

文章编号: 0258-7025(2008)12-1940-06

# 芯轴型光纤水听器灵敏度的优化设计

殷 锴<sup>1,2</sup> 周宏朴<sup>2</sup> 张 敏<sup>2</sup> 丁天怀<sup>1,3</sup> 王立威<sup>2</sup> 荆振国<sup>2</sup> 廖延彪<sup>2</sup>

(清华大学<sup>1</sup>精密仪器与机械学系,<sup>2</sup>电子工程系光纤传感实验室,<sup>3</sup>精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京 100084)

**摘要** 声压相移灵敏度是光纤水听器的重要指标之一,提高灵敏度是光纤水听器设计的基本原则。应用正交设计方法对光纤水听器声压灵敏度指标进行优化设计,提出了一种带空气腔芯轴型光纤水听器的三维声压相移灵敏度理论模型,对其灵敏度特性进行了研究。根据提出的结构,制作了探头。通过试验测试,理论模型符合实际测试结果,并且通过极差分析方法得到各种因素对于光纤水听器灵敏度的影响程度,进而得到了优化设计方案。

**关键词** 光纤传感器;光纤水听器;声压相移灵敏度;正交设计

**中图分类号** TB 565<sup>+</sup>.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.1940

## Optimization Design of the Pressure Phase Sensitivity of the Fiber-Optic Air-Backed Mandrel Hydrophone

Yin Kai<sup>1,2</sup> Zhou Hongpu<sup>2</sup> Zhang Min<sup>2</sup> Ding Tianhuai<sup>1,3</sup>

Wang Liwei<sup>2</sup> Jing Zhenguo<sup>2</sup> Liao Yanbiao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Precision Instruments and Mechanology, <sup>2</sup>Department of Electronic Engineering, <sup>3</sup>State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** Pressure phase sensitivity is one of the most important performance indexes for the fiber-optic hydrophone. Maximizing the pressure phase sensitivity is a basic principle in the fiber-optic hydrophone design. In this work, the orthogonal experimental method was applied to optimize the design of the pressure phase sensitivity of the fiber-optic air-backed mandrel hydrophone. A general three-dimensional (3D) theoretical model was created, and nine fiber-optic hydrophones were designed and made for orthogonal experiment. Several factors which affect the sensitivity were analyzed in the experiments, and the results validate the theory. The optimized designs are also gained by the analysis of the results to maximize the pressure phase sensitivity.

**Key words** fiber-optic sensor; fiber-optic hydrophone; pressure phase sensitivity responsivity; orthogonal design

## 1 引 言

光纤水听器是用于海洋和广阔水域中作为检测声信号的装置,它在军事和石油勘探等民用领域都有重要应用<sup>[1]</sup>。在军事领域它是反潜声纳的核心部件,在民用领域,它可用作地震波探测、石油地震勘探、海洋渔群探测等。光纤水听器有多种结构形式,从结构上区分包括芯轴型, F-P 型<sup>[2,3]</sup>, Sagnac 型<sup>[4]</sup>等,其中带空气腔芯轴型的光纤水听器因其具有高灵敏度、大频率宽度等优点而被广泛应用。Cielo 等

最先报道和简单分析了带空气腔芯轴型光纤水听器<sup>[5]</sup>,之后 McDearmon 对此进行了更详细的分析<sup>[6]</sup>,同时芯轴型光纤水听器在组成阵列方面国内外均有报道<sup>[1,7]</sup>。

之前发表的论文中,试验结果仅被用于验证带空气腔芯轴型光纤水听器灵敏度的模型理论<sup>[5]</sup>,或者只考虑单个因素对声压灵敏度的影响,而未考虑多个因素的综合影响<sup>[6]</sup>。实际上,有多个因素对声压相移灵敏度有重要影响,为此本文利用正交设计

收稿日期:2008-01-02;收到修改稿日期:2008-04-14

基金项目:国家 863 计划(2003AA602110-1)资助项目。

作者简介:殷 锴(1982—),男,山西人,博士研究生,主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail:yinkai@tsinghua.org.cn

