

油中绝缘纸和铝箔对局放超声信号传播的影响

韩世杰, 谢虎波, 任文军, 郑小康, 陈忠贤, 王 伟

华北电力大学电气与电子工程学院, 北京

收稿日期: 2021年8月29日; 录用日期: 2021年9月14日; 发布日期: 2021年9月29日

摘 要

变压器套管是变压器的重要附件。油纸绝缘型套管中的电容芯子由多层绝缘纸和铝箔紧密缠绕所制, 该结构对局放超声信号的传播存在一定影响, 因而分析油中绝缘纸和铝箔对局放超声信号参数传播的影响可以为利用光纤EFPI传感器对套管内部局放检测提供理论基础。本文采用有限元分析方法, 对油中局放超声信号经过铝箔传播的二维模型进行仿真, 并搭建了EFPI光纤局放检测系统, 对局放超声信号经过铝箔, 绝缘纸以及绝缘纸和铝箔组合时所产生的衰减进行了量化分析, 将试验结果及实际套管尺寸进行对比分析, 验证了利用光纤EFPI传感器对套管进行局放监测的可行性。

关键词

光纤EFPI传感器, 局部放电, 油纸绝缘, 变压器套管

Influence of Insulating Paper and Aluminum Foil in Transformer Oil on Ultrasonic Signal Propagation in Local Discharge

Shijie Han, Hubo Xie, Wenjun Ren, Xiaokang Zheng, Zhongxian Chen, Wei Wang

College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: Aug. 29th, 2021; accepted: Sep. 14th, 2021; published: Sep. 29th, 2021

Abstract

Transformer bushing is an important accessory of transformer. Oiled paper type insulation casing internal capacitor core is made up of multilayer insulation paper and aluminum foil winding structure of the game with the spread of ultrasonic signal. Therefore, the analysis of the influence of insulating paper and aluminum foil in oil on the transmission of ultrasonic signal parameters can pro-

vide a theoretical basis for using fiber EFPI sensor to detect the local discharge in the casing. In this paper, the finite element analysis method is used to simulate the two-dimensional model of ultrasonic signal propagation through aluminum foil. At the same time, the EFPI optical fiber local discharge detection system was built, and the attenuation of local discharge ultrasonic signal through aluminum foil, insulating paper and the combination of insulating paper and aluminum foil was quantitatively analyzed. Finally, the feasibility of using fiber optic EFPI sensor to monitor casing local discharge is verified by comparing the test results with the actual casing size.

Keywords

Fiber-Optic EFPI Sensor, Partial Discharge, Oil Paper Insulation, Transformer Bushing

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

变压器的套管内部由导电铜导杆及起绝缘作用的电容芯子组成。电容芯子由绝缘纸及铝箔缠绕制成，当套管内部发生局部放电时，电容芯子的多层结构会使得局放超声信号发生多次折反射及衰减，因此分析套管内部电容芯子对超声信号特征参数的影响，对验证利用光纤 EFPI 传感器对套管进行局放监测的可行性以及后续传感器布置方式、放电模式识别、放电源定位等技术具有重要的实际价值和指导意义。

相较于传统的介质损耗监测，对套管进行局放监测具有实时性好、可在线监测以及可发现局部缺陷等优点。现有针对套管的局放监测均处于实验室阶段，特高频法依靠测量伴随着局放产生的电磁信号对局放进行检测，但由于套管结构封闭，电磁信号不易从套管内部传出，且现场电磁干扰也会影响其稳定性，对内部电容芯子结构发生局放无法进行较好的检测[1] [2]。脉冲电流法则对不能准确地对容性设备进行局放检测，而套管属于典型的容性设备[3]。超声法检测伴随局部放电发生的超声波对设备进行局放检测，超声波为机械波，不存在金属屏蔽现象，因此超声法有能够测量套管内部放电的可行性。

