

[电缆]

基于声磁特征匹配分析的地下电缆故障定位方法研究

文/纪礼君¹ 朱启凌¹ 李俊杰¹ 白蕾¹ 龚侃² 刘亦颖²

1. 国网上海市电力公司市北供电公司; 2. 上海久隆电力(集团)有限公司

以高自动化和高精度为目标,设计一种基于声磁特征匹配分析的地下电缆故障定位系统,包括探地传感器、嵌入式信号处理系统 and 人机交互终端三个部分,通过探地采集、信号处理和位置解算三个步骤,可以实现在若干次探地监听后自动解算出地下电缆故障点的三维位置坐标,并在终端中实时显示,从而指引操作员快速、简便、准确地找到地下电缆故障点,以便于后续的故障处理。

电缆是城市电网的重要组成部分,是电力输送的生命线,一般可以分为架空电缆与地下电缆两种。相比于架空电缆,地下电缆的主要优势是不占用线路走廊,同时由于深埋在地下而不受大气环境等自然条件影响,运行比较安全。随着城市化进程的发展,为降低电缆建设对居民生活环境的影响,地下敷设电缆的形式被广泛用于城市电网的布局 and 建设中。作为连接发电网络与电力用户的重要媒介,保障地下电缆运行的安全和稳定十分重要。据调查,我国电网中出现停电问题的大部分起因是配电网故障,其中电缆出现故障的情况占有故障的32%。电缆深埋地下的特性导致其不利于日常排查,因此一般都是出现较严重故障后才会被发现。同时地下电缆存在较大的隐蔽性,给电缆故障定位带来了很大的困难。

按照造成故障的原因,地下电缆故障类型主要可以分为外力损伤引起的故障和化学腐蚀引起的故障、超常规运行引起的故障和地面沉降引起的故障等。按照故障的主要表现形式,地下电缆故障大体分为低阻短路故障、断路故障、闪络性故障和高阻泄漏故障四类;按照故障位置,地下电缆故障分为主绝缘故障、护套故障、本体故障和接头故障

四类。在所有故障位置中,接头故障受制作工艺和人工施工的影响较大,电缆外破故障受外部暴力施工影响比较大。因此两种故障更容易发生,且不可预见性强,需要故障查找阶段具有较高时效性。

近年来电缆故障定位成为各国电力行业的研究焦点之一,目前电缆故障定位主要方法主要分为主动式方法和被动式方法,主动式方法主要有注入法,被动式方法主要有阻抗法和行波法。注入法是向故障回路中注入特定信号,通过追踪信号来定位故障位置的一种方法,按照注入信号划分,注入法可以分为S注入法、直流信号注入法和脉冲注入法等。注入法的主要问题是需要专门的信号发生和采集装置,并且对折射信号特征的清晰度要求比较高,在距离较远或者干扰较多时较难应用。阻抗法是根据电路异常信息计算出电缆的故障处和测量点之间的阻抗值从而估计故障距离的一种方法,当出现故障后,电缆运行参数会变化,阻抗法是将电缆看成一个均匀导线,假定线路阻抗大小和线路长度成正比,在低电阻故障情况下一般采用电桥法,将电缆故障相和正常相短接,并且将电桥双臂连接两相上,通过改变桥臂的电阻实现电桥平衡,利用比例关系和线缆总长得到故障位置,阻抗法是电缆

故障测距中最简单有效的方法，但是面对接地故障为可变电阻如电弧时，阻抗法就会面临无法避免的误差。行波法将麦克斯韦电磁学作为理论基础，主要原理是当电磁波遇到故障点时会有一部分反射，故障位置可以通过信号采集点在得到反射的时间差值乘上波速计算得到，具体方法可以分为双端行波法、单端行波法等，行波法的优点是故障定位速度快，但需要高采样频率的录波装置，一旦采集频率不满足要求，最终测距误差就会变大，并且行波法需要准确找到反射波的波头来确定反射时间，配电网中比较难满足上述要求。在实际应用中，地下电缆故障点环境往往过于复杂，如环境噪声过大、电缆敷设深度过深等，造成定位困难，成为快速、准确找到故障点的主要矛盾。为解决当前电缆故障定位存在的问题，本文提出一种基于声磁特征匹配分析的地下电缆故障定位系统及方法，可以通过探地采集获取地下电缆故障点发出的原始混合信号，通过信号处理算法将故障点声磁脉冲信号从混合信号中分离出来，通过位置解算算法获得地下电缆故障点三维位置，最终将地下电缆故障点在交互终端中实时显示出来，使操作员快速找到地下电缆故障点的精确位置且无需复杂操作，方便后续的地下电缆故障处理。

