

水下圆柱形 Helmholtz 共振器的声学特性分析^{*}

王泽锋[†] 胡永明 孟 洲 倪 明

(国防科技大学光电科学与工程学院,长沙 410073)

(2007 年 12 月 2 日收到,2008 年 2 月 4 日收到修改稿)

理论分析了水下圆柱形 Helmholtz 共振器的声学特性. 综合考虑壁面弹性和辐射阻抗的影响,基于电-声类比的基本原理,建立了较为完善的水下圆柱形 Helmholtz 共振器的低频集中参量模型. 利用电路分析的基本方法,得到了系统的输入阻抗和声压传递函数表达式. 仿真分析了主要结构参数对共振器声学特性的影响,得出了一些有意义的结论. 在充水驻波罐中对自制的 Helmholtz 共振器进行了测量,并对实验结果进行了详细地误差分析. 去除压电水听器对测量结果的影响后,实验与仿真结果基本一致,从而验证了理论分析的正确性. 为水下圆柱形 Helmholtz 共振器的设计提供了详细的理论和实验指导,对其他形状共振器的水下特性分析 also 具有很好的参考价值.

关键词: Helmholtz 共振器, 共振频率, 传递函数, 辐射阻抗

PACC: 4320, 4330, 4350

1. 引 言

Helmholtz 共振器由一个密封的腔体通过一个小孔与外界连接而成. 由于它具有结构简单,声学效果显著等特点,被广泛用于各种噪声的吸收和有用声的放大^[1-4]. 在实际应用中,最大限度地准确计算 Helmholtz 共振器的共振频率至关重要. 因此,共振频率一直是研究的热点^[5-11]. 最早得到的是带有圆孔的球形共振器的共振频率计算公式,之后的研究增加了小孔的末端修正,后来的工作进一步考虑了腔体和开口形状以及高阶波对共振频率的影响. 最近 Selamat 和 Ji 等人分析了腔体形状、插入管、内置吸声材料等因素对共振频率的影响,获得了较好的结果^[12-15]. 但是,目前的研究主要集中在空气中,得到的共振频率表达式大多基于共振器刚性壁面假设.

关于 Helmholtz 共振器水下特性的研究非常少. 在水中,由于共振器壁面的形变与水的压缩性可以相比拟,因此刚性壁假设不再成立,必须考虑壁面弹性对共振器声学特性的影响. 同时,共振器各壁面振动要向水中辐射声场,因此还要考虑辐射阻抗.

最早关注此问题的是 Cotton,他研究的是人体发声时的共振情况^[16]. 之后 Henriquez, Photiadis, Norris, Horowitz 等人的研究都说明了这一问题的重要性^[17-20]. 2007 年周城光等人研究了腔体弹性对充水 Helmholtz 共振器声学特性的影响,其研究的目的是解决充水管道的消声问题^[21].

本文对水下圆柱形 Helmholtz 共振器的声学特性进行了详细地理论分析,基于电声类比理论,建立了较为完善的低频集中参量模型,利用电路分析的基本方法得到了系统的输入阻抗和声压传递函数表达式. 对影响共振器声学特性的各项因素进行了详细地仿真分析,并在充水驻波罐中对自制的小型金属圆柱形 Helmholtz 共振器进行了测试,实验结果验证了理论分析的正确性.

2. 理 论

2.1. 低频集中参量模型

集中参量模型被广泛用于 Helmholtz 共振器的低频特性分析. 当频率较低时,声波波长远远大于共振器的结构尺寸,共振器各部分可以等效成一些理

^{*} 国家高技术研究发展计划(863)(批准号:2006AA09Z121),教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号:NCET-06-0925)和国防科技大学优秀博士研究生创新重点项目(批准号:0623)资助的课题.

[†] E-mail: hotrosemaths@163.com

想的分立声学元件,系统可以用一个等效的声学电路图来表示,然后利用电路分析的方法可以方便地得到共振器的各项低频声学特性。

基于共振器刚性壁面假设,传统的 Helmholtz 共振器的低频集中参量模型可以用小孔的声质量、声阻和腔体的声容来表示。但是在水中,由于共振器受到声压作用产生的形变与腔体内水的压缩性可相比拟,因此必须考虑共振器壁面弹性引入的等效声阻抗。同时,还要考虑共振器在水中的等效辐射声阻抗。图 1 是本文要分析的水下圆柱形 Helmholtz 共振器,它由小孔、腔体、侧面圆柱壳、开孔圆板和底端圆板五部分构成,分别具有各自的等效声阻抗,图 2 是该系统的等效声学电路图。其中, R_o 和 M_o 是小孔的声阻和声质量; C_{Ca} 和 M_{Ca} 是腔体的声容和声质量; C_{P1} , M_{P1} , R_{rP1} 和 M_{rP1} 分别是穿孔圆板的弹性声容、弹性声质量、辐射声阻和同振声质量; C_{P2} , M_{P2} , R_{rP2} 和 M_{rP2} 分别是底端圆板的弹性声容、弹性声质量、辐射声阻和同振声质量; C_{Cy} , M_{Cy} , R_{rCy} 和 M_{rCy} 分别是圆柱壳的弹性声容、弹性声质量、辐射声阻和同振声质量; P_1 和 P_2 分别是开口处和腔内的声压; U 是声流的体积速度。

