

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.05.006

## 基于 EMD 和 Teager 能量算子的电缆局部放电辨识

刘波<sup>1</sup>, 孟祥震<sup>2</sup>, 迟鹏<sup>2</sup>, 聂鹏飞<sup>3</sup>, 丁然<sup>4</sup>, 梁睿<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司徐州供电分公司, 江苏 徐州 221005; 2. 中国矿业大学电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中航光电科技股份有限公司, 河南 洛阳 471003; 4. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**交联聚乙烯(XLPE)电缆在矿区电网中普遍使用,因运行环境恶劣,电缆局部放电(PD)现象时有发生。首先,针对矿区电缆的PD辨识问题,对PD信号在XLPE电缆中的传播特性进行研究。其次,根据其传播特性,提出利用经验模态分解(EMD)与Teager能量算子相结合的方法,对电缆两端测量点处PD信号的初始波头进行辨识,该方法大大提升了波头辨识的抗噪声干扰能力。然后,采用径向基(RBF)神经网络对训练样本进行训练,结合PD信号到达电缆两端测量点的时间差,实现XLPE电缆PD精确定位。最后,通过搭建PSCAD/EMTDC电缆仿真电路验证了所提方法PD辨识精度高、辨识误差小的结论。

**关键词:**电缆;局部放电(PD)辨识;经验模态分解(EMD);Teager能量算子;径向基(RBF)神经网络

**中图分类号:**TM85

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2020)05-0036-07

### 0 引言

矿用交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电缆具有很高的电阻率和良好的耐温特性,多用于6 kV及以上线路,是矿区用电设备正常运作的动力线。由于采区环境相对恶劣,矿区供电一直是供电系统中的薄弱环节。大量研究与分析表明,局部放电(partial discharge, PD)是造成电缆绝缘劣化、性能下降的关键因素之一<sup>[1-4]</sup>。当电缆因绝缘劣化产生PD后,实现对PD点的精确辨识对电缆状态维护、保障矿区供电可靠性具有重要意义<sup>[5]</sup>。

文献[6]提出了基于PD信号上升时间与传播距离关系的电缆PD在线辨识方法,可用于长电缆的PD辨识,但其建立的PD上升时间与PD位置知识库易受PD源影响。文献[7]提出利用PD信号小波变换各尺度中心频率对应的波速进行PD辨识,减小了波速不确定性对辨识精度的影响,但未考虑短电缆中容易出现入射波和反射波波头重叠问题。文献[8]采用单个PD信号特征频率连续小波分解与能量峰值识别算法相结合的方法,优化对PD单脉冲波形的识别,提高了短电缆PD辨识精度,但不适用于长电缆的PD辨识。

电缆的PD信号除包含高频分量外,还具有陡度相对较大的上升沿,高频分量主要集中在1 kHz~

120 MHz<sup>[9-12]</sup>。PD信号不同频率分量振荡衰减的程度不同,主要和信号角频率 $\omega$ 、衰减常数 $\alpha(\omega)$ 、相位常数 $\beta(\omega)$ 有关。电缆长度越长,则信号频率越高,幅值衰减越严重,相位移也越严重。

为了克服波速不确定性和反射波头衰减严重的问题,文中提出利用PD信号到达电缆两端测量点的时间差与PD位置的关系进行PD辨识。首先,利用PSCAD/EMTDC搭建矿区10 kV中压电缆PD仿真模型,电缆长度为1 km;其次,在电缆不同位置处注入模拟PD信号,采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和Teager能量算子提取PD信号到达两端测量点的时间;然后,利用径向基(radial basis function, RBF)神经网络拟合两端时间差与PD位置的关系;最后,当电缆发生PD后,将计算得到的PD信号到达两端测量点的时间差输入到训练好的神经网络中,得到精确的PD位置。

### 1 PD 辨识理论基础

#### 1.1 EMD 基本理论

EMD信号分解方法可将任何信号分解为多个基本模态分量(intrinsic mode function, IMF),对非平稳和非线性信号处理效果较好,因此在很多领域均有应用<sup>[13]</sup>。EMD具有较强的自适应能力,核心思想是任何一个信号 $x(t)$ 都可以分解为 $n$ 个固有IMF分量 $c_i(t)$ 和1个残差分量 $r_n(t)$ 。即:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

对于EMD,核心是根据原信号的特征时间尺度

收稿日期:2020-03-03;修回日期:2020-04-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51504253);国家电网有限公司科技项目“基于暂态扰动的配网电缆早期故障预警和定位方法研究”(J2018078)

