

基于光纤光栅法布里-珀罗干涉仪的液体 介质声波检测技术研究

张伟超¹ 赵 洪^{1*} 刘 通² 王国利² 李锐海²

(¹ 哈尔滨理工大学电气与电子工程学院工程电介质及应用技术教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

² 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510000

摘要 结合光纤光栅法布里-珀罗干涉仪(FBG-FPI)和圆筒振子耦合技术设计高灵敏度传感器,应用于电力设备液体绝缘介质中声波信号检测。FBG-FPI采用反射率为50%的光纤布拉格光栅(FBG),中间处截断熔接20 mm长单模光纤SMF-28制备。为获得高灵敏度,根据弹性力学原理和有限元分析方法建立圆筒振子参数确定方法。为解决FBG-FPI受温度影响而造成静态工作点漂移的问题,提出了一种利用可调谐分布式反馈(DFB)激光器的温度补偿方法,并通过升降温实验验证了该方法的温度补偿效果。建立FBG-FPI传感器与RC6500T传感器对比实验系统,实验结果表明在1.1 kHz声波信号驱动下液体介质中的FBG-FPI与加速度传感器具有相近灵敏度。

关键词 光纤光学; 声波传感器; 光纤光栅法布里-珀罗干涉仪; 圆筒振子灵敏度; 温度补偿

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0906001

Acoustic Detection Technology Based on Fiber Bragg Grating Fabry-Perot Interferometer in Liquid Medium

Zhang Weichao¹ Zhao Hong¹ Liu Tong² Wang Guoli² Li Ruihai²

¹ Key Laboratory of Engineering Dielectric and Its Application, Ministry of Education, School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Heilongjiang, Harbin 150080, China

² China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangdong, Guangzhou 510000, China

Abstract Combining with fiber Bragg grating Fabry-Perot interferometer (FBG-FPI) with cylinder oscillator coupling technology, a highly sensitive sensor is designed for detecting acoustic signal in liquid dielectrics of electrical equipment. A fiber Bragg grating (FBG) with reflectivity of 50% is cut in the middle to produce two identical half-length Bragg gratings, and a piece of 20-mm SMF-28 monomode fiber is spliced between the FBGs to produce the FBG-FPI. The parameters of the cylinder oscillator are determined for high sensitivity by finite element analysis method based on the theory of elasticity. A novel method of temperature compensation using a tunable distributed feedback (DFB) laser is presented to solve FBG-FPI static working point drift influenced by temperature change. The effect of temperature compensation is proved by raising and falling temperature experiment. A contrast system with FBG-FPI sensor and RC6500T transducer is designed and constructed. The experimental results show that FBG-FPI in liquid dielectrics has the same sensitivity as acceleration transducer for the 1.1 kHz acoustic signal.

Key words fiber optics; acoustic sensor; fiber Bragg grating Fabry-Perot interferometer; cylinder oscillator sensitivity; temperature compensation

OCIS codes 060.2310; 230.1040; 120.3180

收稿日期: 2013-02-23; 收到修改稿日期: 2013-05-05

基金项目: 国家 973 计划(2012CB723308)、南方电网重点科技项目(KZB2011014)、工程电介质及应用技术国家重点实验室培育基地资助项目(103504)、黑龙江省自然科学基金重点项目(ZD200815)

作者简介: 张伟超(1984—),男,博士研究生,主要从事光纤传感及高压绝缘测试等方面的研究。

E-mail: weichaozhang@163.com

导师简介: 赵 洪(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事高压绝缘技术方面的研究。E-mail: hongzhao@hrbust.edu.cn

1 引 言

大型液固复合绝缘电力设备如大型变压器中的声波检测具有重要意义。较强声波如变压器铁磁振动发出 100Hz 的声波,又如瞬间过流形成的暂态电磁力引起的冲击声波等;微弱声波信号主要产生于介质内部局部放电声发射,其单次放电声辐射能量一般在微瓦量级。较强声波的测量,对评价电磁力对设备的破坏作用有重要参考价值;而微弱声波信号的测量,对电力设备绝缘质量检测有重大意义。目前大型变压器中声波测量主要以在设备容器壁粘贴压电陶瓷(PZT)传感器方式为主^[1],其缺点是一方面声波经钢板材料的容器壁传播可能衰减 50% 声波强度,同时 PZT 传感器与钢板界面用脂类物质耦合方式,长期使用会因多种因素导致其失效需经常维护;另一方面大型变压器周围电磁环境复杂,PZT 传感器信号传输抗干扰问题和其供电问题都难以解决。

