

# 芯轴干涉型光纤水听器的声压灵敏度研究

周 炜 周宏朴 张 敏 廖延彪

(清华大学电子工程系光纤传感实验室, 北京 100084)

**摘要** 分析了3层结构(封装层、弹性筒、芯轴)的芯轴干涉型光纤水听器声压灵敏度。通过建模和三维的弹性力学分析,结果表明,影响水听器探头声压灵敏度的主要因素为弹性筒的杨氏模量、壁厚、外半径以及传感光纤的长度。而封装层材料的杨氏模量、泊松比、厚度和芯轴对声压灵敏度的影响不大。制作了一批水听器样品,理论分析其声压灵敏度为 $-150.7$  dB(re rad/ $\mu$ Pa),实测平均值为 $-151.3$  dB(re rad/ $\mu$ Pa)。实测值范围为 $-151.9 \sim -150.5$  dB(re rad/ $\mu$ Pa),理论值与实测结果最大相差不超过 $1.2$  dB(re rad/ $\mu$ Pa)。实验表明,封装前、后的工艺流程对探头的声压灵敏度有一定影响。

**关键词** 光纤水听器; 声压灵敏度; 弹性力学; 封装层; 弹性筒; 芯轴

**中图分类号** TB565+.1

**OCIS** 060.2370 230.1040

**文献标识码** A

## Acoustic Sensitivity of Interferometric Fiber-Optic Mandrel Hydrophone

Zhou Wei Zhou Hongpu Zhang Min Liao Yanbiao

(Fiber-optic Sensors Laboratory, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** The acoustic sensitivity of mandrel interferometric fiber-optic hydrophone with three layers (coated layer, flexible tube, mandrel) was analyzed. Modeling was built with three-dimensional elasticity analysis. Results show that the major factors which influence the acoustic sensitivity of the hydrophone are elastic modulus, wall thickness, outer radius of the tube, and sensing fiber's length and diameter. Young's modulus, Poisson's ratio and thickness of encapsulation layer and mandrel have little effect on the acoustic sensitivity. A number of hydrophone samples were produced. The theoretical value of their acoustic sensitivity is  $-150.7$  dB (re rad/ $\mu$ Pa), and the average measured values is  $-151.3$  dB (re rad/ $\mu$ Pa). The range of measured values is  $-151.9 \sim -150.5$  dB (re rad/ $\mu$ Pa), the difference between theoretical value and the measured value is less than  $1.2$  dB (re rad/ $\mu$ Pa). Experiments also show that encapsulation process of packaging has some influence on the acoustic sensitivity.

**Key words** fiber-optic hydrophone; acoustic sensitivity; elasticity; encapsulation layer; flexible tube; mandrel

## 1 引 言

光纤水听器是一种建立在光纤、光电子技术基础上的水下声信号传感器。干涉型光纤水听器是通过水中声波对光纤的压力作用改变光纤芯的折射率和长度,从而引起在光纤中传播的光束光程改变,导致相位发生变化。采用干涉测量技术检测相位变化,可得到有关水声的信息。相对于传统的压电水听器,光纤水听器具有探测灵敏度高、响应频带宽、耐恶劣环境、结构轻巧、易于遥测和构成大规模阵列等特点,是现代声呐的一个重要发展方向<sup>[1~4]</sup>。自1977年美国海军实验室的光纤传感系统计划问世以来<sup>[5]</sup>,经过30多年的发展,各国研究人员设计了各种不同结构的增敏结构。其中芯轴干涉型基元具有高声压灵敏度、较小的加速度响应、大带宽、能够耐一定静水压、结构简单、易于组阵等特点<sup>[6~8]</sup>,是当前光纤水听器及其组阵采用最多的基元方式。光纤水听器在国内处于工程实用化的研究过程中。

收稿日期: 2010-01-27; 收到修改稿日期: 2010-02-20

基金项目: 国家863计划(2006AA0AA102-03)资助课题。

作者简介: 周 炜(1984-),男,硕士研究生,主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail: zhouw03@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 廖延彪(1935-),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感器方面的研究。

E-mail: lyb-dee@mail.tsinghua.edu.cn

为了提高水听器的可靠性,通常用透声性能较好的材料对水听器探头进行封装。国内、外对于芯轴干涉型光纤水听器的声压灵敏度已有较详尽的分析<sup>[9~13]</sup>,但对于包含封装层在内的芯轴干涉型光纤水听器的声压灵敏度的完整的理论分析尚未见公开报道。本文针对这种结构的光纤水听器声压灵敏度进行深入的理论研究,并着重分析不同参数对声压灵敏度的影响。

