第 50 卷 第 11 期：4981-4989 高电压技术 Vol.50, No.11: 4981-4989
2024 年 11 月 30 日 High Voltage Engineering November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231783

基于 EFPI 膜片纳米级振幅识别的电晕放电检测

周朕蕊[1,2]，张国强[1,2]，邱宗甲[1]，张　萌[1]，李　群[3]，郝宝欣[3]
（1. 中国科学院电工研究所，北京 100190；2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院，南京 211102）

摘　要：为检测微弱局部放电，评估局部放电严重程度，提出了基于声敏感膜片纳米级振幅解调的光纤非本征型法布里-珀罗(extrinsic Fabry-Perot interferometric，EFPI)超声传感器电晕放电检测的新方法。首先，结合理论分析，设计制作了共振频率为 55.5 kHz 的 EFPI 探头。然后，研究了可解调纳米级膜片振幅的相位生成载波-反正切算法。基于 EFPI 探头和相位生成载波-反正切算法搭建 EFPI 超声传感器，并采用单点声源与点火脉冲发生器对传感器进行标定。EFPI 超声传感器对膜片振幅的分辨率不低于 0.43 nm，具有良好的响应线性度与超声信号检测能力。最后，将 EFPI 探头内置于电晕放电试验装置，实现 13.86 pC 局放量的检测。同时，结合 Bootstrap 小样本分析法建立膜片振幅与电晕放电发展情况的联系。试验结果表明：膜片振幅大小随放电电压呈指数增长，与局放量随电压变化的趋势相似，即膜片振幅大小与电晕放电严重程度相关。

关键词：电晕放电；法布里-珀罗超声传感器；相位生成载波-反正切解调法；膜片振幅；小样本分析

Corona Discharge Detection Based on Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Diaphragm Nanoscale Amplitude Recognition

ZHOU Zhenrui[1,2], ZHANG Guoqiang[1,2], QIU Zongjia[1], ZHANG Meng[1], LI Qun[3], HAO Baoxin[3]
(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract：To detect weak partial discharges and evaluate the severity of partial discharge, a novel corona discharge detection method based on acoustic-sensitive diaphragm nanoscale amplitude demodulation for an optical fiber extrinsic Fabry-Perot (EFPI) ultrasonic sensor was proposed. Firstly, an EFPI probe with a resonance frequency of 55.5 kHz was designed based on theoretical analysis. Then, the phase generated carrier arc-tangent algorithm(PGC-Atan) was investigated to demodulate the weak amplitude of the diaphragm. The EFPI ultrasonic sensor was constructed based on the EFPI and PGC-Atan algorithm, and its performances were verified by a single-point sound source and ignition pulse generator. The resolution of the EFPI ultrasonic sensor to the amplitude of the diaphragm can reach 0.43 nm, and it has good linearity of response and ultrasonic signal detection ability. Finally, the EFPI was installed into the experimental device to detect the air corona discharge, and 13.86 pC partial discharge magnitude was achieved. The relationship between the diaphragm amplitude and the corona discharge development was established by Bootstrap small sample analysis. The experimental results indicate that the amplitude of the diaphragm increases exponentially with the discharge voltage, which is similar to the variation trend of the partial discharge magnitude with the voltage. The amplitude of the diaphragm is related to the severity of corona discharge.

Key words：corona discharge; Fabry-Perot ultrasonic sensor; PGC-Atan algorithm; diaphragm amplitude; small sample analysis

0　引言

局部放电是气体绝缘电气设备中常见的一种绝缘故障，可从声、光、热、化学、机械等角度进行监测，以评估气体绝缘电气设备的运行状态。当气体绝缘电气设备发生局部放电时，放电空间迅速升温，气体受热迅速膨胀，压强增大，引起放电空间中的气体振动，从而产生超声波。传统的超声波法采用压电陶瓷传感器贴于电气设备外壳，检测由

基金资助项目：国家重点研发计划(2022YFF0708402)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2022YFF0708402).

设备内部传输至外壳的超声波信号，易受环境与电磁干扰，且超声波传播过程中衰减快。

近年来，光学检测技术以其灵敏度高、抗电磁干扰能力强、响应速度快等优点受到电力行业的关注。光学超声检测技术采用光纤传感器检测局部放电产生的超声波信号，传感器件可选用光纤迈克尔逊传感器、光纤马赫增德尔传感器、光纤法珀传感器、光纤布拉格光栅等等。2018 年，司文荣等综述了各类光纤传感器对局部放电超声波信号的检测能力[1]，其中非本征型光纤法珀(extrinsic Fabry-Perot interferometric，EFPI)传感器的灵敏度、稳定性与定位能力最佳。EFPI 超声传感器在本世纪初就被用于局部放电检测[2-3]，至今仍受到广泛关注[4-6]。

EFPI 超声传感器发展至今，研究者们不断根据局放监测需求改进 EFPI 结构，以提高 EFPI 的局放检测能力与环境适应性。2008 年，Dong Bo 等通过侧孔光纤对 F-P 腔进行抽真空并充入 0.3 MPa SF_6 气体，保证 EFPI 正常工作于电力设备内部高压环境[7]。2020 年，张宇帅等设计了一种全石英激光焊接、F-P 腔侧开孔结构的 EFPI，降低了环境温度与压力对 EFPI 性能的影响，可在距局放源 25 cm 处检测到变压器油中局部放电，并取得了较好的实用效果[8]。2021 年，陈起超设计了一种抛物面聚声结构的 EFPI 传感器，可外置贴合于变压器油箱壁上检测局放超声信号[9]。Li Haoyong 等将 EFPI 的膜片置于菲涅尔声透镜的焦点处，使得 EFPI 灵敏度提升了 7.8 dB 且频带变窄，有利于提取单一频率局放超声信号并消除其他频率信号的干扰[10]。另一方面，基于 EFPI 超声传感器的局放定位、多参量传感、放电模式识别等技术也在发展。2015 年，郭少朋在变压器内进行 3 支 EFPI 局放定位试验，纵向测距定位精度可达 1~2 mm[11]。2018 年，高超飞等设计了 4 元 EFPI 阵列，结合多信号分类等算法对变压器绕组局放进行空间多角度测向定位[12-13]。2021 年，张知先等采用多频 EFPI 传感器阵列提高了局部放电检测的灵敏度与精度，并采用多参量 EFPI 传感器实现了变压器油中 52.78 pC 的局放量测量与油温传感[14-15]。韩世杰等采用 EFPI 检测 GIS 绝缘缺陷模型放电产生的超声信号，并结合波形特征提取单次脉冲特征参数对 4 种局放类型进行模式识别[16]。

