

分类号: S24
学号: 20222009034

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



基于信号注入的电缆故障测距方法研究

学位申请人	刘勇
指导教师	王宾教授 龚立娇教授
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	农业工程
研究方向	农业电气化与自动化
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

分类号: S24
学号: 20222009034

密级: 公开
单位代码: 10759

石河子大学

硕士学位论文



基于信号注入的电缆故障测距方法研究

学位申请人	刘勇
指导教师	王宾教授 龚立娇教授
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	农业工程
研究方向	农业电气化与自动化
所在学院	机械电气工程学院

中国·新疆·石河子
2025年5月

Research on power cable fault location based on signal injection

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements f

or the Degree of

Master of Engineering

By

Liu Yong

(Agricultural Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Wang Bin, Gong Li-jiao

May,2025

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：




时间： 2025 年 5 月 23 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：



时间： 2025 年 5 月 23 日

导师签名：



时间： 2025 年 5 月 23 日

摘要

随着城市电网中电力电缆规模化部署与运行年限增长，电力电缆绝缘劣化引发的故障严重威胁电网的可靠运行，电缆绝缘劣化在线监测和故障后精准测距技术需求迫切，因此，本论文开展了一种融合主动信号激励与频域分析的电缆绝缘缺陷在线监测方法和基于量化扫频带宽的频域电缆故障精确测距技术研究。主要工作如下：

(1) 针对传统电缆绝缘在线监测方法响应被动的弊端，基于绝缘劣化过程中分布参数电容与电导的时变特性，提出一种主动信号注入式监测方法。该方法基于电磁感应的原理，将由RLC振荡电路产生的脉冲信号注入到电缆的首端，测量电缆末端脉冲冲击响应实现绝缘缺陷监测。基于PSCAD/EMTDC仿真平台构建10 kV XLPE电缆多工况模型验证，结果表明监测系统可在线识别绝缘材料复介电常数实部变化量大于15.5%时的绝缘缺陷，有效实现了电缆绝缘缺陷的在线监测，为电缆绝缘缺陷的监测提供了新的思路与方法。

(2) 针对传统频域反射法因扫频信号速度的频变特性导致首端反射系数谱周期畸变的问题，提出了改进的反射系数谱重构思路。该方法通过引入电缆分布参数与行波特征参数的关系重构首端反射系数谱，消除了传统首端反射系数谱周期非一致性误差。

(3) 针对传统故障测距方法带宽过大、频率过高问题，本论文在前人提出的基于反射系数谱曲线周期原理测距与广义正交积分测距算法模型上，建立了电缆故障测距遮蔽距离与扫频带宽量化表达式，提出了基于带宽量化的故障测距方法。通过1.5 km的10 kV电缆仿真试验验证表明，基于反射系数谱周期原理的测距方法，除了测距遮蔽距离临界处外，对于高阻、低阻和绝缘缺陷故障，测距精度均 <1 m，遮蔽距离测距精度 <5 m。同时在1.5 km的10 kV电缆上基于广义正交积分测距的方法实现了高阻故障测距最大误差 ≤ 2 m(相对误差0.13%)；低阻故障最大误差 ≤ 10 m(相对误差0.66%)；绝缘缺陷诱发的隐性故障最大误差 <7 m(相对误差0.46%)；多点故障误差 <10 m的精确测距。本论文提出的带宽量化方法将传统测距采用扫频带宽，由常规20 MHz带宽需求压缩至1 MHz以内(故障遮蔽距离 >50 m，降幅95%)，同时将传统测距方法需要的1900个数据点(采用20 MHz扫频带宽)降至76个数据点，降幅达96%，测距结果仍保持绝对误差 ≤ 10 m的定位准确率，同时通过实物测距装置验证了算法的准确性，结果表明具有一定的工程应用潜在价值。

本论文所提的绝缘缺陷在线监测与电缆故障后快速测距方法可大幅提升配电网运行的可靠性，提升智能化快速运维水平。

关键词：电缆绝缘缺陷监测；故障测距；反射系数谱重构；频域反射；扫频带宽量化

Abstract

With the large-scale deployment and operation of power cables in urban power grids, faults resulting from insulation degradation of power cables pose a significant threat to the reliable operation of power systems. There is an urgent need for online monitoring of cable insulation degradation as well as precise post-fault location technologies. In this thesis, an online monitoring method for cable insulation defects based on active signal excitation and frequency domain analysis is proposed, and a frequency domain-based cable fault accurate location technology utilizing quantitative sweep frequency bandwidth is investigated. The primary contributions and innovations are summarized as follows:

(1) In the field of cable insulation online monitoring, to address the limitations of traditional methods characterized by passive responses, an active signal injection monitoring approach is proposed. This method leverages the time-varying nature of distributed parameters capacitance and conductance during insulation degradation. Based on the principle of electromagnetic induction, a pulse signal generated by an RLC oscillator circuit is injected into the cable's head end, and the pulse impulse response at the cable's termination is measured to monitor insulation defects. A 10kV XLPE cable multi-condition model was constructed using the PSCAD/EMTDC simulation platform for validation. The results indicate that the monitoring system can effectively identify insulation defects online when the real part change of the complex dielectric constant of the insulation material exceeds 15.5%, thereby providing a novel and effective solution for cable insulation defect monitoring.

(2) To address the issue of spectral period distortion in the first-end reflection coefficient caused by frequency variation in the speed of the traditional frequency-domain reflection method, an enhanced spectral reconstruction approach for the reflection coefficient is proposed. This method incorporates the relationship between cable distribution parameters and line-wave characteristic parameters to reconstruct the spectrum of the first-end reflection coefficient, thereby eliminating the inconsistency in the spectral period of the traditional first-end reflection coefficient.

(3) To address the issues of excessive bandwidth and high frequency in traditional fault location methods, this paper builds upon the previously proposed fault location principles based on the periodicity of the reflection coefficient spectrum curve and the generalized orthogonal integration algorithm model. It establishes a quantitative expression for the shielding distance and sweep bandwidth in cable fault location and proposes a bandwidth-quantified fault location method. Simulation tests on a 1.5 km 10 kV cable demonstrate that the reflection coefficient spectrum periodicity-based method achieves a location accuracy

of <1 m for high-impedance, low-impedance, and insulation defect faults, except at the critical shielding distance, where the accuracy remains <5 m. Meanwhile, the generalized orthogonal integration-based method achieves a maximum error of ≤ 2 m (relative error 0.13%) for high-impedance faults, ≤ 10 m (relative error 0.66%) for low-impedance faults, <7 m (relative error 0.46%) for latent faults induced by insulation defects, and <10 m for multi-point faults. The proposed bandwidth quantification method reduces the conventional sweep bandwidth requirement from 20 MHz to below 1 MHz (for fault shielding distances >50 m, a 95% reduction) while cutting the number of required data points from 1,900 (with a 20 MHz sweep bandwidth) to 76, a 96% reduction. Despite this, the location accuracy remains within an absolute error of ≤ 10 m, demonstrating significant engineering application value.

The online monitoring of insulation defects and the fast ranging method after cable faults proposed in this thesis can significantly improve the reliability of distribution network operation and enhance the level of intelligent and fast operation and maintenance.

Key words: cable insulation condition monitoring; fault location; reflection coefficient spectral reconstruction; frequency domain reflection; swept bandwidth quantization

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
第1章 绪论.....	1
1.1研究背景与意义.....	1
1.2国内外研究现状.....	2
1.2.1电缆绝缘缺陷在线监测技术研究现状.....	2
1.2.2电缆故障测距方法研究现状.....	4
1.3本论文主要研究内容.....	8
第2章 电缆故障波过程分析与在线监测技术研究.....	10
2.1电缆故障波过程分析.....	10
2.1.1电缆基本结构.....	10
2.1.2电缆行波传输方程.....	11
2.2电缆故障时域和频域行波特征分析.....	15
2.2.1基于时域行波的电缆故障检测原理.....	15
2.2.2基于频域反射系数谱的故障检测原理.....	16
2.2.3基于时域反射与频域反射的故障检测对比分析.....	23
2.3基于信号注入的电缆绝缘缺陷在线监测技术研究.....	24
2.3.1基于电磁感应原理的注入模型与信号模型.....	24
2.3.2基于信号注入的电缆绝缘缺陷在线监测原理.....	29
2.3.3注入模型仿真与试验验证.....	33
2.4本章小结.....	35
第3章 基于带宽量化的频域行波故障测距方法研究.....	36
3.1面向反射系数谱周期测距方法的扫频带宽量化分析.....	36
3.1.1基于反射系数谱周期的测距原理.....	36
3.1.2基于反射系数谱周期测距的扫频带宽量化分析.....	37
3.1.3基于分段三次样条插值的曲线过零、峰值点检测分析.....	41
3.2基于反射系数谱广义正交积分测距方法的带宽量化分析.....	43
3.2.1基于广义正交积分的测距原理.....	43
3.2.2基于广义正交积分测距的扫频带宽量化分析.....	45

