

DOI: 10.7667/PSPC171502

## 基于EMMD局域波分解的网络行波测距方法研究

杜向楠<sup>1</sup>, 杨飞<sup>2</sup>, 郭宁明<sup>1</sup>, 闻福岳<sup>1</sup>, 许勇<sup>1</sup>

(1. 中电普瑞电力工程有限公司, 北京 102200; 2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006)

**摘要:** 目前, 随着能源互联网的不断发展, 行波测距装置省级互联为实现网络化测距提供了良好的数据平台。在重点分析网络行波的特征上, 提出一种基于极值域均值模式分解(EMMD)的局域波自适应行波故障定位方法。该方法有效抑制了EMD分解过程中产生的过冲和欠冲现象。在模式混叠方面, 在EEMD方法基础上提出了一种加入互补噪声的方法(CEEMD)。最后通过一组现场实际故障数据进行算例分析, 验证了该方法的有效性。

**关键词:** 网络行波测距; EMMD分解; 局域波; 互补噪声

### Research on network traveling wave fault location based on the decomposition of EMMD

DU Xiangnan<sup>1</sup>, YANG Fei<sup>2</sup>, GUO Ningming<sup>1</sup>, WEN Fuyue<sup>1</sup>, XU Yong<sup>1</sup>

(1. C-EPRI Electric Power Engineering Co., Ltd., Beijing 102200, China;

2. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co. Ltd., Shenyang 110006, China)

**Abstract:** At present, with the continuous development of the energy of the Internet, traveling wave location device upgraded to the provincial Internet, the provincial Internet provides a good data platform to realize the network fault location. Focusing on the analysis of the network characteristics in traveling wave, this paper puts forward a method of local wave adaptive traveling wave fault location based on Extremum Field Mean Mode Decomposition (EMMD). This method effectively restrains the Empirical Mode Decomposition (EMD) overshoot and undershoot phenomenon in the process of decomposition and proposes a method of adding Complementary Noise based on EEMD (CEEMD) for mode aliasing. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by a set of field fault recorder data.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Xinjiang Electric Power Company (No. 5230BD1501GK).

**Key words:** network traveling wave location; EMMD; local wave; complementary noise

## 0 引言

随着现代电网互联互通技术的发展, 行波测距装置联网成为可能, 广域行波装置互联可以方便集中管理、维护以及故障信息发布等, 目前国内多地(如辽宁、广东、陕西、湖南等)供电公司正在开展或已经开展将测距装置由站与站之间通信改造为省级联网方式<sup>[1-4]</sup>。行波测距装置联网不仅可以发现某个测距装置发生GPS、采样、通信等故障, 还可以在一端数据异常时, 利用相邻线路或相邻站行波数据进行二次有效测距<sup>[5-6]</sup>。目前基于小波变换的行波测距技术已经成熟应用, 现场应用的小波尺度一般为固定尺度<sup>[7]</sup>, 通过人工短路试验或经验波速等方

法设定波速。当采用网络行波即非故障线路上的故障行波进行测距时, 由于各相邻线路上的透射波高频分量经母线以及母线上各出线的衰减效应, 幅值降低, 波头会变得平缓, 削弱高频分量, 固定尺度有时不能自适应这种变化特征频带的行波信号, 导致波头计算误差较大。

文献[8-11]提出了基于HHT及EMD分解的高频暂态行波波头的提取方法, 但是均未考虑EMD分解过程中存在的过冲和欠冲现象。文献[12]提出并总结了局域波分析理论, 指出EMD分解是局域波分解的一种, 并给出了几种局域波分解方法。本文是在文献[12]的基础上, 提出一种基于极值域均值分解(EMMD)的网络行波定位方法, 通过对现场实录数据进行分析, 证明了该方法相对于EMD在行波波头标定方面具有更加精准的特点, 是一种有

基金项目: 国网新疆电力公司科技项目资助(5230BD1501GK)

效的自适应行波定位方法。

## 1 网络行波测距原理

### 1.1 基于网络行波故障定位基本原理

双端行波测距是利用故障产生的第一个初始行波波头，通过计算故障行波波头到达线路两端的时间差进行测距，如图 1 所示，假设故障点位于变电站 M、N 之间的 Line1 线路上，距离 M 侧变电站为 L1，距离 N 侧变电站为 L2，行波到达 M、N 的时间分别为 t<sub>1</sub>、t<sub>2</sub>，通过式(1)、式(2)来计算故障位置，双端测距计算的重点是：行波到达时刻的精确识别及波速度<sup>[13]</sup>。双端行波测距由于是利用第一个行波波头，不存在区分故障点反射波和对端母线反射波的问题，原理上简单可靠。

