

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250361

计及护层结构的高压电缆外护套破损点在线定位方法

梁 铖¹, 罗 建¹, 李昆晟², 张奇英³

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 国网重庆市电力公司超高压分公司, 重庆 400039;
3. 西南大学工程技术学院, 重庆 400716)

摘要: 针对高压电缆外护套破损点现场检测仍依赖人工巡线与红外测温、难以实现在线精确定位的问题, 提出一种基于分布参数模型和故障暂态信息的外护套破损点在线定位方法。首先, 建立计及护层结构的高压电缆分布参数模型, 推导不同接地方式下外护套破损故障的暂态电压响应函数。然后, 利用故障暂态电压在故障点两侧瞬时相位一致的特性, 构建外护套破损点测距方程。最后, 采用遗传算法对测距方程进行优化求解, 得到故障位置。仿真分析表明, 所提外护套破损点精确定位方法可在电缆单端接地和交叉互联接地方式下实现多种故障情景下的破损点在线定位, 且受故障过渡电阻和故障初相角的影响程度低。

关键词: 外护套破损; 交叉互联; 分布参数模型; 瞬时相位; 遗传算法

Online localization method for outer sheath damage points in high-voltage cables considering sheath structure

LIANG Cheng¹, LUO Jian¹, LI Kunsheng², ZHANG Qiyang³

(1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Ultra High Voltage Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400039, China; 3. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: Aiming at the problem that on-site detection of high-voltage cable sheath faults still relies on manual line inspection and infrared thermography, making accurate online localization difficult, an online sheath fault localization method based on a distributed parameter model and fault transient information is proposed. First, a distributed parameter model of high-voltage cables considering the sheath structure is established, and the transient voltage response functions of outer sheath faults under different grounding modes is derived. Then, by utilizing the characteristic that the instantaneous phases of the fault transient voltages on both sides of the fault point are consistent, a distance calculation equation for outer sheath fault localization is formulated. Finally, a genetic algorithm is employed to optimize and solve the distance equation to determine the fault location. Simulation results demonstrate that the proposed method can achieve online fault localization of outer sheath faults under various fault scenarios for both single-end grounding and cross-bonded grounding cable systems, and exhibits low sensitivity to fault transition resistance and fault inception angle.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U22B6006).

Key words: outer sheath fault; cross-bonding; distributed parameter model; instantaneous phase; genetic algorithm

0 引言

随着城市用电量的持续增长, 电缆在电能输送中的占比不断提高, 其安全可靠运行的重要性也日益凸显^[1-3]。目前高压电缆主要采用单芯结构, 敷设

在地下隧道或电缆沟中^[4-5], 由于其特殊的物理结构及恶劣的敷设环境, 导致电缆外护套经常会由于人为因素或环境侵蚀产生破损^[6-8]。电缆外护套破损后会使电缆内部金属护层与外界形成接地回路, 引起电缆异常发热, 在此异常状态下长时间运行可能会导致主绝缘被击穿引发重大事故, 影响系统可靠运行^[9-11]。因此有必要对电缆外护套破损点进行检测,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U22B6006)

排除电力系统安全隐患^[12-14]。

目前常见的电缆外护套破损点检测方法主要有电桥法、跨步电压法、声磁同步法等^[15],但这些方法不仅步骤繁琐、局限性高,而且通常需要在停电后进行检测,这不仅需要较长的准备时间和人力物力的投入,而且会导致电力系统运行中断^[16]。因此,现场仍主要采用人工巡检的方式来寻找电缆的外护套破损点^[17],这不仅效率低下,而且容易出现遗漏,无法满足现代新型电力系统对于实时监测和快速响应的要求。目前实际应用中暂无电缆外护套破损点检测的解析方法,若能解析电缆故障信号直接进行外护套破损点的在线检测,将有效节约电缆运维时间和成本^[18]。

电缆外护套破损点检测的解析方法是利用电缆外护套破损故障信息计算外护套破损点位置,目前这方面的研究还较少。现有的电缆线芯故障检测解析方法在构建计算模型时通常未考虑电缆护层结构特点,因而不能直接应用于电缆外护套破损点位置的计算。文献[19]给出了一种考虑电缆护层结构特点的集中参数双层阻抗计算模型。该模型基于集中参数双层阻抗计算模型得到线芯故障点位置,但没有考虑电缆的交叉互联结构,且没有对电缆外护套破损点位置进行计算。文献[20-21]给出了一种考虑电缆护层结构特点的双 π 集中参数计算模型。该方法基于双 π 集中参数模型,利用故障稳态分量计算交叉互联电缆线芯与外护套故障点的位置,但仍受限于接地电阻参数难以获取的工程瓶颈。目前考虑电缆护层结构特点的电缆外护套破损点检测解析方法通常都是基于集中参数模型,由于目前常见分析方法所采用电缆线路模型较少考虑电缆护层电流分布特性,其护层电气量的计算精度较差,导致电缆外护套破损点的检测精度不够理想。

利用线路两端电压电流电气量,依据线路模型计算电压一致点是一种目前寻找线路故障点的有效方法。采用暂态瞬时相位一致法判断电压一致点,相比瞬时值判断法及稳态幅值相位判断法,在精度上具有明显优势^[22]。但现有考虑电缆护层结构的集中参数电缆模型适应暂态特性差,不利于采用暂态瞬时相位一致方法检测电缆外护套破损点位置。

为了提高电缆外护套破损点的检测精度,本文采用考虑电缆护层结构的电缆分布参数电路模型对电缆外护套破损点进行定位。首先,以电缆分布参数电路模型为基础,推导出单端接地以及交叉互联接地方式下外护套破损点处故障电压表达式;然后,再利用破损点处两端故障电压瞬时相位一致原则,

建立故障测距方程;最后,通过遗传算法进行迭代求解得到最终故障距离。

1 高压电缆外护套破损点测距原理

基于电网络思想和分布参数理论,利用高压电缆微元等效段级联思想,在保留高阶项的前提下,通过待定系数法和微积分理论推导获得高压电缆分布参数模型^[23],如图1所示。图中: R_c 和 L_c 分别表示电缆线芯上的单位电阻和单位电感; R_s 和 L_s 分别表示电缆金属护层上的单位电阻和单位电感; C_{cs} 和 C_{sg} 分别表示电缆线芯和金属护层之间及金属护层和大地之间的单位电容; M_m 表示线芯和护层之间的单位互感; l 表示电缆长度; Δx 表示电缆微元等效段长度;下标“tc”和“ts”分别表示线芯末端和护层末端;下标“hc”和“hs”分别表示线芯首端和护层首端。

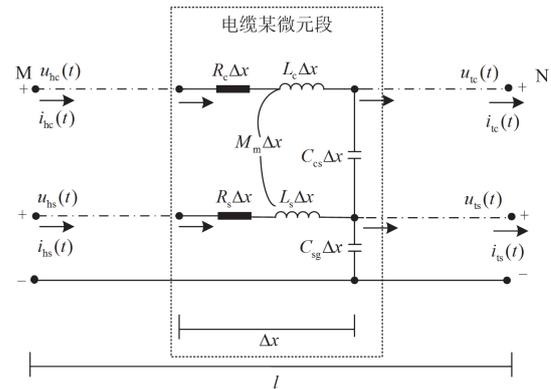


图1 高压电缆微元段等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of microelement segment of high voltage cable

分布参数模型的具体表达式如式(1)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{tc}(t) = u_{hc}(t) - \left[R_c i_{hc}(t) + L_c \frac{di_{hc}(t)}{dt} + \right. \\ \quad \left. M_m \frac{di_{hs}(t)}{dt} \right] l + \sum_{j=1}^{\infty} P_{cn}(j) \\ i_{tc}(t) = i_{hc}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} Q_{cn}(j) \\ u_{ts}(t) = u_{hs}(t) - \left[R_s i_{hs}(t) + L_s \frac{di_{hs}(t)}{dt} + \right. \\ \quad \left. M_m \frac{di_{hc}(t)}{dt} \right] l + \sum_{j=1}^{\infty} P_{sn}(j) \\ i_{ts}(t) = i_{hs}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} Q_{sn}(j) \end{array} \right. \quad (1)$$

