

# 基于空间电场探针的输电线路故障行波检测

胡轶波<sup>1</sup>, 吕佳佳<sup>2</sup>, 彭翰川<sup>3</sup>, 冯亮<sup>4</sup>

(1. 华自科技股份有限公司, 湖南长沙 410205; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114; 3. 湖南省电力公司  
柘溪水力发电厂, 湖南益阳 413508; 4. 国家电力投资集团有限公司五凌电力有限公司, 湖南长沙 410004)

**摘要:**在不影响行波检测精度的前提下,提出一种基于电场探针的行波检测方法以降低检测成本。该方法根据输电线路周围的空间电场情况,利用镜像法理论对输电线路附近的电场分布进行分析,选择恰当的检测位置安装探针以检测空间电位。探针不与输电线路直接接触,可在不停止运行的情况下进行安装与检修,通过接地线得到该电位产生的感应电流,再利用固有时间尺度分解方法分析感应电流信号以提取故障行波信号。仿真结果表明,利用探针感应电流表征输电线路上的电压信号的方法是可行的。此外,该方法定位误差较小,精度高,能够实现跨度较长输电线路的故障检测。

**关键词:**故障行波;空间电场;探针;固有时间尺度分解;输电线路

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.004 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2020)04-0027-06

## Fault detection of transmission line based on space electric field probes

HU Yibo<sup>1</sup>, LV Jiajia<sup>2</sup>, PENG Hanchuan<sup>3</sup>, FENG Liang<sup>4</sup>

(1. HNAC Technology Co., Ltd., Changsha 410205, China; 2. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Zhexi Hydroelectric Power Plant, Hunan Electric Power Company, Yiyang 413508, China; 4. Wuling Power Co., Ltd., State Power Investment Group Corporation Limited, Changsha 410004, China)

**Abstract:** In order to reduce the cost of traveling wave detection without affecting the accuracy, a traveling wave detection method based on electric field probe is proposed. According to the conditions of the space electric field around the transmission line, the electric field distribution near the transmission line is analyzed by using the mirror theory. Then the appropriate detection position is selected to install the probe to detect the space potential. The probe is not in direct contact with the transmission line, and can be installed and repaired without stopping the operation. The induced current generated by the potential is obtained through the ground wire. Using the inherent time scale decomposition method, we analyze the induced current signal to extract the fault traveling wave signal. The simulation results show that the method of using the probe induced current to characterize the voltage signal on the transmission line is feasible. Moreover, the method has small positioning error and high precision, and can achieve fault detection for long-distance transmission lines.

**Key words:** traveling wave; space electric field; probe; intrinsic time scale decomposition; transmission line

随着当前经济的不断发展,电网规模不断扩大,电网技术的迅猛发展使得电网公司与用户对电网安全、稳定运行提出了更高的要求,而可靠的故障检测与定位技术成为提高电力系统稳定性的重要保障<sup>[1-3]</sup>。对于广域智能电网的输电线路而言,其跨度相比一般输电线路较大<sup>[4]</sup>,现有的行波检测技术不能完全满足日趋壮大的电网线路的保护和定位要求。因此,研究一种具有检测精度高、适用于广域电网输电线路、成本低廉等优点的行波检测技术已迫在眉睫。

目前行波的提取方式有许多种,文献[5]将贝叶斯分类算法与电流突变量检测算法结合在一起,设计出一种新型行波故障信号检测算法;文献[6]基于行波固有频率,无需检测行波波头,但是提取固有频率存在困难;文献[7]基于电容式电压互感器,将电压行波传感器套接在其地线上,可有效提取电压行波信号,避免了线路改造及成本问题,但该方法易受变电站的电磁干扰影响;文献[8]能够有效提取电流行波信号,但过程繁琐,成本较大。

为减小广域电网行波检测装置的制作成本,提高广域电网行波保护的检测精度,满足电网可靠性的精确定位需求,该文基于空间电场探针理论,提出一种新型的输电线路故障行波检测方法。该方法利用行波在空间探针上产生的感应电流,采用固有时间尺度方法从感应电流中提取出波头信号。该方法使用的电位探针造价低、安装方便,适用于大跨度的输电线路大范围使用,大大降低了设备成本。

## 1 导线周围空间电场分析

依据现有的输电线路设计原则,输电线路若为三相交流,则一般采用三角形排列或水平排列<sup>[9]</sup>。为了对三相输电线路的模型进行简化,该文作出以下假设<sup>[10]</sup>:

- 1) 输电线路的导线为无限长的光滑柱体,三相导线的半径相同,且彼此与大地平行;
- 2) 假设输电线路的半径  $r$  远小于高度  $h$ , 则输电线路上的电荷在此时可被看做线电荷,其位置为输电线路的几何中心;

3) 线路上的电荷未发生畸变且电压等级已知。

将三相架空导线垂直于平面内建立坐标系统,其横截结构如图 1 所示,其中地面电位为  $0\text{ V}$ <sup>[11-14]</sup>。

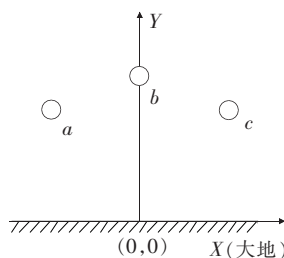


图 1 三相输电线路系统的结构

Figure 1 Structure of three-phase transmission line system

由镜像法相关理论可知,电压和电位系数的关系  $Q = \lambda^{-1} \dot{U}$  决定多导线线路中等效电荷的关系。其中,  $Q$  表示线路上镜像电荷的单列矩阵;对于三相输电线路而言,  $\lambda$  表示在三相输电线路中线路电位系数组成的三阶方程;  $\dot{U}$  表示线路对地电压单列矩阵,主要由线路电压及相位决定。为保留一定电压裕度,通常选择线路首端电压 ( $1.05U_N$ ) 作为计算电压。

$$|U_A| = |U_B| = |U_C| = 1.05 / \sqrt{3} U_N = U \quad (1)$$

假设 A 相输电线路的相角为 0, 则可以将三相输电线路上的电压写成:

$$\begin{cases} U_A = (U + j0) \\ U_B = (-\frac{1}{2}U - j\frac{\sqrt{3}}{2}U) \\ U_C = (-\frac{1}{2}U + j\frac{\sqrt{3}}{2}U) \end{cases} \quad (2)$$

将  $\dot{U}$  写为实部与虚部相加的形式,即

$$\dot{U} = U_R + jU_I \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} U \\ -\frac{1}{2}U \\ -\frac{1}{2}U \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}U \\ \frac{\sqrt{3}}{2}U \end{bmatrix}$$

其中,  $U_R = -\frac{1}{2}U$ ,  $U_I = -\frac{\sqrt{3}}{2}U$ 。

由镜像原理可得到电位系数矩阵,用符号  $\lambda$  表示,此时对地电荷为 0。因此,可用对地导线镜像电荷代替地面感应电荷。

如图 2 所示,互相平行的三相输电线路  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的镜像分别为  $a'$ 、 $b'$ 、 $c'$ 。

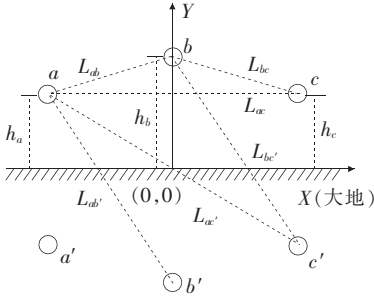


图 2 三相输电线路电位系数计算

Figure 2 Calculation of electric potential coefficients produced by three-phase transmission line

电位系数矩阵分为自电位和互电位系数矩阵,自电位系数矩阵  $\lambda_{ii} = (1/2\pi\epsilon_0)\ln(2h_i/R_i)$ ,  $i = a, b, c$ ,互电位系数矩阵  $\lambda_{ij} = (1/2\pi\epsilon_0)\ln(L'_{ij}/L_{ij})$ ,  $i, j = a, b, c, i \neq j$ 。其中,  $\epsilon_0$  为空气介电常数,通常为  $10^{-9}/36\pi$ ;  $R_i$  为输电线路的导体半径。由自电位和互电位系数矩阵可以求得三相输电线路的电位系数矩阵  $\lambda$ 。

由于  $\dot{U}$  是一个复数量,因此  $Q$  也是一个复数量,且有

$$\begin{cases} Q = Q_R + jQ_I \\ Q_R = \lambda^{-1}U_R \\ Q_I = \lambda^{-1}U_I \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可求出导线单位长度的等效电荷。然后依据叠加定理,可计算出空间电场某点  $P(x, y)$  电场强度的水平和竖直分量,计算公式为

$$\begin{cases} E_x = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=a,b,c} Q_i \left( \frac{x-x_i}{L_i^2} - \frac{x-x_i}{(L'_i)^2} \right) \\ E_y = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=a,b,c} Q_i \left( \frac{y-y_i}{L_i^2} - \frac{y+y_i}{(L'_i)^2} \right) \end{cases} \quad (5)$$

