

应用于舷侧阵的分布反馈式光纤激光水听器研究

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 为减小分布反馈式(DFB)光纤激光器在水声探测时的扰动,设计了一种双膜片式封装结构的光纤激光水听器。该结构通过膜片增大声压作用面积,并转化为激光器的轴向应变以实现增敏。利用有限元软件 ANSYS 对该结构进行了仿真分析,加工制作了双膜片式结构封装的 DFB 光纤激光水听器原型样品,并对其进行了水声实验研究。实验测得,研制的双膜片端面增敏结构的 DFB 光纤激光水听器在 2.5~10 kHz 的平均声压灵敏度为 -136.9 dB,波动幅度不高于 ± 0.5 dB,水听器的工作频带向高频得到了有效拓宽,使其能很好地满足舷侧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; 增敏; 舷侧阵; 声压灵敏度

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0810002

Distributed Feedback Fiber Laser Hydrophone Used in Flank Array

Tang Bo Huang Junbin Gu Hongcan Mao Xin

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

Abstract To reduce the fluctuation of a distributed feedback (DFB) fiber laser used in underwater sound detection, a fiber laser hydrophone of encapsulated structure with two diaphragms is designed. This structure increases the activated area of the acoustic pressure through the diaphragms, which is transformed to the axial strain in the fiber laser to realize the enhancement of the pressure sensitivity. After the structure is analyzed by ANSYS, the prototypes of the new kind of hydrophone based on the structure are fabricated and tested. Experimental results show that acoustic pressure sensitivity of the DFB fiber laser hydrophone reaches to -136.9 dB with the fluctuation less than ± 0.5 dB in the frequency range of 2.5~10 kHz, which shows that the working frequency of the hydrophone is expanded to high frequency and it can well meet the requirements for the engineering application of flank array.

Key words fiber optics; distributed feedback fiber laser; hydrophone; sensitivity enhancement; flank array; acoustic pressure sensitivity

OCIS codes 060.2340;060.3735;230.1040

1 引 言

相对于拖曳线列阵声纳,舷侧阵声纳在保持了大孔径的前提下,还具备对目标方位的直接测定、可区分左右舷目标以及无需复杂收发基阵的机械机构等突出优点,因而成为近年来水声探测的研究热点^[1-2]。基于分布反馈式(DFB)光纤激光器的光纤水听器具有体积小、灵敏度高、便于复用成阵等特点,很适合在小型水下航行器的有限空间内构建大规模舷侧阵,因而有必要对 DFB 光纤激光器进行适当结构的封装以获得在宽频带内响应平坦的水听器阵元^[3-8]。

2008 年,Zhang 等^[9]设计了一种基于中心嵌有铜质硬芯的橡胶膜片结构的光纤激光水听器,在 100~1000 Hz 的频率范围内获得了波动幅度小于 ± 3 dB 的频响曲线;2012 年,李东明等^[10]研制了一种弹性铍铜膜片端面拉伸式增敏结构的光纤激光水听器,其性能优于侧面压迫式增敏结构的水听器,且在 100~1000 Hz 频带内平均灵敏度为 (-175 ± 2) dB。然而,声纳的工作频率通常要高于 5 kHz 才能获得高精度的方位数据,因而在水听器阵列面积一定的情况下,要求水听器的工作频率向高频扩展,才能同时测定目标的

收稿日期: 2016-01-20; 收到修改稿日期: 2016-04-18

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,教授,博士生导师,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: Tsyj98@163.com

方位与距离信息。

为此,本文提出了一种应用于舷侧阵的双膜片端面增敏结构的DFB光纤激光水听器,并对其在中高频段的性能进行了理论与实验研究。在理论计算与有限元软件ANSYS仿真分析的基础上对水听器的结构进行了优化设计,根据分析结果加工制作了原型样品,并在消声水池中对水声性能进行了实验研究,初步验证了理论与仿真结果,对DFB光纤激光水听器在舷侧阵中的工程化应用具有重要意义。

2 DFB 光纤激光水听器结构优化设计

双膜片端面增敏结构的DFB光纤激光水听器如图1所示,水听器的套筒沿径向均布4个长条形通孔,膜片的下端边缘与套筒两端通过环氧树脂胶粘接,DFB光纤激光器张紧后通过膜片上的柱形圆杆固定于套筒的中心轴线上,套筒两端拧入端盖将膜片的上端边缘压紧确保其与套筒刚性连接,激光器的尾纤从端盖中间的孔穿出,水听器的套筒被聚合物套管包裹,不仅对水听器起到保护作用还兼具超高的透声率,套管内灌入的常温固化凝胶,也具有去耦和传递声压的功能。