相较于其他超声波法检测局放所使用的传感器，光纤 EFPI 局放超声传感器具有体积小，不受外界干扰，灵敏度高、能够伸入套管内部进行局放检测等优点[4]，但套管内部结构复杂，必须对其内部由多层绝缘纸和铝箔缠绕制成电容芯子对局放超声信号的传播的影响进行量化分析，才可验证该方法的可行性和有效性，本文通过仿真和试验对油中绝缘纸和铝箔对局放超声信号传播的影响进行了分析。

2. 局放超声信号穿过铝箔的仿真分析

2.1. 超声波传播方程

超声波属于机械波，在不考虑传播媒质滞性，认为媒质本身不具有加速度，在绝热且声波引起的振幅远小于媒质静态压强的条件下，超声波在单一媒质中传播时的声场通过媒质中的声压 p ，质点速 D 度 v 以及密度 ρ 来表征[5]。超声波传播过程中应满足三个基本物理定律，即牛顿第二定律、质量守恒定律及描述压强、密度变化、温度等状态参数关系的物态方程[6] [7]。在三维声场中，可由运动方程、连续性方程以及物态方程对超声波传播过程进行表述[8]。其三维运动方程为：

$$\rho = \frac{dv}{dt} = -gradp \quad (2-1)$$

连续性方程为:

$$-div(\rho v) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2-2)$$

其中, div 为散度运算符号。

物态方程为:

$$dp = c_0^2 d\rho \quad (2-3)$$

式(2-1)、(2-2)、(2-3)中, ρ 为传播媒质的密度; v 为超声波波速; p 为声压; c_0^2 为与媒质参数相关的常数; $grad$ 为梯度运算符号; div 为散度运算符号。

将连续性方程对 t 求导都将物态方程和连续性方程带入, 最终的得到均匀的理想媒质中, 小振幅超声波声压 p 的三维波动方程:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2-4)$$

式中, ∇^2 为拉普拉斯算符。

2.2. 声源方程与模型参数设置

2.2.1. 声源的设置

伴随局放发生时产生的超声波属于欠阻尼振动[9], 因此本文在模型中设置点声源来模拟局放发生点[10][11]。点声源的时域声压表达式为:

$$p(t) = A \sin(2\pi ft) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2-5)$$

式中, A 指幅值; f 指局放超声信号的频率; τ 为局放超声信号的时间常数。本文选取的幅值大小为 1; 频率大小为 20 KHz; 时间常数为 1/36000。

2.2.2. 仿真参数设置

在 1.5 m × 0.6 m 的油箱平面模型中, 局放源距左右两侧监测点距离都为 0.6 m, 铝箔放置在 2 号监测点和局放源之间, 距局放源的距离为 0.3 m。