## 2 水听器探头的力学分析及声压灵敏度的计算

图1给出了芯轴型探头的基本结构。工作时在声压作用下探头的弹性筒产生径向位移,从而使缠绕于其上的传感光纤长度发生变化。而缠绕在芯轴上的参考光纤的长度则保持不变。因此传输的激光经两路光纤及反射镜反射后会产生相位差,此相位差大小,反映了作用在水听器探头上的声压大小。

为便于分析,将水听器分为3层,如图1(b)所示,其中 $\delta$ 为封装厚度, $a$ 为弹性筒内半径, $b$ 为弹性筒外半径。第1层(外径 $b+\delta$ ,内径 $b$ )是透声性能较好的封装材料,它对探头起保护作用,第2层(外径 $b$ ,内径 $a$ )是弹性筒及绕于其上的光纤,用于实现声、光信号转换。缠绕光纤会使弹性筒的等效杨氏模量增加,第1层和第2层是紧密连在一起的。第3层是芯轴,起支撑作用,第2层和第3层之间由空气层隔开,以利于弹性筒的径向变形,从而增加探头的声压灵敏度。探头的封装层和弹性筒均可看作厚壁圆柱筒(壁厚 $t$ 与圆筒内半径 $a$ 之比大于 $1/10$ )。如在圆柱筒上任取一个六面微单元体,则该微单元4个侧面上的内应力情况如图2所示。

在进行力学分析时,考虑到外界载荷(声压)及封装层和弹性筒本身的轴对称性,故其横截面受声压作用变形后,对轴线仍保持对称。因此用极坐标 $(r, \theta)$ 求解时,切向位移 $u_\theta=0$ ;剪应力 $\tau_{r\theta}=0$ ,而径向位移 $u_r$ ,径向正应力 $\sigma_r$ ,切向正应力 $\sigma_\theta$ 均与坐标 $\theta$ 无关。且封装层,弹性筒以及芯轴沿 $z$ 向(探头轴线方向)的应变 $\epsilon_z$ 彼此相等,而轴向正应力 $\sigma_z$ 为常数,但彼此不等。

根据弹性力学原理对厚壁圆筒,可得微单元体上应力和应变的关系<sup>[14,15]</sup>。根据水听器的实际工作情况,其边界条件为(参考图1及图2)如下:

在第1层 $r_1=b+\delta$ 处,径向正应力等于声压 $P_s$ (方向为负),

$$\sigma_{(r_1=b+\delta)} = A_1/(b+\delta)^2 + 2C_1 = -P_s; \quad (1)$$

在第2层 $r_2=a$ 处,径向正应力等于零,

$$\sigma_{(r_2=a)} = A_2/a^2 + 2C_2 = 0; \quad (2)$$

在第1层与第2层交界处( $r_1=r_2=b$ ),径向位移相等,即 $\Delta r_{(r_1=b)} = \Delta r_{(r_2=b)}$ ,故有

$$\frac{1}{E_1} \left[ -\frac{A_1}{b} (1 + \mu_1) + 2C_1 (1 - \mu_1) - \mu_1 D_1 b \right] = \frac{1}{E_2} \left[ -\frac{A_2}{b} (1 + \mu_2) + 2C_2 (1 - \mu_2) - \mu_2 D_2 b \right]; \quad (3)$$

在第1层与第2层交界处( $r_1=r_2=b$ ),径向正应力相等,即 $\sigma_{(r_1=b)} = \sigma_{(r_2=b)}$ ,故有

$$A_1/b^2 + 2C_1 = A_2/b^2 + 2C_2; \quad (4)$$

第1层、第2层及第3层,在横截面上轴向力( $z$ 向)的总和,等于外部声压作用在探头端面上的合力,即

$$\pi[(b+\delta)^2 - b^2]D_1 + \pi(b^2 - a^2)D_2 + S_3 D_3 = -\pi(b+\delta)^2 P_s; \quad (5)$$

