

基于频域反射技术的控制电缆缺陷定位技术研究

刘凯¹ 李欧¹ 张建华¹ 通讯作者 袁超²

(1. 广东电网有限责任公司东莞供电局 523000; 2. 湖南大学 410082)

摘要：随着控制电缆在电力系统、交通运输、石油化工和建筑工程等领域的广泛应用，电缆局部缺陷的检测和定位成为保障系统安全和可靠运行的关键技术。本文研究了一种基于加窗傅里叶变换的电缆局部缺陷离线定位算法。通过建立控制电缆的传输线模型，考虑集肤效应和邻近效应对电缆单位电阻和电感的影响，利用频域反射理论分析高频信号在电缆中的传播和反射特性。采用 Kaiser 窗等窗函数进行傅里叶变换，减小频谱泄露和栅栏效应，提高缺陷定位的精确性和分辨率。仿真实验结果验证了该算法在检测微小缺陷和电缆末端缺陷方面的有效性和可靠性。

关键词：频域反射技术；控制电缆；缺陷定位；

1 引言

电缆故障检测技术经历了从早期的直流电阻法、时域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR) 到现代的频域反射法 (Frequency Domain Reflectometry, FDR) 等多种方法的发展^[1-2]。本文研究了一种基于加窗傅里叶变换的电缆局部缺陷离线定位算法。通过仿真实验验证了所提出算法的有效性和可靠性，为电缆缺陷定位提供了一种高效且精准的技术手段。

2 频域反射法定位原理

频域反射法 (Frequency Domain Reflectometry, FDR) 是一种利用电磁波反射特性来测量和定位电缆或传输线故障的位置的技术。其基本原理是将一个已知频率范围的电磁信号注入到待测传输线中，并通过分析返回的反射信号来确定传输线的特性和故障点。由于不同频率的信号在传输线中传播时的波长和相位不同，因此在频域中分析这些反射信号，可以得到非常高的分辨率。通过对反射信号的频谱分析，可以确定反射点的位置^[3]。与时域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR) 相比，FDR 在处理长距离和高速传输线故障定位时具有更高的分辨率和精度，特别适用于检测小故障和细微的阻抗变化^[4]。

3 设计思路

本设计旨在实现电缆局部缺陷的离线定位，利用频域反射法结合分布参数模型，对高频信号在电缆中的传播和反射进行精确分析。

首先，通过建立电缆传输线的分布参数模型，考虑集肤效应和邻近效应的影响，确定电缆单位长度的电阻和电感参数变化。然后，采用加窗傅里叶变换，选择合适的窗函数 (如 Kaiser 窗) 以减少频谱泄露和栅栏效应，增强缺陷定位的精确性和分辨率，特别是在检测弱缺陷和电缆末端缺陷时，通过调节窗函数参数，实现对不同缺陷条件下的优化定位效果。

4 电缆局部缺陷离线定位算法研究

4.1 电缆传输线模型

对于控制电缆而言，当注入高频信号时电缆应被当作一个分布参数网络，其等效电路图可由图 4-1 表示。

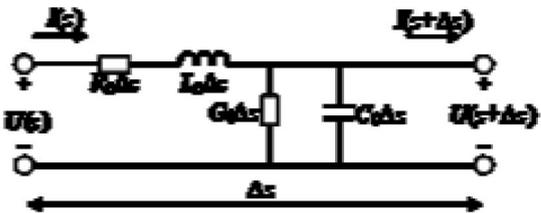


图 4-1 分布参数模型

其中 R、L、G、C 分别为电缆单位长度的电阻 (单位为 Ω/m)、电感 (单位为 H/m)、电导 (单位为 S/m) 和电容 (单位为 F/m)。

那么可以得到线路的特性阻抗如式(4-1)所示

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (0-1)$$

由于集肤效应和邻近效应的影响，电流主要集中在导体表面，此时频率对电缆的单位电阻 R 与单位电感 L 有较明显的影响，因此在高频下就必须将集肤效应和邻近效应考虑进去。电缆单位长度电阻 R 与电感 L 可由式 (4-2)、(4-3) 表示

$$R \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (0-2)$$

$$L \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_c} + \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2\mu_0}{\omega}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (0-3)$$

