

侧面压迫式及端面拉伸式增敏光纤光栅 水声传感器

李东明^{1,2} 陈 军¹ 葛辉良² 桑卫兵²

(¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

² 杭州应用声学研究所, 浙江 杭州 310012

摘要 研究了采用侧面压迫式增敏和端面拉伸式增敏的无源光纤光栅水声传感器。采用灌注和弹性片端面增敏两种方案分别对光纤光栅传感器进行增敏。研究表明灌注方案谐振频率过低(300 Hz), 高频灵敏度过低(小于-205 dB), 且制作工艺要求比较复杂; 弹性片端面增敏方案采用铍铜片进行增敏, 在 100~1000 Hz 频率范围内灵敏度为(-175±2) dB。对端面增敏传感器进行了封装, 并应用于水声的检测实验。实验表明, 该传感器在灵敏度及灵敏度频响指标上已经可以满足应用要求。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 传感器; 增敏

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0506001

Water Sound Sensor Using the Optical Fiber Grating Sensitivity Enhanced Through Side Pressure and End Surface Pulling

Li Dongming^{1,2} Chen Jun¹ Ge Huiliang² Sang Weibing²

(¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China
² Hangzhou Applied Acoustics Institute, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

Abstract Hydroacoustic sensor of the passive optical fiber grating sensitivity enhanced through side pressure and end surface pulling is investigated. The filling and the elastic slice is used to enhance the sensitivity of the optical fiber grating sensor. The research results indicate that the resonance frequency using the filling method is too low (300 Hz), and high frequency sensitivity is too low (< -205 dB) too. The technology is complex. The Be-Cu (beryllium-copper) elastic slice is used to enhance sensitivity. In a frequency range of 100~1000 Hz the sensitivity reaches (-175 ± 2) dB. The casing of the enhanced sensitivity sensor is made and applied to water sound detection. The results indicate that its sensitivity and frequency response can meet the application requirement.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; sensor; enhanced sensitivity

OCIS codes 060.2770; 060.2370; 060.3735; 060.3788

1 引 言

光纤光栅作为传感器以其众多的优越性而迅速发展, 由于其对应力、温度和振动等物理量以及某些化学量的敏感, 已经在桥梁建筑、矿山油田和地下水探测等诸多领域得到广泛应用^[1~12]。在工程应

用中, 传感器的灵敏度是一个重要的标志性参数。同时, 在工程应用中必不可少的封装也将带来传感器灵敏度的变化。因此, 研究传感器的增敏及其与封装之间的关联是光纤光栅传感器研究中的一个重要课题^[13,14]。

收稿日期: 2011-05-31; **收到修改稿日期**: 2011-09-27

作者简介: 李东明(1979—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事光纤水声传感技术方面的研究。

E-mail: lidongming715@163.com

导师简介: 陈 军(1946—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事激光、非线性光学及光纤传感等方面的研究。

E-mail: chenjun1@zju.edu.cn

对于无源光纤光栅水声听测传感器,增敏的方法中有侧面压迫式增敏和端面拉伸式增敏。本文对这两种方法都进行了研究。在侧向压迫式增敏研究中,利用购置的无源光纤光栅传感器进行了设计、封装和试验,在几种封装材料中最终确定了环氧树脂作为封装材料,研制了水声传感器。并对增敏后的光纤光栅传感器进行了水声传感实验以及灵敏度测试。与裸光纤比较,这一增敏可以在 100~1000 Hz 的声频段获得 -189~-218 dB 的压力相移灵敏度。

在端面拉伸式增敏研究中,采用高弹性铍铜片作为端面弹性膜片拉动光栅产生变形来达到增敏效果,并通过封装设计,制作了水声传感器。进行了水声传感实验以及灵敏度测试。与裸光纤比较,这一增敏可以在 100~1000 Hz 的声频段能获得 -175 dB 的声压相移灵敏度,相当于获得 3840 倍的增敏效果。

2 光纤光栅水声传感原理及系统构成

2.1 光纤光栅传感原理

如图 1 所示,假设在光纤纤芯中写入一段布拉格(Bragg)型光纤光栅,其长度为 l 、周期为 Λ 、有效折射率为 n_{eff} ,那么由该光纤光栅所反射回的激光中心波长(Bragg 波长)可表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

光纤光栅反射光的带宽为^[15]

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B s \sqrt{(\Delta n/2n)^2 + (l/N)^2}, \quad (2)$$

式中 N 为光栅层数,对强耦合光栅(反射率接近 100%)来说, s 近似为 1,对弱耦合光栅来说, s 近似为 0.5。从(2)式可看出,光栅的带宽与折射率变化的大小成正比,与光栅长度成反比。经过计算可以得到,以下实验所用的 4 cm 长光栅的带宽约为 0.054 nm。

