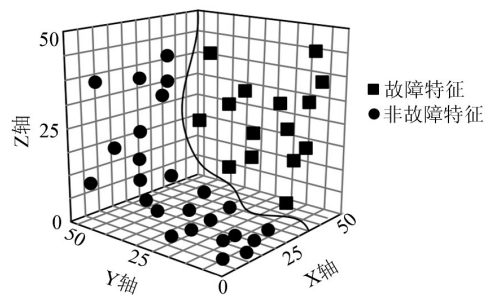
在装置的1、4、5、8、9上安装振动传感器,采集非平稳状态下的装置机械振动信号,采样率为100 Hz/ms。设置训练集和测试集,采用Python编程语言将训练集数据导入到MATLAB配套神经网络工具箱中,在Tensorflow深度学习框架上进行神经网络故障监测模型训练,将训练好的模型通过更新学习速率进行微调,再使用测试集完成测试。

#### 3.2 实验结果分析

##### 3.2.1 装置故障特征提取效果测试



(a) 提取特征前



(b) 提取特征后

图4 特征分类提取对比结果

在三维空间坐标系中测试本文方法的装置信号时空故障特征提取效果,将故障时空分为非故障状态特征和故障状态特征,特征提取结果如图4所示。

对比图4(a)和图4(b)可知,未特征提取分类前,故障信号故障特征和非故障特征混淆在一起,经过特征进行提取后,信号的故障特征和非故障特征完成了分类,使得各类装置信号更具有可分性,特征提取效果更好。

### 3.2.2 装置故障类型监测效果测试

该装置的机械故障具有螺栓弱化、支撑臂变形、绞盘磨损、钢丝绳断裂四种类型,故障监测模型的参数输出量如表1。

表1 模型的输出量

状态	期望输出量				
	A1	A2	A3	A4	A5
状态正常	1	0	0	0	0
螺栓弱化	0	1	0	0	0
支撑臂变形	0	0	1	0	0
绞盘磨损	0	0	0	1	0
钢丝绳断裂	0	0	0	0	1

根据式(7),可以得到以上模型内五个输出量在不同

时间序列号下的熵值,如图5所示。

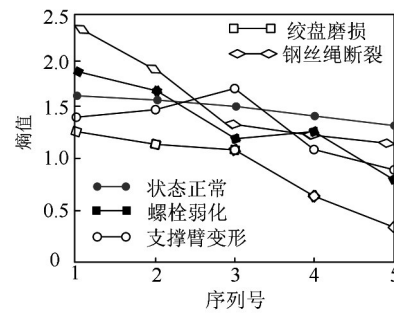
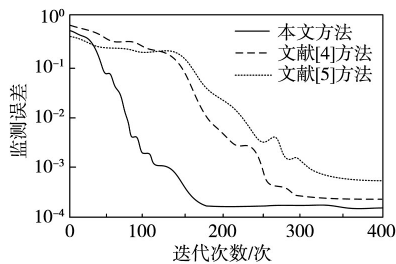
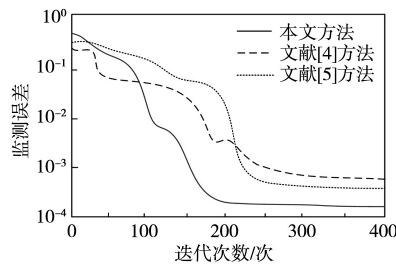


图5 不同机械状态下振动信号能量分布

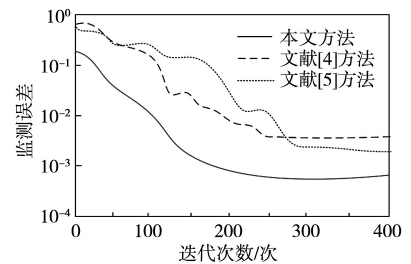
由图5中可以明确得知,随着信号时间序列号由1增加至5,各个输出类型的熵值呈现出减小的趋势。其中,状态正常条件下,熵值的减小趋势为一条直线。螺栓弱化条件下,熵值在序列号3与序列号4之间有一个短暂的上升。支撑臂变形条件下,熵值小幅度增加,直至序列号3时才开始下降。绞盘磨损时,熵值虽然在每一个序列内均降低,但是其降低的趋势大小不一。钢丝绳断裂条件下,熵值先是存在较大的波动幅度,后趋势骤然减缓。由此可见,使用能量分布的方式可以对机械故障状态进行区分。



