

水声通讯仪换能器系统的研制*

王清池

(厦门大学亚热带海洋研究所 361005)

提要 利用溢流式换能器的液腔振动和径向振动耦合原理获得较宽的频率响应;采用声反射系统使换能器在垂直方向形成高指向性,换能器的方向性指数增加 22 dB.

关键词 水声通讯仪,溢流式换能器,耦合振动

* 水声通讯仪是为 300 m 船用饱和潜水系统研制的,用于潜水钟和母船间应急状态下通讯。根据水声通讯仪特殊的工作状态和功能要求,300 m 饱和潜水系统水声通讯仪要求起耳目作用的换能器具有大功率、宽频带、在垂直方向形成高指向性的特点,并能在 300 m 水深内正常工作。为此,300 m 饱和潜水系统水声通讯仪的换能器系统采用溢流式换能器和在其外侧装伞形反射器组成。

1 换能器的特点

1.1 宽频率、低 Q_m 值

圆柱型径向极化的压电陶瓷在电场的激励下,可激发轴向、径向、厚度等振动模式,工作于哪种振动模式,取决于圆柱型压电陶瓷的尺寸。假设圆柱的壁厚 t 很薄, t 的大小远小于径长耦合振动在谐振时的工作波长 λ , 即 $t \ll \lambda$, 此时,在电场激励下,只存在对称于 Z 轴的径向振动及沿 Z 轴的纵振动。圆柱的径向振动由圆管的平均半径 a 和材料特性决定,其径向共振频率为

$$f_y = \frac{1}{2\pi a} \left(\frac{Y^E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, a 为圆管的平均半径; Y^E 为压电陶瓷的弹性模量; ρ 为压电陶瓷材料的密度。

圆柱沿 Z 轴的纵振动由圆柱的高度 h 和材料特性决定,其纵向共振频率为

$$f_z = \frac{1}{2h} \left(\frac{Y^E}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

由于自由溢流式换能器其内腔可进海水,在工作时,内腔仍是谐振腔,液腔振动主要决定于腔体的尺寸(圆柱的高度和内半径)。M cm ah on(1964)指出,液柱的共振频率为

$$f_c = \frac{C}{\Phi_i \pi} [1 + B \Phi_i / (Y^E t)]^{\frac{1}{2}} \cdot \Omega \quad (3)$$

式中, C 为水中声速; Φ_i 为圆管的内径; B 为水的体积弹性模量; t 为管壁厚; Y^E 为材料的弹性模量; Ω 满足下列方程:

$$\Omega \left(\frac{h}{2a} + 0.633 \right) - 0.106\Omega^2 = \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

式中, a 为圆管平均半径; h 为圆管高度。

从上述振动模式的分析可知,各振动模式间的耦合程度主要取决于圆管高度 h 与平均直径 D_m 之比 $\frac{h}{D_m}$ 。当圆管 h 很短时,耦合振动很弱,换能器在弱耦合状态下的频率响应为单峰曲线。随着圆管高度与直径之比 $\frac{h}{D_m}$ 的增大,耦合逐渐增强,频带展宽。实验表明,

当 $\frac{h}{D_m} \geq 0.5 \sim 0.6$ 时,径向振动与液腔振动耦合,频响曲线就明显地出现双峰现象,其峰值频率分别接近液腔谐振频率和径向谐振频率,随着 $\frac{h}{D_m}$ 的进一步增大,两峰之间的距离随之增大,而且液腔谐振的幅值也愈来愈低于径向谐振的幅值,径向振动与液腔振动耦合减弱,若 $\frac{h}{D_m}$ 的比值再增大,致使轴向振动的谐振频率与径向振动的谐振频率接近时,就产生圆管的径长耦合振动,其频率方程为^[1]

$$\omega(\omega^2 - \omega_r^2)(\omega^2 - \omega_l^2) = \sigma^2 \omega^4 \quad (5)$$

式中, ω 为径长耦合振动角频率; ω_r 为径向谐振角频率; ω_l 为轴向谐振角频率; σ 为压电陶瓷材料的泊松比。

当 $\omega = \omega_r$, 即 $\pi a = h, (\frac{h}{D_m} = \frac{\pi}{2})$ 时

$$\omega = \omega_l = \frac{1}{a} \frac{\sqrt{Y^E}}{\rho(1 - \sigma)} = \frac{\pi}{h} \frac{\sqrt{Y^E}}{\rho(1 - \sigma)} \quad (6.1)$$

* 中国船舶工业总公司武昌造船厂资助项目
收稿日期:1997-09-17

$$\omega = \omega_2 = \frac{1}{a} \frac{Y^H}{\rho(1+\sigma)} = \frac{\pi}{h} \frac{Y^H}{\rho(1+\sigma)} \quad (6.2)$$

