

文章编号 1004-924X(2012)08-1691-05

分布反馈光纤激光水听器封装结构的设计

谭 波*, 黄俊斌

(海军工程大学 兵器工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要:针对分布反馈式(DFB)光纤激光器用于水声探测时频响曲线起伏较大的问题,设计了一种开孔套管式封装结构。通过对 DFB 激光器的封装,使其张紧后被聚氨酯固定于开孔套筒的中心轴线上,利用开孔套管的保护作用以及施加于光纤激光器两端的拉力来抑制水声探测过程中频响曲线的起伏。基于有限元软件 ANSYS 对封装结构的动态特性进行了数值仿真计算,然后加工制作了开孔套管结构封装的 DFB 光纤激光水听器原型样品,并利用振动液柱法进行了测试。试验结果显示,DFB 光纤激光水听器在 20~800 Hz 的声压灵敏度达到-131 dB 左右,灵敏度起伏不高于 ± 1.5 dB,表明通过该封装结构的保护及聚氨酯的张紧作用,有效抑制了频响曲线的起伏,改善了 DFB 光纤激光水听器的水声探测性能。

关键词:分布反馈激光器;光纤激光器;水听器;封装结构;声压灵敏度

中图分类号:TP212.14;TN253 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122008.1691

Design of encapsulated structure of distributed feedback fiber laser hydrophone

TAN Bo*, HUANG Jun-bin

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

* Corresponding author, E-mail: whtbwjs@163.com

Abstract: To reduce the fluctuation of frequency response of a Distributed Feedback (DFB) fiber laser used in underwater sound detection, an encapsulated structure with orifices was designed. With the encapsulated structure, both ends of the DFB fiber laser were fixed along the axes of the structure by the tension of polyurethane, and the fluctuation of mid-frequency response was restrained. The dynamics of the encapsulated structure was numerically analyzed with ANSYS, and a prototype of the new kind of hydrophone based on the structure was produced and tested with the vibration fluid column method. The results show that the fluctuation of frequency response of the DFB fiber laser is restrained effectively from 20 Hz to 800 Hz, and the acoustic pressure sensitivity reaches to -131 dB with the fluctuation less than ± 1.5 dB. These results demonstrate that the performance of the DFB fiber laser hydrophone has been improved by the protection of the encapsulated structure and the tension of polyurethane.

Key words: Distributed Feedback(DFB) laser; fiber laser; hydrophone; encapsulated structure; acoustic pressure sensitivity

收稿日期:2011-12-23;修订日期:2012-02-07.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目

1 引言

分布反馈(Distributed Feedback, DFB)光纤激光器近年来在水声探测领域得到了广泛应用,但作为一种结构细长型敏感元件,DFB 光纤激光器在未经封装便用于探测的情况下,易受外界扰动影响而使其频响曲线出现较大起伏,诸多基于光纤激光器的水听器经测试所得到的频响曲线均出现了较大的起伏^[1-5]。为了改善 DFB 光纤激光器的抗干扰能力,研究者们设计了不同结构的探头对它进行封装,以改善其水声探测性能。2005 年,Scott Foster 等人提出的类似机械补偿机构的水听器在 200 Hz~2 kHz 获得了相对较平坦的响应曲线^[6];2008 年,他们又对该结构进行了进一步的研究和改善^[7];2009 年,Steven Goodman 等人在澳大利亚 Jervis 海湾进行的阵列试验表明,通过采取某种形式的探头对光纤激光器进行封装后,也获得了起伏在±1 dB 内的平坦频响曲线^[8]。

上述研究表明,声波引起的光纤弯曲为 DFB 光纤激光器引入干扰的主要原因^[9-11],而其动态特性与激光器两端所受拉力有着密切联系^[12]。因此,设计并采用适当的机械结构对 DFB 光纤激光器进行封装是消除外界扰动影响,解决 DFB 光纤激光水听器抗干扰问题,改善其水声传感特性的重要途径。

