

10 kV XLPE 电缆中局部放电声波 衰减规律研究

罗海静, 柳 赞

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘 要: 超声传感技术的应用有望实现电缆局部放电的在线监测, 因此有必要对相应型号电缆局放声波频率及幅值的衰减规律进行研究。基于型号为 YJV-185 mm² 的 10 kV XLPE 电力电缆, 结合 2 组不同频率声源的仿真计算和 1 组“针一孔”局放实验, 研究局放声波信号在电缆中的频率及幅值衰减问题。研究结果表明: 声波在多层复杂介质中的衰减规律和在单一介质中的衰减规律不一致; 声源频率组成对电缆表面可检测声波频率及幅值的影响不可忽略; 电缆中“针一孔”局部放电的声源模型可以近似为带宽为 1 MHz、峰值时间为 1 μs、频率范围为 0~1.5 MHz 的高斯脉冲; 本文所用型号电缆的“针一孔”局部放电声波信号在电缆中的径向衰减系数数值约为 8.17 dB/mm, 电缆表面的轴向衰减系数为 0.43~0.52 dB/mm, 电缆表面的可检测声波频率为 0~40 kHz; 高灵敏度传感器的中心频率建议设计为 20~40 kHz, 而分布式检测传感器分布密度的设计需要具体问题具体研究。

关 键 词: XLPE 电缆; 局部放电; 声波衰减; 衰减系数; 中心频率

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.021

中图分类号: TM855

文章编号: 1673-9140(2023)02-0186-10

Study on the acoustic wave attenuation of partial discharge in 10 kV XLPE cable

LUO Haijing, LIU Yun

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The application of ultrasonic sensing technology is expected to achieve online monitoring of cable partial discharge. Therefore, it is necessary to study the acoustic frequency and amplitude attenuation rules of partial discharge in a certain type of cable. Taking the YJV-185 mm² type 10 kV XLPE power cable as research object, this paper carries out simulation calculations of two sets of different frequency acoustic sources and a set of "needle-hole" partial discharge experiment. The frequency and amplitude attenuation rules of partial discharge acoustic signals in the cable are studied. Research results show that the attenuation law of acoustic waves in multi-layer complex media is inconsistent with that in a single medium. The influence of the frequency composition of the sound source on the detectable sound frequency and amplitude of the cable surface cannot be ignored. The acoustic source model of the "needle-hole" partial discharge in the cable can be approximated as a Gaussian pulse with a bandwidth of 1 MHz, a peak time of 1 μs, and a frequency in the range of 0~1.5 MHz. The radial attenuation coefficient of the "needle-hole" partial discharge acoustic signal in the cable sample is about 8.17 dB/mm, the axial attenuation coefficient on the cable surface is about 0.43~0.52 dB/mm, and the detectable acoustic frequency range on the cable surface is 0~40 kHz. The center frequency of high sensitivity sensors is

收稿日期: 2023-03-10; 修回日期: 2023-04-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2019MS005)

通信作者: 柳 赞(1986—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事电工理论与新技术的研究, E-mail: 306094217@qq.com

recommended to be designed at 20~40 kHz, while the design of distribution density of distributed detection sensors require specific research on specific issues.

Key words: XLPE power cable; partial discharge; acoustic attenuation; attenuation coefficient; center frequency

交联聚乙烯(cross linked polyethylene, XLPE)电缆被广泛应用于城市输配电网络中,其安全运行对于电力系统稳定性至关重要^[1-4]。局部放电是威胁电缆安全的主要因素之一,因此,保障电缆安全运行的关键措施是对电缆局部放电进行在线监测,尽早发现绝缘缺陷并采取应对措施。然而,目前对于电缆局部放电缺乏有效的在线监测手段,电缆本体及附件被击穿事故时有发生。

用于电气设备局部放电检测的主流方法是脉冲电流法、特高频检测法以及超声波检测法^[5]。脉冲电流法需要接高压试验电源,适用于离线检测^[6]。特高频检测法易受现场电磁环境干扰,误报、漏报问题十分严重^[7]。相比电学原理的检测方法,超声波检测法具有相对较强的抗电磁干扰能力,长久以来得到广泛的关注和研究。

目前应用超声波法对局部放电进行研究,主要针对GIS、发电机、变压器等设备,而应用超声波法对XLPE电缆及其附件局部放电进行研究的较少^[3,8],其原因是局放声波信号在电缆的多层介质结构中衰减比较严重^[9-10],电缆的局放超声波检测对传感器的灵敏度提出很大的挑战。传统的局放声波检测技术是利用压电陶瓷传感器(piezoelectric transducers, PZT),其灵敏度比较低^[11],不能满足电缆局放检测的要求。近年来,随着光纤技术的进步,电力设备上的光纤超声传感技术得到快速发展^[12]。研究表明,光纤超声传感器比PZT的灵敏度高,并且能够实现通道复用^[11,13-14],这是目前最有望用于实现电缆局放在线监测的超声波传感技术。

电缆中的局部放电在发展到击穿之前,局部放电程度会逐渐增加。局部放电发生的初期是局放检测的最佳窗口期,但当放电发展到中期比较剧烈且没有击穿之前,仍然是超声检测法进行局放检测的关键窗口期,对电缆中的大局放进行检测,可以降低对超声传感器灵敏度的要求。设计适用于电缆局放的分布式光纤超声传感检测系统,分布式检测的方法可以弥补单个超声传感器检测范围小的不足,因此仍然有希望实现高效的电缆局放在线监

测,以降低目前的电缆事故带来的经济损失。因此,需要对电缆上局放声波的频率和幅值衰减的规律进行深入研究,以指导分布式传感器中心频率以及分布密度的设计。

电气设备绝缘中局部放电产生的声波频率一般认为能高达数MHz^[5]。但是,由于局放声波在介质中传播时频率会发生衰减以及电气设备自身固有频率的影响,不同电气设备具有不同的可检测声波频率。比如,在GIS的局部放电超声波检测中,超声波传感器的谐振频率一般在25 kHz左右,而在变压器中,其谐振频率一般在150 kHz左右^[5]。目前,对电缆中局放声波可检测频率的研究很少。文献[15]利用中心频率为150 kHz的PZT对110 kV XLPE电缆中间接头中的局部放电声波频率进行了研究,得到声信号频率为50~250 kHz,此研究的不足在于没有考虑电缆结构的固有频率的分析。

