

◇ 研究报告 ◇

用于矢量水听器的弯曲圆盘型声压水听器*

周宏坤^{1†} 洪连进² 葛锡云¹ 赵俊波¹ 冯雪磊¹

(1 中国船舶科学研究中心深海载人装备国家重点实验室 无锡 214082)

(2 哈尔滨工程大学水声技术国防科技重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要 针对在同振型矢量水听器中有效地复合声压通道的问题,提出一种采用压电双迭片结构的弯曲圆盘型声压水听器。压电双迭片由中心开孔的压电圆片和金属背衬组成,采用弯曲振动工作模式。为提高声压水听器的灵敏度,分别通过理论计算和有限元仿真的方法对双迭片结构进行了分析与优化设计,并制作了一只声压水听器样机用于实验验证。测试结果表明,声压水听器的灵敏度为 -157 dB (0 dB re 1 V/ μ Pa),在25 Hz~1000 Hz频带内分布平坦,并具有全指向性的特点。综合理论研究与实验室测试结果,这种弯曲圆盘型声压水听器成功满足了低频宽带声信号接收的需要,达到了复合同振型矢量水听器对声压通道的设计要求。

关键词 矢量水听器,压电双迭片,声压水听器,弯曲振动

中图分类号: TB565.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2017)06-0497-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.06.004

A flexural-disk hydrophone employed in the acoustic vector sensor

ZHOU Hongkun¹ HONG Lianjin² GE Xiyun¹ ZHAO Junbo¹ FENG Xuelei¹

(1 State Key Laboratory of Deep-Sea Manned Vehicles, China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

(2 Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract A flexural-disk hydrophone utilizing the piezoelectric unimorph is presented here to achieve the effective combination between pressure channel and the inertial acoustic vector sensor. The flexural-mode piezoelectric unimorph consists of a piezoelectric disk with a hole in the center and a metal substrate. To improve the pressure sensitivity of the hydrophone, theoretical analysis and finite element method were used to optimize the design of the piezoelectric unimorph, and a hydrophone prototype was fabricated and tested. It is shown from the experimental result that the hydrophone is provided with the sensitivity of -157 dB (0 dB re 1 V/ μ Pa) with a less fluctuation over the bandwidth of 25 Hz~1000 Hz, and the directivity satisfies omni-directional characteristic well. Both theoretical researches and experimental results demonstrate that the piezoelectric unimorph-type hydrophone successfully achieves low-frequency broadband sound pressure signal reception, and meets the design requirement for the combined inertial acoustic vector sensor.

Key words Acoustic vector sensor, Piezoelectric unimorph, Hydrophone, Flexural vibration

2017-03-06 收稿; 2017-05-01 定稿

*国家自然科学基金项目 (11074057, 11674075)

作者简介: 周宏坤 (1987-), 男, 江苏盐城人, 博士, 工程师, 研究方向: 水声换能器与基阵。

† 通讯作者 E-mail: zhouhk702@126.com

1 引言

矢量水听器能同时共点获得水下声场的声压和质点振速信息,具有心形自然指向性,抗各向同性噪声,它从声能流检测的角度加速了水下噪声场矢量特性的研究,在舰船辐射噪声测量方面发挥了很大的作用^[1]。一方面在现代反潜战中,由于矢量水听器阵列具有高检测信噪比、大孔径、有效解决左右舷模糊的特点,有利于增强潜艇的远程被动探测、警戒和识别能力,因此矢量型拖曳阵和舷侧阵声纳成为了潜用声纳的一个重要发展方向^[2];另一方面,在潜艇噪声控制和减振降噪设计中,矢量水听器可用于测量和评估低噪声舰船(噪声级小于145 dB)的噪声时空分布特性和线谱特性,开展水下噪声源识别和分离技术研究^[3]。

在复合同振型矢量水听器中,声压通道作为其三个(或四个)声学通道之一,提供了声场的标量信息,是研究矢量-相位技术的基础。同振型矢量水听器中声压通道和矢量通道工作原理不同,如何简单可靠地将两者进行复合,是目前工程中需要解决的一个问题。目前矢量水听器的声压通道多采用压电球壳和压电圆管的结构形式,单是随着矢量水听器不断向小型化、智能化的方向发展,典型声压水听器体积大、装配复杂的问题凸显了出来^[4]。

利用薄片弯曲振动的压电双迭片是压电换能器中的另一种常用结构,由于体积小、阻抗低、低频响应高、易于施加阻尼、结构简单,在超声马达、加速度计和水声换能器等方面获得较多应用^[5]。将压电双迭片结构用作声压水听器时,由于金属和压电陶瓷构成两层结构易于密封,金属板本身可作为声接收面,不需另外的透声窗,所以整体结构更加简单轻便。典型结构的压电双迭片振子在不同的简支、固定以及自由边界条件下的振动分析理论已经发展比较成熟,但是对典型结构衍生出的其它结构,比如中心开孔压电片和金属背衬组成的双迭片,相应的研究则较少^[6-7]。