3.3扫频带宽量化对比分析	47
3.4基于带宽量化的测距方法仿真分析	49
3.4.1仿真模型建立	49
3.4.2基于反射系数谱周期测距的仿真验证	50
3.4.3基于广义正交积分测距的仿真验证	56
3.5带宽量化测距与传统测距方法对比分析	60
3.6本章小结	62
第4章 基于信号注入的缺陷在线监测与离线测距验证分析	64
4.1电缆绝缘缺陷在线监测系统设计与验证分析	64
4.1.1缺陷监测系统架构设计	64
4.1.2仿真验证分析	65
4.2电缆故障离线测距系统设计与验证分析	67
4.2.1故障测距系统框架设计	67
4.2.2故障测距系统验证分析	69
4.2.3工程案例适用性分析	72
4.3本章小结	73
第5章 结论与展望	74
5.1结论	74
5.2展望	75
参考文献	76
致谢	82
作者简介	83

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

随着经济的快速发展，城镇规模不断扩大和农村农业电力需求呈高速增长的趋势，10 kV~35 kV的电力电缆被广泛应用于配电网系统中^[1]。目前电缆使用量超27万公里且以平均每年35%的速度增长，电力电缆传输的占比快速增加，且朝着高电压、大容量、长距离方向发展，其安全可靠运行对城市、农村配电网的稳定起着重要的作用^[2,3]。

尽管电力电缆多埋在地下或电缆沟中，但人为损坏或电缆质量问题引起的电缆故障时有发生^[4]，且故障难以发现；况且电力电缆的制造门槛较低，制造设备质量参差不齐，施工工艺复杂，运行环境多变，易受短时超负荷运行的影响，绝缘容易老化，易受到化学腐蚀，为电网运行留下了潜在安全隐患^[5]。

当前我国在电缆线路运维领域存在理论与技术双重短板，具体表现为故障处置效率低下、修复作业耗时增加，进而引发重大经济损失与广泛社会关注。2018年7月24日下午15时左右，位于山西省仁怀市怀义西街供电片区的地下高压电缆突然击穿断电，导致城内沁和园、仁义园、常青园、凯旋小区等居民片区出现大面积供电故障。现实中电缆大多数都是在电缆沟内密集敷设，由于电缆单相接地不能及时切除引发电缆沟火灾的风险日益突出。近年来西安、重庆、大连等城市曾多次发生由于10 kV配电电缆单相接地故障引发沟道火灾^[6,7]，导致大面积停电的恶性事件，严重影响社会正常生产和生活秩序。

