

# 基于 ApFFT-NLS 的振荡波下电缆介质损耗因数测试方法

杨赛柯, 庞先海, 张鹏, 李天辉  
(国网河北省电力公司电力科学研究院, 石家庄 050021)

**摘要:** 振荡波试验是电缆绝缘检测的重要手段, 解决了现场试验负载容量大导致的试验设备体积庞大的问题, 介质损耗因数属于电缆振荡波试验的核心测试参数之一, 然而现有振荡波条件下的介质损耗因数测试精度较低 (仅为  $1 \times 10^{-3}$  量级), 无法满足现场测试要求。本研究提出一种基于全相位快速傅立叶变换 (ApFFT) 和非线性最小二乘法 (NLS) 算法的高准确度介损因数测试方法, 与传统方法对比无需再评估振荡波系统自身误差, 测量精度提升到  $1 \times 10^{-4}$  量级。测试过程需同时测量振荡波电压和电流信号, 开发了可实现最小化理论相位误差的测试系统, 避免了测试对象击穿引发的地电压抬升风险。通过仿真和实验验证了该测试方法的准确性和算法的稳健性, 达到了现场高精度介损检测需求, 为振荡波下电缆绝缘评估提供了更可靠的技术手段。

**关键词:** 电缆; 振荡波; 介质损耗因数; 绝缘状态诊断

## Method for Testing Dielectric Loss Factor of Cables Under Damped AC Voltage Based on ApFFT-NLS

YANG Saike, PANG Xianhai, ZHANG Peng, LI Tianhui

(1.State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** Damped AC test is an important means for cable insulation detection, which solves the problem of large volume of test equipment caused by large load capacity in on-site tests. Dielectric loss factor is one of the core test parameters in cable damped AC tests. However, the current dielectric loss factor test accuracy under damped AC conditions is relatively low (only about  $1 \times 10^{-3}$  level), which cannot meet the requirements of on-site tests. This study proposes a high-accuracy dielectric loss factor test method based on all-phase fast Fourier transform (ApFFT) and nonlinear least squares (NLS) algorithm. Compared with traditional methods, it no longer needs to evaluate the error of the damped AC system itself, and the measurement accuracy is improved to  $1 \times 10^{-4}$  level. The test process requires simultaneous measurement of damped AC voltage and current signals. A test system that can minimize theoretical phase error has been developed, avoiding the risk of ground voltage rise caused by breakdown of the test object. The accuracy of the test method and the robustness of the algorithm have been verified through simulation and experiments, meeting the on-site high-precision dielectric loss detection requirements and providing a more reliable technical means for cable insulation assessment under damped AC voltage.

**Keywords:** cable; damped AC; dielectric loss factor; insulation condition diagnosis

## 0 引言

电力电缆因高可靠性、强干扰能力和美观等优点, 逐渐成为城市输配电网的主要组成部分<sup>[1-3]</sup>。测量电缆的介质损耗因数 (dielectric dissipation factor, DDF) 是诊断电缆绝缘状态的重要手段之一, 其表征了电缆整体绝缘状态, 可发现诸如绝缘整体老化、受潮以及水树等问题<sup>[4-6]</sup>, 准确测量电缆的 DDF 可及时对电缆绝缘进

行评估避免电缆绝缘击穿造成更严重后果。

电缆介质损耗因数测量所使用的激励电压主要包括工频高压、类工频电压、超低频电压以及振荡波电压<sup>[7-10]</sup>, 由于电缆电容量较大, 工频高压激励需要极大试验电源, 现场测试极为不利, 通过降低频率的方法可以有效降低电源容量需求, 然而超低频法由于频率较低其工频等效性

有待考究。振荡波电压相较于其他电压激励具有工频等效性好、设备体积小、无脉冲噪声、以及无空间电荷累计问题等优点，虽然其目前常用于局部放电检测，但多年的现场应用和测试经验证明了振荡波电压在电缆诊断方面的独特优势<sup>[11]</sup>。然而，现有技术使用振荡波测试介质损耗仍存在精度不足的问题，通过在振荡波电压下准确测量介质损耗因数，以实现结合局放和介损测试综合评估电缆绝缘状态以发现电缆绝缘中的集中性缺陷和整体缺陷，可以显著提升现场测试有效性和测试效率。

目前，广泛使用的介损检测方法包括硬件法和软件法，其中常见的硬件法包括西林电桥<sup>[12]</sup>、电流比较式电桥<sup>[13]</sup>、C-tan $\delta$ <sup>[14]</sup>电桥法等。软件法又称为间接法，常见方法包括正弦拟合法<sup>[15]</sup>、相关函数法<sup>[16]</sup>以及谐波分析法<sup>[17]</sup>等。但上述方法均基于正弦激励下，并不适用于振荡波激励电压下的介损测量。对于在振荡波状态下进行的介损测量，Houtepeu 等<sup>[18]</sup>给出了非常经典的推导和实现方式，通过建立介质损耗因数与振荡波衰减系数、频率及系统等效电阻的数学关系模型，利用实测电压波形的衰减特性推导试品的介损值。该方法计算量小，需估算的参数相对较少，是振荡波下介损测量的经典方法，其存在的主要问题是表征测量系统自身损耗的电阻难以准确估计，其与电压的幅值、频率、电力电子损耗及试品电容量均相关。电抗的损耗也随测量条件的不同而变化，进一步导致了测量时系统自身损耗电阻变化。相关文献指出，振荡波下 DDF 测试的分辨率为  $1 \times 10^{-3}$ <sup>[10]</sup>，而传统测试方法，如西林电桥，可实现最小分辨率  $1 \times 10^{-4}$ <sup>[12-14]</sup>。

