

基于激光雷达信号的直流输电线路故障测距研究

赵锐¹, 王云杰², 李杰¹, 白鑫³

(1. 山西益通电网保护自动化有限责任公司, 山西 太原 030600;

2. 国网山西省电力公司信息通信分公司, 山西 太原 030021;

3. 积成电子股份有限公司, 山东 济南 250104)

摘要: 为了精准定位故障位置, 降低电网损失, 提出一种基于激光雷达信号的直流输电线路故障测距方法。首先确定航拍线路方向, 通过搭载激光雷达的飞行设备采集直流输电线路故障数据; 考虑到信号中含有非平稳的高幅值脉冲噪声和白噪声, 使用中值滤波与鸡群优化法去除干扰噪声; 最后, 使用三维空间大地坐标系与三维直角坐标系的转换, 得到修正后的坐标位置, 基准变换两个三维空间直角坐标系, 求解出直流输电线路故障实际位置和距离。最后, 选择8种直流输电线路进行故障测距实验。实验结果表明, 对于这8种故障而言, 所提方法的故障测距结果均精准, 测距耗时短, 故障测距运行时间在0.28 s-0.6 s之间, 具有一定应用价值。

关键词: 激光雷达信号; 输电线路故障; 中值滤波; 鸡群优化方法; 故障定位

中图分类号: TP274+.51 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)05-0121-05

Research on Fault Ranging of DC Transmission Line Based on Lidar Signal

ZHAO Rui¹, WANG Yun-jie², LI Jie¹, BAI Xin³

(1. Shanxi Yitong Power Grid Protection Automation Co., Ltd., Taiyuan 030600 China;

2. State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030021 China;

3. Integrated Electronic Systems Lab Co., Ltd., Jinan 250104 China)

Abstract: In order to accurately locate the fault location and reduce power grid losses, this paper proposes a fault location method for DC transmission lines based on laser radar signals. Firstly, it determines the direction of the aerial photography line, and collects the fault data of the DC transmission line through the flight equipment equipped with a laser radar. Considering that the signal contains non-stationary high amplitude impulse noise and white noise, median filtering and flock optimization methods are used to remove the interference noise. Finally, using the transformation of three-dimensional spatial geodetic coordinate system and three-dimensional rectangular coordinate system, the corrected coordinate position is obtained, and the reference transformation of two three-dimensional spatial rectangular coordinate systems is used to solve the actual location and distance of the direct transmission line fault. Finally, eight types of DC transmission lines are selected for fault location experiments. The experimental results show that for these eight types of faults, the proposed method has accurate fault location results, short fault location time, and fault location operation time between 0.28 seconds and 0.6 seconds, which has certain application value.

Keywords: laser radar signal; transmission line fault; median filtering; optimization method of chicken flock; fault location

0 引言

随着我国电力行业的蓬勃发展, 电网的电压等级与直流输电线路数量都日渐升高。由于在电力线路的长度不断增加、输电储备容量供不应求等情况, 输电线路在电力传输的工作过程中, 很大概率会发生绝缘子断片、线路杆塔悬挂异物、线路绝缘缺陷等直流输电线路故障的现象, 不仅降低了电力行业工作效益, 还对输电线路周边人

员的人身安全产生了超高危害。因此, 当下寻找一种精准的直流输电线路故障测距方法是至关重要的。

国外 X Che^[1]等人提出一种基于相量测量单元同步的输电线路故障定位方法。在两条母线上测量输电线路实时的电压相量与电流相量, 并在线路两端列出故障点同步电压, 最后通过两端故障条件下复方程得到故障距离, 但实际测距中仅仅只适用于结构简单的输电线路故障测距, 对于复杂结构的线路故障测距会产生误差。国内余晓^[2]等人提出利用直流线路特点, 推导出一种基于神

*基金项目: 国网山西省电力公司科学技术项目 (52053018000z)

收稿日期: 2023-10-27

经网络的直流输电线路故障位置测距方法,对电压、电流信号数据进行增强处理后,不断学习输入数据的深层特征,以此提高输电线路故障测距精度。但是实际测距过程中会受到外界电磁干扰,导致电力线路测距结果不稳定,李翀^[3]等人提出一种多传感器数据融合的输电线路故障测距方法,首先计算电力线路的距离,确定多源数据信息,通过模糊推理算法与加权协方差融合技术最终确定数据融合结果,实现输电线路故障测距,但该测距算法泛化能力不足,实际线路故障测距应用效果差。

