

应用于拖曳线列阵的分布反馈式光纤激光水听器

唐 波 黄俊斌 顾宏灿 毛 欣

海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033

摘要 为了进一步拓宽端面拉伸增敏的分布反馈式(DFB)光纤激光水听器的工作频带,研制了一种外径为 13 mm 的聚氨酯端面拉伸式增敏结构的 DFB 光纤激光水听器,建立了其声压灵敏度与聚氨酯材料参数的理论模型,仿真分析了水听器的动态特性与聚氨酯材料参数的关系,并制备了参数经过优化后的双组分聚氨酯材料,制作了水听器原型样品并进行了水声实验研究。实验测得,研制的聚氨酯端面拉伸式增敏结构的 DFB 光纤激光水听器在 10~20000 Hz 的宽频带内获得了 (-137.60 ± 2) dB 的声压灵敏度,表明聚氨酯端面增敏式封装有效地拓宽了水听器的工作频带,很好地满足拖曳线列阵的工程化应用要求。

关键词 光纤光学;分布反馈式光纤激光;水听器;聚氨酯;拖曳线列阵

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.0505005

Distributed Feedback Fiber Laser Hydrophone Used in Towed Line Arrays

Tang Bo Huang Junbin Gu Hongcan Mao Xin

Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract To further expand the working frequency band of the distributed feedback (DFB) fiber laser hydrophone, a 13-mm-diameter encapsulated structure with sensitivity enhanced through polyurethane end surface pulling is presented. The theoretical model of the relationship between acoustic pressure sensitivity and polyurethane material parameters is established. After the relationship between the dynamics performance of hydrophone and polyurethane material parameters is simulated, the parameters of the two-component polyurethane are optimized. Prototypes of the hydrophone are fabricated and tested. The acoustic pressure sensitivity reaches (-137.60 ± 2) dB in the frequency range of 10~20000 Hz, which shows that the working frequency band of the hydrophone is expanded through polyurethane end surface pulling and it can well meet the requirements for the engineering application of towed line arrays.

Key words fiber optics; distributed feedback fiber laser; hydrophone; polyurethane; towed line arrays

OCIS codes 060.2370; 230.1040; 060.2340; 060.3735

1 引 言

相比于传统的干涉型光纤水听器和分布布拉格反射式(DBR)光纤激光水听器,以分布反馈式(DFB)光纤激光器为传感元件的水听器具有灵敏度高、体积小以及便于大规模复用成阵等优势,适合构建拖曳线列阵,因而成为近年来水声探测技术的研究热点^[1-5]。一般未经过封装的 DFB 光纤激光器用于水声探测时,其声压灵敏度相对较低,也极易受到外界干扰的影响,这些都制约了其在拖曳阵中的应用,因而有必要对 DFB 光纤激光器进行适当结构的封装以改善其水声性能^[6]。

2012 年,李东明等^[7]经过实验得出,端面拉伸式增敏的光纤激光水听器性能优于侧面压迫式,但只在 100~1000 Hz 的频率范围内获得了波动幅度小于 ± 2 dB 的频响曲线;同年,谭波等^[8]设计了一种增敏罐聚合物封装的光纤激光水听器,仿真结果表明在 3 kHz 以下该水听器具有较好的动态性能,但受工艺限制并未进行实验验证。而对于拖曳阵的工程化应用,特别是工作于高中低多频带的组合阵,水听器阵元需要在更宽的频带内具有更为平坦的频率响应,以提高对微弱信号探测的信噪比。

收稿日期: 2015-12-25; 收到修改稿日期: 2016-01-14

作者简介: 唐 波(1991-),男,博士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 942896945@qq.com

导师简介: 黄俊斌(1965-),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: Tsyj98@163.com

本文提出了一种应用于拖曳线列阵的聚氨酯端面拉伸式增敏的DFB光纤激光水听器,建立了其声压灵敏度理论模型,并实现了对聚氨酯材料参数的选择,利用有限元软件 ANSYS 进一步优化了各参数,根据仿真分析结果加工制作了水听器的原型样品,并在振动液柱、千岛湖实验场以及消声水池中对其在各频段的水声性能进行了实验研究,保证了较高声压灵敏度的同时,获得了较宽频带内平坦的频响曲线,研究结果对DFB光纤激光水听器在拖曳线列阵的工程化应用具有较高参考价值。