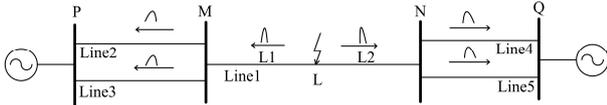


图 1 故障行波在输电线路网络中传播示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fault traveling wave in transmission line network

$$L_1 = \frac{L - (t_2 - t_1)v}{2} \quad (1)$$

$$L_2 = \frac{L - (t_1 - t_2)v}{2} \quad (2)$$

故障行波在到达母线后会产生波的折反射，在图 1 中，故障行波在到达故障线路 Line1 两端的 M 和 N 变电站后继续向下一级的 P、Q 变电站进行传播，非故障线路 Line2—Line5 上均可以检测到该故障行波，利用该到达行波可以继续采用双端测距基本公式，得出故障点距离。因此，区域行波定位原理是建立在双端测距基础上，在故障线路的一侧或两侧的测距终端出现未启动、数据丢失以及 GPS 异常等故障时，可采用相邻线路上的各启动录波数据进行二次匹配双端测距，确定故障位置。

### 1.2 暂态行波在传输线上的传播过程

在线路发生故障后，根据叠加原理，相当于在故障点附加了一个等效电压源，在该附加电源的作用下，将产生由故障点向线路两侧传播的暂态行波。式(3)是沿三相输电线路故障行波的波动方程。

$$\begin{cases} -\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ -\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = CL \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \end{cases} \quad (3)$$

由于导线间存在电磁、电感耦合，因此需要先进行相模变换，常用的模量变换有凯伦贝尔(Karenbaner)变换和克拉克(Clarke)变换。本文采用 Clarke 变换对三相电流进行解耦，以消除三相间耦合的影响，变换到模分量状态，如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中：i<sub>0</sub>、i<sub>1</sub>、i<sub>2</sub>为解耦后的电流模分量，由于零模分量 i<sub>0</sub>要流经大地，信号色散及衰减较为严重，且波速不稳定。本文在测距中选用线模分量 i<sub>1</sub>作为信号分析对象。

行波在输电线上传播时，行波幅值及行波波速会随频率的变化而变化，称为行波的色散现象<sup>[14-15]</sup>。根据波动方程可以求得三相输电线路的模传播常数 γ，它由模量衰减常数 α 和模相位常数 β 构成，如式(5)所示。

$$\gamma_m(\omega) = \alpha_m(\omega) + j\beta_m(\omega) \quad (5)$$

其中，α<sub>m</sub>(ω)、β<sub>m</sub>(ω)分别为

$$\alpha_m(\omega) = \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{(\omega^2 L_m C_m - G_m R_m)^2 + \omega^2 (R_m C_m + G_m L_m)^2} - (\omega^2 L_m C_m - G_m R_m)} \quad (6)$$

$$\beta_m(\omega) = \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{(\omega^2 L_m C_m - G_m R_m)^2 + \omega^2 (R_m C_m + G_m L_m)^2} + (\omega^2 L_m C_m - G_m R_m)} \quad (7)$$

式中：R、L、G、C 分别为传输线路的电阻、电感、电导、电容，考虑行波色散时，它们均为随频率变化的参数；α<sub>m</sub>(ω)为行波衰减常数，它随频率的增大而增大，是引起故障行波、透射波波头畸变以及波头幅值衰减的主要因素。

### 1.3 变电站一次系统对行波传输的影响

变电站的母线、电压互感器、电流互感器、变压器等一次设备存在一定的对地电容 C<sub>0</sub>，当故障行波到达母线后，受其影响波头会有所衰减，故障行波通过母线透射到其他非故障相邻线路，并传播到下一级变电站，在此过程中行波均会有不同程度的衰减，假设各相邻的非故障线路特征阻抗相同，这时各线路的折射系数 λ 为

