

## 基于变分模态分解和改进型Teager能量算子的电缆故障行波定位方法

姚源, 林顺富

引用本文:

姚源, 林顺富. 基于变分模态分解和改进型Teager能量算子的电缆故障行波定位方法[J]. 上海电力大学学报, 2025, 41(6): 542–550.

YAO Yuan, LIN Shunfu. Lable Fault Traveling Wave Location Method–Based on VMD and NTEO[J]. *Journal of Shanghai University of Electric Power*, 2025, 41(6): 542–550.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于差分和变换的电力电缆故障行波定位方法](#)

Traveling-wave Fault Location Method of Power Cable Based on Difference Summation Transformation

上海电力大学学报. 2020, 36(5): 461–465 <https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-8299.2020.05.009>

[基于延时电路的高频高压激励电缆故障测距方法](#)

Fault Location Method of High Frequency High Voltage Excitation Cable Based on Delay Circuit

上海电力大学学报. 2020, 36(5): 477–480,516 <https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-8299.2020.05.012>

[基于改进EMD和小波阈值法的风机数据降噪研究](#)

Noise Reduction of Wind Turbine Data Based on Improved EMD and Wavelet Threshold

上海电力大学学报. 2020, 36(2): 136–140 <https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-8299.2020.02.007>

[基于聚类算法和改进证据理论的广域后备保护新算法](#)

A New Wide Area Backup Protection Algorithm Based on Clustering Algorithm and Improved Evidence Theory

上海电力大学学报. 2019, 35(3): 247–252,292 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4729.2019.03.010>

[基于多源信息的配电网停电故障研判](#)

Fault Location Based on Multisource Information in Distribution Networks

上海电力大学学报. 2018, 34(6): 572–576 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-4729.2018.06.012>

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8299.2025.06.004

# 基于变分模态分解和改进型Teager能量算子的电缆故障行波定位方法

姚源, 林顺富

(上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 针对配电网电缆线路行波故障定位中检测含噪行波困难问题, 提出了一种基于参数优化变分模态分解(VMD)和改进型Teager能量算子(NTEO)的电缆故障行波定位方法。首先, 采用灰狼优化算法优化VMD参数, 提取含有故障特征的高频模态分量。然后, 通过NTEO对该模态分量进行差分运算, 精确标定故障行波首波到达时刻。最后, 采用分布式多测点行波定位方法实现波速在线计算和故障精确定位。仿真结果验证了所提方法的正确性和有效性。

**关键词:** 电缆线路; 故障行波定位; 变分模态分解; 改进型Teager能量算子

中图分类号: TM9

文献标志码: A

文章编号: 2096-8299(2025)06-0542-09

## Lable Fault Traveling Wave Location Method-Based on VMD and NTEO

YAO Yuan, LIN Shunfu

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulties of detecting noisy traveling waves in the fault location of distribution network power cable lines, this paper proposes a fault traveling wave location method for power cable based on the parameter-optimized variational mode decomposition (VMD) and the novel Teager energy operator (NTEO). The grey wolf optimizer is used to optimize the VMD parameters and to extract the high-frequency modal components with fault characteristics. Then, the NTEO is adopted to calculate the differences of the modal components and accurately calibrate the arrival time of the first fault traveling wave. Finally, the wave velocity and fault location are calculated. Simulation results verify the correctness and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** power cable line; fault traveling wave location; variational mode decomposition; novel Teager energy operator

配电网电缆线路具有受恶劣天气影响小、节约土地资源等优点, 正逐步替代架空线路, 一些大

中城市的配电网电缆化率更是达到90%以上<sup>[1]</sup>。由于配电网电缆线路一般都敷设于地下, 故障定

收稿日期: 2025-01-10

通信作者简介: 林顺富 (1983—), 男, 博士, 教授。主要研究方向为智能电网用户端技术等。E-mail: shunfu-lin@shiep.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金 (51977127); 上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“曙光计划” (20SG52)。

位较难,因此快速、可靠、准确定位配电网电缆线路故障点,对于提高运维效率、保证供电可靠性具有重要意义<sup>[2]</sup>。

常见的配电网电缆线路故障定位方法包括故障分析法和行波定位法。行波定位法以其受系统运行方式、故障过渡电阻影响小等优势,被广泛应用于配电网电缆线路故障定位的理论研究和实际应用中<sup>[3-4]</sup>。行波定位法根据采用行波信息的不同可以分为单端法<sup>[5]</sup>、双端法<sup>[6]</sup>和分布式定位法<sup>[7]</sup>。分布式定位法具有可实现波速在线计算的优点,更适用于配电网电缆线路故障行波定位。精确检测行波首波时刻是分布式定位法的关键<sup>[8]</sup>。目前应用较多的分布式定位法主要有小波变换法<sup>[9-10]</sup>、希尔伯特黄变换法<sup>[11]</sup>、变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)法<sup>[12-13]</sup>。小波变换法将信号按频率多层分解,利用小波变换模极大值法检测故障行波首波时刻,但不同的小波基函数和分解尺度会影响其检测效果,且很难选取合适的基函数和分解尺度。希尔伯特黄变换法通过经验模态分解算法分解故障行波信号,但在处理含噪声信号时会出现模态混叠情况,导致含噪故障行波首波时刻检测失败,造成故障定位误差较大。相比之下,VMD法将信号分解成不同频率的模态分量,能很好地反映信号的奇异性特征。上述方法均是采用信号分解算法检测行波首波时刻,但通过人为选取参数或基函数,很难找到最优组合,特别是在噪声较多的环境下,可能导致行波首波时刻检测失败。

