



中国电机工程学报  
*Proceedings of the CSEE*  
ISSN 0258-8013, CN 11-2107/TM

## 《中国电机工程学报》网络首发论文

题目: 基于沿线行波突变的双回线路单端测距  
作者: 束洪春, 宋晶, 田鑫萃  
DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.180742  
网络首发日期: 2019-05-23  
引用格式: 束洪春, 宋晶, 田鑫萃. 基于沿线行波突变的双回线路单端测距[J/OL]. 中国电机工程学报. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.180742>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.180742

# 基于沿线行波突变的双回线路单端测距

束洪春, 宋晶, 田鑫萃\*

(昆明理工大学电力工程学院, 云南省 昆明市 650051)

## Single ended fault location of double circuit lines based on traveling wave saltation along the line

SHU Hongchun, SONG Jing, TIAN Xincui

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, Yunnan Province)

**ABSTRACT:** The key of single ended traveling wave location is the identification of the reflected wave of fault point (or the reflected wave of end bus). The traditional traveling wave fault location method only uses the one dimension time information which caused by fault traveling wave, and the fault traveling wave is not easy to detect and identify for the traveling wave data which is rich in the interfere. The one-dimensional information of fault traveling wave in time domain of the reverse current wave for double circuit lines is mapped to the abrupt change caused by superposition of forward traveling wave and backward traveling wave. According to the relationship between the saltation point and the fault location, and the time constraints and length constraints satisfied, the saltation points that reflect the position of the fault and reflect the dual position are identified, and the fault location result is obtained. A large number of measured data show that: The range affected by the reflected wave from the sound line positioned the measuring end of the fault location algorithm is less than the traditional single end traveling wave algorithm, and the "detection function" can be adapted to different fault conditions by the fault signal itself, so the fault traveling wave can be identified more easily, and the single end automatic traveling wave fault location for double circuit lines is realized.

**KEY WORDS:** Double circuit line; Single end traveling wave fault location; Directional traveling wave; Saltation point; Reverse direction traveling wave; Fault location function

**摘要:** 单端行波测距的关键是故障点反射波(对端母线反射波)的辨识, 而传统的行波测距仅利用了故障行波到达量测端的一维时刻信息, 对于富含干扰的实测故障行波数据, 故障行波不易检测辨识。基于此, 将双回线路的反向量电流行波一维的波到时刻的信息映射到沿线长维度上正向行波与反向行波形成的突变, 根据行波突变点与故障位置的关系以及所满足的时间约束和长度约束, 辨识出反映故障位置和反映对偶位置的突变点, 进而得到故障距

离。大量的实测数据表明: 该测距算法受量测端健全线路末端反射波影响的范围小于传统单端行波测距, 且由故障信号本身构造“检测函数”可以适应不同的故障条件, 更易辨识出故障行波, 实现双回线路单端自动化行波测距。

**关键词:** 双回线路; 单端测距; 方向行波; 突变点; 反向量行波; 测距函数

## 引言

行波测距以其测距算法简单、测距精度高等优势, 已经广泛应用于电网实际中。但从现场实际运用行波测距的效果来看, 仍存在问题需要解决。尤其对于单端行波测距, 故障行波波头的可靠检测、有效表征、可靠辨识以及精确标定仍然没有得到很好的解决, 错标和漏标波头的情况, 经常发生<sup>[1-6]</sup>。为了准确的检测和标定出故障点反射波或对端母线反射波, 国内外学者对此进行大量的研究<sup>[7-15]</sup>, 提出了采用求导、相关分析<sup>[7]</sup>标定故障行波, 但求导对噪声敏感、可靠性较差, 而相关分析难以选择合适的时窗。小波变换有着严密、坚实的数学基础, 其特有的多分辨率和局部时频化的特点使其成为最成熟有效的行波检测标定方法<sup>[8,9]</sup>。同时, 形态学<sup>[10]</sup>、希尔伯特黄变换(HHT)<sup>[10,11]</sup>、TT变换<sup>[12]</sup>以及自适应推广卡尔曼滤波方法<sup>[13]</sup>等多种信号处理方法应用到故障行波波头的检测和标定, 取得一定的成果。但是这些方法对实录高频故障初始行波后续波头检测和标定的结果却不尽人意。文献<sup>[14,15]</sup>从数字图像处理角度实现行波波头到达时刻和极性检测和标定, 改善了现场实际故障行波检测和标定效果。上述的这些方法仅利用了故障行波到达量测端的一维时刻信息, 在剔除量测端健全线路末端反射波时往往需要知道健全线路全长或者借助其他线路的故障信息; 在检测和辨识故障点反射波(或对

端母线反射波)时,需要引入性能优秀的信号处理方法。

本文是将传统一维的波到时刻信息,映射到沿线长维度上正向行波与反向行波叠加形成的行波突变,得到行波突变与故障位置的关系,并结合时间信息提出一种新型单端测距。双回线路中,采用两回线路相减构造得到的反向量(环流量)电流行波计算方向行波时无需引入电压行波,且反向量电流行波中不含有健全线路末端反射波,故障点反射波和对端母线反射波易于识别的特点,融合上述两个提点提出了基于沿线行波突变的双回线路单端测距。该测距算法中,受量测端健全线路影响的范围小于传统单端测距,由故障信号本身构造“检测函数”,无需引入额外的信号处理方法,且可以适应不同的故障条件,更易辨识出故障行波,实现故障测距。

## 1 行波突变点与位置、时间的映射关系

同塔双回线不仅相间存在耦合,线间也存在耦合。首先可以采用如式(1)所示同向量和反向量将 I 回线和 II 回线进行解耦得到

$$\begin{cases} u_{TA,B,C} = (u_{IA,B,C} + u_{IIA,B,C})/2 \\ u_{FA,B,C} = (u_{IA,B,C} - u_{IIA,B,C})/2 \end{cases} \quad (1a)$$

$$\begin{cases} i_{TA,B,C} = (i_{IA,B,C} + i_{IIA,B,C})/2 \\ i_{FA,B,C} = (i_{IA,B,C} - i_{IIA,B,C})/2 \end{cases} \quad (1b)$$

然后采用 Karrenbauer 相模变换以消除其非对角元素,得到同向量和反向量的 0 模、 $\alpha$  模、 $\beta$  模的模量。这样,存在耦合关系的均匀换位同塔双回线路实现了完全解耦<sup>[16]</sup>。现假设同塔双回线路中单回线路发生接地故障,采用如图 1 所示的行波网络图描述反向量行波于故障点以及母线端等阻抗不连续点的折反射规律。反向量行波中不含有反应量测端(M 端)健全线路全长的反射波,其健全线路末端反射波形成的正向行波沿全线长范围内不会与反向行波叠加形成突变点,但反向量中含有对端(N 端)健全线路末端反射波,因此 N 端健全线路末端反射波形成的反向行波会与 M 端正向行波叠加形成突变点。半线长内故障下,突变点沿线分布结果图 1 所示。

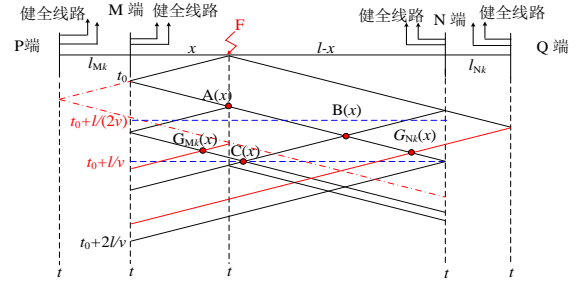


图 1 故障位于半线长之内行波突变点沿线分布  
Fig. 1 The Distribution of Traveling Wave Catastrophe Points along the Line under the fault located within the half line length of the line

由图 1 可知,当故障位于半线长之内,于 $[t_0, t_0+l/(2v)]$ 时窗,在线长 $[0, l/2]$ 范围内,由 M 端起始的正向行波遇到阻抗不连续点(故障点)会发生行波叠加,形成 A(x)突变点,其表达式为

$$u_A(t) = \underbrace{u_M^+(t-x/v)}_{\text{前行波}} + \underbrace{\beta_{Fu} \times u_M^+(t-x/v)}_{\text{反向波}} \quad (2)$$

