

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2026.03.001

梯度声学超材料增强的油纸绝缘局部放电声学检测方法

周俊杰, 吴治诚, 王少琦, 周春阳, 张乔根

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:油纸绝缘局部放电所激发的微弱声波检测是变压器状态监测的关键挑战, 现有高灵敏声传感方法因声波信噪比过低而受限。为此, 文中提出一种基于梯度声学超材料的绝缘油中声信号增强检测方法, 通过实现宽频带声波的压缩放大, 提升微弱声波的信噪比。文中采用30个直径按二次函数增大的圆板单元构建梯度声学超材料, 单元厚度为1 mm, 相邻单元间隙距离保持1 mm, 最小单元直径为5 mm, 最大单元直径为47.05 mm, 整体结构的最大尺寸小于6 cm。通过数值模拟计算该超材料的声压放大效果, 结果表明, 尽管超材料单元与绝缘油间有限的声阻抗差异降低了放大倍数, 但拓宽了放大带宽, 从而实现宽频带声信号的增强。在实验中, 将声传感器与超材料末端单元相结合, 兼顾窄间隙声场的检测需求与超材料结构的完整性, 并成功验证超材料在绝缘油中的声信号增强效果。测试结果显示, 该超材料在45~200 kHz范围内具有增益效果, 峰值增益可超3倍。针对针尖局部放电的实验结果表明, 该超材料能直接增强检测的声波峰值, 还能显著提升其在放大频段内的频率成分含量, 实现对局部放电信号的有效增强检测。文中将声学超材料应用于增强局部放电声学检测, 对局部放电的早期检测具有重要意义。

关键词:油浸式变压器; 油纸绝缘; 局部放电; 声传感; 梯度声学超材料; 声压放大; 频率特性

中图分类号: TM407

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2026)03-0002-09

0 引言

局部放电是导致油浸式变压器绝缘劣化乃至设备故障的重要诱因, 对其进行早期检测至关重要^[1-7]。声学检测技术因其抗电磁干扰能力强、适用于在线检测等特点, 在工程实践中展现出显著优势^[8-10]。然而, 变压器内部复杂结构会导致声波在传播过程中出现显著衰减, 使得传感器接收到的声信号微弱, 这已成为制约声学检测技术推广应用的瓶颈^[11-16]。因此, 开展变压器内部微弱放电声信号的高灵敏度检测方法研究, 具有重要现实意义。

针对局部放电产生的微弱声信号, 当前研究主要聚焦于提升传感器灵敏度。一方面, 通过优化敏感材料的掺改性、结构设计, 有效提高声传感器的机电转换效率和频率响应特性^[17-18]。另一方面, 基于光学原理的新型声传感技术因其优异的抗电磁干扰能力和本征高灵敏度而快速发展, 现有研究已实现纳米级的膜片振动分辨率^[19-20]。然而, 变压器工程现场的强噪声、机械振动等干扰会导致声信号的信噪比降低, 仅靠提升传感器灵敏度难以有效提升声信号的信噪比。

增强特定频率声波的声压, 为提升局部放电声信号的信噪比提供了新思路。声学超材料通过人工设计的亚波长结构, 能够突破传统材料的物理限

制, 实现对声波的高效调控与能量汇聚, 在声压放大方面展现出显著优势^[21]。其中, 梯度声学超材料可在特定频率产生声场局域化效应, 将声能高效集中至传感器的检测区域, 从而提升声学检测的灵敏度^[22-23]。目前, 梯度声学超材料已在发动机转子异常检测等领域取得初步应用, 学者们利用超材料对空气介质中齿轮故障产生的微弱声信号进行增强, 成功实现微弱故障声信号的检测^[24-25]。然而, 液体介质中的超材料增强特性尚不清楚^[26-27], 其在局部放电检测方面的研究也尚未开展。

尽管梯度声学超材料在声压增强方面展现出巨大潜力, 但其在局部放电声学检测中的应用仍面临挑战。首先, 现有研究中梯度声学超材料仅针对空气介质设计, 而绝缘油的声学特性与空气存在显著差异, 且绝缘油的高黏度会导致声波损耗增加, 这使得传统针对空气设计的超材料单元必须重新优化共振频率和阻抗匹配。其次, 局部放电激发的超声频段的脉冲声波与超材料常规设计的可听频段声场条件存在差异。综上所述, 梯度声学超材料在绝缘油环境中对局部放电激发声波的放大机制尚不明确, 需要针对绝缘油介质设计梯度声学超材料。

为此, 文中提出基于梯度声学超材料的变压器油中局部放电声信号增强检测方法。通过理论结构设计实现宽频微弱信号的有效放大与高信噪比感知。实验验证了超材料对脉冲声波的增强效果, 成功将声学超材料用于局部放电检测中。该方法

收稿日期: 2025-08-02; 修回日期: 2025-10-26

基金项目: 智能电网国家科技重大专项资助项目(2025ZD0807800)

不仅能实现宽带声信号的增强,还能显著提升传统声学检测技术的灵敏度和可靠性,对电力设备的状态运维具有重要应用价值。

1 梯度声学超材料理论设计

1.1 梯度声学超材料理论

梯度声学超材料凭借其独特的结构特性,能够实现显著的声压增益效应。声波在超材料中传播时会产生波长压缩效应,进而导致不同频率的声能选择性集中于超材料特定区域,实现局域声场的增强。对于包含流体介质的圆形板阵列结构,可将其等效为连续的有效介质。设沿阵列方向为 z 轴,沿圆半径方向为 r 轴,其 z 轴方向有效质量密度 ρ_z 、 r 轴方向有效质量密度 ρ_r 和体积模量 β ^[28]可以表示为:

$$\begin{cases} \rho_z = F_s \rho_s + (1 + F_s) \rho_m \\ \rho_r = \frac{\rho_s \rho_m}{(1 - F_s) \rho_s + F_s \rho_m} \\ \beta = \frac{\beta_s \beta_m}{(1 - F_s) \beta_s + F_s \beta_m} \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_s 为金属板填充比, $F_s = d/(g+d)$, d 为超材料单元的厚度, g 为间隙距离; ρ_s 为超材料中固体单元的密度; β_s 为超材料中固体单元的体积模量; β_m 、 ρ_m 分别为介质的体积模量和密度。

