

基于反射系数修正与局部能量提取的 电缆故障在线定位方法

朱光亚, 潘松焜, 沈青, 饶丛笑, 唐昕宇, 孟鹏飞, 周凯*

(四川大学电气工程学院, 四川省 成都市 610065)

Online Cable Fault Location Based on Reflection Coefficient Modification and Local Energy Extraction

ZHU Guangya, PAN Songkun, SHEN Qing, RAO Congxiao, TANG Xinyu, MENG Pengfei, ZHOU Kai*

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: The electromagnetic time-reversal (EMTR) location method enables real-time online cable fault location. However, due to the influence of the insulation defect evolution and the unknown fault resistance, the traditional EMTR method often suffers from low location accuracy. To address this issue, this paper proposes a cable fault location method based on reflection coefficient modification and local energy extraction during the time-reversal process. First, based on the time-domain propagation characteristics of fault traveling waves, the paper thoroughly investigates the underlying mechanisms by which fault resistance affects EMTR location accuracy, specifically how the reflection coefficient magnitude influences the energy of the backward-time process in traditional EMTR methods. To address the impact of fault resistance on EMTR location accuracy, a special fault resistance model is constructed in the backward-time EMTR process to modify the reflection coefficient. Additionally, a location criterion based on the local energy at the initial traveling wave is proposed. To validate the accuracy of the proposed method, both practical cable tests and simulations are conducted. The results demonstrate that the proposed method is robust under various fault resistances and cable operating conditions. Compared with the traditional EMTR method, the proposed method reduces the location error from 40 m to within 10 m in a 300 m medium voltage cable, significantly improving the location accuracy of the EMTR method.

KEY WORDS: cable fault location; electromagnetic time reversal; online location; fault resistance; reflection coefficient

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5400-202318550A-3-2-ZN)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5400-202318550A-3-2-ZN).

摘要: 电磁时间反演(electromagnetic time-reversal, EMTR)定位方法能够实时在线地定位电缆故障。然而,由于受到绝缘缺陷发展演变过程影响,故障电阻未知,传统EMTR方法定位精度不高。该文提出一种基于时间反演过程中反射系数修正与局部能量提取的电缆故障定位方法。首先,基于故障行波的时域传播特性,详细探究故障电阻影响EMTR定位精度的深入原因,即反射系数幅值影响传统EMTR方法反向阶段结果的能量;为解决EMTR定位效果受故障电阻影响的问题,在EMTR的反向阶段中构建特殊故障电阻对反射系数进行修正,并提出利用首个行波处的局部能量进行定位的判据;为验证所提方法的定位准确性,采用实际电缆试验测试与仿真验证相结合的方法。结果表明,所提出的方法在不同故障电阻情况下及不同电缆运行条件下均具有鲁棒性。与传统EMTR方法对比,在300 m中压电缆中,所提方法将定位误差从40 m降低至10 m以内,显著提高EMTR方法的定位精度。

关键词: 电缆故障定位; 电磁时间反演; 在线定位; 故障电阻; 反射系数

0 引言

电力电缆广泛用于城市配电网,是连接输电网与用户终端的关键设备^[1-4]。配网电缆运行过程中无法避免地会受到电、热、机械力及环境应力的影响而产生故障,造成停电事故和经济损失。因此,快速准确地定位电缆故障对保障配电网的安全可靠运行具有重要意义^[5-6]。

电缆故障定位方法主要可分为离线和在线两类^[7]。离线定位方法需要首先将在运电缆停运,在线定位方法可在电缆运行时实现定位,避免停电带来的经济损失。电缆在线故障定位方法主要有:阻抗法、行波法及人工智能算法。阻抗法^[8-9]主要利用

故障信号中的低频成分，求解电缆的集总参数等值电路实现定位，但该类方法容易受故障过渡电阻及测量装置同步误差的影响。行波法^[10-11]主要基于故障位置处的反射特性，通过计算行波到达的时间差实现定位。然而，为精确识别行波波头到达的时间，需要引入复杂的算法来处理行波数据。人工智能方法^[12-13]基于所测量得到的数据，通过优化算法来实现定位，但该类方法的实现依赖于庞大的数据量，在工程实际应用中受到限制。

目前，大量学者提出基于电磁时间反演 (electromagnetic time reversal, EMTR) 的方法对电缆故障进行在线定位^[14-16]，该方法不依赖于行波到达时间，无需对行波进行复杂处理，仅需将行波反演后重新注入网络便可实现定位。

EMTR 方法主要包含两个步骤，即正向阶段和反向阶段，两个阶段的网络模型相似度会极大程度影响定位结果的准确性。EMTR 方法早期广泛用于电缆的局部放电定位，其在反向阶段的网络模型中无需考虑局放源处的故障电阻^[17-18]，因此 EMTR 方法在局放定位中呈现优异的定位精度。然而，在利用 EMTR 方法对电缆接地故障进行定位过程中，由于故障电阻未知，反向阶段的网络拓扑只能依靠猜测的故障电阻进行构建，导致传统 EMTR 方法的故障定位误差明显。Razzaghi 等^[19]提出在 EMTR 定位过程中，利用故障电流能量最大值来定位电缆接地故障，实现在一定范围的故障电阻条件下的精确定位，但随着故障电阻增大，定位误差显著^[20]；孙健^[21]提出一种基于分布式电压感知的 EMTR 方法，解决故障电阻导致的定位误差，然而该方法需要双端信号的同步注入，同步误差会极大影响定位效果；杨庆等^[22]提出一种基于固有频率与 EMTR 结合的定位方法，一定程度上降低故障电阻对定位精度的影响；文献[23]提出一种基于反射系数修正的 EMTR 方法，采用传递函数计算的方式替代反向阶段的仿真计算，消除故障电阻对 EMTR 定位精度的影响，但针对实际配网中存在分支的复杂电缆网络，传递函数难以直接推导得到的，故而该方法难以在实际工程上应用。

综上，目前国内外学者普遍认为故障电阻会导致 EMTR 故障定位结果产生偏差，但对于故障电阻是如何影响 EMTR 定位精度的原因尚未可知。因此，本文在深入探究故障电阻对 EMTR 定位精度的影响机理，并从时域角度分析定位误差产生原因的

基础上，提出基于反射系数修正与局部能量提取的电缆时间反演定位方法，解决 EMTR 定位效果受故障电阻影响的问题。

1 基于 EMTR 方法的电缆故障定位原理

EMTR 方法实现故障定位主要包含两个过程，分别为采集信号的正向阶段以及注入信号的反向阶段^[22]。

1.1 正向阶段

针对一条总长为 l 的电缆线路，若距离电缆首端 l_F 位置处发生接地故障，故障电阻为 R_F ，首端测试得到的故障行波信号 U_1 可表示为

$$U_1(f) = H(f, l_F, R_F) U_0(f) \quad (1)$$

式中： f 为频率； $U_0(f)$ 为故障发生时故障点位置产生的初始行波； $U_1(f)$ 为电缆首端测量得到的行波信号，行波在传输线上的传递过程以传递函数 $H(f, l_F, R_F)$ 表示。传递函数 H 与故障距离 l_F 及故障电阻 R_F 的取值有关。

1.2 反向阶段

正向阶段完成后，在反向阶段中，需要将测量得到的行波信号 U_1 进行时间反演处理，即在时域中令 $t \rightarrow -t$ ，频域中等效为共轭处理。接着将反演后的信号注入构建的电缆线路中。对于信号的注入位置有两种选择，分别为在测量位置即线路首端^[22]及故障点位置注入^[17-18]，本文采用故障点位置注入的方式进行定位。