本文从检测微弱电晕放电并评估放电严重程度的角度出发，提出了一种基于 EFPI 超声传感器的电晕放电检测方法。检测微弱放电的关键在于 EFPI 可响应微弱声压和后续信号处理能分辨 EFPI 的微弱振动。本文设计制作了可内置于电力设备的 EFPI，其共振频率处于试验装置电晕放电频谱分布较强区间；并研究了可检测纳米级 EFPI 膜片振幅的相位生成载波-反正切解调(phase generated carrier arctangent，PGC-Atan)法。空气电晕放电检测试验结果表明，本文搭建的 EFPI 超声传感器可响应起晕时的微弱超声信号，此时局放量为 13.86 pC。结合 Bootstrap 法对电晕放电检测结果统计分析发现，EFPI 膜片振幅与放电电压呈指数关系，膜片振幅的增大预示着放电严重程度的增强。

1 光纤法珀超声传感器

1.1 EFPI 超声传感原理

EFPI 超声传感器原理图如图 1 所示。光源发出的光经环形器进入 EFPI，在光纤端面一部分光发生反射回到光纤中，另一部分光折射进入 F-P 腔，于声敏感膜片上再次反射并耦合回到光纤中，与第 1 束反射光发生干涉。当外界超声信号引起 EFPI 的声敏感膜片振动，光纤端面与声敏感膜片之间形成的 F-P 腔腔长发生变化，导致干涉光光程差的变化。

干涉光经环形器进入信号处理系统，由光谱仪等光谱分析器件或者光电探测器结合上位机提取干涉信号的强度、波长、相位等信息，对超声信息进行解调。EFPI 超声传感器的主流解调方法是工作点控制法[17-18]，该方法属于强度解调，其原理是根据干涉光强的近似线性区间直接解调相对腔长，响应速度快，线性范围内灵敏度高，适用于声波检测，但工作点易受温度影响发生漂移。相位解调法中，移相法[19]被证实对高频动态信号有良好的解调效果，但多路光源控制难度较大。相位生成载波算法具有动态范围大、线性度良好、灵敏度与精度高等优点，适用于长腔长 EFPI 动态信号检测，但该算法解调频率上限受光源调制频率范围等因素限制[20-23]。

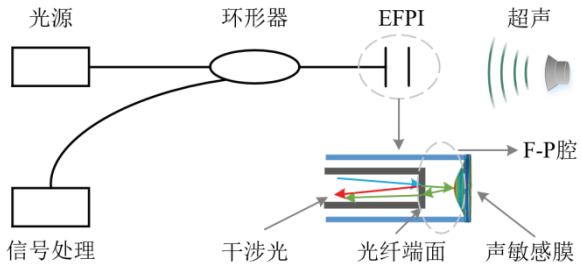


图 1 EFPI 超声传感器原理图

Fig.1 Schematic of EFPI ultrasonic sensor

1.2 EFPI 超声传感器探头制作

1.2.1 声敏感膜片振动性能理论分析

EFPI 中，膜片的有效约束半径 r 与厚度 h 之间满足 $h\leq 2r/5$ 时，膜片可视为力学中的薄板。根据弹性力学[24]，四周固定的膜片的 1 阶自由振动频率 f_1、压强响应灵敏度 y 与受迫振动下中心点位移 η 可由式(1)—式(3)计算得出：

$$f_1=\frac{3.2^2 h}{4\pi r^2}\sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\mu^2)}} \tag{1}$$

$$y=\frac{3(1-\mu^2)r^4}{16Eh^3} \tag{2}$$

$$\eta=\frac{3p(1-\mu^2)r^4}{16Eh^3}\cdot\frac{\omega_p^2}{\sqrt{(\omega_p^2-\omega_f^2)^2+\omega_f^2(R_e/\rho h)^2}} \tag{3}$$

式中：E 为膜片材料的杨氏模量；ρ 为材料的密度；μ 为材料的泊松比；p 为施加于膜片上的声压；ω_p 为声压的振动角频率；ω_f 为膜片的自由振动频率；R_e 为膜片振动过程中的集中阻尼系数。

根据式(1)与(2)可知，当膜片的材料确定后，膜片的 1 阶自由振动频率与 h/r^2 成正比，且适当减小 h 并增大 r，可提高膜片的压强响应灵敏度。旭硝子超薄浮法玻璃为目前可直接采购到的超薄玻璃，其厚度 h=30 μm，泊松比 μ=0.221±0.001，密度 $\rho=2.5\times10^3$ kg/m^3，杨氏模量 $E=72.5\times10^9$ Pa。将浮法玻璃膜片参数代入式(1)与式(2)，绘制如图 2 所示的有效约束半径与 1 阶自由振动频率和压强响应灵敏度之间的关系曲线。

根据式(3)可知，外施声压的频率越接近膜片的自由振动频率时，膜片的振幅越大，EFPI 对外施声压响应的灵敏度越高。因此，为提高 EFPI 超声传感器对局部放电的检测能力，需将膜片的自由振动频率匹配在设备局部放电超声频谱的较强分布范围内。受结构、环境等因素影响，不同设备的局部放电超声频谱分布不同。采用 R15α型号压电陶瓷超声传感器(piezoelectric ceramic transducer，PZT)测得常温常压下试验设备空气中电晕放电频谱主要集中在 40~60 kHz，因此膜片的 1 阶自由振动频率优选在该频率范围。根据式(1)计算的该频率范围对应的有效约束半径范围是 1.14~1.39 mm。

1.2.2 EFPI 超声传感器探头结构设计

EFPI 超声传感器用于内置式检测电力设备局部放电，因此探头各部件材料须采用绝缘材料。为减小温度对 F-P 腔腔长的影响，各部件材料的热膨胀系数须相等或相近。综合考虑，EFPI 探头各部件选用玻璃和石英材质，生产厂家所给的电气性能参数与热膨胀系数如表 1 所示。由此可知，EFPI 探头具有良好的绝缘耐压性能，在本试验环境下可正常工作，但必须经本质安全封装才可使用[25]。

本文设计的 EFPI 超声传感器结构图如图 3 所示。其中光纤插芯材质为石英，外径为 2.8 mm。套筒材质为硼硅玻璃，其内径为 2.82 mm。浮法玻璃膜片通过紫外胶固定于套筒表面，有效约束半径约为 1.19 mm。

为配合相位生成载波解调算法，需制作长腔长 EFPI。同时，为降低光在长 F-P 腔中的传播损耗，在 F-P 腔中插入一段斜 8°光纤。因此，该 EFPI 的光程差 $2nL$ 表达式为：