仿真模型里的各种材料相关数据如表 1 所示。

Table 1. Physical parameters of simulated materials

表 1. 仿真材料物理参数

材料	声速(m/s)	密度(kg/m ³)
变压器油	1420	890
铝板	6250	2700

2.3. 仿真结果分析

1) 经过十层 0.01 mm 铝箔衰减情况

铝箔每层厚度为 10 μm, 其宽度为 0.5 m, 共计有十层。此时, 1 号和 2 号监测点收到的声压情况如下图 1 所示。

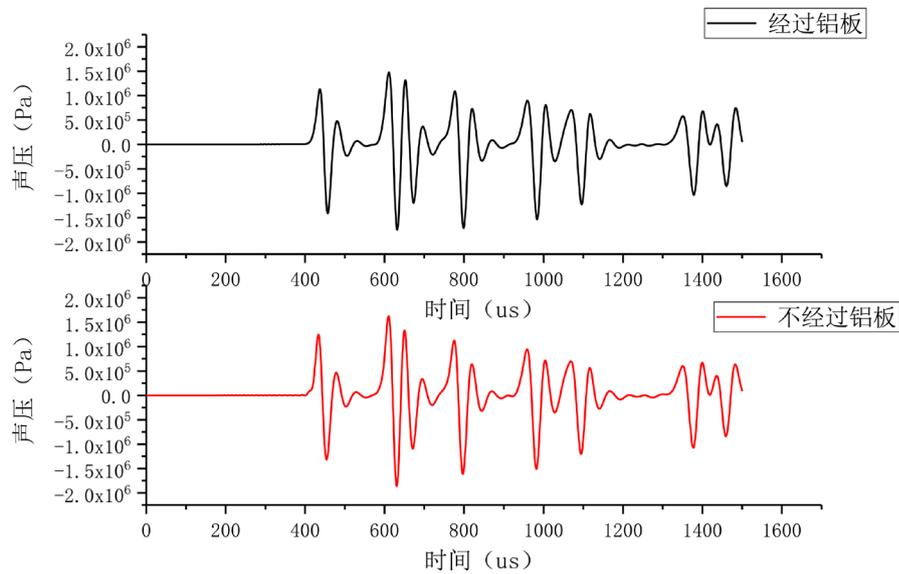


Figure 1. Simulation results of ultrasonic signal propagation through 0.1 mm aluminum foil

图 1. 超声信号经过 0.1 mm 铝箔传播情况仿真结果

Table 2. Amplitude of sound pressure

表 2. 声压幅值

	穿过铝板(点 1)	不穿过铝板(点 2)
最大声压幅值(MPa)	1.07	1.23

图 2、图 3 显示了不同时刻的声压分布图。

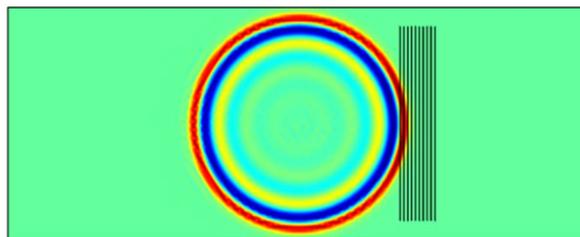


Figure 2. Transmission of ultrasonic signals at 200 μ s

图 2. 200 μ s 超声信号传播情况

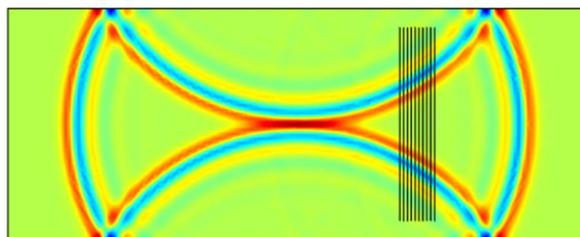


Figure 3. Transmission of ultrasonic signals at 433 μ s

图 3. 433 μ s 超声信号传播情况

从声压图可以发现，超声信号在变压器油中前进时，将以球状波形式传播。超声波经过铝板时会在表面发生微弱反射。在 200 μ s 时，超声信号并未传播到监测点，所以此时监测点的声压为 0；在 433 μ s 时，

超声信号刚好到达监测点，在这段时间内，传播到上壁以及下壁位置的超声信号在油壁位置发生反射，并在模型中间处上下壁反射的超声信号相遇，所以中间位置的颜色更深。由表 2 可知，超声信号分别穿过 0.1 mm 的铝板和不穿过 0.1 mm 厚的铝板在监测点所接受到的最大的声压最大值，从该表可以看出，超声信号穿过 0.1 mm 厚的铝板产生了 13% 的减少，所接受到的超声信号的声压的最大值是原信号的 87%。

2) 经过十层 0.05mm 铝箔衰减情况

当铝箔厚度为 10 μm 时，折反射现象并不明显，为分析铝箔厚度对超声波传播的影响，将铝箔每层厚度增加到 50 μm ，其宽度仍为 0.5 m，层数仍为 10 层。仿真结果如下，1 号和 2 号监测点的接收声压情况如下图 4 所示，图 5、图 6 为不同时刻的声压分布图。