光纤光栅在外界压力或拉力作用下,会改变光

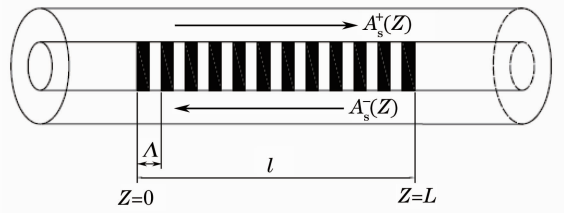


图 1 光纤 Bragg 光栅结构示意图

Fig. 1 Schematic of fiber Bragg grating

纤光栅折射率和光栅周期,导致光栅 Bragg 波长的变化。光纤光栅水声传感的基本原理是在声压的作用下,一方面由于弹性形变效应使光栅的周期伸长或缩短,另一方面由于光弹效应使光纤的折射率发生变化。两者共同作用使光栅的 Bragg 波长改变,波长的变化与光纤光栅应变的关系可以表示为^[15]

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\lambda_B\epsilon. \quad (3)$$

这里假设光纤的应变是均匀和各向同性的。(3)式中 $P_e = n^2[p_{12} - (p_{11} - p_{12})\nu]/2$ 称之为有效光弹系数,其中 p_{11} 和 p_{12} 为光纤 Pockel 系数, ν 为光纤泊松比,(3)式表达了光栅波长变化与应变间的线性关系。由弹性力学可知,外界压力引起的各向同性应力在裸光栅中产生的轴向应变量为

$$\epsilon = -P(1 - 2\nu)/E, \quad (4)$$

式中 E 为光纤光栅杨氏模量, P 为声压压强。(3)、(4)式联立可得光纤光栅中心反射波长的相对变化与声压关系,可以表示为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = -(1 - P_e)(1 - 2\nu)P/E. \quad (5)$$

当传感光栅周围声压变化时,传感光栅中心反射波长发生相应改变,这样就实现了水声声压对反射信号光的波长调制。所以,通过实时检测中心反射波长偏移量 $\Delta\lambda_B$,即可获得声 P 变化的信息。

2.2 光纤光栅水声传感实验系统构成

光纤光栅水声传感实验系统如图 2 所示,放大

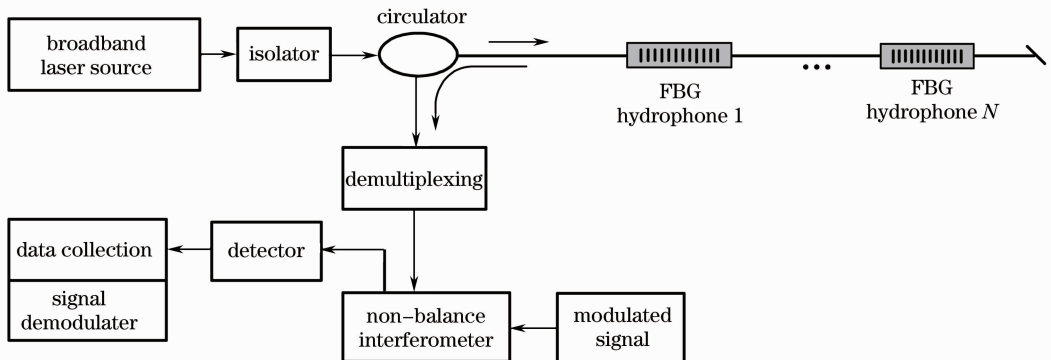


图 2 光纤光栅传感器系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fiber grating sensor system

自发辐射(ASE)宽带光源发出的激光(波长范围1530~1565 nm)通过隔离器、衰减器和环形器进入光纤光栅水听器探头,环形器的返回光信号为携带声信息的光频波动信号,光频变化的光信号进入外调制非平衡迈克耳孙(Michelson)干涉仪后产生干涉波形,该干涉波形的光强度信号经光电探测器转换为电信号输入到数据采集卡进行PGC软件解调。

当光纤光栅在声压作用下发生应变时,光纤光栅的中心波长发生变化,其变化量 $\Delta\lambda_B$ 与非平衡干涉仪的相位变化成正比。检测干涉仪的相位变化即可获得相应的声压变化。采用非平衡干涉仪检测相位变化是一种宽带、高分辨率的检测方法,尤其适合于水声信号频带内的高频动态相位变化检测。采用双光束非平衡干涉仪进行水听器波长变化解调时,干涉仪的输出光强 I 与光栅反射波长 λ 的关系为

$$I(\lambda_B) = A \{1 + V \cos[\phi(\lambda_B) + \phi_0]\}, \quad (6)$$

式中 A 为输入光的强度参数, ϕ_0 为干涉仪的初始相位偏置,它是一个缓慢变化的随机参数。 $\phi(\lambda_B)$ 为与输入波长有关的相位项,它的表达式为 $\phi(\lambda_B) = 2\pi nd/\lambda_B$,式中 nd 为非平衡干涉仪两光纤臂之间的光程差,当在光栅上施加动态应变时,产生的反射波长变化为 $\Delta\lambda_B$,在相位项中相应的变化为

