



外置油腔耦合局放超声非本征光纤法布里-珀罗传感器

陈起超, 赵洪, 张伟超

引用本文:

陈起超, 赵洪, 张伟超. 外置油腔耦合局放超声非本征光纤法布里-珀罗传感器[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(7): 1471-1479.

CHEN Qi-chao, ZHAO Hong, ZHANG Wei-chao. External oil cavity coupled with EFPI partial discharge ultrasonic detection sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(7): 1471-1479.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202807.1471>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

温度自补偿高灵敏度非本征光纤珐珀横向负载传感器

Transverse load sensor based on optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometer with high sensitivity and temperature self-compensation

光学精密工程. 2017, 25(6): 1433-1440 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172506.1433>

环氧树脂封装的EFPI-FBG复合压力温度传感器

EFPI-FBG composite pressure and temperature sensor embedded in epoxy resin

光学精密工程. 2019, 27(10): 2080-2088 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192710.2080>

双Fabry-Perot干涉腔型光纤声发射传感器

Fiber-optic acoustic emission sensors with dual Fabry-Perot interferometric cavities

光学精密工程. 2015, 23(11): 3069-3076 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152311.3069>

端面腐蚀的双法布里-珀罗光纤温度传感器

Double Fabry-Perot fiber optic temperature sensor based on end-face corrosion

光学精密工程. 2019, 27(4): 766-770 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192704.0766>

马赫-曾德尔干涉集成化的全光纤磁场与温度传感器

Mach-Zehnder interference all-fiber sensor for measurement of magnetic field and temperature

光学精密工程. 2018, 26(6): 1338-1345 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182606.1338>

文章编号 1004-924X(2020)07-1471-09

外置油腔耦合局放超声非本征光纤法布里-珀罗传感器

陈起超, 赵 洪, 张伟超*

(哈尔滨理工大学 电气与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:为解决非本征光纤法布里-珀罗(Extrinsic Fiber Fabry-Perot Interferometer, EFPI)在电力变压器内体绝缘安装困难且易损坏的问题,设计了高灵敏度的 EFPI 传感器,提出采用油腔结构的变压器油箱壁外置式安装方法。在阐述 EFPI 传感和液气介质下膜片振动原理的基础上,分析了传感器检测灵敏度与其法-珀腔膜片尺寸的关系,设计 EFPI 传感器法-珀腔膜片尺寸并制备传感器。然后,设计外置油腔耦合结构,采用压电陶瓷(Piezoelectric, PZT)声发射传感器构建 EFPI 传感器性能测试系统,测得 EFPI 传感器的幅频特性和检测灵敏度。最后,使用板-板电极和变压器实体模型搭建局放检测系统,外置 EFPI 传感器与 PZT 传感器同时探测电极局放信号。实验结果表明:EFPI 传感器的一阶固有谐振频率为 113 kHz,静压灵敏度为 7.5 nm/kPa,外置油腔耦合结构 EFPI 传感器局放超声信号的检测灵敏度高于传统的 PZT 传感器。外置结构可有效保护传感器膜片,降低安装难度,且避免了 EFPI 传感器置于变压器绝缘高场强度区域带来的安全隐患。

关键词:光纤传感器;法布里-珀罗传感器;局放超声检测;外置耦合;幅频特性

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202807.1471

External oil cavity coupled with EFPI partial discharge ultrasonic detection sensor

CHEN Qi-chao, ZHAO Hong, ZHANG Wei-chao*

(School of Electrical and Electronic Engineering,
Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

* Corresponding author, E-mail: weichaozhang@163.com

Abstract: Extrinsic fiber Fabry-Perot Interferometer (EFPI) sensors are difficult to install and can be damaged easily in the internal insulation of power transformers. To address this issue, a high-sensitivity EFPI sensor was designed in this study, following which an external method was proposed to install the EFPI with the oil cavity on the transformer tank. On the basis of the principle of EFPI sensors and diaphragm vibration in gas-solid media, the relationship between the EFPI detection sensitivity and its diaphragm size was first analyzed, following which the high-sensitivity sensor size was designed and manufactured. Subsequently, the cavity oil structure of the external installation was designed. The Piezoelectric ceramic Transducer (PZT) was used to build an EFPI testing system, using which the amplitude-frequency characteristics and detection sensitivity were analyzed. Finally, a

收稿日期:2019-12-23;修订日期:2020-01-06.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 51607049);黑龙江省普通高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. LGYC2018JC029)

board-to-board electrode and transformer model were employed to build a PD detection system, and the external EFPI and PZT sensors were enabled to detect the PD acoustic signals synchronously. The experimental results show that the first-order natural resonance frequency of the EFPI sensor is 113 kHz, and the static pressure sensitivity is 7.5 nm/kPa. Moreover, the external EFPI sensor is significantly more sensitive than the PZT sensor. The external EFPI structure is effective for ensuring protection of the sensing diaphragm, and its installation is considerably less difficult. Furthermore, potential risks are prevented when the EFPI sensor is placed in the high-voltage field strength area.

