

文章编号: 0253-2239(2009)07-2018-04

液体粘滞系数对声低通滤波光纤水听器 声学特性的影响

王泽锋 胡永明 孟洲 罗洪 倪明

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 理论和实验研究了液体粘滞系数对声低通滤波光纤水听器声压灵敏度频响特性的影响。为了更好地描述声低通滤波光纤水听器的声学特性,在已建立的低频集中参量模型中,引入了一个用于描述系统机械损耗的参量,即机械声阻,从而得到了改进后的声压传递函数表达式。仿真结果表明,粘滞系数主要影响共振频率附近的响应,随着粘滞系数的增加,共振频率基本不变,共振峰值迅速下降。利用蓖麻油粘滞系数随温度变化较大的特性,在充油驻波罐中测试了不同温度下声低通滤波光纤水听器的声压灵敏度频响,结果与仿真曲线基本吻合,较好地验证了理论分析的正确性。

关键词 光纤传感器; 光纤水听器; 声压灵敏度; 低通滤波器

中图分类号 TB133; TB565⁺.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.2018

Effects of Liquid Viscosity Coefficient on Properties of Acoustic Low-Pass Filtering Fiber-Optic Hydrophone

Wang Zefeng Hu Yongming Meng Zhou Luo Hong Ni Ming

(College of Opto-Electric Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract Effects of liquid viscosity coefficient on acoustic properties of acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophone are studied theoretically and experimentally. For better descriptions, the key parameter of mechanical acoustic resistance which is used to describe the mechanical loss of the system, is introduced into the previous lumped parameters model. Then the improved expression of the transfer function is obtained by the circuit analysis method. Simulation results show that the liquid viscosity coefficient mainly affects the response near the resonant frequency. The resonant frequency is approximately identical and the transfer function amplitude at the resonant frequency decreases sharply, with the increasing of the liquid viscosity coefficient. Acoustic sensitivity frequency responses of different temperature are measured in the standing-wave tube filled with castor oil. The experimental results are in well agreement with the simulation results.

Key words fiber-optic sensor; fiber-optic hydrophone; acoustic pressure sensitivity; low-pass filter

1 引 言

声低通滤波光纤水听器是为解决现代光电声纳系统的高频混叠问题而提出的一种新功能水声传感器,并对它在水中的声学特性进行了一系列的理论

和实验研究,获得了较好的结果^[1~5]。然而实际应用时,由于海水的腐蚀性很强,一般不会直接将光纤水听器置于水中,而都要装在充满匹配液的塑料管中,常用的匹配液有蓖麻油、硅油、煤油等^[6,7]。匹

收稿日期: 2008-10-27; **收到修改稿日期**: 2008-11-17

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z121)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0925)和国防科技大学优秀博士研究生创新基金(0623)资助课题。

作者简介: 王泽锋(1980—),男,博士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: hotrosemaths@163.com

导师简介: 胡永明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术方面的研究。

E-mail: huyongming_nudt@hotmail.com

配液的特性阻抗(即密度和声速的乘积)一般与水相当,但粘滞系数却可能差好几个数量级。因此,研究液体粘滞系数对声低通滤波光纤水听器声学特性的影响非常有必要。

本文为了更好的描述声低通滤波光纤水听器的特性,基于已有的低频集中参量模型,引入了机械声阻,从而得到了改进的声压传递函数表达式。仿真分析了粘滞系数对声压传递函数的影响,结果表明,粘滞系数主要影响共振频率处的传递函数幅度,对共振频率影响很小。光纤水听器阵列实际应用时,选用最多的匹配液之一是蓖麻油。利用蓖麻油的粘滞系数随温度的改变会发生明显变化的特性,设计实验方案,测试了不同温度下的频响曲线,并与水中测试结果以及理论曲线进行了比较,较好地验证了模型及理论的正确性。