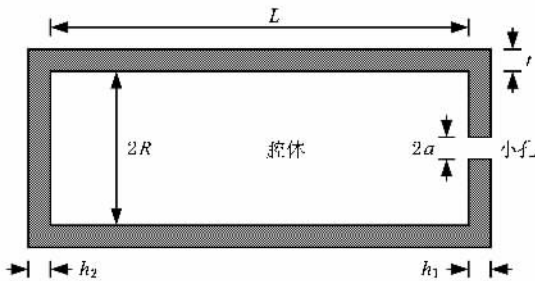


图 1 圆柱形 Helmholtz 共振器

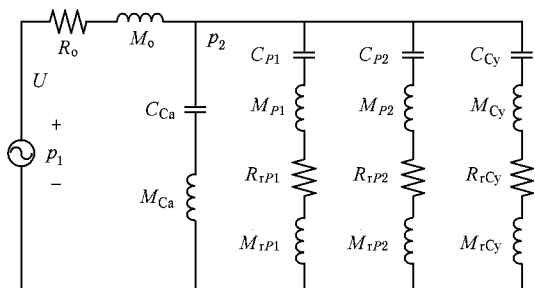


图 2 圆柱形 Helmholtz 共振器的等效声学电路图

由图 2 可知,系统的等效输入声阻抗为

$$Z_{in} = \frac{P_1}{U} = R_o + j\omega M_o + Z_{He}, \quad (1)$$

其中, Z_{He} 是表示腔内媒质可压缩性、腔壁弹性和声辐射共同作用的等效声阻抗,其表达式为

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_{He}} = & \frac{j\omega C_{Ca}}{1 - \omega^2 C_{Ca} M_{Ca}} \\ & + \frac{j\omega C_{P1}}{1 - \omega^2 C_{P1}(M_{P1} + M_{rP1}) + j\omega C_{P1} R_{rP1}} \\ & + \frac{j\omega C_{P2}}{1 - \omega^2 C_{P2}(M_{P2} + M_{rP2}) + j\omega C_{P2} R_{rP2}} \\ & + \frac{j\omega C_{Cy}}{1 - \omega^2 C_{Cy}(M_{Cy} + M_{rCy}) + j\omega C_{Cy} R_{rCy}} \end{aligned} \quad (2)$$

腔内声压 P_2 和外部激励声压 P_1 的比值,即系统的声压传递函数为

$$T(\omega) = \frac{P_2}{P_1} = \frac{Z_{He}}{R_o + j\omega M_o + Z_{He}}, \quad (3)$$

从(3)式可以看到,声压传递函数与频率有关。随着外界声压频率的变化,传递函数的幅度会出现一个最大值,即发生共振,对应的频率即为系统的共振频率。

2.2. 小孔的等效声阻抗

小圆孔的等效声阻 R_o 和等效声质量 M_o 为^[22]

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

$$M_o = \frac{l\rho}{\pi a^2} \left(1 + \frac{2\beta_m a}{l} \right) \left(1 + \frac{1}{\sqrt{3^2 + \zeta^2/2}} \right), \quad (5)$$

式中, l 和 a 分别是小孔长度(即穿孔板的厚度)和小孔半径, ρ 和 μ 分别是水的密度和运动黏滞系数, $\zeta = a\sqrt{\omega/\mu}$ 是无量纲的参数,反应了孔径与声波长的相对大小, $\sigma = (a/R)^2$ 是圆板的穿孔率, $\beta_r = (1/2 + \sqrt{1/4 + [2\ln(\zeta + 1)3\pi]})3\pi/16$ 是小孔声阻的末端修正系数, $\beta_m = 8(1 - 5\sqrt{\sigma}/4 + \sigma^2/4)/3\pi$ 是小孔声质量的末端修正系数。

2.3. 圆柱形腔的等效声阻抗

圆柱形腔体的等效声容 C_{Ca} 和等效声质量 M_{Ca} 分别由下面的式子给出^[23]:

$$C_{Ca} = \frac{V}{\rho c^2}, \quad (6)$$

$$M_{Ca} = \frac{\rho V}{3S^2}, \quad (7)$$

其中, S 和 V 分别是腔体的横截面积和体积, ρ 和 c

分别是水的密度和水中声速.