Key words: optical fiber sensor; Fabry-Perot sensor; partial discharge ultrasonic detection; external coupling; amplitude-frequency characteristics

1 引言

电力变压器中局部放电是危害绝缘安全的主要原因,极易引起运行事故造成巨大的经济损失,因此对局部放电现象的检测就显得尤为重要。通常情况下,局部放电的发生伴随有声、光、电及化学反应等现象,对局放超声信号的检测具有较高的实时性以及抗干扰性^[1]。检测局放超声信号较为常用的方法是使用压电陶瓷(Piezoelectric, PZT)声发射传感器,但 PZT 传感器为现场有源安装且依靠电信号作为信息的传输载体,极易受现场电力设备高电场和强磁场干扰^[2]。利用光纤声波传感器检测局放超声信号可有效避免上述问题,具有检测精度高、抗电磁干扰能力强和便于组成智能检测网络等优点^[3-4]。

在众多的光纤声波传感器中,非本征光纤法-珀干涉仪(Extrinsic Fiber Fabry-Perot Interferometer, EFPI)传感器在局放超声信号检测中获得广泛关注和研究,该类型传感器具有结构简单、体积小、频响高和检测灵敏等优点,非常适合于局放超声信号的检测^[5-6]。但是大部分 EFPI 传感器受限于其膜片材料及加工技术,传感器本身的检测灵敏度相对较低,无法有效检测到微弱的局放超声信号,这就极大地制约了 EFPI 传感器在局放检测中的应用及发展^[7-8]。鉴于大部分 EFPI 传感器的检测灵敏度相对较低,多数关于 EFPI 传感器局放超声信号检测的研究中,都将传感器本身置于油箱内部靠近局放多发的高压源附近来检测局放超声信号。这不仅限制了实际应用中 EFPI 传感器的安装和使用,同时由于 EFPI 传感

器法-珀腔的存在,其内部空气绝缘强度较低,在高场强区域极易产生局放,破坏传感器结构,危害变压器安全运行,并且对于大量已经投产运营的电力变压器,这种在内部安装 EFPI 传感器的方式也无法实现。因此,提高 EFPI 传感器的检测灵敏度,实现在油箱壁外侧安装 EFPI 传感器检测局放超声信号,才能促进 EFPI 传感器在实际应用中的发展。

本文分析了石英膜片固有谐振频率及灵敏度与 EFPI 传感器膜片有效约束半径之间的关系,结合传感器在变压器油中一阶固有谐振频率降低的情况,并根据局放超声信号的特点确定 EFPI 传感器的膜片有效约束半径,利用石英套管、石英毛细管及紫外固化胶制备获得具有较高检测灵敏度的 EFPI 传感器。为避免 EFPI 传感器在变压器内部安装的情况,针对该传感器的结构特点设计并制作可安装于油箱壁外部的耦合式油腔结构,将传感器固定安装在油腔内部对局放超声信号进行检测,检测灵敏度要明显高于传统的 PZT 传感器。

2 传感器设计及特性测试

2.1 传感器检测原理及结构设计

EFPI 传感器的法-珀腔由光纤尾纤端面与石英膜片平行放置组成,石英膜片的有效振动约束半径依靠石英套管内径确定,其结构如图 1 所示^[9]。由光源发出的光经光纤传输进入法-珀腔,在腔体内不断进行反射和折射,最终在腔的两侧发生干涉现象,形成相位差恒定、波长相同的相干光信号并由光纤输出^[10-11]。

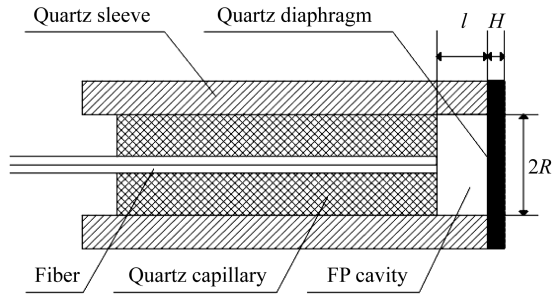


图 1 EFPI 传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of EFPI sensor

根据多光束干涉理论,法-珀腔的反射光输出光强为^[12]:

$$I(\lambda, l) = I_0(\lambda) \cdot \frac{R_1 + R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(4\pi n l / \lambda)}{1 + R_1 R_2 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cos(4\pi n l / \lambda)}, \quad (1)$$

其中: $I_0(\lambda)$ 为入射光光强; R_1, R_2 分别为尾纤端面与耦合膜片的反射率; l 为法-珀腔长; λ 为入射光波长; n 为腔内介质折射率,当介质为空气时 $n=1$ 。当局部放电产生的超声波作用于 EFPI 传感器膜片时,膜片受迫振动,法-珀腔的腔长发生改变,导致反射光输出光强发生变化,通过解调反射光输出的光强信号就可获得局放超声信号。

石英膜片作为局放超声信号与光信号的换能元件,其振动灵敏度与固有谐振频率决定了 EFPI 传感器的检测灵敏度,因此对膜片尺寸的分析研究就显得尤为重要^[13-14]。石英膜片的结构尺寸直接影响其静压灵敏度和谐振频率,四周完全约束的圆形石英膜片的一阶固有谐振频率为:

$$f = \frac{10.21}{2\pi} \sqrt{\frac{Eg}{(1-\nu^2)\rho}} \cdot \frac{H}{R^2} = 14.84 \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2)\rho}} \cdot \frac{H}{R^2}, \quad (2)$$

其中:石英的杨氏模量 $E=73.73 \text{ GPa}$;泊松比 $\nu=0.17$;密度 $\rho=2210 \text{ kg/m}^3$; H 为膜片厚度; R 为圆形膜片有效半径; f 为频率; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