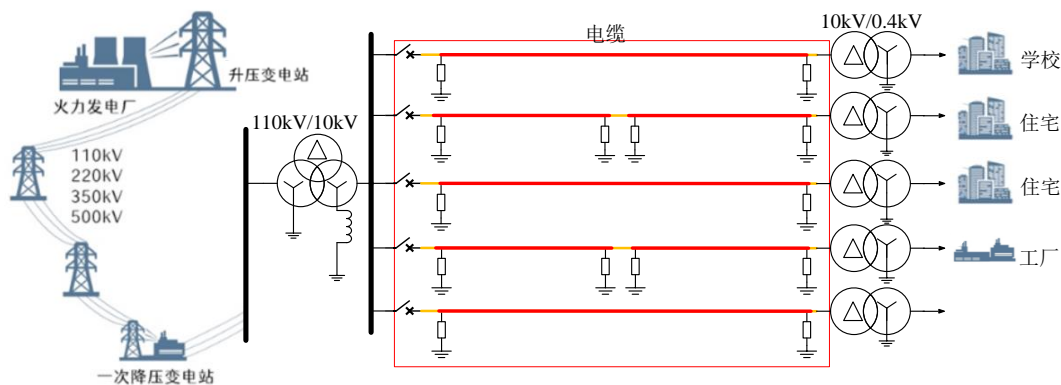


图 1-1 配网典型系统图

Fig 1-1 The typical system diagram of distribution network

电缆线路作为城市供电网络的核心组成部分，电缆线路的运行状态密切关联着电网系统的可靠性。统计数据显示，约50%的电缆故障由绝缘性能劣化引发。由于电缆电缆

沟内密集敷设，一旦出现故障，就需花费大量人力及经济投入去寻找故障点，而10 kV配电网又是一个复杂的系统，在其运行过程中可能会出现各种情况，如接地短路、断线等事故，此时就必须对电网进行停电检修及更换设备。开展实时在线监测绝缘缺陷，并在故障发生后精确定位故障点，对于降低运维人员工作压力，减少因停电引发的经济社会损失具有重要意义，这已成为保障电力系统可靠运行的重要环节。

目前，大多数研究着眼于在电缆故障发生后进行及时的切除以避免连锁故障的发生^[8-10]，然而这种“被动”的故障测距方式仍然难以避免区域性的停电事故。如果能够在运行过程中实现对电缆绝缘缺陷的主动在线监测，就可以在严重老化现象出现前进行计划性的电缆检修和替换，使得系统运维从“被动”变为“主动”，有助于从根本上避免突发性停电事故，进一步提高系统运行可靠性^[11]。因此对电缆在线绝缘缺陷监测以及电缆发生故障后快速故障测距研究十分必要，对缩短故障时间和提高供电可靠性，具有十分重要的实际意义。

为此，本论文研究内容主要包括基于信号注入的电缆在线绝缘缺陷监测技术与基于信号注入的频域行波故障测距问题，针对电缆在线绝缘缺陷监测与基于信号注入的故障离线测距问题，通过理论分析、仿真与部分试验验证的方法开展研究。

1.2 国内外研究现状

自19世纪中期电力电缆技术投入实际应用以来，与之配套的运维检修体系逐步形成。在此背景下，研究人员针对电缆系统两大核心技术难题—绝缘性能评估与故障测距方法展开了持续攻关。尽管经过百余年的技术积累，相关领域已取得显著突破，但受限于电缆线路复杂的安装环境，目前仍存在若干技术瓶颈亟待突破：其一，如何实现电缆绝缘老化程度的精准判定；其二，怎样提升故障的测距精度。这两大核心问题至今仍是制约电力系统可靠性的重要技术挑战。现有电力电缆故障检测技术集中在对电缆整体绝缘状态的评估和故障后的定位阶段，不能定位局部缺陷点从而提前预测电缆的运行状态；且现有故障检测方法定位精度不够高，寻找故障点需要耗费较多时间，为了保障电力系统的安全、可靠的运行，迫切需要一种能够快速、安全、无损的精确定位电缆故障，并能够发现局部缺陷从而预测电缆绝缘状态的新技术，这使得对于电缆绝缘状态诊断和电缆故障测距问题成为研究热点。

1.2.1 电缆绝缘缺陷在线监测技术研究现状

地下电力电缆因其安装方式的不同，造成部分电缆工作环境恶劣，在电、热、机械

等多重应力作用下极易出现绝缘老化, 导致线路绝缘水平下降进而诱发故障, 严重危害配电网的可靠运行^[12,13]。与此同时, 随着国家大力提倡能源结构改革, 建设新型电力系统, 大量的风电、光伏、储能等分布式能源接入配电网中, 分布式能源的运行特点使得流过电缆的负载电流可能在较短的时间内出现大范围波动, 在电缆上易产生较大的热应力, 加速了电缆绝缘的老化速度^[14]。因此, 提高电缆运行可靠性对于分布式能源大量接入的现代配电网也具有较大意义。