导师简介:廖延彪(1935—),男,江西人,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

方法来分析诸多因素对声压相移灵敏度的综合影响,从而给出它们之间的最佳组合,并且利用极差分析得到各个因素对声压相移灵敏度的影响程度。通过确定上述的多个因素,水听器可以在一定结构参数下得到最大的声压相移灵敏度指标。

在研究一种带空气腔芯轴型光纤水听器的基础上建立了三维准静态声压相移灵敏度模型,并通过实验验证了该理论模型。由于未涉及到多层假设和壳体模型近似,所以该模型适用于大部分带空气腔芯轴型水听器的设计。

## 2 理 论

光纤水听器的原理图如图 1 所示。光纤水听器探头为迈克耳孙干涉仪形式,图中的阴影部分为探头骨架。光源发出的激光通过 3 dB 耦合器进入迈克耳孙干涉仪的两个臂。其中敏感臂感受声压作用,参考臂与声压隔离,两臂中的激光通过反射镜反射后再次进入耦合器,在此两光束叠加并发生干涉,干涉光通过光电转换后解调,由此就得到所需的声压信号。

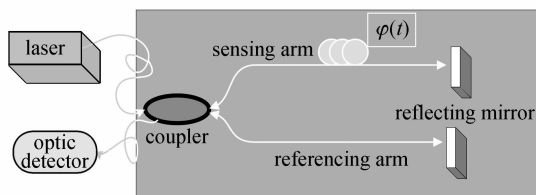


图 1 光纤水听器原理示意图

Fig. 1 Sketch map of the principle of the optic fiber hydrophone

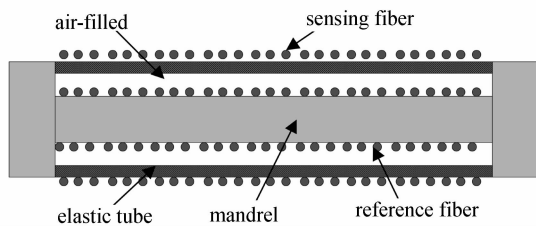


图 2 带空气腔芯轴型水听器结构示意图

Fig. 2 Structure sketch map of the air-backed mandrel hydrophone

图 2 是带空气腔芯轴型光纤水听器的基本结构。参考光纤缠绕在芯轴上,敏感光纤缠绕在薄壁弹性筒上以感受声压,芯轴与弹性筒之间是空气以提高灵敏度并且使参考光纤与声压隔离。在低频声波情况下,也就是声波波长大于或者与光纤水听器的有效尺寸相当时,弹性筒可以被认为处于一种平

面应变的状态<sup>[8]</sup>。声压作用于弹性筒使弹性筒径向尺寸发生变化,进而带动敏感光纤长度发生变化,将声压信号转换为相位信号进行测量。

带空气腔芯轴型光纤水听器的理论模型如图 3 所示,图中圆柱横截面从里向外可以分为芯轴、参考光纤、空气腔层、弹性筒、敏感光纤等几部分。整个模型建立在弹性理论的基础上。参考光纤缠绕在芯轴上,敏感光纤缠绕在弹性筒上。芯轴的弹性模量一般远大于弹性筒的弹性模量。对于大臂长差的光纤干涉仪结构,一般只需考虑弹性筒形变带给敏感光纤相位的变化。

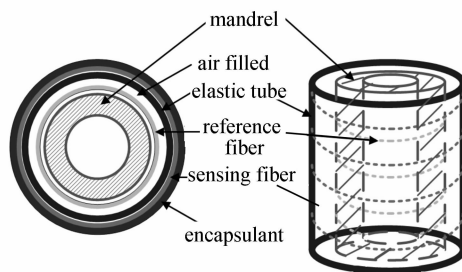


图 3 带空气腔芯轴型光纤水听器理论模型图

Fig. 3 Theory model of the air-backed mandrel hydrophone

由于假设弹性筒处于径向均匀压力作用下,类似于平面应变的状态,因此弹性筒的平衡方程在柱坐标下可以描述为<sup>[8]</sup>

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0, \quad (1)$$

式中  $\sigma_r$  为径向正应力,  $\sigma_\theta$  为切向正应力,  $r$  为半径。

由于弹性筒所载荷荷有轴对称性质,所以轴向应变与  $r, \theta$  无关,可表示为  $\epsilon_z = C_3$ 。而轴向位移  $u_z = C_3 \cdot z$ , 其中  $C_3$  为常数,  $z$  为轴向坐标。