第1层、第2层及第3层的轴向应变彼此相等,即 $\epsilon_{z_1} = \epsilon_{z_2} = \epsilon_{z_3}$ ,所以

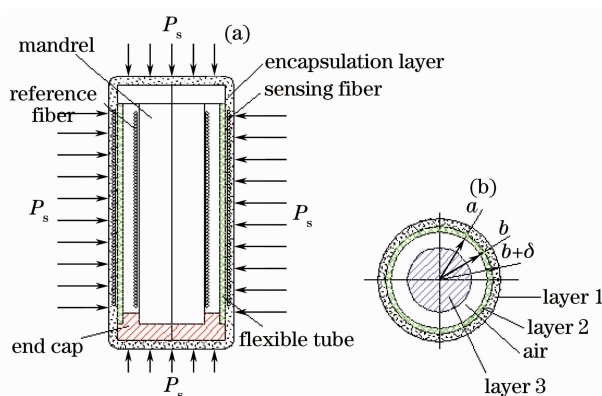


图1 芯轴型光纤水听器结构简图

Fig. 1 Structure schematic of mandrel fiber-optic hydrophone

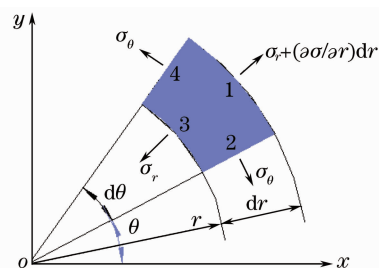


图2 圆柱筒微单元体上4个侧面的应力情况

Fig. 2 Stress of the four sides on the cylindrical micro-cell body

$$\frac{1}{E_1}(D_1 - 4\mu_1 C_1) = \frac{1}{E_2}(D_2 - 4\mu_2 C_2), \quad (6)$$

$$\frac{1}{E_1}(D_1 - 4\mu_1 C_1) = \frac{D_3}{E_3}. \quad (7)$$

(1)~(7)式中  $E$  为杨氏模量,  $\mu$  为泊松比,  $A, C, D$  为待定的积分常数,  $S_3$  为芯轴截面积, 下标 1, 2, 3, 分别表示第 1, 2, 3 层的有关参数,  $E_2$  为弹性筒的等效杨氏模量, 它考虑了弹性筒的自身杨氏模量  $E_{20}$  及光纤缠绕后的综合影响。

将(1)~(7)式整理后, 可得七元一次方程组, 以矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{(b+\delta)^2} & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a^2} & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1+\mu_1}{b^2} & -\frac{E_1(1+\mu_2)}{E_2 b^2} & -2(1-\mu_1) & \frac{2E_1}{E_2}(1-\mu_2) & \mu_1 & -\frac{E_1}{E_2}\mu_2 & 0 \\ \frac{1}{b^2} & -\frac{1}{b^2} & 2 & -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi[(b+\delta)^2 - b^2] & \pi(b^2 - a^2) & S_3 \\ 0 & 0 & -4\mu_1 & \frac{E_1}{E_{20}}4\mu_2 & 1 & -\frac{E_1}{E_{20}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E_3}{E_1}4\mu_1 & 0 & -\frac{E_3}{E_1} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \\ X \\ Y \\ Z \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\pi(b+\delta)^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中  $U = A_1/P_s, V = A_2/P_s, W = C_1/P_s, X = C_2/P_s, Y = D_1/P_s, Z = D_2/P_s, Q = D_3/P_s$ 。通过计算, 可得(8)式中的 7 个系数  $U, V, W, X, Y, Z, Q$ 。同时由(3)式知, 弹性筒在  $r_2 = b$  处的径向位移为

$$\Delta r_{(r_2=b)} = \frac{1}{E_2} \left[ -\frac{A_2}{b}(1+\mu_2) + 2C_2(1-\mu_2) - \mu_2 D_2 b \right] = \frac{1}{E_2} \left[ -\frac{V}{b}(1+\mu_2) + 2X(1-\mu_2) - \mu_2 Z b \right] P_s, \quad (9)$$

而水听器中传输激光在传感光纤和参考光纤中的相位差为

$$\Delta\varphi = 2 \left[ \frac{4\pi^2 n N |\Delta r_{(r_2=b)}|}{\lambda_0} (1 - P_e) \right], \quad (10)$$

故水听器探头的声压相移灵敏度为

$$\frac{\Delta\varphi}{P_s} = 2 \left[ \frac{4\pi^2 n N}{\lambda_0} (1 - P_e) \right] \left| \frac{1}{E_2} \left[ -\frac{V}{b}(1+\mu_2) + 2X(1-\mu_2) - \mu_2 Z b \right] \right|, \quad (11)$$