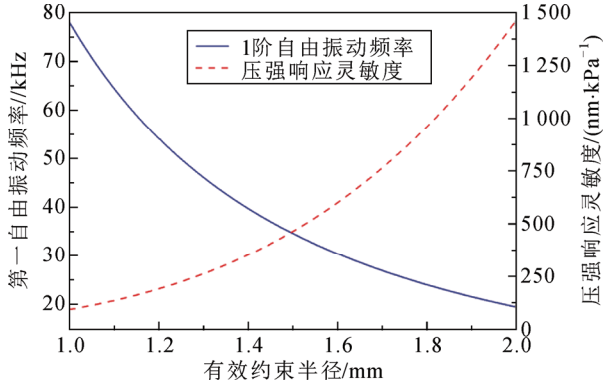


图 2 有效约束半径与 1 阶自由振动频率和压强响应灵敏度之间的关系曲线

Fig.2 First-order free vibration frequency and pressure response sensitivity as a function of effective radius

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

膜片材料	相对介电常数	介质损耗角正切	击穿场强/(kV·cm^{-1})	热膨胀系数/(10^{-6} ℃$^{-1}$)
浮法玻璃	6.05	9.5×10^{-2}		9~10
硼硅玻璃	4.5~5.0		200~350	3.2~3.4
石英	3.7~3.9		250~400	0.54

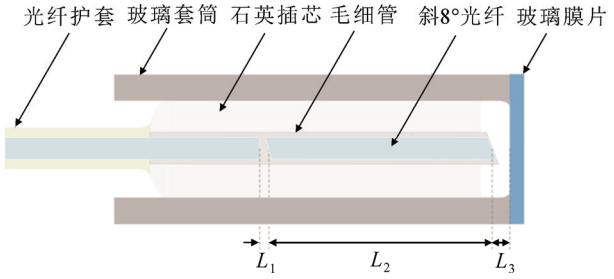


图 3 EFPI 超声传感器结构图

Fig.3 Structure of the EFPI ultrasonic sensor

$$2nL = 2n_1L_1 + 2n_2L_2 + 2n_1L_3 \tag{4}$$

式中：n 表示腔内介质折射率；L 表示 F-P 腔几何长度；L_1 为平角光纤与斜 8°光纤的中心距离，为避免光束在 L_1 段发散，制作时 L_1 尽可能小；L_2 为斜 8°光纤的长度；L_3 为斜 8°光纤与玻璃膜片的中心距离；n_1 为空气的折射率，一般取 1；n_2 为光纤的折射率，一般取 1.46。该 EFPI 对外界信号响应时，膜片振动引起 L_3 变化。

采用螺旋推进器将石英插芯推入粘接有玻璃膜片的玻璃套筒，逐渐改变腔长直至获得较好的干涉光信号，并用紫外胶将插芯末端与套筒末端固定在一起。EFPI 实物图如图 4 所示。采用电子显微镜测得 L_2 为 680 μm。采用基于电荷耦合器件(charge coupled device，CCD)成像的解调法测得该 EFPI 的静态光程差为 2 310.8 μm。根据式(4)可知，L_1+L_3 为 162.6 μm。

采用声发射系统对 EFPI 的频响曲线进行标定，参考传声器为 MPA401 传声器，标定结果如图 5 所示。无任何放大措施下，EFPI 在共振频率 55.5 kHz 处的声压响应灵敏度为 5.6 mV/Pa。

1.3 EFPI 超声传感器信号解调

1.3.1 相位生成载波算法原理

相位生成载波法在信号频带外引入高频载波，并将被调制的干涉信号分别与载波和载波二倍频信号相乘以构造 1 对正交信号，再通过微分-交叉相乘(differential cross multiplication，DCM)、反正切(Atan)等正交信号解调方法提取待测相位信息。其中，相位生成载波-反正切算法(PGC-Atan)的原理图如图 6 所示。

EFPI 输出的干涉光信号经光电转换后所得的电信号 V 表达式为：

$$V = A + B\cos\left(C\cos\omega_0 t + \varphi(t)\right) \tag{5}$$

式中：A 和 B 为常数项，与发生干涉的 2 束光光强有关；ω_0 为载波频率，选取要求是载波边带与待测信号高次谐频不发生频谱混叠；$\varphi(t)$为外界对 EFPI 的影响所产生的相位，包括幅值为 D、频率为ω的待测信号 $D\cos\omega t$，以及温度、低频振动等环境干扰产生的相位$\psi(t)$；C 为载波相位调制深度，计算式为：

$$C = \frac{4\pi nL}{c}\Delta v \tag{6}$$

式中：c 为光速；Δv为最大光频率变化量。

对式(5)进行贝塞尔函数展开，并分别与载波 1 倍频 $G\cos\omega_0 t$、载波 2 倍频 $H\cos 2\omega_0 t$ 分别相乘，再经过低通滤波器滤除含 ω_0 及其倍频的项，得到 2 路正交信号 $P(t)$与 $Q(t)$，即：

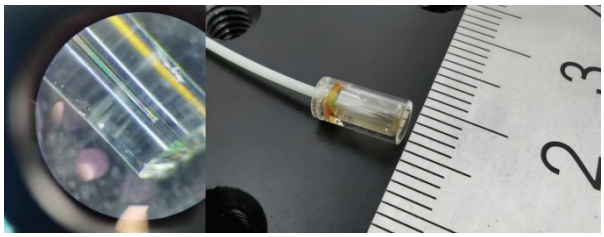


图 4 EFPI 超声传感器实物图

Fig.4 Picture of the EFPI ultrasonic sensor

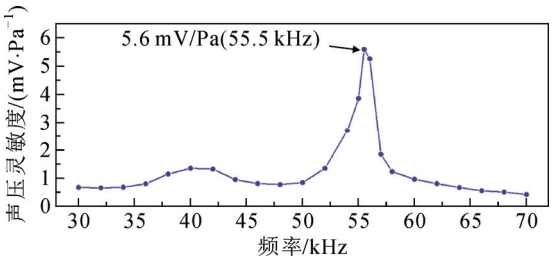


图 5 EFPI 的频响曲线

Fig.5 Frequency response of the EFPI

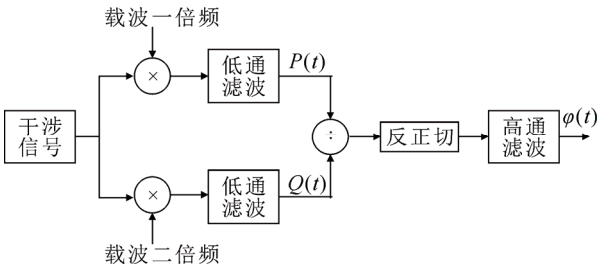


图 6 相位生成载波-反正切算法原理图

Fig.6 Demodulation principle of PGC-Atan

$$P(t) = -BGJ_1(C)\sin\varphi(t) \tag{7}$$

$$Q(t) = -BHJ_2(C)\cos\varphi(t) \tag{8}$$

式中：$J_k(C)$表示 k 阶贝塞尔函数在 C 处的值。当 C=2.63 rad 时，有 $J_1(C)$=$J_2(C)$，且 $J_1(C)/J_2(C)$变化率相对小。式(7)与式(8)相除并进行反正切运算，经高通滤波器滤除环境干扰低频相位，即可提取待测相位信息，即：