基于上述线路故障测距的缺陷,提出一种激光雷达信号下直流输电线路故障测距方法,首先为了准确获得航拍线路路径^[4],设计了激光雷达航飞前的全面准备,通过激光雷达飞行设备,对直输电线路故障数据进行采集;由于采集的直流输电线路信号含有非平稳的高幅值脉冲噪声和白噪声,通过中值滤波与鸡群优化方法去除了原始数据的大量噪声;使用大地坐标系确定直流输电线路故障区域的经纬度,通过坐标系转换,将2个空间直角坐标系进行基准变换,对多维空间内的所有坐标点进行不同形式的调整,最后得到输电线路故障的具体位置。然后选择8种直流输电线路进行故障测距实验。分别为线路污闪、异物造成的相间短路、单相接地故障、过流故障、短路故障、负荷超出故障、雷击故障、漏电故障。验证了方法的实用性。

1 直流输电线路激光雷达信号采集

在进行激光雷达航飞任务时,为了保证采集的输电线路影像质量,需要在没有雾霾遮挡的良好天气进行航摄,这是由于激光雷达测量机带有电荷耦合器件相机,恶劣天气会影响激光雷达信号质量。航飞使用的地形地图使用带有全球定位系统(global positioning system, GPS)航空定位功能,并且为了准确获得航拍线路路径,布置了数十条首端与尾端相连的航空雷达线路,进行带状摄影^[5]。最后,通过激光雷达飞行路径文件在谷歌地球中进行飞行,可以避免发生飞行中的危险事件。

为了使采集的数据良好、画面开阔,拍摄地面最少设置1个基站,且拍摄地面的任意拍摄点与隔壁基站之间的距离不能超过40 km。

在激光雷达机器起飞前,首先需要打开定位系统与时点信息系统。在拍摄区域,进行输电线路数据采集时,激光雷达机器按照设计的航线自动航拍,采集当前区域输电线路数据后,需要直线飞行10 min,关掉时点信息系统,当关掉时点信息系统20 min后,再关掉定位系统。

2 信号数据预处理

由于采集的激光雷达信号存在非均匀的高频率脉冲

噪声和白噪声,需要对原始噪声数据进行去噪。中值滤波可以去除信号中的脉冲噪声,首先建立直流输电线路信号为 $q_n(n=1,2,\dots,N)$,定义窗口 W 的数量为奇数,窗口内的信号样本为 $q_{n-o},\dots,q_n,\dots,q_{n+o}$, q_n 代表窗口中心点的样本,中值滤波的输出公式如下:

$$Q_n = \text{Med}(q_{n-o}, \dots, q_n, \dots, q_{n+o}) \quad (1)$$

通过中值滤波^[6]可以抑制占比较重的脉冲噪声。虽然去除了高幅值脉冲噪声,但是信号仍然含有白噪声,第二代小波变换可以进行双正交小波的构造,且对非平稳的噪声信号具有良好的去噪能力。每次变换分解都经过小波系数分列、数据预测、数据更新这三个步骤,图1为第二代小波变换工作流程示意图。

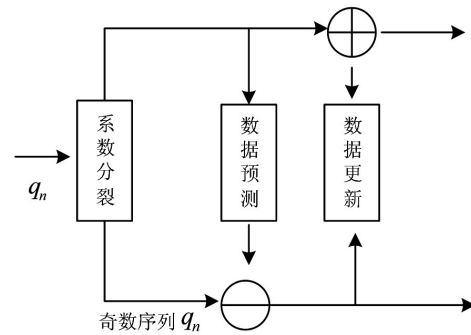


图1 第二代小波变换工作流程示意图

通过图1可得知,小波系数分列是将直流输电线路原始信号分列为奇数序列与偶数序列,然后通过奇数序列来预测偶数序列;由于小波系数分列转换的子集特征与原始数据有较大差距,需要进行多次的小波变换来保留输电线路原始信号特征^[7]。

建立实际测试的直流输电线路测距噪声数据为 q_n^* ,通过第二代小波变换^[8]进行 n 次变换分解,直流输电线路的原始数据为: $\{s_{j-n}, d_{j-n}, d_{j-n+1}, \dots, d_{j-1}\}, d_{j-n}, d_{j-n+1}, \dots, d_{j-1}$ 代表信号频率的高频内容, s_{j-n} 代表信号频率的低频内容。