## 2 利用探针对行波信号进行检测

### 2.1 探针模型

探针本质上属于电场传感器,能够测量输电线路周围的电位,探针的构造与原理相对较为简单,一般而言,在大地和输电线路之间任意体积的物体都可以认为是探针。但是为了便于分析,该文对探针作出理想化假设:

1)探针为理想球形导体;

2)探针尺度远小于输电线路的高度;

3)探头由输电线路理想接地。

根据以上假设设计的三相输电线路探针模型如图 3 所示。在三相输电线路中,  $a, c$  两相输电线路距离水平地面高度为  $h_1$ ,  $b$  相输电线路的水平高度为  $h_2$ ,  $b$  相与  $a, c$  两相输电线路的水平距离均为  $L$ ,球形探针放置在  $b$  相输电线路下方,即有  $x = 0$ 。

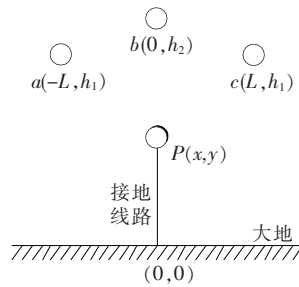


图 3 用于三相输电线路的探针模型

Figure 3 A point probe model for three-phase transmission line

### 2.2 探针工作原理

为了更好地理解探针的工作原理,可以将探针分为 2 种运行状态:①在三相输电线路注入三相电流,并断开接地线路。输电线路产生的电磁场将会在探针上激发自由电子,并重新分布,使得探针处的电压升高,探针与大地间的电势差定义为接地线路开路电压  $V_{oc}$ 。这种运行状态下,可以将探针视为接收器。②将输电线路移除,假设探头上存在测试电荷  $Q_t$ ,此时,电荷密度为  $\rho_s^t(r)$ ,其中  $t$  表示测试情况,  $s$  表示球体表面。这些电荷在探针处引发的电位为  $V^b$ 。这种运行状态下,可以将探针视为一个发射源。2 种工作状态如图 4 所示。

探针上的电压为  $V_{oc}$ ,探针经过接地线与大地相连,此时在接地线上将会出现一个感应电流,通过对该感应电流进行检测,可以表征输电线路通过的电流状态。利用 MATLAB 对输电线路进行仿真,当三相输电线路正常运行时,探针接地线上的感应电流如图 5 所示。

基于探针工作原理的装置结构简单、造价低廉,适用于大规模生产。由于探针在工作时,不直接与输电线路物理接触,故其安装与维修可以带点进行,因此适用于广域智能电网的输电线路检测。

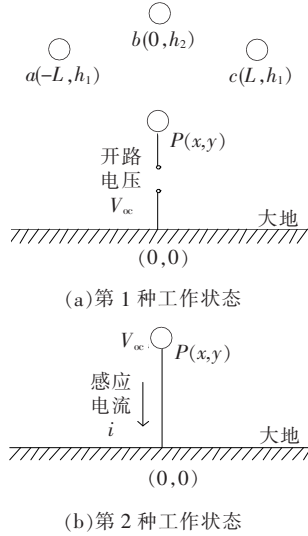


图 4 探针的 2 种运行状态

Figure 4 Two operating states of the probe

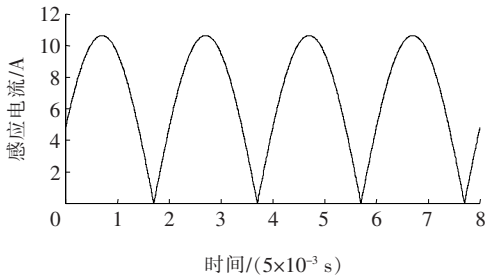


图 5 正常运行时的感应电流

Figure 5 Induced current under normal operation

### 3 固有尺度分解方法

固有尺度分解方法<sup>[15-18]</sup> (intrinsic time-scale decomposition, ITD) 是一种用于非平稳信号特征提取的方法。首先, ITD 能够将任意信号分解为若干固有旋转分量 (proper rotation component, PRC) 和一个趋势分量; 其次, 对所得固有旋转分量进行求解; 最后, 得到含所有固有旋转分量的瞬时幅值和瞬时频率。基于此, 利用 ITD 能够判别行波信号到达的初始时刻。