现有关于电缆局放声波幅值衰减的研究需进一步完善。文献[16]利用断铅方式模拟局放声波信号,研究了25 kV电缆上声波的幅值随传播距离的变化趋势;文献[17]采用模拟计算的方式研究了电缆外表面声波幅值随传播距离以及切向夹角的变化趋势;文献[18]在XLPE绝缘试块上开展了局放声波检测实验,测得局放声波信号全波幅值在XLPE绝缘块上的衰减系数为0.62 dB/mm、216.4 kHz的高频信号幅值衰减系数为0.80 dB/mm以及76.36 kHz的低频信号幅值衰减系数为0.44 dB/mm;文献[19]开展了10 kV XLPE电缆中模拟局放超声波传播的仿真计算和实验,用电缆中声波波阵面的变化解释了电缆表面声波信号幅值的变化,并且测得电缆表面声波信号幅值的衰减系数为0.62 dB/mm。但是上述研究的结论难以直接指导前述分布式光纤局放超声传感检测系统的设计。

本文基于型号为YJV-185 mm²的10 kV XLPE单芯电缆,通过2组脉冲宽度声源的仿真计算以及“针一孔”类型缺陷的局放试验,研究局放声波在电缆结构中的频率及幅值衰减规律,得到此型号电缆外表面可检测局放声波频率范围以及声波幅值衰

减系数,并依此可以直接给出本文型号电缆对应分布式传感器中心频率设计的建议范围。

1 电缆局部放电声波传播仿真

1.1 仿真模型的建立

1.1.1 电缆本体模型的建立

型号为YJV-185 mm²的10 kV XLPE电缆本体结构如图1所示,电缆为多层同心圆柱体,各层结构参数如表1所示;在有限元仿真软件中,构建此型号电缆本体三维模型,如图2所示,设置轴向长度为150 mm,径向尺寸和实际电缆完全一致。为方便描述,在模型上建立空间直角坐标系 $O-xyz$, O 点在轴心左端点, x 轴与电缆轴心重合。

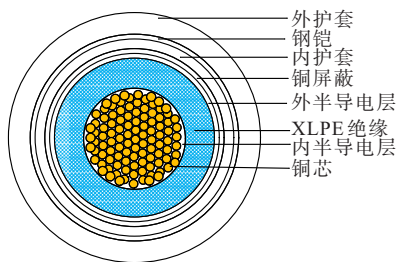


图1 10 kV XLPE 电缆本体结构

Figure 1 Structure of 10 kV XLPE power cable

表1 10 kV XLPE 电缆结构参数

Table 1 Structure parameters of 10 kV XLPE cable

结构	厚度/ mm	密度/ (kg/m ³)	杨氏模量/ GPa	泊松比
铜芯	8.4(R)	8 960	110.00	0.35
XLPE绝缘	5.0	930	0.13	0.32
内/外半导体层	1.0	1 150	0.11	0.33
铜屏蔽	0.2	8 960	110.00	0.35
钢铠	0.2	7 930	195.00	0.25
内/外护套	3.0	2 230	1.95×10^{-3}	0.45

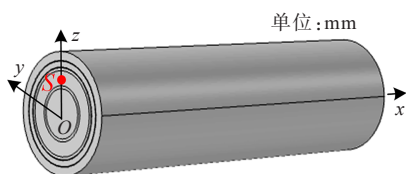


图2 电缆本体仿真模型

Figure 2 Simulation model of power cable body

1.1.2 物理场、声源、边界条件的设置

利用有限元仿真软件中固体力学位移场模块,

模拟局放声波在电缆中的传播过程,运动方程为

$$\nabla \cdot S + F_v = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中, ρ 为媒质密度, kg/m³; F_v 为体积力, N; S 为应力, Pa; u 为位移量, m。

电缆中的局部放电可能会发生在绝缘中,故仿真时将声源设置在绝缘中距内半导体层 1 mm 的位置 S 处(图2), S 在 z 坐标轴上,其坐标为(0, 0, 10.4)。局部放电会产生声波为脉冲型,有限元计算中一般可用高斯脉冲模拟。声源设置方式为指定位移,声源表达式为

$$\begin{cases} u_{0x} = 0 \\ u_{0y} = 0 \\ u_{0z} = A' \cdot \exp[-\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot (t - t_c)^2] \end{cases} \quad (2)$$

式中, u_{0x} 、 u_{0y} 、 u_{0z} 分别为声源点 x 、 y 、 z 方向的初始位移量; A' 为位移量初始幅值; t_c 为脉冲峰值时间; f_0 为脉冲带宽。

声源波形及频谱形状如图3所示。为了研究声源的频率组成对电缆表面可检测声波频率及幅值衰减系数的影响,本文设置2种不同频带范围的高斯脉冲模型作为声源,分别对其进行仿真。将低频声源仿真记为“仿真1”、高频声源仿真记为“仿真2”,具体参数设置如表2所示,其中,“频带范围”的定义采用“1/10法则”,即频谱幅值下降到最大幅的1/10时的频率范围。

