

含侧腔的机械抗混叠声低通滤波光纤水听器^{*}

王泽锋[†] 胡永明 孟 洲 罗 洪 倪 明

(国防科学技术大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

(2009 年 1 月 21 日收到,2009 年 3 月 12 日收到修改稿)

报道了一种含侧腔的机械抗混叠声低通滤波光纤水听器.基于电-声类比理论建立了该光纤水听器的低频集中参量模型,画出了声学等效电路图,利用电路分析方法给出了声压传递函数表达式,并对其声学特性进行了理论分析.研究表明,该光纤水听器具有三个共振频率,由于侧腔的引入使得传递函数出现了一个零点,从而加快了第二个共振频率之后的衰减速度,可以获得更好的高频整体衰减特性.在充水驻波罐中对自行设计并制作的含侧腔的声低通滤波光纤水听器进行了测试.在 50—7000 Hz 频段上,该光纤水听器的声压灵敏度频响曲线与理论结果具有大致相同的变化形式,低频响应非常符合,声压灵敏度约为 -140 dB (0 dB = 1 rad/ μ Pa),受低频模型精度的限制,高频响应差异较大.这为解决光纤水听器的高频混叠问题提供了一条简单可行的技术途径.

关键词:光纤传感器,光纤水听器,声压灵敏度,低通滤波器

PACC:4281C,4281P,4320,4330

1. 引 言

干涉型光纤水听器具有灵敏度高、动态范围大、抗电磁干扰、便于复用构成大规模阵列等诸多优点,正在被考虑构成现代光电声纳系统^[1-3].高频混叠是其走向应用必须解决的一个关键问题^[4-6].由混叠产生的机理可知^[6],增加系统工作带宽是最直接的解决方案,但系统的成本和信号解调的复杂性都会急剧上升,尤其对于未来主要发展的大规模和超大规模阵列是不可取的.为了更有效解决光纤水听器的信号混叠问题,我们曾提出了声低通滤波方案,基于声学滤波器原理设计了二阶和四阶声低通滤波光纤水听器,并对其声压灵敏度频响特性进行了一系列的理论和实验研究^[6-10].结果表明,这类光纤水听器对高频声信号具有较强的抑制作用,为解决高频混叠问题提供了一种有效的技术途径.

为了进一步改善高频衰减特性,本文基于四阶结构设计了一种含侧腔的声低通滤波光纤水听器.由于侧腔的引入,使得声压传递函数中出现了一个零点,从而加速了高频的衰减.实验测得的声压灵敏度频响曲线与理论仿真的结果基本一致,从而有效

地验证了理论模型和分析结果的正确性.

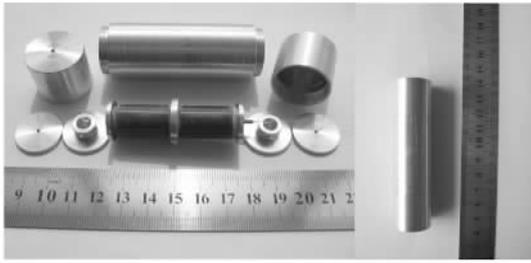
2. 探头设计与理论分析

与四阶光纤水听器相比^[8],本文设计的光纤水听器在两个短腔中各引入了一个侧腔,如图 1 所示.传感轴的核心是一个高性能的全保偏 Michelson 型光纤干涉仪,其结构参数与四阶完全相同.声滤波器总长 108 mm,外径为 26 mm,除外面的圆柱面厚度为 3 mm 外,其他各壁面厚度均为 2 mm;短腔(图 1 中 V_1)长 16 mm,内径为 8 mm;长腔(图 1 中 V_2)长 64 mm,侧腔(图 1 中 V_3)长 16 mm;在两个侧腔柱面中间位置上沿圆周均匀地各穿 4 个小孔,4 个端面上各穿 1 个小孔,孔径均为 1 mm.