本文设计了适用于复合同振型矢量水听器的声压水听器,对中心开孔双迭片振子的声接收特性进行了分析,首先从理论上计算了典型双迭片在固定和简支边界条件下的共振频率以及灵敏度;然后采用有限元数值计算的方法,对双迭片的结构进行优化设计;最后制作一只声压水听器样机,对其性能进行了实验验证。

2 结构与理论分析

典型的复合同振型矢量水听器,采用外部套装压电圆管作为声压敏感通道,如图1(a)所示,本文为矢量水听器设计声压通道,则是基于压电圆片的双迭片结构,如图1(b)所示。图1(b)中,声压通道位于柱形铝合金壳体的底部,与壳体内部的速度(或加速度)传感器组成复合矢量水听器。压电圆片直接粘接在壳体内部,密封壳体一部分作为金属背衬,背衬外表面暴露在水中直接感受声波压力作用并产生弯曲形变,压电圆片随之变形从而完成信号的接收。这种结构避免了使用透声橡胶密封,没有电缆线穿舱问题,同时直接采用金属壳体密封可以有效地屏蔽电磁干扰,有助于弱信号的接收。

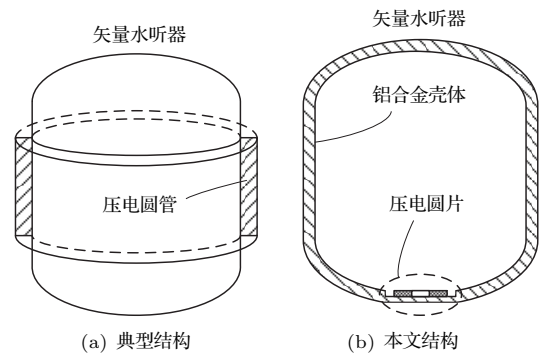


图1 同振型矢量水听器声压通道结构

Fig. 1 Structure of sound pressure sensor of inertial acoustic vector sensor

将一片压电陶瓷圆片和一片金属薄片胶合在一起便构成压电双迭片,金属片可以提高整体的刚度和强度,改善机械特性或电学特性。双迭片结构利用薄片的弯曲振动,具有较低的阻抗,对低频振动响应较高。对双迭片的振动分析可采用弹性力学中的薄板问题方法来求解:若板的厚度与半径相比很小,并和板材料所对应的波长相比很小,则振动时挠度很小,那么可以忽略转动惯量,只考虑法向振动,从而求解得到简化。在文献[8]中,Vassergiser给出了采用压电双迭片设计声学换能器的一般公式。如图2所示, p 和 V 分别对应双迭片声接收面的声压和体积振速, U 和 I 分别为输出电压和电流, C_0^S 为固定边界条件下的压电陶瓷电容值, C_A^U 为极板短路条件下的声顺, N_A 为声电转换系数, M_{eff} 为有效声质量,于是有

$$p = Z_A^I V + Z_0^S N_A I, \quad U = Z_0^S N_A V + Z_0^S I,$$

$$Z_0^S = 1/j\omega C_0^S, \quad Z_A^I = [1 - (f/f_A)^2]/j\omega C_A^I, \quad (1)$$

$$C_A^I = C_A^U (1 - k_{\text{eff}}^2), \quad k_{\text{eff}} = N_A \sqrt{C_A^U/C_0^T},$$

这里, $\omega = 2\pi f$ 为声波角频率, f_A 为自由边界条件下双迭片的反共振频率, Z_0^S 为双迭片边界固定的阻抗, Z_A^I 为双迭片的开路阻抗, C_A^I 为双迭片的开路条件下的声顺, k_{eff} 为有效机电耦合系数, C_0^T 为双迭片静态电容值。

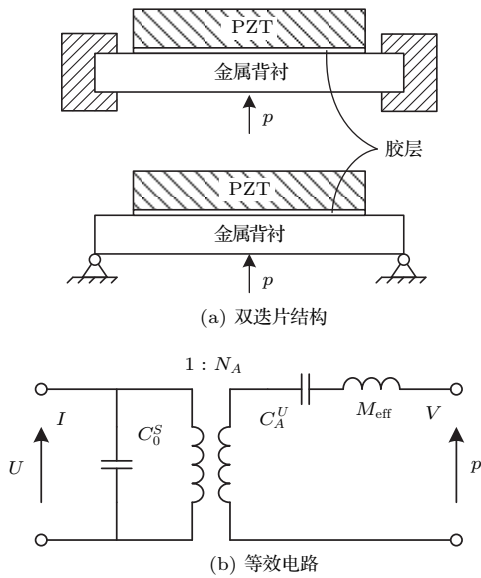


图2 双迭片结构及等效电路

Fig. 2 Structure and equivalent circuit of the unimorph

考虑到压电圆片和金属背衬具有不同的直径和厚度, 并且粘接胶层不能忽略, 设压电层厚度为 h_k , 半径为 a , 胶层厚度为 h_c , 半径与压电层相同, 背衬厚度为 h_π , 半径为 b , 则令半径比、厚度比分别为

$$\delta = a/b, \quad \gamma_\pi = h_\pi/h_k, \quad \gamma_c = h_c/h_k, \quad (2)$$

