

doi:10.3788/gzxb20174602.0206004

基于流固耦合作用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, 武汉 430033)

摘 要:为了解决流固耦合模态使水听器工作频带变窄的问题,理论分析了流体对双膜片结构的分布反馈式光纤激光水听器固有频率的影响,基于有限元软件对水听器加固封装前后在空气中和流体中的模态和频响性能进行仿真分析,加工制作了水听器原型样品并开展了水声实验研究.实验结果表明,在 2 500~8 000 Hz 的频率范围内,未经加固封装的水听器由于在该频段内存在多个流固耦合固有频率造成响应曲线起伏较大,而采取了加固措施封装后的水听器获得了一 142.77±0.8 dB 的平均声压灵敏度,验证了流体对水听器频响性能的影响以及改善措施的有效性,实验结果与理论及仿真结果吻合较好.

关键词:光纤光学;分布反馈式光纤激光;水听器;流固耦合;固有频率

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)02-0206004-8

DFB Fiber Laser Hydrophone Based on Fluid-structure Interaction

TANG Bo, HUANG Jun-bin, GU Hong-can, MAO Xin

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

Abstract: To solve the problem that fluid-structure coupling mode makes the frequency band of hydrophone narrowed, the influence of fluid on the natural frequency of the distributed feedback fiber laser hydrophone with two diaphragms was theoretically analyzed. Based on the finite element software, the mode and frequency response performance of the hydrophone in the air and fluid before and after the reinforcement were simulated. Prototypes of the hydrophone were fabricated and tested. The results show that response curve of the hydrophone before reinforcement fluctuates greatly due to the existence of several natural frequencies in a frequency range of 2 500~8 000 Hz. The average acoustic pressure sensitivity of the hydrophone reaches -142.77±0.8 dB after reinforcement, which verifies the influence of fluid on the frequency response performance of the hydrophone and the effectiveness of the measures. It agrees well with both the theoretical analysis and simulation results.

Key words: Fiber optics; Distributed feedback fiber laser; Hydrophone; Fluid-structure interaction; Natural frequency

OCIS Codes: 060.2370;060.3735;230.1040

0 引言

以分布反馈式(Distributed Feedback, DFB)光纤激光器为传感元件的水听器具有灵敏度高、抗电磁干扰以及易于大规模复用成阵等优势,成为近年来水声探测领域的研究热点^[1-6].但由于其细长型的结构特点,DFB 光纤激光器需要经过适当结构的封装以增强其抗外界干扰的能力,从而满足水声探测的要求.由此可见,DFB 光纤激光水听器的性能很大程度上取决于封装,如封装水听器的支架的固有机机械振动耦合作用于光纤激光器上,会导致水听器的频响曲线在设计的工作频带内出现较大幅度的起伏^[7-10].因此,有必要对水

基金项目:“十二五”装备预先研究项目和武器装备探索研究重大项目资助

第一作者:唐波(1991-),男,博士研究生,主要研究方向为光纤传感技术. Email: 942896945@qq.com

导 师:黄俊斌(1965-),男,教授,博士,主要研究方向为光纤传感技术. Email: tsy98@163.com

收稿日期:2016-09-05;录用日期:2016-10-19

<http://www.photon.ac.cn>

听器各封装部件的固有频率进行深入研究,以采取适当的措施使得这些频率远离水听器的工作频带,使水听器的频响曲线平坦。

通常情况下,计算空气中结构的固有频率时都假设其处于真空中,不考虑空气的影响.然而,DFB 光纤激光水听器长期工作于水中,必须考虑结构周围流体对于水听器固有频率的影响,即流固耦合作用的影响.2009年,谭波等通过仿真和实验得出,DFB 光纤激光器在水介质中的各阶固有频率要低于空气中的,并于2012年仿真得到 DFB 光纤激光水听器的一阶固有频率受水介质的影响从 4kHz 以上下降到 2kHz 附近^[11-12].2014年,Scott Foster 等研制的弯曲梁结构的光纤激光水听器在空气中的理论基频为 15kHz,而实测得其在水中的频响曲线峰值在 9kHz^[13-14].由此可见,基于流固耦合作用下水听器的固有频率更真实地反映了结构封装对水听器工作频带的影响。