反向阶段进行信号注入的电缆线路等值电路需要人为进行构建，因此需要首先猜测故障位置 $x(0 < x < l)$ 以及故障电阻 R_G 。将反演后信号由猜测故障位置 x 处注入， x 处设置故障电阻 R_G ，此时在电缆首端测试得到的行波信号 U_2 为

$$U_2(f, x, R_G) = H(f, x, R_G) \overline{U_1(f)} = H(f, x, R_G) \overline{H(f, l_F, R_F) U_0(f)} \quad (2)$$

式中 $\overline{U_1(f)}$ 表示对函数 $U_1(f)$ 进行共轭处理，将式(2)转换为时域，可得：

$$U_2(t, x, R_G) = H(t, x, R_G) * U_1(-t) = H(t, x, R_G) * H(-t, l_F, R_F) * U_0(-t) \quad (3)$$

式中： $*$ 表示卷积运算； $H(t, x, R_G) * H(-t, x, R_G)$ 为正反向阶段传递函数的相关函数。 U_2 信号的能量取决于二者的自相关程度^[24]。在猜测故障电阻 R_G 与实际故障电阻 R_F 相等时，能够在 $x=l_F$ 位置处取得具有最大能量的信号，这是行波信号经过时间反演后发

生时空聚焦的主要原因。

2 基于反演过程中反射系数修正与局部能量提取的电缆故障在线定位方法

2.1 故障电阻对 EMTR 定位的影响

由1节分析可知, EMTR 方法实现准确定位的关键在于当 $x=l_F$ 时正反向阶段传递函数的自相关程度。在电缆线路结构已知的情况下, 只有猜测故障电阻 R_G 会影响二者的自相关程度。

考虑一条长度为 l 的电缆线路, 电缆特性阻抗为 Z_C , 两端连接变压器, 变压器在高频条件下表现为高阻抗, 即 $Z_1=Z_2=100\text{ k}\Omega$ ^[22]。假设距离首端 l_F 处发生金属性接地故障, 故障电阻 $R_F \approx 0\ \Omega$ 。如图1所示。

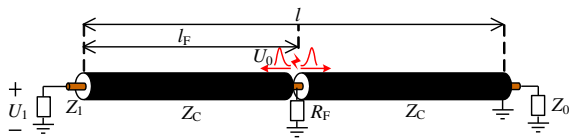


图1 电缆故障示意图

Fig. 1 Diagram of cable fault

将初始行波视为输入, 首端测量得到的行波为输出, 根据传输线理论^[22], 此时传递函数为

$$H(f, l_F, 0) = \sum_{i=0}^n e^{-(2i+1)\gamma l_F} \rho_1^i \rho_F^i (1 + \rho_1) = \frac{e^{-\gamma l_F} (1 + \rho_1)}{1 - e^{-2\gamma l_F} \rho_1 \rho_F} \quad (4)$$

式中 γ 为传播系数, 可由电缆的分布参数 R 、电感 L 、电导 G 和电容 C 求出, 具体表达式为

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (5)$$

式中: $\omega = 2\pi f$; α 、 β 分别为 γ 的实部与虚部, $\beta = 2\pi f \sqrt{LC}$ ^[7]。

式(4)中 ρ_1 、 ρ_F 为电缆首端和故障点处的反射系数, 计算式为:

$$\rho_1 = \frac{Z_1 - Z_C}{Z_1 + Z_C} = 1 \quad (6)$$

$$\rho_F = \frac{Z_C // R_F - Z_C}{Z_C // R_F + Z_C} = -1 \quad (7)$$

由式(4)可得, 传递函数在频域中的形式为等比数列的和, 公比为

$$q(l_F) = \rho_1 \rho_F e^{-2\alpha l_F} e^{-j2\beta l_F} = -e^{-2\alpha l_F} e^{-j2\beta l_F} \quad (8)$$

由式(8)可得, 公比将会导致等比数列中相邻两项发生幅度为 $-e^{-2\alpha l_F}$ 的衰减, 并且发生 $e^{-j2\beta l_F}$ 的相移, 结合 $\beta = 2\pi f \sqrt{LC}$, 相移将引起时域中发生 $2l_F \sqrt{LC}$ 的时移。因此传递函数 $H(f, l_F, 0)$ 在时域中为一串冲激函数序列, 冲激函数幅值以指数形式衰

减, 并且在时间轴上相邻二者之间间隔 $2l_F \sqrt{LC}$, 与故障距离成正比, 如图2所示。

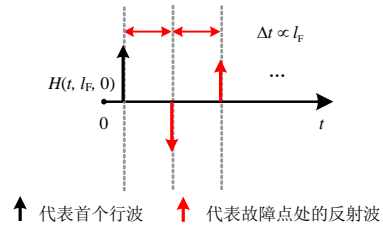


图2 传递函数 $H(f, l_F, 0)$ 的时域波形

Fig. 2 Time domain waveform of $H(f, l_F, 0)$

在反向阶段, 构建相同的电缆线路结构, 并且一般都取猜测故障电阻 R_G 为 0 ^[22], 此时刚好与实际故障电阻 R_F 相等。令反演后信号从故障点位置注入, 则反向阶段的电缆传递函数为

$$H(f, x, R_G) |_{R_G=0} = \frac{2e^{-\gamma x}}{1 + e^{-2\gamma x}} \quad (9)$$

时域中, 反向阶段传递函数的形式与图2相同, 只是时间间隔变为 $2x \sqrt{LC}$, 与猜测故障距离成正比, 因此当 $x=l_F$ 时, 正反向的传递函数自相关程度最大, 从而实现故障准确定位, 如图3所示。

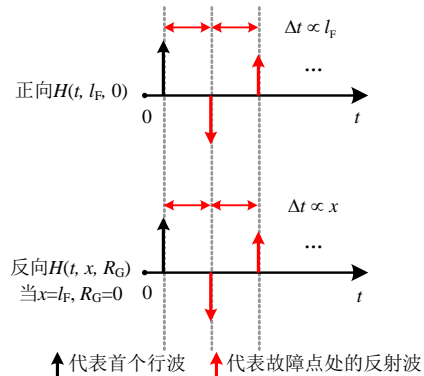


图3 自相关程度最大示意图

Fig. 3 Diagram of maximum autocorrelation

进一步, 将两个冲激函数按式(3)形式进行卷积, 如图4所示, 当正反阶段传递函数具有强相关程度时, 将会导致卷积结果出现冲激函数的重叠, 最终导致行波发生重叠相加, 因此出现能量的汇聚, 这是传统 EMTR 方法利用波形能量最大值作为定位判据的机理。

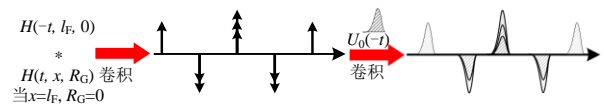


图4 注入结果示意图

Fig. 4 Diagram of injection result

然而, 实际电缆发生故障时, 故障电阻 R_F 的值无法获得, 并且 R_F 的取值范围很广。假设电缆发生高阻故障, 此时故障点反射系数 $\rho_F \approx 0$, 则故障

点处的折射系数为 $1+\rho_F \approx 1$ ，行波在故障点处全部折射，此时正向阶段的传递函数可表示为

$$H(f, l_F, \rho_F \approx 1) = \frac{(1 + \rho_2 e^{-2\gamma(l-l_F)})(1 + \rho_1) e^{-\gamma l}}{1 - \rho_1 \rho_2 e^{-2\gamma l}} \quad (10)$$