针对当前配电网电缆线路行波定位方法较难精确检测含噪行波问题,本文提出一种基于参数优化 VMD 和改进型 Teager 能量算子(Novel Teager Energy Operator, NTEO)的故障行波定位方法。首先,采用灰狼优化(Grey Wolf Optimizer, GWO)算法优化 VMD 参数,提取含有故障特征的高频模态分量。然后,通过 NTEO 精确计算故障行波首波时刻。最后,采用分布式多测点行波定位方法实现故障区段及故障点位置的精确定位。

## 1 基于参数优化 VMD 和 NTEO 的故障行波定位方法

由于电缆线路三相参数存在耦合,故障状态

下电磁暂态过程相互影响,因此需做解耦运算。本文采用 Karenbauer 相模变换解耦得到线模和地模分量信号,对传播过程衰减小、波速近似恒定的故障电压行波线模分量进行分析。

### 1.1 VMD 法原理

VMD 法是一种针对非平稳信号的分解技术<sup>[14]</sup>,能够将时间  $t$  的含噪故障行波信号  $f(t)$  分解为  $K$  个不同中心频率的本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)。VMD 法的变分约束模型可表示为

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^K u_k(t) = f(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\{u_k\}$ —— $K$  个 IMF 分量信号集合,  $\{u_k\} =$

$$\{u_1, u_2, u_3, \dots, u_K\};$$

$\{\omega_k\}$ —— $K$  个 IMF 分量信号中心频率集合,

$$\{\omega_k\} = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_K\};$$

$k$ ——IMF 分量信号编号,  $k=1, 2, 3, \dots, K$ ;

$\partial_t$ ——对时间  $t$  求偏导;

$\delta(\cdot)$ ——脉冲函数<sup>[15]</sup>;

$u_k(\cdot)$ ——分解后的第  $k$  个 IMF 分量信号<sup>[15]</sup>;

$\omega_k$ ——分解后的第  $k$  个 IMF 分量信号中心频率。

为求取式(1)变分约束模型的最优解,引入的无约束最优化模型  $L(\{u_k(t)\}, \{\omega_k\}, \lambda)$  为

$$\begin{aligned} L(\{u_k(t)\}, \{\omega_k\}, \lambda) = & \alpha \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[ \left( \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \\ & \left\| f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\rangle \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\alpha$ ——二次惩罚因子;

$\lambda$ ——拉格朗日乘法算子;

$\langle \cdot \rangle$ ——相内积。

利用交替方向乘子法求取  $L(\{u_k(t)\}, \{\omega_k\}, \lambda)$  所示的拉格朗日函数的鞍点,从而将  $f(\cdot)$  分解为  $K$  个 IMF 分量信号。

### 1.2 基于 GWO 的 VMD

由式(2)可以看出,VMD 法的分解效果受到

模态分量个数  $K$  和二次惩罚因子  $\alpha$  影响<sup>[16]</sup>。在含噪故障行波信号中,若参数选取不当,模态分量的波形突变可能被噪声掩盖,难以确定故障行波首波时刻。为了解决上述问题,本文利用GWO算法<sup>[17]</sup>选择适当的适应度函数优化VMD参数,获得最优参数配置。

### 1.2.1 GWO算法

GWO算法在求解精度和鲁棒性等方面优于粒子群算法和差分进化算法等经典元启发式算法<sup>[18]</sup>。

GWO算法按个体适应度值将群体中前3个最优个体依次记为 $\alpha$ 狼、 $\beta$ 狼和 $\delta$ 狼,剩余其他灰狼个体记为 $\omega$ 狼,灰狼优化算法的具体寻优过程可表示为

$$\begin{cases} D_\alpha = |CX_\alpha - X(o)| \\ D_\beta = |CX_\beta - X(o)| \\ D_\delta = |CX_\delta - X(o)| \\ X_1 = X_\alpha - AD_\alpha \\ X_2 = X_\beta - AD_\beta \\ X_3 = X_\delta - AD_\delta \\ X(o+1) = \frac{(X_1 + X_2 + X_3)}{3} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $D_\alpha, D_\beta, D_\delta$ ——灰狼个体与 $\alpha$ 狼、 $\beta$ 狼和 $\delta$ 狼之间的距离向量;

$C, A$ ——协同系数向量;

$X_\alpha, X_\beta, X_\delta$ —— $\alpha$ 狼、 $\beta$ 狼和 $\delta$ 狼的位置向量;

$X(o)$ ——第 $o$ 次迭代时灰狼个体位置向量;

$X_1, X_2, X_3$ ——灰狼个体朝向 $\alpha$ 狼、 $\beta$ 狼和 $\delta$ 狼的移步距离向量。

### 1.2.2 优化目标选取

为了保证VMD法能够实现故障行波信号去噪,确保故障行波首波时刻标定的准确性,本文以包络熵<sup>[19]</sup>和峰度值的比值最小为优化目标 $F$ 。  $F$ 可表示为

$$F = \min_k \frac{E_k^{\text{IMF}}}{\beta_k^{\text{IMF}}} \quad (4)$$

式中: $E_k^{\text{IMF}}, \beta_k^{\text{IMF}}$ ——第 $k$ 个IMF分量信号的包络熵和峰度值。

包络熵是一种能够反映信号稀疏特性的指标,可评估故障行波信号复杂度。故障行波信号复杂度与信号噪声成分含量成正比。经过VMD法分解后,若得到IMF分量信号中包含的噪声较

多,则信号的复杂度较高、包络熵较大,会掩盖故障冲击特征。因此,在分解故障行波信号时,应尽量降低IMF分量信号的包络熵,减小噪声干扰。 $E_k^{\text{IMF}}$ 的计算公式为

$$E_k^{\text{IMF}} = - \sum_{j=1}^n p_{k,j}^{\text{IMF}} \lg p_{k,j}^{\text{IMF}} \quad (5)$$

$$p_{k,j}^{\text{IMF}} = \frac{e_{k,j}^{\text{IMF}}}{\sum_{j=1}^n e_{k,j}^{\text{IMF}}} \quad (6)$$

