

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191050

# 特高压直流输电线路改进双端行波故障定位方法研究

孙广<sup>1</sup>, 王阳<sup>2</sup>, 薛枫<sup>1</sup>, 李猛克<sup>1</sup>, 董金星<sup>1</sup>, 梁伟<sup>1</sup>, 乐健<sup>2</sup>

(1. 国网内蒙古东部电力有限公司检修分公司, 内蒙古 通辽 028000;

2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 实现特高压直流输电系统线路故障的准确定位对于提高故障处理效率、确保直流输电系统运行可靠性等均具有重要现实意义。设计了基于改进 D 型双端行波法的直流输电线路故障定位策略。首先采用导数法对故障发生的时刻范围进行准确判断, 进而通过小波模极大值分析确定行波到达线路双端的准确时刻。利用故障行波波头到达测量端的第一和第二次时刻, 设计了改进 D 型双端行波测距方法, 消除了行波波速对故障测距的影响。仿真算例结果表明故障测距结果误差较小, 说明改进 D 型双端行波法具有较高的故障测距精度, 同时对不同类型故障和不同过渡电阻具有良好的适应性, 也能应用于近区故障定位。

**关键词:** 特高压直流输电系统; 线路故障定位; 双端行波法; 小波分析; 行波波速

## Research on an improved double-terminal traveling wave fault location method for UHVDC project

SUN Guang<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>2</sup>, XUE Feng<sup>1</sup>, LI Mengke<sup>1</sup>, DONG Jinxing<sup>1</sup>, LIANG Wei<sup>1</sup>, LE Jian<sup>2</sup>

(1. State Grid East Inner Mongolia Electric Power Maintenance Company, Tongliao 028000, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Accurate transmission line fault location is of great practical significance for improving the efficiency of fault treatment and guaranteeing the reliability of a UHVDC system. A fault location strategy for a DC transmission line based on an improved D-type twin-terminal traveling wave method is designed. First, the derivative method is adopted to accurately judge the range of fault occurrence time. Then, the exact time when the traveling wave reaches both ends of the line is determined by wavelet modulus maximum analysis. Based on the first and second moments when the fault traveling wave reaches the measuring end, an improved D-type two-terminal traveling wave ranging method is designed. It eliminates the influence of traveling wave velocity on fault ranging. The simulation results show that the error of fault ranging is small. It indicates that the improved D-type two-terminal traveling wave method has higher fault location accuracy. At the same time, it has good adaptability to different types of faults and different transition resistances, and can also be applied to the location of near-area faults.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477120).

**Key words:** UHVDC system; line fault location; double-end traveling wave method; wavelet analysis; travel wave velocity

## 0 引言

特高压直流输电(UHVDC)系统因其输电容量大、控制响应速度快、无同步运行稳定性问题, 在大容量远距离输电时优势明显, 已成为我国电能传输和区域联网最重要的方式之一<sup>[1-4]</sup>。特高压直流输电线路长、跨越地形复杂, 线路发生故障时进行故

障点的人工排查难度大且效率低。快速准确地实现线路故障定位, 进而采取相应措施以清除故障, 对于提高直流输电系统的运行可靠性, 减少系统停运造成的经济损失等均具有重要的现实意义<sup>[5]</sup>。

目前特高压直流输电线路故障定位主要采用行波故障定位法<sup>[6-8]</sup>和故障分析法<sup>[9-11]</sup>两类。行波定位法通过检测故障线路上暂态行波在测量端与故障点之间传播的时间来测量故障距离。该方法不受线路类型、故障电阻及两侧系统的影响, 且暂态行波中

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477120)

故障信息丰富,波头易于识别,已被广泛应用于交流输电系统的故障定位<sup>[12-14]</sup>。为应对行波信号中存在的噪声干扰,文献[15]提出了一种基于数学形态理论的多尺度数学形态滤波器,提高了信号突变点识别的准确性,进而结合行波测距方法提出了一种基于模式识别的单端故障定位算法,提高了直流输电系统线路故障定位的精度。文献[16]设计了一种基于行波固有频率的高压直流输电线路故障定位方法。通过对线路终端暂态电压进行频谱分析得到故障行波的固有频率,进一步结合故障线路的边界条件得到故障定位结果。文献[17]指出了采用比值方式的导数法进行故障测距时易造成故障发生时刻的误判,从而导致故障测距结果出现较大偏差。为此提出了一种基于波形变化比值的算法,有效消除了信号自身变化对故障时刻判定的影响,提高了故障测距结果的准确性。文献[18]提出了一种输电线路单端行波测距新算法。该方法通过检测各个行波到达测量端的时间,利用3或4个行波波头的时序关系可直接计算出故障点距离,避免了行波波速的影响,但该方法依赖于对多个行波波头的准确检测。故障分析法是根据系统参数和测得的电压和电流,通过分析计算求出故障距离。故障分析法受系统参数、对侧系统和故障点过渡电阻影响较大,且定位精度相对于行波定位法误差较大。