根据 EFPI 传感器的工作原理,法-珀腔的腔长变化只与膜片的中心位移有关,膜片圆心处的静压灵敏度为:

$$S = \frac{3(1-\nu^2)}{16E} \cdot \frac{R^4}{H^3} = 2.47 \times 10^{-6} \frac{R^4}{H^3}, \quad (3)$$

式中 S 为静压灵敏度。

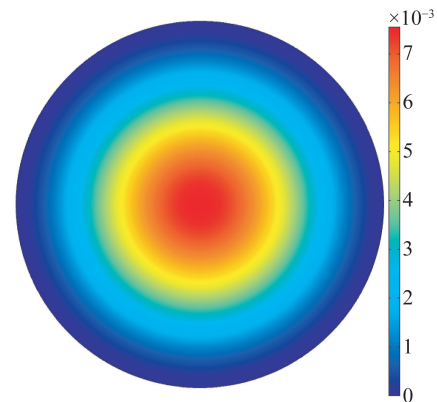
根据式(2)、式(3)可以得出结论,当膜片所选择的材料和固有谐振频率确定后, R/H 越大,则在相同声压作用下膜片形变越大,即在已经确定膜片固有谐振频率后,越薄的膜片静压灵敏度越高;同时通过上述公式可以发现,相对于增大膜片半径以提高膜片静压灵敏度获得的收益要明显小于减少膜片厚度而带来的收益^[15]。

公式(2)是计算膜片完全暴露在空气介质中的固有谐振频率,在实际应用 EFPI 传感器检测局放超声信号时,传感器膜片内侧面与密闭法-珀腔中的空气介质接触,而传感器膜片外侧面与变压器油接触^[16],此时膜片的固有谐振频率为:

$$f = \frac{10.21}{2\pi} \sqrt{\frac{Eg}{(1+\mu)(1-\nu^2)\rho}} \cdot \frac{H}{R^2}, \quad (4)$$

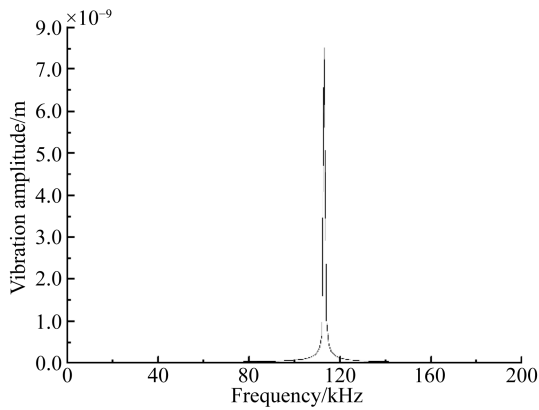
式中: $\mu=0.6689 \frac{\rho_{\text{oil}} R}{\rho_{\text{Si}}}$, ρ_{oil} 为变压器油密度, ρ_{Si} 为石英膜片密度, 0.6689 是变压器油液体与膜片耦合作用时的附加质量系数。

目前,用于局放超声信号检测的传感器响应频带一般在 $100 \sim 200 \text{ kHz}$ 之间,根据上述理论分析可知,石英膜片越薄且约束半径越大则其静压灵敏度越高,同时其一阶固有谐振频率也会相应降低。受限于实际加工技术,本文所用石英膜片厚度为 $30 \mu\text{m}$,有效约束半径为 0.55 mm 。利用 COMSOL 有限元软件,计算获得膜片振动位移分布云图及幅频特性曲线,结果如图 2 所示。该结构尺寸下膜片的一阶固有谐振频率为 113 kHz ,静压灵敏度为 7.5 nm/kPa 。



(a)单位应力下膜片位移分布

(a) Displacement distribution of diaphragm in unit stress



(b) 幅频特性曲线

(b) Amplitude-frequency characteristic curve

图 2 仿真计算结果

Fig. 2 Simulation calculation results

2.2 传感器制备及其解调系统

根据公式(1)分析可知,EFPI 传感器为获得较好的调制光谱和干涉条纹精细度,需将石英膜片内表面和光纤端面镀 50% 的反射膜,石英膜片及传感器实物如图 3 所示。

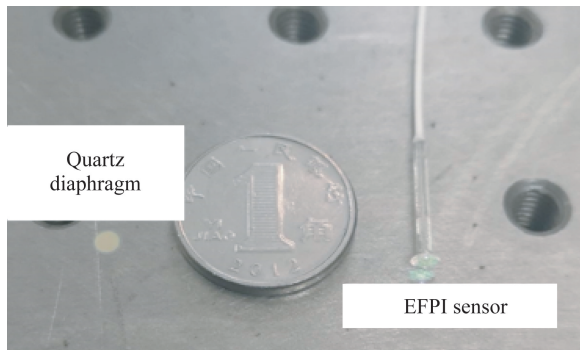


图 3 EFPI 传感器实物图

Fig. 3 Photo of EFPI sensor

在传感器制作过程中,首先将石英膜片与石英套管之间利用紫外固化胶固定,石英套管内侧直径为 1.1 mm;然后将光纤尾纤插入内径为 126 μm 、外径为 1.1mm 的石英毛细管中,利用紫外固化胶固定后将它放入石英套管内;最后,使用光学三轴微动仪将法-珀腔腔长调节到 40 μm 后,使用紫外固化胶进行封装固定,获得的 EFPI 传感器干涉光谱如图 4 所示。

