

文章编号:1671-251X(2019)11-0093-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019050001

# 考虑脉冲信号传输特性的矿用电缆故障定位方法

程江洲, 唐阳, 谢诗雨, 熊双菊, 王劲峰

(三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)



扫码移动阅读

**摘要:**为解决电缆分接头对脉冲信号的反射干扰造成故障定位困难的问题,分析了脉冲信号沿电缆传输特性:脉冲信号幅值、脉宽随传输距离的增加呈单调线性变化。在此基础上提出了一种考虑脉冲信号传输特性的矿用电缆故障定位方法:通过向电缆中注入原始脉冲信号获得反射脉冲信号,根据反射脉冲信号的脉宽、幅值变化识别电缆故障点反射脉冲信号,从而排除电缆分接头反射脉冲信号的干扰,实现故障准确定位。搭建了矿用电缆故障定位仿真模型对该方法进行验证,仿真结果表明,该方法具有较高的故障定位精度,定位误差小于1%。

**关键词:**矿用电缆; 电缆故障定位; 脉冲信号传输特性; 反射脉冲识别; 行波测距  
**中图分类号:**TD611      **文献标志码:**A

Mine-used cable fault location method considering  
transmission characteristics of pulse signal

CHENG Jiangzhou, TANG Yang, XIE Shiyu, XIONG Shuangju, WANG Jinfeng  
(College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University,  
Yichang 443002, China)

**Abstract:** In view of difficulty in fault location due to reflection interference of cable tap on pulse signal, transmission characteristics of pulse signal along cable were analyzed, that is, amplitude and pulse width of pulse signal changed linearly with the increase of transmission distance. On this basis, a fault location method of mine-used cable considering transmission characteristics of pulse signal was proposed. Reflected pulse signal is obtained by injecting original pulse signal into cable, and reflected pulse signal from cable fault point is identified according to variation of pulse width and amplitude of the reflected pulse signal, so as to eliminate interference of the reflected pulse signal from cable tap and realize accurate fault location. A mine-used cable fault location simulation model was built. The simulation result show that the method has high fault location accuracy and location error is less than 1%.

**Key words:** mine-used cable; cable fault location; transmission characteristics of pulse signal; reflected pulse recognition; traveling-wave ranging

## 0 引言

煤矿井下配电网多由数段短距离电缆连接而成,受运行环境影响,井下电缆一旦发生故障,很难确定故障发生位置,严重降低了电缆供电可靠

性<sup>[1-3]</sup>。为保障井下作业安全,快速、准确地定位井下电缆故障位置十分重要。

目前常用的电缆故障定位方法有阻抗法和行波法<sup>[4]</sup>。阻抗法通过测量监测端与故障点之间的阻抗,根据线路参数求解故障距离。文献[5-6]提出了

收稿日期:2019-05-02;修回日期:2019-11-03;责任编辑:盛男。  
基金项目:湖北省科技计划项目技术创新专项重大项目(2016AAA040)。  
作者简介:程江洲(1979—),男,湖北枝江人,副教授,硕士,研究方向为电器设备状态在线监测及故障诊断技术、智能配电网,E-mail:chengjiangzhou@ctgu.edu.cn。  
引用格式:程江洲,唐阳,谢诗雨,等.考虑脉冲信号传输特性的矿用电缆故障定位方法[J].工矿自动化,2019,45(11):93-97.  
CHENG Jiangzhou,TANG Yang,XIE Shiyu,et al. Mine-used cable fault location method considering transmission characteristics of pulse signal[J]. Industry and Mine Automation,2019,45(11):93-97.

利用 Prony 算法提取电缆特征参数,在考虑电缆频率特性的基础上根据电缆的过渡阻抗计算电缆的故障距离,实现故障定位,但该方法主要以  $\pi$  模型电缆为研究对象,并没有包含所有参数的频率相关性。行波法根据脉冲信号由信号发射器到故障点间往返 1 次的时间差实现故障定位<sup>[7]</sup>。与阻抗法相比,行波法不受电缆故障类型及过渡电阻的影响,具有较高的定位精度。文献[8-9]利用小波变换和模极大值法识别波形畸变点,通过双端测距法计算电缆故障点位置,但双端测距法对电缆双端监测设备的同步性要求极高。文献[10-11]提出了基于经验模态分解的电缆双端定位方法,通过对行波进行经验模态分解实现故障高频成分提取与噪声消除,然后通过计算故障信号的能量确定初始行波到达时刻,该方法解决了双端测距法对监测设备同步性要求高的问题,但需要对每组数据进行多次监测,因此对监测数据的准确性要求很高,在实际应用中实现难度较大。文献[12]将多小波理论应用于煤矿井下电缆故障定位,可实现对局部瞬态信号和波形突变点的精细化分析,对数据的整体准确度要求较低,但未考虑电缆分接头对脉冲信号的反射干扰问题。

