

基于时间线性拟合的地缆架空混合线路的行波故障定位

杨 岸, 许鹏坤

安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

摘要:目的 研究 n 段地缆架空混合输电线路中行波故障定位问题, 提出一种基于时间线性拟合的行波故障定位方法。方法 首先对故障区域进行判断, 确定故障所在的区域, 其次再将不同波阻抗线路进行归一化处理, 减少因波速不同而产生的测距误差, 最后使用时间线性拟合的方法对故障进行精确定位。结果 解决了初始行波波头识别困难的问题, 也减小了行波速度随传输距离变化而变化带来的测距误差问题。结论 在 MATLAB/Simulink 中搭建一个 500 kV 的地缆架空混合输电线路仿真模型, 实验的验证结果表明此故障定位方法能够有效地解决因行波速度不同而导致的双端行波测距方法不适用问题, 最终实现对故障点的精确定位。

关键词:混合线路; 线性拟合; 归一化处理; 双端行波; 故障定位

中图分类号: TM75 文献标识码: A doi: 10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0003.010

Traveling Wave Fault Location of Mixed Lines of Ground and Overhead Cables Based on Time Linear Fitting

YANG An, XU Pengkun

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science & Technology, Anhui Huainan 232001, China

Abstract: Objective This paper investigated the traveling wave fault location in n -section ground-overhead mixed transmission lines and proposed a traveling wave fault location method based on time linear fitting. **Methods** Firstly, the fault area was determined to identify the region where the fault occurred. Next, different wave impedance lines were normalized to reduce ranging errors caused by different wave speeds. Finally, the time linear fitting method was used to accurately locate the fault. **Results** This method addressed the difficulty in identifying the initial traveling wave head and reduced ranging errors caused by changes in traveling wave speed with transmission distance. **Conclusion** A simulation model of a 500 kV ground-overhead mixed transmission line was built in MATLAB/Simulink. The experimental validation results demonstrate that this fault location method can effectively overcome the inapplicability of the dual-end traveling wave ranging method due to different wave speeds and ultimately achieve precise fault location.

Keywords: mixed lines; linear fitting; normalization; dual-end traveling wave; fault location

1 引言

随着我国电力系统的不断发展, 输电线路开始向地缆架空混合线路发展, 越来越多的城市外围使用架空线路而城市内则使用地缆线路。地缆架空混合线路的增多对于故障定位要求也在提高, 现阶段故障定位

的方法主要有行波法^[1-3]与阻抗法^[4-6]两种。与阻抗法相比行波法因不受系统运行方式的影响、并且响应快、精度高而在电网故障定位中广泛使用。

近年来大量学者对地缆架空线路的行波故障定位方法进行了研究。文献[7]研究了带变压器的混合线

收稿日期: 2022-11-07 修回日期: 2022-12-26 文章编号: 1672-058X(2024)03-0072-09

作者简介: 杨岸(1965—), 男, 安徽淮南人, 副教授, 硕士, 从事电力系统及其自动化研究。

通讯作者: 许鹏坤(1999—), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 从事电力系统及其自动化研究。Email: 1015833236@qq.com。

引用格式: 杨岸, 许鹏坤. 基于时间线性拟合的地缆架空混合线路的行波故障定位[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2024, 41(3): 72—80.

YANG An, XU Pengkun. Traveling wave fault location of mixed lines of ground and overhead cables based on time linear fitting [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(3): 72—80.

路行波故障定位,研究表明:变压器会使得故障行波的波头幅值发生衰减对行波初始波头标定的准确性会产生影响,使用 HHT 算法会消除变压器对行波幅值产生的影响,进而获得故障行波到达检测装置的准确时间提高定位精度。文献[8]提出了故障行波全波形与故障点位置一一对应的本质,定性分析了区域内故障与相邻区段故障行波波形时-频域相似性和差异性,利用波形特征匹配技术对混联输电线路进行准确故障定位。但方法的工作量较大。文献[9]提出了利用行波固有频率的混合线路测距方法,首先利用 EEMD 算法将检测到的行波信号分为若干个 IMF 分量,再利用 MUSIC 算法对 IMF 分量的固有频率进行提取,最后利用行波固有频率与故障位置的关系进行定位。文献[10]提出了一种故障电流信号与故障电压信号相结合的混合输电线路定位新方法,首先对故障电流信号进行 EMD 分解对故障位置初步定位,再利用故障电压信号进行验证。但行波在混合线路中折反射现象严重,对反射波波头的准确标定困难,对单端行波测距方法结果的准确性有较大影响。文献[11-12]提出了一种基于时间差值的混合线路定位方法,利用线路中不同位置的故障行波到达线路两端时间差值的对应关系进行故障定位。但方法的计算量较大。

针对上述问题在传统的双端测距方法上加以改进,为解决线路中不同波阻抗造成的行波传播速度不一致问题,提出一种基于时间线性拟合的行波故障定位方法。首先采用了归一化^[13-14]处理将不同波阻抗的线路转化为波阻抗相同的线路,保证行波的传输速度相同。其次在每一个架空与地缆线路的连接点处放置一个行波检测装置,使用小波变换法^[15-17]对故障行波的波头进行标定,得到故障行波到达时间。然后再利用这些故障行波到达时间与线路距离进行线性拟合^[18-19]得到故障的准确位置,方法与传统双端测距法相比较,其改善了行波速度在线路中由于衰减^[20]所带来的测距误差问题。最后通过实验验证了所提故障方法的准确性和可靠性。

2 行波传输原理

2.1 故障行波的产生

在传输线路中,由于电容的连续充放电而形成电场,产生电压波;传输线路中的电感形成磁场,产生电流波。传输线路中的电压波、电流波即为行波,其传输过程中,幅值和相位都在发生变化。行波在电力系统中被分为暂态行波和稳态行波两种状态,当传输网络处于断路、短路等状态产生的行波,则为暂态行波;当