式中: $n$ ——信号采样数量;

$p_{k,j}^{\text{IMF}}$ ——第 $k$ 个IMF分量信号第 $j$ 次信号采样值 $s_{k,j}^{\text{IMF}}$ 经希尔伯特解调后得到的包络信号 $e_{k,j}^{\text{IMF}}$ 的归一化形式。

峰度值是评估信号波形的重要指标,故障行波信号经过VMD法分解后,若得到IMF分量信号波峰更尖锐,即冲击脉冲更明显,则信号的峰度值较大。因此,在分解故障行波信号时,应尽量升高IMF分量信号的峰度值,使其波形突变更加明显,从而有利于对故障行波进行波头标定。 $\beta_k^{\text{IMF}}$ 的计算公式为

$$\beta_k^{\text{IMF}} = \frac{m_{k,4}^{\text{IMF}}}{(m_{k,2}^{\text{IMF}})^2} \quad (7)$$

$$m_{k,q}^{\text{IMF}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (s_{k,j}^{\text{IMF}} - \mu_{k,j}^{\text{IMF}})^q \quad (8)$$

$$\mu_{k,j}^{\text{IMF}} = \frac{\sum_{j=1}^n s_{k,j}^{\text{IMF}}}{n} \quad (9)$$

式中: $m_{k,q}^{\text{IMF}}$ ——第 $k$ 个IMF分量信号的 $q$ 阶中心距( $q=1, 2, 3, \dots$ );

$\mu_{k,j}^{\text{IMF}}$ ——第 $k$ 个IMF分量信号第 $j$ 次信号采样值。

基于GWO算法优化VMD参数的寻优流程如图1所示。

## 1.3 NTEO

NTEO是一种基于信号瞬时能量的非线性算子,可用于检测含噪故障行波的首波时刻<sup>[11]</sup>。对于第 $k$ 个IMF分量信号,NTEO计算公式为

$$\psi[s_{k,j}^{\text{IMF}}] = [s_{k,j}^{\text{IMF}}]^2 - s_{k,j-g}^{\text{IMF}} s_{k,j+g}^{\text{IMF}} \quad (10)$$

式中: $\psi[s_{k,j}^{\text{IMF}}]$ —— $s_{k,j}^{\text{IMF}}$ 的能量算子;

$g$ ——分辨率系数。

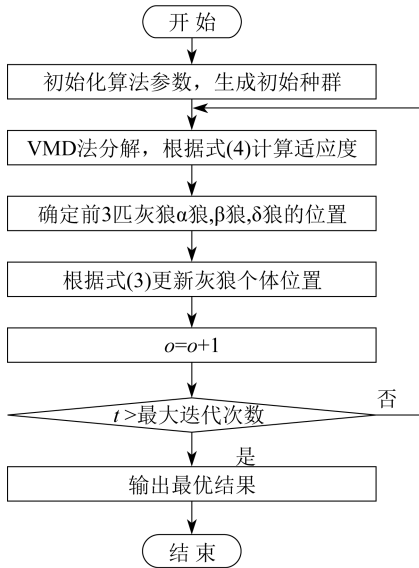


图1 基于GWO算法优化VMD参数的寻优流程

## 2 分布式行波定位原理

本文以10 kV配电网电缆单环网为研究对象,根据实际需求,假设环网柜母线处均安装行波监测器。基于三测点行波定位<sup>[8]</sup>提出分布式多测点行波定位方法。故障定位示意如图2所示。其中,B、C、D、E、F表示环网柜,1、2、3、4、5、6、7为区段监测点。

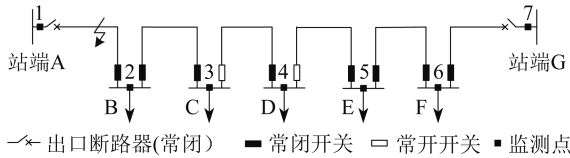


图2 10 kV配电网电缆单环网故障定位示意

以站端A为参考位置起始,设电缆线路共有 $m$ 个区段,编号分别为 $1, 2, 3, \dots, m$ 。共有 $m+1$ 个监测器,编号分别为 $1, 2, 3, \dots, m+1$ 。记录相邻监测点距离为区段 $i$ 的长度 $l_i$ ,记录行波首波到达各监测点时间为 $t_i$ ,记录相邻监测点时差 $\Delta t_i = |t_{i+1} - t_i|$ 。基于首波到达各监测点时间以及相邻监测点时差,定义首波时差向量 $\Delta T$ 为

$$\Delta T = [\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, \dots, \Delta t_m] \quad (11)$$

式中: $\Delta t_m$ ——区段 $m$ 的相邻监测点时差。

基于相邻监测点距离,定义区段长度向量 $L$ 为

$$L = [l_1, l_2, l_3, \dots, l_m] \quad (12)$$

式中: $l_m$ ——区段 $m$ 长度。

利用首波时差向量 $\Delta T$ 及区段长度向量 $L$ 计

算得到故障区段判断向量 $\Delta\varphi$ 为

$$\Delta\varphi = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_m] \quad (13)$$

式中: $\varphi_m$ ——区段 $m$ 的故障判断。

第 $i$ 个区段的故障判断 $\varphi_i = l_i / (v\Delta t_i)$ , $v$ 为行波在电缆线路中实际波速, $\Delta t_i$ 为区段 $i$ 的相邻监测点时差,若 $\varphi_i \geq 1.1$ ,令 $\varphi_i = 1$ ,表示区段 $i$ 内有故障发生;若 $\varphi_i < 1.1$ ,令 $\varphi_i = 0$ ,表示区段 $i$ 内无故障发生。

