

## 一种改进的混合三端输电线路故障定位算法研究

王振杰, 姚善化

安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232063

**摘要:** 针对混合输电线路故障多、定位精度差等问题, 提出一种基于改进的自适应噪声完备集合经验模态分解 (CEEMDAN) 和 Teager-Kaiser 能量算子相结合的混合三端输电线路故障测距方法。首先对输电线路故障电压信号使用新型相模变换进行解耦, 以消除线路间的电磁耦合现象; 然后利用改进的 CEEMDAN 和 Teager-Kaiser 能量算子对解耦后的故障电压信号进行分解, 提取了故障初始行波到达检测点的时间, 再根据故障时暂态电压行波零模分量和线模分量的故障特性, 提出一种基于零模和线模时间差的故障分支判别方法; 最后为解决无法得到行波波速精确值的问题, 采用基于零模线模时间差的行波测距方法得到了精确的故障定位数据。基于仿真模型, 对比改进 CEEMDAN 算法和传统 CEEMDAN 算法, 验证所提改进算法的有效性。仿真结果表明, 所提算法不受故障类型、过渡电阻、波速、时间不同步的影响, 具有较高的测量精度。改进 CEEMDAN 算法能够有效改善故障信号经传统 CEEMDAN 算法分解后带来的随机性问题, 具有较高的工程应用价值。

**关键词:** 混合输电线路; 故障定位; 自适应噪声完备集合经验模态分解; Teager-Kaiser 能量算子; 新相模变换

**中图分类号:** TM726 **文献标识码:** A **doi:** 10.16055/j.issn.1672-058X.2023.0006.004

### Research on an Improved Fault Location Algorithm for Hybrid Three-terminal Transmission Line

WANG Zhenjie, YAO Shanhua

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Anhui Huainan 232063, China

**Abstract:** Aiming at the problems of multiple faults and poor location accuracy of hybrid transmission lines, a fault location method based on improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) and Teager-Kaiser energy operator was proposed. Firstly, the fault voltage signals of transmission lines were decoupled by a new phase-mode transformation to eliminate the electromagnetic coupling phenomenon between lines. Then, the decoupled fault voltage signal was decomposed by using the improved CEEMDAN and Teager-Kaiser energy operator, and the time when the initial traveling wave of the fault reached the detection point was extracted. According to the fault characteristics of the zero-mode and line-mode components of the transient voltage traveling wave, a fault branch discrimination method based on the time difference between zero-mode and line-mode was proposed. Finally, in order to solve the problem that the accurate value of the traveling wave velocity can not be obtained, the accurate fault location data were obtained by using the traveling wave ranging method based on the time difference between zero-mode and line-mode. Based on the simulation model, the improved CEEMDAN algorithm was compared with the traditional CEEMDAN algorithm, and the effectiveness of the proposed improved algorithm was verified. The simulation results show that the proposed algorithm is not affected by fault type, transition resistance, wave velocity and time synchronization, and has a high

**收稿日期:** 2022-09-05 **修回日期:** 2022-12-08 **文章编号:** 1672-058X(2023)06-0025-11

**基金项目:** 安徽高校自然科学重点项目 (KJ2020A307).

**作者简介:** 王振杰 (1998—), 男, 浙江湖州人, 硕士研究生, 从事输电线路故障诊断研究。

**通讯作者:** 姚善化 (1966—), 男, 安徽淮南人, 教授, 博士, 从事信号处理研究. Email: shhyao@aust.edu.cn.

**引用格式:** 王振杰, 姚善化. 一种改进的混合三端输电线路故障定位算法研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2023, 40(6): 25—35.

WANG Zhenjie, YAO Shanhua. Research on an improved fault location algorithm for hybrid three-terminal transmission line[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(6): 25—35.

measurement accuracy. The improved CEEMDAN algorithm can effectively improve the randomness problem caused by the decomposition of fault signals by the traditional CEEMDAN algorithm, which has high engineering application value.

**Keywords:** hybrid transmission lines; fault location; CEEMDAN; Teager-Kaiser energy operator; new phase-mode transformation

## 1 引言

随着城市化进程的发展,输电线路的布局在不断发生着变化。单一的架空线路越来越不适应城市建设的协调,电缆线路能凭借其占地面积小等优点,充分利用城市的空间和土地。因此在城市内大多已经采用电缆线路,而在城市外采用架空线路,逐渐形成架空线-电缆的混合线路分布格局<sup>[1-2]</sup>。对于架空线路,大多数都是瞬时性故障。而电缆线路深埋在城市地下,故障的概率远远小于架空线。在长期的运行下,由于外部因素会引起绝缘老化而造成永久性故障,因此这将对混合线路故障定位准确性的要求更高<sup>[3-4]</sup>。

目前国内外对于单一均匀线路的研究达到了很高的水平<sup>[5-8]</sup>,然而架空线和电缆线路的混合线路改变了线路阻抗特性,造成电缆和架空线的波速不一致。在架空线和电缆连接点使得波阻抗不再均匀,行波将产生更加复杂的折反射现象,传统的测距方法也无法直接应用于此<sup>[9]</sup>。对于混合线路的故障测距仍需要深入研究,文献[10]采用了一种基于小波变换的双端混合线路故障定位,通过采集故障电流行波信号实现精确定位,但定位精度会受到同步时钟的精度和电流传感器采集精度的影响,并且存在小波变换选择小波基函数和分解尺度的难题。文献[11]将传统的波速归一化理论应用于混合线路中,再利用波速和时间差值计算出故障距离,但实际的混合线路参数具有时变特性,因此故障定位的准确性会受到波速的影响。文献[12]和文献[13]均采用了利用 CEEMDAN 对故障电压行波进行分解并能精确识别行波波头到达检测点时间,但 CEEMDAN 算法由于存在随机分量,会导致每次分解的数据有偏差。文献[14]提出了一种基于非同步电流测量的故障定位方法,利用第二次行波到达检测端判断故障线段,通过连接在故障线段的检测端计算出故障距离,降低了采集成本,但该方法需要精确的线路参数值,否则会影响定位精度。

现有混合线路的故障检测方法有行波法、故障分析法、人工智能法等。行波法测距的关键问题是能否有效提取波头到达检测端的时间,常用的方法有小波分析法、希尔伯特黄变换等。小波分析法<sup>[15]</sup>需要选择合适的基函数,不同基函数的选取对最后分析结果的准确性造成影响,不存在哪一种基函数适用于所有场

合。希尔伯特黄变换<sup>[16]</sup>吸取了小波分析的优势、克服了小波分析需要选择小波基的困难,但希尔伯特黄变换存在过包络和欠包络现象,影响整个数据序列。

由于上述算法缺点,本文提出了基于 CEEMDAN 和 Teager-Kaiser 能量算子(TKEO)的故障行波定位改进算法。改进 CEEMDAN 算法有较强的完备性,具有更快的计算速度,能够得到更好的模态分解结果;TKEO 算法可以增强信号中存在的高频瞬态并有效地提取信号能量值。将所提改进算法对混合三端线路的故障电压行波进行分解,提取故障行波到达 4 个检测端的时间,根据零模线模分量的时间差判断出故障区间,推导了基于零模线模分量的双端混合线路行波测距方法并求出故障距离。