归一化杨氏模量与泊松比为

$$\alpha_c = \frac{1 - \sigma_c^2}{1 - \sigma_\pi^2}, \quad \alpha_k = \frac{1 - \sigma_k^2}{1 - \sigma_\pi^2}, \quad (3)$$

$$\beta_k = Y_k/Y_\pi, \quad \beta_c = Y_c/Y_\pi.$$

双迭片无负载时的有效质量采用能量方法计算, 其与静态质量 M_{st} 的关系为

$$M_{\text{eff}} = K_m M_{st} / \pi^2 b^4,$$

$$M_{st} = \pi b^2 \rho_\pi h_\pi (1 + \delta^2 \lambda), \quad (4)$$

$$\lambda = (\rho_k + \rho_c \gamma_c) / \rho_\pi \gamma_\pi,$$

于是双迭片的固有频率和灵敏度分别为

$$f_R = 1/2\pi \sqrt{C_A^U M_{\text{eff}}},$$

$$S_{oc} = N_A C_A^U / C_0^T,$$

$$C_A^U = \pi b^6 \mu_{12} (1 - \sigma_\pi^2) / 16 Y_\pi h_\pi^3 \mu_1,$$

$$C_0^T = C_0^S + N_A^2 C_A^U,$$

$$C_0^S = \frac{1}{h_k} \pi a^2 \varepsilon_{33}^T (1 - k_p^2) (1 + \mu_{13}) (1 - k_{\text{eff}}^2),$$

$$N_A = \frac{-24 d_{31} Y_k h_\pi \delta^2 \mu_8 t_0}{b^2 (1 - \sigma_k) \mu_{12}}, \quad (5)$$

式(5)中, C_0^T 为换能器静态电容, ε_{33}^T 是自由介电常数, d_{31} 是压电常数, s_{11}^E 为短路柔顺系数, k_p 为平面耦合因数, K_m 、 μ_1 、 μ_8 、 μ_{12} 、 μ_{13} 以及 t_0 均为和边界条件有关的无量纲参数, 见文献[8-9]。

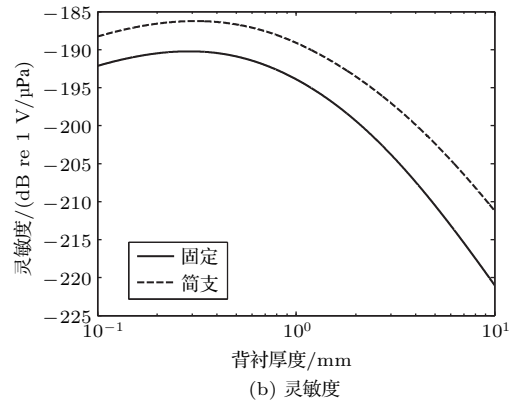
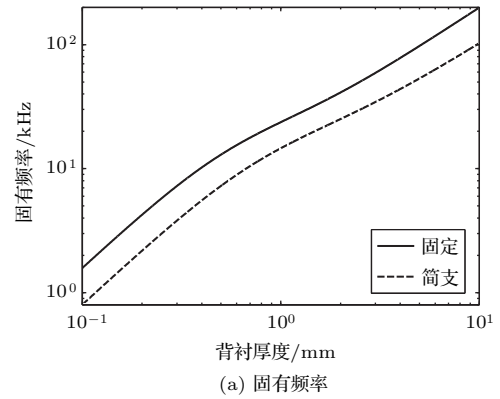


图3 根据 Vassergiser 的理论计算出的结果

Fig. 3 Calculated results according to Vassergiser's theory

下面计算由铝合金背衬和压电陶瓷 PZT-5 组成的双迭片的灵敏度与固有频率, 令

$$a = 8 \times 10^{-3} \text{ m}, \quad b = 11 \times 10^{-3} \text{ m},$$

$$h_k = 1 \times 10^{-3} \text{ m}, \quad h_c = 5 \times 10^{-5} \text{ m},$$

$$d_{31} = -1.71 \times 10^{-10} \text{ C/N}, \quad k_p = 0.603,$$

$$e_{33}^T = (8.85 \times 10^{-10}) \times 1700 \text{ F/m},$$

$$\sigma_\pi = 0.33, \quad \sigma_c = 0.4, \quad \sigma_k = 0.348,$$

$$\begin{aligned}
 Y_{\pi} &= 6.9 \times 10^{10} \text{ Pa}, & Y_c &= 2 \times 10^9 \text{ Pa}, \\
 Y_k &= 61 \times 10^9 \text{ Pa}, & \rho_{\pi} &= 2730 \text{ kg/m}^3, \\
 \rho_c &= 1100 \text{ kg/m}^3, & \rho_k &= 7750 \text{ kg/m}^3,
 \end{aligned} \tag{6}$$

