

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)04-0164-05

# 基于自适应阈值选取算法的配电网馈线故障诊断优化

欧朱建, 黄冬冬, 吴夕楠, 顾彬仕, 钱凌寒

(国网南通供电公司, 江苏 南通 226000)

**摘要:**为保障电力系统安全稳定运行,尤其在医学检验管理系统等对供电可靠性要求较高的应用场景中,需要对配电网馈线故障进行准确诊断。针对传统馈线故障诊断方法中阈值选取依赖经验、抗噪声能力不足、定位精度受限等问题,提出一种基于自适应阈值选取算法的配电网馈线故障诊断优化方法。通过对自适应阈值选取算法进行正则化改进,使阈值能够随故障信号特征和噪声水平自适应调整,并将其嵌入配电网馈线故障诊断模型中,以提升故障特征判别的稳定性与准确性。通过噪声扰动实验和实际配电网馈线应用分析对所提方法进行验证。结果表明在自适应阈值选取算法作用下,各对比模型的图像相关系数差值均小于0.1,显示出较强的抗噪声能力。在实际配电网馈线应用实验中,研究所提出的优化模型在4种典型电路条件下的故障定位误差分别为0.05%、0.34%、0.37%和0.28%,均低于对比算法下的故障定位误差。研究表明,该方法能够有效提高配电网馈线故障诊断精度与运行稳定性,具有一定的工程应用价值。

**关键词:**自适应阈值选取算法;馈线;故障定位诊断;配电网;电力系统稳定性;医学检验管理

中图分类号: TP277.2; TN76

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)04-0164-05

## Optimization of fault diagnosis for distribution network feeder based on adaptive threshold selection algorithm

OU Zhujian, HUANG Dongdong, WU Xinan, GU Binshi, QIAN Linghan

(State Grid Nantong Power Supply Company, Nantong 226000, Jiangsu, China)

**Abstract:** The accurate diagnosis of feeder faults in distribution networks is of great significance for ensuring the safe and stable operation of power systems, especially in application scenarios such as medical laboratory management systems that require high reliability of power supply. A distribution network feeder fault diagnosis optimization method based on adaptive threshold selection algorithm is proposed to address the problems of threshold selection relying on experience, insufficient noise resistance, and limited positioning accuracy in traditional feeder fault diagnosis methods. By improving the regularization of the adaptive threshold selection algorithm, the threshold can be adaptively adjusted according to the characteristics of fault signals and noise levels, and embedded into the distribution feeder fault diagnosis model to enhance the stability and accuracy of fault feature discrimination. The proposed method is validated through noise disturbance experiments and analysis of actual distribution network feeder applications. The results indicate that under the influence of the adaptive threshold selection algorithm, the difference in image correlation coefficients between each comparison model is less than 0.1, demonstrating strong noise resistance. In practical distribution network feeder application experiments, the optimization model proposed by the research institute has fault localization errors of 0.05%, 0.34%, 0.37%, and 0.28% under four typical circuit conditions, all of which are lower than the fault localization errors under the comparative algorithm. Research shows that this method can effectively improve the accuracy of fault diagnosis and operational stability of distribution network feeders, and has certain engineering application value.

**Keywords:** adaptive threshold selection algorithm; feeder; fault location diagnosis; distribution network; power system stability; medical laboratory management

如今城市不断发展进步,配电网逐渐成为现代社会建设必不可少的一部分。但随着城市建设越来越丰富,配电网规模逐渐扩大,因此造成电力负荷的增加,引发许多配电网故障问题<sup>[1-2]</sup>。如今城市医疗机构的发展进步逐渐形成了独有的一套医学检验管理系统,通过城市或者区域内的医疗资源共享,能够实现医疗资源的利用最大化和配

置合理化<sup>[3]</sup>。医学检验管理系统是基于电力系统建立的,若配电网发生故障会导致设备损坏,影响电力的正常供应,造成能源的浪费等负面影响。传统故障定位方法主要根据保护装置的反馈和电气测量数据来判断并定位配电网中的故障位置,但当多个故障同时发生时可能响应较慢且准确率较低<sup>[4-6]</sup>。自适应阈值选取算法(adaptive

收稿日期:2024-06-08;录用日期:2024-07-08

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5108-202218280A-2-396-XG)