为此,本文从理论上分析了水介质对于水听器固有频率的影响,利用有限元分析软件 ANSYS 分别对在空气和水中的只经过结构封装的水听器和采取了进一步加固措施封装的水听器进行了模态以及谐响应分析,根据分析结果加工制作了水听器的原型样品,并在消声水池中进行实验研究,以验证流体对于水听器性能的影响以及采取的改善措施的有效性。

1 理论分析

双膜片结构的 DFB 光纤激光水听器主要由 DFB 光纤激光器、套筒、膜片以及端盖组成,为了进一步提升结构整体刚度以及抗干扰能力,在水听器上安装了一个与其外侧紧贴的圆柱形透声聚氨酯护套,并向内部灌注了常温固化的凝胶.当水听器未采取加固措施时,即没有聚氨酯护套和凝胶,其工作时水会充满水听器内部和周围,因而进行理论分析时可将其简化为水中的空心圆柱体结构,如图 1,当水听器受到声压作用时,其内外壁上都将产生动水压力^[15]。

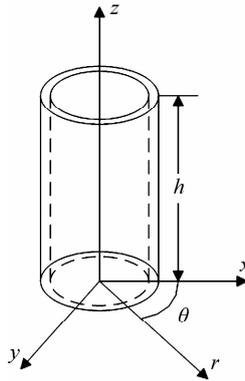


图 1 水听器简化模型示意图

Fig. 1 Simplified model of hydrophone

根据连续性条件,扰动液体内的任意一点均必须满足三维拉普拉斯方程,即

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

式中, ψ 为速度势函数,其相应的边界条件为

$$z = 0 \text{ 时, } \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$z = h \text{ 时, } \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$r = a \text{ 时, } \frac{\partial \psi}{\partial r} = \left(\dot{u}_g + \frac{\partial u}{\partial t} \right) \cos \theta \quad (4)$$

式(2)和式(3)分别表示水听器的底面液体和顶部液体是一自由面,式(4)表示水听器表面的振动速度与液体在该处的振动速度相同,其中 \dot{u}_g 为沿 x 方向水平声压作用时的地面运动速度。 $\partial u / \partial t$ 为水听器沿 x 方向的弹性振动速度。

采用试探法取液体速度势函数的表达式为

$$\psi(r, z, \theta, t) = \cos\theta \sum_{n=1}^{\infty} \dot{q}_n \sum_{s=1,3,5}^{\infty} f(r) \cos \frac{\pi s}{2h} z \quad (5)$$

式中, $f(r)$ 为柱坐标中 r 的函数, 可由式(1)得到, \dot{q}_n 为广义速度, 即广义坐标对时间的一阶导数. 令 $r_1 = \pi s/2hr$, 将式(5)带入式(1), 整理后可得

$$\frac{\partial^2 f(r_1)}{\partial r_1^2} + \frac{1}{r_1} \frac{\partial f(r_1)}{\partial r_1} - \left(1 + \frac{1}{r_1^2}\right) f(r_1) = 0 \quad (6)$$

显然式(6)为贝塞尔方程, 故其通解为

$$f(r_1) = A_{ms} J_{1s}(r_1) + B_{ms} N_{1s}(r_1) \quad (7)$$

式中, A_{ms} 、 B_{ms} 为根据边界条件决定的常数, $J_{1s}(r_1)$ 、 $N_{1s}(r_1)$ 分别为第一类和第二类柱函数. 又由数理方程理论可知

$$r_1 \rightarrow 0 \text{ 时, } J_{1s} \rightarrow 0, N_{1s} \rightarrow \infty \quad (8)$$

$$r_1 \rightarrow \infty \text{ 时, } J_{1s} \rightarrow \infty, N_{1s} \rightarrow 0 \quad (9)$$

因此, 水听器内部液体的速度势表达式为

$$\psi_1(r, z, \theta, t) = \cos\theta \sum_{n=1}^{\infty} \dot{q}_n \sum_{s=1,3,5}^{\infty} A_{ms} J_{1s}(r_1) \cos \frac{\pi s}{2h} z \quad (10)$$

水听器外部液体的速度势表达式为

$$\psi_2(r, z, \theta, t) = \cos\theta \sum_{n=1}^{\infty} \dot{q}_n \sum_{s=1,3,5}^{\infty} B_{ms} N_{1s}(r_1) \cos \frac{\pi s}{2h} z \quad (11)$$