相应的应力分别可以通过物理方程和变形协调方程解得

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{E}{1+\mu} \left( \frac{C_1 + \mu C_3}{1-2\mu} - \frac{C_2}{r^2} \right) \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1+\mu} \left( \frac{C_1 + \mu C_3}{1-2\mu} + \frac{C_2}{r^2} \right), \\ \sigma_z = \frac{E[2\mu C_1 + C_3(1-\mu)]}{(1+\mu)(1-2\mu)} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $C_1, C_2, C_3$  为积分常数,  $E$  为弹性筒材料的杨式模量,  $\mu$  为弹性筒材料的泊松比。

根据图 3 所示的水听器,在声压作用下,弹性筒的轴向位移受到固定在芯轴上的压紧螺母的限制,故两者的轴向位移相等,各种边界条件如图 4 所示。

边界条件可以表示为

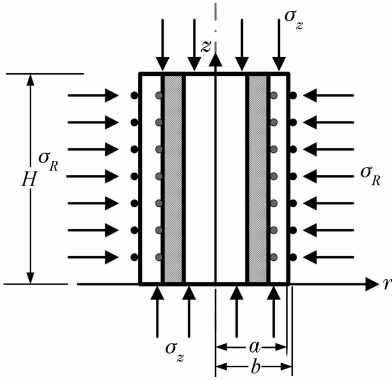


图 4 光纤水听器探头边界条件示意图

Fig. 4 Boundary condition of the alysis of the air-backed mandrel fiber-optic hydrophone

$$\begin{cases} \sigma_r|_{r=a} = 0 \\ \sigma_r|_{r=b} = -\sigma_R \\ u_z|_{z=H} = C_3 h \\ u_z^*|_{z=H} = C_3 h \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\sigma_R$  为弹性筒受到的光纤径向缠绕的反作用力,  $a, b$  为弹性筒的内外半径,  $u_z$  和  $u_z^*$  为外壁筒和芯轴的轴向位移,  $h$  为弹性筒的高度,  $H$  为敏感光纤在弹性筒上的有效高度。

为了能够进一步了解轴向力学状态,需要分析螺母受力情况。螺母的受力示意图如图 5 所示,螺母在外侧压力  $P_t$ , 弹性筒的作用力  $F$  和螺帽与中心

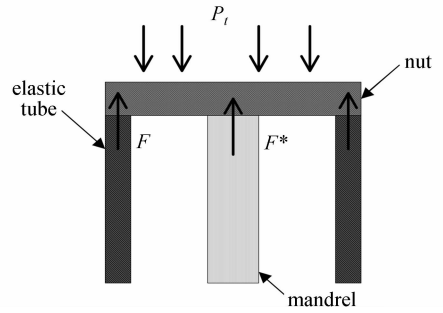


图 5 螺母力学状态示意图

Fig. 5 Mechanical status of the nut

支撑柱之间的作用力  $F^*$  的作用下平衡。而  $F = \sigma_z \pi(b^2 - a^2)$ , 可以预见的是, 由于螺帽和中心支撑之间是螺纹连接, 因此螺帽的弹性应变方向与中心支撑给螺帽力的方向必然是反向的。在这里仍然考虑中心支撑与弹性筒的位移与应变相同, 那么有关系式

$$\epsilon_{z|z=H} = \epsilon_{z^*|z=H},$$

于是还可以得到  $F^* = C_3 E^* S^*$ , 其中  $E^*, S^*$  分别为中心金属支撑的杨氏模量和有效面积。根据螺母的受力关系, 存在力平衡方程