## 2 改进 CEEMDAN 和 TKEO 算法

### 2.1 改进 CEEMDAN 算法

输电线路在发生故障后的信号具有非平稳性和非线性特征,传统的经验模态分解算法虽能将故障信号分解为单一的固有模态(IMF)分量,但容易出现虚假 IMF 分量和模态混叠等问题,失去了原有的物理意义。CEEMDAN 算法有效地解决了 EEMD 算法在分解过程中造成每个 IMF 数量不同的问题<sup>[17]</sup>,但是 CEEMDAN 算法在分解的早期会出现一些虚假分量造成真实分量出现得较晚。因此,Colominas 等学者<sup>[18]</sup>提出了改进的 CEEMDAN(ICEEMDAN),可以将信号的每个分量都提取出来,不会出现虚假分量。然而不论是 CEEMDAN 或 ICEEMDAN,在每一次信号分解的过程中,都是添加了随机分量,这会导致最终提取每次故障行波到达检测点的时间不同,为了增强故障行波信号的突变特性,因此本文在文献[18]研究的基础上,提出一种改进的混合三端输电线路故障定位算法,具体分解步骤如下:

1) 使用 EMD 计算  $I$  个混合信号  $x^i(t) = x(t) + \beta_{k-1}E_k(\omega^i(t))$ , ( $i=1, 2, \dots, I$ ) 的局部均值,以获得第一个残余分量,如式(1)所示:

$$r_1(t) = \langle M(x^i(t)) \rangle \quad (1)$$

其中,  $x(t)$  为原信号,  $\beta_{k-1}$  是标准噪声偏差,  $\omega^i(t)$  是遵循  $N(0, 1)$  分布的高斯白噪声,  $E_k(\cdot)$  是定义由 EMD 分解获得的第  $k$  个 IMF 分量,  $M(\cdot)$  是计算局部均值的算子,  $\langle \cdot \rangle$  是求平均值的算子。

2) 根据公式(1)求出第一个 IMF 分量  $d_1(t)$ :

$$d_1(t) = x_1(t) - r_1(t)$$

3) 计算第二个残余分量以实现  $r_1(t) + \beta_1 E_2(\omega^i(t))$  局部均值的平均值,并获得第二个 IMF 分量:

$$d_2(t) = r_1(t) - r_2(t) = r_1(t) - \langle M(r_1(t) + \beta_1 E_2(\omega^i(t))) \rangle$$

4) 当  $k=3, \dots, I$  时,计算第  $k$  个残余分量:

$$r_k(t) = \langle M(r_{k-1}(t) + \beta_{k-1} E_k(\omega^i(t))) \rangle$$

5) 计算第  $k$  个 IMF 分量:

$$d_k(t) = r_{k-1}(t) - r_k(t)$$

6) 重复步骤 4) 和 5), 计算得到所有的 IMF 分量。

7) 设 IMF 分量数据为  $a[i]$ , 对各个 IMF 分量做如下操作:

$$\begin{cases} a[0] = 0 \\ b[1] = a[1] - a[0] \\ b[2] = a[2] - a[1] \\ \vdots \\ b[i] = a[i] - a[i-1] \end{cases}$$

其中,  $b[i]$  是 IMF 分量  $a[i]$  进行一阶差分的结果。

离散信号的一阶差分类同于连续信号的一阶微分。连续函数在奇异点处的微分值常有剧烈波动。离散信号处理中正是根据这一特点利用差分实现奇异点检测。对 IMF 分量进行差分运算, 可以减轻数据之间的不规则波动, 使其波动曲线更平稳, 增强 IMF 分量的突变特性, 消除 CEEMDAN 算法引起的随机性问题。

### 2.2 Teager-Kaiser 能量算子

Teager-Kaiser 能量算子<sup>[19]</sup>由 Teager 和 Kaiser 提出, 是一种非线性的高通能量跟踪算子。它在抑制低频信号的同时增强信号中存在的高频瞬态, 因此可以有效地提取信号的瞬时能量。

对于离散信号  $s(n)$ , TKEO 可表示为

$$\psi[s(n)] = [s(n)]^2 - s(n-1)s(n+1)$$

TEKO 能量算子的主要特点是其几乎是瞬时的, 因为它在每个时刻只需要三个样本来计算能量, 这使得 TKEO 适合应用于故障行波瞬态分量的提取。在本文中, 为了便于观察, 对 TEKO 计算得到的瞬时能量进行了归一化处理。

### 2.3 基于改进 CEEMDAN-TKEO 算法的故障初始时间提取

基于改进 CEEMDAN-TKEO 算法提取故障初始时间的流程如下:

1) 采集故障后四个检测端的三相故障暂态电压行波信号。

2) 采用新相模变换, 得到故障电压行波信号的线模和零模分量。

3) 使用改进 CEEMDAN 算法分解对电压行波线模

和零模分量进行分解, 得到数个由高频到低频的 IMF 分量。

4) 采用 TKEO 算法计算 IMF1 分量的 Teager 能量值, 通过 Teager 能量谱提取故障初始行波到达检测端的时间。

使用改进 CEEMDAN-TKEO 算法可以增强故障行波信号的突变特征, 减轻数据间的不规律波动, 从而实现故障初始时间的精确提取。

## 3 混合三端线路行波测距方法

### 3.1 新相模变换

当输电线路发生故障时, 由于三相线路之间存在电磁耦合现象, 对故障定位产生干扰<sup>[20]</sup>。为了消除耦合现象, 可以采用相模变换进行解耦。传统的相模变换, 例如克拉克变换、凯伦贝尔变换, 无法用单一的模量涵盖所有的故障类型, 需要根据相位配合选择双模量分析, 失去了相模变换的意义<sup>[21]</sup>。文献[22]提出了一种新的相模变换法, 用于解耦时可以通过单一模量反映出所有的故障类型。其新相模变换矩阵为

$$T = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ 5 & -1 & -4 \\ 5 & -4 & -1 \end{bmatrix}$$

其逆矩阵为:

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & -3 \\ 1 & -3 & 2 \end{bmatrix}$$

### 3.2 故障分支判别

在进行故障定位计算之前, 首先需要对故障分支进行判别。

图 1 为简易的三端架空-电缆混合输电线路模型,  $F_1, F_2, F_3$  为 3 个分支的随机故障点。  $L_{A0}$  是架空线路,  $L_{B0}$  是电缆线路,  $L_{C0}$  是架空-电缆-架空线路, 其中  $OC_1$  段、 $C_2C$  段是架空线路,  $C_1C_2$  段是电缆线路。