以故障发生在区段 $i$ 为例,故障行波定位表达式为

$$v = \frac{l_{i+1}}{\Delta t_{i+1}} \quad (14)$$

$$x_i = 0.5[l_i + v(t_i - t_{i+1})] \quad (15)$$

式中: $l_{i+1}$ ——区段 $i+1$ 的长度;

$\Delta t_{i+1}$ ——区段 $i+1$ 的相邻监测点时差;

$x_i$ ——区段 $i$ 故障定位结果。

基于参数优化VMD和NTEO的配电网电缆线路故障行波定位流程如图3所示。

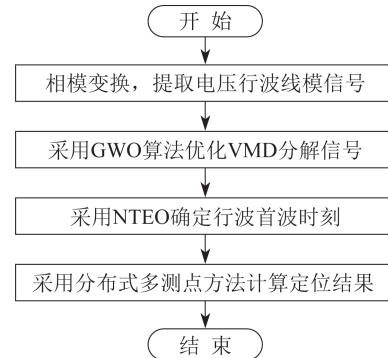


图3 基于参数优化VMD和NTEO的配电网电缆线路故障行波定位流程

## 3 仿真分析

### 3.1 配电网电缆线路故障行波仿真分析

基于Simulink软件建立10 kV配电网电缆单环网故障仿真模型,故障定位区间为站端A至环网柜D总长为6 km的电缆线路,各区段长度均为2 km,线路参数详见文献[20]。监测器1安装在站端A处,监测器2安装在环网柜B处,监测器3安装在环网柜C处,监测器4安装在环网柜D处。采样频率为10 MHz。模型仿真总时间为0.100 s,假设区段AB内距站端A处1.2 km发生单相接地故障,过渡电阻 $10 \Omega$ ,故障发生时刻0.035 s。

通过对4个监测点所监测到的三相电压行波

采样信号进行希尔伯特黄相模变换,得到电压行波的 $r$ 线模分量。其中,监测器1、2、3、4监测到的电压行波 $r$ 线模分量如图4所示。

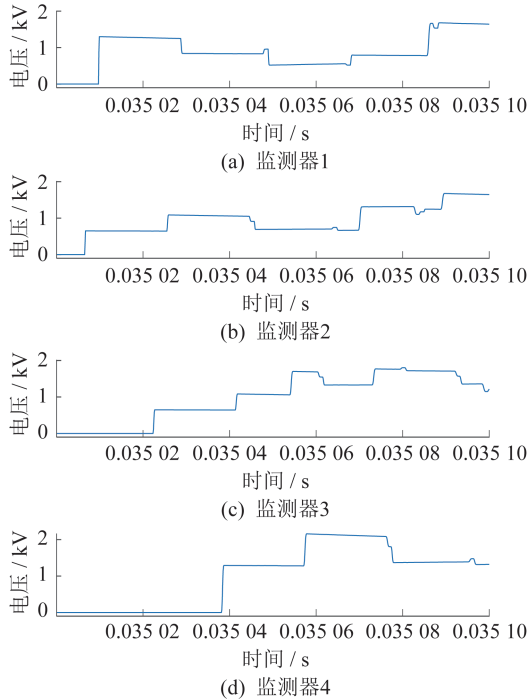


图4 监测器1、2、3、4监测到的电压行波 $r$ 线模分量

采用上文所述基于GWO算法优化的VMD法分解电压行波线模分量,设置种群大小为20,最大迭代次数为30次。GWO算法收敛曲线如图5所示。

由图5(a)可以看出,第16次迭代中算法收敛到最优解,适应度最小值为0.018 374,VMD法最优参数为(5,69)。由图5(b)、5(c)、5(d)可以看出,环网柜B处电压行波 $r$ 线模分量的GWO优化过程在第14次迭代中收敛到最优解,适应度最小值为0.026 397,最优参数为(6,13);环网柜C处电压行波 $r$ 线模分量的GWO优化过程在第17次迭代中收敛到最优解,适应度最小值为0.062 191,最优参数为(8,11);环网柜D处电压行波 $r$ 线模分量的GWO过程在第2次迭代中收敛到最优解,适应度最小值为0.070 372,最优参数为(5,10)。总之,GWO算法收敛速度快,且有一定跳出局部最优的能力。

采用NTEO对适应度值最小的5种IMF分量信号(IMF1、IMF2、IMF3、IMF4、IMF5)计算Teager能量值,确定故障行波首波时刻。5种IMF分量信号VMD法分解结果如图6所示。