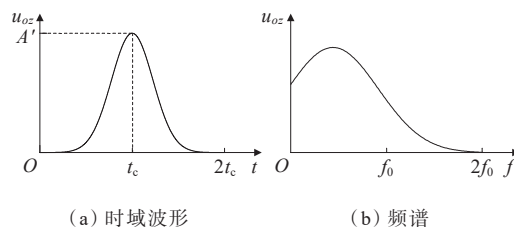


图3 声源波形及其频谱

Figure 3 Waveform and spectrum of sound source

表2 声源参数

Table 2 Parameters of sound source

声源仿真	$t_c/\mu\text{s}$	f_0/MHz	频带范围/MHz
1	1.0	1	0~1.5
2	0.2	5	0~7.5

实际运行的电缆长度一般为几公里到几十公里,而仿真中的电缆模型仅有 150 mm,为模拟实际

长度电缆中声波的传播,避免声波在模型的 2 个端面发生反射造成误差,将 2 个端面设置为低反射边界,同时电缆模型的柱面外围设置为空气介质。

1.1.3 网格的剖分

对模型进行网格剖分是有限元计算的关键环节,网格剖分质量决定着计算结果的准确性。钢铠和铜屏蔽的厚度均仅为 0.2 mm,为了保证计算结果的准确性,要求其至少被剖分成 2 层网格,每层网格最多 0.1 mm,如此细小的网格剖分会使整个电缆的网格剖分数量骤增。网格数量决定自由度的求解,对运算设备中 CPU 的计算能力和内存大小提出很高的要求。现有很多关于电缆的仿真研究中,为了减少计算量均忽略了这 2 层结构,一定程度上给仿真结果带来误差。本文在高性能计算机的支持下,对钢铠和铜屏蔽结构进行合理剖分,暂态求解自由度高达 324 300,保证了仿真结果的准确性。

1.2 仿真结果分析

1.2.1 仿真数据采集

仿真计算时间长度为 1 000 μ s,步长为 0.25 μ s,采样率为 4 MS/s,频谱分辨率为 1 kHz,能够充分保证信号频率的完整性。电缆模型的 xoz 面以及声波信号采集位置如图 4 所示。

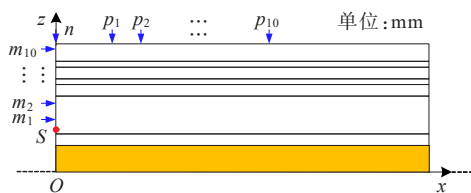


图 4 电缆模型上信号采集位置

Figure 4 Position of signal acquisition on the cable model

为了对声波信号在电缆中径向和轴向的频率变化以及幅值变化进行研究,在声源 S 正上方(沿 z 轴正方向)依次设置若干检测点 m_i 和 n ,其中 n 点是外护套表面距离声源最近的点;在外护套表面轴向(沿 x 轴正方向)依次设置若干检测点 p_i 。 m_i 、 n 、 p_i 均位于坐标 xoz 面,各点坐标值: $m_i(0, 0, 10.4 + i)$, $i=1, 2, \dots, 10$; $n(0, 0, 20.8)$; $p_i(10i, 0, 20.8)$, $i=1, 2, \dots, 10$ 。2 组仿真 n 点采集的声波信号波形及频谱分别如图 5 所示。

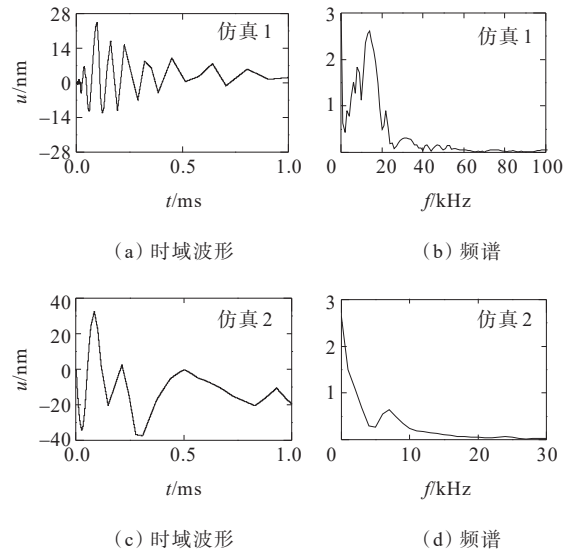


图 5 n 点信号时域波形及频谱

Figure 5 Time domain waveform and spectrum of signal on point n

由于仿真声源设置的初始位移量在空间只有 $z > 0$ 方向,故时域信号波形中低频分量的部分明显关于时间轴 $t=0$ 不对称,这是预期的现象;其他检测点也有相同特点,这不影响对频谱及幅值变化规律的分析。 n 点是电缆外护套表面距离声源 S 最近的位置,和声源 O 点相比, n 点声波信号的高频部分发生了明显的衰减。仿真 1 的 n 点信号频带上限衰减至 34 kHz,主频为 13 kHz;仿真 2 的频带上限衰减至 10 kHz。一般认为高频声波信号比低频衰减快,由于仿真 1、2 声源频谱的差异,电缆表面的可被检测频率也有较大差异,需进一步分析。

1.2.2 声波信号频率的变化规律

2 组仿真径向和轴向测点信号的频带上限值 f_h 如图 6 所示,各测点频带下限值均为 0。随着声波信号的衰减,各测点信号的频带范围也逐渐缩小,且径向缩小速度较快、轴向较慢或趋于稳定。

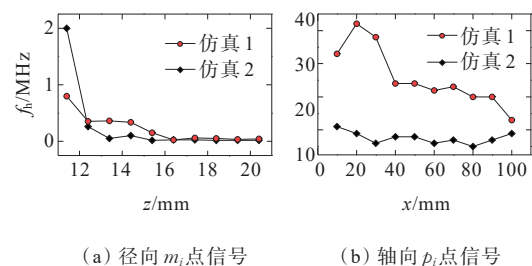


图 6 各测点信号的频带范围

Figure 6 Frequency band range of each signal detection point

对于外护套上轴向同一测点,仿真1的声波信号频带范围大于仿真2,仿真1、2电缆外护套声波信号频率分别在42、11 kHz以下。频谱上限随着传播距离的增大并非表现出单调递减特性,为验证此现象不是因为取频率上限值作为分析对象时产生的偶然现象,则需要进一步分析验证。