2 DFB 光纤激光水听器封装结构设计

2.1 DFB 光纤激光水听器封装结构

聚氨酯端面拉伸式增敏的DFB光纤激光水听器封装结构如图1所示,水听器的套筒沿径向均布4个长条形开口,套筒两端灌注一定体积的聚氨酯,DFB光纤激光器张紧后通过两端的聚氨酯固定于套筒的中心轴线上,套筒两端通过螺纹拧入端盖,激光器的尾纤从端盖中间的孔穿出。该水听器的长度为95 mm,外径为13 mm,套筒上的穿缆通孔可穿过多芯光缆,使其在拖曳阵中不占用空间并具有向后扩展阵元数的功能,而套筒上的固定线槽则可将水听器牢固地固定在拖曳阵中的Kevlar绳上,这些都是为构建多阵元超细光纤拖曳线列阵设计的优化结构。

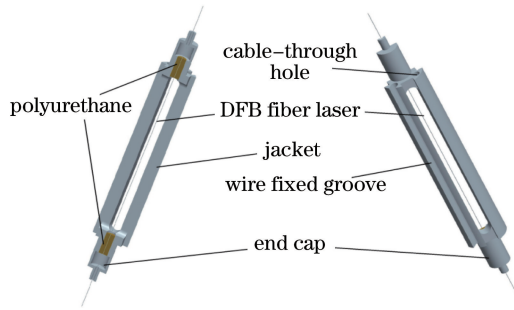


图1 DFB 光纤激光水听器封装结构图

Fig. 1 Scheme of encapsulated structure of DFB fiber laser hydrophone

2.2 聚氨酯材料的选择与优化

进行水声探测时,假设DFB光纤激光水听器的套筒与端盖均为刚体,因而声压载荷只透过开口作用在聚氨酯端面上,使两端的聚氨酯发生弹性形变。由于光纤激光器处于张紧状态,聚氨酯会使激光器产生轴向应变,从而实现对水声信号的探测。圆柱形聚氨酯端面受均布载荷 p 的作用时,其内部产生的应力为

$$\sigma_z = p. \quad (1)$$

由于假设水听器的套筒与端盖均为刚体,聚氨酯固化后与套筒内侧紧密粘合,则聚氨酯径向上的应变为

$$\epsilon_r = \epsilon_\theta = 0. \quad (2)$$

设聚氨酯的弹性模量为 E ,泊松比为 ν ,则由广义胡克定律可知

$$\begin{cases} \epsilon_r = \frac{1}{E}\sigma_r - \frac{\nu}{E}\sigma_\theta - \frac{\nu}{E}\sigma_z \\ \epsilon_z = \frac{1}{E}\sigma_z - \frac{\nu}{E}\sigma_r - \frac{\nu}{E}\sigma_\theta \\ \epsilon_\theta = \frac{1}{E}\sigma_\theta - \frac{\nu}{E}\sigma_r - \frac{\nu}{E}\sigma_z \end{cases}, \quad (3)$$

联立(1)、(3)式可得

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_z = \frac{\nu}{1-\nu}p, \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式中可得聚氨酯的轴向应变表达式为

$$\epsilon_z = \frac{1}{E}\sigma_z - \frac{\nu}{E}(\sigma_r + \sigma_\theta) = \frac{1-\nu-2\nu^2}{1-\nu} \frac{p}{E}. \quad (5)$$

设圆柱形聚氨酯的高度为 l ,套筒两端聚氨酯之间封装的DFB光纤激光器的长度为 L ,则激光器的轴

向应变为

$$\epsilon_{jz} = 2\epsilon_z l/L. \quad (6)$$

因而聚氨酯端面拉伸式增敏结构的光纤激光水听器声压灵敏度理论表达式为

$$M_{DFB} = 20\lg\left(\frac{\Delta\phi}{p}\right) = 20\lg\left(\frac{\epsilon_{jz}}{p}\right) + G_{int} + 20\lg d, \quad (7)$$