$$D\cos\omega t = \arctan\left(\frac{-BGJ_1(C)\sin\varphi(t)}{-BHJ_2(C)\cos\varphi(t)}\right) \tag{9}$$

据此，可求解 EFPI 腔长变化量 Δl 为：

$$\Delta l = \frac{\lambda\Delta\varphi}{4\pi n} \tag{10}$$

式中：λ为光波长；$\Delta\varphi$为相位变化量，即 $D\cos\omega t$。

1.3.2 相位生成载波算法仿真验证

考虑到 EFPI 未镀高反膜且腔长较长，故而针对高频、微弱信号的 PGC-Atan 解调进行仿真。根

据贝塞尔函数的性质，待测信号 $D\cos\omega t$ 的 k 次谐频分量的幅值正比于 $J_k(D)$。当$|J_k(D)|<0.1$ 时，待测信号的 k 次及以上谐频分量可忽略，待测信号频谱集中在$(k-1)\omega$范围内。为避免频谱混叠导致的解调失真，ω_0 与 ω 之间须满足：

$$\omega_0 - k\omega > k\omega + \omega_L \tag{11}$$

式中：ω_L 为低通滤波器过渡带宽。计算得 $J_1(0.92)=0.099$，即当待测信号幅值不超过 0.92 rad 时，ω_0 应大于 $4\omega+\omega_L$。

在 LabVIEW 平台搭建 PGC-Atan 算法仿真程序。设定待测信号幅值 D=0.5 rad，频率ω=55.5 kHz；载波频率 ω_0=250 kHz；采样频率为 5 MHz；相位调制深度 C=2.63 rad；滤波器阻带衰减 80 dB。PGC-Atan 算法对 0.5 rad 待测信号解调结果的时域波形如图 7 所示。解调结果幅值为 0.511 rad，与待测信号幅值的误差为 2.2%，解调结果信纳比(signal to noise and distortion，SINAD)为 86.332 dB。

进一步，在 10^{-7}~5 rad 范围改变待测信号幅值，所得结果如表 2 所示。仿真结果表明，载波频率为 250 kHz 时，PGC-Atan 算法可有效解调幅值在 10^{-4}~0.92 rad 范围的 55.5 kHz 待测信号。将仿真结果代入式(11)，若光波长为 1 550 nm，理论上可解调 F-P 腔腔长变化范围是 0.012~113 nm。

对于多频信号解调，只要各频率信号幅值之和不超过 0.92 rad，PGC-Atan 算法即可承载多频信号。

2 EFPI 超声传感器性能标定与测试

2.1 分辨率与响应线性度测试

在光学平台上搭建如图 8 所示的 EFPI 超声传感器测试系统。光源采用垂直腔面发射激光器(vertical-cavity surface-emitting laser，VCSEL)，中心波长为 1 550.02 nm，调制特性为 0.4 nm/mA。调制激光器的载波由 1 号信号发生器产生，频率为 250 kHz，C 值设定为 2.63 rad。2 号信号发生器产生 55.5 kHz 正弦信号驱动声源，向 40 cm 外的 EFPI 施加正弦激励。EFPI 的输出信号经光纤环形器送入索雷博 DET01CFC 型号的光电探测器并转换为电信号。该信号被 PICO 4225A 采集卡以 5 MHz 的采样速率传入计算机中，并在 PGC-Atan 算法程序中进行解调。线性度测试过程中，试验环境温度为 25 ℃，相对湿度为 35%。

声源声压与其两端电压成正比，调节信号发生器输出电压改变声压大小，得到膜片振幅(F-P 腔腔

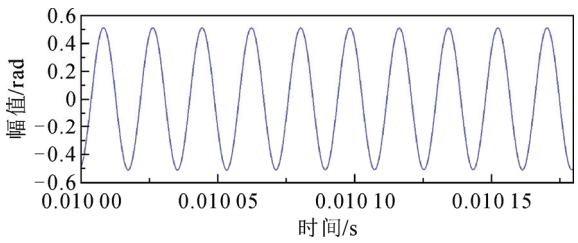


图 7 解调信号波形图

Fig.7 Waveform diagram of the demodulation signal

表 2 PGC-Atan 算法仿真结果

Table 2 Simulation results of PGC-Atan algorithm

待测幅值/rad	解调幅值/rad	SINAD/dB	备注
10^{-7}	1.030×10^{-6}	0.014	波形严重失真
10^{-6}	1.514×10^{-6}	1.179	波形严重失真
10^{-5}	1.025×10^{-5}	15.078	波形失真
10^{-4}	1.022×10^{-4}	34.944	解调结果良好
1×10^{-3}	1.022×10^{-3}	54.969	解调结果良好
0.1	0.105	72.547	解调结果良好
0.5	0.511	86.332	解调结果良好
0.92	0.883	62.330	幅值误差 4.0%
5	1.592	4.795	波形严重失真



图 8 EFPI 超声传感器解调测试平台

Fig.8 EFPI ultrasonic sensor demodulation platform

长变化量幅值)与声源两端电压之间的关系如图 9 所示。图 9 的拟合计算式中，x 表示声源激励电压，y 表示膜片振幅，r^2 表示拟合优度。根据图 9 可知，EFPI 膜片振幅与声源两端电压呈线性关系，一方面表明 EFPI 在该声压范围内线性响应，另一方面表明 PGC-Atan 解调线性度良好。此外，当激励电压增大步进为 50 mV 时，解调所得的振幅有明显变化，表明该系统的膜片振幅分辨率≥0.43 nm。