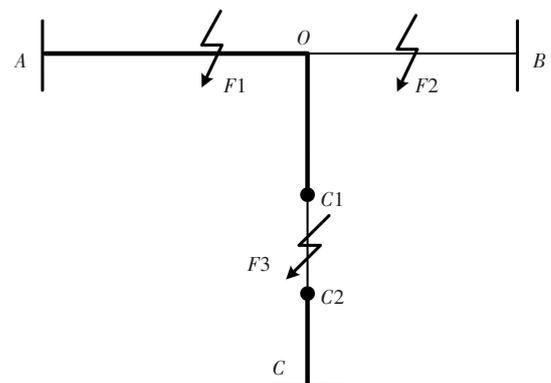


图 1 简易三端混合线路模型

Fig. 1 Simple three-terminal hybrid line model

设故障行波线模和零模分量在架空线路的波速为  $v_{ol}$  和  $v_{o0}$ , 故障行波线模和零模分量在电缆线路的波速为  $v_{cl}$  和  $v_{c0}$ 。设  $L_{AO}$  的长度为  $S_{AO}$ ,  $L_{BO}$  的长度为  $S_{BO}$ ,  $L_{CO}$  的长度为  $S_{CO} = S_{OC_1} + S_{C_1C_2} + S_{C_2C_0}$ 。

当  $O$  点发生故障时, 故障行波线模和零模分量到达各个检测点的时间为

$$\begin{cases} t_{1l} = \frac{S_{AO}}{v_{ol}} \\ t_{10} = \frac{S_{AO}}{v_{o0}} \\ t_{2l} = \frac{S_{BO}}{v_{cl}} \\ t_{20} = \frac{S_{BO}}{v_{c0}} \\ t_{3l} = \frac{S_{CO}}{v_l} = \frac{S_{OC_1}}{v_{ol}} + \frac{S_{C_1C_2}}{v_{cl}} + \frac{S_{C_2C_0}}{v_{ol}} \\ t_{30} = \frac{S_{CO}}{v_0} = \frac{S_{OC_1}}{v_{o0}} + \frac{S_{C_1C_2}}{v_{c0}} + \frac{S_{C_2C_0}}{v_{o0}} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $t_{1l}$  和  $t_{10}$  是行波线模和零模分量到达  $A$  端检测点所用时间;  $t_{2l}$  和  $t_{20}$  是行波线模和零模分量到达  $B$  端检测点所用时间;  $t_{3l}$  和  $t_{30}$  是行波线模和零模分量到达  $C$  端检测点所用时间。

根据式(2), 可以得到行波线模和零模分量到达各个检测点的时间差:

$$\begin{cases} \Delta t_1 = t_{10} - t_{1l} \\ \Delta t_2 = t_{20} - t_{2l} \\ \Delta t_3 = t_{30} - t_{3l} \end{cases}$$

其中,  $\Delta t_1$  是故障初始行波零模和线模分量从  $O$  点传播到  $A$  端检测点的时间差;  $\Delta t_2$  是故障初始行波零模和线模分量从  $O$  点传播到  $B$  端检测点的时间差;  $\Delta t_3$  是故障初始行波零模和线模分量从  $O$  点传播到  $C$  端检测点的时间差。

当三端混合线路有某处发生故障时, 例如  $F1$ 、 $F2$  或  $F3$ , 假设  $t_{A_l}$ 、 $t_{B_l}$ 、 $t_{C_l}$  分别为某处故障初始行波线模分量的波头到达  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三端的时间;  $t_{A_0}$ 、 $t_{B_0}$ 、 $t_{C_0}$  分别为某处故障初始行波零模分量的波头到达  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三端的时间。计算出此时的线模零模分量的时间差:

$$\begin{cases} \Delta t_A = t_{A_0} - t_{A_l} \\ \Delta t_B = t_{B_0} - t_{B_l} \\ \Delta t_C = t_{C_0} - t_{C_l} \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\Delta t_A$  是故障初始行波零模和线模分量到达  $A$  端检测点的时间差;  $\Delta t_B$  是故障初始行波零模和线模分量到达  $B$  端检测点的时间差;  $\Delta t_C$  是故障初始行波零模和线模分量到达  $C$  端检测点的时间差。

从图 1 可知, 当  $F1$  发生故障时, 此时故障分支在  $AO$  上, 此时根据式(3)可以得到三端检测点零模和线模分量的时间差, 通过式(4)将其扩展:

$$\begin{cases} \Delta t_A = t_{A_0} - t_{A_l} = (t_{10} - t_{F1_0}) - (t_{1l} - t_{F1_l}) = (t_{10} - t_{1l}) + \\ (t_{F1_l} - t_{F1_0}) \\ \Delta t_B = t_{B_0} - t_{B_l} = (t_{20} + t_{F1_0}) - (t_{2l} + t_{F1_l}) = (t_{20} - t_{2l}) + \\ (t_{F1_0} - t_{F1_l}) \\ \Delta t_C = t_{C_0} - t_{C_l} = (t_{30} + t_{F1_0}) - (t_{3l} + t_{F1_l}) = (t_{30} - t_{3l}) + \\ (t_{F1_0} - t_{F1_l}) \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中,  $t_{F1_l}$  和  $t_{F1_0}$  分别是故障点  $F1$  的行波线模和零模分量到达  $O$  端检测点的时间。根据线路参数可知, 线模分量波速大于零模分量波速, 因而  $t_{F1_l} - t_{F1_0}$  是小于零的数。因此当  $AO$  区间内发生故障时, 可得:

$$\begin{cases} \Delta t_A < \Delta t_1 \\ \Delta t_B > \Delta t_2 \\ \Delta t_C > \Delta t_3 \end{cases} \quad (5)$$

同理可得, 当  $BO$  和  $CO$  区间内发生故障, 根据线模和零模分量时间差, 分别具有以下关系, 如式(6)和式(7)所示:

$$\begin{cases} \Delta t_A > \Delta t_1 \\ \Delta t_B < \Delta t_2 \\ \Delta t_C > \Delta t_3 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \Delta t_A > \Delta t_1 \\ \Delta t_B > \Delta t_2 \\ \Delta t_C < \Delta t_3 \end{cases} \quad (7)$$

当故障点发生在  $O$  端检测点时, 则有:

$$\begin{cases} \Delta t_A = \Delta t_1 \\ \Delta t_B = \Delta t_2 \\ \Delta t_C = \Delta t_3 \end{cases} \quad (8)$$

因此, 当混合三端输电线路发生故障时, 根据各个线模

和零模分量到达检测点的时间差,结合式(5)一式(8)的判定公式,可以得出故障点所在分支。

### 3.3 故障路段判别

从图 1 可知,  $L_{CO}$  支路是架空-电缆-架空的混合线路。当  $L_{CO}$  支路的  $F3$  处发生故障时,传统的定位算法不能直接应用于此,须提前判断出故障点处于架空线路段还是电缆线路段。

$$\begin{cases} t_{OC_1} = \frac{S_{OC_1}}{v_{ol}} \\ t_{OC_1} = \frac{S_{OC_1}}{v_{o0}} \\ t_{C_1C_2} = \frac{S_{C_1C_2}}{v_{el}} \\ t_{C_1C_2} = \frac{S_{C_1C_2}}{v_{e0}} \\ t_{C_2C} = \frac{S_{C_2C}}{v_{ol}} \\ t_{C_2C} = \frac{S_{C_2C}}{v_{o0}} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中  $t_{OC_1}$ 、 $t_{OC_1}$ 、 $t_{C_1C_2}$ 、 $t_{C_1C_2}$ 、 $t_{C_2C}$  和  $t_{C_2C}$  分别是故障行波线模和零模分量经过  $OC_1$  段、 $C_1C_2$  段和  $C_2C$  段所需时间。