本文提出了一种考虑脉冲信号传输特性的矿用电缆故障定位方法,该方法根据脉冲信号参数的变化识别故障点反射脉冲,进而实现故障定位。通过 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型验证了该方法可行,且具有较高的定位精度。

1 脉冲信号传输特性分析

为准确分析脉冲信号沿电缆传输过程中的变化规律,以交联聚乙烯电缆(XLPE)为研究对象,根据 XLPE 结构选择合适的电缆模型并设置相关电缆参数,利用 PSCAD/EMTDC 建立仿真模型。

1.1 脉冲信号

电缆中电信号以电磁波形式沿电缆传输<sup>[13-14]</sup>,本文利用高斯脉冲函数模拟原始脉冲信号:

$$u(t) = U_0 \exp\left(-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{1}$$

式中: $u(t)$ 为原始脉冲信号瞬时值; $U_0$ 为原始脉冲信号幅值; $t$ 为时间; $a$ 为位置参数; $\sigma$ 为时间尺度因子。

1.2 电缆模型

PSCAD/EMTDC 中提供了 2 种不同类型的电缆模型,其中 Bergeron 模型仅能准确表示基频模型,反映参数在特定频率处的频率相关性,而频率相关相域模型本质上是分布式 RLC 行波模型,包含了所有参数的频率相关性,是一种更先进的时域模

型<sup>[15]</sup>。因此选择频率相关相域模型建立电缆模型,如图 1 所示,具体参数见表 1。

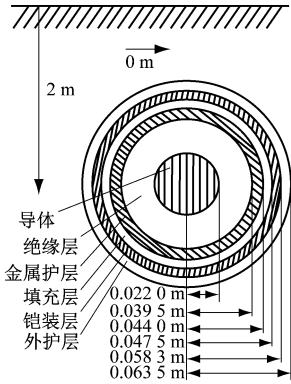


图 1 电缆模型

Fig. 1 Cable model

表 1 电缆参数

Table 1 Cable parameters

| 参数                                | 设置值                  |
|-----------------------------------|----------------------|
| 导体电阻率/( $\Omega \cdot \text{m}$ ) | $1.7 \times 10^{-8}$ |
| 绝缘层相对介电常数                         | 2.3                  |
| 绝缘层相对磁导率                          | 5.5                  |
| 电缆埋设深度/m                          | 2                    |

利用 PSCAD/EMTDC 建立脉冲信号沿电缆传输仿真模型,如图 2 所示。原始脉冲信号从电缆首端注入电缆,沿电缆设置  $n$  个信号接收器监测脉冲信号,即可得到经不同距离传输后的脉冲信号波形。

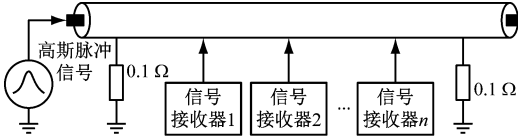


图 2 脉冲信号沿电缆传输仿真模型

Fig. 2 Simulation model of pulse signal transmission along cable

1.3 传输特性

假定外部环境噪声信号不会对测试电缆中脉冲信号产生电磁干扰,经不同传输距离后的脉冲信号波形如图 3 所示。由图 3 可看出,随着脉冲信号在电缆中传输距离的增加,脉冲信号幅值呈明显衰减趋势,但无法直接判断脉冲信号的脉宽变化趋势。

将图 3 中各脉冲信号幅值量化,并与传输距离进行拟合,得到脉冲信号幅值与传输距离的拟合关系曲线,如图 4 所示,其中纵坐标为脉冲信号幅值与原始脉冲信号幅值的比值。由图 4 可看出,在不考虑电缆具体结构与分布的情况下,脉冲信号幅值沿电缆传输呈线性单调衰减状态。