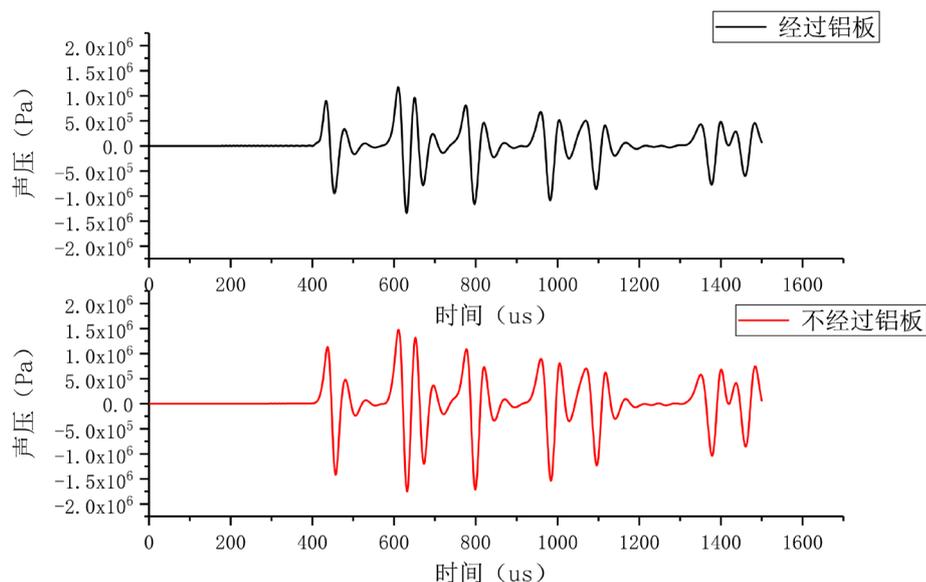


Figure 4. Simulation results of ultrasonic signal propagation through 0.5 mm aluminum foil
图 4. 超声信号经过 0.5 mm 铝箔传播情况仿真结果

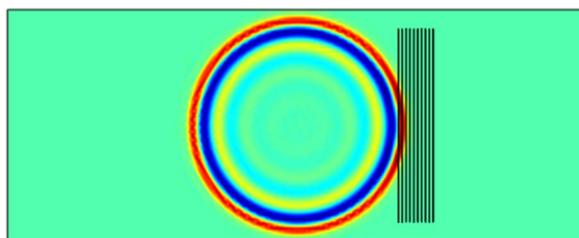


Figure 5. Transmission of ultrasonic signals at 200 μs
图 5. 200 μs 超声信号传播情况

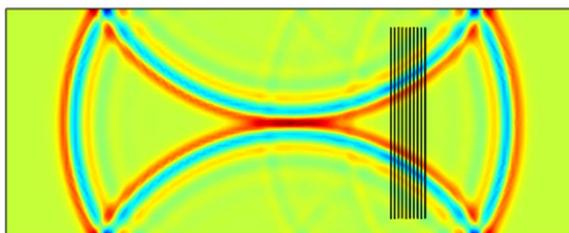


Figure 6. Transmission of ultrasonic signals at 433 μs
图 6. 433 μs 超声信号传播情况

与铝箔厚度为 1010 μm 时对比可以发现, 铝板的厚度增加以后, 局放超声信号经过铝板后的折反射现象更加明显。

表 3 为超声信号分别穿过 0.5 mm 厚的铝板和不穿过 0.5 mm 厚的铝板观测点所接受到的最大声压幅值, 从该表可以看出, 超声信号穿过 0.1 mm 厚的铝板减小了 34.77%, 所收到的超声信号的声压最大值是原信号的 65.22%。

Table 3. Simulation results of ultrasonic signal propagation attenuation in 0.5 mm aluminum foil