由式(7)可得，反射系数 ρ_F 只与 R_F 有关，因此为表达方便，将式(10)中原本传递函数的变量 R_F 更换为 ρ_F 进行表示， ρ_2 为电缆末端的反射系数， $\rho_2 = \rho_2 = 1$ 。此时，反射波都来自末端反射，相邻冲激函数的时间差关系较为复杂，主要是两列时差为 $2(l-l_F)\sqrt{LC}$ 的冲激函数序列，这两列序列内部的相邻冲激函数的时间差为 $2l\sqrt{LC}$ ，如图 5 所示。利用式(10)的反向阶段传递函数进行定位可以发现，当 $x=l_F$ 时，如图 5 中的②③序列，冲激函数序列在时域中无法对齐，相关程度低，然而反观猜测故障距离 $x=l/2$ ，如图 5 中的①②序列，有大部分冲激函数在时域处于相同位置，相关程度高，故得出故障未知为 $l/2$ 的错误定位结果。这是目前传统 EMTR 方法在定位高阻故障过程中，定位结果误差大的原因。

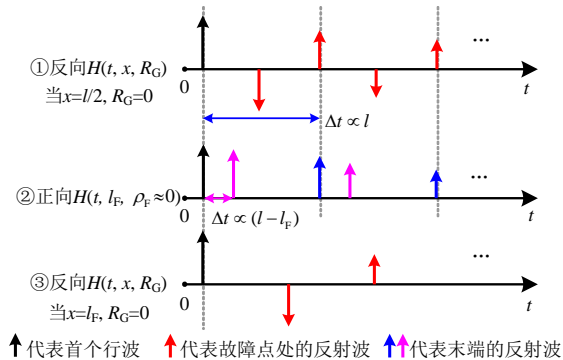


图 5 高阻故障时的正反阶段传递函数示意图

Fig. 5 Diagram of forward-time and backward-time process transfer functions for high resistance fault

当故障点反射系数 ρ_F 在 $(-1,0)$ 范围内时，首端测得的行波信号中既有来自故障点的反射波，也有来自电缆末端的反射波，两类反射波在时间轴上的位置分别与上文叙述的低阻和高阻情况相同。然而，由式(8)可得，故障电阻不会影响冲激函数在时间轴上的位置，但会影响冲激函数的幅值。如图 6 所示，图中给出 ρ_F 增大过程中冲激函数幅值的变化。当反射系数 ρ_F 处于 $(-1,0)$ 范围内时，行波的传递过程较为复杂，本文重点讨论来自故障点与来自末端的反射波，其他反射波幅值较小并未在图中体现。代表故障点反射波的冲激函数幅值与反射系数幅值成正比，而代表末端反射波的冲激函数幅值与折射系数幅值成正比，即与反射系数幅值成反比。因此，当故障点反射系数幅值较大时，故障点反射

波的冲激函数幅值较高，并且反向阶段的冲激函数 $H(f, x, R_G)|_{x=l_F, R_G=0}$ 中的冲激序列刚好与其处于同一位置，此时二者的相关程度较高，定位结果为 $x=l_F$ ，这解释了当传统 EMTR 方法在猜测故障电阻与实际故障电阻不等时仍然能在一定情况下准确定位的原因。然而当反射系数幅值减小时，实现定位的关键冲激函数幅值降低，反而使代表电缆末端反射波的冲激函数幅值增大，导致其反而与 $H(f, x, R_G)|_{x=l/2, R_G=0}$ 的相关程度增大，造成显著的定位误差。

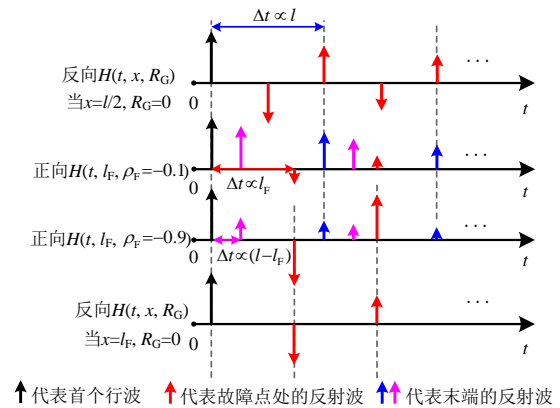


图 6 反射系数在 $(-1,0)$ 时的传递函数示意图

Fig. 6 Diagram of transfer function for reflection coefficient at $(-1,0)$

2.2 基于反射系数修正与局部能量提取的 EMTR 方法

由 2.1 节的分析可知，造成传统 EMTR 方法定位失误的原因主要有：1) 反向阶段的传递函数中缺失与末端反射波相对应的冲激函数；2) 反射系数与折射系数的幅值相互制约。针对这 2 点问题，需要重新构建反向阶段的网络结构，缺失末端反射波对应的冲激函数主要是反向阶段将猜测故障电阻设为 0 导致的，因为此时故障点折射系数为 0，末端反射波无法在故障点处折射并传递至首端，但只要将猜测故障电阻调大，便可解决这一问题。由于折射系数等于反射系数加 1，且反射系数的范围为 $[-1,0]$ ，为解决折反射系数幅值相互制约的问题，假设新构建一个反射系数 ρ_{TR} ， ρ_{TR} 需满足方程 $|1+\rho_{TR}|=|\rho_{TR}|$ ，求解可得 $\rho_{TR}=-0.5$ ，因此本文提出了基于反射系数修正的改进方法，在反向阶段，改用一个特殊的猜测故障电阻 R_{TR} ，在该电阻的作用下，反向阶段的故障点反射系数固定为 -0.5 ，此时折射系数为 0.5 ，折反射系数的幅值相等，传递函数中包含故障点反射波与末端反射波。如图 7 所示，此时，反向阶段的传递函数总能与正向阶段传递函数

保持较高的相关程度。电阻 R_{TR} 的值可求解下列方程获得：

$$\frac{R_{TR} // Z_C - Z_C}{R_{TR} // Z_C + Z_C} = -0.5 \quad (11)$$

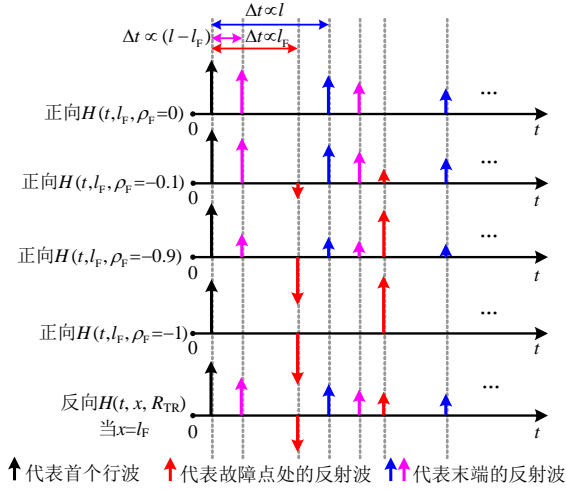


图7 修正后的传递函数示意图

Fig. 7 Diagram of the modified transfer function

然而，需要注意的是，由于代表末端反射波的冲激函数序列中具有 $2l\sqrt{LC}$ 的时间差关系(该时间差是常量与故障距离无关)，因此关于电缆长度中点对称的两个位置发生故障时二者的传递函数会有一些的相似性，如图8所示，给出传递函数 $H(t, l_F, \rho_F=0)$ 和 $H(t, l-l_F, \rho_F=0)$ 的冲激函数，红色虚线框处将会出现相似的部分。这说明对称位置 $l-l_F$ 也会发生能量汇聚现象，可能会干扰定位正确性，如图9所示，考虑了正向阶段传递函数 $H(-t, l_F, \rho_F=0)$ 分别与反向传递函数 $H(t, l_F, R_{TR})$ 和 $H(t, l-l_F, R_{TR})$ 的卷积结果，可以发现猜测故障位置为 l_F 和 $l-l_F$ 时都出现了能量汇聚现象，此时传统的基于整体信号能量最大值的定位判据可能会失效。以往的解决方案是采取对行波信号进行截断的方式，如文献[25]在定位局部放电(类似于高阻故障)时，采用截取信号2个波头的方式，然而在实际电缆接地故障中很难分辨行波的第2个波头，因此本文提出了基于局部能量提取的定位判据。

