

基于 PK-HT 算法的输电线路故障定位方法

付江浩¹ 李增超¹ 刘洋² 刘彬² 王旭辉¹ 王亚² 张伟¹
(1. 平高集团(河南)电力器材科技有限公司 2. 上海电力大学)

摘要: 如何快速、高效、准确地对输电线路故障进行精确定位,是目前电力系统输电线路故障方面亟待解决的问题。目前对于输电线路的故障定位主要有阻抗法和行波法,阻抗法存在精准度低、不能精准定位的缺陷,行波法存在需要对入反射波头精准识别的问题。针对行波法这一问题,提出一种输电线路故障的精确定位方法,首先通过对采集所在输电线路的故障电流信号采用算数平均法、巴特沃斯滤波进行直流、高通滤波,通过峰值极端化、希尔伯特变换提高部分故障信号尖端化和识别度。最后根据单端法原理计算出故障点位置。该方法与传统的小波分析法相比,更加容易识别故障信号,有更高的定位精度。

关键词: 故障定位; 输电线路; 希尔伯特变换; 小波分析; 单端行波原理

0 引言

输电线路是电网与用户之间的桥梁,承担着将电能安全可靠地分配给用户终端的重要任务,根据国家电网的统计,我国发电量 85% 以上都是通过输电线路输送给用户的;当输电线路发生故障时,会给电力系统带来经济损失和安全隐患,严重时可能会影响社会的正常运行^[1-5]。因此研究输电线路的准确、快速的故障定位方法具有重要意义。

由于输电线路复杂的运行环境,其故障行波信号可能受到其他电气设备或环境噪声的干扰,使得信号的检测和定位受到影响。因此,要对采集的信号进行降噪处理。目前降噪的解决办法有傅里叶变换、小波变换、经验模态分解(EMD)等^[6-7]方法,并在此基础上进行优化。文献[8]提出一种改进变分模态分解

的算法对信号降噪,通过 Spearman 相关系数对 VMD 算法中的 K 值进行优化,再通过使用改进小波阈值法对信号的 IMF 分量进行去噪,但该方法的适用场景有一定的局限性,其中对于 K 值的选取具有一定的经验性,受人为影响因素较大。文献[9]提出一种局放信号自适应加权分帧快速稀疏表示去噪方法。以信号稀疏表示理论为核心,用快速正交匹配追踪算法来提高去噪速度。文献[10]提出一种基于最优离散谐波小波包变换的去噪新方法,将不同频率窄带干扰的能量分别集中在单一的子带内,克服了离散小波包变换子带间存在频谱泄漏的缺点,实现了对信号的自适应优化分解。但这些处理方法均较为复杂且需要较多时间,不能满足快速处理的要求。

对于输电线路故障,国内外提出了诸多故障定位

方法，目前主要以行波法为主。行波法由于其较高的定位精度，不受故障类型和线路不对称条件的制约，因此得到广泛应用。另外，在行波信号传输过程中的损耗和衰减，导致信号强度降低，是限制行波信号定位精度的重要原因。文献 [11] 提出基于经验模态分解与动态时间规整算法，对原始局放波形进行局放脉冲分割和入反射脉冲匹配，最后根据 TDR 原理计算局放源位置。文献 [12] 针对存在双回线或三角环网的特殊拓扑，提出利用健全线的回路波头的单端测距，降低波头识别难度。文献 [13] 针对在 EMD 可能导致模态混叠的问题，提出一种将变分模态分解和 Teager 能量算子相结合的故障测距方法，对入反射波进行识别，但该方法具有一定局限性。文献 [14] 提出了利用首波头波前陡度的单端测距算法。文献 [15] 针对输电线路单端行波测距难以可靠、有效辨识第二个波头的不足，提出一种通过分析故障行波的传播规律来实现对反射波的精准识别。文献 [16] 开创性地将小波变换应用于波头识别并实现行波测距，通过变尺度模极大值变化识别行波。文献 [17] 考虑二次回路暂态特性，提出 Prony 分解与多尺度小波变换结合的识别方法。

