

DOI: 10.7667/PSPC170248

# 线缆混合输电线路故障组合行波测距方法及影响因素研究

黄荣辉<sup>1</sup>, 李勋<sup>1</sup>, 张宏钊<sup>1</sup>, 伍国兴<sup>1</sup>, 刘顺桂<sup>1</sup>, 安韵竹<sup>2</sup>, 陈平<sup>2</sup>, 邵健<sup>2</sup>

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001; 2. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000)

**摘要:** 电缆-架空线混合输电线路的故障暂态行波具有复杂多变的传播特性。通过理论分析和仿真验证, 深入研究电缆-架空线混合线路故障暂态行波的产生机理及传播特性。并基于此阐明混合线路的单双端组合行波测距原理, 详细探究了过渡电阻、故障初始相角、故障类型、故障距离对混合输电线路故障电压行波、电流行波的传播特性及组合行波测距精度的影响。同时计算分析了电缆金属屏蔽层单端接地线上的故障电流随故障距离的变化关系。过渡电阻、故障初始相角、故障类型对 220 kV 电缆-架空线混合线路的故障电压行波、电流行波幅值有显著影响, 但对行波的第一个波头到达线路两端所需时间无影响。不同故障位置下, 混合线路故障行波的幅值及第一个波头到达两端所需时间不同。电缆金属屏蔽层采用单端接地方式时, 电流行波幅值随电缆故障距离增大呈非线性单调递减的特性。

**关键词:** 混合线路; 故障因素; 行波幅值; 电缆; 金属屏蔽层

## Research on combined traveling wave fault location method of overhead line-cable hybrid line and influencing factors

HUANG Ronghui<sup>1</sup>, LI Xun<sup>1</sup>, ZHANG Hongzhao<sup>1</sup>, WU Guoxing<sup>1</sup>, LIU Shungui<sup>1</sup>, AN Yunzhu<sup>2</sup>, CHEN Ping<sup>2</sup>, SHAO Jian<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518001, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

**Abstract:** Fault transient traveling wave of cable and overhead line hybrid transmission line has the characteristics of complex and variable propagation. To this end, this paper uses theoretical analysis and simulation verification to do the research of the mechanism of production and propagation characteristics of fault transient traveling wave of cable and overhead line hybrid line in depth. On this basis, the principle of single line traveling wave distance measuring principle for hybrid line is expounded and the influence of transition resistance, fault inception angle, fault type, fault position on the fault voltage traveling wave, current traveling wave propagation characteristics and combined traveling wave fault location precision is explored in detail. At the same time, the relationship between the fault current and the fault distance of cable-metal shielding layer single-terminal grounded line is calculated and analyzed. The transition resistance, initial phase angle, fault type have a significant impact on fault voltage traveling wave and current traveling wave amplitude of 220 kV cable-overhead-line hybrid line, but they have no effect on the time required to reach the first wave of the traveling wave; under different fault location, the time that the amplitude of fault traveling wave of hybrid line and initial row wave surge reach both sides of the line is different; the current traveling wave amplitude of the single end ground wire of the cable metal shield decreases with the increase of the cable part fault distance, that is nonlinear monotone decreasing characteristic.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid (No. 090000KK52140041) and National Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2016EL17).

**Key words:** hybrid line; fault factors; traveling wave amplitude; cable; metal shielding layer

## 0 引言

近年来, 随着电力电缆在高压输电网的推广应

用, 输电网的输电方式由传统纯架空线路输电转变为电缆-架空线混合线路输电。由于架空线与电缆的材料参数、结构参数、电气特性参数等均明显不同, 电缆的波阻抗和波速度均明显小于架空线的波阻抗和波速度。线路中的故障行波传播到架空线与电缆连接点处必然发生强烈的折反射, 导致行波在混合

基金项目: 中国南方电网公司科技项目(090000KK52140041); 山东省自然科学基金项目(ZR2016EL17)

线路中出现复杂的传播过程,影响行波测距在混合线路中的精确性。因此,明晰混合输电线路故障暂态行波的传播特性,探究故障电流行波、电压行波与各种故障因素之间的相互关系,对减小混合输电线路的测距误差具有重要的意义<sup>[1-2]</sup>。

行波法<sup>[3]</sup>是电力系统故障定位领域公认的最为精确、适用范围最广的故障测距方法。行波测距算法精度主要依赖故障行波波头时间的提取。因此,如何有效提取故障行波波头时刻成为电力系统行波特性研究领域的关注问题之一。单端行波法<sup>[4-5]</sup>主要通过分析行波分量衰减特性,实现对各次行波性质的识别。文献[6]通过分析及提取故障行波自然频率主频率,实现单端测距,但受到线路噪声、耦合及谐波干扰等因素的作用,将会影响自然主频率提取,且测距误差较大。文献[7]通过分析固有频率特性,结合单双端行波测距原理,实现杆塔故障定位,该方法可靠性高,可减小测距误差。文献[8]对配电网短距离输电线路中零模行波分量衰减特性进行分析验证,为零模分量在行波波头识别中的应用提供了理论基础;文献[9]通过对行波线模分量和零模分量衰减特性进行分析,提出通过线模分量和零模分量波速差值对各次行波波头进行识别的方法;但受线路分布参数、线路实际长度等因素的影响,零模分量会产生较为严重的衰减和色散。所以,对于长距离输电线路,利用零模分量识别行波波头的方法还有待进一步验证。文献[10-11]提出向故障线路注入特征信号,通过识别特征信号反射波波头的方法,实现故障定位。该方法不需要对故障行波进行提取,但注入特征信号可能会对电力设备造成冲击。双端行波法<sup>[12]</sup>通过对行波波头初次到达线路两端的时刻进行提取,实现故障测距。文献[13]提出通过检测暂态电流行波波头到达线路两侧的时刻,利用双端原理进行测距的方法,与单端测距方法相比,该方法原理简单,计算量小,不需要考虑行波分量的衰减特性,只需利用行波波头到达时刻即可实现测距,经验证该方法平均测距误差不超过 400 m,满足测距精度要求。