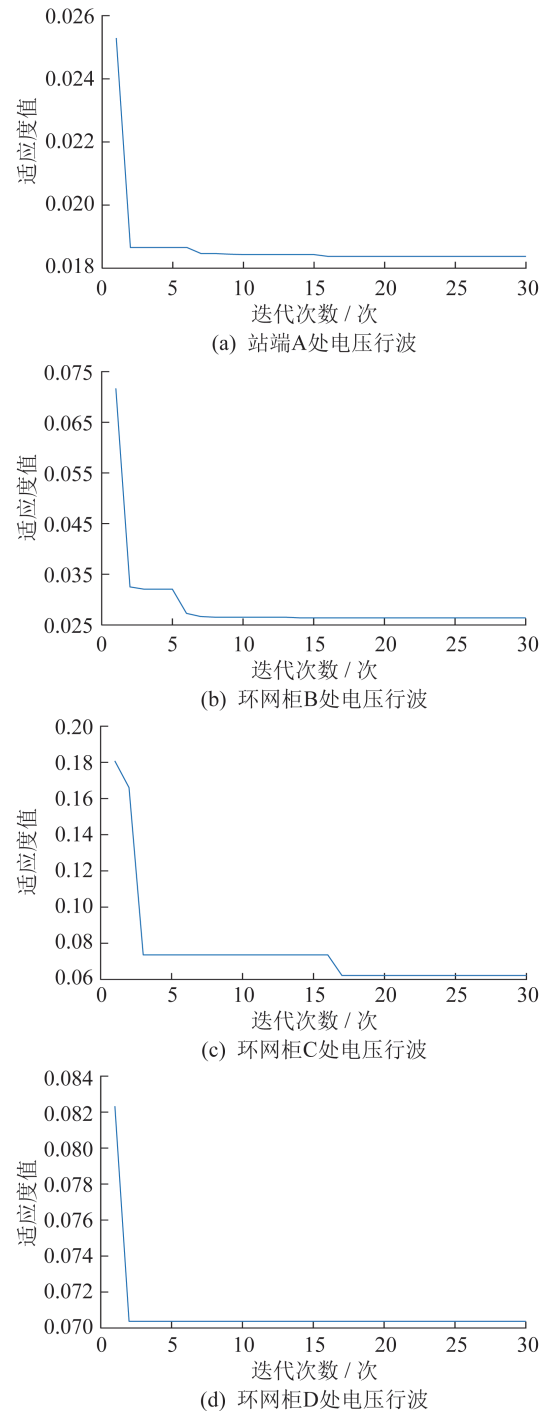


图5 GWO算法收敛曲线

图6中IMF1分量信号采用NTEO得到的Teager能量谱如图7所示。

由图7可知,监测器1的行波首波时刻 $t_1=0.035 009 7$  s。同理得到监测器2的行波首波时刻 $t_2=0.035 006 7$  s,监测器3的行波首波时刻 $t_3=0.035 022 4$  s,监测器4的行波首波时刻 $t_4=0.035 038 3$  s。

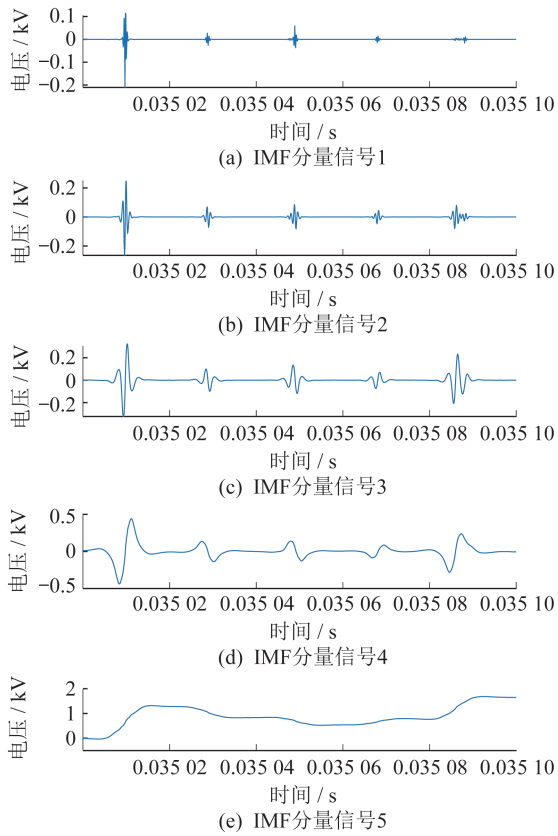


图6 5种IMF分量信号VMD法分解结果

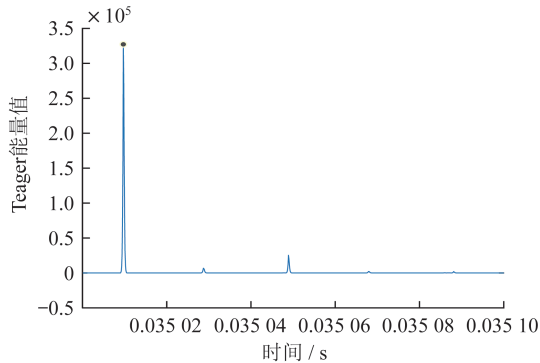


图7 IMF1分量信号的Teager能量谱

采用分布式多测点行波定位方法,通过故障区段判断向量 $\Delta\varphi$ 确定故障区段。其中,首波时差向量 $\Delta T = [0.000\ 003\ 0, 0.000\ 015\ 7, 0.000\ 015\ 9]$ ,区段长度向量 $L = [2, 2, 2]$ ,故障区段判断向量 $\Delta\varphi = [1, 0, 0]$ 。通过 $\Delta\varphi$ 可判断故障发生在区段1内。由式(14)计算得到区段内的波速为 $1.273\ 89 \times 10^5$  km/s。由式(15)计算得到故障点到A端的距离为1.191 km,误差为0.009 km。

为验证本文所提方法的优越性,将文献[9]中所采用的小波分析法与文献[16]中的VMD法进行对比。其中:VMD法的经验选取参数取值为

(4, 2 000),小波基函数为db 6;采用NTEO计算分量信号Teager能量值,确定故障行波首波时刻;两种方法均结合传统的双端定位方法进行故障定位。采用小波分析法对文献[9, 16]中的前4个分量信号(d1、d2、d3、d4)进行分解,结果如图8所示。VMD法4个分量信号分解结果如图9所示。