$$\Delta\phi = 2\pi nd \Delta\lambda_B / \lambda_B^2. \quad (7)$$

将(4)、(5)式及光纤杨氏模量等参数代入(7)式可以得到相位变化与光栅应变变量及干涉仪光程差之间的相互关系为

$$\Delta\phi(\lambda_B) = 4.9nd\epsilon/\lambda_B. \quad (8)$$

由(8)式可知相位变化与光栅轴向应变大小和非平衡干涉仪的光程差成正比,通过选择合适的光程差,干涉仪相位变化可以做到对动态和准静态应变十分敏感。但光程差的选择应小于光纤光栅线宽所决定的相干长度,以便干涉仪两臂反射光相干叠加而产生干涉条纹。根据干涉仪相干长度表达式

$$l_c = n\lambda_B^2/2\Delta\lambda_B, \quad (9)$$

可知该光栅的相干长度为36 mm。因此在采用干涉仪对光纤光栅的波长变化进行解调时,干涉仪的光程差必须小于36 mm。采用Michelson干涉仪作为非平衡干涉仪来进行解调,为保证一定的干涉信噪比,解调干涉仪的光程差一般需小于相干长度的1/4,因此设计中光程差取值为9 mm,干涉仪制作后实测光程差值为8 mm。实验中,当解调干涉仪光程差固定后,光纤光栅传感器灵敏度的大小则仅取决于其增敏效果。

3 传感器增敏设计及实验结果

对光纤光栅的增敏可采用侧面压迫式增敏和端面拉伸式增敏两种方式实现,侧压式增敏是指利用杨氏模量比较低的聚合物树脂在光纤光栅周围进行灌注,增大光纤光栅传感器的受压面积,以提高光纤光栅本身的中心波长变化率。端面拉伸式增敏原理是指将光纤光栅两端固定于弹性较好、面积较大的弹性膜片上,利用膜片随声压的振动拉伸光栅,使光纤光栅波长随之波动,从而达到增敏的目的。侧向增敏方案在国内外有较多研究成果报道,其主要应用于有源光纤光栅声传感器的增敏封装,具备尺寸小、耐压高的优点。端面拉伸式增敏方案具备增敏能力高的优点,适用于普通无源光纤光栅水声传感器。

3.1 光纤光栅侧向灌注增敏

利用聚氨酯胶或环氧树脂灌注方案如图3所示,将光纤光栅固定于两个刚性端帽上,两端帽之间用厚度小于0.5 mm薄有机玻璃外壳密封,分别对内部灌注聚氨酯胶和环氧树脂进行了实验和比较。

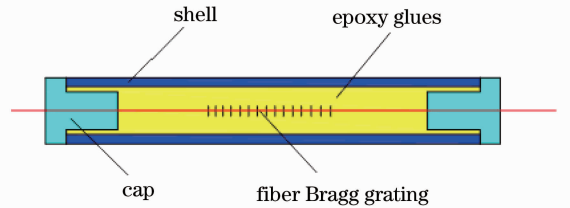


图3 光纤光栅侧向灌注方案示意图

Fig. 3 Schematic of fiber grating side filling

该结构的增敏原理是在增大光纤光栅传感器的受压面积的同时,降低整个传感器结构的杨氏模量,使结构的声压响应更加灵敏。设光纤光栅的杨氏模量为 E_1 ,直径为 D_1 ,灌注结构杨氏模量 E_2 ,外径 D_2 ,两者长度相同,均为 L 。则增敏倍数计算公式为

$$K = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \frac{E_1}{E_2}. \quad (10)$$

对上述方案分别采用聚氨酯胶和环氧树脂进行试样研制,在灌注聚氨酯胶试样时由于胶在固化过程中会产生较大的收缩,使光纤光栅产生了很大的压缩形变,波长静态漂移大于20 nm,导致光纤光栅光谱严重变形,无法进行干涉,因此认为灌注聚氨酯胶不利于光纤光栅传感器的制作。故改为环氧树脂进行灌注封装,其杨氏模量为 $E_2 = 3$ GPa,远低于石英光纤($E_1 = 77$ GPa),环氧树脂灌注层外径设计值为5 mm,将参数代入(10)式中可以计算出增敏倍数为 $K = (77 \times 5) / (3 \times 0.125) \approx 1027$ 倍。

对该样品采用水声传感中常用的比对法在实验室内进行了灵敏度测量,具体方法为:用振动液体腔产生声驻波场,将标准压电水听器和光纤光栅水声传感器放入振动液柱,使两者的声中心处于同一水平面。标准水听器灵敏度为-199 dB,实验时标准水听器与测量放大器配合使用,设光纤光栅传感器

表1 环氧树脂灌注光纤光栅传感器灵敏度测试结果

Table 1 Measured results of sensitivity of fiber grating sensor using epoxy resin filling

