10 kV电缆配电网接地故障检测定位方法研究

宁诗堂
广西正远监理咨询有限公司　广西 南宁　530000

摘　要　在10 kV配电网经消弧线圈接地系统实际运行场景中存在因稳态信号强度较低及行波色散现象导致的故障定位困难问题，本研究为此提出一种将小波包变换（WPT）与PSO−RBF神经网络相结合的故障定位方法，同时针对配电网运行方式复杂多变的特点提出“离线多模型库+在线拓扑匹配”的自适应策略，以增强定位方法对不同运行工况的适应能力。仿真实验结果显示，该定位方法在2 000 Ω高阻故障及电压过零点故障等复杂工况下误差能控制在20 m以内，且与标准RBF网络定位方法相比定位精度提升约4倍，为实际工程中故障快速精准定位提供有力技术支持。

关键词　10 kV电缆配电网；接地故障定位；小波包变换；PSO−RBF神经网络

Research on Grounding Fault Detection and Location Method for 10kV Cable Distribution Networks

Ning Shi-tang
Guangxi Zhengyuan Supervision Consulting Co., Ltd., Nanning 530000, Guangxi Province, China

Abstract　In the practical operation of 10kV distribution networks with arc suppression coil grounding systems, fault location difficulties arise due to weak steady-state signals and traveling wave dispersion. To address this, the study proposes a fault location method combining Wavelet Packet Transform (WPT) with a PSO-RBF neural network. Furthermore, considering the complex and variable operational modes of distribution networks, an adaptive strategy of "offline multi-model library + online topology matching" is proposed to enhance the method›s adaptability to different operating conditions. Simulation experiment results show that this positioning method can control the error within 20 meters under complex conditions such as 2000Ω high-resistance faults and voltage zero-crossing faults. Compared with the standard RBF network positioning method, the positioning accuracy is improved by approximately four times, providing strong technical support for fast and accurate fault location in practical engineering.

Key words　10kV Cable Distribution Network; Grounding Fault Location; Wavelet Packet Transform; PSO-RBF Neural Network

随着城市配电网电缆化率的提升而使单相接地故障定位面临严峻挑战，消弧线圈系统中稳态信号微弱且电缆行波色散严重导致传统物理测距失效，同时配电网拓扑频繁变化进一步限制常规智能算法的泛化应用。本文鉴于此，提出基于暂态能量熵的WPT-PSO-RBF融合定位策略，通过挖掘暂态频域特征，结合PSO全局寻优能力与多拓扑模型库匹配机制，旨在解决高阻接地、微弱信号提取及网络结构变化下的高精度定位难题并提升方法的工程实用性。

1　接地故障机理与特征分析

1.1 故障类型及其电气特性

10 kV电缆单相弧光接地呈现显著非线性与时变特征[1]，如图1所示，其零序信号叠加大量高频暂态分量并呈间歇性振荡，且相比受消弧线圈补偿抑制的微弱工频稳态量，故障瞬间受线路分布参数主导的高幅值高频暂态电流因蕴含丰富特征而成为实现精准定位的关键依据。

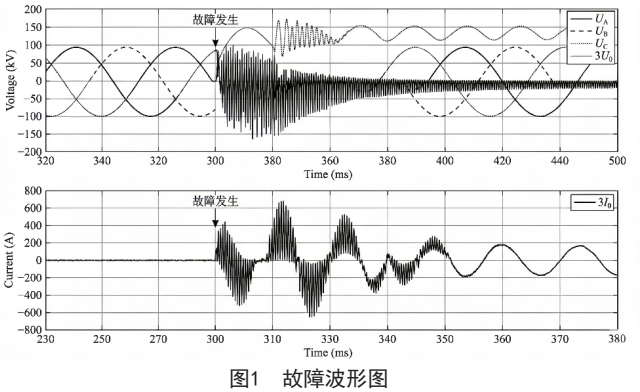


图1　故障波形图

1.2 稳态方法的局限性与暂态策略的确定

表1对比了不同接地方式下的稳态电流特征。在经消弧线圈接地系统中，尤其是过补偿运行时，仅依赖稳态工频信号进行选线和定位存在巨大盲区。因此，挖掘暂态高频信号特征是解决复杂故障定位的关键[2]。

表1 稳态信号特征与局限性分析

接地方式	故障点电流成分	稳态特征	检测难点
中性点不接地	全电容电流	电流幅值较小，方向由线路流向母线	信号微弱，易受CT不平衡电流影响
经消弧线圈接地	残流（有功分量+谐波分量）	工频无功分量被补偿，仅剩微弱的有功分量及高频谐波	补偿度非线性，稳态信号极微弱，方向判别困难
经小电阻接地	电阻性电流主导	电流幅值大，相位特征明显	需快速跳闸，对定位速度要求高

2 现有定位技术瓶颈分析

针对暂态信号的利用，现有技术主要包括行波法和信号注入法，但在工程应用中均存在特定瓶颈。

2.1 行波法的色散与衰减问题

行波法在10 kV电缆应用中面临两大瓶颈：一是绝缘介质老化及温度影响导致的波速不确定；二是强色散与衰减效应致使波头平缓、时刻标定困难，多分支网络引起的反射波混叠增加了误判风险。