为了深入研究电缆-架空线混合线路中故障暂态行波的传播特性,本文首先从行波原理出发分析电缆-架空线混合线路故障暂态过程,并基于此提取故障暂态行波的时间参数,阐述单双端组合行波测距原理。搭建 220 kV 电缆-架空线混合线路故障暂态模型,仿真分析过渡电阻、故障初始相角、故障类型、故障距离对混合线路两端故障电压行波和电流行波的影响以及对混合线路测距精度的影响,探究电缆金属屏蔽层单端接地、线路故障时电缆金

属屏蔽层接地线上故障电流与故障距离的相互关系。

## 1 故障暂态行波传播特性及测距方法分析

### 1.1 故障线路等效变换原理

如图 1(a)所示,当电力线路发生接地故障时,故障点处的等效电路如图 1(b)所示。通过叠加原理<sup>[14]</sup>对故障线路进行变换,将其分解为非故障分量和故障分量,其等效电路分别如图 1(c)、图 1(d)所示。

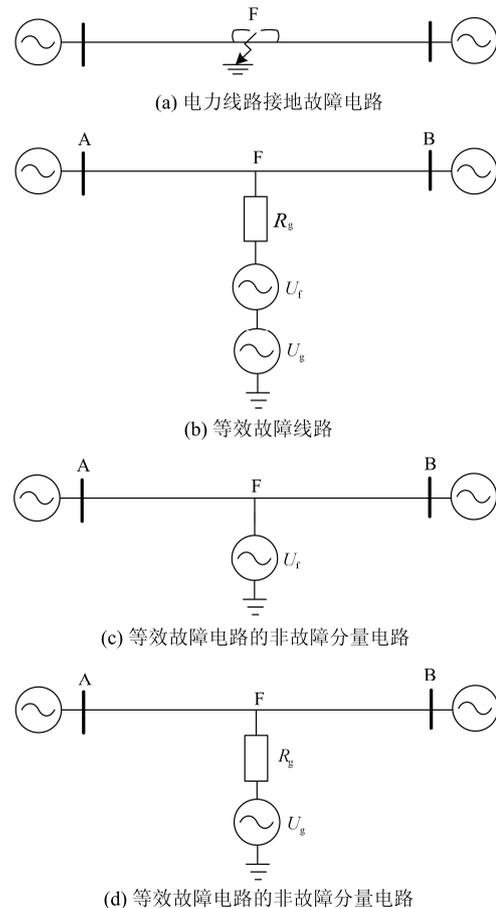


图 1 故障线路等效变图

Fig. 1 Fault line equivalent transformation diagram

$U_f$ 为电力线路 F 处的电压,当 F 点处发生接地故障时,可在接地点串联一电压源  $U_g$ ,  $U_g$  数值大小与  $U_f$  大小相等、方向相反,两者串联后,其值为零,可等效为故障点接地情况。非故障分量是指未发生故障时线路的正常运行状态,故障分量是指发生故障后作用在线路上的故障电气量,它只在故障发生后出现且独立于非故障分量,其中,故障电气量包括故障电压分量  $u_g$  和由其产生的故障电流分量  $i_g$ 。线路各点电压、电流关系如式(1)、式(2)所示。

$$u = u_0 + u_g + R_f i_g \quad (1)$$

$$i = i_0 + i_g \quad (2)$$

式中:  $u_0$  为故障前线路上的电压, 单位为 kV;  $i_0$  为故障前线路上的电流, 单位为 A;  $R_f$  为过渡电阻, 单位为  $\Omega$ 。

由式(1)和式(2)可知, 当故障点接地电阻越大时, 对于点 F, 由于  $U_g$  一定, 故障电流分量  $i_g$  随之变小, 导致线路各点故障电压、电流随过渡电阻升高而变小。

### 1.2 故障行波折、反射过程

当输电线路发生短路故障时, 暂态故障电压、电流波从故障点逐渐向线路两端传播, 并在故障点及线路两侧端点处产生折射、反射过程。当线路为电缆和架空线连接的混合输电线路时, 由于电缆和架空线波阻抗不同, 导致故障行波在电缆-架空线连接点处产生折射和反射, 进一步增加了到达线路两端各次行波的复杂性。

假设输电线路由长度为  $L_1$ 、波阻抗为  $Z_1$  的线路 1 与长度为  $L_2$ 、波阻抗为  $Z_2$  的线路 2 构成, 当电压幅值为  $u_{1q}=U_0$  的行波由架空线传播到电缆时, 会在连接点处发生折射和反射, 连接点处电压、电流关系如图 2 所示<sup>[15]</sup>。