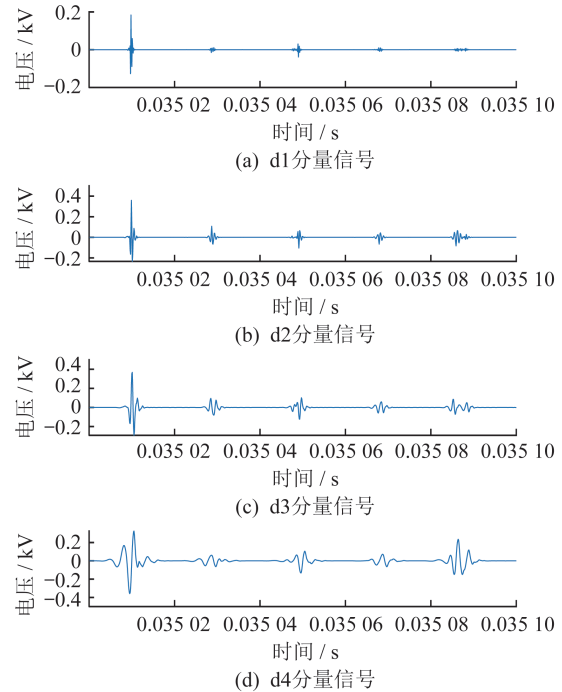


图8 小波分析法4个分量信号分解结果

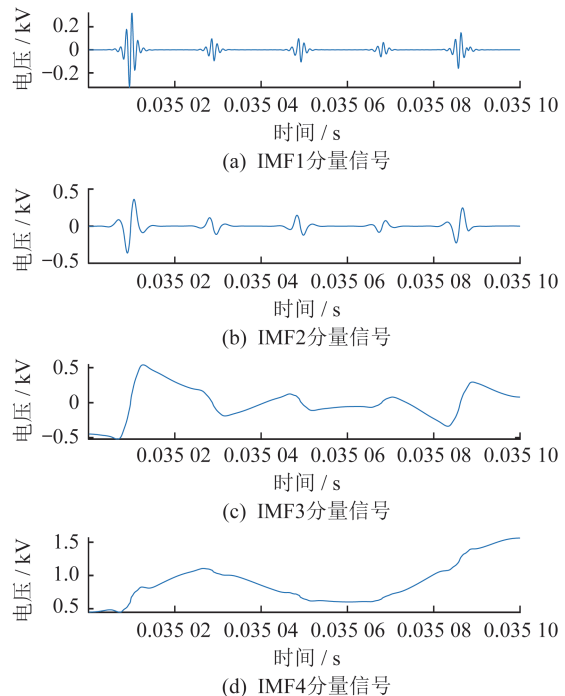


图9 VMD 4个分量信号分解结果

由图8和图9可知,d1分量信号中有明显的突变信号,IMF1分量信号中有明显的突变信号。

选取图8中的d1分量信号和图9中的IMF1分量信号作为待测信号进行Teager能量值计算,确定故障行波首波时刻。d1分量信号和IMF1分量信号的Teager能量谱对比如图10所示。

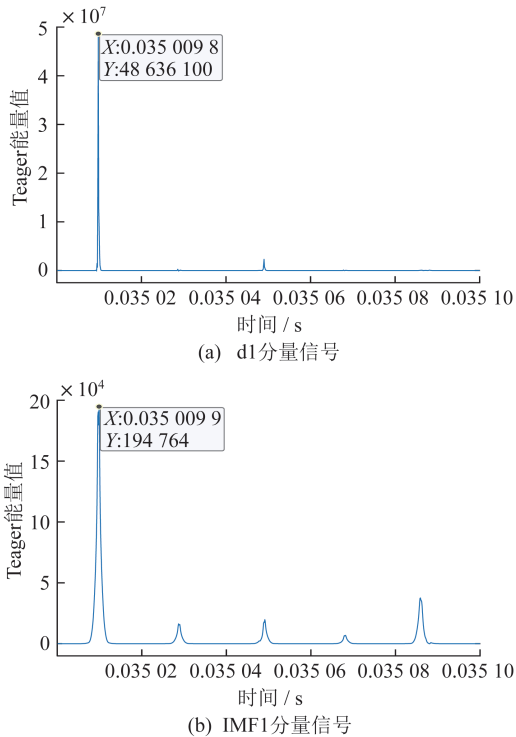


图10 d1分量信号和IMF1分量信号的Teager能量谱对比

由图10可知,采用小波分析法计算得到站端A处故障行波首波时刻为0.035 009 8 s,采用参数未优化的VMD算法计算得到站端A处故障行波首波时刻为0.035 009 9 s。

3种方法故障行波定位结果及定位误差如表1所示。

表1 3种方法故障行波定位结果及定位误差 单位:km

方法	定位结果	定位误差
小波分析	1.181	0.019
VMD	1.187	0.013
参数优化VMD	1.191	0.009

由表1可以看出,在信号不含噪声时,本文提出的参数优化VMD法具有较高的定位精度。

### 3.2 噪声对故障行波定位的影响

监测器3监测到的电压行波不含噪和含噪信号如图11所示。

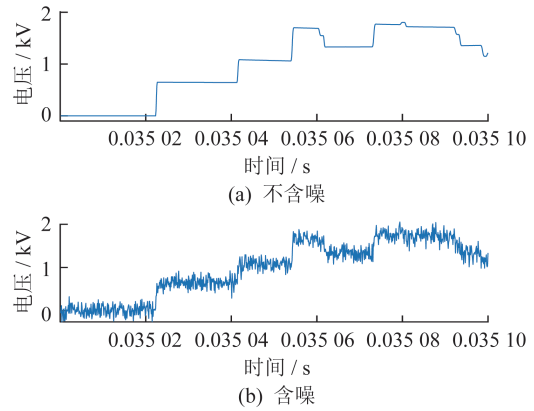


图11 监测器3监测到的电压行波不含噪和含噪信号

为验证本文所提方法的抗噪性能,以距离站端A处1.2 km处发生过渡电阻10 Ω单相接地故障为例,针对监测器3监测到的电压行波信噪比20 dB进行分析,仿真中通过叠加白噪声模拟含噪行波信号。经过GWO算法优化后,VMD法参数为(6, 3 602)。小波分析法4个分量信号分解结果如图12所示,VMD法4个分量信号分解结果如图13所示,参数优化VMD法6个分量信号分解结果如图14所示。