本文设计了一种利用开孔套管式结构进行封装的 DFB 光纤激光水听器。通过开孔套管的保护作用以及施加于光纤激光器两端的拉力,有效削弱了外界扰动带来的影响,抑制了水声探测过程中频响曲线的起伏。利用有限元软件 ANSYS 对开孔套管式结构进行了仿真分析,加工制作了 DFB 光纤激光水听器样品,并利用振动液柱法对其进行了水声试验研究。该封装结构增强了 DFB 光纤激光水听器的抗干扰能力,对其实用化具有重要的意义。

2 DFB 光纤激光水听器封装结构

2.1 水听器封装结构设计

基于开孔套管式结构封装的 DFB 光纤激光水听器如图 1 所示。探头的主体为一个中段沿径

向均布有 4 个长条形开口的套筒,长条形开口长度与激光腔长度对应;套筒两端内部灌注一定长度的聚氨酯,DFB 光纤激光器张紧后被聚氨酯固定于开孔套筒的中心轴线上;套筒两端外径缩小,外部加工螺纹,可用于拧入固定螺帽;固定螺帽中间穿孔,DFB 光纤激光器尾纤可从孔中穿出;尾纤外部套上尾纤套管,通过环氧胶与固定螺帽粘连,避免外界作用力直接作用到光纤上。

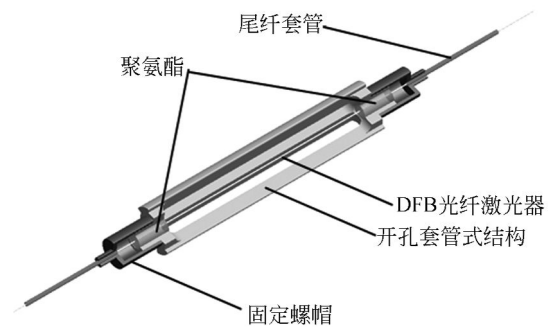


图 1 封装结构示意图

Fig. 1 Scheme of encapsulated structure

在较低频率进行水声探测时,套筒的结构对于声场的影响较小,故声压可直接作用于 DFB 光纤激光器及其两端的聚氨酯端面上。在声压作用下,聚氨酯发生变形,牵动 DFB 光纤激光器发生变形,从而引起激光腔出射激光波长的变化。由于套筒壁厚较大,且 DFB 光纤激光器被固定前施加了一定的张力,因此可有效避免外界振动引起的 DFB 光纤激光器的弯曲振动,减小外界干扰对激光器输出波长的影响。

2.2 探头结构仿真分析

利用有限元软件 ANSYS 对探头进行了仿真分析,考虑到光纤对探头的结构特性影响很小,且在不发生弯曲振动时,DFB 光纤激光器的输出具有平坦的频响特性,因此,分析未建立光纤的模型,仅建立了简化后的开孔套筒式结构与聚氨酯的实体模型,利用 SOLID45 单元对模型进行了网格划分,网格模型如图 2 所示。开孔套筒式结构外形尺寸参数为:外径 8 mm,长度 75 mm,开口长度 50 mm。采用铝合金材料进行加工,材料参数为:弹性模量 $E=6.85 \times 10^{10}$ Pa,泊松比 $\nu=0.34$,密度 $\rho=2700$ kg/m³;封装用聚氨酯的材料参数为:弹性模量 $E=1 \times 10^8$ Pa,泊松比 $\nu=0.495$,密度 $\rho=1100$ kg/m³。

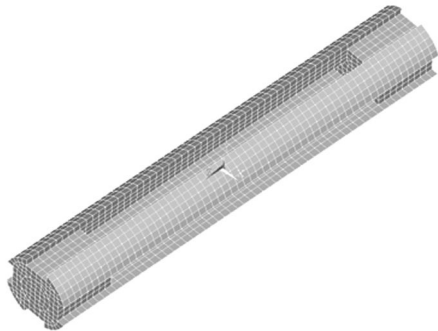


图 2 封装结构网格模型

Fig. 2 Meshed model of encapsulated structure

采用上述材料参数对模型进行设置后,首先对结构进行了模态分析,其前 4 阶固有频率如表 1 所列,对应的振型如图 3 所示。

表 1 封装结构前 4 阶固有频率

Tab. 1 The first four natural frequencies of encapsulated structure (Hz)