因此，为满足大电容量电缆试品介损检测高压激励需求，同时保证 DDF 测试分辨率，文中提出一种不使用系统损耗电阻作为已知量的振

荡波激励下的 DDF 测试方法，通过振荡波电流与电压关系实现 DDF 精确估计。结合全相位快速傅里叶变换(ApFFT)和非线性最小二乘(NLS)的 DDF 估计算法，有效消除了衰减振荡波对估计精度的影响，并通过仿真与实验验证了方法有效性，测试精度达到  $1 \times 10^{-4}$  量级，可满足现场试验需求，显著高于现有振荡波下介损测试方法的  $1 \times 10^{-3}$  水平。

## 1 振荡波下介质损耗因数估计模型

### 1.1 传统介损估计模型

电缆等有损电力设备在开展振荡波电压试验过程中，通常可由电容电阻并联的方式等效，见图 1，图 1 中： $C$  为绝缘介质的并联等效电容； $R$  为并联等效电阻，根据图 1 中各支路的电流相位关系可以表示为

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega RC} \quad (1)$$

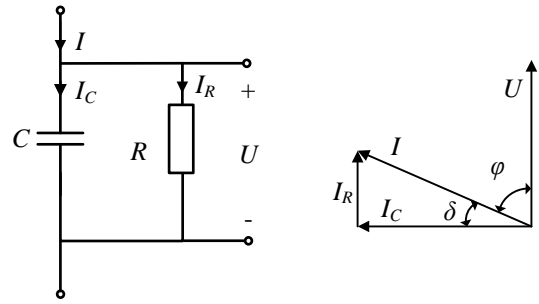


图 1 并联等效模型与相量图

Fig. 1 Parallel equivalent model and phasor diagram

荡波作用于试品的测试过程等效电路见图 2。图 2 中： $L$  为谐振电抗器的等效电感； $R_1$  为系统等效电阻。等效电路可以被描述为一个二阶零输入 RLC 串联电路，其中电容  $C$  上的初始电压为  $A_U$ ，电感  $L$  上初始电流为 0。

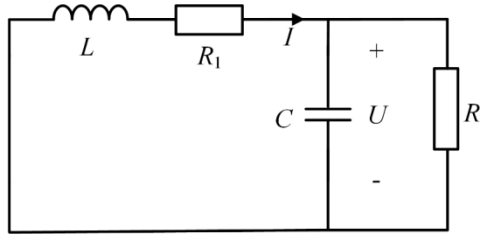


图2 振荡波测试等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of damped AC test

基于基尔霍夫电路定律列写方程,可以得到试品电容电压  $U$  的表达式为

$$U(t) = A_U e^{-\lambda t} \left[ \cos(\omega t) + \frac{\alpha - \lambda}{\omega} \sin(\omega t) \right] \quad (2)$$

结合式(1)、(2),在传统方法中,使用振荡波电压的波形参数来估计电容设备的 DDF,介质损耗因数可以计算为

$$\tan \delta = \frac{2\lambda}{\omega} - \frac{R_1}{\omega L} \quad (3)$$

式(3)中:  $\lambda$  为振荡波电压的衰减系数;  $\omega$  为电压频率;  $R_1$  为通过校准确定的代表电路损耗的系统等效电阻;  $L$  为电抗器的电感值。

## 1.2 基于电压电流同时测量的介损估计模型

传统方法需要将  $R_1$  视为一个已知的恒定参量,然而,  $R_1$  在测试过程中不是时不变量,因而传统方法无法满足电缆介损检测的精度。本研究提出可采用振荡波电流作为新的已知量来估计电路参数。

利用基尔霍夫定律和电路元件的电压—电流关系,则系统的微分方程可表示为

$$LC \frac{d^2 U}{dt^2} + \left( \frac{L}{R} + R_1 C \right) \frac{dU}{dt} + U \left( 1 + \frac{R_1}{R} \right) = 0$$

$$U(0) = A_U; \left. \frac{dU}{dt} \right|_{t=0} = 0 \quad (4)$$

$$I(t) = \frac{1}{R} U(t) + C \frac{dU(t)}{dt}$$

通过求解式(4),可以得到电压电流的表达式分别为:

$$U(t) = A_U e^{-\lambda t} \cos(\omega t + \varphi_U) \quad (5)$$

$$I(t) = A_I e^{-\lambda t} \cos(\omega t + \varphi_U + \varphi) \quad (6)$$

式(4)、(5)中,  $A_I$  为电流的初始值,衰减系数  $\lambda$ 、频率  $\omega$ 、电压电流相位差  $\varphi$  的表达式分别为:

$$\omega = \sqrt{\frac{R_1 + R}{RLC} - \left( \frac{L + R_1 RC}{2RLC} \right)^2} \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{L + R_1 RC}{2RLC} \quad (8)$$

$$\varphi = \arctan \frac{\omega}{\frac{1}{RC} - \lambda} \quad (9)$$

结合式(1)、(7)-(9),可以得到介质损耗因数的表达式为:

$$\tan \delta = \frac{1}{\tan \varphi} + \frac{\lambda}{\omega} \quad (10)$$

根据式(10),可以通过振荡波波形参数衰减系数  $\lambda$ 、频率  $\omega$  和电压电流相位差  $\varphi$ ,估计 DDF,在此计算过程中,将测量 DDF 的问题转化为对电压和电流波形参数的估计。