本文提出了不受波速影响的新型特高压直流输电线路故障定位方法。首先提出了基于导数法的故障发生判据,在此基础上提出了基于小波模极大值分析的故障到达时刻判定方法。分析了D型双端行波测距法的原理及其不足,提出了不受波速影响的改进双端行波测距算法,给出了特高压直流输电线路故障测距方法的实现流程。通过仿真验证了本文方法的正确性和有效性。

## 1 故障行波到达时刻判定

直流输电线路中某处发生故障时,在故障点等效故障电压源作用下会产生一系列包含故障信息的暂态行波,故障行波将沿输电线路向线路两端传播<sup>[19-24]</sup>。

本文首先通过导数法对读取的电流信息进行分析,确定故障到达线路两端时间的范围,对确定时间范围内的电流数据进行小波分析,确定行波波头到达测量端的准确时刻,为之后开展故障定位算法研究提供可靠依据。

### 1.1 基于导数法的故障判定

当输电线路发生故障时,线路电流通常将迅速增大,此时具有较大的电流变化率。但正常运行时

电流也具有一定的波动,需要首先排除正常波动对故障到达时刻判定可能造成的影响。

本文利用电流采样数据的变化进行故障发生的判定,计算公式为

$$K_i = \frac{|y(i+n) - y(i)|}{nT} > K_{th} \quad (1)$$

式中: $y(i+n)$ 和 $y(i)$ 分别为第 $i+n$ 和第 $i$ 个电流采样值, $n$ 为选定常数; $T$ 为数据采样周期; $K_{th}$ 为设定阈值。阈值 $K_{th}$ 的取值主要考虑系统正常运行时电流的波动变化,并且采样频率也对 $K_{th}$ 的取值有一定影响。因此, $K_{th}$ 的设定视系统正常运行时的波动量与对应的采样频率而定。

当首次满足阈值条件式(1)时,记录 $i$ 值并选取区间 $[i-H, i+H]$ 内的数据提供给后续小波分析, $H$ 为选定数据范围。

### 1.2 基于小波分析的到达时刻计算

小波变换可对时频域信号进行局部化分析,可以快速有效地提取信号特征,适用于故障暂态信号的处理<sup>[25-27]</sup>。

设 $f(x)$ 为信号函数,则信号在各尺度上的小波系数为 $W_s f(x)$ ,小波系数上存在某点 $x_0$ 满足:

$$|W_s f(x)| \leq |W_s f(x_0)| \quad (2)$$

式(2)中, $x_0$ 为小波系数的模极大值点<sup>[28-30]</sup>。模极大值点对应了故障行波到达测量端的时刻,其正负代表信号突变的方向,而其幅值代表信号突变的强度。通过小波分析方法可为后续设计故障定位算法提供行波到达测量端的准确时刻。

## 2 改进双端行波法

### 2.1 现有双端行波法的不足

现有D型双端行波故障测距法的原理如图1所示。

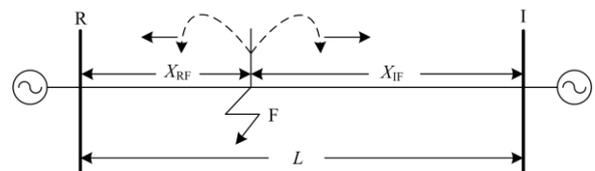


图1 D型双端行波法原理

Fig. 1 Principle of the D-type two-terminal traveling wave method

图1中F为故障点,故障发生时将由故障点F向线路两端传播故障行波。 $X_{RF}$ 和 $X_{IF}$ 分别为故障点F到测量端R端和I端的距离, $L$ 为输电线路全长。设故障行波第一次到达测量端R和I的时刻分别为 $t_R$ 和 $t_I$ ,则有

$$\frac{X_{RF}}{v} - \frac{L - X_{RF}}{v} = t_R - t_1 \quad (3)$$

进而可得

$$\begin{cases} X_{RF} = \frac{L + (t_R - t_1)v}{2} \\ X_{IF} = \frac{L + (t_1 - t_R)v}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $v$  为行波在输电线路中传播的速度。由式(4)可知, D型双端行波法仅需检测故障行波首次到达两个测量端的时间差即可得出测距结果。但故障测距结果受到信号采样频率和行波波速测量精度的影响, 其中行波波速对结果精度的影响尤为明显。

