文章编号: 0253-2239(2010)02-0340-07

基于顺变柱体和膜片复合结构的压差式 光纤矢量水听器研究

吕文磊¹ 庞 盟² 王利威³ 张 敏³ 周宏朴³ 廖延彪³ 康 崇¹ 苑立波¹ (¹哈尔滨工程大学理学院,黑龙江哈尔滨 150001;² 香港理工大学电子工程系,香港) ³清华大学电子工程系光纤传感实验室,北京 100084

摘要 设计了一种基于顺变柱体和膜片复合结构的矢量光纤水听器。对水听器的传感原理和矢量生成原理进行 了理论模型分析,得出了水听器相移灵敏度的数学表达式,讨论了传感器的设计参数,并按照设计参数制作了水听 器探头。在国防水声一级计量站做了传感器相移灵敏度频响曲线和"8"字形方向图的测试实验。实验结果表明, 当频率为 800 Hz 时,此种复合结构的水听器相移灵敏度很高,能达到-155 dB re rad/μPa(0 dB=1 rad/μPa),并且 实验测试值与理论计算值基本吻合,偏差之处分析其原因主要由于理论模型不够精确和测试装置与固定装置有谐 振造成。

关键词 光纤传感器;矢量水听器;顺变柱体;膜片 中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103002.0340

Study on Optic Fiber Gradient Hydrophone Based on Composite Structures of Compliantly Variable Cylinder and Diaphragm

Lü Wenlei¹ Pang Meng² Wang Liwei³ Zhang Min³ Zhou Hongpu³ Liao Yanbiao³ Kang Chong¹ Yuan Libo¹

¹ Science School, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

² Department of Electronic Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

³ Laboratory of Optical Fiber Sensor, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University,

Beijing 100084, China

Abstract A kind of vector optical fiber hydrophone based on the composite structure of variable cylinder and diaphragm is designed. Firstly, the theoretical model of the hydrophone's sensing principle and vector building principle is analyzed, the mathematical expression of hydrophone's phase-shift sensitivity is obtained and the sensor's design parameters are discussed. Then the probe head of hydrophone is manufactured according to design parameters. Experiments on the sensor's sensitivity-frequency curve and the "8" glyph directional diagram are carried out in the first class underwater acoustic measurement station of the national defence. This hydrophone's sensitivity reaches the value -155 dB re rad/ μ Pa(800 Hz), and the experimental result agrees well with the theoretical value. Some errors are mainly caused by that the theoretical model is not accurate enough, and there is also some resonance in the test equipment and the fixing bracket.

Key words optical fiber sensor; vector hydrophone; variable cylinder; diaphragm

1 引 言

压电水听器阵列声纳系统需要大量的水下电子 元件及信号传输电缆,这些电子设备价格贵,质量 大,往往会因为水下密封问题导致设备失效,使得系 统可靠性恶化;而光纤水听器不仅可以避免这些缺点,而且具有灵敏度高、响应带宽以及光信号传输不 受电磁干扰的优点^[1,2]。矢量水听器可以同步、共 点测量声压标量和质点振速矢量,不同于传统的仅

收稿日期: 2009-03-27; 收到修改稿日期: 2009-04-17

作者简介: 吕文磊(1982—),男,博士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: kingdom_929@163.com 导师简介: 苑立波(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: lbyuan@vip.sina.com

测量声压标量的水听器,因此矢量水听器可以切实 改善声纳系统的声学性能,如阵列增益、定向精度 等^[3,4]。伴随着这些显著的优势和科学技术的进 步,光纤水听器和矢量水听器已经成为当前水声研 究领域最具有代表性的两大技术而倍受业界的关 注^[5~7]。光纤矢量水听器将光纤水听器和矢量水听 器两者的优点同时结合在一块,其应用前景广大,优 越性好。设计了一种基于顺变柱体和膜片复合结构 的压差式光纤矢量水听器探头,分析了探头设计的 理论模型,讨论了探头的设计参数,最后对探头的灵 敏度和方向性进行了测试实验。