上述研究充分考虑了入、反射信号的识别困难，并通过算法使得信号易于识别提取，来提高定位精度。但这些算法适合于短输电线路，对于长输电线路，由于传递衰减导致幅值降低，加之噪声影响，后续波头奇异性急剧降低，使得定位变得困难。为此，本文提出了一种在基于算数平均法和巴特沃斯滤波^[18-19]的处理下，进行峰值极端化（Peak Extreme）和希尔伯特变换（Hilbert Transform）的识别算法。首先通过算数平均法和巴特沃斯滤波器将测得的原始行波进行滤波处理；然后再根据滤波处理后的数据进行峰值极端化、希尔伯特变换，使得入反射波更加容易识别；最后根据单端法定位原理对故障信号进行定位，并将结果与小波分析算法进行对比，

以验证文中所提（PK-HT）算法的准确性。

1 基于 PK-HT 的行波处理算法

本文所提的 PK-HT 算法流程如图 1 所示，主要包含信号处理和定位两个模块。

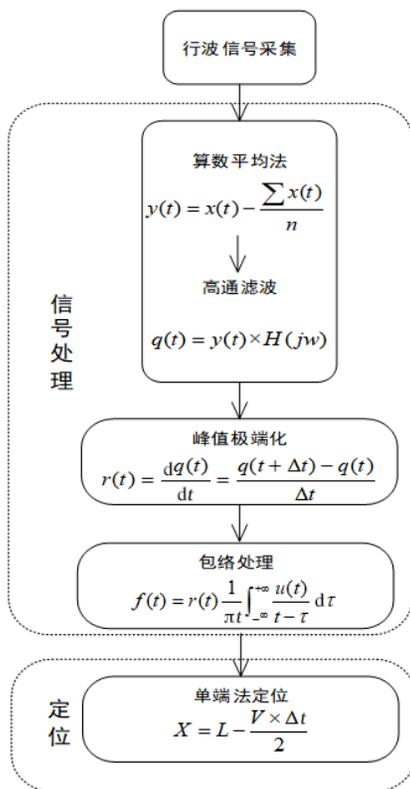


图 1 算法流程

详细步骤如下：第 1 步，确定故障行波信号，结合算数平均法、巴特沃斯滤波器去除直流和低频干扰。第 2 步，将去除干扰信号的行波进行峰值极端化处理，获得更为有效的入反射行波。第 3 步，对极端化处理后的行波信号，进行希尔伯特变换包络，确定更精确的波头位置。第 4 步，采用单端法进行故障定位。

1.1 滤波

在测到的原始信号中有直流和低频干扰信号，要对原始信号进行滤波处理。行波信号测量过程中，由

于输电线缺陷或损坏以及测量环境因素产生的直流信号，电力系统的谐振和共振、输电线的绝缘缺陷和环境因素产生的低频信号通常在几十 Hz~ 几 kHz 等干扰，会叠加到真实的高频的（几百 kHz~ 几百 MHz）行波信号中。因此，要对原始信号进行滤波处理。

直流滤波方法一般有算数平均法、中值滤波法、高通滤波法、小波变换等方法，本文采用算数平均法进行直流滤波，能够突显出信号的集中趋势，即对采集的信号求取平均值与真实信号做差，可以去除信号中的直流干扰。在信号滤波后，还含有低频干扰信号，本文采用巴特沃斯滤波器进行高通滤波来去除低频干扰，根据巴特沃斯滤波器的传递函数式（1）在通带内是随频率单调递减函数^[20-21]（见图2），可以通过增加滤波阶数 n 实现快速有效的滤波。其传递函数如下：

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}} \quad (1)$$

式中， ω_c 为截止频率， n 为滤波阶数。

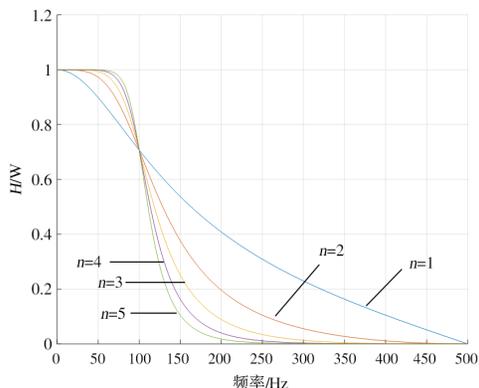


图2 振幅对频率的关系图

在选择合适的滤波阶数 n 后，巴特沃斯滤波器在通频带内的频率响应曲线最大限度平坦，没有起伏，而阻频带则逐渐下降为零的特点，据此可以结合行波信号的频带范围和滤波要求设置截止频率。由于真实