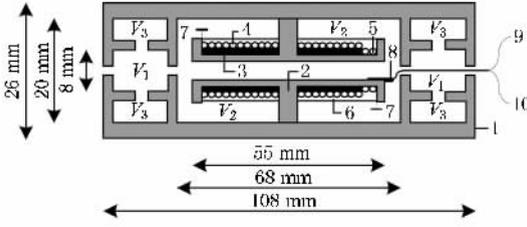
假设声滤波器各壁面满足刚性条件,则当声波波长远大于光纤水听器结构尺寸时,可以认为两端开口处的声压相同,根据电-声类比的原理,可以直接画出该光纤水听器系统的声学等效电路图,如图 2 所示.图 2 中, R_1, M_1, R_2, M_2, R_3 和 M_3 分别为外端面、内端面和侧腔柱面小孔的等效声阻和等效声质量; C_1, C_2 和 C_3 分别为短腔、长腔和侧腔的总等

^{*} 国家高技术研究发展计划(批准号:2006AA09Z121)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET-06-0925)和国防科学技术大学优秀博士研究生创新基重点项目(批准号:0623)资助的课题.

[†] E-mail: hotrosemaths@163.com



(a)



(b)

图1 含侧腔的声低通滤波光纤水听器 (a)实物照片 (b)结构示意图.1为含侧腔的声滤波器,2为支撑骨架,3为弹性层,4为传感光纤,5为参考光纤,6为保护层,7为反射端,8为3 dB耦合器,9为输入,10为输出

效声容; C_{opt} 为光纤传感轴的等效声容^[10]; C_L 为长腔自身的等效声容; p_1 和 p_2 分别为外端面小孔外表面和长腔内的声压.

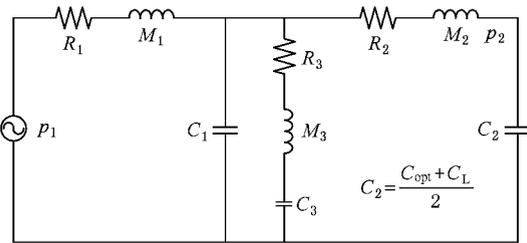


图2 光纤水听器的声学等效电路图

由图2可得系统的声压传递函数为

$$\mathcal{T}(s) = \frac{M_3 C_3 s^2 + R_3 C_3 s + 1}{\alpha s^6 + \beta s^5 + \gamma s^4 + \zeta s^3 + \xi s^2 + \eta s + 1} \quad (1)$$

其中 $s = j\omega$,各系数为

$$\alpha = M_1 M_2 M_3 C_1 C_2 C_3, \quad (2)$$

$$\beta = (R_1 M_2 M_3 + R_2 M_1 M_3 + R_3 M_1 M_2) \times C_1 C_2 C_3, \quad (3)$$

$$\gamma = M_1 M_2 C_2 (C_1 + C_3) + M_1 M_3 C_3 (C_1 + C_2) + (R_1 R_2 M_3 + R_1 R_3 M_2 + R_2 R_3 M_1) \times C_1 C_2 C_3 + M_2 M_3 C_2 C_3, \quad (4)$$

$$\zeta = R_1 R_2 R_3 C_1 C_2 C_3 + R_1 M_2 C_2 (C_1 + C_3)$$

$$+ R_2 (M_1 C_1 C_2 + M_1 C_2 C_3 + M_3 C_3 C_2) + R_1 M_3 C_3 C_1 + R_3 C_3 (M_1 C_1 + M_1 C_2 + M_2 C_2) + R_1 M_3 C_3 C_2, \quad (5)$$

$$\xi = R_1 R_2 C_2 (C_1 + C_3) + R_1 R_3 C_3 (C_1 + C_2) + R_2 R_3 C_2 C_3 + M_1 (C_1 + C_2 + C_3) + M_2 C_2 + M_3 C_3, \quad (6)$$

$$\eta = R_1 (C_1 + C_2 + C_3) + R_2 C_2 + R_3 C_3. \quad (7)$$

当所有小孔的尺寸相同时,有 $R_1 = R_2 = 4R_3$ 和 $M_1 = M_2 = 4M_3$.由于声低通滤波光纤水听器的损耗较小,因此系统的共振方程可近似写成