式(2)中, $u_M^+(t)$ 为量测端 M 处的正向电压行波,且 $u_M^+(t) = \beta_{Mu} u_f(t-x/v)$ ,  $u_f(t)$ 为故障起始电压行波,  $\beta_{Mu}$ 和 $\beta_{Fu}$ 分别为电压行波于 M 端和故障点的反射系数,且 $\beta_{Mu} = \frac{1-n_M}{1+n_M} < 0$ ,  $\beta_{Fu} = \frac{R_f - Z_c}{R_f + Z_c} < 0$ ,  $n_M$ 为 M 端的出线数目。可见,故障突变点 A(x)处是正向行波和反向行波以相反的极性叠加,且 $A(x)=x_f$ 。

正向行波继续沿线路 MN 前行,于 $[t_0+l/(2v), t_0+l/v]$ 时窗,在线长 $[l/2, l]$ 范围内,遇到由 N 端起始的反向行波发生行波叠加,形成 B(x)突变点,其表达式为

$$u_B(t) = \underbrace{\alpha_{Fu} u_M^+(t-(l-x)/v)}_{\text{前行波}} + \underbrace{u_N^-(t-x/v)}_{\text{反向波}} \quad (3)$$

式(3)中, $u_N^-$ 为对端母线 N 的反向电压行波,且 $u_N^-(t) = \beta_{Nu} \times u_f(t-(l-x)/v)$ ,  $\beta_{Nu}$ 为电压行波于 N 端的反射波系数,  $\alpha_{Fu}$ 为电压行波于故障点的折射系数,且 $\alpha_{Fu} = \frac{2R_f}{R_f + Z_c}$ ,  $\beta_{Nu} = \frac{1-n_N}{1+n_N}$ , 故正向行波 $\alpha_{Fu} u_M^+(t-(l-x)/v) < 0$ , 反向行波 $u_N^-(t-x/v) < 0$ 。可见,对偶故障点 B(x)处正向行波和反向行波以相同的极性叠加,且 $B(x)=l-x_f$ 。

故障点反射波沿线路 MP 前行遇到 M 端健全线路经 P 端反射后又经故障点反射形成的反向行波叠加,形成 G<sub>Mk</sub>(x)突变点,其表达式为

$$u_{G_{Mk}}(t) = \underbrace{u_M^{+}(t-l_{Mk}/v)}_{\text{前行波}} + \underbrace{\beta_{Fu} \times u_P^{+}(t-(2x-l_{Mk})/v)}_{\text{反行波}} \quad (4)$$

式(4)中,  $u_M^{+}(t) = \beta_{Mu} \beta_{Fu} u_M^{+}(t-2x)$ ,  $u_P^{+} = \alpha_{Mu}^2 \beta_{Fu} u_f(t-(x+2l_{Mk})/v)$ 。由于  $\beta_{Fu} < 0$ , 且  $u_M^{+}(t-2x) < 0$ , 可知  $u_M^{+} < 0$ 。  $\beta_{Pu}$  取决于健全线路末端的接线形式, 若健全线路末端为多出线的母线形式, 则  $\beta_{Pu} < 0$ ,  $u_P^{+}(t) < 0$ , M 端健全线路末端反射波与故障点反射波形成的正向行波以相反的极性叠加, 且  $G_{Mk}(x) = l_{Mk}$ ; 若健全线路末端为第 III 类母线接线形式, 则  $\beta_{Pu} > 0$ ,  $u_P^{+}(t) > 0$ , 健全线路末端反射波与故障点反射波形成的正向行波以相同的极性叠加, 且  $G_{Mk}(x) = l_{Mk}$ 。

正向行波继续沿 MQ 前行, 遇到健全线路经 Q 端反射后形成反向行波叠加, 形成  $G_{Nk}(x)$  突变点, 其表达式为

$$u_{G_{Nk}}(t) = \underbrace{\alpha_f u_M^{+}(t-(l-x+l_{Nk})/v)}_{\text{前行波}} + \underbrace{u_Q^{-}(t-(x-l_{Nk})/v)}_{\text{反行波}} \quad (5)$$

式(5)中,  $u_Q(t) = \beta_{Qu} \alpha_{Nu}^2 \times u_f(t-(l-x-2l_{Nk})/v)$   $\beta_{Qu}$  为 N 端健全线路末端反射系数, 若 N 端健全线路末端为多出线的母线形式, 则  $\beta_{Qu} < 0$ ,  $\beta_{Qu} \alpha_{Nu}^2 \times u_f(t-(l-x-2l_{Nk})/v) < 0$ , N 端健全线路末端反射波与 M 端正向行波以相反的极性叠加; 若 N 端健全线路末端为第 III 类母线接线形式, 则  $\beta_{Qu} > 0$ ,  $\beta_{Qu} \alpha_{Nu}^2 \times u_f(t-(l-x-2l_{Nk})/v) > 0$ , N 端健全线路末端反射波与 M 端正向行波以相反的极性叠加, 且  $G_{Nk}(x) = l-x_f+l_{Nk}$ 。

在  $t_0+l/v$  时刻, 经故障点反射的正向行波遇到由 N 端起始的反向行波发生行波叠加, 形成 C(x) 突变点, 其表达式为

$$u_C(t) = \underbrace{u_M^{+}(t-(l-2x)/v)}_{\text{前行波}} + \underbrace{u_N^{-}(t-(l-2x)/v)}_{\text{反行波}} \quad (6)$$

式(6)中,  $u_M^{+} = \beta_{Fu} \times \beta_{Mu} \times u_M^{+}(t-x/v)$ 。由式(6)可知, C(x) 突变点是正向行波和反向行波以相同的极性叠加, 且  $C(x) = l-2x_f$ 。

由上述分析可知, 当故障位于半线长之内, 在  $[t_0, t_0+l/v]$  时窗, 在线长  $[0, l]$  范围内, 正向行波与反向行波叠加形成的突变点的极性和反应的位置如表 1 所示。

表 1 故障位于半线长之内突变点的极性与反映的位置

Tab.1 The polarity of the saltation point and the position represented by the saltation point under fault is located within the half length of the line

突变点	极性	时窗范围	距离范围	反映的距离
A(x)	-	$[t_0, t_0+l/(2v)]$	$[0, l/2]$	$x_f$
B(x)	+	$[t_0+l/(2v), t_0+l/v]$	$[l/2, l]$	$l-x_f$

$G_{Mk}(x)$	-/+	——	——	$l_{Mk}$
$G_{Nk}(x)$	+/-	——	——	$l-x_f+l_{Nk}$
$C(x)$	+	$t_0+l/v$	$[0, l]$	$l-2x_f$

通过上述分析可得到如下结论: 当故障位于半线长之内, A(x) 突变点位于  $[t_0, t_0+l/(2v)]$  时窗,  $[0, l/2]$  线长范围内, 而 B(x) 突变点位于  $[t_0+l/(2v), t_0+l/v]$  时窗,  $[l/2, l]$  线长范围内, 且  $A(x)+B(x)=l$ ; 于  $t_0+l/v$  时刻, 有 C(x) 突变点, 且  $C(x)=l-2x_f$ ; 于时间轴上观测突变点可知, 表征故障位置的 A(x) 突变点会先于 M 端健全线路干扰突变点  $G_{Mk}(x)$ , 表征对偶故障 B(x) 的突变点也会先于 N 端健全线路干扰突变点  $G_{Nk}(x)$ ; 干扰突变点  $G_{Mk}(x)$  和  $G_{Nk}(x)$  是否能够进入  $[t_0, t_0+l/(2v)]$  和  $[t_0+l/(2v), t_0+l/v]$  判断分析窗, 取决于健全线路的长度。

现假设  $G_{Mk}(x)$  突变点分布于  $[t_0, t_0+l/(2v)]$  时窗,  $[0, l/2]$  线长范围内, 则需满足

$$\text{时间约束: } \frac{2x_f + l_{Mk}}{v} < \frac{l}{v} \quad (7)$$

$$\text{长度约束: } l_{Mk} < \frac{l}{2}, l_{Mk} < x_f < \frac{l}{2} \quad (8)$$

由式(7)和(8)可知, 当  $l_{Mk} < l/2$  且  $l_{Mk} < x_f < l/4-l_{Mk}/2$ , 于  $[t_0, t_0+l/(2v)]$  时窗,  $[0, l/2]$  线长范围内, 可以检测到  $G_{Mk}(x)$  突变点, 且  $G_{Mk}(x) = l_{Mk}$ 。

