

# 分布反馈式光纤激光水听器的声压 灵敏度频率响应特性

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** 光纤激光水听器的频率响应曲线会在声压传递函数的谐振频率处出现谐振峰, 使水听器的工作频带变窄。研制了一种金属膜片端面增敏结构的分布反馈式(DFB)光纤激光水听器。基于电声类比理论, 建立了 DFB 光纤激光水听器的声压传递函数模型, 仿真分析了水听器各结构参数对水听器声压传递函数的影响, 实现了水听器结构的优化设计, 加工制作了水听器原型样品并进行了实验研究。由实验结果可知, DFB 光纤激光水听器在 2.5~10 kHz 频率范围内的平均声压灵敏度为 -135.99 dB, 波动幅度小于  $\pm 0.6$  dB, 且在 16 kHz 附近出现谐振峰, 实验结果与仿真分析结果较好地吻合。该研究对 DFB 光纤激光水听器的研制具有重要指导意义。

**关键词** 光纤光学; 分布反馈式光纤激光水听器; 增敏; 谐振频率; 声压灵敏度

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0406001

## Frequency Response Characteristics of Sound Pressure Sensitivity of Distributed Feedback Fiber Laser Hydrophone

Tang Bo, Huang Junbin, Gu Hongcan, Mao Xin

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

**Abstract** Some resonant peaks in the frequency response curve of fiber laser hydrophone appear at the resonant frequency of sound pressure transfer function, which makes the working frequency band narrow. A distributed feedback (DFB) fiber laser hydrophone is designed with a sensitivity enhanced mental diaphragm structure. A sound pressure transfer function model of the DFB fiber laser hydrophone is established based on electro-acoustic theory. The influence of structural parameters of hydrophone on sound pressure transfer function is simulated, and the structure of hydrophone is optimized. Prototypes of hydrophones are fabricated and tested experimentally. The experimental results show that the average sound pressure sensitivity of the DFB fiber laser hydrophone can reach to -135.99 dB with the fluctuation range within  $\pm 0.6$  dB in the frequency range of 2.5-10 kHz, and the resonant peak appears near the frequency of 16 kHz. The experimental results agree well with the simulation results. The study is of great guiding significance for the development of DFB fiber laser hydrophone.

**Key words** fiber optics; distributed feedback fiber laser hydrophone; sensitivity enhancement; resonant frequency; sound pressure sensitivity

**OCIS codes** 060.2770; 060.2340; 060.3735; 230.1040

## 1 引 言

在过去的 30 年, 干涉型光纤水听器凭借其灵敏度高、动态范围大以及抗电磁干扰能力强等优势, 在水声探测中表现出很大的应用潜力, 因此研究人员对干涉型光纤水听器的封装结构、信号解调以及成阵技术等方面开展了大量颇有成效的研究<sup>[1-2]</sup>。光纤激光传感器的出现为光纤水听器的实现提供了新的技术途径, 利用光纤激光传感器可使水听器阵元的尺寸缩小到毫米量级, 解决了干涉型光纤水听器在体积上的瓶颈。与同样具有高功率激光输出的分布布拉格反射式(DBR)光纤激光器相比, 分布反馈式(DFB)光纤激光器的谐振腔更短、更易实现增敏, 成为构建光纤激光水听器的首选<sup>[3-4]</sup>。

收稿日期: 2016-11-02; 收到修改稿日期: 2016-12-04

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, 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

近年来,出现了许多新型 DFB 光纤激光水听器封装结构的设计,主要以聚合物包裹激光器和金属膜片端面拉伸激光器两种封装方式为主。聚合物的固化过程难以控制,导致水听器的出光性能极易受到影响,因此聚合物包裹激光器封装方式的应用受到了限制。金属膜片端面拉伸激光器的封装方式为机械封装方式,不与激光器谐振腔直接接触,可通过设计机械结构实现温度、静压以及加速度补偿等功能,因此发展较为迅速<sup>[5-7]</sup>。虽然最近出现了一些关于具有高声压灵敏度且响应平坦的 DFB 光纤激光水听器结构方面的报道,但是由于这些设计中所建立的模型过于简化或者目标函数不够全面等,研制的水听器都或多或少存在需要改进的地方,从而降低了其实现工程化应用的效率。2009 年,Zhang 等<sup>[8-10]</sup>设计了一种双膜片结构的 DFB 光纤激光水听器,基于电声类比理论建立水听器声压灵敏度模型时,为了消除变量进行了过多的简化,使得水听器的一些结构尺寸无法得到优化,因此对水听器结构进行了多次改进。2012 年,李东明等<sup>[11]</sup>提出了一种弹性膜片封装结构的 DFB 光纤激光水听器,分析时仅以膜片的谐振频率以及中心挠度为目标函数;虽然该水听器在 100~1000 Hz 的频率范围内获得了一 132.7 dB 的高平均声压灵敏度,但其外径达到了 22 mm,尺寸优势没有得到体现。

本文基于电声类比理论,建立了金属膜片端面增敏结构的 DFB 光纤激光水听器的声压传递函数模型,仿真分析了腔体长度、腔体半径、通孔半径、通孔长度以及膜片厚度等参数对水听器声压传递函数的影响,实现了 DFB 光纤激光水听器结构的优化设计,加工制作了水听器原型样品并开展了水声实验研究。