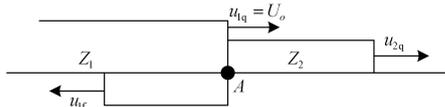


图 2 连接点电压和电流关系图

Fig. 2 Relation between voltage and current at the connection point

入射电压波  $u_{1q}$  由线路 1 传播至连接点 A, 其对应的入射电流波为  $i_{1q}$ , 由于连接点两侧线路波阻抗不同, 行波在 A 点产生折射电压波  $u_{2q}$  和反射电压波  $u_{1r}$ ,  $u_{2q}$  和  $u_{1r}$  分别向线路 1 和线路 2 传播, 对应的折射电流波和反射电压波分别为  $i_{2q}$  和  $i_{1r}$ 。由波的折反射原理, 入射电压波和反射电压波的求取公式为

$$u_{2q} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} u_{1q} = \alpha u_{1q} \quad (3)$$

$$u_{1r} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} u_{1q} = \beta u_{1q} \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为行波的折射系数;  $\beta$  为行波的反射系数, 其值仅和线路的波阻抗有关。

根据线路连接情况,  $\alpha$ 、 $\beta$  的取值范围为:  $0 \leq \alpha \leq 2$ ,  $-1 \leq \beta \leq 1$ , 由式(3)和式(4)可知, 折射

电压波极性与入射电压波极性相同, 折射电压波极性由连接点两侧线路波阻抗共同决定。若线路由架空线和电缆构成, 由于架空线波阻抗大于电缆波阻抗, 则行波由架空线传播到电缆或由电缆传播到架空线将导致折射波性质发生变化, 若规定入射波极性为正, 则通过行波极性获得各次到达线路检测点行波波头性质, 当线路 1 和线路 2 分别为架空线和电缆时, 入射波及线路连接点 A 处折射、反射波性质分别如表 1 所示, 其中, 正、负极性分别用“+”、“-”表示。

表 1 连接点反射波和折射波极性

Table 1 Reflection wave and refraction wave nature at the connection point

线路 1	线路 2	$\alpha$	$\beta$	入射波极性	A 点反射波极性	A 点折射波极性
架空线	电缆	$\alpha > 0$	$\beta < 0$	+	-	+
电缆	架空线	$\alpha > 1$	$\beta > 0$	+	+	+

### 1.3 线缆混合线路故障行波测距原理

当故障点发生接地故障时, 故障行波浪涌分别向线路两端传播, 并在线路连接点及端点处发生折、反射过程, 各次故障行波到达时间由检测装置采集, 故障行波折、反射过程如图 3 所示。

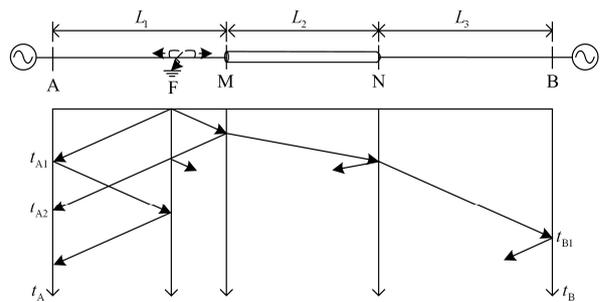


图 3 混合线路上故障行波折、反射示意图

Fig. 3 Figure of fault traveling wave refraction and reflection

当混合线路发生故障时, 测距原理首先利用故障初始行波到达线路两端的时刻  $t_{A1}$ 、 $t_{B1}$  求取时间差值  $\Delta t = t_{A1} - t_{B1}$ , 通过  $\Delta t$  的值判断故障所在线路区间, 同时, 利用上述原理分析故障行波波头性质, 判断各次行波为故障点反射波或对端母线反射波。

以故障发生在线路 AM 段为例, 若  $t_{A2}$  为故障点反射波, 则故障点 F 到线路 A 端的距离为  $L_{AF} = \frac{t_{A2} - t_{A1}}{2} v_1$ , 若  $t_{A2}$  为线路连接点 M 点的反射波, 则故障点 F 到线路 A 端的距离为  $L_{AF} = L_1 - \frac{t_{A2} - t_{A1}}{2} v_1$ , 其中  $L_1$  为 AM 段线路长度,

$v_1$  为故障行波在线路 AM 上的传播速度，通过结合单、双端测距原理实现故障测距<sup>[16]</sup>。

## 2 不同因素对线缆混合线路故障行波测距精度的影响

为了分析不同影响因素对电缆-架空线混合线路组合行波测距方法的影响，本节在 PSCAD 仿真软件中搭建 220 kV 架空线-电缆-架空线混合输电线路模型，仿真计算不同因素对混合线路两端故障电压行波和电流行波的影响程度。改变故障点接地电阻大小、故障初始相角和故障类型等因素，通过定性分析故障电流、电压行波在各因素中的特性，总结各因素对故障测距精度的影响<sup>[17-19]</sup>。

电力线路两端系统电抗均为  $0.0314 \Omega$ ，架空线 AM 段长度  $L_1=13 \text{ km}$ ，电缆 MN 段长度  $L_2=6 \text{ km}$ ，架空线 NB 段长度  $L_3=10 \text{ km}$ ，仿真频率为 1 MHz，故障行波在架空线中传播速度为  $300 \text{ km/ms}$ ，在电缆中传播速度为  $190 \text{ km/ms}$ ，线路连接方式如图 4。

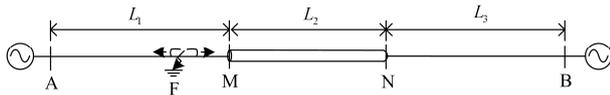


图 4 220 kV 混合输电线路模型

Fig. 4 Model of 220 kV hybrid transmission line

### 2.1 过渡电阻

在架空线 AM 段设置 A 相单相接地故障点 F，故障点 F 距 A 端的距离为 9.6 km，分别设置故障点 F 的接地电阻为  $0 \Omega$ ， $50 \Omega$ ， $300 \Omega$ ， $500 \Omega$ 。混合线路 A、B 两端监测到的故障电压行波、电流行波如图 5 所示。