小波去噪的关键步骤是阈值确定,若选择不合适的阈值,则会出现去噪效果不完全的现象,因此选取鸡群优化方法^[9]确定最佳阈值,可以增强小波逆变换,得到重构后的输电线路测距信号。鸡群优化方法具有优秀的处理速度与滤波精度,根据适应度来判断滤波程度。当最强适应值显示为公鸡时,更新能力为最优,当最低适应值显示为母鸡时,更新能力为最中等水平。

公鸡位置的更新公式如下:

$$Q^{k+1}_{i,j} = Q^k_{i,j} \times [1 + \text{randn}(0, \sigma^2)] \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \begin{cases} 1, f_i \geq f_r \\ \exp\left(\frac{f_r - f_i}{f_i + \varepsilon}\right), f_i > f_r, r \neq i \end{cases} \quad (3)$$

式中, i 代表鸡群数量序列数值, j 代表空间维数序列, k 代

表迭代次数, $Q_{i,j}^k$ 代表公鸡位置的第 j 空间维数的数值, f_i 代表第 i 只公鸡的适应度, f_r 代表任意选取的公鸡^[10], $randn$ 代表高斯分布数值, σ^2 代表标准差。

母鸡位置的更新公式如下:

$$Q_{i,j}^{k+1} = Q_{i,j}^k + C_1 R_1 (Q_{r_1,j}^k - Q_{i,j}^k) + C_2 R_2 (Q_{r_2,j}^k - Q_{i,j}^k) \quad (4)$$

式中, R_1, R_2 都代表随机正数, C_1, C_2 都表示环境影响因子。影响因子的具体表达式如下:

$$C_1 = \exp[(f_i - f_{r_1}) / f_i + \varepsilon] \quad (5)$$

$$C_2 = \exp(f_{r_2} - f_i) \quad (6)$$

式中, f_{r_1} 代表母鸡的适应度值, f_{r_2} 代表任意选取母鸡的适用度值。幼鸡位置的更新公式如下:

$$Q_{i,j}^{k+1} = Q_{i,j}^k + F \times (Q_{m,j}^k - Q_{i,j}^k) \quad (7)$$

式中, m 代表幼鸡对应的母亲, F 代表平均分布的随机正数, 基于鸡群最优阈值的二代小波变换的去噪流程如图 2 所示。

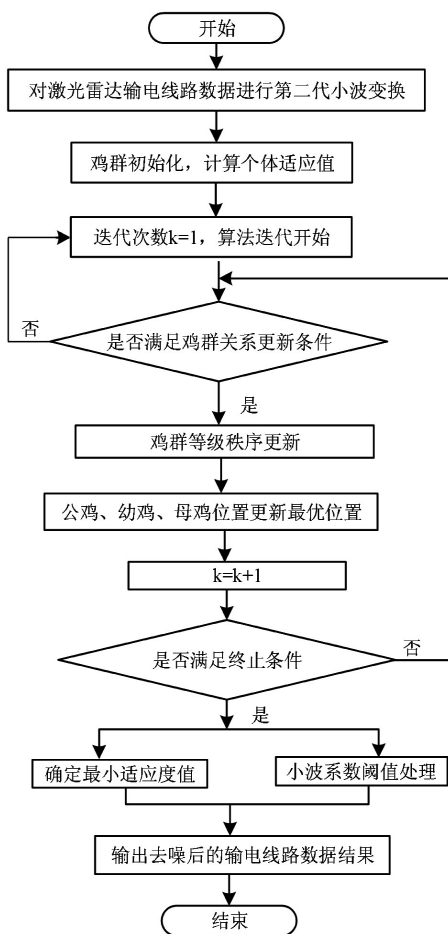


图 2 鸡群最优阈值的二代小波变换的去噪流程

3 直流输电线路故障测距

通过中值滤波与鸡群优化算法去除了输电线路数据的噪声, 获得了增强的输电线路数据, 在此基础上使用大地坐标系进行坐标位置检测, 确定直流输电线路故障区域的经纬度^[11]。为了对坐标进行修正, 通过坐标系转

换, 将 2 个空间直角坐标系进行基准变换, 对多维空间内的所有坐标点进行不同形式的调整, 坐标系转换的具体公式如下:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A+H) \cos B \cos L \\ (A+H) \cos B \sin L \\ \left[A \left(1 - \sqrt{\frac{a_2 - b_2^2}{a_2}} \right) + H \right] \sin B \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, a 代表圆心长半径, b 代表圆心短半径, B 代表坐标系的分布节点, L 代表坐标中心点数据, H 代表精准函数, A 代表大地坐标系的圆形离心率。