传输网络处于正常运行状态产生的行波,则为稳态行波。可知行波信号产生的本质即传输线路中的故障点的电感电场与电容磁场转化形成,且由于行波信号是沿着电力线路传输的,其速度和变化是同步的,所以电压波和电流波的速度和变化也是同步的。

2.2 行波的折射与反射

当电力系统处于故障状态时,故障点产生的行波信号为暂态信号,该暂态行波信号沿着输电线路向线路两端传播,且在暂态行波信号传输过程中,会在波阻抗不同处以及故障点等处发生行波的折射和反射。行波故障定位就是需要得到行波在此传输线路中的传输特性,减弱故障行波在传输线路上因折射或反射带来的测距误差,分析故障行波到达行波检测装置的时间差来进行故障定位。图1为波阻抗不同的两条线路相连, A 为连接点。

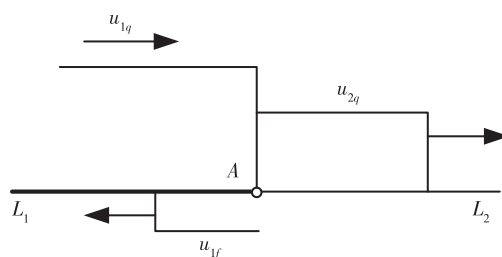


图1 行波在 A 点的折射与反射

Fig.1 The refraction and reflection of traveling wave at point A

由于 L_1 和 L_2 为不同的传输线路,其波阻抗也是不同的,在 A 点发生了行波的折射和反射。电压波 u_{1q} 沿着线路 L_1 传输到连接点 A,折射波 u_{2q} 沿着线路 L_2 传播,反射波 u_{1r} 从 A 点沿着 L_1 向后传输。故障行波将在多个地方以及故障点处形成多次的折反射,其折反射波过程比较复杂,一直折反射到故障行波衰减到趋近于零。

2.3 混合输电线路行波传播过程

地缆架空混合输电线路的行波故障定位与单一的传输线路相比存在许多不同之处,其波阻抗、行波的传输速度均不相同。在参数问题上,地缆架空混合线路的电抗值、波阻抗较于电缆线路较大,其输电线路每段特性不同。由于波阻抗的不连续性,故障点往往会产生多次的折反射,主要为架空线路与地缆线路的连接处,还需要识别故障点的反射波。波阻抗的不连续性还会导致不同的行波波速问题,传统的单端、双端行波测距法不能够直接用于地缆架空混合线路的故障定,因此需要对行波速度进行归一化处理。研究为消除波速及行波信号的衰减与畸变的影响,提出一种基于时间线性拟合的行波故障定位方法。

3 测距方法

3.1 故障区域判断

如图 2 所示, $E-F$ 为一段混合型传输线路, 将其分成三段区域, 其中 $E-K_1$ 、 K_2-F 为两段地缆-架空-地缆混合线路, K_1-K_2 为一段地缆传输线路。将故障发生区域划分为近端点故障区域与线路中间故障区域, 若发生故障时, 为快速进行故障定位, 则需要首先判断故障发生在近端点故障区域或线路中间故障区域。

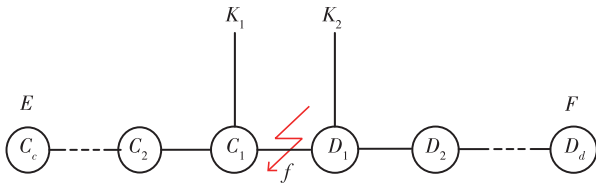


图 2 混合线路拓扑图

Fig. 2 Topology of mixed lines

假设故障点发生在 $E-F$ 区域, 当输电线路发生故障时, 其输电线路将产生故障行波, 同时故障点两端的波阻抗发生变化, 故障行波传播至故障点时将产生波的折射和反射。其故障行波传输到两端测点的时间为 t_E 、 t_F 。故障行波从 K_1 、 K_2 , 传输到两端测点的时间差为 Δt_{EK_1F} 、 Δt_{EK_2F} , 其表达式为

$$\begin{cases} \Delta t_{EK_1F} = t_{EK_1} - (t_{K_1K_2} + t_{K_2F}) \\ \Delta t_{EK_2F} = (t_{EK_1} + t_{K_1K_2}) - t_{K_2F} \end{cases}$$

故障行波达到两端测点的时间差 Δt_{EF} 为

$$\Delta t_{EF} = t_E - t_F$$

(1) 当故障发生在 $E-K_1$ 区域时, 此时故障行波从故障点传输到测点 E 的时间比从 K_1 传输到 E 的时间短, 此时 $\Delta t_{EF} < \Delta t_{EK_1F}$ 。

(2) 当故障发生在 K_1-K_2 区域时, 此时故障行波从故障点传输到测点 E 的时间比从 K_1 传输到 E 的时间长。此时 $\Delta t_{EK_1F} < \Delta t_{EF} < \Delta t_{EK_2F}$ 。

(3) 当故障发生在 K_2-F 区域时, 此时故障行波从故障点传输到测点 E 的时间比从 K_2 传输到 E 的时间长。此时 $\Delta t_{EF} > \Delta t_{EK_2F}$ 。

若故障发生在其他线路, 可同理判断。

3.2 归一化处理

在 n 段地缆架空混合输电线路中, 由于地缆输电线路与架空输电线路交替频繁, 导致行波的折反射特别复杂, 存在着 n 段阻抗不同的导线, 波速度在波阻抗不同的导线中是不同的。对于该问题, 提出一种波速度归一化的处理方法。此方法可以消除行波传输速度在不同输电线路中波速不一的问题。设行波在架空中的传输速度为 v , 在地缆线路中的传输速度为 v' 。再以