进而可以推导出超材料的有效折射率^[28]:

$$n_{\text{eff}}(z, f) = \sqrt{n_{\text{oil}} + \frac{\beta_m \rho_m}{\rho_s \beta} \tan^2 \left(r(z) f \pi \sqrt{\frac{\rho_z}{\beta}} \right)} \quad (2)$$

式中: n_{oil} 为绝缘油的折射率,其为介质中声速与绝缘油中声速的比值,即为1; f 为声波的频率; $r(z)$ 为超材料单元的宽度,是关于 z 轴的连续函数。由于不同方向的有效密度 ρ_r 与 ρ_z 差异显著,该超材料结构表现出高度的声学各向异性,导致声波沿传播方向的波矢量模值 k_z 较大。超材料的有效折射率为 $n_{\text{eff}} = k_z/k_m$,其中 k_m 为声波在介质中的波矢量模值。 n_{eff} 表征了波矢量与空气线的偏差,其不仅取决于恒定的有效材料参数,还取决于超材料波导的几何参数。因此,通过合理设计超材料的几何参数,可灵活调控并定制其有效折射率。

1.2 绝缘油中梯度声学超材料结构设计

考虑到径向对称性结构能够有效收集声波,且有助于实现等效折射率在介质中的平滑过渡,文中采用半径按二次函数规律变化的圆形板阵列构建声学超材料。基于加工便利性,选用不锈钢材料进行建模分析。由于不锈钢的声阻抗与陶瓷材料相近,所得结论可直接推广至陶瓷基等绝缘材料体系。所设计的超材料单元结构如图1所示,结构参数如表1所示。其中, r_n 为超材料半径, n 为超材料

单元序号。

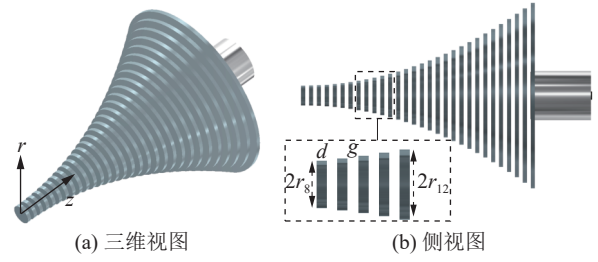


图1 梯度声学超材料的结构示意图

Fig.1 Structure schematic diagram of gradient acoustic metamaterial

表1 梯度声学超材料的结构参数

Table 1 Structural parameters of gradient acoustic metamaterial

序号	直径/mm	序号	直径/mm
1	5.00	16	16.25
2	5.05	17	17.80
3	5.20	18	19.45
4	5.45	19	21.20
5	5.80	20	23.05
6	6.25	21	25.00
7	6.80	22	27.05
8	7.45	23	29.20
9	8.20	24	31.45
10	9.05	25	33.80
11	10.00	26	36.25
12	11.05	27	38.80
13	12.20	28	41.45
14	13.45	29	44.20
15	14.80	30	47.05

如图1(a)及表1所示,所设计的超材料直径的变化函数为 $D=(0.05n^2-0.1n+5.05)$ mm。考虑到变压器的应用场景对结构紧凑性的要求,文中将超材料的最大尺寸控制在6 cm以内。如图1(b)所示,相邻单元之间的间隙距离 g 恒为1 mm,单元厚度 d 保持为1 mm,最小单元直径为5 mm,最大单元直径为47.05 mm。绝缘油介质的密度为 895 kg/m^3 ,体积模量为 1.755 GPa ,声学超材料单元的密度为 7900 kg/m^3 ,弹性模量为 200 GPa 。由于超材料的间隙距离很小,而液体中声传感器尺寸均在厘米量级,直接在间隙中提取声压面临较大困难。对此,文中将传感器集成至超材料结构中,在最后一个单元的中心开设与PAC R15 α 压电传感器的外形尺寸匹配的孔,将压电传感器插入后,使其传感面与超材料单元表面平齐,从而共同构成超材料的末端单元。通过该设计,压电传感器置于超材料的最后一个间隙处,实现对该位置局域声场的直接提取。

1.3 梯度声学超材料增益特性仿真计算

采用 COMSOL Multiphysics 6.2 软件中的压力声学模块及声固耦合模块,开展二维轴对称数值仿真。以超材料的中心为对称轴,计算区域设定为包含超材料结构的矩形区域。正对超材料起始单元的边界施加入射压力场,设恒定入射声压为 1 Pa,其他 3 个边界设置为完美匹配层,以消除声波反射。网格划分时,最大单元尺寸控制在最小声波波长的 1/5,通过稳态计算得到收敛的计算结果。在稳态背景声场条件下,对比两种情形下超材料的声压增益特性:采用超材料单元为理想介质,即声阻抗远大于绝缘油,此时超材料单元的边界设置为硬声场边界;采用不锈钢的实际声阻抗参数,通过声固耦合模块进行建模。图 2 展示了上述两种情况下超材料的声压增益与声波频率的关系。其中声压增益定义为超材料中声压幅值与自由空间中声压幅值的比值。