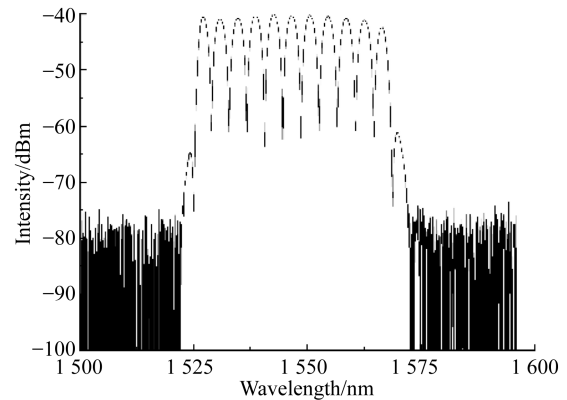


图 4 EFPI 传感器的干涉光谱

Fig. 4 Interference spectrum of EFPI sensor

使用 EFPI 传感器对局放超声信号进行检测时,传统方法是传感器安装在变压器内部。为了在变压器内部安装 EFPI 传感器,不仅需要在变压器设计时对主体结构件进行优化,同时在生产变压器时更需要额外增加固定支撑结构,极大地增加了变压器的生产难度和成本;当变压器入网运行时内部电场较高,但 EFPI 传感器的腔体介质为空气,其绝缘强度相对较低,极易因周围高场强而诱发 EFPI 传感器本体发生局放,危害变压器运行;EFPI 传感器脆弱的前端膜片,在变压器内部复杂的运行环境下更是非常容易破损,而其内部安装的情况则会导致其破损后无法更换。为解决上述问题,设计可安装 EFPI 传感器的外置油腔结构,局放超声信号经过变压器油箱壁后,通过外置油腔结构中的变压器油耦合作用到 EFPI 传感器上,该结构示意图如图 5 所示。外置油腔结构内表面为抛物面,与变压器油箱壁之间使用环氧胶固定,该油腔结构进深为 32.3 mm、焦点为 5 mm、口径为 40 mm,EFPI 传感器由可调节支架固定在腔体内,整体结构采用 3D 打印技术制作而成,材料为光敏树脂。

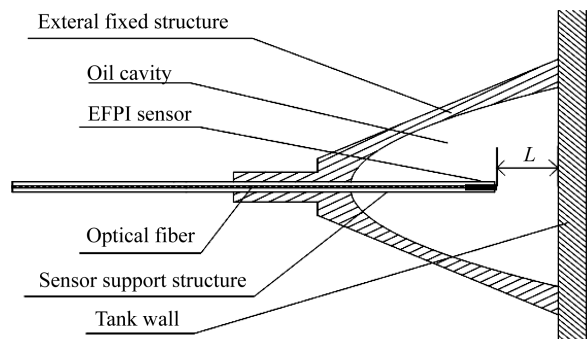


图 5 外置油腔结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of external oil cavity

该 EFPI 传感器的解调系统采用正交强度解调,使用光源为 3 dB、带宽为 0.01 pm 的窄线宽分布式反馈(Distributed Feedback Laser,DFB)激光器,该 DFB 激光器的中心工作波长为 1 550 nm,输出光强为 21.31 mW。当油腔中油的温度发生变化时,EFPI 传感器的静态工作点发生变化,因此使用 PID 闭环控制电路为 DFB 激光器供电,实时调节 DFB 激光器的中心工作波长,实现静态工作点的动态追踪,消除由环境温度变化引起的静态工作点改变对 EFPI 传感器的影响^[17]。光电转换器为 THORLABS 公司生产的 PDA10CS-EC-钢镓探针探测器,其检测带宽为 0~17 MHz;使用工作波长为 1 550 nm、分光比为 50:50 的 1分2耦合器连接上述光学器件。该解调系统的工作流程如图 6 所示。

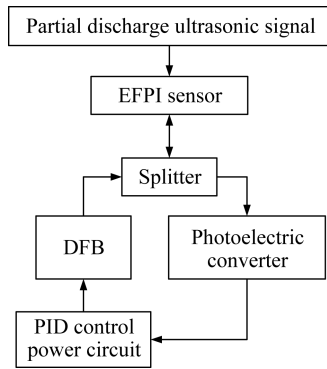


图 6 解调系统的工作流程

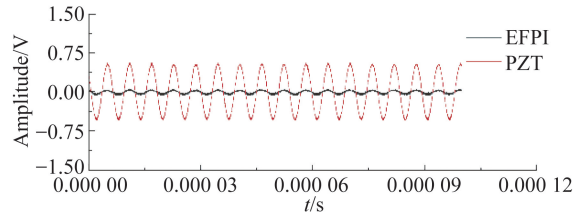
Fig. 6 Work flow of demodulation system

2.3 传感器测试

利用两支 SR15 型 PZT 传感器对 EFPI 传感器进行灵敏度及幅频特性测试^[18],将其中一支 PZT 传感器作为驱动声源固定在油箱中,EFPI 传感器与另一支 PZT 传感器同时接收超声信号进行对比。使用数字信号发生器为声源 PZT 传感器提供 100 mV 的驱动电信号,该信号的扫频范围为 20~300 kHz,步长为 1 kHz。