式中  $n$  为折射率,  $N$  为传感光纤缠绕圈数,  $P_e$  为弹光系数,  $\lambda_0$  为激光波长。

本文研制的光纤水听器探头的主要参数值如表 1 所示。将表 1 中有关数据代入(8)式后求解可得  $U = -3.76 \times 10^{-6} \text{ m}^2, V = 2.13 \times 10^{-4} \text{ m}^2, W = -0.4813, X = -2.1783, Y = -0.8857, Z = -3.1834, Q = -0.5626$ 。将计算出的各参数代入(9)~(11)式, 可得到封装后探头声压灵敏度的理论值:  $\Delta r_{(r_2=b)} = -8.3988 \times 10^{-12} P_s \text{ m}; \Delta\varphi = 0.03949 P_s \text{ rad}$ , 声压灵敏度级次为  $20 \lg(\Delta\varphi/P_s) = -30.7 \text{ dB(re rad/Pa)} = -150.7 \text{ dB(re rad/\mu Pa)}$ 。

表 1 芯轴型光纤水听器结构参数

Table 1 Structure parameters of fiber-optic mandrel hydrophone

Coated layer	$E_1 = 25.5 \text{ MPa}, \mu_1 = 0.46, \delta = 2 \text{ mm}$
Flexible tube	$E_2 = 5.88 \text{ GPa}, \mu_2 = 0.36, a = 7 \text{ mm}, b = 8 \text{ mm}$
Mandrel	$E_3 = 71 \text{ GPa}, \mu_3 = 0.3, R_0 = 2 \text{ mm}$
Fiber	$d_f = 190 \mu\text{m}, 1 - P_e = 0.79^{[6]}, n = 1.456, N = 59$
Wavelength	$\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$

$d_f$ : fiber diameter

### 3 声压灵敏度实验

根据表 1 的参数制作了一批探头,在 20~1000 Hz 频率范围内测试该批探头的声压灵敏度。由于测试过程中发现该频带内探头的声压灵敏度的波动不超过  $\pm 0.5$  dB (re rad/ $\mu$ Pa),因此用探头频带内的灵敏度平均值来表示探头的声压灵敏度。测试频带内声压灵敏度的平均值如表 2 所示。由表 2 可得 45 个光纤水听器探头封装后声压灵敏度分布在  $-151.9 \sim -150.5$  dB (re rad/ $\mu$ Pa),平均值为  $-151.3$  dB (re rad/ $\mu$ Pa),离散程度小于  $\pm 1$  dB (re rad/ $\mu$ Pa)。

表 2 45 个探头的声压灵敏度测试值

Table 2 Test value of 45 hydrophone's acoustic sensitivity

unit: dB (re rad/ $\mu$ Pa)

No.	Value	No.	Value	No.	Value	No.	Value	No.	Value
1	-151.1	10	-151.1	19	-151.8	28	-151.9	37	-150.3
2	-150.9	11	-151.4	20	-151.5	29	-151.1	38	-151.1
3	-150.8	12	-151.6	21	-150.8	30	-150.5	39	-150.9
4	-151.6	13	-151.8	22	-152.0	31	-151.9	40	-151.8
5	-151.6	14	-151.6	23	-151.7	32	-151.3	41	-151.7
6	-151.0	15	-151.7	24	-151.5	33	-151.6	42	-150.8
7	-151.4	16	-150.8	25	-151.6	34	-151.9	43	-151.6
8	-151.2	17	-150.9	26	-151.4	35	-150.7	44	-150.7
9	-151.2	18	-150.8	27	-151.0	36	-151.4	45	-150.7

45 个探头的声压灵敏度分布如图 3 所示。由图 3 可看出,探头的声压灵敏度实测值与理论值最大相差不超过 1.2 dB (re rad/ $\mu$ Pa)。说明理论能较好地预测光纤水听器封装后的声压灵敏度。

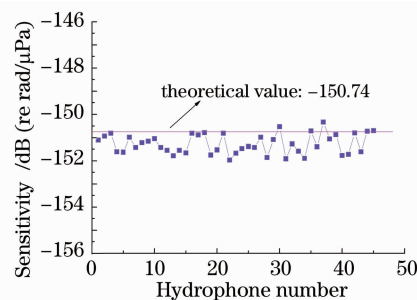


图 3 45 个探头的声压灵敏度实测值与理论值对比  
Fig. 3 Contrast between measured values and theoretical values of acoustic sensitivity