## 2 理论分析

金属膜片增敏结构的 DFB 光纤激光水听器的封装结构示意图如图 1 所示。金属膜片作为水听器的增敏元件,其下端边缘与套筒两端通过环氧树脂胶黏结,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以确保其与套筒的刚性连接;激光器的尾纤从端盖中间的孔穿出,套筒上开有通孔,声压透过端盖壁进入短腔并作用在膜片的上端面,同时声压通过通孔进入长腔作用在膜片的下端面;两端面之间的压差使膜片产生形变,从而拉动与其固定连接且处于张紧状态的 DFB 光纤激光器来产生轴向应变,以实现探测水声信号,端盖内部为密封的空气腔。基于电声类比理论,给出了 DFB 光纤激光水听器的声学等效电路,如图 2 所示。

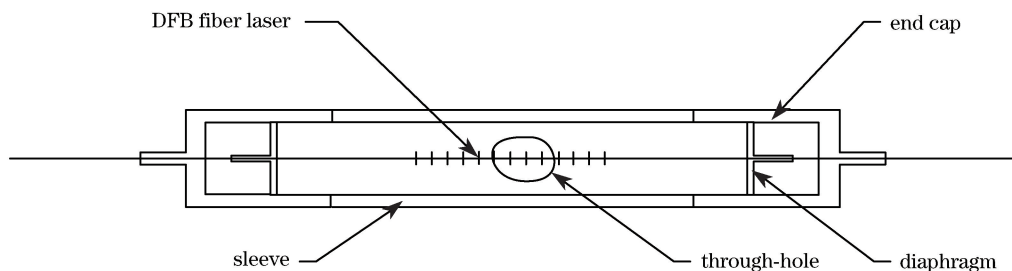


图 1 DFB 光纤激光水听器的封装结构示意图

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

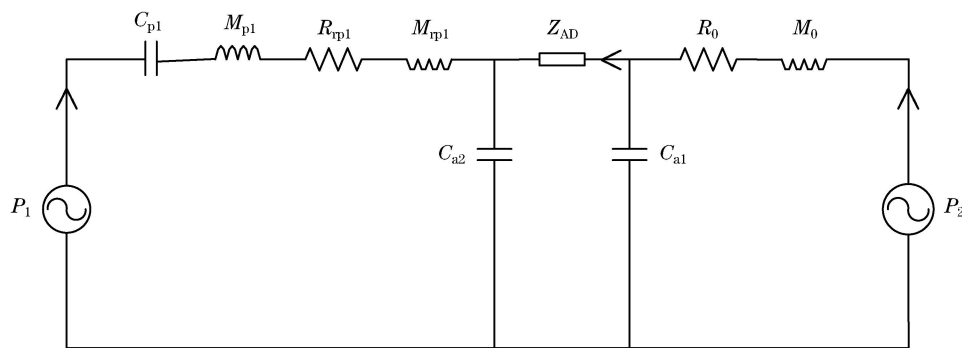


图 2 DFB 光纤激光水听器的声学等效电路

Fig. 2 Acoustic equivalent circuit of DFB fiber laser hydrophone

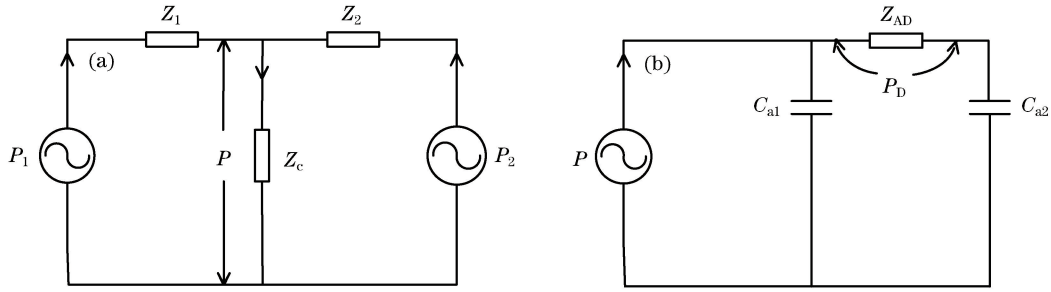


图 3 DFB 光纤激光水听器的简化电路。(a) 水听器整体电路图；(b) 水听器内部电路图  
Fig. 3 Simplified circuit of DFB fiber laser hydrophone. (a) Integrated circuit of hydrophone;  
(b) interior circuit of hydrophone

图 2 中,  $C_{p1}$ 、 $M_{p1}$ 、 $R_{rp1}$ 、 $M_{rp1}$  分别为端盖壳的等效声容、声质量、辐射声阻和同振声质量,  $R_0$  和  $M_0$  为通孔的等效声阻抗和声质量,  $C_{a1}$  和  $C_{a2}$  分别为长腔和短腔的等效声容,  $Z_{AD}$  为膜片的等效声阻抗,  $P_1$  和  $P_2$  分别为端盖外侧和通孔外表面的声压。为了便于分析与计算, 将图 2 中的电路等效简化, 如图 3 所示。

