

# 基于可变行波辨识时窗的单端故障定位方法

牛睿<sup>1</sup>, 梁军<sup>1</sup>, 张峰<sup>1</sup>, 张旭<sup>1</sup>, 杨潇<sup>2</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 滨州电力公司, 山东 滨州 256600)

**摘要:** 提出了一种基于改进分布参数法的可变时窗单端行波故障定位方法。该算法通过对端系统阻抗的在线估计, 构建改进的分布参数法, 改善常规方法误差分布的不规律性, 提升依据工频量定位误差构建组合定位算法的可行性。探索改进分布参数法的定位误差分布, 根据故障条件和误差规律计算可变的故障距离窗口, 由此划定行波反射波辨识的可变时窗。基于该时窗, 综合考虑测量本端和对端的母线接线方式、相邻母线反射波的影响等因素, 构建可变时窗内的故障行波反射波辨识方法及定位方法。仿真验证结果表明, 该方法提高了组合定位方法的可靠水平, 故障定位精度较高, 具有一定工程应用价值。

**关键词:** 测距; 单端; 对端系统阻抗; 在线估算; 变窗口

## Single-ended fault location method based on variable time windows for traveling wave identification

NIU Rui<sup>1</sup>, LIANG Jun<sup>1</sup>, ZHANG Feng<sup>1</sup>, ZHANG Xu<sup>1</sup>, YANG Xiao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Binzhou Power Supply Company, Binzhou 256600, China)

**Abstract:** A single-ended fault location algorithm is proposed, based on the improved distributed-parameter method and variable time windows of traveling wave. According to the online estimation of the opposite terminal source impedance, the improved distributed-parameter method can be built, to enhance the location-error distribution regularity and improve the feasibility of the assembled fault location algorithm. Then based on the study of the location-error distribution of the proposed improved distributed-parameter method, the variable fault distance window can be computed, determining the variable time windows of the reflected waves to be identified. At last, considering the wiring schemes of local and opposite buses combined with the impact of the interference waves from adjacent buses, reflected waves contained in the variable time windows can be identified and the exact fault location can be detected. Simulation results demonstrate the high reliability and accuracy as well as the engineering application value of the proposed algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177091).

**Key words:** fault location; single ended; opposite terminal source impedance; online estimation; variable windows

中图分类号: TM771 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0056-09

## 0 引言

单端测距与双端测距相比, 不受通信条件、经济条件、管理权限等因素制约, 其固有优点使单端测距拥有广阔的发展前景。但目前单端测距仍存在一些问題<sup>[1-2]</sup>: 工频量法由于理论限制, 无法根本上消除对端助增电流的影响, 实际应用误差相对较大; 行波法理论上不受系统运行方式、故障过渡电阻影响, 测距精度高于工频量法, 但行波法的关键在于行波折反射波的准确辨识<sup>[3]</sup>, 而工程现场行波波

复杂, 波头辨识困难, 无效的波头辨识将导致错误的定位结果<sup>[4]</sup>。

目前许多文献从行波波头辨识的角度探讨测距精度的提升方法<sup>[5-7]</sup>: 文献[5]利用极性关系识别反射波的性质, 但该极性关系受限于现场母线类型; 文献[6]提出了针对“三一类”母线结构利用初始反极性行波的单端行波测距新方法, 应用范围具有有限性; 文献[7]考虑到母线结构, 提出综合电压行波极性和电流行波极性识别反射波的方法, 而精确测量现场的电压行波是实现该方法的前提。文献[8]提出综合两种行波原理测距, 但该方法需利用双端数据。同时有学者提出行波法与阻抗法相结合的方

**基金项目:** 山东省博士后专项基金资助项目 (201103032); 国家自然科学基金项目 (51177091)

法,文献[9]利用单端阻抗法对行波法的多个结果进行筛选,基于阻抗法误差规律修正线路中点附近故障测距结果,在现场故障情况复杂的情况下,阻抗法测距精度难以遵循一定规律;文献[10-11]针对行波法可靠性较低的情况,引入阻抗法测距结果及10%的阻抗法误差限定故障点反射波的识别范围,但测量端有两条出线时故障点反射波难以检测,且10%的误差范围不利于误差较小的故障情况下有效筛选干扰波。由此可见,组合故障定位方法具有较强理论性和工程应用可行性,但同时受限于母线接线方式和行波反射波限定范围的有效性。因此,如何结合实际误差情况灵活确定限定反射波的区域,并在接线方式多样化的情况下准确标识并选择限定范围内的定位波头,对于进一步提升组合定位方法的可行性具有重要意义。

针对以上问题,提出了一种基于改进分布参数法的可变形波辨识窗口的单端故障测距算法。该算法通过对端系统阻抗在线估计构建改进分布参数法,并依此给出合理、有效的工频量故障距离窗口,通过该窗口形成行波反射波头辨识的可变范围,提高行波波头辨识的抗干扰能力;行波法在给定时间窗口内综合线路接线方式准确标识定位波头,实现精确可靠故障测距。仿真验证表明,所提算法可同时提高测距结果的精度和可靠性,以及对不同线路结构的通用性。

## 1 基于改进分布参数法的可变形时窗

### 1.1 反射波时窗

行波法受限于现场强噪声、复杂操作干扰等因素,反射波辨识较困难。图1所示为双端电源系统图,线路MN于F点处发生故障,其故障行波如图2所示,辨识过程中发现故障行波中存在与真实反射波同极性的干扰波头1、2、3,分别对应28.7 km、47.3 km、118.3 km,与真实故障距离99.6 km相比误差很大,给真实反射波的有效辨识造成困难。考虑到工频量法测距依靠的是物理量之间的电气关系,具有误差相对较大但可靠性较高的特点,因此,利用工频量法定位结果限定故障距离范围,利于限定故障行波反射波的辨识窗口,可有效提升行波定