架空中的波速度 v 为归一时长度的基准, 对地缆线路 L 进行归一化处理, 令归一化后的长度为

$$L' = Lv' / v$$

3.3 线性拟合测距原理

3.3.1 行波检测装置放置及故障区域定义

设此 500 kV 地缆架空混合输电线路为 n 段地缆架空混合线路, 在每段连接处放置行波检测装置, 则一共需要放 $(n+1)$ 个检测装置。

由于在长距离混合输电线路中, 会导致暂态行波信号的衰减, 对故障定位会造成一定的误差, 影响测距精度。通过放置多个行波装置检测装置, 可以有效缩短故障点到检测装置的距离, 减小行波信号的衰减与畸变, 提高测距精度。

定义故障发生在近端点侧, 是指靠近传输线路左端及右端的两段线路, 此时可以得到线性拟合后较为准确的直线。而定义线路中间区域则为传输线路除近端点侧外的所有混合线路。设置两种故障区域, 分别对应两种不同的线性拟合测距原理, 可以快速准确进行相应的故障定位。

3.3.2 故障发生在线路中间

在归一化后的行波传输中, 行波到达记录点的时间与行波在这一段时间里所传输的距离关系是线性的, 其线性函数方程为 $Y = aX + b$ 。根据线性方程原理可得到其行波传输的线性拟合方程, 再根据故障特征, 可进行准确的故障定位。

$C_c D_d$ 是一段地缆架空混合输电线路, 以故障发生在 $C_1 D_1$ 为例, 如图 3 所示, 以变电站 C_1 为基准, 将此传输网络定义为 h, f 为故障点, 若 h 在故障点 f 左侧, $h = C_i (i = 1, 2, \dots, c)$; 若 h 在故障点 f 右侧, $h = D_i (i = 1, 2, \dots, d)$ 。

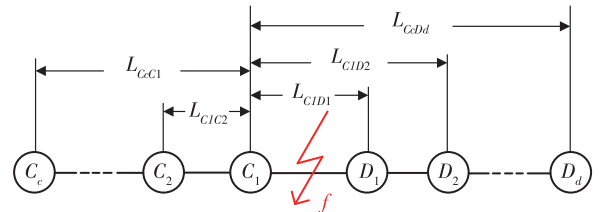


图 3 传输网络最短路径拓扑图

Fig. 3 Topology structure of the shortest path of the transmission network

对于在故障点 f 左侧任意的变电站 h , 都会有:

$$l_{C_1 h} = v(t_h - t_{C_1}) = vt_h - vt_{C_1} \quad (1)$$

其中, v 为行波在归一化后的网络中的传输速度, $l_{C_1 h}$ 为 C_1 到任意变电站 h 的最短距离, t_h 为任意变电站测得的行波首次达到的初始时间, t_{C_1} 为行波首次达到记录

点 C_1 的初始时间。

同理,对于在故障点 f 右侧任意的变电站 h ,都会有:

$$l_{C_1 h} = v(t_h - t_{D_1}) + l_{C_1 D_1} = vt_h - vt_{D_1} + l_{C_1 D_1} \quad (2)$$

其中, t_{D_1} 为行波首次到达记录点 D_1 的时间, $l_{C_1 D_1}$ 为记录点 C_1 经过故障点 f 到记录点 D_1 的距离。根据式(1)和式(2),可以得到其拟合的线性回归方程。可以设 $Y = l_{C_1 h}$, $X = t_h$ 。由式(1)可知, $Y = a_1 X + b_1$, 其中 $a_1 = v$, $b_1 = -vt_{C_1}$ 。由式(2)可知, $Y = a_2 X + b_2$, 其中 $a_2 = v$, $b_2 = l_{C_1 D_1} - vt_{D_1}$ 。上述公式可知:在归一化后波阻抗相同的传输网络中,行波传输速度 v 理论上是相同的,即 a_1 与 a_2 是相等的。但是由于 a_1 和 a_2 属于线性拟合关系,两组数据拟合出来的两条直线其斜率近似相等,因此 a_1 与 a_2 是存在略微差距的。根据线性回归原理,可由 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 来求得的最小值为

$$\begin{cases} E(a_1, b_1) = \sum_{i=1}^c (l_{C_1 h(i)} - a_1 - b_1 t_{h(i)})^2 \\ E(a_2, b_2) = \sum_{j=1}^d (l_{C_1 h(j)} - a_2 - b_2 t_{h(j)})^2 \end{cases}$$

式(1)中, a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 需要满足其 $h(i) = C_i (i=1, 2, \dots, c)$ 、 $h(j) = D_j (j=1, 2, \dots, d)$ 从最小值到最大值。

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^c (l_{C_1 h(i)} - a_1 - b_1 t_{h(i)}) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b_1} = -2 \sum_{i=1}^c (l_{C_1 h(i)} - a_1 - b_1 t_{h(i)}) t_{h(i)} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial a_2} = -2 \sum_{j=1}^d (l_{C_1 h(j)} - a_2 - b_2 t_{h(j)}) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b_2} = -2 \sum_{j=1}^d (l_{C_1 h(j)} - a_2 - b_2 t_{h(j)}) t_{h(j)} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)、式(4)简化,可得到 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 的值为

$$\begin{cases} a_1 = \frac{\sum_{i=1}^c l_{C_1 h(i)} - b_1 \sum_{i=1}^c t_{h(i)}}{c} \\ b_1 = \frac{c \sum_{i=1}^c l_{C_1 h(i)} t_{h(i)} - \sum_{i=1}^c l_{C_1 h(i)} \sum_{i=1}^c t_{h(i)}}{c \sum_{i=1}^c t_{h(i)}^2 - (\sum_{i=1}^c t_{h(i)})^2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} a_2 = \frac{\sum_{j=1}^d l_{C_1 h(j)} - b_2 \sum_{j=1}^d t_{h(j)}}{d} \\ b_2 = \frac{d \sum_{j=1}^d l_{C_1 h(j)} t_{h(j)} - \sum_{j=1}^d l_{C_1 h(j)} \sum_{j=1}^d t_{h(j)}}{d \sum_{j=1}^d t_{h(j)}^2 - (\sum_{j=1}^d t_{h(j)})^2} \end{cases} \quad (6)$$