2 理 论

图 1(a)为本文研究的声低通滤波光纤水听器结构框图,由光纤传感轴和圆柱形声滤波器构成。其中,传感轴的核心是一个全保偏 Michelson 光纤干涉仪,如图 1(b)所示。传感光纤(信号臂)均匀地紧绕在弹性增敏层上,参考光纤直接绕在铝骨架上。声滤波器是一个两端开孔的封闭铝质圆柱筒,外径为 28 mm,内径为 20 mm,总长度为 84 mm,两个端面的厚度都为 2 mm,端面小圆孔的直径都为 1.7 mm。

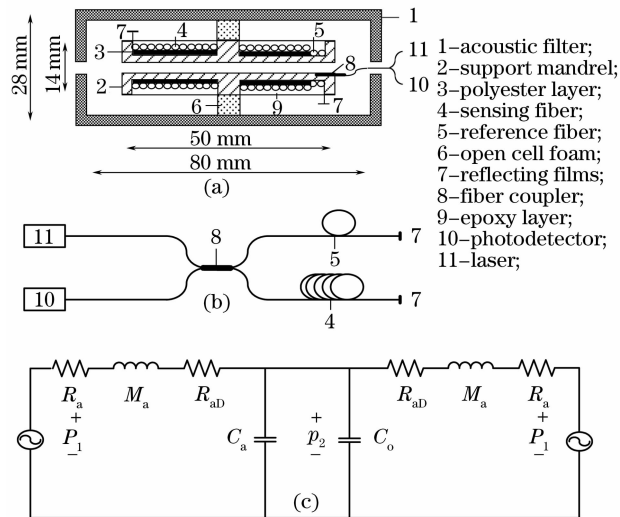


图 1 声低通滤波光纤水听器。(a) 水听器结构示意图; (b) 全保偏 Michelson 光纤干涉仪; (c) 声学等效电路图

Fig.1 Acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophone. (a) Schematic diagram of the hydrophone; (b) all polarization-maintaining Michelson fiber interferometer; (c) acoustic equivalent circuit

对圆柱形亥姆霍兹共振器声学特性的分析结果表明,当端面厚度为 2 mm,柱面厚度为 4 mm 时,腔壁弹性对共振器的声学特性影响很小,可以忽略,认为满足刚性条件^[8]。当声波频率较低时,声波波长远大于水听器的结构尺寸,可以近似认为水听器周围的声压均匀,此时根据电-声类比理论,可以直接画出该系统的低频等效声学电路图,如图 1(c)所示。其中, p_1 和 p_2 分别是孔口和腔内的声压; C_a 和 C_o 分别为腔体和光纤传感轴的等效声顺; R_a 和 M_a 分别为小孔的等效声阻和声质量; R_{ad} 是为了描述系统的机械损耗而引入的参量,称为机械声阻。

一般来说, R_{ad} 与小孔的长度成正比,与小孔的直径和腔体的体积成反比,因此可以定义为

$$R_{ad} = \zeta \sqrt{M_a / C_a}, \quad (1)$$

式中 ζ 为衰减因子,它与小孔表面的粗糙度、测量状态等因素有关,一般很难从理论上给出确切值,只能利用实验测得的数据计算得到。

根据图 1(b),利用电路分析方法可得系统的声压传递函数为

$$T(s) = \frac{p_2}{p_1} = \frac{1}{1 + sR_{eff}C_{eff} + s^2M_aC_{eff}}, \quad (2)$$

式中 $s = j\omega$, $C_{eff} = (C_a + C_o)/2$ 为腔体总的效声容, $R_{eff} = R_a + R_{ad}$ 为系统总的声阻。(2)式还可以写成

$$T(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + s\omega_0/Q + \omega_0^2}, \quad (3)$$

式中

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{M_a C_{eff}}}, \quad (4)$$

$$Q = \frac{1}{R_{eff}} \sqrt{\frac{M_a}{C_{eff}}}, \quad (5)$$

分别是共振器的共振频率和声学品质因素,其中 Q 在数值上等于共振频率与零频处的声压传递函数幅度之比。

由(3)式可求得系统声压传递函数的幅度位频响特性为

$$|T(j\omega)| = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega_0/Q)^2 \omega^2}}, \quad (6)$$