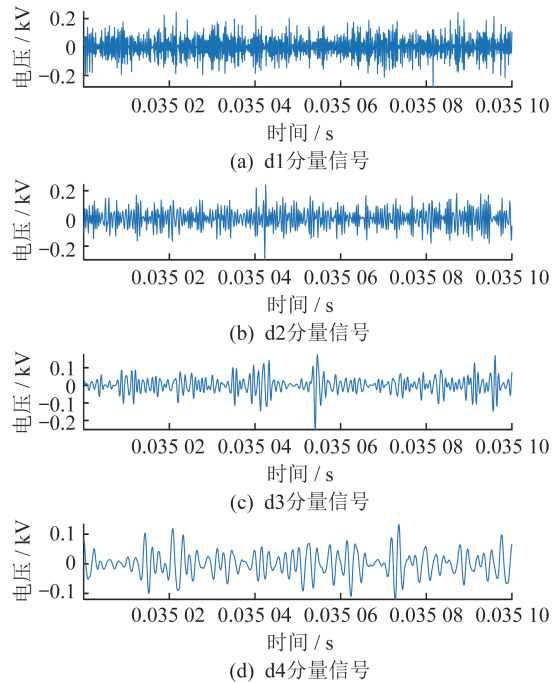


图12 小波分析法4个分量信号分解结果

通过图12、13、14可以看出,图12和图13中各分量信号均严重受到了噪声污染,难以确定故障行波的首波时刻,图14中IMF5分量信号可确定故障行波的首波时刻,一定程度上减少了噪声信号的影响,具有良好的抗噪性能。

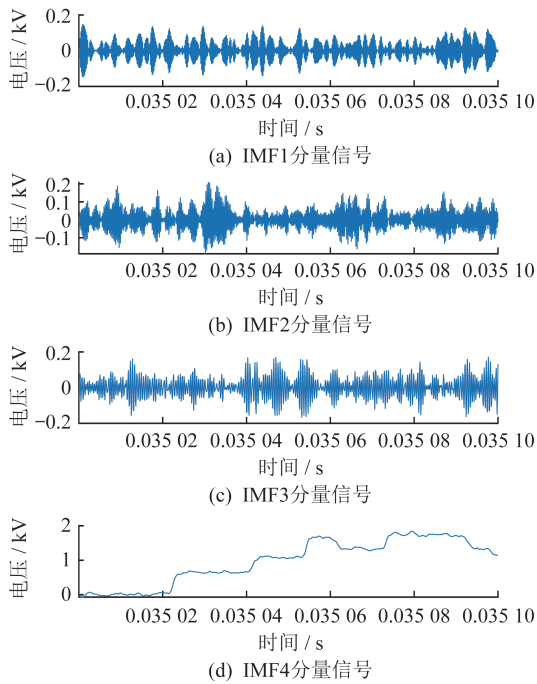


图13 VMD法4个分量信号分解结果

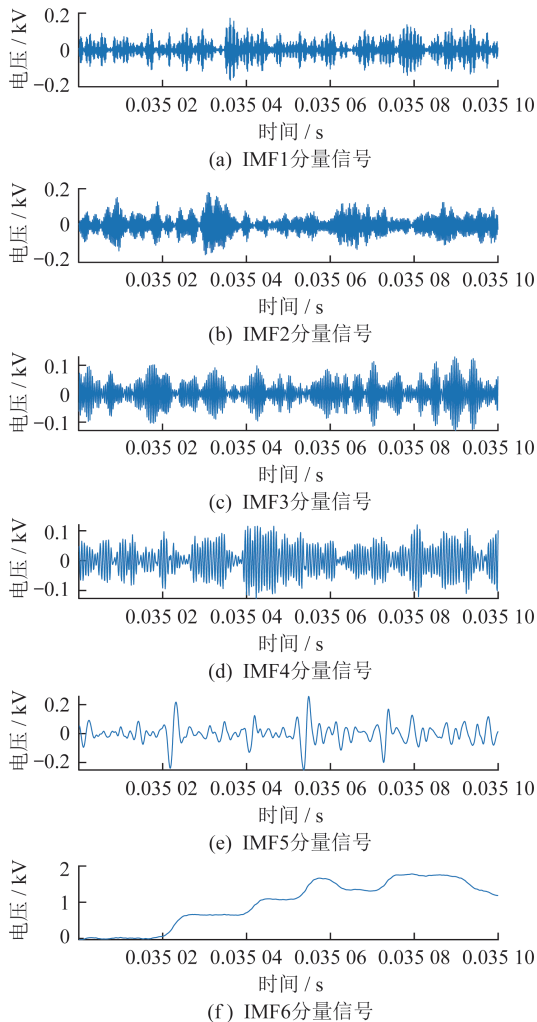


图14 参数优化VMD法6个分量分解结果

为进一步说明本文所提方法的抗噪性能,选取不同的信噪比,与另外两种方法进行对比。3种方法的抗噪性能对比如表2所示。

表2 3种方法的抗噪性能对比 单位:km

信噪比 / dB	小波分析法		VMD法		参数优化VMD法	
	定位结果	定位误差	定位结果	定位误差	定位结果	定位误差
20	1.170	0.030	1.176	0.024	1.203	0.003
30	1.181	0.019	1.193	0.007	1.191	0.009
40	1.181	0.019	1.181	0.019	1.201	0.001
50	1.181	0.019	1.181	0.019	1.191	0.009