计算结果如图3所示,采用边界简支的双迭片振子显然具有较高的声压灵敏度,而边界固定的振子则具有更高的固有频率,实际中由于简支条件实施困难,所以大都采用固定的边界条件。随着背衬厚度的增加,双迭片的固有频率逐渐上升,而灵敏度先升高再逐渐降低。对于任何一种水听器,高灵敏度与宽频带都是相互制约的,因此在实际设计中要根据需要确定合适的参数。

3 有限元分析与优化

为提高声压通道的灵敏度,在压电双迭片设计中采用中心开孔的压电圆片,显然上面的理论计算不再适用,因此本文采用有限元的方法进行进一步地分析与优化。在建模过程中忽略胶层影响,分别建立声压水听器三维有限元模型以及二维轴对称模型,如图4所示。

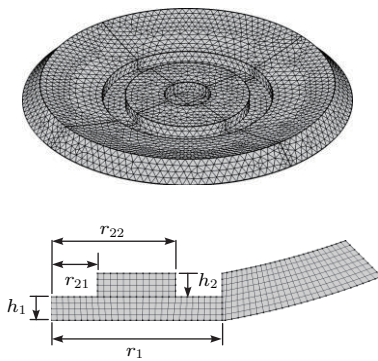


图4 声压通道结构的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the sound pressure channel

令金属背衬片半径与厚度分别为 $r_1 = 11 \text{ mm}$, $h_1 = 1 \text{ mm}$, 压电圆片的半径和厚度分别为 $r_{22} = 8 \text{ mm}$, $h_2 = 1 \text{ mm}$, 压电圆片中心圆孔半径 $r_{21} = 0 \text{ mm}$, 使用三维有限元模型分析得到压电双迭片第一阶模态振形,如图5所示。从图5中可以看出,该双迭片的模态振形与薄圆板模态相同。因为一阶模态为轴对称模态,所以在进行频率低于一阶模态频率的振动分析时,三维模型可简化为二维轴对称模型。

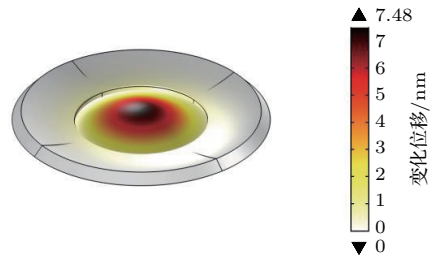
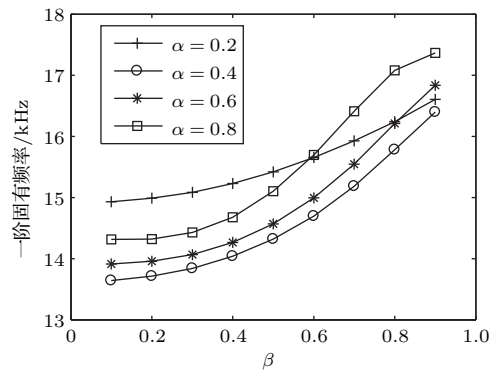


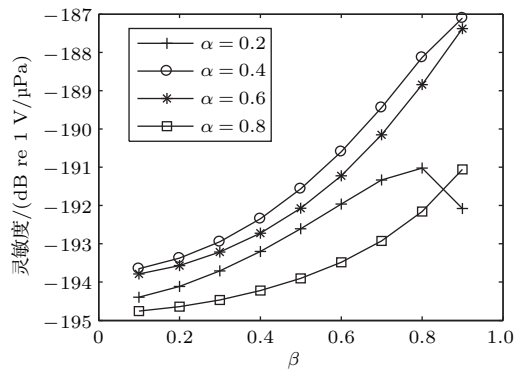
图5 压电双迭片第一阶模态振形,15877 Hz

Fig. 5 First mode shape of the unimorph, 15877 Hz

定义压电圆片与背衬半径比为 α , 开孔压电圆片内外径之比为 β , 分别计算得到半径比 α 、 β 对声压水听器性能的影响如图6所示。由于压电陶瓷厚度与金属背衬厚度相当,所以两者尺寸均会对双迭片整体固有频率产生影响。当 α 取值为0.4时,双迭片具有最低的固有频率;而当 α 一定时,固有频率随着 β 值的增大而增大。按照一般设计原则,声压水听器的工作频带的上限频率要远离第一阶固有频率。从图6中可以看出,无论参数 α 、 β 取何值都能保证双迭片的最低阶固有频率在 13 kHz 以上,因