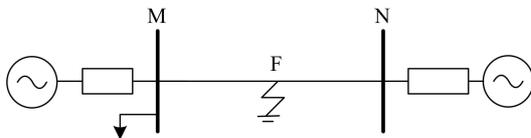


图1 双端电源系统故障图  
Fig. 1 Fault diagram of double power system

位的抗干扰能力。

图2所示工频量法确定的行波反射波的划定时窗,若工频量测距误差偏大,如窗口W3,则无法包含真实波头,将可能导致完全错误的测距结果;若窗口包含真实反射波但窗口长度偏大,如窗口W2,则无法有效消除真实反射波辨识过程中的干扰,并可能引入奇异性更强的干扰波头3;可见,包含真实反射波头且时窗长度合理的W1更利于消除干扰影响,给出高精度定位结果。

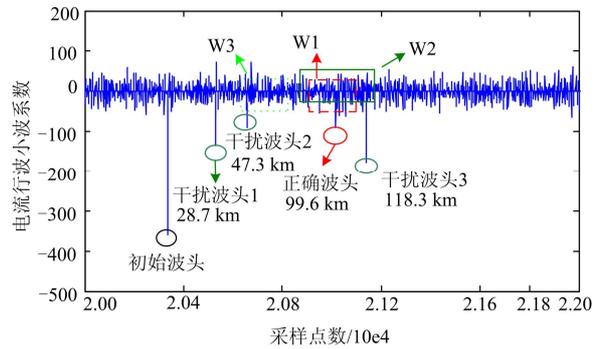


图2 窗口位置、大小对排除干扰的影响

Fig. 2 Impact of the window location and size on interference elimination

由上述分析可得,反射波时窗划定需满足准确性和稳定性的要求,为此需提升工频量定位方法误差分布的稳定性,并准确提取其误差分布规律。

### 1.2 改进工频量分布参数法

相比阻抗法而言,常规工频量分布参数法采用精确线路模型,定位精度明显高于集中参数模型测距算法<sup>[12]</sup>,更符合时窗对工频量定位方法准确性的要求。但目前分布参数法均基于对端系统阻抗为定值的假设,该假设在对端系统阻抗角变化时,即使对于同一故障情况,故障定位精度将会大幅改变<sup>[13]</sup>,因此,其误差分布具有明显不稳定性。同时,对于单端测距方式而言,对端母线运行方式的改变具有未知性,无法实时更改计算参数。由此,若能实现对端系统阻抗参数的在线辨识,则可实时修正常规分布参数法中的对端系统阻抗参数,提升定位误差分布稳定性。可见,对分布参数法改进的关键问题在于对端系统阻抗的在线估算方法。

利用戴维南等值电路表达对端系统如图3所示,其中, $\dot{E}_N$ 、 $Z_N$ 分别为对端等值电源和对端系统阻抗。单端测距中对端系统的运行方式未知,但其在线路故障时刻前后几个周波内发生变化的可能性几乎为零,可认为该时间段内 $\dot{E}_N$ 、 $Z_N$ 均为定值。而分布参数法测距利用的正是该时间段内故障期间

的电气量,因此可由节点 N 处故障前几个周波内的工频电气量确定分布参数测距算法内的  $Z_N$  值,实现对端系统阻抗参数的实时修正。

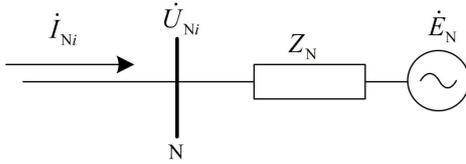


图 3 对端系统等值

Fig. 3 Opposite system equivalence

电力系统的正常运行过程始终伴随负荷波动、电压波动等小扰动的存在,因此线路正常运行时测量端的电压电流相量是实时变化的。故障录波装置依据行业标准<sup>[14]</sup>,需记录系统扰动开始前至少两个周波的实时模拟量数据,这为故障前多组工频稳态数据的获取提供了实际应用基础。提取故障前多组工频电气量,利用最小二乘原理估算本次故障期间对端系统阻抗值为

$$\begin{cases} \dot{U}_{Ni} = \dot{U}_{Mi} \text{ch} \gamma L - Z_c \dot{I}_{Mi} \text{sh} \gamma L \\ \dot{I}_{Ni} = \frac{\dot{U}_{Mi}}{Z_c} \text{sh} \gamma L - \dot{I}_{Mi} \text{ch} \gamma L \end{cases} \quad (1)$$

$$Z_N = - \frac{k \sum_{i=1}^k (\dot{U}_{Ni} \dot{I}_{Ni}) - \sum_{i=1}^k \dot{U}_{Ni} \sum_{i=1}^k \dot{I}_{Ni}}{k \sum_{i=1}^k \dot{I}_{Ni}^2 - (\sum_{i=1}^k \dot{I}_{Ni})^2} \quad (2)$$

式中:  $L$  为故障线路全长;  $Z_c$  为线路正序波阻抗;  $\gamma$  为线路正序传播系数;  $\dot{U}_{Ni}$ 、 $\dot{I}_{Ni}$  为故障前 N 端第  $i$  组工频量;  $\dot{U}_{Mi}$ 、 $\dot{I}_{Mi}$  为故障前 M 端第  $i$  组工频量;  $Z_N$  为对端系统阻抗的在线估计值。