设故障发生时刻  $t=0$ ，对故障行波到达检测点时刻进行提取，并结合单、双端行波原理对故障点进行测距，结果如表 2 所示。

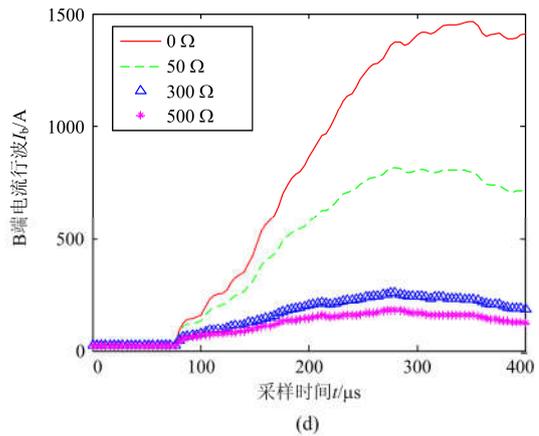
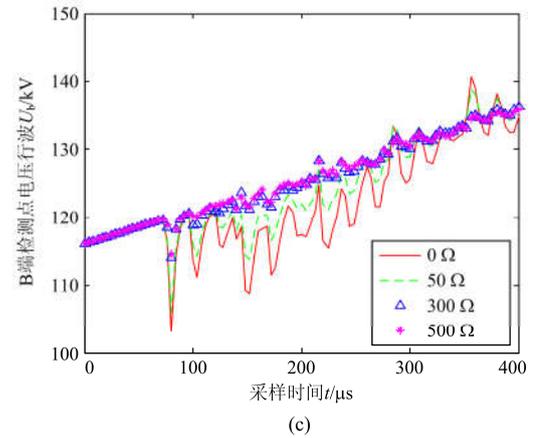
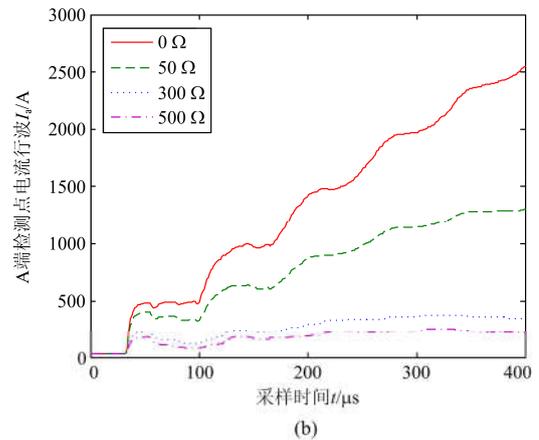
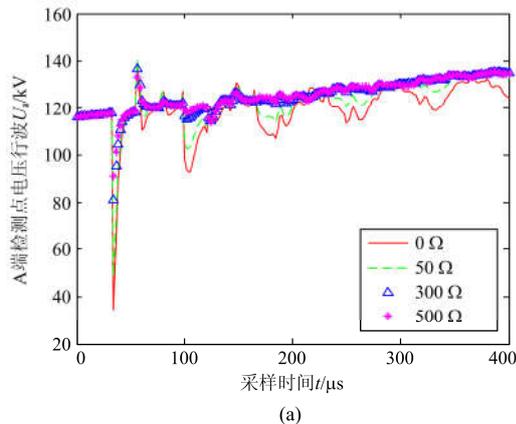


图 5 检测点故障行波波形

Fig. 5 Fault current traveling wave of testing point

表 2 故障行波到达检测点时刻

Table 2 Moment of fault traveling wave arrived at the testing point

接地电阻/ $\Omega$	$t_{A1}/\mu\text{s}$	$t_{A2}/\mu\text{s}$	$t_{B1}/\mu\text{s}$	$\Delta t/\mu\text{s}$
0	32	54	75	-43
50	32	54	75	-43
300	32	54	75	-43
500	32	54	75	-43

由图 5 可知, 当故障点接地电阻发生变化时, A、B 两端的电压、电流行波发生变化, 接地电阻越大, 故障电压、电流行波幅值随之减小, 与叠加原理分析结果一致。同时, 由表 2 可知故障行波到达时刻与故障点接地电阻变化无关, 因此, 故障点接地电阻不会对测距结果产生影响。

### 2.2 故障初始相角

在架空线 AM 段设置 A 相单相接地故障点 F, 故障点 F 距 A 端的距离为 9.6 km, 分别设置故障点 F 的故障初始相角为 30°、60°、90°。混合线路 A、B 两端监测到的故障电压行波、电流行波如图 6 所示。