提取图 3 中各脉冲信号脉宽,得到脉冲信号脉宽与传输距离的拟合关系曲线,如图 5 所示,其中纵坐标为脉冲信号脉宽与原始脉冲信号脉宽的比值。

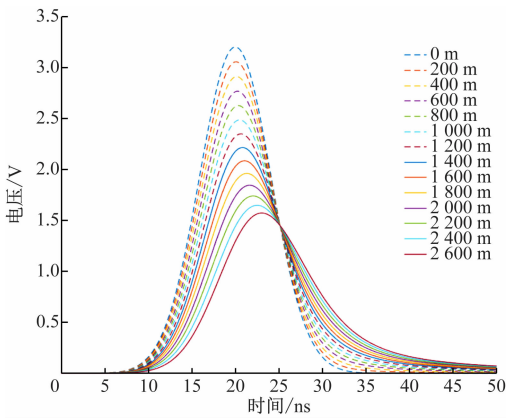


图3 不同传输距离下脉冲信号波形

Fig. 3 Pulse signal waveforms under different transmission distances

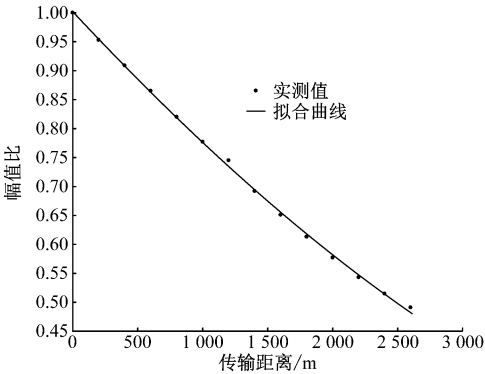


图4 脉冲信号幅值与传输距离的拟合关系曲线

Fig. 4 Fitting relation curve of pulse signal amplitude and transmission distance

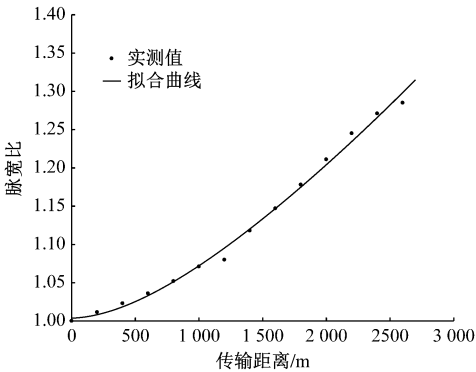


图5 脉冲信号脉宽与传输距离的拟合关系曲线

Fig. 5 Fitting relation curve of pulse width of pulse signal and transmission distance

由图5可看出,随着脉冲信号在电缆中传输距离的增加,脉冲信号脉宽呈增大趋势,传输距离越远,脉冲信号脉宽增大越快。因此利用行波法进行电缆故障定位时,脉冲信号在电缆中传输距离越远,电缆对脉冲信号的畸变作用越强,对故障点反射脉冲信号的识别难度越大。

2 矿用电缆故障定位方法

2.1 方法原理

根据图4和图5可知,脉冲信号在电缆中传输

时,脉冲信号幅值、脉宽随传输距离的增加呈单调线性变化,即在经过一定距离的电缆传输后,脉冲信号的波形参数变化与传输距离呈一一对应关系。因此可根据反射脉冲信号的参数变化规律确定电缆分接头的反射脉冲信号,从而滤除不相干信号的干扰,快速识别故障点反射脉冲信号,实现故障点准确定位。矿用电缆故障定位流程如图6所示,具体步骤如下。

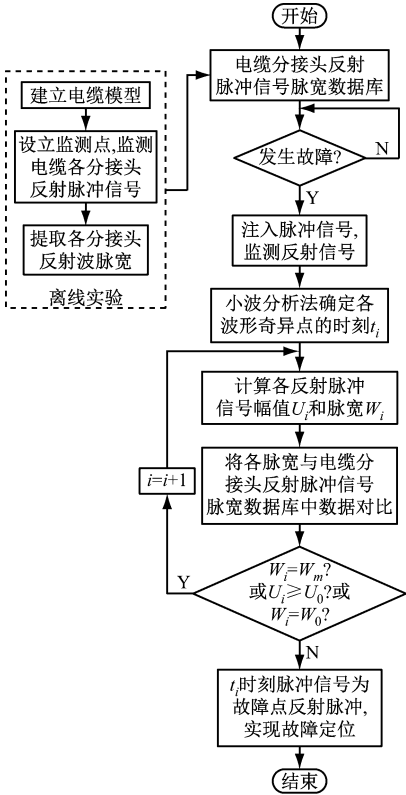


图6 矿用电缆故障定位流程

Fig. 6 Flow of mine-used cable fault location

步骤1:利用高斯脉冲函数模拟原始脉冲信号,确定脉冲信号在电缆中的传输规律,得到第 $m$  ( $m=1,2,\dots,M$ ,  $M$ 为电缆分接头数)个电缆分接头反射脉冲信号对应的脉宽 $W_m$ ,建立电缆分接头反射脉冲信号脉宽数据库。