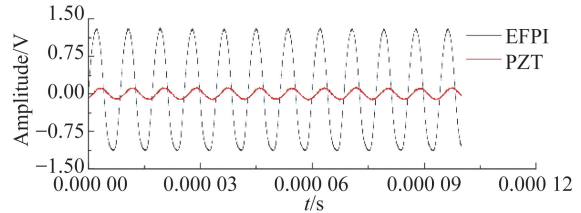
在对比 EFPI 传感器与 PZT 传感器检测灵敏度时,分别选取两支传感器在各自谐振频率下的输出信号幅值进行对比。图 7(a)为 PZT 传感器在谐振频率时输出信号峰-峰值与 EFPI 传感器输出信号峰-峰值的对比情况,PZT 传感器的最大输出信号峰-峰值为 1.10 V,图 7(b)为 EFPI 传感器在谐振频率时输出信号峰-峰值与 PZT 传感器输出信号峰-峰值的对比情况,EFPI 传感器的

最大输出信号峰-峰值为 2.52 V。



(a)PZT 谐振频率时传感器灵敏度对比

(a)Comparison of sensor sensitivity at PZT resonance frequency



(b)EFPI 谐振频率时传感器灵敏度对比

(b)Comparison of sensor sensitivity at EFPI resonance frequency

图 7 EFPI 和 PZT 传感器检测灵敏度对比结果

Fig. 7 Comparison of detection sensitivity between EFPI and PZT sensors

使用示波器记录两种传感器在不同频率下的输出信号峰-峰值,得到两种传感器的幅频特性曲线,结果如图 8 所示。PZT 传感器的谐振频率为 169 kHz,EFPI 传感器的谐振频率为 113 kHz,其结果与仿真计算结果一致。

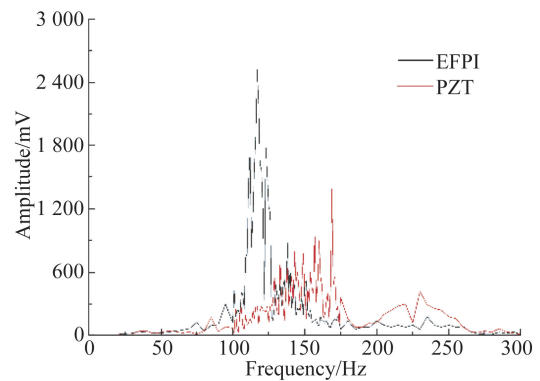


图 8 幅频特性曲线

Fig. 8 Amplitude-frequency characteristic curves

EFPI 传感器安装在外置油腔结构内时,超声信号经油箱壁传播到油腔内,作用于石英膜片上,此时油箱壁相当于液-固-液声耦合结构,油腔内声压受此耦合结构及外置固定结构的共同作用,其分布规律与一般情况有所不同。将外置油腔结

构及 EFPI 传感器安装好后,使用 PZT 传感器作为声源,由数字信号发生器为其提供频率为 113 kHz,输出幅值为 100 mV 的电信号,调节 EFPI 传感器支撑结构改变石英膜片与油箱壁之间的距离 L ,通过示波器记录 EFPI 传感器输出信号峰-峰值随距离 L 变化的关系,结果如图 9 所示。

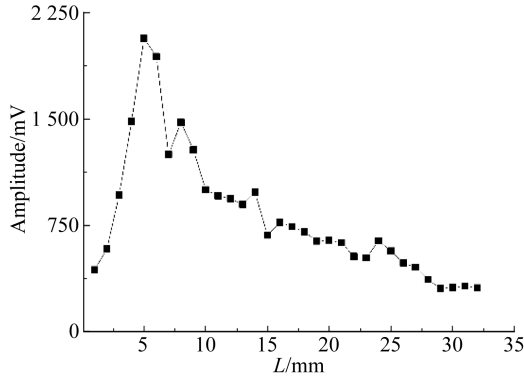


图 9 传感器输出信号峰-峰值与距离的关系

Fig. 9 Variation of sensor output signal peak-to-peak with distances

在声源固定位置及输出强度基本不变的情况下,EFPI 传感器的检测灵敏度有所下降,这是由于 EFPI 传感器由油箱内部安装到油箱外部后,声波在传播过程中经过油箱壁,在液-固分界面处传播时,由于液-固之间声阻抗不匹配,由公式(5)可知,声波进入固体介质时会有一定的衰减且声阻抗相差越大,衰减越明显:

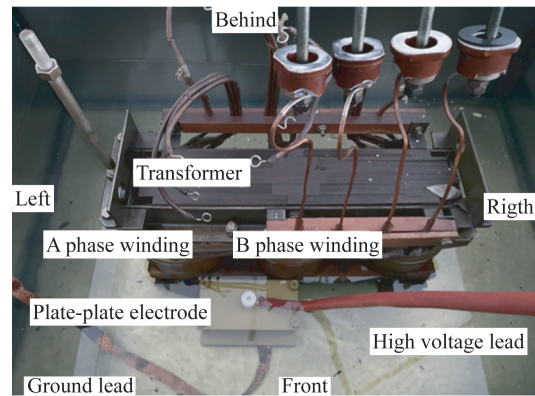
$$\frac{P_t}{P_0} = 1 / \sqrt{1 + \frac{1}{4}(m-1/m)^2 \sin^2 \frac{2\pi d}{\lambda}}, \quad (5)$$