假设  $X_t$  ( $t$  为时间) 代表原始信号, 令  $\tau_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) 表示  $X_t$  的局部极值点, 定义  $\tau_0 = 0$ 。定义  $L$  为  $X_t$  的基线提取算子,  $L_t$  为基线信号, 将  $L$  作用于原始信号。剩下的信号定义为固有旋转分量  $H_t$ , 若用  $H$  表示固有旋转提取因子, 则有  $H = 1 - L$ , 表示信号中的高频分量。由此可以把  $X_t$  进一步分解为

$$X_t = LX_t + (1 - L)X_t = L_t + H_t \quad (6)$$

为了简化符号, 将  $X(\tau_k)$ 、 $L(\tau_k)$  分别由  $X_k$  和  $L_k$  表示。在某一时间间隔内, 如果  $X_t$  为常数, 则极值  $\tau_k$  为该时间间隔的右端点。假设  $L_t$  和  $H_t$  的定义域为  $[0, \tau_k]$ ,  $X_k$  的定义域为  $[0, \tau_{k+2}]$ 。在连续极值点  $(\tau_k, \tau_{k+2}]$  范围内, 基线提取算子  $L$ , 有

$$LX_t = L_k + \frac{(L_{k+1} - L_k)}{(X_{k+1} - X_k)} (X_t - X_k) \quad (7)$$

$$L_{k+1} = \alpha \left[ X_k + \frac{(\tau_{k+1} - \tau_k)}{(\tau_{k+2} - \tau_k)} (X_{k+2} - X_k) \right] + (1 - \alpha) X_{k+1} \quad (8)$$

其中,  $\alpha$  的取值范围为  $0 < \alpha < 1$ , 其主要作用是控制固有旋转分量幅度的线性缩放, 通常情况下  $\alpha$  的取值为 0.5。

根据式(7)、(8), 定义基线信号后可以得到固有旋转提取算子  $H$ , 有

$$HX_t = (1 - L)X_t = H_t = X_t - L_t \quad (9)$$

其中, 基线信号  $L_t$  保留了其在极值间具有的单调性, 可提取极值间的局部叠加高频分量, 即文中所述的固有尺度旋转分量。

由式(6)~(9)可知, 当该信号进行一次分解时, 若不符合条件, 则将该信号作为输入信号继续分解, 直到筛选至符合条件的信号位置。其分解全过程可以表示为

$$X_t = HX_t + LX_t = HX_t + (H + L)X_t =$$

$$\left( H \sum_{k=0}^{p-1} L^k + L^p \right) X_t \quad (10)$$

式中  $HL^k X_t$  为  $(k + 1)$  层固有旋转分量;  $L^p X_t$  为单调趋势或提取的最低频率基线。

### 4 仿真分析

为验证所述方法的有效性, 利用 ATP 仿真软件搭建模型进行仿真。设长为 194 km 的 500 kV 输电线路发生单相短路故障,  $A$ 、 $B$  为母线两端, 设定故障点  $P$  距离母线  $A$  端 94 km。  $a$ 、 $c$  两相输电线路离地面 22 m,  $b$  相输电线路距离地面 25 m,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三相输电线路的相间距为 3.5 m, 输电线路直径为 20 mm, 探针坐标为  $P_1(0, 5)$ ,  $x$ 、 $y$  轴单位为 m。

当输电线路发生单相接地故障时, 该线路暂态电流行波信号会发生突变, 利用 ATP 进行仿真得到探针上测得的感应电流波形如图 6 所示, 可知探针在  $A$ 、 $B$  两端时间为  $720 \times 10^{-6}$  s 时发生信号突

变,表明该方法检测有效。基于此,可设定磁场门槛值,假如输电线路发生单相接地故障且幅值大小超过设定门槛值时,可判定其为电网故障行波信号,从而采用 ITD 对故障行波信号进行分解,得到线路两端感应电流信号。利用 ITD 有效提取行波波头,如图 7 所示。