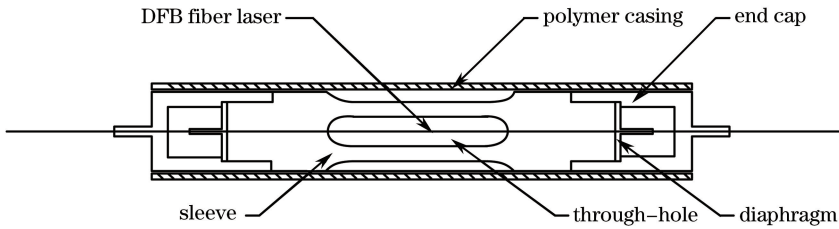


图1 水听器封装结构示意图

Fig. 1 Scheme of encapsulated structure of hydrophone

声压载荷透过水听器的通孔作用在膜片上,使其中心产生一定的挠度,由于DFB光纤激光器处于预拉紧状态,该挠度即对应激光器的应变变量。膜片在均布载荷的作用下,中心点处挠度的表达式为

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

式中 a 为不锈钢材料膜片的有效作用半径, t 为膜片厚度, E 为膜片的弹性模量, ν 为膜片的泊松比, $D = Et^3/[12(1-\nu^2)]$ 为膜片的弯曲刚度。

膜片作为水听器的增敏元件,其固有频率对于水听器的频响性能起主要作用,因而对于膜片的结构尺寸优化显得尤为重要。采用ANSYS对单个膜片进行仿真分析,为了使水听器声压灵敏度随膜片结构尺寸变化的趋势更为明显,此处使用激光器的轴向应变来衡量声压灵敏度的大小,首先设定膜片的直径为6 mm,厚度为0.1 mm,膜片的四周施加固定约束,膜片下端施加 $1 \mu\text{Pa}$ 的均布声压,改变膜片上柱形圆杆的直径,得到光纤激光器的轴向应变和膜片的一阶固有频率如表1所示。

表1 柱形圆杆对膜片固有频率的影响

Table1 Influence of the cylindrical bar on natural frequency of diaphragms

Diameter of cylindrical bar /mm	Axial strain	First order natural frequency /kHz
0.5	2.1×10^{-15}	22.7
1	1.7×10^{-15}	16.8
1.5	1.26×10^{-15}	14.2
2	0.83×10^{-15}	13.6

由表1可知,光纤激光器的轴向应变随着膜片柱形圆杆直径的增大而减小,膜片的一阶固有频率也随着柱形圆杆直径的增大而减小。设定膜片的直径为6 mm,柱形圆杆直径为1 mm,其他约束条件与之前相同,改变膜片的厚度,得到激光器的轴向应变以及膜片一阶固有频率如表2所示。

由表2可知,光纤激光器的轴向应变随着膜片厚度的增大而减小,膜片的一阶固有频率随着膜片厚度的增大而增大。设定膜片的厚度为0.1 mm,柱形圆杆的直径为1 mm,约束条件与之前相同,改变膜片的直径,得到激光器的轴向应变以及膜片一阶固有频率如表3所示。

表 2 膜片厚度对膜片固有频率的影响

Table 2 Influence of thickness of diaphragms on natural frequency

Thickness of diaphragms /mm	Axial strain	First order natural frequency /kHz
0.1	17×10^{-15}	16.8
0.2	2.1×10^{-15}	42.4
0.3	0.68×10^{-15}	68.1
0.4	0.31×10^{-15}	93.4

表 3 膜片直径对膜片固有频率的影响

Table 3 Influence of diameter of diaphragms on natural frequency

Diameter of diaphragms /mm	Axial strain	First order natural frequency /kHz
6	17×10^{-15}	16.8
5	7.6×10^{-15}	21.8
4	2.4×10^{-15}	32.9

由表 3 可知,光纤激光器的轴向应变随着膜片直径的增大而增大,膜片的一阶固有频率随着膜片直径的增大而减小。综上所述,要得到灵敏度高的 DFB 光纤激光水听器,需要柱形圆柱直径小、膜片厚度小、膜片直径大的结构设计,但是又考虑到固有频率、实际尺寸要求、加工和装配难度要求,最终选定直径为 1 mm 的柱形圆杆,厚度为 0.1 mm、直径为 6 mm 的膜片作为封装元件。

