

薄壁球形导流罩对矢量水听器接收性能的影响*

时胜国^{1†} 杨德森¹ 陈志刚^{1,2}

(1 哈尔滨工程大学水声工程学院 哈尔滨 150001)

(2 海军第四试验区 450 所 湛江 524006)

摘要 在实际使用时,为了减小流噪声对矢量水听器的影响,将其放置在流线型较好的导流罩内,因此对导流罩内矢量声场的计算是非常必要的。以水下弹性球壳为研究对象,从理论上研究了弹性薄球壳声透射对矢量水听器声场测量的影响;推导了平面声波对弹性球壳声透射的矢量声场数学表达式,计算了不同壳体参数下内充水弹性球壳的声透射矢量声场对矢量水听器各通道声波接收响应幅值和相位以及各通道接收指向性的影响。理论分析表明,弹性薄球壳透射声场对矢量水听器接收声场的影响与壳体机械阻抗和水听器安装位置密切相关,水听器安装偏差对其声场测量影响比较大。

关键词 矢量水听器,弹性薄球壳,近场声透射,声场测量

Influence of thin walled spherical dome on the receiving performance of vector hydrophone

SHI Sheng-Guo¹ YANG De-Sen¹ CHEN Zhi-Gang^{1,2}

(1 College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

(2 Navy the Fourth Test Base, Zhanjiang 524006)

Abstract In the practical engineering, a vector hydrophone (VH) is usually put in a dome to reduce the flow noise. It is necessary to investigate the sound vector field in the dome. On the base of the theory of transmission of sound plane wave through a elastic spherical shell, the influence of sound transmission on the results of the VH measurement is studied in theory. The expression of the sound vector field in the spherical shell and its influence on the amplitude and phase of the receiving response and the receiving directivity pattern of the VH are calculated. The theoretical analysis shows that the influence of sound transmission of the spherical shell on the receiving sound field of the VH arises mainly from the mechanical impedance of the shell and the installation position of the hydrophone where any erroneous installation affects to larger extent the results of measurement of the hydrophone.

Key words Vector hydrophone, Elastic thin spherical shell, Sound transmission, Sound field measurement

2008-04-10 收稿; 2008-08-14 定稿

*水声技术国防科技重点实验室基金资助项目(9140C20020 4060C2003)

作者简介:时胜国(1973-),男,黑龙江省肇东市人,教授,博士,研究方向:水声工程,矢量声学。

杨德森(1957-),男,教授,博士,博士生导师。 陈志刚(1980-),男,助理工程师,硕士研究生。

†通讯作者:时胜国, E-mail: shishengguo@yahoo.com.cn

1 引言

矢量水听器作为一种新型水声测量设备, 它逐渐被广泛地应用于水声各个领域。当矢量水听器在水中使用时, 它会不可避免地受到流噪声的影响。理论和实验研究表明, 在同样的流速条件下, 振速水听器低频段的噪声级明显地高于声压水听器, 换句话说, 振速水听器对湍流噪声比较敏感; 对于球型惯性水听器而言, 尺度大的要比尺度小的对其表面的湍流和尾流更为不敏感; 如果外裹橡胶层则可以显著降低流噪声^[1-3]。

在实际使用中, 为了避免流噪声对矢量水听器测量的影响, 经常将矢量水听器放置在流线型较好的导流罩内, 导流罩与外部海水贯通, 以保证矢量水听器能够正常工作。在水声领域, 对于导流罩的研究涉及材料力学、流体力学、结构力学、声学、制造工艺等^[4-9], 但保证导流罩高透声性能是设计关键。随着矢量水听器在水声工程中的应用, 人们也越来越关注导流罩内矢量声场特性。本文以弹性球壳为研究对象, 定性分析平面声波通过弹性球壳的透射矢量声场的特点及其对矢量水听器声压和各振速分量幅值、相位和指向性的影响, 为矢量水听器的工程应用提供理论指导和依据。

2 平面声波通过弹性球壳的透射声场

令坐标系的原点和弹性球壳的球心重合, 并取 x 轴与入射平面波的传播方向一致, 弹性球壳内外半径分别为 a_1 和 a_2 , 球壳内外区域介质密度分别为 ρ_1 和 ρ_2 , 声传播速度分别为 c_1 和 c_2 , 见图 1 所示。一般, 壳体外部为流体介质, 壳体内部为流体介质或空气。

取入射平面波声压为:

$$p_i = p_0 \sum_{n=0}^{\infty} (-i)^n (2n+1) j_n(k_2 r) P_n(\cos \theta) \quad (1)$$

