

中频小型矢量水听器设计研究^{*}

陈洪娟[†] 杨士莪 王智元 洪连进

(哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

摘要 中频小型同振式矢量水听器采用低密度复合材料作为矢量通道外壳, 压电加速度计作为内部振动传感器, 以拾取水下声场中的矢量信息。与以往同振式矢量水听器设计不同的是每个矢量通道中只放置一只压电加速度计, 这样, 不仅减小了矢量水听器的体积, 降低了水听器的整体平均密度, 而且消除了以往同振式矢量水听器设计中矢量通道采用两只配对传感器而引起的相位不一致给矢量水听器定向带来的影响。而声压通道采用 PVDF 压电薄膜作为敏感元件, 以拾取水下声场中的标量信息。

关键词 矢量水听器, 同振式, 中频

Design a medium frequency-small size vector hydrophone

CHEN Hong-Juan YANG Shi-E WANG Zhi-Yuan HONG Lian-Jin

(Harbin Engineering University, HEU, Harbin 150001)

Abstract A medium frequency-small size vector hydrophone of co-vibrating type is wrapped with low density compound material and in shuck only one piezoelectric ceramic accelerator is used for each channel to measure the vector components of the underwater acoustic field. As a result, not only the hydrophone volume can be diminished, the average density of the hydrophone decreased, but also the phase mismatch between accelerator pair, which was used in old design, can be eliminated. A PVDF piezoelectric membrane is used as sensitive element for measuring the scalar pressure of the underwater sound field.

Key words Vector hydrophone, Co-vibrating type, Medium frequency

1 引言

目前, 国内在矢量水听器研制方面的发展

十分迅速, 低频三维球形和二维柱形矢量水听器已经开始应用于工程实际, 如, 警戒声纳浮标系统、低噪声测量系统等。近年来矢量水听

2005-04-13 收稿; 2006-07-22 定稿

^{*} 哈尔滨工程大学基础研究基金资助项目 (HEUFP05017)

作者简介: 陈洪娟 (1969-), 女, 河北抚宁, 副教授, 博士, 主要从事水声换能器与水声测量方面的研究。

杨士莪 (1931-), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士。王智元 (1943-), 男, 研究员。洪连进 (1965-), 女, 教授, 博士。

[†] 通讯联系人 Email: chenhongjuan@hrbeu.edu.cn

器的应用技术研究表明，其在水声工程领域具有较大的应用潜力，它的体积小，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。目前，基于矢量水听器的成阵技术的研究也已经取得了较快的发展。本文作者在研究低频同振式矢量水听器制作技术的基础上，结合矢量水听器基本理论，采用新结构、新材料，设计并制作了中频柱型矢量水听器，它具有工作频带宽、结构简单、体积小、指向性好等特点，在水下测量中将有广泛发展前景。

2 同振柱型矢量水听器的结构优化设计方法

同振式矢量水听器的基本理论研究表明^[1,2]，如果同振柱形矢量水听器的几何尺寸远远小于波长，即 $ka \ll 1$ ， k 是波数， a 是矢量水听器的半径，则其在水中声波作用下作自由运动时，矢量水听器的振动速度 v 与声场中柱体几何中心处水质点的振动速度 v_0 之间的幅值和相位有如下关系：

$$\begin{cases} \frac{V}{V_0} = \left| \frac{v}{v_0} \right| = \frac{2\rho_0}{\bar{\rho} + \rho_0} \\ \Delta\phi \rightarrow 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中： ρ_0 水介质密度， $\bar{\rho}$ 矢量水听器的平均密度， $\Delta\phi$ 矢量水听器的振动速度 v 与声场中柱体几何中心处水质点的振动速度 v_0 之间相

位差。

由公式 (1) 可知，如果满足 $ka \ll 1$ 的条件，则当矢量水听器的平均密度 $\bar{\rho}$ 等于水介质密度 ρ_0 时，其振速幅值 V 与声场中柱体几何中心处水质点的振速幅值 V_0 相同，而它们之间的相位差 $\Delta\phi$ 趋于零，这样只要刚性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柱体几何中心处水质点的振动速度，因此国内外在低频同振式矢量水听器的结构设计中一直以公式 (1) 为主要理论设计依据。