该水听器的长度为 72 mm,外径为 12 mm,膜片除去粘接处的内径为 4 mm,因此膜片的有效作用半径为 2 mm。水听器原型样品的参数为 $a=0.002$ m, $t=0.1 \times 10^{-3}$ m, $E=1.93 \times 10^{11}$ Pa, $\nu=0.31$,将参数代入(1)式计算得到单个膜片中心点在 $1 \mu\text{Pa}$ 声压作用下的挠度为 1.405×10^{-17} m,两膜片之间的激光器的长度 $L=48$ mm,因而其应变量为 $\epsilon=2w/L=5.85 \times 10^{-16}$,则光纤激光水听器的声压灵敏度理论计算值为

$$M_{\text{DFB}} = 20\lg\left(\frac{\Delta\phi}{p}\right) = 20\lg\left(\frac{\epsilon}{p}\right) + G_{\text{int}} + 20\lg(d) = 20\lg(5.85 \times 10^{-16}) + 133.26 + 20\lg(100) = -131.4 \text{ dB} (0 \text{ dB} = 1 \text{ rad}/\mu\text{Pa}), \quad (2)$$

式中 p 为作用在膜片上的声压幅值,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 $G_{\text{int}}=133.15$ dB; d 为非平衡长度,单位为 m^[10]。

为了验证上述计算结果的可靠性,运用有限元分析软件 ANSYS 对该结构进行仿真分析,考虑到 DFB 光纤激光器对水听器的结构特性影响很小,因此分析时未建立其模型;并且膜片作为水听器的增敏元件,其固有频率对水听器的频响性能起主要作用,因而分析时只建立了水听器套筒与膜片的 1/4 实体模型。使用 SOLID45 单元对模型进行了网格划分,在膜片与水听器端盖以及与套筒的接触部分施加固定约束,在结构的各个中间剖面施加对称约束,采用上述设置对膜片进行模态分析,其振型结果如图 2 所示,该结构水听器膜片的一阶固有频率为 13299 Hz,二阶固有频率为 25052 Hz,有利于其中高频段内获得平坦的响应曲线。并在此基础上对膜片的下端面施加幅度为 $1 \mu\text{Pa}$ 的声压作用,在 2500~10000 Hz 频率范围内,以 500 Hz 为间隔,均布了 16 个频点对其进行了谐响应分析,分析得到膜片中心点在不同频率下的位移幅值响应,分析结

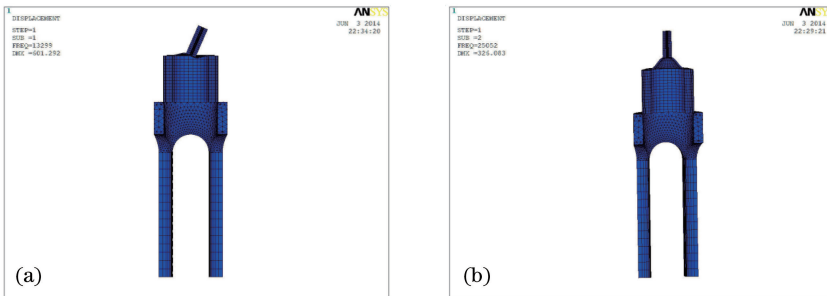


图 2 膜片增敏结构固有频率 ANSYS 计算结果。(a) 一阶振型; (b) 二阶振型

Fig. 2 ANSYS calculated resonant frequency for enhanced sensitivity using diaphragm.

(a) First order resonance; (b) second order resonance

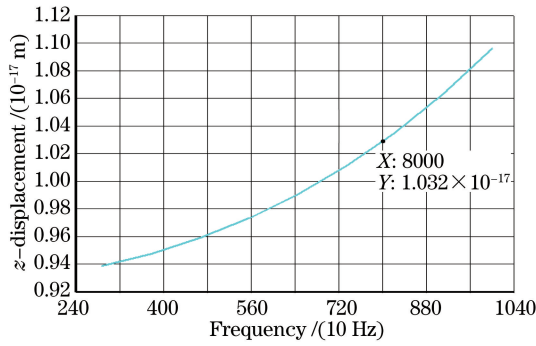


图 3 膜片中心点的位移幅值响应

Fig. 3 Longitudinal displacement responsibility in diaphragm center point

果如图 3 所示。

由图 3 可知,在 $1 \mu\text{Pa}$ 的声压作用下,8 kHz 频点单个膜片中心点的位移为 $1.032 \times 10^{-17} \text{ m}$,对应在光纤激光器上的应变量为 $\epsilon = 2w/L = 4.3 \times 10^{-16}$,则水听器的声压灵敏度为

$$M_{\text{DFB}} = 20\lg\left(\frac{\Delta\phi}{p}\right) = 20\lg(4.3 \times 10^{-16}) + 133.26 + 20\lg(100) = -134.1 \text{ dB}. \quad (3)$$