表 3. 超声信号在 0.5 mm 铝箔中传播衰减情况的仿真结果

	穿过铝板	不穿过铝板
最大声压幅值(MPa)	0.77	1.195

综上所述, 超声信号穿过 0.1mm 厚的铝板信号幅值的衰减是 13%, 穿过 0.5mm 厚的铝板信号幅值的衰减是 34.77%。铝板厚度增加以后, 局放超声信号穿过铝板产生的衰减增加。

3. 局放超声信号经过铝箔与绝缘纸的试验分析

3.1. 实验回路

3.1.1. 光纤 EFPI 局放超声传感系统

本文试验采用光纤 EFPI 传感器对超声信号进行采集, 该传感器具有信号幅值与声压呈正比的特点, 且能够捕捉声纹信息。光纤 EFPI 局放监测系统的组成部分包括光源、单模光纤、光环行器、传感器探头、放大器、示波器以及光电转换器等。EFPI 传感器是有绝缘支架, 光纤, 硅套管和硅膜共同组成[12] [13]。

传感器监测原理为: 光源向外发射出一种颜色的光, 顺着光纤进入 EFPI 传感器的头部, 入射光会在光纤的头部产生首次曲射, 有一部分的入射光会由硅膜反射后到达光纤, 剩余一大部分的入射光射到 FP 腔, 后经过硅膜的反射后, 将那一部分光反射到光纤。当外界的超声波振动信号在硅膜上作用时, 会引起传感器的探头的硅膜形状产生改变, 相位上, 由光纤的头部往光纤尾部反射的光和从硅膜反射回的光将产生改变[14]。光强 I 的表达式为

$$I = 2I_0R_0 \left(1 + \cos \left(\frac{4\pi n_0 l}{\lambda} \right) \right) \quad (3-1)$$

从上式可以看出, 干涉发生后的光强, 它的大小只与 EFPI 传感器的腔长有关, 调节 EFPI 传感器的腔长后, 在外界超声振动信号输出的光强将会有变化, 通过对光强分布情况的分析, 能够知道待测超声波的强弱分布, 继而通过示波器得到超声波的波形, 此波形就是所求局放超声信号的波形[15]。

3.1.2. 试验平台搭建

实验所用变压器的模拟油箱的规格是 2 m \times 1 m \times 1 m (对应长宽高), 使用 25 号变压器油填充油箱, 填充后油箱内的油面距箱底 0.8 m。局放模型采用针板波形, 该模型是由高压电极及低压电极均由黄铜制成, 针板间距为 0.5 cm, 在局放模型两侧距离均为 0.6 m 处放置两个光纤 EFPI 探头对超声信号进行检测。

3.2. 实验结果分析

1) 局放超声信号经过铝箔的衰减情况

在局放源的两端各放一个光纤传感器, 记为 1 号传感器和 2 号传感器, 而且这两个光纤传感器距离局放源都是 0.6 m, 2 号传感器和局放源中间放 10 层铝箔, 其中每一层铝箔厚 10 μm , 十层共计厚度为 0.1 mm。