作者简介:欧朱建(1989—),男,博士,高级工程师,研究方向:配电网运维技术。

引用本文:欧朱建,黄冬冬,吴夕楠,等.基于自适应阈值选取算法的配电网馈线故障诊断优化[J].自动化技术与应用,2026,45(4):164-168.(OU Zhujian, HUANG Dongdong, WU Xinan, et al. Optimization of fault diagnosis for distribution network feeder automation based on adaptive threshold selection algorithm[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(4):164-168.)

threshold selection algorithm, ATSA) 是一种对图像不同区域,能够自适应计算不同的阈值的图像处理方法<sup>[7-8]</sup>。目前针对配电网馈线故障诊断模型的研究大多采用大数据分析或者智能算法进行优化,其中宋强为优化配电网低电压变化的预测精度,在大数据分析的基础上结合神经网络建立低电压势态变化预测模型,提高了传统预测模型的精度<sup>[9]</sup>。Rahangdale 等提出一种基于离散小波和集成回归树的配电网故障定位方法,通过馈线仿真测试验证该方法具有较低的计算负担和内存需求<sup>[10]</sup>。基于此背景,研究创新性将 ATSA 与配电网馈线技术相结合,以此优化配电网故障诊断模型,目的在于为医疗机构检验系统提供电力保障,实现医疗管理系统的高效运行。

## 1 配电网馈线故障诊断优化模型

### 1.1 配电网馈线故障诊断模型搭建

配电网馈线技术是通过结合信息通信技术与先进电力检测设备,完成配电网中故障发生区段的定位检测以及处理<sup>[10]</sup>。故障定位技术主要依靠馈线终端单元(feeder

terminal unit, FTU) 实现, FTU 不仅能够实时获取线路电压、功率、开关位置等信息,还可以将信息上传至配电站并根据主站运行需求进行协调<sup>[11]</sup>。当配电网中有故障发生时, FTU 能够采集到当下各线路的电压、电流等信息,判断是否发生异常。然后配电站可以根据收集到的故障数据判断故障位置,采取相应的故障定位方法,配电网馈线流程如图 1 所示。

图 1 中,当配电网馈线发生瞬时短路故障时,电路开关会自动跳闸以保护其他区段的线路不受到损害,然后重新合上恢复电力供应。若电路发生永久性的短路故障,电路开关会跳闸,此时当故障节点上游的 FTU 检测到故障电流时,会触发警报并向主站发送故障信息,而由于电流短路,所以故障节点下游的 FTU 不会检测到短路电流。主站在收到故障检测信息后就进行故障位置的定位判断,并在工作站上显示故障位置和相关信息。为保证电力系统的可靠性和安全性,研究基于此技术搭建配电网馈线故障诊断模型。设配电网范围内的开关节点数量为  $N$ , 配电网表征矩阵为  $D$ , 表达式如式(1)所示。

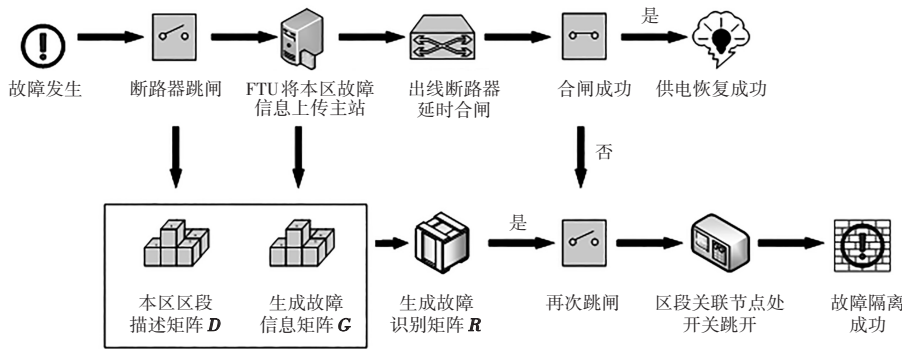


图 1 配电网馈线流程

Fig. 1 Network feeder operation process

$$D = [d_{ij}]_{N \times N}, d_{ij} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $i$  和  $j$  表示节点,  $i, j \in (1, 2, \dots, N)$ 。  $d_{ij}$  表示  $D$  中包含的元素, 当  $d_{ij}$  取值为 0 时,  $i$  和  $j$  不相邻; 当  $d_{ij}$  取值为 1 时,  $i$  和  $j$  相邻。设故障信息矩阵为  $G$ , 表达式如式(2)所示。

