

# 聚氨酯端面拉伸式光纤激光水听器的声压 灵敏度频响特性

唐波<sup>1\*</sup>, 孟荻<sup>1</sup>, 黄俊斌<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国人民解放军 92578 部队, 北京 100161;

<sup>2</sup>海军工程大学兵器工程学院, 湖北 武汉 430033

**摘要** 为研究声压传递函数的谐振频率对分布反馈式光纤激光水听器频响特性的影响, 研制一种聚氨酯端面拉伸式增敏结构的光纤激光水听器。基于电声类比理论建立了声压传递函数模型, 仿真分析水听器各结构、材料参数与水听器声压传递函数的关系, 制作水听器原型样品并进行了实验研究。实验测得, 该结构水听器在 10~2000 Hz 频率范围内的平均声压灵敏度为 -142.8 dB, 波动幅度小于 ±1.5 dB, 且谐振频率出现在 3150 Hz 附近, 与仿真分析结果吻合较好, 表明光纤激光水听器的声压灵敏度频响特性可有效预测以及精细优化, 这对于应用于小型水下作战平台的小尺寸阵元的研制具有重要指导意义。

**关键词** 传感器; 光纤激光水听器; 声压灵敏度; 增敏; 谐振频率

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1010004

## Sound Pressure Sensitivity Frequency Response of Polyurethane End Surface Pulling Fiber Laser Hydrophone

Tang Bo<sup>1\*</sup>, Meng Di<sup>1</sup>, Huang Junbin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>92578 Troops, Chinese People's Liberation Army, Beijing 100161, China;

<sup>2</sup>College of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

**Abstract** To study the influence of the resonant frequency in sound pressure transfer function on the frequency response characteristics of distributed feedback fiber laser hydrophone, a sensitivity enhanced structure through polyurethane end surface pulling is designed. The sound pressure transfer function model is established based on electro-acoustic theory. Then the relationship between the structure and material parameters with the sound pressure transfer function is simulated, and prototypes of hydrophones are fabricated and tested. The results show that the average sound pressure sensitivity reaches to -142.8 dB with the fluctuation less than ±1.5 dB in the frequency range of 10~2000 Hz and the resonant peak appears near 3150 Hz, which agrees well with the simulation result. The frequency response characteristics of fiber laser hydrophone can be effectively predicted, refined and optimized, which is of great guiding significance for the development of small array elements used in small-sized underwater combat platform.

**Key words** sensors; fiber laser hydrophone; sound pressure sensitivity; sensitivity enhancement; resonant frequency

**OCIS codes** 060.2770; 060.2340; 060.3735

## 1 引言

潜艇具有隐蔽性好、生存能力强、突击威力大等特点, 能够在水下广阔海域实施隐蔽机动作战, 可对敌形成“出其不意, 攻其不备”的巨大威慑效果。然

而, 我国潜艇的辐射噪声性能整体水平落后于国外先进水平, 且短期内难以有明显改善, 导致我国潜艇在平时出航时经常受到国外反潜体系和多种兵力的围追堵截, 作战时更会受到敌方反潜兵力的鱼雷攻击。因此, 在这种不对称对抗态势下, 我国潜艇所安

收稿日期: 2019-05-17; 修回日期: 2019-05-25; 录用日期: 2019-06-21

\* E-mail: 942896945@qq.com

装的声纳系统如果能在复杂的水下环境中实现对安静型目标的远距离探测,就能为自身争取更长的规避敌方鱼雷攻击的时间,还能提高其所搭载鱼雷的有效射距,以实现我国潜艇生命力与战斗力的最大化。然而,潜艇,特别是鱼雷及水下无人航行器(UUV)等小型水下作战平台的空间极为有限,在保证声纳系统具备优良探测性能的同时,对其阵元尺寸的小型化乃至成阵后的体积提出了较高的要求<sup>[1]</sup>。干涉型光纤水听器具有灵敏度高、抗电磁干扰及便于大规模复用成阵等优点,且可实现水下“湿端”无源,但受光纤最小弯曲半径及缠绕长度的限制,其尺寸不能得到明显减小,因而成阵后仍会占用大量空间,限制其在水下小型平台上的应用<sup>[2-3]</sup>。之后随着光敏光刻技术与光纤掺杂技术的发展,出现了光纤布拉格光栅(FBG)及分布布拉格反射式(DBR)光纤激光器,以FBG为传感单元的水听器虽然尺寸缩小,但受到自身带宽与信噪比的限制,探测精度有待提高;DBR虽然克服了FBG在带宽与信噪比上的缺陷,但其有源区长度较长,因而构成水听器时尺寸缩小与增敏难度都较大<sup>[4-6]</sup>。