(a) 固有频率



(b) 灵敏度

图6 半径比 α 、 β 对声压水听器性能的影响

Fig. 6 Influence of radius ratio α and β on the performance of the sound pressure sensor

此工作频带满足设计要求。随着半径比 β 增大,双叠片的电压灵敏度基本呈现增大的趋势,并且和 α 的取值密切相关,且当 $\alpha = 0.4$ 时,灵敏度取得最大值,与图5中的最低固有频率一致。

影响水听器检测能力的主要原因源自内部自噪声,这种噪声通常源于水听器部件和水介质的热扰动^[10]。为提高水听器的性能,应该使其自噪声低于海洋环境噪声。自噪声产生机理是能量损耗,包括传感材料的电学和机械损耗,机械阻抗以及辐射阻抗等等。以压电型水听器为例,如果用电阻 R_h 等效电学和机械的损耗,则对应Johnson热噪声均方电压为^[11]

$$V_n^2 = 4kTR_h\Delta f, \quad (7)$$

这里 k 是玻尔兹曼常数, T 是绝对温度, Δf 是分析带宽,一般取1 Hz。如果水听器工作在低频,振动频率远低于机械共振点,可以认为电学损耗占主要总噪声的主要部分,于是有

$$R_h = \text{Re} \left[\frac{1}{j\omega C_f (1 - j \tan \delta)} \right] \approx \frac{\tan \delta}{\omega C_f}, \quad (8)$$

这里, $\tan \delta < 1, \omega = 2\pi f$ 是角频率。利用水听器的灵敏度值将自噪声从输出端等效到输入端,用等效噪声声压级表示为

$$\text{SPL}_N = 10 \lg (p_n^2) = 10 \lg \left(\frac{V_n^2}{M_p^2} \right), \quad (9)$$

于是在20 °C时,式(9)为

$$\begin{aligned} \text{SPL}_N \approx & -206 + 10 \lg (\tan \delta / C_f) \\ & - 20 \lg M_p - 10 \lg f, \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可知,当水听器的带宽和介质损耗因子一定时,自噪声主要取决于压电元件的电容量。

采用同样的参数 $r_1 = 11 \text{ mm}, h_1 = h_2 = 1 \text{ mm}$,计算得到双迭片元件的等效噪声声压级,如图7所示。可以看出, β 值对自噪声的影响较小,即压电圆片开孔的大小与自噪声关系不大;另一方面, α 值越大对应压电片的电容越大,因此对应自噪声水平越低。根据以上理论与仿真分析,并考虑到粘接装配的可实施性,本文选用尺寸为 $r_1 = 11 \text{ mm}, r_{21} = 4 \text{ mm}, r_{22} = 8 \text{ mm}$ 的背衬与压电圆片构成双迭片,即 $\alpha = 0.7, \beta = 0.5$,即对应灵敏度的仿真值约为-193 dB。

声压水听器的阻抗测试结果如图8所示,水听器的电容为2 nF (1 kHz),在空气中一阶固有频率

为12 kHz,在水中约为8 kHz。由于受到粘接装配工艺的限制,双迭片的实际刚度比理想值小,相应地实测的固有频率值略有降低。

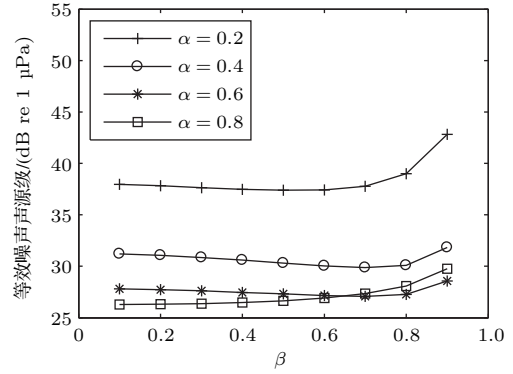
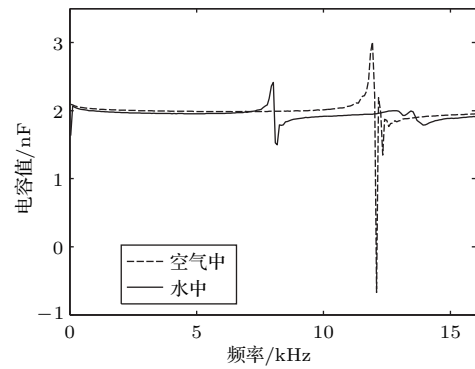
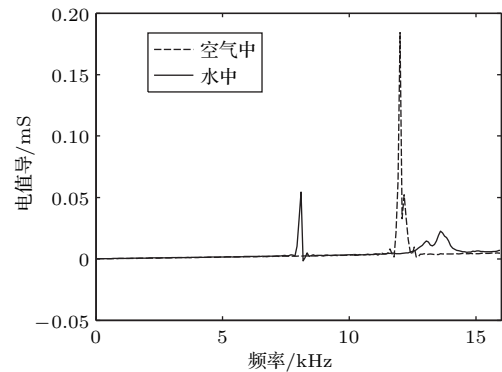