## 1.3 误差估计

根据式(10)可以得到测试系统的误差传递为

$$\Delta \tan \delta = -\frac{\tan \varphi^2 + 1}{\tan \varphi^2} \Delta \varphi + \frac{1}{\omega} \Delta \lambda + \frac{1}{\omega^2} \Delta \omega = A_1 \Delta \varphi + A_2 \Delta \lambda + A_3 \Delta \omega \quad (11)$$

式(11)中:  $\varphi$  接近  $90^\circ$ ;  $\omega$  介于  $20 \times 2\pi$  和  $500 \times 2\pi$  之间(相关标准规定振荡波电压频率为  $20 \sim 500$  Hz);  $\lambda$  介于  $0$  和  $-20$  之间(近似估计)。对测试电路进行参数估计,  $A_1$  值约为  $1$ ,  $A_2$  比  $A_1$  小  $2$  到  $3$  个数量级,  $A_3$  比  $A_1$  小  $4$  到  $7$  个数量级。这表明电压与电流相位差  $\varphi$  的误差对 DDF 测量误差的影响最为显著。因此在设计估计算法时应优先考虑准确估计振荡波电压和电流的相位。

## 2 ApFFT-NLS算法

振荡波电压的波形与传统交流电压不同,其随时间逐渐衰减,对于振荡波电压与电流的估计可能会产生较大误差,这会对 DDF 的测量误差造成影响。文中提出一种基于 ApFFT-NLS 的

缆介损估计算法，将测试精度提升到  $1 \times 10^{-4}$  级。

## 2.1 ApFFT算法

文[19]中提出一种基于 ApFFT 相位估计方法，这种方法通过对序列进行移位相加后进行 FFT，可以实现相位的无差估计，解决传统 FFT 造成的截断效应所造成的相位估计误差。ApFFT 算法的基本步骤可以描述为：

对于输入序列  $\{\dots, x(-N), x(-N+1), \dots, x(-1), x(0), x(1), \dots, x(N-1), \dots\}$ ，对于某样点  $x(0)$ ，传统的 FFT 仅考虑了其中一种长度为  $N$  的截断情况。如果把所有包含样点  $x(0)$  的长度为  $N$  的阶段情况全部考虑，则存在  $N$  个包含该点的  $N$  维向量，即

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_0' &= [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T \\ \mathbf{x}_1' &= [x(-1), x(0), \dots, x(N-2)]^T \\ &\dots \end{aligned} \quad (12)$$

$$\mathbf{x}_{N-1}' = [x(-N+1), x(-N+2), \dots, x(0)]^T$$

在式(12)中， $x(0)$ 遍历了输入向量所有可能的起始位置，因而称为全相位。将式(12)中的向量进行循环移位，使得  $x(0)$ 移至首位，将式(12)转换为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_0' &= [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T \\ \mathbf{x}_1' &= [x(0), x(1), \dots, x(-1)]^T \\ &\dots \end{aligned} \quad (13)$$

$$\mathbf{x}_{N-1}' = [x(0), x(-N+1), \dots, x(-1)]^T$$

式(13)中的每个数据向量均进行传统 FFT，得到对应的频域表达式分别为  $\{X_i(k), i=0, 1, 2, \dots, N-1\}$ ，对于所有子频域数据进行求和平均，得到全相位 FFT 分析结果，即：

$$Y(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X_i(k), k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (14)$$

上述过程共进行了  $N$  次 FFT 运算，为了简化这一过程，先将式(13)中的各向量相加，得到

新的数据向量  $y$ ，即

$$y = \frac{1}{N} [Nx(0), (N-1)x(1) + x(-N+1), \dots, x(N-1) + (N-1)x(-1)]^T \quad (15)$$

对向量  $y$  直接进行 FFT 运算，可以得到和式(14)中相同的分析结果。当采用 ApFFT 后，中心样点处  $x(0)$  的理论相位值既与频率偏离值  $\delta$  无关，又与谱序号  $k$  无关，即此时相位估计是无偏的。