根据线性回归方程 1: $Y = a_1 X + b_1$ 和线性回归方程 2: $Y = a_2 X + b_2$, 可以得到两条平行的线, 如图 4 所示。

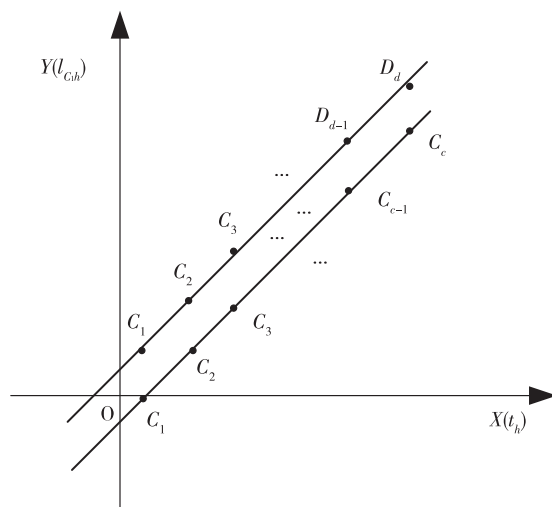


图 4 故障行波的线性拟合图

Fig. 4 Linear fitting diagram of fault traveling wave

图 4 中,把线性回归方程 1: $Y = a_1 X + b_1$ 中的斜率 $a_1 = v$ 更改为 $a_1 = -v$, 其截距 $b_1 = -vt_{C_1}$ 更改为 $b_1 = +vt_{C_1}$ 。则更改后的线性回归方程 1: $Y = a_1 X + b_1$ 会与原线性回归方程 2: $Y = a_2 X + b_2$ 有且只有一个交点。因为在该传输网络中,行波的传输方向是相反的,线性回归方程 1: $Y = a_1 X + b_1$ 是负方向的拟合直线,线性回归方程 2: $Y = a_2 X + b_2$ 是正方向的拟合直线,所以其唯一交点即为故障点 f , 如图 5 所示。其交点的纵坐标的截距即为故障点 f 到任意变电站 h 的距离。

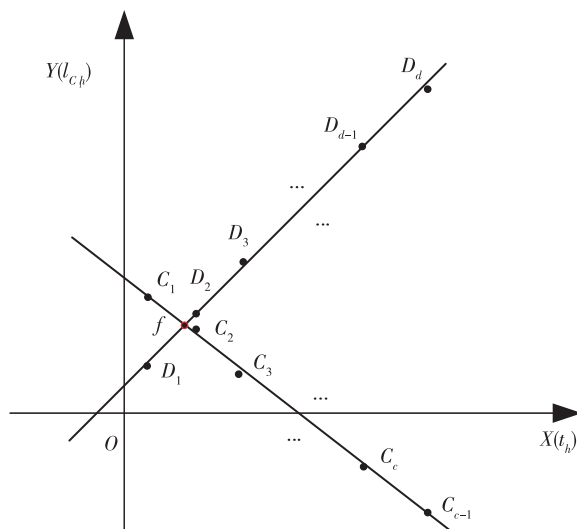


图 5 故障定位的线性拟合图

Fig. 5 Linear fitting diagram of fault location

其两条线性拟合的直线交点的纵坐标的值即为故障点 f 到 C_1 的故障距离, 交点坐标由式(7)求解可得:

$$\begin{cases} Y = -a_1 x - b_1 \\ Y = a_2 x + b_2 \end{cases} \quad (7)$$

a_1, a_2, b_1, b_2 的值可以通过式(5)和式(6)算得,即得到准确的故障距离:

$$l_{c,f} = Y_f = \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{a_1 + a_2} \quad (8)$$

通过上述方法,即可以实现对故障距离的精确测定,也可以消除由于行波速度带来的误差,实现对故障的精准定位。且不需要复杂的计算即可得到准确的故障位置,可以在实际应用中实现。

3.3.3 故障发生在近端点

若近端点发生故障,其拓扑结构如图 6 所示。 $C_c D_d$ 是一段地缆架空混合输电线路, f 为故障点,故障发生在 $C_c C_{c-1}$ 之间,属于近端点故障区域。此时根据行波所测得的时间只能得到一条拟合直线。不能如故障发生在中间时,通过两条线性拟合直线相交的交点来判断故障距离,其近端点故障时的线性拟合如图 7 所示。

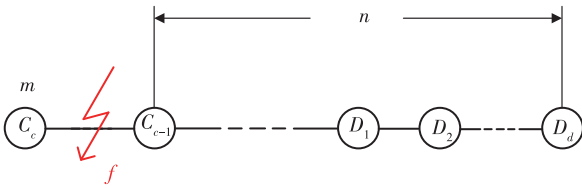


图 6 近端点发生故障时的拓扑图

Fig. 6 Topology diagram when faults occur at the near-end points

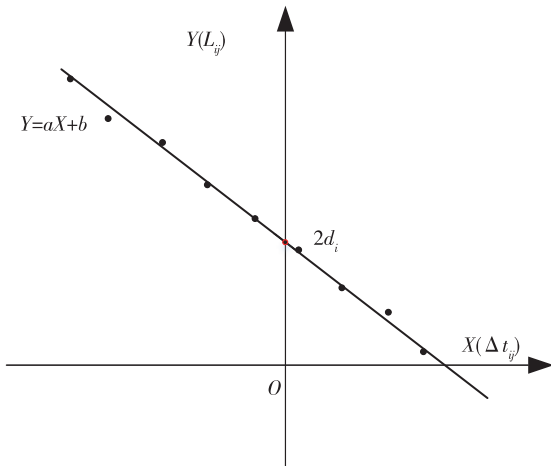


图 7 近端点故障时行波的线性拟合图

Fig. 7 Linear fitting diagram of traveling wave faults occur at the near-end points