对比理论计算值和有限元软件分析值,两者声压灵敏度值较为吻合。1999 年,Hill 等^[3]指出干涉仪非平衡长度为 200 m 时 DFB 光纤激光器的声压灵敏度为 -171 dB ,由此可知,当干涉仪的非平衡长度为 100 m 时激光器的声压灵敏度为 -177 dB ,而仿真得到的双膜片结构的 DFB 光纤激光水听器的声压灵敏度为 -134.1 dB ,较封装前提高了 42.9 dB。2009 年,谭波等^[6]对 DFB 光纤激光器动态特性进行分析,得到长度为 50 mm 的激光器的频响曲线在其一阶固有频率 200 Hz 附近出现了较大的起伏,对激光器进行水声探测时会产生极大的干扰,而通过对膜片尺寸的优化设计,使其固有频率远离设计工作频带,膜片作为增敏元件,它的固有频率对水听器频响性能的影响远大于激光器本身固有频率的影响,且仿真得到双膜片结构的 DFB 光纤激光水听器在设计频率范围 2500~10000 Hz 内的响应平坦,获得了良好的动态特性。

3 实验分析

基于上述分析结果加工制作了双膜片端面增敏结构的 DFB 光纤激光水听器原型样品,具体参数如表 4 所示。利用消声水池实验系统对水听器在 2.5~20 kHz 频段的水声探测性能进行了测试,实验系统如图 4 所示。

表 4 实验所用的 DFB 光纤激光水听器的参数

Table 4 Parameters of DFB fiber laser hydrophone in the experiment

Number	Output wavelength /nm	Wavelength variation /pm
H521	1540.040	380
H842	1546.735	490
H530	1539.950	590

消声水池尺寸为 $10 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,发射换能器入水 2.5 m,与 KROHN 7500 型功率放大器连接,使用一台 GFG-8050 型信号发生器提供脉冲信号,BK8105 标准水听器与一台 Reson VP-2000 型电荷放大器相连,输出信号幅度通过一台 TDS2024 型示波器读取,标准水听器靠近 DFB 光纤激光水听器放置且入水 1.7 m。测量的 DFB 光纤激光水听器引出端与解调样机相连,干涉仪的非平衡长度为 100 m,通过解调后得到 DFB 光纤激光水听器的相位漂移信息,再读取示波器的电压信号,代入到(4)式即可得到水听器的声压灵敏度。在测量频率范围内选择 1/3 倍频程频点进行测量后,即可得到该频率范围内水听器的声压灵敏度频响曲线。

在水声学中,水听器的尺寸通常要小于水声波长的 1/6,但该结构的 DFB 光纤激光水听器两膜片之间的距离为 48 mm,在进行 5 kHz 以上的高频水声信号标定时,两个膜片各自承受的声压相位可能不同,使得测试结果存在偶然性,因而选择了多支 DFB 光纤激光水听器参与测试,并且在测试时多次改变待测水听器与标准水听器的相对位置,以减小测试结果的偶然性。

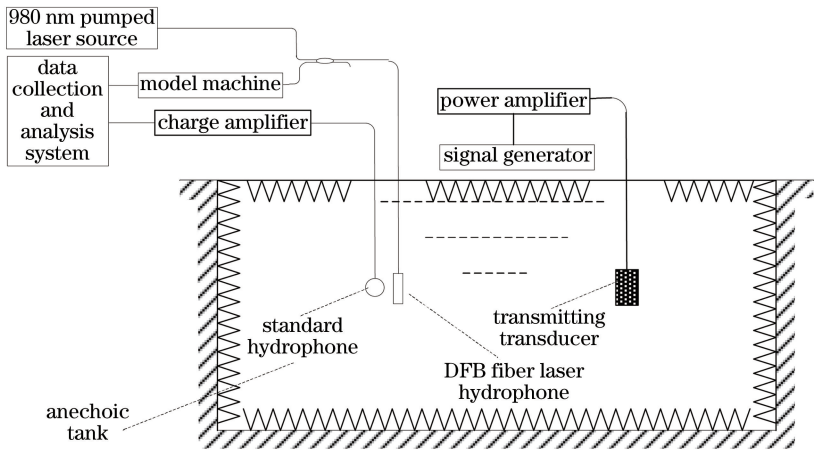


图 4 消声水池实验系统示意图

Fig. 4 Schematic of testing system in anechoic tank

根据实验所得数据绘制的水听器原型样品在 2.5~20 kHz 频响曲线如图 5 所示,从实测数据可以看出,在 2.5~10 kHz 的频率范围内,3 支水听器在不同位置的两次测试的平均声压灵敏度值相差都在 0.2 dB 以内,因而保证了此水声信号标定方法对该结构水听器测试结果的可信度,且编号为 H842 的水听器的声压灵敏度平均值为 -136.9 dB,波动幅度不大于 ± 0.5 dB,并在 12.5 kHz 附近出现谐振峰,这与有限元仿真分析得到的 13.299 kHz 的固有频率非常接近。