### 4 影响水听器探头声压灵敏度的主要因素

为了研究影响封装后探头声压灵敏度的主要因素,在理论分析的基础上,针对水听器探头的封装层、光纤、弹性筒以及芯轴的某些参数进行仿真,仿真时,除仿真参数值外,表 1 中其他参数值不变。

分别给出封装层材料的杨氏模量( $E_1$ )、泊松比( $\mu_1$ )及厚度( $\delta$ )对探头声压灵敏度的影响,如图 5,6 所示。可见,增加杨氏模量及泊松比,减小封装层的厚度,都会使声压灵敏度稍许下降。当封装材料的杨氏模量由 10 MPa 增加到 1 GPa 时,探头的声压灵敏度仅下降约 1.8 dB (re rad/ $\mu$ Pa)。当封装层的厚度由 1 mm 增加到 4 mm 时,探头的声压灵敏度增加不到 dB。实际上封装材料的杨氏模量一般都小于  $10^8$  Pa,厚度不大于 2 mm,因此它们对探头声压灵敏度的影响小。

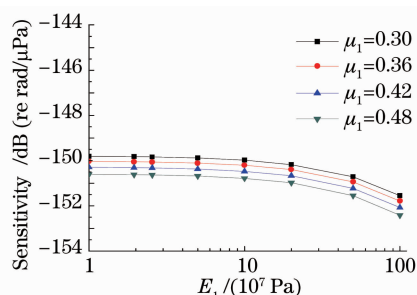


图 4 封装层的杨氏模量、泊松比对声压灵敏度的影响  
Fig. 4 Impact on the acoustic sensitivity of coated layer's Young's modulus and Poisson's ratio

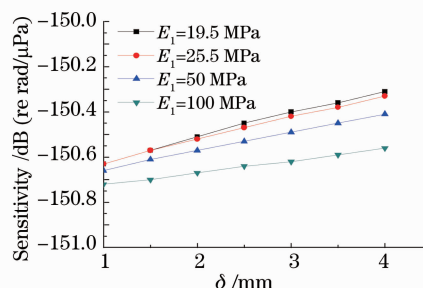


图 5 封装层的杨氏模量及厚度与声压灵敏度的关系  
Fig. 5 Impact on the acoustic sensitivity of coated layer's Young's modulus and thickness

相位变化与光纤长度成线性关系,符合光纤传感的理论公式。如图 6 所示,传感光纤长度  $L$  每增加 1 倍,声压灵敏度将增加 6 dB (re rad/ $\mu$ Pa)。

弹性筒主要参数对声压灵敏度的影响如图 7~9 所示,由图可知,除泊松比( $\mu_2$ )外,弹性筒的杨氏模量( $E_{20}$ ),筒壁厚度( $t$ )以及筒的外半径( $b$ ),都对探头的声压灵敏度有较大影响。声压灵敏度随弹性筒的杨氏模量及壁厚增加而减小,随筒外半径的增加而加大(光纤长度不变)。

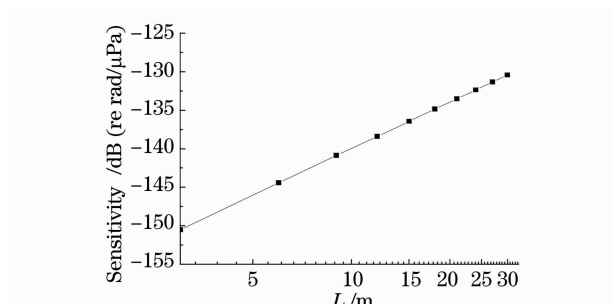


图 6 传感光纤长度与声压灵敏度的关系

Fig. 6 Relationship between acoustic sensitivity and sensing fiber length

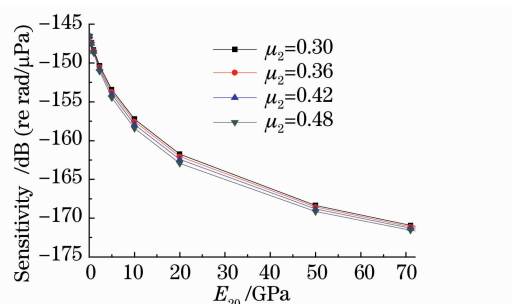


图 7 弹性筒的杨氏模量、泊松比对声压灵敏度的影响

Fig. 7 Impact on the acoustic sensitivity of flexible tube's Young's modulus and Poisson's ratio