式中： $P_{cn}(j)$ 、 $Q_{cn}(j)$ 、 $P_{sn}(j)$ 和 $Q_{sn}(j)$ 的表达式详见附录 A。

通过式(1)可知，在已知电缆基本参数的情况下，可以通过电缆上任意一点电气量推导获得电缆上其余任意另一点处的电气量。

此时式(1)仅适用于单相单芯电缆正常工况下首末端相关电气量的推导，为了将其拓展到三相系统中使用，还需要再引入解耦矩阵 \mathbf{Q} 将相与相之间的耦合关系消去^[24]。假设三相电缆材料一致、结构相同，且为正三角形敷设，相与相之间的互阻抗均相等且为 Z_{ABC} ，则可以得到三相电缆的单位阻抗矩阵 \mathbf{Z} ，如式(2)所示。

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{CC} & \mathbf{Z}_{CS} \\ \mathbf{Z}_{SC} & \mathbf{Z}_{SS} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{Z}_{CS} = \mathbf{Z}_{SC} = \begin{bmatrix} j\omega M_m & Z_{ABC} & Z_{ABC} \\ Z_{ABC} & j\omega M_m & Z_{ABC} \\ Z_{ABC} & Z_{ABC} & j\omega M_m \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_{CC} = \begin{bmatrix} Z_C & Z_{ABC} & Z_{ABC} \\ Z_{ABC} & Z_C & Z_{ABC} \\ Z_{ABC} & Z_{ABC} & Z_C \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Z}_{SS} = \begin{bmatrix} Z_S & Z_{ABC} & Z_{ABC} \\ Z_{ABC} & Z_S & Z_{ABC} \\ Z_{ABC} & Z_{ABC} & Z_S \end{bmatrix}$$

式中： Z_{ABC} 为相与相之间的互阻抗； $Z_C = R_c + j\omega L_c$ ； $Z_S = R_s + j\omega L_s$ 。

故有： $\mathbf{Z}_{120} = \mathbf{Q}^{-1}\mathbf{Z}\mathbf{Q}$ ，其中 \mathbf{Z}_{120} 是三相序分量的单位阻抗矩阵， \mathbf{Q} 的具体表达式为

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{S} & \\ & \mathbf{S} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ k^2 & k & 1 \\ k & k^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： k 为旋转因子， $k = -0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ 。

此时通过解耦矩阵 \mathbf{Q} ，即可将三相系统解耦为独立的三相序分量，每相序分量之间依然保留了线芯和护层的耦合关系。

值得注意的是，当高压电缆发生外护套破损导致发生护层-地短路故障时，电缆护层电压电流产生扰动对线芯造成的影响可以忽略不计，且在实际工程中，高压电缆仅在直接接地箱和交叉互联箱处可以对电缆护层的电气量进行监测。因此，在计算过程中，认为线芯不受外护套破损故障扰动的影响，

运用正常运行时线芯电气量数据代入计算，设为已知，故在后续计算中不再赘述。同时，由于式(1)解析式过于复杂，可简化为(4)所示的函数形式。

$$\begin{cases} (u_{ts}(t), i_{ts}(t)) = f_1(l, u_{hs}(t), i_{hs}(t)) \\ (u_{hs}(t), i_{hs}(t)) = f_2(l, u_{ts}(t), i_{ts}(t)) \end{cases} \quad (4)$$

式中： f_1 为基于式(1)构建的隐函数，通过 f_1 即可利用末端电缆相关电气量，推导获得距离末端 l 处的电缆首端相关电气量； f_2 为利用首端电缆相关电气量推导获得距离首端 l 处电缆末端相关电气量的隐函数。

由于消去了相与相之间的影响，因此解耦后的序分量，依然遵守式(1)的约束。为了统一描述序分量的传输特性，本文对式(4)所述的函数关系进行向量化拓展。定义 $\mathbf{u}_{120}^{hs}(t) = [u_1^{hs}(t), u_2^{hs}(t), u_0^{hs}(t)]^T$ 为首端电压序分量向量， $\mathbf{i}_{120}^{hs}(t) = [i_1^{hs}(t), i_2^{hs}(t), i_0^{hs}(t)]^T$ 为首端电流序分量向量，其中下标“1”、“2”、“0”分别表示正序、负序和零序分量。末端电气量向量分别为 $\mathbf{u}_{120}^{ts}(t)$ 、 $\mathbf{i}_{120}^{ts}(t)$ ，则式(4)向量化后的映射关系为

$$\begin{cases} [\mathbf{u}_{120}^{ts}(t), \mathbf{i}_{120}^{ts}(t)] = F_1(l, \mathbf{u}_{120}^{hs}(t), \mathbf{i}_{120}^{hs}(t)) \\ [\mathbf{u}_{120}^{hs}(t), \mathbf{i}_{120}^{hs}(t)] = F_2(l, \mathbf{u}_{120}^{ts}(t), \mathbf{i}_{120}^{ts}(t)) \end{cases} \quad (5)$$

向量化函数 F_1 、 F_2 的运算逻辑与原始形式一致，即对向量中正负零序分量分别独立执行相同的物理约束计算，从而实现多序分量的并行映射。

1.1 单端接地方式下电缆护层接地故障电压求取

通常长度小于 800 m 的高压电缆适用于单端接地方式。当 A 相外护套破损发生护层接地故障时，其沿线相关电气量分布如图 2 所示。图 2 中： $u_{tc\varphi}(t)$ 表示电缆末端线芯 φ 相电压， $\varphi = \{A, B, C\}$ ； $i_{hs\varphi}(t)$ 表示电缆首端护层 φ 相电流；图 2 中护层保护器为大电阻，可视为开路。

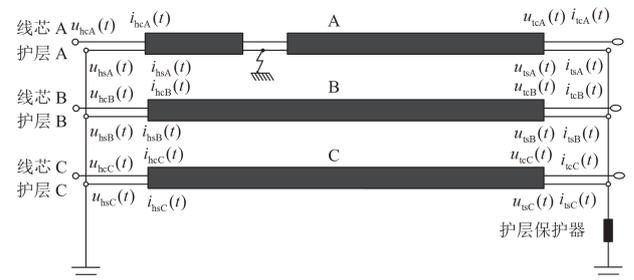


图 2 单端接地高压电缆 A 相护层接地故障相关电气量分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the distribution of electrical quantities associated with a single-ended grounded high-voltage cable with an A-phase sheath ground fault

当电缆发生外护套破损故障时, 故障点处的等效电路如图 3 所示。图中: l_f 为故障点至电缆首端的距离; Δx_h 表示故障点前的第一个等效微元段; Δx_l 表示故障点后的第一个等效微元段; R_f 表示故

障点处的过渡电阻。由于破损点前后的电气量分布依旧遵守式(4)的约束关系, 因此可得故障点相关电气量计算过程。

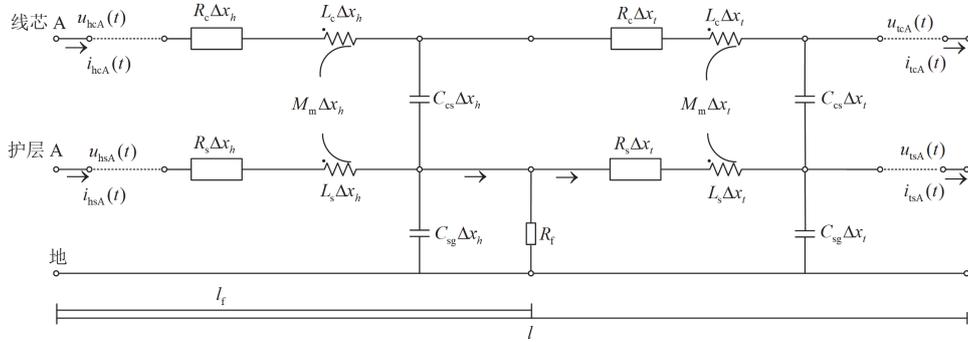


图 3 高压电缆护层接地故障等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram for high voltage cable sheathing ground faults