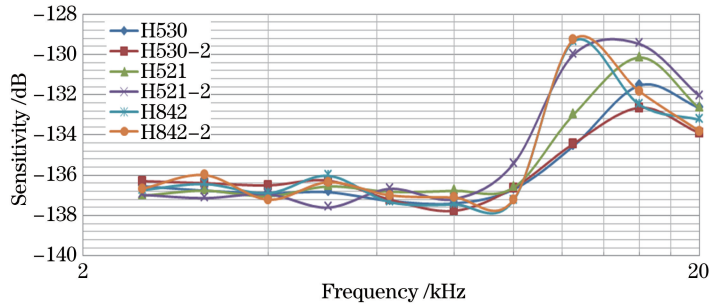


图 5 DFB 光纤激光水听器实测频响曲线

Fig. 5 Experimental frequency response curves of DFB fiber laser hydrophone

从实验结果可以知道,这种双膜片端面增敏结构的 DFB 光纤激光水听器在 2.5~10 kHz 的中高频段能获得较为平坦的声压灵敏度响应,且制作的 3 支水听器的频响一致性较好,因而以该结构水听器为单元构建大规模舷侧阵进行水声探测时,目标方位的指向性好、距离信息的测量精度高,对于舷侧阵声纳的工作频带向高频拓展起到了重要作用。但是,实验测得水听器在 2.5~10 kHz 频率范围内的平均声压灵敏度值要比理论与仿真分析结果低 4 dB 左右,这主要是因为分析过程中未考虑水听器套筒内的凝胶对膜片产生形变时存在阻碍作用,造成水听器的声压灵敏度有所降低。实验测得的谐振峰的位置低于仿真分析的 13.299 kHz,这主要是因为仿真分析时未考虑水介质的影响,水听器工作时与水介质的流固耦合作用会导致结构的固有频率降低。

4 结 论

设计了一种双膜片端面增敏结构,基于理论分析和有限元仿真的结果,研制了长度为 72 mm、外径为 12 mm 的 DFB 光纤激光水听器原型样品。实验测得,在 2.5~10 kHz 的中高频段内,该光纤激光水听器的平均声压灵敏度为 -136.9 dB,灵敏度的波动幅度不大于 ± 0.5 dB。实验结果表明,这种超细结构的双膜片式 DFB 光纤激光水听器在较宽的中高频段具有平坦的声压灵敏度响应,且频响一致性较好,因而以该结构水听器为传感单元构建的舷侧阵声纳对水声目标进行探测时的方位数据精度会更高,同时还能提供距离信息,对于光纤激光水听器在舷侧阵中的应用起到了极大地推动作用。

参 考 文 献

- 1 Cheng Ling, Zhou Suping, Ge Huiliang. Flow noise reduction principle and simulation analysis on small scale underwater vehicle flank array[J]. *Ship Science and Technology*, 2011, 33(5): 66-70.
程 玲, 周苏萍, 葛辉良. 小型水下航行器舷侧阵流噪声抑制原理和仿真分析[J]. *舰船科学技术*, 2011, 33(5): 66-70.
- 2 Yun Chaoqing, 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. 应用于拖曳细线阵的光纤水听器研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1206004.
- 3 Hill D J, Nash P J, Jackson D A, *et al.* A fiber laser hydrophone array[C]. *SPIE*, 1999, 3860: 55-66.
- 4 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.
- 5 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.
- 6 Tan Bo, Huang Junbin, He Lin, *et al.* A study on the 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 Tang Bo, Huang Junbin, Gu Hongcan, *et al.* Prestressing force in DFB fiber laser hydrophone: Theory and experiment [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(3): 0305005.
唐 波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. DFB 光纤激光水听器预应力理论与实验研究[J]. *中国激光*. 2016, 43(3): 0305005.
- 8 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. 基于分布布拉格反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.
- 9 Zhang W, Liu Y, Li F, *et al.* Fiber laser hydrophone based on double diaphragms: Theory and experiment[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(10): 1349-1352.
- 10 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.
- 11 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.