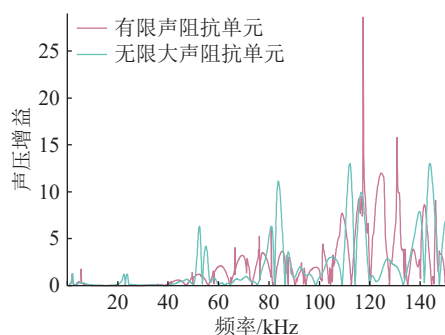


图 2 稳态声场下超材料的增益特性
Fig.2 Gain characteristics of acoustic metamaterial under steady-state acoustic field

如图 2 所示,在理想条件下,声波在 150 kHz 频率范围内,存在多个增益峰值,且随着声波频率的增加,增益倍数呈上升趋势,最大增益倍数可达数十倍。这是由于超材料在声波传播方向与垂直方向产生的声学各向异性,导致声波在局部区域被压缩并增强。然而,当介质与超材料结构的材料声阻抗差异较小时,即超材料单元声阻抗有限时,增益特性与频率的关系规律变得复杂,增益峰值的对应频率范围变窄,并且存在更多的频率峰值。由此可见,对于具有有限声阻抗的梯度声学超材料,需要进一步开展实验研究确定其声压增益。

考虑到局部放电产生的声信号为脉冲形式,有必要研究超材料对脉冲声波的增益响应特性。首先采用不同周期数的带汉宁窗的正弦函数模型,对单一频率的脉冲声信号进行仿真,计算得到脉冲声场激励下超材料的增益特性,结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看到,与稳态声场下的增益特性

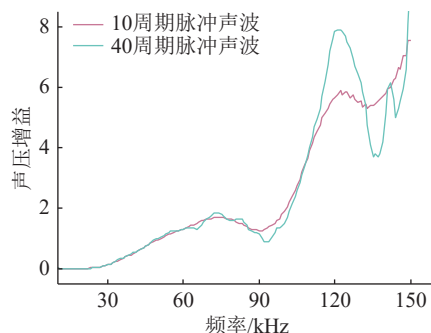


图 3 脉冲声场下超材料的增益特性
Fig.3 Gain characteristics of acoustic metamaterial under pulsed acoustic field

相比,超材料对脉冲声波的增益响应存在显著差异。首先,在 150 kHz 的宽频率范围内,超材料对脉冲声波均存在一定程度的增益。这主要是源于脉冲声波具有较宽的频谱分布,并非单一频率成分。此外,在该频段内存在两个声压增益峰值,分别位于 75 kHz 和 122 kHz 附近,最大增益峰值均出现在 122 kHz 附近。对于不同周期数的脉冲声波,超材料增益特性的变化趋势总体一致,仅在部分频率点处,40 周期脉冲声波的增益倍数大于 10 周期的声波,这表明随着声波持续时间的增加,声压增益也会升高。

为进一步分析上述现象,提取图 3 中不同周期数脉冲声波的增益峰值频率,并对其时域特性以及声场空间分布进行分析,其结果如图 4 和图 5 所示。

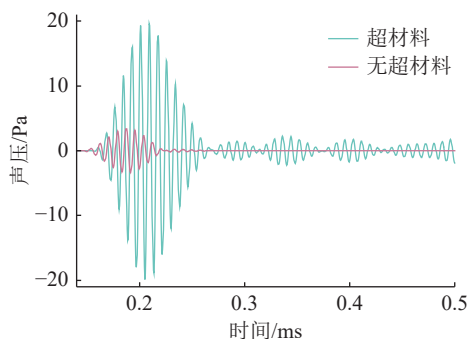


图 4 10 周期脉冲声波条件下增益峰值对应频率声波的时域波形及声场分布
Fig.4 Time domain waveforms and acoustic field distribution of the frequency corresponding to the peak gain under 10 cycle pulsed sound wave conditions

从图 4 和图 5 中可以看到,对于暂态声波,超材料对声场存在压缩放大效应,声波的峰值和持续时间均增大。这是因为声波在超材料结构中传播时等效声速降低,导致其在传播方向上发生时空压缩,从而延长持续时间并提升局部声压。同时,暂态声场的空间分布与稳态声场存在较大的差异,这可能是造成二者增益曲线差异的根本原因。声场

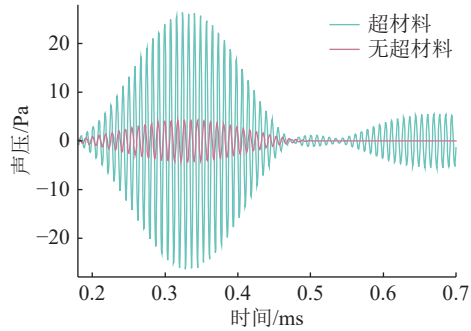


图5 40周期脉冲声波条件下增益峰值对应频率声波的时域波形及声场分布

Fig.5 Time domain waveforms and acoustic field distribution of the frequency corresponding to the peak gain under 40 cycle pulsed sound wave conditions

分布结果表明, 声波会透射有限阻抗的超材料, 部分能量因透射损耗而无法有效集中, 削弱了声场局域化能力, 进而导致声压增益降低。

基于理论计算, 进一步分析得到超材料对增益峰值位置及增益频率范围的影响。结果表明, 暂态声场下的增益特性与稳态声场下的增益特性差异较大。因此有必要通过实验手段对超材料的增益效果进行验证, 并与仿真结果对比, 以明确超材料对油中声波的增益特性。

2 梯度声学超材料增益特性实验

2.1 实验测试平台

为在绝缘油中对超材料进行测试并获得其声学增益特性, 需要设计相应的实验平台。该平台能够便捷地调控超材料和标准声源之间的距离、声波频率以及声波的周期数, 以获得频率增益曲线。所设计的实验平台如图6所示。