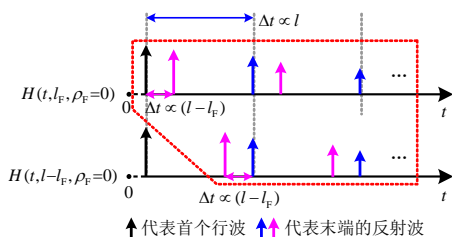


图8 高阻故障时对称位置的传递函数示意图

Fig. 8 Diagram of the transfer function of the symmetrical position during high impedance faults

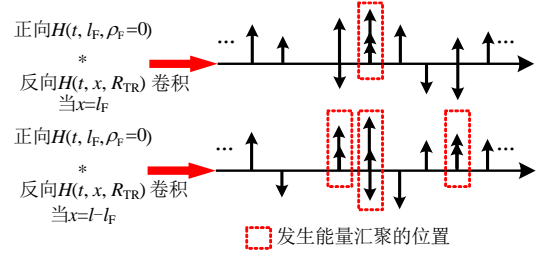


图9 高阻故障时 $x=l_F$ 和 $x=l-l_F$ 的卷积结果示意图

Fig. 9 Diagram of convolution results for $x=l_F$ and $x=l-l_F$ for high resistance faults

对式(3)传递函数的卷积进行展开：

$$H(t, x, R_{TR}) * H(-t, l_F, R_F) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\tau, x, R_{TR}) H(-t + \tau, l_F, R_F) d\tau \quad (12)$$

当 $t=0$ ，卷积的结果等于两列冲激函数序列在时域进行逐点相乘，并将所有点的乘积结果相加。原来的相关结果求取的是传递函数在时间轴上移动后与另一函数之间的关系，取 $t=0$ 时即可限制相关函数在时间轴上的移动，避免了图8所示的局部相似性导致的定位错误。由图7可知，当 $x=l_F$ 时，两列冲激函数序列的正负及冲激函数在时间轴上的分布相同，因此卷积结果在 $t=0$ 位置会出现最大值，即使对于 $\rho_F=-1$ 及 $\rho_F=0$ 的情况，虽然有部分冲激函数缺失，但由于这些位置的乘积为0，故不影响结果。因此，可以利用 $t=0$ 位置的能量作为定位判据。本文所指的 $t=0$ 是当正向阶段令故障开始时刻作为时间零点而言的，但对于实际情况，故障何时开始是无法得知的。为求取 $t=0$ 区域的特征，考虑首个行波在正反阶段的位置变化，由2节可得，仅考虑首个行波时，正向阶段的传递函数为

$$H_1 = e^{-\gamma l_F} (1 + \rho_1) = 2e^{-\gamma l_F} \quad (13)$$

同样，仅考虑首个行波时反向阶段网络的传递函数为

$$H_2 = e^{-\gamma x} (1 + \rho_1) = 2e^{-\gamma x} \quad (14)$$

根据式(2)，可以求得反演后采集的信号为

$$U_2 = H_2 \bar{H}_1 \bar{U}_0 = 4e^{-\alpha l_F} e^{-\alpha x} e^{-j\beta(x-l_F)} \bar{U}_0 \quad (15)$$

当 $x=l_F$ 时，式(15)可简化为

$$U_2 = H_2 \bar{H}_1 \bar{U}_0 = 4e^{-\alpha l_F} e^{-\alpha x} \bar{U}_0 = P \bar{U}_0 \quad (16)$$

式中 P 为幅值系数， $P = 4e^{-2\alpha l_F}$ 。由式(16)可得，经过反向阶段后，在电缆首端接收到的信号 U_2 为 P 倍的首个行波，没有任何的时移，即首个行波回到 $t=0$ 时刻。如图10所示，假设故障开始时刻与首端收到首个行波相隔 $t_1 = \sqrt{LC}l_F$ ，则 $t=0$ 位置就是首

个行波经过反向阶段后输出的位置。

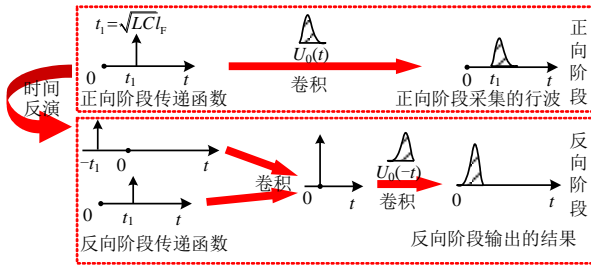


图 10 首个行波经过 EMTR 处理后的时移示意图

Fig. 10 Diagram of the time shift of

the first travelling wave after EMTR processing

因此，本文取反向阶段后首个行波区域的能量作为定位判据，由于首个行波的幅值较大，在正向阶段时更容易辨别。在定位过程中首先在正向阶段测量得到的行波信号中确定首个行波的范围 $[t_b, t_e]$ ，对行波信号进行反演后在 t_m 插入一个幅值为最大值 5 倍的数据点作为首个行波位移的辨识标志，则经过反向阶段处理后，辨识标志的位置由 t_m 变为 t'_m ，故障位置的求取公式为

$$\begin{cases} t'_m = \arg \{ \max_x [U_2(t, x)] \} \\ l_F = \arg \{ \max_x [\int_{t_b+t'_m-t_m}^{t_e+t'_m-t_m} U_2(t, x)^2 dt] \} \end{cases} \quad (17)$$

3 实验与仿真

3.1 方法流程

基于反射系数修正与局部能量提取的 EMTR 定位方法流程如图 11 所示。主要有 3 个重要步骤：1) 信号处理：当电缆发生故障时，在电缆首端记录暂态信号 $U_1(t)$ ，接着将 $U_1(t)$ 进行时间反演得到 $U_1(-t)$ ，并在反演后的信号中插入辨识标志以及确定首个行波在时间轴上的范围；2) 信号注入：根据网络结构和电缆线路的电气参数构建反向阶段的网络，并根据式(11)确定故障电阻，从不断猜测的故障点位置注入并在电缆首端测量注入结果 $U_2(t, x)$ ；3) 定位结果：利用式(17)求取最终的定位结果 l_F 。

3.2 实验验证

为验证所提方法的有效性，在实验室内一条 300 m 电缆上进行了接地故障定位试验。电缆型号为 YJLV22-8.7/10 kV-3×95 mm²，试验设置如图 12 所示。电缆的一端连接示波器采集故障行波信号。在距电缆首端 100 m 处设置故障，将电缆绝缘层破坏，在电缆缆芯与铜屏蔽层之间依次接入 3 种不同值的电阻以模拟不同状态的电缆接地故障。根据 2.1 节分析可知，故障点反射系数主要可以分为 3 类：