总体系统方案研究与设计

1. 地下电缆故障定位总体系统方案

定位系统布局如图1所示。



图1 基于声磁特征匹配分析的地下电缆故障定位系统布局示意图

基于声磁特征匹配分析的地下电缆故障定位系统由探地传感器、嵌入式信号处理系统和人机交互终端组成。在执行电缆故障定位时，在故障电缆的一端将冲击发生器连接到故障电缆终端头，冲击发生器向故障电缆的一端发出冲击信号，并在地下

电缆故障点处产生闪络冲击放电，放电产生的声脉冲和磁脉冲将沿覆土物传播至地面。将探地传感器贴近地面进行探地监听，采集包含地下电缆故障点声脉冲和磁脉冲以及环境噪声的混合信号，并将混合信号通过有线通信链路传输到嵌入式信号处理系统。嵌入式信号处理系统对混合信号进行处理，将地下电缆故障点发出的声脉冲和磁脉冲信息从混合信号中分离出来，同时通过GPS定位模块获取当前系统位置，将声磁脉冲信号、GPS定位数据通过无线网络通信链路传输给人机交互终端机。人机交互终端通过位置解算算法对地下电缆故障点进行定位，并在人机交互终端界面进行位置标识与数据显示。

2. 系统设计

定位系统组成如图2所示，地下电缆故障定位装置根据功能关系可划分为探地传感器、嵌入式信号处理系统和人机交互终端三个部分。探地传感器是数据采集单元，具备声磁模拟信号采集、模数转换和串口通信功能；嵌入式信号处理系统是数据处理与交换的核心模块，具备信号处理与辨识、数字运算、GPS定位、串口通信、无线网络通信和电源管理等功能；人机交互终端是可视化操作中心，运行地下电缆故障定位装置终端软件，具有人机交互界面，具备故障点位置解算、地图显示标注、数据显示和作业控制等功能。

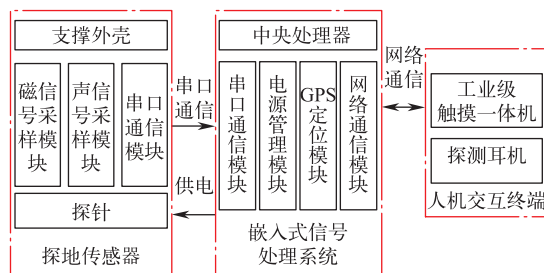


图2 基于声磁特征匹配分析的地下电缆故障定位系统组成

(1) 探地传感器

探地传感器由支撑外壳、探针和传感电路板三部分组成，支撑外壳起到保护内部电路、探测时提供稳定支撑结构以及屏蔽外界干扰信号的作用；探针可以根据不同类型的探测地面覆土物条件进行更换，起到固定探地传感器和提高声磁信号接收强度的作用；传感电路板配备FPGA、AD同步采样芯片、1路声波传感器、1路磁场传感器和串口通信

模块，能够探地采集地下覆土物传来的声信号和磁信号并进行模数转换，并将声磁数字信号通过串口传输到嵌入式信号处理系统。

(2) 嵌入式信号处理系统

嵌入式信号处理系统是地下电缆故障定位装置的数据流转与处理的核心，主要包括一块信号处理电路板。信号处理电路板基于低功耗ARM构架核心设计，具备高性能中央处理芯片，外围电路包含串口通信模块、网络通信模块、GPS定位模块和电源管理模块，能够获取并处理探地传感器传输的原始声磁信号，提取出地下电缆故障点的声脉冲与磁脉冲到达时间信息，同时通过GPS定位模块获取当前地下电缆故障定位装置的位置，最后通过无线网络通信将声磁脉冲信息和GPS定位信息传输给人机交互终端。