步骤2:电缆发生故障时,由电缆一端注入脉冲信号,记脉冲注入时间为 $t_0$ 、原始脉冲信号脉宽为 $W_0$ ,采集反射脉冲信号波形,利用小波变换和模极大值法提取波形奇异点并确定第 $i$  ( $i=1,2,\dots,I$ ,  $I$ 为采集到的脉冲信号数)个奇异点对应的时刻 $t_i$ 。

步骤3:计算 $t_i$ 时刻对应的反射脉冲信号幅值 $U_i$ 和脉宽 $W_i$ 。

步骤4:将反射脉冲信号脉宽 $W_i$ 与电缆分接头反射脉冲信号脉宽数据库中 $W_m$ 比较,若 $W_i=W_m$ ,则判断 $t_i$ 时刻的反射脉冲信号为电缆分接头反射脉冲信号。

步骤5:将反射脉冲信号的幅值 $U_i$ 和脉宽 $W_i$ 分别与原始脉冲信号的幅值 $U_0$ 和脉宽 $W_0$ 对比,若 $U_i \geq U_0$ 或 $W_i \leq W_0$ ,则判断 $t_i$ 时刻的反射脉冲信号

为电缆分接头反射脉冲信号。

步骤 6:重复步骤 3—步骤 5,直至排除全部电缆分接头反射脉冲信号,筛选出故障点反射脉冲,确定故障点反射脉冲对应的时刻  $t_c$ ,则故障距离为

$$l_c = \frac{v(t_c - t_0)}{2} \tag{2}$$

式中  $v$  为脉冲信号在电缆中传输速度。

2.2 方法验证

为验证本文方法的有效性,利用 PSCAD/EMTDC 搭建电缆故障定位仿真模型,如图 7 所示。主线中电缆 Cable1,Cable2,Cable4,Cable6 长度分别为 500,700,200,250 m,在电缆故障点未接入电缆的状态下,测得电缆 2 个分接头反射脉冲信号脉宽分别为 53.25,66.77  $\mu\text{s}$ 。

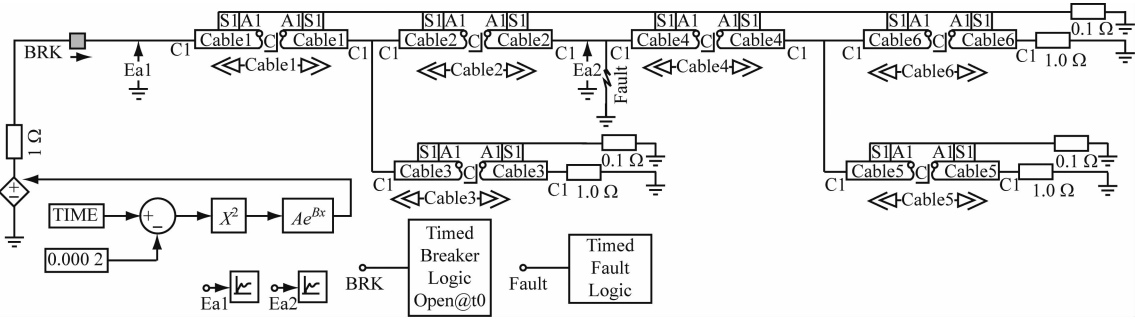


图 7 电缆故障定位仿真模型

Fig. 7 Cable fault location simulation model

仿真模型中设置了 1 个故障点、2 个电缆分接头,因此脉冲信号中包含了故障点反射脉冲信号与电缆分接头反射脉冲信号。电缆首端监测的脉冲信号波形如图 8 所示。取前 5 个脉冲信号,自左至右依次编号  $S_0$ — $S_4$ ,利用小波变换确定各脉冲信号的对应时刻,并依次提取各脉冲信号的脉宽,见表 2。