2.4. 圆板的等效声阻抗

圆板的等效声阻抗由两部分构成,即表征圆板形变的弹性声阻抗和圆板振动引起的辐射声阻抗.对于图 1 中的两个端面,当小孔面积远小于圆板的面积时,可以认为它们的等效声阻抗具有相同的形式.四周固定的圆板的弹性声阻抗可以用一个等效声容 C_p 和一个等效声质量 M_p 来表示^[20,21],即

$$C_p = \frac{\pi R^6 (1 - \sigma^2)}{16 E h^3}, \tag{8}$$

$$M_p = \frac{9 h \rho_s}{5 \pi R^2}, \tag{9}$$

其中 h 和 R 分别为圆板的厚度和半径, ρ_s , σ 和 E 分别为圆板材料的密度、泊松比和杨氏模量.

利用与活塞式辐射器等效的方法^[24],可以求得具有固支边界的圆板的等效辐射声阻 R_{rp} 和等效同振声质量 M_{rp} (计算两面辐射) 分别为

$$R_{rp} = \frac{\rho_s \omega^2}{2 \pi c}, \tag{10}$$

$$M_{rp} = \frac{4 \sqrt{3} \rho_s}{\pi^2 R}. \tag{11}$$

2.5. 圆柱壳的等效声阻抗

圆柱壳的声阻抗也是由表征其自身形变的弹性声阻抗和振动引起的辐射声阻抗两部分构成.利用集中等效法,可以得到具有固支边界的圆柱壳的等效弹性声容 C_{cy} 和等效弹性声质量 M_{cy} 分别为

$$C_{cy} = \frac{S_c R^2}{E t} \left(1 - \frac{2}{\beta L} \right), \tag{12}$$

$$M_{cy} = \frac{\rho_s t [2 \beta L - 5]}{4 \pi R (\beta L - 2)}, \tag{13}$$

其中 t , R , L 分别为圆柱壳的厚度、半径、长度, $S_c = 2 \pi R L$ 为圆柱壳的面积, ρ_s , σ 和 E 分别为材料的密度、泊松比和杨氏模量, $\beta = [E t (4 R^2 D)]^{1/4}$ 是便于讨论引入的一个单位为 $[\text{长度}]^{-1}$ 的常数, $D = E t^3 / [12 (1 - \sigma^2)]$ 为圆柱壳的弯曲刚度.

利用与均匀柱面辐射器等效的方法,可以求得具有固支边界的圆柱面的等效辐射声阻 R_{rcy} 和等效同振声质量 M_{rcy} (同时计算圆柱壳相内外的辐射) 分别为

$$R_{rcy} = \frac{\rho \omega \beta}{2 (\beta L - 2)}, \tag{14}$$

3. 仿 真

从上面的分析可以看到,圆柱形 Helmholtz 共振器的声学特性与小孔大小、腔体结构尺寸以及材料的力学特性等诸多因素有关.直接利用输入阻抗表达式来分析共振器的共振频率和声压传递函数非常复杂,因此采用仿真分析的方法.在下面的仿真结果中,水的参数取值为 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $c = 1500 \text{ m/s}$, $\mu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$;共振器材料为铝,其参数取值为 $\rho_s = 2700 \text{ kg/m}^3$, $E = 6.85 \times 10^{10} \text{ Pa}$, $\sigma = 0.34$.

3.1. 共振频率

图 3 为共振频率随圆柱壳厚度的变化曲线.仿真时,两端圆板厚度取 4 mm,小孔直径取 2 mm,图 3 (a) 中共振器总长度(柱面长度和两端面厚度之和)取 90 mm,图 3 (b) 中圆柱壳内径取 24 mm.从图中可以看到,当壳的厚度小于 2 mm 时,共振频率随着厚度的变大而迅速增加;当厚度达到 2 mm 以后,共振频率缓慢增加;当厚度达到 4 mm 以后,共振频率基

