地下配电电缆故障测距技术应用与误差分析

陈文曲

国网福建省电力有限公司厦门供电公司　福建　厦门　361004

摘　要：地下配电电缆是城市电力输配网络的重要组成部分，其隐蔽性运行特征使得故障的快速准确定位成为供电可靠性保障的关键环节。故障测距技术的应用效果直接决定了故障排除时间与恢复供电效率，但受电缆结构、故障类型及环境因素影响，各类测距方法均存在不同程度的测量误差。本文系统梳理了地下配电电缆典型故障类型及其测距需求，深入分析阻抗法、行波法及智能测距方法的技术原理、应用特点与误差来源，并从物理因素、算法局限性及外部环境等维度系统剖析测距误差的成因机制。在此基础上，从方法融合、参数校正与数据预处理等角度提出误差综合抑制策略。研究表明，提升地下配电电缆故障测距精度的核心路径在于多方法协同与误差源针对性补偿。

关键词：地下配电电缆；故障测距；阻抗法；行波法；误差分析；故障定位

引言

地下配电电缆广泛应用于城市中心区域、工业园区及特殊环境中的电力输配网络，其隐蔽性、高可靠性及空间利用率优势使其成为城市电网的重要组成部分。然而，与架空线路相比，地下电缆一旦发生故障，巡检难度显著增大，故障点的查找往往需要投入大量的人力和时间。故障测距技术通过在电缆端头施加检测信号或利用故障暂态信号，计算故障点与测试端之间的距离，是缩小故障查找范围的核心手段。经过数十年的发展，以阻抗法、行波法为代表的故障测距技术日趋成熟，智能化测距方法也在不断涌现。然而，受电缆结构参数的不确定性、故障过渡电阻的影响、行波波速的频变特性以及现场测试条件的限制，各类测距方法的实际精度均存在不同程度的偏差。这些误差来源的识别与补偿，是提高测距实用化水平的关键。

1 地下配电电缆故障类型与测距需求

1.1 地下配电电缆典型故障类型

地下配电电缆的故障按其性质可划分为永久性故障和瞬时性故障。永久性故障包括：单相接地故障——最为常见，约占电缆故障的 70%以上，通常由绝缘老化、水分侵入或外力损伤引起；两相短路故障——由绝缘击穿或相间短路造成，故障电流大，通常伴随明显的放电痕迹；三相短路故障——发生概率较低，但后果最为严重，往往伴随巨大的短路电流和电弧烧蚀；断线故障——由机械张力过大或接头松动引起，造成供电中断。此外，电缆故障按其发生位置可分为终端故障、本体故障和中间接头故障，其中中间接头是电缆线路中最薄弱的环节，故障发生率远高于电缆本体。

1.2 电缆线路的结构特征与故障测距的约束条件

地下配电电缆的线路结构对故障测距形成多重约束。电缆沿线参数分布不均匀——不同区段的土壤热阻、埋设深度、回填材料差异导致电气参数的横向变化；中间接头和终端头引入的阻抗不连续点使行波传播过程中产生多次折反射，干扰测距波形的识别；电缆的金属护层接地方式（两端接地、单端接地或交叉互联接地）影响零序阻抗的分布特征，进而影响阻抗法测距的精度[1]。这些结构特征要求测距方法在应用中必须考虑线路参数的纵向不均匀性和边界条件的复杂性，而非简单按均匀传输线处理。

1.3 故障测距的基本功能要求

现场故障测距应满足三个基本要求。精度要求——测距误差应控制在可接受的范围内，通常要求定位误差不超过线路全长的 1%~3%，以便巡线人员在可接受的范围内快速找到故障点。适用性要求——测距方法应能适应不同的故障类型（金属性接地、高阻接地、相间短路等）和不同的电缆结构（单芯、三芯、不同截面）。快速性要求——测距过程应尽量简洁高效，能够在数十分钟内完成，为后续巡线抢修争取时间。三者之间往往存在权衡——高精度方法可能需要更多的时间和数据准备，而快速方法精度有限，需根据实际场景合理取舍。

2 主流故障测距技术原理与应用特点

2.1 阻抗法

阻抗法（含低压脉冲法及电桥法）是目前应用最广

的电缆故障测距方法。其原理是向故障电缆施加测试信号，通过测量电压与电流比值推算故障回路阻抗，并结合单位长度阻抗值计算故障距离。经典电桥法（如 Murray 回路法）利用惠斯通电桥平衡，在已知线路总长和单位电阻时直接求取故障距离，适用于低阻故障（过渡电阻 < 100Ω）。现代设备多采用低压脉冲反射法，即发射低压脉冲并测量反射波往返时间，结合波速测距，适用于断线和低阻故障。该方法设备简单、操作便捷、测试速度快，但局限性显著：测距精度受过渡电阻影响大，高阻时反射脉冲衰减严重；波速因频变效应和线路参数分布不均而产生系统误差；且难以区分近距离多反射波，在含多个接头或分支的线路上波形辨识困难。