### 1.3 反射波变长时窗划定

长度合理的窗口需在满足准确性的前提下,尽可能缩小反射波辨识范围以排除干扰。若能跟踪不同故障情形下的误差规律,据此动态确定窗口长度,则可有效提高行波辨识的抗干扰能力。定位误差的规律性在改进分布参数法中得到了有效提升,在此基础上,需探索总结改进分布参数法定位精度的规律,同时考虑不同故障条件的影响,由此划定反射波变长时窗范围。

在实时估算对端系统阻抗后,利用改进分布参数法定位故障点的过程实质上是求解关于故障距离的一元方程,算法本身基本不受故障点过渡电阻值和故障类型的影响,故只需考虑故障点位置对定位误差的作用。针对一典型 500 kV 双端电源系统<sup>[15]</sup>设计参数模型,线路全长范围内改进分布参数法的

误差如图 4 所示。可见,改进分布参数法对于线路近测量端的大部分长度范围内的故障,定位误差小且范围集中,线路末端长度范围内的故障,定位误差随故障距离增加而加速变大。

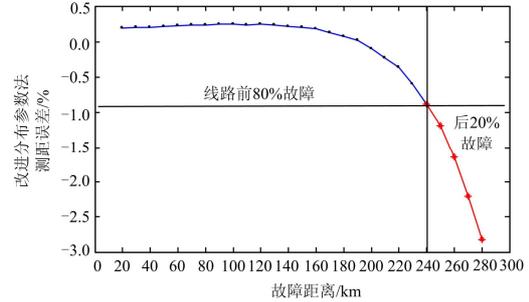


图 4 不同故障位置的改进分布参数法测距误差

Fig. 4 The improved distributed parameter fault location errors of different fault distances

可见,改进分布参数法具有明显的故障位置分布规律,据此可得到窗口长度随故障位置变化的故障距离窗口为

$$X = [D - \varepsilon L, D + \varepsilon L] \quad (3)$$

$$\begin{cases} D \leq \mu L \text{ 时, } \varepsilon = \varepsilon_1 \\ D > \mu L \text{ 时, } \varepsilon = \varepsilon_2 \end{cases} \quad \text{其中, } \varepsilon_1 < \varepsilon_2 \quad (4)$$

式(3)中:  $D$  为改进的分布参数法定位结果;  $\varepsilon$  为定位误差。式(4)中:  $\mu$  为线路长度百分比;  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  为不同故障距离时的定位误差;  $\mu$ 、 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  三者取值需依据实际系统情况与故障情况确定。

变长故障距离窗可转换为时域上两个变长时窗,转换如式(5)。

$$\begin{cases} T_1 = [t_0 + \frac{2(D - \varepsilon L)f}{v}, t_0 + \frac{2(D + \varepsilon L)f}{v}] \\ T_2 = [t_0 + \frac{2(L - D - \varepsilon L)f}{v}, t_0 + \frac{2(L - D + \varepsilon L)f}{v}] \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $t_0$  为初始故障行波到达测量端的时刻对应的采样点;  $T_1$  为第一个故障点反射波对应的采样点窗口;  $T_2$  为第一个对端母线反射波对应的采样点窗口;  $f$  为行波采样频率;  $v$  为行波波速。

## 2 基于可变时窗的行波波头辨识

单端行波法关键在于对反射波的准确辨识。在故障窗口给定的条件下,反射波的辨识被限定在特定区间内,此时在给定窗口内的行波波头辨识成为单端测距的重要步骤。

### 2.1 故障行波的折反射分析

如图 5 所示,输电线路 MN 的 F 点于  $t_0$  时刻发生故障。M 端检测到的初始电流行波  $i_0(t)$ 、第一个故障点反射波  $i_1(t)$ 、第一个对端母线反射波  $i_2(t)$  可

表达为

$$\begin{cases} i_0(t) = (1 + \rho_M) i_b(t - t_0 - \tau_{MF}) \\ i_1(t) = \rho_M \rho_F (1 + \rho_M) i_b(t - t_0 - 3\tau_{MF}) \\ i_2(t) = \rho_N \gamma_F (1 + \rho_M) i_f(t - t_0 - \tau_{MF} - 2\tau_{NF}) \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\rho_M$ 、 $\rho_N$ 、 $\rho_F$  分别为电流行波在 M、N、F 处的反射系数； $\gamma_F$  为电流行波在 F 处的折射系数； $\tau_{MF}$ 、 $\tau_{NF}$  分别为电流行波在 MF 和 NF 线路段的传播时间； $i_b$ 、 $i_f$  分别为故障时刻故障点产生的沿线路  $\vec{FM}$  和  $\vec{FN}$  方向传播的故障电流行波。其中， $\rho = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$ ， $\gamma = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$  [16]， $Z_1$ 、 $Z_2$  分别是不连续点前后线路波阻抗；显然  $(1 + \rho_M) > 0$ 。

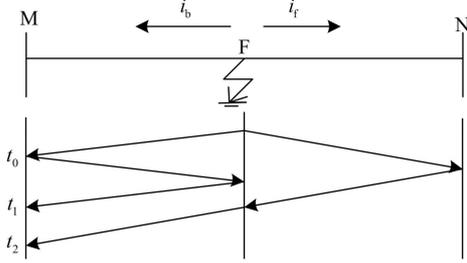


图 5 故障行波的折反射

Fig. 5 Refraction and reflection of fault traveling wave

设故障点 F 存在过渡电阻值为  $R_F$ ，则阻抗不连续点后的等效特征阻抗为

$$Z_2 = Z_1 // R_F \quad (7)$$

可见， $Z_2 < Z_1$ ，故  $\rho_F > 0$ ， $\gamma_F > 0$ ，那么 M 端检测到的电流行波的极性与母线处的反射系数  $\rho_M$ 、 $\rho_N$  有关，因此， $i_1(t)$ 、 $i_2(t)$  分别与  $i_0(t)$  的相对极性取决于故障线路两端母线的接线方式（下文提到的同极性、反极性均是相对初始故障行波的极性而言）。