式中 $\omega = 2\pi f$ 为角频率， r_c 和 r_s 分别为电缆缆芯半径和屏蔽层内半径， ρ_c 和 ρ_s 分别为电缆缆芯电导率和屏蔽层电导率， μ_0 为真空的磁导率。

电缆的单位电阻 R 与频率成正相关性，会随着频率的增加而增加。而电缆的单位电感 L 则与频率成负相关性，随着频率的增加逐渐减小。电缆的单位长度电容 C

和电导 G 可以表示为式(2-4)和(2-5):

$$G = \frac{2\pi\sigma}{\ln(r_s / r_c)} \quad (0-4)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(r_s / r_c)} \quad (0-5)$$

式中 ϵ 为电介质的介电常数, σ 为电介质的电导率。

通过行波理论可知, 行波在经过线路中不均匀节点时会发生一系列的折反射。由于电缆中存在许多结构不连续点, 当往电缆中注入高频信号的时候, 信号在到达这些结构不连续点时就会发生反射现象。如果利用波反射原理对电缆中结构不连续点进行监测就能实现对缺陷的精确定位。

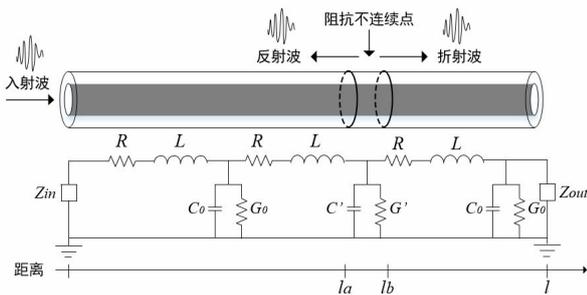


图 4-2 存在缺陷的电缆传输线模型

如图 4-2 所示, 由于电缆结构的改变和缺陷的存在, 该位置的 R、L、G、C 可能会发生改变, 进而导致该位置的特性阻抗发生变化, 造成阻抗不连续点。

4.2 频域宽频阻抗谱

4.2.1 频域反射理论

对于图 4-1 所示的电路, 利用基尔霍夫电压定律以及基尔霍夫电流定律可以导出:

$$\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = -Gv(z,t) - C \frac{\partial u(z,t)}{\partial t} \quad (0-6)$$

$$\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} = -Gv(z,t) - C \frac{\partial u(z,t)}{\partial t} \quad (0-7)$$

对于简谐稳态, 引入简谐变量 $u(z,t)$ 、 $i(z,t)$ 的复数表示 $U(z)$ 、 $I(z)$, 式 (4-6)、(4-7) 简化为

$$\frac{dU(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I(z) \quad (0-8)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)U(z) \quad (0-9)$$

利用电缆端口的边界条件, 求解式(4-8)、(4-9), 得到电缆任意位置 z 的电压和电流的相量表达式

$$U(z) = U_{12}e^{\gamma(l-z)} + U_{R2}e^{-\gamma(l-z)} \quad (0-10)$$

$$I(z) = \frac{1}{Z_0} (U_{12}e^{\gamma(l-z)} - U_{R2}e^{-\gamma(l-z)}) \quad (0-11)$$

式中 U_{12} 为负载侧的入射电压波, U_{R2} 为负载侧的反射电压波, γ 称为电缆的传递常数, Z_0 为电缆的特征阻抗, 可由(0-12)、(0-13)式表示

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (0-12)$$

$$Z_0(\omega) = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (0-13)$$

根据传输线理论, 长度为 l 的完好电缆首端反射系数 $\Gamma(z)$ 可表示为

$$\Gamma(z) = \frac{U_{R2}}{U_{12}} e^{-2\gamma(l-z)} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-2\gamma(l-z)} \quad (4-14)$$