图 3 中  $P$  为水听器内部的声压,  $P_D$  为膜片两端的声压差,  $Z_1$  为端盖壳的总等效声阻抗,  $Z_2$  为通孔的总等效声阻抗,  $Z_c$  为长腔、短腔以及膜片共同作用的等效声阻抗。

端盖壳可认为是具有固支边界的圆柱壳, 其等效声容  $C_{p1} = 2\pi L_2 R_y^3 [1 - 2/(BL_2)] / (E_1 L)$ , 声质量  $M_{p1} = [\rho_1 L B (2BL_2 - 5)] / [4\pi R_y (BL_2 - 2)]^2$ , 辐射声阻  $R_{rp1} = \rho_0 \omega B / [2(BL_2 - 2)]$ , 同振声质量  $M_{rp1} = \rho_0 B \ln\{[c_0 / (\omega R_y)] / [\pi(BL_2 - 2)]\}$ , 其中  $B = [12(1 - \nu_1^2) / (4R_y^2 L^2)]^{1/4}$  为引入的常量,  $L$ 、 $R_y$ 、 $L_2$  分别为端盖壳的长度(即通孔长度)、外侧半径与短腔长度,  $\rho_1$ 、 $E_1$ 、 $\nu_1$  分别为端盖材料的密度、弹性模量和泊松比,  $\rho_0$  为水的密度,  $c_0$  为水中声速,  $\omega$  为角频率。端盖壳的总等效声阻抗可表示为

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_{p1}} + j\omega M_{p1} + R_{rp1} + j\omega M_{rp1} \quad (1)$$

通孔的等效声阻抗  $R_0 = \frac{8\rho_0 L \mu}{\pi r^4} \left(1 + \frac{2B_1 r}{L}\right) \sqrt{1 + \frac{F^2}{32}}$ , 声质量  $M_0 = \frac{\rho_0 L}{\pi r^2} \left(1 + \frac{2B_2 r}{L}\right) \left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + F^2/2}}\right)$ ,  $r$  为通孔半径,  $\mu$  为运动粘滞系数,  $F = r \sqrt{\omega/\mu}$  为无量纲参数,  $B_1 = \frac{3\pi}{16} \left\{ \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \left[ \frac{2 \ln(F+1)}{3\pi} \right]^2} \right\}$ ,  $B_2 = \frac{8}{3\pi} \left(1 - \frac{5}{4}\sqrt{b} + \frac{b^2}{4}\right)$  分别为通孔的声阻与声质量末端修正系数,  $b = nr^2 / (2L_1 R_y)$  为穿孔率,  $L_1$  为长腔长度,  $n$  为通孔个数。通孔的总等效声阻抗可表示为

$$Z_2 = R_0 + j\omega M_0 \quad (2)$$

水听器长腔的等效声容  $C_{a1} = \pi R^2 L_1 / (\rho_0 c_0^2)$ , 短腔的等效声容  $C_{a2} = \pi R^2 L_2 / (\rho c^2)$ , 其中  $R$  为腔体半径,  $\rho$  为空气密度,  $c$  为空气中的声速。长腔、短腔以及膜片共同作用的等效声阻抗<sup>[12]</sup>可表示为

$$Z_c = \frac{\left( Z_{AD} + \frac{1}{j\omega C_{a2}} \right) \frac{1}{j\omega C_{a1}}}{Z_{AD} + \frac{1}{j\omega C_{a2}} + \frac{1}{j\omega C_{a1}}} \quad (3)$$

等效声容  $C_c = \frac{\pi R^6 (1 - \nu_2^2)}{16 E_2 t^3}$ , 声质量  $M_c = \frac{9t\rho_2}{5\pi R^2}$ , 辐射声阻  $R_{rc} = \frac{\rho_2 \omega^2}{2\pi c_0}$ , 同振声质量  $M_{rc} = \frac{4\sqrt{3}\rho_2}{\pi^2 R}$ , 其中  $\rho_2$ 、 $E_2$ 、 $\nu_2$  为膜片材料的密度、弹性模量和泊松比,  $t$  为膜片厚度, 则有

$$Z_{AD} = \frac{1}{j\omega C_c} + j\omega M_c + R_{rc} + j\omega M_{rc} \quad (4)$$

根据叠加原理, 水听器内部的声压为

$$P = \frac{Z_1 Z_c P_2 - Z_2 Z_c P_1}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_c + Z_2 Z_c} \quad (5)$$

膜片上下两端的声压差为

$$P_D = \frac{Z_{AD}}{Z_{AD} + \frac{1}{j\omega C_{a2}}} P. \quad (6)$$

由于水听器的尺寸很小,通孔与端盖的距离很小,可以认为水听器四周的声场是均匀的,即  $P_1 = P_2$ ,因此水听器的声压传递函数为

$$T(\omega) = \frac{P_D}{P_1} = \frac{Z_{AD}(Z_1 Z_c - Z_2 Z_c)}{\left(Z_{AD} + \frac{1}{j\omega C_{a2}}\right)(Z_1 Z_2 + Z_1 Z_c + Z_2 Z_c)}. \quad (7)$$