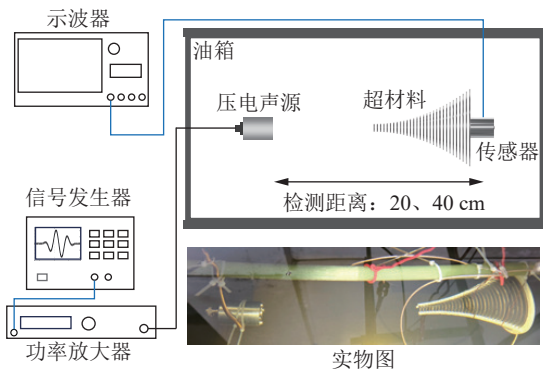


图6 绝缘油环境中声学超材料实验测试平台
Fig.6 Acoustic metamaterial experimental testing platform under insulating oil environment

此实验旨在量化超材料对声波的增益效应。在实际工程应用中, 该结构可通过变压器取油口等现有接口进行安装, 以保证可行性与安全性^[29]。如图6所示, 实验平台采用 AFG3022 信号发生器产生

特定中心频率的激励信号。该信号经功率放大器放大后, 驱动压电声源发射相应频率的声波。文中采用单频率不同周期数的汉宁窗发出信号作为声源激励, 以模拟局部放电产生的脉冲声波, 并有效区分实验腔体内部的折反射声波, 获得声波持续时间对声压增益的影响。在声信号检测环节, 选用 PAC R15 α 传感器, 并将其部署在超材料的末端单元。超材料的增益特性通过比值法获得: 首先, 在无超材料条件下, 测量 PAC R15 α 传感器对不同频率声波的初始响应。随后, 将超材料与传感器集成, 测量经过超材料调制后的增益响应。通过对比两组数据, 计算获得对应频率下的声压增益倍数。为确保实验结果的可靠性, 全程使用同一传感器, 并严格保持声源与传感器之间的距离不变, 从而有效排除传感器响应特性、实验腔体结构等外部因素的影响, 实现超材料增益的准确计算。

2.2 超材料声压增益特性

基于所搭建的实验平台, 对声学超材料的增益特性进行实验测试, 并研究不同检测位置对增益效果的影响。为排除传播距离和声波周期数的变化对声压增益的干扰, 选择 20 cm 和 40 cm 两个检测距离以及 40 周期和 10 周期两种脉冲声波, 所得声压增益曲线如图7和图8所示。

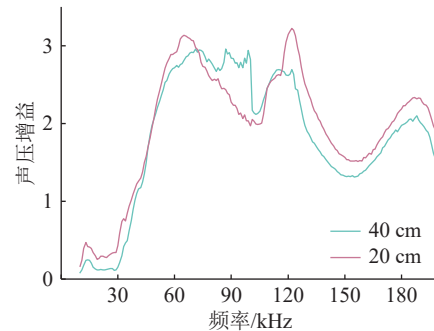


图7 梯度声学超材料对 10 周期脉冲声波的增益特性
Fig.7 Gain characteristics of gradient acoustic metamaterials for 10 cycle pulsed sound wave

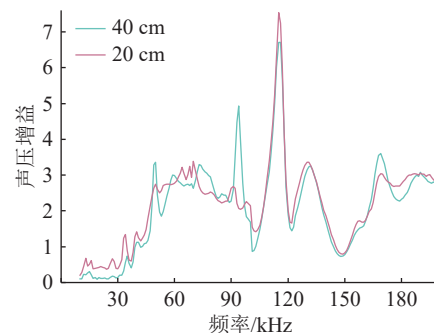


图8 梯度声学超材料对 40 周期脉冲声波的增益特性
Fig.8 Gain characteristics of gradient acoustic metamaterials for 40 cycle pulsed sound wave

如图7和图8所示, 该超材料在较宽频带内均

表现出增益效果,有效增益范围覆盖 45~200 kHz。总体而言,声波的增益幅值与频率相关,在 10 周期声波条件下,最大增益约为 3 倍;而在 40 周期声波条件下,出现幅值超过 7 倍的声压增益峰值。在不同的检测距离下,声波的增益变化较小,表明传播距离对超材料声压增益的影响较小。综合来看,对于两种不同周期的声波,实验测量得到的超材料增益曲线均在 118 kHz 处呈现明显的声压增益的峰值,且在 60~90 kHz 范围内持续存在增益。这一结果与图 3 中数值仿真所得的增益趋势高度吻合,实验结果与理论结果相互印证,验证了该超材料能够实现绝缘油中的声波增强。但是实验得到的增益倍数普遍低于理论预测值。这主要是因为数值计算中未考虑绝缘油的黏滞损耗。实际上,绝缘油本身具有较高的黏滞损耗,特别是在超材料的窄油隙中,这种损耗会进一步增大。此外,黏滞损耗随声波频率的升高而显著增加,导致高频段实验增益与理论计算的差异更为明显。

为进一步分析超材料对暂态声信号的时域调制作用,提取增益前后典型频率下的声波波形。分别以 10 周期脉冲声波下的频率增益峰值 122 kHz 和 40 周期脉冲声波下的频率增益峰值 118 kHz 为例,其时域波形对比如图 9 所示。

由图 9 可知,超材料对声波的增益并未改变其频率成分,主要表现为声波峰值的显著增加。在 10 周期和 40 周期脉冲声波中,时域波形均出现波形分离现象;且随着传播距离的增加,该分离效应更加显著。这可能是声波在有限介质超材料中的折反射引起的。随着传播距离增加,声波幅值因介质损耗而降低,从而导致分离现象也更显著。该结果也进一步证明声学超材料能够诱导声波局域化效应,从而增强声压峰值。

综上所述,通过采用特定频率的脉冲声信号,实验测得梯度声学超材料的频率增益特性。结果表明,该超材料在 45 kHz 以上的宽频范围内均存在声压增益。

3 梯度声学超材料对局部放电声波的增益

3.1 局部放电实验设置

为满足基于梯度声学超材料的变压器油中局部放电声信号增强实验的需求,搭建如图 10 所示的实验平台。该平台包括高压发生器和测量装置、绝缘油实验腔体、超材料增强声学检测系统以及局部放电电流检测模块。