## 2.2 振荡波电压下基于ApFFT-NLS的介损估计算法

ApFFT 方法在标准正弦波相位准确估计方面具有显著优势，但是文中需要估计的电压电流波形为衰减正弦波，文中提出了 ApFFT-NLS 算法，该方法结合了参数估计和非参数估计的优点。其中，由于文中研究的振荡波波形具有典型的多峰特性，非参数估计方法(如 ApFFT 算法)通常无需先验知识即可实现参数的无偏相位估计，并可为 NLS 算法提供高质量的初始参数。NLS 算法虽然具有较高的估计精度，但对初始值较为敏感，若初始化不准确，容易陷入局部最优解或导致不收敛。通过进一步修正衰减系数和直流偏置等关键参数，NLS 能有效弥补非参数估计在指数衰减波建模能力方面的不足。两者的结合显著提升了波形参数估计的精度与鲁棒性。其基本过程如下文所述：

1)数据预处理。首先，对原始序列进行预处理，将数据转换成正弦信号。具体方法为对电压电流波形的峰值进行检测，根据峰值以及对应的时间求解衰减系数，其衰减系数表达式为

$$\lambda = \frac{\ln \frac{U_2}{U_1}}{t_1 - t_2} \quad (16)$$

基于式(16)计算衰减系数，进而得到衰减系数的估计值  $\hat{\lambda}$ ，可按照下式计算得到正弦化后的电压电流波形：

$$u'(t) = u_c(t) \cdot e^{\lambda t} \quad (17)$$

$$i'(t) = i_c(t) \cdot e^{\lambda t} \quad (18)$$

该变换将指数衰减正弦波形  $u(t)$  和  $i(t)$  分别转换为正弦波形  $u'(t)$  和  $i'(t)$ ，便于使用 ApFFT 求解波形参数  $\omega$  和  $\varphi$ 。计算得到的衰减系数  $\lambda$  可以作为 NLS 方法的初始值之一。这里需要注意的是，该预处理没有考虑直流偏置和噪声影响，导致估计精度较低，本文通过引入 ApFFT-NLS 算法解决该问题。

2) ApFFT 相位估计。采用 ApFFT 对正弦序列  $u'(n)$  与  $i'(n)$  进行处理，得到波形参数的估计值  $\omega$ ,  $A_U$ ,  $A_I$ ,  $\varphi_U$  与  $\varphi_I$ 。其基本过程如 2.1 节所述。

3) NLS 收敛计算。利用 2) 中得到的波形参数估计值  $[A_U, \lambda, \omega, \varphi_U]$  与  $[A_I, \lambda, \omega, \varphi_I]$  作为 NLS 的初始值，对 NLS 进行初始化，并通过基于信赖域的 NLS 求解方法得到衰减系数和角频率的精确估计为  $[\hat{\lambda}, \hat{\omega}]$ ，同时得到直流偏置的准确估计，NLS 非线性目标函数  $f(x_i; \theta)$  分别为：

$$U(t) = A_U e^{-\lambda t} \cos(\omega t + \theta) + C \quad (19)$$

$$I(t) = A_I e^{-\lambda t} \cos(\omega t + \theta + \varphi) + C \quad (20)$$

相较于式(5)、(6)，上述函数中增加了常数项模拟采样序列中的直流偏置，以消除因为采样零漂等带来的估计误差。

4) ApFFT 相位精确估计。基于前文中估计得到的直流偏置，去除原始序列中的直流偏置，并对原始序列乘以  $\exp(\hat{\lambda} t)$ ，其中  $\hat{\lambda}$  为衰减系数的精确估计，得到新的正弦序列  $u''(n)$  与  $i''(n)$ ，对该序列进行 ApFFT，并得到相位的精确估计分别为  $\varphi_u'$  和  $\varphi_i'$ ，相位相减得到相位差的精确估计。

5) 介损求解。根据式(10)，带入估计的波形参数  $[\hat{\lambda}, \hat{\omega}, \hat{\varphi}]$ ，求解得到介质损耗因数的准确估

计。

### 3 ApFFT-NLS 评估算法性能仿真

为了验证所提出算法的有效性，使用图 2 所示的等效电路进行了 MATLAB 仿真。其中电路参数列于表 1 中。初步设定 DDF 的真实值为  $2 \times 10^{-4}$ ，与电缆处于同一数量级<sup>[20]</sup>。本节基于算法仿真探讨了噪声强度、介损真值、采样系统采样率和位深对介损估计的影响。

表 1 仿真电路参数

Table 1 Simulation circuit parameters

电路参数	L/H	R <sub>1</sub> /Ω	C/μF	R/MΩ
数值	0.88	18	0.22	10

#### 3.1 信噪比对介损估计误差的影响

噪声显著会降低介损估计精度，其中白噪声是最常见的噪声源类型，具有功率谱密度在无限频带上保持常数的特征。在仿真中得到的电压电流序列中分别添加不同强度的高斯白噪声，假设信号序列为  $x(n) = s(n) + \delta(n)$ ，其中： $s$  为仿真得到的无噪声电压电流波形； $\delta$  为高斯白噪声。噪声强度通过信噪比(SNR)进行量化，其定义如下所示

$$SNR = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^N s^2(i)}{\sum_{i=1}^N \delta^2(i)} = 20 \log \frac{S_{RMS}}{\Delta_{RMS}} \quad (21)$$

设信噪比为在 20~100 dB 间每 10 dB 为一档，对序列参数用 ApFFT-NLS、NLS、ApFFT 3 种方法进行估计，估计出的 DDF 值相对误差见图 3，在各信噪比下均生成 20 组序列，分别进行介损估计，然后计算均值。