### 3 仿真分析

从以上分析可知,DFB 光纤激光水听器的声压传递函数与通孔大小、长短腔长度与半径、端盖壳尺寸以及膜片厚度等众多参数有关,直接利用(7)式以及各结构的阻抗表达式进行理论分析会非常复杂,因此采用仿真分析的方法对水听器声压传递函数的幅度与各参数的关系进行分析。在仿真分析的过程中,水听器膜片材料为不锈钢,其弹性模量  $E_2 = 1.93 \times 10^{11}$  Pa,泊松比  $\nu_2 = 0.31$ ,密度  $\rho_2 = 7750$  kg/m<sup>3</sup>。水听器的端盖材料为殷钢,其弹性模量  $E_1 = 1.42 \times 10^{11}$  Pa,泊松比  $\nu_1 = 0.28$ ,密度  $\rho_1 = 8100$  kg/m<sup>3</sup>。水的密度  $\rho_0 = 1000$  kg/m<sup>3</sup>,水中声速  $c_0 = 1500$  m/s,运动粘滞系数  $\mu = 1.14 \times 10^{-3}$ 。

图4为通孔长度  $L$  与水听器声压传递函数幅值之间关系,仿真过程使用的参数为: $t = 0.1$  mm,  $L_1 = 48$  mm,  $L_2 = 5$  mm,  $R = 2$  mm,  $r = 1$  mm,  $n = 10$ 。由图4可知,随着通孔长度的减小,水听器声压传递函数的谐振频率向高频移动,谐振频率对应的声压传递函数的幅度也略微增加。考虑到实际装配时,水听器膜片需要端盖压紧以保证其与套筒的刚性连接,因此通过缩短通孔长度将谐振频率向高频推移的同时,端盖壳也需要预留一定的厚度并与膜片接触。

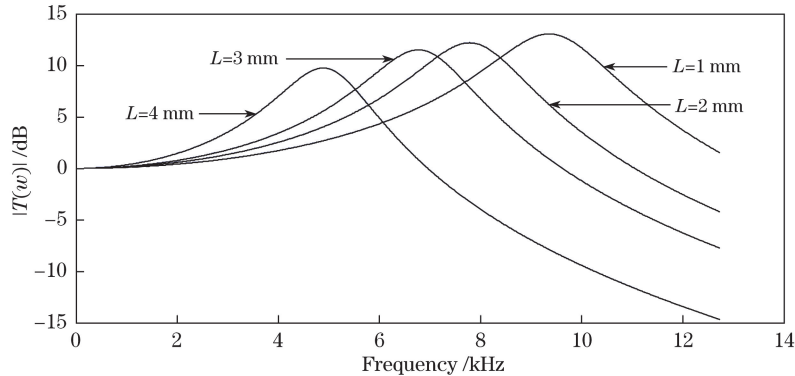


图4 通孔长度  $L$  对水听器声压传递函数幅值的影响

Fig. 4 Influence of through-hole length  $L$  on amplitude of sound pressure transfer function of hydrophone

图5为通孔半径  $r$  与水听器声压传递函数幅值的关系,仿真过程中使用的参数为: $t = 0.1$  mm,  $L_1 = 48$  mm,  $L_2 = 5$  mm,  $R = 2$  mm,  $L = 1$  mm,  $n = 10$ 。由图5可知,随着通孔半径的增大,水听器声压传递函数的谐振频率向高频迅速移动,谐振频率对应的声压传递函数的幅度也急剧增大;当通孔半径大于2 mm时,谐振频率向高频移动的速度变得缓慢,对应的幅度也基本不变。由于水听器尺寸较小,通孔半径过大会严重影响水听器结构的稳定性以及对称性,因此通孔半径的增大要以结构的稳定性为前提。

图6为腔体长度  $L_1$ 、 $L_2$  对水听器声压传递函数幅值的影响,仿真过程中使用的参数为: $t = 0.1$  mm,  $R = 2$  mm,  $L = 2$  mm,  $r = 1$  mm,  $n = 10$ 。由图6(a)可知,当  $L_1 = 48$  mm时,水听器声压传递函数的谐振频率随短腔长度  $L_2$  的减小向高频方向略微移动,对应的幅值也略微减小;由图6(b)可知,当  $L_2 = 5$  mm时,随着水听器长腔长度  $L_1$  的减小,水听器声压传递函数的谐振频率向高频方向移动,对应的幅值略微增加。由于水听器的膜片采用一体化设计,在膜片的上端固定连接了毛细钢管以保证膜片与光纤激光器的牢固连接,因此短腔长度的缩短要以毛细钢管的长度为下限并留有余量,防止在端部出现的应力集中导致光纤微弯;长