$$\omega^6 + a\omega^4 + b\omega^2 + c = 0, \quad (8)$$

其中

$$a = -(6\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2 + \omega_{03}^2), \quad (9)$$

$$b = 5\omega_{01}^2 \omega_{02}^2 + \omega_{02}^2 \omega_{03}^2 + 2\omega_{01}^2 \omega_{03}^2, \quad (10)$$

$$c = -\omega_{01}^2 \omega_{02}^2 \omega_{03}^2, \quad (11)$$

$$\omega_{0i} = \frac{1}{M_i C_i} \quad (i = 1, 2, 3), \quad (12)$$

由方程(8)可知,系统存在三个共振点,共振频率分别由下列公式给出:

$$\omega_1^2 = 2\sqrt{-Q} \cos(\theta/3) - \frac{1}{3}a, \quad (13)$$

$$\omega_2^2 = 2\sqrt{-Q} \cos(\theta/3 + 2\pi/3) - \frac{1}{3}a, \quad (14)$$

$$\omega_3^2 = 2\sqrt{-Q} \cos(\theta/3 - 2\pi/3) - \frac{1}{3}a, \quad (15)$$

其中,

$$Q = (3b - a^2)/9,$$

$$R = (9ab - 27c - 2a^3)/54,$$

$$\cos\theta = (-R^2/Q^3)^{1/2}.$$

由于侧支的引入,使得(1)式所示的声压传递函数出现了一个零点,对应的零点频率,即反共振频率由下列方程确定:

$$M_3 C_3 s^2 + R_3 C_3 s + 1 = 0, \quad (16)$$

其中 $s = j\omega$.同样由于系统的损耗较小,反共振频率近似等于 ω_{03} ,即侧腔的共振频率.

3. 实验结果与分析

为了验证理论分析的正确性,在充水驻波罐中利用比较测量法对自行设计并制作的含侧腔的光纤水听器(结构参数如图1所示)进行了测试,信号检测采用基于光频调节的相位补偿法^[11,12].将实验测得的声压灵敏度频响与数值计算的结果进行了比

较,如图3所示.图3中星号标记的曲线和实线分别为普通光纤水听器(不含声滤波器)和声低通滤波光纤水听器声压灵敏度频响的测量结果,虚线为仿真曲线.仿真结果对应的声压灵敏度为 -140 dB ,其他参数取值分别为 $H=38\text{ mm}$, $R=6.5\text{ mm}$, $L=14\text{ m}$, $n=1.456$.