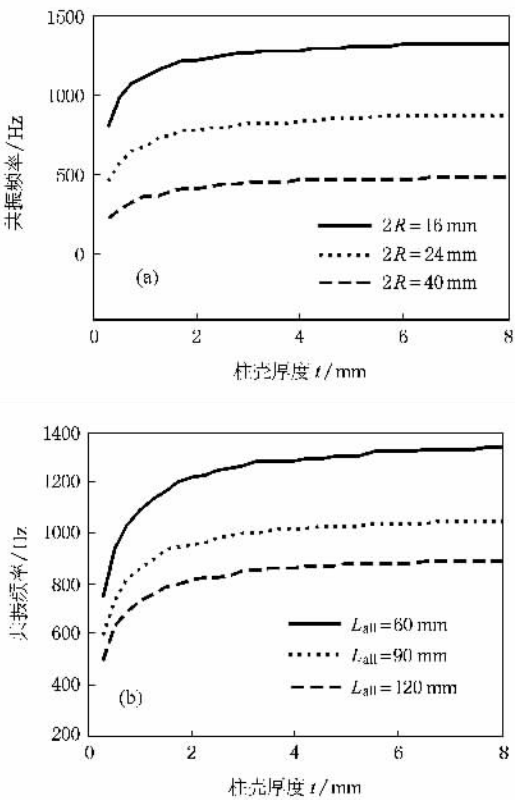


图 3 圆柱壳厚度对共振频率的影响

本上不再受圆柱壳厚度的影响,此时可以认为圆柱壳为刚性的。

图 4 为共振频率随底端圆板厚度的变化曲线。仿真时,小孔直径均取 2 mm,柱面长度和厚度分别取 80 mm 和 4 mm,图 4(a)中穿孔板厚度取 4 mm,图 4(b)中圆柱壳内径取 24 mm。从图中可以看到,当板的厚度小于 1 mm 时,共振频率随着厚度的变大而迅速增加;当厚度达到 1 mm 以后,共振频率缓慢增加;当厚度达到 2 mm 以后,共振频率基本上不再受圆板厚度的影响,此时可以认为圆板为刚性的。

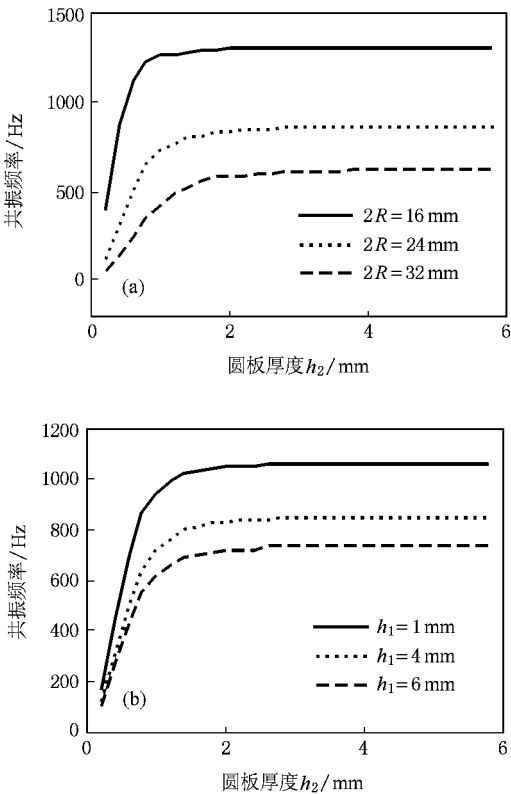


图 4 圆板厚度对共振频率的影响

3.2. 声压传递函数

图 5 是共振器各壁面厚度均为 1 mm 和 4 mm 时,圆柱形 Helmholtz 共振器的声压传递函数。仿真时,柱面外径和长度分别取 30 mm 和 80 mm,小孔直径取 2 mm。从图中可以看到,当壁面厚度为 1 mm 时,壁面弹性对共振频率影响较大,由刚性模型得到的共振频率为 1150 Hz,而由弹性模型得到的共振频率为 620 Hz,相差较大;当壁面厚度为 4 mm 时,刚性模型和弹性模型给出的共振频率分别为 1000 Hz 和 930 Hz,相差很小,此时共振器可以认为是刚性的,