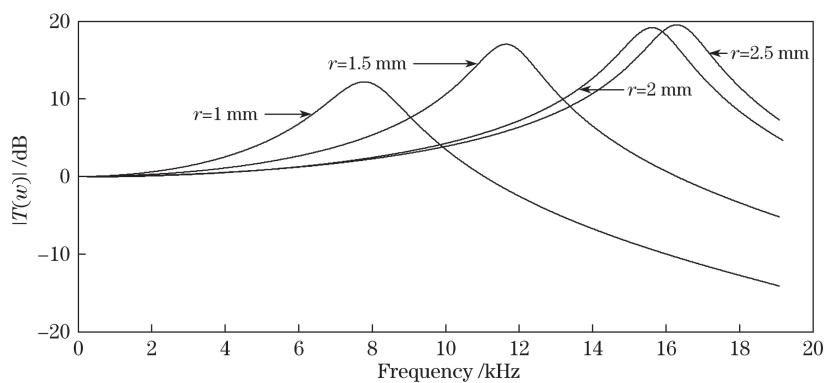


图 5 通孔半径  $r$  对水听器声压传递函数幅值的影响

Fig. 5 Influence of through-hole radius  $r$  on amplitude of sound pressure transfer function of hydrophone

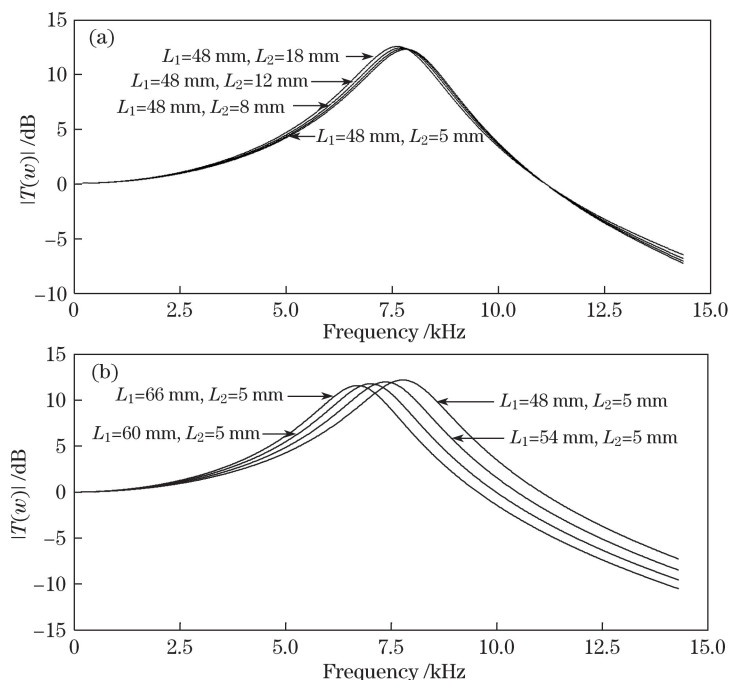


图 6 (a)短腔长度  $L_2$  和(b)长腔长度  $L_1$  对水听器声压传递函数幅值的影响

Fig. 6 Influence of lengths of (a) short cavity  $L_2$  and (b) long cavity  $L_1$  on amplitude of sound pressure transfer function of hydrophone

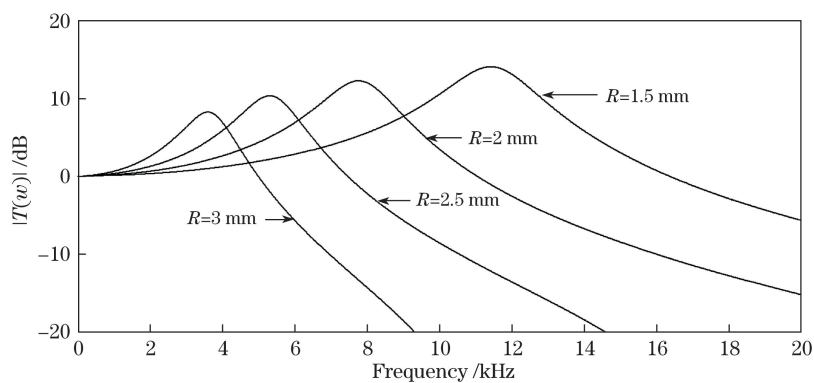
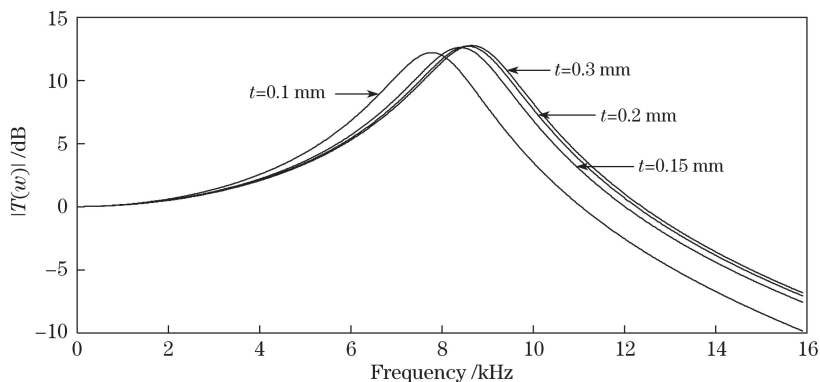
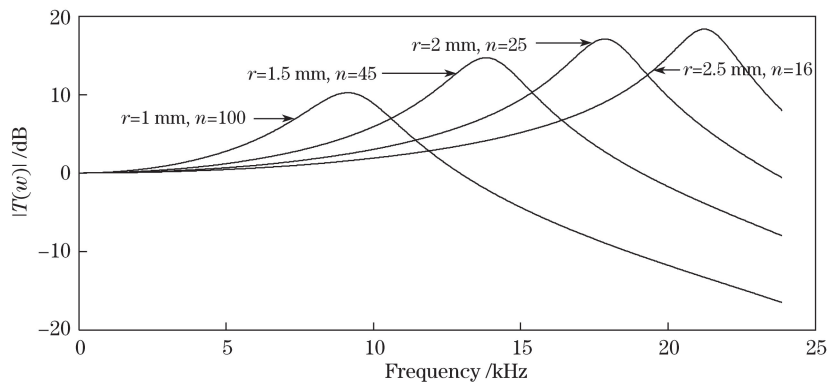
腔长度的缩短要以光纤激光器有源部分的长度为下限,防止两端的环氧树脂影响其出光功率。