$$\lambda = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (8)$$

式(8)中，Z<sub>1</sub>、Z<sub>2</sub>分别为阻抗不连续点前后的等效阻抗，各线路电流透射行波 i'<sub>n</sub> 为

$$i'_n = \frac{1}{n-1} \lambda i \quad (9)$$

式中：n 为母线出线数目；i 为电流入射行波。

## 2 局域波分析理论及 EMD 算法

### 2.1 局域波分析理论

小波变换在图像处理、信号奇异性检测以及信号去噪方面具有非常优异的特性,但本质上仍是建立在傅里叶频率基础上,同样会受海森堡不确定原理制约。在实际使用中往往存在选择哪一种小波基以及基函数缺乏自适应等问题,需要采用各类小波进行大量测试,最终确定最优小波基函数及分解尺度<sup>[16-17]</sup>。但在分析网络行波测距时,由于行波存在 1.2 和 1.3 中的不同程度的色散效应,即使确定了最优的小波尺度,但该尺度不能自适应根据信号具体特征进行调整,依然会产生较大的计算误差,甚至计算失效。

局域波分析理论是指任一复杂信号都可以分解成有限个幅度或频率调制的基本内蕴模式函数分量,如式(10)所示。局域波分析理论基于 Hilbert-Huang 变换发展而来, Hilbert-Huang 变换只是局域波分析理论的一种,从信号分解基函数角度来看,局域波分解中的基函数依赖于信号自身,即它是自适应的,随着信号的不同而变化<sup>[18]</sup>。而小波分析中的基函数需要预先根据信号的特征频带设定为一固定的基函数,在之后的应用过程是不变的。局域波分解过程基于局部瞬时频率,而不是傅里叶频率,两者具有不同的物理意义,因此局域波分解不受不定原理制约。

N.E.Huang 提出基于经验模式分解(EMD)的算法,式(10)为 EMD 分解公式。

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \text{imf}_i(t) + r(t) \quad (10)$$

式中:  $\text{imf}_i(t)$  为第  $i$  层 IMF 分量;  $r(t)$  为剩余分量;  $n$  为分解层数。

EMD 具体分解过程为

1) 找到原始信号  $x(t)$  所有局部极值点,再利用三次样条函数分别对局部最大值和局部最小值进行插值拟合,得到上下包络线。求出上下包络均值  $m_1(t)$ , 并令:

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (11)$$

2) 对  $h_1(t)$  进行式(11)的迭代运算,直到  $h_1k(t)$  满足 IMF 的两个条件: (1) 在整个数据中,极值点的数量与过零点的数量应相同或相差一个; (2) 在任何一点,被它局部最大值和局部最小值定义的包络均值为零。令  $h_1k(t)$  即为  $\text{imf}_1(t)$ 。

3) 令  $r_1(t) = x(t) - \text{imf}_1(t)$ , 并进行 1)、2) 过程。

4) 最终  $x(t)$  被分解为  $k$  个 imf 分量, 即:

$$\text{imf}_1(t), \dots, \text{imf}_k(t), r_m(t)。$$

EMD 存在的问题: 基于样条插值存在容易带来过冲和欠冲, 且拟合过程比较耗时等问题。

### 2.2 极值域均值模式分解 EMD

极值域均值模式分解(EMMD)主要是先利用相邻极值点间的数据求得局部均值, 再用三次样条插值得到数据的均值曲线。该方法可以较好地消除 EMD 过程中的过冲和欠冲问题, 且每次分解只需要一次样条插值, 具体步骤如下。

1) 根据式(12), 求出所有极值点间的局部均值, 并作为新的极值点。

$$f(\xi) = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx \quad (12)$$

2) 利用两个相邻极值点(新生成的极值点)间的均值加权平均求得所有极值点处的局部均值。

3) 对所有局部均值进行三次样条拟合, 求出均值曲线。

根据上述过程可知, EMD 算法利用了所有原始数据, 因而求得的局部均值更加准确。

EMMD 具体分解过程如下。

首先, 求出被分析信号(为一组离散采样值)所有  $k$  个局部均值点, 形成极值点序列  $e(t_i)$ , 其中  $i=1, 2, \dots, k$ , 然后根据式(12), 计算两相邻极值点间所有的数据的局部均值  $m_i$ , 其中  $i=1, 2, \dots, k$ 。对应离散信号  $x(t)$ ,  $t_i$  和  $t_{i+1}$  间数据的均值由式(13)计算。

$$m_i(t_\xi) = \frac{1}{t_{i+1} - t_i + 1} \sum_{t=t_i}^{t_{i+1}} x(t) \quad (13)$$