从式(6)可以看到,它与 Q 值有关。

考虑到液体粘度的影响,小圆孔的等效声阻 R_a 和等效声质量 M_a 可以写成^[8]

$$R_a = \frac{8l\eta}{\pi a^4} \left(1 + \frac{2\beta_r a}{l}\right) \sqrt{1 + \frac{\zeta^2}{32}}, \quad (7)$$

$$M_a = \frac{l\rho}{\pi a^2} \left(1 + \frac{2\beta_m a}{l}\right) \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3^2 + \zeta^2/2}}\right), \quad (8)$$

式中 l 和 a 分别为小孔长度(即穿孔板的厚度)和小孔半径, ρ 和 η 分别为介质的密度和切变粘滞系数; $\zeta = a(\rho\omega/\eta)^{1/2}$ 为无量纲的参数, σ 是圆板的穿孔率, $\beta_r = \{1/2 + \{1/4 + [2\ln(\zeta + 1)/(3\pi)]^2\}^{1/2}\}3\pi/16$ 为小孔声阻的末端修正系数, $\beta_m = 8(1 - 5\sigma^{1/2}/4 + \sigma^2/4)/(3\pi)$ 是小孔声质量的末端修正系数。

当共振器的结构尺寸较小,腔体和光纤传感轴的等效声容可以分别写成^[5,8]

$$C_a = \frac{V}{\rho c^2}, \quad (9)$$

$$C_o = \frac{\lambda HR^2}{2nL} \left(\frac{\Delta\varphi}{p} \right), \quad (10)$$

式中 V 为腔体容积; c 为介质中声速; H 和 R 分别为弹性柱面的长度和外半径; L 和 n 分别是传感光纤长度和纤芯有效折射率; $\Delta\varphi/p$ 是光纤水听器(不含声滤波器)的声压相位灵敏度。

从上面的分析可见,液体粘滞系数 η 与声压传递函数的关系较复杂,直接进行分析非常困难,下面采用仿真的方法。利用(6)式,对不同粘滞系数 η 对应的声压传递函数进行了数字仿真,介质为蓖麻油,密度和声速分别为 $\rho = 962 \text{ kg/m}^3$ 和 $c = 1477 \text{ m/s}$, 结果如图 2 所示。仿真时,结构参数如图 1 所示,并假设光纤水听器(不含声滤波器)的声压灵敏度为 -140 dB , 光纤传感轴其它参数取值为 $H = 38 \text{ mm}$, $R = 6.5 \text{ mm}$, $L = 14 \text{ m}$, $n = 1.456$ 。

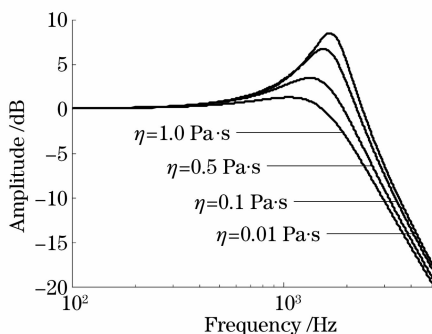


图 2 声低通滤波光纤水听器声压传递函数幅度与 η 的关系

Fig. 2 Acoustic pressure transfer functions of low-pass filtering fiber-optic hydrophone with different values of η

从图 2 可见,粘滞系数 η 主要影响共振频率附近的响应,对低频和高频响应的影响很小。随着液体粘滞系数的增加,共振频率缓慢往低频移动,共振峰迅速降低,使得低频响应便得更平坦。

3 实 验

为了验证上述理论分析的正确性,设计了图 3

所示的驻波罐对比测试系统。驻波罐中充满蓖麻油,信号检测采用基于光频调节的相位补偿法^[9,10]。由于蓖麻油的粘滞系数受温度的影响很大,通过改变温度可以获得不同的粘滞系数。因此,将驻波罐置于一个温箱中,通过调解温箱的温度来改变蓖麻油的温度,从而改变蓖麻油的粘滞系数。同时,用一个温度计实时监测驻波罐中蓖麻油的实际温度。