由末端推导至故障点处:

$$\begin{bmatrix} u_1^{ts}(t) \\ u_2^{ts}(t) \\ u_0^{ts}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \begin{bmatrix} u_{tsA}(t) \\ u_{tsB}(t) \\ u_{tsC}(t) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_1^{ts}(t) \\ i_2^{ts}(t) \\ i_0^{ts}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \begin{bmatrix} i_{tsA}(t) \\ i_{tsB}(t) \\ i_{tsC}(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: \mathbf{Q} 为 6×6 的解耦矩阵, 其作用是将线芯与护层的三相电气量同时变换为序分量。鉴于前文已设定线芯电气量已知且不受外护套故障影响, 因此, 后续分析与计算将重点放在护层序分量上, 对线芯部分的变换过程不再单独展开。

将式(6)代入式(5)中, 可得

$$[\mathbf{u}_{120f}^{ts}(t), \mathbf{i}_{120f}^{ts}(t)] = F_2(l - l_f, \mathbf{u}_{120}^{ts}(t), \mathbf{i}_{120}^{ts}(t)) \quad (7)$$

故有

$$\begin{bmatrix} u_{Af}^{ts}(t) \\ u_{Bf}^{ts}(t) \\ u_{Cf}^{ts}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} u_{1f}^{ts}(t) \\ u_{2f}^{ts}(t) \\ u_{0f}^{ts}(t) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{Af}^{ts}(t) \\ i_{Bf}^{ts}(t) \\ i_{Cf}^{ts}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} i_{1f}^{ts}(t) \\ i_{2f}^{ts}(t) \\ i_{0f}^{ts}(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

由首端推导至故障点处:

$$\begin{bmatrix} u_1^{hs}(t) \\ u_2^{hs}(t) \\ u_0^{hs}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \begin{bmatrix} u_{hsA}(t) \\ u_{hsB}(t) \\ u_{hsC}(t) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_1^{hs}(t) \\ i_2^{hs}(t) \\ i_0^{hs}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \begin{bmatrix} i_{hsA}(t) \\ i_{hsB}(t) \\ i_{hsC}(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

将式(9)代入式(5)中, 可得

$$[\mathbf{u}_{120f}^{hs}(t), \mathbf{i}_{120f}^{hs}(t)] = F_1(l_f, \mathbf{u}_{120}^{hs}(t), \mathbf{i}_{120}^{hs}(t)) \quad (10)$$

故有

$$\begin{bmatrix} u_{Af}^{hs}(t) \\ u_{Bf}^{hs}(t) \\ u_{Cf}^{hs}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} u_{1f}^{hs}(t) \\ u_{2f}^{hs}(t) \\ u_{0f}^{hs}(t) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{Af}^{hs}(t) \\ i_{Bf}^{hs}(t) \\ i_{Cf}^{hs}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} i_{1f}^{hs}(t) \\ i_{2f}^{hs}(t) \\ i_{0f}^{hs}(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

综上, 由式(8)和式(11)即可在单端接地方式下

A 相电缆发生外护套破损故障时, 基于分布参数模型获得两端推导的故障点电压表达式。此时, 基于同一点处电压应相等条件, 应有首端推导获得故障点处护层电压与末端推导获得故障点处护层电压相等, 如式(12)所示。

$$u_f(t) = u_{Af}^{hs}(t) = u_{Af}^{ts}(t) \quad (12)$$

1.2 交叉互联接地方式下电缆护层接地故障电压求取

在电缆的实际运行中, 当电缆长度超过 1.2 km 时, 根据电缆运行安全规范, 通常采用护层交叉互联的接地方式抑制感应电压^[25-26]。当交叉互联电缆 B2 区段发生护层接地故障时, 如图 4 所示, 图中: $u_{hsx\varphi}(t)$ 表示区段 x 的 φ 相首端护层电压, $x=1, 2, 3$; $u_{tsx\varphi}(t)$ 表示区段 x 的 φ 相末端护层电压。此时故障点电气量计算过程类似于单端接地方式下故障点电气量计算方式, 但在每一段电缆进行交叉换位时, 相关电气量并不是相等状态, 而是线芯相等, 护层发生交叉换位, 具体推导如下。

由电缆首端推导(即区段一首端)至区段 2 首端:

$$\begin{bmatrix} u_1^{hs1}(t) \\ u_2^{hs1}(t) \\ u_0^{hs1}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \begin{bmatrix} u_{hs1A}(t) \\ u_{hs1B}(t) \\ u_{hs1C}(t) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_1^{hs1}(t) \\ i_2^{hs1}(t) \\ i_0^{hs1}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \begin{bmatrix} i_{hs1A}(t) \\ i_{hs1B}(t) \\ i_{hs1C}(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

将式(11)代入式(5)中, 可得

$$[\mathbf{u}_{120}^{ts1}(t), \mathbf{i}_{120}^{ts1}(t)] = F_1(l, \mathbf{u}_{120}^{hs1}(t), \mathbf{i}_{120}^{hs1}(t)) \quad (14)$$

故有

$$\begin{bmatrix} u_{ts1A}(t) \\ u_{ts1B}(t) \\ u_{ts1C}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} u_1^{ts1}(t) \\ u_2^{ts1}(t) \\ u_0^{ts1}(t) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{ts1A}(t) \\ i_{ts1B}(t) \\ i_{ts1C}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} i_1^{ts1}(t) \\ i_2^{ts1}(t) \\ i_0^{ts1}(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

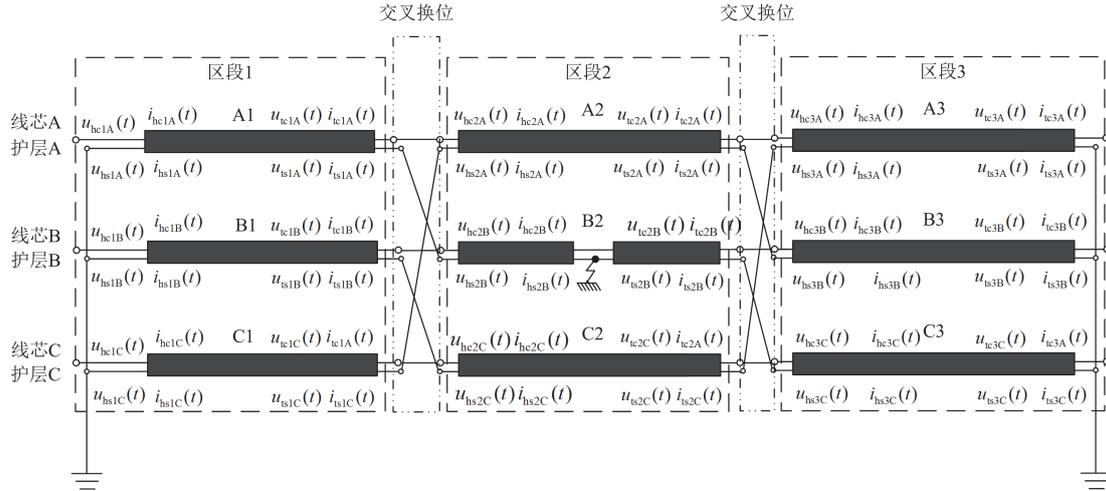


图 4 交叉互联电缆 B2 区段发生护层接地故障相关电气量分布示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the distribution of electrical quantities associated with the occurrence of a sheath ground fault in section B2 of the cross-interconnection cable

由交叉换位即可获得区段 2 首端相关电气量为

$$\begin{bmatrix} u_{hs2A}(t) \\ u_{hs2B}(t) \\ u_{hs2C}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{ts1B}(t) \\ u_{ts1C}(t) \\ u_{ts1A}(t) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{hs2A}(t) \\ i_{hs2B}(t) \\ i_{hs2C}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ts1B}(t) \\ i_{ts1C}(t) \\ i_{ts1A}(t) \end{bmatrix} \quad (16)$$