2.2 行波法

行波法利用故障产生的暂态电压/电流行波传播特性进行测距。双端法通过测量行波抵达线路两端的时间差（需 GPS/北斗微秒级同步）计算故障位置，单端法则利用故障点反射波与初始波的时间差测距。该方法不受故障类型和过渡电阻影响，对高阻及电弧性故障有效，响应快且精度高[2]。其挑战包括：波速受频率和温度影响，频变效应与温漂引入速度误差；近距离故障时行波间隔极短（微秒级），对采样率和波形识别要求高，存在测距盲区；线路中间接头产生的反射波亦会干扰故障点反射波的准确辨识。

2.3 智能测距方法

随着人工智能技术的发展，基于神经网络、支持向量机和深度学习的故障测距方法逐渐应用于电缆故障定位领域。其基本思路是通过离线仿真或实测数据构建电缆在不同故障类型、不同故障距离和不同系统条件下的故障特征样本库，训练智能模型建立故障特征与故障距离之间的映射关系。在现场测距时，采集故障暂态信号特征（如行波波形、电压电流谐波分量、零序电流特征等），输入训练好的模型直接输出故障距离。智能测距方法在理论上具有处理非线性关系和适应复杂工况的潜力，能够在一定程度上克服传统方法对物理模型的依赖。但其应用面临样本获取困难、模型泛化能力不足以及物理可解释性差等问题。在实际应用中，智能方法通常作为传统测距方法的辅助和校验手段，而非独立使用的核心测距工具。

3 测距误差的来源与机理分析

3.1 电缆参数不确定性引起的误差

电缆的电气参数（单位长度电阻 R、电感 L、电容 C、电导 G）是阻抗法和行波法测距的基础输入参数。然而，实际电缆线路的参数与设计值或出厂参数之间存在偏差。导线电阻率的温度系数是导致参数漂移的最主要因素——铜导体的电阻率温度系数约为 0.0039/℃，当电缆运行温度在 20~80℃之间变化时，单位长度电阻的偏差可达 23%，在阻抗法测距中直接转化为相应比例的测距误差。电缆绝缘层的介电常数随频率、温度和老化程度变化，影响行波波速的精确值——行波法测距中，1%的波速误差将直接导致 1%的测距误差，在长距离电缆线路中（如数公里），这种误差可能达到数十米。电缆的实际长度与设计长度之间的差异也是不容忽视的误差来源，尤其在非直线敷设的电缆线路中，实际长度可能比投影长度长 5%~10%。

3.2 故障过渡电阻的影响

故障过渡电阻是阻抗法测距精度的主要影响因素。当故障点存在较大过渡电阻时，测量回路中除了故障电缆本身的阻抗外，还串联了不确定的非线性电阻分量，使阻抗法计算的故障距离偏大。在高阻接地故障（接地电阻 > 100Ω）中，阻抗法的测距误差可能超过 10%甚至完全无法测距[3]。这一问题的物理本质在于阻抗法将故障回路视为纯电阻性负载，而实际高阻故障中的弧光电阻呈现强烈的非线性特性，与测试电流的幅值和波形相关，无法通过线性校正消除。

3.3 行波波速的频变与传播特性偏差

行波法测距对波速的准确性高度依赖。然而，行波在电缆中的传播速度随频率变化而改变，这种频散效应使不同频率分量的行波具有不同的传播速度，导致行波波头在传播过程中发生畸变和展宽。在实际测距中，通常采用固定的经验波速（约为光速的 50%~70%），忽略了频变的影响，引入系统性误差。此外，电缆的绝缘材料、屏蔽结构及敷设环境对波速的影响也缺乏定量补偿手段，不同厂家、不同型号的电缆之间波速差异可能达到 5%~8%。在长距离线路中，这种波速偏差可能导致测距误差达到数十米至百米量级。

3.4 现场测试条件与设备因素

现场测试条件对测距精度的影响不容忽视。测试接线方式不规范——如接地线过长、接触电阻过大、信号注入点选择不当——将引入额外的阻抗分量，影响测距精度。测试设备自身的性能限制同样重要：采样率不足无法精确捕捉行波波头到达时刻，时钟同步精度不足（在双端行波法中）会导致时间差测量的微秒级误差转化为距离误差，脉冲源的上升沿不够陡峭则降低了反射波的分辨率。此外，现场电磁干扰、电缆护层感应电压