基于两极值点间的数据一般是均匀变化的, 取  $t_\xi = (t_i + t_{i+1})/2$ , 同理,  $t_{i+1}$ 、 $t_{i+2}$  间的数据平均值  $m_{i+1}$  由式(14)计算。

$$m_{i+1}((t_{i+1} + t_{i+2})/2) = \frac{1}{t_{i+2} - t_{i+1} + 1} \sum_{t=t_{i+1}}^{t_{i+2}} x(t) \quad (14)$$

这样,  $m_i$  就代表了第  $i$  个极值点和第  $i+1$  个极值点间数据的局部平均值,  $m_{i+1}$  就代表了第  $i+1$  个极值点和第  $i+2$  个极值点间数据的局部平均值。对  $m_i$  和  $m_{i+1}$  加权平均求  $i+1$  处极值点的局部均值  $m_{t_{i+1}}$ , 即:

$$m(t_{i+1}) = h(t_i) \times m_i + h(t_{i+1}) \times m_{i+1} \quad (15)$$

式中,  $h(t_i) = \frac{t_{i+2} - t_{i+1}}{t_{i+2} - t_i}$ 、 $h(t_{i+1}) = \frac{t_{i+1} - t_i}{t_{i+2} - t_i}$ ,  $t_i$  代表第

$i$  个极值点。对局部均值  $m_{t_{i+1}}$  用三次样条插值方法即可得数据的均值曲线。将该均值曲线作为  $m_1(t)$  代入到 2.1 节中式(11)中, 重复 2.1 节中的 2)、3)、

4)步骤,即可得到所有的 imf 分量。

### 2.3 EMD、EMMD 极值域均值分解比较

图 2 是对一段故障行波分别采用 EMD 分解和极值域均值分解(EMMD)两种方法进行一次迭代后得到  $\text{imf}_1$  分量的波形图。

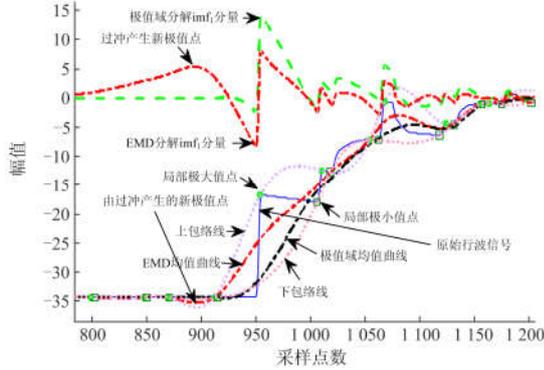


图 2 迭代一次  $\text{imf}_1$  分量分解结果

Fig. 2 Iterative  $\text{imf}_1$  component decomposition result

图 2 中可以看出, EMD 在分解过程中  $\text{imf}_1$  分量产生了新的伪极值点,这主要是因为求上下包络曲线期间采用样条拟合函数而产生了新极值点,而极值域均值模式分解方法则较好地分解出了原始信号高频分量,有效抑制了数据的过冲和欠冲。需要说明的是,在进行 EMD 分解的多次迭代计算过程中,会进一步放大过冲或欠冲效应,对波头的准确标定带来较大误差。

### 2.4 模式混叠及基于互补噪声的消除方法

针对 EMD 分解中存在的模态混合问题,文献[19]提出了集总经验模态分解(EEMD),该方法可以有效利用白噪声的 EMD 特征,进而减少频谱混叠现象。EEMD 存在以下不足:1) EEMD 过程需要进行上百次的集总平均,耗时较长,在实际应用中效果不理想;2)在进行对信号加噪后,虽然通过集总平均过程可以消除该噪声,但难免会在每个 IMF 分量中残留,影响最终计算结果。针对该问题,文献[20]提出了一种互补集总经验模态分解方法(CEEMD),该方法通过对同一信号分别添加正、负符号的白噪声,再利用式(18)进行相加,最后使 imf 分量中的噪声抵消掉。该方法与直接进行 EEMD 结果基本相同,但在计算量上降低了集总平均次数,可以大大加快信号的处理速度。

互补 EEMD 方法的主要步骤为

对  $x(t)$  做 EEMD 时,令集总平均的次数为  $L$ ,对  $x(t)$  第  $i$  次施加噪声后,有:

$$x_i^+(t) = x(t) + u_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (16)$$