图7 等效噪声声压级与半径比 α, β 的关系

Fig. 7 Relationship between equivalent-noise sound pressure level and radius ratio α, β



(a) 电容



(b) 电导

图8 声压水听器的电容和电导曲线

Fig. 8 Capacitance and conductance curves of the sound pressure sensor

4 信号调理电路设计

为提高水听器输出信号的信噪比,便于信号的进一步传输和处理,一般要先对信号进行预处理,包

括信号的放大和滤波^[12]。压电型声压水听器一般采用前置电压放大的模式,滤波器由一阶高、低通滤波组成带通滤波器。在如图9所示的电路中,调理电路的放大增益和滤波器的截止频率分别为

$$G = 1 + \frac{R_4}{R_3}, \quad f_L = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}, \quad f_H = \frac{1}{2\pi R_5 C_2}, \quad (11)$$

这里为满足低噪声的设计要求,调理电路中的运算放大器选用低噪声、高输入阻抗的运放OPA2140。基本参数为:输入阻抗 $10^{13} \Omega$,在0.1 Hz~10 Hz范围内低频1/f噪声为250 nV_{pp},1 kHz处的电压、电流噪声谱密度分别为5.1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 以及

0.8 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。调理电路的设计目标为增益40 dB,带宽5 Hz~2500 Hz,因此电容电阻分别选用 $C_1 = 330 \text{ pF}$, $C_2 = 10 \text{ nF}$, $R_1 = 100 \text{ M}\Omega$, $R_3 = 100 \Omega$, $R_4 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_5 = 6.6 \text{ k}\Omega$ 。

调理电路设计、制作完成后,利用动态信号分析仪(DSA Agilent 35670A)对其频率特性进行了测试,结果如图10所示。从幅度、相位响应曲线上可以看出,该调理电路电压增益为41.6 dB,-3 dB带宽为4.7 Hz~2.44 kHz,满足设计要求。相应地声压水听器采用该放大电路,对应的输出灵敏度理论值应该为-151.4 dB(0 dB re 1 V/ μPa)。

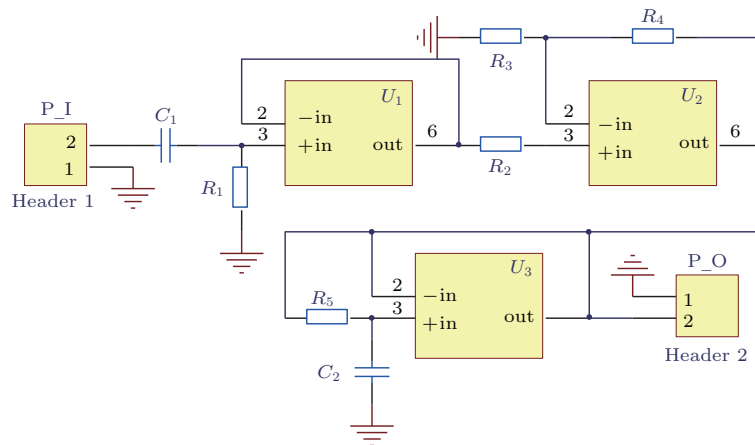


图9 声压水听器调理电路

Fig. 9 Conditioning circuit of the hydrophone

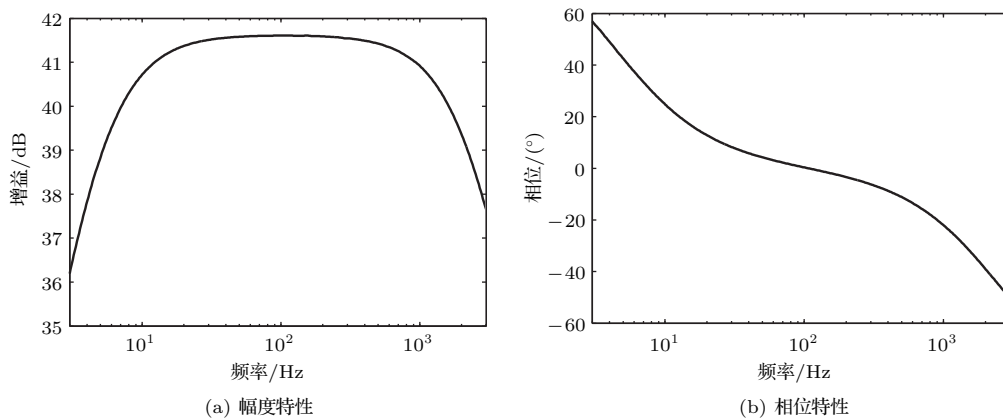


图10 声压水听器调理电路频率特性曲线

Fig. 10 Frequency characteristic curves of signal condition circuit for the hydrophone