2.2 阻抗法与注入法的不足

传统阻抗法在处理高阻抗接地（接地电阻超过500 Ω）时，故障电流微弱，测量阻抗主要体现负荷特征，导致定位功能失效。信号注入法需增加一次设备，且难以捕捉瞬时性弧光接地。现有方法在高阻抗故障适应能力和复杂电缆环境下的可靠运行方面难以兼顾。

3 改进方法研究与优化策略

针对行波法受波速不确定与波头识别制约的难题，本文提出摒弃对波头时刻的依赖，转而提取故障暂态频域能量特征，并利用优化后的神经网络构建特征与距离非线性映射以实现复杂工况下精准定位的WPT-PSO-RBF融合定位方法。

3.1 基于小波包变换的暂态特征深度挖掘

鉴于故障信号显著的非平稳与宽频带特性，传统傅里叶变换难以捕捉其局部特征[3]。本文选用小波包变换，凭借其全频带正交划分优势，实现对高频暂态信号的精细化分解。算法选用Daubechies4（db4）作为母小波，对采集到的暂态零序电流信号$i_0(t)$进行J=4层小波包分解，将信号投影到2^J=16个独立的频带节点上。考虑到小波包分解存在频率次序颠倒现象，本文采用格雷码（GrayCode）规则对分解后的节点进行重排，以确保节点索引与信号频率单调对应。设重排后第j层第n个节点的重构系数为$d_{j,n}(k)$，该频带内的信号能量$E_{j,n}$可表示为：

$$E_{j,n}=\sum_{k=1}^{N}\left|d_{j,n}(k)\right|^2\left(n=0,1,\cdots,2^J-1\right) \quad (1)$$

式中，N—采样点数，因故障距离改变导致行波传播特性变化、各频带能量重新分配，故构建归一化的能量熵特征向量T作为后续模型输入以消除信号幅值波动的影响。

$$T=\left[\frac{E_{4,0}}{E_{\text{total}}},\frac{E_{4,1}}{E_{\text{total}}},\cdots,\frac{E_{4,15}}{E_{\text{total}}}\right] \quad (2)$$

式中，$E_{\text{total}}=\sum_{n=0}^{15}E_{4,n}$作为总能量，其有效压缩数据规模的特征向量构成定位所需的“能量指纹”。

3.2 PSO优化径向基神经网络的融合

建模在获取能量特征向量后利用径向基函数（RBF）神经网络建立特征与故障距离的非线性映射，该网络通过高斯核函数将低维输入映射到高维空间且其输出函数$y(x)$定义为：

$$y(x)=\sum_{i=1}^{m}w_i\exp\left(-\frac{\left\|x-c_i\right\|^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (3)$$

式中，x—输入的特征向量；m—隐含层的节点数量；c_i—第i个基函数的中心数值；σ_i—第i个基函数的宽度参数；w_i—输出权重参数；鉴于RBF网络性能对参数设置的较高敏感性，本文引入粒子群优化算法（PSO）开展参数优化工作，将训练样本的均方误差（MSE）设定为目标函数，把RBF网络参数组$\{c_i,\sigma_i,w_i\}$编码成粒子位置向量，粒子群优化算法通过迭代更新粒子速度和位置以寻找使均方误差最小的全局最优参数组合，改变依靠人工经验设定参数的盲目状况并保障模型良好的泛化能力。

3.3 算法实现流程与非线性映射机制

改进算法的整体实现遵循“离线训练、在线应用”的工程逻辑，具体执行流程如图2所示。

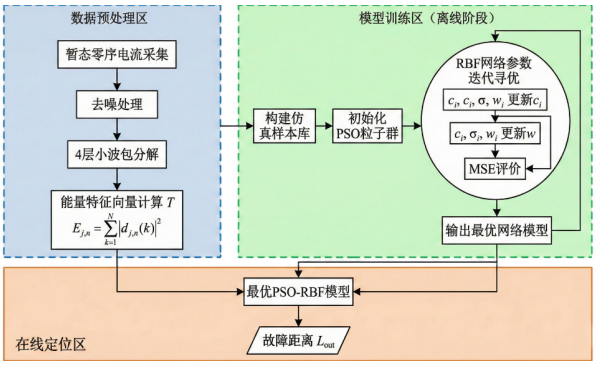


图2 基于WPT-PSO-RBF的融合定位算法流程图

离线阶段基于仿真构建多工况样本库，完成网络训练；在线运行时采集暂态数据，经特征提取后输入模型。该方法规避了波速计算与波头标定难题，实现了暂态特征到故障距离的直接映射，显著提升了定位的鲁棒性[4]。

4 仿真验证与结果分析

为验证本文提出的WPT-PSO-RBF融合定位方法的有效性及鲁棒性，利用PSCAD/EMTDC仿真软件搭建了10 kV电缆配电网典型线路模型，并开展了系统的对比测试。