Frequency /Hz	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Sound-phase sensitivity /dB	-189.5	-182.4	-169.5	-203.8	-205.5	-212.5	-216.4	-216.6	-222.1	-218.3
Undulation sensitivity /dB	±25									

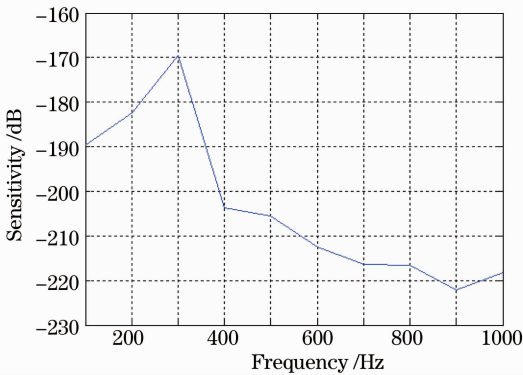


图4 环氧树脂灌注传感器灵敏度测试曲线

Fig. 4 Sensitivity curve of epoxy resin affused detector

从表中可以看出,用环氧树脂封装的光纤光栅传感器在300 Hz有很强的谐振峰,导致频带内灵敏度频响极度不平。在高频段以1000 Hz为例,其灵敏度较裸光栅高55 dB左右,折算成增敏倍数为562倍,与设计的增敏倍数在同一量级,说明设计基本能够指导实际研制,但该样品灵敏度偏低的特性限制了其实际应用。进行这种侧向灌注增敏结构的实验研究一方面为了便于与端面拉伸式增敏方案的结果进行比较,另一方面也是为今后的小型化有源光纤光栅水听器的研制提供依据。

3.2 端面弹性膜片增敏

利用端面弹性膜片随声压的振动来拉动光纤光栅使其产生形变,可以有效提高光纤光栅波长-声压响应度,从而达到增敏的目的。弹性膜片可以选择不同的材料,例如弹性极好的铍铜片、弹簧钢片,或厚度可控的聚碳酸脂片等。本文设计了几种不同的弹性片增敏结构来验证该方案的可行性,最终选定高弹性铍铜片作为增敏膜片。图5所示的结构是采用高弹性铍铜片进行增敏的结构示意图,光纤光栅与铍铜片之间采用聚碳酸脂连接帽进行固定,弹性片边缘与壳体之间采用环氧树脂进行密封粘接,壳体采用厚2 mm的硬铝材料保证了足够的刚性,光

输出电压为 V_h , 标准压电水听器输出电压为 V_z , 测量放大器放大量为 C , 则光纤光栅水声传感器灵敏度为: $M = 20\lg(V_h/V_z) + C - 199$ 。所得到的光栅传感器和标准压电水听器输出电压值通过数据采集卡输入到微机中,通过软件进行对比计算。在振动液柱中测得的传感器灵敏度结果的如表1和图4所示。

纤光栅的右端与外壳之间采用环氧树脂进行固定,整个壳体内部空间完全密封。外壳外径为20 mm,内径为16 mm,因此弹性片的有效可利用直径为16 mm。

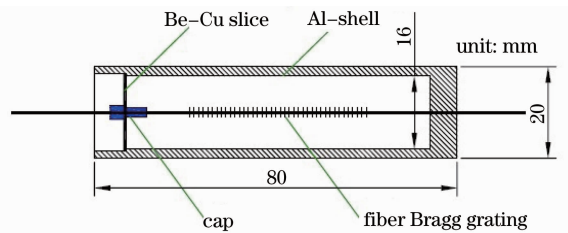


图5 铍铜弹性片端面增敏结构示意图

Fig. 5 Structure of end-surface enhanced sensitivity with Be-Cu slice

当变化的声压作用于传感器左侧弹性膜片之上时,会使膜片随之产生振动,膜片与壳体之间为简支连接,其中心点的位移对应光纤光栅的应变变量。因此求解膜片中心点在声压载荷作用下的挠度即可得到光纤光栅的应变变量,进而得到光纤光栅水声传感器的声压-相移灵敏度。根据弹性力学理论,周边简支的弹性膜片,在均布载荷的作用下,中心点处的挠度表达式为

$$\omega = \frac{Pa^4}{64D} = \frac{3Pa^4(1-\nu^2)}{16Et^3}, \quad (11)$$

式中 t 为膜片厚度, a 为膜片半径, $D = Et^3/12(1-\nu^2)$ 为圆形薄片的弯曲刚度, E 为膜片杨氏模量, ν 为膜片泊松比。计算中取样品参数为 $E = 270 \text{ GPa}$, $\nu = 0.35$, $a = 0.008 \text{ m}$, $t = 0.08 \times 10^{-3} \text{ m}$, 将参数代入(11)式可计算得到圆片中心点在1 Pa声压作用下的弯曲形变为

$$\omega = \frac{3Pa^4(1-\nu^2)}{16Et^3} = \frac{3 \times 0.008^4(1-0.35^2)}{16 \times 270 \times 10^9 \times (0.08 \times 10^{-3})^3} = 4.88 \times 10^{-9} \text{ m}, \quad (12)$$