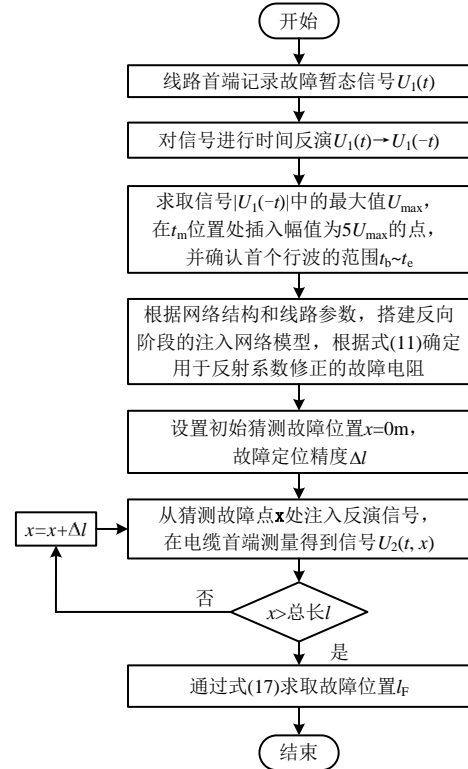


图 11 故障定位流程图

Fig. 11 Fault location flowchart

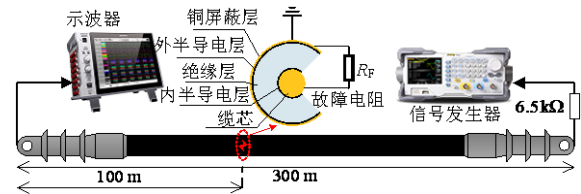


图 12 试验接线与故障设置示意图

Fig. 12 Diagram of experimental setting

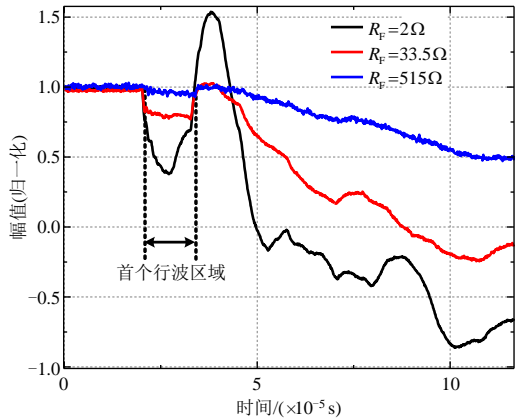
$\rho_F \approx -1$ 、 $-1 < \rho_F < 0$ 和 $\rho_F \approx 0$ ，这 3 类故障电阻值的选取能够代表故障点反射波幅值从高递减至接近于 0 及末端反射波幅值从接近于 0 递增的情况，具体选取值如表 1 所示。电缆末端连接信号发生器，其可为电缆线路提供 20 V、50 Hz 的交流电压，模拟电缆在运状态。由于信号发生器的输出阻抗较小，为保证电缆末端发生全反射，故在电缆与信号发生器之间串联了一个 65 kΩ 的电阻。具体的试验参数设置情况如表 1 所示。

试验测得的故障行波如图 13(a)所示，可以发现

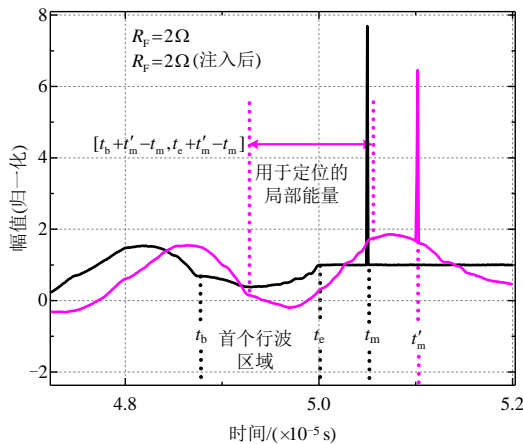
表 1 试验参数

Table 1 Experiment parameters

参数	取值
示波器采样频率/MHz	100
电缆电容/(F/km)	2.144×10^{-7}
电缆电感/(H/km)	1.200×10^{-4}
故障电阻(反射系数)/Ω	2(-0.86)、33.5(-0.26)、515(-0.02)
R_{TR}/Ω	11.83



(a) 首端采集的故障行波



(b) 反演和注入后的行波

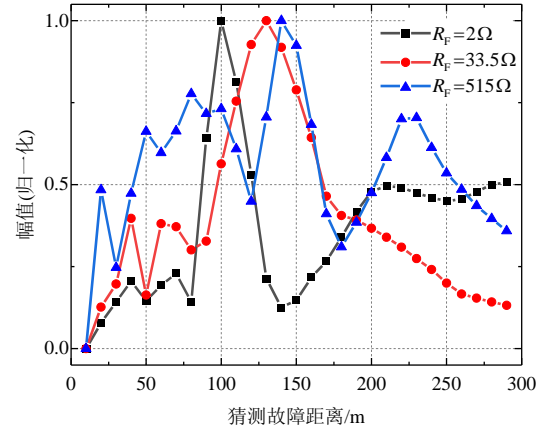
图 13 行波曲线

Fig. 13 Travelling wave

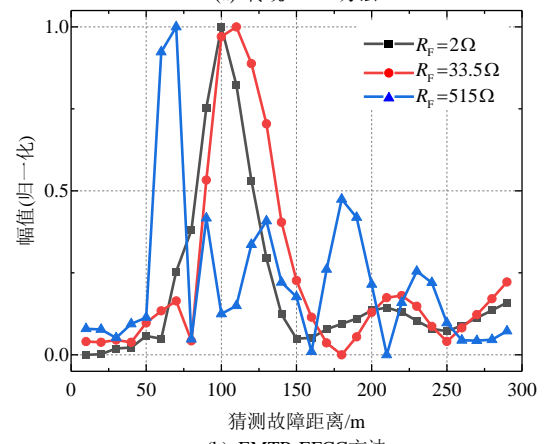
在不同的故障阻值情况下，行波呈现不同的特征，并且由于首个行波在线路上的衰减较小，可以很容易辨别首个行波在时间轴上的位置。以故障电阻 2Ω 为例，经过时间反演，并插入首个行波位移的辨识标志后得到的波形如图 13(b)所示，图 13(b)中标注了首个行波的时间范围 $[t_b, t_c]$ 及注入后波形的变化情况，可以看到辨识标志发生了位移，根据位移量可以获取首个行波的位移变化，从而确定用以定位的局部波形。

由于仿真速度以及传输线模型长度的限制，对于试验电缆的定位设置的猜测故障距离为 10~290 m，步长为 10 m。图 14 中分别给出传统 EMTR、文献[20]中的 EMTR-EFCC(EMTR fault location method based on the energy of the fault current at the characteristic frequency)及本文所提方法的定位结果对比情况，取图 14 中最大值对应的横坐标为定位结果，具体定位效果及误差情况如表 2 所示。

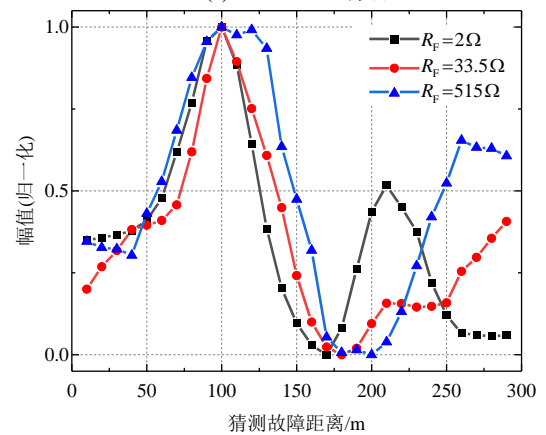
由表 2 可知，对于传统 EMTR 方法，随着故障电阻的逐渐增大，定位误差也逐渐增大，传统 EMTR 方法只在故障电阻为 2Ω 的情况实现准确定