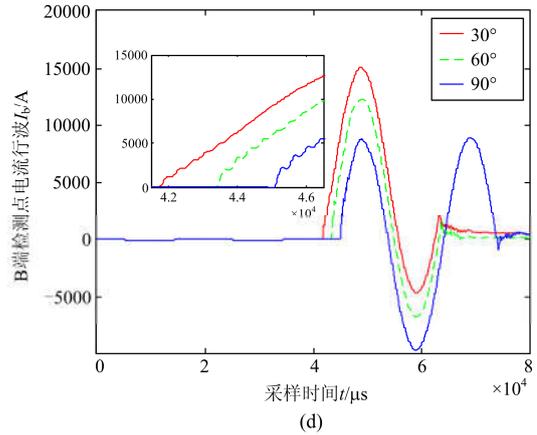
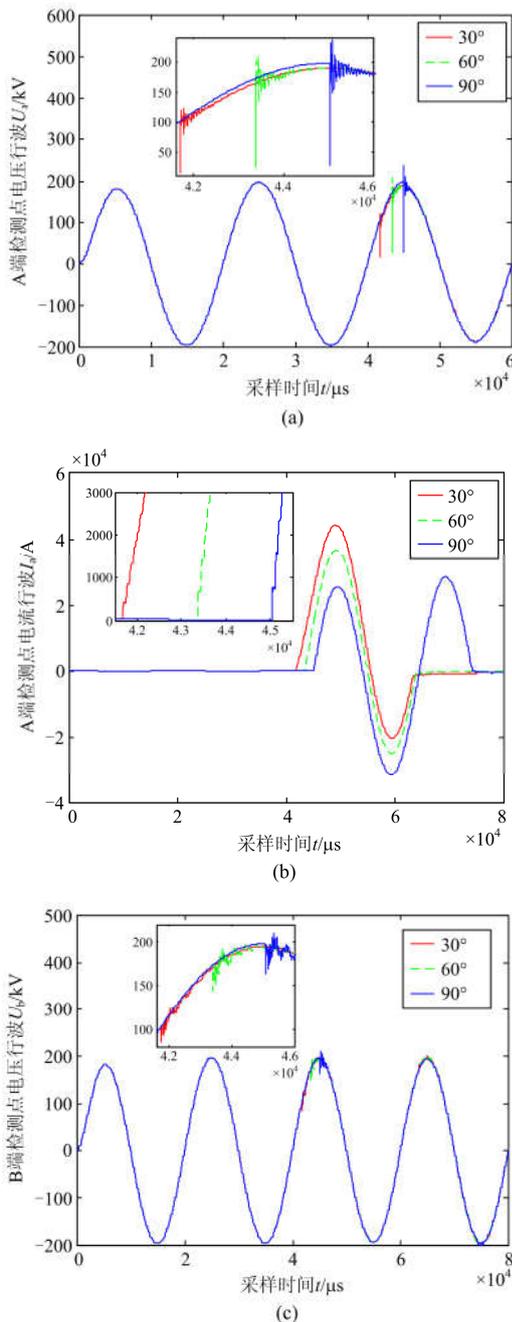


图 6 检测点故障行波波形

Fig. 6 Fault current traveling wave of testing point

设故障发生时刻  $t=0$ , 对故障行波到达检测点时刻进行提取, 利用行波测距原理对故障点进行测距, 结果如表 3 所示。

表 3 故障行波到达检测点时刻

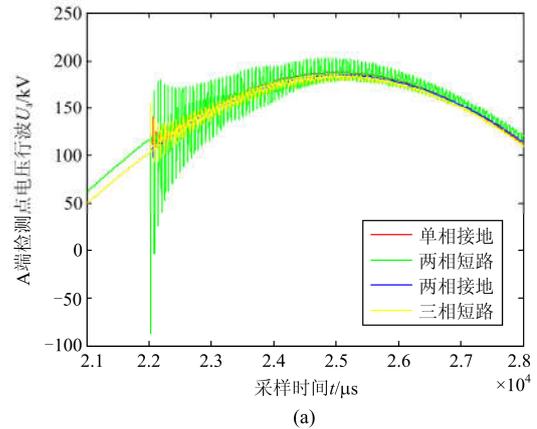
Table 3 Moment of fault traveling wave arrived at the testing point

故障初始相角	$t_{A1}/\mu\text{s}$	$t_{A2}/\mu\text{s}$	$t_{B1}/\mu\text{s}$	$\Delta t/\mu\text{s}$
30°	33	55	76	-43
60°	32	54	75	-43
90°	33	55	76	-43

由图 6 可知, 故障初始相角不同时, 故障电压、故障电流变化特性相同, 由表 3 可知, 故障初始相角对行波到达检测装置时刻造成影响较小, 各次故障行波到达时刻可准确提取, 因此, 故障初始相角变化对测距精度影响较小。

### 2.3 故障类型

在架空线 AM 段设置故障点 F, 故障点 F 距 A 端的距离为 9.6 km, 分别设置故障点 F 的 A 相单相接地、AB 相间短路、AB 两相短路接地、三相短路接地, 仿真结果如图 7 所示。