此时表明,圆柱产生强烈的径长耦合振动,它存在两个共振峰。由径长耦合振动频率方程理论计算可得出,当 $\frac{h}{a} < 2$ 或 $\frac{h}{a} > 5$ 时,径长耦合程度就减弱。

由压电陶瓷圆柱的振动模式和耦合振动的分析可知,通过合理地设计压电陶瓷圆柱的尺寸,恰当地利用这些振动模式的相互耦合,可以获得较宽的频率响应。

1.2 高比声功率

换能器的辐射声功率为^[2]

$$Pa = \frac{k_{\text{eff}}^2 \eta_{a/m} \omega_r \theta_m \bar{U}_{e_{\text{max}}}}{1 - k_{\text{eff}}^2} \quad (7)$$

式中, k_{eff} 为有效机电耦合系数; $\eta_{a/m}$ 为机声效率; ω_r 为谐振角频率; θ_m 为机械品质因数; $\bar{U}_{e_{\text{max}}}$ 为换能器最大允许贮存电能。

因此,换能器的比声功率为

$$\frac{Pa}{S} = \frac{k_{\text{eff}}^2 \eta_{a/m} \omega_r \theta_m (\mu_e)_{\text{max}} \nabla_c}{1 - k_{\text{eff}}^2} \quad (8)$$

式中, $(\mu_e)_{\text{max}} \cdot \nabla_c = \bar{U}_{e_{\text{max}}}$; ∇_c 为压电陶瓷的体积; $(\mu_e)_{\text{max}}$ 为换能器单位体积允许贮存的电能; S 为辐射面积。

对于圆环换能器

$$\theta_m = \frac{\bar{M} \omega_r}{R_m + R_s} = \frac{\rho_{\text{晶}} \nabla_c \omega_r}{R_m + R_s} = \frac{\rho_{\text{晶}} \nabla_c \omega_r \eta_{a/M}}{R_s} = \frac{\rho_{\text{晶}} \nabla_c \omega_r \eta_{a/M}}{(\rho_c)_{\text{水}} S}$$

$$\text{因此, } \frac{\eta_{a/M} \omega_r \nabla_c}{S} = \frac{\theta_m (\rho_c)_{\text{水}}}{\rho_{\text{晶}}}$$

$$\text{所以, } \frac{Pa}{S} = \frac{k_{\text{eff}}^2}{1 - k_{\text{eff}}^2} (\mu_e)_{\text{max}} \theta_m^2 \frac{(\rho_c)_{\text{水}}}{\rho_{\text{晶}}} \quad (9)$$

式中, $(\rho_c)_{\text{水}}$ 为水介质的特性阻抗; $\rho_{\text{晶}}$ 为压电材料的密度。

PZT 压电材料 $(\mu_e)_{\text{max}} = 1200$ 个/ m^3 , 利用圆环的径向振动模式 $k_{31} = 0.4$, $\rho_{\text{晶}} = 7.5$ g/cm^3 , 若 $\theta_m = 2$, 可得比声功率 $\frac{Pa}{S} = 12$ W/cm^2 。因此, PZT 压电陶瓷圆环制成溢流式换能器具有较高的比声功率, 适合作深水大功率发射器。

1.3 利用反射器, 形成高指向性

自由溢流式换能器在水声通讯仪发射机电信号的激励下产生径向振动, 为了在垂直方向上获得高指向性, 在自由溢流式换能器的外侧装有用硬铝材料制成的伞形反射器, 溢流式换能器径向振动发出的声波由水介质传播到反射器, 由于水介质的声特性阻抗

$Z_{\text{水}} = (\rho c)_{\text{水}} = 1.50 \times 10^5$ $\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 铝的声特性阻抗 $Z_{\text{铝}} = (\rho c)_{\text{铝}} = 17.1 \times 10^5$ $\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, 铝的声特性阻抗为水的声特性阻抗的 11 倍。根据声波在两种不同特性阻抗的介质传播的反射原理^[3], 溢流式换能器径向振动发出的声波通过水介质入射到铝制的反射器, 经反射器的反射, 声波集聚到垂直方向上, 在垂直方向形成高的指向性。