由电缆末端(区段 3 末端)推导至区段 2 末端:

$$\begin{bmatrix} u_1^{ts3}(t) \\ u_2^{ts3}(t) \\ u_0^{ts3}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \begin{bmatrix} u_{ts3A}(t) \\ u_{ts3B}(t) \\ u_{ts3C}(t) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_1^{ts3}(t) \\ i_2^{ts3}(t) \\ i_0^{ts3}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q}^{-1} \begin{bmatrix} i_{ts3A}(t) \\ i_{ts3B}(t) \\ i_{ts3C}(t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

将式(17)代入式(5)中, 可得

$$[\mathbf{u}_{120}^{hs3}(t), \mathbf{i}_{120}^{hs3}(t)] = F_2(l, \mathbf{u}_{120}^{ts3}(t), \mathbf{i}_{120}^{ts3}(t)) \quad (18)$$

故有

$$\begin{bmatrix} u_{hs3A}(t) \\ u_{hs3B}(t) \\ u_{hs3C}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} u_1^{hs3}(t) \\ u_2^{hs3}(t) \\ u_0^{hs3}(t) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{hs3A}(t) \\ i_{hs3B}(t) \\ i_{hs3C}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{Q} \begin{bmatrix} i_1^{hs3}(t) \\ i_2^{hs3}(t) \\ i_0^{hs3}(t) \end{bmatrix} \quad (19)$$

由交叉换位即可获得区段 3 末端相关电气量为

$$\begin{bmatrix} u_{ts2A}(t) \\ u_{ts2B}(t) \\ u_{ts2C}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{hs3B}(t) \\ u_{hs3A}(t) \\ u_{hs3C}(t) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{ts2A}(t) \\ i_{ts2B}(t) \\ i_{ts2C}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{hs3B}(t) \\ i_{hs3A}(t) \\ i_{hs3C}(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

由此即完成了由电缆区段 2 首末端电气量的推导。此时再重复式(6)一式(11)过程, 即可获得交叉互联接地方式下 B2 区段护层接地时, 两端推导故障点处护层电压 $u_{BF}^{hs}(t, l_f)$ 和 $u_{BF}^{ts}(t, l_f)$ 。

综上所述, 实现了单端接地以及交叉互联接地方式下外护套破损时破损点处护层故障电压的求取。此时基于两端推导电压相位一致条件建立故障测距方程, 求解即可获得故障距离, 如式(21)所示。

$$\omega t + \varphi_{hs}(t, l_f) = \omega t + \varphi_{ts}(t, l_f) \quad (21)$$

式中: $\varphi_{hs}(t, l_f)$ 表示首端推导获得的故障点电压 $u_{BF}^{hs}(t, l_f)$ 的初相位; $\varphi_{ts}(t, l_f)$ 表示末端推导获得的故障点电压 $u_{BF}^{ts}(t, l_f)$ 的初相位。

2 基于暂态信号的测距实现方法

2.1 基于故障暂态信号的故障距离求取

2.1.1 基于希尔伯特变换的瞬时相位表示

文献[27]给出了一种基于希尔伯特变换的暂态信号正弦表示方法, 其可以将采集到的暂态信号 $f(t)$ 表示为正弦稳态信号和衰减的暂态信号的叠加, 如式(22)所示。

$$f(t) = A(t) \cos(\omega t) + B(t) \sin(\omega t) = A_m(t) \sin(\omega t + \varphi(t)) \quad (22)$$

式中: $A(t)$ 、 $B(t)$ 为缓变的时变幅值函数, 它们共同决定了信号的瞬时幅值与相位; $A_m(t)$ 为瞬时幅值; $\varphi(t)$ 为瞬时初相位。 $A_m(t)$ 、 $\varphi(t)$ 的表达式为

$$\begin{cases} A_m(t) = \sqrt{A(t)^2 + B(t)^2} \\ \varphi(t) = \arctan(A(t)/B(t)) \end{cases} \quad (23)$$

同时为了将信号的正弦表示形式唯一确定, 令 $B(t)$ 为 $A(t)$ 的希尔伯特变换, 此时, 利用一段时间的信号采样值, 即可将式(22)中的 $A(t)$ 和 $B(t)$ 进行具体表示, 如式(24)所示。

$$\begin{cases} A(t) = \sum_{j=0}^N a_j \cdot t^j \cdot e^{-st^2} \\ B(t) = H(A(t)) \end{cases} \quad (24)$$

式中: H 表示希尔伯特变换; N 表示函数多项式的阶数; a_j 为一组待定系数, $j = 0, 1, \dots, N$; s 为所设

定的衰减系数。

经此,由式(22)一式(24)即可将第1节中计算获取的护层故障电压表示为幅值和相位都随时间和故障距离变化的正弦函数形式,以图4所示故障情况为例,由首端电气量推导获得的故障点处护层电压和由末端电气量推导获得的故障点处护层电压表达式分别如式(25)和式(26)所示。

$$u_{\text{Bf}}^{\text{hs}}(t, l_f) = \left[\sum_{j=0}^N a_j^{\text{hs}}(l_f) \cdot t^j \cdot e^{-st^2} \right] \cos(\omega t) + \left[\sum_{j=0}^N a_j^{\text{hs}}(l_f) \cdot H(t^j \cdot e^{-st^2}) \right] \sin(\omega t) \quad (25)$$

$$u_{\text{Bf}}^{\text{ts}}(t, l_f) = \left[\sum_{j=0}^N a_j^{\text{ts}}(l_f) \cdot t^j \cdot e^{-st^2} \right] \cos(\omega t) + \left[\sum_{j=0}^N a_j^{\text{ts}}(l_f) \cdot H(t^j \cdot e^{-st^2}) \right] \sin(\omega t) \quad (26)$$

将式(25)和式(26)分别代入式(23),即可分别获得两端推导得到的破损点护层故障电压瞬时初相位,此时基于式(21)即可得到最终的测距方程表达式如式(27)所示。

$$\frac{\sum_{j=0}^N a_j^{\text{hs}}(l_f) \cdot t^j \cdot e^{-st^2}}{\sum_{j=0}^N a_j^{\text{hs}}(l_f) \cdot H(t^j \cdot e^{-st^2})} = \frac{\sum_{j=0}^N a_j^{\text{ts}}(l_f) \cdot t^j \cdot e^{-st^2}}{\sum_{j=0}^N a_j^{\text{ts}}(l_f) \cdot H(t^j \cdot e^{-st^2})} \quad (27)$$

2.1.2 基于遗传算法的测距方程迭代求解

显然由于上述求解过程过于复杂,导致最终得到的测距方程无法通过常规方法求解,而传统的逐点代入求解过程又过于繁琐,不能满足实际的工程需求。因此为了提高计算效率和计算精度,引入优化算法进行迭代求解^[28]。经过分析研究发现,相比于其他方法,遗传算法是一种兼顾了全局和局部搜索能力的优化算法,其具有全局搜索能力强、目标函数要求低、适应性强、计算效率高等优点^[29-31]。

将测距方程进行优化,得到适应度函数,如式(28)所示。

$$F_{\text{it}}(l_x) = \sum_{q=1}^n \left[\left| \varphi_{\text{hs}}(l_x, t_q) - \varphi_{\text{ts}}(l_x, t_q) \right| \right] \quad (28)$$

式中: l_x 为观测点距离区段首端距离; t_q 为采样时间点, $q=1, 2, \dots, D$, D 为采样窗口大小。

由此将测距方程的求解零点问题,转换为借由适应度函数的最优解问题,当适应度 $F_{\text{it}}(l_x)$ 的值最小时,此时 $l_x = l_f$, 具体步骤如下。