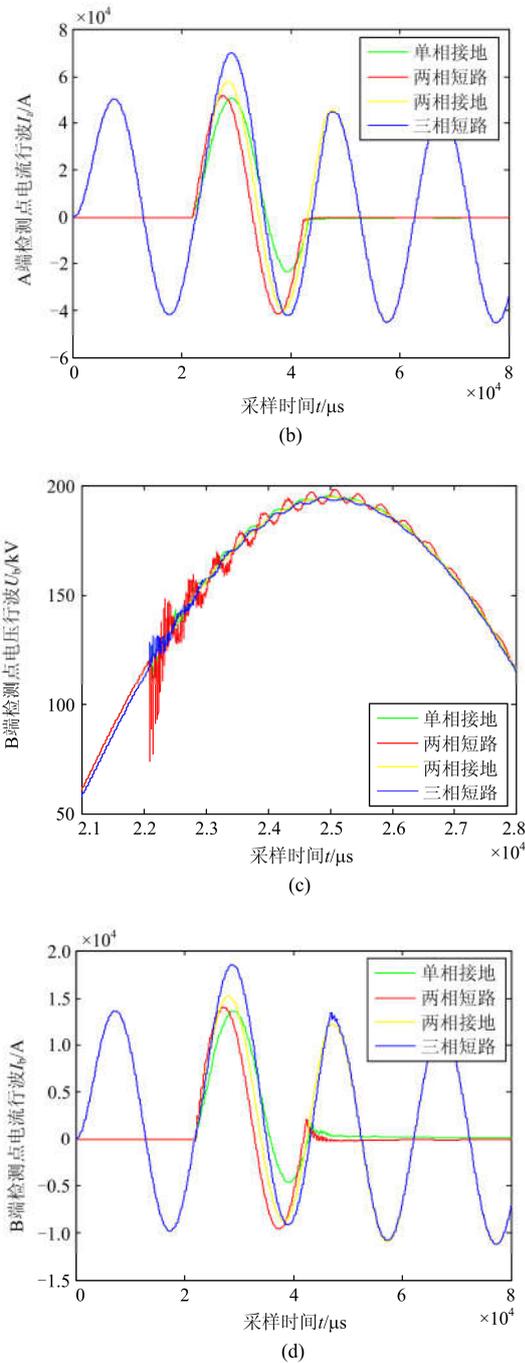


图 7 检测点故障行波波形

Fig. 7 Fault current traveling wave of testing point

设故障发生时刻  $t=0$ ，对 A 相故障行波到达检测点时刻进行提取，利用行波测距原理对故障点进行测距，结果如表 4 所示。

由表 4 可知，故障相接地和相间短路故障不同时，会造成第二次故障行波到达检测端的时刻发生变化，因此，故障类型不同时可对测距结果造成影响。

表 4 故障行波到达检测点时刻

Table 4 Moment of fault traveling wave arrived at the testing point

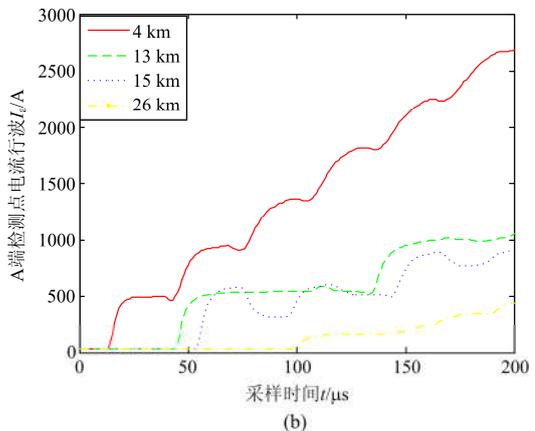
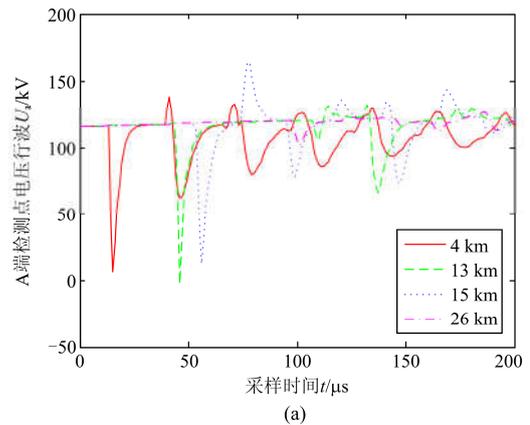
故障类型	$t_{A1}/\mu\text{s}$	$t_{A2}/\mu\text{s}$	$t_{B1}/\mu\text{s}$	$\Delta t/\mu\text{s}$
单相接地	26	58	80	-54
两相短路	26	61	80	-54
两相接地	26	58	80	-54

## 2.4 故障位置

### 2.4.1 故障位置对混合线路两端故障暂态行波的影响

通过上文分析可知，各种故障因素主要是对故障电压、故障电流幅值产生影响，对故障测距精度影响较小，因此故障因素对故障行波到达检测点时刻影响较小，可通过单相检测值完成对各种故障类型的故障测距。分别在架空线 AM 段、线路连接点 M 点、电缆 MN 段、架空线 NB 段设置故障点 F1、F2、F3、F4，故障点到 A 端的距离  $L_{AF}$  分别为 4 km、13 km、15 km、26 km，对故障点进行单相接地故障仿真，仿真结果如图 8 所示。