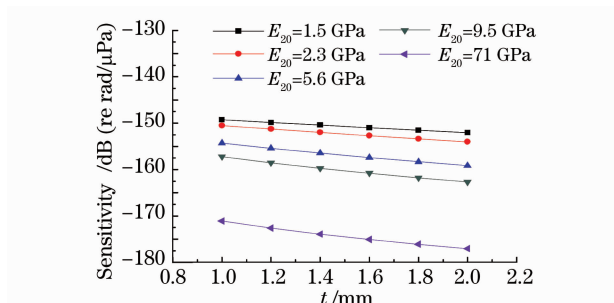


图 8 弹性筒的杨氏模量及壁厚对声压灵敏度的影响

Fig. 8 Impact on the acoustic sensitivity of flexible tube's Young's modulus and thickness

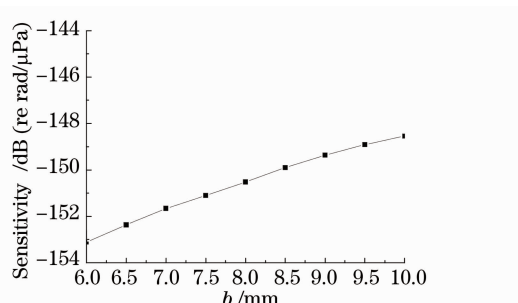


图 9 弹性筒外半径与声压灵敏度的关系

Fig. 9 Relationship between acoustic sensitivity and outer radius of flexible tube

弹性筒的横截面的径向形变可以看作沿弹性筒的长度方向截取一纵条横梁的挠度<sup>[16]</sup>。弹性筒的杨氏模量  $E_{20}$  增大,相同的声压  $P_s$  作用下,弹性筒的径向形变  $\Delta r$  减小,导致缠绕在弹性筒上的光纤长度变化  $\Delta L$  减小,即干涉仪的两臂的相位差  $\Delta\varphi$  减小,从而水听器的声压灵敏度减小。由图 7 知,当杨氏模量由 1 GPa 增至 71 GPa 时,声压灵敏度下降约 22.3 dB(re rad/ $\mu$ Pa)。

同理,当横梁的高度(弹性筒的厚度  $t$ )增加,横梁的挠度减小,即弹性筒的径向形变  $\Delta r$  减小,水听器的灵敏度降低。由图 8 知,当  $E_{20}=2.3$  GPa 时,若筒壁厚由 1 mm 增至 2 mm,声压灵敏度下降约 3.5 dB(re rad/ $\mu$ Pa)。

当弹性筒的外半径  $b$  增加时,横梁的挠度(弹性筒径向形变  $\Delta r$ )随  $b$  近似平方增加,同时光纤缠绕圈数  $N$  随  $b$  反比减小(光纤长度不变),综合影响的结果使得相位差  $\Delta\varphi$  增加,从而水听器的灵敏度增加。由图 9 知,当筒外半径由 6 mm 增至 10 mm 时,声压灵敏度上升约 5.4 dB(re rad/ $\mu$ Pa)。

芯轴一般选取杨氏模量远大于弹性筒杨氏模量的材料,再加上声屏蔽的效果,芯轴的径向形变要远小于弹性筒的径向形变。因而缠绕在芯轴上的参考光纤的相位变化远小于传感光纤的相位变化。所以芯轴对水听器的灵敏度的影响可以忽略。

由图 10 可知,当芯轴的杨氏模量小于 20 GPa(一般为非金属材料),声压灵敏度随着杨氏模量的减小会有所增加;当大于 20 GPa 后,影响很小。水听器探头的芯轴,通常用铝合金制造,它的杨氏模量为 71 GPa,因此对探头声压灵敏度的影响,可以不必考虑。