2.2 超声信号响应测试

2.2.1 探头对点火脉冲响应测试

采用点火脉冲发生器模拟局部放电超声信号，对 EFPI 的响应情况进行初步测试。将 EFPI 和 R15α

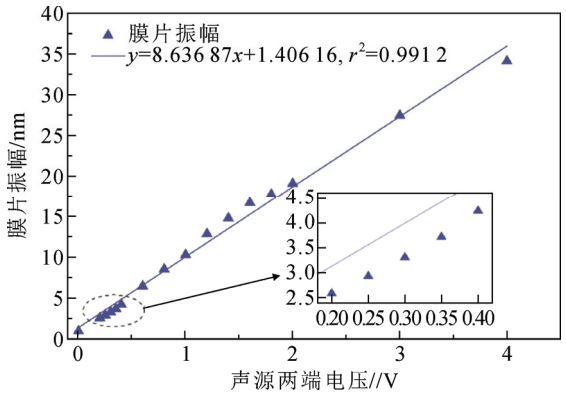


图 9 EFPI 膜片振幅与声源激励电压之间的关系曲线

Fig.9 Relationship between the diaphragm amplitude of EFPI and the voltage of the sound source

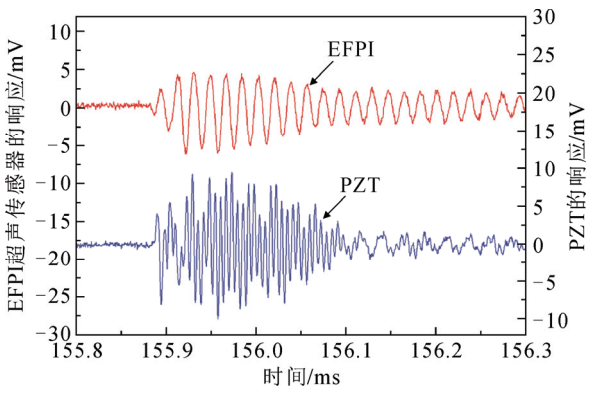


图 10 EFPI 与 PZT 对点火脉冲响应的时域波形

Fig.10 Waveforms of EFPI and PZT response to pulse

型号的 PZT 探头并排水平放置于距点火脉冲发生器 20 cm 的位置，2 款探头与点火脉冲发生器之间无阻挡。响应测试试验中，EFPI 传感器所用光源仅进行波长稳定控制，干涉光信号经无放大功能的光电探测器直接接入示波器。PZT 探头输出不经放大器直接接入示波器。2 套传感器对点火脉冲信号响应情况如图 10 所示。

由图 10 可知，EFPI 与 PZT 同步响应点火脉冲信号，但 EFPI 对该点火脉冲信号的响应略低于 PZT。EFPI 的 3 dB 频响范围为 54~56.5 kHz，点火脉冲中所含的该频率范围信号才能引起 EFPI 的有效响应，因此 EFPI 的时域波形相对规整；PZT 的频响范围是 50~400 kHz，对局放频谱覆盖更全，时域响应波形较为杂乱。

2.2.2 点火脉冲响应的解调

将图 8 中的声源替换为点火脉冲发生器，对 EFPI 捕捉到的点火脉冲信号进行解调。被高频载波和点火脉冲调制的 EFPI 响应波形与膜片振幅解调结果如图 11 所示。

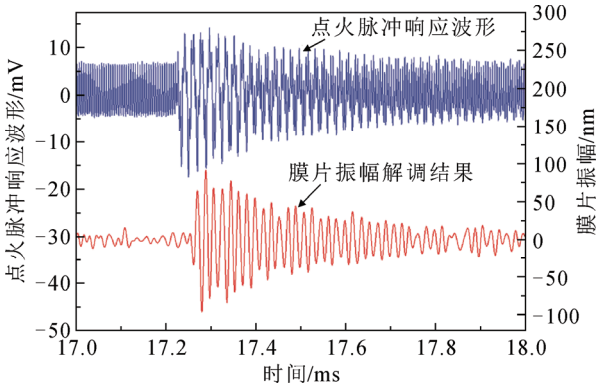


图 11 EFPI 响应波形与膜片振幅解调结果

Fig.11 Waveforms of EFPI response and the demodulation result of diaphragm amplitude

由于 PGC-Atan 算法计算的数据量较大，解调结果相较响应波形滞后约 0.05 ms。根据图 11 可知，17.2 ms 前，响应波形与膜片振幅均无较大起伏；17.2 ms 后，EFPI 检测到强烈点火脉冲信号，膜片振幅变化较大。2 个波形的轮廓基本一致，可认为 PGC-Atan 算法能够解调 EFPI 对超声信号的响应。

3 电晕放电检测

3.1 电晕放电超声检测平台

基于 EFPI 超声传感器的电晕放电超声检测平台如图 12 所示。试验采用高压尖端放电模拟电晕放

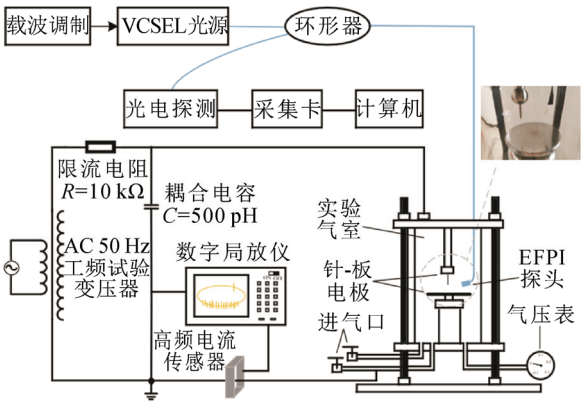


图 12 基于 EFPI 超声传感器的电晕放电检测平台

Fig.12 Corona discharge detection platform based on EFPI ultrasonic sensor

电，电极结构为不锈钢针-板电极，极间距离为 2 cm。试验气罐在抽真空与洗气过程中会产生气压冲击，可能损坏未经可靠封装的 EFPI。因此，气罐充分清洁后与外界相通，罐内为常压空气。EFPI 通过气罐盖板通孔伸入罐内，与针电极距离约 3 cm。为避免

光电探测器直接接入示波器时，微弱的局放响应信号湮没在电噪声中，本文将 EFPI 接入 PGC-Atan 解调系统，以检测 EFPI 膜片振幅的纳米级变化。试验中还将 WCT-2 型号的高频电流传感器接入试验气罐接地线，其输出接入 TWPD-2E 型号的数字局放仪，同步观察局部放电波形并记录局放量。试验环境温度为 25 ℃，相对湿度为 35%。