由上述分析可知, 若仅采用传统的单端行波测距, 即仅采用时间轴上行波信息, 当 M 端健全线路长度和故障位置满足  $l_{Mk} < l/2$  且  $x_f < l/2-l_{Mk}$  时, 于  $[t_0, t_0+l/v]$  时窗内会有反映 “ $x_f+l_{Mk}$ ” 的健全线路末端反射波。

现假设健全线路全长为  $l_{Mk}$ , 由上述分析可知 M 端含有健全线路影响本文提出的方法(新方法)和传统方法的范围如图 2 所示。

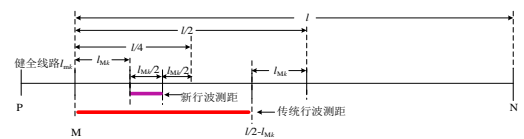


图 2 M 端健全线路影响测距范围示意图

Fig. 2 A schematic diagram of the range affected by a sound line at the M end

由图 2 可知, 新行波测距受 M 端健全线路的影响范围较小。

同样假设  $G_{Nk}(x)$  突变点分布于  $[t_0+l/(2v), t_0+l/v]$  时窗,  $[l/2, l]$  线长范围内, 则需满足

$$\text{时间约束: } \frac{l}{2v} < \frac{l-x_f + l_{Nk}}{v} < \frac{l}{v} \quad (9)$$

$$\text{长度约束: } l/2 < l-x_f + l_{Nk} < l, 0 < x_f < l/2 \quad (10)$$



由式(9)和(10)可知, 当  $l_{Nk} < x_f < l/2$ , 于  $[t_0 + l/(2v), t_0 + l/v]$  时窗,  $[l/2, l]$  线长范围内, 可以检测到  $G_{Nk}(x)$  突变点, 且  $G_{Nk}(x) = l - x_f + l_{Nk}$ 。

同样地, 若仅采用时间轴上行波信息, 当 N 端健全线路长度满足  $l_{Nk} < x_f < l/2$  时, 于  $[t_0 + l/v, t_0 + 2l/v]$  时窗内会有反映 “ $l - x_f + l_{Nk}$ ” 的健全线路末端反射波, 且 N 端健全线路影响新方法和传统方法的范围如图 3 所示。

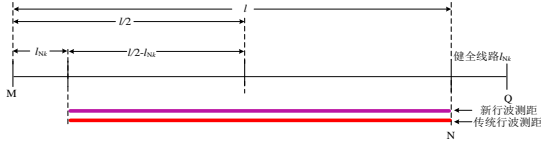


图 3 N 端健全线路影响测距的范围

Fig. 3 A schematic diagram of the range affected by a sound line at the N end

由图 3 可知, 传统行波测距和新行波测距受 N 端健全线路的影响范围一样。

现定量分析各个突变点之间的幅值比较。对比式(1)和(3)可知, 若忽略故障行波在线路传播损耗, 则突变点 A(x) 与  $G_{Mk}(x)$  正向行波和反向行波之比分别为

$$k_{f,A/M} = \frac{1}{\beta_{Mu} \beta_{Fu}} > 1 \quad (11)$$

$$k_{b,A/M} = \frac{\beta_{Mu}}{\alpha_{Mu}^2 \beta_{Fu}} \quad (12)$$

由式(14)可知, 假设突变点 A(x) 的反向行波幅值大于突变点  $G_{Mk}(x)$ , 则需  $k_{b,A/M} > 1$ , 即  $\frac{\beta_{Mu}}{\alpha_{Mu}^2 \beta_{Fu}} > 1$ , 即  $n_M > 3$ , 表明 M 端除故障线路外出线数大于 3, 则 A(x) 突变点的幅值大于  $G_{Mk}(x)$ 。

对比式(2)和(4)可知, 若忽略故障行波在线路传播损耗, 则突变点 B(x) 与  $G_{Nk}(x)$  正向行波和反向行波之比分别为

$$k_{f,B/N} = 1 \quad (13)$$

$$k_{b,B/N} = \frac{\beta_N}{\alpha_N^2 \beta_Q} \quad (14)$$

由式(16)可知, 假设 B(x) 的反向行波幅值大于  $G_{Nk}(x)$ , 则需  $k_{b,B/N} > 1$ , 即  $\frac{\beta_N}{\alpha_N^2 \beta_Q} > 1$ , 即  $n_N > 3$ , 表明 N 端除故障线路外出线数大于 3, 则 B(x) 突变点的幅值大于  $G_{Nk}(x)$ 。

由式(11)~(14)可知, 对于母线以多出线形式的输电线路, 其干扰突变点  $G_{Mk}(x)$  和  $G_{Nk}(x)$  的幅值小于故障突变点 A(x) 和对偶故障突变点 B(x)。我国 220kV 输电线路 80% 的母线均为多出线, 因此

对于这样的输电线路发生故障, 沿线突变点中只有故障位置突变点和对偶故障突变点幅值最大。

当故障位于半线长外, 正向行波与反向行波相遇叠加形成的突变点与位置、时间的关系如图 4 所示。

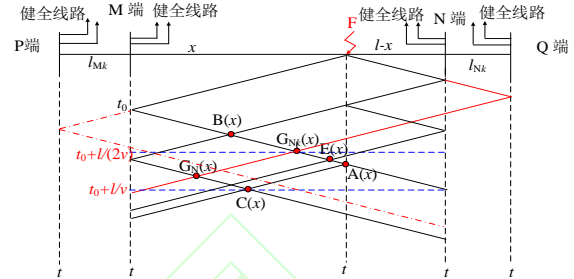


图 4 故障位于半线长之外行波突变点沿线分布

Fig. 4 The Distribution of Traveling Wave Catastrophe Points along the Line under the fault located outwith the half line length of the line

由图 4 可知, 当故障位于半线长之外, 于  $[t_0, t_0 + l/(2v)]$  时窗, 在  $[0, l/2]$  线长范围内, 由 M 端起始的正向行波遇到由 N 端起始的反向行波发生行波叠加, 形成 B(x) 突变点, 其表达式为

$$u_B(t) = \underbrace{u_M^+(t - (l - x)/v)}_{\text{前行波}} + \underbrace{\alpha_{Fu} u_N^-(t - x/v)}_{\text{反行波}} \quad (15)$$

由式(17)可知, 当故障位于半线长之外, 对偶故障点 B(x) 处正向行波和反向行波以相同的极性叠加, 且  $B(x) = l - x_f$ 。

由 M 端起始的正向行波遇到 N 端健全线路末端反射波形成的反向行波叠加, 形成  $G_{Nk}(x)$  突变点, 其表达式为

$$u_{G_{Nk}}(t) = \underbrace{u_M^+(t - (l - x + l_{Nk})/v)}_{\text{前行波}} + \underbrace{\alpha_{Fu} u_Q^-(t - (x - l_{Nk})/v)}_{\text{反行波}} \quad (16)$$

在式(18),  $u_Q^- = \alpha_{Nu}^2 \beta_Q \times u_f(t - (l - x + 2l_{Nk})/v)$ , 且  $u_Q^-$  的极性取决于 Q 端的接线形式, 若 Q 端为多出线的接线形式, 则  $G_{Nk}(x)$  的极性为正, 若 Q 端为第 III 类母线接线形式, 则  $G_{Nk}(x)$  的极性为负, 且  $G_{Nk}(x) = l - x_f + l_{Nk}$ 。

由 M 端起始的正向行波遇到对端母线第二次反射波叠加, 形成 E(x) 突变点, 其表达式为

$$u_E(t) = \underbrace{u_M^+(t - 2(l - x)/v)}_{\text{前行波}} + \underbrace{\beta_{Fu} \beta_{Nu} \alpha_{Fu} u_N^-(t - (x - l_{Nk})/v)}_{\text{反行波}} \quad (17)$$