形心频率 f_c 可以概括信号各频率分量的分布特征,可借助其对各测点信号频率的变化规律进一步分析,定义如下:

$$f_c = \frac{\sum_{i=0}^N f_i |A(f_i)| \Delta f}{\sum_{i=0}^N |A(f_i)| \Delta f} \quad (3)$$

式中, f_i 为离散化的各频率值; $A(f_i)$ 为相应各频率的幅值; Δf 为相邻频率之间的差值。

2组仿真各测点信号的形心频率随传播距离的变化规律如图7所示,形心频率总体的变化趋势与图6所示频带范围的变化趋势近似。形心频率随传播距离呈非单调递减特性,与采用频率上限的结果一致。因此证明这种衰减特性是一种普遍特性,从而也说明了声波在多层复杂介质中的衰减规律和在单一介质中的衰减规律不一致。由于介质的微观特性,声波在介质中会发生吸收和散射衰减,一般认为,单一介质中这2种形式的衰减和频率呈正相关,即呈现高频比低频衰减快的规律。但在电缆这种多介质复杂结构中,每种频率的声波信号都有特定的衰减模态,若要对比某些特定频率信号的衰减,则需要具体分析。

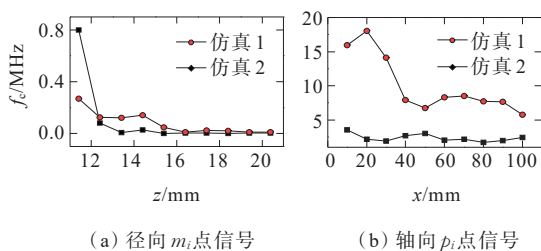


图7 形心频率变化趋势

Figure 7 Variation tendency of centroid frequency

根据以上分析,仿真2比仿真1中声源高频分量占比大,故仿真2的声波频率径向衰减速度更快。在此条件下,仿真1传播到电缆表面的声波信号高频分量占比反而比仿真2的大,因此,仿真1外护套上的声波频率轴向的衰减速度又更快一些。由此

可知声源频率组成对电缆表面可检测声波频率的影响不可忽略。高频占比大的声源传播到电缆表面的声波频率上限反而偏低,随之频率衰减速度也偏低;高频占比小的声源传播到电缆表面的声波频率上限反而偏高,随之频率衰减速度也偏高。

1.2.3 声波信号幅值的变化规律

电缆上声波信号幅值的衰减规律也是对声波检测传感器安装位置进行评估的重要参考依据。声波信号幅值 A 随传播距离 d 的衰减关系为

$$A = A_0 + A_1 \cdot e^{-\alpha \cdot d} \quad (4)$$

其中, α 为声波幅值衰减系数,Np/mm(1 Np/mm=8.69 dB/mm),其大小可以表征声波幅值随传播距离衰减的快慢程度。

2组仿真各测点信号峰峰值随距离的变化规律如图8所示。对于 m_i 点信号,传播距离 $d=z$;对于 p_i 点信号,传播距离 $d=x$ 。对信号峰峰值和传播距离的关系按照式(4)进行拟合,拟合曲线见图8。

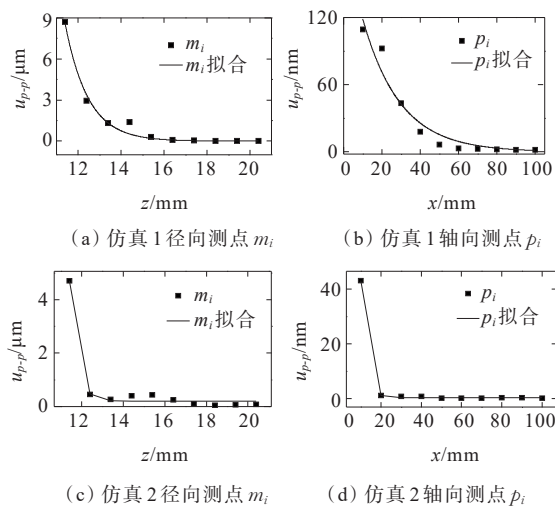


图8 各测点信号峰峰值及其指数拟合曲线

Figure 8 Peak-to-peak value and its exponential fitting curve of signals

拟合曲线参数如表3所示,仿真1的径向、轴向声波峰峰值衰减系数分别为8.17、0.52 dB/mm,仿真2的径向、轴向声波峰峰值衰减系数分别为23.29、3.39 dB/mm。仿真2比仿真1的信号峰峰值衰减系数大,这是由于仿真2的声源相比于仿真1声源的高频分量占比大,由此可知声源频率组成对电缆表面可检测声波幅值的影响也不可忽略。高频占比大的声源在传播的过程中幅值衰减速度总是更快;高频占比小的声源在传播的过程中幅值衰减速度总是更慢。

表 3 各测点信号峰峰值指数拟合曲线参数

Table 3 Exponential fitting parameters of peak-to-peak value of signals

声源	A_0/mm	A_1/mm	$\alpha/(\text{dB}/\text{mm})$	R^2	
仿真 1	m_i	0	366.47	8.17	0.98
	p_i	0	2.71×10^{-4}	0.52	0.96
仿真 2	m_i	2.08×10^{-4}	6.24×10^{11}	23.29	0.99
	p_i	3.63×10^{-7}	2.10×10^{-3}	3.39	1.00

2 基于 PZT 的电缆“针一孔”放电检测实验

2.1 PZT 的频响曲线测量

本文利用 PZT 对电缆局放声波进行测量,一般在 PZT 中心频率附近检测比较灵敏,故需对其频率响应曲线进行测量。用于局放实验的 PZT 记为 mPZT,其频响曲线测量还需要用到另一个 PZT 作为激励,记为 sPZT。如图 9 所示,sPZT 和 mPZT 均被放置于一块铝板上,铝板尺寸为 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$ 。用信号发生器向 sPZT 输入正弦电信号,sPZT 受正弦电信号的激励而向铝板输出相同频率的正弦声信号,mPZT 在相距一定距离的位置接收到此信号并显示在示波器上,继而测得 mPZT 的频率响应曲线如图 10 所示。单一铝介质中的声波传播速度为 $6\,400 \text{ m/s}$,故 100 kHz 对应声波长为 6.4 cm ,远大于铝板厚度 0.5 cm ,因此可以近似认为 100 kHz 是 mPZT 的中心频率点。