### 2.2 改进行波法原理

为避免测量行波波速, 本文利用故障行波连续两次到达某个测量端的时间。以测量端R为例, 行波第二次到达该端可分为两种情况, 如图2所示。

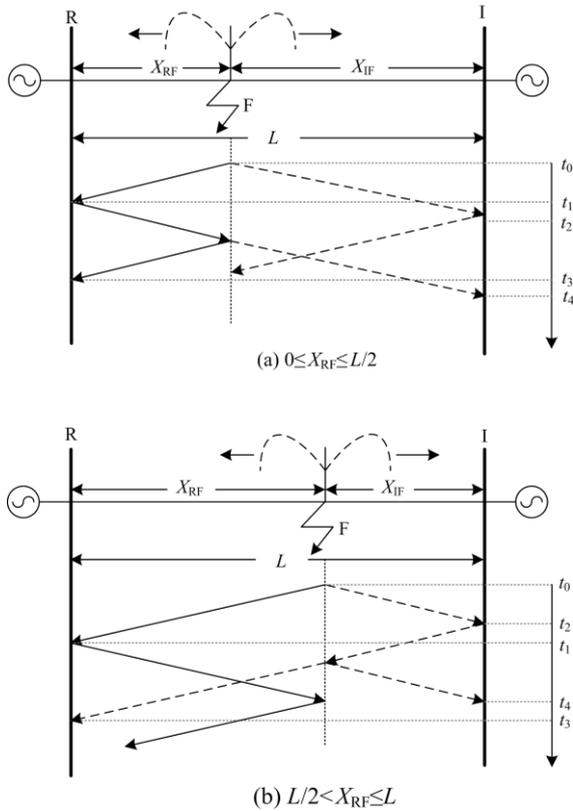


图2 行波传播示意图

Fig. 2 Diagram of traveling wave propagation

图2中,  $t_0$  为故障发生时刻,  $t_1$  和  $t_3$  分别为行波第一次和第二次到达测量端R的时刻,  $t_2$  和  $t_4$  分别为行波第一次和第二次到达测量端I的时刻。

如图2(a)所示, 当  $0 \leq X_{RF} \leq L/2$  时, R端接收到的两个行波分别为第一次到达的故障行波和该故障行

波在故障点的反射波。此时各行波到达时刻与故障距离的关系为

$$\begin{cases} v(t_1 - t_0) = X_{RF} \\ v(t_2 - t_0) = L - X_{RF} \\ v(t_3 - t_0) = 3X_{RF} \end{cases} \quad (5)$$

消去波速后可得

$$X_{RF} = \frac{L(t_3 - t_1)}{2(t_2 + t_3 - 2t_1)} \quad (6)$$

如图2(b)所示, 当  $L/2 < X_{RF} \leq L$  时, R端接收到的两个行波分别为第一次到达的故障行波和该故障行波经I端反射及在故障点折射后到达的行波。同理可得

$$X_{RF} = \frac{L(t_1 + t_3 - 2t_2)}{2(t_3 - t_2)} \quad (7)$$

理论上而言, 在  $t_1$ 、 $t_2$  和  $t_3$  均准确的情况下, 根据式(6)或式(7)均可得到故障点到R端的准确距离。但在  $L/2 < X_{RF}$  时, 由于  $t_3$  是故障行波经I端反射及在故障点折射后到达R端的时刻, 行波能量衰减较大, 实际通过小波分析得到的  $t_3$  时刻存在相对较大的误差。此时应以行波到达I端的两个时刻进行故障距离计算, 即