根据表达式 (1) 设计同振柱形矢量水听器，原理简单、计算方便，但是水听器的波尺寸需要满足 $ka \ll 1$ 的条件，即 $a \ll \frac{\lambda}{6}$ ，而这一条件在工程上难以真正实现，特别是中、高频情况下，表 1 列出了同振式矢量水听器上限工作频率与其几何尺寸之间的数值关系。

从上表可以看出：当同振式矢量水听器工作频率上限为 10kHz 时，波长为 150mm，则在工程上， a 应取 2.5mm~5mm 左右，这一条件采用传统工艺根本无法实现，为此我们对同振式矢量水听器的振动速度 v 、波尺寸 ka 、平均密度 $\bar{\rho}$ 与水质点的振动速度 v_0 之间的关系进行了理论研究，得出如下关系式^[3]：

$$\frac{v}{v_0} = \frac{4}{j(ka)^2\pi\frac{\bar{\rho}}{\rho_0}\frac{dH_1^{(2)}(ka)}{d(ka)} + \pi(ka)H_1^{(2)}(ka)} \quad (2)$$

表 1 同振式矢量水听器上限工作频率与其几何尺寸之间的数值关系

| 水听器上限工作频率 | f_H | 10Hz | 100Hz | 1kHz | 5kHz | 10kHz | 20kHz |
|-----------|---------------------------|------|-------|-------|------|-------|--------|
| 相应波长 | λ | 150m | 15m | 1.5m | 0.3m | 0.15m | 75mm |
| 水听器最大线度尺寸 | $a \ll \frac{\lambda}{6}$ | 25m | 2.5m | 0.25m | 50mm | 25mm | 12.5mm |

图 1 是根据表达式 (2) 得出的同振柱形矢量水听器振动速度与被测水质点振动速度之比的幅值和相位与水听器的波尺寸和平均密度之间的关系曲线。

由图 1 可以看出：在同振柱形矢量水听器的设计中，当水听器的灵敏度和相位一致性要求允许时，可以通过适当选取同振式矢量水听

器的整体平均密度来放宽矢量水听器的波尺寸 ka 的范围，这对于中、高频矢量水听器的设计十分有力。本文作者根据图 1 设计出上限工作频率为 10kHz 的中频同振柱形矢量水听器样品的结构参数为： $a = 25\text{mm}$ ，即 $a/\lambda = 1/6$ ，从图中可知此时如果选取矢量水听器平均密度 $\bar{\rho} = 0.8 \sim 1.4\rho_0$ ，则矢量水听器的振速 v 与

被测水质点的振速 v_0 之间的相位差值 $\Delta\phi$ 在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 之内, 而矢量水听器的振速 v 与被测水质点的振速 v_0 之间的幅值比约为 0.7, 这样就在水听器的灵敏度和相位一致性误差允许范围内通过适当选取同振式矢量水听器的整体平均密度实现了扩大水听器波尺寸的目的, 从而为中、高频同振式矢量水听器的研制提供理论设计依据。