图 7 是故障发生在 m, n 之间的线性拟合图,此时故障点距离测点 m 的距离为

$$l_{mn} = 2d_m - v\Delta t_{mn} \quad (9)$$

其中, v 是行波的传输速度, d_m 为线性拟合后的直线与纵坐标的截距, Δt_{mn} 为行波到测点 m, n 的到达时间之差。 l_{mn} 是点 m, n 经过故障点的最短路径。

3.4 流程图

方法流程图如图 8 所示:

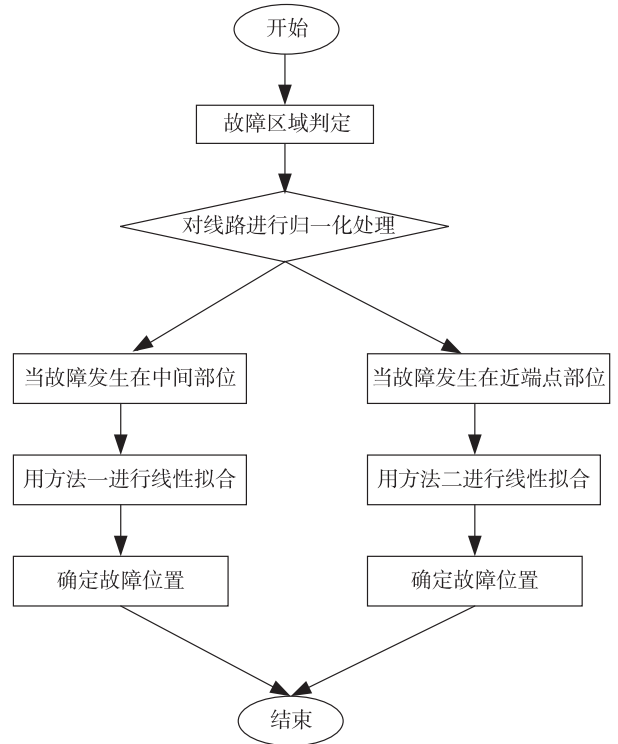


图 8 故障定位的流程图

Fig. 8 Flowchart for locating a fault

步骤 1 根据故障产生的行波到达各行波检测装置的时间差,判断故障发生区域,故障发生在近端点区域或线路中间。

步骤 2 对此地缆架空混合线路进行归一化处理,将不同波阻抗导致波速不同的输电线路归算到同一基准的行波速度。

步骤 3 若判断故障发生在中间部位,采用方法 1 对两条线性拟合直线进行相交,交点处即为故障位置所在,采用逆归一化,再将故障位置在原输电线路中确定。若判断故障发生在近端点部位,采用方法 2 可得到一条线性拟合直线,其与纵坐标的截距通过式(10)可得到其故障距离,采用逆归一化,再将故障位置在原输电线路中确定。以实现准确可靠快速故障定位。

4 实验验证与仿真分析

4.1 仿真模型的搭建

为了验证提出的方法,在 MATLAB/Sim ulink 中搭建 500 kV 混合输电线路仿真模型,为使行波波头标定更为精准,设置采样频率为 10 MHz,故障类型为最常见的单相接地故障,故障发生时间为 0.036 s,故障持续时间为 0.004 s,仿真时长 0.05 s。仿真模型的原理图如图 9 所示。

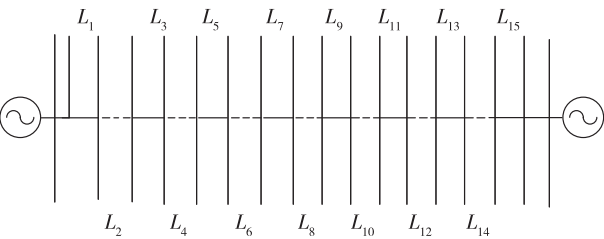


图 9 500 kV 输电网络仿真拓扑模型

Fig. 9 Simulation topology model for the 500 kV transmission network

该仿真模型由电缆线路交替连接组成,共有 15 段不同的波阻抗传输线路,模型中电缆和架空线路的各段的实际长度和归一化后的长度如表 1 所示,电缆和架空线路参数由表 2 所示。

表 1 地缆架空线路长度及其归一化后的长度
Table 1 Length of ground-overhead line and its normalized length

L/km	线路类别	实际长度/km	归一化后长度/km
L_1	架空 1	12	12
L_2	地缆 1	21	35.7
L_3	架空 2	14	14
L_4	地缆 2	26	44.197
L_5	架空 3	8	8
L_6	地缆 3	17	28.898
L_7	架空 4	21	21
L_8	地缆 4	34	57.797
L_9	架空 5	15	15
L_{10}	地缆 5	27	45.897
L_{11}	架空 6	22	22
L_{12}	地缆 6	15	25.499
L_{13}	架空 7	30	30
L_{14}	地缆 7	22	37.378
L_{15}	架空 8	16	16

表 2 地缆架空线路参数
Table 2 Parameters of ground-overhead line

参数名称	架空线段	电缆段
$R_1/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.034 68	0.024 1
$L_1/(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	1.347 7	0.516 3
$C_1/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	0.008 67	0.065 4
$R_0/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.3	0.196 4
$L_0/(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$	3.637	0.397 2
$C_0/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	0.006 16	0.317 1

4.2 故障发生在线路中间部位

将故障设置(A相单相接地故障)在距离C端131 km处,通过故障区域判断,即处于电缆线路 L_8 上,距 L_8 线路左端点12 km处。此时故障发生在线路中间,部分行波检测装置故障线模暂态电压及小波变换