$$-P_t S_n = -\sigma_{zH} \pi(b^2 - a^2) - C_3 E^* S^*, \quad (4)$$

式中  $S_n$  为螺母上表面的面积,  $S_n = \pi b^2$ 。基元探头未硫化之前,  $P_t = P_s, P_s$  为水中声压。这样将 (4) 和 (2) 式及相关关系式代入 (3) 式可以解得

$$\begin{cases} C_1 = -\frac{b^2 \{E^* S^* (1 + \mu)(1 - 2\mu)\sigma_R + E\pi(b^2 - a^2)[P_s \mu + (1 - \mu)\sigma_R]\}}{E[E\pi(b^2 - a^2) + E^* S^*](b^2 - a^2)} \\ C_2 = -\frac{a^2 b^2 (1 + \mu)\sigma_R}{E(b^2 - a^2)} \\ C_3 = \frac{b^2 \pi(P_s + 2\mu \sigma_R)}{E\pi(b^2 - a^2) + E^* S^*} \end{cases},$$

而对于光纤缠绕的反作用力  $\sigma_R$ , 则可表示为<sup>[9]</sup>

$$\sigma_R = E_f S_f N \Delta r / (b^2 H) = k_{fn} N \Delta r / (b^2 H), \quad (5)$$

式中  $E_f, S_f$  为光纤石英部分的弹性模量和面积,  $N$  为敏感光纤绕制的圈数,  $k_{fn} = E_f S_f$  为等效光纤劲度系数,  $\Delta r$  为光纤轴向长度的位移。

而根据  $\Delta r$  的定义有

$$\Delta r = u_{r=b} = C_1 b + (C_2 / b), \quad (6)$$

如果设  $v^* = E_f S_f N / H, v^*$  为光纤单位径向厚度的可归一化劲度系数, 并且

$$x^* = \frac{b^2 \{ \pi a^4 E(1 + \mu) - a^2 [E^* S^* (1 + \mu) + \pi b^2 E \mu] - b^2 [\pi b^2 E + E^* S^* (1 + \mu)(1 - 2\mu)] \}}{[E^* S^* + \pi(b^2 - a^2)E][(b^2 - a^2)(bE - v^* \mu) + (a^2 + b^2)v^*] - 2b^2 E^* S^* v^* \mu^2},$$

$x^*$  为单位声压作用下径向长度的变化, 可以得到

$$\Delta r = P_s x^*, \quad (7)$$

综合以上因素, 由于弹性筒径向伸缩所带来的光纤长度以及弹光效应引起的相位变化为

$$\Delta \phi = 2 \frac{2\pi n \delta L}{\lambda} (1 - P_c) = 2 \left[ \frac{4\pi^2 n \Delta r N}{\lambda} (1 - P_c) \right], \quad (8)$$

式中  $P_c$  为弹光系数, 约为 0.21,  $n$  为光纤折射率,  $L$  为传感光纤长度。因此声压相移灵敏度为

$$\frac{\Delta\phi}{P_s} = 2 \frac{2\pi nL}{\lambda} [x^* (1 - P_c)/b], \quad (9)$$

应该指出的是, 当绕制两层光纤的时候, 一般灵敏度降低约 1.5 dB re rad/ $\mu$ Pa。

### 3 正交优化设计

由(9)式可以看出, 声压相移灵敏度是光纤水听器探头的主要技术指标, 影响该技术指标的因素有很多, 比如弹性筒材料(A)、弹性筒外径和厚度(D)、芯轴材料(B)、光纤长度(C)等。而且这些因素对于声压灵敏度影响的程度一般都不相同, 在前期实验工作中也证实了这一点。因此如何优化这些因素的配, 使得探头的各项指标都能处在一个较好的状态, 或者是某一个或者两项指标处在最好的状态, 这是设计必须考虑的问题。

优化这些因素的方法有多种, 其中包括: 给出理论公式、由实验对各因素进行筛选、用正交设计法进行筛选等。从探头设计的实际情况看, 目前尚难于给出可用的理论公式。如果按照全部因素一一进行试验, 显然试验次数过多, 成本过大。一般情况下, 在实际设计与工程制作中, 光纤水听器声压相移灵敏度需要考虑弹性筒材料、弹性筒厚度及尺寸、芯轴材料、光纤长度这四个因素, 这四个因素也比较好实现, 因此对其进行重点分析。如果每个因素取 3 个不同的水平 (即取不同参数值), 需要  $3^4 = 81$  次试验, 显然全部试验考察不合理。