其所对应的光纤光栅应变量为

$$\epsilon = 4.88 \times 10^{-9} / 67 \times 10^{-3} = 0.073 \times 10^{-6}, \quad (13)$$

将该应变变量代入(8)式可得

$$\Delta\phi(\lambda) = 4.9nd\epsilon/\lambda_B = 4.9 \times 1.46 \times 0.008 \times 0.073 \times 10^{-6} / 1550 \times 10^{-9} = 0.0027 \text{ rad}, \quad (14)$$

因此用解析法计算所得的相移灵敏度设计值为

$$M_\phi = 20 \times \lg\left(\frac{\Delta\phi}{P}\right) = 20 \times \lg\left(\frac{0.0027}{10^6}\right) = -171.4 \text{ dB}. \quad (15)$$

通过上述解析计算,初步得出该结构方案的灵敏度理论值,此计算未考虑中心聚碳酸酯固定帽的材料特性,如需考虑该结构则力学模型较为复杂,但聚碳酸酯固定帽的存在对灵敏度会有一些影响,因此本文进一步采用有限元分析的方法对该结构进行精细建模,利用 ANSYS 结构分析软件对模型进行详细分析,并计算该结构在不同频率下的灵敏度特性。

根据结构方案,首先利用 ANSYS 软件对其进行进行了有限元建模分析。模型中,该弹性片与壳体之间为简支连接,其余边界为自由边界条件。在 ANSYS 中,处理结构力学线性问题的有限元方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}, \quad (16)$$

式中 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, \mathbf{F} 为载荷向量, \mathbf{u} 为结构位移矢量。对于模态分析而言,即计算 $\mathbf{F}=0$ 时,方程有非零解的本征值问题,从而求得各阶谐振频率及对应的模态振型。计算中,选取材料参数为:铍青铜杨氏模量 270 GPa,密度 8300 kg/m³,泊松比 0.35,铝壳的杨氏模量 71.5 GPa,密度 2790 kg/m³;聚碳酸酯的杨氏模量 2.12 GPa,密度 1180 kg/m³,泊松比 0.36。

计算结果如图 6 所示,在片厚度为 0.08 mm 的情况下,该传感器在空气中的一阶谐振频率为 2415 Hz,二阶谐振频率为 11934 Hz,设计值可以满足工作频段的要求。

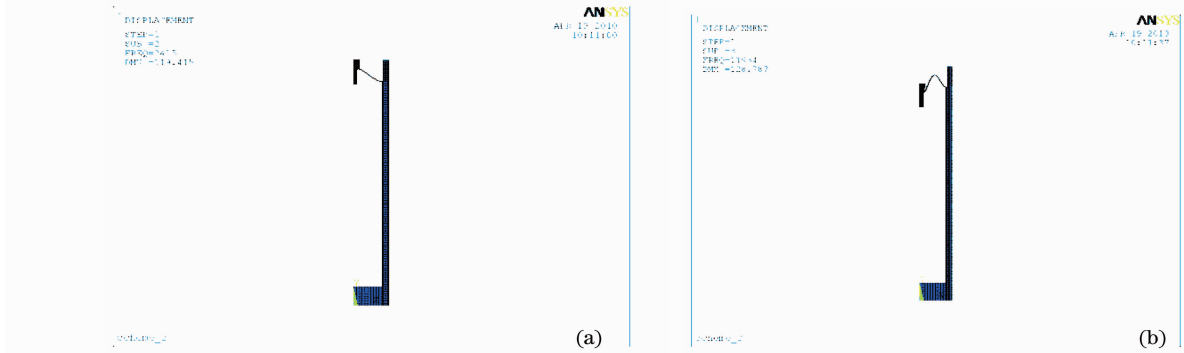


图 6 铍铜弹性片端面增敏谐振频率 ANSYS 计算结果。(a) 1 阶谐振; (b) 2 阶谐振

Fig. 6 ANSYS calculated resonant frequency for end surface enhanced sensitivity with Be-Cu elastic slice. (a) First-order resonance; (b) second-order resonance

为研究水声传感器的声学响应特性,利用有限元法计算了在水中声压幅值 1 Pa 的平面波激励下,膜片的位移频响特性。这是一个流体-结构耦合分析问题,由于水介质的特性声阻抗是空气介质的 3500 多倍,所以不得不考虑流体对结构振动特性的载荷作用,反过来,结构振动对流体中声场分布的影响也不可忽视。这两个方面通过流固耦合边界条件联系起来,即声压-应力连续以及法向加速度连续。通过变分原理可以得到整个问题的有限元方程

$$\mathbf{M}^p \ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{K}^p \mathbf{p} + \rho_0 \mathbf{R}\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{0}, \quad (17)$$