实验采用 50 kV/25 kV·A 无电晕交流变压器提

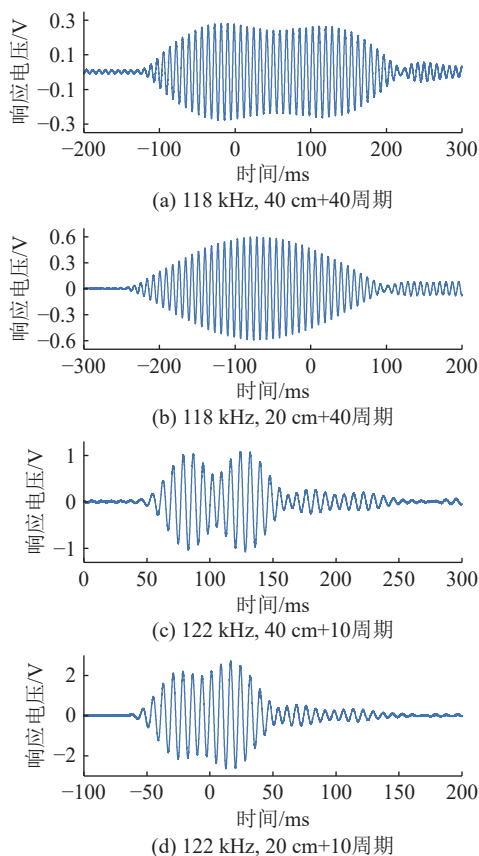


图 9 频率增益峰值对应的声波时域波形

Fig.9 The time domain waveforms of the sound wave corresponding to the peak frequency gain

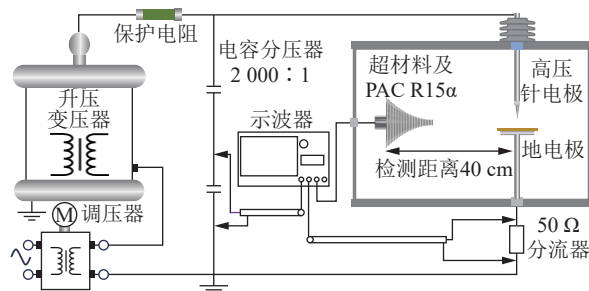


图 10 局部放电实验平台

Fig.10 Partial discharge experimental platform

供工频电压,并串联一个 1 MΩ 保护电阻以限制放电电流。为获得相同放电能量条件下的声压差异,文中通过计算局部放电的能量与对应声压的关系进行分析^[30]。局部放电能量通过对放电电压与放电电流乘积的积分获得。其中,放电电压由变比为 2 000 : 1 的电容分压器测量,放电电流通过 50 Ω 无感分流电阻采集。在相同外施电压条件下,分别采集有超材料和无超材料两种配置下的声波数据,每种工况记录 60 组正、负半周的局部放电数据,以获得统计结果。声学检测采用与超材料结合的 PAC R15α 传感器,并将其部署在超材料的末端单元,以获得最后一个间隙中的声波数据。绝缘材料介质

选用在实际变压器中广泛使用的 KI25X 变压器油。实验前,该油样经滤油器在 70 °C 下过滤、干燥并脱气处理 5 h,使其满足 IEC 60641—2007 标准对绝缘油性能的要求。局部放电模型采用针板电极结构,针尖曲率半径为 25 μm 。板电极为圆形,直径为 64 mm,厚度为 8 mm,倒角为 4 mm。为防止绝缘油在高电场下发生意外击穿损坏实验设备,在针板电极之间插入一片厚度为 1 mm、完全干燥的油浸魏德曼绝缘纸作为屏障。

3.2 局部放电声波幅值的增益

首先,在距局部放电声源 40 cm 处,使用 PAC R15 α 声传感器直接测量无超材料下的参考信号。随后,将超材料置于声传感器前端,保持传感器与放电声源的距离不变,以获得超材料增强的声学响应。声波峰值与对应放电能量的关系如图 11 所示。

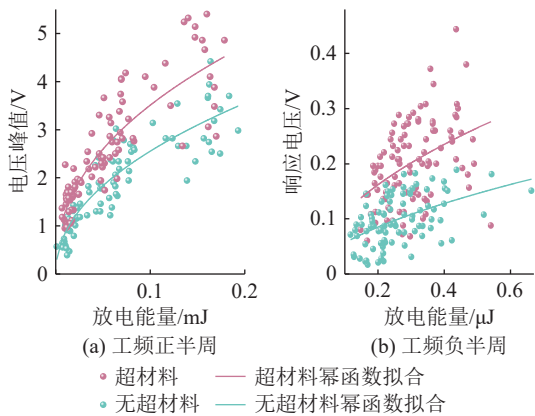


图 11 局部放电激发的声波峰值与放电能量的关系
Fig.11 The relationship between peak acoustic waves excited by partial discharge and discharge energy

如图 11 所示,在相同放电能量条件下,经超材料增强后,正、负半周局部放电所激发声波的声压峰值均高于无超材料中的对应值,表明梯度声学超材料能够直接提升声压峰值。通过对幂函数拟合曲线的对比分析发现,正半周放电声波的声压峰值增益约为 1.2 倍,而负半周放电的声压峰值增益可达 2 倍。这一差异主要源于正、负半周放电激发声波的频谱特性不同,负半周放电包含更多高频成分,其能量分布更接近传感器的谐振频率,从而在超材料增益频带内获得更强的响应。局部放电的实测结果表明传感器检测到的声压峰值因超材料的引入而显著提高。该实验证明将声学超材料的增益频率与检测传感器的谐振频率有效匹配,可显著提升局部放电声学传感检测的灵敏度,进而降低检测下限。