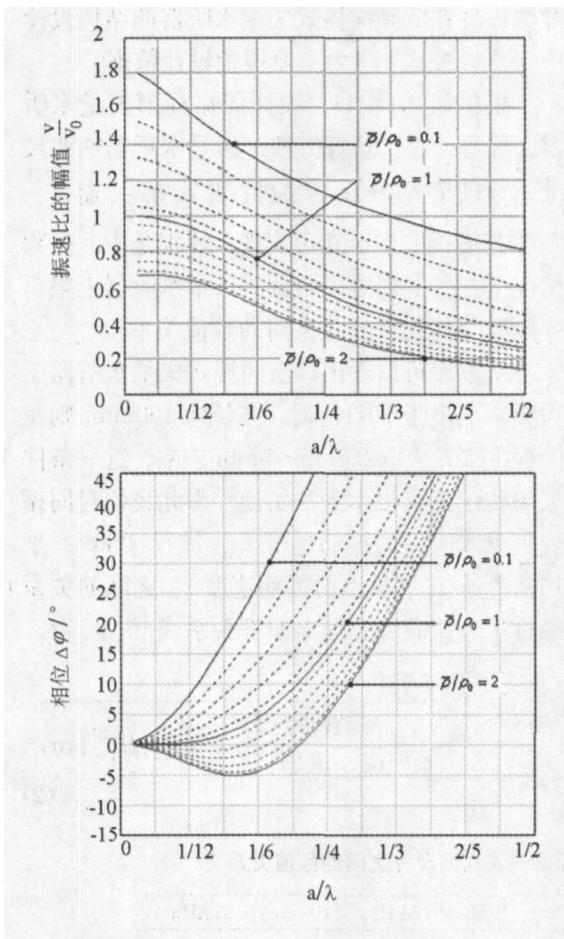


图1 同振柱形矢量水听器振动速度与被测水质点振动速度之比的幅值和相位特性曲线

3 矢量水听器的结构设计

根据上述分析可知, 同振式矢量水听器的整体平均密度能否满足设计要求对于水听器的性能影响较大。为此, 本文设计的矢量水听器(图2)在每个矢量通道上仅放置一只振动传感

器, 而声压通道采用 PVDF 压电薄膜作为敏感元件, 以降低矢量水听器的整体平均密度及减小体积。这样, 不仅满足了水听器的灵敏度和相位一致性的要求, 而且由于避免了原来低频矢量水听器矢量通道采用两只配对传感器设计而带来的相位误差^[4], 从而提高了使用矢量水听器进行定位的精度要求。

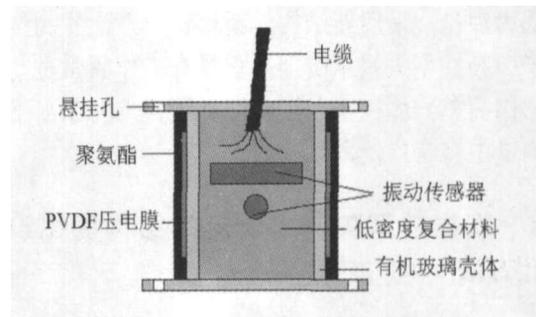


图2 中频同振式矢量水听器结构示意图

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3、图4。

从图3可以看出: (1) x 、 y 通道自由场电压灵敏度 M_P 在 8000Hz 时均为 -210dB ($0\text{dB re } 1\text{v}/\mu\text{Pa}$), 其随频率的变化基本符合每倍频程增加 6dB 的规律; (2) 声压通道自由场电压灵敏度 M_P 在 500Hz~16kHz 频段内大约为 -230dB ($0\text{dB re } 1\text{v}/\mu\text{Pa}$), 灵敏度起伏在 $\pm 2\text{dB}$ 以内。

图4是采用弹簧悬挂方式下测得的矢量水听器样品在 2.5~8kHz 频段内的指向性图, 指向性指数 $kd \geq 20\text{dB}$, 指向性图与余弦指向性图的偏差 $\Delta \leq 2\text{dB}$, 主轴方向最大灵敏度的不对称性 $k\Delta_{\text{max}} \leq 2\text{dB}$, 与主轴垂直方向最小灵敏度的不对称性 $k\Delta_{\text{min}} \leq 2\text{dB}$ 。另外 y 通道的指向性图比 x 通道稍差, 原因是: y 通道位于输出电缆一端。由于输出电缆较粗、柔顺性差, 因此输出电缆在同振式矢量水听器悬挂系统中对矢量水听器的自由振动影响较大, 所以接近电缆输出端的矢量通道的指向性受其影响

较大, 通过实验证实了这一点。

5 结论

根据同振式矢量水听器的波尺寸 ka 、平均密度 $\bar{\rho}$ 与水质点的振动速度 v_0 之间的关系曲线设计的中频小型矢量水听器, 不仅结构简

单、体积小、重量轻, 而且相位特性简单, 其指向性在工作频带内均呈良好“8”字型, 自由场电压灵敏度基本以每倍频程 $6\text{dB}\pm 1\text{dB}$ 的规律变化, 实验测试结果与文献 [3] 中理论计算的结果基本相符, 为中、高频同振式矢量水听器在工程上的应用提供了参考依据。