高频的行波信号频带范围与干扰信号差距较大，通频带内频率响应平坦，可以有效地滤掉干扰信号。

1.2 峰值极端化

在使用单端法进行故障定位时，由于行波信号在传输中有衰减和色散现象，会对入反射波的识别产生干扰，本文通过信号变化部分极端化来解决。在极端化后，信号波形整体变成以0为基准线，可以更明显地观测到信号的变化，确定峰值所对应的数据点。对滤波后的信号进行微分变换，微分求导能增加信号辨识度，易于特征提取^[22]，常用的方法是对信号求一阶、二阶导数。但由于二阶导数可能会放大信号中的高频噪声，增加不稳定性，故本文采用一阶微分变换。

1.3 包络处理

行波信号在峰值极端化处理，其变化峰值仍可能存在难以分辨的情况，会使得故障定位存在较大误差。因此，为了更准确掌握入反射波波头信息，需要突显变化信号部分整体的变化。希尔伯特变换相比于傅里叶变换，能更好地保留信号的相位信息、适用于非稳态信号的处理等优点^[23-24]。采用希尔伯特变换可保证信号波头信息的有效分辨，真实高频的信号能够完整保留。因此，选定希尔伯特变换，对信号变化部分进行突显化处理。首先对信号进行计算解析，识别信号的所有极值点，然后采用二项式方程拟合成上、下包络线，分别为 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 。在进行包络拟合时，为获得更为有效的包络曲线，需遵循最小二乘法原则。

2 故障距离计算

2.1 PK-HT 算法故障定位

通过一条 66kV 输电线路的故障行波来具体介绍本文的处理和定位方法。图3为线路整体结构，总长为 17.824km，其中 1 号杆塔侧为电能输入端，行波信号由测量装置获得。



图3 输电线路示意图

图4中采样总时间为1ms，总数据为2000个点，采样频率为2MHz。从图中对比可以看出，原始信号在经算术平均法和巴特沃斯滤波处理后，信号变化部分整体有小幅度降低，代表着低频干扰信号被去除。图5b是图5a的局部放大图。从图5b中得出，在极端化处理之前信号第一个峰值对应的数据点是601，处理后对应的数据点是598。这表示实际故障信号的变化比测到的要提前，对信号峰值进行极端化处理能够有效解决这一问题。在极端化处理后为了能入反射波形更容易识别，需要对其进行包络处理，结果如图6所示。

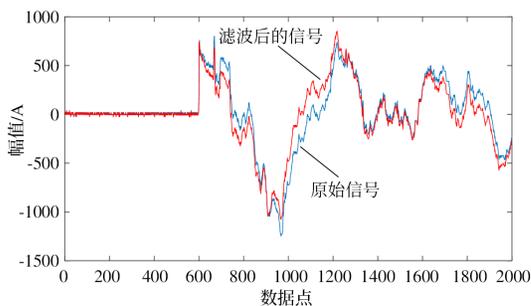
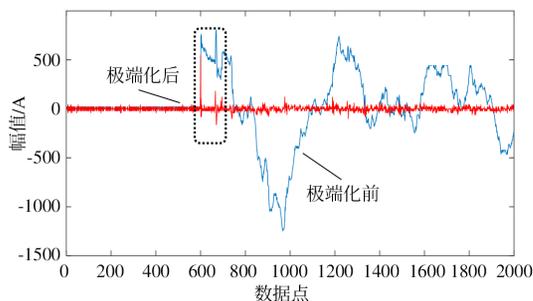
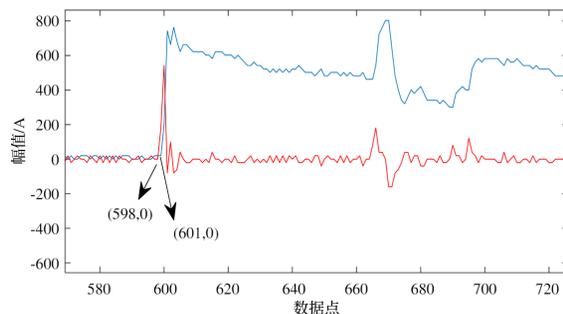