为进一步分析超材料对声信号时域特性的影

响,选取相同放电能量下的声波数据,对比超材料增强前后的局部放电声波时域波形,结果如图 12 所示。

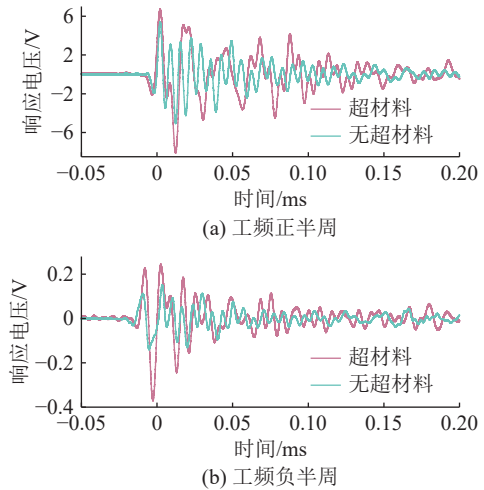


图 12 超材料增强前后的声波时域波形对比
Fig.12 Time domain waveforms comparison of sound waves before and after metamaterial enhancement

如图 12 所示,对于正、负半周的局部放电声波,引入超材料后,其首峰峰值均有所增大,而首峰的振荡周期与无超材料基本一致,表明超材料主要对声波的首峰峰值实现增强,即该峰值对应 PAC R15 α 传感器的谐振频率。而在首峰之后的后续振荡中,超材料增强条件下的声波振荡周期高于无超材料情况,表明超材料对低于传感器谐振频率的低频声波成分也有增强作用。

3.3 局部放电声波频率的增益

为进一步分析超材料对局部放电声波频率分布的影响,采用傅里叶变换得到有无超材料条件下的声波频率分布,结果如图 13 和图 14 所示。为了避免局部放电随机性对结果的影响,共采集并分析了 60 组独立放电事件的频率分布数据。

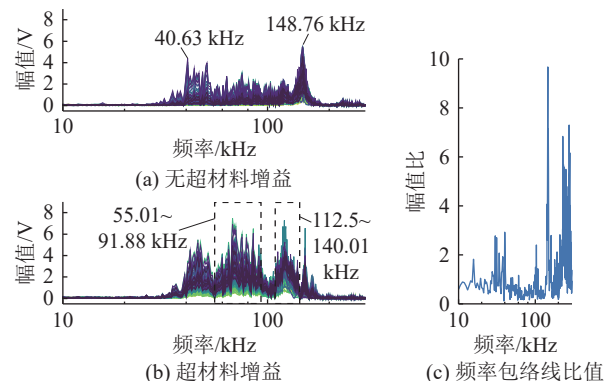


图 13 正半周局部放电声波的频率分布
Fig.13 Frequency distribution of partial discharge sound waves in the positive half cycle

如图 13 和图 14 所示,引入超材料后,声波在

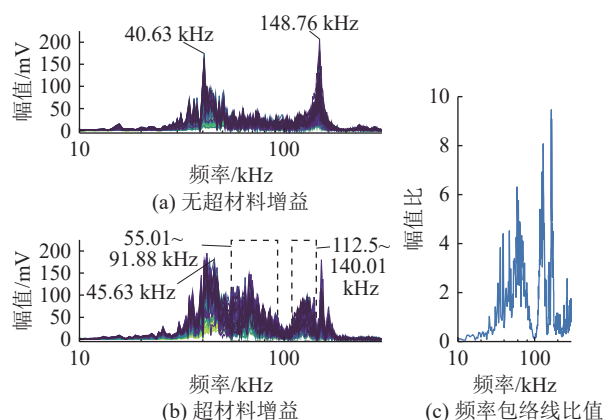


图 14 负半周局部放电声波的频率分布

Fig.14 Frequency distribution of partial discharge sound waves in the negative half cycle

约 150 kHz 处出现较大的频率峰值,这也是有超材料检测到的声波峰值大于无超材料条件下声波峰值的原因。此外,在无超材料条件下,声波的频率分布主要在 150 kHz 以及 40 kHz 附近,且频带较窄。而引入超材料后,声波在 55~92 kHz 和 112~140 kHz 两个频段均具有较高频谱幅值。通过对比频率包络线,可以得到不同频率的增益倍数。结果表明,在 100 kHz 以上频段存在增益峰值,最大增益可达约 9 倍。该结果与第 2 章中得到的超材料频率增益特性相近,证明了超材料能够在宽频范围内有效增强局部放电声波。后续研究可以采用与该增益频段相匹配的声传感器,从而能够进一步提升声学检测的灵敏度,并降低声学检测的下限。

4 结论

文中提出基于梯度声学超材料的声学检测增强方法,实现局部放电声波的放大,有效提升局部放电声学检测的信噪比。主要结论如下:

(1) 基于等效介质理论,设计最大尺寸小于 6 cm 的梯度声学超材料,并建立超材料仿真模型,得到稳态声场与脉冲声场下的理论声压增益倍数的频率特性。在稳态声场条件下,超材料在多个频率处呈现增益峰值,且增益倍数随频率的升高而增大。对于暂态声波,超材料在宽频率范围内均具有一定的增益能力,但最大增益倍数较低。此外,随着声波持续时间的增加,声压增益也会升高。

(2) 通过实验系统验证超材料对脉冲声波的频率增益特性。该超材料在 45~200 kHz 频段内均有增益效果,且在不同条件下频率增益曲线均在约 118 kHz 处出现明显的声压增益峰值。总体而言,声波的增益幅值较低,峰值增益仅为数倍。尽管如此,实验结果与理论计算在趋势和峰值频率位置上