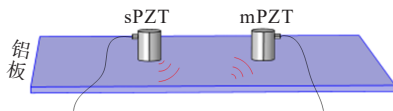


图 9 sPZT 频率响应曲线测量示意

Figure 9 Schematic diagram of resonant frequency measurement of the sPZT

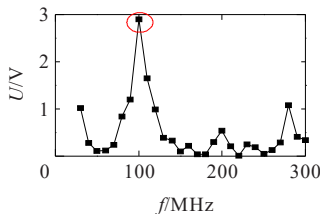


图 10 sPZT 的频率响应曲线

Figure 10 Frequency response curve of sPZT

2.2 “针一孔”模型及实验系统

电缆局放实验系统如图 11 所示,实验电缆长度

为 3 m ,在电缆绝缘中人为设计“针一孔”缺陷产生局放,在外护套表面用 mPZT 进行局放检测。由于声波信号在电缆结构中的幅值衰减比较严重,故设计缺陷需要能够产生大放电才能检测到信号。

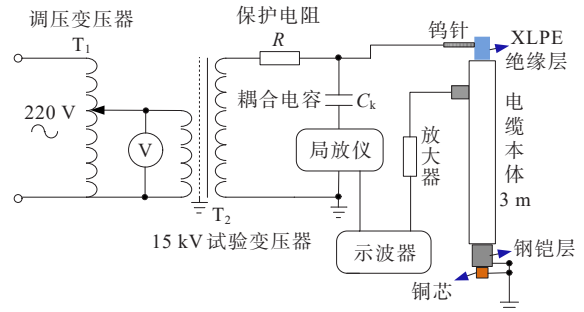


图 11 基于 PZT 的“针一孔”模型放电检测实验系统

Figure 11 Experimental system of "needle-hole" discharge detection based on PZT

“针一孔”缺陷设计如图 12 所示,电缆一端绝缘以外的部分被剥除,在绝缘上制作半径 $r=1 \text{ mm}$ 、深度 $d_1=4 \text{ mm}$ 的圆柱小孔,将连接高压接线端的钨针固定在孔中。为获取较大的放电量,对针尖进行钝化处理;为防止声波从针孔泄露,采用绝缘胶水进行封口处理。

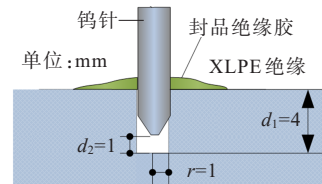


图 12 电缆“针一孔”局放缺陷模型

Figure 12 "Needle-hole" partial discharge defect model of cable

2.3 实验结果分析

示波器采集数据时设置为采样模式,采样率为 2.5 MS/s ,测点和局放点之间的切向圆心角为 0° ;考虑到外壳为金属材质的 PZT 与高压电极之间的安全距离,测点和局放点的轴向距离 x 分别设置为 $50、70、90、110、130 \text{ mm}$;用脉冲电流局放仪记录局放的脉冲电流信号及视在放电量 Q ,视在放电量与试品的电容有关,本实验试品电容保持不变,采集视在放电量是为了将多次局放采集到的声波信号幅值进行归一化处理,方便对比分析。

待放电稳定时每个测点连续采集 3 组数据,由于各检测点的 3 组数据特征具有一致性,因此只取 1 组数据进行分析,如图 13 所示,每个测点的声信号信噪比都比较小,信噪比最大为 12.6 dB ,最小为 6.1 dB 。

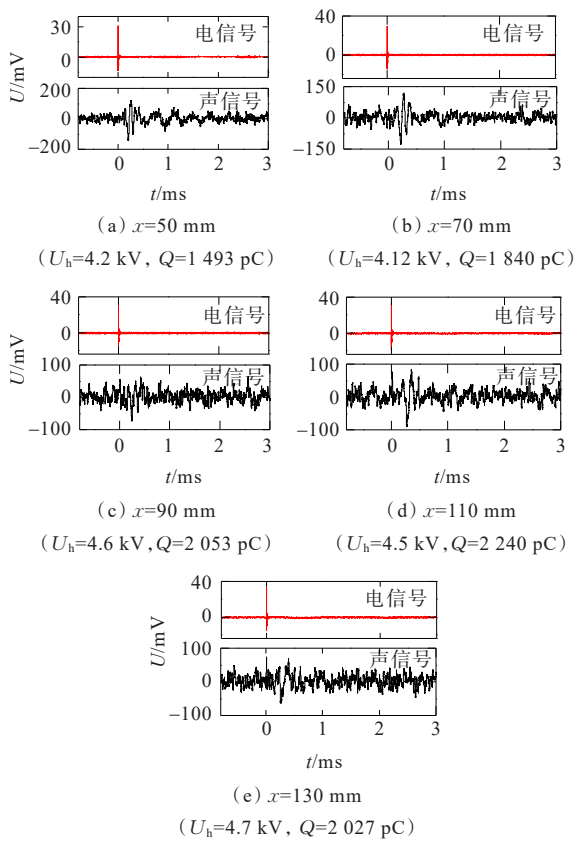


图 13 “针—孔”放电声波采样信号

Figure 13 Acoustic sampling signals of "needle-hole" discharge

对各个检测点的数据进行归一化处理,求得归一化后各检测点声波信号峰峰值的均值为 U_{av} , 对 U_{av} 和 x 的关系按照式(4)进行拟合,拟合效果如图 14 所示,拟合参数如表 4 所示,衰减系数为 0.43 dB/mm。