式中 p 为作用在聚氨酯端面上的声压幅值,单位为 μPa ; G_{int} 为单位长度非平衡干涉仪对激光器单位应变的相位增益,与激光器的初始波长有关,若波长取 1530 nm ,则对应的 $G_{int} = 133.15\text{ dB}$; d 为非平衡长度,单位为 m [9]。将(5)、(6)式代入(7)式可得

$$M_{DFB} = 20\lg\left[\frac{2L(1-\nu-2\nu^2)}{EL(1-\nu)}\right] + G_{int} + 20\lg d. \quad (8)$$

聚氨酯端面拉伸式增敏结构的DFB光纤激光水听器套筒两端聚氨酯在不受声压作用时的距离 $L = 5.9 \times 10^{-2}\text{ m}$,聚氨酯的高度 $l = 8 \times 10^{-3}\text{ m}$,解调系统的非平衡长度 $d = 100\text{ m}$,因而该结构水听器的声压灵敏度 M_{DFB} 主要与聚氨酯材料的弹性模量 E 以及泊松比 ν 有关。

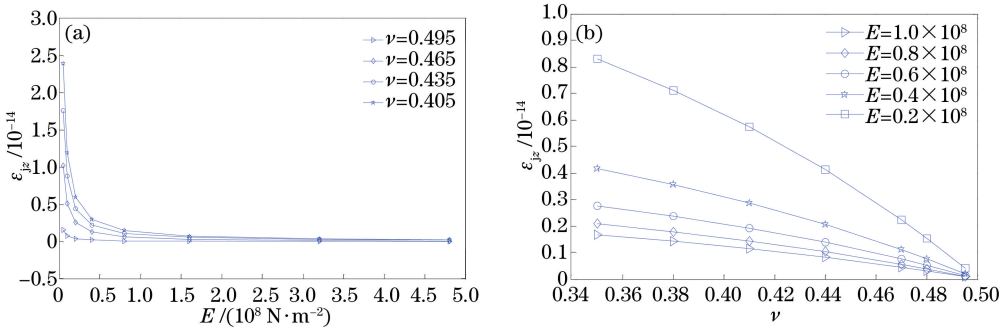


图2 聚氨酯的材料参数对激光器轴向应变的影响。(a) 弹性模量;(b) 泊松比

Fig. 2 Influence of the material parameters of polyurethane on the axial strain of laser.

(a) Modulus of elasticity; (b) Poisson's ratio

为了使DFB光纤激光水听器声压灵敏度随聚氨酯材料参数变化的趋势更为明显,使用激光器的轴向应变 ϵ_{jz} 来衡量声压灵敏度的大小,将不同聚氨酯参数代入(6)式中得到激光器的轴向应变,结果如图2所示。当聚氨酯的弹性模量小于 $0.8 \times 10^8\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,随着弹性模量的减小,水听器的声压灵敏度会急剧增加,当聚氨酯的弹性模量大于 $1.0 \times 10^8\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,聚氨酯弹性模量的增大对水听器声压灵敏度的影响较小[图2(a)]。当聚氨酯的弹性模量小于 $0.6 \times 10^8\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,水听器的声压灵敏度会随着聚氨酯泊松比的减小而有较大程度的增大,而当聚氨酯的弹性模量大于 $0.6 \times 10^8\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,水听器的声压灵敏度与聚氨酯的泊松比关联较小[图2(b)]。因此,聚氨酯的弹性模量越小,泊松比越小,DFB光纤激光水听器的声压灵敏度越高。

聚氨酯作为光纤激光水听器的增敏元件,其固有频率对水听器工作带宽的影响起主要作用,使用有限元软件ANSYS对不同材料参数的聚氨酯进行模态分析,结果如表1、2所示,其中当聚氨酯弹性模量 $E = 1.0 \times 10^8\text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$,泊松比 $\nu = 0.495$ 时,水听器中聚氨酯的振型如图3所示。