$$X_{RF} = L - \frac{L(t_4 - t_2)}{2(t_1 + t_4 - 2t_2)} \quad (8)$$

### 2.3 改进行波测距法流程

据上述分析, 本文提出的特高压直流输电线路故障测定算法流程如图3所示。

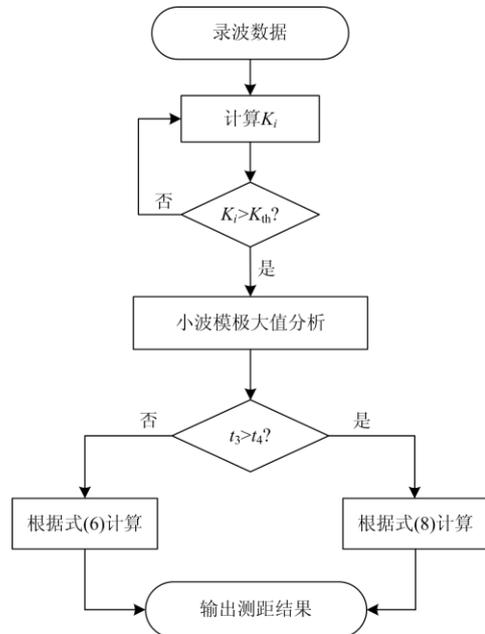


图3 故障测距算法流程图

Fig. 3 Flowchart of fault location algorithm

具体而言，本文改进故障定位算法的流程如下。

(1) 首先获取故障录波数据，进而根据式(1)计算导数值 $K_i$ ；当 $K_i$ 首次大于预设阈值 $K_{th}$ (本文取 $K_{th}=500$  kA/s)时，确定采样数据区间 $[i-H, i+H]$ (仿真中采用 $H=300$ )，本区间数据包含了行波到达时刻信息。本步骤有效减少了后续小波分析的数据量，且避免了未发生故障时波形自身波动的干扰。

(2) 对确定区间数据进行小波模极大值分析，确定出行波到达R端的两个时刻 $t_1$ 和 $t_3$ 以及行波到达I端的两个时刻 $t_2$ 和 $t_4$ 。

(3) 比较 $t_3$ 和 $t_4$ 。若 $t_3 \leq t_4$ ，表明故障距离 $X_{RF} \leq L/2$ ，采用式(6)进行故障距离计算；若 $t_3 > t_4$ ，则表明故障距离 $X_{RF} > L/2$ ，采用式(8)进行故障距离计算；并将故障测距结果输出。

### 3 仿真实验

本文以扎鲁特-青州±800 kV 特高压直流输电工程为对象开展仿真分析，该系统 PSCAD 仿真模型如图 4 所示。

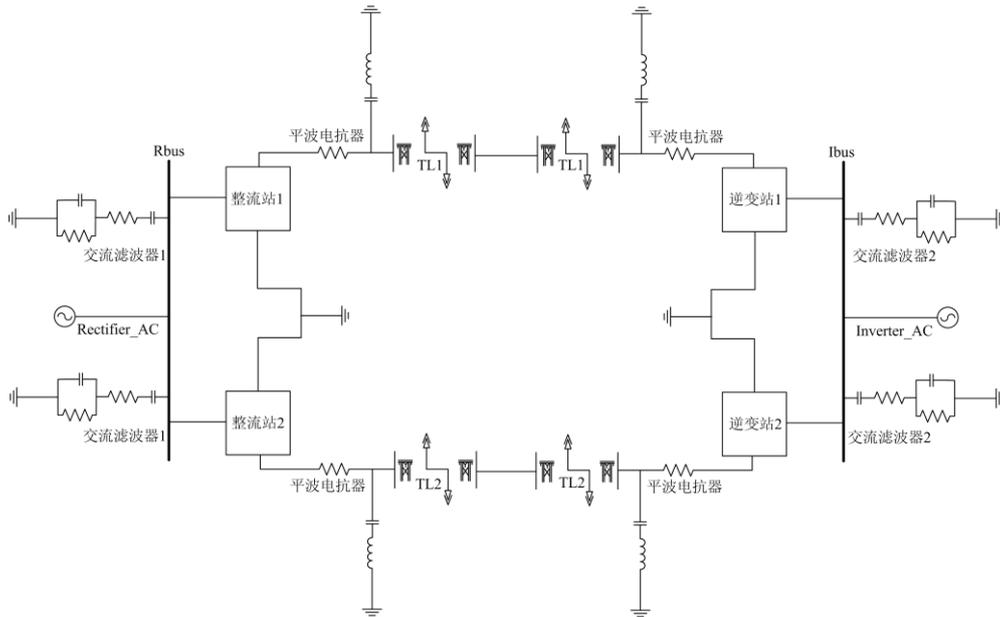


图 4 特高压直流输电仿真模型

Fig. 4 UHVDC transmission simulation model

图4中，本特高压直流输电模型采用双极运行方式，整个系统中共有两套整流装置和两套逆变装置，整流站与逆变站之间采用架空线路连接。其中，架空线选用频率相关相域模型(Frequency Dependent (Phase) Model)，该模型本质上是分布RLC行波模型，架空线全长设为300 km，经计算本模型行波波速为 $2.82 \times 10^8$  m/s。

#### 3.1 导数法仿真

设置仿真时长为1 s，故障发生时刻为0.6 s。测量端R的故障电流波形如图5所示。

图5中0.3 s前的波形对应仿真启动阶段。注意到除发生故障的时刻(对应电流波形B点)外，未发生故障时直流电流也存在波动，如图5中A点处。对这两点处进行小波分析，对应的模极大值系数如图5所示。可见未发生故障时，波形波动也可得到较大的小波模极大值，可能误判为故障行波到达测量端的时刻，影响了故障定位的精度。