(3) 人机交互终端

人机交互终端硬件形式为一台工业级触摸一体机和配套探测耳机，工业级触摸一体机运行人机交互终端软件，能够获取嵌入式信号处理系统传输的声磁脉冲信息和位置信息并解算地下电缆故障点位置，同时将操作记录、数据记录和系统状态信息进行存储，人机交互终端软件配备可视化人机交互界面，可实时查看声磁脉冲时域信号图、当前地理位置信息和地下电缆故障点位置解算结果，可通过交互界面输入和选择界面管理探地传感器信号采集的启动和停止，具备全自动作业的特点，在若干次探地监听完成后就能自动解算并显示地下电缆故障点位置。配套探测耳机可以用立体声形式实时播放声磁脉冲信号，便于操作人员对地下电缆故障点位置进行辅助人工判断。

关键算法研究

1. 声磁信号处理算法研究

本文提供一种基于声磁特征匹配分析的声磁信号处理算法。当采集到原始声信号和磁信号后，对原始信号采取如图3所示步骤的信号处理流程。

1) 将原始声信号和原始磁信号分别输入带通滤波器中进行滤波，带通滤波器的带通频段是基于已知的故障点声磁脉冲所在的频段，经过滤波后只保留声磁脉冲有效频段附近的信息，消除其他频段内的噪声和干扰信息。

2) 将滤波后的声信号和磁信号分别与在无外界干扰和阻挡的条件下提前录制完成的标准故障点声磁脉冲信号进行互相关处理，将滤波后的声磁信号与标准故障点声磁脉冲信号的特征信息进行匹配。

3) 对互相关处理后的信号进行求包络线处理，得到的包络线信号的幅值大小代表该时间段的声磁信号与标准故障点脉冲信号的相似程度，检索包络线信号的最大值时间坐标，即为故障点发出的声磁脉冲到达时间点。

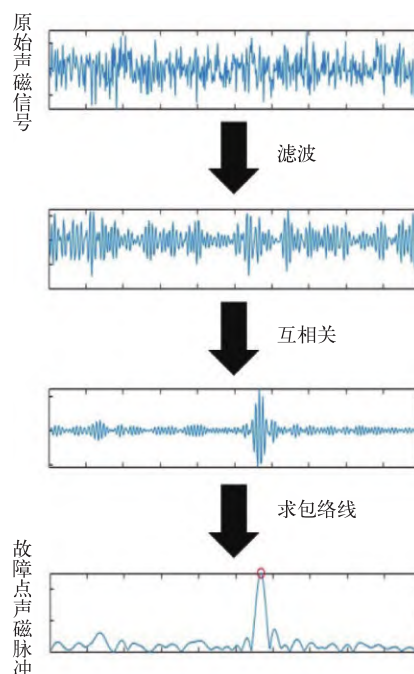


图3 声磁信号处理流程图

2. 地下电缆故障点位置解算算法研究

基于已有的故障点声磁脉冲到达时间信息，本文针提出一种基于三点定位的地下电缆故障点位置解算算法。

首先根据声波和电磁波的到达时间差，采用如下方法计算地下电缆故障点到装置探地点的直线距离

$$r = \frac{v_m v_s (t_m - t_s)}{v_m - v_s} \quad (1)$$

式中， v_m 为声波在覆土物的传播速度； v_s 为电磁波在覆土物的传播速度； t_s 为地下电缆故障点声脉冲的到达时间； t_m 为地下电缆故障点磁脉冲的到达时间。

故障点定位示意图如图4所示。

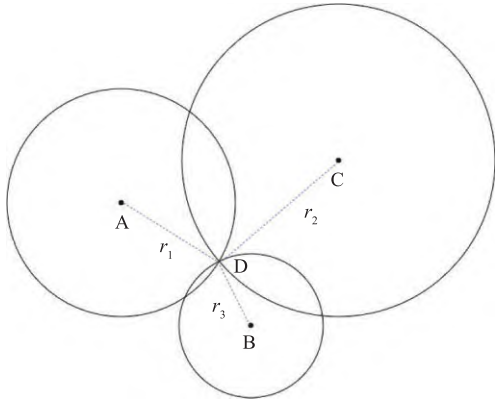


图4 地下电缆故障点定位示意图

在进行三次以上的探地采集后，可以获取多个不同位置探地点到故障点的直线距离，按每三个位置为一组进行排列组合，每个组合分别采用如下方法计算地下电缆故障点的三维位置。

构建非线性方程组如下

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2 = r_1^2 & (2) \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2 = r_2^2 & (3) \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 + (z-z_3)^2 = r_3^2 & (4) \end{cases}$$