图 7 为腔体半径(膜片半径)  $R$  对水听器声压传递函数幅值的影响,仿真过程使用的参数为:  $t=0.1$  mm,  $L_1=48$  mm,  $L_2=5$  mm,  $L=2$  mm,  $r=1$  mm,  $n=10$ 。由图 7 可知,随着水听器腔体半径  $R$  的减小,水听器声压传递函数的谐振频率向高频方向移动,对应的幅值逐渐增大。膜片作为水听器的增敏元件,其半径的缩小会使膜片中心点的位移减小,从而降低水听器的声压灵敏度,因此在通过减小膜片半径来增大声压传递函数谐振频率的同时,应保证水听器的声压灵敏度维持在较高的水平。

图 8 为膜片厚度  $t$  对水听器声压传递函数幅度的影响,仿真过程中使用的参数为:  $L_1=48$  mm,  $L_2=5$  mm,  $R=2$  mm,  $L=2$  mm,  $r=1$  mm,  $n=10$ 。由图 8 可知,水听器声压传递函数的谐振频率随着膜片厚度的增加向高频方向缓慢移动,对应的幅值基本没有变化,因此膜片厚度对水听器的声压灵敏度影响较大。

图 9 为通孔面积一定的情况下,通孔个数  $n$  对水听器声压传递函数幅度的影响,仿真过程中使用的参数为:  $t=0.1$  mm,  $L_1=48$  mm,  $L_2=5$  mm,  $R=2$  mm,  $L=2$  mm。由图 9 可知,当通孔面积保持不变时,随着通孔个数  $n$  的增加,水听器传递函数的谐振频率向低频移动,对应的幅值减小,说明通孔个数  $n$  的增加增大



图 7 腔体半径  $R$  对水听器声压传递函数幅值的影响Fig. 7 Influence of cavity radius  $R$  on amplitude of sound pressure transfer function of hydrophone图 8 膜片厚度  $t$  对水听器声压传递函数幅值的影响Fig. 8 Influence of diaphragm thickness  $t$  on amplitude of sound pressure transfer function of hydrophone图 9 通孔个数  $n$  对水听器声压传递函数幅值的影响Fig. 9 Influence of number of through-hole  $n$  on amplitude of sound pressure transfer function of hydrophone

了其共振频率处声压幅值的衰减作用。由上述分析可知,通孔半径  $r$  的减小会使共振频率向低频移动,因此在面积一定的情况下,通孔个数和通孔半径同时对水听器的声压传递函数作用时,通孔半径  $r$  起主导作用。

综上所述,最终选定 DFB 光纤激光水听器的结构参数为:通孔长度  $L=2$  mm,长腔长度  $L_1=48$  mm,短腔长度  $L_2=5$  mm,腔体半径  $R=2$  mm,膜片厚度  $t=0.1$  mm,通孔的半径  $r=1.5$  mm,通孔个数  $n=20$ 。

#### 4 实验分析

为了验证仿真分析的正确性,基于其选定的结构尺寸加工制作了 DFB 光纤激光水听器原型样品,并利用比较法在消声水池中对水听器在 2.5~20 kHz 频率范围内的声压灵敏度(选择 1/3 倍频程频点)进行了测试。实验系统示意图如图 10 所示,消声水池尺寸为 10 m×6 m×5 m,发射换能器的入水深度为 2.5 m,信

号发生器通过功率放大器发出脉冲信号,标准水听器与电荷放大器相连,输出信号幅度通过示波器读取,标准水听器靠近待测水听器放置且入水深度为 1.7 m。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,通过解调后得到待测水听器的相位漂移信息,再读取示波器中标准水听器的电压信号,即可得到 DFB 光纤激光水听器的声压灵敏度。考虑到研制的水听器属于双膜片结构,在进行高频水声信号测试时,两个膜片接收的声压信号的相位存在差异,可能会造成测试结果的偶然性,因此选择了多支水听器进行实验,并且在多次测试同一支水听器时改变其与标准水听器的相对位置,以确保实验的可重复性,待测 DFB 光纤激光水听器的具体参数如表 1 所示。