当  $C_1$  和  $C_2$  处(电缆和架空线路的连接点)分别发生故障时,故障行波到达  $C$  端检测点的零模和线模分量的时间差分别为  $\Delta t_{C_1}$  和  $\Delta t_{C_2}$ ,可以根据式(10)计算得出:

$$\begin{cases} \Delta t_{C_1} = (t_{C_1C_2_0} + t_{C_2C_0}) - (t_{C_1C_2_l} + t_{C_2C_l}) \\ \Delta t_{C_2} = t_{C_2C_0} - t_{C_2C_l} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(10)可知,  $\Delta t_{C_1} > \Delta t_{C_2}$ 。

假设  $L_{CO}$  支路  $OC_1$  段发生故障,根据式(4)计算得出的  $\Delta t_C$ ,进行如下计算:

$$\begin{aligned} \Delta t_C = t_{C_0} - t_{C_l} = t_{C_1C_2_0} + t_{C_2C_0} + t_{F3C_{1_0}} - t_{C_1C_2_l} - t_{C_2C_l} - t_{F3C_{1_l}} = \\ (t_{C_1C_2_0} + t_{C_2C_0}) - (t_{C_1C_2_l} + t_{C_2C_l}) + (t_{F3C_{1_0}} - t_{F3C_{1_l}}) \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $t_{F3C_{1_l}}$  和  $t_{F3C_{1_0}}$  是故障行波线模和零模分量从故障点到  $C_1$  处所用的时间。

根据式(10)和式(11)对比可知,当  $OC_1$  段发生故障时,  $\Delta t_C > \Delta t_{C_1}$ 。

当  $C_2C$  段发生故障时,则有:

$$\begin{aligned} \Delta t_C = t_{C_0} - t_{C_l} = t_{C_2C_0} - t_{C_2F3_0} - t_{C_2C_l} + t_{C_2F3_l} = (t_{C_2C_0} - t_{C_2C_l}) + \\ (t_{C_2F3_l} - t_{C_2F3_0}) \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $t_{C_2F3_l}$  和  $t_{C_2F3_0}$  是故障行波线模和零模分量从故障点到  $C_2$  处所用的时间。

根据式(10)和式(12)对比可知,当  $C_2C$  段发生故障时,  $\Delta t_C < \Delta t_{C_2}$ 。

当  $C_1C_2$  段发生故障时,则有:

$$\begin{cases} \Delta t_C = t_{C_0} - t_{C_l} = t_{C_1C_2_0} + t_{C_2C_0} - t_{F3C_{1_0}} - t_{C_1C_2_l} - t_{C_2C_l} + t_{F3C_{1_l}} = \\ (t_{C_1C_2_0} + t_{C_2C_0}) - (t_{C_1C_2_l} + t_{C_2C_l}) + (t_{F3C_{1_l}} - t_{F3C_{1_0}}) \\ \Delta t_C = t_{C_0} - t_{C_l} = t_{C_2C_0} + t_{C_2F3_0} - t_{C_2C_l} - t_{C_2F3_l} = (t_{C_2C_0} - t_{C_2C_l}) + \\ (t_{C_2F3_0} - t_{C_2F3_l}) \end{cases} \quad (13)$$

根据式(10)和式(13)对比可知,当  $C_1C_2$  段发生故障时,  $\Delta t_{C_2} < \Delta t_C < \Delta t_{C_1}$ 。

因此,当  $L_{CO}$  支路发生故障时,通过  $C$  端检测点零模和线模分量的时间差,结合式(10)一式(13),即可判断出故障点所处区间。

### 3.4 基于线模零模时差的测距算法

文献[23]的基于零模线模时差的行波故障测距算法,具体见式(14):

$$d_A = \frac{L_{AB}}{2} + \frac{v_0 v_l}{2(v_l - v_0)} [(t_{A_0} - t_{A_l}) - (t_{B_0} - t_{B_l})] \quad (14)$$

式(14)中,  $v_0$ 、 $v_l$  分别是行波零模和线模的波速;  $t_{A_0}$ 、 $t_{A_l}$ 、 $t_{B_0}$ 、 $t_{B_l}$  分别是行波零模和线模分量到达  $A$  端和  $B$  端检测点的时间;  $L_{AB}$  是  $A$  端检测点到  $B$  端的距离。

实际应用中无法得到准确的波速值,为消除波速的影响,需对式(14)进行改进。联立方程:

$$\begin{cases} v_0 = \frac{t_{A_l} + t_{B_l}}{t_{A_0} + t_{B_0}} v_l \\ v_l = \frac{L_{AB}}{t_{A_l} + t_{B_l}} \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)代入式(14),计算得:

$$d_A = \frac{t_{A_0} - t_{A_l}}{t_{A_0} - t_{A_l} + t_{B_0} - t_{B_l}} L_{AB} \quad (16)$$

式(16)不受波速的影响,将式(16)引入图 1 的混合三端输电线路故障定位,当  $AO$  区间内发生故障时,可得故障点到  $O$  端的距离:

$$d_O = \frac{t_{O_0} - t_{O_l}}{t_{A_0} - t_{A_l} + t_{O_0} - t_{O_l}} S_{AO} \quad (17)$$

式(17)中,  $t_{O_0}$ 、 $t_{O_l}$  分别是故障行波零模和线模分量到达  $O$  端的时间。

当  $BO$  区间内发生故障:

$$d_O = \frac{t_{O_0} - t_{O_l}}{t_{B_0} - t_{B_l} + t_{O_0} - t_{O_l}} S_{BO} \quad (18)$$

当  $CO$  区间的  $OC_1$  区段发生故障:

$$d_o = \frac{(t_{o_0} - t_{o_1})(S_{CO} - S_{C_1C_2})}{(t_{c_0} - t_{c_1c_2_0}) - (t_{c_1} - t_{c_1c_2_1}) + t_{o_0} - t_{o_1}} \quad (19)$$

当  $CO$  区间的  $C_1C_2$  区段发生故障:

$$d_o = \frac{[(t_{o_0} - t_{oc_1_0}) - (t_{o_1} - t_{oc_1_1})] S_{C_1C_2}}{[(t_{c_0} - t_{c_2_0}) - (t_{c_1} - t_{c_2_1}) + (t_{o_0} - t_{oc_1_0}) - (t_{o_1} - t_{oc_1_1})]} + S_{oc_1} \quad (20)$$

当  $CO$  区间的  $C_2C$  区段发生故障:

$$d_o = \frac{[(t_{o_0} - t_{c_1c_2_0}) - (t_{o_1} - t_{c_1c_2_1})] (S_{CO} - S_{C_1C_2})}{[t_{c_0} - t_{c_1} + (t_{o_0} - t_{c_1c_2_0}) - (t_{o_1} - t_{c_1c_2_1})]} + S_{C_1C_2} \quad (21)$$