国外首先兴起应用光纤传感技术检测大型变压器中局部放电和电磁冲击力引起震动的研究。最早出现的光纤声发射传感器以本征光纤干涉仪为主,如迈克耳孙干涉仪^[2]、马赫-曾德尔干涉仪^[3]、Sagnac 干涉仪^[4]等。此类干涉仪可获得较高灵敏度,但是其结构中需要引入参考臂光纤,存在结构不紧凑、需要保偏光纤等困难,并且解调算法相对复杂,响应频率也较低。非本征光纤法布里-珀罗干涉仪声发射传感器是电力设备绝缘监测中应用最为广泛的一种方式,如用于局部放电的超声声发射传感器^[5-9]等相继被报道。非本征法布里-珀罗(F-P)声发射传感器可获得较高的灵敏度,但是一般以空气为反射腔光损耗较大并且加工难度大,这些都会影响检测效果。

现有报道中以光纤为反射腔的本征型法布里-珀罗干涉仪多以光纤端面镀膜等方式为主^[10-11]。以光纤布拉格光栅(FBG)为反射面的光纤布拉格光栅法布里-珀罗干涉仪(FBG-FPI)也有报道将其用于弱磁、振动等物理量检测^[12-15]。FBG-FPI 结构简单灵敏度高,但因其本身对多物理参数敏感而容易受到环境扰动,特别是环境温度的改变会造成传感器工作不稳定。为使 FBG-FPI 传感器具有合适的谐振频率和较高的灵敏度,设计了以横向振动模式为主的圆筒声振子。针对环境温度对 FBG-FPI 稳定性的影响问题,建立基于分布式反馈(DFB)激光器的正交强度解调系统,设计 DFB 激光器波长反馈控制系统。通过采集反馈信号及相关算法获得波

长调节控制量,将控制量送入 DFB 温度控制器,实现对 FBG-FPI 静态工作点漂移的温度补偿。

2 FBG-FPI 传感器结构及相关原理

2.1 FBG-FPI 结构

光纤光栅法布里-珀罗干涉仪是将反射率为 50% 的布拉格光栅于中心处截成长度相等两段用作腔的反射面,用一段 20 mm 单模光纤将两段 FBG 熔接形成 FP 腔制成干涉仪,其结构如图 1 所示。光由 FBG-FPI 的一端导入,在两段 FBG 处被多次反射形成相差恒定的相干光。

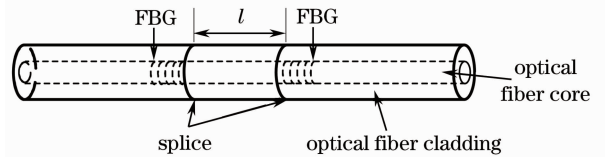


图 1 光纤光栅法布里-珀罗干涉仪结构图

Fig. 1 FBG-FPI structural drawing

根据多光干涉原理 FBG-FPI 反射输出端的反射光强可以表示为^[16]

$$I(\lambda, l) = \frac{2R \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi nl}{\lambda}\right) \right]}{1 + R^2 - 2R \cos\left(\frac{4\pi nl}{\lambda}\right)} \cdot I_0(\lambda), \quad (1)$$

式中 $I_0(\lambda)$ 是入射光光强, λ 为入射光波长, l 为两段 FBG 中间光纤长度即腔长, n 是 FP 腔的介质折射率, 介质为 SMF-28 光纤, 其折射率近似值为 1.47, R 为 FBG 反射率。由于 FBG 反射谱呈高斯分布, R 呈以工作波长为中心的高斯分布。根据以上原理在确定反射率和腔长情况下可仿真出经 FBG-FPI 反射的光谱, 图 2 是假设腔长为 20 mm 时 FPG-FPI 输出光谱的仿真图。