将水听器的弹性位移 $u(z, t)$ 用其水中振型 X_n 及广义坐标 q_n 展开, 即

$$u(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n(t) X_n(z) \quad (12)$$

将水听器内部和外部单位高度上的弹性动水压力叠加, 可得到水听器内外充满液体时, 沿其单位高度上总的弹性动水压力为

$$p_n = -\frac{4\gamma_0}{g} \sum_{n=1}^{\infty} \ddot{q}_n \sum_{s=1,3,5}^{\infty} \bar{H}_s \cos \frac{\pi s}{2h} z \int_0^h X_n \cos \frac{\pi s}{2h} \xi d\xi \quad (13)$$

式中, \ddot{q}_n 为广义坐标对时间的二次导数, $\bar{H}_s = H_s \cdot s$, 且有

$$H_s = \frac{1}{s^2} \left[a_1 \left(\frac{N_{1s}(r_1)}{N_{1s}(r_1)} \right)_{r=a_1} + a_2 \left(\frac{J_{1s}(r_1)}{J_{1s}(r_1)} \right)_{r=a_2} \right] \quad (14)$$

利用振型分解的概念来求解动水压力, 令水听器作频率为 ω 的简谐自由振动, 则式(13)可以表示为

$$p_n = \frac{4\gamma_0}{g} \omega^2 \sum_{s=1,3,5}^{\infty} \bar{H}_s \cos \frac{\pi s}{2h} z \int_0^h X_n \cos \frac{\pi s}{2h} \xi d\xi \quad (15)$$

此时, 水听器在水中满足弯曲自由振动方程, 即

$$EI \frac{d^4 X}{dz^4} - \frac{\rho F}{g} \omega^2 X = \frac{4\gamma_0}{g} \omega^2 \sum_{s=1,3,5}^{\infty} \bar{H}_s \cos \frac{\pi s}{2h} z \int_0^h X \cos \frac{\pi s}{2h} \xi d\xi \quad (16)$$

式中, E 为水听器的弹性模量, I 为水听器的横截面惯性矩, F 为水听器的横截面积, ρ 为水听器封装材料的密度, ω 为自振圆频率.

将水听器任一有水振型 X 按无水振型 \bar{X}_n 展开, 令

$$X = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \bar{X}_n \quad (17)$$

且无水振型与相应的圆频率 ω_{0n} 应满足方程式

$$EI \frac{d^4 \bar{X}_n}{dz^4} - \frac{\rho F}{g} \omega_{0n}^2 \bar{X}_n = 0 \quad (18)$$

将式(17)、(18)带入式(16)可得

$$\frac{\rho F}{g} \sum_{n=1}^{\infty} \omega_{0n}^2 C_n \bar{X}_n - \frac{\rho F}{g} \sum_{n=1}^{\infty} \omega^2 C_n \bar{X}_n = \frac{4\gamma_0 \omega^2}{g} \sum_{s=1,3,5}^{\infty} \bar{H}_s \cos \frac{\pi s}{2h} z \sum_{k=1}^{\infty} C_k \int_0^h \bar{X}_k \cos \frac{\pi s}{2h} \xi d\xi \quad (19)$$

以 X_n 乘以式(19)两端, 然后从 0 到 h 积分, 再利用振型 \bar{X}_n 的正交条件, 可得

$$\frac{\rho F}{4\gamma_0 h} N_n (\omega_{0n}^2 - \omega^2) C_n - \omega^2 \sum_{s=1,3,5}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \bar{H}_s M_{ns} M_{ks} C_k = 0 \quad (n = 1, 3, 5 \dots) \quad (20)$$

其中,

$$\begin{cases} M_{ns} = \frac{1}{h} \int_0^h \bar{X}_n \cos \frac{\pi s}{2h} z dz \\ N_n = \frac{1}{h} \int_0^h \bar{X}_n^2 dz \end{cases} \quad (21)$$

在式(20)中取 $n=1, k=1$, 可求得水听器水中一阶固有频率, 它与无水时的一阶固有频率之比的平方为

$$\left(\frac{\omega_1}{\omega_{01}}\right)^2 = \frac{1}{1 + \frac{4\gamma_0 h}{\rho F N_1} \sum_{s=1,3,5}^{\infty} \bar{H}_s M_{1s}^2} < 1 \quad (22)$$