(a) 传统EMTR方法



(b) EMTR-EFCC方法



(c) 基于反射系数修正与局部能量提取的EMTR方法

图 14 不同方法的定位结果

Fig. 14 Location results of different methods

表 2 定位结果与误差

Table 2 Location results and errors

定位方法	故障电阻/ Ω	定位结果/m	误差/m
传统 EMTR	2	100	0
	33.5	130	30
	515	140	40
EMTR-EFCC	2	100	0
	33.5	110	10
	515	70	30
本文所提方法	2	100	0
	33.5	100	0
	515	100	0

位，这是因为当故障电阻为 33.5 和 515Ω 时，传统 EMTR 方法会由于末端反射波幅值越来越强而导致定位准确性下降，与 2.1 节的分析相对应。EMTR-EFCC 方法在传统 EMTR 方法基础上进行了改进，在故障电阻为 33.5Ω 时 EMTR-EFCC 的定位误差小于传统 EMTR 方法，但 EMTR-EFCC 方法定位准确性依赖于行波信号特征频率的选取，在故障电阻较大时，特征频率的改变将导致较大的定位误差。基于本文所提方法的定位结果如图 14(c)所示，故障分别被定位于 100 m(2Ω)、100 m(33.5Ω)和 100 m(515Ω)，考虑到定位过程中选取的猜测故障距离步长为 10 m，因此本文所提方法的实际定位误差小于 10 m。当故障电阻较大时，定位精度仍然很高，即使在故障点反射系数为-0.02 的情况下依旧可以实现定位，显著提高了 EMTR 方法在故障电阻较大时的定位精度，证明了该方法的有效性。

在以往的研究中，RG-58 电缆线常用于验证 EMTR 方法的定位效果^[20-22]，因此为更充分地验证本文所提方法的有效性，在 60 m 的 RG-58 线路中进行了定位试验，接地故障设置在距离首端 40 m 处，具体试验接线如图 15 所示，电路结构与图 12 相似。故障电阻选取：2Ω($\rho_F=-0.93$)、33.5Ω($\rho_F=-0.43$)和 515Ω($\rho_F=-0.05$)。试验测得的故障行波如图 16(a)所示，定位结果如图 16(b)所示，猜测故障距离为 10~50 m，步长为 1 m，定位结果分别为 39 m(2Ω)、39 m(33.5Ω)和 41 m(515Ω)。这 3 种故障电阻情况下的定位误差均较小，进一步验证了该方法在不同故障电阻下定位的有效性。

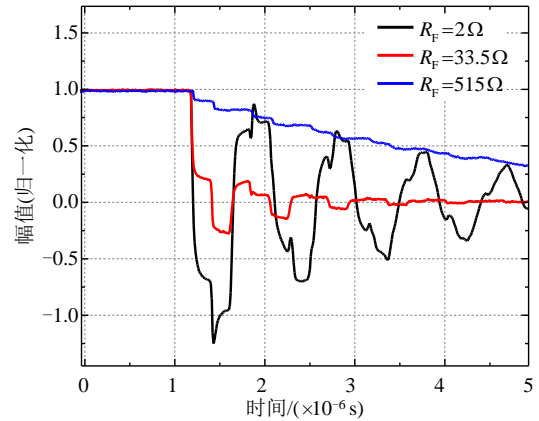


图 15 RG-58 电缆试验接线示意图

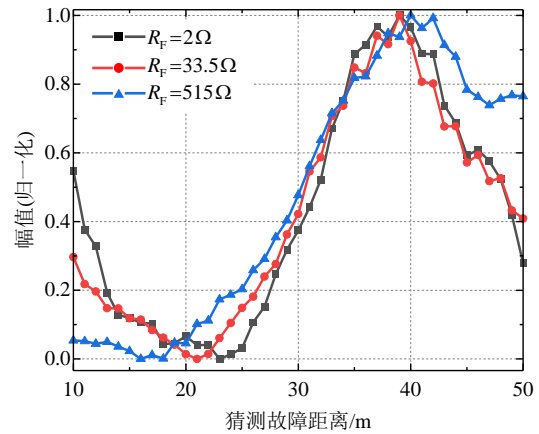
Fig. 15 RG-58 cable experimental wiring diagram

3.3 仿真验证

为进一步验证本文所提方法的在线定位效果，在 Simulink 里搭建了 10 kV 配网系统，如图 17 所示，表 3 给出仿真的具体参数^[26]。仿真中电缆单相故障采用 Simulink 的 Three-phase fault 模块进行设置，调整故障电阻以模拟不同的电缆接地故障，在



(a) 故障行波



(b) 定位结果

图 16 RG-58 电缆试验

Fig. 16 RG-58 cable experiment

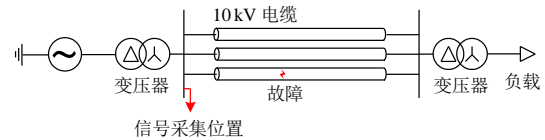


图 17 仿真模型示意图

Fig. 17 Diagram of the simulation model

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

参数	取值	
电缆总长/km	3	
故障相	A 相	
采样频率/MHz	1	
R_{TR}/Ω	38.766 6	
电缆分布参数	正序	零序
电阻 $R/(\Omega/\text{km})$	0.2744	0.7067
电感 $L/(\text{H}/\text{km})$	5.7345×10^{-4}	1.8546×10^{-3}
电容 $C/(\text{F}/\text{km})$	9.5394×10^{-8}	7.5427×10^{-8}

定位过程中假设故障相已提前获知。实际中电缆可能存在中间接头，但在本文的采样率条件下中间接头对信号的传递影响较小^[17]，因此可以忽略中间接头的影响。

3.3.1 不同故障电阻的影响

将故障设定在距离信号采集位置 0.7 km 的位置处, 对不同故障电阻的电缆单相接地故障进行仿真, 并利用所提出的基于反射系数修正与局部能量提取的 EMTR 方法进行定位, 得到的定位结果如图 18 所示。由于仿真传输线模型的限制, 猜测故障位置范围为 [0.2, 2.8] km, 步长为 0.01 km。仿真结果表明, 在不同故障电阻条件下, 定位结果均在真实故障位置 0.7 km 附近, 由此可知, 本文所提的改进 EMTR 方法在不同故障电阻条件下均能实现可靠定位。

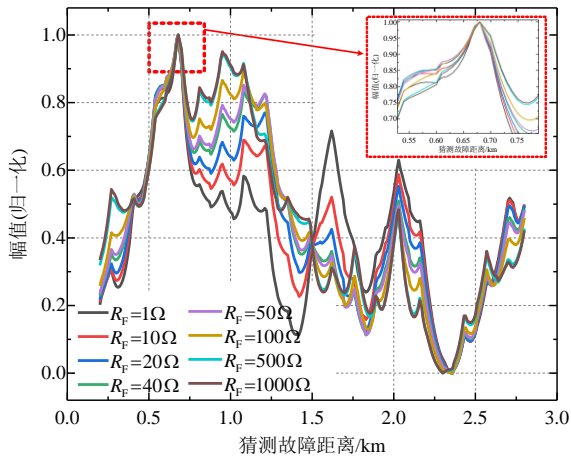


图 18 不同故障电阻条件下的定位结果

Fig. 18 Location results under different fault resistance

3.3.2 不同故障位置的影响

由 3.3.1 节可得, 本文所提方法对不同故障电阻均具有适用性。为进一步验证本文所提方法对不同故障电阻准确定位的普适性, 仿照 3.2 节选用 3 个典型的故障电阻进行不同故障位置对定位效果影响的研究, 3 个故障电阻(反射系数)分别为: 1 Ω(-0.97)、40 Ω(-0.49)、1 000 Ω(-0.04)。在不同故障位置条件下, 定位结果如图 19 所示。由定位