其中 Z_L 为负载阻抗。针对无缺陷且末端开路的电缆, $\Gamma(z)$ 可以改写为

$$\begin{aligned} \Gamma(z) &= e^{-2\gamma(l-z)} = e^{-2\alpha(l-z)} e^{-j2\beta(l-z)} \\ &= e^{-2\alpha(l-z)} \{ \cos[2\beta(z-l)] + j \sin[2\beta(z-l)] \} \end{aligned} \quad (4-15)$$

通过提取 $\Gamma(z)$ 的实部, $\text{Re}[\Gamma(z)]$ 可得

$$\text{Re}[\Gamma(z)] = e^{-2\alpha(l-z)} \cos\left[\frac{4\pi f}{v}(z-l)\right] \quad (4-16)$$

当电磁波的频率很高时 (此时 $\omega L \gg R$, $\omega C \gg G$), 电缆中电磁波的波速 v 趋近常数。因此, 对于中的反射系数的实部, 可以认为是以 f 为时间变量, 角频率为 $4\pi l/v$ 的余弦或正弦信号。考虑其频率为

$$f' = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{2l}{v} \quad (4-17)$$

从上式可以看出, 当以频率 f 为自变量时, 完好电缆的首端会出现 $2l/v$ 的频率等效分量, 当电缆在距首端 L 处出现缺陷或故障时, 该位置的 R、L、G、C 可能会发生改变, 进而导致该位置的特性阻抗发生变化, 造成阻抗不连续点, 此时电缆会出现 $2L/v$ 的频率等效分量, 因此可以通过对电缆首端的宽频阻抗谱进行傅里叶分析来定位电缆的阻抗不连续点。

4.3 加窗傅里叶变换

4.3.1 窗函数的选择

可采用不同的截取函数对信号进行截断, 截断函数称为窗函数。以窗长度 $N=64$ 为例, 仿真得到的常用几种窗的特性参数。

在基于实际测试分析中, 固定的窗函数并不是最好的选择, 为了便于调节主瓣宽度以及控制频谱泄露的影响, 达到反射系数在后续定位中的最优效果, 所以需要找到一种更灵活和可调节的窗函数以适应不同缺陷的频

域反射特征。为了便于调节窗函数，需要采用更容易变换的窗函数。其中 Kaiser 窗就是一种可调节的且常用的窗函数，在商用产品中经常用到这类窗函数。不同 β 值时 Kaiser 窗的频域特性如表 4-2 所示。在窗取同等长度下，当 β 值越小主瓣宽度越窄，但是旁瓣电平越高，旁瓣衰减越慢，此时频谱泄露更严重。当 β 值较高的时候，旁瓣更低且衰减更快，此时频谱泄露得到较好的控制，但是由于主瓣增宽使得分辨率降低。

表 4-1 Kaiser 窗不同 β 值的旁瓣特性

β 值	窗长度	主瓣宽度 (-3dB)	Asp (-3dB)	Dea (dB/oct)
$\beta=4$	64	0.035	-30.6	-7
$\beta=8$	64	0.047	-58.3	-12
$\beta=12$	64	0.059	-90.4	-18

4.3.2 加窗效果对比

仿真 120 m 的控制电缆在 110 m 处存在 $C_d=1.1 C_h$ 、缺陷长度为 0.2 m 的定位曲线 (C_d 为缺陷段电容, C_h 为正常段电容)。

从图 4-8 可以发现，对于较弱的缺陷以及位于电缆末端的阻抗不连续点，采用以上的处理方式很难实现对其进行有效地定位。仿真 120 m 的控制电缆在 60 m 处存在 $C_d=1.1 C_h$ 、缺陷长度为 0.2 m 的定位曲线，图 4-3 为微小缺陷在不同 β 值下的仿真结果。