使用示波器记下 1 号及 2 号光纤传感器所收到的由针板局放模型发出的超声信号，波形的改变如图 7 所示。

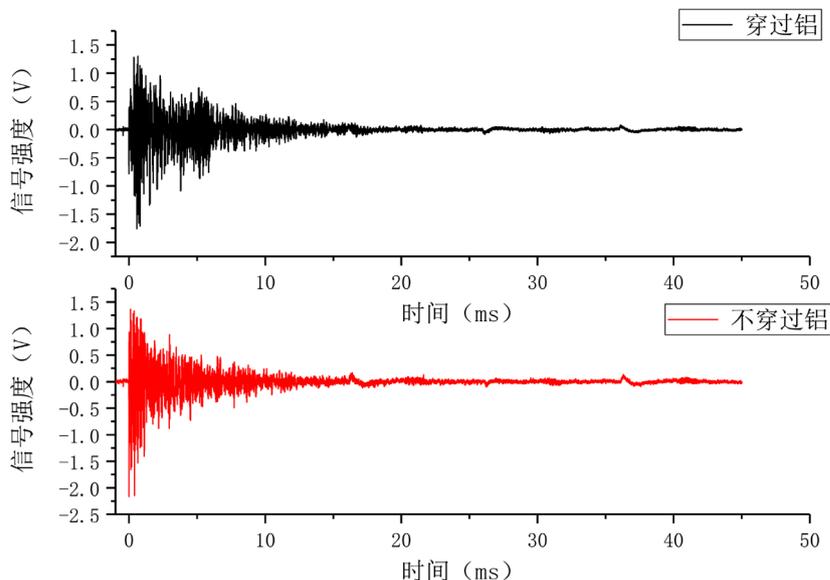


Figure 7. Waveform of ultrasonic wave propagating in aluminum foil
图 7. 超声波在铝箔中传播的波形

下面分析超声信号穿过 0.1 mm 铝箔后的衰减情况，表 4 是根据图 7 得出的超声信号穿过铝箔后的超声信号传播衰减情况的实验数据。

Table 4. Experimental results of ultrasonic signal propagation and attenuation in aluminum foil
表 4. 超声信号在铝箔中传播衰减情况的实验结果

	穿过铝	不穿过铝
信号强度(V)	1.762	2.254

因为光纤传感器在线性的区间工作，输出的电压和传感器收到的超声信号的最大值存在线性联系。超声信号穿过铝后，示波器收到的信号强度的最大值是 1.762 V，而超声信号不穿过铝，示波器收到的信号强度最大值是 2.254 V，因此实验得出局放超声信号穿过 0.1 mm 铝箔具有 21.8% 的衰减。

2) 局放超声信号经过绝缘纸的衰减情况

在局放源的两端各放一个光纤传感器，记为 1 号传感器和 2 号传感器，而且这两个光纤传感器到局放源的距离都是 0.6 m，在 2 号传感器与局放源之间放置 64 层绝缘纸，每层绝缘纸厚度为 70 μm，六十四层共计厚度为 4.48 mm。

使用示波器记下 1 号及 2 号光纤传感器所收到的由针板局部放电模型发出的超声信号。波形的变化如图 8 所示。

下面研究超声信号穿过 4.48 mm 的绝缘纸后产生的衰减，表 5 是根据图 8 所得到的超声信号穿过绝缘纸后的超声信号传播过程中的减小情况的实验数据。

超声信号穿过绝缘纸后，示波器所接收到的电压的最大值是 3.148 V，而超声信号不穿过绝缘纸，示波器所接收到的电压的最大值是 4.020 V，因此实验得到超声信号穿过 4.48 mm 的绝缘纸产生了 21.69% 的衰减。