由式(17)一式(21)可知,该测距算法不受波速影响,只需故障行波到达检测点的时间就可以算出精确距离。

#### 4 仿真验证与分析

在 Matlab/Simulink 中搭建如图 1 所示的 T 型 110 kV 混合输电线路模型。架空线路和电缆线路均采用分布参数模型,架空线路  $L_{AO}$  长度为 90 km,电缆线路  $L_{BO}$  长度为 70 km,其中  $L_{CO}$  是架空-电缆-架空混合线路,长度分别为 60 km、40 km 和 30 km,总长为 130 km。输电线路具体参数如表 1 所示。

表 1 输电线路参数

Table 1 Parameters of transmission lines

线路种类	相序	电阻( $\Omega/\text{km}$ )	电感( $\text{mH}/\text{km}$ )	电容( $\mu\text{F}/\text{km}$ )
架空	正序	0.17	1.21	0.009 7
	零序	0.23	5.48	0.006
电缆	正序	0.265	0.255	0.17
	零序	2.54	1.019	0.153

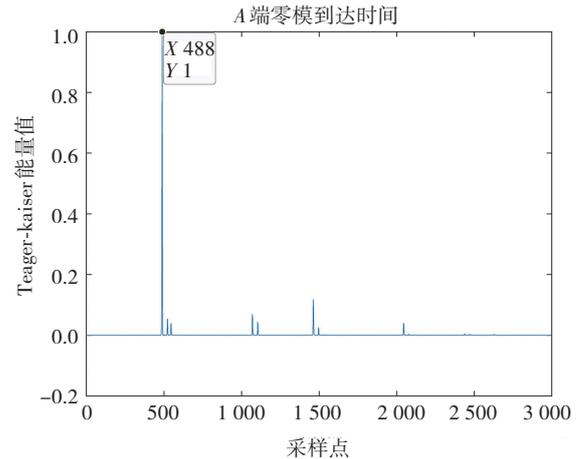
该系统的仿真时间为 0.1 s,采样频率为 1 MHz,故障时间是 0.035 s,选取故障发生后 3 ms 的故障分量进行故障定位。下述仿真中,故障距离均指  $O$  点到故障点的距离。目前实际情况下,单相接地故障发生概率最高,如若没有特别注释,故障均以单相接地故障为主,过渡电阻为零。

##### 4.1 定位算法对比分析

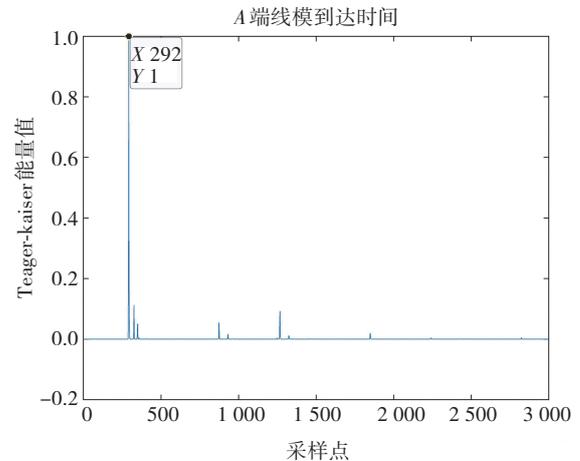
为了验证本文所提改进 CEEMDAN 算法的性能,分别通过 CEEMDAN 和改进 CEEMDAN 对故障信号进行分解,比较分解结果。

以  $AO$  支路为例,在距离  $O$  点 5 km 处发生故障。实验将利用 CEEMDAN 和改进 CEEMDAN 对同一故障重复进行十次仿真,结合 TKEO 提取故障行波到达检测点时间。

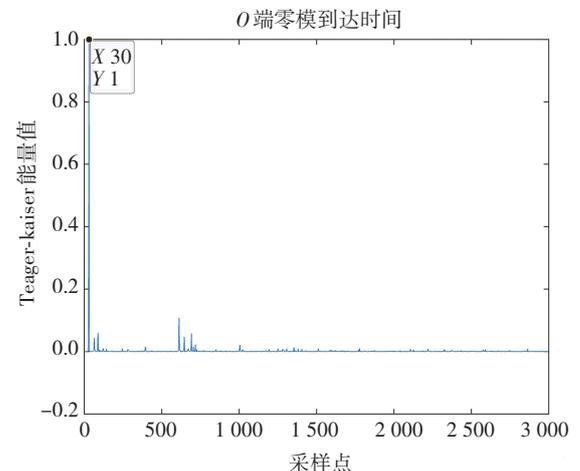
为了避免赘述,仅详细给出 CEEMDAN-TKEO 算法分解其中重复两次的的数据,改进 CEEMDAN-TKEO 算法分解的数据在十次仿真中都是相同的,如图 2、图 3、图 4 所示。从图 2、图 3、图 4 可知,由于 CEEMDAN 算法添加了随机的特殊噪声,虽然每次计算得到的 IMF 分量都有做求均值的处理,但依旧会造成最终提取到的故障时间有一些偏差。