3.2 电晕放电超声检测结果的 Bootstrap 分析

EFPI 膜片作为声波与机械波之间的换能元件，其振幅随超声波能量的增强而增大。调节施加电压可改变总放电能量，进而改变电晕放电产生的声波能量。试验中通过高压试验控制台对试验平台进行升压，当局放波形的负半周开始出现放电脉冲，表明起晕，此时从控制台上读取起晕电压为 3.7 kV；当电压升高至 14.7 kV 时，间隙立即击穿；降压后再次将电压升高至 14.3 kV，此时局放波形正半周有明显放电脉冲，局放量急剧增大，绝缘处于临界击穿状态。采用数字局放仪记录起晕至临界击穿过程中不同电压下的局放量，如图 13 所示。

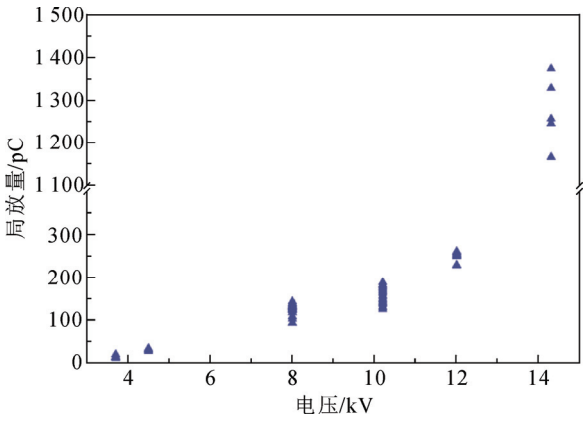


图 13 电晕放电下局放量与电压关系图

Fig.13 Relationship between partial discharge magnitude and voltage under corona discharge

从图 13 中可看出，起晕至击穿过程中局放量随电压近似指数增长。其中，持续稳定的电晕放电下，局放量与施加电压之间近似正相关，表明放电能量随施加电压的增大而增大。起晕电压下的局放量均值为 13.86 pC。临界击穿下，局放量突增，此时放电能量骤然增长。

超声信号检测试验中，施加电压分别取 3.7、6、8、10、12 kV 和 14.3 kV。采用 PGC-Atan 算法解调未施加电压时和不同电压下的 EFPI 膜片振幅。未施加电压时，受环境与 EFPI 悬挂影响，膜片有一定初始振幅，频谱表现为本底噪声。为避免初始振幅、环境与系统噪声等因素影响微弱超声响应信号的判断，现结合膜片振幅、超声频谱与波形、解调信纳比判断是否检测到超声信号。若膜片振幅高于初始振幅，且 EFPI 共振频率附近的频谱谱峰增强，出现超声波形或 SINAD 增大，则认为 EFPI 检测到局部放电的超声信号，并记录 2 ms 内的膜片振幅均值。3.7 kV 和 12 kV 电压下 EFPI 检测所得的超声频谱如图 14 所示。

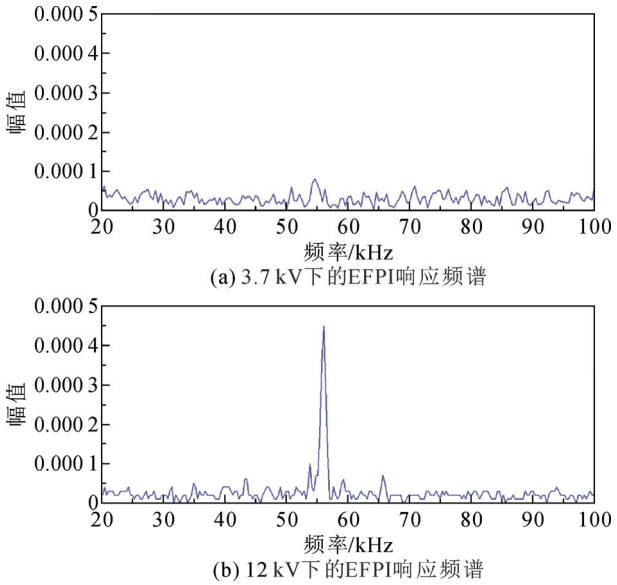


图 14 EFPI 超声响应频谱

Fig.14 Frequency spectrum of EFPI response to ultrasonic

试验中每个电压下捕捉 20 个响应信号。分析施加电压与膜片振幅的关系需要大量数据，而样本量较小。这里引入 Bootstrap 法[26-27]对小样本进行分析。该统计方法无须已知样本分布，直接对原始数据进行反复再抽样，进而将小样本转化为大样本来估计未知参数的近似分布，具体原理如下。

已知随机样本 $\boldsymbol{X}=[x_1, x_2, \cdots, x_n]$，且 $\boldsymbol{X}$ 为某未知总体分布 $\boldsymbol{F}$ 的子样本。$\theta=\theta(\boldsymbol{F})$为总分布 $\boldsymbol{F}$ 的待求参数，可以是均值、标准差等。$\hat{\theta}=\hat{\theta}(\boldsymbol{F}_n)$ 为根据 $\boldsymbol{X}$ 计算得出的θ的估计。记估计误差 $R(\boldsymbol{X}, \boldsymbol{F})$为式(12)，并定义为随机变量 $\boldsymbol{T}_n$。

$$R(\boldsymbol{X},\boldsymbol{F})=\hat{\theta}(\boldsymbol{F}_n)-\theta(\boldsymbol{F})\triangleq\boldsymbol{T}_n \tag{12}$$

式中：符号≜表示“定义为”。

首先，构造 $\boldsymbol{X}$ 的经验分布函数 $\boldsymbol{F}_n$ 的数值表达式为：

$$F_n(x)=\begin{cases}0, & x<x_{(1)}\\ \dfrac{k}{n}, & x_{(k)}<x<x_{(k+1)}\\ 1, & x\geq x_{(n)}\end{cases} \tag{13}$$

式中：$(x_{(1)}, x_{(2)}, \cdots, x_{(n)})$为 $\boldsymbol{X}$ 中各数据从小到大的重新排序。

然后，从 $\boldsymbol{F}_n$ 中抽取 Bootstrap 样本 $\boldsymbol{X}^*=[x_1^*, x_2^*, \cdots, x_n^*]$，并计算估计误差 $\boldsymbol{R}^*(\boldsymbol{X}^*, \boldsymbol{F}_n)$为：

$$\boldsymbol{R}^*(\boldsymbol{X}^*, \boldsymbol{F}_n) = \hat{\theta}(\boldsymbol{F}_n^*) - \hat{\theta}(\boldsymbol{F}_n) \triangleq \boldsymbol{R}_n \tag{14}$$