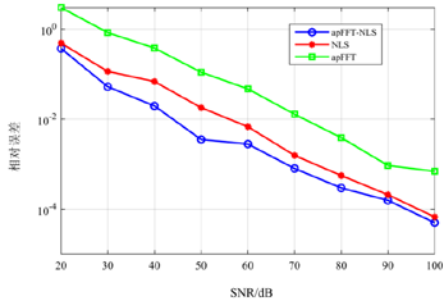


图3 不同 SNR 噪声下介损估计相对误差

Fig. 3 Relative error of dielectric loss estimation under different SNR noises

从整体趋势看, 3 种方法的相对误差都随 SNR 的增大而减小, ApFFT-NLS 方法在整个 SNR 范围内都具有最小的相对误差, 估计效果最好。相对误差若降低到 1% 以下, ApFFT-NLS、NLS、ApFFT 3 种方法所需的 SNF 分别为 50B、60、80 dB, 意味在该限制条件下, ApFFT-NLS 方法的抗噪声能力比其余两种至少高出 10 dB 以上, 其在噪声条件下有显著优势。

### 3.2 介损真值对估计误差的影响

在 Simulink 中采用了不同的并联电阻值进行仿真, 并联电阻  $R$  的值分别设置为  $10^1$ 、 $10^2$ 、 $10^3$ 、 $10^4$ 、 $10^5$  k $\Omega$ 。根据表 1 中给出的电路参数  $L$ 、 $R_1$ 、 $C$  的值, 利用式(7)-(9)计算波形参数的真值, 采用文中提出的 ApFFT-NLS 算法估计介损损耗因数。此外, 应用 ApFFT 和 NLS 算法分别来估计介损作为对比。每个不同的电阻数据下均采样 20 组数据, 在采用每种算法计算介损后取平均值以尽可能消除随机误差, 仿真结果见图 4。

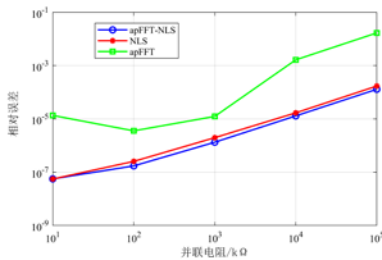


图4 不同并联电阻介损估计相对误差

Fig. 4 Relative error of dielectric loss estimation for

### different parallel resistors

对比 3 种方法可以发现, ApFFT-NLS 始终保持最低的相对误差, 在不同的电阻阻值下均优于其他 2 种方法, 表现出更高的计算精度。NLS 方法的误差略高于 ApFFT-NLS, 整体趋势与之相近, 而 ApFFT 方法的误差显著高于另外两种方法, 尤其在电阻增大时, 其误差增长尤为明显, 其在高电阻条件下适用性较差, 这主要是由于随着并联电阻的增加, 振荡波形的衰减主要取决于系统电阻, 而 ApFFT 算法对于衰减正弦波的相位估计误差较大导致的。

### 3.3 采样位深与采样率对估计误差的影响

采样系统不可避免地会受到数模转换器 (ADC) 量化误差的影响, 采样序列的时间和幅值均为离散形式, 这种离散化过程会引入量化误差, 通常通过位深度来衡量, 位深度反映了 ADC 对模拟信号幅值分辨的精细程度, 位深度越高, 信号幅值的分辨率越高, 量化误差越小。数据序列的最小可分辨幅值为

$$s_{\min} = \frac{2M}{2^P} = \frac{M}{2^{P-1}} \quad (22)$$

ADC 位数越多, 可减少量化误差, 提高介损估计的准确性, 但在工程应用的实际场景中, 由于受到硬件成本、系统复杂度和传输带宽等影响, ADC 位深受限。为了验证所提的算法在各种 ADC 位深度条件下的有效性与适配性, 文中就通过仿真对不同位深度条件的介损估计准确率进行了分析。

选取 ADC 的位深度分别为 8、10、12、14、16 位, 在不同位深度条件下, 选择采样频率  $10^1$ 、 $10^2$ 、 $10^3$ 、 $10^4$ 、 $10^5$  kHz 的 5 个采样频率, 组成不同采样条件, 对参数值进行估计, 计算相应的 DDF 相对估计误差, 结果见图 5。

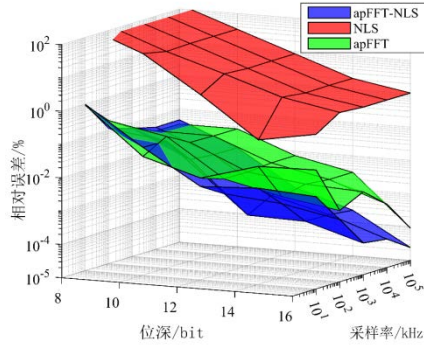


图 5 不同 ADC 量化误差下介损估计相对误差  
Fig. 5 Relative error of dielectric loss estimation under different ADC quantization errors