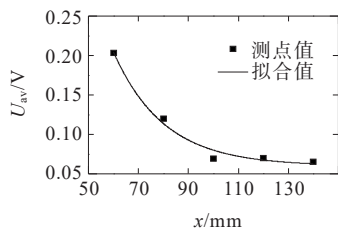


图 14 “针—孔”放电实验声波信号峰峰值及其指数拟合曲线

Figure 14 Peak-to-peak values of acoustic signals and its fitting curve of "needle-hole" discharge experiment

表 4 “针—孔”放电实验声信号峰峰值指数拟合曲线参数
Table 4 Exponential fitting parameters of peak-to-peak value of acoustic signals created in "needle-hole" discharge

A_0/V	A_1/V	$\alpha/(dB/mm)$	R^2
1.72	0.06	0.43	0.98

U_{1000pC} 代表归算后 1 000 pC 视在放电量对应声波信号幅值。对归一化后的声波数据进行频谱分析,如图 15 所示,可知局放检测到的声波信号频率主要分布为 0~40 kHz,且各检测点的主频均小于 10 kHz,频谱特征与仿真 1 的仿真结果更接近。由于 mPZT 的中心频率为 100 kHz,由此也可以佐证 100 kHz 的声波信号幅值已经衰减至难以检测。

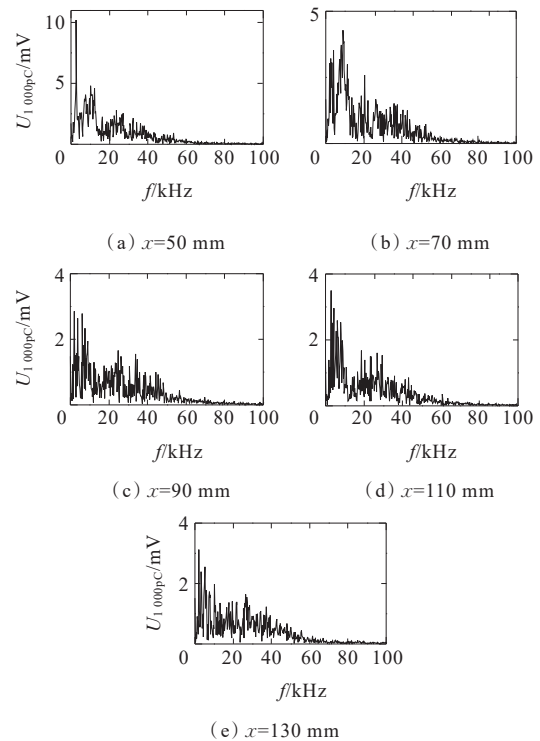


图 15 “针—孔”放电实验声波信号频谱

Figure 15 Acoustic signal spectrum of "needle-hole" discharge experiment

3 讨论

实际应用中 对 电 缆 上 的 局 放 声 波 检 测 一 般 在 电 缆 外 护 套 表 面 进 行,其 可 检 测 频 率 范 围 主 要 取 决 于 局 放 声 源 频 率 和 频 率 在 电 缆 中 的 衰 减 两 方 面 因 素,同 时 检 测 声 波 的 主 频 受 电 缆 结 构 本 身 固 有 频 率 的 影 响。从 2 种 频 带 声 源 设 置 的 仿 真 结 果 来 看,声 源 频 率 组 成 对 电 缆 表 面 可 检 测 声 波 频 率 范 围 以 及 可 检 测 声 波 幅 值 的 影 响 很 大,因 此,接 近 于 真 实 局 放 声 源 频 率 组 成 的 仿 真 结 果 才 具 指 导 意 义。对 比 2 组 仿 真 结 果 和 “针—孔”模 型 局 放 实 验 结 果,如 表 5 所 示,可 以 发 现,仿 真 1 中 得 到 的 电 缆 表 面 声 波 检 测 频 率 范 围 和 “针—孔”模 型 局 放 实 验 的 结 果 比 较 接

近,以及声波幅值衰减系数值在同一数量级。因此,“针一孔”模型局放声源频率组成可以近似等效于仿真 1 的声源模型,仿真 1 得到的数据更具直接参考价值。

表 5 仿真及实验声信号检测频率及幅值衰减系数对比

Table 5 Comparison of acoustic signal attenuation coefficient of frequency and amplitude in simulation and experiment

仿真或实验	频带上限/ kHz	轴向衰减系 数/(dB/mm)	径向衰减系数/ (dB/mm)
仿真 1	34	0.52	8.17
仿真 2	10	3.39	23.29
针一孔放电实验	40	0.43	—

仿真 1 和“针一孔”局放实验得到的电缆表面声波幅值轴向衰减范围为 0.43~0.52 dB/mm,比径向测点的小 1 个数量级,分析可知,造成这种巨大差异的原因是和电缆的径向结构有关。在声波信号径向传播的过程中,其会以不同的角度入射到介质分界面,由于各层介质声阻抗之间存在巨大差异,声波会在分界面发生反射,造成声波幅值急剧衰减。在根据式(5)计算得到声波从声源位置向外传播的过程中,介质界面的反射系数随声波入射角的变化曲线如图 16 所示。

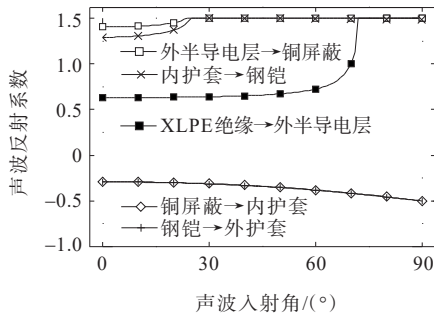


图 16 电缆多层结构界面声波反射系数

Figure 16 Acoustic reflectance coefficients of multi-layer structure interfaces of cable

由图 6 可知,声波在“外半导体层→铜屏蔽”界面、“内护套→钢铠”界面上有 2/3 的入射角度会发生全反射。据此可以推断:一方面金属层与非金属层界面材料的声阻抗差异是导致 XLPE 电缆中声波信号径向衰减的主要因素;另一方面也可说明,若为了方便计算而忽略这 2 层仅有 0.2 mm 的金属介质结构,则对研究结果造成的影响是灾难性的。

$$r_{12} = \frac{m \cos \theta_i - \sqrt{n^2 - 1 + \cos^2 \theta_i}}{m \cos \theta_i + \sqrt{n^2 - 1 + \cos^2 \theta_i}} \quad (5)$$