早期对电缆绝缘性能的测试主要是做耐压测试, 这样的方式具有一定的破坏性, 也存在本来电缆的绝缘只是轻微劣化, 但是由于耐压试验破坏了原来绝缘轻微劣化的电缆。于是后来又通过非破坏性的试验测量电缆的绝缘电阻或者泄露电流来判断电缆绝缘情况, 这两种情况通常只能判断电缆整体的绝缘状况, 无法评估电缆绝缘中的局部缺陷, 并且以上测试的方式都需要电缆脱离电网离线测试, 必然就会造成定期非必要的停电事故, 在高速发展的今天停电必然也会造成一定的经济损失。

鉴于传统电缆绝缘监测方法的缺点, 国内外学者展开了大量的试验与理论创新, 开发了一些电缆绝缘在线监测的方法。电缆绝缘检测技术的发展历程可追溯至上世纪中叶至80年代, 欧美及日本学者在该领域开展了系统性研究, 逐步构建了不同的理论体系^[15,16]。其中, 荷兰NKF电缆厂专家F.H.Kreuger博士通过实验研究揭示了局部放电对绝缘性能的影响机制, 研发了平衡电桥法、针电极放电源等创新检测手段。这种基于局部放电的评估技术因其有效性获得IEEE等国际权威机构认可, 被确立为电缆绝缘状态评估的有效手段^[17]。针对进口检测设备成本过高的问题, 学者K.Sona等提出了直流分量检测法。其原理在于: 在交流电场中, 水树枝与地电位间会产生类似针板电极的整流效应, 形成微弱直流电流(通常为nA级)。通过捕捉该电流信号即可实现绝缘状态分析^[18], 然而受限于仪器精度、环境干扰等因素, 该方法的实际应用效果并不理想。在此背景下, 学界又陆续开发出直流叠加法、低频叠加法和介质损耗角正切法等改进技术, 推动了检测手段的持续演进^[19]。

总体而言, 目前国内外对于电缆绝缘在线监测方法主要分为基于局部放电技术的在线监测方法和基于介质损耗角正切值或漏电流的在线监测方法。局部放电监测方法就是通过电缆两端或者单端的高频传感器采集电缆缺陷处的间歇性放电信号, 对放电信号进行分析从而实现电缆绝缘状态的评估^[20]。在实际电网中电缆局部缺陷产生的间歇性放电信号是一个宽频带的信号, 而高频的局部放电信号在电缆的传播过程中会存在严重的衰减, 这就要求在实际配网中需要分布安装较多的传感器, 带来了较高的经济成本^[21]; 同时局部间歇性放电信号具有随机性, 这就对传感器的性能要求较高, 否则在电缆的采集端可能采集不到局部放电信号。另一方面通过监测电缆局部放电信号去实现电缆绝缘状态评估的难点还在于对局部信号的特征进行提取, 从而找到可以作为判断电缆绝缘状态的评估标准。目前大多数研究采用放电幅值、放电频率等统计量分析的方法^[22]或采用K

聚类方法^[23]、粗糙集理论^[24]、随机森林算法^[25]等数据驱动的方法实现对绝缘状态的评估,但精度较为有限而且所提方法只能应用于所研究的电缆,难以广泛应用于配电网中不同类型的电缆绝缘状态评估。

介质损耗角正切值或漏电流监测技术本质相同,介质损耗角正切值主要通过测量电缆的漏电流,然后分离出漏电中阻性分量与容性分量,进而计算出介质损耗角正切值来判断电缆绝缘状态。文献表明常见的电缆介质损耗角正切值在线测量的方法包括过零比较法^[26]、接地盒引线电流测量法^[27]、双端电气量测量法^[28]、系统暂态响应分析法^[29]。这些方法都是基于工频电压电流情况下的测量方法,虽然理论上可以测得电缆介质损耗角正切值,然而工频50 Hz下泄漏电流的阻性分量为微安级,容性分量为毫安级,前者约为后者的1/1000^[30]。现有测量设备难以同时准确地测量微安级和毫安级的工频电流信号导致阻性分量极易被容性分量所淹没,此时介质损耗因数的测量精度无法保证,会影响电缆绝缘评估的可靠性^[31]。