$$G = [g_{ij}]_{N \times N} \quad (2)$$

式中,  $g_{ij}$  表示矩阵  $G$  中的元素, 此时  $i = j$ 。当节点  $i$  发生故障时,  $g_{ij}$  取值为 0, 反之  $g_{ij}$  取值为 1。除上述两种情况外,  $g_{ij}$  取值均为 0。设置故障判定矩阵为  $P$ , 表达式如式(3)所示<sup>[12]</sup>。

$$P = D \cdot G \quad (3)$$

式中, 当  $P = 0$  时, 说明线路上的某个区域发生了故障; 当  $P = 1$  时, 则对判定故障矩阵元素  $p_{ij}$  进行计算。若  $p_{ij} = 1$  则说明节点  $i$  到节点  $j$  之间存在故障线路。利用故障指示器检测馈线上的故障发生的节点, 如图 2 所示。

图 2 中, 将故障指示器放置在配电网中所有的馈线分支上, 通过对每个节点与故障指示器所在区段的各单元进行分类后, 在支路上生成单元邻接示意图来反映各单元间的关系, 各单元成立条件如式(4)所示。

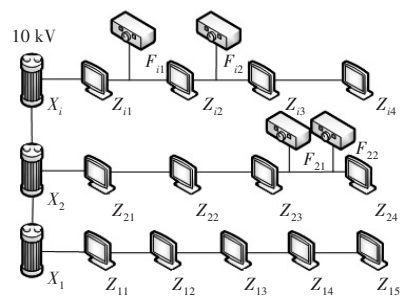


图 2 馈线单元邻接关系示意图

Fig. 2 Adjacency representation of feeder units

$$\begin{cases} \forall Z_{ij} \in X_i \\ \forall F_{ij} \in X_i \\ \exists F_{ij} \in Z_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $X_i$  表示馈线,  $i = 1, 2, \dots, N$ ,  $Z_{ij}$  表示智能终端,  $F_{ij}$  表示故障指示器。基于模型中的  $P$  和单元邻接示意图, 通过对比节点  $i$  和节点  $j$  区段上的电流确定故障位置, 电流大的区段为故障可能发生的节点。一般故障定位模型会通过结合线路的规划情况和设备状态信息来判断故障的所处位置, 同时收集断路器跳闸和继电器动作的信息并对比

故障前后的电流和电压变化等。

## 1.2 配电网故障诊断优化模型

ATSA 是一种图像处理技术,通过将图像的局部阈值替换为全局阈值进行图像计算,适用于颜色差异不明显的图片<sup>[13]</sup>。将 ATSA 与配电网馈线故障诊断模型结合,可以根据图像不同区域的亮度计算局部阈值,使得配电网不同区域能够自适应地计算不同的阈值。通过特征点提取不仅可以对图像中的高维度信息进行降维,还可以对图像中的代表性区域进行描述。能够在未知环境中完成图像的建立和定位,并加快图像信息的处理效率<sup>[14]</sup>。在配电网馈线故障诊断模型研究中主要针对故障区段区别较小的节点进行计算,对于不同的模型需要选取阈值参数,研究使用一种自适应阈值求解,参数表达式如式(5)所示。

$$g = S_A [g_k + S^T(z - Sg_k)] \quad (5)$$

式中,  $g$  为电导率解,  $k$  表示迭代次数,  $g_k$  表示第  $k$  次迭代时的电导率解,  $z$  表示故障前后电压测量值,  $S$  表示基础阈值算子,  $S^T$  表示  $S$  的转置,  $S_A$  表示自适应阈值函数。自适应阈值求解过程如式(6)所示。

$$S_A(x) = \begin{cases} x - 0.5 \operatorname{sgn}(x) \frac{\rho^b}{|x|^{b-1}}, & |x| > \rho \\ 0.5 \operatorname{sgn}(x) \frac{|x|^{b-1}}{\rho^b}, & |x| \leq \rho \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\rho$  表示自适应因子,  $b$  为调节阈值参数,可以调节阈值对解的衰减程度,  $x$  为函数变量。由于需要根据算法经验来选取固定阈值,在此引入自适应阈值,弥补这一短板,表达式如式(7)所示。