由图 8 可知，当故障位于线路不同位置时，各故障点电压电流初始行波幅值随故障距离增加呈减小趋势，且各故障点故障行波到达时刻不受故障位置的影响，均可精确采集。



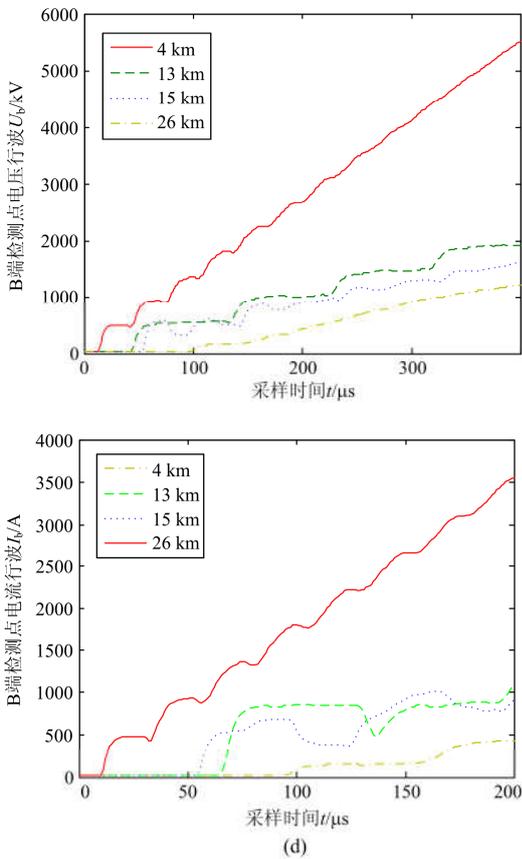


图 8 检测点故障行波波形

Fig. 8 Fault current traveling wave of testing point

结合单、双端行波测距原理对不同位置故障点进行故障测距, 测距结果如表 5 所示。

表 5 输电线路故障测距结果

Table 5 Result of fault location of transmission line

故障位置/km	$t_{A1}/\mu s$	$t_{A2}/\mu s$	$t_{B1}/\mu s$	$\Delta t/\mu s$	测距结果/km	测距误差/m
4	13	39	94	-81	3.9	100
13	43	105	64	-21	12.9	100
15	52	73	53	-1	1.995	5
26	96	117	9	87	6.85	150

由表 5 可知, 当故障点位于线路及线路连接点时, 通过行波法均可准确得到故障距离, 仿真测距误差在 150 m 范围内, 满足实际工程应用中对测距误差的要求。

### 2.4.2 故障位置对电缆金属屏蔽层接地线故障行波的影响

由 2.4.1 节可知, 各次故障电压、电流行波幅值随故障距离增加呈减小趋势, 因此可通过分析电缆故障时故障电压、电流行波幅值随故障距离变化的

关系<sup>[20-21]</sup>, 在电缆 MN 段每隔 1 km 设置 1 个故障点, 共 7 个, 对故障点进行单相接地故障仿真, 采集故障电压、电流行波信号, 仿真结果如图 9 所示。

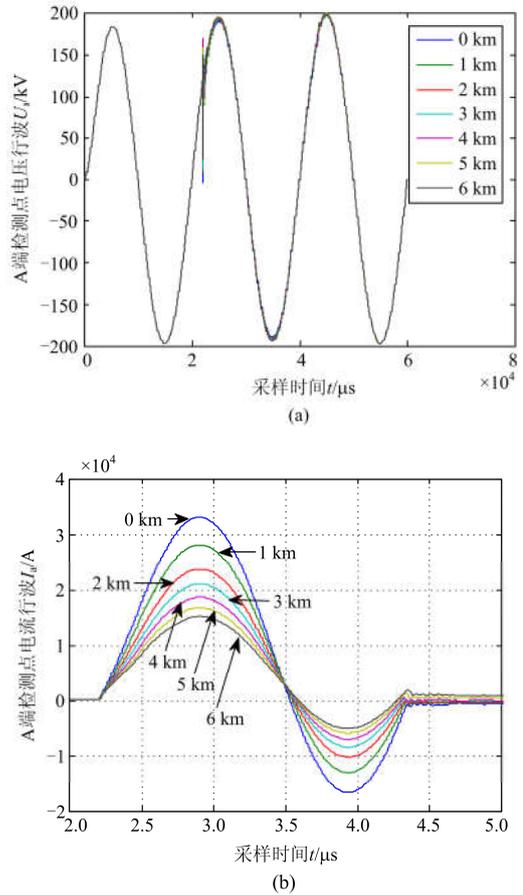


图 9 A 检测点故障行波波形

Fig. 9 Fault current traveling wave of testing point A

由图 9 可知, 故障周期内, 故障电压行波幅值在故障发生时突变, 当故障结束后逐步恢复稳定, 故障电流行波幅值在故障周期内变化较大, 最大值随故障距离增大而减小, 因此, 采集不同故障距离时, 对故障电流行波幅值与故障距离进行曲线拟合, 得到曲线如图 10 所示。