而正交设计是研究多因素多水平的又一种有效、合理且经济的设计方法, 它是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验, 这些有代表性的点具备了“均匀分散, 齐整可比”的特点, 正交试验设计是分析设计的主要方法<sup>[10]</sup>。如上所述, 如果采用正交设计方法, 采用合理的分析与数理统计, 可以得到比较全面的科学结论。在正交设计试验的时候要使用正交表, 按照正交表设计出的试验, 它的各个因素、各水平搭配是均衡的, 虽然试验的次数不多, 但是代表性比较强, 通过试验结果的统计分析, 就可以知道各个因素对于试验结果的影响程度, 找到最好的设计方案。

为了具体地研究四个因素对水听器主要指标的影响, 而又保证经济性, 可对每个因素取 3 个不同的水平, 再根据正交设计手册取  $L_9(3^4)$  正交表进行试验, 这样需要的试验总次数仅为 9 次, 试验测试大大

减少, 是比较合理、有效的设计。在  $L_9(3^4)$  正交表中各个因素以及水平的选择如表 1 所示, 弹性筒材料分别取聚合物材料 1, 铝合金, 聚合物材料 2 这三种不同弹性模量的材料; 芯轴材料取铝合金与不锈钢两种材料; 传感光纤取 2.6 m, 5.2 m 和 5.2 m (双层) 三个水平; 而弹性筒厚度取 1.25 mm, 1 mm 和 0.75 mm 三种厚度。这些因素和水平比较有代表性, 可以将工程中需要利用的各个参数进行考察, 进而实现优化。这些因素与正交表中的搭配情况列于表 2。

表 1  $L_9(3^4)$  中因素和水平的选择

Table 1 Choices of factors and levels in  $L_9(3^4)$

Factors	Levels	
A (material of the elastic tube)	A1	Polymer1
	A2	Aluminum alloy
	A3	Polymer2
B (material of the mandrel)	B1	Aluminum alloy
	B2	Stainless steel
C (length of the sensing fiber)	C1	2.6 m
	C2	5.2 m
	C3	5.2 m (two layers)
D (thickness of the elastic tube)	D1	1.25 mm
	D2	1 mm
	D3	0.75 mm

表 2  $L_9(3^4)$  正交表

Table 2  $L_9(3^4)$  orthogonal table

Experimental number	Factors			
	A	B	C	D
1	1	2	3	4
2	A1	B1	C3	D2
3	A2	B1	C1	D1
4	A3	B1	C2	D3
5	A1	B2	C2	D1
6	A2	B2	C3	D3
7	A3	B2	C1	D2
8	A1	B2	C1	D3
9	A2	B2	C2	D2
	A3	B2	C3	D1

### 4 实验结果与分析

图 6 为光纤水听器灵敏度测试示意图。用一个标准压电水听器校准待测的光纤水听器, 要求校准时将标准压电水听器和光纤水听器同时或不同时放置在容器内同样高度的位置进行测量, 通过对比两者之间灵敏度的关系就可以得到光纤水听器的灵敏度<sup>[11]</sup>。图 7 给出了光纤水听器灵敏度响应的实测结果 ( $< 2$  kHz)。实验结果表明, 利用正交设计法设

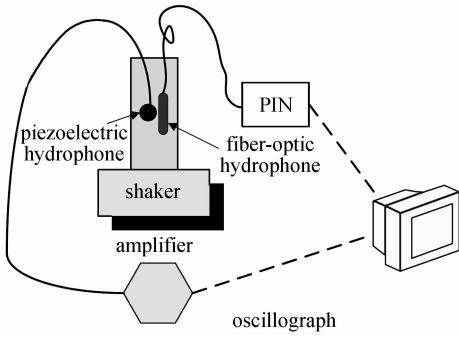


图 6 光纤水听器灵敏度测试示意图

Fig. 6 Measurement setup of the sensitivity of the fiber-optic mandrel hydrophones