随着位深从增加, 3 种算法相对误差逐渐减小, 这符合 ADC 量化误差理论特性。在采样频率方面, 随着采样率提升, 3 种算法的相对误差也逐渐减小, 时间分辨率越高, 估计 DDF 的精度就越高。这主要是由于随着位深和采样率的增加, 电压电流相位差的估计精度可显著提升。ApFFT-NLS 算法在整个位深、采样率范围内都维持着最低的相对误差, 这表明其对于 ADC 的量化误差与采样率变化具有较强的适用性及鲁棒性。

文中进一步分析了 ApFFT-NLS 算法在不同采样误差下的相对误差水平, 见图 6。通过提高采样率可有效减小低位深带来的相对误差。当采样率超过 1 MHz 时, 进一步提升采样率对降低误差的效果并不显著。因此, 设置采样率为 1 MHz、位深度为 12 位, 即可在保证 DDF 有效估计的同时, 兼顾合理的设备性能要求。

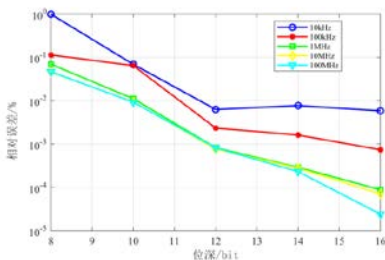


图 6 不同 ADC 量化误差下 ApFFT-NLS 介损估计相对误差

Fig. 6 Relative error of dielectric loss estimation by ApFFT-NLS under different ADC quantization errors

综合上述内容, 从图 6 可以看出所提出的 ApFFT-NLS 算法在各种复杂条件下均表现出最强的鲁棒性; 与传统 NLS 相比, ApFFT-NLS 有效提升了对噪声、量化误差和不同介损真值的适应能力; 相比 ApFFT 算法, ApFFT-NLS 虽然计算量有提升, 但误差下降了数个数量级, 整体性能优势明显。综上, ApFFT-NLS 算法具有更高的估计精度, 能够满足实际工程应用中对电缆介质损耗因数估计的高精度、抗噪性和稳定性要求。

## 4 硬件实现与实验结果分析

### 4.1 硬件实现

为了验证算法与实际的测量环境的适应性及获得实测精度, 研制了一套硬件测量电路及相应的信号采集装置。在开展振荡波试验过程中介损测量系统要适应高电压环境, 同时满足相位精确测量要求。设计电压通过电容采样, 电流通过无感电阻测量, 等效电路见图 7。虽然选用的无感电阻阻值很小, 但是在试品击穿的情况下, 由于大电流的冲击, 仍然会使系统的电位出现大幅抬升, 所以将无感电阻放置在高压端, 避免产生电位抬升的危险, 提升了系统的抗干扰性及安全性。

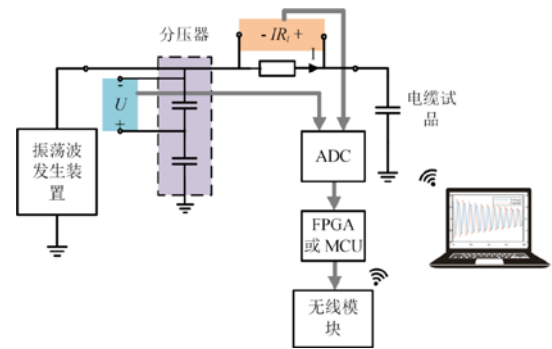


图 7 硬件电路示意图

Fig. 7 Circuit diagram

为保证电压与电流采样信号在时域上的高

度同步,系统将电压采样电路的低压臂亦连接至高压侧,与电流检测电阻共享参考地点位。采集到的电压与电流信号经隔离电路处理后被转换为低压信号,供上位机进行相位差计算与后续数据分析,以实现中介质损耗因数的高精度测量。

#### 4.2 实验结果

为了验证文中所提出的方法以及硬件电路的有效性,在实验室中搭建了检测平台。实验中采用一台可变介损标准电容作为试品,该可变介损电容器采用标准气体电容器与无感精密可变电阻并联组成,标准气体电容器的电容值为 1 nF,介损标称值共有 8 档,其额定介损值分别为  $1 \times 10^{-4}$ 、 $5 \times 10^{-4}$ 、 $1 \times 10^{-3}$ 、 $2 \times 10^{-3}$ 、 $5 \times 10^{-3}$ 、 $1 \times 10^{-2}$ 、 $5 \times 10^{-2}$ 、 $1 \times 10^{-1}$ 。采用分辨率为  $1 \times 10^{-6}$  的高精度电流比较式电桥对该可变介损标准电容器介损值进行测量,为系统评估所提出介损测量方法的实际性能,在实验平台上对 8 个介损值下样本分别进行 10 次独立测量,并统计得到平均值、相对误差与标准差,见表 2。实验结果表明,该算法在全介损范围内均具有良好的测量一致性和估计精度。

表 2 可变介损标准电容器实测介损值测试结果  
Tab. 2 Test results of measured dielectric loss values for variable dielectric loss standard capacitor