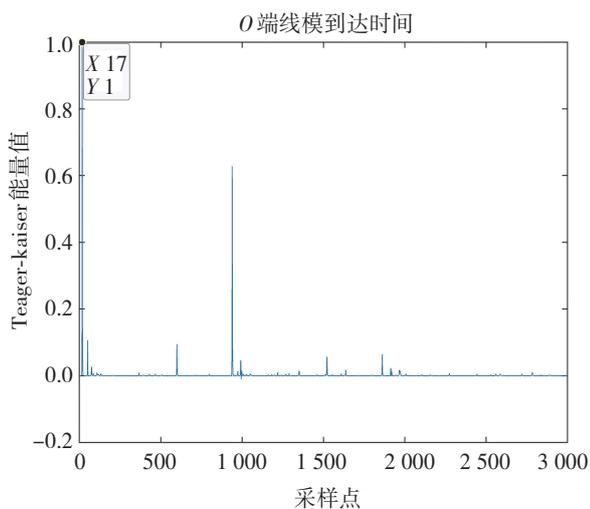
(a) A 端零模分量瞬时能量谱



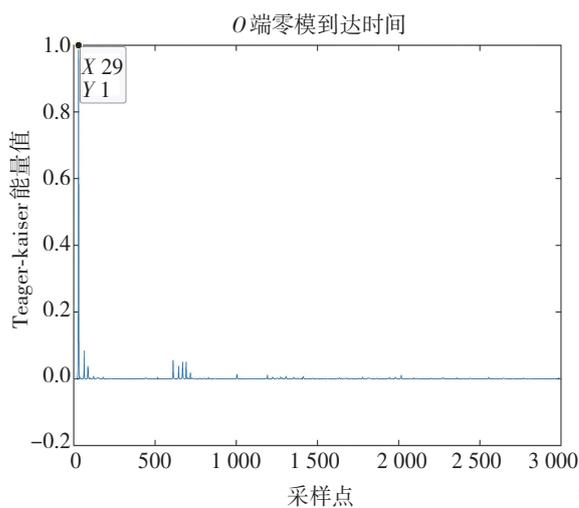
(b) A 端线模分量瞬时能量谱



(c) O 端零模分量瞬时能量谱

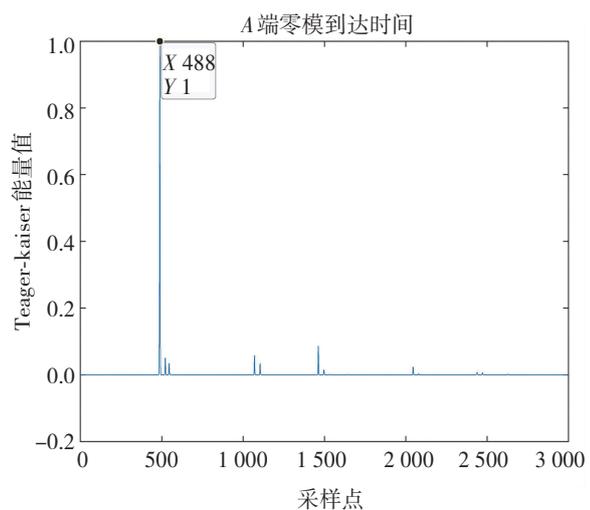


(d) O 端线模分量瞬时能量谱

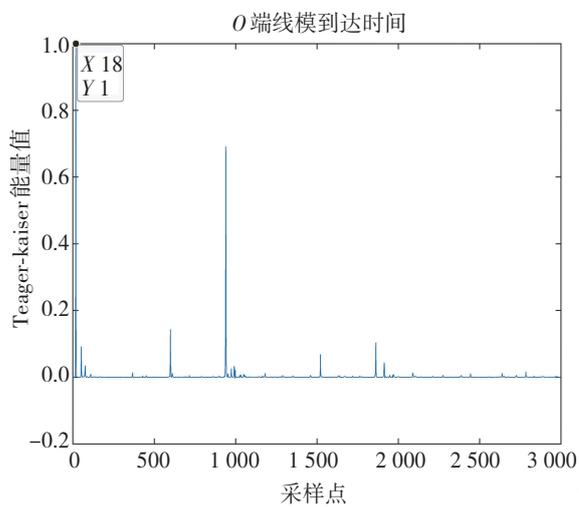


(c) O 端零模分量瞬时能量谱

图 2 使用 CEEMDAN 的双端瞬时能量谱  
Fig. 2 Two-terminal instantaneous energy spectrum of CEEMDAN

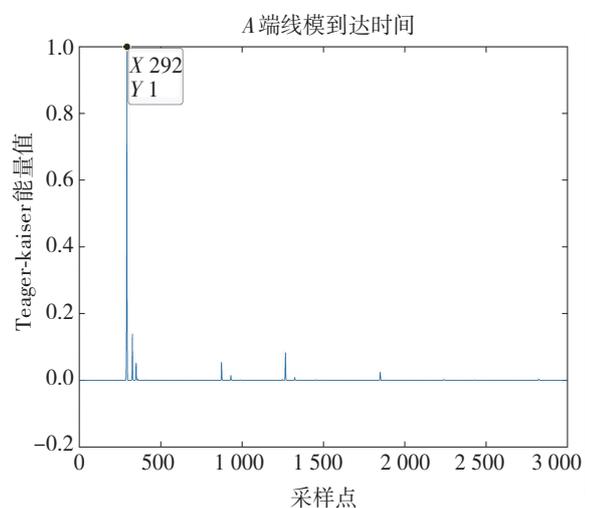


(a) A 端零模分量瞬时能量谱

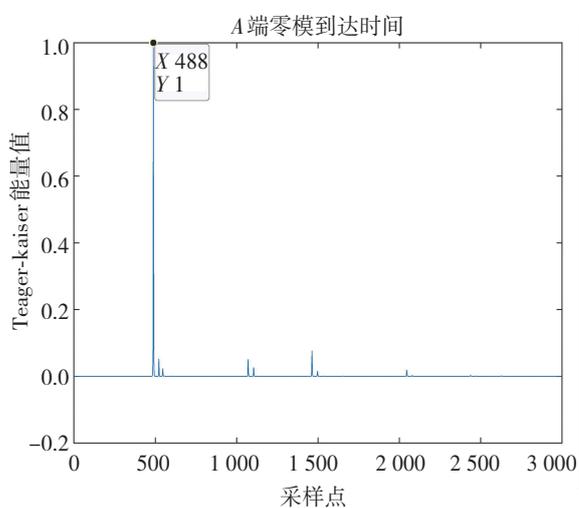


(d) O 端线模分量瞬时能量谱

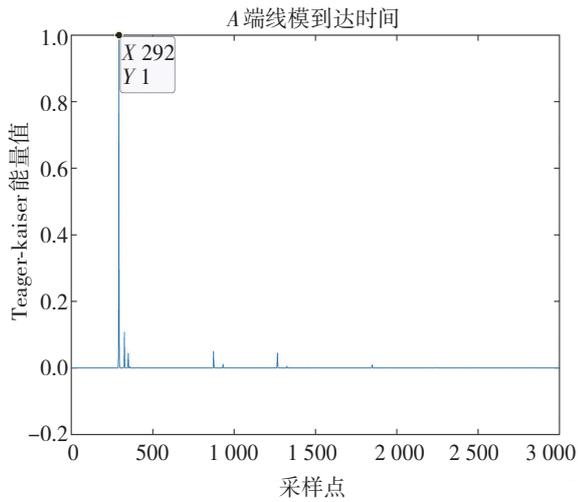
图 3 使用 CEEMDAN 的双端瞬时能量谱  
Fig. 3 Two-terminal instantaneous energy spectrum of CEEMDAN



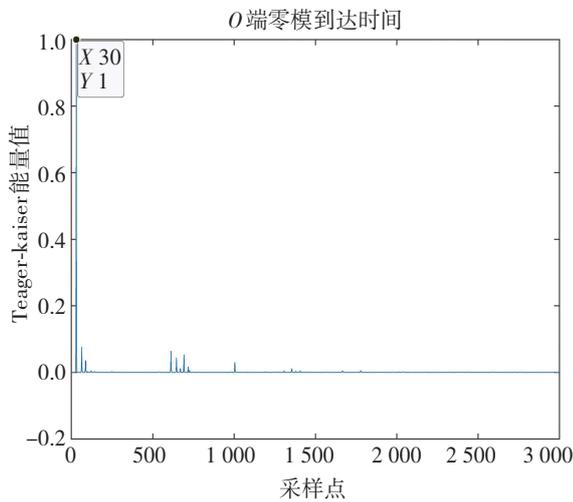
(b) A 端线模分量瞬时能量谱



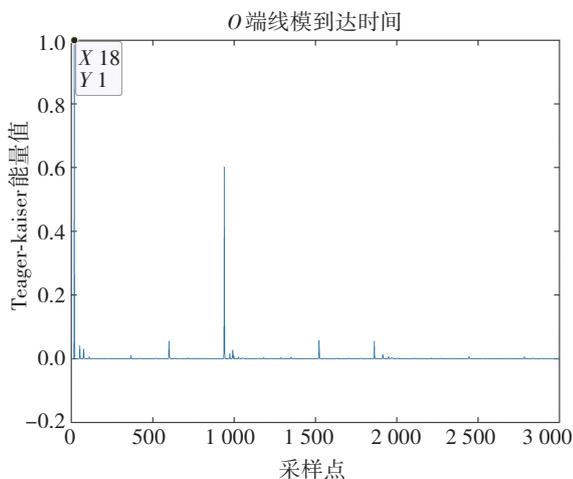
(a) A 端零模分量瞬时能量谱



(b) A 端线模分量瞬时能量谱



(c) O 端零模分量瞬时能量谱



(d) O 端线模分量瞬时能量谱

图 4 使用改进 CEEMDAN 的双端瞬时能量谱

Fig. 4 Two-terminal instantaneous energy spectrum of improved CEEMDAN

从图 2、图 3、图 4 可得行波线模和零模分量到达各个端点的时间,根据式(17)分别得到故障距离为 5.600 km、4.783 km、5.192 km。因此,利用本文所提改进 CEEMDAN 算法对故障信号进行分解,不仅可以消除随机噪声带来的偏差,而且能提高测距精度。