式中：$\hat{\theta}(\boldsymbol{F}_n^*)$ 为根据 $\boldsymbol{X}^*$计算得出的θ的估计；$\boldsymbol{F}_n^*$ 为 $\boldsymbol{X}^*$的经验分布函数。由于 $\boldsymbol{F}_n$ 既是 $\boldsymbol{X}^*$的分布函数，又是 F 的充分统计量，因此 $\boldsymbol{F}_n^*$ 是 $\boldsymbol{F}_n$ 的逼近，$\boldsymbol{F}_n$ 是 F 的逼近，$\boldsymbol{R}^*(\boldsymbol{X}^*, \boldsymbol{F}_n)$可被定义为 $\boldsymbol{F}_n$ 的 Bootstrap 统计量 $\boldsymbol{R}_n$。

接下来，重复上一步 m 次，从 X 中有放回地再抽样得到 m 组 Bootstrap 样本和 m 个 Bootstrap 统计量。m 的取值一般不低于 1 000。

最后，采用 m 组 $\boldsymbol{R}_n$ 的分布逼近 $\boldsymbol{T}_n$ 的分布，得到$\theta(\boldsymbol{F})$的 m 个可能取值，进而统计求出θ的分布及相关特征。

对电晕放电下 EFPI 超声传感器检测结果进行 Bootstrap 统计分析，求解 Bootstrap 均值及其置信水平为 95%的 Bootstrap 置信区间，分析结果如图 15 所示。

图 15 中，拟合式中的 x 为电极两端电压。未施加电压时的膜片振幅 Bootstrap 均值为 4.63 nm，3.7 kV起晕电压下的膜片振幅Bootstrap均值提升至5.93 nm，相较于未施加电压时的膜片振幅增大了1.3 nm，表明 EFPI 超声传感器可响应起晕时的微弱超声信号，此时局放量为 13.86 pC。14.3 kV 临界击穿状态下，膜片振幅 Bootstrap 均值为 13.89 nm。虚线所围的部分是膜片振幅置信水平为 95%的Bootstrap 置信区间，放电过程的 120 个统计数据中，共计 45%的点落在该置信区间。尽管膜片振幅在一定范围内具有随机性，但可通过 Bootstrap 法分析得到膜片振幅与电压之间的关系。在施加电压为 3.7~12 kV 的稳定电晕放电过程中，膜片振幅与电压一定程度上呈现正相关趋势。14.3 kV 的临界击穿状态下膜片振幅突增，考虑到起晕至临界击穿整体过程，膜片振幅的 Bootstrap 均随电压的变化关系更贴近指数曲线，与图 13 中局放量随电压变化的趋势相似。其原因是电压增高引起电晕放电加剧，局放量增大，并伴随着超声波能量的增强，膜片振幅随之增大。当电极间处于临界击穿状态时，绝缘急剧劣化，因而膜片振幅突增。即 EFPI 膜片振幅的大小与局部放电严重程度相关，振幅的增大预示着局放严重程度可能加剧。

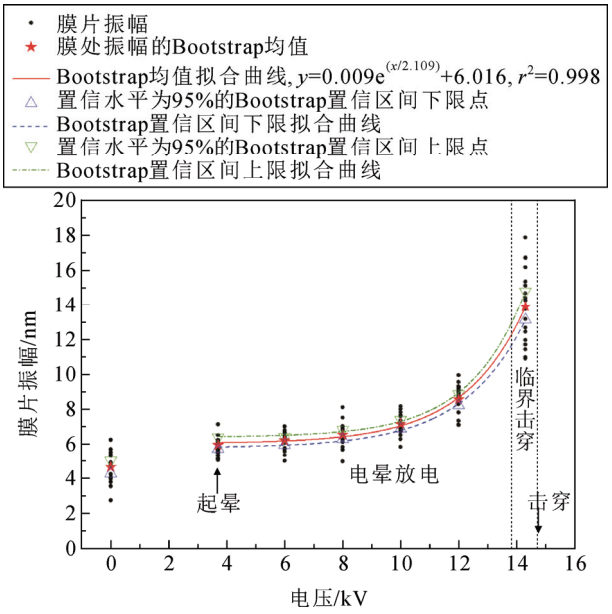


图 15 电晕放电的 EFPI 超声检测结果分析图

Fig.15 Analysis of EFPI ultrasonic detection results for corona discharge

4 结论

1）在 EFPI 腔长、激光器调制特性等条件的约束下，仿真结果显示 PGC-Atan 算法动态范围为 10^{-4}~0.92 rad，实测结果显示 EFPI 超声传感器对膜片振幅的分辨率实测结果≥0.43 nm。表明 PGC-Atan 算法可有效解调 EFPI 膜片的纳米级振幅，有望用于解调 EFPI 超声传感器对微弱局放信号的响应。

2）常温常压下空气电晕放电试验中，EFPI 传感器探头在距离针电极 3 cm 处时，3.7 kV 起晕电压下的膜片振幅 Bootstrap 均值相较于未施加电压时的膜片振幅增大了 1.3 nm，实现 13.86 pC 的微弱局部放电传感。膜片振幅的变化可作为 EFPI 超声传感器对局部放电响应的判断依据。

3）EFPI 膜片振幅与超声波能量相关，当电晕放电程度加剧，即放电能量增强，转换所得的声波能量增大，进而膜片振幅增大。本试验条件下，起晕至临界击穿阶段，膜片振幅与所施电压总体上呈指数关系，与局放量随电压的变化趋势相近，表明膜片振幅大小与电晕放电严重程度相关。

参考文献 References

[1] 司文荣，傅晨钊，黄 华，等. 局部放电非本征法珀光纤传感检测技术述评[J]. 高压电器，2018，54(11)：20-32.
SI Wenrong, FU Chenzhao, HUANG Hua, et al. Review on detection technologies for PD signals using fiber optic sensor of extrinsic Fabry-Perot interferometer[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 20-32.

