

二维同振柱形组合矢量水听器^{*}

洪连进[†] 陈洪娟

(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

摘要 介绍一种采用两只压电加速度计作为敏感元件的二维同振型组合矢量水听器。叙述了该矢量水听器的设计方法,给出了相应的灵敏度和指向性测试结果。

关键词 矢量水听器, 同振型, 压电加速度计

Two-dimensional combined vector hydrophone of the resonant-column type

HONG Lian-Jin CHEN Hong-Juan

(Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract This paper reports a kind of two-dimensional combined vector hydrophone of resonant-column type in which a piezoelectric accelerometer are used as are 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 accelerometer

1 引言

能测量液体、气体介质声场中质点运动的矢量信号,如位移 $\vec{\xi}(t)\{\xi_x(t), \xi_y(t), \xi_z(t)\}$ 、振速 $\vec{V}(t)\left\{\frac{\partial \xi_x(t)}{\partial t}, \frac{\partial \xi_y(t)}{\partial t}, \frac{\partial \xi_z(t)}{\partial t}\right\}$ 和振动加速度 $\vec{a}(t)\left\{\frac{\partial^2 \xi_x(t)}{\partial t^2}, \frac{\partial^2 \xi_y(t)}{\partial t^2}, \frac{\partial^2 \xi_z(t)}{\partial t^2}\right\}$ 的装置称为声矢量传感器,用于水下的这类传感器称为矢量水听器。随介质质点同振的矢量水听器属于惯性式的,如果在球体或柱体内部沿空间坐标轴

放置位移(振速、加速度)传感器,就可得到同振型矢量水听器。此时当矢量水听器外壳振动时,在矢量水听器三个正交通道的输出端会产生与相应振动分量成正比的电荷或电压。研究结果表明^[1,2]:同振型矢量水听器灵敏度高、灵敏度频响在工作频带内起伏小;指向性图对称性好、零点响应级低,并且体积小、重量轻、布放方便,特别适用于声呐浮标和拖曳阵的要求,是解决低频辐射噪声测试问题的有效途径

2003-12-16 收稿; 2004-12-10 定稿

^{*} 水声技术国防科技重点实验室基金资助项目(5144505104CB0103)

作者简介:洪连进(1965-),女(汉族),哈尔滨人,哈尔滨工程大学水声工程学院教授,博士,主要从事传感器与水声换能器研究。

陈洪娟(1969-),女,副教授,硕士。

[†] 通讯联系人 Email: lj2003hong@yahoo.com.cn

之一。本文结合压电加速度计的特点，将声压水听器与矢量水听器在结构上组合为一体，设计并制作了能同时测量声场中声压信号与振速矢量信号的 V_x 、 V_y 分量的二维同振型柱形组合矢量水听器。

2 理论依据

声学理论研究表明^[2,3]，声学刚硬球(或柱)体的几何尺寸如果远小于声波波长，即 $kL \ll 1$ (k —波数； L —球(柱)体的最大线性尺寸)，则球(或柱)体在水中声波作用下做自由运动时，其振动速度的幅度 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：

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

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

其中 ρ_0 —水介质密度 (kg/m^3)； $\bar{\rho}$ —刚硬球(或柱)体的平均密度 (kg/m^3)。

由式(1)、(2)知，设计矢量水听器时应保证球(柱)体的平均密度 $\bar{\rho}$ 与介质密度 ρ_0 相同，且质心与几何中心重合，因此合理选择传感器及矢量水听器壳体材料，将改善矢量水听器的整体性能。

在同振型矢量水听器设计中，首先应考虑其内部的传感器灵敏度和工作频带，它直接影响矢量水听器的声压灵敏度和工作频带，而传感器的外形尺寸和重量影响着矢量水听器最终的几何尺寸及平均密度，其次外壳的材料密度还应小于介质(水)密度。

3 结构设计

本文设计的二维柱型组合矢量水听器的结构简图如图1所示。图1中1—矢量水听器，具有两个由压电加速度计按 X 、 Y 方向正交分布组成的 X 和 Y 通道，可输出 $\vec{X}_x(t)$ 和 $\vec{V}_y(t)$

信号；2—声压水听器，由压电圆管组成；3—密封层；4—低密度复合材料。

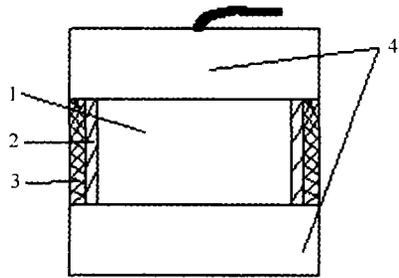


图1 二维组合式矢量水听器结构简图

根据平面波场理论：同振型矢量水听器的自由场电压灵敏度 M_p 与其在水中的振动速度 V 之间存在下列关系^[3]：

$$M_p = \frac{1}{\rho_0 c} \cdot \frac{U_{oc}}{V} = \frac{j\omega}{\rho_0 c} \cdot M_a \quad (3)$$

式中 $Z_0 = \rho_0 c$ 为水的声特性阻抗 (kg/sm^2)； U_{oc} 为矢量水听器的开路输出电压 (V)； M_a 为内置压电加速度计的灵敏度 (V/ms^{-2})。