与前面的分析结果一致。

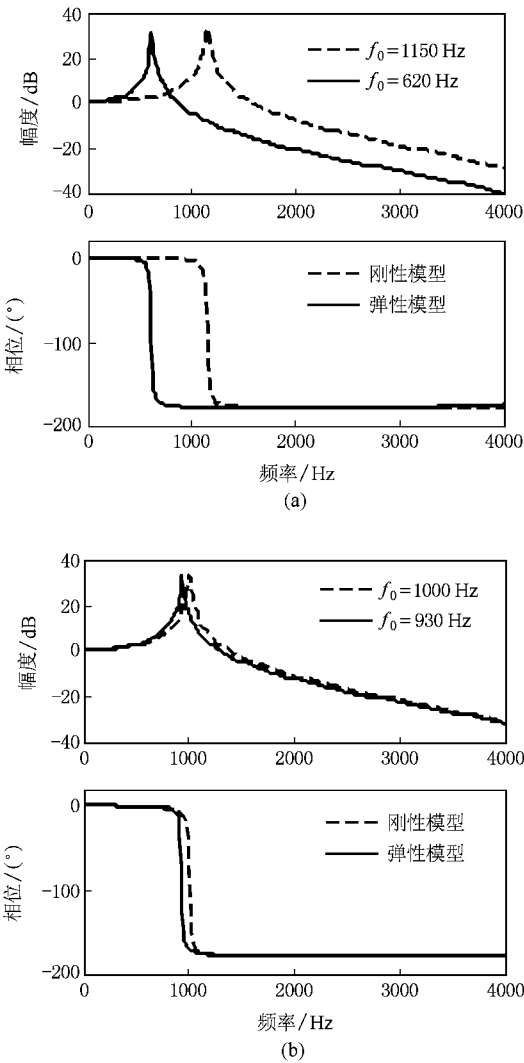


图 5 共振器的声压传递函数 (a)壁面厚度为 1 mm (b)壁面厚度为 4 mm

当壁面较厚时,共振器的声压传递函数主要由小孔和腔体的结构尺寸决定。图 6—9 分别是声压传递函数随小孔直径、小孔长度、柱面内径和柱面长度的变化。仿真时,小孔直径取 2.5 mm(图 6 除外),小孔长度取 4 mm(图 7 除外),柱面长度取 80 mm(图 8 除外),柱面外径取 30 mm(图 9 除外)。从图 6 可以看到,随着孔径的增加,声压传递函数整体往高频移动,共振频率对应的最大声压传递系数逐渐增加;从图 7 可以看到,随着小孔长度的增加,声压传递函数整体往低频移动,最大声压传递系数基本不变;从图 8 和图 9 可以看到,随着腔体体积(柱面长度或内径)的增加,声压传递函数整体往低频移动,最大声压传递系数基本不变。

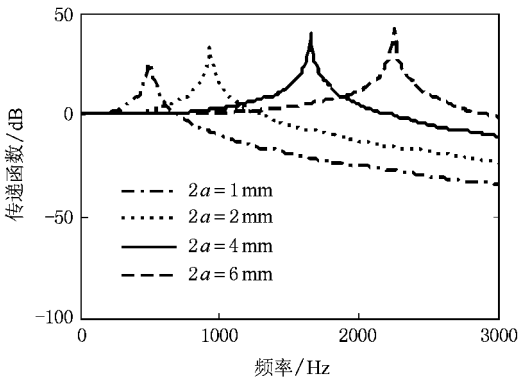


图 6 孔径对声压传递函数的影响

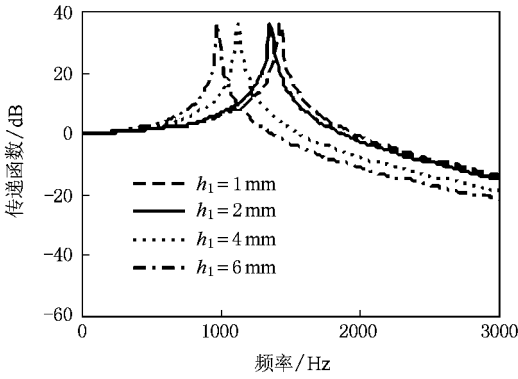


图 7 小孔长度(即穿孔板厚度)对声压传递函数的影响

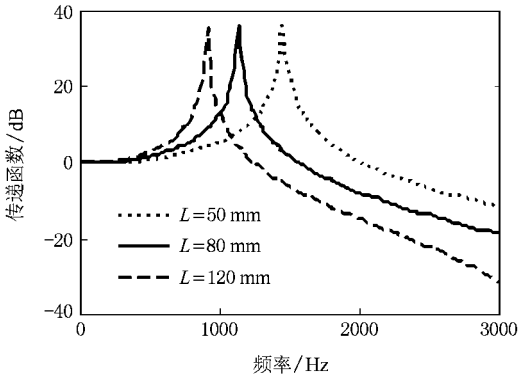


图 8 圆柱壳长度对声压传递函数的影响

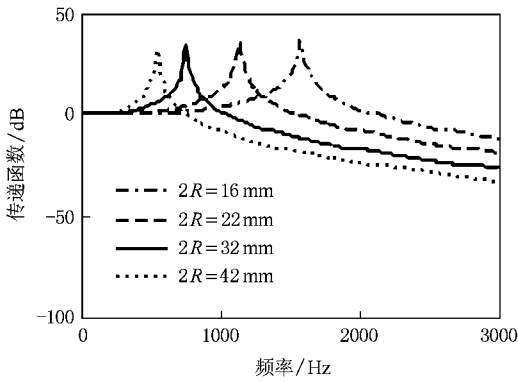


图 9 圆柱壳内径对声压传递函数的影响

Helmholtz 共振器,并在图 10 所示的驻波罐中对其垂直入射声压传递函数进行了测试.实验中使用的两个声传感器为中科院声学所生产的 CS-3 测量压电水听器,其敏感元件是一个内径 6 mm、外径 8 mm、高 8 mm 的 PZT-5 压电陶瓷圆管,外面包覆一层厚约 1 mm 的透声橡胶.其低频声压灵敏度约为 -210 dB (0 dB = 1 V/ μ Pa).两个压电水听器的灵敏度一致性较好,在 5000 Hz 以内频响波动小于 ± 1 dB.函数发生器产生一个单频正弦信号进行功率放大后驱动扬声器,在驻波罐中产生准平面声波.由于位于共振器外面的压电水听器的声中心与小孔位于同一深度,因此可以认为它测得的声压等于共振器开口处的声压,利用位于共振器里面的水听器可测得腔内的声压,二者相比即可得到圆柱形 Helmholtz 的声压传递函数.