式中, p_0 为单频入射平面波场中声压的幅值; $k_2 = \omega/c_2$ 为壳体外部区域的波数, ω 为角频率; $j_n(z)$ 为球贝塞尔函数; $P_n(z)$ 为勒让德函数。声波通过弹性球壳的内部透射声压 p_1 ^[8]:

$$p_1 = p_0 \sum_{n=0}^{\infty} (-i)^n (2n+1) a_n j_n(k_1 r) P_n(\cos \theta) \quad (2)$$

式中, $k_1 = \omega/c_1$ 为壳体内部区域的波数, a_n 为待定系数。

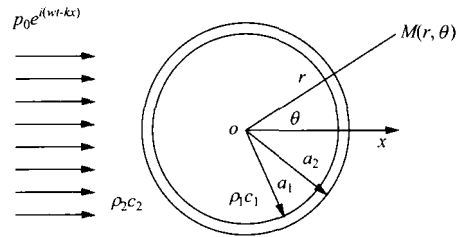


图 1 球壳和入射平面波的坐标关系示意图

根据边界条件可求得弹性球壳内部声压为:

$$p_1 = \frac{\rho_1 c_1}{\mu_2^2} p_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-i)^n (2n+1) j_n(k_1 r) P_n(\cos \theta)}{j_n'(\mu_1) h_n^{(2)'}(\mu_2) [Z_n + Z_{s1} + Z_{s2}]} \quad (3)$$

式中, $Z_{s1} = i \rho_1 c_1 j_n(\mu_1) / j_n'(\mu_1)$, $\mu_1 = k_1 a_1$, $Z_{s2} = -i \rho_2 c_2 h_n^{(2)}(\mu_2) / h_n^{(2)'}(\mu_2)$, $\mu_2 = k_2 a_2$; Z_{s1} 和 Z_{s2} 分别是在 n 号振型时向内区域和向外区域的球面辐射阻抗; $h_n^{(2)}(z)$ 为第二类汉克尔函数。

根据薄壁球壳的运动方程, 如果只考虑球壳的弯曲振动和纵向振动, 而忽略壳体旋转惯量和剪切惯量, 则可求得薄壁球壳第 n 次振型的机械阻抗为 $Z_n = i \omega \rho h \zeta_n$ ^[10-12], 式中: ρ_s 为壳体材料密度, h 为壳体壁厚, ζ_n 是球壳的无量纲球面阻抗

$$\zeta_n = \frac{h_a}{G} \frac{m^3 + m^2 g_1 + m g_2 + g_3}{g_4 - m}$$

式中: $g_1 = -(G+3+\sigma)$, $g_2 = (1-\sigma^2-G)/h_a$, $g_3 = (G+1-\sigma)(G-2-2\sigma)/h_a$, $g_4 = (G+1-\sigma)$, $G = \rho \omega^2 a^2 (1-\sigma^2)/E$, $h_a = h^2/(12a^2)$,

$m = n(n+1)$, a 为壳体半径, σ 为泊松系数, E 为材料的弹性模量。薄壁球壳的机械阻抗公式适用条件为 $k_f h < 1/4$, k_f 为壳体中弯曲波的波数^[11]。

利用 Euler 方程可求得球壳内声场径向振速 u_{1r} 和垂直径向振速 $u_{1\theta}$:

$$u_{1r} = -\frac{P_0}{\mu_2^2} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)(-i)^{n+1} \times \frac{j'_n(k_1 r) P_n(\cos \theta)}{j'_n(\mu_1) h_n^{(2)'}(\mu_2) [Z_n + Z_{s1} + Z_{s2}]} \quad (4)$$

$$u_{1\theta} = -\frac{P_0}{\mu_2^2 k_1 r} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)(-i)^{n+1} \times \frac{j_n(k_1 r) P_n^{(1)}(\cos \theta) \operatorname{sgn}(\sin \theta)}{j'_n(\mu_1) h_n^{(2)'}(\mu_2) [Z_n + Z_{s1} + Z_{s2}]} \quad (5)$$

当球壳为薄壁且内外介质相同时 ($\rho_1 = \rho_2 = \rho$, $c_1 = c_2 = c$, $\mu_1 = \mu_2 = \mu$), 利用关系式:

$$j_n(\mu) h_n^{(2)'}(\mu) - j'_n(\mu) h_n^{(2)}(\mu) = -\frac{i}{\mu^2} \quad (6)$$