根据图 7 感应电流的瞬时频率对故障进行定位分析。故障发生后母线 A 端感应到行波到达的时

间为第 18 385  $\mu\text{s}$ , B 端感应到磁场变化的时间为第 18 360  $\mu\text{s}$ 。根据行波计算公式<sup>[19]</sup>,假定行波的传播速度为  $2.997 \times 10^5 \text{ km/s}$ ,可得输电线路的故障点距离 A 端约为 96.253 75 km,误差为 746.25 m。

仿真分析结果表明,利用探针感应电流表征输电线路电压信号的方法是可行的。该方法的定位误差较小、精度高,能够满足跨度较长输电线路的故障检测。

### 5 结语

基于空间电场探针,该文提出了一种输电线路故障行波检测的新方法。该方法首先通过探针感应输电线路下方的电位,采集探针接地线路上的感应电流,然后采用固有时间尺度分解的方法对该信号进行分析,从而提取出行波波头信号。该方法原理简单,造价成本低廉,可以在不断电的前提下进行安装与维修,检测精度较高,十分适用于大跨度的输电线路故障检测。

### 参考文献:

[1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社,2007.

[2] Mallikarjuna B, Vardhan Varma P V, Samir S D, et al. An adaptive supervised wide-area backup protection scheme for transmission lines protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(12): 1-16.

[3] 王永进,樊艳芳,李自乾. 基于改进方向电流法的特高压直流输电线路故障识别[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 76-81. WANG Yongjin, FAN Yanfang, LI Ziqian. Fault diagnosis of UHVDC transmission lines based on improved directional current method[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 76-81.

[4] 邓丰,曾祥君,马士聪,等. 基于分布式行波检测的广域网络故障定位方法[J]. 电网技术 2017, 41(4): 1300-1307. DENG Feng, ZENG Xiangjun, MA Shicong, et al. Research on wide area traveling wave fault location method based on distributed traveling wave detection[J]. Power Systems Technology, 2017, 41(4): 1300-1307.

[5] 杜平,占劲松,韩建军,等. 基于故障起点检测的电力系统故障数据匹配方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 98-104. DU Ping, ZHAN Jinsong, HAN Jianjun, et al. An ap-