$$\rho = 0.6 \cdot \lambda \left(1 + \frac{n_k}{N}\right) \quad (7)$$

式中,  $\lambda$  表示所选取的固定阈值的参数,  $N$  表示解向量所包含的元素数量,  $n_k$  表示第  $k$  次迭代解向量中非零元素的个数。迭代初始解、阈值参数和初始预估稀疏度满足条件如式(8)所示。

$$\begin{cases} g_0 = S^T z \\ \lambda = \frac{\max(S^T z)}{m} \\ n_0 = \frac{N}{5} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $g_0$  表示迭代初始解,  $n_0$  表示初始预估稀疏度。对自适应阈值求解过后,设角点中心为  $p$ ,采用一个固定的阈值作为标准对  $p$  进行求解,并与周围所有像素值的灰度值进行比较,灰度值计算过程如式(9)所示。

$$\mu_{I_{w \cdot h}} = \frac{1}{w \cdot h} \sum_{I_{w \cdot h}} I(x, y) \quad (9)$$

式中,  $\mu_{I_{w \cdot h}}$  表示  $p$  周围的灰度均值,  $h$  表示区域像素高度,  $w$  表示区域像素宽度,  $I(x, y)$  表示每个像素点的灰度值。

$\mu_{I_{w \cdot h}}$  与  $I(x, y)$  的差值与差值平方和如式(10)所示。

$$\begin{cases} \varepsilon = I(x, y) - \mu_{I_{w \cdot h}} \\ \xi_i = (I(x, y) - \mu_{I_{w \cdot h}})^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\varepsilon$  表示差值,  $\xi_i$  表示差值平方和,像素点灰度与  $\mu_{I_{w \cdot h}}$  的像素分布概率、图像待提取区域的灰度对比度如式(11)所示。

$$\begin{cases} P' = P'_\varepsilon(i, j) \\ G' = \sum_\varepsilon P' \xi_i \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $P'$  表示分布概率,  $G'$  表示灰度对比度。自适应阈值选取算法流程如图 2 所示。

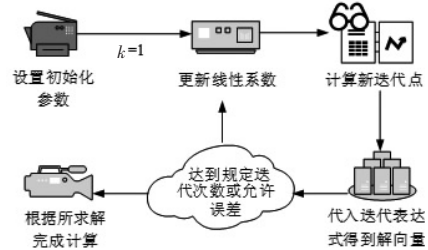


图 3 自适应阈值选取算法流程

Fig. 3 Flowchart of the adaptive threshold selection algorithm

图 3 中,首先对初始参数进行设置,使  $k=1$  然后进行线性系数的更新,通过代入表达式计算新的迭代点得到新的解向量。若达到规定次数或者达到允许误差则输出所取得解并完成成像,结束算法。反之则回到第二步继续更新线性系数直到输出解满足条件为止。最后基于此算法结合配电网馈线故障诊断模型完成优化。

## 2 配电网故障诊断优化效果

### 2.1 算法对比性能测试

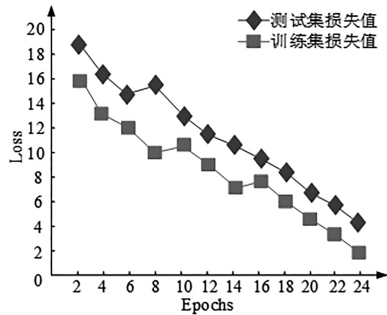
为验证 ATSA 的效果,研究使用 Windows 10 操作系统, Intel(R) Core(TM) i5 -9400F CPU 处理器、Pycharm 集成开发工具以及 PyTorch 搭建实验环境进行仿真对比实验,采用损失值和图像相关系数 (correlation coefficient, CORR) 为指标评估训练模型性能。为避免算法出现拟合,在测试前对算法执行正则化,结果如图 4 所示。