得到本征波动模式,再对信号进行分解。分解出来的每个 IMF 都包含原始信号在不同时间尺度下的局部特征信号。EMD 算法具体步骤为:

(1) 求取信号  $x(t)$  的局部极大值点和极小值点。

(2) 通过三次样条插值方法对极值点进行拟合,得到信号的上包络线  $x_{\max}(t)$  和下包络线  $x_{\min}(t)$ 。对  $x_{\max}(t)$ ,  $x_{\min}(t)$  求平均值。

$$m(t) = \frac{x_{\max}(t) + x_{\min}(t)}{2} \quad (2)$$

(3) 信号  $x(t)$  减去  $m(t)$ , 得到剩余信号  $h(t)$ 。若  $h(t)$  满足:在整个序列中,过零点的数目与极值点的数目最多相差 1 个,且  $m(t)$  为 0,则得到最终合适的第一尺度本征模态分量  $c_1(t)$ 。若  $h(t)$  不满足此条件,则对  $h(t)$  重复步骤(1)和(2),直至  $h(t)$  满足条件,并获得  $c_1(t)$ 。

(4) 求取  $x(t)$  与  $c_1(t)$  的差值,得到第一尺度残差量  $r_1(t)$ 。

(5) 将  $r_1(t)$  作为信号  $x(t)$ , 重复步骤(1)–(4),直至得到  $r_n(t)$ 。若  $r_n(t)$  为单调函数或常数,则 EMD 分解结束,得到  $n$  个  $c_i(t)$  和残差分量  $r_n(t)$ 。否则,继续重复步骤(1)–(4)。

## 1.2 Teager 能量算子

Teager 能量算子<sup>[14]</sup>是一种非线性的能量算子。连续信号  $x(t)$  的 Teager 能量算子定义为:

$$\varphi(x(t)) = \dot{x}^2(t) - x(t)\ddot{x}(t) \quad (3)$$

式中:  $\dot{x}(t)$ ,  $\ddot{x}(t)$  分别为  $x(t)$  的一阶和二阶微分。

离散信号  $x(n)$  的 Teager 能量算子定义为:

$$\varphi(x(n)) = x^2(n) - x(n+1)x(n-1) \quad (4)$$

信号  $x(t)$  以采样频率  $f_s$  进行采样,则其离散信号可表示为:

$$x_n = A \cos(\Omega n + \varphi) \quad (5)$$

式中:  $A$  为幅值;  $\Omega = 2\pi f/f_s$ ,  $f$  为信号频率;  $\varphi$  为初相角。

由式(4)、式(5)可知,对于离散时间信号,Teager 能量算子仅需 3 个样本数据就能计算任一时刻的信号源能量,具有较好的时间分辨率。

## 1.3 RBF 神经网络

RBF 神经网络如图 1 所示,其为具有 3 层结构的前馈网络,具有较好的逼近特性与全局更优特性。

图 1 中,RBF 神经网络具有输入、隐含、输出 3 层结构。 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  为输入向量,  $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ ,  $\mathbf{R}^n$  为  $n$  维实数集;  $\Phi(\cdot)$  为 RBF 函数;  $\|\cdot\|$  为求范数;  $c_1, c_2, \dots, c_m$  为 RBF 的网络中心;  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m$  为 RBF 函数的宽度。一般情况下,输入层到隐含层之

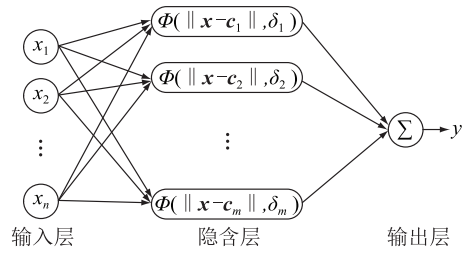


图 1 RBF 神经网络结构

Fig.1 Structure of RBF neural network

间多采用非线性函数。RBF 神经网络中间层采用距离函数,神经元距离 RBF 的网络中心越近激活度越高,距离越远激活度越低。

## 2 PD 辨识方法研究

### 2.1 PD 信号的衰减特性

为研究 PD 信号衰减与传播距离的关系,利用 PSCAD/EMTDC 搭建 XLPE 电缆仿真模型,改变 PD 发生位置,使 PD 点分别位于距电缆首端 0.1 km, 0.3 km, 0.5 km, 0.7 km, 0.9 km, 1.1 km, 1.3 km, 1.5 km, 1.7 km, 1.9 km 处。为了消除反射波对测量结果的影响,将电缆首端测得的 PD 信号导入 Matlab 中进行处理,得到如图 2 所示的不同距离下 PD 信号的衰减波形。