分布反馈式(DFB)光纤激光器能实现高功率窄线宽激光输出,在保留DBR光纤激光器优势的同时,谐振腔长度较短且激光输出模式更加稳定,大大降低了构成水听器时尺寸缩小与增敏的难度,在水声探测领域表现出极大的应用潜力。经过15年的技术攻关,我国在水听器增敏与频响特性方面取得了较大突破,以金属膜片端面增敏结构为代表的光纤水听器发展较为迅速。2008年,Zhang等<sup>[7]</sup>设计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的频率范围内获得波动幅度小于±3 dB的频响曲线;2012年,李东明等<sup>[8]</sup>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;2018年,张海岩等<sup>[9]</sup>报道了一种超细型DFB光纤激光水听器,在100~2000 Hz频率范围内的平均声压灵敏度为-130 dB,波动幅度不大于±2 dB。但金属膜片会受到材料固有属性的限制,无法实现对水听器频响特性的精细优化,使得水听器的实测性能与理论、仿真分析结果存在或多或少的差异,难以形成“理技融合”的光纤激光水听器设计模型。

本文建立DFB光纤激光水听器的声压传递函数理论模型,仿真分析了通孔长度、半径、腔体长度、

半径,及聚氨酯弹性模量、泊松比、高度等参数与声压传递函数的关系,对水听器的结构、材料参数进行了优化,并对其声压频响特性开展实验研究。水听器的实测结果与仿真分析吻合较好,表明理论模型可有效预测水听器的声压灵敏度频响特性。

## 2 理论分析

聚氨酯端面拉伸式增敏结构的DFB光纤激光水听器结构示意图如图1所示,其工作原理为声压载荷通过通孔作用在聚氨酯的下端面,使两端的聚氨酯发生形变,从而带动与之黏接的光纤激光器产生轴向应变,以实现声压的探测。

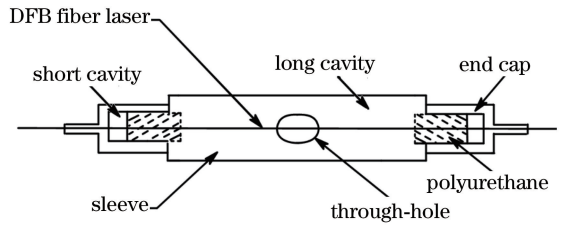


图1 水听器结构示意图

Fig. 1 Diagram of hydrophone structure

基于电声类比理论,可建立该结构水听器的声学等效电路,如图2所示, $P_1$ 为水听器外侧的声压, $R_0$ 和 $M_0$ 为通孔的等效声阻抗和声质量, $C_{a1}$ 、 $C_{a2}$ 分别为长腔和短腔的等效声容, $C_a$ 为聚氨酯的等效声容, $p$ 为作用在聚氨酯下端面的声压, $Z_{AD}$ 为聚氨酯的等效声阻抗。

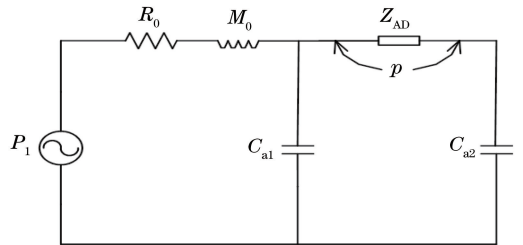


图2 水听器声学等效电路

Fig. 2 Diagram of sound equivalent circuit of hydrophone

设聚氨酯的弹性模量为 $E$ ,泊松比为 $\nu$ ,当圆柱形聚氨酯端面受到声压 $p$ 的作用时,产生的轴向应变为<sup>[10]</sup>

$$\epsilon_z = \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{1 - \nu} \cdot \frac{p}{E} \quad (1)$$

由于聚氨酯的尺寸相对于声波的波长较小,因而可将其等效为集中力顺为 $C_m$ 的弹簧振动系统,那么由虎克定律可知聚氨酯的轴向应变与声压 $p$ 的关系为

$$\varepsilon_z = C_m \cdot pS, \quad (2)$$

式中,  $S$  为聚氨酯端面的面积,  $S = \pi R^2$ ,  $R$  为聚氨酯的半径。

联立(1)式与(2)式可得聚氨酯的等效力顺为

$$C_m = \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{ES(1 - \nu)}. \quad (3)$$