在完善直角坐标^[12]后, 使空间直角坐标相反方向, 转换为大地坐标, 可以提高直流输电线路故障区域的经纬度坐标的精准度, 公式如下:

$$\begin{bmatrix} L \\ B \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \left(\frac{\arctan \frac{Y}{X} Z(N+H)}{\sqrt{(X^2 + Y^2) \left[N \left(1 - \sqrt{\frac{a_2 - b_2^2}{a_2}} \right) + H \right]}} \right) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, X 代表末端中心点, Y 代表测量端, Z 代表顶端中心点, 坐标基准变换的故障点表达式如下:

$$\begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + (1+M)R(\varpi) \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 代表 3 个平行移近的参变量, $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ 代表 3 个旋转参变量, M 代表坐标系尺度不同产生的尺度参变量, (X_v, Y_v, Z_v) 代表以测量终端为中心的直角坐标系, (X_B, Y_B, Z_B) 代表以圆心为中心的直角坐标系, $R(\varpi)$ 代表坐标系反变换, $R(\varpi) = R(\varpi)Z \cdot R(\varpi)Y \cdot R(\varpi)X$, 并且有坐标基准变换具体表达式:

$$R(\varpi)X = \begin{cases} 1, 0, 0 \\ 0, \cos(\varpi)X, \sin(\varpi)X \\ 0, -\sin(\varpi)X, \cos(\varpi)X \end{cases} \quad (11)$$

$$R(\varpi)Y = \begin{cases} \cos(\varpi)Y, 0, -\sin(\varpi)Y \\ 0, 1, 0 \\ \sin(\varpi)Y, 0, \cos(\varpi)Y \end{cases} \quad (12)$$

$$R(\varpi)Z = \begin{cases} \cos(\varpi)Z, \sin(\varpi)Z \\ -\sin(\varpi)Z, \cos(\varpi)Z \\ 0, 0 \end{cases} \quad (13)$$

在完成直流输电线路故障区域的坐标基准变换后, 得到了精准的直流输电线路故障点位置, 实现了线路故障位置测距工作。

4 故障测距实验与分析

实验使用激光雷达无人机用于巡视主流输电线路, 实

验编程平台为Interi8CPU, 64 GB内存的PC上使用Matlab编程实现。图3为基于激光雷达实验的实际地点图像。



图3 直流输电线路激光雷达图

测距实验中最高传输距离为5 km,最高承受负荷为6 kg,拍摄方向可设置为360度横翻方向与360度仰视方向,且拍摄方向误差可控制在0.01度,通过旋翼激光无人机的平稳性,将杆塔之间的线路均匀分为8段折线,凭借编程段技术将路线提前输入旋翼激光雷达的飞控路线中,图4为搭载激光雷达的六角旋翼无人机的飞行路线图。

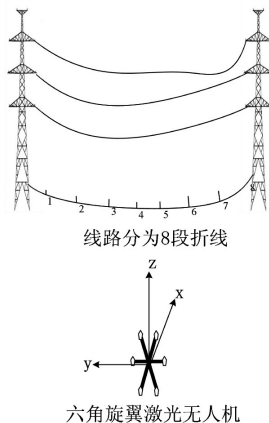


图4 搭载激光雷达的无人机飞行路线图

为了证明所提直流输电线路故障测距方法有效性,选取8个直流输电线路测距实验点,这八个故障点的故障分别为线路污闪、异物造成的相间短路、单相接地故障、过流故障、短路故障、负荷超出故障、雷击故障、漏电故障。通过循环神经网络方法、多源数据融合技术、所提激光方法经纬度测量结果与实际经纬度距离进行对比,输电线路故障测距方法的经纬度测量结果如表1所示。

通过表1的经纬度测量结果可得知,从测试点1到测试点8,循环神经网络方法与多源数据融合技术的经纬度线路故障测距结果与实际测点故障距离还是有一定的差距,而所提方法的测距结果与实际测点故障距离高度吻合,具有更强的测距精度。

为了进一步证明所提测距方法的精准度,将所提激光雷达信号测距方法与循环神经网络测距方法、多源数据融合技术进行测量偏差对比实验。3种故障测距方法的测量偏差曲线如图5所示。