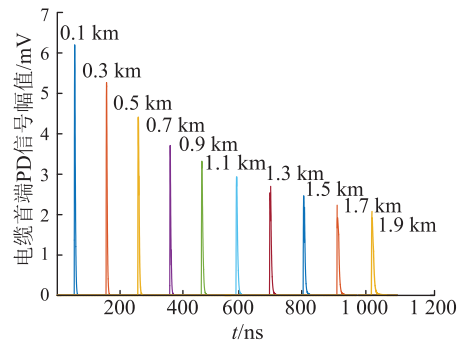


图 2 不同距离下 PD 信号的衰减情况

Fig.2 Attenuation of PD signals at different distances

由图 2 可知,PD 信号在电缆中传播时幅值衰减,且传播距离越长幅值衰减越严重。为了观察 PD 信号在形态上的具体变化,对仿真结果进一步细化,得到如图 3 所示不同传播距离的 PD 信号波形。

由于衰减和色散效应存在,PD 信号随着传播距离增加幅值衰减严重,且脉冲宽度不断增加、陡度不断下降,信号畸变也愈发严重。此现象是受电缆特性影响,高频分量衰减快,低频分量衰减慢。

### 2.2 基于 EMD 和 Teager 能量算子的 PD 信号到达时间提取

目前,确定 PD 行波信号到达时间的提取大多采用小波变换模极大值法,但该方法精度易受母小

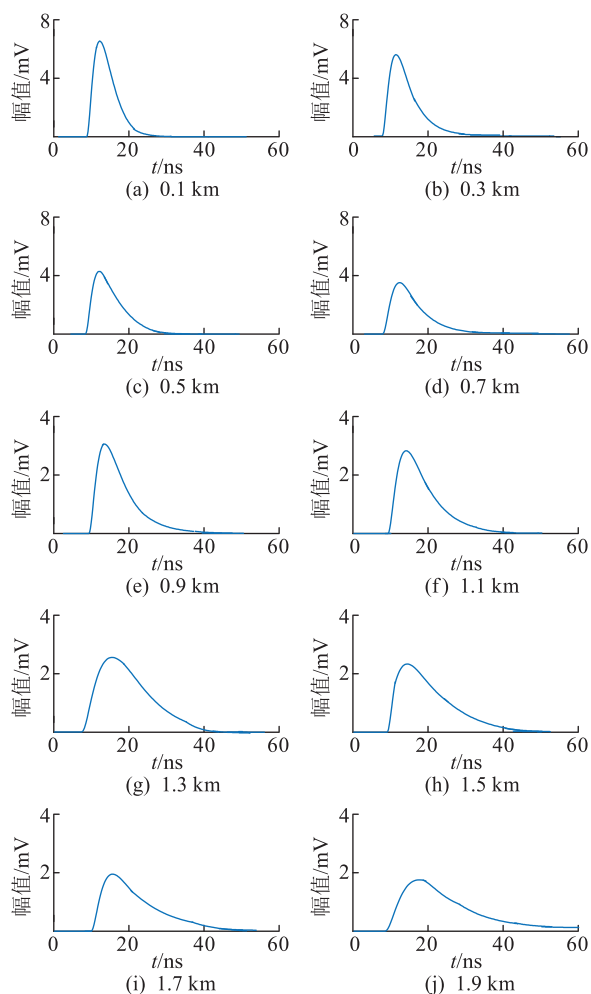


图3 不同传播距离的PD信号波形

Fig.3 PD waveform under different propagation distance

波类型、分解及提取尺度的影响,且抗噪声干扰能力一般。为了更准确地提取PD行波信号到达电缆两端测量点的时间,提出采用EMD和Teager能量算子相结合的方法对PD信号的到达时间进行提取,具体步骤为:

(1) 由电缆线路首端(或者末端)测量点测得三相PD电压行波信号 $U_a, U_b, U_c$ ,计算PD电压行波三相解耦后的复空间相量模值信号。

(2) 采用EMD自适应分解步骤(1)中得到的复空间相量模值信号 $|U_{cs}|$ ,分解后得:

$$|U_{cs}| = \sum_{j=1}^n u_j(t) + r_n(t) \quad (6)$$

式中: $j$ 为EMD分解尺度; $n$ 为EMD分解总层数; $u_j(t)$ 为尺度 $j$ 的本征模态分量; $r_n(t)$ 为经过 $n$ 层分解后的残差分量。