r	1	2	3	4
f_r	4 377	4 453.3	4 504.3	4 838

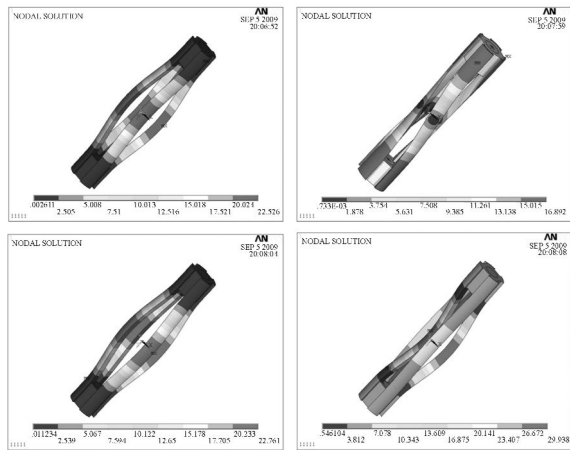


图 3 封装结构前四阶固有振型

Fig. 3 The first four mode shapes of encapsulated structure

2.3 水介质中封装结构的频响特性分析

为分析封装结构在水介质中的振动特性,利用 ANSYS 的流体-结构耦合处理功能对该问题进行了计算。在封装结构周围建立了水介质模型,分别选用 SOLID45 单元和 FLUID30 单元对封装结构和水介质划分网格,其 1/2 网格模型如

图 4 所示。取水介质参数为:密度 $\rho = 1\ 000\ \text{kg/m}^3$,声速 $c = 1\ 500\ \text{m/s}$ 。模型建立后对封装结构施加一端固定的边界条件,对封装结构及水介质中间剖面施加对称约束。在声压幅度为 100 Pa 的声压作用下,对探头 0~2 000 Hz 以 50 Hz 为间隔,均匀分布的 40 个频点进行了谐响应分析,分析可得端面位移与频率之间的关系。根据该位移值,可得 DFB 光纤激光器的内部应变,取干涉仪干涉路径不平衡长度为 100 m,计算^[12-13]可得 DFB 光纤激光水听器解调后的各频点声压灵敏度,绘制频响曲线如图 5 所示。

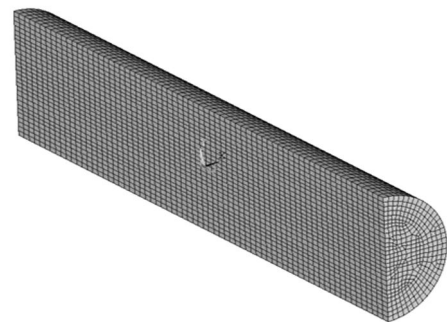


图 4 水介质中封装结构网格模型

Fig. 4 Meshed model of encapsulated structure in water

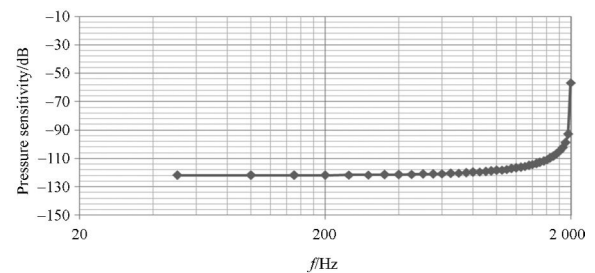


图 5 仿真所得水听器频响曲线

Fig. 5 Frequency response curve of hydrophone by numerically method

由模态分析结果可见,开孔套管式封装结构第 1 阶固有频率高于 4 000 Hz,有利于在 0~2 000 Hz 获得平坦的频响曲线。由水介质中谐响应分析可见,水听器在频率为 50 Hz 时的声压灵敏度为 -122 dB(re 1rad/ μPa),在 1 200 Hz 以前灵敏度不高于 -117 dB(re 1rad/ μPa),且频响曲线非常平坦;而此后声压灵敏度随频率升高而增加,在 2 kHz 附近,水听器灵敏度出现较大起伏。由此可见,受水介质影响,探头的第一阶固有频率有所下降。