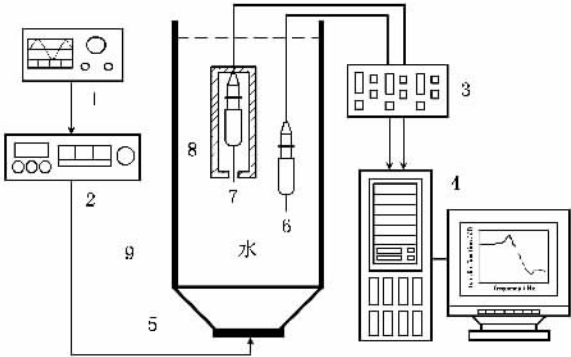


图 10 驻波罐测试系统(1 为信号发生器(AFG3022)2 为功率放大器(YE2706)3 为数字滤波器 SR650 4 为计算机和数据采集系统 5 为扬声器 6,7 为 CS-3 压电水听器 8 为 Helmholtz 共振器 9 为钢管)

4. 实 验

4.1. 实验设计

基于前面的理论分析,设计制作了一个外径 30 mm,总长 90 mm,各壁面厚 4 mm 的铝质圆柱形

4.2. 结果与分析

分别测试了小孔直径为 $2a = 1.5$ mm,1.8 mm,

2.5 mm 4.0 mm 四种情况对应的声压传递函数,结果如图 11 中的实线所示,并与仿真结果进行了比较。从图中可以看到,共振频率的测量值都小于集中参量模型给出的计算值(图中点划线所示),这主要是因为该模型中没有考虑测量压电水听器的影响。由于压电水听器外面包覆了一层透声橡胶,在

声压的作用下会发生形变。由于压电水听器的体积较小,当共振器的体积较大时,透声橡胶的形变与腔体中水的压缩量相比可以忽略;但是当共振器的体积较小时,透声橡胶的形变就可能是主要的,因此不能忽略。下面分析压电水听器对圆柱形 Helmholtz 共振器声压传递函数的影响。