1) 种群初始化: 在所有可行解空间中随机生成初始种群,以实体编码形成初始解集合 $\{l_{x_1}, l_{x_2}, \dots,$

$l_{x_p}\}$, p 为遗传算法设置的初始解个数。

2) 适应度评估: 基于式(28)计算每个个体的适应度 $F_{\text{it}}(l_x)$, 并将最优个体及其位置记录。

3) 精英选择: 以竞标赛选择方法,从当前种群中选出适应度较高个体,形成新的父代集合。

4) 交叉重组: 采用模拟二值扩散算法,通过引入自适应扩散系数实现父代基因信息的动态重组。由随机两个第 n 代父代个体 X_1^n 、 X_2^n 产生第 $n+1$ 代子代个体 X_1^{n+1} 、 X_2^{n+1} 具体步骤如下。

① 定义扩散系数 β_i , 其分布如式(29)所示。

$$\rho(\beta_i) = \begin{cases} 0.5(\eta_c + 1)\beta_i^{\eta_c}, & \beta_i \leq 1 \\ 0.5(\eta_c + 1)\frac{1}{\beta_i^{\eta_c+2}}, & \beta_i > 1 \end{cases} \quad (29)$$

式中: β_i 为自定义扩散系数, $\beta_i = \left| \frac{X_2^{n+1} - X_1^{n+1}}{X_2^n - X_1^n} \right|$; η_c 为交叉分布指数,可取任意非负实数。 η_c 的取值决定了产生的子代与父代之间的距离,取值越小表明子代与父代之间的距离越大,一般取 $\eta_c = 1$ 。

② 取随机数 $u_i \in (0, 1)$, 令 $u_i = \int_0^{\beta_i} \rho(\beta_i) d\beta_i$; 将其与式(29)联立,即可解得

$$\beta_F = \begin{cases} (2u_i)^{\frac{1}{\eta_c+1}}, & u_i \leq 0.5 \\ \frac{1}{2(1-u_i)^{\frac{1}{\eta_c+1}}}, & u_i > 0.5 \end{cases} \quad (30)$$

③ 综上,即可得到第 $n+1$ 代子代个体 X_1^{n+1} 、 X_2^{n+1} , 如式(31)所示。

$$\begin{bmatrix} X_1^{n+1} \\ X_2^{n+1} \end{bmatrix} = 0.5 \begin{bmatrix} 1 + \beta_F & 1 - \beta_F \\ 1 - \beta_F & 1 + \beta_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1^n \\ X_2^n \end{bmatrix} \quad (31)$$

5) 变异突变: 为了增强种群多样性,防止可行解陷入局部最优困境,采用多项式扰动模型引入可控扰动,其变异幅度由边界条件动态约束。设当前个体为 X_1^n , 变异后的个体为 \bar{X}_1^n , 则有

$$\bar{X}_1^n = X_1^n + (X^U - X^L)\bar{g} \quad (32)$$

式中: X^U 和 X^L 分别为 X^n 取值的上、下界; 定义算子 \bar{g} , 如式(33)所示。

$$\bar{g} = \begin{cases} 2u_i^{\eta_m+1} - 1, & u_i < 0.5 \\ 1 - [2(1-u_i)]^{\eta_m+1}, & u_i \geq 0.5 \end{cases} \quad (33)$$

式中: η_m 为突变分布指数,其决定了突变后个体与父代的距离,一般取值越小距离越短,通常 $\eta_m \in (20, 100)$ 。

6) 迭代求解：检查是否满足终止条件。

① $F_{it}(l_x) = 0$ ，即找到瞬时相位一致的点；② 收敛判别值 $\varepsilon = |F_{it}(l_{x_n}) - F_{it}(l_{x_{n-1}})| \leq 10^{-8}$ ，即最终结果收敛。若满足，则输出当前最优；若未满足，则重新回到步骤 3) 进行适应度评估和迭代。

7) 最终得到的最优参数 l_x 即为实际故障距离。

通过该算法可大大加快测距方程的求解过程，增强本文外护套破损点定位方法的工程实用性。

2.1.3 仿真验证

为验证上述外护套破损点定位方法，本节将在 ATP-EMTP 中进行仿真验证。电缆选用 YJLW03 型号，总长度为 1500 m，每段长度均为 500 m，相关参数设置见表 1，信号采样频率为 1200 Hz，本文采用相对误差 δ 计算表达式为

$$\delta = \frac{|l_d - l_f|}{l} \times 100\% \quad (34)$$

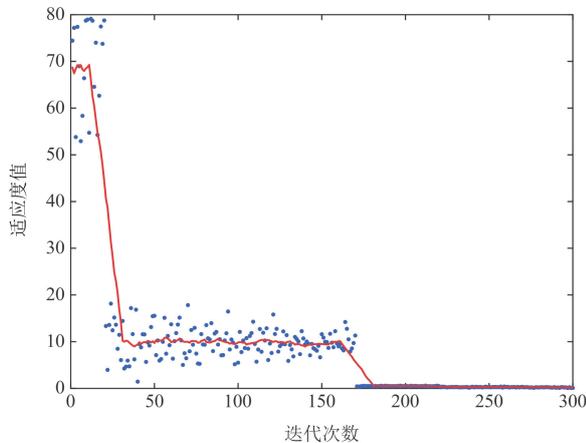
式中： l_d 和 l_f 分别为故障距离的实际值和计算值。

以 B2 区段发生的交叉互联接地方式高压电缆外护套破损故障为例，设置故障距离为 250 m，故障电阻为 3 Ω ，故障初相角为 0°。按照表 1 设置相关参数。基于式(26)进行故障定位的结果如图 5 所示，图中蓝点表示每代个体的适应度值，红线表示由这些点拟合出的最佳适应度变化趋势。算法求解的最终结果为 251.37 m，相对误差约为 0.274%，绝对误差约为 1.37 m，定位结果准确。

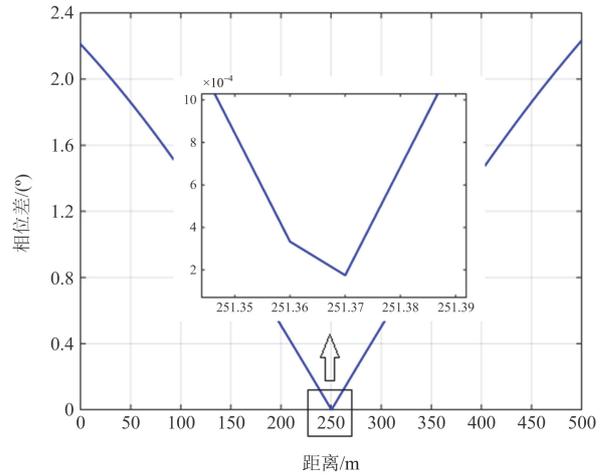
表 1 电缆相关参数设置

Table 1 Cable-related parameter settings

电缆参数	数值	电缆参数	数值
线芯外径/mm	27.5	大地电阻率/($\Omega \cdot m$)	100
护层内径/mm	65.1	线芯电阻率/($\Omega \cdot m$)	1.724×10^{-8}
护层外径/mm	67.9	护层电阻率/($\Omega \cdot m$)	2.826×10^{-8}
相对介电常数	2.3	半导体屏蔽层厚度/mm	2.0



(a) 算法运行效果



(b) 沿线相位差值

图 5 交叉互联接地方式下发生 B2 护层对地故障定位结果
Fig. 5 Localization results of B2 sheath-to-ground faults occurring in the cross-interconnection grounding mode

2.2 基于故障暂态信号的高压电缆外护套破损点定位流程

本文采用基于故障暂态信号的高压电缆外护套破损点定位方法，以故障时高压电缆等效电路为基础，通过电缆首末端线芯和护层电气量推导获得外护套破损点处过渡电阻上故障电压和故障电流的函数表达式；再基于希尔伯特变换获取两端推导的故障电压瞬时相位，根据两端推导故障电压相位一致原则，构建故障测距方程；最后将故障测距方程的求解转化为适应度函数的优化问题，基于遗传算法进行求解，获得的最优参数即为故障距离。