## 2.2 可変时窗内的行波波头辨识

基于反射波极性与母线结构的分析，对于不同接线结构，有以下行波波头辨识方法，其中母线接线方式如图 6 所示，M 端母线总出线数为  $m$ ，N 端母线总出线数为  $n$ ，带变压器出线不计入母线总出线数。

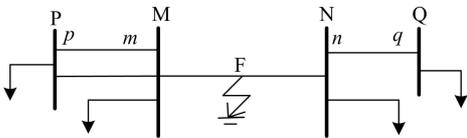
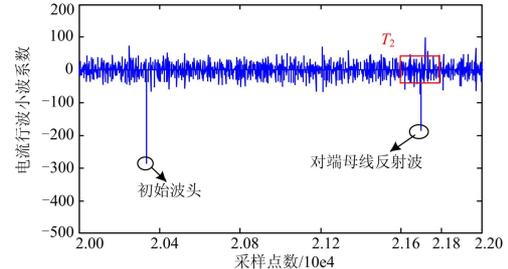


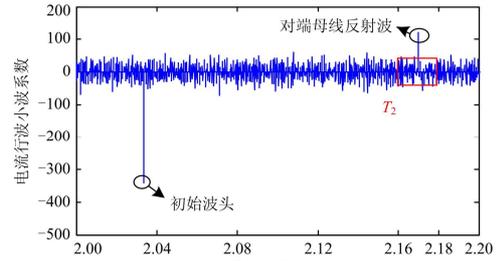
图 6 母线接线结构图

Fig. 6 Bus connection diagram

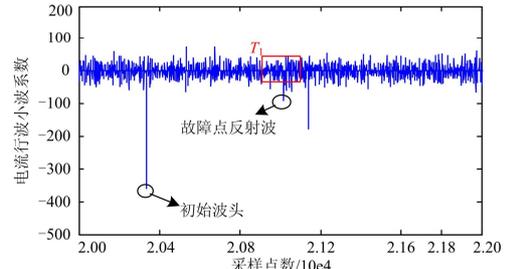
1) 对于时窗  $T_1$ 、 $T_2$  仅其中一个窗口存在明显反射波的接线方式，直接利用该窗口内对应极性的奇异性最强的波头作为定位波头。如图 7(a)、图 7(b) 所示， $m=2$ 、 $n=1$ ， $m=2$ 、 $n>2$  类型线路在  $T_2$  内分别



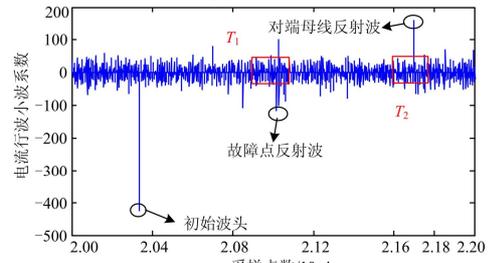
(a)  $m=2$ 、 $n=1$  结构



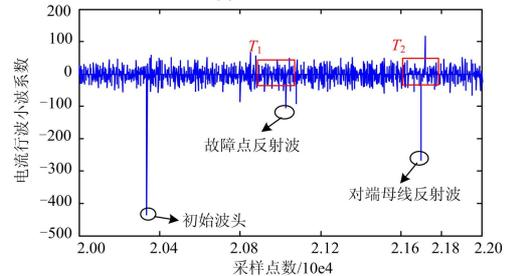
(b)  $m=2$ 、 $n>2$  结构



(c)  $m>2$ 、 $n=2$  结构



(d)  $m>2$ 、 $n>2$  结构



(e)  $m>2$ 、 $n=1$  结构两窗口不相交

图 7 不同接线结构各窗口内波形

Fig. 7 Window waveforms of different line structures

选择同极性和反极性的绝对模极大值最大的波头作为对端母线反射波,  $m>2, n=2$  类型线路在  $T_1$  内选择同极性的绝对模极大值最大的波头作为故障点反射波, 如图 7(c)所示。

2) 对于时窗  $T_1, T_2$  二者均存在明显反射波的接线方式, 即  $m>2, n>2$  与  $m>2, n=1$  类型线路, 若两窗口无交集, 利用各自窗口内对应极性的奇异性最强的波头作为定位波头, 如图 7(d)、7(e)所示。

若两窗口相交, 即  $D \in [\frac{L}{2} - \varepsilon L, \frac{L}{2} + \varepsilon L]$  时, 有以下分析:

$m>2, n>2$  类型的接线方式, 两端母线反射系数均为正值, 故  $T_1, T_2$  内故障点反射波和对端母线反射波极性相反, 可利用极性辨识波头。