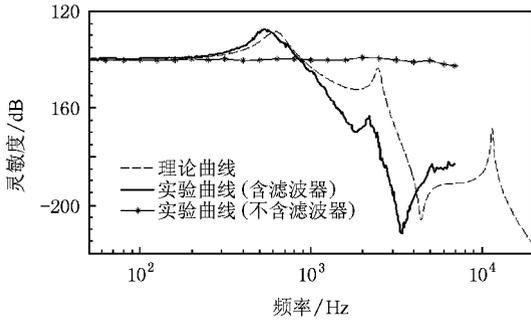


图3 含侧支的声低通滤波光纤水听器声压灵敏度频响的测量结果与数值计算结果对比

从图3可见,光纤水听器(不含声滤波器)在 $50\text{—}7000\text{ Hz}$ 测量频带上响应非常平坦,平均声压灵敏度约为 -140 dB ($0\text{ dB}=1\text{ rad}/\mu\text{Pa}$),波动小于 $\pm 2\text{ dB}$.除高频差异稍大外,测得的声压灵敏度频响曲线与仿真结果具有大致相同的变化形式.从测量曲线上可以明显地看到前两个共振频率和反共振频率,与理论分析的结果一致.受驻波罐测量频带的限制,无法观测到最高的共振频率.各共振频率的测量值和理论值如表1所列.从表1可知,测得的共振频率都稍低于对应的理论值,引起这种差别的原因可能有两个.其一,输入输出光纤使得孔径的有效值减少,而共振频率与孔径成正比,孔径的减少使得共振频率往低频移动.其二,当各壁面不是很厚时,其弹性形变与腔内水的压缩量以及传感轴的形变相比并不能完全忽略^[13,14],这相当于在腔体和传感轴的等效声容上再并联一个声容,使得总的等效声容增大,这也会使共振频率变低.实际测量得到的第二个共振频率处的声压灵敏度比理论值小很多,表明系统的实际等效声阻要比理论值大得多.这主要来自以下两方面的贡献:第一,仿真结果是基于小孔内表面无限光滑得到的,这在实际加工中无法做到,小孔内表面的不光滑会增加小孔的等效声阻.第二,前面的低频集中参量模型假设声滤波器各壁面是刚性的,而实际在水中由于滤波器各壁面存在微小的振动而产生辐射声阻,使得系统总的等效声阻增加.引起高频差异的主要原因也可能有两个.一是由于高频声

压灵敏度很低,因此实验中测得的信号幅度非常小,而加大声信号发射系统的声压级又会使声压罐中的声波波形产生畸变,因此高频的测量误差要远大于低频.二是上述建立的集中参量模型只适用于频率较低的情况,当频率较高时探头结构尺寸与声波波长可以相比拟,集中参量模型给出的结果与实际情况的差异会随着频率的增加而急剧加大,到一定频率时集中参量模型不再适用,必须建立更精确的模型进行求解.

表1 共振频率测量值与理论值的比较

	最低共振 频率	中间共振 频率	最高共振 频率	反共振 频率
测量值/Hz	620	2470	11480	4400
理论值/Hz	540	2200	—	3400

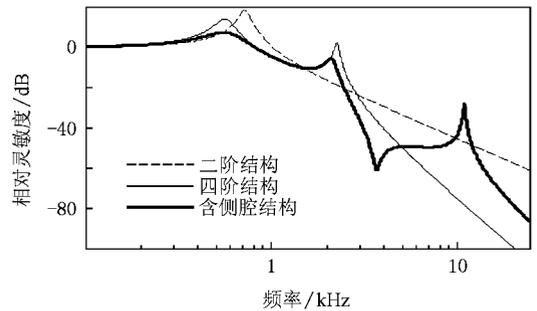


图4 三种结构的声低通滤波光纤水听器相对声压灵敏度频响比较

图4是二阶、四阶和含侧腔三种结构的声低通滤波光纤水听器的相对声压灵敏度比较.为了确保比较的合理性,三种声低通滤波光纤水听器具有相同的整体结构尺寸(外径和总长度).与二阶结构相比,四阶结构除引入了短腔外,其他参数完全相同;与四阶结构相比,含侧支的结构除在短腔中引入了侧腔外,其他参数完全相同.由图4可见,三种结构的低频响应相差不大,这是由于系统的低频特性主要由系统的整体结构尺寸决定.与二阶结构相比,四阶结构由于增加了一级滤波器,从而引入了第二个共振频率,加速了频响曲线中第二个共振频率之后的衰减,但这是以牺牲第二个共振频率附近的响应为代价的.与四阶结构相比,带侧支的结构由于引入了侧腔,使得在系统的声压传递函数中引入了零点,从而进一步加速了第二个共振频率之后的衰减.当然,这种良好的特性是以牺牲截止斜率的对称性和带外衰减为代价的,这相当于降低了系统的有效阶

次.带侧支的结构比其他两种结构具有更平坦的低频响应.更快的中频段衰减速率.高频的衰减效果虽然比四阶结构差,但也能基本满足实际应用的需求.

4. 结 论

本文报道了一种含侧腔的声低通滤波光纤水听器.基于电-声类比理论,建立了该光纤水听器的低

频集中参量模型,并对其声压频响特性进行了理论分析.结果表明,含侧腔的光纤水听器比二阶和四阶光纤水听器具有更平坦的低频响应和更好的高频衰减特性.除高频响应差异较大外,实验测得的声压灵敏度频响曲线与仿真结果基本一致,低频响应非常符合.声低通滤波光纤水听器为解决光纤水听器阵列的信号混叠问题提供了一条行之有效的技术途径.