式(6)中,较高频率分量的变化能够反映待分解信号的突变信息。

(3) 计算出前3个较高频率本征模态分量的离

散Teager能量<sup>[15]</sup>。

(4) 对于尺度 $j$ 本征模态分量的离散Teager能量 $E_j$ ,利用式(7)求取相应的PD电压行波信号到达时间 $t_j$ 。

$$t_j = \frac{N_j}{f_s} \quad (7)$$

式中: $N_j$ 为PD电压行波到达时刻对应的采样点,对应PD电压行波Teager能量绝对值最大的时刻。

采用提出的EMD和Teager能量算子法对线路首、末端测得的PD电压行波信号到达时间进行提取。为了研究噪声对所提方法的影响,分别对有无高斯白噪声的原始PD电压行波信号进行计算(有高斯白噪声污染时,信噪比为25 dB),得到多个尺度下PD电压行波复空间相量模值信号的本征模态分量及其Teager能量分布,其中第一尺度的本征模态分量和Teager能量分别如图4、图5所示。

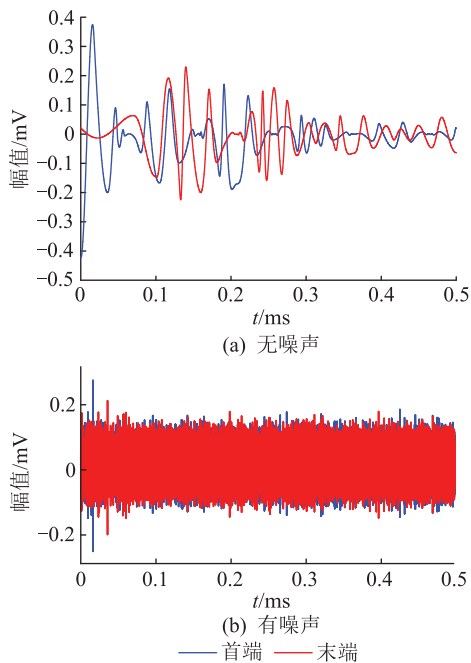


图4 第一尺度本征模态分量

Fig.4 First-level intrinsic mode component

对比图4、图5可知,即使在有较大噪声的情况下,该方法也能很好地克服噪声干扰,准确辨识PD行波信号到达测量点的时间。

### 2.3 基于RBF神经网络的PD辨识

PD信号在电缆中传播时受色散和衰减影响,其波速难以精确确定。选用RBF神经网络拟合PD行波信号到达电缆两端测量点的时间差与PD位置间的关系。为了构建RBF神经网络需要的训练样本,同时保证PD辨识精度,从PSCAD搭建的电缆模型首端5 m处起,每隔5 m加入模拟的PD信号,直至距离线路末端5 m处停止。对于每次PD模拟

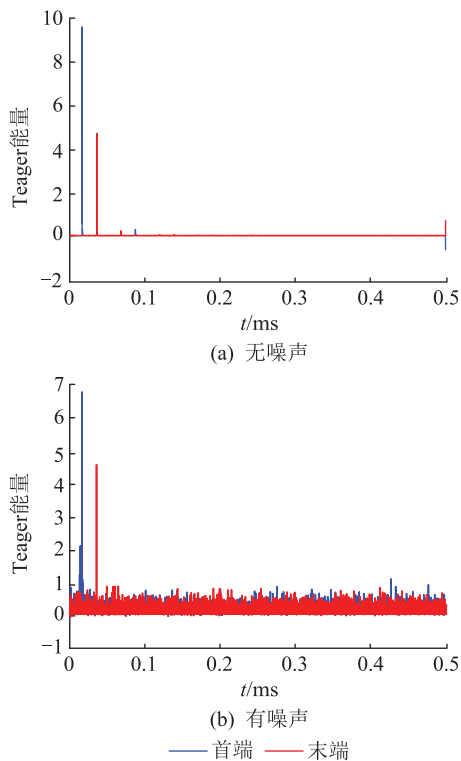


图5 Teager 能量分布

Fig.5 Teager energy distribution

试验,计算出前3个尺度对应的PD行波信号到达两端测量点的时间,并求取信号到达两端测量点的时间差。按照此方式,共构建199组训练样本。其中,每个样本集  $S_i (i=1, 2, \dots, 199)$  由3个尺度对应的两端时间差和相应的PD位置组成。为了保证训练精度,同时简化神经网络结构,设计如图6所示的RBF神经网络。