由式(19)可知, E(x) 处正向行波与反向行波以相同的极性进行叠加, 且  $E(x) = 2(l - x_f)$ 。

继续沿线前行遇到故障点 (阻抗不连续点) 会发生行波叠加, 形成 A(x) 突变点, 且突变点 A(x) 的行波表达式形式同式(1)。

N端母线反射波经M端反射波后形成的正向行波与N端健全线路经Q端形成的反向行波叠加形成 $G_N(x)$ 突变点，其表达式为

$$u_{G_N}(t) = \beta_{Mu} \underbrace{u_N^-(t - (l + l_{Nk})/\nu)}_{\text{前行波} +} + \underbrace{\alpha_{Fu} u_Q^-(t - (l - l_{Nk})/\nu)}_{\text{反向波} -/+} \quad (18)$$

由式(20)可知， $G_N(x)$ 突变点的极性取决于Q端的接线形式，若Q端为多出线的接线形式，则 $G_{Nk}(x)$ 的极性为正，若Q端为第III类母线接线形式，则 $G_{Nk}(x)$ 的极性为负，且 $G_N(x) = l_{Nk}$ 。

同样，在 $t_0 + l/\nu$ 时刻，M端观测到的N端反射波的正向行波遇到由N端起始的反向行波发生行波叠加，形成 $C(x)$ 突变点，其表达式为

$$u_C(t) = \beta_{Mu} \underbrace{u_N^-(t - 2x/\nu)}_{\text{前行波} +} + \underbrace{\beta_{Fu} u_M^+(t - l/\nu)}_{\text{反向波} +} \quad (19)$$

由式(19)可知， $C(x)$ 突变点是正向行波和反向行波以相同的极性叠加，且 $C(x) = 2x_f - l$ 。

表2 故障位于半线长之外突变点的极性与反映的位置

Tab.2 The polarity of the saltation point and the position represented by the saltation point under fault is located out the half length of the line

突变点	极性	时窗范围	距离范围	反映的距离
B(x)	+	$[t_0, t_0 + l/(2\nu)]$	$[0, l/2]$	$l - x_f$
$G_{Nk}(x)$	+/-	—	—	$l - x_f + l_{Nk}$
E(x)	+	$[t_0, t_0 + l/\nu]$	$[0, l]$	$2(l - x_f)$
A(x)	-	$[t_0 + l/(2\nu), t_0 + l/\nu]$	$[l/2, l]$	$x_f$
$G_N(x)$	-/+	—	—	$l_{Nk}$
C(x)	+	$t_0 + l/\nu$	$[0, l]$	$2x_f - l$

通过上述分析可得到如下结论：当故障位于半线长之外， $B(x)$ 突变点位于 $[t_0, t_0 + l/(2\nu)]$ 时窗， $[0, l/2]$ 线长范围内， $A(x)$ 突变点位于 $[t_0 + l/(2\nu), t_0 + l/\nu]$ 时窗， $[l/2, l]$ 线长范围内，且 $B(x) + A(x) = l$ ；于 $t_0 + l/\nu$ 时刻，有 $C(x)$ 突变点，且 $C(x) = l - 2x_f$ ； $E(x)$ 反映 $2(l - x_f)$ 的距离，且幅值小于 $B(x)$ 突变点，因此 $E(x)$ 不会影响 $A(x)$ 和 $B(x)$ 突变点的辨识；突变点 $G_{Nk}(x)$ 的幅值小于 $G_N(x)$ ；于时间轴上观测突变点可知，表征对偶故障位置的 $B(x)$ 突变点会先于N端健全线路干扰突变点 $G_{Nk}(x)$ 以及 $G_N(x)$ 。干扰突变点 $G_{Nk}(x)$ 和 $G_N(x)$ 是否能够进入 $[t_0, t_0 + l/(2\nu)]$ 和 $[t_0 + l/(2\nu), t_0 + l/\nu]$ 判断分析窗，取决于健全线路的长度。

现假设 $G_{Nk}(x)$ 突变点分布于 $[t_0, t_0 + l/(2\nu)]$ 时窗， $[0, l/2]$ 线长范围内，则需满足

$$\text{时间约束: } \frac{l - x_f + l_{Nk}}{\nu} < \frac{l}{2\nu} \quad (20)$$

$$\text{长度约束: } l - x_f + l_{Nk} < \frac{l}{2}, \frac{l}{2} < x_f < l \quad (21)$$

由式(21)和(22)可知，当 $l_{Nk} < l/2$ 且 $l/2 + l_{Nk} < x_f < l$ ，于 $[t_0, t_0 + l/(2\nu)]$ 时窗， $[0, l/2]$ 线长范围内，可以检测到 $G_{Nk}(x)$ 突变点，且 $G_{Nk}(x) = l - x_f + l_{Nk}$ 。

同样，假设 $G_N(x)$ 突变点分布于 $[t_0, t_0 + l/(2\nu)]$ 时窗， $[0, l/2]$ 线长范围内，则需满足

$$\text{时间约束: } \frac{2(l - x_f) + l_{Nk}}{\nu} < \frac{l}{2\nu} \quad (22)$$

$$\text{长度约束: } l_{Nk} < \frac{l}{2}, \frac{l}{2} < x_f < l \quad (23)$$

由式(22)和(23)可知，当 $l_{Nk} < l/8$ 且 $3l/4 + l_{Nk}/2 < x_f < l$ ，于 $[t_0, t_0 + l/(2\nu)]$ 时窗， $[0, l/2]$ 线长范围内，可以检测到 $G_N(x)$ 突变点，且 $G_N(x) = l_{Nk}$ 。

若采用传统的单端行波测距，当N端健全线路长度和故障位置满足 $l_{Nk} < l/2$ 且 $l/2 + l_{Nk} < x_f < l$ 时，于 $[t_0, t_0 + l/\nu]$ 时窗内会有反映“ $l - x_f + l_{Nk}$ ”的健全线路末端反射波；且当 $l_{Nk} < l/2$ 且 $l/2 < x_f < l/2 + l_{Nk}$ ，于 $[t_0 + l/\nu, t_0 + 2l/\nu]$ 时窗内会有反映“ $l - x_f + l_{Nk}$ ”的健全线路末端反射波。

通过上述分析，采用沿线正向行波和反向行波沿线相遇叠加形成的突变点与故障位置、时间的关系构建的测距方法中，反映故障位置的突变点 $A(x)$ 和 $B(x)$ 分别属于 $\{[t_0, t_0 + l/(2\nu)], [0, l/2]\}$ 和 $\{[t_0 + l/(2\nu), t_0 + l/\nu], [l/2, l]\}$ 时间邻域，且满足 $A(x) + B(x) = l$ 线路约束，其幅值大于其他突变点；而干扰突变点在时间上后滞后于 $A(x)$ 和 $B(x)$ 突变点，从时间维上可以剔除干扰突变点。

## 2 基于贝杰龙线路模型的方向行波求取以及行波叠加过程分析

### 2.1 方向行波的求取

特(超)高压输电线路一般可采用贝杰龙传输线模型来描述。贝杰龙线路模型就是将一段均匀有损传输线分成2段均匀无损传输线路，每段将线路电阻分别集中到线路两侧。大量的工程实际表明这样的近似是有较高精度的。贝杰龙线路模型如图5所示，其等效电路如图6所示。