鉴于工频下测量介质损耗角正切值的缺点,以及考虑到电缆的等效容抗与频率呈反比,降低频率可以增大电缆的等效容抗,降低泄漏电流的容性分量,进而降低漏电流中阻性分量与容性分量的数量级提高测量精度。因此一些学者提出了低频介质损耗角正切值与超低频介质损耗角正切值的方法,测量原理依旧与传统工频测量的方法一致。利用零序电压互感器向系统施加频率为10 Hz的零序电压信号,然后利用电压探头测量电缆导体的对地电压,通过皮安表测量流经电缆绝缘层的泄漏电流^[32]或者在中性点经消弧线圈接地系统中通过消弧线圈注入频率为1 Hz甚至更低0.1 Hz的电压信号,此时泄漏电流的容性分量会降低到与阻性分量近似的数量级,这将有助于更准确地测量介质损耗因数^[30]。由此引入了超低频介质损耗因数测量方法,并衍生了IEEE试验标准和大量的技术论文^[33]。同时一些学者认为测量介质损耗角的精度不够高,于是提出直接测量电缆绝缘的漏电流,不需要复杂的计算就可以提高计算精度^[34];目前文献表明大多数直接测量漏电流的方法主要有直流电压叠加法和低频电压叠加法^[35],通过系统变压器中性点^[36]或电压互感器^[35]在电缆上叠加监测电压并测量漏电流大小,从而实现绝缘状态监测。

综上所述,无论是做耐压测试,还是测量电缆绝缘电阻;无论检测电缆局部放电信号,还是通过一些方式注入部分信号来测量电缆的绝缘介质损耗角正切值,虽然都能实现对电缆绝缘状态的监测,但是以上方式均为离线式监测及在线式被动监测,为了避免以上问题,本论文提出了电缆在线主动注入式电缆绝缘缺陷在线监测方法,通过主动监测电缆绝缘缺陷,预防故障发生。

1.2.2 电缆故障测距方法研究现状

电缆故障检测技术的演进历程可概括为三个阶段:早期主要依赖人工巡检,通过目

视检查电缆外观确定故障区域,但存在效率低、成本高等局限性^[37]。随着录波器的应用,基于通信信号的故障定位技术显著降低了人力投入。至20世纪后期,在通信技术与计算机发展的推动下,电缆测距技术取得重要突破,具有快速响应和智能分析特征的算法逐渐成为研究重点^[38]。

大量文献表明,电力电缆故障测距主要分为阻抗法和行波法两种方法。阻抗法故障测距的原理简单,当电路作为均匀传输电路的情况下出现故障时,通过线路的阻抗与线路的单位阻抗值间的正比例关系来计算故障距离^[39]。虽然文献^{[40]、[41]}改进了传统阻抗法,避免了过度电阻、系统运行方式带来的影响,同时通过考虑电缆频变特性对电缆简化为集中参数模型进行了改进,但该方法在不同故障下的测距差异较大,在实际运用中测距精度远不及行波法测距,因此在电力系统故障检测中逐渐被行波法所替代。行波测距的研究始于20世纪50年代,行波法测距因其不受过渡电阻、故障类型和线路两侧系统阻抗的影响而被广泛应用于电力电缆故障测距^[42]。行波具有方向突变迅速,幅值衰减严重,频带宽,传播速度快,持续时间短的特点。

目前电缆故障测距主流的行波法,根据行波分析的方式又分为时域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)^[43]和频域反射法(Frequency Domain Reflectometry, FDR)^[44]。时域反射法(TDR)基本思路是从电缆一端发射脉冲信号,该信号在传播过程中遇到电缆阻抗不连续点时会发生反射,根据入射脉冲信号和反射脉冲信号的时间差与波速的乘积来实现缺陷定位或者在电缆两端检测故障行波分别到达的时刻然后根据波速与时间差计算得到故障距离实现测距。时域行波反射法根据测量点的不同又分为单端行波与双端行波。双端时域行波测距通过被动检测故障行波到达电缆两端的时刻然后联立行波速度实现故障测距^[45,46],该方法仅仅需要识别故障行波到达电缆检测两端的时刻,但是双端行波法存在一个两端时钟需要同步的问题。目前在时间同步问题上主要采用GPS同步技术,虽然该技术在时间同步上可以达到20 ns满足故障测距精度的要求,但是电缆多深埋在电缆沟里面,这就导致GPS时间同步受限,进而导致故障测距的精度不够。于是后来为了避免双端行波测距需要双端对时的问题,一些学者提出了基于行波时域反射的单端行波故障测距^[47,48],该方法主要原理就是根据检测位置首次检测到的行波与行波反射到故障点再次反射回来的时刻实现故障测距或者主动注入信号然后检测信号遇到故障点反射回来行波的时间然后实现故障测距。单端行波法避免了对时的问题,但是存在检测行波二次反射行波的时候,而无法判断到达的行波是否是前一次检测到的行波在故障点反射回来的行波,以及由于行波多次的反射导致行波衰减后可能无法检测到反射行波。同时无论单端行波还是双端行波都会遇到行波波头的标定问题,目前行波波头标定的方法主要有,主要有导数法、小波变换法、数学形态学法和希尔伯特—黄变换法^[42]等,行波波头能否准确识别和标定到达时刻直接关系测距的精度。