- [1] Giallorenzi T G , Bucaro J A , Dandridge A 1982 *IEEE Trans. Microw. Theor. Tech.* **MITT-30** 472
- [2] Nash P 1996 *IEE Proc. Rada Sonar Navig.* **143** 204
- [3] Cranch G A , Nash P J , Kirkendall C K 2003 *IEEE Sensors J.* **3** 19
- [4] Carroll J B , Huber D R 1986 *J. Lightw. Technol.* **LT-4** 83
- [5] Roe J N , Dobashi K , Kabayashi K 1992 *Proc. SPIE* **1756** 42
- [6] Wang Z F , Hu Y M , Meng Z , Ni M , Xiong S D 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 92 (in Chinese) [王泽锋、胡永明、孟洲、倪明、熊水东 2008 光学学报 **28** 92]
- [7] Wang Z F , Hu Y M , Meng Z , Ni M 2008 *Opt. Lett.* **33** 37
- [8] Wang Z F , Hu Y M , Meng Z , Luo H , Ni M 2008 *Opt. Lett.* **33** 1267
- [9] Wang Z F , Hu Y M 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 783 (in Chinese) [王泽锋、胡永明 2008 光学学报 **28** 783]
- [10] Wang Z F , Hu Y M , Meng Z , Luo H , Ni M 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 1883 (in Chinese) [王泽锋、胡永明、孟洲、罗洪、倪明 2008 光学学报 **28** 1883]
- [11] Wang Z F , Luo H , Xiong S D , Ni M , Hu Y M 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 654 (in Chinese) [王泽锋、罗洪、熊水东、倪明、胡永明 2007 光学学报 **27** 654]
- [12] Wang Z F , Hu Y M , Meng Z , Ni M 2008 *Appl. Opt.* **47** 3524
- [13] Norris A N , Wickham G 1993 *J. Acoust. Soc. Am.* **93** 617
- [14] Horowitz S B , Nishida T , Cattafesta L N , Sheplak M 2002 *Int. J. Aeroacoust.* **1** 183

Mechanical anti-aliasing acoustic low-pass filtering fiber-optic hydrophones with side cavities^{*}

Wang Ze-Feng[†] Hu Yong-Ming Meng Zhou Luo Hong Ni Ming

(College of Photoelectric Science and Engineering ,National University of Defense Technology ,Changsha 410073 ,China)

(Received 21 January 2009 ; revised manuscript received 12 March 2009)

Abstract

A novel mechanical anti-aliasing fiber-optic hydrophone with an acoustic low-pass filter of side cavities has been reported , to the best of our knowledge ,for the first time . The low frequency lumped parameters model and the effective acoustic circuit of the hydrophone is constructed based on the theories of electro-acoustic analogy and the acoustic performance is predicted by the circuit analysis methods . Theoretical results show that the hydrophone has three resonant frequencies and one inverse resonant frequency induced by the side cavities ,and the hydrophone has good high frequency attenuation properties . A hydrophone with side cavities designed and fabricated by us is tested in a standing-wave tube filled with water . The measured frequency response curve ,on the whole ,has identical form as that predicted by theory , over the test frequency range of 50 to 7000 Hz . To be specific ,the low frequency responses are in good accordance ,and the acoustic sensitivity is about -140 dB re 1 rad/ μ Pa . The high frequency responses have obvious difference ,which is mainly induced by the operation limitation of the low frequency model . It is expected that this new type of fiber-optic hydrophone will work as an important class of sensors used to eliminate the aliasing in the future fiber-optic sonar systems .

Keywords : fiber-optic sensor , fiber-optic hydrophone , acoustic pressure sensitivity , low-pass filter

PACC : 4281C , 4281P , 4320 , 4330

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA09Z121) ,the Program for the New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education ,China(Grant No. NECT-06-0925) and the Key Program of the Science and Technology Innovation Foundation for Doctors of National University of Defense Technology , China(Grant No. 0623) .

[†] E-mail : hotrosemaths@163.com