图型如图 10 所示。

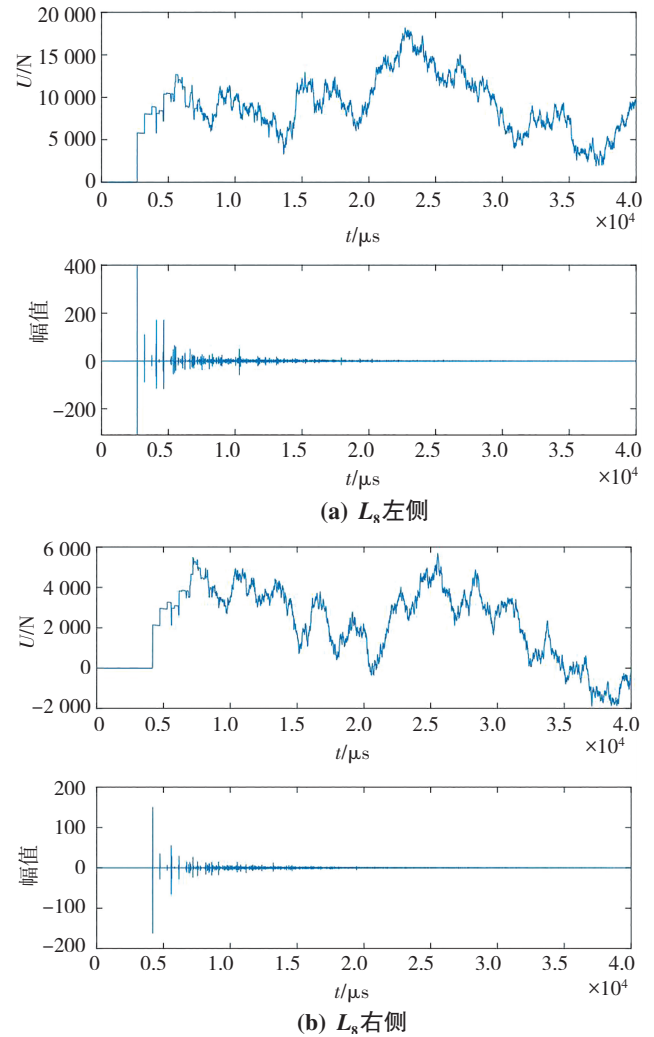


图 10 L_8 检测装置的暂态电压及小波变换图

Fig. 10 Transient voltages and wavelet transform patterns of L_8 detection device

从图 10 中可以看出,暂态电压过程十分明显,经小波变换后能准确得到初始行波到达时间。各行波检测装置检测的初始行波到达时间如表 3 所示。

表 3 故障发生在中间时初始行波到达时间

Table 3 Time of arrival of the initial wave when the fault occurs in the middle part of the line

NDS	$t/\mu\text{s}$	PDS	$t/\mu\text{s}$
C_1	69.8	D_1	127.8
C_2	1 416	D_2	179.2
C_3	240.4	D_3	336.2
C_4	267.8	D_4	411.4
C_5	418.8	D_5	498.6
C_6	466.8	D_6	601.2
C_7	588.8	D_7	729.0
C_8	629.8	D_8	783.6

由式(1)和式(2)进行拟合得到式(10):

$$\begin{cases} Y_1 = -0.292\,488X - 20.419 \\ Y_2 = 0.292\,463X + 20.375 \end{cases} \quad (10)$$

根据式(9)得: $l_{clf} = 20.379\text{ km}$,此长度为归一化后的长度,通过逆归一化再折算回实际距离为 $l_{clf} = 11.988\text{ km}$,其测定的故障位置与实际故障位置相差 12 m ,误差较小,符合实际工程需要。将式(10)进行绘图,得到图 11。从图 11 中可以看出两条线性拟合直线的交点纵坐标为 20.397 km ,与计算出的数值基本相吻合。

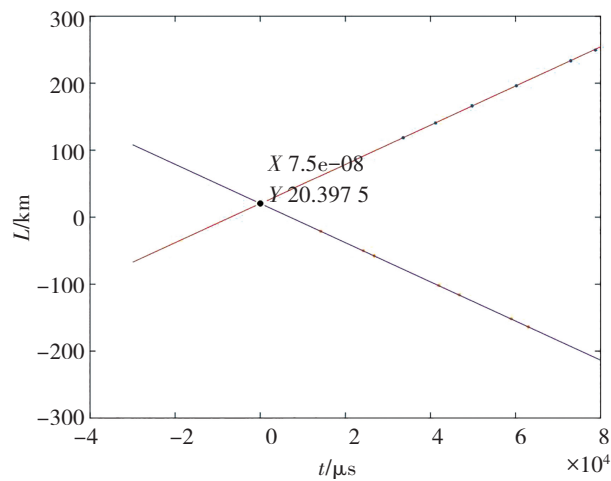


图 11 中间发生故障时的线性拟合图
Fig. 11 The linear fitting pattern of sampling points when the intermediate fault occurs

4.3 故障发生在线路近端点部位

将故障设置在距离 C 端 3 km 处,通过故障区域判断,此时为近端点侧发生故障,部分行波检测装置暂态电压及小波变换图形如图 12 所示。

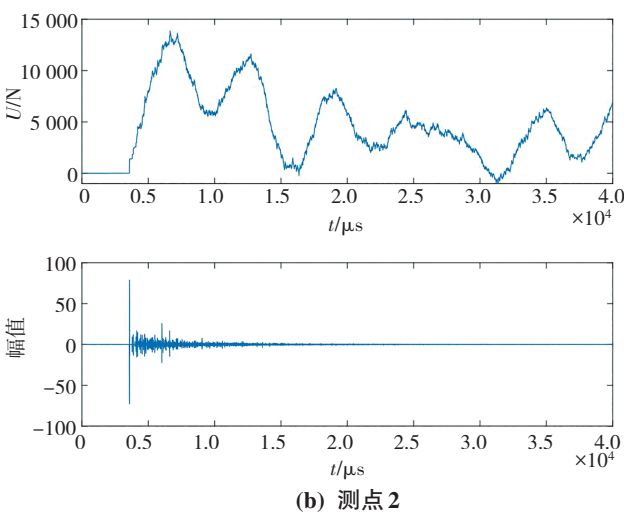
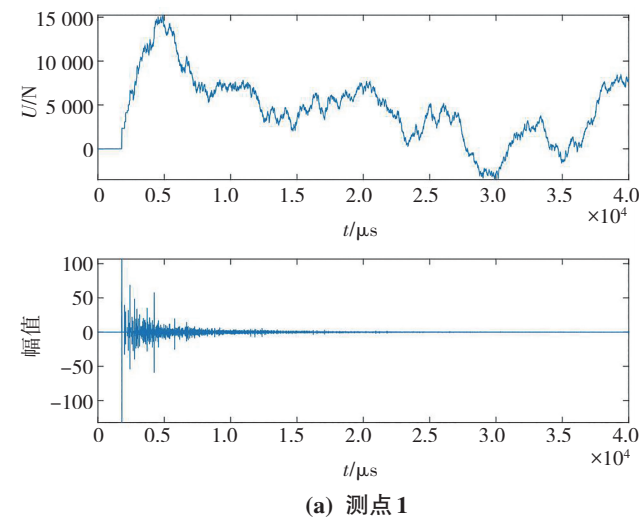