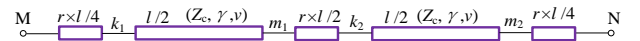


图5 贝杰龙线路等效模型

Fig. 5 Equivalent model of Bergeron line

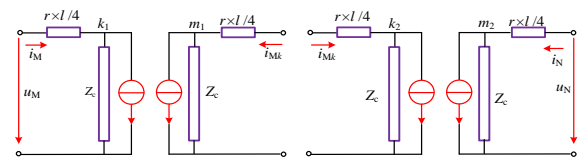


图6 贝杰龙传输线路时域等效电路

Fig. 6 Time domain equivalent circuit of Bergeron transmission line

由于同塔双回路反向量定义可知,由于其母线侧对地电压为零,计算双回线路反向量沿线电压、电流分布时,只需采用 M 端电流,即如式(24)和(25)所示。

$$u_{x,s}(x,t) = -\frac{1}{2Z_{c,s}} \left( \frac{Z_{c,s} + r_s x/4}{Z_{c,s}} \right)^2 \left[ i_{M,s} \left( t + x/v_s \right) \times (Z_{c,s} + r_s x/4) \right] - \frac{1}{2Z_{c,s}} \left( \frac{Z_{c,s} - r_s x/4}{Z_{c,s}} \right)^2 \left[ i_{M,s} \left( t - x/v_s \right) \times (Z_{c,s} - r_s x/4) \right] \quad (24)$$

$$\frac{r_s x}{4} \left( \frac{Z_{c,s} + r_s x/4}{Z_{c,s}} \right) \times \left( \frac{Z_{c,s} - r_s x/4}{Z_{c,s}} \right) \times i_{M,s}$$

$$i_{x,s}(x,t) = -\frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c,s} + r_s x/4}{Z_{c,s}} \right) \times i_{M,s} \left( t + x/v_s \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{Z_{c,s} - r_s x/4}{Z_{c,s}} \right) \times i_{M,s} \left( t - x/v_s \right) \quad (25)$$

$$+ \frac{1}{2Z_{c,s}} \times \frac{r_s x}{2Z_{c,s}} \left[ i_{M,s}(t) \times \frac{r_s x}{4} \right]$$

根据式(24)和(25)以及方向行波的定义,得到正向电压行波和反向电压行波为

$$u_{x,s}^+ = (u_{x,s} + Z_{c,s} i_{x,s})/2 \quad (26)$$

$$u_{x,s}^- = (u_{x,s} - Z_{c,s} i_{x,s})/2 \quad (27)$$

可见由式(24)~(27)可以计算出沿线长范围内的任意位置的正向行波和反向行波。

## 2.2 行波叠加过程的仿真及分析

采用如图 7 所示的仿真系统中,并 M 端和 N 端均为出线的母线形式,且健全线路末端为变压器,该仿真模型中采样率为 1MHz。现假设 I 回线路距离 M 端半线长之内 56km 发生单相接地故障,采用如图 8 所示的 M 端反向量电流行波计算得到正向行波和反向行波相遇叠加形成过程如图 9 所示。在图 7 中, M 端有 3 条健全线路,分别为  $l_{M1}=70\text{km}$ ,  $l_{M2}=10\text{km}$ ,  $l_{M3}=200\text{km}$ ; N 端有 2 条健全线路,  $l_{N1}=260\text{km}$ ,  $l_{N2}=10\text{km}$ 。  $x_f$  表示故障点离开量测端 M 的距离,  $l-x_f$  表示故障点离开对端(N 端)的距离。在图 9 和图 11 中,  $x$  表示离开量测端的距离。例如在图 9(a)中,  $x=20\text{km}$  的蓝色实线表示离开 M 端 20km 处的正向行波。

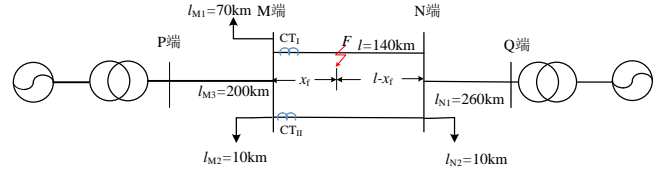


图 7 双回线路仿真模型

Fig. 7 Double circuit simulation model

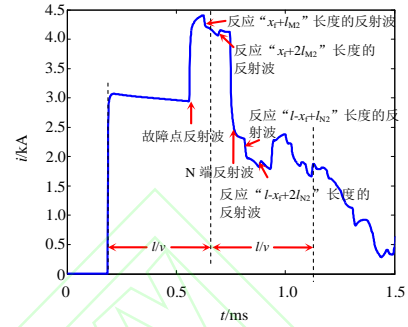
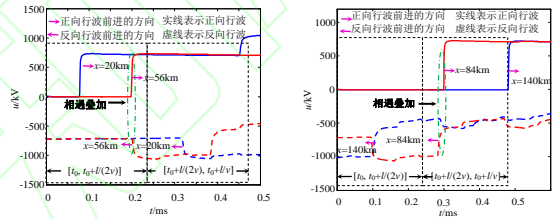
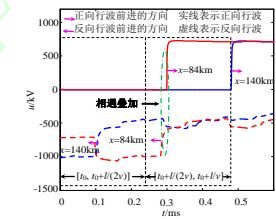


图 8 半线长之内故障下反向量电流行波

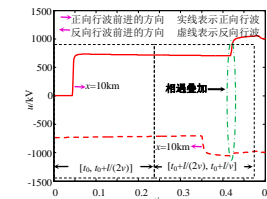
Fig. 8 Reverse direction current traveling wave under the fault lies within the half line length



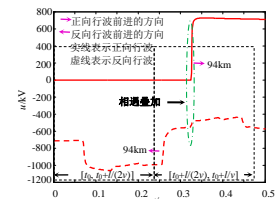
(a)故障位置 A(x) 突变点



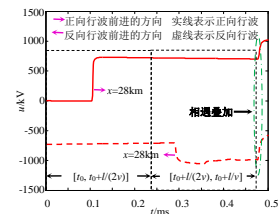
(b)对偶故障位置 B(x) 突变点



(c)M 端健全线路干扰  $G_{Mk}(x)$  突变点



(d)N 端健全线路干扰  $G_{Nk}(x)$  突变点



(e)于  $t_0+l/v$  时刻的 C(x) 突变点

图 9 半线长之内故障下行波叠加过程

Fig. 9 The superposition process of the traveling wave under the fault lies within the half line length

同样地,现假设 I 回线路距离 M 端半线长之外 84km 发生单相接地故障,采用如图 10 所示的

M 端反向量电流行波计算得到正向行波和反向行波相遇叠加形成过程如图 11 所示。

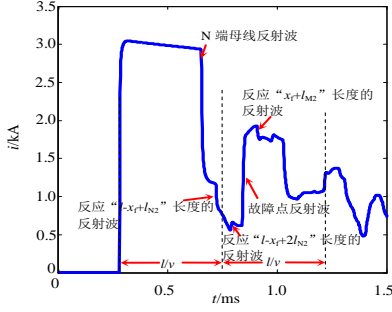
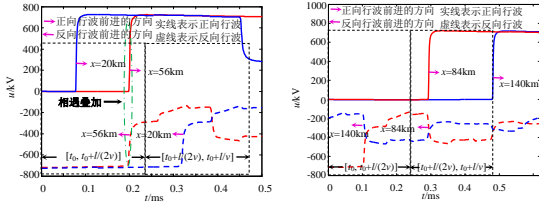
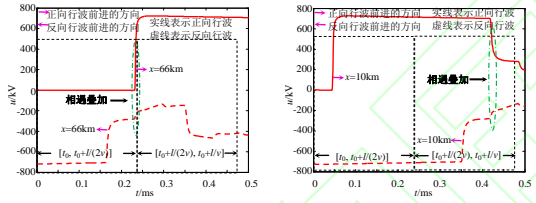


图 10 半线长之外故障下反向量电流行波

Fig. 10 Reverse direction current traveling wave under the fault lies without the half line length

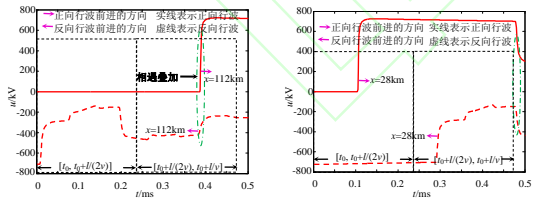


(a) 对偶故障位置 B(x) 突变点 (b) 故障位置 A(x) 突变点



(c) N 端健全线路  
干扰  $G_{Nk}(x)$  突变点

(d) N 端健全线路  
干扰  $G_N(x)$  突变点



(e) 反映 2 倍故障位置  
E(x) 突变点

(f) 于  $t_0 + l/v$  时刻的 C(x) 突变点

图 11 半线长之外故障下行波叠加过程

Fig. 11 The superposition process of the traveling wave under the fault lies without the half line length

由图 9~11 可知, 无论是故障位于半线长内还是半线长外, 正向行波沿时间轴正方向行进, 反向行波沿时间轴反方向行进, 于故障点正向行波和反向行波以相反的极性相遇叠加; 于对偶故障点正向行波与反向行波以相同的极性相遇叠加;