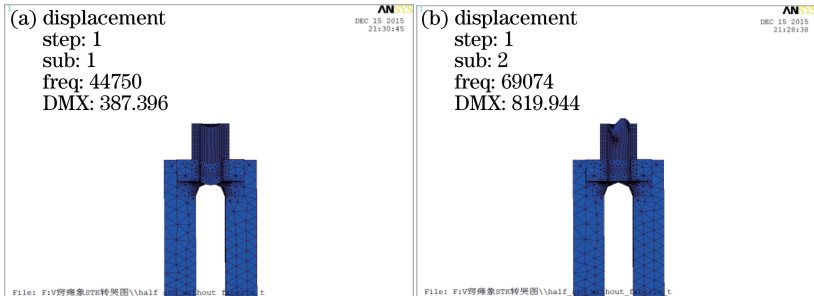


图3 聚氨酯端面拉伸式增敏结构水听器的ANSYS模态分析结果。(a)一阶振型;(b)二阶振型

Fig. 3 ANSYS mode analysis results of the end surface tensile type hydrophone with the sensitivity enhanced through polyurethane. (a) First order mode; (b) second order mode

表 1 泊松比为 0.495 时聚氨酯弹性模量对固有频率的影响

Table 1 Influence of the modulus of elasticity of polyurethane on natural frequency when the Poisson's ratio is 0.495

Modulus of elasticity / (N·m ⁻²)	First order natural frequency / Hz	Second order natural frequency / Hz
1.0×10 ⁸	44750	69074
0.8×10 ⁸	39175	60301
0.6×10 ⁸	33926	52223
0.4×10 ⁸	27701	42640
0.2×10 ⁸	19587	30151

表 2 弹性模量为 1.0×10⁸ N·m⁻² 时聚氨酯泊松比对固有频率的影响

Table 2 Influence of the Poisson's ratio of polyurethane on natural frequency when the modulus of elasticity is 1.0×10⁸ N·m⁻²

Poisson's ratio	First order natural frequency / Hz	Second order natural frequency / Hz
0.495	44750	69074
0.465	45157	57611
0.435	45536	52840
0.405	45928	51107

由表 1、2 可知,聚氨酯的一阶固有频率随其弹性模量的减小而减小,与泊松比的关系不大,然而根据前述分析得到水听器的声压灵敏度随弹性模量的减小而增大,所以对聚氨酯材料弹性模量的选取要在工作带宽与灵敏度之间作出权衡;其次,该结构水听器是通过两端的聚氨酯拉动激光器产生轴向应变来实现水声信号的探测,聚氨酯与激光器的接触面积小,对聚氨酯材料的粘结强度提出了较高的要求;最后,考虑到水听器长期工作于水中,聚氨酯需具备较好的耐水性以保持其在水中的力学性能。根据分析结果,使用端羟基聚丁二烯(HTPB)与异氰酸酯(MDI)、聚醚多元醇(PTMEG)共聚制备的常温固化的高弹性聚氨酯作为水听器的封装材料,其弹性模量为 $E = 1.0 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$,泊松比为 $\nu = 0.495$,水听器原型样品聚氨酯的高度 $l = 0.008 \text{ m}$,两端聚氨酯之间激光器的长度 $L = 0.059 \text{ m}$,则 DFB 光纤激光水听器的声压灵敏度理论值为

$$M_{\text{DFB}} = 20\lg \left[\frac{2l(1-\nu-2\nu^2)}{EL(1-\nu)} \right] + G_{\text{int}} + 20\lg d = -137.79 \text{ dB}. \quad (9)$$

由模态分析结果可知,该结构水听器的增敏元件圆柱形聚氨酯的一阶固有频率为 44750 Hz,有利于其在较宽的频带内获得平坦的响应曲线,因而使用有限元分析软件 ANSYS,以 500 Hz 为间隔,在 0~45000 Hz 的频率范围内均布 90 个频点,对聚氨酯端面中心点进行幅度为 1 μPa、频率不同的声压作用下的谐响应分析,结果如图 4 所示。