图 12 线路近端检测装置的暂态电压及小波变换图
Fig. 12 Transient voltages and wavelet transform pattern of the detection device at the near end of the line
故障发生在近端点时,各行波检测装置的初始行波到达时间如表 4 所示。

表 4 故障发生在近端点时初始行波到达时间
Table 4 Time of arrival of the initial traveling wave when the fault occurs at the near-end point

测 点	$t/\mu\text{s}$	测 点	$t/\mu\text{s}$
C_1	30.8	D_1	727.2
C_2	10.4	D_2	778.2
C_3	132.4	D_3	934.8
C_4	180.2	D_4	1 010.0
C_5	331.4	D_5	1 097.4
C_6	358.8	D_6	1 200.0
C_7	457.6	D_7	1 327.8
C_8	529.4	D_8	1 382.8

根据表 4 的所测的各行波检测装置的初始行波到达时间结合式(7)得到一条线性拟合直线为 $Y_3 = -0.292\,515X + 17.970$,将 Y_3 进行绘图,可得到端点发生故障时的线性拟合图形图 13。

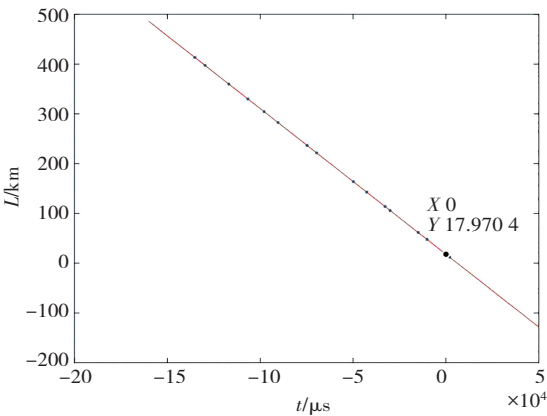


图 13 端点发生故障时的线性拟合图
Fig. 13 The linear fitting pattern of sampling points when the endpoint fails

结合 Y_3 与图 13 得出此故障距离 C 端 8.985 km。此时故障处于线路 L_1 中, L_1 中行波传输速度为归一化中的基准,无须再进行逆归一化处理,其测定的故障距离与实际故障距离相差 15 m,误差较小,符合实际工程需要。

当故障发生在线路中其他位置时的定位结果如表 5 所示。

表 5 不同故障点的定位结果

Table 5 Location results for different points of failure

故障设置			故障定位		
故障类型	故障区域	故障距 C 端距离/km	故障区域	故障距 C 端距离/km	误差/m
$A-g$	L_1	10	L_1	9.980	20
$A-g$	L_2	20	L_2	20.023	23
$A-g$	L_6	90	L_6	89.983	17
$A-g$	L_8	130	L_8	129.862	38
$A-g$	L_9	160	L_9	160.031	31

从不同故障点的定位结果看,采用的方法误差最小为 17 m,误差最大为 38 m,绝对值误差在 50 m 以内,不受故障点及故障区域不同的影响,精度较高。且在故障区域分界点附近时,也能取得较为满意的定位结果。

5 结 论

在将不同波阻抗线路归一化处理的基础上,首先对故障区域进行判断,确定故障所在的区域,其次再将不同波阻抗线路进行归一化处理,减少因波速不同而产生的测距误差,最后使用时间线性拟合的方法对故障进行精确定位。采用时间线性拟合的方法改善了因行波速度带来的测距误差问题,准确判断了故障发生的位置。解决了初始行波波头识别困难的问题,也减小了行波速度随传输距离变化而变化带来的测距误差问题。并讨论了故障发生在近端点和故障发生在中间时的两种情况。仅需把数据和行波到达的时间经公式拟合后的直线,根据其纵坐标的截距即可得到相应的故障定位,若故障发生在地缆传输段,还需折算其真实距离,方法简单,准确性较高。在 MATLAB/Simulink 中搭建一个 500 kV 的地缆架空混合输电线路仿真模型,对线路中不同位置发生故障,以及不同故障电阻等因素对时间线性拟合的行波故障定位方法影响进行验证。实验的验证结果表明此故障定位方法能够有效地解决因行波速度不同而导致的双端行波测距方法不适用问题,最终实现对故障点的精确定位。

参考文献(References):

[1] 王召磊,刘明光. 基于线性方程组解的 T 型线路行波测距[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1046—1050.
WANG Zhao-lei, LIU Ming-guang. Traveling wave distance measurement of T-type transmission line based on linear equation set solution[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 1046—1050.

[2] 王奎鑫,祝成,孙佳佳,等输电线路组合行波测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 82—86.
WANG Kui-xin, ZHU Cheng, SUN Jia-jia, et al. Study on combined traveling wave fault location method for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 82—86.

[3] 李一峰,陈平. 行波故障测距及其应用[J]. 现代电力, 2008, 92(1): 44—48.
LI Yi-feng, CHEN Ping. Traveling wave fault location and its application[J]. Modern Electric Power, 2008, 92(1): 44—48.