4.1 仿真模型搭建与参数设置

针对10 kV经消弧线圈接地系统（10%过补偿），选用频率相关模型精确模拟10 km电缆的色散与趋肤效应，在电缆中段及末端设置分支以还原复杂拓扑结构。采样率设为5 MHz，可借助FPGA边缘计算实现就地特征提取，仅上传低维特征向量以规避通信压力。样本构建涵盖0～2 000 Ω过渡电阻及0～90° 初相角，共生成2 000组数据用于模型离线训练。

4.2 不同工况下的定位性能分析

利用未参与训练的测试集验证模型，重点关注高阻接地难题。金属性接地（R_f=0 Ω）时，暂态信号能量强，平均定位误差仅8.2 m（约占全长的0.08%），基准精度高。高阻接地（R_f=1 000 Ω）时，暂态信号幅值衰减，但归一化频带能量熵特征反映频谱分布比例而非绝对幅值，对过渡电阻变化具有较强免疫力，定位结果稳定在5.52 km（实际故障点5.5 km），误差控制在20 m以内。故障初相角测试显示，即使在电压过零点附近（0～15° ）、暂态能量较弱时，经小波包去噪与特征增强后的模型仍保持优于50 m的定位精度，算法对不同故障时刻具有良好的适应性。

4.3 算法优越性对比分析

为了验证本文提出的PSO-RBF融合算法的性能，将其与以下两种方法进行对比：①传统双端行波法；②标准RBF神经网络（未通过PSO优化），用于验证本文PSO参数寻优策略的贡献。对比结果分析如图3所示。

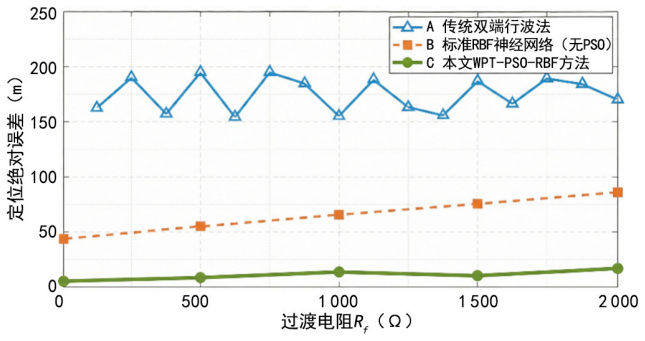


图3 不同算法优化策略下的定位误差对比分析

三种方法在不同过渡电阻条件下的定位性能差异明显：传统行波法受波速色散及波头识别误差影响，定位误差在150～200 m之间波动，且多分支处易出现反射波混淆；标准RBF网络虽克服波速计算难题，但因径向基中心和宽度随机初始化易陷入局部最优，在高阻接地（R_f>1 000 Ω）工况下预测值离散较大，最大误差达85 m；本文方法（WPT-PSO-RBF）得益于PSO全局寻优，精确捕捉暂态能量熵与故障距离间的强非线性关系，即使在2 000 Ω高阻接地工况下定位误差仍稳定控制在20 m以内。相比标准RBF网络，PSO优化策略使定位精度提升约4倍，有效解决了传统神经网络参数配置依赖人工经验及泛化能力差的问题。

4.4 配电网运行方式变化下的适应性策略

神经网络模型建立的故障特征与距离映射关系依赖电缆网络拓扑。针对配电网运行方式多变的特点，本文提出“多拓扑模型库”策略：①典型拓扑离线预训练：针对全线运行、分段运行等典型方式，离线构建对应PSO-RBF定位模型库；②在线拓扑自适应匹配：通过配电自动化系统实时获取开关状态，动态调取对应模型进行故障定位。对于非典型拓扑变化，能量熵特征主要反映行波高频衰减特性。仿真表明，对不影响主干传输路径的微小拓扑变化，模型平均误差波动小于15%；主干网重大改变则严格遵循模型库切换策略[5]。

5 结束语

本文提出的WPT-PSO-RBF方法有效克服了行波色散与微弱信号提取难题。PSO优化策略使模型在2 000 Ω高阻工况下定位误差控制在20 m以内，精度显著优于传统行波法与未优化的RBF网络。针对拓扑多变问题，采用“多模型库匹配”策略保障算法适应性。结合基于FPGA的5 MHz边缘计算可行性分析，实现了从理论算法到工程策略的闭环，为复杂配电网中隐蔽性故障定位提供了可靠的新技术路径。

参考文献

[1]李晨,李玥珩.基于CEEMD-小波包与分形盒维数算法的谐振接地系统单相接地故障选线[J].电工技术,2025(12):145-148,152.

[2]陈睿.基于多源广域同步信息的配电网故障定位方法研究[D].武汉:华中科技大学,2020.

[3]刘富州,萨仁娜,朱永利,等.基于FDM孪生网络的风电场集电线单相接地故障区段定位[J].可再生能源,2023,41(3):401-410.

[4]刘俊,王旭,孙惠文,等.采用FJPD互信息的电力系统暂态稳定性预测特征选择分析[J].智慧电力,2018,46(10):78-85,95.

[5]许名扬,樊艳芳,刘群杰,等.基于电流初始行波极性的主动配电网纵联保护方案[J].可再生能源,2020,38(4):509-516.

（本文编辑 曹 阳）