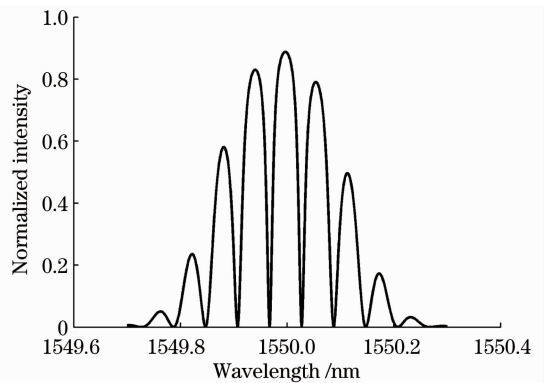


图 2 FBG-FPI 反射光谱

Fig. 2 Reflectance spectra of FBG-FPI

2.2 高灵敏度圆筒声振子设计

FBG-FPI 主要是通过腔长变化感知被测声波, 由于光纤本身受声波驱动腔长变化范围非常小, 很难达到理想的测试灵敏度。采用圆筒振子与声信号耦合方式放大声信号, 提高传感灵敏度。当圆筒振子在被测信号频域内发生共振时, 圆筒振子的振幅达到最大, 因此圆筒振子本身谐振频率及其振型对传感器灵敏度有重要影响。根据弹性力学理论, 薄壁圆筒模型振动模态可用轴向方向的半波数 i 和环向方向的整波数 j 表示。振子谐振角频率 $\omega_{i,j}$ 可表示为^[17]

$$\omega_{i,j} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)r^2} \left[\frac{(1-\nu^2)\lambda^4 + a^2(\lambda^2 + n^2)^4}{n^2 + (\lambda^2 + n^2)^2} \right]}, \quad (2)$$

式中 E, ν, ρ 分别为振子材料的杨氏模量、泊松比和材料密度; r, L, h 分别为圆筒中轴半径、长度和厚度; $\lambda = i\pi R/L, a = \sqrt{h^2/(12r^2)}$ 。在一定的声压 P 下圆筒振子应变可表示为

$$y(P) = \frac{0.71(1-\nu^2)rP}{Eh}, \quad (3)$$

则圆筒振子灵敏度可表示为

$$S = \frac{y(P)}{P} = \frac{0.71(1-\nu^2)r}{Eh}. \quad (4)$$

从(2)式可知振子固有频率随圆筒长度变化缓慢。假设圆筒振子厚度不变, 随半径增加其固有频率逐渐变小而灵敏度逐渐变高, 如图 3 所示。假设圆筒振子半径不变, 随厚度增加其固有频率逐渐变大而灵敏度逐渐变低, 如图 4 所示。

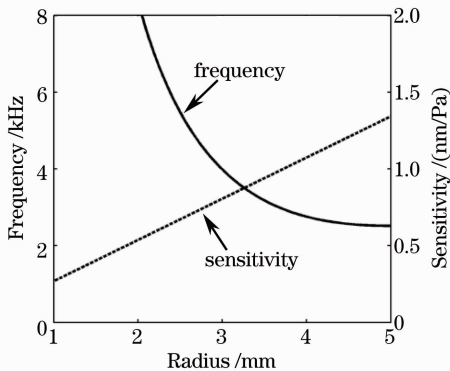


图 3 圆筒振子固有频率和灵敏度随半径的变化
Fig. 3 Cylinder oscillator intrinsic frequency and sensitivity versus radius

圆筒振型不同对振子响应灵敏度有较大影响, 利用计算机采用有限元软件分析不同尺寸振子一阶固有频率振型及灵敏度。长度 $L = 55.3\text{mm}$ 、半径 $r = 3.2\text{mm}$ 、壁厚 $h = 0.8\text{mm}$ 的圆筒振子的固有频

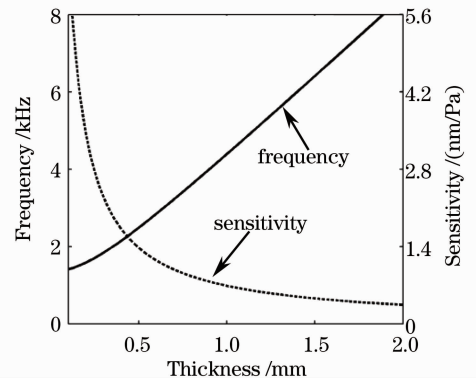


图 4 圆筒振子固有频率和灵敏度随厚度的变化
Fig. 4 Cylinder oscillator intrinsic frequency and sensitivity versus thickness

率为 2.954kHz , 其频率接近设计目标并且此时振子呈横向振动模态。当圆筒振子尺寸增加到长度 $L = 55.3\text{mm}$ 、半径 $r = 14.8\text{mm}$ 、壁厚 $h = 0.8\text{mm}$ 时, 其固有频率亦可达到 2.954kHz , 此时振子呈“呼吸”振动模态。图 5、6 分别是圆筒振子在上述两种尺寸时一阶固有频率下振型图, 从仿真结果可见