图 4(a) 中 Dropout 值为 0,训练集和测试集曲线变化较为振荡,且训练集上的损失函数低于测试集上的损失函数,说明该算法出现过拟合的情况。图 4(b) 中 Dropout 值为 0.4,训练集和测试集曲线变化较为平稳,且损失函数相差不大稳步下降,说明该算法训练效果较好地缓解了算法训练过程中的过拟合现象。对比可知,采用 Dropout 正则化的算法比不采用 Dropout 正则化的算法损失值更低,且指标下降平稳,收敛速度较快。由于实际测量电压数据时会存在噪声,为验证基于 ATSA 的配电网馈线故障诊断优化模型的抗干扰性。实验加入高斯白噪声,采用 OTSU 阈值分割法、二维 OTSU 自适应阈值算法与 ATSA 设置 3 种模型进行对比 CORR, CORR 值越接近于 1,表明算法效果越好,结果如图 4 所示。

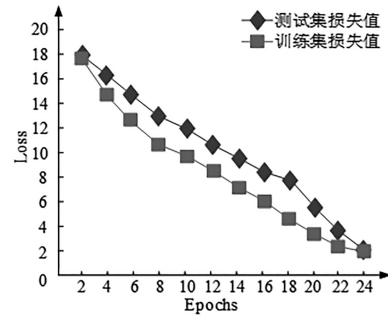
图 5(a) 为 OTSU 阈值分割法在 3 种噪声下对 1~5 五种类型的模型的 CORR 值,其中除模型 2 与模型 4 之外,其余 3 个模型在 0.3% 和 6% 噪声影响下 CORR 值相差 0.01~0.21 之间,且 5 个模型中最高值为 0.87。图 5(b) 为二维 OTSU 自适应阈值算法在 0.3% 和 6% 噪声影响下 5

种模型的 CORR 值,5 种模型在不同程度的噪声影响下 CORR 值差别较大,比如模型 1 中 0、3% 和 6% 噪声的 CORR 值分别为 0.98、0.88 和 0.74,分别相差 0.1 和 0.14,说明不同程度的噪声对算法的影响较大。图 5(c) 为 ATSA 在 3 种噪声下对五种模型的 CORR 值对比,5 种模型在 3 种程度的噪声下 CORR 值相差较小,其中差别最

大的是模型 2 和模型 5。模型 2 中 0、3% 和 6% 噪声影响下 CORR 值分别为 0.89、0.92 和 0.96,差值均为 0.03。模型 5 的 3 种 CORR 值分别为 0.97、1.0 和 0.91,该模型在 3% 和 6% 的影响下差值最大为 0.09。总体来说 ATSA 在 3 种噪声下的 CORR 值整体最接近 1,且差值在 0~0.09 之间,表明该算法抗干扰性最强,效果最好。



(a) 未采用 Dropout 正则化的损失训练曲线



(b) 采用 Dropout 正则化的损失训练曲线

图 4 采用 Dropout 正则化前后的损失训练曲线对比

Fig. 4 Comparison of training loss curves with and without dropout regularization