档位	介损值( $\times 10^{-4}$ )		相对误差/%	标准差( $\times 10^{-4}$ )
	电桥测量真值	文中方法估计值		
1	1.01	1.028	1.736	0.268
2	5.03	5.106	1.521	0.235
3	9.94	10.093	1.534	0.322
4	19.92	19.999	0.397	0.511
5	49.83	50.103	0.547	0.271
6	99.75	99.651	-0.099	0.362
7	498.70	498.693	-0.001	0.479
8	997.40	997.468	0.007	0.583

在低介损区域( $<10^{-3}$ ),文中所述方法最低档位( $1.01 \times 10^{-4}$ )下仍能实现 1.736% 的相对误差,标

准差为  $0.268 \times 10^{-4}$ ,证明其在低介损条件下具备较强的抗噪性和高灵敏度。这主要由于所提出的 ApFFT-NLS 算法在相位提取精度上的优化设计,以及硬件同步采样系统对电压电流信号相位保持一致性。

中高介损区域( $10^{-3}$ 至  $10^{-1}$ )下的测量结果进一步验证了算法的稳定性,在 DDF 值为  $99.75 \times 10^{-4}$ 、 $498.70 \times 10^{-4}$ 、 $997.40 \times 10^{-4}$  对应档位中,测量误差分别仅为  $-0.099\%$ 、 $-0.001\%$ 、 $0.007\%$ ,这表明随着介损水平升高,测量误差进一步降低。这一趋势符合理论预期,即介损值越大,其测量分辨越高,也表明该方法具有较好的量程线性扩展能力。

为了进一步评估文中提出的方法对于不同介损水平的适应能力及其鲁棒性,给出其与文[18]中提出的传统振荡波电压下的介损测量方法在前 5 个标准介损档位下的估计值分布的对比,介损真值以横实线表示、实测点以箱图表示,见图 8。

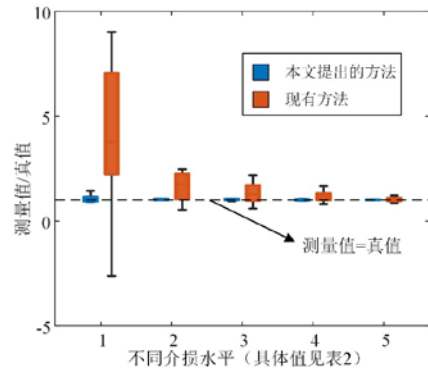


图 8 介损估计精度对比

Fig. 8 Comparison of dielectric loss estimation accuracy

在较低的介损水平下,传统方法测量值分散性强,且远离参考值较远,这表明传统方法在介损小的情况下的性能严重降低。文中提出方法测量结果比较集中,所有的样本围绕着真实值呈对称分布,最大相对差在 2% 以下,提出的算法具

有更加优越的低损耗识别能力。这主要是由于文中所提的 ApFFT-NLS 算法在相位估计过程中提升了抗噪处理能力,显著减少了测量噪声对相位差计算的影响。

在中高介损水平下,文中方法测得结果基本呈“紧聚簇”态势,误差值收敛在正负 1%以内;而传统方法即便在高介损下有部分点得到改善,但测得结果依旧波动范围较大,且时常存在离群点。

综上,文中提出的介损估计算法在测量精度、重复性、稳定性及异常值抑制上都大幅优于已有算法,特别是在低 DDF 的情况下具有非常明显的性能优势,可以实现  $1 \times 10^{-4}$  级的精准测量。

## 5 结论

文中提出一种基于振荡波激励下的电缆 DDF 测量方法,与传统方法对比,无需校正振荡波测试系统损耗,通过测量电缆两端的电压和电流并计算相位差推算 DDF。提出基于 ApFFT-NLS 算法来估计被测振荡波电压电流的波形特征参数,消除衰减振荡电压波形带来的参数估计误差。对提出的估计算法进行了仿真,表明该方法在不同介损真值、噪声强度以及采样条件下均表现出较好有效性及鲁棒性。研制了电压电流同时测试系统,通过将电流采集模块布置于高压侧消除了由于试品击穿可能产生的地电位抬升风险。搭建了变 DDF 标准电容器实验平台,在实验室对方法进行测试验证,结果显示文中提出方法与传统振荡波电压下的介损测量方法对比提高了 1 个数量级至  $1 \times 10^{-4}$ ,达到了介损现场测量的高精度要求,为利用振荡波技术开展电缆整体绝缘特性高灵敏度评估提供了可靠的方法和理论基础。

**基金项目:** 国网河北省电力有限公司科技项目资助(kj2024-096)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Company Co., Ltd.(kj2024-096)。