高度吻合,两者相互印证。实验中高频声波的增益低于理论计算结果,主要是由于绝缘油中的声波损耗。

(3) 进一步开展了梯度声学超材料对局部放电声波的增益特性实验。采用 PAC R15 α 传感器时,梯度声学超材料显著提升了声波峰值,对正半周放电激发声波的增益约为 1.2 倍,对负半周放电声波的增益近 2 倍。频谱分析表明,经超材料增益后,声波频谱在 55~92 kHz 和 112~140 kHz 两个频段内的成分显著较高,实现了局部放电声波信号的宽频带增强。

参考文献:

- [1] WANI S A, SARATHI R, SUBRAMANIAN V. A multivariable sensing system for condition monitoring of oil-immersed transformers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(6): 9708-9717.
- [2] 周俊杰, 吴治诚, 张乔根, 等. 油纸绝缘层间气泡局部放电演化特性[J]. *高电压技术*, 2024, 50(5): 2217-2224.
ZHOU Junjie, WU Zhicheng, ZHANG Qiaogen, et al. Evolution characteristics of bubble partial discharge between oil paper insulation layers[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(5): 2217-2224.
- [3] 魏意恒, 杨丽君, 徐治仁, 等. “快速发展型”放电故障及其对油纸绝缘的损伤特性[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(4): 1020-1030.
WEI Yiheng, YANG Lijun, XU Zhiren, et al. The rapid-development-type discharge failure and its damage characteristics to oil-paper insulation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(4): 1020-1030.
- [4] 马富齐, 穆睿昕, 贾嵘, 等. 基于声光融合成像特征解析的电力设备局部放电精细识别方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(11): 51-62.
MA Fuqi, MU Ruixin, JIA Rong, et al. Refined identification method for partial discharge in power equipment based on acoustic-optical fusion imaging feature analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(11): 51-62.
- [5] 尚海昆, 张冉喆, 黄涛, 等. 基于 CEEMDAN-TQWT 方法的变压器局部放电信号降噪[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(1): 272-284.
SHANG Haikun, ZHANG Ranzhe, HUANG Tao, et al. Partial discharge signal denoising based on CEEMDAN-TQWT method for power transformers[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(1): 272-284.
- [6] 张晓琴, 朱洪斌, 杨延涛, 等. 局部放电电压及放电时长对油纸绝缘劣化性能的影响研究[J]. *高压电器*, 2025, 61(10): 30-38.
ZHANG Xiaoqin, ZHU Hongbin, YANG Yantao, et al. Research on impact of partial discharge voltage and duration on degradation of oil-paper insulation[J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(10): 30-38.
- [7] 朱涛, 陈理, 沈煜, 等. 真型变压器中典型悬浮缺陷的局部放电

- 特征[J]. 高压电器, 2025, 61(1): 173-180.
- ZHU Tao, CHEN Li, SHEN Yu, et al. Partial discharge characteristics of typical floating defects in full-size power transformer[J]. *High Voltage Apparatus*, 2025, 61(1): 173-180.
- [8] WU Z C, GUO Y R, ZHOU J J, et al. Optical sensing technology for acoustic detection of partial discharges: a review[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2024, 31(2): 591-606.
- [9] KWEON D J, CHIN S B, KWAK H R, et al. The analysis of ultrasonic signals by partial discharge and noise from the transformer[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(3): 1976-1983.
- [10] 张丽娜, 黄烽, 汪良杰, 等. 高灵敏硅凹槽膜片型光纤 F-P 局部放电超声传感器[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 2-9.
- ZHANG Lina, HUANG Yi, WANG Liangjie, et al. High sensitivity fiber optic F-P partial discharge ultrasonic sensor based on a grooved silicon diaphragm[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(5): 2-9.
- [11] 王玉龙, 张晓虹, 李丽丽, 等. 基于超声波声压衰减效应的局部放电源定位与强度标定[J]. 物理学报, 2021, 70(9): 305-314.
- WANG Yulong, ZHANG Xiaohong, LI Lili, et al. Localization and intensity calibration of partial discharge based on attenuation effect of ultrasonic sound pressure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(9): 305-314.
- [12] QIAN G C, WU K J, LEI J L, et al. Propagation characteristics of ultrasonic signals generated partial discharge in transformer oil[C]//2021 International Conference on Advanced Electrical Equipment and Reliable Operation (AEERO). Beijing, China. IEEE, 2022: 1-6.
- [13] 林智勇, 苏若杭, 黄国泰, 等. 基于等值老化容抗的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 140-147.
- LIN Zhiyong, SU Ruohang, HUANG Guotai, et al. Evaluation of the oil-paper insulation state of a transformer based on equivalent aging capacitance[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(3): 140-147.
- [14] 高超, 王志武, 冯玉辉, 等. 基于模拟退火法与多层感知机的变压器故障诊断模型及其泛化性能研究[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 77-85.
- GAO Chao, WANG Zhiwu, FENG Yuhui, et al. Fault diagnosis model of transformer and its generalization performance based on simulated annealing and multilayer perceptron[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(11): 77-85.
- [15] 容春艳, 胡诗尧, 李腾, 等. 高压内置型高阻抗变压器励磁涌流特性分析及工程计算[J]. 电测与仪表, 2025, 62(1): 217-224.
- RONG Chunyan, HU Shiyao, LI Teng, et al. Analysis and engineering calculation of excitation inrush current characteristics of high voltage built-in high impedance transformer[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(1): 217-224.
- [16] 刘庆珍, 张溢, 鄢仁武. 基于拉曼光谱数据处理和谱峰识别的变压器油绝缘老化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 158-166.
- LIU Qingzhen, ZHANG Yi, YAN Renwu. Transformer oil insulation aging based on Raman spectral data processing and peak identification[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(8): 158-166.
- [17] 袁燕岭, 高岭, 张占新, 等. 电缆局放检测用柔性压电超声传感器的灵敏度优化[J]. 高电压技术, 2025, 51(2): 652-659.
- YUAN Yanling, GAO Ling, ZHANG Zhanxin, et al. Sensitivity optimization of flexible piezoelectric ultrasonic sensor for cable partial discharge detection[J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(2): 652-659.
- [18] LI M, LAI K Y, WANG D T, et al. Interface-optimized piezoelectric tactile sensor with enhanced sensitivity for arterial pulse wave-enabled blood pressure monitoring[J]. *Applied Surface Science*, 2025, 708: 163690.
- [19] 丁伟, 傅海威, 王跃凯, 等. 非本征型法布里-珀罗光纤声波传感器结构与材料研究进展[J/OL]. 光通信技术: 1-14 [2025-06-20]. <https://link.cnki.net/urlid/45.1160.tn.20250508.0958.002>.
- DING Wei, FU Haiwei, WANG Yuekai, et al. Advances in structure and materials of extrinsic Fabry-Pérot fiber optic acoustic sensors[J/OL]. *Optical Communication Technology*: 1-14 [2025-06-20]. <https://link.cnki.net/urlid/45.1160.tn.20250508.0958.002>.
- [20] ZHAO P C, ZHAO C, SONG W, et al. Extrinsic F-P interferometric fiber ultrasonic sensor using two-photon polymerization 3D printing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 176: 111010.
- [21] 陈阿丽, 汪越胜, 王艳锋, 等. 声学/弹性相位梯度超表面设计: 原理、功能基元、可调和编码[J]. 力学进展, 2022, 52(4): 948-1011.
- CHEN ALi, WANG Yuesheng, WANG Yanfeng, et al. Design of acoustic/elastic phase gradient metasurfaces: principles, functional elements, tunability, and coding[J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(4): 948-1011.
- [22] CHEN T G, YU D J. A novel method for enhanced demodulation of bearing fault signals based on acoustic metamaterials[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(10): 6857-6864.
- [23] CHEN T G, JIAO J R, YU D J. Enhanced broadband acoustic sensing in gradient coiled metamaterials[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(8): 085501.
- [24] PAN H F, DING X X, QIAO H, et al. Metamaterial-based acoustic enhanced sensing for gearbox weak fault feature diagnosis[J]. *Smart Materials and Structures*, 2023, 32(10): 105034.
- [25] ZHAO X S, HAO G D, SHANG Y, et al. A crossed T-gradient metamaterial for enhanced acoustic sensing[J]. *Applied*

