

采用双迭片压电敏感元件的同振柱型 矢量水听器

陈洪娟 洪连进

(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

2002年9月23日收到

摘要 介绍一种采用双迭片作为压电敏感元件的同振柱型矢量水听器, 描述了该矢量水听器的设计方法, 并给出所研制该类型水听器的灵敏度和指向性测试结果。

关键词 矢量水听器, 同振型, 双迭片压电敏感元件

Vector hydrophone of the resonant-column type using a piezoelectric bilaminar sensing element

CHEN Hongjuan HONG Lianjin

(Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract This paper reports on a kind of vector hydrophone of resonant-column type in which a piezoelectric bilaminar are used as the sensing element. Detailed design of the vector hydrophone is described and the experimentally measured sensitivity and directivity characteristics are given.

Key words Vector hydrophone, Resonant-column type, Piezoelectric bilaminar sensing element

1 引言

国内外研究表明, 矢量水听器在水声工程诸多方面具有应用潜力, 如, 由于矢量水听器体积小、重量轻、布放方便, 特别适合于声呐浮标的要求, 是解决低频辐射噪声测试问题的有效途径之一^[1,2]; 美国在 SURTASS 系统中应用矢量水听器, 解决了左右舷模糊问题^[3]; 前苏联利用矢量水听器拖线阵, 系统地研究了矢量水听器拖线阵的姿态、拖曳速度和流噪声对矢量水听器检测性能的影响等^[3]。矢量水

听器的研制目前在美国、俄罗斯等国已基本实现结构系列化和功能实用化可满足不同工程要求, 而在国内经过“八五”“九五”近十年的研究及技术引进也开始走向工程应用阶段。矢量水听器按照结构形式不同可分为双声压式、不动外壳式和同振式三种^[4], 本文作者在吸收、消化俄罗斯同振球形三维矢量水听器制作技术的基础上, 结合传统水声换能器结构特点及工作原理, 设计并制作了采用双迭片作为压电敏感元件的同振柱型矢量水听器, 它具有工作频率低、体积小、结构简单、应用方便等特点, 在

水下低频测量中将有广泛发展前景。

2 同振型结构设计方法

理论研究表明^[5],如果声学刚硬球(或柱)体的几何尺寸远远小于波长(即 $kL \ll 1$, k 是波数, L 是刚硬球(或柱)体的最大线性尺度),则其在水中声波作用下作自由运动时,刚硬球(或柱)体的振动速度幅值 V 与声场中球心(或柱体几何中心)处水质点的振动速度幅值 V_0 之间存在以下关系:

$$V = \frac{3\rho_0}{2\bar{\rho} + \rho_0} V_0 \quad (1)$$

其中: ρ_0 —水介质密度, $\bar{\rho}$ —刚硬球(或柱)体的平均密度。

由公式(1)可知,当刚硬球(或柱)体的平均密度等于水介质密度时,其振动速度幅值 V 与声场中球心(或柱体几何中心)处水质点的振动速度幅值 V_0 相同,这样只要刚硬球(或柱)体内部有可以拾取该振动速度的传感器件即可获得声场中球心(或柱体几何中心)处水质点的振动速度,所以公式(1)是同振型矢量水听器结构设计中的主要依据。

其次,声学刚硬球(或柱)体在水中声波作用下作自由运动时,存在声散射问题,根据理论研究可知^[6],如果声学刚硬球(或柱)体的几何尺寸远远小于波长(即 $kL \ll 1$, k 是波数, L 是刚硬球(或柱)体的最大线性尺度),则刚硬球(或柱)体对声场的干扰可不予考虑,因此, $kL \ll 1$ 的条件是同振型矢量水听器结构设计中的又一主要依据。

3 双迭片结构设计方法

本文设计的同振型矢量水听器内部采用双迭片作为压电敏感元件,该结构在国内同振型矢量水听器设计中首次应用,其结构示意图见图1。双迭片是由粘接在一金属圆垫片上的两片压电陶瓷圆片组成的敏感元件,用它制作的

振动传感器不需要外加质量块,因此与俄罗斯同振球形三维矢量水听器中采用的中心压缩式加速度计相比,它的优点是工作频率低、体积小、质量轻。由公式(1)可知,同振型矢量水听器的设计中内置传感器的质量是很重要的指标,因此作者在同振型矢量水听器的设计中尝试采用双迭片敏感元件以达到体积小、频率低的目的。

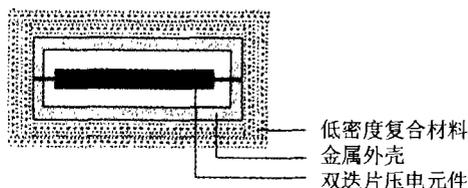


图1 矢量水听器结构示意图

由该矢量水听器的等效电路(图2),可得出其声压灵敏度 M_P (指平面波场)和开路谐振频率 f_{oc} 的表达式^[4]:

$$M_P = \frac{U_{oc}}{P} = \frac{j\omega}{\rho c} \cdot M_a \quad (2)$$

$$f_{oc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_S C_m(1-k^2)}} \quad (3)$$