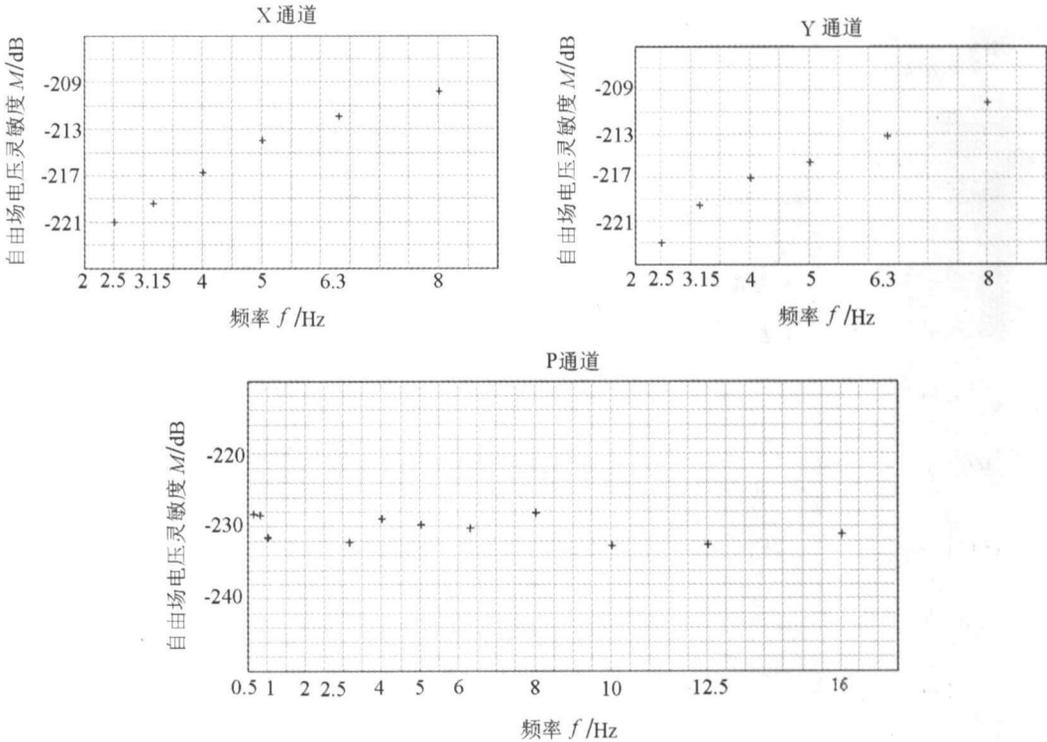
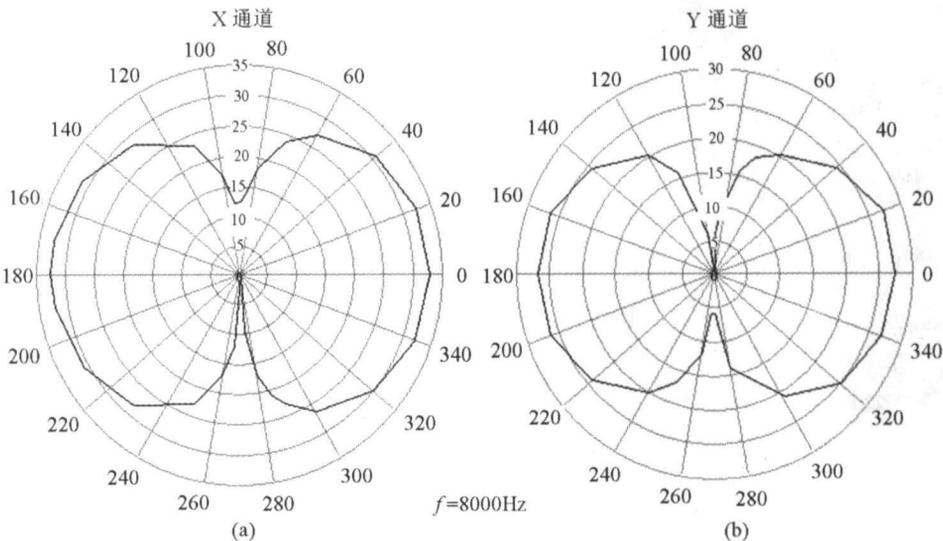
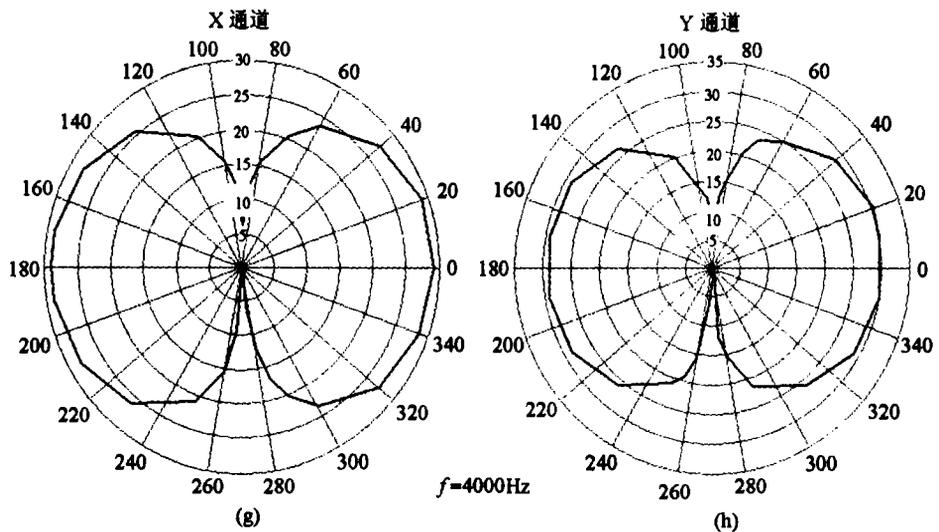