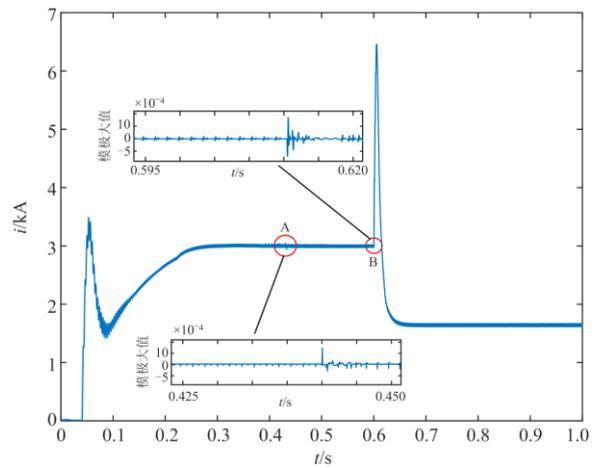


图 5 R端测量的电流波形

Fig. 5 Current waveform measured at terminal R

取 $n=20$ 、 $K_{th}=500$ ，基于式(1)计算A、B两点的电流导数分别为

$$K_A = \frac{|2.9210 - 2.9105|}{20 \times 5 \times 10^{-6}} = 105 \text{ kA/s} < K_{th}$$

$$K_B = \frac{|2.9411 - 3.0076|}{20 \times 5 \times 10^{-6}} = 665 \text{ kA/s} > K_{th}$$

由上述分析可知, 电流正常波动时的电流导数值远小于预设的阈值, 判断结果为非故障点, 避免了电流正常波动对故障测距的影响。

若故障波动点在采样数据区间 $[i-H, i+H]$ 内, 电流正常波动点的小波模极大值可能会产生故障行波到达测量端时刻的误判, 图6给出了电流正常运行波动点靠近故障发生时刻的电流波形图。其中, 故障发生在0.6 s。

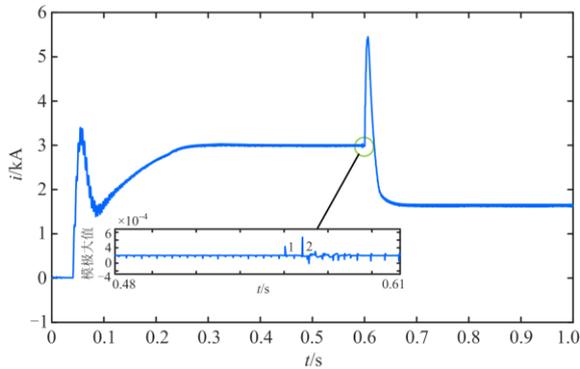


图6 波动点靠近故障发生时刻的电流波形

Fig. 6 Current waveform near the wave point of the fault

图6中0.3 s前的波形对应仿真启动阶段。图6中, 点1为电流正常波动点, 其电流导数值为214 kA/s; 点2为故障发生时刻, 其对应的导数计算值为628 kA/s。由两点导数计算值可知, 点2判断为故障发生时刻用于划定范围。由于电流正常波动点1靠近故障发生点2, 电流正常波动时点1的小波模极大值小于故障点2的小波模极大值。在选定采样区间 $[i-H, i+H]$ 内, 行波首次到达测量端的时刻为采样区内小波模极大值的最大值。故当故障点与未发生故障时直流电流的波动点距离很近, 本文提出的方法仍可避免将正常波动误判为故障点。

根据本文方法消除了电流波动的影响, 同时减少了后续小波分析的数据量, 为后续利用小波法进行准确故障行波到达时刻的计算提供了可靠的数据基础。

### 3.2 有效性对比

设置故障点过渡电阻为 $50 \Omega$ , 线路全长为300 km, 改变故障发生位置。表1和表2分别为单极接地和双极短路情况下, 本文改进故障定位方法(简称方法1)和常规双端D型行波法(简称方法2)所得到的测距结果。

表1 单极接地故障

Table 1 Unipolar grounding fault

$X_{RF}/\text{km}$	$X_{IF}/\text{km}$	$X_{RF\text{计算}}/\text{km}$ (相对误差)	
		方法2	方法1
50	250	51.89(3.78%)	50.10(0.20%)
75	225	76.70(2.27%)	75.16(0.21%)
100	200	97.34(2.66%)	99.81(0.19%)
150	150	150.00(0.00%)	150.00(0.00%)
175	125	176.51(0.86%)	175.19(0.11%)
200	100	201.15(0.58%)	200.21(0.10%)
250	50	251.77(0.71%)	250.09(0.04%)