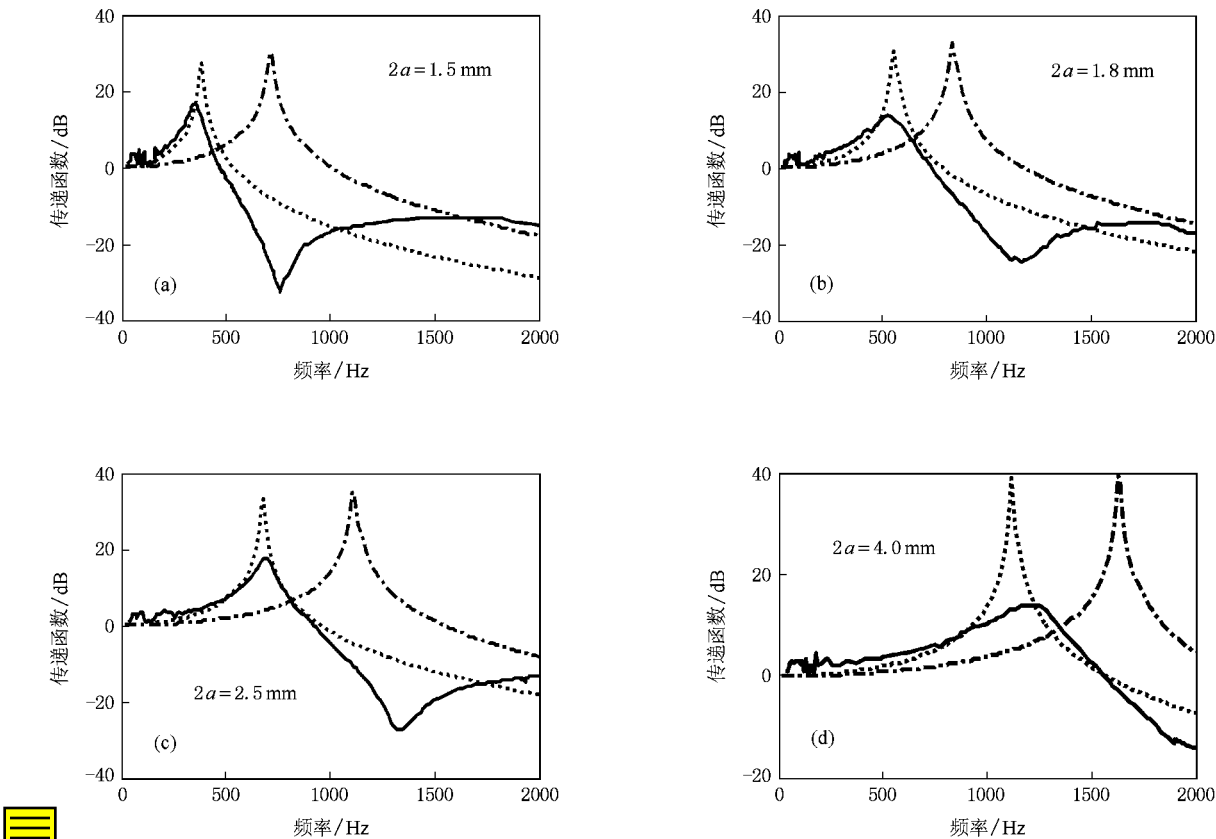


图 11 圆柱形 Helmholtz 共振器声压传递函数的测量值与计算值的比较 (a) $2a = 1.5\text{ mm}$; (b) $2a = 1.8\text{ mm}$; (c) $2a = 2.5\text{ mm}$; (d) $2a = 4.0\text{ mm}$

由于压电水听器的传感陶瓷环直径非常小,而且它的杨氏模量远大于包覆层透声橡胶的,因此可以认为它是刚性的,其应力和位移可忽略,只需考虑透声橡胶的弹性形变。当橡胶柱面受到轴对称均匀分布的压力 p 时,根据弹性力学理论可得其径向位移 u_R 为

$$u_R = \frac{-p(1 - 2\sigma_t)(1 + \sigma_t)\Delta t}{(1 - \sigma_t)E_t}, \quad (16)$$

其中 Δt , σ_t , E_t 分别是透声橡胶的厚度、泊松比和杨氏模量。

当频率较低时,橡胶柱面的尺寸远小于声波波长,此时弹性柱面可以等效成位于柱面中间的无限薄、无限短的弹性圆环,由虎克定律可知^[25]

$$u_R = -C_m \cdot F, \quad (17)$$

式中, C_m 为橡胶柱面的等效力顺, F 为柱面受到的等效集中压力。

对比 (16) 和 (17) 式,并利用力顺和声容的变换关系 $C_a = C_m \cdot S^2$ 可得橡胶柱面的等效声容为

$$C_a = \frac{(1 - 2\sigma_t)(1 + \sigma_t)S_t\Delta t}{(1 - \sigma_t)E_t}, \quad (18)$$

式中, $S_t = 2\pi R_t L_t$ 为橡胶柱面的面积, R_t 和 L_t 分别是柱面半径和长度。将橡胶柱面的参数 $R_t = 5\text{ mm}$, $L_t = 20\text{ mm}$, $\Delta t = 1\text{ mm}$, $\sigma_t = 0.45$, $E_t = 9\text{ MPa}$, 代入 (18) 式可以求得其等效声容约为腔体等效声容的 1.32 倍,因此压电水听器对测量结果的影响非常大。图 11 中虚线所示为考虑橡胶柱面弹性的影响后的理论曲线,此时共振频率的计算值与测量值基本符合。从图 11 中还可以看,实验测得的共振峰值

都小于理论计算值,这说明系统实际的声阻要大于理论值.引起声阻增大的主要原因有两个,其一是小孔内表面的摩擦损耗,其二是共振器壁面振动引起的机械损耗^[20].

5. 结 论

本文基于电-声类比和弹性力学的基本理论,建立了较为完善的水下圆柱形 Helmholtz 共振器的低频集中参量模型.对影响其声学特性的各主要参量进行了详细的仿真分析.结果表明,当柱面厚度大

于 4 mm 且端面圆板厚度大于 2 mm 时,小型金属圆柱形 Helmholtz 共振器可以认为是刚性的,随着小孔直径的增加,声压传递函数往高频平移,且共振峰值逐渐增大,随着腔体体积的增加,声压传递函数往低频平移,共振峰值基本不变.在充水驻波罐中对自制的铝质圆柱形 Helmholtz 共振器进行了测试,去除压电水听器对测量结果的影响后,实际测得的声压传递函数与仿真结果基本一致,从而验证了理论分析的正确性.本文为水下圆柱形 Helmholtz 共振器的设计提供了详细的理论和实验指导,对其他形状共振器的水下特性分析具有很好的参考价值.