[2] YU B, KIM D W, DENG J D, et al. Fiber Fabry-Perot sensors for detection of partial discharges in power transformers[J]. Applied Optics, 2003.42(16): 3241-3250.
[3] WANG X D, LI B Q, XIAO Z X, et al. An ultra-sensitive optical MEMS sensor for partial discharge detection[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005, 15(3): 521-527.
[4] 姚维强，司文荣，吕佳明，等. EFPI 光纤超声传感器及其潜在局放检测应用综述[J]. 高电压技术，2020，46(6)：1853-1866.
YAO Weiqiang, SI Wengrong, LÜ Jiaming, et al. Review on EFPI fiber-based ultrasonic sensors and its potentially partial discharge detection application[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1853-1866.
[5] 陈起超，张伟超，白仕光，等. 非本征光纤法-珀传感器局部放电检测研究进展[J]. 电工技术学报，2022，37(5)：1305-1320.
CHEN Qichao, ZHANG Weichao, BAI Shiguang, et al. Research progress of extrinsic fiber Fabry-Perot interferometer sensor in partial discharge detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(5): 1305-1320.
[6] 陈起超，李 琪，李中原，等. 高灵敏度高一致性非本征光纤法-珀局部放电声发射传感器[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4747-4756.
CHEN Qichao, LI Qi, LI Zhongyuan, et al. High-sensitivity and high-consistency extrinsic fiber fabry-perot partial discharge induced acoustic emission sensor[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4747-4756.
[7] DONG B, HAN M, SUN L Q, et al. Sulfur hexafluoride-filled extrinsic Fabry-Pérot interferometric fiber-optic sensors for partial discharge detection in transformers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(18): 1566-1568.
[8] 张宇帅，隋浩冉，韩世杰，等. 一种用于高压电气设备局放超声检测的新型 EFPI 传感器[J/OL]. 电测与仪表，2022：1-8[2024-01-31]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20211231.1101.002.html.
ZHANG Yushuai, SUI Haoran, HAN Shijie, et al. A novel type of EFPI sensor for partial discharge ultrasonic testing of high-voltage electrical equipment[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022: 1-8[2024-01-31]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20211231.1101.002. html.
[9] 陈起超. 液体电介质局部放电声发射非本征光纤法-珀传感器[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2021.
CHEN Qichao. Extrinsic fiber fabry-perot sensors for partial discharg induced acoustic emmission in liquid dielectrics[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2021.
[10] LI H Y, BU J, LI W L, et al. Fiber optic Fabry-Perot sensor that can amplify ultrasonic wave for an enhanced partial discharge detection[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 8661.
[11] 郭少鹏. 变压器局部放电光纤法珀传感器若干关键技术研究[D]. 北京：中国科学院大学，2015.
GUO Shaopeng. Research on some key technologies of fiber Fabry-Pero sensor applied for partial discharge detection in transformers[D]. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
[12] GAO C F, WANG W, SONG S, et al. Localization of partial discharge in transformer oil using Fabry-Perot optical fiber sensor array[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2279-2286.
[13] GAO C F, YU L, XU Y, et al. Partial discharge localization inside transformer windings via Fiber-Optic acoustic sensor array[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1251-1260.
[14] ZHANG Z X, LEI J L, CHEN W G, et al. Oil-paper insulation partial discharge ultrasonic multifrequency sensing array based on fibre-optic Fabry-Perot sensor[J]. High Voltage, 2022, 7(2): 325-335.
[15] 张知先，雷嘉丽，陈伟根，等. 基于多参量光纤 F-P 传感的变压器局部放电与油温传感方法[J]. 高电压技术，2022，48(1)：58-65.
ZHANG Zhixian, LEI Jiali, CHEN Weigen, et al. Transformer's partial discharge and oil temperature sensing method based on multi-parameter fiber optic F-P sensing[J]. High Voltage Engineering, 2022.48(1): 58-65.
[16] 韩世杰，吕泽钦，隋浩冉，等. 基于 EFPI 传感器的 GIS 局部放电模式识别研究[J]. 电力工程技术，2022，41(1)：149-155.
HAN Shijie, LYU Zeqin, SUI Haoran, et al. Partial discharge pattern recognition in GIS based on EFPI sensor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 149-155.
[17] 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)：0406002.
ZHANG Weichao, ZHAO Hong, CHU Xiong. Partial discharge acoustic emission sensor design based on extrinsic fiber Fabry-Perot interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0406002.
[18] SI W R, YAO W Q, GUAN H, et al. Numerical study of vibration characteristics for sensor membrane in transformer oil[J]. Energies, 2021, 14(6): 1662.
[19] LIU Q, JING Z G, XIA Z J, et al. Fiber-optic ultrasonic sensing via quasi-continuous quadrature frequency modulation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(21): 1385-1388.
[20] 江 毅，张树桓. 光纤激光干涉测量技术在 EFPI 传感器信号解调中的研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2021，58(13)：1306017.
JIANG Yi, ZHANG Shuheng. Research progress on fiber optical laser interferometry in signal demodulation of EFPI sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(13): 1306017.
[21] VOLKOV A V, PLOTNIKOV M Y, MEKHRENGIN M V, et al. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(13): 4143-4150.
[22] QU Z Y, GUO S, HOU C B, et al. Real-time self-calibration PGC-Arctan demodulation algorithm in fiber-optic interferometric sensors[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 23593-23609.
[23] HOU C B, LIU G W, GUO S, et al. Large dynamic range and high sensitivity PGC demodulation technique for tri-component fiber optic seismometer[J]. IEEE Access, 2020, 8: 15085-15092.
[24] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 5 版. 北京：高等教育出版社，2016：25.
XU Zhilun. Elasticity[M]. 5th ed. Beijing, China: Higher Education Press, 2016: 25.
[25] 汤贝贝，张国强，李 群，等. 光学麦克风封装材料相容性试验[J]. 电力工程技术，2023，42(5)：20-29.
TANG Beibei, ZHANG Guoqiang, LI Qun, et al. Compatibility test of optical microphone packaging materials[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 20-29.
[26] 刘琰君，张效民. Bootstrap 方法在水声信号检测中的应用[J]. 电声技术，2007，31(5)：4-6.
LIU Yanjun, ZHANG Xiaomin. Underwater acoustics signal detection based on Bootstrap method[J]. Audio Engineering, 2007, 31(5): 4-6.
[27] 韩 冬，马 进，贺仁睦. 基于 Bootstrap 的负荷模型的小样本不确定性分析[J]. 电力系统保护与控制，2012，40(18)：95-100.
HAN Dong, MA Jin, HE Renmu. Small sample uncertainty analysis of load model based on Bootstrap[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 95-100.



周朕蕊
1995—，女，博士生
主要从事先进光学传感器与电力设备在线监测研究
E-mail: zhouzhenrui@mail.iee.ac.cn

ZHOU Zhenrui
Ph.D.candidate



张国强(通信作者)
1964—，男，博士(后)，研究员，博导
主要从事电气设备状态检测与故障诊断机理、先进光学传感器与在线监测仪器研制等方面研究
E-mail: zhanggqi@mail.iee.ac.cn

ZHANG Guoqiang
Post-doctorate
Professor
Corresponding author

收稿日期 2023-09-28 修回日期 2024-02-19 编辑 曾文君