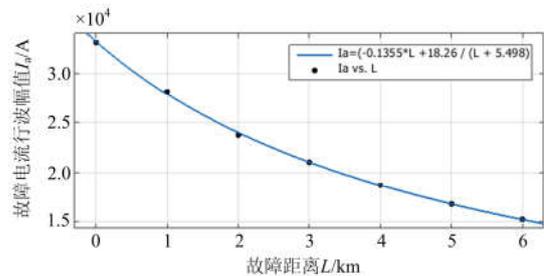


图 10 曲线拟合图

Fig. 10 Curve fitting of FIG

图 10 中:  $L$  为故障点到电缆 M 端的距离;  $i$  为故障电流行波在故障周期内第一次达到的极大值, 单位为 kA。

由图 10 可知, 电缆一端金属屏蔽层接地时, 过度电阻恒定时, 电缆段故障距离与故障电流幅值呈非线性单调递减的关系。

### 3 结论

本文采用理论分析和仿真计算的方法研究了线缆混合线路故障暂态行波传播特性, 并基于此计算分析了不同因素对组合行波测距算法精度的影响, 得到如下结论。

1) 线缆混合输电线路两端的故障初始行波到达时间差值不受故障点过渡电阻、故障类型、故障初始相角的影响。

2) 组合行波测距算法以初始行波到达线路两端的时间差作为故障定位的重要判据, 该算法测距精度不受故障点过渡电阻、故障类型、故障初始相角的影响。

3) 通过对电缆一端金属屏蔽层接地情况进行故障仿真, 得到故障电流幅值与电缆故障距离的关系, 进一步分析电缆故障时行波传播特性与故障距离的关系, 可应用于故障测距领域。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 王海港, 谢民, 孙月琴, 等. 输电线路双端故障测距时域算法实用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 142-147.  
WANG Haigang, XIE Min, SUN Yueqin, et al. Practical study on transmission line two terminal time-domain fault location method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 142-147.
- [3] 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 Bingyin, LI Jing, CHEN Ping, et al. Modern fault location techniques based on fault generated travelling waves and their applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 62-65.
- [4] 林圣, 何正友, 李小鹏, 等. 一种考虑时域特征的单端行波固有频率测距方法[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 243-248.
- [5] LIN Sheng, HE Zhengyou, LI Xiaopeng, et al. Single terminal fault location by natural frequencies of travelling wave considering its time-domain characteristics[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 243-248.
- [6] 梁睿, 孙式想. 单端行波故障测距的组合方法研究[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 699-706.  
LIANG Rui, SUN Shixiang. A combined method for single-ended traveling wave fault location[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 699-706.
- [7] 李金泽, 李宝才, 翟学明. 一种考虑多次谐波的行波自然频率测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 9-15.  
LI Jinze, LI Baocai, ZHAI Xueming. Single terminal fault location by natural frequencies of travelling wave considering multiple harmonics[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 9-15.
- [8] 李勋, 黄荣辉, 姚森敬, 等. 一种改进行波时频复合分析的杆塔故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 130-136.  
LI Xun, HUANG Ronghui, YAO Senjing, et al. A novel fault location method by tower based on traveling wave time-frequency analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 130-136.
- [9] 何军娜, 陈剑云, 艾颖梅, 等. 电力系统行波测距方法及其发展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 148-154.  
HE Junna, CHEN Jianyun, AI Yingmei, et al. Fault location methods based on traveling wave theory for power system and its development[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 148-154.
- [10] 尹晓光, 宋琳琳, 尤志, 等. 与波速无关的输电线路双端行波故障测距研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 35-39.  
YIN Xiaoguang, SONG Linlin, YOU Zhi, et al. Study of fault locating for transmission line double terminal traveling waves unrelated to wave speed[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 35-39.
- [11] 李骏, 范春菊. 基于小波分析的电力电缆行波故障测距[J]. 继电器, 2005, 33(14): 15-18.  
LI Jun, FAN Chunju. Research of electrical cable travelling wave fault location based on wavelet analysis[J]. Relay, 2005, 33(14): 15-18.
- [12] 郭方正. 双端行波故障测距方法的深入研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.
- [13] 陈平, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用-D 型原理[J]. 继电器, 2004, 32(3): 14-17, 28.

- CHEN Ping, GE Yaozhong, XU Bingyin, et al. Modern travelling wave-based fault location principle and its applications to actual fault analysis-type D principle[J]. Relay, 2004, 32(3): 14-17, 28.
- [13] 陈平, 徐丙垠, 李京, 等. 现代行波故障测距装置及其运行经验[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(6): 66-69.
- CHEN Ping, XU Bingyin, LI Jing, et al. Modern travelling wave based fault locator and its operating experience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 66-69.
- [14] 邬林勇, 何正友, 钱清泉. 一种提取行波自然频率的单端故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 69-75.
- WU Linyong, HE Zhengyou, QIAN Qingquan. A single ended fault location method using traveling Wave natural frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 69-75.
- [15] 鲁铁成. 电力系统过电压[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [16] 梁睿, 孙式想, 靳征, 等. 单双端行波特征综合考虑的辐射状电网组合测距技术[J]. 高电压技术, 2014, 40(5): 1461-1467.
- LIANG Rui, SUN Shixiang, JIN Zheng, et al. Fault location in radial Power grid after analyzing characteristics of both single-terminal and double-terminal traveling waves[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(5): 1461-1467.
- [17] 王珺, 董新洲, 施慎行. 考虑参数依频变化特性的辐射状架空配电线路行波传播研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 96-102.
- WANG Jun, DONG Xinzhou, SHI Shenxing. Traveling wave transmission research for overhead lines of radial distribution power systems considering frequency characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 96-102.
- [18] 张慧芬, 潘贞存, 桑在中. 基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 64-66.
- ZHANG Huifen, PAN Zhencun, SANG Zaizhong. Injecting current based method for fault location in neutral isolated power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 64-66.
- [19] 王利平, 王晓茹, 王伟, 等. 输电线路故障测距实用算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 52-58.
- WANG Liping, WANG Xiaoru, WANG Wei, et al. Study of faults location utilizing algorithm on power transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 52-58.
- [20] 刘伟, 陈皓. 基于分布参数模型的混合线路故障测距新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 76-80, 132.
- LIU Wei, CHEN Hao. A new fault location algorithm for hybrid transmission line based on distributed parameter model[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 76-80, 132.
- [21] 王升, 徐伟. 架空线-电缆混合线路故障行波信号识别的研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(4): 52-57.
- WANG Sheng, XU Wei. Research on signal recognition of fault traveling wave for cable-overhead mixed line[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(4): 52-57.

收稿日期: 2017-02-23; 修回日期: 2017-04-01

作者简介:

黄荣辉(1976—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为输变电设备技术监督和电力技术研究工作; E-mail: 13631561618@139.com

李 勋(1983—), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 研究方向为主网技术监督和电力新技术研究工作; E-mail: epcman@vip.qq.com

张宏钊(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为主网技术监督工作。E-mail: zhanghongzhao05@126.com

(编辑 周金梅)