再令  $x(t)$  减去  $u_i(t)$ , 得到

$$x_i^-(t) = x(t) - u_i(t), \quad i = 1, 2, \dots, L \quad (17)$$

对  $x_i^-(t)$  和  $x_i^+(t)$  分别做 EEMD, 各得到一组 IMF, 分别记为  $\text{imf}_i^+$ 、 $\text{imf}_i^-$ ,  $i = 1, 2, \dots, L$ , 令

$$\text{imf}_i = (\text{imf}_i^+ + \text{imf}_i^-) / 2 \quad (18)$$

对  $\text{imf}_i$  求集总平均, 即

$$\text{imf} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \text{imf}_i \quad (19)$$

则 imf 是对  $x(t)$  做 CEEMD 分解得到的固态模式函数, 它一般应该有  $M = \log_2 N - 1$  个分量, 即  $c_1(t)$ ,  $c_2(t), \dots, c_n(t)$ , 其中  $N$  是  $x(t)$  离散化以后的长度。

## 3 网络行波故障定位流程

本文提出的基于 EEMD 算法的网络行波故障测距方法步骤如图 3 所示。原始信号分解前加入原始信号标准差的 0.1 的互补白噪声, 对加噪后的信号进行 EEMD 分解, 得到 IMF 分量, 对各 IMF 分量进行集总平均消除噪声干扰, 利用  $\text{imf}_1$  分量代入双端公式完成故障定位, 具体过程如图 3 所示。

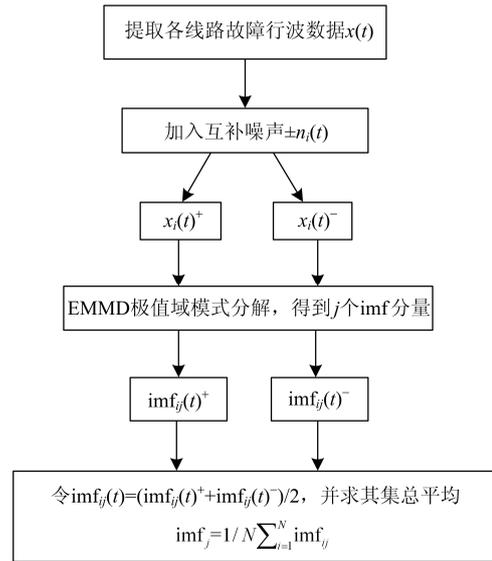


图 3 加入互补噪声的 EEMD 分解流程图

Fig. 3 Flow chart of adding complementary noise EEMD decomposition

## 4 算例分析

2017年7月辽宁省燕建线发生一次C相短路故障,故障点位于距离燕南站46.675 km,现场各站安装的为WFL型号行波测距装置,测距算法为小波变换,在故障期间除燕建线正常启动录波外,其他相邻的多条非故障线路也均检测到行波并启动了录波,燕建线及相邻线路拓扑结构图如图4所示。

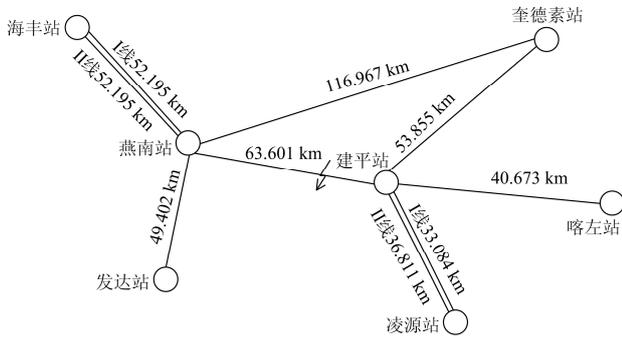


图 4 燕建线及相邻站拓扑结构

Fig. 4 Topological structure of adjacent station and Yanjian line

燕南站和建平站的故障线路及相邻非故障线路录波波形如图 5 和图 6 所示, 其中图 5 中的故障线路 1、非故障线路 2~5 分别对应燕南站的燕建线、燕奎线、燕发线、燕海 I 线、燕海 II 线, 图 6 中的故障线路 1、非故障线路 2~5 分别对应建平站的燕建线、建左线、建凌 II 线、建凌 I 线、建奎线。