对于 M 和 N 端健全线路末端反射波引起的干扰突变点的极性与健全线路末端的出线形式有关。

### 3. 基于行波沿线突变的单端行波测距

由上述分析可知, 正向行波与反向行波叠加形成的突变点与故障位置有关, 因此可以采用测距函数来构建突变点与故障位置关系, 并根据测距函数得到故障距离。

#### 3.1 测距函数的构建

利用方向电压行波相邻两个采样值向后差分构造电压变化梯度为

$$c_{\text{dif } u^+}(t) = [u^+(t) - u^+(t - \Delta t)] / \Delta t \quad (28a)$$

$$c_{\text{dif } u^-}(t) = [u^-(t) - u^-(t - \Delta t)] / \Delta t \quad (28b)$$

定义观测时窗内不连续性程度的测度为“突变能量”为

$$S_{2u}^+(x, t) = \sum_{n=t-N\Delta t+1}^t [c_{\text{dif } u^+}(t)]^3 \quad (29a)$$

$$S_{2u}^-(x, t) = \sum_{n=t-N\Delta t+1}^t [c_{\text{dif } u^-}(t)]^3 \quad (29b)$$

式(28)可以消除直流分量并提取出行波波头, 式(29)可以提高抗干扰的能力, 并且  $N=5$ 。

构建基于行波沿线突变的单端行波测距函数为

$$f_u(x) = \int_{t_1}^{t_2} S_{2u}^+(x, t) \times S_{2u}^-(x, t) dt \quad x \in [0, l] \quad (30)$$

在式(30)中, 选取  $t_1$ 、 $t_2$  为判断分析窗的上、下限。

#### 3.2 测距算法与算例分析

(1) 读取宽频暂态电流数据。由高速采集装置获取故障电流行波数据, 并截取故障初始行波到达前  $l/(2v)$  时长和故障初始行波到达后  $1.1l/v$  时长, 即共计  $1.6l/v$  时长的行波数据。

(2) 计算方向行波沿线分布。根据步骤(1)和步骤(2)获取的电流行波和电压行波, 在两个相继行波观测时窗  $[t_0, t_0 + l/(2v)]$  和  $[t_0 + l/(2v), t_0 + l/v]$  内, 利用贝杰龙传输方程计算沿线电压行波和电流行波分布, 并根据  $u^+(x, t) = (u(x, t) + Z_c i(x, t)) / 2$  和  $u^-(x, t) = (u(x, t) - Z_c i(x, t)) / 2$  计算沿线的正向行波和反向行波。

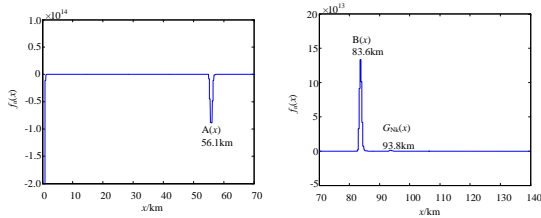
(3) 构建测距函数。采用式(29)沿线提取正向行波突变和反向行波突变  $S_{2u}^+(x, t)$  和  $S_{2u}^-(x, t)$ , 并在时窗  $[t_0, t_0 + l/(2v)]$  和  $[t_0 + l/(2v), t_0 + l/v]$  内, 计算测距函数  $f_u(x) = \int_{t_1}^{t_2} S_{2u}^+(x, t) \times S_{2u}^-(x, t) dt, x \in [0, l]$ 。



(4)故障位置的确定。在时窗 $[t_0, t_0+l/(2v)]$ 并在 $[0, l/2]$ 范围内计算测距函数突变点解集, 记为 $\mathbf{f}_{ul}=[x_{11}, x_{12}, \dots]$ , 在时窗 $[t_0+l/(2v), t_0+l/v]$ 并在 $[l/2, l]$ 范围内计算测距函数突变点解集, 记为 $\mathbf{f}_{ul2}=[x_{11}, x_{12}, \dots]$ 。以 $\mathbf{f}_{ul}$ 为基准突变点解集, 则将另一个测距函数突变点解集中依次与基准突变点解集的突变点按照式 $A(x)+B(x)=l$ 进行匹配, 并采用欧氏距离作为测度来衡量匹配误差。匹配误差最小所对应的突变点即为反映故障位置的突变点。

#### (1)仿真算例分析

采用如图7所示的仿真系统, 假设故障位于半线长之内, 根据式(24)~(27)和图8所示的反向量电流行波计算得到的测距函数如图12所示。

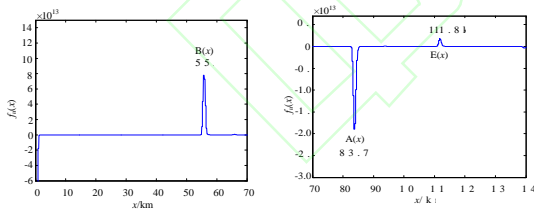


(a)在 $[t_0, t_0+l/(2v)]$ 计算得到  $f_u(x)$ 沿 $[0, l/2]$ 线长分布 (b)在 $[t_0+l/(2v), t_0+l/v]$ 计算得到的 $f_u(x)$ 沿 $[l/2, l]$ 线长分布

图12 半线长之内故障下测距函数分布结果

Fig. 12 The distribution of the range function under fault lies within the half line length

当故障位于半线长外, 根据式(28)~(30)和图10所示的反向电流计算得到的测距函数如图13所示。



(a)在 $[t_0, t_0+l/(2v)]$ 计算得到  $f_u(x)$ 沿 $[0, l/2]$ 线长分布 (b)在 $[t_0+l/(2v), t_0+l/v]$ 计算得到的 $f_u(x)$ 沿 $[l/2, l]$ 线长分布

图13 半线长之外故障下测距函数分布结果

Fig. 13 The distribution of the range function under the fault lies without the half line length

由图12可知, 当故障位于半线长之内, 于 $[t_0, t_0+l/(2v)]$ 计算得到测距函数沿 $[0, l/2]$ 线长分布中有1个负极性的突变点 $x_{11}=56.1\text{km}$ ; 于 $[t_0+l/(2v), t_0+l/v]$ 计算得到测距函数沿 $[l/2, l]$ 线长分布中有2个突变点 $\mathbf{f}_{ul2}=[83.6, 93.8]$ , 极性均为正, 且 $x_{11}+$

$x_{112}=56.1+83.6=139.7\approx l$ ,  $x_{11}$ 的极性为负, 可知故障点距离量测端56.1km。

由图13可知, 当故障位于半线长之内, 于 $[t_0, t_0+l/(2v)]$ 计算得到测距函数沿 $[0, l/2]$ 线长分布中有1个正极性的突变点 $x_{11}=55.7\text{km}$ , 于 $[t_0+l/(2v), t_0+l/v]$ 计算得到测距函数沿 $[l/2, l]$ 线长分布中有2个突变点 $\mathbf{f}_{ul2}=[83.7, 111.8]\text{km}$ , 且 $x_{11}+x_{112}=55.7+83.7=139.4\approx l$ ,  $x_{11}$ 的极性为正, 可知故障点距离量测端83.7km。为了验证该方法的正确性, 采用如图7所示的仿真模型, 得到不同故障类型(I回线路或II回线路发生单相接地故障)、不同故障距离、不同过渡电阻以及不同故障初相角下采用该方法得到的测距结果如附表1所示。

#### (2)实测数据分析

实测数据是由课题组研制的行波测距装置获取到的, 该装置采用10 kHz采样率相电流突变量启动算法, 1MHz采样率, 24通道电流同步采集16 ms记录长度及4 ms预触发连续启动间隔小于20 ms, 实际记录死区小于3 ms, 录波文件以COMTRADE99格式存储。

2010年8月12日3时21分40秒, 某220kV电网大苏(屯)一保(山)II回线路半线长之内B相发生闪络故障, 大苏接线线如图14所示。

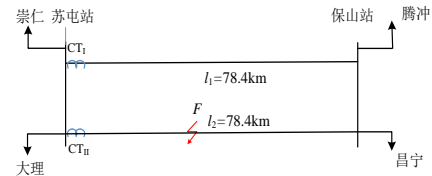
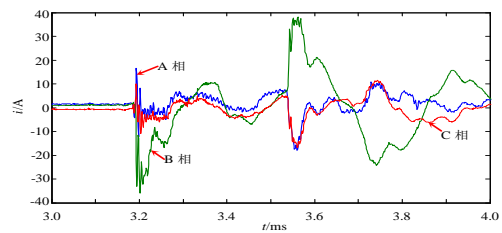