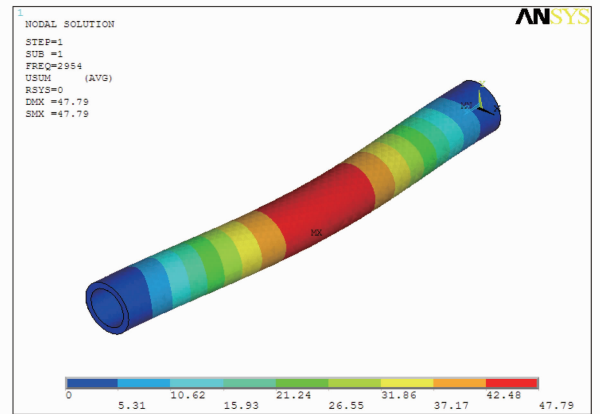


图 5 横向振动振型图

Fig. 5 Transverse vibration mode image

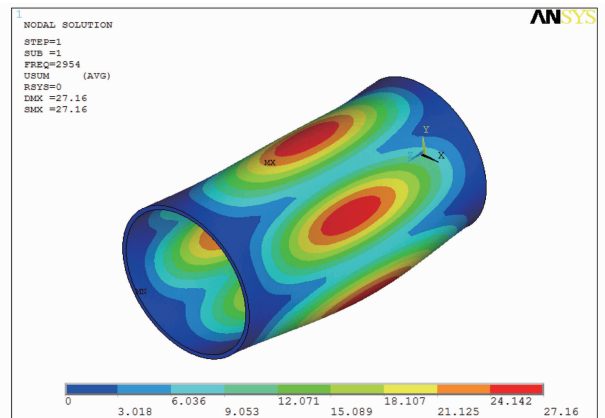


图 6 呼吸振动振型图

Fig. 6 Breathing vibration mode image

传感器与 RC6500T 传感器对比实验系统,如图 10 所示为测试实验系统示意图。使用电动式激振器作为激励声源,其最大激振力可以达到 20 N,配合功率放大器可得到频率连续可调范围为 0~10 kHz 标准的正弦声信号。传感器探头由 FBG-FPI 用环氧树脂粘贴在长为 55.3 mm、半径为 3.2 mm、壁厚为 0.8 mm 的聚氯乙烯圆筒振子封装制成。探头置于充满绝缘油的长 30 cm 铁箱中间处,铁箱一端布置激振器,另一端安装 RC6500T 传感器。DFB 激光器激光经耦合器输入到 FBG-FPI,反射光经光电

转换器后转换成载有声波信息的瞬时交流电信号。交流信号经模数转换和数字滤波获得直流电压值,该直流值就是 FBG-FPI 瞬时工作点电压。将瞬时工作点电压作为反馈信号,在计算机中将其与标准静态工作点电压做差,把该电压差作为误差信号经 PID 算法整定后得到 DFB 激光器温度控制电压,最终通过 LT1923 温度控制器实现对 DFB 激光器波长的调整。上述滤波及静态工作点的 PID 自整定过程在计算机中以程序方式实现,如图 10 中方框部分所示。