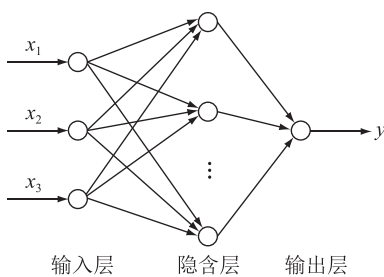


图6 RBF神经网络结构

Fig.6 RBF neural network structure

图6中,RBF神经网络有  $x_1, x_2, x_3$  3个输入,分别对应3个尺度的双端时间差,而其输出只有PD位置  $y$ 。隐含层的神经元数目以及函数的拟合光滑度由RBF函数决定,通过仿真可设置其值为1.5。神经网络的学习方式设置为自组织选取中心法,其余设置保持默认值,神经网络的训练效果如图7所示。

根据PD信号在电缆中的传播特性,提出EMD

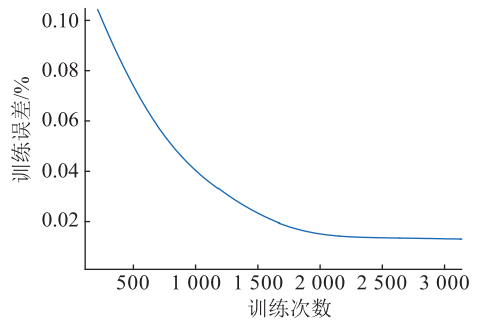


图7 RBF神经网络训练效果

Fig.7 Training effect of RBF neural network

与Teager能量算子相结合的电缆两端测量点处PD信号初始波头辨识方法。采用RBF神经网络对样本进行训练,结合PD信号到达电缆两端测量点的时间差,实现XLPE电缆PD精确辨识。具体流程如图8所示。

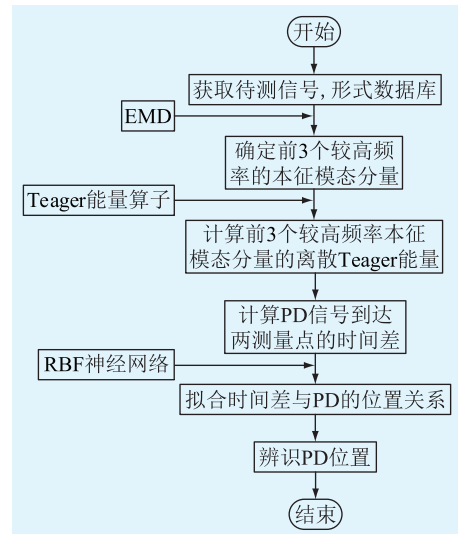


图8 电缆PD辨识流程

Fig.8 PD location flow of cable

### 3 仿真与真型验证

#### 3.1 仿真模型

通过大量的比较分析,选择PSCAD中基于Frequency Dependent Phase Model的Cable Constants Coax Cable Data电缆模型进行建模仿真。电缆本体由6部分组成:导体线芯、内半导体屏蔽层、绝缘层、外半导体屏蔽层、金属屏蔽层和外护套。电缆参数如表1所示。

在PSCAD中搭建如图9所示的10 kV电缆PD辨识仿真电路,模拟PD信号如式(8)所示<sup>[16]</sup>。

$$I_t = I_0(e^{-1.3t/\tau} - e^{-2.2t/\tau}) \sin(2\pi f_c t) \quad (8)$$

式中: $I_0$ 为信号幅值; $\tau$ 为衰减系数; $f_c$ 为振荡频率。向电缆注入如图10所示的模拟PD信号<sup>[17]</sup>。

表 1 电缆参数  
Table 1 Cable parameters

参数	数值
导体截面半径/mm	4.8
内半导体层厚度/mm	0.8
外半导体层厚度/mm	0.8
绝缘厚度/mm	4.5
金属屏蔽层外半径/mm	11.075
绝缘层的相对介电常数	2.3
导体相对磁导率	1
金属屏蔽层相对磁导率	1
导体电阻率/( $\Omega \cdot m$ )	$1.724 \times 10^{-8}$
金属屏蔽层电阻率/( $\Omega \cdot m$ )	$2.840 \times 10^{-7}$
电缆长度/km	1