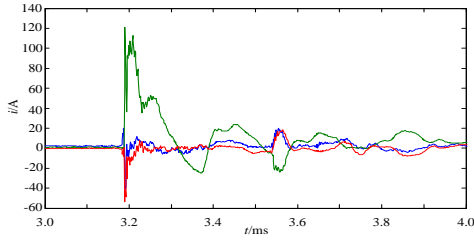
图14 苏保接线线图

Fig. 14 Structure of Subao transmission line

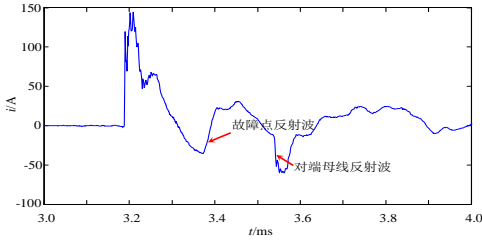
于苏屯站 $\text{CT}_I$ 和 $\text{CT}_{II}$ 量测端获取到的时域波形以及反向量电流行波如图15(a)、15(b)和15(c)所示, 反向量电流行波的小波变换如图16所示, 测距函数 $f_u(x)$ 如图15(e)和(f)所示。



(a)I回线路(非故障回)量测端电流行波



(b)II 回线路(故障回)量测端电流行波



(c)反向量电流行波

图 15 半线长内实测故障数据电流行波

Fig. 15 Current traveling wave of measured fault data under fault lies within the half line length

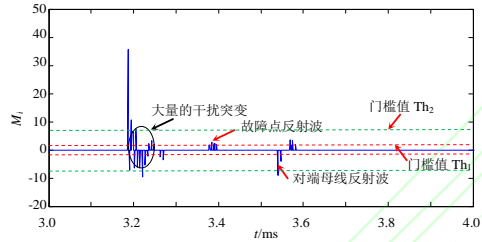
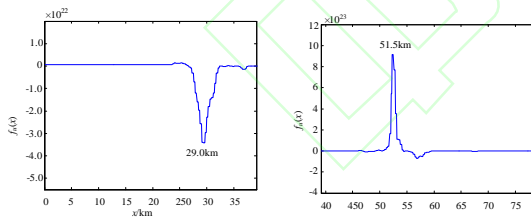


图 16 半线长内实测故障数据的小波变换模极大值

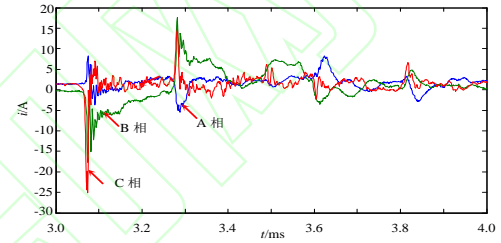
Fig. 16 Wavelet transform modulus maximum of measured fault data under fault lies within the half line length

(e)在 $[t_0, t_0+l/(2v)]$ 计算得到  $f_u(x)$ 沿 $[0, l/2]$ 线长分布图 17 半线长之内实测故障数据的测距函数  $f_u(x)$ 结果Fig. 17 The range function  $f_u(x)$  result of the measured fault data under fault lies within the half line length

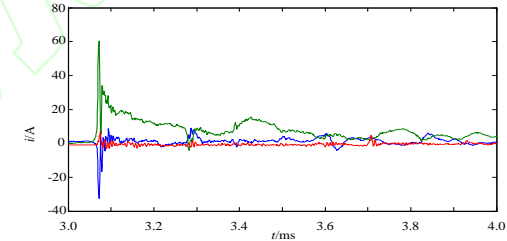
由图 16 可知, 若以初始行波幅值的 5%作为阈值  $Th_1$ , 会有大量的振荡引起的干扰落入观测窗内, 故障点反射波和对端母线反射波不易辨识或辨识失败; 若以初始行波幅值的 25%作为阈值  $Th_2$ , 虽会减少了一些干扰落入观测窗内, 但也易误判为近端故障。而采用测距函数  $f_u(x)$ 进

行故障测距, 则由图 17 可知, 于 $[t_0, t_0+l/(2v)]$ 计算得到测距函数沿 $[0, l/2]$ 线长范围内有 1 个负极性的突变点  $x_{II}=29.0\text{km}$ ; 于 $[t_0+l/(2v), t_0+l/v]$ 计算得到测距函数沿 $[l/2, l]$ 线长范围内有 1 个正极性的突变点  $x_{III}=51.5\text{km}$ , 且  $x_{II}+x_{III}=80.5\text{km}\approx l$ ,  $x_{II}$ 极性均为负, 故障点距离苏屯站  $29.0\text{km}$ 。经过人工巡线, 得到的故障距离为  $27.75\text{km}$ , 测距误差为  $1.25\text{km}$ 。

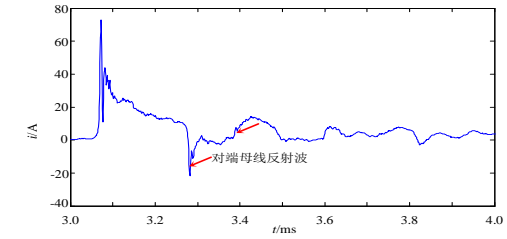
2011 年 4 月 19 日 16 时 44 分 28 秒, 某 220kV 电网大苏(屯)一保(山)II 回线路半线长之内 B 相发生闪络故障, 于苏屯站  $CT_I$  和  $CT_{II}$  量测端获取到的时域波形以及反向量电流行波如图 15(a)、15(b)和 15(c)所示, 反向量电流行波的小波变换如图 16 所示, 测距函数  $f_u(x)$ 如图 15(e)和(f)所示。



(a)I 回线路(非故障回)量测端电流行波



(b)II 回线路(故障回)量测端电流行波



(c)反向量电流行波

图 18 半线长外实测故障数据电流行波

Fig. 18 Current traveling wave of measured fault data under fault lies without the half line length

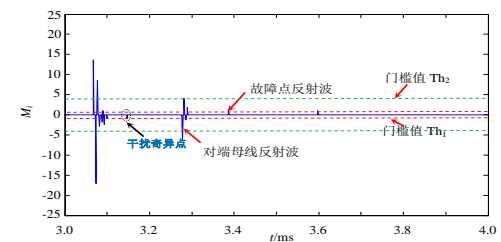
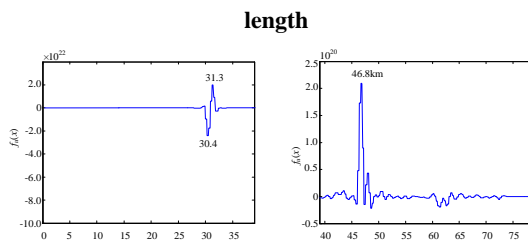


图 19 线长之内实测故障数据的小波变换模极大值

Fig. 19 Wavelet transform modulus maximum of measured fault data under fault lies without the half line



(e)在 $[t_0, t_0+l/(2v)]$ 计算得到  $f_u(x)$ 沿 $[0, l/2]$ 线长分布

(f)在 $[t_0+l/(2v), t_0+l/v]$ 计算得到  $f_u(x)$ 沿 $[l/2, l]$ 线长分布

图 20 半线长外实测故障数据的测距函数  $f_u(x)$  结果Fig. 20 The range function  $f_u(x)$  result of the measured fault data under fault lies without the half line length