由力顺与声容之间的转换关系可得聚氨酯的等效声容为

$$C_a = C_m S^2 = \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{E(1 - \nu)} S. \quad (4)$$

则聚氨酯的等效声阻抗为

$$Z_{AD} = \frac{1}{j\omega C_a}, \quad (5)$$

式中,  $\omega$  为自振圆频率。

通孔的等效声阻和声质量分别为

$$R_0 = \frac{8\rho_0 L \mu}{\pi r^4} \left(1 + \frac{2B_1 r}{L}\right) \sqrt{1 + \frac{F^2}{32}}, \quad (6)$$

$$M_0 = \frac{\rho_0 L}{\pi r^2} \left(1 + \frac{2B_2 r}{L}\right) \left(1 + \frac{1}{\sqrt{9 + F^2/2}}\right), \quad (7)$$

式中,  $B_1$  为通孔的声阻末端修正系数,  $B_2$  为声质量的末端修正系数,  $F$  为无量纲参量,  $L$ 、 $r$  分别为通孔的长度和半径,  $\rho_0$ 、 $\mu$  分别为水的密度和运动黏滞系数。则通孔的总等效声阻抗为

$$Z_0 = R_0 + j\omega M_0. \quad (8)$$

水听器长腔、短腔的等效声容分别为

$$C_{a1} = \pi R^2 L_1 / (\rho_0 c_0^2), \quad (9)$$

$$C_{a2} = \pi R^2 L_2 / (\rho c^2), \quad (10)$$

式中,  $c_0$ 、 $\rho_0$  分别为水中声速和水中密度,  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $R$  分别为长腔长度、短腔长度与腔体半径,  $c$ 、 $\rho$  分别为空气中的声速和在空气密度<sup>[11]</sup>。

则水听器腔体与聚氨酯共同作用的总等效声阻抗为

$$Z_c = \frac{\left(Z_{AD} + \frac{1}{j\omega C_{a2}}\right) \cdot \frac{1}{j\omega C_{a1}}}{Z_{AD} + \frac{1}{j\omega C_{a2}} + \frac{1}{j\omega C_{a1}}}. \quad (11)$$

因此,该结构水听器的声压传递函数可表示为

$$T(\omega) = \frac{p}{P_1} = \frac{Z_c}{Z_c + Z_0} \cdot \frac{Z_{AD}}{Z_{AD} + \frac{1}{j\omega C_{a2}}}. \quad (12)$$

### 3 仿真分析

由上述理论分析可知,该结构水听器的声压传递函数与通孔、端盖、腔体及聚氨酯的结构、材料参数均有关,本文采用仿真计算的方法,更为直观地分

析水听器声压传递函数随各参数改变的变化趋势。水听器的封装结构材料为热膨胀系数较小的殷钢,其弹性模量  $E_1 = 1.42 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ,泊松比  $\nu_1 = 0.28$ ,  $\rho_1 = 8100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

图3为通孔长度(套筒壳体厚度) $L$ 与水听器声压传递函数关系的仿真结果,其仿真参数设定为聚氨酯材料的弹性模量  $E = 3.5 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ,泊松比  $\nu = 0.47$ ,高度  $l = 8 \text{ mm}$ ,长腔长度  $L_1 = 59 \text{ mm}$ ,短腔长度  $L_2 = 5 \text{ mm}$ ,腔体半径  $R = 2 \text{ mm}$ ,通孔半径  $r = 1 \text{ mm}$ ,从图3可以看出,水听器声压传递函数的谐振频率随通孔长度的减小而提高,对应的谐振峰值也有所增加。考虑到水听器套筒上的穿缆通孔需要穿过多芯光缆,因而通过减小套筒壳体厚度来提高谐振频率,套筒壳体也需要维持一定的厚度以保证多芯光缆对穿缆通孔的孔径要求。

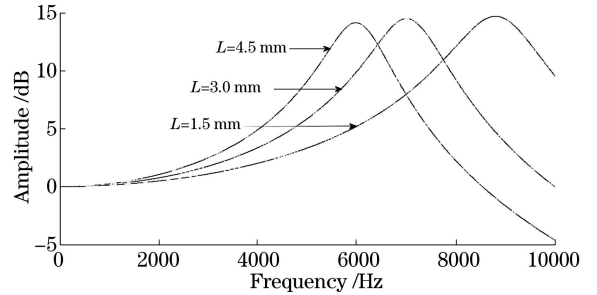


图3 通孔长度  $L$  与声压传递函数的关系

Fig. 3 Relationship between the through-hole length  $L$  and sound pressure transfer function