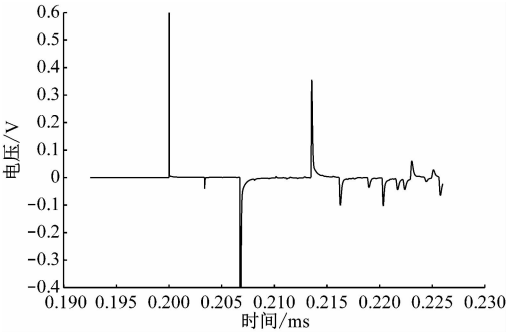


图 8 脉冲信号波形

Fig. 8 Pulse signal waveform

表 2 脉冲信号参数

Table 2 Pulse signal parameters

| 参数                | $S_0$   | $S_1$   | $S_2$   | $S_3$   | $S_4$   |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 时刻/ms             | 0.200 0 | 0.206 8 | 0.213 6 | 0.216 2 | 0.219 0 |
| 脉宽/ $\mu\text{s}$ | 49.70   | 53.23   | 60.19   | 63.17   | 66.75   |

由表 2 可知, $S_0$  为原始脉冲信号; $S_1$  和  $S_4$  脉宽与已知的分接头反射脉冲信号脉宽 53.25,66.77  $\mu\text{s}$  相近,由此可判断  $S_1$  和  $S_4$  为电缆分接头反射脉冲信号; $S_2$  极性与  $S_1, S_3, S_4$  不同,可判断  $S_2$  为电缆末端接地点反射脉冲信号; $S_3$  脉宽与电缆分接头脉宽相差较大,故  $S_3$  为电缆故障点反射脉冲信号。

根据各段电缆长度可计算出 2 处电缆分接头分别距电缆首端距离  $l_{m1}$  和  $l_{m2}$ ,根据各脉冲信号对应时刻可计算出脉冲信号分别在  $l_{m1}$  和  $l_{m2}$  长度电缆中

往返传输 1 次的时间间隔  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_2$ ,故可求解脉冲信号分别在  $l_{m1}$  长度电缆中传输速度  $v_1$  和  $l_{m2}$  长度电缆中传输速度  $v_2$ :

$$v_1 |_{(\text{m} \cdot \text{ms}^{-1})} = \frac{2l_{m1}}{\Delta t_1} = \frac{2 \times 500}{0.206\,8 - 0.2} \approx 147\,058.82$$

$$v_2 |_{(\text{m} \cdot \text{ms}^{-1})} = \frac{2l_{m2}}{\Delta t_2} = \frac{2 \times 1\,400}{0.219\,0 - 0.2} \approx 147\,368.42$$

则脉冲信号在电缆中传输速度平均值为

$$v |_{(\text{m} \cdot \text{ms}^{-1})} = \frac{v_1 + v_2}{2} = 147\,213.62$$

根据各脉冲信号对应时刻及各段电缆长度可计算出脉冲信号  $S_0$  与  $S_3$  到达电缆首端的时间间隔  $\Delta t$ 、预设的电缆故障距离  $l_f$ ,则电缆故障定位距离  $l_c$  和定位误差  $e$  分别为

$$l_c |_{\text{m}} = \frac{\Delta t v}{2} = \frac{(0.216\,2 - 0.2) \times 147\,213.62}{2} = 1\,192.43$$

$$e = \frac{|l_f - l_c|}{l_f} \times 100\% = \frac{|1\,200 - 1\,192.43|}{1\,200} \times 100\% = 0.631\%$$

由计算结果可知,利用本文方法得到的故障定位误差小于 1%,具有较高的准确性。

3 结论

- (1) 随着脉冲信号在电缆中传输距离的增加,脉冲信号幅值呈线性衰减,而脉冲信号脉宽增大速度越来越快,脉冲信号幅值、脉宽均呈单调性变化。
- (2) 在一定电缆长度范围内,利用反射脉冲信号脉宽、幅值变化能有效区分电缆分接头反射脉冲与故障点反射脉冲,快速实现故障定位,并且具有较高的准确性。
- (3) 研究脉冲信号沿电缆传输特性时,电缆长

度有限,缺少对脉冲信号沿远距离电缆传输规律的分析。同时本文只考虑了电缆分接头反射脉冲对电缆故障定位的干扰,在后期研究中需要进一步排除其他类型噪声脉冲信号对故障定位的干扰。

参考文献(References):

[1] 王兵,吴文明,王太辉. 35 kV 级交联聚乙烯单芯电缆接地故障的处理[J]. 煤矿现代化,2013(增刊 1):58.  
WANG Bing, WU Wenming, WANG Taihui. Treatment of grounding fault of 35 kV crosslinked polyethylene single core cable [J]. Coal Mine Modernization,2013(S1):58.