其中

$$M_a = \frac{U_{oc}}{\dot{a}} = \frac{k^2 \cdot M_s}{N} \cdot \frac{1}{1 - \omega^2 \frac{M_s \cdot C_m \cdot C_b}{C_f}}$$

是矢量水听器的加速度灵敏度;在工作频率远低于谐振频率的低频段,即 $f \ll f_{oc}$ 处,加速度灵敏度 $M_a \approx \frac{k^2 M_s}{N}$,与频率无关,其灵敏度频响曲线呈一平坦曲线。 f_{oc} 和 M_a 的式中,

$k^2 = N^2 \cdot C_m / C_f$ 是有效机电耦合系数;

$M_s = \pi(\rho_b b^2 h_b + \rho_a a^2 h_a)$ 是双迭片弯曲振子质量;

$N = \frac{-24\pi d_{31} h_b \delta^2 t_0 \mu_8}{S_{11}^E (1 - \sigma_a) K_m^{1/2} \mu_{12}}$ 是机电转换系数;

$C_f = \frac{\pi \epsilon_{33}^T a^2 (1 - k_p^2) (1 + \mu_{13})}{h_a}$ ($C_f = N^2 C_m + C_b$, C_b 是静态电容);

$$C_m = \frac{(1 - \sigma_b^2)b^2 K_m \mu_{12}}{16\pi Y_b h_b^3 \mu_1}$$

是恒压时柔顺系数;

a, h_a, ρ_a 和 b, h_b, ρ_b 分别是组成双迭片的压电陶瓷圆片和金属垫片的半径、厚度和密度。以上表达式中其余参数详见文献 [4]。

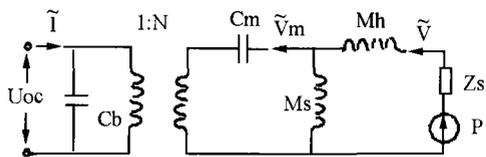


图 2 矢量水听器的等效电路图

根据表达式 (2)、(3), 在选定压电陶瓷及金

属垫片材料参数的情况下, 可确定加速度灵敏度 M_a 和开路谐振频率 f_{oc} 与组成双迭片的压电陶瓷圆片和金属垫片的半径比 (a/b)、厚度比 (h_a/h_b) 之间的关系 (图 3), 从而为双迭片几何参数的设计提供了理论依据。

理论与实践结果证明 [4], “同振型” 矢量水听器的平均密度应近似等于水介质密度, 目前有两种方法可以实现: 一是通过提供足够大的刚性壳体内空间 (即壳体充气体积), 从而实现整体密度的降低; 二是通过附加低密度复合材料外壳的方法来降低整体密度。本文采用后一种方法, 即采用环氧树脂与玻璃微珠的混合物制成的平均密度约为 $\bar{\rho} = 0.65\text{g/cm}^3$ 的低于水介质密度的复合材料制作外壳。