由表2可知,本文所提方法具有最高的定位精度,定位误差仅为0.001 km,同时最大定位误差为0.009 km,波动范围最小,且在信噪比较低时保证了较高的定位精度,体现出良好的抗噪性能。

### 3.3 过渡电阻对故障行波定位的影响

考虑到过渡电阻对于行波幅值的影响可能会影响故障定位结果,本文构建了4种不同过渡电阻值下的接地故障模型,并采用本文所提方法对行波信号进行分析。不同过渡电阻下行波定位结果及定位误差如表3所示。

表3 不同过渡电阻下行波定位结果及定位误差

过渡电阻 / $\Omega$	站端	环网柜	环网柜	环网柜	定位结果 / km	定位误差 / km
	A处行波时刻 / ms	B处行波时刻 / ms	C处行波时刻 / ms	D处行波时刻 / ms		
5	35.009 7	35.006 7	35.022 4	35.038 3	1.191	0.009
10	35.009 7	35.006 7	35.022 4	35.038 3	1.191	0.009
15	35.009 7	35.006 7	35.022 5	35.038 3	1.190	0.010
20	35.009 7	35.006 7	35.022 5	35.038 3	1.190	0.010

由表3中可以看出,本文所提方法在不同过渡电阻下,均能保证较高的定位精度。

### 3.4 故障距离对故障行波定位的影响

为了分析故障距离对行波定位结果的影响,本文构建了4种不同故障距离下的接地故障模型,并采用本文所提方法对行波信号进行分析。不同故障距离下的行波定位结果及定位误差如表4所示。

由表4可以看出,本文所提方法在不同故障距离下都可以保证较高的定位精度。

表4 不同故障距离下行波定位结果及定位误差

故障 距离/ km	站端	环网柜	环网柜	环网柜	定位 结果/ km	定位 误差/ km
	A处行波 时刻/ ms	B处行 波时刻/ ms	C处行 波时刻/ ms	D处行 波时刻/ ms		
1.2	35.009 7	35.006 7	35.022 4	35.038 3	1.191	0.009
2.4	35.019 4	35.003 5	35.012 9	35.028 8	2.409	0.009
3.6	35.028 8	35.012 9	35.003 5	35.019 4	3.591	0.009
4.7	35.037 5	35.021 8	35.005 9	35.010 5	4.711	0.011

## 4 结 语

基于参数优化VMD和NTEO行波检测方法,可精准标定含噪声故障行波信号的初始波头到达时刻。本文以包络熵及峰度值作为优化目标,采用NTEO对优选波形突变明显的IMF分量信号进行分析,在精确计算故障行波首波时刻的基础上,采用分布式多测点行波定位方法实现了配电网电缆线路故障区段的精准定位。仿真结果表明,本文所提方法具有良好的抗噪性能及较高的定位精度,定位误差基本不受过渡电阻和故障距离的影响,具有较高的工程应用价值。

### 参考文献:

- [1] 吴阳,张品佳. 基于漏电流测量的配电网电缆高精度状态感知技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2929-2940.
- [2] 李佳宇,王光临,罗建华,等. 基于多元变分模态分解与峭度的配电网电缆故障定位方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(3): 92-98.
- [3] LENG H, HE S, QIU J, et al. Multi-branch fault line location method based on time difference matrix fitting[J]. Energy Engineering, 2023, 121(1): 77-94.
- [4] WANG Y, XIE L, LIU F, et al. Fault location method for distribution network considering distortion of traveling wavefronts[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 159: 1-11.
- [5] DENG F, ZHONG Y, ZENG Z, et al. A single-ended fault location method for transmission line based on full waveform feature extraction of traveling waves[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(4): 2585-2595.
- [6] LIU F, XIE L, YU K, et al. A novel fault location method based on traveling wave for multi-branch distribution network[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 224: 1-9.
- [7] 李航,曾海燕,喻锟,等. 基于多端行波频率矩阵的复杂配电网故障定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(3): 19-30.
- [8] 曹雨,林顺富,于俊苏,等. 基于差分和变换的高压输电线路故障行波测距方法[J]. 水电能源科学, 2019, 37(12): 171-175.
- [9] 区伟潮,葛阳,朱延廷,等. 基于双端原理的中压电缆潜伏性故障定位方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(5): 84-91.
- [10] HAMIDI R, LIVANI H. Traveling-wave-based fault-location algorithm for hybrid multiterminal circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 135-144.
- [11] 白浩,钟振鑫,李巍,等. 基于CEEMD和NTEO的故障行波定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 50-59.
- [12] 郭亮,王建平,郭鑫. 基于VMD-TEO与全信号采集的配电网接地故障测距方法[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2023, 28(6): 57-66.
- [13] KOLLI J, ANKUR S, MINI S. DCVD-VMD enabled traveling wave-based fault location in nonhomogenous AC microgrids[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(2): 2411-2421.
- [14] 田二伟,刘持涛,林顺富. 基于差分和变换的电力电缆故障行波定位方法[J]. 上海电力大学学报, 2020, 36(5): 461-465.
- [15] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [16] 池梓斌,夏成军,杨明嘉. 基于参数优化VMD和TET的柔直线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 1-11.
- [17] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69(3): 46-61.
- [18] SHETA A, ABDEL A. Estimating the parameters of software reliability growth models using the grey wolf optimization algorithm[J]. International Journal of Advanced Computer Science & Applications, 2016, 7(4): 499-505.
- [19] 唐贵基,王晓龙. 参数优化变分模态分解方法在滚动轴承早期故障诊断中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(5): 73-81.
- [20] 赵铁军,王秀斌,虞跃. 基于金属护层模型参数辨识的电缆单相故障单端测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 83-91.

(责任编辑 谢 冉)