表1 不同输电线路故障测距方法的经纬度测量结果

| 线路测点编号 | 经纬度(°)/实际距离 | 测距方式 | | |
|--------|-------------|----------|----------|----------|
| | | 循环神经网络方法 | 多源数据融合技术 | 所提激光测距方法 |
| 测距点1 | N/30.56 | 30.96 | 30.981 | 30.56 |
| | E/114.86 | 113.86 | 113.96 | 114.85 |
| 测距点2 | N/30.46 | 29.61 | 29.64 | 30.47 |
| | E/115.86 | 118.57 | 118.51 | 115.17 |
| 测距点3 | N/30.56 | 31.58 | 31.67 | 30.58 |
| | E/114.36 | 115.38 | 115.32 | 114.38 |
| 测距点4 | N/30.56 | 31.21 | 31.56 | 30.21 |
| | E/114.22 | 116.29 | 116.62 | 114.29 |
| 测距点5 | N/30.25 | 31.26 | 31.25 | 30.28 |
| | E/114.86 | 113.29 | 113.25 | 114.29 |
| 测距点6 | N/30.86 | 31.88 | 31.43 | 30.88 |
| | E/114.22 | 116.23 | 115.29 | 114.23 |
| 测距点7 | N/30.39 | 31.28 | 31.26 | 30.28 |
| | E/113.71 | 115.64 | 115.74 | 113.76 |
| 测距点8 | N/30.33 | 31.89 | 31.83 | 30.35 |
| | E/114.19 | 112.93 | 113.99 | 114.15 |

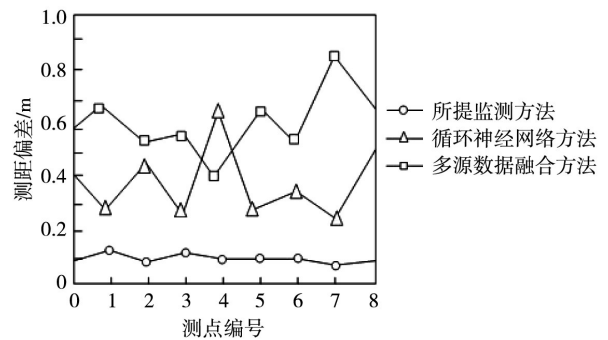


图5 3种故障测距方法的测量偏差曲线

通过图5的测量偏差曲线结果可得知,多源数据融合技术的偏差空间距离是最高的,在测距点7中,高达了0.85 m;循环神经网络测距方法的偏差空间距离最高也达到了0.71 m,且测量偏差曲线非常不稳定;所提方法的偏差空间距离仅在0.05 m-0.15 m之间,测距偏差非常小,完全符合实际测距标准需求。

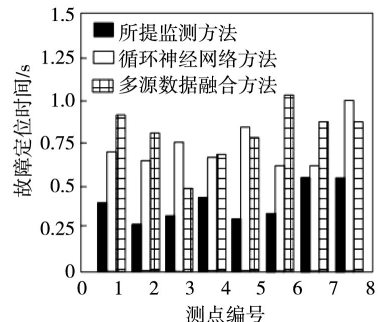


图6 输电线路故障测距运行时间对比图

为了进一步验证所提方法的测距能力,通过所提激光雷达信号测距方法与循环神经网络测距方法、多源数据融合技术在上述8个测点中进行输电线路故障测距运

行时间对比,时间对比结果如图6所示。

通过图6的故障测距运行时间对比结果可得知,所提方法的故障测距运行时间在0.28 s-0.6 s之间,明显低于循环神经网络测距方法与源数据融合技术的测距运行时间,说明所提方法的故障测距效率极高,具有优秀的实用性。

5 结束语

为了降低直流输电线路故障带来的经济损失,提升电力工作人员维修效率与安全性,提出一种基于激光雷达信号的直流输电线路故障测距方法。首先利用激光雷达飞行设备对直流输电线路数据进行采集;由于信号含有大量的非平稳噪声,先凭借中值滤波消除了高幅值脉冲噪声,又利用鸡群优化方法降低了白噪声;最后通过大地坐标系确定直流输电线路故障区域的经纬度,将2个空间直角坐标系完成基准变换,校正对多维空间内的所有坐标点位置,最后实现了直流输电线路故障的精准测距。实验结果表明:所提方法较其他两种测距方法有较好的鲁棒性与实用性,经纬度测量精度与测量时间都很完美,且测距偏差非常小、稳定,测距偏差空间距离精确在0.05-0.15之间,符合实际测距标准需求,具有可应用的价值。

参考文献:

[1] Che X, Jian H, Sun Q, et al. Fault Location Technology of Transmission Line based on Asynchronous Phasor Measurement from PMUs[J]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2021(645):012084.
[2] 余晓,吕飞鹏,张国星,等.循环神经网络输电线路双端故障

测距方法[J].中国测试,2021,47(9):119-125.