2 系统设计及工作原理

2.1 光纤矢量水听器系统的组成

如图 1 所示,水听器系统由光源入射系统、信号 传感系统和信号检测解调系统三部分组成。激光器 经驱动电路驱动发出激光,耦合进入光纤,然后经过 耦合器分别进入传感系统的两传感臂,声压信号作 用于传感系统的两传感臂,载有声压信号的光信号 发生干涉后经光电转换后传送到信号检测及解调系 统,转化为电信号并进行信号处理。这里传感系统 是压差式光纤矢量水听器系统的核心部分,它主要 靠上下两个膜片感受声压的作用,其性能的好坏直 接影响水听器的性能指标。





2.2 水听器传感单元的基本结构

设计的压差式光纤矢量水听器传感单元的结构 如图 2 所示。膜片为声压信号的接收元件,在一个 静压力的作用下被固定在一个顺变柱体的端面上, 并且膜片的四周固定于传感器的外壁。迈克耳孙干 涉仪的两个传感臂紧密缠绕于顺变柱体上。此干涉 仪两光纤臂端面上分别应用一个法拉第旋镜,以抵 消偏振的随机漂移所引起的干涉仪可见度的变化。 当传感元件周围存在声压信号时,一个附加的声压 信号作用于膜片外表面,此压力传输到顺变柱体端 面,并最终转化为传感光纤光程的变化,此光程差被 干涉仪转换为相位调制信号,并通过光电转换设备 检测出来,这就是传感器传感单元的基本工作机理。





2.3 水听器传感单元的力学分析

传感单元的力学模型如下图 3 所示, 半径为 a 的 膜片由薄不锈钢片构成,其应变量用 W 表示,半径为 b 的顺变柱体由硅橡胶构成,其静态高度为 H。由于两 个顺变柱体是对等的,因此在分析中,只讨论其中一 个的性质。声压 P 作用在膜片上,膜片随声压作用发 生形变,并对顺变柱体的一端有压力 P。作用,顺变柱 体另一端顶在中心骨架上不发生位移,顺变柱体在一 端压力作用下发生弹性形变,长度和直径随之改变, 从而引起缠绕在顺变柱体上的光纤的长度的改变,最 后导致光纤里传播的光相位的变化。



图 3 传感单元的力学模型

Fig. 3 Mechanical model of the sensing element

将模型分两部分进行分析,第一部分是顺变柱体的应力应变分析,这部分推导出被光纤缠绕的顺变柱体在一端受到压力 P_z的作用下长度变化和其所导致的顺变柱体外径的相对关系,并求出顺变柱体的等效 弹性系数公式;第二部分是膜片的应力应变分析,这部分推导出膜片在受到声压 P 和顺变柱体的反作用力 P_z的综合作用下膜片和顺变柱体的共同应变 W_o 与声压 P 的关系式。最后结合两部分内容即可推导出水听器传感单元的相移灵敏度公式。

2.3.1 顺变柱体的应力应变分析

顺变柱体关于 Z轴对称,在 Z方向受力均匀,柱

体外围受到光纤的均匀张力,根据弹性力学理论关 于平面问题的阐述可知,可以把顺变柱体的应力应 变近似为平面应变问题。如图 4,在顺变柱体上取一 横截面,在横截面内取一小微元 ABCD 为研究对 象,进行受力分析,微元的径向正应力为 σ_r,切向正 应力为 σ_θ,切应力为 τ_{rθ},于是柱体在径向和切向的 平衡微分方程为^[8]

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} = 0, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0. \end{cases}$$
(1)



图 4 顺变柱体应力应变分析模型

Fig. 4 Stress-strain analysis of variable cylinder model

由于顺变柱体是实心,且有边界条件:1)顺变柱 体一端受膜片对其作用力 P_ε作用,另一端被支撑骨 架顶住,故也受到支撑骨架对其反作用力 P_ε作用; 2) 缠绕在柱体上的光纤对其所施加的静压力 σ_b(方 向指向轴心)。根据弹性理论相关知识可求得顺变 柱体在径向和轴向的形变为

$$\begin{cases} \delta_{C} = -\frac{2\pi b}{E} [(1-v)\sigma_{b} - vP_{z}], \\ \delta_{H} = \frac{H}{E} (2v\sigma_{b} - P_{z}), \end{cases}$$
(2)