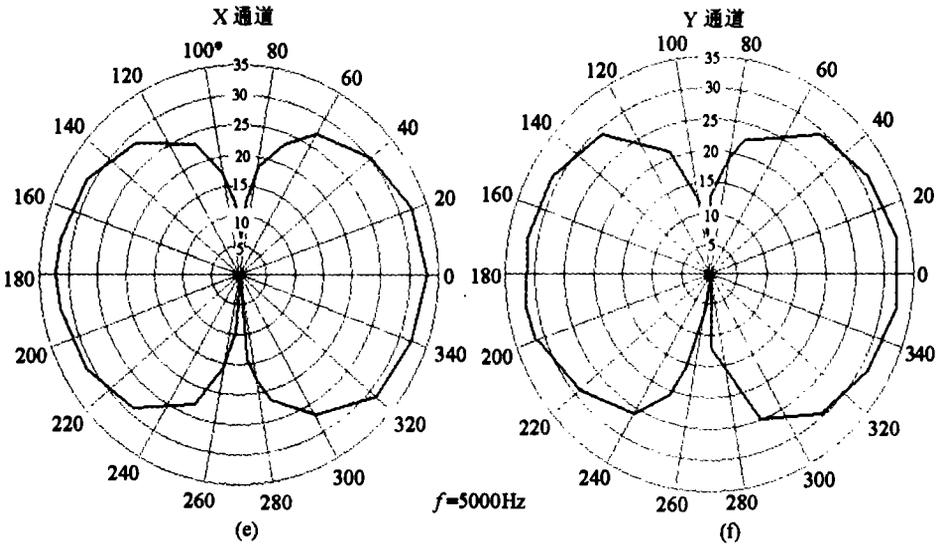
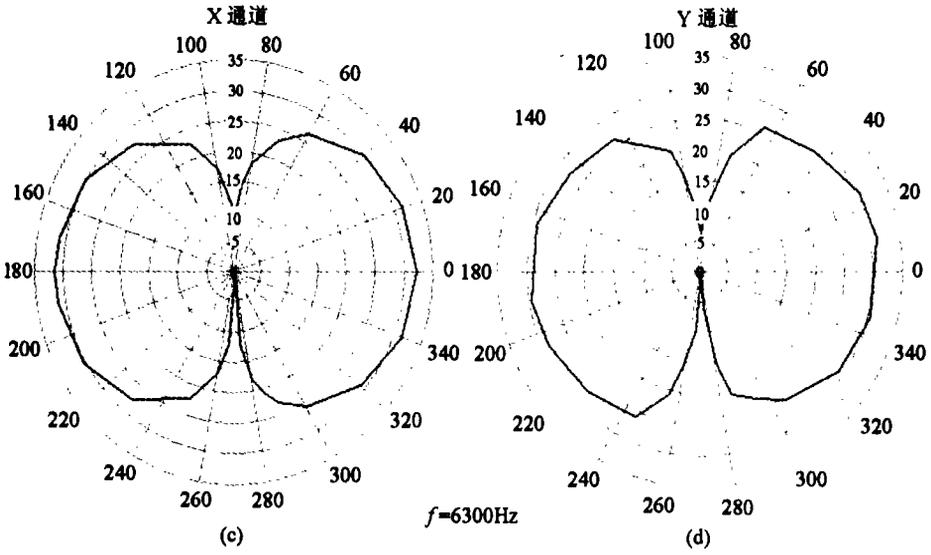