表2 双极短路故障

Table 2 Bipolar short circuit fault

$X_{RF}/\text{km}$	$X_{IF}/\text{km}$	$X_{RF\text{计算}}/\text{km}$ (相对误差)	
		方法2	方法1
50	250	48.57(2.86%)	49.85(0.30%)
75	225	76.12(1.49%)	74.78(0.37%)
100	200	99.24(0.76%)	99.75(0.25%)
150	150	150.00(0.00%)	150.00(0.00%)
175	125	177.05(1.17%)	175.27(0.15%)
200	100	201.03(0.52%)	200.85(0.43%)
250	50	251.52(0.61%)	250.42(0.17%)

图7给出了测距结果误差的对比。

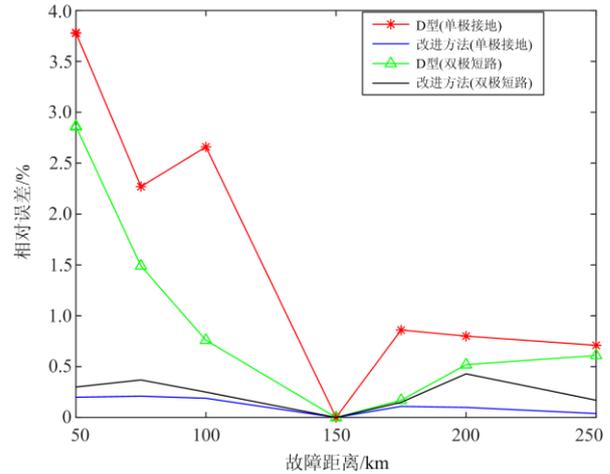


图7 测距结果对比

Fig. 7 Comparison of the fault location results

由图7可得出如下结论。(1) 故障距离为 $L/2$ 时, 故障行波首次到达两端时刻及行波中包含能量基本相同, 两种计算方法公式中与时间有关的项均被消除。因此, 方法1和方法2在故障距离为 $L/2$ 时的相对误差均为0.00%。(2) 发生单极接地故障时, 方法1的最大相对误差为0.2%, 而方法2的相对误差最大

为3.78%；发生双极短路故障时，方法1的最大相对误差为0.43%，而方法2的相对误差最大为2.86%。由此表明通过本文改进测距方法可有效提高传统D型双端测距法的精度。(3)方法1在不同故障类型下的测距结果略有差别，不同故障位置时双极短路故障的测距相对误差比相应的单极接地故障有所增大。发生双极故障时正负极线路均会产生故障行波，故障行波中包含的能量相对单极接地故障有所降低，进而影响到故障行波到达测量端时刻检测的准确性，造成测距误差略有增大。

由上述分析可知，本文提出的方法相对于D型双端行波法具有更高的测距精度，且不同故障类型对故障测距结果影响较小。

### 3.3 利用反射波定位的有效性验证

设置单极接地故障且故障点过渡电阻为50 Ω，改变故障点位置。当 $L/2 < X_{RF} \leq L$ 时，分别以式(7)和式(8)进行故障距离的计算，结果如表3所示。

表3 两种计算方法结果对比

Table 3 Result comparison of two computation methods

$X_{RF}/\text{km}$	$X_{IF}/\text{km}$	$X_{RF\text{计算}}/\text{km}$ (相对误差)	
		式(7)	式(8)
175	125	173.44(0.89%)	175.19(0.11%)
200	100	201.44(0.72%)	200.21(0.10%)
250	50	251.36(0.55%)	250.09(0.04%)
275	25	273.22(0.65%)	275.62(0.23%)

根据表3可知，采用式(7)进行故障距离计算时的相对误差最小为0.55%，最大为0.89%；而采用式(8)计算所得结果的相对误差最大0.23%，最小仅为0.04%。由此可见，根据故障位置距线路中点不同的情况来进行故障距离计算，该方法进一步提高了故障测距精度。

### 3.4 近区故障和过渡电阻的影响

设置单极接地故障且故障点过渡电阻为50 Ω，采用本文方法所得到的输电线路近区(靠近测量端距离不大于线路全长的10%)故障的测距结果如表4所示。

表4 近区故障测距结果

Table 4 Ranging result for near-zone fault

$X_{RF}/\text{km}$	$X_{IF}/\text{km}$	$X_{RF\text{计算}}/\text{km}$	绝对误差/km
4	296	4.56	0.56
6	294	5.75	0.25
8	292	6.95	1.05
10	290	9.77	0.23
12	288	12.07	0.07
16	284	16.03	0.03
20	280	19.62	0.38
24	276	24.05	0.05

根据表4可知，近区故障时故障测距的绝对误差最大为1.05 km，此时 $X_{RF}=8$  km；故障测距最小误差仅为0.03 km，此时 $X_{RF}=16$  km。结果表明本文提出的故障测距方法在近区故障也有较好的故障测距精度。