图4为通孔半径  $r$  与水听器声压传递函数关系的仿真结果,其仿真参数设定为聚氨酯材料的弹性模量  $E = 3.5 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ,泊松比  $\nu = 0.47$ ,高度  $l = 8 \text{ mm}$ ,长腔长度  $L_1 = 59 \text{ mm}$ ,短腔长度  $L_2 = 5 \text{ mm}$ ,腔体半径  $R = 2 \text{ mm}$ ,通孔长度  $L = 4.5 \text{ mm}$ 。从图4可以看出,水听器声压传递函数的谐振频率及对应的谐振峰值均随通孔半径的增大而急剧增

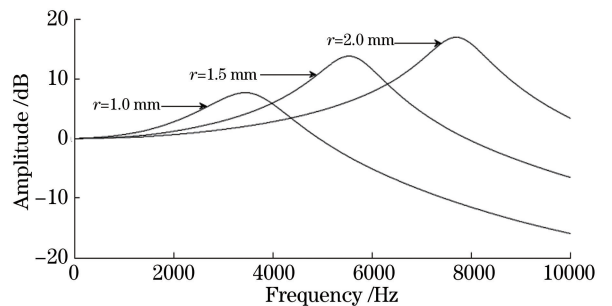
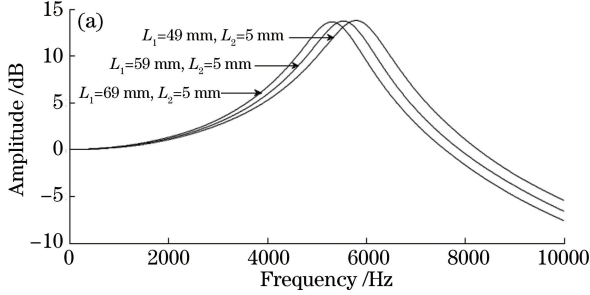


图4 通孔半径  $r$  与声压传递函数的关系

Fig. 4 Relationship between the through-hole radius  $r$  and sound pressure transfer function

大。考虑到水听器的尺寸较小,其通孔半径不宜过大,以保持水听器结构的稳定性。

图 5 为腔体长度  $L_1$ 、 $L_2$  与水听器声压传递函数关系的仿真结果,其仿真参数设定为聚氨酯材料的弹性模量  $E=3.5 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ,泊松比  $\nu=0.47$ ,高度  $l=8 \text{ mm}$ ,腔体半径  $R=2 \text{ mm}$ ,通孔长度  $L=4.5 \text{ mm}$ ,通孔半径  $r=1 \text{ mm}$ 。从图 5(a)可以看出,当短腔长度  $L_2$  一定时,水听器声压传递函数谐振频率及对应的谐振峰值均随长腔长度  $L_1$  的减小而



略微有所增大。从图 5(b)可以看出,当长腔长度  $L_1$  一定时,水听器短腔长度  $L_2$  的变化对声压传递函数的影响可忽略。考虑到水听器封装过程中聚氨酯的固化难以控制,长腔长度的缩短在以 DFB 光纤激光器有源部分长度为下限的同时,需要预留一定的长度防止封装过程中聚氨酯黏接在激光器的有源部分而影响其出射激光质量。短腔长度的缩短则是从水听器的尺寸缩小角度来考虑,但要留有余量以防止在端部出现应力集中而引起光纤微弯。

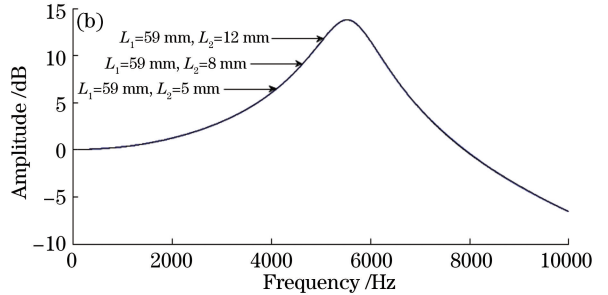


图 5 腔体长度与声压传递函数的关系。(a)长腔  $L_1$ ;(b)短腔  $L_2$

Fig. 5 Relationship between the cavity length and sound pressure transfer function.