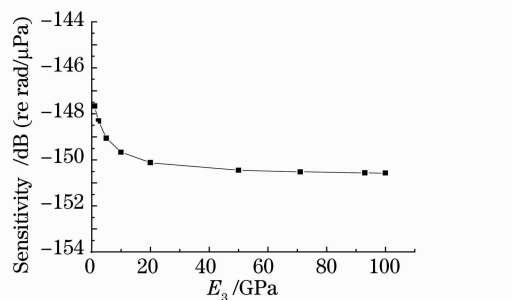


图 10 芯轴的杨氏模量与声压灵敏度的关系

Fig. 10 Relationship between acoustic sensitivity and mandrel Young's modulus

## 5 结 论

将芯轴干涉型光纤水听器分成 3 层结构,建立了三维力学模型,对其声压灵敏度进行了理论分析。并制作了小批量探头对理论分析进行了实验验证。声压灵敏度的实际测量值与理论值最大相差不超过 1.2 dB (re rad/ $\mu$ Pa),说明所建立的理论模型能较好地指导带封装层的光纤水听器的设计。进一步仿真分析表明,影响水听器探头声压灵敏度的主要因素依次是:传感光纤的长度,弹性筒的杨氏模量、壁厚、外半径。封装层和芯轴总体上对声压灵敏度的影响很小。应该指出的是,实验表明探头在封装前、后的工艺流程,往往会对声压灵敏度产生一定影响,因此必须对封装工艺给予充分重视。

## 参 考 文 献

- 1 P. Nash. Review of interferometric optical fiber hydrophone technology[J]. *IEEE Proc. Radar, Sonar Navig.*, 1996, **143**(3): 204~209
- 2 K. K. Clay, D. Anthony. Overview of high performance fibre-optic sensing[J]. *J. Phys. D*, 2004, **37**: 197~216
- 3 Gu Hongcan, Yuan Bingcheng, Huang Junbin *et al.*. Theoretical and experimental analysis of an active optic fiber hydrophone [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2316~2320  
顾宏灿,苑秉成,黄俊斌等. 一种有源型光纤水听器原理与实验分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2316~2320
- 4 Ge Qiang, Xu Changchun, Wu Xuqiang *et al.*. Two noise reduction methods in interferential optical fiber sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 726~728  
葛 强,徐长春,吴许强等. 干涉型光纤传感器中的双重降噪方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 726~728
- 5 B. Culshaw, A. Kersey. Fiber-optic sensing: a historical perspective[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(9): 1064~1078
- 6 Liao Yanbiao. *Fiber Optics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 71~73  
廖延彪. *光纤光学*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 71~73
- 7 A. M. Yurek, A. M. Tveten, A. Dandridge. High performance fiber optic hydrophones in the arctic environment[C]. 7th Optical Fiber Sensors Conference, Sydney, 1990. 321~324
- 8 S. Knudsen, A. B. Tveten, A. Dandridge *et al.*. Low frequency transduction mechanisms of fiber-optic air-backed mandrel hydrophones[C]. 11th Optical Fiber Sensors Conference, Sapporo, 1996. 208~211
- 9 Yin Kai, Zhou Hongpu, Zhang Min *et al.*. Optimization design of the pressure phase sensitivity of the fiber-optic air-backed mandrel hydrophone[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1940~1945  
殷 锴,周宏朴,张 敏等. 芯轴型光纤水听器灵敏度的优化设计[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1940~1945
- 10 Wang Zefeng, Hu Yongming. A novel passive homodyne fiber-optic hydrophone of acoustic low-pass filtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 783~786  
王泽锋,胡永明. 一种具有声低通滤波特性的无源零差光纤水听器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 783~786
- 11 Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Frequency response of two-order acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophones[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1883~1887  
王泽锋,胡永明,孟 洲等. 二阶声低通滤波光纤水听器的声压灵敏度频响特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(10): 1883~1887
- 12 Ma Lina, Hu Yongming, Luo Hong *et al.*. Acoustic pressure sensitivity of  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$  co-doped distributed Bragg reflection fiber laser hydrophone[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1473~1478  
马丽娜,胡永明,罗 洪等. 基于钇镱共掺分布布拉格反射式光纤激光器的有源光纤水听器声压灵敏度[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1473~1478
- 13 Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Effects of liquid viscosity coefficient on properties of acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophone[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 2018~2021  
王泽锋,胡永明,孟 洲等. 液体粘滞系数对声低通滤波光纤水听器声学特性的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 2018~2021
- 14 Xue Qiang. *Elasticity*[M]. Beijing: Peking University Press, 2006. 117~125  
薛 强. *弹性力学*[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006. 117~125
- 15 Hocker. Fiber optic acoustic sensors with composite structure: an analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(21): 3679~3683
- 16 Li Bingwei. *Analysis Method of Shell Structure*[M]. Beijing: People's Communications Press, 1977. 38~53  
李炳威. *壳体结构的工程分析方法*[M]. 北京: 人民交通出版社, 1977. 38~53