计并制作出的 9 个光纤水听器探头灵敏度分布在  $-152 \sim -171$  dB re rad/ $\mu$ Pa 之间,并且可以看出在频带内灵敏度响应比较平坦,可以满足实际需求。

根据(9)式可以得到 9 个正交设计探头的声压相移灵敏度的理论值,再将图 7 中各个探头试验值在频带内取平均值,两者的相互比较如表 3 所示。

表 3 光纤水听器灵敏度理论值与实验结果对比

Table 3 Comparison of the theoretical results and experimental results

Experimental number	Factors				Pressure phase sensitivity (dB re rad/ $\mu$ Pa)		
	A	B	C	D	Theoretical results	Experimental results	Difference
	1	2	3	4			
1	A1	B1	C3	D2	-151.344	-152.397	1.053092
2	A2	B1	C1	D1	-173.666	-170.893	-2.77284
3	A3	B1	C2	D3	-143.97	-144.187	0.216747
4	A1	B2	C2	D1	-151.4187	-152.593	1.1
5	A2	B2	C3	D3	-165.447	-161.884	-3.56262
6	A3	B2	C1	D2	-150.982	-151.27	0.287891
7	A1	B2	C1	D3	-154.233	-155.113	0.879915
8	A2	B2	C2	D2	-166.108	-162.928	-3.1801
9	A3	B2	C3	D1	-147.391	-149.474	2.083099

表 4 正交设计光纤水听器探头极差分析

Table 4 Range analysis of fiber-optic hydrophones in orthogonal design

Unit (dB re rad/ $\mu$ Pa)	A (material of elastic tube)	B (material of mandrel)	C (length of the sensing fiber)	D (thickness of elastic tube)
$K_1$	-460.103	-467.477	-477.276	-472.96
$K_2$	-495.705	-933.262	-459.708	-466.595
$K_3$	-444.931	-	-463.755	-461.184
$k_1$	-153.368	-155.826	-159.092	-157.653
$k_2$	-165.235	-155.544	-153.236	-155.532
$k_3$	-148.31	-	-154.585	-153.728
Range	16.92467	0.282	5.856	3.925333

为了进一步研究各个因素对声压灵敏度的影响程度,以及找到各因素、各水平之间更好的搭配关系,可以按照表 4 的测试数据,分别计算出各个因素

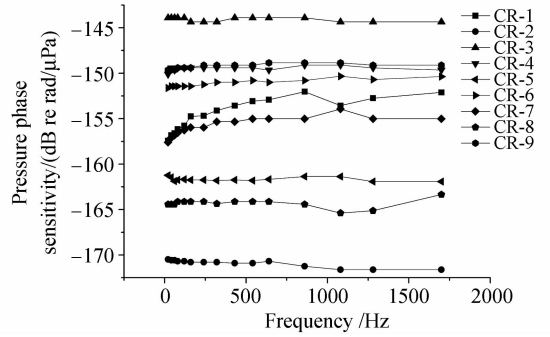


图 7 光纤水听器灵敏度响应图(0~1800 Hz)

Fig. 7 Sensitivity responses of the fiber-optic hydrophones between 0~1800 Hz

从表 3 可以看到,理论计算结果与实验测量结果非常接近,也就是说理论模型可以非常良好地估计探头的声压灵敏度。同时也发现,弹性材料为铝合金的理论值与试验值的最大差值比其他两种材料大,这说明理论模型在估计弹性模量很大的弹性筒材料时误差加大,但是仍在 3 dB re rad/ $\mu$ Pa 左右的可控范围之内。

在每个水平上的声压灵敏度之和,然后进行极差分析。其中  $K_i$  为某因素第  $i$  水平的声压灵敏度各次测试结果之和; $k_i$  为  $K_i$  除以该因素第  $i$  个水平所做