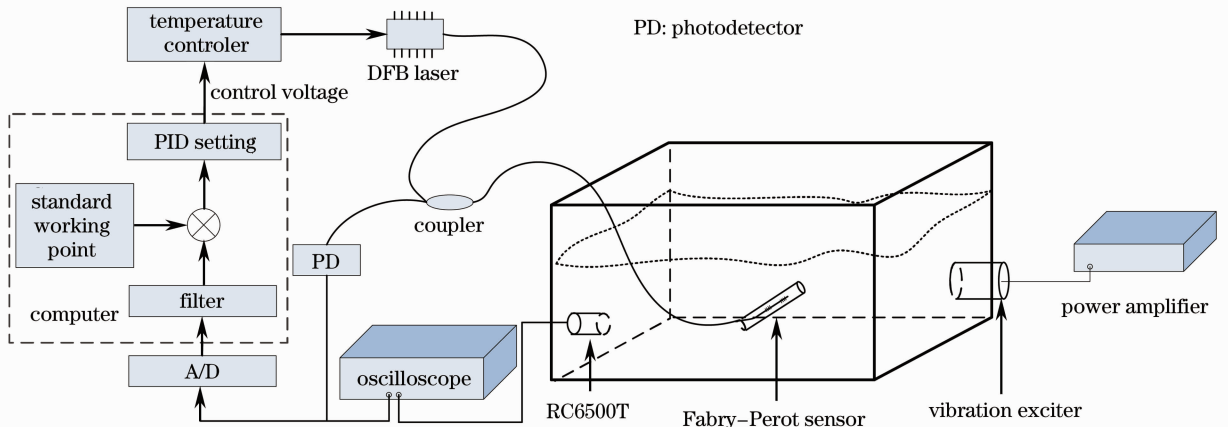


图 10 测试系统示意图

Fig. 10 Schematic diagram of measurement system

3.2 FBG-FPI 温度补偿效果分析

FBG-FPI 传感器进入工作状态前,应先确定传感器的标准静态工作点。由计算机程序控制,输出等步长连续变化的控制电压,使 DFB 激光器输出中心波长连续变化的激光。通过实验系统可获得 FBG-FPI 在 DFB 光谱范围内的输出光谱,如图 11 所示。计算机通过寻峰找到输出最大值,再经与其相邻波谷值进行算术平均就得到 FBG-FPI 的正交静态工作点 Q ,即标准静态工作点。在寻找标准静态工作点的同时,记录获得静态工作点 Q 时的温度控制器的控制电压。在 Q 点确定后计算机结束连续输出控制电压模式,转换成输出寻 Q 点时记录的标准静态工作点 Q 对应的控制电压,进入 FBG-FPI 标准工作状态。

为验证温度补偿原理效果,将 FBG-FPI 传感器置于恒温温箱,控制其温度从 20.4 °C 上升到 25.4 °C 然后再自然冷却降温。整个过程中利用数据采集卡实时采集传感器输出信号到计算机,计算机中经数字滤波后获得传感器的实时工作点。将滤波处理后获得的实时工作点与系统最初设置的静态工作点 Q 做差值,计算机根据该偏差值和已经预先设计的 PID

算法便可获得控制 DFB 激光器中心波长的控制电压。实验升降温过程用时 60 min,整个过程同时对温度值和控制电压进行采集,如图 12 所示是获得的控制电压随温度变化曲线。图中可以看出温度从 20.4 °C 上升至 25.4 °C,对应 DFB 波长控制电压从 1.612 V 升至 1.622 V;随温度下降控制电压也随之下降。在温度上升和下降阶段,控制电压随温度

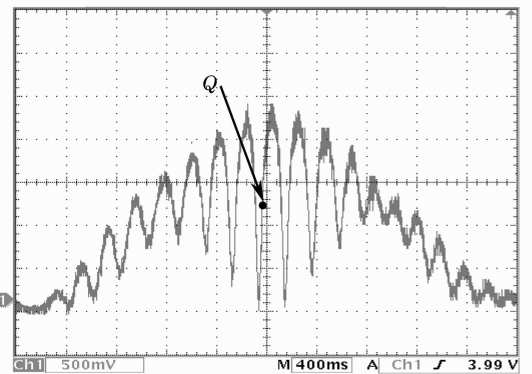


图 11 DFB 波长扫描时 FBG-FPI 输出光谱
Fig. 11 Output spectra of FBG-FPI under DFB wavelength scanning

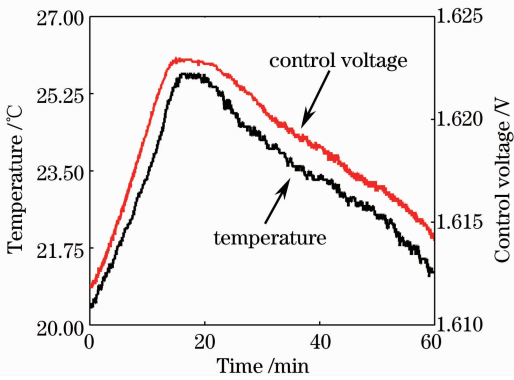


图 12 DFB 波长控制电压随温度的变化

Fig. 12 Control voltage by DFB wavelength versus temperature

变化具有很好的一致性,且整个过程中 FBG-FPI 静态工作点电压始终保持恒定不变,通过利用调谐 DFB 激光器波长的方式消除了传感器静态工作点的温度漂移。由于 FBG-FPI 升温和降温过程是光谱向相反方向移动过程,可推知当温度从 20.4 °C 降温 5 °C 时控制电压应呈现与 20.4 °C 升温至 25.4 °C 相反的变化过程。可认为,系统实现了在 10 °C 范围内对 FBG-FPI 静态工作点的温度补偿,FBG-FPI 传感器在使用温度补偿方法后具有更好的稳定性。