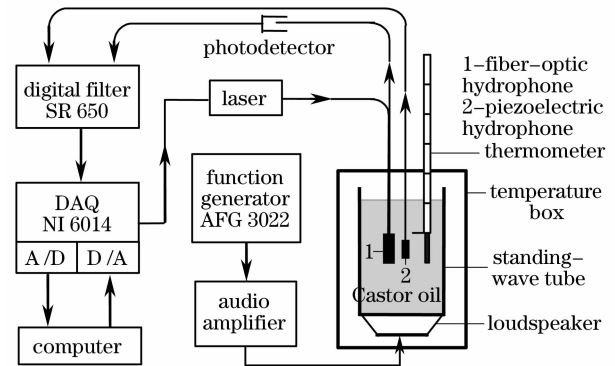


图 3 实验系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup

将在蓖麻油和水中测得的声压灵敏度频响与理论计算结果进行比较,如图 4 所示。其中,虚线和小圆点标记的曲线分别为水中声压灵敏度频响的理论值和测量值,理论曲线对应的衰减因子 $\zeta = 0.22$; 实线为 $26 \text{ }^\circ\text{C}$ 时蓖麻油中的声压灵敏度频响理论值,对应的衰减因子 $\zeta = 0.05$; 星号、小圆圈、正方形和小十字标注的曲线分别是 $26 \text{ }^\circ\text{C}$, $22 \text{ }^\circ\text{C}$, $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 时声压灵敏度频响测量结果,蓖麻油随温度的变化关系如表 1 所示。数值计算时,水的密度和声速分别为 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 和 $c = 1500 \text{ m/s}$, 其它参数与前面仿真时的完全相同。

表 1 蓖麻油粘滞系数随温度的变化

Table 1 Viscosity coefficient of castor oil versus temperature

Temperature / $^\circ\text{C}$	15	18	20	22	24	26
Viscosity coefficient $\eta / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	1.51	1.15	0.95	0.79	0.67	0.57

从图 4 中可以看到,声低通滤波光纤水听器的低频响应非常平坦,平均声压灵敏度约为 -140 dB ($0 \text{ dB} = 1 \text{ rad}/\mu\text{Pa}$),这主要是由光纤传感轴的特性和光纤干涉仪的性能决定。各理论和实验曲线低频响应一致性很好,相互之间差异在 2 dB 之内。蓖麻油和水中的实验曲线都与各自的理论曲线具有大致相同的变化趋势,中间衰减部分的斜率基本相同,这主要取决于声滤波器的结构。水中和蓖麻油中测得的频响曲线的共振频率差别不大,而共振频率处的