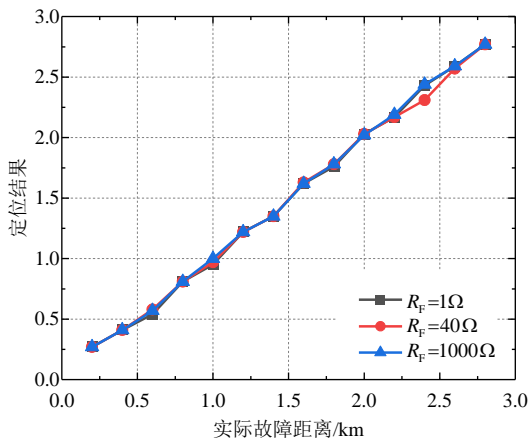


图 19 不同故障位置的定位结果

Fig. 19 Location results for different fault locations

结果可以看出, 本文所提方法在不同故障位置条件下均能实现准确定位。

3.3.3 噪声的影响

考虑到实际配电网运行中存在许多噪声干扰, 因此在仿真中对信号添加不同信噪比(signal to noise ratio, SNR)的高斯白噪声, 探究噪声对所提方法定位精度的影响。SNR 分别设置为 10、20 和 30 dB。仿真中故障位置设置为 2 km, 故障电阻设置为 1 000 Ω, 定位结果如图 20 所示。由定位结果可得, 噪声的添加对定位结果曲线的影响较小, 在高噪声、高阻故障条件下本文所提出的 EMTR 改进方法仍然能够实现准确定位。

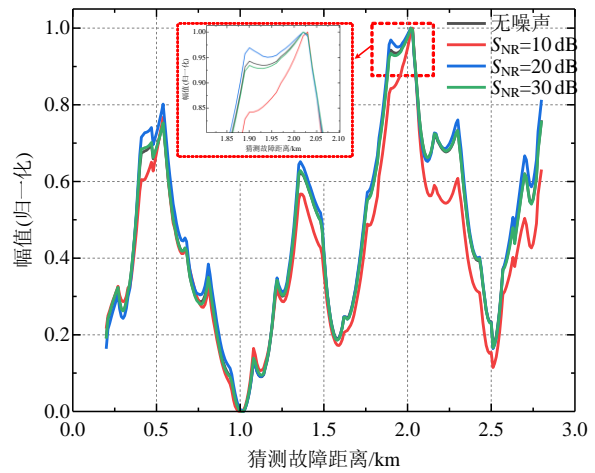


图 20 不同信噪比条件下的定位结果

Fig. 20 Location results under different SNR

3.3.4 分支线路的影响

实际配网电缆线路结构较为复杂, 存在多条分支, 因此需要考虑本文所提方法在含分支线路上的定位效果。在仿真中建立如图 21 所示的含分支线路的电缆复杂网络, 图中的电缆参数与图 17 相同, 3 条线路分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 , 仿真分析两种情况, 即故障位置在电缆 l_1 距首端 1.3 km 位置处, 以及故障位置在电缆 l_2 距分支点 1.7 km 位置处, 故障电阻均设置为 1 000 Ω。

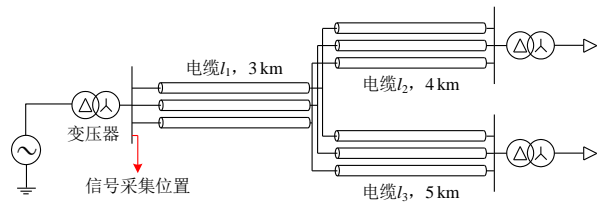


图 21 含分支线路的配电网

Fig. 21 Distribution network with branch lines

2 种故障设置情况下的定位结果如图 22 所示, 分别对 3 条线路进行定位, 图 22(a)中电缆 l_1 的定位曲线幅值大, 表明故障发生在电缆 l_1 中, 根据曲线

中幅值最大点可以得出定位结果为 1.33 km，接近真实故障距离，同样的，所提方法也能实现电缆 I_2 中的故障定位。由此可见，本文所提的方法同样适用于存在分支线路的复杂配电网。

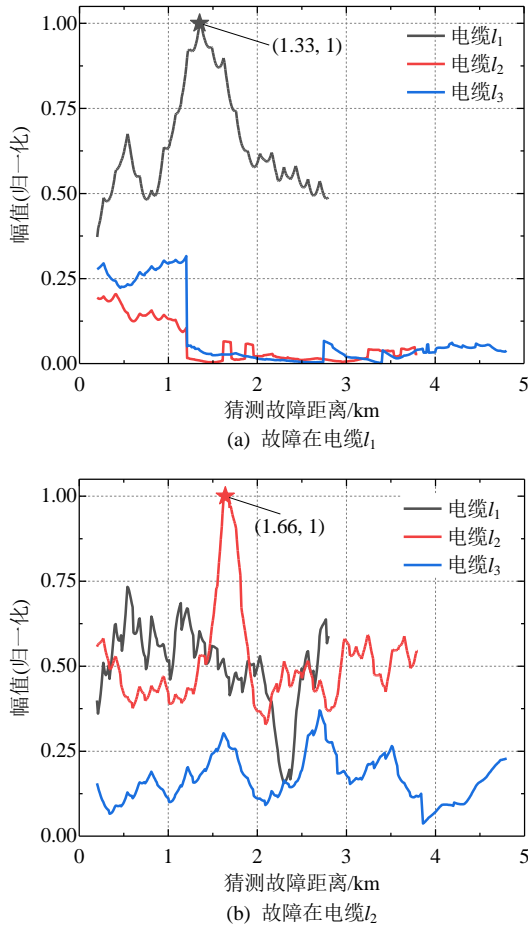


图 22 含分支线路的定位结果

Fig. 22 Location results with branch lines

4 结论

本文针对传统 EMTR 定位方法易受故障电阻影响的问题，提出一种基于反射系数修正与局部能量提取的改进 EMTR 方法，得到主要结论如下：

1) EMTR 方法的定位效果取决于正向与反向阶段网络传递函数的相关程度，然而针对传统 EMTR 方法，传递函数在时域中的分布以及幅值会受故障电阻的影响。随着故障电阻增大，末端反射波的出现及反射系数与折射系数之间的制约关系是影响正反向传递函数的相关程度的主要原因。

2) 针对故障电阻导致传统 EMTR 定位准确率低的问题，本文提出了基于反射系数修正与局部能量提取的改进 EMTR 方法，该方法利用特殊固定的猜测故障电阻将反射系数与折射系数幅值都限制

为 0.5，并且根据注入后行波会在首个行波位置发生汇聚的特征，提出了提取首个行波位置能量作为定位判据的方法。

3) 通过在实验室内采用 10 kV 试验电缆进行故障定位测试，验证了本文所提方法的有效性。并通过对不同故障电阻、不同故障距离、不同强度噪声以及含分支线路的复杂网络进行仿真定位，证明了该方法的鲁棒性。