以及邻近运行电缆的互感效应均可能干扰测距信号的正常采集与判读。

3.5 人为判读与波形辨识偏差

在阻抗法和单端行波法的应用中，波形的判读很大程度上依赖操作人员的经验。对于反射波形的拐点识别、波头位置的标定以及多个反射波之间的对应关系判断，不同操作人员的判断结果可能相差一个波形周期（对应数十米的距离），引入不可控的主观误差。在波形畸变严重或信噪比较低的条件下，人为误判的概率显著增大。这种“人因误差”虽然难以完全消除，但可通过自动判读算法和波形处理技术来降低其发生概率。

4 误差抑制策略与测距精度提升途径

4.1 多方法融合与交叉验证

单一测距方法难以覆盖所有故障类型和工况条件，多方法融合是提升测距可靠性的有效途径。在测距实践中，应将阻抗法与行波法结合使用——以行波法快速获取初步测距结果，缩小故障搜索范围，再以阻抗法对低阻故障进行复核验证。当两种方法的测距结果基本吻合时（偏差 < 5%），置信度较高；当二者出现显著偏差时，应分析偏差来源（可能是过渡电阻过高导致阻抗法失效，或行波识别错误），在此基础上决定取用哪种结果或组织进一步测试[4]。对于配置条件允许的线路，双端行波法与单端行波法的交叉验证同样具有重要意义。

4.2 电缆参数实测与在线校正

消除参数不确定性的根本途径是实现电缆参数的现场实测而非依赖设计值或出厂参数。可利用电缆的正常运行状态或离线状态，通过施加测试信号测量单位长度的波速、阻抗和衰减常数，建立该电缆线路的“参数指纹”，作为后续故障测距的计算基准。对于已投运的电缆线路，可结合历史测距结果与现场巡线反馈，校正线路的平均波速和单位长度阻抗参数，使测距模型的参数逐步趋近真实值，形成“测距—巡线—校正”的闭环参数更新机制。

4.3 行波波速的动态补偿

针对行波波速的频变和漂移问题，可采用动态波速补偿策略。通过离线测试获取该电缆线路在不同频率下的波速-频率特性曲线，在现场测距时，根据行波信号的频谱分布特征，采用加权平均波速替代固定波速，提高速度取值的准确性。对于条件允许的情况，可利用电缆线路末端的已知反射界面（如终端头、中间接头）进行波速在线标定，通过测量已知距离的反射波时延反推实际波速，以实测波速替代经验波速，有效消除由温度、老化等因素引起的波速偏差。

4.4 信号预处理与自动波头识别

现场信号的噪声抑制和自动波头识别是降低误判的有效手段。采用小波变换等时频分析方法对采集到的行波信号进行去噪处理，在保留行波波头突变特征的同时滤除高频噪声和电磁干扰，提高信号的信噪比。在此基础上，利用波形突变检测算法（如模极大值检测或希尔伯特黄变换）实现波头到达时刻的自动判读，减少人为操作的主观性。自动波头识别算法应具备多尺度分析能力，以适应不同故障条件下的波形形态差异。

结束语

地下配电电缆故障测距技术的应用水平直接关系到城市供电可靠性和故障抢修效率。本文系统梳理了阻抗法、行波法及智能测距方法的技术特点与适用范围，深入分析了电缆参数不确定性、故障过渡电阻、行波波速频变、现场测试条件及人为判读等因素对测距精度的具体影响机制。研究表明，各种测距方法均有其固有的误差来源和适用边界，没有任何单一方法能够在所有故障条件下保持最优性能。提升测距精度的核心路径在于多方法协同配合、电缆参数实测校正和信号处理技术升级的综合运用——通过方法间的交叉验证降低不确定性，通过参数实测消除系统性偏差，通过自动判读减少人为误差。随着数字信号处理技术的进步和在线监测装置的普及，故障测距将逐步从“人工操作、经验判读”向“自动采集、智能分析”方向演进，测距精度和可靠性有望得到进一步提升。

参考文献

[1] 董新洲, 王宾, 施慎行. 电力电缆故障测距技术研究综述 [J]. 电力系统自动化,2022,46(18):178-187.

[2] 徐丙垠, 李伟, 陈平. 配电电缆行波故障测距的关键技术与应用 [J]. 电网技术,2023,47(7):2821-2829.

[3] 张保会, 尹项根, 王增平. 电缆故障阻抗法测距的过渡电阻影响与补偿策略 [J]. 电力自动化设备,2024,44(5):156-163.

[4] 和敬涵, 李斌, 黄少锋. 考虑频变参数的行波波速校正方法研究 [J]. 中国电机工程学报,2023,43(14):5346-5355.