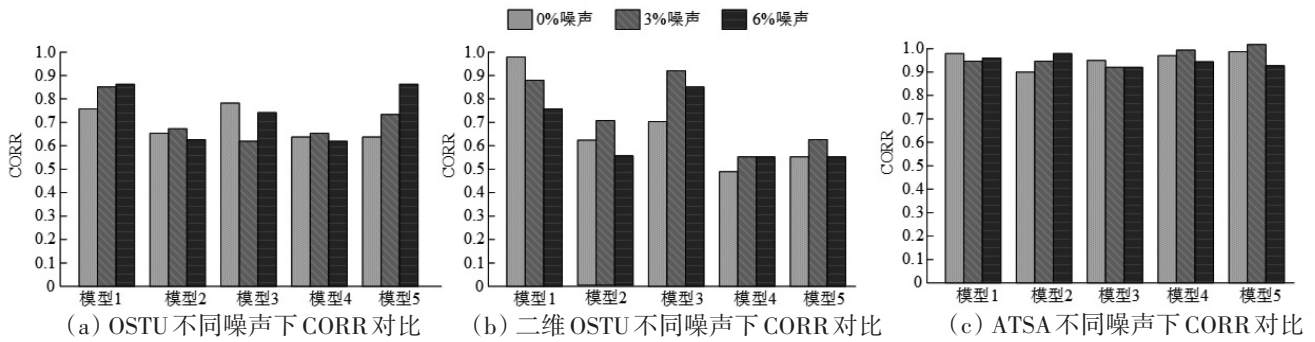


图 5 噪声实验结果

Fig. 5 Results of noise experiments

## 2.2 应用效果分析

针对医疗机构信息化程度高,实现区域医疗机构间的信息共享,为研究配电网故障诊断与定位技术在医疗检验管理系统应用中的效果。在验证了 ATSA 性能的基础上,研究进一步对融合 ATSA 的配电网馈线故障诊断模型进行实际应用性能测试。首先是 3 种算法对模型的故障定位延时对比,设置测试数量为 600,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,基于 ATSA 优化的配电网馈线故障诊断模型测试过程中的延时曲线变化较平稳,位置始终处于 OTSU 和二维 OTSU 模型的故障定位延时曲线之下。OTSU 和二维 OTSU 的延时曲线随着测试数量的增大呈上升趋势,意味着随着模型测试数量的累积,OTSU 和二维 OTSU 优化的模型故障定位延时会越来越久,其中二维 OTSU 延时曲线斜率更高,上升趋势最明显,定位效果最差。基于 ATSA 优化的模型故障定位延时受测试数量多少的影响较小,具有更好的定位效果。最后对基于 ATSA 的配电网馈线故障诊断优化模型进行实际应用分析,实验选取某城市区域的医疗机构管理系统配电网作为对象,通过对比 ATSA 与人工智能(artificial intelligence, AI)算法在医学检验管理系统中的故障定位结果<sup>[15]</sup>。验证研究所提出模型的故障定位准确性,结果如表 1 所示。

由表 1 所示,当电路类型为低阻时,基于 ATSA 的模型故障定位误差为 0.05%,而基于 AI 的模型误差为 0.60%,相比之下 ATSA 的定位效果更好。在高阻情况下,ATSA 和 AI 故障定位误差分别为 0.34% 和 0.35%,短路情况下的故障定位误差分别为 0.37%、0.38%,开路情况下故障定位误差分别为 0.28% 和 0.73%,基于 ATSA 的模型故障定位的准确度在 4 种情况下均优于基于 AI 的模型。综上所述,定位结果显示针对 4 种不同类型的缺陷故障,研究所提出模型均可实现精确定位,定位误差小于 0.40%,并且不存在交叉项干扰。

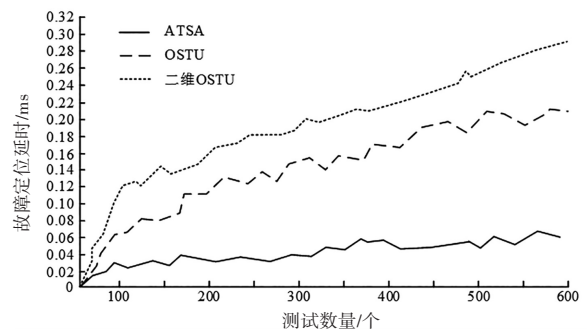


图 6 不同算法下模型的故障定位延时对比

Fig. 6 Comparison of fault localization delay under different algorithms

表1 两种算法在医学检验管理系统中的故障定位结果

Tab. 1 Fault localization results of two algorithms in the medical laboratory management system

算法	电路类型	输入电流/A	输入电压/V	预设位置/m	定位效果/m	误差/%
ATSA	低阻	130	240	40	40.02	0.05
	高阻	260	250	40	40.13	0.34
	短路	90	225	40	40.15	0.37
	开路	80	70	40	40.11	0.28
AI	低阻	130	240	60	60.36	0.60
	高阻	260	250	60	60.21	0.35
	短路	90	225	60	60.23	0.38
	开路	80	70	60	60.44	0.73

### 3 结论

为优化配电网馈线故障诊断模型的性能,保障医学检验系统等各类电网建设的安全运行,研究在搭建配电网馈线故障诊断模型的基础上,引入 ATSA 优化故障定位模型的准确性。研究表明,ATSA 与 OTSU 阈值分割法、二维 Otsu 自适应阈值算法进行的噪声实验对比中,ATSA 具有更好的抗干扰性和鲁棒性。将研究所提出模型与采用 AI 技术的配电网馈线故障诊断模型应用于某城市的医疗机构管理系统中对比应用效果,虽然相差不大但 ATSA 的定位准确性依然高于 AI。虽然研究所提出模型能够在医学检验管理系统应用中提供较为准确的故障诊断和定位效果,但针对电力系统中的特定情况需要考虑更多方面进行改进。

### 参考文献

[1] 肖峻,王传奇,李晓辉. 城市配电网 DG 消纳能力曲线的计算方法

(上接第 154 页)