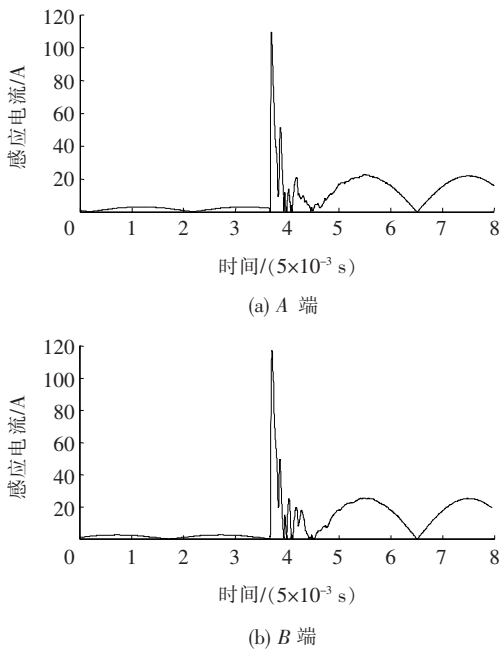


图 6 探针上测得的感应电流波形

Figure 6 Induced current waveform measured on the probe

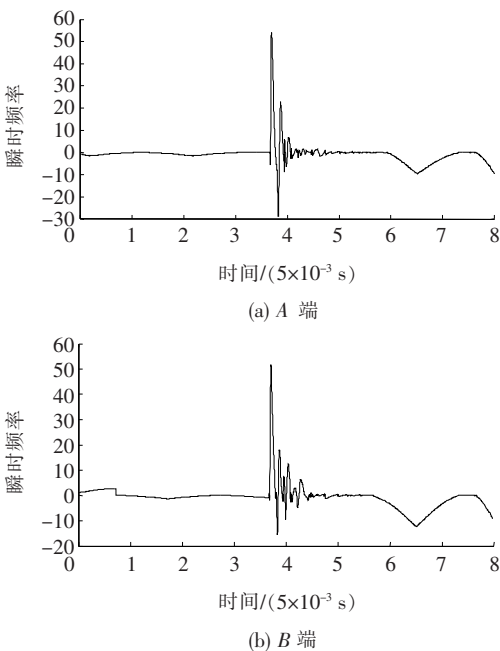


图 7 感应电流的瞬时频率

Figure 7 Instantaneous frequency of induced current

- proach to data matching in power system based on a combination algorithm for detection of signal singularity [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2017, 32(2): 98-104.
- [6] 张媛媛, 朱永利. 基于行波固有频率的多分支输电线路故障定位[J]. *电力科学与技术学报*, 2016, 31(3): 65-72.  
ZHANU Yuanyuan, ZHU Yongli. A fault location method for multi-terminal transmission lines based on traveling wave natural frequencies[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2016, 31(3): 65-72.
- [7] 曾祥君, 尹项根, 林福昌. 基于行波传感器的输电线路故障定位方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(6): 42-46.  
ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, LIN Fuchang. Study on fault location for transmission lines based on the sensor of traveing-wave[J]. *Proceeding of CSEE*, 2002, 22(6): 42-46.
- [8] 孙波, 张承慧, 孙同景, 等. 配电架空线路非接触式故障电流测量方法[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(10): 107-112.  
SUN Bo, ZHANG Chenghui, SUN Tongjing, et al. A new non-contact approach for fault current measurement of non-solidly earthed overhead lines[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(10): 107-112.
- [9] 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, 32(8): 64-68.  
ZHANG Xiaoli, ZENG Xiangjun, MA Hongjiang, et al. Based on the Hilbert Huang transform grid of traveling wave fault location method[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(8): 64-68.
- [10] 强生泽. 220 kV 同塔双回线空间工频电场理论计算[J]. *高电压技术*, 2004, 30(5): 45-58.  
QIANG Shengze. Analysis and calculation of the power frequency electric field under 220 kV double circuit transmission lines[J]. *High Voltage Engineering*, 2004, 30(5): 45-58.
- [11] Lee J B, Ha C W, Chung C H. Development of digital distance relaying algorithm in combined transmission lines with underground power cables[C]//IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver BC, Canada, 2001.
- [12] 李泽文, 姚建刚, 曾祥君, 等. 基于整个电网行波时差的故障定位方法[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(4): 60-64.  
LI Zewen, YAO Jiangang, ZENG Xiangjun, et al. Fault location based on traveling wave time difference in power grid [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(4): 60-64.
- [13] 罗福玲, 胡志坚, 倪识远, 等. 三相不对称 T 型输电线路参数测量方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(4): 41-49.  
LUO Fuling, HU Zhijian, NI Shiyuan, et al. Study on measurement method of parameters of three-phase asymmetrical T-connection transmission lines[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(4): 41-49.
- [14] 李泽文, 易志鹏, 杨毅, 等. 基于遗传算法的电网故障行波定位装置的优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(3): 77-83.  
LI Zewen, YI Zhipeng, YANG Yi, et al. Optimal placement of traveling wave fault location equipment for power grid based on genetic algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(3): 77-83.
- [15] 黄建才, 朱永利. 基于改进固有尺度分解法的绝缘子泄漏电流去噪研究[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(1): 57-64.  
HUANG Jiancai, ZHU Yongli. Research on de-noising of insulator leakage current based on improved intrinsic time-scale deposition[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(1): 57-64.
- [16] 李泽文, 刘柏罕, 熊毅, 等. 基于 SR-ITD 的故障行波检测方法 [J]. *电力自动化设备*, 2017, 32(2): 121-133.  
LI Zewen, LIU Bohan, XIONG Yi, et al. Fault traveling wave detection based on SR-ITD [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 32(2): 121-133.
- [17] 郑楚韬, 孔祥轩, 关家华, 等. 小波多尺度信息综合的行波波头检测算法研究[J]. *智慧电力*, 2019, 47(5): 97-102.  
ZHENG Chutao, KONG Xiangxuan, GUAN Jiahua, et al. Traveling wave head detection algorithm based on wavelet multi-scale information fusion[J]. *Smart Power*, 2019, 47(5): 97-102.
- [18] Lee H, Mousa A M. GPS traveling-wave fault locator systems: investigation into the anomalous measurements related to lightning strikes[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, 11(3): 1214-1223.
- [19] 曾祥君, 陈楠, 李泽文, 等. 基于网络的故障行波定位算法[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 28(31): 48-53.  
ZENG Xiangjun, CHEN Nan, LI Zewen, et al. Network-based algorithm for fault location with traveling wave[J]. *Proceeding of CSEE*, 2009, 28(31): 48-53.