#### 4.2 故障分支判别分析

由 3.2 和 3.3 节可知,通过行波零模和线模分量的时间差,就能得出故障所在分支。为了验证此方法的准确性,在不同支路上的不同距离分别设置故障点,仿真结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 各检测点故障行波线模分量到达时间

Table 2 Arrival time of fault traveling wave line-mode component at each measuring point

故障支路	故障距离/km	$t_{A_i}/\mu\text{s}$	$t_{B_i}/\mu\text{s}$	$t_{C_i}/\mu\text{s}$
AO	20	241	530	641
	60	104	667	778
BO	15	408	363	672
	40	573	199	836
CO	55	498	650	384
	95	745	898	137
O 点	0	309	462	573

表 3 各检测点故障行波零模分量到达时间

Table 3 Arrival time of fault traveling wave zero-mode component at each measuring point

故障支路	故障距离/km	$t_{A_0}/\mu\text{s}$	$t_{B_0}/\mu\text{s}$	$t_{C_0}/\mu\text{s}$
AO	20	402	990	1 131
	60	173	1 219	1 360
BO	15	704	688	1 204
	40	1 016	376	1 516
CO	55	832	1 190	701
	95	1 298	1 656	235
O 点	0	517	875	1016

从表 2 和表 3 可知,所得数据都满足 3.2 和 3.3 节的判别公式,可以准确地判断出故障所在支路。

#### 4.3 故障点位置和过渡电阻对故障定位的影响

设置不同的故障点位置和过渡电阻,故障定位仿

真结果如表 4—表 6 所示。

表 4 AO 支路不同故障距离及过渡电阻定位结果

Table 4 Location results of different fault distances and transition resistances of AO branch

故障距离 /km	过渡电阻 /Ω	定位距离 /km	绝对误差 /m	相对误差 /%
7	0	6.923	77	0.086
	100	6.923	77	0.086
	500	6.923	77	0.086
29	0	28.990	10	0.011
	100	28.990	10	0.011
	500	28.990	10	0.011
45	0	45.000	0	0
	100	45.000	0	0
	500	45.000	0	0
64	0	64.038	38	0.042
	100	64.038	38	0.042
	500	64.038	38	0.042
87	0	86.971	29	0.032
	100	86.971	29	0.032
	500	86.971	29	0.032

表 5 BO 支路不同故障距离及过渡电阻定位结果

Table 5 Location results of different fault distances and transition resistances of BO branch

故障距离 /km	过渡电阻 /Ω	定位距离 /km	绝对误差 /m	相对误差 /%
5	0	4.915	85	0.121
	100	4.915	85	0.121
	500	4.915	85	0.121
21	0	21.017	17	0.024
	100	21.017	17	0.024
	500	21.017	17	0.024
45	0	45.085	85	0.121
	100	45.085	85	0.121
	500	45.085	85	0.121
53	0	53.051	51	0.073
	100	53.051	51	0.073
	500	53.051	51	0.073
62	0	62.034	34	0.049
	100	62.034	34	0.049
	500	62.034	34	0.049

表 6 CO 支路不同故障距离及过渡电阻定位结果

Table 6 Location results of different fault distances and transition resistances of CO branch

故障距离 /km	过渡电阻 /Ω	定位距离 /km	绝对误差 /m	相对误差 /%
10	0	9.952	48	0.037
	100	9.952	48	0.037
	500	9.952	48	0.037
38	0	38.077	77	0.059
	100	38.077	77	0.059
	500	38.077	77	0.059
73	0	73.051	51	0.039
	100	73.051	51	0.039
	500	73.051	51	0.039
95	0	95.085	85	0.065
	100	95.085	85	0.065
	500	95.085	85	0.065
121	0	120.913	87	0.067
	100	120.913	87	0.067
	500	120.913	87	0.067

从表 4—表 6 可知,本文方法不受过渡电阻的影响,在不同位置的故障点下依旧能准确定位,误差在 0.1% 以内,可以满足故障定位要求。

#### 4.4 故障类型对故障定位的影响

不同故障类型的故障定位仿真结果如表 7 所示。从表 7 可知,本文方法不受故障类型的影响,误差能够控制在 0.1% 左右。

表 7 不同故障类型的定位结果

Table 7 Locating results of different fault types

故障支路	故障距离/km	故障类型	定位距离/km	绝对误差/m	相对误差/%
AO	35	AG	35.048	48	0.053
		AB	35.048	48	0.053
		ABG	35.048	48	0.053
BO	25	AG	24.915	85	0.121
		AB	24.915	85	0.121
		ABG	24.915	85	0.121
CO	55	AG	54.952	48	0.037
		AB	54.952	48	0.037
		ABG	54.952	48	0.037

#### 4.5 时间不同步对故障定位的影响

时间不同步对于传统的双端行波测距方法影响较大,目前市面上能接受的时间误差在 2 μs。为了验证时间不同步对故障定位的影响,对 A、B、C 三端检测点

分别延时  $1 \mu\text{s}$ 、 $2 \mu\text{s}$ 、 $-2 \mu\text{s}$ , 采用表 4—表 6 部分数据进行仿真验证, 结果如表 8 所示。对比表 8 和表 4—表 6 的定位结果可知, 时间不同步对本文方法不影响。

表 8 时间不同步的定位结果

Table 8 Locating results of unsynchronized time

故障支路	故障距离/km	延时/ $\mu\text{s}$	定位结果/km	相对误差/%
AO	7	1	6.923	0.086
	64		64.038	0.042
BO	5	2	4.915	0.121
	53		53.051	0.073
CO	10	-2	9.952	0.037
	95		95.085	0.065

## 5 结 论

针对故障信号在进行 CEEMDAN 分解后得到的 IMF 分量出现不规则波动的问题, 提出了改进 CEEMDAN 算法, 对 IMF 分量进行差分运算, 可以减少数据的波动, 增强数据的突变特征, 解决 CEEMDAN 算法带来的随机性问题。

针对三端混合线路系统结构复杂以及波阻抗不连续问题, 提出了基于零模线模时差的故障分支判别方法。该方法通过三端的零模线模时间差与标准时间差进行对比, 确定故障分支线路以及故障所处架空线路或电缆线路, 继而利用基于零模线模时差的测距算法得到故障距离。该测距算法不受故障距离、过渡电阻、故障类型、波速的影响, 无须对时间同步, 兼顾了双端和单端行波测距算法的优点, 其中定位误差基本控制在 0.1% 以内, 具有较高精度。

本文所提方法仅在仿真软件上进行试验, 有许多理想化的条件。在实际生活中, 故障信号会受到周围噪声的干扰。线路的老化、天气的变化等都会影响测距的精度, 在实际的工作中, 需要考虑各种的外界因素的影响, 因此仍需要进行相关研究。

## 参考文献(References):

[1] 石逸雯, 徐星, 屠幼萍, 等. 超高压架空线-电缆混合线路合闸过电压特性仿真分析[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 178—185.  
SHI Yi-wen, XU Xing, TU You-ping, et al. Simulation analysis of closing overvoltage characteristics of overhead-cable hybrid lines with extra high voltage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 178—185.