高压电缆外护套破损点定位流程如图 6 所示，具体步骤如下。

- 1) 采集电缆首末端线芯和护层相关电气量。
- 2) 根据不同接地方式，基于故障时电缆等效电路，经由式(6)一式(20)推导获得电缆故障区段首末端相关电气量。
- 3) 取故障距离 l_f 为待优化参数，以电缆长度范围为参数区间，创建初始种群。
- 4) 基于式(28)进行种群适应度评价，若获得的最优解为零值，即证明找到瞬时相位一致的点，该点即为破损点；若最优解不存在零点，则按照 2.1.2 节中所描述过程进行迭代求解，直至出现零点；或函数收敛，找到最小值。零值点或最小值所在点即为破损点。

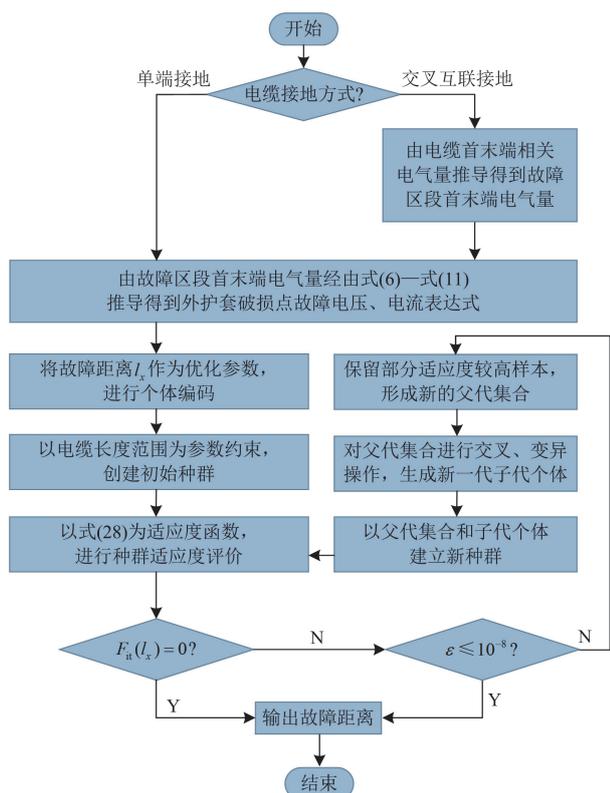


图 6 高压电缆外护套破损点定位流程图

Fig. 6 Flowchart for locating the damaged point of outer sheath of high-voltage cable

3 算法适应度分析

3.1 不同接地方式对故障定位方法的影响

设置接地方式分别为单端接地以及交叉互联接地两种, 故障电阻为 5Ω , 令外护套破损故障分别发生在电缆区段的 50、150、250、350、450 m 处。通过仿真验证不同接地方式下, 不同故障区段和不同故障距离下的算法定位效果, 结果如表 2 所示。可以看出, 单端接地方式下电缆故障定位平均相对误差低于 0.690%; 针对交叉互联接地方式下电缆, 当故障发生在区段 1 和区段 3, 即电缆首末端时, 由于直接接地箱处护层电压近似为 0, 导致运算过程中精度有所降低, 但是故障平均误差依旧低于 1.040%, 测距精度较高。

表 3 为本文方法与电桥法、跨步电压法及声磁同步法的定位结果的平均相对误差。可以看出, 本文所提出的故障定位方法不仅外护套破损点定位精度较高, 而且无需停电和获取接地电阻等参数, 具有一定工程实用性。

3.2 不同故障初相角对故障定位方法的影响

在不同接地方式下, 令外护套破损故障分别发生在电缆区段的 50、200、300、450 m 处, 且分别

设置不同故障初相角, 范围为 $0^\circ \sim 120^\circ$, 进行算法适应性验证, 定位结果如表 4 所示。可以看出, 不同故障初相角对定位精度的影响较小, 在两种接地方式下, 平均相对误差最大与最小差值仅分别为 0.236%、0.141%, 定位方法仍然具有较高的精度。

表 2 不同接地方式对定位算法的影响

Table 2 Effect of different grounding methods on localization algorithms

接地方式	故障区段	定位结果/m					平均相对误差/%
单端接地	A 相	53.9	147.24	252.09	348.27	456.03	0.660
	B 相	46.34	148.79	246.57	345.94	445.12	0.690
	C 相	44.69	153.85	248.35	348.6	453.98	0.648
交叉互联	A1	54.48	155.23	243.73	347.72	442.27	1.040
	A2	51.19	153.41	252.15	353.47	457.48	0.708
	A3	53.31	156.77	254.26	348.64	445.74	0.798
	B1	55.34	153.26	257.63	353.59	445.15	0.987
	B2	47.77	143.49	246.75	349.47	459.66	0.887
	B3	55.92	154.89	246.75	356.67	454.29	1.001
	C1	46.24	156.89	244.15	347.91	448.32	0.811
	C2	56.44	157.69	252.08	347.76	453.85	0.892
	C3	47.91	147.82	239.85	355.71	446.63	0.940

表 3 不同接地方式下不同定位方法的平均相对误差

Table 3 Average relative error of different positioning methods under different grounding methods

接地方式	平均相对误差/%			
	本文方法	电桥法	跨步电压法	声磁同步法
单端接地	0.67	4	0.67	0.13
交叉互联	0.89	6.67	2	0.67

表 4 故障初相角对定位算法的影响

Table 4 Effect of fault initial phase angle on the localization algorithm

接地方式	故障初相角/ $^\circ$	定位结果/m				平均相对误差/%
单端接地	0	49.56	197.51	302.09	447.98	0.352
	30	47.88	202.17	295.31	452.19	0.586
	60	53.97	202.13	297.76	447.89	0.523
	90	47.82	198.05	304.51	446.88	0.588
	120	48.84	197.67	304.64	452.15	0.514
交叉互联	0	46.58	204.35	302.36	453.04	0.659
	30	54.07	197.91	301.94	444.96	0.657
	60	52.51	204.63	295.76	454.57	0.798
	90	54.91	201.47	295.5	454.02	0.745
	120	53.51	204.68	296.87	445.98	0.767

3.3 过渡电阻对故障定位方法的影响

在不同接地方式下, 设置电缆区段 250 m 处发生外护套破损故障, 且分别设置过渡电阻为 5、50、

200、320、500、750和1000 Ω，进行算法适应性验证，定位结果如表 5 所示。结果表明，过渡电阻对定位精度影响较小，本文方法减小了过渡电阻对传统阻抗法的影响，在不同过渡电阻影响下本文方法一直保持较高精度。

表 5 过渡电阻对定位算法的影响

Table 5 Effect of transition resistance on localization algorithms

接地方式	过渡电阻/Ω	定位结果/m	相对误差/%	绝对误差/m
单端接地	5	248.01	0.398	1.99
交叉互联		253.17	0.634	3.17
单端接地	50	247.26	0.548	2.74
交叉互联		253.69	0.738	3.69
单端接地	200	247.87	0.426	2.13
交叉互联		248.74	0.252	1.26
单端接地	320	248.27	0.346	1.73
交叉互联		253.15	0.630	3.15
单端接地	500	251.41	0.282	1.41
交叉互联		247.43	0.514	2.57
单端接地	750	254.27	0.854	4.27
交叉互联		245.15	0.970	4.85
单端接地	1000	246.85	0.630	3.15
交叉互联		255.31	1.062	5.31

3.4 环境噪声对故障定位方法的影响

为了评估本文方法在实际工程中的定位效果，设置在不同接地方式下，当环境存在不同大小的高斯白噪声时，令外护套破损故障分别发生在电缆区段的 100、200、300、400 m 处，进行算法的适应性验证，定位结果如表 6 所示。由表 6 可知，噪声对算法的影响较小，在信噪比为 0~100 dB 范围内，算法定位精度仍然较高，平均误差均低于 0.811%。