由图 19 可知, 若以初始行波幅值的 5% 作为门槛值  $Th_1$ , 会引入干扰奇异点, 可能使得测距失败。若以初始行波幅值的 25% 作为门槛值  $Th_2$ , 故障点反射波未落入观测窗内。而采用测距函数  $f_u(x)$  进行故障测距, 则由图 20 可知, 于  $[t_0, t_0+l/(2v)]$  计算得到测距函数沿  $[0, l/2]$  线长范围内有 1 个负极性的突变点  $x_{II}=30.4\text{km}$ ; 于  $[t_0+l/(2v), t_0+l/v]$  计算得到测距函数沿  $[l/2, l]$  线长范围内有 1 个正极性的突变点  $x_{III}=46.8\text{km}$ , 且  $x_{II}+x_{III}=77.1\text{km}\approx l$ ,  $x_{II}$  极性均为负, 故障点距离苏电站  $30.4\text{km}$ 。经过人工巡线, 得到的故障距离为  $31.14\text{km}$ , 误差为  $0.74\text{km}$ 。

#### 4 结论

本文提出的基于沿线行波突变的双回路单端测距是将行波观测时窗内暂态数据映射为沿线分布的行波(能量)突变之规律, 其本质是利用正向行波与反向行波相遇叠加形成的突变点与位置、时间的对应关系构建测距函数。实测数据测试结果表明:

1. 该方法受量测端健全线路末端反射波影响的范围小于传统单端行波测距;

2. 该方法反映故障的突变点(A(x)和 B(x))满足时窗和线长的约束关系, 而干扰突变点与反映故障的突变点存在确定的时间对应关系, 即干扰突变点在时间上滞后于反映故障的突变点, 基于此可以可靠的剔除干扰突变点的影响;

3. 利用正向行波与反向行波相乘来构建测距函数, 可以将正向行波视为如小波基函数作用的“检测函数”, 而反向行波可视为“被检测信

号”。由故障信号本身构造“检测函数”可以适应不同的故障条件, 更易辨识出故障行波。

#### 参考文献

- [1] 雷傲宇, 董新洲, 施慎行. 一种识别输电线路单相接地故障下第二个反向行波的方法 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8):2151-2158.  
Lei Aoyu, Dong Xinzhou, Shi Shenxing. A method to identify the second reverse travelling wave induced by single-phase-to-ground fault in transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8):2151-2158.
- [2] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 输电线路单端行波测距法和双端行波测距法的对比[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6):92-95.  
Qin Jian, Ge Weichun, Qiu Jinhui, et al. Study on Single Terminal Method and Double Terminal Method of Traveling Wave Fault Location in Transmission Line[J]. Automatic of Electric Power System, 2006, 30(6):92-95.
- [3] 高洪雨, 陈青, 徐丙垠, 等. 输电线路单端行波测距新算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5):121-127.  
GAO Hongyu, CHEN Qing, XU Bingyin, et al. Fault Location Algorithm of Single-ended Traveling Wave for Transmission Lines[J]. Automatic of Electric Power System, 2017, 41(5):121-127.
- [4] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8):8-13.  
GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. A new fault location method of transmission lines based on double-terminal traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8):8-13.
- [5] Felipe V. Lopes, Karcus M. Dantas, Kleber M. Silva, et al. Accurate Two-Terminal Transmission Line Fault Location Using Traveling Waves[J]. Power Delivery, 2018, 33(2):873-880.
- [6] Md Shafiullah, Mohammad A. Abido 1, Zakariya Al-Hamouz Wavelet-based extreme learning machine for distribution grid fault location[J]. 2017, 11(17):4256-4263.
- [7] 陈玉林, 陈允平, 龚庆武. 基于时频分量相关分析的高压电缆双端行波测距[J]. 电力系统自动化设备, 2008, 28(12):16-20.  
CHEN Yuli, CHEN Yunping, GONG Qingwu. Double-terminal traveling wave fault location for HV cable based on time-frequency component correlation analysis[J]. Electric power Automation Equipment, 2008, 28(12):16-20.
- [8] 覃剑, 黄震, 邱宇峰等. 基于小波变换的同杆并架双回线双端行波故障测距[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5):51-55.

- Qin Jian, Huang Zhen, Qiu Yufeng, et al. Wavelet transform based double terminal method of travelling wave fault location in double-circuit parallel transmission line[J]. Automatic of Electric Power System, 2004, 28(5):51-55
- [9] 张永健, 胥杰, 孙嘉. 基于静态小波变换的 T 型输电线路行波测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(6):84-88
- ZHANG Yongjian, XU Jie, SUN Jia. Travelling Wave Fault Location for Three-Terminal Transmission Line Based on Static Wavelet Transform[J]. Power System Technology, 2012, 36(6):84-88.
- [10] 束洪春, 程春和, 赵文渊, 等. 形态学与 HHT 检测相结合的行波波头准确标定方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7):1-6.
- SHU Hongchun, CHENG Chunhe, ZHAO Wenyuan, et al. Accurate traveling-wave front detection based on morphology and HHT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7):1-6.
- [11] 张小丽, 曾祥君, 马洪江, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的电网故障行波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 25(32):64-68.
- ZHANG Xiaoli, ZENG Xiangjun, MA Hongjiang, et al. Power Grid Faults Location with Traveling Wave Based on Hilbert-Huang Transform Automatic of Electric Power System, 2008, 25(32):64-68.
- [12] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. 利用故障特征频带和 TT 变换的电缆单端行波测距[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22):103-112.
- SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. A Single Terminal Cable Fault Location Method Based on Fault Characteristic Frequency Band and TT Transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22):103-112.
- [13] Yanhui Xi, Zewen Li, Xiangjun Zeng, et al. Fault location based on travelling wave identification using an adaptive extended Kalman filter[J]. IET Generation, Transmission & Distributio, 2017, 11(17):4256-4263
- [14] 张广斌, 束洪春, 于继来. 基于 Hough 变换直线检测的行波波头标定[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19):165-173.
- ZHANG Guangbin, SHU Hongchun, YU Jilai. Surge Identification for Travelling Wave Based on Straight Lines Detection Via Hough Transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19):165-173.
- [15] Pulin Cao, Hongchun Shu, Bo Yang, et al. Speeded-up robust features based single-ended travelling wave fault location: a practical case study in Yunnan power grid of China[J]. IET Generation, Transmission & Distributio, 2018, 12(4): 886-894
- [16] 宋国兵, 索南加乐, 许庆强等. 同杆双回线环流量的行波特点[J]. 继电器, 2004, 32(3):1-5
- Song Guobing, SuoNAN Jiale, Xu Qingqiang, et al. Travelling wave characteristics of circumfluence component of double-circuit lines on the same pole[J]. RELAY, 2004, 32(3):1-5



#### 作者简介:

束洪春(1961-), 男, 博士教授, 博士生导师, 副校长, 国家自然科学基金项目评审专家, 主要研究方向: 新型继电保护与故障测距信号处理及其应用, 电力系统等, E-mail: [kms@sin.com](mailto:kms@sin.com)

宋晶(1979-), 女, 博士研究生, 主要研究方向: 新型继电保护与故障测距, E-mail: [8680622@qq.com](mailto:8680622@qq.com)

田鑫萃(1985-), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究方向: 新型继电保护与故障测距、高压直流保护。E-mail: [1105479731@qq.com](mailto:1105479731@qq.com)



附录:

附表 1 不同故障条件下采用仿真数据得到的测距结果

故障条件				测距结果		
故障距离/km	故障类型	过渡电阻/ $\Omega$	故障初相角/ $^{\circ}$	测距函数突变点解集	测距结果/km	测距误差/km
2	IAG	0	90	$f_{ul}=[2.1]$	2.1	0.1
				$f_{uII}=[137.8]$		
18	IBG	10	30	$f_{ul}=[17.8]$	17.8	0.2
				$f_{uII}=[121.6]$		
31	IIAG	100	60	$f_{ul}=[31.1]$	31.1	0.1
				$f_{uII}=[108.9]$		
73	IIBG	50	30	$f_{ul}=[66.9]$	73.1	0.1
				$f_{uII}=[72.9,133.9]$		
91.5	IAG	10	90	$f_{ul}=[48.4]$	91.6	0.1
				$f_{uII}=[91.6,96.9]$		
102.3	IBG	50	30	$f_{ul}=[37.6]$	102.4	0.1
				$f_{uII}=[75.5,102.3]$		
126.8	IIAG	100	60	$f_{ul}=[13.1]$	126.9	0.1
				$f_{uII}=[126.6]$		
134.7	IIBG	10	60	$f_{ul}=[5.3]$	134.7	0
				$f_{uII}=[134.5]$		