因时域行波测距反射波头精确标定困难和波速未知等问题严重影响测距精度,于是

国内外的一些学者采用正弦信号扫频的方式去测量电缆的宽频阻抗谱或反射系数谱，扫频信号的高频分量的平均功率远大于时域反射法的脉冲冲击信号，时域反射法（TDR）法注入脉冲高频成分较少且高频信号在电力电缆中衰减较为突出，较时域反射法（TDR）法而言频域反射法（FDR）法具有更好的灵敏度和空间分辨率^[49,50]。

频域反射法（FDR）基本原理是通过测量电缆首端输入阻抗谱、首端反射系数谱等随频率变化的特征曲线，并采用一定的数据分析方法将其变换为可表征电缆状态参数沿电缆线路位置分布的空间域函数，根据函数波形中的畸变位置来实现故障缺陷的测距。频域反射法（FDR）法根据测量特征曲线的不同可进一步分为宽频阻抗谱（Broadband Impedance Spectrum, BIS）^[50]和反射系数谱（Reflection Coefficient Spectrum, RCS）^[51]，同时频域反射法因其较高的灵敏度而快速发展。最早在美国联邦航空管理局资助的一个研究项目中发展了宽频阻抗谱技术，同时因宽频阻抗谱（BIS）技术是一种非破坏性的方法，通过注入不同频率的低压信号对整条线缆进行扫频测量，扫频信息经过处理后可以有效识别并定位电缆中的异常现象和缺陷区域^[52]，于是利用电缆阻抗特性来获得电缆绝缘介电特性的相关信息实现监测航空器线缆的绝缘状态^[50]。2003年挪威学者 Paolo Fantoni 首次提出基于电缆首端输入阻抗谱的电缆缺陷测距技术，并开发了基于线性共振技术的定位仪器 LIRA，该仪器测试时直接与电缆线芯与屏蔽层链接构成回路，通过对电缆注入电压幅值为 5 V 的 0~100 MHz 正弦信号实现电缆缺陷无损检测^[53,54]。鉴于宽频阻抗谱的优点，2012 年日本学者在含有绝缘缺陷的电缆上展开试验对比宽频阻抗谱（BIS）和时域反射法（TDR）两种方法的定位精度。实验结果表明，与时域反射法（TDR）对比发现宽频阻抗谱（BIS）的定位结果中出现明显的突变峰，其对缺陷的识别灵敏度更高^[55]。2018 年该团队又利用网络分析仪开展多点阻抗不连续点的定位研究^[56]；结果表明在电缆的连接位置均会出现突变峰，同时发现扫频范围越宽，缺陷的识别灵敏度越高、定位误差越小。