3 振动液柱法试验设计

基于以上分析结果加工制作了利用开孔套管式结构封装的 DFB 光纤激光水听器原型样品。所采用的 DFB 光纤激光器为在掺铒光纤上蚀刻 $\lambda/4$ 相移光栅制作而成, 出射激光中心波长为 1 535.23 nm, 在 100 mW 980 泵浦光泵浦下的输出功率为 110 μ W, 线宽 < 50 kHz。实验系统采用了基于 3×3 耦合器的无源零差解调方案, 非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪由一只 3 dB 的 2×2 耦合器和一只 3×3 的耦合器组成, 非平衡路径长度为 60 m; 经非平衡干涉仪输出的相位信息再通过光电探测器和数据采集卡采集后联入计算机进行信号处理, 如图 6 所示。利用振动液柱法试验系统对水听器水声探测性能进行了测试, 试验系统如图 7 所示。

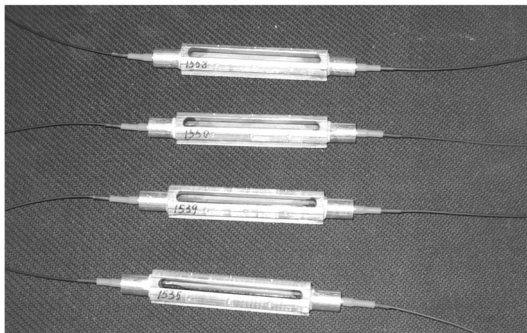


图 6 水听器原型样品

Fig. 6 Prototypes of hydrophones

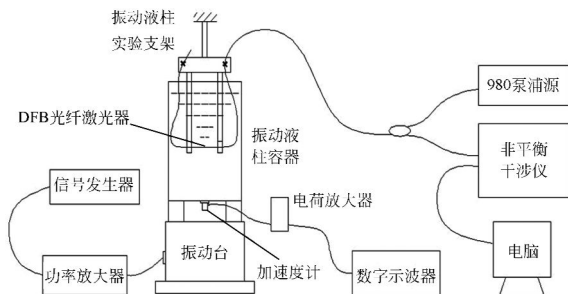


图 7 振动液柱法试验系统

Fig. 7 Vibration column testing system

液柱水深 180 mm, 容器固定于一台 2202 型振动台的台面中心, 振动台与 7101 功率放大器连接, 使用一台 GFG-8050 型信号发生器提供正弦

波信号。将一个 6100 型加速度计固定于液柱容器底部, 加速度计与一台 3114 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。夹持待测水听器后, 入水深度为 90 mm, 并保持待测水听器声学中心与水平面平行, 定位后将夹持水听器的夹具固定于与振动系统隔开的连杆上。测量的 DFB 光纤激光水听器引出端与 980 泵浦源光源及非平衡干涉仪解调系统相连, 干涉仪输出的相位信息通过光电探测输出后接入数据采集卡, 联入计算机, 通过解调后得到 DFB 光纤激光水听器的相位漂移信息。读取加速度后, 根据振动液柱法声压计算公式, 可计算出 DFB 光纤激光器所处深度在各频点的声压大小, 从而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。

4 试验结果

利用振动液柱法试验系统所测得套管开孔式水听器原型样品从 20~1 250 Hz 的频响曲线如图 8 所示。

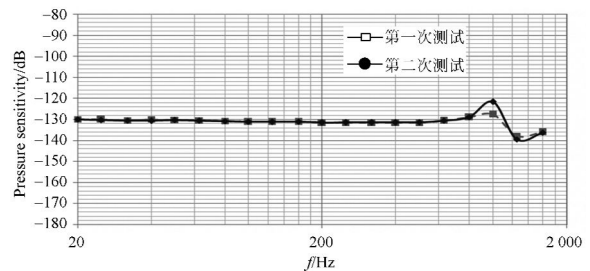


图 8 DFB 光纤激光水听器实测频响曲线

Fig. 8 Experimental frequency response curves of DFB fiber laser hydrophone

从试验结果可见, 采用开孔套管式结构封装的 DFB 光纤激光水听器在 20~800 Hz 的声压灵敏度达到了 -131 dB 左右, 灵敏度起伏不高于 ± 1.5 dB, 在 1 kHz 以后灵敏度出现了较大起伏。