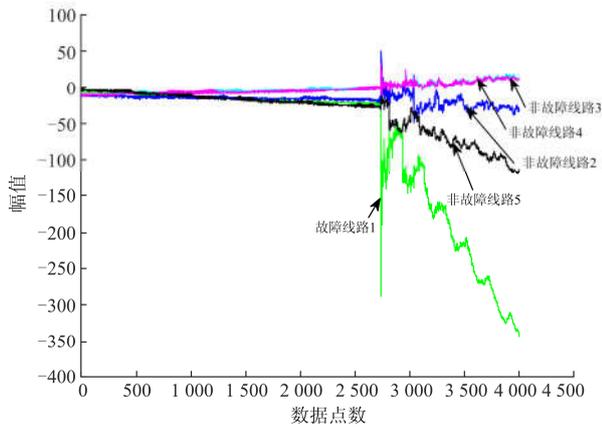


图 5 燕南站各线路录波波形图

Fig. 5 Record waveform of each line of Yannan station

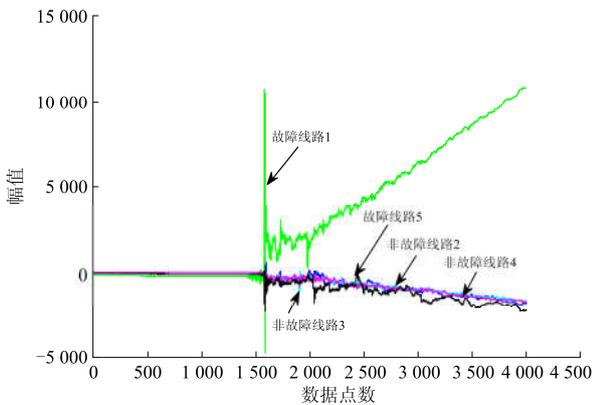


图 6 建平站各线路录波波形图

Fig. 6 Record waveform of each line of Jianping station

图 6 中各站的测距装置采样频率为 625 kHz。利用 EMD 和极值域均值分解算法分别对上面波形进行数据处理, 得到图 7 和图 8 所示波形。

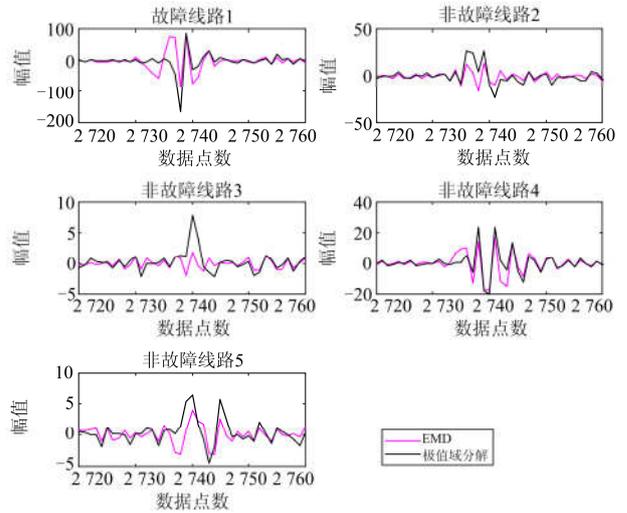


图 7 燕南站各线路 EMD&EMD 分解图

Fig. 7 EMD&EMD decomposition of Yannan station lines

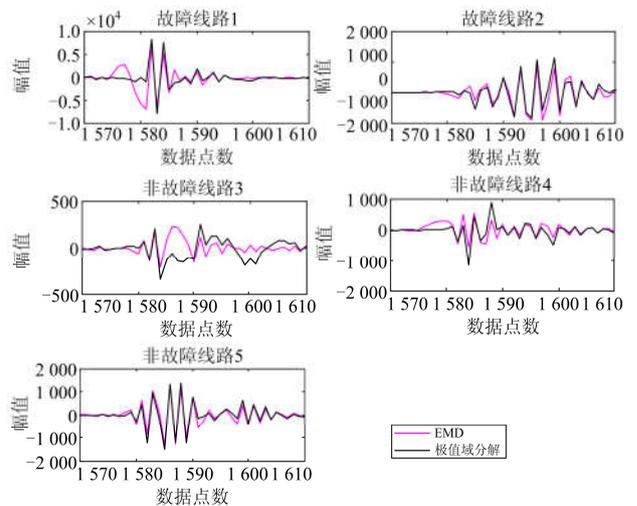


图 8 建平站各线路 EMD&EMD 分解图

Fig. 8 EMD&EMD decomposition of Jianping station lines

根据图 7 和图 8 可知, 图中各线路对应的模极值点应为故障行波波头的初始位置, 据此可以得到以下波头位置信息, 以记录采样点数作为比较标准, 如表 1 和表 2 所示。