$m>2, n=1$  类型的接线方式, 测量端母线反射系数为正值, 对端母线反射系数为负值, 则  $T_1, T_2$  内故障点反射波和对端母线反射波极性相同, 极性判别方法失效, 需利用行波的奇异性实现波头辨识。行波传输过程中奇异性的衰减主要受传输长度和故障点过渡电阻影响, 对端  $n=1$  的结构导致 N 处电流行波发生全反射, 然而近 M 端故障时, 故障点反射波传输距离短于对端母线反射波, 对端母线反射波的传播衰减更大, 故不能直接比较二者的奇异性强弱, 需进一步考虑过渡电阻值对行波衰减的影响。现针对该线路结构利用 ATP 构建 500 kV 输电系统仿真模型, 故障线路 MN 长 300 km, 设置在  $T_1, T_2$  存在交集条件下近 M 端在不同过渡电阻时故障, 三波头的奇异性变化如图 8 所示, 其中, 波头 1、2、3 分别为初始行波、第一个故障点反射波和第一个对端母线反射波。

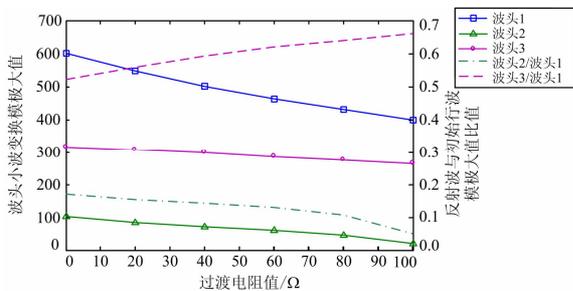


图 8 波头奇异性大小与过渡电阻值关系图

Fig. 8 Relationship between wave singularity and fault resistance

图 8 表明, 对端母线反射波的奇异性始终远强于故障点反射波, 且二者差异随故障电阻值的增加而扩大。据此, 判定  $T_1, T_2$  两窗口合集范围内奇异性最强的同极性波头为对端母线反射波, 如图 9 所示。

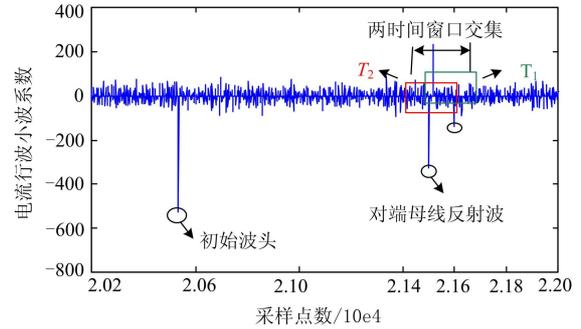


图 9  $m>2, n=1$  结构两窗口有交集

Fig. 9  $m>2, n=1$ : two overlapped windows

### 2.3 相邻母线反射波干扰时的数据预处理

如图 6 所示, M 端、N 端相邻母线分别为 P、Q, 母线总出线数分别为  $p, q$ , 相应线路长度分别为  $|MP|, |NQ|$ 。若相邻母线反射波出现在故障线路窗口  $T_1, T_2$  内, 且与窗口内待辨识波头极性相同, 则将此相邻母线反射波定义为相邻线路干扰波头。

相邻线路干扰波头的极性与相邻母线的接线方式有关, 表 1 给出了不同线路结构下相邻线路干扰波对故障线路对应窗口内波头辨识的影响。

表 1 相邻线路干扰波对故障线路对应窗口的影响

Table 1 Impact of the interference wave from adjacent

bus on corresponding window			
干扰侧接线结构	干扰侧线路长度	受影响的接线类型	受影响的时间窗口
$p>2$	$ MP  \in [D - \varepsilon L, D + \varepsilon L]$	$m>2, n>2$	$T_1$
		$m>2, n=2$	$T_1$
		$m>2, n=1$	$T_1$
$p=1$	$ MP  \in [L - D - \varepsilon L, L - D + \varepsilon L]$	$m>2, n=1$	$T_2$
		$m=2, n=1$	$T_2$
$q=1$	$ NQ  \in [2D - L - \varepsilon L, 2D - L + \varepsilon L]$	$m>2, n>2$	$T_2$
		$m=2, n=2$	$T_2$

获得变长时窗后, 测量端结合表 1 检查是否存在满足产生干扰波头条件的相邻线路。若存在, 有以下处理对策: 确定受影响的时间窗口, 根据干扰线路长度, 确定干扰波到达测量端母线的时刻对应的采样点, 锁定与该采样点最近且与窗口内待辨识波头极性相同的波头, 将此波头对应的小波模极大值置零。极端情况下, 干扰波头可能与待辨识波头重合, 置零操作会湮没定位波头, 但改进分布参数法定位窗口仍可保证测距结果的可靠性与精度。

### 3 算法实现

- 1) 在线估计对端系统阻抗。
- 2) 改进的分布参数法给出定位结果  $D$ , 计算可

变的故障距离窗口  $X$ 。

3) 对故障后电流线模进行小波变换及模极大值计算,检测故障初始行波到达测量端的时刻对应采样点数  $t_0$ ,计算变长时窗  $T_1$  和  $T_2$ 。