式中, r_{12} 为声波从介质 1 入射到介质 2 的反射系数; θ_i 为入射角; m 为介质 2 和介质 1 的密度比值; n 为声波从介质 1 入射到介质 2 的折射率。

分布式检测传感器分布密度的设计不仅与电缆表面声波的轴向衰减系数有关,还和传感器的灵敏度有关,因此需要具体问题具体研究。

仿真 1 和“针一孔”局放实验得到的电缆表面声波频率范围为 0~40 kHz,可检测声波的主频受结构的固有频率影响。固有频率是结构受到激励时发生自然振动的频率,低阶固有频率易被激发,通常用来指导声波传感器中心频率的设计,以提高检测的灵敏度。利用有限元仿真软件对文 1.1.1 中所建电缆模型进行特征频率分析,得到前六阶特征模态及其特征频率,如图 17 所示,可见模型电缆的前六阶特征频率均在 1 kHz 左右。

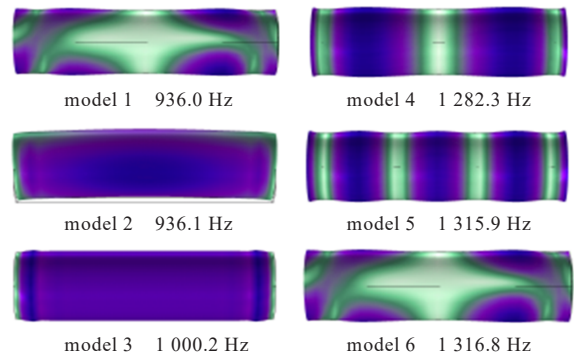


图 17 仿真电缆模型的前六阶特征模态及其特征频率

Figure 17 The first six characteristic modes and their characteristic frequencies of simulation cable model

将 2 组仿真中各测点信号的频谱进行对比,如图 18 所示,在仿真 1 径向 m_i 点信号和仿真 2 轴向 p_i 点信号频谱图中,1 kHz 处均有明显的谐振峰。

实际现场敷设的电缆长度远大于模型电缆,为对其固有频率进行估计,可以简化为单一介质圆柱体,此圆柱体的固有频率为

$$f_n = \frac{1}{2\pi L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (6)$$

式中, L 为圆柱体长度, m ; E 为介质杨氏模量,Pa; ρ 为介质密度,kg/m³。

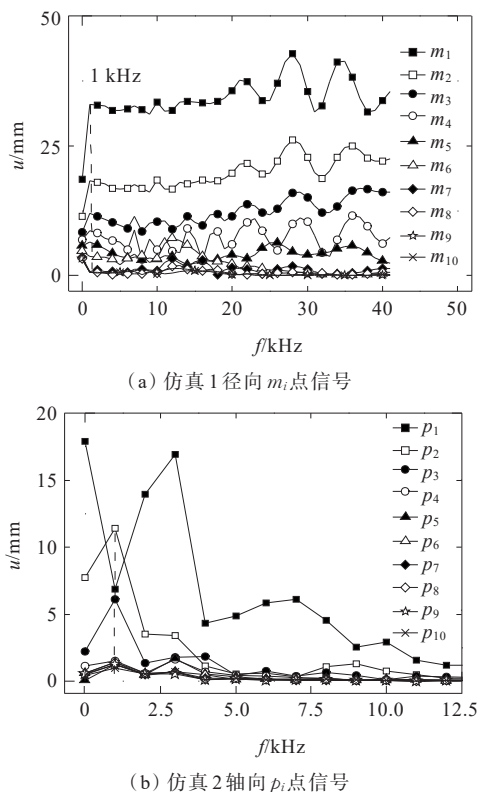


图 18 信号频谱对比

Figure 18 Comparison of signal spectrums

由式(6)可知,圆柱体的固有频率与介质杨氏模量正相关,与圆柱体长度以及介质密度负相关,因此,可以推断出实际现场敷设的电缆的低阶特征频率必然低于1 kHz。为避免环境噪声干扰,1 kHz不能作为检测局放的声波传感器的中心频率,用于局放检测的声波传感器应该尽量降低对20 kHz以下的声波信号的敏感度,所以电缆的低阶固有频率不能作为传感器的中心频率。针对本文型号电缆,传感器最佳的中心频率点只能选为20~40 kHz;由于声波检测频率受电缆结构影响较大,不同型号电缆的结构差异也较大,这意味着没有普适的传感器中心频率,针对特定型号电缆则应具体研究;而下一步将设计出适用的分布式局放声波检测传感器,验证对此型号电缆大局放进行在线监测的可行性。

4 结语

本文基于型号为YJV-185 mm²的10 kV XLPE单芯电缆,结合2组不同频率声源的仿真计算和“针一孔”模型局放实验,研究了局放声波信号在电缆中的频率及幅值衰减问题。

1) 声波在多层复杂介质中的衰减规律和在单一介质中的衰减规律不一致。电缆结构中局放声波高频分量总体上比低频分量衰减快,但在局部范围可能得到正好相反的规律。因此,对具体频率分量的声波衰减速度进行比较时应具体分析。

2) 声源频率组成对电缆表面可检测声波频率的影响不可忽略。高频占比大的声源传播到电缆表面的声波频率上限反而偏低,频率衰减速度也偏低;高频占比小的声源传播到电缆表面的声波频率上限反而偏高,频率衰减速度也偏高。

3) 声源频率组成对电缆表面可检测声波幅值的影响也不可忽略。高频占比大的声源在传播的过程中幅值衰减速度总是更快;高频占比小的声源在传播的过程中幅值衰减速度总是更慢。