表 6 环境噪声对定位算法的影响

Table 6 Effect of environmental noise on localization algorithms

接地方式	信噪比/dB	定位结果/m				平均相对误差/%
单端接地	0	98.57	200.81	294.91	394.65	0.634
交叉互联		101.61	206.94	295.25	397.08	0.811
单端接地	15	105.01	197.43	303.09	403.04	0.723
交叉互联		97.57	196.36	297.84	393.7	0.776
单端接地	30	103.77	196.92	305.15	398.2	0.69
交叉互联		103.03	203.97	298.21	394.34	0.673
单端接地	50	102.09	196.75	303.44	403.04	0.591
交叉互联		103.52	204.13	300.42	396.75	0.566
单端接地	70	101.09	197.7	301.44	396.72	0.406
交叉互联		98.22	196.37	296.78	402.59	0.561
单端接地	85	99.45	202.91	302.05	403.22	0.437
交叉互联		96.84	197.82	303.07	397.79	0.531
单端接地	100	101.89	202.43	297.76	402.48	0.452
交叉互联		102.75	202.79	297.95	402.82	0.521

3.5 不同电缆型号对故障定位方法的影响

分别设置电缆型号为 YJLW02-76/132-1×1400、YJLW02-127/220-1×1600、YJLW03-76/132-1×2000，在交叉互联接地方式下，设置 A2 区段在 200、400 m 处发生高压电缆外护套破损故障，通过仿真验证本文方法对不同电缆型号下电缆发生外护套破损故障的适应性，其结果如表 7 所示。可以看出，电缆型号对于算法精度影响较小，故障定位方法普适性较高。

表 7 不同电缆型号对定位算法的影响

Table 7 Effect of cable types on localization algorithms

电缆型号	定位结果/m		平均相对误差/%
YJLW02-76/132-1×1400	201.20	402.57	0.38
YJLW02-127/220-1×1600	200.08	398.45	0.16
YJLW03-76/132-1×2000	198.84	401.68	0.28

4 结论

本文给出了一种高压电缆外护套破损点在线精确定位方法。该方法基于故障暂态信息和高压电缆分布参数模型，在计及金属护层结构的前提下，依据两端推导的故障电压相位一致原则求解故障距离。本文主要结论如下。

1) 本文方法利用电缆分布参数模型，得到了电缆在外护套破损故障情况时的等效电路，实现了对不同故障区段和不同接地方式下高压电缆的故障分析，对不同故障情况下故障点处护层电压的表达式做出了描述。故障测距方程的列写与过渡电阻无关，避免了其时变性质对结果的影响，提高了定位的可靠性；同时将故障方程的求解问题转换为适应度函数的优化问题，大大提高了求解效率和精度。

2) 本文方法基于护层对线芯影响的单向性，减少了电缆线芯相关电气量的检测要求，更符合工程现场实际数据采集情况。

附录 A

为了便于计算，引入算子 S 、 T 、 Θ ，可得

$$S(j, a, b) = \sum_{i=0}^{j-1} C_{j-1}^i [(R_c + R_s)^i (L_c + L_s - 2M_m)^{j-i-1} (C_{cs})^j a^{(2j-i-1)} + (-R_s)^i \times (M_m - L_s)^{j-i-1} (C_{sg})^{j-1} C_{cs} b^{(2j-i-1)}] \quad (A1)$$

$$T(j, a, b) = \sum_{i=0}^{j-1} C_{j-1}^i [(-R_s)^i (M_m - L_s)^{j-i-1} \times (C_{cs})^{j-1} C_{sg} a^{(2j-i-1)} + (R_s)^i (L_s)^{j-i-1} \times (C_{sg})^j b^{(2j-i-1)}] \quad (A2)$$

定义矩阵 $\mathbf{W} = \begin{bmatrix} a & b & c & d \\ e & f & g & h \\ x & y & k & j \end{bmatrix}$, 则有

$$\Theta(\mathbf{W}) = \frac{l^{2k}}{(2k)!} \{x \cdot S(k, a, b) + y \cdot T(k, c, d)\} \times \\ 2^{k-2} - \frac{l^{2j+1}}{(2j+1)!} \{x \cdot S(j, e, f) + \\ y \cdot T(j, g, h)\} \times 2^{j-2} \quad (\text{A3})$$

$$Q_{\text{cn}}(j) = [C_{\text{cs}} Y'(t)] l^2 - [C_{\text{cs}} U'_{\text{cs}}(t)] l + \\ \Theta \left(\begin{bmatrix} Y(t) & Z_s(t) & 0 & 0 \\ U_{\text{cs}}(t) & u_{\text{hs}}(t) & 0 & 0 \\ 1 & 0 & j & j \end{bmatrix} \right) \quad (\text{A4})$$

$$Q_{\text{sn}}(j) = [-C_{\text{cs}} Y'(t) + (C_{\text{cs}} + C_{\text{sg}}) Z'_s(t)] l^2 - \\ [-C_{\text{cs}} U'_{\text{cs}}(t) + C_{\text{sg}} u'_{\text{hs}}(t)] l + \\ \Theta \left(\begin{bmatrix} Y(t) & Z_s(t) & Y(t) & Z_s(t) \\ U_{\text{cs}}(t) & u_{\text{hs}}(t) & U_{\text{cs}}(t) & u_{\text{hs}}(t) \\ -1 & 1 & j & j \end{bmatrix} \right) \quad (\text{A5})$$

$$P_{\text{cn}}(j) \approx \left\{ \left[R_c C_{\text{cs}} \frac{dU_{\text{cs}}(t)}{dt} + (L_c - M_m) C_{\text{cs}} \frac{d^2 U_{\text{cs}}(t)}{dt^2} + \right. \right. \\ \left. \left. M_m C_{\text{sg}} \left(\frac{d^2 u_{\text{hs}}(t)}{dt^2} \right) \right] \right\} l^2 - l^3 \left\{ C_{\text{cs}} \left[R_c \frac{dY(t)}{dt} + \right. \right. \\ \left. \left. (L_c - M_m) \frac{d^2 Y(t)}{dt^2} \right] + C_{\text{sg}} M_m \frac{d^2 Z_s(t)}{dt^2} \right\} + \\ \Theta \left(\begin{bmatrix} U_{\text{cs}}(t) & U_{\text{cs}}(t) & u_{\text{hs}}(t) & u_{\text{hs}}(t) \\ Y(t) & Y(t) & Z_s(t) & Z_s(t) \\ R_c + L_c - M_m & M_m & j & j \end{bmatrix} \right) \quad (\text{A6})$$

$$P_{\text{sn}}(j) \approx l^2 [(R_m - R_s) C_{\text{cs}} U'_{\text{cs}}(t) + (M_m - L_c) C_{\text{cs}} U''_{\text{cs}}(t) + \\ R_s C_{\text{sg}} u'_{\text{hs}}(t) + L_s C_{\text{sg}} u''_{\text{hs}}(t)] - \{C_{\text{cs}} [(R_m - R_s) Y'(t) + \\ (M_m - L_s) Y''(t)] + C_{\text{sg}} (R_s Z'_s(t) + L_s Z''_s(t))\} l^3 + \\ \Theta \left(\begin{bmatrix} U_{\text{cs}}(t) & U_{\text{cs}}(t) & u_{\text{hs}}(t) & u_{\text{hs}}(t) \\ Y(t) & Y(t) & Z_s(t) & Z_s(t) \\ -R_s + M_m - L_s & R_s + L_s & j & j \end{bmatrix} \right) \quad (\text{A7})$$

式中: $U_{\text{cs}}(t) = u_{\text{hc}}(t) - u_{\text{hs}}(t)$; $Z_s(t)$ 、 $Y(t)$ 均为引入的算子, 如式(A8)所示。

$$\begin{cases} Z_s(t) = R_s i_{\text{hs}}(t) + L_s \frac{di_{\text{hs}}(t)}{dt} + M_m \frac{di_{\text{hc}}(t)}{dt} \\ Y(t) = R_c i_{\text{hc}}(t) + L_c \frac{di_{\text{hc}}(t)}{dt} + M_m \frac{di_{\text{hs}}(t)}{dt} - \\ \left(R_s i_{\text{hs}}(t) + L_s \frac{di_{\text{hs}}(t)}{dt} + M_m \frac{di_{\text{hc}}(t)}{dt} \right) \end{cases} \quad (\text{A8})$$