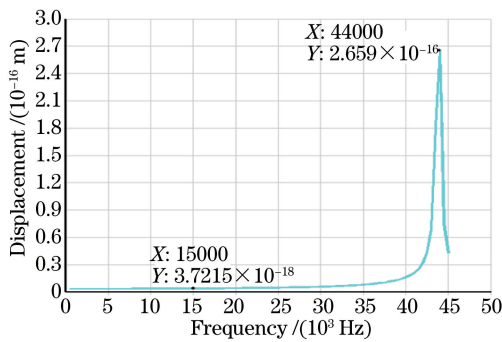


图 4 聚氨酯端面中心点的谐响应分析结果

Fig. 4 Harmonic analysis of polyurethane end surface center point

由图 4 可知,在频率为 15000 Hz、幅度为 1 μPa 的声压作用下,聚氨酯端面中心点的位移 $\omega = 3.7215 \times 10^{-18} \text{ m}$,光纤激光器上的应变量为 $\epsilon_{jz} = 2\omega/L = 4.3 \times 10^{-16} \mu\text{Pa}^{-1}$,因而可计算出 DFB 光纤激光水听器的声压灵敏度为

$$M_{\text{DFB}} = 20\lg \epsilon_{jz} + G_{\text{int}} + 20\lg d = -133.73 \text{ dB}. \quad (10)$$

频率在 25000 Hz 以下时,水听器的频率响应曲线较为平坦,而随着频率的继续增大,聚氨酯端面中心点的位移急剧增大,当频率增大到 44000 Hz 时,即水听器中聚氨酯的一个固有频率,此时端面中心点的位移达

到了 2.659×10^{-16} m, 对应的声压灵敏度为 -96.64 dB, 这是水听器工作时要尽量避开的频段。根据仿真结果可知, 水听器的灵敏度值与理论分析结果较为吻合, 且在 25000 Hz 以下的频段内可获得较为平坦的频响曲线。

3 实验分析

选用的 DFB 光纤激光器是刻有 $\lambda/4$ 相移的有源光纤光栅, 谐振腔的长度为 48 mm, 100 mW 抽运功率作用下的输出激光功率为 $100 \mu\text{W}$, 在 1 kHz 下的相位噪声级为 -83 dB \cdot Hz $^{-1/2}$ 。在上述分析结果的基础上加工制作了聚氨酯端面拉伸式增敏的 DFB 光纤激光水听器原型样品, 编号 17101, 出射波长为 1530.510 nm。首先使用振动液柱实验系统对光纤激光水听器在 $10 \sim 400$ Hz 范围内的频响曲线进行测试, 测试系统如图 5 所示, 液柱罐内径为 110 mm, 外径为 120 mm, 液柱深度为 180 mm; 液柱罐固定于振动台台面中心, 振动台与功率放大器连接, 用信号发生器提供正弦波信号; 将加速度计固定于液柱罐底部, 并与电荷放大器相连, 输出信号幅度通过示波器读取; 待测水听器入水 90 mm, 并保持其声学中心与水平面平行, 其光纤引出端与解调系统相连, 干涉仪非平衡长度为 100 m, 解调出水听器的相位漂移信息, 再读取加速度大小后, 即可计算得到 DFB 光纤激光水听器的声压灵敏度。