[4] 戴志辉,王旭. 基于改进阻抗法的有源配电网故障测距算法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 2027—2034.
DAI Zhi-hui, WANG Xu. Active distribution network fault location algorithm based on improved impedance method[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 2027—2034.

[5] 王宾,董新洲,薄志谦,等. 特高压长线路单端阻抗法单相接地故障测距[J]. 电力系统自动化, 2008(14): 25—29.
WANG Bin, DONG Xin-zhou, BO Zhi-qian, et al. Single phase ground fault location using single terminal impedance method for ultra-high voltage long lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008(14): 25—29.

[6] 卢继平,黎颖,李健,等. 行波法与阻抗法结合的综合单端故障测距新方法[J]. 电力系统自动化, 2007, (23): 65—69.
LU Ji-ping, LI Ying, LI Jian, et al. A new comprehensive single terminal fault location method based on traveling wave method and impedance method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007(23): 65—69.

[7] 孔垂祥,杨岸,祝龙记. 基于小波变换的双端输电线路行波故障定位[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2019, 36(5): 31—36.
KONG Chui-xiang, YANG An, ZHU Long-ji. Traveling wave fault location of double-ended transmission lines based on wavelet transform[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2019, 36(5): 31—36.

[8] 邓丰,李欣然,曾祥君. 基于全波形信息的混联线路单端行波定位方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3471—3485.

- DENG Feng, LI Xin-ran, ZENG Xiang-jun. Single-end traveling wave location method for hybrid lines based on full waveform information[J]. Journal of Electrical Technology, 2018, 33(15): 3471—3485.
- [9] 黄忠棋. 采用行波固有频率的混合线路故障测距新方法[J]. 电力系统及其自动化报, 2015, 27(11): 73—79.
- HUANG Zhong-qi. A new method of hybrid line fault location using traveling wave natural frequency[J]. Power System and Automation News, 2015, 27(11): 73—79.
- [10] 李雪云, 刘青, 李丽英. 基于单端行波法的配电网混合线路波头组合式故障测距方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(5): 55—61.
- LI Xue-yun, LIU Qing, LI Li-ying. Wave-head combined fault location method for distribution network hybrid lines based on single-terminal traveling wave method[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2014, 41(5): 55—61.
- [11] 刘顺桂, 李勋, 张宏钊, 等. 一种采用时间判别法的混合线路故障行波定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 41—46.
- LIU Shun-gui, LI Xun, ZHANG Hong-zhao, et al. A hybrid line fault traveling wave location method using time discrimination[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 41—46.
- [12] 田行军, 邢志杰, 雷云涛, 等. 10 kV 自闭贯通线分段时间差值法行波故障测距[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(12): 130—136.
- TIAN Xing-jun, XING Zhi-jie, LEI Yun-tao, et al. Traveling wave fault location using segmented time difference method for 10 kV self-closing through line[J]. Journal of Power System and Automation, 2019, 31(12): 130—136.
- [13] 于玉泽, 覃剑, 李功新, 等. 电缆-架空线混合线路故障测距方法综述[J]. 电网技术, 2006(17): 64—69.
- YU Yuze, QIN Jian, LI Gong-xin, et al. Overview of fault location methods for hybrid cable overhead lines[J]. Power System Technology, 2006(17): 64—69.
- [14] 徐善琛, 张建文, 王刚, 等. 基于波速度归一方法的电缆架空线路双端行波测距研究[C]//第十八届全国煤矿自动化学术年会中国煤炭学会自动化专业委员会学术会议论文集., 2008.
- XU Shan-chen, ZHANG Jian-wen, WANG Gang, et al. Study on double ended traveling wave distance measurement of overhead cable lines based on wave velocity normalization [C]//Proceedings of the 18th National Coal Mine Automation Annual Conference of the Automation Professional Committee of China Coal Society, 2008.
- [15] 吴承阳, 王玲桃. 基于平稳小波变换的输电线路故障测距[J]. 电气自动化, 2022, 44(3): 100—102.
- WU Cheng-yang, WANG Ling-tao. Transmission line fault location based on stationary wavelet transform[J]. Electrical Automation, 2022, 44(3): 100—102.
- [16] 陶彩霞, 杜雪, 高锋阳, 等. 基于经验小波变换的混合输电线路单相接地故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 105—112.
- TAO Cai-xia, DU Xue, GAO Feng-yang, et al. Fault location for single-phase grounding of hybrid transmission lines based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 105—112.
- [17] 付华, 刘公权, 邢亮. 基于同步挤压小波变换的故障行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 18—24.
- FU Hua, LIU Gong-quan, XING Liang. Fault traveling wave location method based on synchronous squeeze wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 18—24.
- [18] 杜嫣然, 杨帆, 王颖, 等. 基于数据拟合的配电网线性运行约束建模方法[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(3): 242—250.
- DU Yan-ran, YANG Fan, WANG Ying, et al. Modeling method for distribution network linear operation constraints based on data fitting [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 242—250.
- [19] 余坤, 曾菊鹏, 曾祥军, 等. 一种基于有向树模型和线性拟合的输电网络行波故障定位新方法[J]. IEEE Access, 2020, 8(8): 610—625.
- YU Kun, ZENG Ju-peng, ZENG Xiang-jun, et al. A novel traveling wave fault location method for transmission network based on directed tree model and linear fitting[J]. IEEE Access, 2020, 8(8): 122610—122625.
- [20] 梁睿, 王全金, 孔令昌, 等. 考虑行波波速衰减及波头时间误差的复杂输电网络故障精准定位[J/OL]. 电网技术: 1—14 [2022-11-17].
- LIANG Rui, WANG Quan-jin, KONG Ling-chang, et al. Accurate fault location of complex transmission network considering traveling wave velocity attenuation and wave head time error[J/OL]. Power System Technology: 1—14[2022-11-17].