[3] 李翀,刘林青,陶鹏,等.基于多源数据融合技术的输电线路故障定位方法[J].水电能源科学,2021,39(1):168-170,210.
[4] 吴昌松,彭业萍,曹广忠,等.面向三维重建的无人机航拍路径规划技术研究综述[J].测绘通报,2022(8):98-103,122.
[5] 金艳,赵大地,姬红兵.脉冲噪声下基于NAT函数的LFM信号参数估计[J].系统工程与电子技术,2022,44(3):762-770.
[6] 陈蓉,杨勇.基于多孔分数阶小波变换的谐波检测新方法[J].电测与仪表,2023,60(11):142-150,157.
[7] 秦春林,石建刚,任帅.基于大数据分析的轴承退卸工装智能化研究[J].自动化技术与应用,2023,42(11):60-63.
[8] 余晓兰,万云,朱景建,等.基于动态自确定并行模糊聚类鸡群优化算法的水稻机器人路径规划[J].机械设计与制造,2022(1):251-256.
[9] 陈慧,丁戈,唐婧璇,等.对称因子表的快速形成及直角坐标和极坐标PQ分解法的比较[J].南昌大学学报(理科版),2021,45(2):129-134.
[10] 杨煜,王敏敏,王坚,等.超宽带应急定位坐标基准动态构建技术研究[J].测绘科学,2022,47(6):44-50.
[11] 郭爱军,鞠晨.基于深度信念网络的模拟电路故障诊断[J].自动化技术与应用,2023,42(2):76-80.
[12] 杨庆,崔浩楠,揭青松,等.配电变压器低压侧脉冲注入故障测距方法[J].中国电机工程学报,2022,42(5):2025-2035.

作者简介:赵锐(1981-),男,本科,中级工程师,研究方向:交直流输电线路运行管理。

(上接第116页)

智能电能表可靠性多层次评估指标,确定智能电能表各评估指标权重,结合模糊理论确定智能电能表各指标之间最大隶属度,通过隶属度函数得出智能电能表模糊评估矩阵,最后依据智能电能表评估指标权重与模糊评估矩阵完成智能电能表可靠性评估。实验说明,智能电能表可靠性15个评估指标的累计贡献度均超过85%,这些指标可代表智能电能表可靠性;本文模型的智能电能表可靠性评估结果与实际结果误差较小,精确度高,本文模型应用性较强。

参考文献:

[1] 蔡慧,乔适苏,袁健,等.基于信息融合的低压智能电能表动态评价模型[J].电力系统自动化,2020,44(11):206-214.
[2] 吕伟嘉,刘浩宇,翟术然,等.基于边缘计算的新型智能电能表[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(7):153-158.
[3] 刘旭明,唐求,邱伟,等.基于ZINB层次贝叶斯智能电能表的可靠性预估[J].电子测量与仪器学报,2019,33(7):28-36.

[4] 曹华锋,马亚珍,井含香,等.智能电能表可靠性评估方法研究[J].山东工业技术,2019(1):212-213.
[5] 王霞,段庆全.基于改进层次分析法的油气管道风险因素权重计算[J].油气储运,2019,38(11):1227-1231.
[6] 黄裕春,雷才嘉,李柏新,等.基于模糊决策的配电网扩展规划综合评价系统[J].能源与环保,2022,44(3):236-241.
[7] 林聪,纪新武,何兆磊,等.电能表自动化检定装置运行质量监测方法研究[J].电测与仪表,2023,60(6):194-200.
[8] 董亮,王宾,徐旭东.基于旧电表机械自动化分拣及检测技术研究[J].自动化技术与应用,2023,42(4):130-133.
[9] 许涛,张闯,刘洋,等.基于LoRa技术的智能电能表研究[J].电测与仪表,2023,60(8):194-200.

作者简介:王辉(1990-),男,硕士研究生,高级工程师,研究方向:电网规划与技术。