参考文献

- [1] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1672.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1672.
- [2] 严有祥, 吴桐, 李振嘉, 等. 基于自生成小波变换的配电网高阻故障精确定位方法[J]. 高压电器, 2025, 61(10): 82-93.
YAN Youxiang, WU Tong, LI Zhenjia, et al. Precise location method for high impedance faults in distribution cables based on self-generated wavelet transform[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(10): 82-93.
- [3] 程鹏, 任倩, 盛诗雯, 等. 电磁式互感器二次电缆引起 MMC 孤岛系统高频谐振机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(19): 89-100.
CHENG Peng, REN Qian, SHENG Shiwen, et al. Research on high-frequency resonance mechanism in MMC islanded systems caused by secondary cables of electromagnetic instrument transformers[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(19): 89-100.
- [4] 黄金波, 邹国平, 焦建格, 等. 基于 IGA-BP 的地下电缆健康指数预测[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(3): 265-274.
HUANG Jinbo, ZOU Guoping, JIAO Jiange, et al. Prediction of underground cable health index based on IGA-BP neural network[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2025, 40(3): 265-274.
- [5] 周远翔, 赵健康, 刘睿, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2593-2612.
ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(9): 2593-2612.
- [6] VAUCHERET P, HARTLEIN R A. Ampacity derating factors for cables buried in short segments of conduit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 560-565.
- [7] 单秉亮, 李舒宁, 杨霄, 等. XLPE 配电网电缆缺陷诊断与定位技术面临的关键问题[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4809-4819.
SHAN Bingliang, LI Shuning, YANG Xiao, et al. Key problems faced by defect diagnosis and location technologies for XLPE distribution cables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4809-4819.

- [8] CHEN R, ZHANG Z, HU J, et al. Grouping-based optimal design of collector system topology for a large-scale offshore wind farm by improved simulated annealing[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(1): 94-111.
- [9] 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.
- [10] 江福章. 电力电缆外护套的故障定位及监测技术[J]. *电线电缆*, 2023(1): 7-11.
JIANG Fuzhang. Review on fault location and monitoring technology of power cable sheath[J]. *Wire & Cable*, 2023(1): 7-11.
- [11] LI Bo, LIAO Kai, YANG Jianwei, et al. Transient fault analysis method for VSC-based DC distribution networks with multi-DGs[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(11): 7628-7638.
- [12] 罗建, 夏豪, 钟加勇, 等. 基于消弧线圈补偿特性的单相接地故障选线方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(11): 158-169.
LUO Jian, XIA Hao, ZHONG Jiayong, et al. A single-phase ground fault line selection method based on arc suppression coil compensation characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(11): 158-169.
- [13] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(9): 115-123.
YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(9): 115-123.
- [14] 鹿洪刚, 覃剑, 陈祥训, 等. 电力电缆故障测距综述[J]. *电网技术*, 2004, 28(20): 58-63.
LU Honggang, QIN Jian, CHEN Xiangxun, et al. Overview of power cable fault location[J]. *Power System Technology*, 2004, 28(20): 58-63.
- [15] 王晓卫, 魏春燕, 王毅钊, 等. 基于护层接地线电流和分段 TKEO 的电缆早期故障检测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(13): 47-58.
WANG Xiaowei, WEI Chunyan, WANG Yizhao, et al. Early fault detection method for cables based on sheath grounding current and segmented TKEO[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(13): 47-58.
- [16] 李蓉, 周凯, 饶显杰, 等. 基于输入阻抗谱的电缆故障类型识别及定位[J]. *高电压技术*, 2021, 47(9): 3236-3245.
LI Rong, ZHOU Kai, RAO Xianjie, et al. Identification and location of cable faults based on input impedance spectrum[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(9): 3236-3245.
- [17] 王传旭. 高压电缆故障分析及其状态检测技术[J]. *电气技术*, 2014(9): 70-73, 77.
WANG Chuanxu. The high voltage cable fault and its condition detection technique[J]. *Electrical Engineering*, 2014(9): 70-73, 77.
- [18] 姜杰, 王鹏, 黄正炫, 等. 基于改进线路参数模型的配电网电缆单相接地测距方法[J]. *电网技术*, 2012, 36(5): 185-189.
JIANG Jie, WANG Peng, HUANG Zhengxuan, et al. Fault location of single-phase earth for power cable in distribution network based on improved cable line parameter model[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(5): 185-189.
- [19] 张姝, 林圣, 唐进, 等. 基于双层阻抗模型的三相单芯电缆自恢复故障定位[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(17): 1-10.
ZHANG Shu, LIN Sheng, TANG Jin, et al. Fault location of self-clearing fault in three phase single core cables based on double impedance model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(17): 1-10.
- [20] 杨明嘉, 夏成军, 池梓斌, 等. 基于沿线电流故障分量差值的交叉互联电缆故障测距[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(19): 54-66.
YANG Mingjia, XIA Chengjun, CHI Zibin, et al. Fault location of cross connecting cable based on fault component difference of along current[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(19): 54-66.
- [21] 杨明嘉, 夏成军, 赖胜杰, 等. 基于线芯-护层过渡电阻无功特性的交叉互联电缆故障测距[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(5): 1372-1389.
YANG Mingjia, XIA Chengjun, LAI Shengjie, et al. Fault location of cross-connected cables based on reactive power characteristics of core-sheath transition resistance[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(5): 1372-1389.
- [22] 罗建, 江丽娟, 崔秋实, 等. 基于瞬时相位一致的电力线路故障分析方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(21): 178-186.
LUO Jian, JIANG Lijuan, CUI Qiushi, et al. Fault analysis method for a power line based on instantaneous phase consistency[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(21): 178-186.
- [23] ZHANG Qiyang, LI Kunsheng, CHEN Lian, et al.

- Identification and localization study of grounding system defects in cross-bonded cables[J]. *Electronics*, 2025, 14(3).
- [24] 王植, 王宾. 一种可反映电缆全类型故障的相模变换矩阵[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(6): 42-50.
WANG Zhi, WANG Bin. A phase-mode transformation matrix for reflecting all types of cable faults[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(6): 42-50.
- [25] 袁燕岭, 周灏, 董杰, 等. 高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术[J]. *高电压技术*, 2015, 41(4): 1194-1203.
YUAN Yanling, ZHOU Hao, DONG Jie, et al. Sheath current in HV cable systems and its on-line monitoring for cable fault diagnosis[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(4): 1194-1203.
- [26] 罗建, 石家炜. 基于希尔伯特变换的暂态信号正弦表示分析方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(1): 1-7.
LUO Jian, SHI Jiawei. Sinusoidal representation of a transient signal based on the Hilbert transform[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(1): 1-7.
- [27] 王伟, 王永亮, 刘冲, 等. 110 kV 三相交叉互联电缆的频变模型及局放仿真分析[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(1): 117-122.
WANG Wei, WANG Yongliang, LIU Chong, et al. Partial discharge simulation analysis and frequency-dependent model for 110 kV three-phase cross-bonded cable[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(1): 117-122.
- [28] KO M, KIM T, SOHN K. Calibrating a social-force-based pedestrian walking model based on maximum likelihood estimation[J]. *Transportation*, 2013, 40(1): 91-107.
- [29] LIU S, LO S, MA J, et al. An agent-based microscopic pedestrian flow simulation model for pedestrian traffic problems[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, 15(3): 992-1001.
- [30] TAHERIFAR N, HAMEDMOGHADAM H, SREE S, et al. A macroscopic approach for calibration and validation of a modified social force model for bidirectional Pedestrian streams[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2019, 15(2): 1637-1661.
- [31] 刘鹏程, 李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(2): 36-41.
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(2): 36-41.

收稿日期: 2025-04-07; 修回日期: 2025-12-17

作者简介:

梁 铖(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 1610456625@qq.com

罗 建(1960—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统信号处理。E-mail: luojian10000@x263.net

(编辑 张 颖)