- Acoustics*, 2025, 227: 110209.
- [26] LEROY V, BRETAGNE A, FINK M, et al. Design and characterization of bubble phononic crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(17): 171904.
- [27] 陈庭贵. 基于梯度声学超材料的微弱故障信号增强检测方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022.
CHEN Tinggui. Research on weak fault signal enhancement detection method based on gradient acoustic metamaterials[D]. Changsha: Hunan University, 2022.
- [28] CHEN Y Y, LIU H J, REILLY M, et al. Enhanced acoustic sensing through wave compression and pressure amplification in anisotropic metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5247.
- [29] ZHANG X R, SHI M X, CAI J, et al. A novel partial discharge detection method for power transformers on site adopting its component as ultra-high frequency sensor[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(6): 2269-2271.
- [30] ZHOU J J, WU Z C, ZHU J H, et al. Electroacoustic transition of partial discharge in insulating oil: from the correlation of acoustic wave and discharge energy[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2024, 31(6): 3092-3099.

作者简介:



周俊杰

周俊杰(1999), 男, 博士, 研究方向为变压器绝缘状态声学诊断技术(E-mail: junjie_zhou_c@163.com);

吴治诚(1993), 男, 博士, 副教授, 研究方向为先进电工材料与先进传感技术;

王少琦(1995), 女, 博士, 研究方向为变压器多物理场模拟计算。

Acoustic detection method of partial discharge in oil-paper insulation enhanced by gradient acoustic metamaterial

ZHOU Junjie, WU Zhicheng, WANG Shaoqi, ZHOU Chunyang, ZHANG Qiaogen
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The detection of weak acoustic waves excited by partial discharge (PD) in oil-paper insulation is considered as a critical challenge in transformer condition monitoring, while existing high-sensitivity acoustic sensing methods are constrained by the low signal-to-noise ratio (SNR) of the acoustic waves. In this paper, an acoustic enhancement detection method based on gradient acoustic metamaterial (GAM) is proposed, achieving compression and amplification of broadband acoustic waves and providing a solution for improving the SNR of weak PD acoustic signals. The GAM is constructed using 30 circular plate units with diameters increasing according to a quadratic function. The thickness of each unit is 1 mm, the gap distance is 1 mm, the minimum diameter is 5 mm, and the maximum diameter is 47.05 mm, with the overall structure's maximum size being less than 6 cm. Numerical calculations of the acoustic pressure amplification effect of the GAM reveal that although the gain factor is reduced by the limited acoustic impedance difference between the GAM and the insulating oil, the amplification bandwidth is broadened, enabling the enhancement of broadband PD acoustic signals. By integrating the acoustic sensor with the end unit of the GAM, narrow-gap acoustic field detection and structural integrity of the GAM are simultaneously achieved, and the enhancement effect of the GAM in insulating oil is demonstrated experimentally. A gain effect is exhibited by the GAM in the frequency range of 45 kHz to 200 kHz, with a peak gain factor exceeding 3. Finally, the results of needle-tip PD show that the detected acoustic wave peak is directly enhanced by the GAM, and the frequency content within the GAM amplification band is significantly improved, thus achieving enhanced detection of PD acoustic waves. This study represents acoustic metamaterials to enhance acoustic detection, which is considered highly significant for the early detection of PD.

Keywords: oil-immersed transformer; oil-paper insulation; partial discharge (PD); acoustic sensing; gradient acoustic metamaterial (GAM); sound pressure amplification; frequency characteristics

(编辑 吴昊)