4) 检测存在相邻线路干扰波的条件是否成立,若成立,排除干扰波影响。

5) 根据线路结构和故障情况,采用不同的波头辨识策略,得到采样点  $t_1$  或  $t_2$ ,确定构建测距方程的定位波头。

6) 若定位波头为故障点反射波,测距结果为

$$x = \frac{(t_1 - t_0)v}{2f} \quad (8)$$

若定位波头为对端母线反射波,测距结果为

$$x = L - \frac{(t_2 - t_0)v}{2f} \quad (9)$$

若波头检测失败,测距结果为改进分布参数法定位结果  $D$ 。

本文算法流程图如图 10 所示。

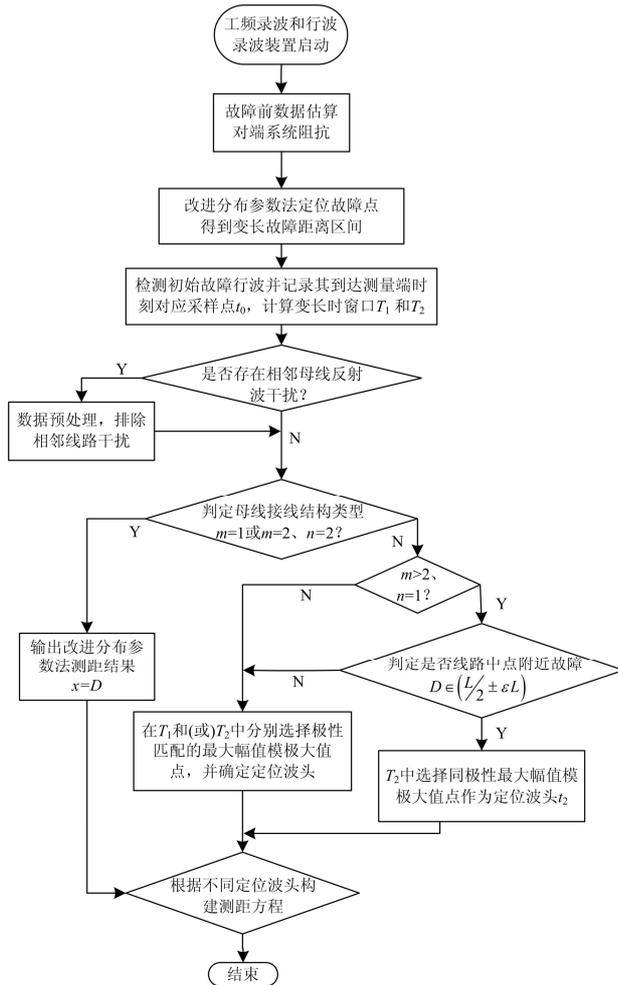


图 10 算法流程图

Fig. 10 Flowchart of the algorithm

## 4 仿真验证及分析

### 4.1 改进分布参数法

利用 ATP 构建 500 kV 输电线路仿真模型,见图 11。线路 MN 长度为 300 km,故障时刻为 0.2 s,工频采样频率为 20 kHz。改变对端负载  $S_2$  模拟对端系统运行方式变化,故障前几个周波内改变测量端 M 上级线路在母线处的负载值  $S_1$ ,模拟上级线路小扰动,获取 MN 线路测量端的多组数据,据此估计对端系统阻抗。表 2 给出了对端系统运行方式改变时,基于对端系统阻抗估计的改进分布参数法对于不同故障距离、过渡电阻情况下的定位误差。

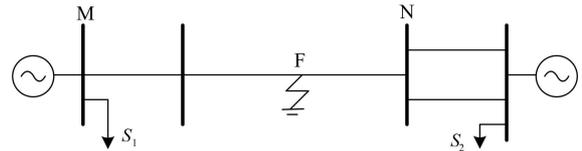


图 11 输电线路仿真模型

Fig. 11 Simulation model of transmission line

表 2 改进分布参数法定位误差

Table 2 Fault location error of the improved distributed parameter method

过渡电阻/ $\Omega$	故障距离/km						%
	30	90	150	210	240	270	
0	-0.25	-0.294	0.376	0.691	1.272	2.133	
30	0.073	0.106	0.137	0.250	0.647	1.405	
100	0.204	0.226	0.352	0.585	0.943	2.218	
300	0.139	0.210	0.279	0.563	1.330	1.806	

表 2 显示,改进的分布参数法对于对端系统运行方式变化不敏感,定位结果准确性、可靠性满足要求。在此基础上验证本文算法的有效性。

### 4.2 可変时窗内的行波辨识及定位

为了体现算法对各种母线接线方式的适用性,本文分别建立 5 种母线结构的 500 kV 输电线路仿真模型(模型一至五的接线方式分别为:  $m=2, n=1$ ,  $m=2, n>2$ ,  $m>2, n=1$ ,  $m>2, n=2$ ,  $m>2, n>2$ ),如图 6 所示,故障线路 MN 长度为 300 km, M 端为测量端,五种模型仅母线结构存在差异,MP、NQ 长度均为 300 km。故障时刻为 0.01 s,工频采样频率为 20 kHz,采样 0.2 s;行波采样频率为 1 MHz,采样 0.02 s,行波线模波速为 0.294 km/ $\mu$ s。对线路 MN 分别设置近端故障、中点附近故障、远端高阻故障且每种故障类型均对五种模型进行仿