- [17] FOSTER G, POU S M I, PESCH D, et al. Performance estimation of efficient UMTS packet voice call control [C]//Proceedings of the IEEE 56<sup>th</sup> Vehicular Technology Conference (VTC 2002-Fall). Vancouver, BC, Canada; IEEE, 2002, 3: 1447-1451.
- [18] 史俊潇,杨鸿珍,卢晓帆. IMS 呼叫处理在电力企业混合组网中的应用研究[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(2): 30-35.
- [19] DI MAURO M, GALATRO G, LONGO M, et al. IP multimedia subsystem in an NFV environment: availability evaluation and sensitivity analysis[C]//Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN). Verona, Italy; IEEE, 2018: 1-6.
- [20] DI MAURO M, GALATRO G, LONGO M, et al. Availability assessment of IP multimedia subsystem in an NFV-based environment [C]//Proceedings of the Tenth International Conference on Advances in Future Internet (AFIN 2018). Venice, Italy; IARIA, 2018: 3-7.
- [21] FIORE M D, MELI G, ZIESE A, et al. A general framework for

与分析应用[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10):200-207.

- [2] 池源,郭莹莹,孟庆昊,等. 主动配电网储能应用新形态:虚拟配电变压器与馈线[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12):163-175.
- [3] 佟明泽,李铮,魏星. 基于 PLC 控制器的医院网络通信故障自适应监控系统[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(2):35-39.
- [4] 刘伯文,张旭,王怡,等. 计及馈线自动化故障处理全过程的配电终端优化布置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 97-107.
- [5] 梁耀贤,郝正航,陈卓,等. 就地型馈线自动化反向闭锁逻辑改进策略[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(3):1-8.
- [6] 陈根永,高翔宇,谭超,等. 集中式馈线自动化配电网供电可靠性评估[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(1):114-121.
- [7] 薛忠新,呼少平,张艳军,等. 皮带机故障诊断中基于自适应小波阈值去噪法的应用[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(4):213-216.
- [8] 罗茗,宫兆宁,张园. 水位波动条件下不同类型内陆湿地动态范围的精准识别[J]. 遥感学报, 2023, 27(6):1348-1361.
- [9] 宋强. 基于大数据分析的配电网低电压变化态势预测研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(3): 96-98, 103.
- [10] RAHANGDALE R, GUPTA A. A novel DWT-ERT-based fault location for distribution network [J]. Recent Advances in Computer Science and Communications (Formerly: Recent Patents on Computer Science), 2024, 17(3):11-19.
- [11] 李文君,段登伟,朱雨,等. 基于 5G 通信模式下的配电网自愈保护应用[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24):152-159.
- [12] 赵书静,龚梁涛,詹博博,等. 基于 FMCW 的 10 kV 配电网电缆故障定位及类型识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11):4452-4462.
- [13] 金极栋,卢宛萱,孙显,等. 分布采样对齐的遥感半监督要素提取框架及轻量化方法[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(5):1-11.
- [14] 周东红,周建科,夏同星,等. 三参数小波变换自适应阈值压制地震数据高频随机噪声[J]. 地球物理学报, 2023, 66(5):2095-2111.
- [15] 蒲天骄,张中浩,谈元鹏,等. 电力人工智能技术理论基础与发展展望(二):自主学习与应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10):3705-3717.

hierarchical redundancy resolution under arbitrary constraints [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2023, 39(3): 2468-2487.

- [22] BARRON A R, COHEN A, DAHMEN W, et al. Approximation and learning by greedy algorithms[J]. The Annals of Statistics, 2008, 36(1):64-94.
- [23] 吕黎明,黄晶,田永兴. 基于神经网络的电网人力资源配置自动优化系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(11):196-199.
- [24] 翁涅元,单杏花,阎志远,等. 基于 Kubernetes 的容器云平台设计与实践[J]. 铁路计算机应用, 2019, 28(12): 49-53.
- [25] COHEN A, MIGLIORATI G. Optimal weighted least-squares methods [J]. The SMAI Journal of Computational Mathematics, 2017(3): 181-203.
- [26] LIU Y, YU W. Survey for various cross-validation estimators of generalization error[J]. Application Research of Computers, 2015, 32(5): 1287-1290, 1297.