的试验次数;极差  $R$  等于某因素  $k_i$  中最大值与最小值之差。分析结果如表 4 所示。

由表 4 可以得到 7 点结论:1) 极差  $R$  越大,表示该因素对于声压灵敏度的影响也越大。从表 4 可以知道各个因素对于声压灵敏度影响程度,由大到小依次为弹性筒材料,敏感光纤长度,厚度,芯轴材料;2) 弹性筒材料弹性模量越小,声压灵敏度越高,但并不成线性关系;3) 敏感光纤长度与声压灵敏度之间基本成线性关系。声压灵敏度随敏感光纤长度的增长而增长;4) 同样长度的敏感光纤绕两层比一层的声压灵敏度低 1.43 dB re rad/ $\mu$ Pa;5) 声压灵敏度随弹性筒的厚度增加而降低,当弹性筒材料不同时,降低的程度也不同;6) 芯轴材料对于声压灵敏度基本没有影响;7) 声压灵敏度和平均值越高,表示水听器的灵敏度越高。再考虑到芯轴材料对于灵敏度影响非常小,同时为了尽量减小水听器探头的重量,选取表 3 中的使  $k_i$  最高的组合作为优化组合方案,即 A3(聚碳酸酯),B1(铝合金),C2 (5.2 m 单层),D3 (0.75 mm)组合,也就是 3 号组合。

## 5 结 论

提出了一种带空气腔芯轴型光纤水听器的三维灵敏度理论模型,推导出了声压相移灵敏度的表达式;应用正交设计方法根据要考察的不同因素及相关水平设计并制作了 9 个光纤水听器探头;通过压电水听器比对法进行试验测试,理论模型符合实际测试结果;最后通过极差分析方法得到各个因素对于光纤水听器灵敏度的影响程度,进而得到了优化设计方案。

## 参 考 文 献

1 P. Nash. Review of interferometric optical fiber hydrophone

- technology [J]. *IEE Proc.-Radar, Sonar Navig.*, 1996, **143** (3):204~209
- 2 Kang Chong, Zhang Shuquan, Huang Zongjun *et al.*. Influence of mode split upon resonance curve of Fabry-Pérot optical fiber hydrophone [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1):155~158  
康 崇,张树全,黄宗军等. 模式分裂对法布里-珀罗型光纤水听器谐振曲线的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1):155~158
- 3 Kang Chong, Huang Zongjun, Tong Chengguo *et al.*. Operating point stabilization of Fabry-Pérot optical fiber hydrophone based on Fourier transform spectrum [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1156~1160  
康 崇,黄宗军,佟成国等. 用傅里叶变换谱稳定法布里-珀罗型光纤水听器的工作点[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7):1156~1160
- 4 Song Zhangqi, Wang Xin, Cao Chunyan *et al.*. Fiber optic hydrophone based on Sagnac interferometer with saw-tooth wave phase biasing technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34** (7):957~961  
宋章启,王 鑫,曹春燕等. Sagnac 光纤水听器锯齿波相位偏置技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7):957~961
- 5 P. G. Cielo. Fiber optic hydrophone: improved strain configuration and environmental noise protection [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**:2933~2937
- 6 G. F. McDearmon. Theoretical analysis of a push-pull fiber-optic hydrophone [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **5**:647~652
- 7 Meng Zhou, Hu Yongming, Xiong Shuidong *et al.*. All polarization maintaining fiber hydrophone array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5):415~417  
孟 洲,胡永明,熊水东等. 全保偏光纤水听器阵列[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5):415~417
- 8 L. D. Landau, E. M. Lifshitz. *Theory of Elasticity* [M]. Pergamon, Oxford, UK, 1986. Chap. 1
- 9 R. D. Pechstedt, D. A. Jackson. Design of a compliant-cylinder-type fiber-optic accelerometer: theory and experiment [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**:3009~3017
- 10 Jin Chaoliang. *Orthogonal Design and Analysis of Multifactor* [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991. Chap. 2  
金超良. *正交设计与多指标分析*[M]. 北京:中国铁道出版社, 1991. 第二章
- 11 Peng Baojin, Liao Mao, Liao Yanbiao *et al.*. Study on measuring sensitivity of fiber-optic hydrophone [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11):1633~1638  
彭保进,廖 茂,廖延彪等. 光纤水听器灵敏度测试研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11):1633~1638