则壳体内部的声场变为^[10]:

$$p_1 = p_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1)(-i)^n j_n(kr) P_n(\cos \theta)}{1 + \mu^2 \frac{Z_n}{\rho c} j'_n(\mu) h_n^{(2)'}(\mu)} \quad (7)$$

$$u_{1r} = -\frac{p_0}{\rho c} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1)(-i)^{n+1} j'_n(kr) P_n(\cos \theta)}{1 + \mu^2 \frac{Z_n}{\rho c} j'_n(\mu) h_n^{(2)'}(\mu)} \quad (8)$$

$$u_{1\theta} = -\frac{p_0}{\rho \omega r} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n+1)(-i)^{n+1} j_n(kr)}{1 + \mu^2 \frac{Z_n}{\rho c} j'_n(\mu) h_n^{(2)'}(\mu)} \times P_n^{(1)}(\cos \theta) \operatorname{sgn}(\sin \theta) \quad (9)$$

式中, $\mu = ka$; $P_n^{(1)}(z)$ 代表第一阶联合勒让德函数; $\operatorname{sgn}(z)$ 表示符号函数。

3 弹性球壳透射声场对矢量水听器影响的数值计算和分析

3.1 数值计算和分析

假设弹性球壳放置在无限的、均匀的水

流体介质中, 弹性球壳内部充满水, 矢量水听器柔性地安装在弹性球壳内。不失一般性, 取矢量水听器的两个正交振速分量 x 、 z 取向分别与观察点 M 处的径向振速、垂直径向振速取向相同, 则矢量水听器的输出信号为:

$$p = p_1 \quad u_x = u_{1r} \quad u_z = u_{1\theta}$$

为了便于分析弹性球壳透射声场对矢量水听器测量的影响, 引入复数无量纲量 Y , 它定义为球壳存在时声场中某点处物理量 (声压或振速) 与自由声场中该点处相同物理量 (声压或振速) 的比值。根据上述定义, 很容易得到声压和各振速分量的无量纲量 Y_p 、 Y_x 、 Y_z , 即

$$Y_p = \frac{p_1}{p_i} \quad Y_x = \frac{u_{1r}}{u_{ir}} \quad Y_z = \frac{u_{1\theta}}{u_{i\theta}}$$

式中: u_{ir} 和 $u_{i\theta}$ 分别为入射平面波振速场中观察点 M 处的径向振速和垂直径向的振速分量。

设矢量水听器几何中心与球壳几何中心重合, 根据球贝塞尔函数性质, 有:

$$j_n(0) = \begin{cases} 1 & n=0 \\ 0 & n \geq 1 \end{cases}$$

则可得球壳中心处的声场为:

$$p_1 = \frac{P_0}{1 + \mu^2 \frac{Z_0}{\rho c} j_1(\mu) h_1^{(2)'}(\mu)} \quad (10)$$

$$u_{1r} = \frac{p_0 \cos \theta}{\rho c \left(1 + \mu^2 \frac{Z_1}{\rho c} j'_1(\mu) h_1^{(2)'}(\mu) \right)} \quad (11)$$

式中, Z_0 和 Z_1 分别为球壳第 0、1 次振型机械阻抗。

矢量水听器声压和振速 x 的无量纲量 Y_p 、 Y_x :

$$Y_p = \frac{1}{1 + \mu^2 \frac{Z_0}{\rho c} j_1(\mu) h_1^{(2)'}(\mu)} \quad (12)$$

$$Y_x = \frac{1}{1 + \mu^2 \frac{Z_1}{\rho c} j'_1(\mu) h_1^{(2)'}(\mu)} \quad (13)$$

取弹性球壳的几何参数为：平均半径 $a=0.4\text{m}$ 、壳厚 $h=0.002\text{m}$ ；弹性球壳材料的物理参数：密度 $\rho_s=7850\text{kg/m}^3$ 、泊松系数 $\sigma=0.28$ 、弹性模量 $E=2.1\times10^{11}\text{N/m}^2$ 。弹性球壳内外部介质密度和声速分别为 $\rho=1000\text{kg/m}^3$ 、 $c=1500\text{m/s}$ 。

弹性球壳声透射对矢量水听器测量的声压和振速分量幅值和相位的影响见图 2。图中曲线有许多谐振峰，是由于壳体本身引起谐振和内腔液体谐振造成的。对于空气中球形壳体，其谐振频率为^[14]：

$$\omega_0 = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{2E}{\rho_s(1-\sigma)}}$$