3.3 传感器声信号检测结果与分析

通过激振器 0~5 kHz 范围内扫频输出方式确定 FBG-FPI 传感器的一阶固有频率,确定 FBG-FPI 传感器最强输出大致在 1~1.2 kHz 之间。经微调功率放大器在频率 1.1 kHz 输出功率 5 W 时,光纤传感器可获得相对最大输出,确定 FBG-FPI 传感器固有频率在 1.1 kHz 处。实验测得 FBG-FPI 传感器固有频率小于有限元分析圆筒振子固有频率,其原因主要是由于绝缘油液体环境比空气阻尼大,以及 FBG-FPI 与圆筒振子用环氧树脂耦合固化时不可能完全相容造成的。如图 13 所示是当激振器频率在 1.1 kHz 时测得的波形图,曲线 1 是 FBG-FPI 输出信号,其响应为 1.3 V,曲线 2 是 RC6500T 输出信号,其响应为 0.54 V。两者输出响应幅值比为 2.4,FBG-FPI 传感器输出响应幅值较大。激振器输出频率 1.1 kHz 不变的情况下,降低激振器功率 FBG-FPI 传感器的响应幅值随之减小,当输出功率小于 15 mW 时,FBG-FPI 和 RC6500T 传感器信号均淹没在噪声中;当增大激振器功率时,FBG-FPI 传感器响应幅值随之增大,当输出功率为 8 W 时,FBG-FPI 传感器输出出现倍频现象。激振器功率在 30 mW~8 W 之间时,FBG-FPI 传感器处于线性

工作区间。通过上述实验表明:在 1.1 kHz 声波信号驱动下,FBG-FPI 传感器输出响应是 RC6500T 的 2.4 倍,FBG-FPI 传感器比 RC6500T 具有更高的灵敏度。但由于 FBG-FPI 在实验系统中距离声源约 15 cm,而 RC6500T 加速度传感器距离声源约 30 cm。FBG-FPI 具有距离优势,所以推断当两者与被测信号距离相等时应具有近似相同的灵敏度。

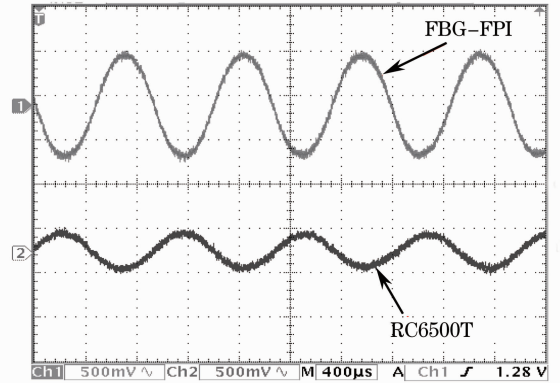


图 13 1.1 kHz 声波激励下 FBG-FPI 传感器和加速度传感器输出波形

Fig. 13 Output wave profiles of FBG-FPI sensor and acceleration transducer under 1.1 kHz acoustic excitation

4 结 论

利用反射率为 50% 的 FBG 熔接光纤方式的 FBG-FPI 和具有声信号被动放大功能的圆筒振子制备了用于液体介质声波测量的高灵敏度传感器。分析并实测 FBG-FPI 光谱特性,依据弹性力学理论和有限元方法分析传感器灵敏度和一阶固有频率关系,对圆筒振子做横向振动和“呼吸”振动的灵敏度对比,进而确定圆筒振子尺寸。利用 DFB 激光器实现了对低频声信号正交解调,并利用反馈信号控制 DFB 激光器波长实现对温度造成静态工作点漂移的补偿。实验结果表明,在 15.4 °C~25.4 °C 温度范围内,DFB 激光器控制电压与温度变化具有一致性,FBG-FPI 静态工作点电压恒定;FBG-FPI 传感器对声波信号检测灵敏度和固有频率与圆筒振子力学特性相符合;在 1.1 kHz 频率声波激励下,FBG-FPI 传感器与 RC6500T 传感器具有相近的灵敏度,故 FBG-FPI 传感器可用于 1.1 kHz 频率以内的低频声信号检测。