式中: P_0 为声波经变压器油传入油箱内表面时的声压, P_t 为声波经箱壁传递后外壁的最终压强, m 为变压器油和铁箱壁之间的声阻抗之比, d 为箱壁厚度, λ 为声波在箱壁中的波长。根据式(5)可知声阻抗之间的差异对声压有显著影响。

传感器石英膜片与油箱壁距离为 5 mm 时,输出信号最强,根据文献[19]可知,EFPI 传感器测得的声压强度即传感器输出信号幅值,随传感器石英膜片与油箱壁间距离 L 的增加先增加后减小,存在一个响应最强点。当距离 L 为 27 mm 时,传感器石英膜片处在油腔抛物面焦点,此时根据抛物面聚焦原理分析,传感器输出幅值应该得到较大增强,在实验过程中并未增强的原因是光敏树脂材料与变压器油的声阻抗率相差较小,声波反射强度低,同时受传感器石英膜片及支撑结构的影响反射声波无法全部聚焦。

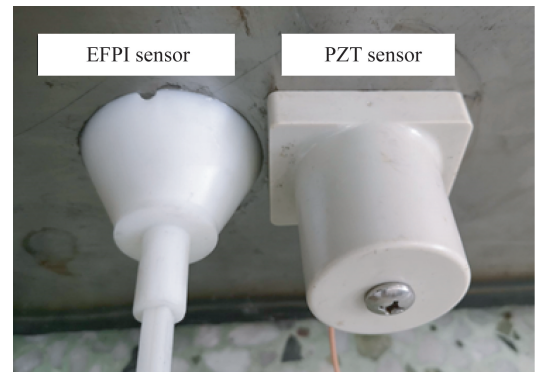
3 实验

搭建以板-板电极放电系统为测试对象的实验平台,为达到模拟实际情况下局放超声信号的传播过程,在油箱中心位置放入 80 kVA 油浸自冷式变压器模型,板-板电极靠近 A 相及 B 相中间位置,实验平台模型如图 10(a)所示。保持板-板电极位置不变,选取油箱前后左右 4 个壁中部靠下位置的 4 个检测点,进行 4 次局放实验,外置油腔耦合 EFPI 传感器与 PZT 传感器紧邻安装以保证接收到的局放超声信号强度基本一致,通过检测结果对比传感器灵敏度,传感器安装示意图如图 10(b)所示。



(a)局放模型

(a)Partial discharge model



(b)传感器安装示意图

(b)Sensor installation diagram

图 10 局放测试平台

Fig. 10 Partial discharge test platform

外置油腔耦合 EFPI 传感器安装固定好后,接入解调系统,将解调系统输出的电信号输入到示波器^[20];PZT 传感器与信号隔离器及 40 dB 信

号放大器相连,将输出的电信号输入到示波器。

实验平台进行升压,当升压变压器加压到一定电压后,板-板电极发生局部放电现象,局部放电所产生的超声波信号分别被 EFPI 传感器和 PZT 传感器检测到。两种传感器安装在油箱后壁时,检测到的局放超声信号如图 11 所示。

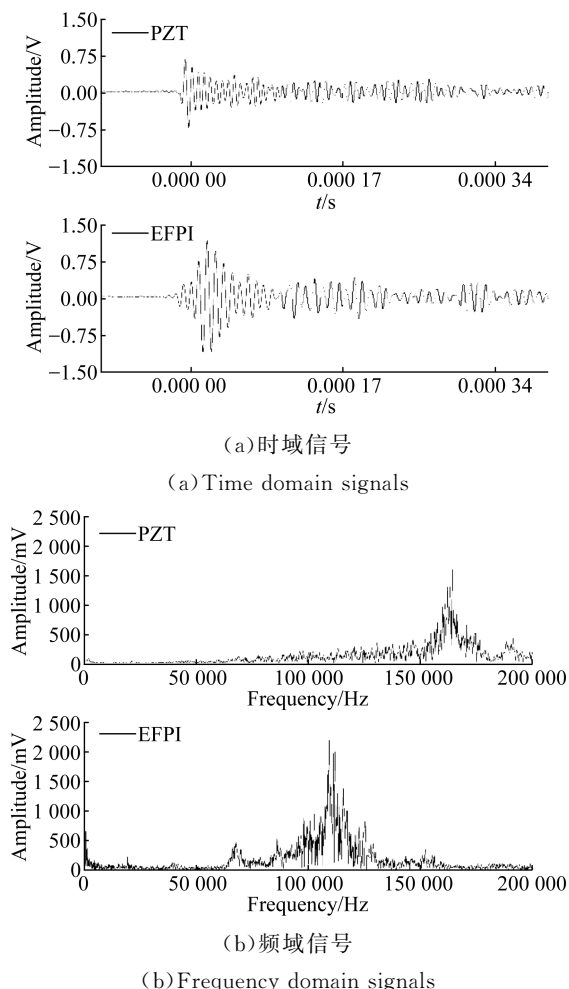


图 11 传感器安装在油箱后壁时检测到的局放超声信号
Fig. 11 Partial discharge ultrasonic signals detected by sensor installed on rear wall of tank

通过检测结果可以发现,EFPI 传感器输出信号最大峰-峰值到达 2 V,而 PZT 传感器输出信号最大峰-峰值不到 1.5 V,由此可见,EFPI 传感器检测灵敏度明显高于 PZT 传感器,同时也可以发现在较为真实的局放超声信号传播环境下,EFPI 传感器能够更好地检测到局放超声信号。