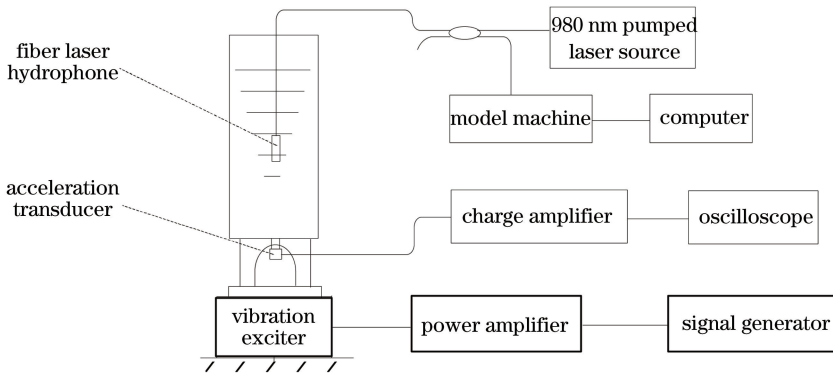


图 5 振动液柱实验系统
Fig. 5 Vibration column testing system

在消声水池中对水听器在 $2500 \sim 40000$ Hz 频段的水声性能进行测试, 实验系统如图 6 所示。消声水池的尺寸为 $10 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, 发射换能器入水 2.5 m, 与功率放大器连接, 通过信号发生器为其提供脉冲信号, BK8105 标准水听器入水 1.7 m, 与电荷放大器连接, 示波器读取其输出信号幅度, DFB 光纤激光水听器靠近标准水听器放置。待测水听器引出端与解调样机相连, 通过解调后得到待测水听器的相位漂移信息, 再读取示波器的电压信号, 即可得到水听器的声压灵敏度。

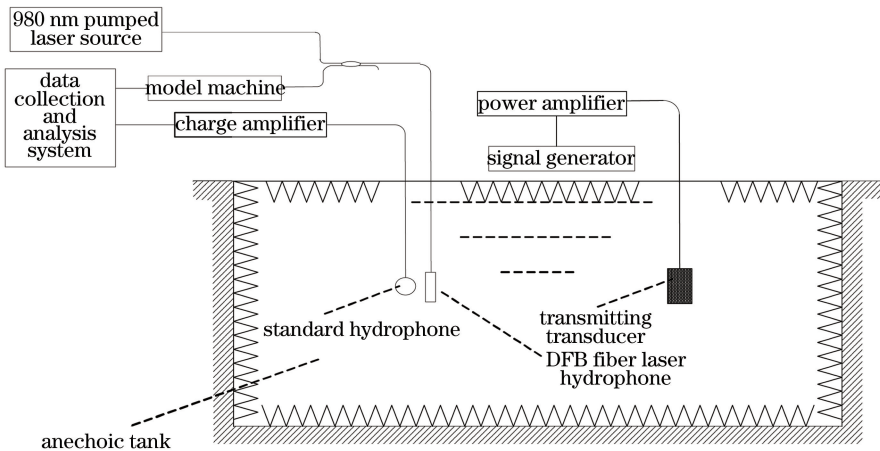


图 6 消声水池实验系统示意图
Fig. 6 Schematic of testing system in anechoic tank

由于本实验室的振动液柱系统测试水听器在 500~2000 Hz 频段内的响应时存在误差,实验得到的结论也使用标准水听器 BK8105 进行了验证,所以在千岛湖实验场对该结构水听器在该频段内的频响性能进行了补测,测试方法与在消声水池中类似,不同的是水听器入水 15 m,发射换能器入水 10 m,消声水池变成了湖水,以上测试都在测量频率范围内按 1/3 倍频程选择频点进行测量,最后得到水听器在所需频带内的声压灵敏度频响曲线。

根据实验数据绘制出水听器原型样品在 10~40000 Hz 的频响曲线如图 7 所示,从实验结果可以看出,在 10~20000 Hz 的频率范围内,该聚氨酯端面拉伸式增敏的 DFB 光纤激光水听器的声压灵敏度平均值为 -137.60 dB,波动幅度小于 ± 2 dB,该结果与理论计算值吻合较好。这种聚氨酯端面增敏式 DFB 光纤激光水听器的材料参数以及结构设计,对拓宽拖曳线列阵的工作频带起到了重要作用。