由式(22)可知, 水听器在水中的固有频率小于无水时的频率。

2 有限元仿真分析

利用有限元软件 ANSYS 首先对未经过加固封装的 DFB 光纤激光水听器进行仿真分析, 建立其 1/4 模型, 使用 SOLID45 单元对模型进行网格划分, 在中间水听器的剖面施加对称约束, 为了使得仿真结果与实测情况尽可能一致, 在水听器两端的端盖外侧施加固定约束, 这与实测时夹具固定水听器的位置相同. 未经加固封装的水听器外径为 8 mm, 长度为 70 mm; 膜片采用不锈钢材料加工, 其弹性模量 $E=1.93 \times 10^{11}$ Pa, 泊松比 $\nu=0.31$, 密度 $\rho=7750$ kg/m³; 水听器其他部分采用殷钢加工, 其弹性模量 $E=1.42 \times 10^{11}$ Pa, 泊松比 $\nu=0.28$, 密度 $\rho=8100$ kg/m³. 材料参数设置后对水听器进行模态分析, 结果显示其一阶固有频率为 4256 Hz, 振型如图 2; 随后在水听器内部以及周围建立半径是水听器横截面半径 10 倍的水介质模型, 分别选用 SOLID45 单元和 FLUID30 单元对水听器和水介质进行网格划分, 水介质的密度 $\rho=1000$ kg/m³, 声速 $c=1500$ m/s. 对水听器的内外侧表面施加流固耦合约束, 对水介质剖面施加对称约束, 其他约束条件与之前分析相同, 进行模态分析得到水听器的一阶流固耦合固有频率为 3903 Hz, 阵型如图 3, 分析结果表明不仅流固耦合固有频率值相对于无水情况下有所降低, 还在设计的 2500~8000 Hz 工作频带内增加了 1 个固有频率, 这不利于水听器获得平坦的频响曲线. 在此基础上, 对水听器增敏元件膜片的下端面施加幅度为 1 μPa 的声压作用, 在 2500~8000 Hz 的频率范围内, 以 100 Hz 为间隔, 均布了 65 个频点对其进行谐响应分析, 得到膜片中心点在不同频率下的位移幅值响应, 结果如图 4.



图 2 未加固封装水听器的一阶振型
Fig. 2 First-order modal shape of the hydrophone without reinforcing

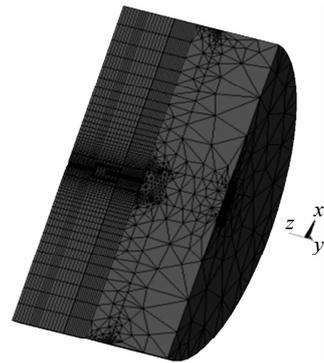


图 3 未加固封装水听器的一阶流固耦合振型
Fig. 3 First-order modal coupling shape of the hydrophone without reinforcing

利用有限元软件 ANSYS 在 1/4 水听器模型内部和外侧分别建立了用于加固封装的凝胶模型以及聚氨酯护套模型, 凝胶的材料参数为: 弹性模量 $E=3.4 \times 10^9$ Pa, 泊松比 $\nu=0.33$, 密度 $\rho=1200$ kg/m³; 聚氨酯材料的参数为: 弹性模量 $E=1.5 \times 10^{10}$ Pa, 泊松比 $\nu=0.36$, 密度 $\rho=1180$ kg/m³. 使用 SOLID45 单元对模型进行网格划分, 固定约束施加在端盖外侧的聚氨酯护套处, 其他约束条件与之前分析相同, 模态分析的结果显示其一阶固有频率为 10403 Hz, 振型如图 5. 相比于未经过加固封装的水听器, 其套筒中部的长条形结构的局部模态得到了抑制, 水听器的固有频率显著提高, 这对拓宽水听器的工作频带具有重要意义. 随后在聚

聚氨酯护套周围建立水介质模型,在聚氨酯护套外表面施加流固耦合约束,通过模态分析可知水听器的一阶流固耦合固有频率为 8 501 Hz,振型如图 6,频率值相对于无水时有一定程度的降低,这与理论分析结果吻合.同样在此基础上,对水听器增敏元件膜片的下端面施加幅度为 $1\mu\text{Pa}$ 的声压作用,在 2 500~8 000 Hz 的频率范围内,以 100 Hz 为间隔,均布了 65 个频点对其进行谐响应分析,得到膜片中心点在不同频率下的位移幅值响应,结果如图 7.