现场测距装置采样频率为 625 kHz, 即 1 个采样点的误差会对应 1.6  $\mu$ s 的时间误差, 若波速采用 294 m/ $\mu$ s, 相当于一个采样点误差对应 470.4 m 测距误差。在表 1 和表 2 中可以发现利用故障线路 1 的录波数据, 小波变换、EMD、极值域分解三种

表 1 M 侧雁南站各波头时刻(采样点数)

Table 1 Calculation of wave head at M side Yannan station (sampling points)

	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	线路 5
小波变换	2 739	2 743	2 801	3 315	2 747
与实际误差	1	5	63	577	9
EMD 分解	2 739	2 738	失效	2 740	2 744
与实际误差	1	0	∞	2	6
极值域分解	2 738	2 738	2 740	2 738	2740
与实际误差	0	0	2	0	2

表 2 N 侧建平站各波头时刻(采样点数)

Table 2 Calculation of wave head at N side of Jianping station (sampling points)

	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	线路 5
小波变换	1 582	1 671	1 586	1 591	1 589
与实际误差	0	89	4	9	7
EMD 分解	1 582	1 599	1 586	1 584	1 587
与实际误差	0	16	4	2	5
极值域分解	1 582	1 595	1 584	1 584	1 585
与实际误差	0	13	2	2	3

算法均能较好测得故障点位置, 测距误差小于 500 m, 而利用两站的非故障线路 2—5 录波数据(即网络行波数据)时, 小波变换因尺度选取相对固定导致误差均大于另外两种算法。EMD 算法因在分解过程中存在欠冲、过冲现象, 多次迭代后会放大新极值点并降低原信号的极值点, 如在图 7 中, 非故障线路 3 的原初始行波波头信号在经过多次 EMD 迭代后, 突变信号幅值已经接近噪声幅值, 导致波头检测失效, 而极值域均值算法较好地分解出了行波波头, 整体平均误差低于 EMD 分解算法和小波变换算法。通过表 2 可以看出, 虽然极值域均值算法在一定程度上抑制了过冲和欠冲, 但在行波衰减严重, 初始波头幅值较低情况下, 依然会存在较大误差, 该误差产生主要原因为局域波分解理论是一种全局的信号自适应分解方法, 系统噪声会在样条拟合迭代过程中扩散到全局数据中, 本文通过互补噪声方法降低其影响, 但并不能完全消除。

### 5 结论

行波测距装置的省级互联为实现网络化测距提供了良好的数据平台。受母线及各出线影响, 故障行波到达各相邻站的波形衰减较大, 利用固定尺度的小波变换技术, 不能较好地适应这种特征频带变化的行波信号。局域波分解方法不同于小波变换, 它的分解过程是完全基于信号本身, 具有非常良好的应用前景, 本文根据该特点提出一种基于极值域

均值模式分解(EMMD)的局域波自适应行波故障定位方法, 该方法有效抑制了 EMD 分解过程中产生的过冲和欠冲现象, 在进行 EMMD 之前通过加入互补噪声的方法, 有效抑制了模式混叠。文中最后通过一组现场实际故障录波数据验证了该方法的有效性。

### 参考文献

- [1] DENG Feng, ZENG Xiangjun, PAN Lanlan. Research on multi-terminal traveling wave fault location method in complicated networks based on cloud computing platform[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 199-210. DOI: 10.1186/s41601-017-0042-4.
- [2] 何军娜, 陈剑云, 艾颖梅, 等. 电力系统行波测距方法及其发展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 148-152.  
HE Junna, CHEN Jianyun, AI Yingmei, et al. Fault location methods based on traveling wave theory for power system and its development[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 148-152.
- [3] 李泽文, 易志鹏, 杨毅, 等. 基于遗传算法的电网故障行波定位装置的优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 77-82.  
LI Zewen, YI Zhipeng, YANG Yi, et al. Optimal placement of traveling wave fault location equipment for power grid based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 77-82.
- [4] 郭宁明, 杨飞, 覃剑, 等. 基于遗传算法及信号谱分析的电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 79-84.  
GUO Ningming, YANG Fei, QIN Jian, et al. Grid fault location method based on genetic algorithm and signal spectrum analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 79-84.
- [5] 梁睿, 徐成, 王飞, 等. 复杂输电网中基于全网行波信息的测距装置最优配置[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 31-36.  
LIANG Rui, XU Cheng, WANG Fei, et al. Optimal deployment of fault location devices based on wide area travelling wave information in complex power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(21): 31-36.
- [6] 梁睿, 杨学君, 薛雪, 等. 零序分布参数的单相接地故障精确定位研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 472-479.  
LIANG Rui, YANG Xuejun, XUE Xue, et al. Study of accurate single-phase grounding fault location based on