则可以求得对应的波尺寸 μ_0 为 5.747。由于球壳浸入流体中，受到内外介质的作用，使得其谐振频率向较低频方向偏离。由计算的曲线可知，声压对应谐振时的 μ 值为 3.583，而在 μ 值为 4.0 附近振速存在极小值。当 $\omega \ll \omega_0$ 低频时，壳内声压急剧下降，而振速下降相对较小；当 $\omega > \omega_0$ 时，壳内声压和振

速幅值和相位存在明显起伏；而且随着频率增大声压和振速起伏也增大。

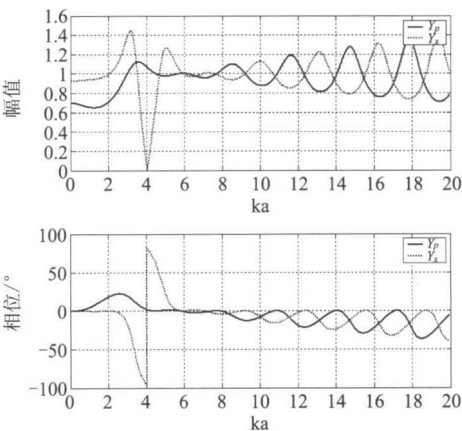


图 2 弹性钢球壳中心点处声压和振速随 ka 变化曲线 ($a=0.4\text{m}$, $h=0.002\text{m}$)

3.2 壳体参数的影响

根据前面分析结果可知，弹性球壳声透射对矢量水听器的影响与壳体的材料、半径、壳厚等参数有关。考虑各参数变化的影响，取计算参数见表 1。

表 1 计算模型参数

算例	壳体材料				壳体尺寸	
	材料名称	密度 ρ_s (kg/m^3)	泊松系数 σ	弹性模量 E (N/m^2)	半径 a (m)	壳厚 h (m)
1	钢	7.85×10^3	0.28	2.1×10^{11}	0.2	0.002
2					0.4	0.001
3	钛合金	4.55×10^3	0.30	1.1×10^{11}	0.4	0.002
4	合成树脂	1.18×10^3	0.4	4.0×10^9	0.4	0.002

壳体参数的改变对矢量水听器测量的声压和振速分量幅值和相位影响见图 3 所示。从图中曲线可以看出：球壳半径越小，壳内的声压和振速在低频下降越大，在高频起伏也越大；球壳厚度越薄，壳内的声压和

振速在低频下降越小，在高频起伏也越小；三种材料壳体相比，合成树脂壳体的透声性能明显地好于钢和钛合金壳体，而钛合金壳体的透声性能又好于钢壳体；三种材料壳体的壳内振速均存在一个明显的极小值点。

3.3 安装误差的影响

在实际使用时, 很难保证矢量水听器几何中心 o' 与球形导流罩几何中心 o 重合; 当二者之间存在安装位置偏差 (如图 4 所示)