(a) Long cavity  $L_1$ ; (b) short cavity  $L_2$

图 6 为腔体半径(圆柱形聚氨酯半径) $R$ 与水听器声压传递函数关系的仿真结果,其仿真参数设定为聚氨酯材料的弹性模量  $E=3.5 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ,泊松比  $\nu=0.47$ ,高度  $l=8 \text{ mm}$ ,长腔长度  $L_1=59 \text{ mm}$ ,短腔长度  $L_2=5 \text{ mm}$ ,通孔半径  $r=1 \text{ mm}$ ,通孔长度  $L=4.5 \text{ mm}$ 。从图 6 可以看出,水听器声压传递函数的谐振频率及对应的谐振峰值均随腔体半径的减小而增大。聚氨酯作为水听器的增敏元件,其与 DFB 光纤激光器黏接处的位移即反映水听器的声压灵敏度大小。聚氨酯从中心点向四周延伸的轴向位移逐渐变小,激光器安装位置的偏差会造成水听器灵敏度的降低,且其半径的缩小会进一步增加水听器封装过程中对激光器的要求,因而圆柱形聚氨酯的半径不能无限缩小。

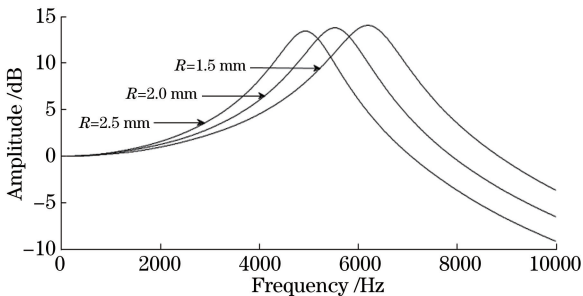


图 6 腔体半径  $R$  与声压传递函数的关系

Fig. 6 Relationship between the cavity radius  $R$  and sound pressure transfer function

图 7 为聚氨酯材料的弹性模量  $E$  与水听器声压传递函数关系的仿真结果,其仿真参数设定为聚氨酯材料的泊松比  $\nu=0.47$ ,高度  $l=8 \text{ mm}$ ,长腔长度  $L_1=59 \text{ mm}$ ,短腔长度  $L_2=5 \text{ mm}$ ,腔体半径  $R=2 \text{ mm}$ ,通孔半径  $r=1 \text{ mm}$ ,通孔长度  $L=4.5 \text{ mm}$ 。从图 7 可以看出,水听器声压传递函数的谐振频率及对应的谐振峰值均随聚氨酯材料弹性模量  $E$  的增大而增大,又由(1)式可知,水听器的声压灵敏度随聚氨酯弹性模量的增大而降低,因而在通过增大聚氨酯弹性模量来提高水听器工作带宽的同时,还需兼顾其具备较高声压灵敏度的要求。

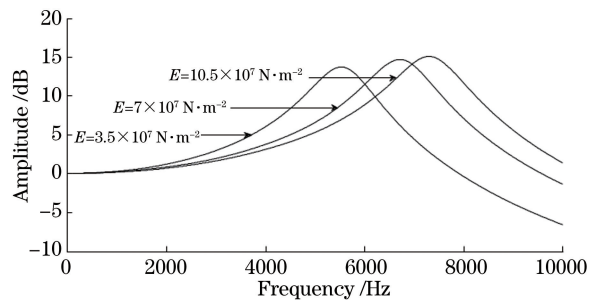


图 7 弹性模量  $E$  与声压传递函数的关系

Fig. 7 Relationship between the elastic modulus  $E$  and sound pressure transfer function

图 8 为聚氨酯材料的泊松比  $\nu$  与水听器声压传递函数关系的仿真结果,其仿真参数设定为聚氨酯

材料的弹性模量  $E = 3.5 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ , 高度  $l = 8 \text{ mm}$ , 长腔长度  $L_1 = 59 \text{ mm}$ , 短腔长度  $L_2 = 5 \text{ mm}$ , 腔体半径  $R = 2 \text{ mm}$ , 通孔半径  $r = 1 \text{ mm}$ , 通孔长度  $L = 4.5 \text{ mm}$ 。从图 8 可以看出, 水听器声压传递函数的谐振频率及对应的谐振峰值均随聚氨酯材料泊松比  $\nu$  的增大而增大, 又由(1)式可知, 水听器的声压灵敏度随聚氨酯泊松比的增大而降低, 因而在通过增大聚氨酯泊松比来提高水听器工作带宽的同时, 还需兼顾其具备较高声压灵敏度的要求。