式中 \mathbf{M}^p 、 \mathbf{K}^p 和 \mathbf{R} 分别为流体质量矩阵,流体刚度矩阵和耦合质量矩阵, \mathbf{p} 为流体中声压。计算结果如图 7 所示,从图中可以看出在水中时该传感器的位移谐振峰为 1460 Hz。

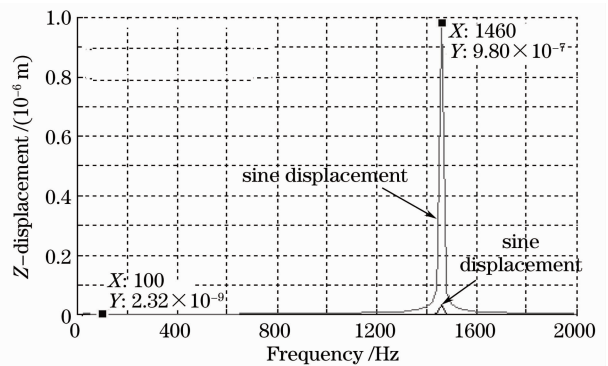


图 7 声压作用下膜片中心点轴向位移幅值响应及谐振响应曲线

Fig. 7 Longitudinal displacement responsibility and resonant response in slice central point of the membrane under the sound pressure

通过 ANSYS 软件建模计算结果可知,在频率为 1 kHz 的 1 Pa 声压作用下的弹性片中心点的位移幅值为 4×10^{-9} m,封装在外壳内的光纤光栅总长度为 67 mm,可知发生在光纤光栅上的应变量为 $\epsilon = 4 \times 10^{-9} / 67 \times 10^{-3} = 0.06 \times 10^{-6}$,由(8)式可知,该应变变量所产生的光纤光栅波长变化而引起的干涉仪相位变化为

$$\Delta\phi(\lambda) = 4.9nd\epsilon/\lambda_B = 4.9 \times 1.46 \times 0.008 \times 0.06 \times 10^{-6} / 1550 \times 10^{-9} = 0.0022 \text{ rad},$$

声相移灵敏度定义为 1 μ Pa 声压作用下相位变化相

对值,因此传感器 1 kHz 频率的相移灵敏度为

$$M_\phi = 20 \times \lg\left(\frac{\Delta\phi}{P}\right) = 20 \times \lg\left(\frac{0.0022}{10^6}\right) = -173.2 \text{ dB}. \quad (18)$$

当声压频率变为 100 Hz 时,弹性膜片中心点位移幅值为 2.32×10^{-9} m,再根据上述步骤计算 100 Hz 相移灵敏度为 -177.9 dB,由计算结果可知在 100~1000 Hz 频段内所设计的光纤光栅水声传感器理论灵敏度为 $-177.9 \sim -173.2$ dB。