-
- [1] Cheng L Q 1992 *Physics Bulletins* **11** 37 (in Chinese) [陈立群 1992 物理通报 **11** 37]
 - [2] Tang S K , Cheng J S F 1998 *Appl. Acou.* **53** 193
 - [3] Nagaya K , Hano Y , Suda A J 2001 *J. Acou. Soc. Am.* **110** 289
 - [4] Esteve S J , Johnson M E 2005 *J. Sound and Vib.* **288** 1105
 - [5] Ingard U 1953 *J. Acoust. Soc. Am.* **25** 1037
 - [6] Alster M 1972 *J. Sound and Vib.* **24** 63
 - [7] Tang P K , Sirignano W A 1973 *J. Sound and Vib.* **26** 247
 - [8] Howe M S 1976 *J. Sound and Vib.* **45** 427
 - [9] Panton R L , Miller J M 1975 *J. Acoust. Soc. Am.* **57** 1533
 - [10] Chanaud R C 1994 *J. Sound and Vib.* **178** 337
 - [11] Chanaud R C 1997 *J. Sound and Vib.* **204** 829
 - [12] Selamet A 1997 *J. Acoust. Soc. Am.* **101** 41
 - [13] Selamet A , Ji Z L 2000 *J. Acoust. Soc. Am.* **107** 2360
 - [14] Selamet A , Lee I J 2003 *J. Acoust. Soc. Am.* **113** 1975
 - [15] Selamet A , Xu M B , Lee I J , Huff N T 2005 *J. Acoust. Soc. Am.* **117** 725
 - [16] Cotton J C 1934 *J. Acoust. Soc. Am.* **5** 208
 - [17] Henriquez T A , Young A M 1980 *J. Acoust. Soc. Am.* **67** 1555
 - [18] Photiadis D M 1991 *J. Acoust. Soc. Am.* **90** 1188
 - [19] Norris A N , Wickham G 1993 *J. Acoust. Soc. Am.* **93** 617
 - [20] Horowitz S B , Nishida T , Cattafesta L N , Sheplak M 2002 *International Journal of Aeroacoustics* **1** 183
 - [21] Zhou C G , Liu B L , Li X D , Tian J 2007 *Acta Acoustic* **32** 426 (in Chinese) [周城光、刘碧龙、李晓东、田 静 2007 声学学报 **32** 426]
 - [22] Wang Z F , Hu Y M 2008 *Acta Acoustic* **33** 184 (in Chinese) [王泽锋、胡永明 2008 声学学报 **33** 184]
 - [23] Zhao S L 1985 *Noise Reductions and Isolations* (Shanghai : Tongji University Press) (in Chinese) [赵松龄 1985 噪声的降低与隔离 (上海 : 同济大学出版社)]
 - [24] He Z Y , Zhao Y F 1981 *Theories of Acoustics* (Beijing : National Defense Industry Press) (in Chinese) [何祚镛、赵玉芳 1981 声学理论基础 (北京 : 国防工业出版社)]
 - [25] Xu Z L 1992 *Elastics Mechanics* (Beijing : High Education Press) (in Chinese) [徐芝纶 1992 弹性力学 (北京 : 高等教育出版社)]

Acoustic characteristics of underwater cylindrical Helmholtz resonator^{*}

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

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

(Received 2 December 2007 ; revised manuscript received 4 February 2008)

Abstract

The acoustic characteristics of underwater cylindrical Helmholtz resonator are analyzed theoretically. Based on the theories of electro-acoustic analogy, a low frequency lumped-parameter model of the Helmholtz resonator is constructed with due consideration of the effects of the elasticity and the radiation impedance of the resonator. To our knowledge, this is the first time such a complete model is constructed. The input impedance and the transfer function of the system are given by circuit analysis. The effects of parameter values of the resonator on the acoustic characteristics are studied by numerical method. Some useful conclusions are drawn. A small aluminum cylindrical Helmholtz resonator is measured in a standing-wave tube filled with water. Error analysis is made in detail. The experimental results are in agreement with the simulation results considering the effect of the piezoelectric hydrophone. The validity of the theoretical analysis is testified. This paper supplies a theoretical and experimental basis for the design of underwater cylindrical Helmholtz resonators, and is useful for the estimation of underwater acoustic performance of Helmholtz resonators of other shapes.

Keywords : Helmholtz resonators , resonant frequency , transfer function , radiation impedance

PACC : 4320 , 4330 , 4350

^{*} Project supported by the 863 National High Technology Program of China (Grant No. 2006AA09Z121), the Program for New Century Excellent Talents in Universities of China (Grant No. NECT-06-0925), the Innovation Science and Technology Foundation of National University of Defense Technology (Grant No. 0623).

[†] E-mail : hotrosemaths@163.com