## 参考文献:

- [1] 于志鹏,刘亚东,严英杰,等.积水环境下的中压电缆接头早期故障特征分析与识别逻辑[J].高电压技术,2025,51(9):4651-4662.  
YU Zhipeng, LIU Yadong, YAN Yingjie, et al. Incipient fault characteristics analysis and identification strategy of medium voltage cable joint in water-logged environment[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(9): 4651-4662.
- [2] 袁豪,周凯,李原,等.基于 SPDMD 算法的 XLPE 电缆介质响应参数辨识[J].高电压技术,2023,49(8):3544-3553.  
YUAN Hao, ZHOU Kai, LI Yuan, et al. Parameters identification for dielectric response of XLPE cable insulation based on SPDMD algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3544-3553.
- [3] 赵书静,龚梁涛,詹博博,等.电缆局部缺陷的步进频连续波定位方法[J].高电压技术,2023,49(5):2121-2130.  
ZHAO Shujing, GONG Liangtao, ZHAN Bobo, et al. Location method for local defects of cable based on stepped frequency continuous wave technology[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2121-2130.
- [4] DAI Dongxue, LI Yi, WANG Jiafu, et al. Bilateral comparison of high-voltage capacitance and dielectric dissipation factor at 50 Hz[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023(72): 1-8.
- [5] JAMSHED A, HAQUE N. Assessment of moisture content in XLPE insulation of power cable using dissipation factor measurements[C]//2023 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT). [S.l.]: IEEE, 2023: 1-4.
- [6] PRADHAN A K, CHATTERJEE B, CHAKRAVORTI S. Estimation of paper moisture content based on dielectric dissipation factor of oil-paper insulation under non-sinusoidal excitations[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 822-830.
- [7] GHADERI A, MINGOTTI A, LAMA F, et al. Effects of temperature on MV cable joints tan delta measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(10):

3892-3898.

- [8] CHAKRABARTY C K, AVINASH A R, AHMAD BASRI A G. Development of high frequency Tan Delta measurement method for 132kV transmission underground cables[C]//2014 IEEE 2nd International Symposium on Telecommunication Technologies (ISTT). [S.l.]: IEEE, 2014: 436-441.
- [9] IEEE guide for field testing of shielded power cable systems using very low frequency (VLF) (less than 1 Hz): IEEE Std 400.2: 2013[S].2013.
- [10] IEEE Guide for field testing of shielded power cable systems rated 5 kV and above with damped alternating current (DAC) voltage : IEEE Std 400.4 — 2015[S].2016.
- [11] GULSKI E, SMIT J J, SEITZ P, et al. PD measurements on-site using oscillating wave test system[C]//Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.98CH36239). [S.l.]: IEEE, 1998: 420-423.
- [12] 李必春, 宋守龙. 电容分压器中压端对地绝缘电阻对  $\tan\delta$  测量值的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(6): 71-74.
- LI Bichun, SONG Shoulong. Influence of ground insulation resistance of medium terminal of capacitive divider on  $\tan\delta$  Measurement[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(6): 71-74.
- [13] KYRIAZIS G A. Calibration of high-voltage current-comparator-based capacitance and dissipation factor bridges using nonsynchronous sampling[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(4): 1029-1034.
- [14] KUFFEL E, ZAENGL W S, KUFFEL J. High voltage engineering fundamentals[M]. Britain Oxford : Butterworth-Heinemann, 2000.
- [15] 王永, 滕召胜, 李建闽, 等. 基于采样序列重构的高精度介质损耗角测量方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(23): 5607-5615.
- WANG Yong, TENG Zhaosheng, LI Jianmin, et al. High accuracy dielectric loss angle measurement method based on sampling sequence Reconstruction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(23): 5607-5615.
- [16] 左自强, 徐阳, 曹晓珑, 等. 计算电容型设备介质损耗因数的相关函数法的改进[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 53-57.
- ZUO Ziqiang, XU Yang, CAO Xiaolong, et al. Improvement to correlation algorithm for dielectric dissipation factor calculation of capacitance equipments[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 53-57.
- [17] 金涛, 陈毅阳, 游胜强. 基于 Nuttall 窗-五点变换的改进 FFT 介质损耗角测量算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(s2): 7-15.
- JIN Tao, CHEN Yiyang, YOU Shengqiang. An improved FFT algorithm for dielectric loss angle based on nuttall window and five-point polynomial transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(s2): 7-15.
- [18] HOUTEPEN R, CHMURA L, SMIT J J, et al. Estimation of dielectric loss using damped AC voltages[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(3): 20-25.
- [19] 黄翔东, 王兆华. 全相位数字谱分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- HUANG Xiangdong, WANG Zhaohua. All-phase digital spectral analysis method[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [20] 刘刚, 李瑞, 张圆明, 等. 循环老化下电缆绝缘介损特征及在线监测修正方法[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(1): 274-280.
- LIU Gang, LI Rui, ZHANG Yuanming, et al. Dielectric loss characteristics and online monitoring correction methods of cable insulation under cyclic aging[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 274-280.
- 杨赛柯(1995—), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为电力设备绝缘状态检测与故障诊断(E-mail: yangsk1204@163.com)。
- 庞先海(1983—), 男, 硕士研究生, 教授级高级工程师, 研究方向为电力状态检测与试验技术(E-mail: dyy\_pangxh@163.com)。
- 张鹏(1993—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力电缆绝缘状态检测与在线监测(E-mail:

**基金项目:** 国网河北省电力有限公司科技项目资助(kj2024-096)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Company Co., Ltd.(kj2024-096).

---

hbdyyp@163.com)。

李天辉(1984—)，男，博士研究生，教授级高级工程师，研究方向为电力状态检测与试验技术(E-mail: 289803775@qq.com)。

**基金项目：**国网河北省电力有限公司科技项目资助(kj2024-096)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Company Co., Ltd.(kj2024-096).