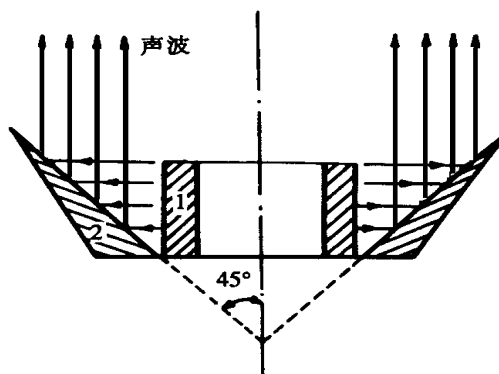


图1 溢流式换能器和声反射罩

1. 溢流式换能器; 2. 声反射罩

Fig. 1 Pinger transducer and the cowling of acoustic reflection

1. Free-flooded transducer; 2. The cowling of acoustic reflection

表1 换能器的发射灵敏度-频率特性及接收灵敏度-频率特性

Tab. 1 Emission sensitivity-frequency response and receiving sensitivity-frequency response of the transducer

频率 (kHz)	发射灵敏度(dB) (基准值 $1 \mu\text{Pa} \cdot \text{m}/\text{V}$)	接收灵敏度(dB) (基准值 $1 \text{V}/\mu\text{Pa}$)
8	125.4	-189.5
9	125.9	-189.7
10	125.5	-188.6
11	125.9	-188.7
12	126.9	-188.5
13	127.3	-188.4
14	127.7	-188.7
15	128.4	-188.9
16	128.3	-189.8
17	127.9	-192.0
18	126.9	-192.5

2 实验结果

300 m 饱和潜水系统水声通讯仪用 PZT-8 压电

陶瓷圆环构成的溢流式换能器,圆环的内壁和上下端面用透声性能良好的聚氨酯胶灌封,外径 Φ 为 84,内径 ϕ 为 54,圆环高 h 为 38,上下腔口对称,利用圆环灌封胶层固定在声反射器上,符合简支边界条件,圆环的高度与直径之比 $\frac{h}{D_m} = 0.55$,按 McMahon 理论,圆环的径向振动与液腔振动产生耦合振动,频响出现双峰,其峰值的频率分别接近液腔谐振频率和径向谐振频率。由公式(1)~(4)计算得液腔谐振频率 $f_c \approx 8 \text{ kHz}$,径向振动谐振频率 $f_r = 13.6 \text{ kHz}$,与实测结果基本相符合。由于两种振动的耦合使该换能器有较宽的频率响应,该换能器于 1994 年 12 月经中国船舶工业总公司 721 厂测量,其发射灵敏度-频率特性,接收灵敏度-频率特性分别列于表 1。

由表 1 可以看出,该换能器在 8 kHz 至 18 kHz 频率范围内,发射灵敏度大于 125 dB,起伏小于 3 dB。其发射响应较好。在 8 kHz 至 16 kHz 频率范围内,接收灵敏度为 -188.4 dB ~ -189.8 dB,起伏小于 1.5 dB,是较好的宽带接收换能器。

测量该溢流式换能器及其反射系统的方向性,测量结果表明,利用声反射器,使声波集中,在垂直方向形成高指向性,其波束角为 6° 左右,换能器的方向性指数增加 22 dB。

该换能器系统用于 300 m 饱和潜水系统水声通

讯仪,经海上多次实验证明,其性能良好,水声通讯仪于 1996 年 4 月份通过了有关单位专家组的验收。

3 结束语

利用自由溢流式换能器的液腔振动和径向振动相耦合的原理获得较宽的频率响应。采用声反射系统使换能器在垂直方向形成高指向性,增加换能器的方向性指数,这种结构简单、制作方便的换能器系统除本文介绍的用于 300 m 船用饱和潜水系统水声通讯仪外,还用于作者承担的大深度触底指示器,水下多媒体设备等项目,实验表明,这种形式的换能器系统是一种具有良好深水性能适宜深海使用的宽带换能器。

参考文献

- 1 周福洪。水声换能器及基阵。北京:国防工业出版社,1984。87~90
- 2 袁易全。超声换能器。南京:南京大学出版社,1992。273~276
- 3 何祚镛、赵玉芳。声学理论基础。北京:国防工业出版社,1981。148~155

MANUFACTURE OF THE TRANSDUCER SYSTEM FOR THE ACOUSTIC COMMUNICATION METER

WANG Qing-chi

(Institute of Subtropical Oceanography, Xiamen University, 361005)

Received: Sep. 17, 1997

Key Words: Acoustic communication meter, Free-flooded transducer, Coupled vibration

Abstract

The manufacture and experimental results of the transducer system for the acoustic communication meter have been introduced in this paper. A wider frequency response has been obtained by using the coupled principle of the liquid-cavity vibration and the radial vibration of the free-flooded transducer, and a higher directivity has been formed at the vertical direction of the transducer by using the acoustic reflection system so that the directivity index of the transducer can be increased by 22 dB.