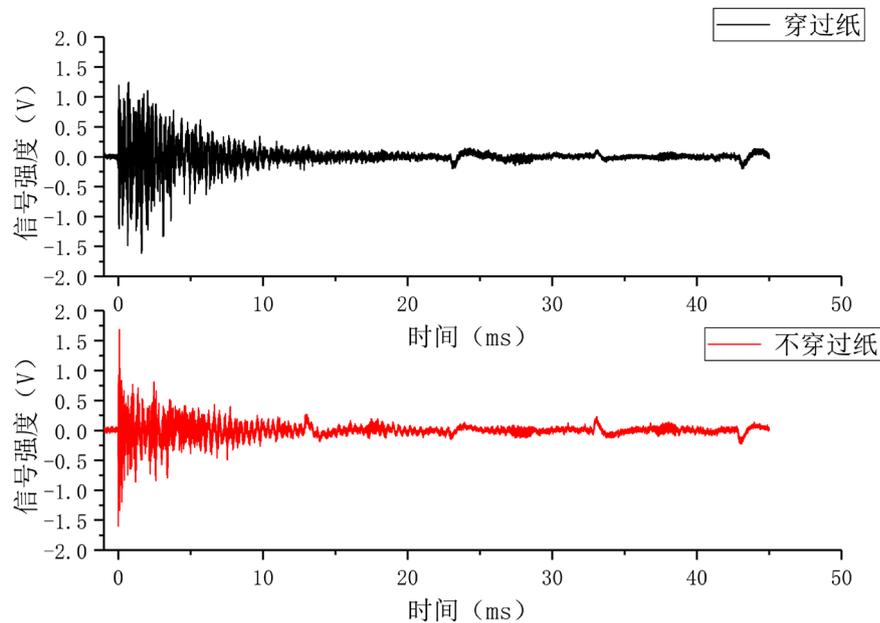


Figure 8. Waveform of ultrasonic wave propagating in insulating paper
图 8. 超声波在绝缘纸中传播的波形

Table 5. Experimental results of ultrasonic signal propagation and attenuation in insulating paper
表 5. 超声信号在绝缘纸中传播衰减情况的实验结果

	穿过绝缘纸	不穿过绝缘纸
信号强度(V)	3.148	4.020

超声信号穿过绝缘纸后，示波器所接收到的电压的最大值是 3.148 V，而超声信号不穿过绝缘纸，示波器所接收到的电压的最大值是 4.020 V，因此实验得到超声信号穿过 4.48 mm 的绝缘纸产生了 21.69% 的衰减。

3) 局放超声信号经过铝箔和绝缘纸的衰减情况

在局放源的两端各放一个光纤传感器，记为 1 号传感器和 2 号传感器，这两个光纤传感器到局放源的距离都是 0.6 m，在 2 号传感器和局放源中间放置铝箔及绝缘纸，每层铝箔厚 10 μm ，共计十层，厚 0.1 mm；每层绝缘纸厚 70 μm ，共计六十四层，厚 4.48 mm。

使用示波器记下 1 号及 2 号光纤传感器所收到的由针板局放模型发出的超声信号。波形的变化如图 9 所示。

下面分析超声信号穿过铝纸后产生的衰减情况，表 6 是根据图 9 所得到的超声信号穿过铝纸后的超声信号的衰减情况的实验数据。

超声信号穿过铝纸后示波器收到的信号强度最大值是 0.594 V，而超声信号不穿过铝纸示波器收到的信号强度的最大值是 1.463 V，因此实验得出超声信号经过铝纸产生了 59.4% 的衰减。

4. 结论

1) 通过在变压器油中对超声信号穿过十层 0.01 mm 或 0.05 mm 铝箔时的传播情况进行二维仿真研究，结果发现，当铝箔厚度会直接影响超声信号穿过铝箔时的衰减情况，电容芯子中铝箔厚度约为 0.01 mm，对超声信号影响较微弱。