同时国内也有一些研究成果出现，2015 年国内学者周志强对电缆不同老化程度以及局部缺陷进行实验，通过广义正交积分处理电缆首端宽频阻抗谱，试验结果表明电缆局部缺陷也会对电缆首端宽频阻抗谱造成十分显著的影响，首端宽频阻抗谱（BIS）经过处理后可以有效定位故障距离^[57,58]。李蓉等人在 2021 年提出了一种基于宽频阻抗频谱特性的电缆故障识别方法。该方法通过分析谐振频率偏移、幅值波动及周期变化规律，构建了涵盖开路、短路、高低阻故障以及容性/感性缺陷的多类型故障诊断模型^[3,59]，该研究还创新性地采用 Blackman 窗函数优化中间接头诊断谱图处理算法，不仅提升了接头定位精度，还可有效判别接头受潮程度。但一些文献表明基于宽频阻抗谱（BIS）测距的方法需要较大的扫频带宽以及较多的采样点数才能实现电缆缺陷的准确定位^[60-62]。于是有学者发现电缆首端反射系数谱不仅能够灵敏反应电缆局部阻抗不匹配点而且对阻抗分析仪性能要求较低。因此后来开始提出基于首端反射系数谱的缺陷定位方法，在保证识

别灵敏度和识别精度的同时，可以在一定程度上降低对测试带宽和采样点数的要求^[63,64]。

2017年四川大学周凯团队提出基于电缆首端反射系数谱的缺陷定位方法，在传统FDR的基础上进行降低测试频率，减少测试点数，并研究改进的FDR对因物理结构发生改变而产生的微弱电缆缺陷进行测距的可行性及对不同程度缺陷的识别灵敏度^[63]。最后试验表明该方法能对不同损伤程度的局部缺陷进行有效定位，与传统TDR相比该方法对微弱缺陷的识别能力更强，与BIS相比该方法所需测试频率更低，所需测试点数更少^[65]。同时华北电力大学赵洪山老师团队也关注基于电缆首端反射系数谱的电缆故障测距方法研究，通过将反射系数谱的虚部从频域转换到空间域，建立积分诊断图，得到具有直观性的定位图谱，根据积分诊断图实现电缆局部缺陷的识别与精准定位^[66,67]，同时也验证了该方法适用于同时存在多处电缆缺陷的情况。2023年周凯团队在测试电缆首端反射系数谱时，忽略了首端阻抗不匹配对测试结果的影响，其评估结果存在一定的局限性，因此周凯团队提出了一种有效的FDR首端阻抗匹配技术^[68]，通过该方法可实现现场FDR数据的有效修正，降低电缆首端阻抗不匹配对测试结果的影响。

基于首端阻抗谱和首端反射系数谱的电缆故障测距方法，目前众多学者对定位算法的处理思路总体上为广义正交积分变换^[58,67]和傅里叶变换^[63]。广义正交积分的核心机理在于基于电缆缺陷区域与正常区段传播系数的显著差异，通过数学变换将首端反射系数谱或阻抗谱映射为空间域分布函数，最终实现电缆缺陷的精准定位与距离测算。该方法需要正常电缆的相关参数作为对比，于是一些学者提出了傅里叶变换的方法实现电缆缺陷定位，文献^[63]利用傅里叶变换（FFT）加窗函数的方式来处理反射系数谱，并在10 kV的电缆上开展了故障缺陷的识别与测距，验证了FFT和IFFT的数据处理方法均能实现电缆故障缺陷的测距。同时由于在实际采集信号的非周期性以及数据截断现象，文献^[69]采用FFT插值的方法来校正离散的频谱，降低各周期分量的影响。文献^[70,71]解决缺陷定位效果差和对测试点数量要求高的问题，提出利用改进的短时傅里叶和分数阶傅里叶变换对反射系数谱时频分辨率低、交叉项干扰严重等问题进行了优化。针对传统傅里叶变换的故障缺陷测距精度受窗函数和交叉干扰项影响的问题，有学者提出基于子空间分解的方法^[72,73]，通过估计反射系数谱中各复指数衰减振荡函数的参数，并滤除相关干扰项，该方法不需要选择窗函数，并且滤除了干扰信号的子空间，并在500 m电缆上通过实验验证了该方法的准确性^[74]。

综上所述，基于时域反射法虽然可以准确定位严重局部放电缺陷的故障，但是对于电缆受潮、电老化、热老化以及轻微绝缘缺陷的故障无法定位。基于频域反射技术的首端阻抗谱和首端反射系数谱都可以很好的实现故障测距，但是在实际应用中对于测试相关反射系数谱的频率范围均采用了较大的扫频带宽，较高的测试频率，导致对测试设备的性能要求较高，同时测试较大范围的频带需要耗费更多的时间。