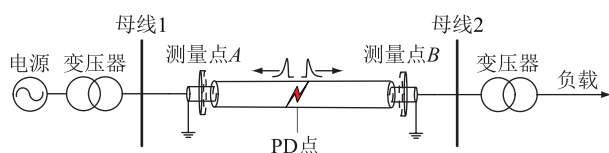


图 9 电缆 PD 辨识仿真电路

Fig.9 Simulation circuit of cable PD identification

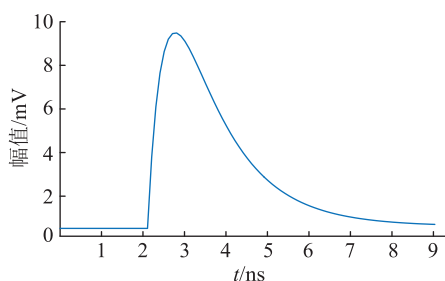


图 10 PD 信号波形

Fig.10 Signal waveform of PD

### 3.2 不同 PD 位置误差分析

基于图 9 中的模型,设置 PD 发生在电缆的不同位置,采样频率为 125 MHz,辨识误差见表 2。

表 2 不同 PD 位置的辨识误差  
Table 2 Identification errors of different PD locations m

PD 位置	辨识结果	辨识误差
23	26.094 5	3.09
167	169.912 8	2.91
246	243.317 9	2.68
324	326.461 8	2.46
487	484.957 8	2.04
518	520.175 1	2.18
672	669.473 9	2.53
753	755.723 8	2.72
841	838.062 7	2.94
978	981.204 6	3.20

由表 2 可知,采用文中所提辨识方法对电缆 PD

进行辨识时,辨识结果精度较高,最大辨识误差不超过电缆总长度的 0.4%,满足工程需求。当 PD 位置靠近电缆两端时,辨识误差较大,原因为到达远端测量点的 PD 信号衰减和色散现象严重,波形产生了较大畸变,致使 PD 信号到达电缆两端测量点时间差计算产生了误差。但文中所提 PD 辨识方法在一定程度上能削弱此影响,使辨识误差降到较低水平,满足工程应用需求。

### 3.3 噪声干扰影响下的误差分析

电力系统中的噪声指低于 200 kHz,叠加在电力系统的相线、中性线或信号线的无用信号。而 PD 检测常用高频电流互感器,工作带宽多为 20 kHz~200 MHz。为了验证该方法的抗噪声干扰能力,在 376 m 处设置 PD 点并加入不同信噪比的高斯白噪声,辨识误差如表 3 所示。

表 3 不同信噪比下的辨识误差  
Table 3 Identification errors of different signal-to-noise ratios

信噪比大小/dB	辨识结果/m	辨识误差/m
25	379.327 9	3.33
30	372.785 4	3.21
35	379.258 2	3.26
40	373.086 3	2.91
45	373.247 1	2.75
50	378.685 6	2.69

由表 3 可知,随着噪声增大,辨识误差有所增加但不明显。可见,Teager 能量算子具有较好的抗噪声干扰能力,且 RBF 神经网络具有很强的鲁棒性。

### 3.4 与现有方法辨识误差对比

为了对比验证所提方法的精确性,在 86 m 处设置 PD 点,分别采用峰值法、小波模极大值法和所提 EMD 与 Teager 能量算子法进行 PD 辨识误差对比,结果见表 4。由表 4 可知,基于 EMD 与 Teager 能量算子的 PD 辨识方法精度最高且误差最小。

表 4 不同方法辨识误差对比  
Table 4 Comparison among different PD identification methods m

辨识方法	辨识结果	辨识误差
峰值法	79.346 2	6.65
小波模极大值法	80.192 3	5.81
EMD 与 Teager	88.137 2	2.14

### 3.5 真型验证

为了验证所提方法在实物电缆中的可行性,参考图 9 进行真型试验接线,现场如图 11 所示。现场测试系统为振荡波 PD 测试系统,所采用的高频电

流传感器带宽为 2.5~216 MHz,示波器采样频率为 120 MHz。截取某段 PD 信号进行去噪和放大后如图 12 所示,PD 辨识结果如表 5 所示。



图 11 真型实验现场

Fig.11 Real physical experiment site

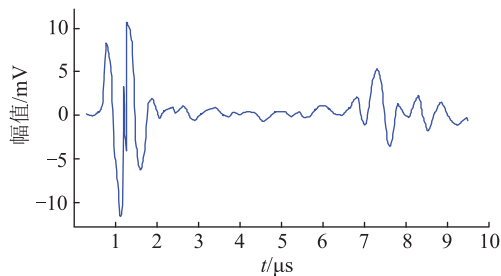


图 12 PD 信号

Fig.12 PD signal

表 5 真型试验不同 PD 位置的辨识误差

Table 5 Identification errors of different PD locations under real physical experiment m