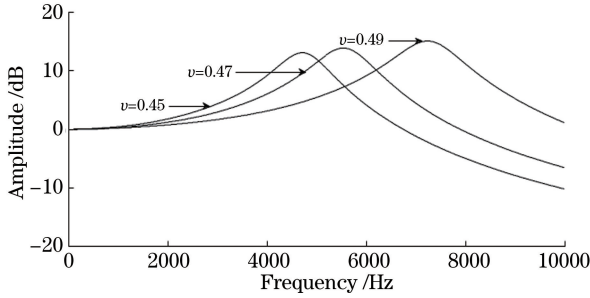


图 8 泊松比  $\nu$  与声压传递函数的关系  
Fig. 8 Relationship between the Poisson ratio  $\nu$  and sound pressure transfer function

图 9 为聚氨酯的高度  $l$  与水听器声压传递函数关系的仿真结果, 其仿真参数设定为聚氨酯材料的弹性模量  $E = 3.5 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ , 泊松比  $\nu = 0.47$ , 长腔长度  $L_1 = 59 \text{ mm}$ , 短腔长度  $L_2 = 5 \text{ mm}$ , 腔体半径  $R = 2 \text{ mm}$ , 通孔半径  $r = 1 \text{ mm}$ , 通孔长度  $L = 4.5 \text{ mm}$ 。从图 9 可以看出, 水听器声压传递函数的谐振频率及对应的谐振峰值均随聚氨酯高度  $l$  的减小而增大, 这有利于水听器的小型化设计, 又由(1)式可知, 水听器的声压灵敏度随聚氨酯高度的减小而降低, 因而在通过减小聚氨酯高度来提高水听器工作带宽的同时, 还需兼顾其具备较高声压灵敏度的要求。

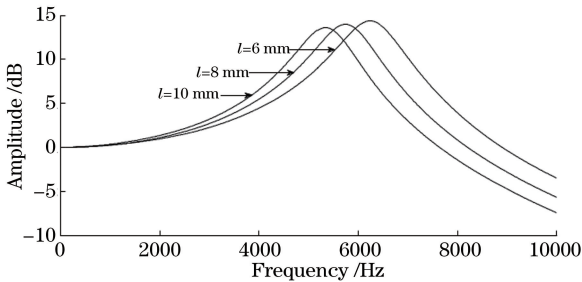


图 9 聚氨酯高度  $l$  与声压传递函数的关系  
Fig. 9 Relationship between the polyurethane height  $l$  and sound pressure transfer function

综上所述, 最终选定水听器的结构参数为: 通孔长度  $L$  为  $4.5 \text{ mm}$ , 通孔的半径  $r$  为  $1 \text{ mm}$ , 长、短腔

的长度  $L_1, L_2$  分别为  $59 \text{ mm}$  和  $5 \text{ mm}$ , 腔体半径  $R$  为  $2 \text{ mm}$ 。考虑到聚氨酯的弹性模量、泊松比等材料参数不仅严重影响水听器的声压灵敏度、工作带宽等声学性能, 还与水听器封装过程的便捷性以及实际使用环境下的可靠性密切相关, 因而聚氨酯材料参数的选取需权衡水听器灵敏度与工作带宽, 还需保证与光纤激光器之间具备良好的黏接强度、在水中保持较强的力学性能并且在常温环境下可固化。根据以上对聚氨酯材料各方面的性能要求以及相应的实验分析结果, 最终确定其弹性模量为  $8 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ , 泊松比  $\nu$  为  $0.47$ , 高度  $l$  为  $8 \text{ mm}$ 。

#### 4 实验分析

在理论与仿真分析的基础上, 加工制作了最终选定参数的水听器原型样品, 编号为 H647, 并且为验证电声理论模型的正确性, 还制作了聚氨酯弹性模量  $E = 4 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ , 泊松比  $\nu = 0.47$  的水听器原型样品, 编号为 H515, 其他结构参数与 H647 相同。然后, 分别利用振动液柱实验系统和消声水池试验系统对水听器在  $10 \sim 2000 \text{ Hz}$  及  $2500 \sim 8000 \text{ Hz}$  频率范围内的声压灵敏度选择  $1/3$  倍频程频点进行测试, 实验系统图分别如图 10 和图 11 所示。