图4 滤波前后对比图

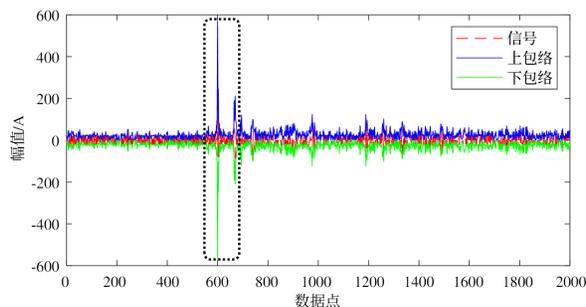


(a) 整体波形

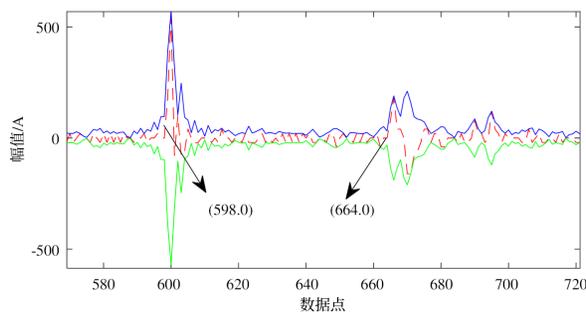


(b) 局部放大

图5 极端化处理



(a) 整体波形



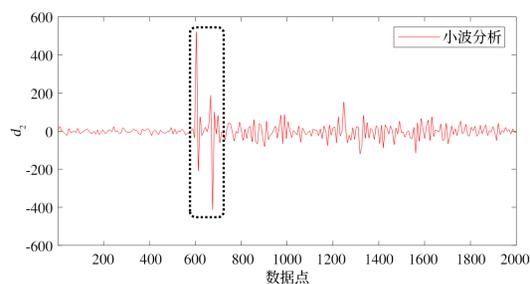
(b) 局部放大

图6 包络处理

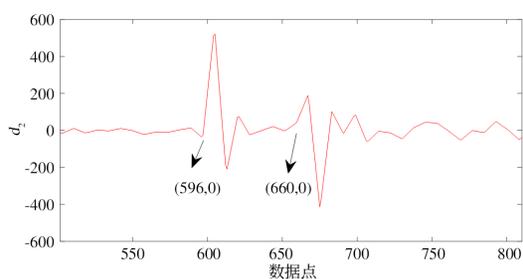
通过得到入反射波模极大值点对应的时间为 T_1 和 T_2 ，根据单端法原理，得出故障点距离 $X=L-(T_2-T_1) \times v/2$ ， T_1 和 T_2 的数据点为598和664，分别是入反射波对应的时间点。 v 是行波波速，为 $290\text{m}/\mu\text{s}$ 。根据单端法，其计算结果为8254m，实际故障距离为8120m。行波信号的输电线路总长 $L=17.824\text{km}$ ，故文中所提PK-HT方法的误差度为0.75%。

2.2 小波分析法

小波分析是一种信号处理技术，用于同时分析信号的时间和频率特征。它通过将信号分解成不同尺度和频率的小波函数来实现。通过对信号进行多尺度分解和重建，可以有效地捕获信号中的瞬态特征和频率变化。采用小波分析方法进行故障定位计算，运用小波变换的多分辨率和模极大值特性是输电线路故障点定位常用方法，因此对行波信号按照不同频率进行分解，得到各频率中的模极大值等主要特征，达到定位的最终目的，根据行波的折反射原理，进行故障定位计算，如图7所示， d_2 代表着信号中的高频成分，图7b是图7a的局部放大。从图7b中读取 d_2 的 T_1 和 T_2 分别为596和660，分别是入反射波对应时间点。计算结果为8544m，实际故障距离为8120m。小波分析法的误差度为2.3%。