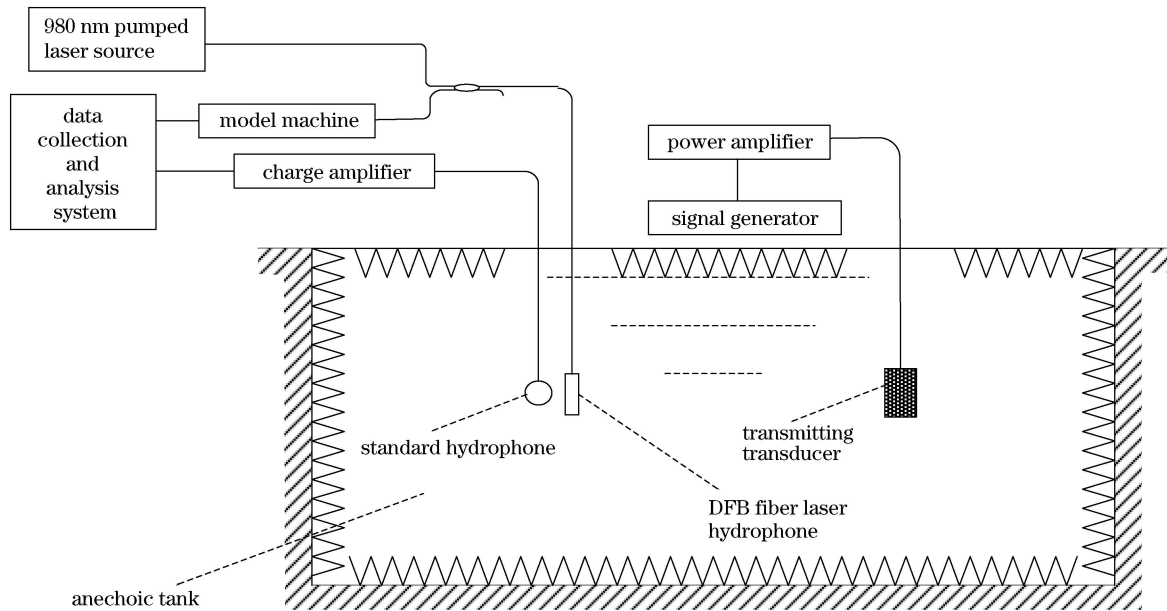


图 10 消声水池实验系统示意图

Fig. 10 Experimental system diagram of anechoic tank

表 1 待测 DFB 光纤激光水听器参数

Table 1 Parameters of DFB fiber laser hydrophone to be measured

| Hydrophone number | Output wavelength /nm | Wavelength variation /pm |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|
| H435              | 1536.810              | 700                      |
| H530              | 1539.950              | 590                      |
| H142              | 1529.975              | 665                      |

DFB 光纤激光水听器的实测声压灵敏度频率响应曲线与仿真结果比较如图 11 所示。从实测数据可以看出,参与测试的 3 支水听器具有良好的声压灵敏度频率响应一致性,且同一支水听器在不同位置测试结果的差异在 0.2 dB 以内,从而保证了实验的可重复性。仿真分析结果表明,水听器的谐振频率为 14.98 kHz,与实验测得的 16 kHz 左右的谐振频率非常接近;水听器实测声压灵敏度频率响应曲线与仿真结果具有相同的变化趋势,且编号为 H142 的光纤激光水听器在 2.5~10 kHz 频率范围内的平均声压灵敏度为 -135.99 dB,波动幅度在 ±0.6 dB 以内。

为了进一步验证电声类比理论模型的正确性,加工制作了膜片厚度为 0.2 mm 的 DFB 光纤激光水听器原型样品 H508,其他结构参数与图 11 中的三支水听器相同。该水听器的实测声压灵敏度频率响应曲线与仿真结果比较如图 12 所示。实验结果与仿真结果具有相同的变化趋势,在 2.5~10 kHz 频率范围内的实测平均声压灵敏度为 -155.71 dB,波动幅度在 ±0.7 dB 以内;水听器的仿真谐振频率为 18.69 kHz,实验测得的谐振频率为 20 kHz 左右,两者较为接近。由图 11、12 可知,当水听器的膜片厚度由 0.1 mm 增加到 0.2 mm,其实测曲线的谐振峰由 16 kHz 移动到 20 kHz,与图 8 中分析膜片厚度对水听器声压传递函数幅值的影响得到的结论相吻合,表明电声类比理论模型可对不同结构参数的金属膜片端面增敏 DFB 光纤激光水听器在中高频段的频率响应性能进行较为准确的预测。

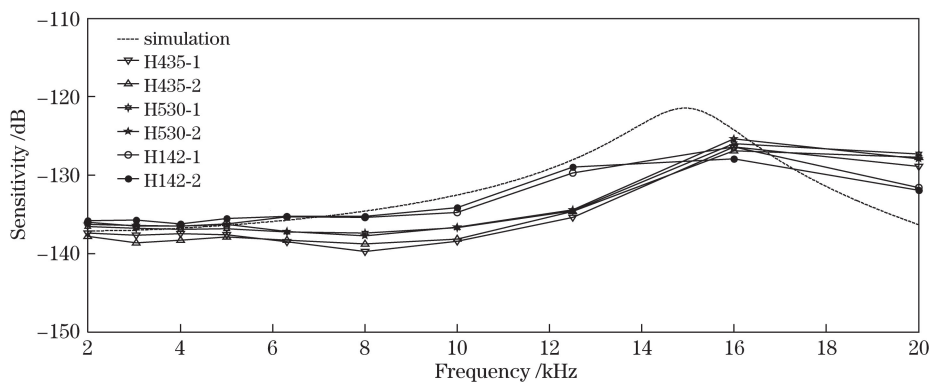


图 11 DFB 光纤激光水听器实测声压灵敏度频率响应曲线与仿真结果的比较

Fig. 11 Comparison among sound pressure sensitivity frequency response curves of DFB fiber laser hydrophone obtained in experiments and simulation result