DFB 光纤激光水听器的实测声压灵敏度频响曲线与仿真分析的比较如图 12 所示。首先, 从实测结果可知, 水听器的声压灵敏度频响特性的测量结果与仿真曲线表现出大致相同的变化趋势, 编号为 H647 和 H515 的水听器在  $10 \sim 2000 \text{ Hz}$  频率范围内的声压灵敏度平均值分别为  $-142.8 \text{ dB}$  和  $-132.6 \text{ dB}$ , 波动幅度分别不大于  $\pm 1.5 \text{ dB}$  和  $\pm 1.8 \text{ dB}$ , 且频响曲线的实测谐振峰分别出现在  $3150 \text{ Hz}$  与  $2500 \text{ Hz}$  附近, 与仿真分析的谐振频率  $4660 \text{ Hz}$  和  $3140 \text{ Hz}$  非常接近; 其次, 通过对比 H647 与 H515 的实测结果, 当水听器聚氨酯的弹性模量由  $8 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$  减小到  $4 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$  时, 其声压灵敏度频响曲线的谐振峰由  $3150 \text{ Hz}$  降低到  $2500 \text{ Hz}$ , 与图 7 中仿真分析聚氨酯弹性模量对水听器声压传递函数影响的结论相吻合, 表明电声理论模型能较为准确地预报水听器在中低频段的声压灵敏度频响性能, 通过配制不同材料参数的聚氨酯可实现对水听器频响性能的精细优化。

由实验结果分析可知, 聚氨酯端面拉伸式增敏结构的 DFB 光纤激光水听器在中低频段具有优良的声压灵敏度频响性能, 且尺寸缩小到毫米级, 对于

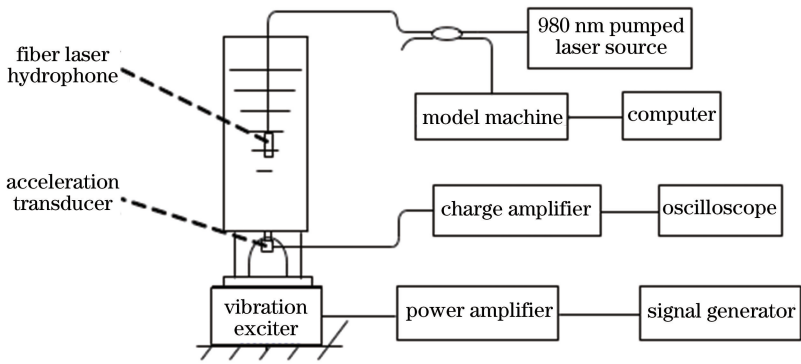


图 10 振动液柱实验系统图

Fig. 10 Schematic of vibration column testing system

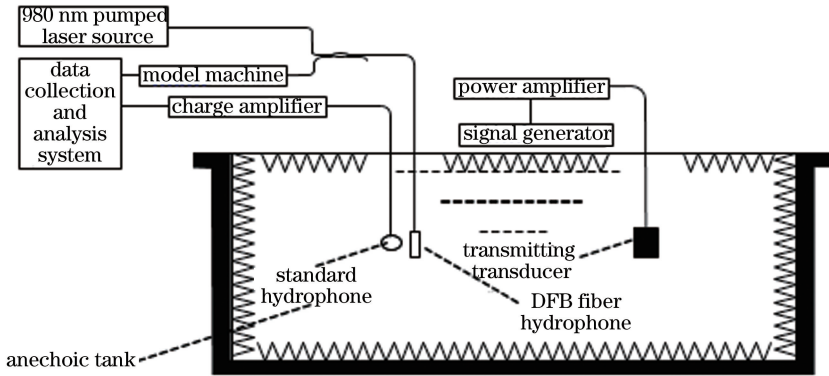


图 11 消声水池实验系统图

Fig. 11 Schematic of testing system in anechoic tank

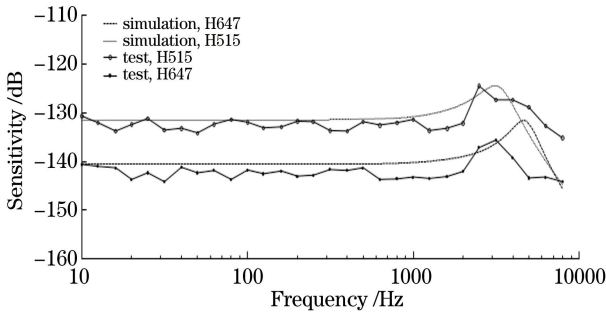


图 12 水听器的仿真及实测频响曲线

Fig. 12 Simulation and experimental frequency response curves of hydrophone

光纤激光水听器应用于小型水下作战平台具有较大的推动作用。然而,该结构水听器声压灵敏度实测值略低于仿真值,这主要是因为在水听器实际封装过程中灌注聚氨酯时,由于重力作用聚氨酯的端面中心会向下凹陷,减小聚氨酯与DFB光纤激光器的实际黏接高度,使得声压载荷引起的光纤激光器轴向应变降低,因而造成水听器的声压灵敏度偏低。该结构水听器的实测谐振频率也略低于仿真结果,这主要是因为仿真分析的结果是基于水听器套筒为刚性壁面的假设得到的,但实际上对于壁厚为