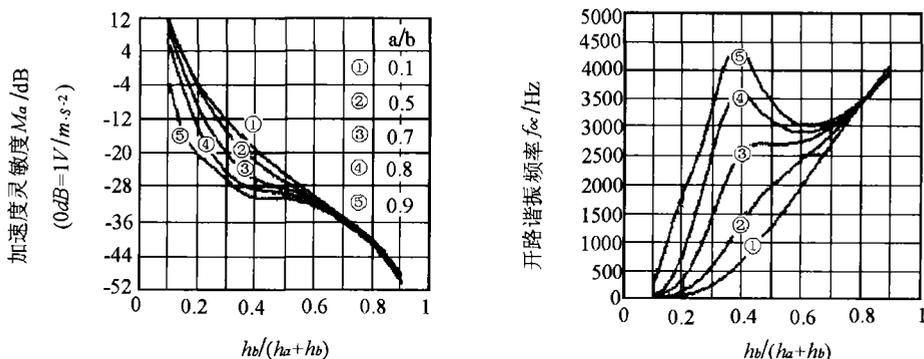


图 3 加速度灵敏度 M_a 和开路谐振频率 f_{oc} 与组成双迭片的压电陶瓷圆片和金属垫片的半径比 (a/b)、厚度比 (h_a/h_b) 之间的关系曲线

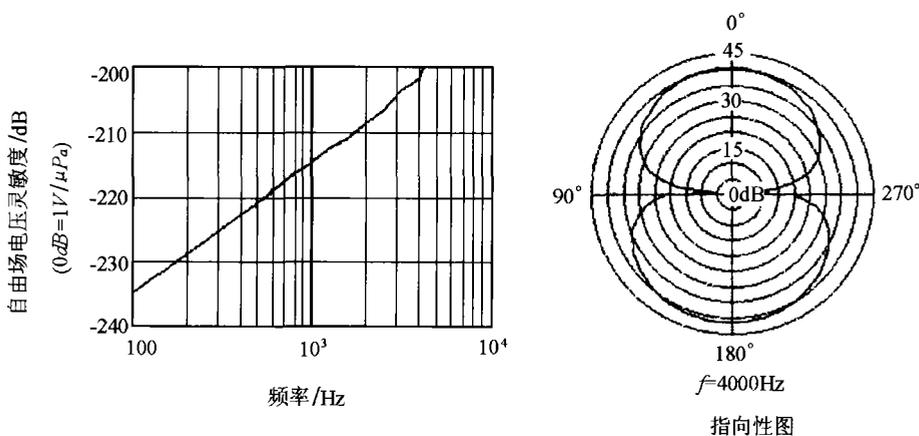


图 4 水听器的自由场电压灵敏度频响曲线和指向性图

4 测试结果

本文作者在非消声水池采用脉冲声技术对该水听器的自由场电压灵敏度和指向性图进行了测量,测量结果见图4。在800-4000Hz频率范围内,指向性图对称性较好,指向性图的表征参数为:分辨力 $k_d > 20\text{dB}$ (灵敏度最大值与最小值之比的分贝数),轴向灵敏度的不对称性 $k\Delta_{\max} \leq 1.5\text{dB}$ ($k\Delta_{\max} = 20\lg \frac{G_{\max}}{G_{180^\circ}}$, G_{180° 为与灵敏度最大值 G_{\max} 相差 180° 的同一轴线上反方向灵敏度值),灵敏度最小值的不对称性 $k\Delta_{\min} \leq 1\text{dB}$ ($k\Delta_{\min} = 20\lg \frac{G_{\min}}{G_{180^\circ}}$, G_{180° 为与灵敏度最小值 G_{\min} 相差 180° 的同一轴线上反方向灵敏度值)。声压灵敏度: -214.5dB ($0\text{dB}=1\text{V}/\mu\text{Pa}$, 测试频率1000Hz)。

5 结论

采用双迭片作为压电敏感元件的同振柱型

矢量水听器是一种新型结构的矢量水听器,其指向性在工作频带内均呈“8”字型,自由场电压灵敏度以每倍频程 $6\text{dB}\pm 1\text{dB}$ 的规律变化,实验结果与根据表达式(2)、(3)计算的结果基本相符。它不仅结构简单,而且体积小(在低频时比采用中心压缩式振动传感器制作的同类水听器体积小近2倍),工作频率低,为矢量水听器在工程上的应用提供了新的选择。

参 考 文 献

- 1 G'Spain G L. Proc. Oceans'92. Newport, Rhode Island. 1992, 346-351.
- 2 Shchurov V A. J. Acous. Soc. Am., 1991, 90(2): 1002-1004.
- 3 孙贵青. 哈尔滨工程大学博士学位论文, 2001, 13-14.
- 4 陈洪娟. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2002, 6-24.
- 5 Захаров Л Н. Акуст. Ж., 1974, 20(3): 393-401.
- 6 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础. 国防工业出版社, 1981: 315-327.

(上接第22页)

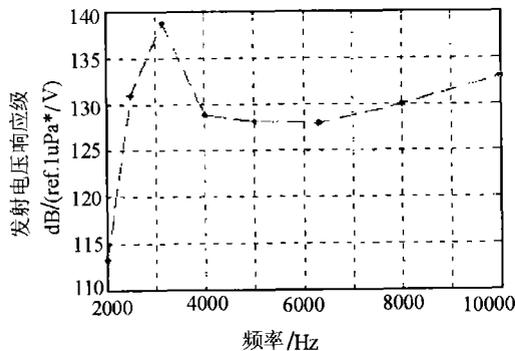


图10 B发射电压响应级

5 分析与讨论

- (1) 研制的凹筒型弯张式换能器实现了低频、小尺寸和大功率的预期技术指标;
- (2) 适当增加压电陶瓷元件的厚度,并采用更好的压电材料,可按 $3.2\text{--}4\text{kV}/\text{cm}$ 施加激励电压,以得到更高的声源级;

(3) 适当减小盖板厚度,并用轻质高强度材料加工端板,可进一步降低换能器重量;

(4) 建立该型换能器等效电路模型,计算的谐振频率与实测结果吻合,适当改变设计参数,可以研制谐振频率更低的发射换能器;

(5) 该型换能器弯张模的等效电阻抗较高,使用时宜配置变压器和相应的功率放大器;

参 考 文 献

- 1 McMahon G W, Jones D F. Barrel-Stave Projector. U.S. patent no.4.922.470, 1990.
- 2 PURCELL C J. Transducers for Sonics and Ultrasonic. Terfenol Driver for the Barrel-stave Projector, 160.
- 3 JONES D F. Transducers for Sonics and Ultrasonic. Flexensional Barrel-Stave Projectors. 150.
- 4 MOFFEIT M B, LINDBERG J F, MCLAUGHLIN E A, et al. Transducers for Sonics and Ultrasonic. An Equivalent Circuit Model for Barrel-Stave Flexensional Transducers, 170.
- 5 高毅品, 蔡志恂, 申扣喜. 声学技术, 2001, 73.