图 3 矢量水听器自由场电压灵敏度曲线





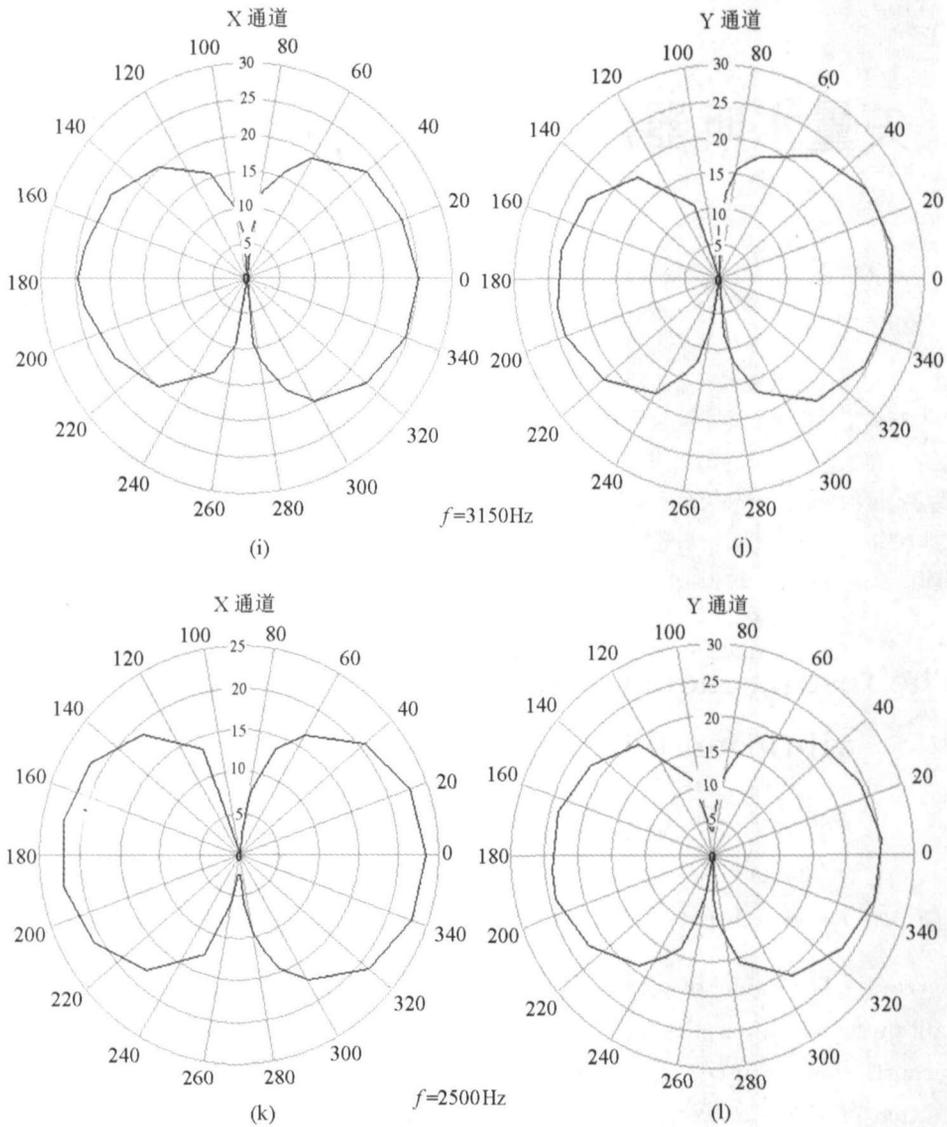


图 4 采用弹簧悬挂情况下的矢量水听器样品 x 、 y 通道指向性图

参 考 文 献

1 Ржевкин С. Н. Вестник московского университета, 1971, 10(4):52~61.

2 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础. 北京: 国防工业出版社, 1981, 315~327.

3 陈洪娟. 哈尔滨工程大学博士学位论文, 2005, 36~38.

4 贾志富. 应用声学, 2001, 20(4):34~39.