4.5 mm的套筒还存在一定的弹性,等效于水听器腔体声容上再并联一个壁厚的等效声容,使得腔体的总等效声容增大,由图5(a)可知,水听器的声压传递函数的谐振频率与腔体声容(腔体长度)成反比,因而造成水听器的谐振频率实测值偏低。

## 5 结 论

基于电声类比理论建立聚氨酯端面拉伸式增敏结构的DFB光纤激光水听器声压灵敏度频响特性理论模型,仿真分析水听器各构件结构、材料参数与声压传递函数的关系,研制了水听器原型样品,并开展水声实验进行对比分析。实验测得,该结构水听器在10~2000 Hz频率范围内的声压灵敏度为 $(-142.8 \pm 1.5)$  dB,且谐振频率出现在3150 Hz附近,与仿真分析结果吻合较好,这表明构建的理论模型可有效预测水听器在中低频段的声压灵敏度频响性能,通过调整聚氨酯的材料参数可精细优化水听器的频响性能,其声压灵敏度频响性能达到了国内外前列水平,对于研制应用于鱼雷、UUV等小型水下作战平台声纳系统的小尺寸阵元具有重要指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] Hu Y M, Hu Z L, Luo H, *et al.* Recent progress toward fiber optic hydrophone research, application and commercialization in China [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8421: 84210Q.
- [2] Wang Z F, Hu Y M. A novel passive homodyne fiber-optic hydrophone of acoustic low-pass filtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 783-786.  
王泽锋, 胡永明. 一种具有声低通滤波特性的无源零差光纤水听器 [J]. *光学学报*, 2008, 28(4): 783-786.
- [3] Wang Z F, Hu Y M, Meng Z, *et al.* Experimental investigations on anti-aliasing properties of acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophones based on phase generate carrier demodulation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(8): 2064-2069.  
王泽锋, 胡永明, 孟洲, 等. 基于相位载波解调的声低通滤波光纤水听器抗混叠性能实验研究 [J]. *中国激光*, 2009, 36(8): 2064-2069.
- [4] Ma L N, Hu Y M, Luo H, *et al.* Acoustic pressure sensitivity of  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$  co-doped distributed Bragg reflection fiber laser hydrophone [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(6): 1473-1478.  
马丽娜, 胡永明, 罗洪, 等. 基于钇镱共掺分布布拉格反射式光纤激光器的有源光纤水听器声压灵敏度 [J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1473-1478.
- [5] Xu P, Hu Z L, Ma L N, *et al.* Output power stability of dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(6): 1347-1351.  
徐攀, 胡正良, 马丽娜, 等. 双波长环形腔掺铒光纤激光器输出的稳定性 [J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1347-1351.
- [6] Tang B, Huang J B, Gu H C. Low acceleration sensitivity DFB fiber laser hydrophone [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0310001.  
唐波, 黄俊斌, 顾宏灿. 低加速度灵敏度的分布反馈式光纤激光水听器研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0310001.
- [7] 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.
- [8] Li D M, Chen J, Ge H L, *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.
- [9] Zhang H Y, Li Z, Zhao C, *et al.* Effect of encapsulation on the performance of ultrafine DFB fiber laser hydrophone [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0903002.  
张海岩, 李振, 赵晨, 等. 封装对超细型 DFB 光纤激光水听器性能的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(9): 0903002.
- [10] Tang B, Huang J B, Gu H C, *et al.* Distributed feedback fiber laser hydrophone used in towed line arrays [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 [J]. *中国激光*, 2016, 43(5): 0505005.
- [11] Tang B, Huang J B, Gu H C, *et al.* Frequency response characteristics of sound pressure sensitivity of distributed feedback fiber laser hydrophone [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0406001.  
唐波, 黄俊斌, 顾宏灿, 等. 分布反馈式光纤激光水听器的声压灵敏度频率响应特性 [J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0406001.