PD 位置	辨识结果	辨识误差
23	28.220 0	5.22
167	169.439 6	2.44
246	242.457 8	3.54
324	328.157 8	4.15
487	483.235 4	3.76
518	521.223 1	3.22
672	675.452 1	3.45
753	756.743 1	3.74
841	839.332 7	1.67
978	982.225 6	4.22

由表 5 可知,由于现场噪声与采集装置的影响,PD 定位误差较仿真虽有所增加,但所提方法在实物电缆上的应用效果依旧良好,满足工程应用需求。

## 4 结论

PD 行波信号在电缆中传播时受衰减和色散影响,当传播距离较长时其波形畸变严重,且 PD 信号波速难以精确确定,故传统的时域反射法难以精确辨识电缆 PD。文中提出了基于 EMD 与 Teager 能量算子相结合的双端时间差电缆 PD 辨识方法,通过理论分析和仿真计算得出以下结论:

(1) 基于 EMD 与 Teager 能量算子相结合的波

头识别方法能实现电缆两端测量点处 PD 信号初始波头的准确辨识,且抗噪声干扰能力强。

(2) 采用 RBF 神经网络对样本进行训练,结合 PD 信号到达电缆两端测量点的时间差,可实现 XLPE 电缆 PD 的精确辨识。该方法无需求取 PD 信号波速,且能进一步削弱噪声和 PD 信号衰减对辨识精度的影响。

## 参考文献:

- [1] 赵学风,蒲路,段玮,等. 基于谐振原理由电容器组供电的电缆局放振荡波检测与定位技术[J]. 电气应用,2019(6): 28-35.  
ZHAO Xuefeng, PU Lu, DUAN Wei, et al. Damped AC technique based on resonant principle and supplied by capacitor banks for partial discharge detection and location in power cables[J]. Electrotechnical Application, 2019(6): 28-35.
- [2] 符玲,刘鸿,林圣,等. 计及局放信号传播特性的多源局放定位算法[J]. 高电压技术,2017,43(12): 4060-4069.  
FU Ling, LIU Hong, LIN Sheng, et al. Multi source PD localization algorithm considering propagation characteristics of PD signals[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12): 4060-4069.
- [3] 姜芸,周韞捷. 分布式局放在线监测技术在上海 500 kV 交联聚乙烯电力电缆线路中的应用[J]. 高电压技术,2015,41(4): 1249-1256.  
JIANG Yun, ZHOU Yunjie. Application of distributed partial discharge on-line monitoring technology in Shanghai 500 kV XLPE power cable line[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1249-1256.
- [4] KIM M H, UNOK T, MURAKAMI Y, et al. Study on water tree degradation diagnosis of XLPE cable using charge radar[C]// Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials. 2014: 148-151.
- [5] GARGARI S M, WOUTERS P A A F, WIELEN P C J M V D W, et al. Practical experiences with on-line PD monitoring and interpretation for MV cable systems[C]// 2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics. 2010: 1-4.
- [6] 张磊祺,盛博杰,姜伟,等. 基于电缆传递函数和信号上升时间的电力电缆局放在线辨识方法[J]. 高电压技术,2015,41(4): 1204-1213.  
ZHANG Leiqi, SHENG Bojie, JIANG Wei, et al. On-line power cable partial discharge localisation method based on cable transfer function and detected pulse rise-time[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1204-1213.
- [7] 高树国,刘贺晨,范辉,等. 考虑波速特性的小波变换模极大值法的电力电缆局部放电定位研究[J]. 电网技术,2016,40(7): 2244-2250.  
GAO Shuguo, LIU Hechen, FAN Hui, et al. PD location method of power cable based on wavelet transform modulus maxima considering wave characteristics[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2244-2250.
- [8] 周凯,赵世林,何珉,等. 考虑短距离电缆中行波特性的振荡波局放辨识方法[J]. 电网技术,2017,41(6): 2047-2054.