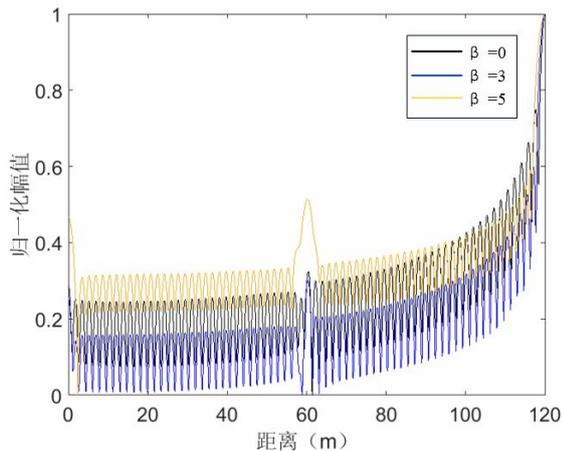


图 4-3 在不同 β 值下的定位结果

从图 4-3 可以发现，在不同的 β 值下缺陷处的突变峰值也有所不同，当选择较大的 β 值时 (β 为 0 时表示未进行加 Kaiser 窗处理) 缺陷处的分辨率会增大同时突变峰宽度也会随之增加。当局部缺陷比较严重或缺陷位于前端时，较小的 β 值能够提高缺陷位置的分辨率，当缺陷较弱时则应选取较大的 β 值。

为了验证通过加窗傅里叶变换处理后的结果对电缆

末端的阻抗不连续点的定位效果，处理结果如图 4-4 所示。

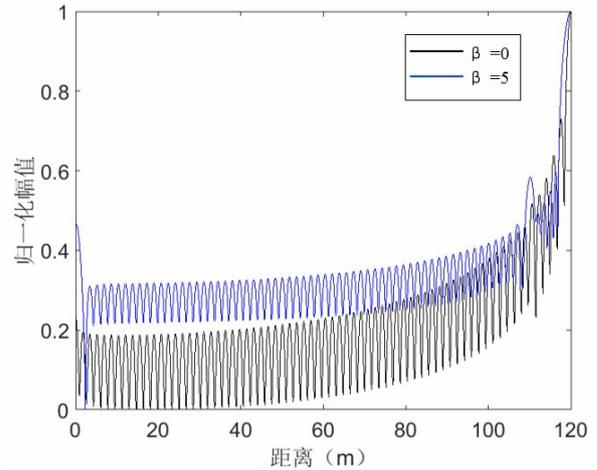


图 4-4 电缆末端阻抗不连续点定位结果

在对数据进行傅里叶分析时，数据的非整周期截断会造成频谱泄露和栅栏效应，降低频率分量的识别能力，因此为了提高对电缆中阻抗不连续点的识别能力，需要进行加窗处理。

5 结束语

本文研究了一种基于加窗傅里叶变换的电缆局部缺陷离线定位算法，通过选择合适的窗函数，特别是 Kaiser 窗，减少了频谱泄露和栅栏效应，增强了缺陷定位的精确性和分辨率。未来的研究可以进一步优化窗函数参数，结合实际应用场景，提升电缆故障检测和定位的效率和精度。

参考文献:

[1] 饶显杰,徐忠林,丁玉琴,等. 基于短时分数阶傅里叶变换与时频域反射法的电缆缺陷定位方法 [J/OL]. 电工技术学报, 1-11[2024-06-13].
 [2] 黄友聪,郑钟楠,林梓圻,等. 基于频域反射法的高压电缆阻水缓冲层缺陷定位研究 [J/OL]. 绝缘材料, 1-10[2024-06-13].
 [3] 董俊超,罗明明,刘剑飞,等. 基于光频域反射技术的风机叶片损伤识别方法研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61 (09): 241-250.
 [4] 周子超,崔文达,奚小明,等. 高功率光纤激光器纤芯温度在线测量技术及其应用研究进展 [J]. 光学学报, 2023, 43 (17): 171-181.
 [5] 封刚铎. 频域反射谱对高压电缆缓冲层缺陷检测的性能研究[D]. 西安理工大学, 2023.