5 实验测量与结果

在实验室条件下,低频平面波自由场很难得到,对于3 kHz以下水听器的低频校准,一般使用双发射器零值法、振动液柱法等。本文选择在驻波声场

中,使用比较法对声压水听器进行校准。图11为哈尔滨工程大学水声工程学院驻波声管测量装置。在充水金属圆柱管底部放置活塞发射换能器,换能器激发的声波在水和空气界面处反射并与入射波叠加产生驻波,其中标准声压水听器采用B&K 8104。当声波频率低于(1,0)阶简正波截止频率时,管中

能产生均匀的、可用来进行测试的驻波声场。

以水和空气的分界面为原点建立坐标系，标准声压水听器 B&K 8104 与待测水听器所在位置分别计为 x_1 、 x_2 。根据绝对软边界条件以及驻波声场的特点，在四分之一波长内有

$$S_2 = S_1 \frac{e_2 \sin(kx_1)}{e_1 \sin(kx_2)}, \quad (12)$$

这里 e_1 、 S_1 分别为标准水听器的开路输出电压以及声压灵敏度， e_2 、 S_2 则分别表示待测水听器的开路输出电压与声压灵敏度。

驻波声管中的校准实验结果如图 12(a) 所示，从图 12(a) 中可以看出，声压水听器在 1 kHz 频点处的灵敏度为 -157 dB (0 dB re 1 V/ μ Pa，带前放增益 41.6 dB)，该测量值比仿真计算值 (-151.4 dB)

降低了 6 dB。这里，灵敏度降低主要是有限元模型和实际结构之间的差异造成的。在有限元模型中，下部金属壳体(图 4)的边缘使用的是刚性边界条件，而在实际中下部壳体则是通过螺纹以及 O 型圈密封，实现与圆柱体部分连接，所以并非理想刚性。声压灵敏度在 25 Hz~2500 Hz 范围内的幅值起伏保持在 2 dB 以内。当声波频率低于 25 Hz 时，声管基座共振与矢量水听器柔性悬挂系统共振导致声压水听器灵敏度剧烈上升；当测量频率超过 500 Hz 时，管内底部发射器的辐射面非轴对称激励，导致了声场出现了非均匀性，因而测量曲线出现了较小的波动。声压水听器的指向性满足全指向的特点，100 Hz 处的指向性比较理想，1 kHz 处的指向性偏差保持在 2 dB 以内，如图 12(b) 所示。