- distributed parameter theory using data of zero sequence components[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 472-479.
- [7] 郭小红, 朱永利, 陈旭, 等. 输电线路雷击组合测距新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 7-9.  
GUO Xiaohong, ZHU Yongli, CHEN Xu, et al. A new combined lightning locating algorithm for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 7-9.
- [8] 杜婉琳, 梁远升, 王钢. 局部耦合双回输电线路故障测距时域算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 59-62.  
DU Wanlin, LIANG Yuansheng, WANG Gang. Fault location algorithm based on time-domain for partial coupling double-circuit transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 59-62.
- [9] 廖晓辉, 赵肖健, 梁恒娜. 一种基于 Hilbert-Huang 变换的电力电缆测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 20-24.  
LIAO Xiaohui, ZHAO Xiaojian, LIANG Hengna. A power cable fault location method based on Hilbert-Huang transform[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 20-24.
- [10] 李天云, 赵妍, 李楠. 基于 EMD 的 Hilbert 变换应用于暂态信号分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 49-52.  
LI Tianyun, ZHAO Yan, LI Nan. Apply empirical mode decomposition based Hilbert transform to power system transient signal analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 49-52.
- [11] 徐俊明, 汪芳宗, 尹星, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的行波法高压输电线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 88-92.  
XU Junming, WANG Fangzong, YIN Xing, et al. A traveling wave fault location method for high voltage power transmission lines based on Hilbert-Huang transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 88-92.
- [12] 盖强, 马孝江, 张海勇, 等. 几种局域波分解方法的比较研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(2): 57-59.  
GAI Qiang, MA Xiaojiang, ZHANG Haiyong, et al. Comparing study for decomposing methods using local wave method[J]. System Engineering and Electronics, 2002, 24(2): 57-59.
- [13] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 影响输电线路行波故障测距方法的主要因素分析[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 28-35.  
QIN Jian, GE Weichun, QIU Jinhui, et al. Analysis of the main influence factors for transmission line fault location methods based on travelling wave[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 28-35.
- [14] 覃剑, 陈祥训, 郑健超. 行波在输电线上传播的色散研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 27-30.  
QIN Jian, CHEN Xiangxun, ZHENG Jianchao. Study on dispersion of travelling wave in transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 27-30.
- [15] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996: 58-61.
- [16] 黄子俊, 陈允平. 行波故障定位中小波基的选择[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 61-64.  
HUANG Zijun, CHEN Yunping. Selection of wavelet bases for traveling wave fault location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 61-64.
- [17] 张保会, 赵慧梅, 张文豪, 等. 基于特征频带内暂态零序电流特点的配电网单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 5-10.  
ZHANG Baohui, ZHAO Huimei, ZHANG Wenhao, et al. Faulty line selection by comparing the amplitudes of transient zero sequence current in the special frequency band for power distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 5-10.
- [18] 盖强, 张海勇, 徐晓刚. Hilbert-Huang 变换的自适应频率多分辨分析研究[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 563-565.  
GAI Qiang, ZHANG Haiyong, XU Xiaogang. Study of adaptive frequency multiresolution analysis of the Hilbert-Huang transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 563-565.
- [19] WU Zhaohua. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2008, 1(1).
- [20] YE H J R, SHIEH J S, HUANG N E. Complementary ensemble empirical mode decomposition: a novel noise enhanced data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2010, 2(2): 135-156.

收稿日期: 2017-10-10; 修回日期: 2018-01-16

作者简介:

杜向楠(1984—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统保护与控制、故障行波测距; E-mail: duxiangnan@sgepri.sgcc.com.cn

杨飞(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

郭宁明(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统故障诊断。

(编辑 葛艳娜)