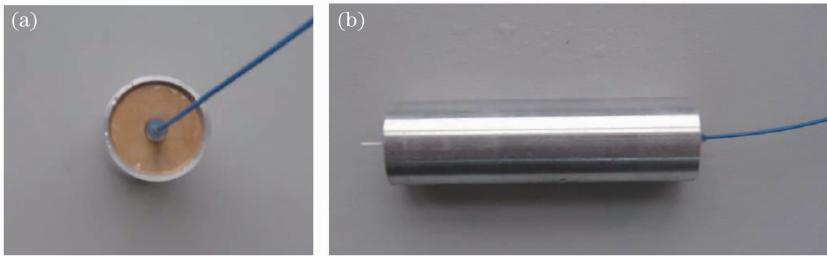


图 8 0.08 mm 铍铜片封装光纤光栅传感器实物图片

Fig. 8 Photos of 0.08 mm thick Be-Cu slice encapsulant fiber grating sensor

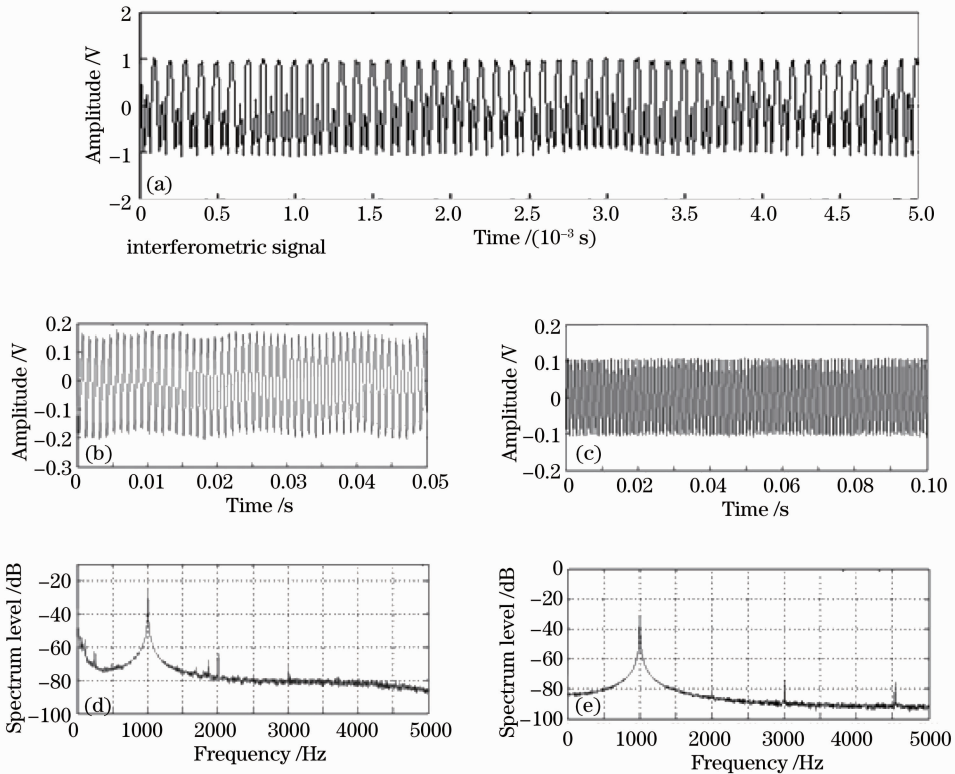


图 9 铍铜片封装光纤光栅传感器在 1000 Hz 声信号下的测试图像。(a)光栅水声传感器干涉图像;(b),(d)光栅水声传感器干涉图像经解调后的声信号及声信号谱;(c),(e)标准压电(PZT)水声传感器探测到的声信号及声信号谱

Fig. 9 Sensitivity curves of Be-Cu slice encapsulated fiber grating sensor at 1000 Hz sound signal. (a) Interferogram of fiber grating sensor; (b),(d) sound signal after demodulation and its spectrum; (c),(e) sound signal and spectrum from standard PZT sound sensor

图 8 为实际封装的传感器。封装过程为：将传感光栅清洗干净，用环氧树脂将其与铍铜片粘接在一起，待树脂完全固化后，将弹性片与外壳粘接，并在另外一端施加一定的预应力，光纤光栅与外壳接触点利用环氧树脂粘接，固化后即完成封装。

在实验室内对所封装的传感器样品进行了灵敏度测试。图 9 给出了传感器样品在振动液柱中测试的软件测试界面图像。图 9(a) 为光栅水声传感器反射光信号经过解调干涉仪后的干涉图像，干涉光信号经过光电转换后由采集卡 CH1 通道输入到微机中处理，经过软件解调得到图 9(b) 的声信号以及声信号频谱（折算到 1 Hz）。将光纤光栅传感器探测到的声信号 [图 9(b)] 与标准压电 (PZT) 水听器

表 2 铍铜片封装光纤光栅传感器灵敏度测试结果

Table 2 Measured results of sensitivity of fiber grating sensor using Be-Cu slice encapsulant

Frequency /Hz	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Sound-phase sensitivity /dB	-176.9	-176.3	-176.2	-176.0	-174.8	-175.0	-174.3	-173.4	-173.4	-173.1
Undulation of sensitivity /dB	±2									

经过实际测量该传感器在水中的一阶谐振点为 1.6 kHz，与理论计算的 1.46 kHz 较为接近。根据实际的测试数据，给出应用频段 (100~1000 Hz) 内的灵敏度频响曲线如图 10 所示。

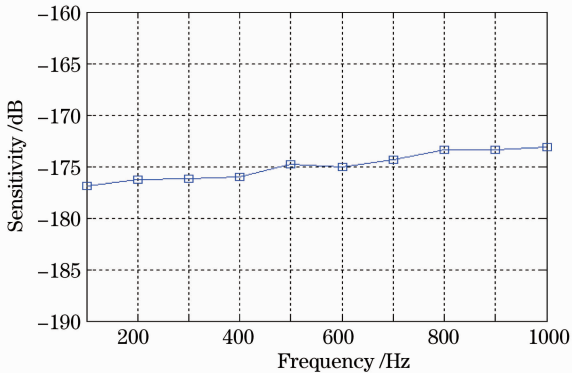


图 10 0.08 mm 铍铜弹性片增敏光纤光栅传感器灵敏度频响曲线

Fig. 10 Sensitivity frequency response curve of 0.08 mm thick Be-Cu slice encapsulated fiber grating sensor

膜片型光纤光栅传感器灵敏度大小与膜片厚度的立方成反比关系，其耐静水压能力则与之成正比，在设计传感器时应将两者结合考虑才能达到实用效果，为达到良好的灵敏度又兼顾实际应用中的耐压能力要求，本文所设计的传感器选取的膜片厚为 0.08 mm，所施加预应力使光栅波长漂移 1 nm，在千岛湖进行耐压实验证明其所能达到的耐静水压能力为 15 m (此情况下光纤光栅仍有预应力存在，传感器可正常工作)，在该传感器的实际应用场合 (固