式中 E,v 分别为顺变柱体的弹性模量和泊松比。

为得到柱体周长变化 δc 与外径应力 σ_b 的关系,引入一个光纤长度变化所引起的张力变化量 δF_t,δF_t可由光纤长度变化乘光纤的归一化弹性系数 k_{in}得到,即

$$\delta F_{\rm t} = k_{\rm fn} \, \frac{\delta_L}{L} = k_{\rm fn} \, \frac{\delta_C}{C}, \qquad (3)$$

式中L为光纤的长度,C为顺变柱体的外周长。

如图 5 所示,在顺变柱体上缠绕的光纤中选一 根光纤的半周作为研究对象进行受力分析,一根光 纤的宽度等于顺变柱体的长度 H 除以缠绕在柱体 上光纤的匝数 N 得到,在半周长的光纤上选一小段 微元,由于光纤张力与顺变柱体表面上由内向外的 应力相平衡,则小微元所受作用力 ôF。满足

$$\delta F_{\mathrm{n}} = \sigma_b \, \frac{H}{N} b \, \mathrm{d} \theta$$



图 5 光纤的受力分析

Fig. 5 Stress analysis of the optical fiber

且此作用力方向为沿径向向外方向,其在竖直 方向的分力为 δF_ncos θ,于是半周长的光纤的受力 平衡方程为

$$2\delta F_{t} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \delta F_{n} \cos \theta d\theta = \frac{2bH\sigma_{b}}{N}.$$
 (4)

结合(3)式和(4)式可得柱体周长变化 δc 与外 径应力σ_i 的关系式为

$$\sigma_b = \frac{k_{\rm fn} N}{bH} \frac{\delta_C}{C}.$$
 (5)

运用(2)式和(5)式,并消去式中的 P_z 和 σ_b ,可以得到顺变柱体的外周长与柱体长度的变化规律,如下式所示^[9]:

$$\frac{\delta c}{c} = -v \frac{\delta_H}{H} \frac{1}{X},$$

$$X = 1 - \frac{Nk_{\text{fn}}}{EHb} (2v^2 + v - 1).$$
(6)

另外,根据(2)式和(5)式还可推导出顺变柱体的等效弹性系数 K_{eff}为

$$K_{\rm eff} = \frac{\delta F_Z}{\delta_H} = \frac{P_z \pi b^2}{\delta_H} = \frac{\pi b^2 E}{H} + \frac{2\pi \gamma^2 k_{\rm fn} N b}{H^2 X}.$$
 (7)

2.3.2 膜片的应力应变分析

如图 3 所示,假设膜片与顺变柱体紧密相连且 保持水平,在受到声压 P 的作用下,它们具有共同 的应变,且很小,远小于膜片的厚度,这样膜片的形 变满足板壳理论中的板的小绕度弯曲理论。实际情 况下膜片很薄,厚度为 h,其等效的弹性系数 K_d 远 小于顺变柱体的等效弹性系数 K_{eff} ,因此在模型的 理论分析计算中可以近似的认为在整个传感过程顺 变柱体上端面及膜片上(r < b)的部分紧密相连,且 它们保持水平,因此他们有共同的应变 W_0 ,而且在 声压的作用下,膜片的绕度非常小,基本可以满足假 设条件下的近似,故选膜片为研究对象,其四周固 定,中间部分在声压 P 及顺变柱体的作用下发生绕 度变化,据板壳理论中小绕度弯曲理论可得出膜片 中间部分(b < r < a)绕度的平衡微分方程^[10]为

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r} \left[\frac{1}{r} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r} \left(r \frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}r} \right) \right] = \frac{Q}{D},\tag{8}$$