由式(2)、式(3)可知同振柱形矢量水听器的自由场电压灵敏度 M_p 与其平均密度 $\bar{\rho}$ 之间存在如下关系式：

$$M_p = \frac{1}{\rho_0 c} \frac{\bar{\rho} + \rho_0}{2\rho_0} \frac{U_{oc}}{V_0} = \frac{1}{\rho_0 c} \cdot \frac{\bar{\rho}/\rho_0 + 1}{2} \cdot \frac{U_{oc}}{V_0} \quad (4)$$

根据式(4)可得出在不同的比值 $\bar{\rho}/\rho_0$ 时的自由场电压灵敏度 M_p 与 $\bar{\rho} = \rho_0$ 时自由场电压灵敏度差值 $\Delta M_p = \frac{1}{\rho_0 c} \cdot \frac{U_{oc}}{V_0} \cdot \frac{\bar{\rho}/\rho_0 - 1}{2}$ 在对数坐标下的关系曲线(如图2所示)。

为了使矢量水听器在介质中振动的振速更趋近于介质质点的振速，根据式(2)矢量水听器的平均密度应首先满足趋近于介质密度的条件，即 $\bar{\rho} \approx \rho_0$ ，这样才能保证矢量水听器的同振条件。其次，由图2曲线可知：当矢量水听器的平均密度与介质密度比值 $\bar{\rho}/\rho_0$ 在(0.6~1.5)之间变化时，矢量水听器的自由场电压灵敏度与 $\bar{\rho} = \rho_0$ 时自由场电压灵敏度差值 ΔM_p 的变化范围在 $\pm 2\text{dB}$ 之内，也就是介质中矢量水听

器的振动速度与水质点的振动速度的差值小于 $\pm 2\text{dB}$, 满足工程设计要求。

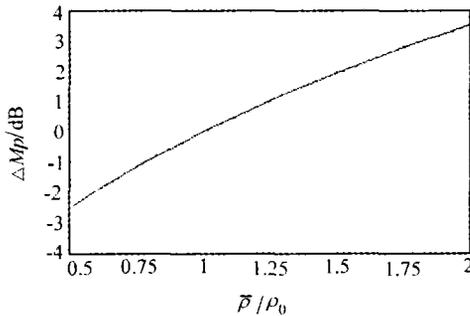


图 2 矢量水听器自由场电压灵敏度与 $\bar{\rho}/\rho_0$ 之间的关系曲线

矢量水听器振速通道选用国产压电式内置集成电路加速度计: 加速度灵敏度为 100mV/g ; 工作频带 $0.5\sim 5000\text{Hz}$ (灵敏度频响曲线起伏 $\pm 1\text{dB}$); 横向灵敏度小于 5% , 即为 5mV/g 。矢量水听器外壳采用环氧树脂与玻璃微珠混合物, 混合物密度约为 650kg/m^3 。外壳直径 50mm 、高 50mm , 其上限工作频率为 1000Hz , 两个振速通道的声压灵敏度为 -206dB (测试频率 1kHz , $0\text{dB re } 1\text{V}/\mu\text{Pa}$), 声压通道的灵敏度为 -190dB 。

4 测试结果

对二维柱形组合矢量水听器在非消声水池中采用脉冲法进行测试, 得到的振速通道的灵敏度示于表 1, 声压通道灵敏度为 -190dB 。图

表 1 振速通道灵敏度 (dB)

通道	800Hz	1000Hz
X	-208	-207
Y	-210	-208

3 给出了 X 通道 800Hz 时的 XOY 平面的指向性图。

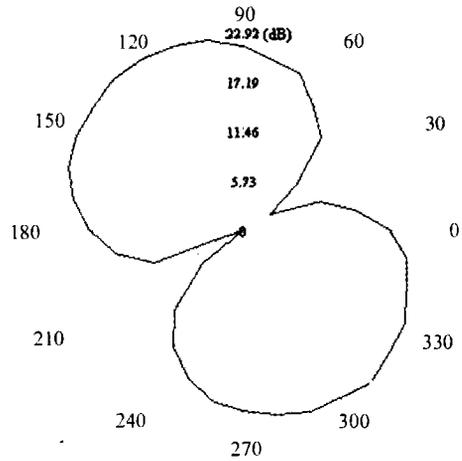


图 3 振速 X 通道在 800Hz 时的指向性图

5 结论

采用压电加速度计及压电圆管成功地设计并制作了二维柱形组合矢量水听器, 实现了同时测量声场中质点声压信号与振速信号的目的。测试结果表明: 合理设计矢量水听器内部振子, 特别是采用小型压电加速度计, 可以解决矢量水听器小型化问题。若选用体积小、灵敏度更高的加速度计, 采用本文的结构, 矢量水听器的灵敏度将进一步提高。

参 考 文 献

- 1 Shchurov V A. *J. Acoust. Soc. Am*, 1991, **90**(4): 1002~1004.
- 2 Захаров Л Н, Ржевкин П Н. *Акуст. Ж.*, 1974, **20**(3): 393~401.
- 3 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础. 国防工业出版社, 1981:327.