[2] 张智伟, 范新桥, 张利, 等. 基于动态模式分解的三端多段式架空线-电缆混合输电线路故障定位新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(10): 129—137.  
ZHANG Zhi-wei, FAN Xing-qiao, ZHANG Li, et al. Novel fault location method for three-terminal multi-segment overhead-cable hybrid transmission line based on dynamic mode decomposition[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2022, 34(10): 129—137.

[3] 梁振锋, 李天婷, 伍美娟, 等. 架空-电缆混合线路自适应故障区段重合闸的研究[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1127—1134.  
LIANG Zhen-feng, LI Tian-ting, WU Mei-juan, et al. Research on adaptive fault section reclosing of overhead-cable hybrid line[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1127—1134.

[4] 宋金钊, 李永丽, 张云柯, 等. 逆变侧交流线路单相自适应重合闸的适用性分析与改进策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1001—1010.  
SONG Jin-zhao, LI Yong-li, ZHANG Yun-ke, et al. Applicability analysis and improved strategy of adaptive single-phase reclosure for AC lines on inverter side[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1001—1010.

[5] 高淑萍, 徐振曦, 宋国兵, 等. 基于小波阈值去噪和 CEEMD 的混合三端直流输电线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 29—40.  
GAO Shu-ping, XU Zhen-xi, SONG Guo-bing, et al. Fault location of hybrid three-terminal HVDC transmission lines based on wavelet threshold denoising and CEEMD[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 29—40.

[6] 张凡, 牟龙华, 陈浩敏, 等. 基于故障分量原理的配电网高阻接地故障检测方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 219—225.  
ZHANG Fan, MU Long-hua, CHEN Hao-min, et al. High impedance grounding fault detection for distribution networks based on fault component principle[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 219—225.

[7] LATHA A H, BHIMASINGU R. A new transmission line fault location identification using fault current DC transients[C]//2021 IEEE 18th India Council International Conference (INDICON). IEEE, 2021: 1—6.

[8] GANGOLU S. Fault location estimation algorithm using local end data for transmission line[C]//2021 IEEE 8th Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON). IEEE, 2021: 1—6.

- [9] 张悻宁. 架空-电缆混合输电线路故障定位方法综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 44—51.  
ZHANG Yi-ning. A review of fault location methods for hybrid overhead and cable transmission lines [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 44—51.
- [10] 曹俊平, 黄勃, 王成珠, 等. 基于小波变换的高压电缆混合线路故障定位方法及验证试验[J]. 浙江电力, 2021, 40(2): 14—19.  
CAO Jun-ping, HUANG Bo, WANG Cheng-zhu, et al. Fault location method and verification test analysis of hybrid HV cable lines based on wavelet transform[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(2): 14—19.
- [11] 邢志杰, 田行军, 刘宇晰, 等. 电缆-架空线混合线路行波故障测距算法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3540—3546.  
XING Zhi-jie, TIAN Xing-jun, LIU Yu-xi, et al. Research of traveling wave fault location algorithm for the overhead line-cable hybrid line[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3540—3546.
- [12] 林明毅. 小电流接地系统单相接地故障选线及测距研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.  
LIN Ming-yi. Research on single-phase grounding fault line selection and distance measurement in small current grounding system[D]. Nanning: Guangxi University, 2021.
- [13] 孙杰. 基于改进 CEEMDAN 与频率加权能量算子的配电网故障测距方法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.  
SUN Jie. Research on distribution network fault location method based on improved CEEMDAN combined with frequency weighted energy operator [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [14] GAUR V K, BHALJA B R, SABER A. New ground fault location method for three-terminal transmission line using unsynchronized current measurements[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 135: 107513.
- [15] 张宸宇, 邓凯, 史明明, 等. 基于小波变换的直流主动配电网电压波动源辨识[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 21—24, 30.  
ZHANG Chen-yu, DENG Kai, SHI Ming-ming, et al. Identification of voltage pollution source based on wavelet transform in DC active distributed network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 21—24, 30.
- [16] 张安安, 周志通, 曲广龙, 等. 基于 HHT 一化迭代的输电线路故障测距研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(3): 165—172.  
ZHANG An-an, ZHOU Zhi-tong, QU Guang-long, et al. Study on fault location of transmission line based on HHT iteration[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(3): 165—172.
- [17] 李书盼. 基于改进的 CEEMDAN 和 1-D CNN 的高速列车转向架故障诊断研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.  
LI Shu-pan. Research on fault diagnosis methods of high-speed train bogie based on improved-CEEMDAN and 1-D CNN [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [18] COLOMINAS M A, SCHLOTTHAUER G, TORRES M E. Improved complete ensemble EMD: A suitable tool for biomedical signal processing[J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2014, 14: 19—29.
- [19] KAISER J F. On a simple algorithm to calculate the 'energy' of a signal [C]//International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. IEEE, 1990: 381—384.
- [20] 赵庆明, 李斌. 基于电压补偿原理的单相自适应重合闸新型相位判据[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 50—54, 60.  
ZHAO Qing-ming, LI Bing. A new phase criterion for single-pole adaptive reclosure based on voltage compensation [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 50—54, 60.
- [21] 宋国兵, 李森, 康小宁, 等. 一种新相模变换矩阵[J]. 电力系统自动化, 2007(14): 57—60.  
SONG Guo-bing, LI Sen, KANG Xiao-ning, et al. A novel phase-mode transformation matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007(14): 57—60.
- [22] 王守鹏, 赵冬梅, 袁敬中, 等. 一种用于同塔双回线故障定位的新相模变换法[J]. 西安理工大学学报, 2020, 36(3): 432—438.  
WANG Shou-peng, ZHAO Dong-mei, YUAN Jing-zhong, et al. New phase-mode transformation matrix for fault location of double-circuit transmission lines[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2020, 36(3): 432—438.
- [23] 胡冰颖, 李梅. 基于零模线模时差的配电网双端行波故障测距[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 114—120.  
HU Bing-ying, LI Mei. Double ended traveling wave fault location in distribution network based on the time difference of zero-mode and line-mode [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 114—120.