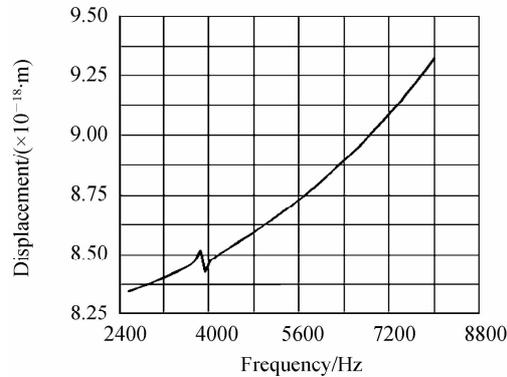


图 4 未加固封装水听器膜片中心点的位移幅值响应

Fig. 4 Longitudinal displacement in diaphragm center point of the hydrophone without reinforcing



图 5 加固封装水听器的一阶振型

Fig. 5 First-order modal shape of the hydrophone with reinforcing

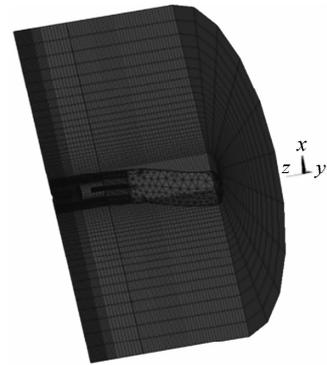


图 6 加固封装水听器的一阶流固耦合振型

Fig. 6 First-order modal coupling shape of the hydrophone with reinforcing

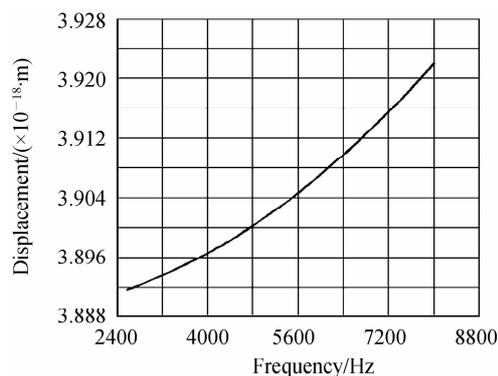


图 7 加固封装水听器膜片中心点的位移幅值响应

Fig. 7 Longitudinal displacement in diaphragm center point of the hydrophone with reinforcing

对比图 4 和图 7 可知,水听器在未经过加固封装时膜片中心点的位移在 3 900 Hz 附近出现急剧变化,通过观察振型图主要由水听器套筒中部长条形结构的横向振动引起的,而采用了凝胶与聚氨酯护套的加固封装后该现象被抑制,且水听器在 2 500~8 000 Hz 设计频段内的位移幅值变化更为平坦.在 $1\mu\text{Pa}$ 的声压作用下,未经加固封装的水听器在 5 kHz 频点处单个膜片中心点的位移为 8.632×10^{-18} m,通过计算^[3]可得其声压灵敏度为 -135.6 dB,而采用加固封装的水听器的位移为 3.901×10^{-18} m,对应的声压灵敏度为

-142.5 dB, 相比于未加固状态的灵敏度降低了 6.9 dB, 这是由于水听器内部的凝胶对膜片的形变存在阻碍作用, 但该指标仍能满足工程上的要求. 综上可知, 通过凝胶与聚氨酯护套的封装来提高水听器的整体刚度是解决固有频率对水听器频响性能影响的可行手段.

3 实验分析

在分析结果的基础上加工制作了双膜片结构的 DFB 光纤激光水听器原型样品, 编号 H741, 只经过结构封装的水听器(如图 8)的出射激光中心波长为 1 544.765 nm, 采取了进一步加固措施封装的水听器(如图 9)的出射激光中心波长略微减小到了 1 544.740 nm.