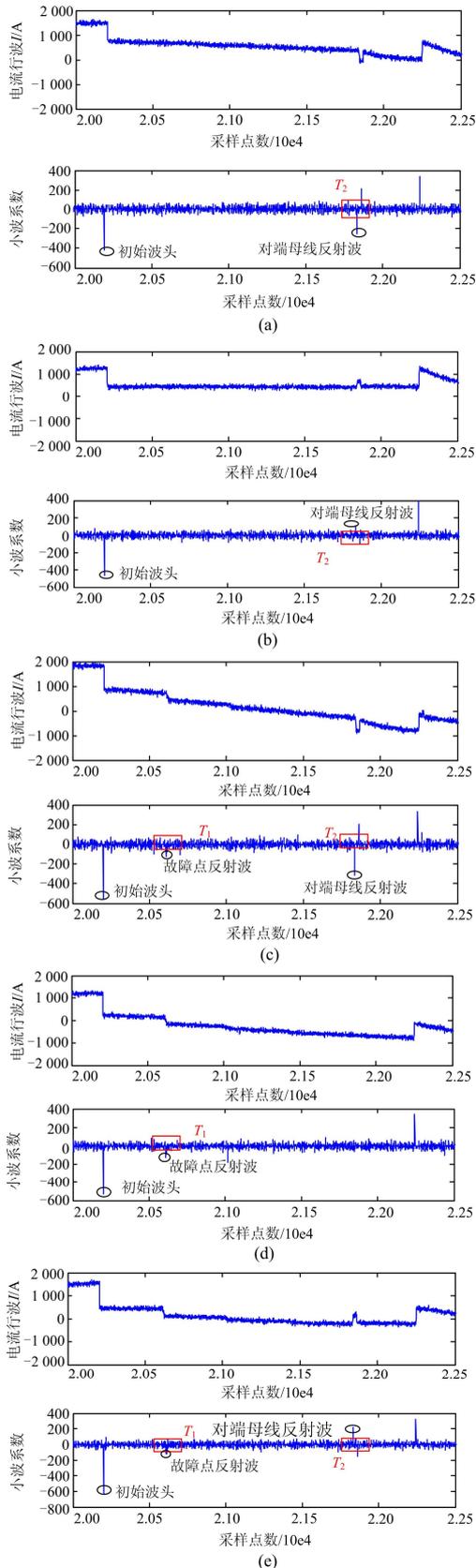


图 12 60 km 处故障时数据处理

Fig. 12 Simulation results of fault at 60 km

真；设置模型五存在相邻线路干扰的情况校验数据预处理效果。

算例 1：线路 MN 近端 60 km 处发生故障，过渡电阻值  $20 \Omega$ ，行波中包含 5% 噪声。近端故障时，改进分布参数法定位较精确，令其误差  $\varepsilon=0.03$ 。五种线路结构的故障电流行波及小波变换系数如图 12(a)~12(e)所示，测距结果如表 3 所示。

表 3 近区低阻故障时测距结果

Table 3 Fault location results of fault at near region with low fault resistance

测距结果	模型一	模型二	模型三	模型四	模型五
改进分布参数法/km	58.468	58.631	58.723	61.978	58.815
本文算法/km	59.802	59.802	59.802	60.205	59.802
相对误差/%	-0.066	-0.066	-0.066	0.102	-0.066

算例 2：线路中点附近故障。线路 MN 距 M 端 158 km 处发生故障，过渡电阻值  $30 \Omega$ ，行波中包含 7% 噪声。非末端故障时，改进分布参数法定位较精确，令其误差  $\varepsilon=0.05$ ，那么  $T_1$ 、 $T_2$  两窗口存在交集，模型一至模型五的测距结果如表 4 所示。

表 4 线路中区故障测距结果

Table 4 Fault location results of fault in the middle region

测距结果	模型一	模型二	模型三	模型四	模型五
改进分布参数法/km	154.141 9	156.633 1	156.822 7	160.353 6	157.502 7
本文算法/km	157.851	157.998	157.851	158.172 0	157.851
相对误差/%	-0.049 7	-0.001	-0.049 7	0.057 3	-0.049 7

算例 3：线路 MN 末端 275 km 处发生高过渡电阻故障，过渡电阻值  $100 \Omega$ ，行波中包含 7% 噪声。末端故障时，改进分布参数法定位窗口偏大，令其误差  $\varepsilon=0.06$ 。五种线路结构模型的测距结果见表 5。

算例 4：调整模型五中相邻线路长度：MP、NQ 长度均为 100 km。线路 MN 距 M 端 205 km 处发生故障，过渡电阻值  $20 \Omega$ ，行波中包含 7% 噪声。两时窗内故障行波小波变换模极大值见图 13。

由图 13 可以看出，在此接线类型和故障条件下，时窗  $T_1$  和  $T_2$  内分别出现来自 Q 端母线和 P 端母线的干扰波头。不考虑相邻线路影响时，测距结果为 199.893 km，误差 5.107 km，利用本文方法对相邻线路影响进行处理后，测距结果为 204.891 km，误差 0.109 km，相对误差 0.036%。

表 5 末端高阻故障测距结果  
Table 5 Fault location results of fault at the terminal  
with high fault resistance

测距结果	模型一	模型二	模型三	模型四	模型五
改进分布参数法/km	283.371 2	263.054 5	270.905 1	288.780 4	269.053 8
本文算法/km	275.010 0	275.010 0	275.231 0	275.441	275.010 0
相对误差/%	0.003	0.003	0.077	0.147	0.003