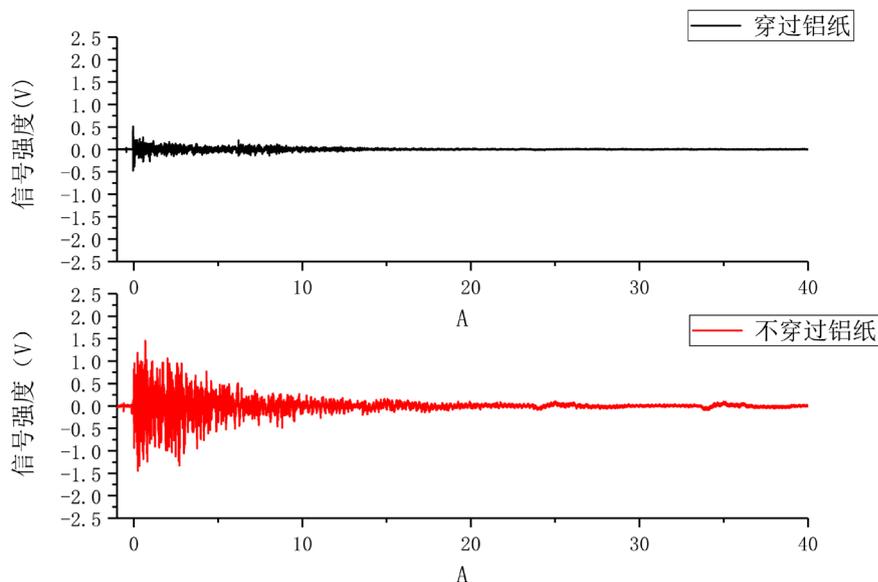


Figure 9. Ultrasonic wave propagation in aluminum paper
图 9. 超声波在铝纸中传播的波形

Table 6. Experimental results of ultrasonic signal propagation and attenuation in insulating paper
表 6. 超声信号在绝缘纸中传播衰减情况的实验结果

	穿过铝纸	不穿过铝纸
信号强度(V)	0.594	1.463

2) 根据 110 kV 变压器套管电容芯子结构, 制作了铝、绝缘纸、铝纸组合模型, 其中铝纸模型厚度约为 5 层电容芯子绝缘层总厚度。试验结果发现绝缘纸对超声信号的影响要远大于铝箔, 但超声信号通过 5 层绝缘层总厚度后仍能被检测, 因此利用光纤 EFPI 传感器对套管内部局放进行检测是可行的。

参考文献

- [1] 杜振波, 刘诣, 张连星, 等. 应用频域介电谱法的高压套管状态评估[J]. 电工电气, 2013(1): 38-41.
- [2] 张强, 李成榕, 刘齐, 郑书生, 高强, 于在明. 变压器升高座内部套管局部放电高频信号传播特征[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1332-1337.
- [3] Azirani, M.A., Ariannik, M., Werle, P. and Akbari, A. (2021) Optimal Frequency Selection for Detection of Partial Discharges in Power Transformers Using the UHF Measurement Technique. *Measurement*, **172**, Article ID: 108895. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108895>
- [4] 张春燕, 张映月, 滕俊, 盛吉, 商超, 王伟. 基于光纤超声传感器的油纸绝缘局部放电超声波信号特性试验研究[J]. 现代电力, 2016, 33(6): 56-63.
- [5] 吴良超, 汪茂光, 章文勋. 精确阻抗边界条件的推导[J]. 通信学报, 1996(3): 98-101.
- [6] Guillen, D., Idarraga-Ospina, G. and Mombello, E. (2014) Partial Discharge Location in Power Transformer Windings Using the Wavelet Laplace Function. *Electric Power Systems Research*, **111**, 71-77. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.02.007>
- [7] 杨宏. 大型变压器内局部放电激发超声波的机理及其传播特性研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.
- [8] 戴佳民. 油浸纸套管受潮缺陷劣化过程及诊断的研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [9] Taha, I.B.M., Dessouky, S.S., Ghaly, R.N.R. and Ghoneim, S.S.M. (2020) Enhanced Partial Discharge Location Determination for Transformer Insulating Oils Considering Allocations and Uncertainties of Acoustic Measurements. *Alexandria Engineering Journal*, **59**, 4759-4769. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.08.041>

-
- [10] 刘晓鸣. 基于有限元法的汽车消声器降噪性能仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2012.
 - [11] 鲍春燕. 汽车车内噪声数值仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2009.
 - [12] 高超飞, 刘旭, 王伟, 于雷, 商超. 变压器局放超声传播 FEM 仿真分析[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(10): 14-22.
 - [13] 王杨超, 杜家振, 高超飞, 宋树, 王伟. 基于 F-P 光纤超声传感器和概率神经网络的油中局部放电模式识别研究[J]. 高压电器, 2018, 54(4): 152-158.
 - [14] 王伟, 王赞, 吴延坤, 杜家振, 李富平. 用于油中局部放电检测的 Fabry-Perot 光纤超声传感技术[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 814-821.
 - [15] 吴俊锋. 局部放电信号经油纸绝缘套管向外传播特性及检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2016.