参考文献

- [1] 朱梦瑶, 李欢, 张瑞祥. 热老化对 XLPE 电缆本体中典型缺陷所引发的电场畸变的影响[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(22): 9076-9087.
ZHU Mengyao, LI Huan, ZHANG Ruixiang. Influence of thermal aging on electric field distortion caused by typical defects in XLPE cable[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(22): 9076-9086(in Chinese).
- [2] 周旭, 李欢, 朱梦瑶, 等. 高压 XLPE 电力电缆阻水缓冲层烧蚀故障研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(12): 4927-4943.
ZHOU Xu, LI Huan, ZHU Mengyao, et al. Research review on the ablative failure of water buffer layer in high voltage XLPE power cables[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(12): 4927-4943 (in Chinese).
- [3] 袁豪, 周凯, 孔佳民, 等. 不同缺陷条件下高压 XLPE 电缆的逸出气体特性[J]. 高电压技术, 2025, 51(2): 946-955.
YUAN Hao, ZHOU Kai, KONG Jiamin, et al. Gas release characteristics of high-voltage XLPE cables under different fault conditions[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2): 946-955 (in Chinese).
- [4] 张海月, 王守明, 刘骥, 等. 基于 PT-PFM 激励阻抗谱数字重构的电缆故障诊断定位[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 805-816.
ZHANG Haiyue, WANG Shouming, LIU Ji, et al. Cable fault diagnosis and location based on digital reconstruction of PT-PFM excitation impedance spectrum [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(2): 805-816(in Chinese).
- [5] 徐先峰, 马志雄, 姚景杰, 等. 基于小波变换和 GA-BP 神经网络的电力电缆故障定位[J]. 电气工程学报, 2024, 19(2): 146-155.
XU Xianfeng, MA Zhixiong, YAO Jingjie, et al. Cable fault location based on wavelet transform and GA-BP neural network[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(2): 146-155(in Chinese)

- [6] 周凯, 黄靖涛, 孟鹏飞, 等. 基于 FDR 和时频脉冲转换的长电缆缺陷极性识别研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 5271-5280.
ZHOU Kai, HUANG Jingtao, MENG Pengfei, et al. Research on defect polarity identification of long cable based on FDR and time-frequency pulse conversion [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(13): 5271-5280(in Chinese).
- [7] 李蓉, 周凯, 饶显杰, 等. 配电网电缆本体受潮缺陷定位及受潮特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3470-3479.
LI Rong, ZHOU Kai, RAO Xianjie, et al. Localization of damp defects and analysis of moisture characteristics for cable body in the distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3470-3479(in Chinese).
- [8] 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 Zhihui, WANG Xu. Impedance method based fault location algorithm for active distribution system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 2027-2034(in Chinese).
- [9] 王玲, 邓志, 马明, 等. 基于改进视在阻抗的配电网故障定位方法及其应用[J]. 广东电力, 2020, 33(10): 84-93.
WANG Ling, DENG Zhi, MA Ming, et al. Distribution network fault location method and its application based on improved apparent impedance[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(10): 84-93(in Chinese).
- [10] 李泽文, 曾祥君, 夏翊翔, 等. 高压交流输电线路故障行波定位技术综述[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2022, 19(3): 104-121.
LI Zewen, ZENG Xiangjun, XIA Yixiang, et al. Review of traveling wave fault location technology for high voltage AC transmission lines[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2022, 19(3): 104-121(in Chinese).
- [11] 孟鹏飞, 李腾飞, 王万岗, 等. 基于双端电流测量的电缆早期故障定位研究[J]. 工程科学与技术, 2025, 57(4): 269-277.
MENG Pengfei, LI Tengfei, WANG Wangang, et al. Research on incipient fault location of cable based on double-ended current measurement[J]. Advanced Engineering Sciences, 2025, 57(4): 269-277. (in Chinese).
- [12] 王巍璋, 王淳, 敖鑫. 基于果蝇优化算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 108-114.
WANG Weizhang, WANG Chun, AO Xin. Fault location of power distribution network based on fruit fly optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 108-114(in Chinese).
- [13] 蒋原, 李擎, 冯茜, 等. 基于 BP 神经网络的直流电网故障定位与保护方法[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 23-28.
JIANG Yuan, LI Qing, FENG Qian, et al. Fault location and protection method for DC power grid based on BP neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 23-28(in Chinese).
- [14] WANG Zhaoyang, HE Shaoyin, LI Qi, et al. A full-scale experimental validation of electromagnetic time reversal applied to locate disturbances in overhead power distribution lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(5): 1562-1570.
- [15] KAFAL M, GREGIS N, BENOIT J, et al. An effective method based on time reversal and optimization techniques for locating faults on power grids[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(2): 1092-1099.
- [16] RAZZAGHI R, LUGRIN G, RACHIDI F, et al. Assessment of the influence of losses on the performance of the electromagnetic time reversal fault location method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(5): 2303-2312.
- [17] 谢敏, 周凯, 何珉, 等. 基于时间反演技术的电力电缆局部放电定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3402-3409.
XIE Min, ZHOU Kai, HE Min, et al. Partial discharge location for power cable based on the time reversal technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3402-3409(in Chinese).
- [18] 汪先进, 周凯, 谢敏, 等. 基于时间反演相位法的电力电缆局部放电定位[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 783-790.
WANG Xianjin, ZHOU Kai, HE Min, et al. Research on partial discharge source location for power cables based on time reversal phase method[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 783-790(in Chinese).
- [19] RAZZAGHI R, LUGRIN G, MANESH H M, et al. An efficient method based on the electromagnetic time reversal to locate faults in power networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1663-1673.
- [20] CUI Haonan, YANG Qing, SUN Jian, et al. Electromagnetic time reversal fault location method based on characteristic frequency of traveling waves [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(5): 3033-3044.
- [21] 孙健. 基于分布式电压感知的中压配电网电磁时间反演故障定位方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
SUN Jian. Electromagnetic time reversal fault location method for medium voltage distribution lines based on distributed voltage sensing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022(in Chinese).

- [22] 杨庆, 胡逸, 崔浩楠, 等. 固有频率与电磁时间反演结合的多支配网故障定位方法[J]. 高电压技术, 2025, 51(3): 1103-1113.
YANG Qing, HU Yi, CUI Haonan, et al. Fault location method for multi-terminal distribution network combined with natural frequency and electromagnetic time reversal[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1103-1113(in Chinese).
- [23] ZHU Guangya, PAN Songkun, LU Lu, et al. Electromagnetic time reversal localization method for distribution cables based on reflection coefficient modification[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2025, 72(6): 6497-6506.
- [24] 刘刚, 张圆明, 陈晨, 等. 基于纳秒窄脉冲与时间反演的电缆故障定位系统设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(7): 170-173.
LIU Gang, ZHANG Yuanming, CHEN Chen, et al. Design of fault location system for distribution network cables based on narrow pulse generator and time reversal method[J]. Automation & Instrumentation, 2023(7): 170-173(in Chinese).
- [25] 张艺驰. 基于分数阶电路模型的电缆信号传播特性及故障定位研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2019.

ZHANG Yichi. Research on signal propagation characteristics and fault location of power cable based on fractional circuit model[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2019(in Chinese).

- [26] ZHANG Peng, KONG Lingchang, LIANG Rui, et al. Fault location method for three-core cable using amplitude ratio of shield-grounding wire currents[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(6): 7456-7467.



朱光亚

在线出版日期: 2025-04-11。

收稿日期: 2024-12-25。

作者简介:

朱光亚(1989), 女, 博士, 副教授, 主要从事固体电介质老化机理和电气设备状态检测方面的研究工作, miyazhu_1989@126.com;

*通信作者: 周凯(1975), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力设备状态监测与故障诊断、中高压电缆系统等, zhukai_scu@163.com。

(编辑 张蕾)