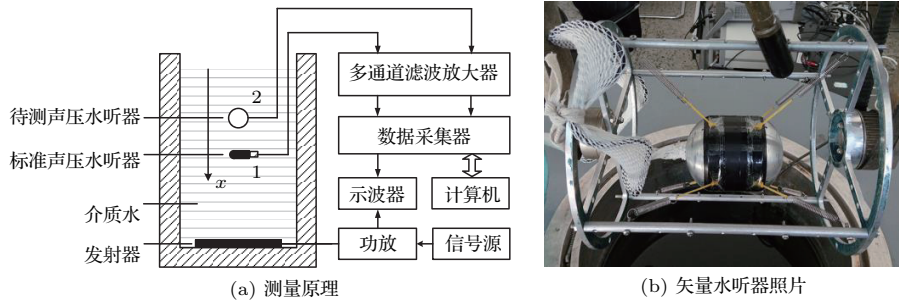


图 11 驻波声管测量装置

Fig. 11 Acoustic standing wave calibrator

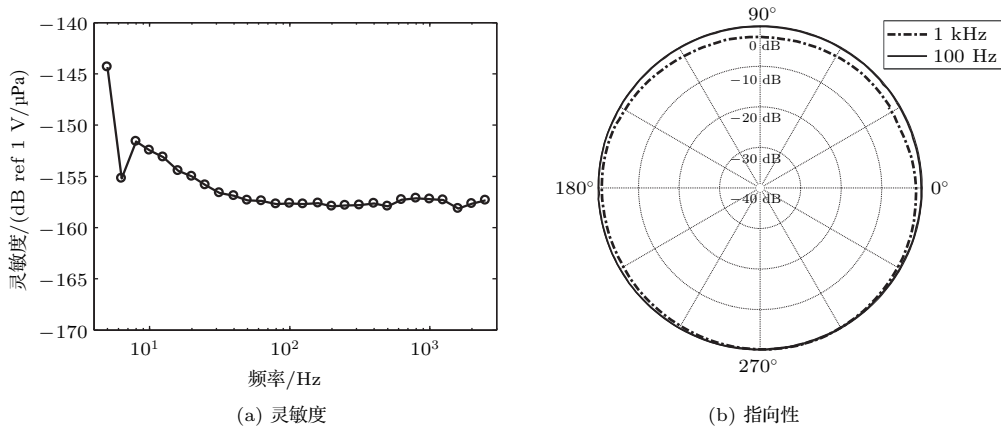


图 12 声压水听器灵敏度和指向性图

Fig. 12 Sensitivity and directivity curves of the hydrophone

6 结论

本文通过理论计算、有限元仿真、样机研制与参数校准，对基于压电双迭片结构的弯曲圆盘型声压水听器在复合同振型矢量水听器上的应用进行

了研究。理论计算结果表明，随着压电双迭片背衬厚度的增加，声压水听器的一阶固有频率逐渐上升而灵敏度逐渐降低。有限元仿真结果表明，当开孔压电圆片内外径之比在 0.4 附近时，声压水听器获得最大的灵敏度。校准结果表明，声压水听器的灵

灵敏度为 -157 dB (0 dB re 1 V/ μ Pa), 工作频率范围 25 Hz \sim 1000 Hz, 满足低频宽带声信号的接收需要。

本文设计的压电双迭片型声压水听器体积小、灵敏度高、装配简单, 为复合同振型矢量水听器声压通道的结构设计提供了一种理想选择, 同时该型声压水听器作为一种理想的基元形式, 在水下大面积声学成阵方面具有较大的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 孙贵青, 李启虎. 声矢量传感器研究进展 [J]. 声学学报, 2004, 29(6): 481–490.
SUN Guiqing, LI Qihu. Progress of study on acoustic vector sensor[J]. Acta Acustica, 2004, 29(6): 481–490.
- [2] 梅继丹, 孙大军, 吕云飞, 等. 多目标对单矢量水听器俯仰角测量的影响研究 [J]. 船舶力学, 2015, 19(10): 1289–1293.
MEI Jidan, SUN Dajun, LYU Yunfei, et al. Research on the influence of the multi-targets on the single vector hydrophone elevation measurement[J]. Journal of Ship Mechanics, 2015, 19(10): 1289–1293.
- [3] 孙贵青, 杨德森, 张揽月. 基于矢量水听器的水下目标低频辐射噪声测量方法研究 [J]. 声学学报, 2002, 27(5): 429–434.
SU Guiqing, YANG Desen, ZHANG Lanyue. Research for the method for measuring radiated noise by an underwater target in low frequency band based on the vector hydrophone[J]. Acta Acustica, 2002, 27(5): 429–434.
- [4] 贾志富. 三维同振球型矢量水听器的特性及其结构设计 [J]. 应用声学, 2001, 20(4): 15–21.
JIA Zhifu. Design and characteristics of a resonant-sphere type three-dimensional vector hydrophone[J]. Applied Acoustics, 2001, 20(4): 15–21.
- [5] 洪连进, 杨德森, 时胜国, 等. 中频三轴向矢量水听器的研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 79–84.
HONG Lianjin, YANG Desen, SHI Shengguo, et al. Study on a medium three dimensional co-oscillating vector hydrophone[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3): 79–84.
- [6] 穆廷荣. 金属和压电陶瓷构成的两层复合薄圆板的强迫振动 [J]. 声学学报, 1984, 9(5): 298–310.
MU Tingrong. Forced vibration of the two-layer metal and piezoceramic composite thin circular plate with different diameter for each other[J]. Acta Acustica, 1984, 9(5): 298–310.
- [7] 潘晓娟, 贺西平, 宋希阳. 双迭片压电振子的振动研究 [J]. 振动与冲击, 2010, 29(3): 125–127.
PAN Xiaojuan, HE Xiping, SONG Xiyang. Analysis on bimorph flexural transducers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(3): 125–127.
- [8] VASSERGISER M E, VINNICHENKO A N, DOROSH A G. Calculation and investigation of flexural-mode piezoelectric disk transducers on passive substrate in reception and radiation[J]. Sov. Phys. Acoust., 1992, 38(6): 558–561.
- [9] MOFFETT M B, TRIVETT D H, KLIPPEL P J, et al. A piezoelectric, flexural-disk, neutrally buoyant, underwater accelerometer[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 1998, 45(5): 1341–1346.
- [10] MELLEN R H. The thermal-noise limit in the detection of underwater acoustic signals[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1952, 24(5): 478–480.
- [11] SHERMAN C H, BUTLER J L. Transducers and arrays for underwater sound[M]. Berlin: Springer, 2007.
- [12] MARK S, TORBEN R L. Piezoelectric accelerometer and vibration preamplifier handbook[M]. Copenhagen: Denmark B&K Inc., 1986.