可见, DFB 光纤激光器经封装后水声探测性能较封装前有了很大提高, 且制作的 4 个水听器样品试验结果具有良好的一致性。试验测得的声压灵敏度在 20~800 Hz, 与计算所得结果相差约 10 dB 左右, 这与加工精度、封装工艺以及仿真时略去了光纤模型有一定关系, 而试验所测的频响

曲线在 1 kHz 左右出现较大起伏的原因还有待进一步研究。

5 结 论

本文设计并加工制作了开孔套管式结构对 DFB 光纤激光器进行封装,改善了 DFB 光纤光

栅激光器的抗干扰能力。试验结果表明,通过该封装结构的保护及聚氨酯的张紧作用,抑制了 DFB 光纤激光水听器在 20~800 Hz 频响曲线的起伏,其声压灵敏度达到 -131 dB 左右,灵敏度起伏不高于 ±1.5 dB,有效改善了其水声探测性能,对于解决 DFB 光纤激光水听器抗干扰问题具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] SIGURD W L, KJELL B, JON T K. Contributions to wavelength shifts of DFB fiber lasers used as acoustic sensors in air[J]. *SPIE*, 1998,3483:69-73.
- [2] HILL D J, NASH P J. A fiber laser hydrophone array[J]. *SPIE*, 1999,3860:55-66.
- [3] TIKBOMIROV A, FOSTER S, MILNES M, *et al.*. Acoustic and vibrational response of a DFB fibre laser sensor[C]. *Proceedings of COIN/ACOFT 2003 Conference, Melbourne, Australia: COIN/ACOFT*, 2003.
- [4] SHAO L Y, LAU S T, DONG X Y, *et al.*. High-frequency ultrasonic hydrophone based on a cladding-etched DBR fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008,20(8):548-550.
- [5] GUAN B O, TAN Y N, TAM H Y. Dual polarization fiber grating laser hydrophone[J]. *Optics Express*, 2009,17(22):19544-19549.
- [6] FOSTER S, TIKHOMIROV A, MILNES M, *et al.*. A fibre laser hydrophone[J]. *SPIE*, 2005, 5855:627-630.
- [7] GOODMAN S, TIKHOMIROV A, FOSTER S. Pressure compensated distributed feedback fibre laser hydrophone[J]. *SPIE*, 2008,7004,700426:1-4.
- [8] HANSEN L V, KULLANDER F K. Modelling of hydrophone based on a DFB fiber laser[C]. *Proceedings of 21st International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Warsaw, Poland*, 2004:15-21.
- [9] HAO Q Q, CHAI Q, LI X L, *et al.*. Hydrophone based on the feedback effect of composite cavity optical fiber laser[J]. *SPIE*, 2010, 7847:78471Q-78471Q-5.
- [10] LI X L, CHAI Q, ZHANG J ZH, *et al.*. DFB fiber laser hydrophone based on a intensity demodulation[J]. *SPIE*, 2010,7847:78471F-78471F-5.
- [11] AZMI A L, SEN D, PEN G D. Sensitivity enhancement in composite cavity fiber laser hydrophone[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(12): 1844-1850.
- [12] 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.
- TAN B, HUANG J B, HE L, *et al.*. A study on the dynamical characteristics of distributed feedback fiber laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1832-1838. (in Chinese)
- [13] 谭波,黄俊斌,李日忠,等. 对基于光纤光栅的两种水听器灵敏度的讨论[J]. *应用声学*, 2008,27(3): 227-233.
- TAN B, HUANG J B, LI R ZH, *et al.*. Discussion on the sensitivities of two kinds of hydrophones based on fiber grating[J]. *Applied Acoustics*, 2008,27(3):227-233. (in Chinese)

作者简介:



谭波(1979—),男,湖南双峰人,讲师,工学博士,主要从事结构动态响应方面的研究。E-mail: whtbwjsw@163.com



黄俊斌(1965—),男,湖南湘潭人,副教授,工学博士,主要从事光纤传感技术和兵器测试与故障诊断技术方面的研究。E-mail: junbinh@public.wh.hb.cn