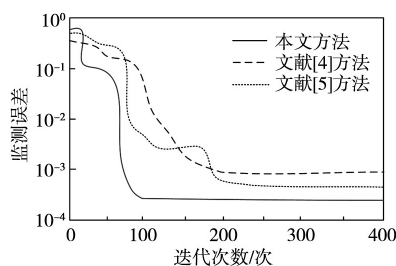
(a) 状态正常



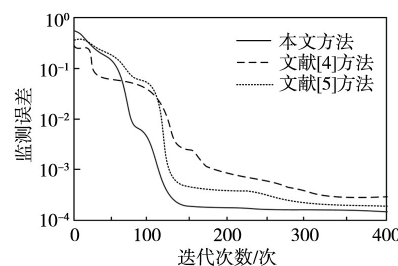
(b) 螺栓弱化



(c) 支撑臂变形



(d) 绞盘磨损



(e) 钢丝绳断裂

图6 不同算法监测误差

根据故障能量分布情况应用本文方法对故障分类,实现故障监测,将文献[4]方法、文献[5]方法作为对比方法。测试三种方法的故障监测误差,误差越小,证明该方法的故障类型分类精度越高,在超出故障阈值时故障类型监测的准确率越大。测试结果如图6所示。

如图6所示,与其他方法相比,本文方法的迭代次数更少即获得最优误差。本文方法所得到的监测误差均小于 $10^{-5}$ ,明显低于其他两种方法,可见该方法的监测精

度较好。

## 4 结束语

本文设计了室内变压器有载分接开关吊芯装置故障自动化监测方法。该方法在定点区域空间解析式的辅助下,可以提取吊芯装置振动信号的时空特征,通过神经网络迭代训练学习,实现吊芯装置故障自动化监测。实验内利用本文方法对状态正常、螺栓弱化、支撑臂变形、绞

盘磨损、钢丝绳断裂等不同故障特征进行分析。实验结果显示,该算法的监测误差优于其他两种算法,可以准确监测室内变压器有载分接开关吊芯装置故障。

#### 参考文献:

- [1] 马勇,王同磊,吴鹏,等.换流变压器真空有载分接开关动力学模拟及工作一致性研究[J].高压电器,2022,58(7):199-206.
- [2] Taha W, Azer P, Callegaro A D, et al. Multiphase. Tra-  
ction. Inverters: State-of-the-Art Review and Future Trends [J]. IEEE Access, 2022(10):4580-4599.
- [3] Thango. B. A. Application. of. the Analysis. Of. Variance (ANOVA) in. the Interpretation of Power Transformer Faults [J]. Energies, 2022, 15(19):1-17.
- [4] 徐海军,李彦斌,王进,等.基于模糊Petri网的有载分接开关故障诊断方法研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(5):222-228.
- [5] 马勇,王树刚,王同磊,等.基于驱动电机电流与振动信号的有载分接开关故障诊断方法[J].高压电器,2022,58(5):202-210.
- [6] 卢士达,刘文意,王亮,等.基于机器学习的操作系统故障自动监测方法[J].自动化技术与应用,2022,41(1):14-17.
- [7] 高树国,王丽丽,田源,等.基于振动时频信号灰度共生矩阵

的有载分接开关触头状态检测方法研究[J].电工电能新技术,2022,41(1):69-77.

- [8] 朱志伟,史慧革,田慧敏,等.基于多态多值决策图的有载分接开关可靠性评估[J].轻工学报,2021,36(4):118-124.
- [9] 刘志远,缪辉,于晓军,等.基于神经网络响应面模型的有载分接开关弹簧储能故障的识别[J].电力科学与技术学报,2021,36(3):203-210.
- [10] 马宏忠,严岩.基于混沌理论和GOA-K-means算法的有载分接开关状态特征分析计算方法[J].电工技术学报,2021,36(7):1399-1406.
- [11] 蔡宇琦,方瑞明,彭长青,等.基于ANHGA-VMD和耦合隐马尔可夫模型的有载分接开关机械故障诊断[J].高电压技术,2021,47(11):3949-3959.
- [12] Hu K, Liu Z, Tasiu I A, et al. Fault Diagnosis and Tolerance With Low Torque Ripple for Open-Switch Fault of IM Drives[J]. IEEE transactions on trans portation electri-  
fication, 2021, 7(1):133-146.