参 考 文 献

- 1 K J Lim, S H Kang, K W Lee, *et al.*. Partial discharge signal detection by piezoelectric ceramic sensor and the signal processing

- [J]. *Journal of Electroceramics*, 2004, 13(2): 487-492.
- 2 David Te-Yen Huang, Sheng Lih Yeh, Sung Chrh Hsu, *et al.*. Measurement of objects with low vibration frequencies using modified Michelson interferometry [J]. *Journal of Optics*, 2011, 13(8): 085401.
 - 3 T K Lim, Y Zhou, Y Lin, *et al.*. Fiber optic acoustic hydrophone with double Mach-Zehnder interferometers for optical path length compensation [J]. *Opt Commun*, 1999, 159(4-6): 301-308.
 - 4 K Kråkenes, K Bløtekjaer. Sagnac interferometer for underwater sound detection: noise properties [J]. *Opt Lett*, 1989, 14(20): 1152-1154.
 - 5 W Wang, N Wu, Y Tian, *et al.*. Optical pressure/acoustic sensor with precise Fabry-Perot cavity length control using angle polished fiber [J]. *Opt Express*, 2009, 17(19): 16613-16618.
 - 6 Zhao Hong, Li Min, Wang Pingping, *et al.*. Extrinsic fiber Fabry-Perot sensors for PD-induced acoustic emission detection in liquid dielectrics [J]. *Chin Soc Electrical Engng*, 2008, 28(22): 59-63.
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布里-珀罗传感器[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(22): 59-63.
 - 7 B Dong, M Han, L Sun, *et al.*. Sulfur hexafluoride-filled extrinsic Fabry-Perot interferometric fiber-optic sensors for partial discharge detection in transformers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(18): 1566-1568.
 - 8 Bing Yu, Dae Woong Kim, Jiangdong Deng, *et al.*. Fiber Fabry-Perot sensors for detection of partial discharges in power transformers [J]. *Appl Opt*, 2003, 42(16): 3241-3250.
 - 9 Onur Can Akkaya, Onur Kilic, Michel J F Digonnet, *et al.*. Modeling and demonstration of thermally stable high-sensitivity reproducible acoustic sensors [J]. *IEEE Journal of Microelectromechanical*, 2012, 21(6): 1347-1356.
 - 10 WooHu Tsai, Chunjung Lin. A novel structure for the intrinsic Fabry-Perot fiber-optic temperature sensor [J]. *Lightwave Technology*, 2001, 19(5): 682-686.
 - 11 C E Lee, H F Taylor. Interferometric optical fibre sensors using internal mirrors [J]. *Electronics Letters*, 1988, 24(4): 193-194.
 - 12 Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen, *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of FBG Fabry-Perot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0406006.
张乐, 吴波, 叶雯, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0406006.
 - 13 Yin Guolu, Lou Shuqin, Peng Wanqing, *et al.*. Sensitivity of fiber Bragg grating based Fabry-Perot interferometric sensor [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(6): 1490-1495.
尹国路, 娄淑琴, 彭万敬, 等. 光纤布拉格光栅法布里-珀罗干涉式传感器灵敏度[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1490-1495.
 - 14 Niu Siliang, Rao Wei, Jiang Nuan, *et al.*. Investigation on phase spectra of fiber Bragg gratings and the constructed Fabry-Perot cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0806007.
牛嗣亮, 饶伟, 姜暖. 光纤布拉格光栅及其构成的法布里-珀罗腔的相位谱特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0806007.
 - 15 Guo Haifeng, Lü Shasha, Liu Fang, *et al.*. Analysis of the vibration sensitivity of Fabry-Perot cavities [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1202004.
郭海风, 吕莎莎, 刘芳, 等. 法布里-珀罗腔振动敏感度的分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1202004.
 - 16 Zhao Yan, Wang Daihua. Mathematical model of optical wedges for cross-correlation demodulation of cavity length of optical fiber Fabry-Perot sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0106007.
赵艳, 王代华. 用于光纤法布里-珀罗传感器腔长互相关解调的光楔的数学模型研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0106007.
 - 17 S E U Lima, O Frazão, R G Farias, *et al.*. Mandrel-based fiber-optic sensors for acoustic detection of partial discharges-a proof of concept [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010, 25(4): 2526-2534.

栏目编辑：张腾