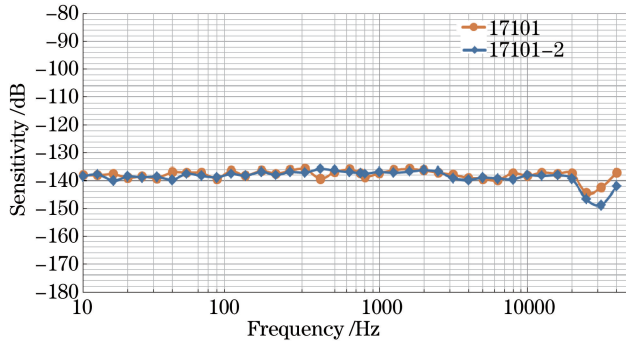


图 7 DFB 光纤激光水听器实验频响曲线

Fig. 7 Experimental frequency response curves of DFB fiber laser hydrophone

4 结 论

设计了一种聚氨酯端面拉伸式增敏结构的 DFB 光纤激光水听器,在理论分析与有限元仿真计算的基础上,对聚氨酯的材料参数进行了优化,研制了长度为 92 mm,直径为 13 mm 的水听器原型样品,并通过水声实验在 10~20000 Hz 的频率范围内获得了 (-137.60 ± 2) dB 的声压灵敏度。实验结果说明,这种聚氨酯端面拉伸式增敏结构的 DFB 光纤激光水听器在保证较高灵敏度的同时,其增敏元件的一阶固有频率远大于膜片式端面增敏元件,从而在 10~20000 Hz 这一更宽的频带内获得了平坦的频响曲线,因而以该结构的水听器为阵元,只需调整阵元的间距即可构建工作于多频点、阵元频响一致性好且信噪比较高的拖曳组合式线列阵,较大程度地降低了拖曳阵的研制成本,对推动光纤激光水听器在拖曳线列阵中的应用具有重要作用。

参 考 文 献

- Hill D J, Nash P J, Jackson D A, *et al.*. A fiber laser hydrophone array[C]. SPIE, 1999, 3860: 55-66.
- Lu Wengao, Sun Qizhen, Wo Jianghai, *et al.*. High sensitivity micro-vibration sensor based on distributed Bragg reflector fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0728006.
鲁文高, 孙琪真, 沃江海, 等. 基于分布布拉格发射光纤激光器的高灵敏度微振动传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0728006.
- Jin Mengqun, Zhang Zili, Wu Guojun, *et al.*. A three-dimensional vector hydrophone based on fiber-optic flexural disk accelerometer[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0305004.
金梦群, 张自丽, 吴国军, 等. 基于光纤碟形加速度传感单元的三维柱形矢量水听器[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0305004.
- Yun Zhaoqing, Luo Hong, Hu Zhengliang, *et al.*. Fiber optic hydrophone used for thin line towed array[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1206004.
运朝青, 罗洪, 胡正良, 等. 应用于拖曳线列阵的光纤水听器研究[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1206004.
- Moccia M, Consales M, Iadicicco A, *et al.*. Resonant hydrophones based on coated fiber Bragg gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(15): 2472-2481.
- Tan Bo, Huang Junbin, He Lin, *et al.*. Dynamical characteristics of distributed feedback fiber laser[J]. Optics and

- Precision Engineering, 2009, 17(8): 1832-1838.
- 谭波, 黄俊斌, 何琳, 等. 分布反馈式光纤激光器的动态特性[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1832-1838.
- 7 Li Dongming, Chen Jun, Ge Huiliang, *et al.*. Water sound sensor using the optical fiber grating sensitivity enhanced through side pressure and end surface pulling[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 0506001.
- 李东明, 陈军, 葛辉良, 等. 侧面压迫式及端面拉伸式增敏光纤光栅水声传感器[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 0506001.
- 8 Tan Bo, Yu Bobiao, Huang Junbin. A study on the dynamical characteristics of fiber grating hydrophone encapsulated with the enhancing sensitivity pot[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(10): 1382-1386.
- 谭波, 余勃彪, 黄俊斌. 增敏罐封装光纤光栅水听器的动态特性研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(10): 1382-1386.
- 9 Tan Bo, Huang Junbin, Gu Hongcan, *et al.*. A bending-tension style DFB fiber laser hydrophone unit[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2008, 20(4): 91-96.
- 谭波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 一种曲伸式 DFB 光纤激光水听器探头的研究[J]. 海军工程大学学报, 2008, 20(4): 91-96.