表5给出了单极接地故障不同过渡电阻下的故障测距结果。

表5 过渡电阻的影响

Table 5 Effect of the transition resistor

$X_{RF}/\text{km}$	$X_{RF\text{计算}}/\text{km}$ (相对误差)		
	50 Ω	100 Ω	200 Ω
50	50.10(0.20%)	49.71(0.58%)	49.88(0.24%)
75	75.16(0.21%)	75.27(0.36%)	74.56(0.59%)
125	124.81(0.15%)	125.38(0.30%)	125.27(0.22%)
200	200.21(0.10%)	200.77(0.38%)	199.49(0.26%)
275	275.62(0.23%)	275.29(0.11%)	274.30(0.25%)

由表5可知，当过渡电阻分别为50 Ω、100 Ω、200 Ω时，本文方法所得最大相对误差分别为0.23%、0.58%、0.59%；当 $X_{RF}=75$  km且过渡电阻为200 Ω时，测距最大相对误差为0.59%。本文提出的改进测距方法在不同过渡电阻下仍具有较高的精度。

## 4 结论

本文对特高压直流输电线路故障定位方法开展了研究。设计了以电流导数为判据的故障发生时刻范围确定方法，进而对确定范围内数据进行小波模极大值分析，有效避免了正常电流波动可能造成的故障误判，提高了故障行波到达测量端时刻的准确性并减小了数据计算量。进一步设计了基于双端行波方法的改进故障测距算法，有效消除了行波波速变化对故障测距结果的影响。仿真结果表明，本文方法相对于传统D型双端行波法具有更高的故障测距精度，对不同类型故障和不同故障过渡电阻具有良好的适应性，同时也能较好地应用于近区故障的定位。

## 参考文献

- [1] 张希鹏, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 基于 WEMTR 的柔性直流输电线路故障测距[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 589-598.  
ZHANG Xipeng, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Fault location in VSC-HVDC transmission lines based on WEMTR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 589-598.
- [2] 杨林, 王宾, 董新洲. 高压直流输电线路故障测距研究综述[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 185-191.  
YANG Lin, WANG Bin, DONG Xinzhou. Overview of

- fault location methods in high voltage direct current transmission lines[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 42(8): 185-191.
- [3] BAO K Q, WU B X, XU Y H. Transmission line fault location based on Hilbert-Huang Transformation and SVM[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 333-335(2): 1673-1678.
- [4] 谢菁, 陈平. 直流输电线路行波故障测距系统[J]. *山东理工大学学报*, 2006, 20(3): 47-50.  
XIE Jing, CHEN Ping. A traveling wave based fault locating system for HVDC transmission lines[J]. *Journal of Shandong University of Technology*, 2006, 20(3): 47-50.
- [5] 周嘉阳, 李凤婷, 刘渊, 等. 基于直流电抗电压的柔性直流配电网故障测距方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(19): 95-101.  
ZHOU Jiayang, LI Fengting, LIU Yuan, et al. A fault location method for flexible DC distribution network based on DC reactor voltage[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(19): 95-101.
- [6] LOPES F V, DANTAS K M, SILVA K M, et al. Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(2): 873-880.
- [7] SUONAN J, GAO S, SONG G, et al. A novel fault-location method for HVDC transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(2): 1203-1209.
- [8] LIANG Y, WANG G, LI H. Time-domain fault-location method on HVDC transmission lines under unsynchronized two-end measurement and uncertain line parameters[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(3): 1-8.
- [9] 束洪春, 田鑫萃, 白冰, 等. 基于多测点的特高压长距离直流输电线路行波故障测距[J]. *高电压技术*, 2017, 43(7): 2105-2113.  
SHU Hongchun, TIAN Xincui, BAI Bing, et al. Fault location for traveling wave based on multi measuring points for UHVDC long distance transmission line[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(7): 2105-2113.
- [10] WEN F, YUAN L. Wide area measurements based fault detection and location method for transmission lines[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(1): 53-64. DOI: 10.1186/s41601-019-0121-9.
- [11] MALLAT S, HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, 38(2): 617-643.
- [12] 李海锋, 丘映丹, 郭履星, 等. 基于单回电气量的同塔双回直流线路故障测距算法[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(12): 172-178.  
LI Haifeng, QIU Yingdan, GUO Lixing, et al. Fault location method for double-circuit HVDC transmission lines on the same tower based on single-circuit electrical quantities[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(12): 172-178.
- [13] HE Z. Application of wavelet analysis in high (voltage) transmission line fault location[M] // *Wavelet Analysis and Transient Signal Processing Applications for Power Systems*, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2016.
- [14] DÜZGÜN A, MAMI M S, MÜSLÜM A, et al. Transmission line fault location using traveling wave frequencies and extreme learning machine[J]. *Electric Power Systems Research*, 2018, 155: 1-7.
- [15] 李学鹏. 高压直流输电线路行波保护及其故障定位的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.  
LI Xuepeng. Study on traveling wave protection and fault location for HVDC transmission lines[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2006.
- [16] 廖凯, 何正友, 李小鹏. 基于行波固有频率的高压直流输电线路故障定位[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(3): 104-109.  
LIAO Kai, HE Zhengyou, LI Xiaopeng. Fault location of HVDC transmission line based on the natural frequency of traveling wave[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(3): 104-109.
- [17] 徐伟宗, 唐昆明. 基于导数法的故障行波波头识别改进算法[J]. *电网技术*, 2010, 34(1): 198-202.  
XU Weizong, TANG Kunming. An improving derivation algorithm to recognize wave heads of fault generated traveling waves[J]. *Power System Technology*, 2010, 34(1): 198-202.
- [18] SALAT R, OSOWSKI S. Accurate fault location in the power transmission line using support vector machine approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(2): 979-986.
- [19] 段建东, 刘静, 陆海龙, 等. 基于行波瞬时频率的高压直流输电线路故障测距方法[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(7): 1842-1848.  
DUAN Jiandong, LIU Jing, LU Hailong, et al. Fault location method based on traveling-wave instantaneous frequency for HVDC transmission lines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(7): 1842-1848.
- [20] 李自乾, 樊艳芳, 胡剑生. 不受波速影响的特高压直流输电线路单端故障测距方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(18): 142-148.  
LI Ziqian, FAN Yanfang, HU Jiansheng. Single terminal fault location method of UHVDC transmission line immune to wave speed[J]. *Power System Protection and*