式中Q为半径为r的周向截面上每单位长的剪力, 由于是固支圆形薄板受均匀载荷作用,且膜片在半径r≤b处其应变(也即绕度)与顺变柱体轴向应变 皆为W。,所以其表达式为

$$Q = \frac{\pi r^2 P - W_0 K_{\text{eff}}}{2\pi r},\tag{9}$$

式中D为膜片的刚度,表达式为

$$D = \frac{E_{\rm d} h^3}{12(1 - v_{\rm d}^2)},\tag{10}$$

式中 h 为膜片的厚度, E_d 和 v_d 分别为膜片的杨氏 模量和泊松比。

将(9)式,(10)式代入(8)式后三次积分得膜片 绕度的解为

$$W = \frac{1}{4}C_{1}r^{2} + C_{2}\ln r + C_{3} + \frac{P}{64D}r^{4} - \frac{W_{0}K_{\text{eff}}}{8\pi D}r^{2}(\ln r - 1), \qquad (11)$$

式中 C_1 , C_2 , C_3 为求解微分方程时的积分常数,由边界条件决定。

膜片的外边缘 (r = a) 固定于传感器外壳上, 中心部分 $(r \leq b)$ 和顺变柱体紧密相连,且保持水 平,所以它们有相同的应变 W_0 。因此膜片平衡方程 的边界条件可以写为

$$W|_{r=a} = 0, \quad \left. \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}r} \right|_{r=a} = 0,$$

$$W|_{r=b} = \omega_0, \quad \left. \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}r} \right|_{r=b} = 0,.$$
(12)

将边界条件(12)式代入膜片的绕度解(11)式, 联立方程组消去 W, C₁, C₂, C₃, 整理可得

$$\frac{W_{o}}{p} = \frac{\pi(a^{2} - b^{2})[(a^{2} - b^{2})^{2} + 2b^{2}B]}{8b^{2}[\ln(a/b)]K_{\text{eff}}B + 4(a^{2} - b^{2})(16\pi D - K_{\text{eff}}A)},$$

$$A = b^{2}(2\ln a - 2\ln b + 1) - a^{2},$$

$$B = a^{2}(2\ln b - 2\ln a + 1) - b^{2}.$$
(13)

这也就是膜片在受到声压 P 和顺变柱体的反 作用力 P。的综合作用下膜片和顺变柱体的共同应 变 W。与声压 P 的关系式。这里的 W。也就是上一小 节里顺变柱体的轴向长度变化 δ_H。

另外,顺变柱体的外周长变化 &c 和干涉仪光程 差的变化 & 的关系式为

$$\delta \phi = 2 \times \frac{2\pi n}{\lambda} N \delta_C \left\{ 1 - \frac{1}{2} n^2 \left[(1 - v_{\rm f}) p_{12} - v_{\rm f} p_{11} \right] \right\},$$
(14)

式中n为光纤芯的折射率, λ 为激光器波长, v_f 为光 纤的泊松比, p_{11} 和 p_{22} 为光纤芯材料的 Pockels 系数。

于是结合(6)式,(7)式,(13)式和(14)式,即可 得到水听器传感单元的相移灵敏度为

$$\frac{\Delta \phi}{p} = \frac{\pi (a^2 - b^2) [(a^2 - b^2)^2 + 2b^2 B]}{8b^2 [\ln(a/b)] K_{\text{eff}} B + 4(a^2 - b^2)(16\pi D - K_{\text{eff}} A)} \times \frac{8\pi^2 n b v N \{1 - 1/2n^2 [(1 - v_i) p_{12} - v_i p_{11}]\}}{\lambda H X},$$

$$A = b^2 (2\ln a - 2\ln b + 1) - a^2,$$

$$B = a^2 (2\ln b - 2\ln a + 1) - b^2.$$
(15)

2.4 矢量水听器矢量生成及声压相移输出

矢量水听器分为声压梯度式和惯性式两种类 型^[3]。惯性式是指将惯性传感器,如加速度计等对 振动敏感的传感器安装在刚性的球体、圆柱体或椭 球体等几何体中,当有声波作用时,刚性体会随流体 介质质点同步振动,其内部的振动传感器拾取相应 的声质点运动信息,因此亦称为同振式。声压梯度 式多是利用空间两点处声压的有限差分的原理来近 似得到声压梯度,所以也称压差式,本文设计的矢量 水听器正是这一类型。