图 8 未加固水听器的原型样品

Fig. 8 Prototype of hydrophone without reinforcing



图 9 加固后水听器的原型样品

Fig. 9 Prototype of hydrophone with reinforcing

对该水听器 2 500~8 000 Hz 频段内水声性能测试的实验在长 10 m、宽 6 m、深 5 m 的消声水池进行, 实验系统如图 10. 发射换能器入水 2.5 m, 与一台功率放大器连接, 信号发生器为其提供脉冲信号, BK8105 标准水听器与发射换能器在水平方向上相距 2.5 m, 入水深度为 1.7 m, 且与一台电荷放大器相连, 用示波器读取标准水听器输出信号的幅度, DFB 光纤激光水听器与标准水听器靠近放置, 其引出端与解调系统相连, 可解调出待测水听器的相位漂移信息, 结合两者即可得到水听器的声压灵敏度. 在 2 500~8 000 Hz 频率范围内选择 1/3 倍频点分别对采取加固措施前后的 DFB 光纤激光水听器 H741 进行测试, 在测试过程中还多次改变标准水听器与待测水听器的相对位置, 验证了实验结果的重复性较好, 其声压灵敏度频率响应曲线如图 11.

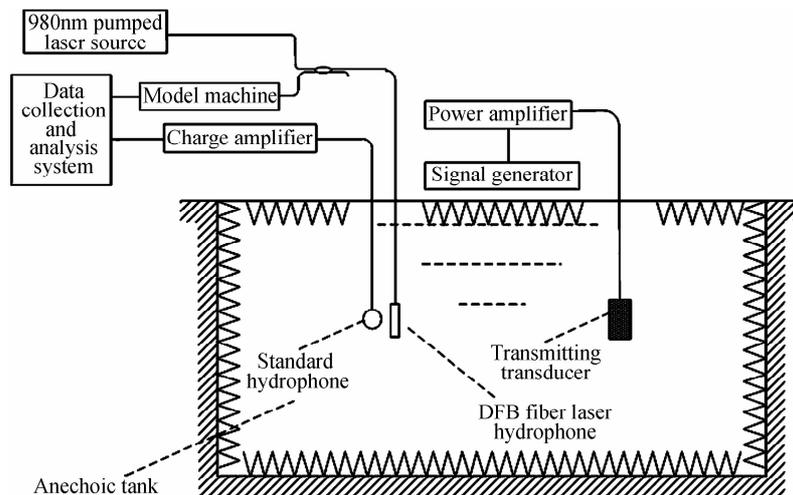


图 10 消声水池实验系统示意图

Fig. 10 Schematic of testing system in anechoic tank

从实验结果可以看出, 在 2 500~8 000 Hz 的频率范围内, 只经过结构封装的 DFB 光纤激光水听器的声压灵敏度曲线出现了较大起伏, 这与水听器在该频段内存在的流固耦合固有频率有关, 而对水听器进行了加固封装后, 其平均声压灵敏度为 -142.77 dB, 波动幅度不大于 ± 0.8 dB, 表明加固措施在显著提高水听器一阶流固耦合固有频率的同时, 还有效抑制了水听器的部分局部模态, 使得水听器在工作频带内具有较为平坦

的响应曲线,同时,实验测得水听器的声压灵敏度在经过加固封装后有所降低,且数值结果与仿真分析吻合较好。

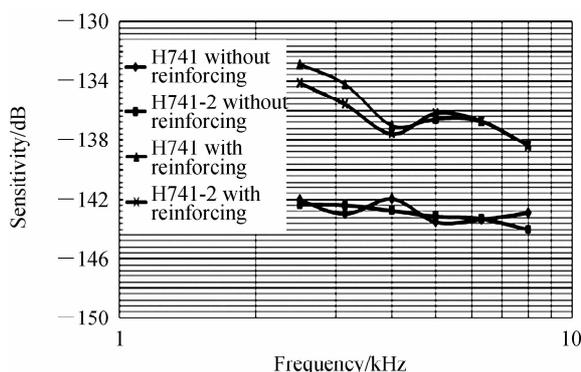


图 11 DFB 光纤激光水听器实测频率响应曲线

Fig. 11 Experimental frequency response curve of DFB fiber laser hydrophone

然而,DFB 光纤激光水听器在实际工程应用中,除了受到流固耦合作用的影响外,还会受加速度效应、温度变化、静压作用等多方面因素的影响,这些都会降低光纤激光水听器在复杂深海环境工作的稳定性,因而,需要对水听器的抗加速度、对温度不敏感以及耐静水压等方面开展进一步研究,才能保证 DFB 光纤激光水听器具有在动态运动的工作方式、大深度的工作环境以及温度变化范围大的工作现状下稳定工作的能力。