式中， (x_1, y_1, z_1) ， (x_2, y_2, z_2) ， (x_3, y_3, z_3) 分别为三个探地点的位置； r_1, r_2, r_3 分别为对应计算得到的地下电缆故障点到探地点的直线距离。

式(2)与式(4)相减，式(3)与式(4)相减，可得

$$2(x_3 - x_2)x + 2(y_3 - y_2)y + 2(z_3 - z_2)z = r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2 - z_2^2 + z_3^2 \quad (5)$$

$$2(x_3 - x_1)x + 2(y_3 - y_1)y + 2(z_3 - z_1)z = r_1^2 - r_3^2 - x_1^2 + x_3^2 - y_1^2 + y_3^2 - z_1^2 + z_3^2 \quad (6)$$

设如下等式

$$\begin{cases} a_{11} = 2(x_3 - x_1) \\ a_{12} = 2(y_3 - y_1) \\ a_{13} = 2(z_3 - z_1) \\ b_1 = r_1^2 - r_3^2 - x_1^2 + x_3^2 - y_1^2 + y_3^2 - z_1^2 + z_3^2 \\ a_{21} = 2(x_3 - x_2) \\ a_{22} = 2(y_3 - y_2) \\ a_{23} = 2(z_3 - z_2) \\ b_2 = r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2 - z_2^2 + z_3^2 \end{cases} \quad (7)$$

把(7)代入式(5)和式(6)，得到

$$a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z = b_1 \quad (8)$$

$$a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z = b_2 \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可得

$$x = \frac{[(a_{22}b_1 - a_{12}b_2) + (a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22})z]}{(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})} \quad (10)$$

$$y = \frac{[(a_{11}b_2 - a_{21}b_1) + (a_{13}a_{21} - a_{11}a_{23})z]}{(a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21})} \quad (11)$$

令

$$\begin{cases} p_1 = (a_{12}a_{23} - a_{13}a_{22}) / (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) \\ q_1 = (a_{22}b_1 - a_{12}b_2) / (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) \\ p_2 = (a_{13}a_{21} - a_{11}a_{23}) / (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) \\ q_2 = (a_{11}b_2 - a_{21}b_1) / (a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}) \end{cases} \quad (12)$$

式(10)和式(11)可以写为

$$x = p_1z + q_1 \quad (13)$$

$$y = p_2z + q_2 \quad (14)$$

将式(13)和式(14)代入式(4)，可得

$$mz^2 + nz + s = 0 \quad (15)$$

其中

$$m = p_1^2 + p_2^2 + 1 \quad (16)$$

$$n = 2(p_1q_1 - z_3 + p_2q_2 - p_1x_3 - p_2y_3) \quad (17)$$

$$s = q_1^2 - 2q_1x_3 + q_2^2 - 2q_2y_3 - r_3^2 + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \quad (18)$$

求解式(15)，可以得到 z ，将 z 代入式(13)和式(14)，可以得到 x 和 y ，从而得到地下电缆故障点位置坐标 (x, y, z) 。

对所有组合求得的地下电缆故障点的位置坐标求平均值，即可对地下电缆故障点进行精准的定位。

结束语

本文在地下电缆故障定位领域提出一种基于声磁特征匹配分析的地下电缆故障定位方法。

本文提出的方案具备高自动化和高精准度的特点。操作人员只需要进行若干次探地信号采集操作，地下电缆故障定位装置及方法就能够根据探测声磁信号自动解算并实时显示出地下电缆故障的精确位置，无需再进行复杂的人工监听和判断，大大提高地下电缆故障定位的效率。EA

(收稿日期：2024-07-21)

参考文献

- [1] 宗刚，王琨．我国电线电缆行业现状与发展研究[J]．电器工业，2008(2)：31-36．
- [2] 刘欣桐．基于单端信号的10kV地下电缆早期故障识别与定位[D]．镇江：江苏大学，2023．