压差式矢量水听器定位的基本原理是相位定位 法。如图 6 所示,其中系统由两个基阵组成(这里是 水听器探头的两端感应膜片),它们之间的距离为 *l*。 当有和两基阵连线方向成 *θ* 角的平面声波信号到来 时,两接收阵列收到的信号存在相位差,其大小为

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi l \cos \theta}{\lambda'}, \qquad (16a)$$

$$\cos \theta = \frac{\lambda' \Delta \varphi}{2\pi l}, \qquad (16b)$$

式中 λ' 为声波的波长,测量到相位差 $\Delta \varphi$ 之后可根据(16b)式计算出声波的一维方向角 θ 。根据三角函数知识可知,当满足 $l \leq \lambda'/2$ 时, $\theta \in \Delta \varphi$ ——对应,故可由所测 $\Delta \varphi$ 唯一确定方向角 θ ,从而达到定位。



图 6 相位定位法的原理图 Fig. 6 Principle of phase positioning

当有声压 P 作用于矢量水听器系统,假设

$$P = P_0 \cos(\omega t + \varphi_0),$$
而且当 l 远小于声波波长 λ' 时,两基阵间声压差为
 $\Delta P = P_0 \cos(\omega t + \varphi_0 + \Delta \varphi) - P_0 \cos(\omega t + \varphi_0) =$
 $- 2P_0 \sin(\Delta \varphi/2) \sin[\omega t + (\Delta \varphi/2)] \approx$
 $- 2P_0 \frac{\pi l \cos \theta}{\lambda'} \sin[\omega t + \frac{\pi l \cos \theta}{\lambda'}].$

$$\frac{\delta \phi}{P_0} = \frac{\pi (a^2 - b^2) [(a^2 - b^2)^2 + 2b^2 B]}{8b^2 (\ln \frac{a}{b}) K_{\text{eff}} B + 4(a^2 - b^2) (16\pi D - K_{\text{eff}} A)} >$$

从(18)式可以看出矢量水听器的声压相移灵敏 度与所测声波波长成反比例关系。

3 测试实验与结果分析

3.1 矢量水听器传感单元参数设计

根据理论模型的分析,由(18)式可以看出有很 多参数都影响水听器传感单元的声压相移灵敏度, 归纳起来主要的因素有:光纤中传输光的波长λ;光 纤的归一化弹性系数 k_{fn} 和光纤在外力作用下的光 弹效应;顺变柱体的杨氏模量 E、高度 H 和半径b; 膜片的厚度为 h、半径为 a、刚度为 D 以及两膜片间 的距离 l。

在这些参数中,光纤的工作波长对传感器相移 灵敏度的影响比较简单,成简单的反比关系。参数 *E*,*k*_{fn}对相移灵敏度的影响比较复杂,式中新定义了 参数 *X*,此参数的表达形式如(6)式所示,它反映了 缠绕顺变柱体的光纤对顺变柱体的影响。由于此 *X* 的影响,传感器的相移灵敏度并非和顺变材料的杨 氏模量(*E*)成简单的反比关系。参考基于顺变柱体 的传感器文献[9],又考虑到水听器探头是在水下工 作的实际情况,选择化学性质和热膨胀率都比较稳 定的硅橡胶。

D为膜片各参数对相移灵敏度的综合影响,由 (10)式可以看出,在选择膜片时,应尽量选择杨氏模 量小而且薄的膜片。l为两膜片间距离,在满足 $l \ll \lambda'/2$ 情况下应尽量长些,但太长传感器尺寸又会太 大,实际设计中选择l=100 mm和l=52 mm制作 了一号和二号两种传感单元。

在实验中,实际应用的顺变柱体的半径、高度、杨 氏模量、泊松比和密度分别为b=14 mm, H=10 mm, $E=15.6 \text{ MPa}, v=0.44, \rho=1.17 \times 10^3 \text{ kg/m}^3;迈克耳孙$

$$\Delta P \approx -2P_{\circ} \frac{\pi l}{\lambda'} \sin\left(\omega t + \frac{\pi l}{\lambda'}\right), \qquad (17)$$