(a) 整体波形



(b) 局部放大

图7 小波分析法

3 结束语

本文提出一种输电线路故障的精确定位方法，关

键在于对单端行波法针入反射行波波头的正确识别，相对于小波分析常用方法，简单易行，对噪声也有良好的抑制作用，得到以下结论：

1) 通过对信号进行包括滤波、变换和调制保证信号处理质量，抑制信号噪声使得本文的定位方法适用于电磁干扰复杂的运行环境。

2) 对滤波信号进行极端化处理，使得信号变得容易识别，同时对信号进行包络处理获得信号极值点进行故障定位，使得定位更加精准。

3) 相对于小波分析法，PK-HT算法注重对信号的局部特征进行分析，通过计算峰值变化来提取其主要特征，从而实现信号的有效处理和分类。同时，PK-HT算法计算简单且效率高，尤其适用于对信号局部特征的快速识别和处理。

4) 与小波分析相比，PK-HT算法的定位精度提高了1.55%，这意味着本文所提的PK-HT算法在长距离输电线的故障定位中PK-HT算法比小波分析法更具优势。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Sabin D D, Dimitriu C, Santiago D, et al. Overview of an automatic underground distribution fault location system[C]. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2009: 1-5.
- [3] 雷朝煜, 郝良收, 戴甲水, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 178-187.

- [4] Das S, Santoso S, Gaikwad A, et al. Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application[J]. IEEE Access, 2014 (2): 537-557.
- [5] Naidu O D, Pradhan A K. Precise traveling wave-based transmission line fault location method using single-ended data[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 17 (8): 5197-5207.
- [6] 谭定彩, 邓声华, 江福章, 等. 电气设备局部放电检测和信号去噪技术综述[J]. 电线电缆, 2020 (4): 4-8.
- [7] 罗高亮, 仇攀. 高压直流输电线路故障测距研究[J]. 中国设备工程, 2021 (24): 205-206.
- [8] 李春锋, 马星河, 刘广朋. 基于改进VMD的矿用电缆局放信号降噪方法[J]. 能源与环保, 2023, 45 (12): 268-274.
- [9] 谢军, 刘云鹏, 刘磊, 等. 局放信号自适应加权分帧快速稀疏表示去噪方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (21): 6428-6439.
- [10] 唐炬, 樊雷, 卓然, 等. 用最优谐波小波包变换抑制局部放电混频随机窄带干扰[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (31): 193-201, 24.
- [11] 张若兵, 金森, 杜钢. 基于EMD与DTW算法的振荡波下电缆局部放电定位方法[J]. 高电压技术, 2020, 46 (1): 273-281.
- [12] 张广斌, 束洪春, 于继来, 等. 基于回路电流故障主导波头到达时差的输电线路故障测距[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (28): 137-145, 21.
- [13] 李斌, 吴松健. 特高压直流输电线路故障测距方法[J]. 电气工程学报, 1-10.
- [14] 程辰, 王伟, 宋光明, 等. 基于行波理论的城市配电网故障快速定位方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43 (3): 43-47.
- [15] 张广斌, 王开福, 束洪春, 等. 基于波形群灵敏角特征的输电线路故障单端行波辨识与测距[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44 (10): 3789-3804.
- [16] 朱柏寒, 陈羽, 马金杰. 基于波前陡度的输电线路单端行波故障测距[J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (9): 130-135.
- [17] 许飞, 董新洲, 王宾, 等. 考虑二次回路暂态传变特性的单端组合测距算法及其应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (20): 5210-5219.
- [18] 黄波. 巴特沃斯数字滤波器的设计与仿真实现[J]. 河南科技, 2021, 40 (36): 10-12.
- [19] 甘华生, 陈明生. 基于希尔伯特变换联合卷积神经网络的脑电信号识别方法[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (12): 184-187, 194.
- [20] 董金宁, 池思慧, 刘宛, 等. 基于CFA的六阶巴特沃斯低通滤波器设计[J]. 电子技术, 2018, 47 (9): 56-59.
- [21] Podder P, Hasan M M, Islam M R, et al. Design and implementation of Butterworth, Chebyshev-I and elliptic filter for speech signal analysis[J]. Int J Comput Appl, 2014, 98 (7): 12-18.
- [22] 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.
- [23] 杨世锡, 胡劲松, 吴昭同, 等. 旋转机械振动信号基于EMD的希尔伯特变换和小波变换时频分析比较[J]. 中国电机工程学报, 2003 (6): 102-107.
- [24] 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 (4): 77-81.

(收稿日期: 2024-07-15)