[2] 曹永军. 煤矿井下电缆故障的查找与处理[J]. 陕西煤炭,2011,30(1):88-89.  
CAO Yongjun. On the finding and treatment of faults for mine underground cable[J]. Shaanxi Coal, 2011, 30(1):88-89.

[3] 苏英. 基于多小波神经网络的井下动力电缆故障定位系统研究[D]. 焦作:河南理工大学,2014.  
SU Ying. Study of fault location in coal mine power cable based on multiwavelet neural networks [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014.

[4] 伏圣群. 行波反射法电缆故障检测关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014.  
FU Shengqun. Research of the key technology of cable fault detection for cable fault detection [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.

[5] 林芳雯,吴俊勇,郝亮亮. 基于视在伪阻抗辨识的直流配电电缆单端在线故障定位方法[J]. 电网技术, 2016,40(8):2555-2561.  
LIN Fangwen, WU Junyong, HAO Liangliang. One-terminal on-line fault location method for DC distribution cable based on apparent pseudo-impedance identification [J]. Power System Technology, 2016, 40(8):2555-2561.

[6] 徐铭铭,肖立业,王海风,等. 一种基于 Prony 算法的直流配电网电缆故障定位方法[J]. 电工电能新技术, 2015,34(4):1-5.  
XU Mingming, XIAO Liye, WANG Haifeng, et al. Novel method of locating cable fault in DC distribution based on Prony algorithm[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(4):1-5.

[7] 唐进,张姝,林圣,等. 计及金属护层结构的电缆单端故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1748-1756.  
TANG Jin, ZHANG Shu, LIN Sheng, et al. Single-terminal fault locating method of cables considering the metal sheath structure [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6):1748-1756.

[8] 王伟,吴亚辉,李志勇,等. 一种用于校验双端行波测距装置的测试系统的研发与测试[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3):176-181.  
WANG Wei, WU Yahui, LI Zhiyong, et al. Development and test of a test system for verifying double-ended traveling wave fault location equipment [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3):176-181.

[9] 宋艳青,李钊年,刘允,等. 基于 Simulink 的光伏电站直流电缆故障定位仿真研究[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2016, 34(3):93-99.  
SONG Yanqing, LI Zhaonian, LIU Yun, et al. DC cable fault location simulation based on Simulink in photovoltaic power station [J]. Journal of Qinghai University (Natural Science Edition), 2016, 34(3): 93-99.

[10] 赵敏,尚鹏辉. 井下配电网电缆故障在线双端行波测距方法[J]. 工矿自动化, 2016, 42(11):50-55.  
ZHAO Min, SHANG Penghui. Online cable fault ranging method by double-end traveling wave for underground distribution network [J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(11):50-55.

[11] 刘洋,曹云东,侯春光. 基于经验模态分解及维格纳威尔分布的电缆两端故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16):4086-4093.  
LIU Yang, CAO Yundong, HOU Chunguang. The cable two-terminal fault location algorithm based on EMD and WVD[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16):4086-4093.

[12] 董爱华,苏英. 基于多小波的煤矿井下动力电缆故障定位研究[J]. 工矿自动化, 2014, 40(5):37-42.  
DONG Aihua, SU Ying. Research of fault location of underground power cable based on multi-wavelet[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(5):37-42.

[13] 邓丰,李欣然,曾祥君. 基于全波形信息的混联线路单端行波定位方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3471-3485.  
DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun. Single-ended traveling-wave-based fault location algorithm for hybrid transmission line based on the full-waveform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15):3471-3485.

[14] LIANG Rui, YANG Zhi, PENG Nan, et al. Asynchronous fault location in transmission lines considering accurate variation of the ground-mode traveling wave velocity [J]. Energies, 2017, 10(12):1957.

[15] PAWEŁ OCŁOŃ, CISEK P, TALER D, et al. Optimizing of the underground power cable bedding using momentum-type particle swarm optimization method[J]. Energy, 2015, 92:230-239.