结合(15)式,可得两个基阵组成的压差式矢量水听 器声压相移灵敏度为

$$\times \frac{8\pi^2 nbv N \left\{1 - \frac{1}{2} n^2 \left[\left(1 - v_{\rm f}\right) p_{12} - v_{\rm f} p_{11}\right]\right\}}{\lambda H X} \times \frac{2\pi l}{\lambda'}.$$
(18)

传感臂的长度为L=3.6 m,光纤归一化的弹性系数为 $k_{fn}=896$ N; 膜片半径为a=20 mm,厚度为h=0.1 mm,两膜片间的距离l=100 mm和l=52 mm。

运用(18)式,可以计算出在理论上两种传感器 单元的声压相移灵敏度。其计算结果如表1所示。

表11号传感器和2号传感器相移灵敏度的理论值

Table 1 Theoretical values of the phase-shift sensitivity of No. 1 sensor and No. 2 sensor

Frequency /Hz	Phase-shift sensitivity /(dB re rad/ μ Pa)	
	No. 1	No. 2
40	-173.44	-179.12
63	-169.49	-175.17
200	-159.46	-165.14
400	-153.45	-159.12
630	-149.52	-155.18
800	-147.46	-153.11

3.2 矢量水听器测试结果及分析

对于水听器声压灵敏度的测试,通常有两种方案:驻波场测试方案和近似平面波场测试方案。其 原理图分别如图 7(a)和(b)所示。

在图 7(a)中,矢量水听器和标定水听器置于驻 波管内水中,管底的振动台振动在管内形成驻波,测 出矢量水听器的相移输出,参照标定水听器的声压 输出,间接得到矢量水听器的声压相移灵敏度;转动 矢量水听器,测出不同角度下矢量水听器的相移灵 敏度,从而得出"8"字形方向图。驻波管测试方案只 能提供低频(10~2000 Hz)测试所需的声压环境, 高频(2~5 kHz)的测试部分则是在如图 7(b)所示 的近似平面波场中进行,矢量水听器、标定水听器和 高频声压发射器都置于消声大水池中,将高频声压 发射器与矢量水听器和标定水听器放置得间隔一段 距离,在测试频段下保证这个距离满足平面波近似 条件,分别测得矢量水听器的相移输出和标定水听器的声压输出,从而得到矢量水听器在高频段的声压相移灵敏度,通过改变频率,可以得到不同频率下 矢量水听器的灵敏度,从而绘制出水听器灵敏度曲 线。由于实验条件的限制,在高频水池中对矢量水 听器的旋转不容易精确定位,就没有在高频段进行 "8"字形方向图的测试实验。矢量水听器在国防水 声一级计量站进行测试。实验中,测试了两种光纤 矢量水听器在频带为 20~3000 Hz 上的频响特性。 测出的传感器频响特性如图 8 所示。



图 7 测试实验的装置图

Fig. 7 Experimental setup for fest





Fig. 8 Measured responsivities of the vector hydrophones as the function of frequency

可见,两矢量水听器的频响曲线变化趋势基本 一致。谐振频率在 2000~2500 Hz 之间,在谐振频 率的 1/3 处之前,矢量水听器的灵敏度基本上是与 声波频率成正比的斜线。挑选了一些典型频率点的 测试值如表 2 所示,与表 1 中的理论值相比较,实际 测试值大约小了 5~7 dB re rad/μPa,这是由于理 论建模时的一些近似影响了理论值的精确性。

表 2 1 号传感器和 2 号传感器灵敏度的实验值

Table 2Experimental values of the phase sensitivityof No. 1 sensor and No. 2 sensor

Frequency / Hz	Phase sensitivity /(dB re rad / μ Pa)	
	No. 1	No. 2
40	-178.81	-183.68
63	-175.11	-179.99
200	-166.27	-170.08
400	-161.42	-164.65
630	-158.18	-161.15
800	-155.51	-159.18

在驻波管中,选定频率为400 Hz 对1号传感器 进行方向图测试,每隔5°转动传感器一次,转动72 次,回到转动起点,得出数据,绘制方向图如图 9 所 示。选定频率点 40 Hz 对 2 号传感器进行方向图测 试,每隔 10°转动传感器一次,转动 36 次,回到转动 起点,得出数据,绘制方向图如图 10 所示。由图 9、 图 10 可见矢量水听器余弦性方向性,而且方向图 中,灵敏度的最大值和最小值之比可以达到大于 10 的基本要求。由于压差式矢量水听器两传感单元灵