为全面地测试 EFPI 传感器的检测性能,在板-板电极位置以及传感器安装方法不变的情况下,分别在油箱的左壁、右壁和前壁进行了三组局

放实验,实验检测结果如图 12 所示。

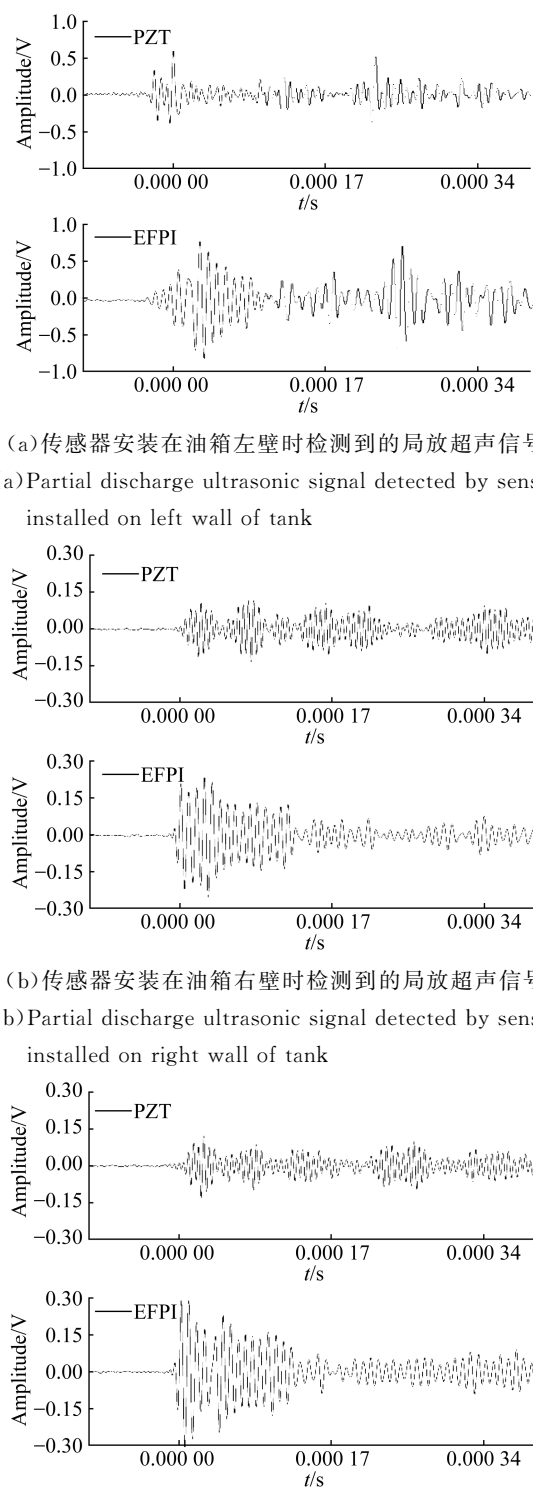


图 12 局放超声信号
Fig. 12 Partial discharge ultrasound signals

通过以上多组实验发现,外置油腔耦合的 EFPI 传感器不仅能够检测到局放超声信号,而且其检测灵敏度要明显高于 PZT 传感器。

4 结 论

本文针对 EFPI 传感器在液体绝缘内局放超声信号检测应用中固有谐振频率降低的问题,分析了液-气复合介质下传感膜片振动规律,设计并制作石英膜片的有效约束直径为 1.1 mm,厚度为

30 μm ,固有谐振频率为 113 kHz,静压灵敏度为 7.5 nm/kPa 的全石英结构 EFPI 传感器。另外,针对变压器内部恶劣的运行环境下极易导致传感器法-珀腔空气介质发生局放和膜片破损,危害变压器安全运行,提出并制作了可安装 EFPI 传感器的外置油腔耦合结构。利用板-板电极作为局放源,并使用 80 kVA 油浸式变压器作为声障碍物模拟局放超声信号传播过程,以 PZT 传感器作为对比,检测外置油腔耦合 EFPI 传感器的检测,实验结果表明,该传感器检测灵敏度明显高于 PZT 传感器。

参考文献:

- [1] 王昌长,李福祺,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
WANG CH CH, LI F Q, GAO SH Y. *On-line Monitoring and Diagnosis for Power Equipment* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 赵洪,李敏,王萍萍,等. 用于液体介质中局放声测的非本征光纤法珀传感器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 59-63.
ZHAO H, LI M, WANG P P, *et al.*. Extrinsic fiber fabry-perot sensors for PD-induced acoustic emission detection in liquid dielectrics [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(22): 59-63. (in Chinese)
- [3] DENG J D, XIAO H, HUO W, *et al.*. Optical fiber sensor-based detection of partial discharges in power transformers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(5): 305-311.
- [4] 黄俊,文溢,姜飞,等. 光纤 F-P 腔传感器特性研究[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(4): 68-70.
HUANG J, WEN Y, JIANG F, *et al.*. Research on characteristics of optical fiber F-P cavity sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technology*, 2017, 36(4): 68-70. (in Chinese)
- [5] 张伟超,赵洪,楚雄. 基于非本征光纤法布里—珀罗干涉仪的局放声发射传感器设计[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 1-8.
ZHANG W CH, ZHAO H, CHU X. Partial discharge acoustic emission sensor design based on discharge acoustic emission sensor design based on extrinsic fiber Fabry-Perot interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 1-8. (in Chinese)
- [6] 郭少朋,韩立,徐鲁宁,等. 光纤传感器在局部放电检测中的研究进展综述[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(3): 47-53, 80.
GUO SH P, HAN L, XU L N, *et al.*. Review of research on fiber optic sensors for partial discharge detection [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2016, 35(3): 47-53, 80. (in Chinese)
- [7] FU C Z, SI W R, LI H Y, *et al.*. A novel high-performance beam-supported membrane structure with enhanced design flexibility for partial discharge detection [J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 593.
- [8] SI W R, FU C Z, LI D L, *et al.*. Directional sensitivity of a MEMS-based fiber-optic extrinsic Fabry-Perot ultrasonic sensor for partial discharge detection [J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1975.
- [9] 皮本熙,曹旭,聂德鑫,等. 光纤 F-P 局部放电检测传感器优化设计[J]. 变压器, 2018, 55(5): 39-43.
PI B X, CAO X, NIE D X, *et al.*. Optimum design of F-P optical fiber sensor PD detecting [J]. *Transformer*, 2018, 55(5): 39-43. (in Chinese)
- [10] 冯文林,彭进,余佳浩,等. 端面腐蚀的双法布里—珀罗光纤温度传感器[J]. 光学精密工程, 2019, 27(4): 766-770.
FENG W L, PENG J, YU J H, *et al.*. Double Fabry-Pérot fiber optic temperature sensor based on end-face corrosion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4): 766-770. (in Chinese)
- [11] 刘明尧,杜常饶,武育斌. 环氧树脂封装的 EFPI-FBG 复合压力温度传感器[J]. 光学精密工程, 2019, 27(10): 2080-2088.
LIU M R, DU CH R, WU Y B. EFPI-FBG composite pressure and temperature sensor embedded in epoxy resin [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(10): 2080-2088. (in Chinese)
- [12] 赵洪,李敏,张影,等. 非本征法珀型超声传感器输出信号的特征[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6): 1018-1024.
ZHAO H, LI M, ZHANG Y, *et al.*. Characteristics of output signal of extrinsic fiber Fabry-Perot

- acoustic sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6): 1018-1024. (in Chinese)
- [13] 王伟, 王赞, 吴延坤, 等. 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.
WANG W, WANG Z, WU Y K, *et al.*. Fabry-Perot optical fiber ultrasonic sensing technology for detection of partial discharge in the oil [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(3): 814-821. (in Chinese)
- [14] LI H Y, LI D L, XIONG CH Y, *et al.*. Low-cost, high-performance fiber optic fabry-perot sensor for ultrasonic wave detection [J]. *Sensors*, 2019, 19(2): 406.
- [15] 张映月, 张春燕, 顾进, 等. 变压器局放检测光纤超声传感器优化设计与分析[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(1): 71-78.
ZHANG Y Y, ZHANG CH Y, GU J, *et al.*. Optimal design and analysis of EFPI sensor in transformer partial discharge detection [J]. *Power System and Clean Energy*, 2017, 33(1): 71-78. (in Chinese)
- [16] 王学会, 张伟超, 赵洪, 等. 液体绝缘对光纤法布里-珀罗局放超声传感器特性参数影响[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 80-88.
WANG X H, ZHANG W CH, ZHAO H, *et al.*. Impact of liquid insulation on characteristic parameters of fiber fabry-perot partial discharge induced ultrasound sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 80-88. (in Chinese)
- [17] 张伟超. 液-固复合绝缘局放声发射光纤传感检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
ZHANG W CH. *Optical Fiber Sensing Detection Technology for Partial Discharge Acoustic Emission in Liquid-solid Composite Insulation* [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [18] MA J, XUAN H F, HO H L, *et al.*. Fiber-optic Fabry-Pérot acoustic sensor with multilayer graphene diaphragm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(10): 932-935.
- [19] 张伟超, 董青青, 赵洪, 等. 液-固复合介质对光纤法-珀局部放电超声响应强度影响分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2230-2238.
ZHANG W CH, DONG Q Q, ZHAO H, *et al.*. Impact of liquid-solid composite medium on fiber Fabry-Perot Response induced by ultrasound from partial discharge [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(10): 2230-2238. (in Chinese)
- [20] 陈家键, 胡慧珠, 缪立军, 等. 双频激光干涉三自由度微振动测量系统[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1435-1443.
CHEN J J, HU H ZH, MIAO L J, *et al.*. Three-degree-of-freedom micro-vibration measurement system based on dual-frequency laser interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 27(7): 1435-1443. (in Chinese)

作者简介:



陈起超(1988—),男,黑龙江绥化人,博士研究生,2011年、2015年于哈尔滨理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事电力设备绝缘检测方面的研究。
E-mail: qichaochen@hrbust.edu.cn

导师简介:



赵洪(1955—),男,黑龙江黑河人,博士,教授,1982年于哈尔滨电工学院获得学士学位,1987年、1996年于西安交通大学分别获得硕士、博士学位,主要从事聚合物绝缘理论及相关测试技术方面的研究。E-mail: hongzhao@hrbust.edu.cn

通讯作者:



张伟超(1984—),男,黑龙江鹤岗人,博士,副教授,2006年、2010年、2015年于哈尔滨理工大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事电力设备绝缘检测,光纤传感技术等方面的研究。
E-mail: weichaozhang@163.com