作者简介:周利兴(1981-),男,大专,助理工程师,研究方向:变压器运行与维护。

(上接第167页)

- [11] 李世明,卢建刚,王茜,等.外网扩展电压源支路Ward等值模型及其在状态估计中的应用[J].电力系统保护与控制,2018,46(15):76-84.
- [12] 李雪,李雯婷,杜大军,等.拒绝服务攻击下基于UKF的智能电网动态状态估计研究[J].自动化学报,2019,45(1):120-131.
- [13] 卢丹,许长清,张琳娟,等.基于博弈赋权和灰色关联投影的电网综合风险评估方法[J].中国安全生产科学技术,2019,15(9):170-175.
- [14] 周霞,杨洲,倪明,等.考虑信息-物理组合预想故障筛选

的配电网CPS安全性评估[J].中国电力,2020,53(1):45-53.

- [15] 彭寒梅,郭颖聪,昌玲,等.基于系统短期时序状态转移抽样法的孤岛运行微电网可靠性评估[J].电工电能新技术,2018,37(1):69-77.

作者简介:王孔耀(1982-),男,本科,高级工程师,研究方向:电力建设工程管理。

(上接第170页)

### 3 结束语

为了适应现代新型技术以及产品要适应新时代下的新要求,需要提升变电站电气设备热故障的诊断技术水平。目前,我国变电站基本都是无人值守的状态,采用远程操控的模式,需要红外技术实时对各种电气设备进行热故障的辨识。这不但可以降低因热故障造成安全事故的概率,还在一定程度上提高了巡检的精度。

#### 参考文献:

- [1] 陈浩,余兴建.变电站电力设备绝缘外表面激光除锈系统设计[J].自动化技术与应用,2021,40(10):29-33.
- [2] Jurisic B, Filipovic-Grcic B, Zupan T, et al. Statistical analysis of non-standard overvoltage waveforms measured at 220 kV terminals of a power transformer[J]. Electric Pow-  
er Systems Research, 2021, 197(1):107-118.
- [3] 尹子会,范晓丹,赵振兵,等.融合边缘计算和改进Faster R-CNN的变电站设备典型视觉缺陷检测系统[J].中国科技论文,2021,16(3):343-348.
- [4] 杜珂,苏淑敏,于树海,等.基于视频监控的变电站巡检巡视

系统设计[J].机械与电子,2022,40(6):52-56.

- [5] 李俊卿,陈雅婷,李斯璇.机器算法在电气设备故障预警及诊断中的应用[J].科学技术与工程,2020,20(9):3370-3377.
- [6] 陈图南,马凤翔,袁小芳,等.SF<sub>6</sub>气体绝缘电气设备故障分解物检测的多组分交叉干扰及校正算法综述[J].电工电能新技术,2021,40(1):43-54.
- [7] 琚泽立,金鸿鹏,徐方植,等.基于轻量化网络的变电站缺陷图片检测算法[J].电网与清洁能源,2020,36(8):43-49.
- [8] 罗林根,盛戈峰,江秀臣,等.基于MPSO-MLE的变电站设备异常声源定位方法[J].高电压技术,2020,46(9):3145-3153.
- [9] 刘青,常丁戈,邓军波.用于变电站站域局部放电特高频测向的空间谱估计算法优化选择[J].电工技术学报,2020,35(16):3551-3560.
- [10] 郝精一,赵有斌.航空飞行器发电机电气附件电阻绝缘测试算法[J].计算机仿真,2020,37(10):32-36.
- [11] 任宇路,刘毅敏,节连彬,等.基于智能视觉的变电站内人员异常行为辅助监控系统[J].自动化技术与应用,2024,43(1):66-70,107.
- [12] 林培玲,黄龙杰,刘俊英,等.基于VR技术的智能变电站运行仿真培训系统[J].信息技术,2022,46(1):107-113.

作者简介:汪笑妮(2001-),女,硕士研究生,研究方向:电气工程自动化。