4) 电缆中“针一孔”模型局部放电的声源模型可以近似为带宽为1 MHz、峰值时间为1 μ s、频率范围为0~1.5 MHz的高斯脉冲。

5) 本文所用型号电缆“针一孔”局部放电声波信号在电缆中的径向衰减系数数值约为8.17 dB/mm,电缆表面的轴向衰减系数为0.43~0.52 dB/mm。分布式检测传感器分布密度的设计值需具体问题具体研究。

6) 本文所用型号电缆“针一孔”局部放电电缆表面的可检测声波频率范围为0~40 kHz。电缆结构的固有频率低于1 kHz,为避免环境噪声干扰,适用于本文型号电缆的高灵敏度传感器的中心频率建议设计范围为20~40 kHz。由于声波检测频率受电缆结构影响较大,针对其他型号电缆则需具体研究。

参考文献:

- [1] 王昊月,李成榕,王伟,等.高压频域介电谱诊断XLPE电缆局部绝缘老化缺陷的研究[J].电工技术学报,2022,37(6):1542-1553.
WANG Haoyue, LI Chengrong, WANG Wei, et al. Local aging diagnosis of XLPE cables using high voltage frequency domain dielectric spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1542-1553.
- [2] 马鑫,张怀垠,吴继岩,等.温度对交联聚乙烯电缆尖刺缺陷局部放电特性的影响[J].高压电器,2021,57(5):151-156.
MA Xin, ZHANG Huaiyin, WU Jiyan, et al. Effect of temperature on partial discharge characteristics of needle defects in cross-linked polyethylene cable[J]. High Voltage

- Apparatus, 2021, 57(5): 151-156.
- [3] 周韞捷, 杨天宇, 周宏, 等. 高压 XLPE 电缆缓冲层状态模糊综合评估方法[J]. 高压电器, 2022, 58(6): 137-143.
ZHOU Yunjie, YANG Tianyu, ZHOU Hong, et al. Fuzzy comprehensive condition assessment method of buffer layer in HV XLPE Cables[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 137-143.
- [4] 王明海. 高压电缆局部放电在线监测技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
WANG Minghai. Study on partial discharge on-line monitoring technology of high voltage cable[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [5] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- [6] 倪鹤立, 姚维强, 傅晨钊, 等. 电力设备局部放电技术标准现状述评[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 1-15.
NI Heli, YAO Weiqiang, FU Chenzhao, et al. Review on status of technical standards of partial discharge in electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 1-15.
- [7] 李进, 赵仁勇, 杜伯学, 等. 电工环氧绝缘件缺陷无损检测方法研究进展[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4598-4607.
LI Jin, ZHAO Renyong, DU Boxue, et al. Research progress of nondestructive detection methods for defects of electrical epoxy insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4598-4607.
- [8] 楚雄. 电缆终端局部放电声波特性及光纤检测技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
CHU Xiong. PD acoustic characteristic in cable terminal and optical fiber detection technology[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [9] TIAN Y, LEWIN P L, DAVIES A E, et al. Acoustic emission techniques for partial discharge detection within cable insulation[C]// IET Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, Edinburgh, UK, 2000.
- [10] CSELKÓ R, TAMUS Z Á, SZABÓ A, et al. Comparison of acoustic and electrical partial discharge measurements on cable terminations[C]// IEEE International Symposium on Electrical Insulation, San Diego, USA, 2010.
- [11] 马国明, 周宏扬, 刘云鹏, 等. 变压器局部放电光纤超声检测技术及新复用方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1768-1780.
MA Guoming, ZHOU Hongyang, LIU Yunpeng, et al. Optical fiber ultrasonic detection technology for partial discharge in power transformer and new multiplexing method[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1768-1780.
- [12] 柴彬, 刘飞, 江平开, 等. 面向电力设备检测与诊断的压电材料及器件[J]. 中国电力, 2021, 54(10): 105-116.
CHAI Bin, LIU Fei, JIANG Pingkai, et al. Piezoelectric materials and devices for monitoring and diagnosis of power equipment[J]. Electric Power, 2021, 54(10): 105-116.
- [13] 周宏扬, 马国明, 张猛, 等. 基于 Michelson 光纤干涉的 GIS 局部放电超声信号检测技术[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6452-6460.
ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHANG Meng, et al. Partial discharge ultrasonic signal detection technology in GIS based on the michelson fiber optic interferometer[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6452-6460.
- [14] FRACAROLLI J P V, FLORIDIA C, DINI D C, et al. Fiber optic interferometric method for acoustic emissions detection on power transformer's bushing[C]// SBMO/ IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC), Rio de Janeiro, Brazil, 2013.
- [15] WANG W, CHENG X, LIU C, et al. Study on the frequency spectrums of acoustic emission PD signals in XLPE cable accessories[C]// International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, 2008.
- [16] HSIEH J H, TAI C C, SU C C, et al. The transmission characteristics of sound wave in power cable[C]// International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, 2008.
- [17] 赵爱华, 李伟, 叶剑涛, 等. 超声波局部放电检测法在电缆终端中的应用[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(6): 112-118.
ZHAO Aihua, LI Wei, YE Jiantao, et al. Application of ultrasonic detection of partial discharge to cable terminals [J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(6): 112-118.
- [18] 程养春, 李日东, 吴旭涛, 等. 基于 FBG 的电缆 XLPE 绝缘局部放电检测研究[J]. 宁夏电力, 2019(6): 26-34.
CHENG Yangchun, LI Ridong, WU Xutao, et al. Research on partial discharge detection of cable insulation based on FBG[J]. Ningxia Electric Power, 2019(6): 26-34.
- [19] 倪辉, 吴旭涛, 余海博, 等. 10 kV 交联聚乙烯电缆中超声波传播规律[J]. 应用声学, 2020, 39(4): 589-597.
NI Hui, WU Xutao, YU Haibo, et al. The propagation characteristics of ultrasonic wave on 10 kV XLPE cable[J]. Journal of Applied Acoustics, 2020, 39(4): 589-597.