- ZHOU Kai, ZHAO Shilin, HE Min, et al. An oscillating wave test method based on traveling wave characteristics of partial discharges for defect location in short cables[J]. Power System Technology, 2017, 41(6):2047-2054.
- [9] 成永红, 谢小军, 陈玉, 等. 气体绝缘系统中典型缺陷的超宽频带放电信号的分形分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8):99-102.  
CHENG Yonghong, XIE Xiaojun, CHEN Yu, et al. Study on the fractal characteristics of ultra-wideband partial discharge in gas-insulated system(GIS) with typical defects[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8):99-102.
- [10] 张泓, 董涛, 张博, 等. 电力电缆局放信号传播特性分析及仿真研究[J]. 电线电缆, 2016(4):1-5.  
ZHANG Hong, DONG Tao, ZHANG Bo, et al. Characteristic analysis and simulation research on PD pulse propagation in power cables[J]. Wire & Cable, 2016(4):1-5.
- [11] 王彩雄, 唐志国, 常文治, 等. 局放超高频检测抗干扰与多源放电信号分离方法[J]. 电网技术, 2012, 36(3):46-50.  
WANG Caixiong, TANG Zhiguo, CHANG Wenzhi, et al. A method for anti-interference and multi-source discharge signal separation in ultra high-frequency partial discharge detection [J]. Power System Technology, 2012, 36(3):46-50.
- [12] 李通, 薛峰. UHF 局放检测技术在 GIS 故障诊断中应用与分析[J]. 供用电, 2018, 35(12):80-88.  
LI Tong, XUE Feng. Application and analysis of UHF partial discharge detection technology in GIS fault diagnosis [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(12):80-88.
- [13] 王龙. 基于 EMD-TFPP 结合 Teager 能量算子的超声红外电子白板辨识算法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.  
WANG Long. Positioning algorithm of ultrasonic infrared electronic whiteboard based on EMD-TFPP combined with Teager energy operator [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.
- [14] PETROS M, KAISER J F, THOMAS F Q. Energy separation in signal modulations with application to speech analysis [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(10):3024-3051.
- [15] 杨青乐, 梅检民, 肖静, 等. Teager 能量算子增强倒阶次谱提取轴承微弱故障特征[J]. 振动与冲击, 2015, 34(6):1-5.  
YANG Qingle, MEI Jianmin, XIAO Jing, et al. Weak fault feature extraction for bearings based on an order cepstrum enhanced with Teager energy operator [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(6):1-5.
- [16] 张宇辉, 刘梦婕, 黄南天, 等. 频率切片小波变换在局放信号分析中的应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(7):2283-2293.  
ZHANG Yuhui, LIU Mengjie, HUANG Nantian, et al. Application of frequency slice wavelet transform in partial discharge signal analysis [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7):2283-2293.
- [17] ALLEN B, ZBIGNIEW L. Fault location in power networks with mixed feeders using the complex space-phasor and Hilbert-Huang transform [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2012, 42(1):208-219.

作者简介:



刘波

刘波(1983),男,硕士,工程师,从事电网运维相关工作(E-mail:614708649@qq.com);  
孟祥震(1994),男,硕士在读,研究方向为电力设备故障诊断与保护;  
迟鹏(1990),男,博士在读,研究方向为电气设备状态感知。

### Cable partial discharge identification based on EMD and Teager energy operator

LIU Bo<sup>1</sup>, MENG Xiangzhen<sup>2</sup>, CHI Peng<sup>2</sup>, NIE Pengfei<sup>3</sup>, DING Ran<sup>4</sup>, LIANG Rui<sup>2</sup>

(1. State Grid Xuzhou Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Xuzhou 221005, China;

2. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3. Avic Jonhon Optronic Technology Co., Ltd., Luoyang 471003, China;

4. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Cross linked polyethylene (XLPE) cables are commonly used in the power grid of mining area, but the operation environment is relatively bad and partial discharge (PD) of cables often occurs. Aiming at the problem of PD identification in the cable, the propagation characteristics of PD signal in XLPE cable are studied. According to propagation characteristics, method combining empirical mode decomposition (EMD) with Teager energy operator is proposed to identify the initial wave head of PD signal at both ends of the cable. The method greatly improves the ability of anti-noise in wave head identification. The radial basis function (RBF) neural network is used to train the training samples. Combined with the time difference between the PD signal and the measurement point at both ends of the cable, the accurate location of PD in XLPE cable is realized. PSCAD/EMTDC is used to build the cable simulation circuit. Simulation results show that proposed method has high PD identification accuracy and small identification error.

**Keywords:** cable; partial discharge (PD) identification; empirical mode decomposition (EMD); Teager energy operator; radial basis function (RBF) neural network