所测声信号 [图 9(c)] 作对比可以看出，所设计的光纤光栅水声传感器探测到的声信号保真度良好，信噪比较高。

对该铍铜片增敏传感器的声致相移灵敏度在 100~1000 Hz 内的各频点进行了测试，测试数据记录在表 2 内，测试结果显示，该传感器的灵敏度为 -176.9~-173.1 dB，低频段与理论计算相差 1 dB，高频段相差 0.1 dB，理论分析和实验验证得到了很好的吻合，灵敏度带内起伏达到了 ±2 dB 以内。该传感器在灵敏度及灵敏度频响指标上已经可以满足工作频段为 100~1000 Hz 的舷侧阵列应用要求。

定于船舷侧向，形成舷侧阵列) 中，传感器吃水最大深度为 5~7 m，其所承受的耐静水压很小，因此所设计传感器可以满足一般舷侧水声传感的布阵需求。

4 结 论

采用灌注和弹性片端面增敏两种方案分别对无源光纤光栅传感器进行了增敏。研究结果表明灌注方案谐振频率过低 (300 Hz)，高频灵敏度过低 (小于 -205 dB)，且制作工艺要求比较复杂；弹性片端面增敏方案采用铍铜片进行增敏，在 100~1000 Hz 频段内灵敏度为 (-175 ± 2) dB。通过两种封装方法的对比实验，采用端面弹性膜片增敏的封装方式更适合无源光纤光栅水声传感器研制。在其应用于水声信号的检测实验中表明，该传感器在灵敏度及灵敏度频响指标上已经可以满足实际应用要求。

参 考 文 献

- 1 K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Jonson *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(10): 647~649
- 2 C. R. Giles. Lightwave applications of fiber Bragg gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1391~1404
- 3 V. Bhatia, A. M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensors [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9): 692~694
- 4 T. K. Gangopadhyay. Prospects for fibre Bragg gratings and Fabry-Perot interferometers in fibre-optic vibration sensing [J]. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2004, **113**(1): 20~38
- 5 B. Lee. Review of the present status of optical fiber sensors [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2003, **9**(2): 57~79

- 6 A. Iadicicco, A. Cusano, A. Cutolo *et al.*. Thinned fiber Bragg gratings as high sensitivity refractive index sensor [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 1149~1151
- 7 X. D. Wu, C. Schmidt-Hattenberger, K. Krüger *et al.*. Temperature-controlled fiber Bragg grating dynamic strain detection system[J]. *Sensors & Actuators; A. Physical*, 2005, **119**(1): 68~74
- 8 Chen Zhemin, Chen Jun, Wu Xiaodong *et al.*. Real-time measurement of harmonic frequency with fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1230~1234
陈哲敏, 陈 军, 吴晓冬等. 基于布拉格光纤光栅谐振频率的实时测量[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1230~1234
- 9 Li Zhizhong, Yang Huayong, Cheng Yusheng *et al.*. Pressure sensing characteristics of panda fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 157~162
李智忠, 杨华勇, 程玉胜等. 熊猫光纤光栅压力传感特性研究 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 157~162
- 10 Xiong Yanling, Zhao Hong, Zhang Jian *et al.*. Research on optical current transformer based on the fiber bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 949~953
熊燕玲, 赵 洪, 张 剑等. 基于光纤光栅的光学电流互感器研究 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 949~953
- 11 Wu Yonghong, Qu Wenjun, Shao Changjiang *et al.*. Basic optical-mechanical transformation theoretical equation for FBG strain sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2067~2070
吴永红, 屈文俊, 邵长江等. 光纤光栅应变传感器光-力转换的理论方程[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2067~2070
- 12 Li Kuo, Zhou Zhen'an, Liu Aichun *et al.*. High-sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor at high temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 249~251
李 阔, 周振安, 刘爱春等. 一种高温下高灵敏度光纤光栅温度传感器的制作方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 249~251
- 13 Zhan Yage, Cai Haiwen, Geng Jianxin *et al.*. Study on aluminum groove encapsulating technique and sensing characteristics of FBG sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 952~955
詹亚歌, 蔡海文, 耿建新等. 铝槽封装光纤光栅传感器的增敏特性研究 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(8): 952~955
- 14 Hu Jiayan, Jiang Shan. Study on encapsulating technique and strain sensing characteristic of FBG temperature sensor [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(3): 311~313
胡家艳, 江 山. 光纤光栅传感器的应力补偿及温度增敏封装 [J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(3): 311~313
- 15 P. S. Russell, J. L. Archambault, L. K. Reekie. Fiber gratings [J]. *Phys. World*, 1993, **10**(1): 41~46

栏目编辑: 谢 婧