4 结论

本文从理论上分析了水介质对双膜片结构的 DFB 光纤激光水听器固有频率的影响,然后用有限元软件进行了仿真分析。仿真结果表明水听器在水中的固有频率相对于无水情况下会有所降低,凝胶以及聚氨酯护套等加固措施能提高水听器的整体刚度以及抑制局部模态。最后通过实验研究了采取加固措施前后水听器的声压灵敏度频响性能,水听器在 2 500~8 000 Hz 的频段内获得了从 ± 3 dB 的较大起伏到平均声压灵敏度为 -142.77 ± 0.8 dB 的转变,为解决流固耦合作用使得水听器工作频带变窄的问题提供了有效的分析方法。

参考文献

- [1] LI Dong-ming, CHEN Jun, GE Hui-liang, *et al.* Research of high sensitivity and anti-acceleration of DFB active fiber Grating hydrophone[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **39**(3): 1-6.
李东明, 陈军, 葛辉良, 等. 高灵敏度加速度抵消型分布反馈有源光纤光栅水听器研究[J]. 中国激光, 2012, **39**(3): 1-6.
- [2] LI Dong-ming, CHEN Jun, GE Hui-liang, *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.
- [3] SONG Xiao-yan, ZHANG Wen-tao, HE Jun, *et al.* Experiment on the phase congruency of distributed feedback optical fiber laser hydrophone[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(2): 311-313.
宋晓燕, 张文涛, 何俊, 等. 分布反馈式光纤激光水听器相位一致性的测试方法[J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(2): 311-313.
- [4] TANG Bo, HUANG Jun-bin, GU Hong-can, *et al.* Distributed feedback fiber laser hydrophone used in flank array[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(8): 0810002.
唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 应用于舷侧阵的分布反馈式光纤激光水听器研究[J]. 中国激光, 2016, **43**(8): 0810002.
- [5] TANG Bo, HUANG Jun-bin, GU Hong-can, *et al.* Distributed feedback fiber laser hydrophone used in towed line array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(5): 0505005.
唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 应用于拖曳线列阵的分布反馈式光纤激光水听器研究[J]. 中国激光, 2016, **43**(5): 0505005.
- [6] ZHANG Wen-tao, LI Fang. Recent progresses in fiber laser hydrophone[J]. *Journal of Integration Technology*, 2015, **4**(6): 1-14.
张文涛, 李芳. 光纤激光水听器研究进展[J]. 集成技术, 2015, **4**(6): 1-14.
- [7] TANG Bo, HUANG Jun-bin, GU Hong-can, *et al.* Prestressing force in DFB fiber laser hydrophone: theory and

- experiment[J]. *Chinese Journal of 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] LI Dong-ming, CHEN Jun, GE Hui-liang, *et al.* Experimental research on passive interferometric hydrophone of Fiber Bragg Grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(S): 83-86.
- 李东明, 陈军, 葛辉良, 等. 无源干涉型光纤光栅水听器实验研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(S): 83-86.
- [9] ZHANG Wen-tao, LIU Yu-liang, LI Fang, *et al.* Fiber laser hydrophone based on double diaphragms: theory and experiment[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, **26**(10): 1349-1352.
- [10] TAN Bo, YAN Ping, HUANG Jun-bin. Optimization design of sandwich-type probe of fiber laser hydrophones[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, **27**(2): 024120.
- 谭波, 严平, 黄俊斌. 夹层式光纤激光水听器探头优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2015, **27**(2): 024120.
- [11] TAN Bo, HUANG Jun-bin, 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.
- [12] TAN Bo, HUANG Jun-bin. Design of encapsulated structure of distributed feedback fiber laser hydrophone[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(8): 1691-1695.
- 谭波, 黄俊斌. 分布反馈光纤激光水听器封装结构的设计[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(8): 1691-1695.
- [13] FOSTER S, TIKHOMIROV A, VELZEN J V. Towards a high performance fiber laser hydrophone[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(9): 1335-1341.
- [14] FOSTER S, TIKHOMIROV A, HAMISON J, *et al.* Field demonstration of an 8-element fiber laser hydrophone array[C]. SPIE, 2014, **9157**:91570H.
- [15] 居荣初, 曾心传. 弹性结构与液体的耦联振动理论[M]. 北京: 地震出版社, 1983.