图 9 1 号传感器的"8"字形方向图

Fig. 9 "8" directivity of No. 1 sensor



图 10 2号传感器的"8"字形方向图 Fig. 10 "8" directivity of No. 2 sensor

敏度不完全一致,导致其"8"字形方向图不完全对称。另外,在传感器转动过程中,测试固定系统的谐振也会发生改变,从而影响了方向图的对称性和平滑性。有些频率点甚至出现方向性不明显的情况。

4 结 论

建立了基于顺变柱体和膜片复合结构的压差式 矢量光纤水听器理论分析模型,得出了此类水听器 的声压相移灵敏度和谐振频率计算公式,对探头设 计参数做了讨论,制作了两种不同规格的矢量水听 器传感单元,在国防水声一级计量站进行了矢量水 听器频响曲线和方向图的测试。测试结果显示,水 听器灵敏度较高,且与理论模型计算值基本吻合,方 向图基本呈现"8"字型方向余弦。从测试结果分析 可知,矢量水听器灵敏度的测试值与理论值大约相 差 5~7 dB re rad/µPa,这是由于理论模型的建立 过程中,顺变柱体的平面弹性问题近似和膜片的小 绕度近似都是理论值与实验测试值之间有差别的一 些重要因素,所以减小这种近似,建立更精确的理论 模型也是此种结构水听器传感单元下一步研究要深 入的课题。另外,由于在方向图的测试过程中需要 转动传感单元,传感单元的转动会引起固定架谐振 的改变,从而影响了方向图的对称性,所以在测试过 程中如何稳定固定矢量水听器传感单元是一个重要 的问题。

致谢 感谢中国科学院声学所朱厚卿教授对矢量水 听器测试方案提出了很有指导意义的建议,感谢哈 尔滨工程大学水声工程学院的陈洪娟教授对矢量水 听器的测试进行的指导,最后感谢 715 研究所矢量 水听器测试中心的陈毅和费腾实验员对矢量水听器 所进行的测试。

参考文献

 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

2 Yang Jian, Zhao Yong, Ni Xingjie. Development of novel fiber Bragg grating underwater acoustic sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(9): 1575~1579

杨 剑,赵 勇,倪行洁.新型光纤光栅水声传感器的研究[J]. 光学学报,2007,**27**(9):1575~1579

3 Sun Guiqing, Li Qihu. Progress of study on acoustic vector sensor[J]. Acta Acustica, 2004, (11): 481~489
孙贵青,李启虎. 声矢量传感器研究进展[J]. 声学学报, 2004, (11): 481~489

4 Jia Zhifu. On pressure gradient hydrophone with co-oscillating sphere[J]. Applied Acoustics, 1997, 16(3): 20~25
贾志富.同振球型声压梯度水听器的研究[J]. 应用声学, 1997, 16(3): 20~25

5 Wang Zefeng, Hu Yongming. A novel passive homodyne fiberoptic 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

- 6 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
- 7 Kang Chong, Zhang Min, Chen Hongjuan *et al.*. Pressure optical fiber vector hydrophone made of thin-walled cylindrical shell[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1214~1219
 康 崇,张 敏,陈洪娟等. 薄壁圆柱壳体压差式光纤矢量水听器[J]. 中国激光, 2008, **35**(8): 1214~1219
- 8 S. P. Timoshenko. Theory of Elasticity[M]. Xu Zhilun Transl. Beijing: Higher Education Press, 1990. 75~170 铁摩辛柯 古地尔. 弹性理论[M]. 徐芝沦译. 北京:高等教育出版社,1990. 75~170
- 9 R. D. Pechstedt, D. A. Jackson. Design of a compliant-cylindertype fiber-optic accelerometer: theory and experiment[J]. Appl. Opt., 1995, 34: 3009~3017
- 10 S. P. Timoshenko, S. W. Kreger. Theory of Plates and Shells [M]. McGraw-Hill Publishing, 1984. 51~78