- Control, 2018, 46(18): 142-148.
- [21] 李莉, 熊炜, 赵艺杰, 等. 基于模糊遗传算法的输电线路故障混合威布尔分布模型[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 60-66.  
LI Li, XIONG Wei, ZHAO Yijie, et al. Mixed Weibull distribution model of transmission line fault based on fuzzy genetic algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 60-66.
- [22] 朱正鼎, 潘文霞, 苏锜. 新型基于频率特性的电缆故障定位方法[J]. 广东电力, 2018, 31(12): 86-92.  
ZHU Zhengding, PAN Wenxia, SU Qi. New cable fault location method based on frequency characteristics[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(12): 86-92.
- [23] 黄龙, 肖湘纯, 曾祥君, 等. 混合线路故障行波综合定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 93-101.  
HUANG Long, XIAO Xiangchun, ZENG Xiangjun, et al. Integrated fault location method for mixed lines based on traveling wave[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 93-101.
- [24] 陈志伟, 舒勤. 基于小波包变换的混联配电网故障定位方法[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 100-108.  
CHEN Zhiwei, SHU Qin. Fault location method for hybrid distribution network based on wavelet transformation[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 100-108.
- [25] 陈仕龙, 谢佳伟, 毕贵红, 等. 一种特高压直流输电线路神经网络双端故障测距新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 257-264.  
CHEN Shilong, XIE Jiawei, BI Guihong, et al. A novel two terminal fault location method used ANN for UHVDC transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 257-264.
- [26] LI Y, FU J, WANG Q, et al. Study on T type transmission line fault location based on voltage traveling wave[C] // 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), September 19-22, 2016, Chengdu, China: 1-5.
- [27] 朱清代, 张纯, 石玉东, 等. 直流输电单极故障引发接地极线路击穿的定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 64-70.  
ZHU Qingdai, ZHANG Chun, SHI Yudong, et al. Research on location method of grounding electrode line fault caused by unipolar fault of HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 64-70.
- [28] 武霁阳. 高压直流线路行波保护新原理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.  
WU Jiyang. New principles of traveling wave protection for HVDC lines[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [29] 董新洲, 葛耀中, 徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 76-80.  
DONG Xinzhou, GE Yaozhong, XU Bingyin. Research of fault location based on current travelling waves[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 76-80.
- [30] 艾斌, 吕艳萍. 基于小波模极大值性的行波信号识别[J]. 电网技术, 2003, 27(5): 55-57.  
AI Bin, LÜ Yanping. Traveling wave signal identification based on wavelet polarity of modulus maximum[J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 55-57.

收稿日期: 2019-08-29; 修回日期: 2019-12-25

作者简介:

孙 广(1968—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为输变电运检管理;

王 阳(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特高压直流输电运行控制技术; E-mail: 493706905@qq.com

薛 枫(1976—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为特高压直流输电系统二次设备管理。

(编辑 许威)