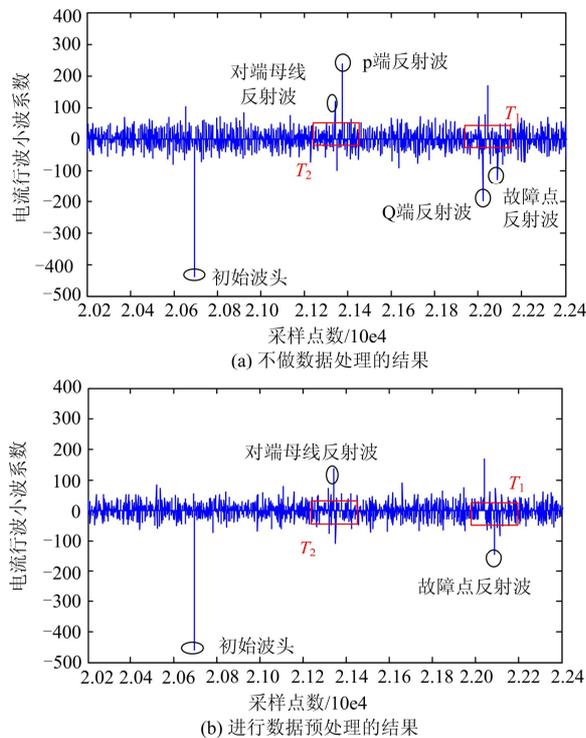


图 13 存在相邻线路干扰时的处理结果

Fig. 13 Results with existence of interference wave from adjacent lines

综上所述, 算法对于各种线路结构具有通用性, 且测距精度较高。模型一、二测量端母线有两条出线, 故障点反射波微弱, 算法依靠对端母线反射波区间  $T_2$  测距, 测距结果较精确。模型四由于没有明显的对端母线反射波, 仅依靠窗口  $T_1$  测距, 在高阻故障时, 故障点反射波较弱, 算法误差较其余模型略大, 在 0.2% 以内。相邻母线反射波造成干扰时, 数据预处理的操作可消除干扰影响, 明显提高测距精度。

## 5 结论

针对现场波形复杂、接线方式多样导致的行波

波头难以准确辨识的问题, 本文提出一种基于可变量波辨识时窗的单端故障定位方法。基于对端系统阻抗在线估计的改进分布参数法能够提高工频定位结果的准确性, 并有效改善误差的稳定性; 通过提取其误差分布规律, 得到长度可变的行波辨识时窗, 能够提升行波辨识的抗干扰能力; 初始故障行波与后续反射波的相对极性取决于故障线路的母线接线方式, 通过分析其特征规律, 可实现不同接线方式下特定时间窗口内行波波头的准确辨识, 以及定位波头的筛选。

仿真验证结果表明, 本文所提方法不受母线接线结构、故障位置、过渡电阻、系统运行方式等因素影响, 能有效提升组合方法可靠水平, 定位精度高, 具有一定工程应用价值。

## 参考文献

- [1] THOMPSON A. A new transmission line fault locating system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(4): 498-503.
- [2] 范新桥, 朱永利, 卢伟甫. 基于 EMD-TEO 的输电线路行波故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 8-17.  
FAN Xin-qiao, ZHU Yong-li, LU Wei-fu. Traveling wave based fault location for transmission lines based on EMD-TEO[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 8-17.
- [3] 梁睿, 靳征, 刘建华. 基于故障特征频率的单端行波测距新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 7-13.  
LIANG Rui, JIN Zheng, LIU Jian-hua. A new single-ended traveling fault location method based on characteristic frequency[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 7-13.
- [4] SPOOR D, JIAN Guo-zhu. Improved single-ended traveling-wave fault-location algorithm based on experience with conventional substation transducers[J]. Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1714-1720.
- [5] 徐丙垠, 李京, 陈平, 等. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62-65.  
XU Bing-yin, LI Jing, CHEN Ping, et al. Modern fault location techniques based on fault generated traveling waves and their applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 62-65.
- [6] 张峰, 梁军, 李建超, 等. 基于初始反极性行波检测的单端故障测距算法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 108-113.  
ZHANG Feng, LIANG Jun, LI Jian-chao, et al. Single ended fault location algorithm based on detection of initial reverse polarity traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 108-113.
- [7] 覃剑. 输电线路单端行波故障测距的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 65-70.

- QIN Jian. Study on single terminal traveling wave fault location of transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 65-70.
- [8] 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. Research of combined traveling wave's fault location method on transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 82-86.
- [9] 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, 31(23): 65-69.  
LU Ji-ping, LI Ying, LI Jian, et al. Non-communication fault locating of transmission line based on traveling wave and impedance method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 65-69.
- [10] 郑秀玉, 丁坚勇, 黄娜, 等. 输电线路单端故障定位的阻抗-行波组合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 18-21.  
ZHENG Xiu-yu, DING Jian-yong, HUANG Na, et al. Impedance-traveling wave assembled algorithm of one-terminal fault location for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 18-21.
- [11] DONG X Z, SHI S X, CUI T, et al. Optimizing solution of fault location using single terminal quantities[J]. Science in China: Series E: Technological Sciences, 2008, 51(6): 761-772.
- [12] JOHNS A T, JAMALI S. Accurate fault location technique for power transmission lines[J]. IEE Proc, 1990, 137(6): 395-402.
- [13] 霍爽. 高压输电线路故障测距算法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- HUO Shuang. Research on fault location algorithm for HV transmission lines[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [14] 中国电力科学研究院. DL/T 553-94 220~500 kV 电力系统故障动态记录技术准则[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.  
China Electric Power Research Institute. DL/T 553-94 220~500 kV technical criteria for dynamically recording malfunctions of 220~500 kV electric power system[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995.
- [15] 姚李孝, 姚金雄, 安源. 基于 Matlab/Simulink 的高压输电线路故障定位的仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 53-56.  
YAO Li-xiao, YAO Jin-xiong, AN Yuan. Fault location simulation for high voltage power transmission line based on Matlab/Simulink[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 53-56.
- [16] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.  
GE Yao-zhong. New types of protective relaying and fault locations: their theories and techniques[M]. Second Edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007.

---

收稿日期: 2014-03-14

作者简介:

牛睿(1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行控制与故障测距;

梁军(1956-), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: liangjun@mail.sdu.edu.cn

张峰(1983-), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统运行与控制。