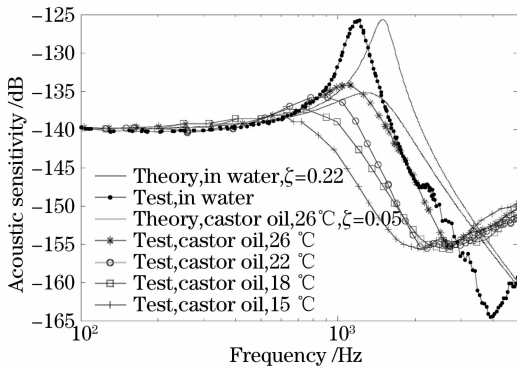


图4 光纤水听器频响曲线

Fig. 4 Frequency response of fiber-optic hydrophones

频响幅度差别却很大,这是由于蓖麻油和水的特性阻抗分别为 $1.42 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $1.50 \times 10^6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,差别很小,而粘滞系数却相差好几个数量级,常温下 ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) 分别为 $0.95 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 和 $1.14 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。由前面的理论分析结果可知,共振频率主要由介质的特性阻抗决定,与粘滞系数关系不大,而共振峰值则主要由介质的粘滞系数决定。随着温度的升高,蓖麻油的粘滞系数逐渐变小,实验测得的共振频率缓慢往高频移动,共振峰值逐渐增大,与理论和仿真的结果基本一致。从图4中还可以看到,水中的测量结果与理论曲线比蓖麻油中的吻合得更好,尤其是高频部分。引起这种差别的最可能的原因是,蓖麻油的粘滞系数远大于水的,实验中气泡的排除非常困难,特别是一些小气泡很难排除干净,对高频的测量结果影响较大。实验测得的共振频率都稍小于相应的理论值,引起这种差别的原因主要有两个:其一,输入输出光纤使得孔径的有效值减少;其二,壁面弹性使得腔体总的等效声容变大^[5]。此外,由于受到测量精度和模型适用条件的限制,测量曲线的高频部分与理论值的差别要远大于低频和中频部分^[5]。

4 结 论

理论和实验研究了液体粘滞系数对声低通滤波光纤水听器声压灵敏度频响特性的影响。通过引入一个机械声阻,从而得到了改进的等效声学电路和声压传递函数表达式,并进行了仿真分析。结果表明,液体粘滞系数主要影响共振频率附近的频响,随着粘滞系数的增加,共振频率缓慢往低频移动,共振

峰值迅速下降。在充满蓖麻油的驻波罐中测试了不同温度下声低通滤波光纤水听器的声压灵敏度频响,实验结果较好地验证了模型及理论分析的正确性,对于声低通滤波光纤水听器阵列的应用具有较好的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Physical mechanism and solution of aliasing in phase generated carrier modulation-demodulation of interferometric fiber-optic hydrophones[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 92~98
王泽锋,胡永明,孟洲等.干涉型光纤水听器相位载波调制-解调中信号混叠产生的机理及解决方案[J].光学学报,2008, **28**(1): 92~98
- 2 Zefeng Wang, Yongming Hu, Zhou Meng *et al.*. Fiber-optic hydrophone using a cylindrical Helmholtz resonator as a mechanical anti-aliasing filter[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(1): 37~39
- 3 Zefeng Wang, Yongming Hu, Zhou Meng *et al.*. Novel mechanical anti-aliasing fiber-optic hydrophone with a fourth-order acoustic low-pass filter[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(11): 1267~1269
- 4 Wang Zefeng, Hu Yongming. 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
- 5 Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Frequency response of second-order acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophones[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1883~1887
王泽锋,胡永明,孟洲等.二阶水声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
- 6 G. A. Cranch, P. J. Nash *et al.*. Large-scale remotely interrogated arrays of fiber-optic interferometric sensors for underwater acoustic applications[J]. *IEEE Sen. J.*, 2003, **3**(1): 19~30
- 7 G. A. Cranch, C. K. Kirkendall, K. Daley *et al.*. Large-scale remotely pumped and interrogated fiber-optic interferometric sensor array[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(11): 1579~1581
- 8 Wang Zefeng, Hu Yongming, Meng Zhou *et al.*. Acoustic characteristics analysis of underwater cylindrical Helmholtz resonator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(11): 338~345
王泽锋,胡永明,孟洲等.水下圆柱形亥姆霍兹共振器的声学特性分析[J].物理学报,2008, **57**(11): 338~345
- 9 Wang Zefeng, Luo Hong, Xiong Shuidong *et al.*. Phase compensating detection method of interferometric fiber-optic hydrophones based on tuning the frequency of the laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 654~658
王泽锋,罗洪,熊水东等.基于光频调节的干涉型光纤水听器相位补偿检测方法[J].光学学报,2007, **27**(4): 654~658
- 10 Zefeng Wang, Yongming Hu, Zhou Meng *et al.*. Working-point control method for readout of dynamic phase changes in interferometric fiber-optic sensors by tuning the laser frequency[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(19): 3524~3529