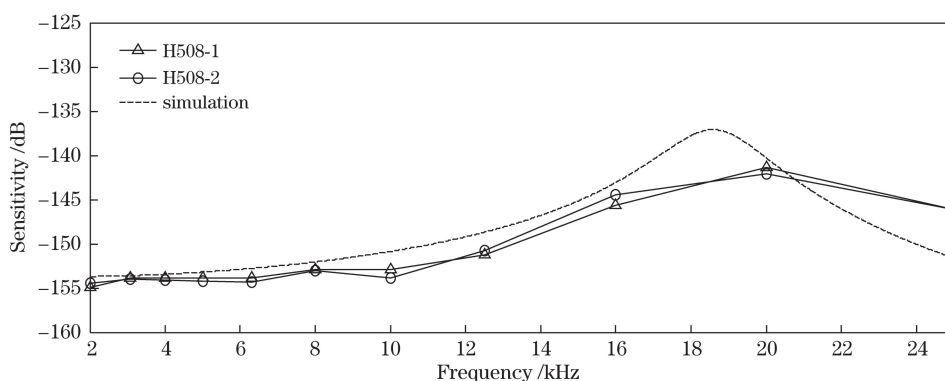


图 12 膜片厚度为 0.2 mm 时 DFB 光纤激光水听器实测声压灵敏度频率响应曲线与仿真结果的比较

Fig. 12 Comparison among sound pressure sensitivity frequency response curves of DFB fiber laser hydrophone obtained in experiments and simulation result when diaphragm thickness is 0.2 mm

由实验结果可知,研制的 DFB 光纤激光水听器在中高频段具有平坦的响应曲线,且具有较好的一致性,对于将水听器的工作频带向高频拓展具有重要意义,从而可提高光纤激光水听器阵列的探测精度。因为仿真分析时将套筒中部长腔的半径与短腔进行了相等处理,使得长腔的声容比实际要小,由图 6、7 可知,水听器的声压传递函数在谐振频率处的幅值与长腔的声容成反比,从而造成水听器声压灵敏度实测值略低于仿真值。为了同时保证水听器在结构上的对称性以及通孔半径尽可能大,在实际加工样品时选择了面积更大的长条形通孔来代替仿真分析时使用的圆形通孔,由图 5 可知,水听器的声压传递函数的谐振频率与通孔半径大小成正比,因此水听器的谐振频率实测值略高于仿真结果。

## 5 结 论

基于电声类比理论,建立了金属膜片端面增敏结构的 DFB 光纤激光水听器频率响应特性的理论模型,仿真分析了水听器各构件结构参数与声压传递函数的关系,研制了结构优化后的水听器原型样品。实验测得所设计的 DFB 光纤激光水听器在 2.5~10 kHz 频率范围内的声压灵敏度为  $(-135.99 \pm 0.6)$  dB,且在 16 kHz 附近出现了谐振峰,与仿真分析曲线吻合较好。实验结果表明,构建的电声类比理论模型可有效预测 DFB 光纤激光水听器的频率响应特性,对研制应用于各种领域以及具有不同带宽的 DFB 光纤激光水听器具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] 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. 应用于拖曳线列阵的光纤水听器研究[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1206004.
- [2] Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou, *et al.* Frequency response of two-order acoustic low-pass filtering fiber optic hydrophone[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(10): 1883-1887.  
王泽锋, 胡永明, 孟 洲, 等. 二阶低通滤波光纤水听器的声压灵敏度频响特性[J]. 光学学报, 2008, 28(10): 1883-1887.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Tan Bo, Huang Junbin. 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.
- [6] Zhang Wentao, 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 Junbin, Gu Hongcan, *et al.* Distributed feedback fiber laser hydrophone used in towed line array[J]. Chinese J 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[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0505005.
- [8] Zhang W T, Zhang F X, Li F, *et al.* Pressure-gradient fiber laser hydrophone[C]. SPIE, 2009, 7503: 75033S.
- [9] Zhang F X, Zhang W T, Li F, *et al.* DFB fiber laser hydrophone with an acoustic low-pass filter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(17): 1264-1266.
- [10] Zhang F X, Zhang W T, Li F, *et al.* DFB fiber laser hydrophone with band-pass response[J]. Optics Letters, 2011, 36(22): 4320-4322.
- [11] 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.
- [12] Du Gonghuan, Zhu Zheming, Gong Xiufen. Principles of sound[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1981: 112-162.  
杜功焕, 朱哲明, 龚秀芬. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 1981: 112-162.