时, 导流罩不仅对矢量水听器接收声场幅值和相位产生影响, 也会对其指向性产生影响。根据式 (7) ~ (9), 可计算球形导流罩对矢量水听器上述影响。

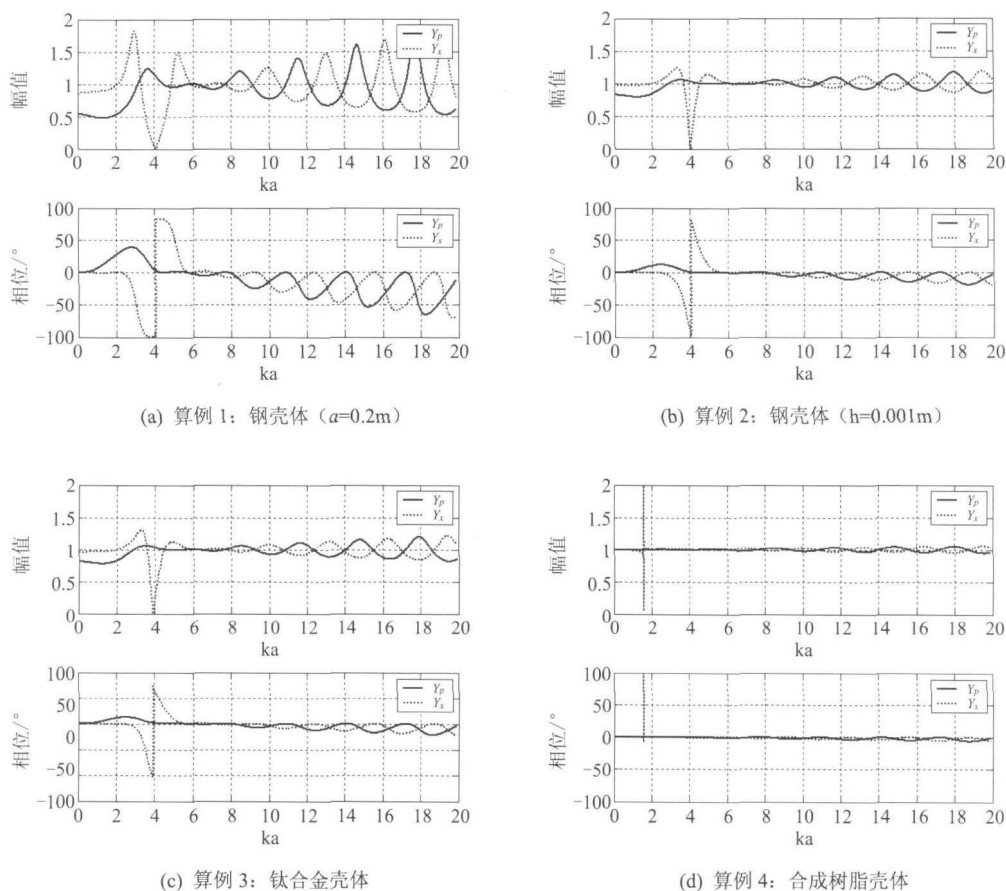


图 3 弹性球壳声透射对声压和振速无量纲量幅值和相位的影响

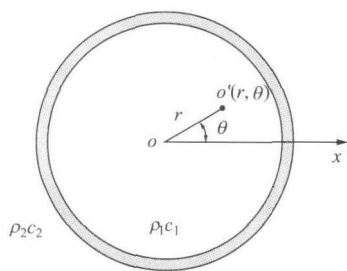


图 4 球壳和矢量水听器之间位置关系示意图

图 5 给出了声波入射角度为 0° 时, 不同

安装位置偏差 r 时钛合金球壳透射声场对矢量水听器接收声场的影响。图 6 给出了 $r = 0.04\text{m}$, 在声波入射角度为 45° 、 90° 、 135° 和 180° 时, 钛合金球壳透射声场对矢量水听器接收声场的影响。图 7 给出了 $r = 0.04\text{m}$, 钛合金球壳透射声场对矢量水听器声压和振速各通道接收指向性的影响。计算参数见表 1 中的算例 3 参数。当矢量水听器安装偏离钛合金球形导流罩圆心时, 声压和振速分量在低频和低频均出现较为“尖锐”的谐振峰,

而且随着偏心 r 的增大, 谐振峰数量增加, 且峰值更加“尖锐”; 另外, 导流罩对声压和振速各分量的影响也不一样, 而且还与声波的入射角度有关。在高于壳体谐振频率的区域

域, 声压和振速各分量的指向性畸变严重, 但垂直径向振速分量指向性仍具有良好的对称性; 而在低于壳体谐振频率的区域, 声压和振速各分量具有良好的空间指向性。

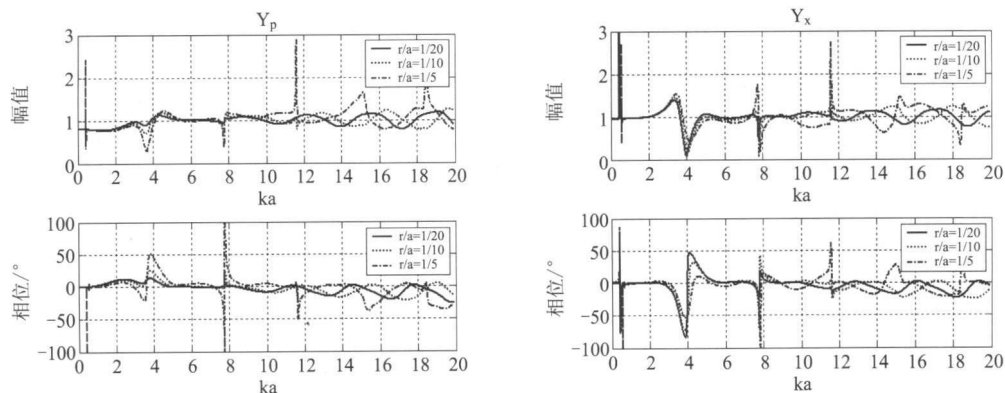


图 5 在不同 r/a 比值情况下, 钛合金球壳声透射对声压和振速无量纲量幅值和相位影响

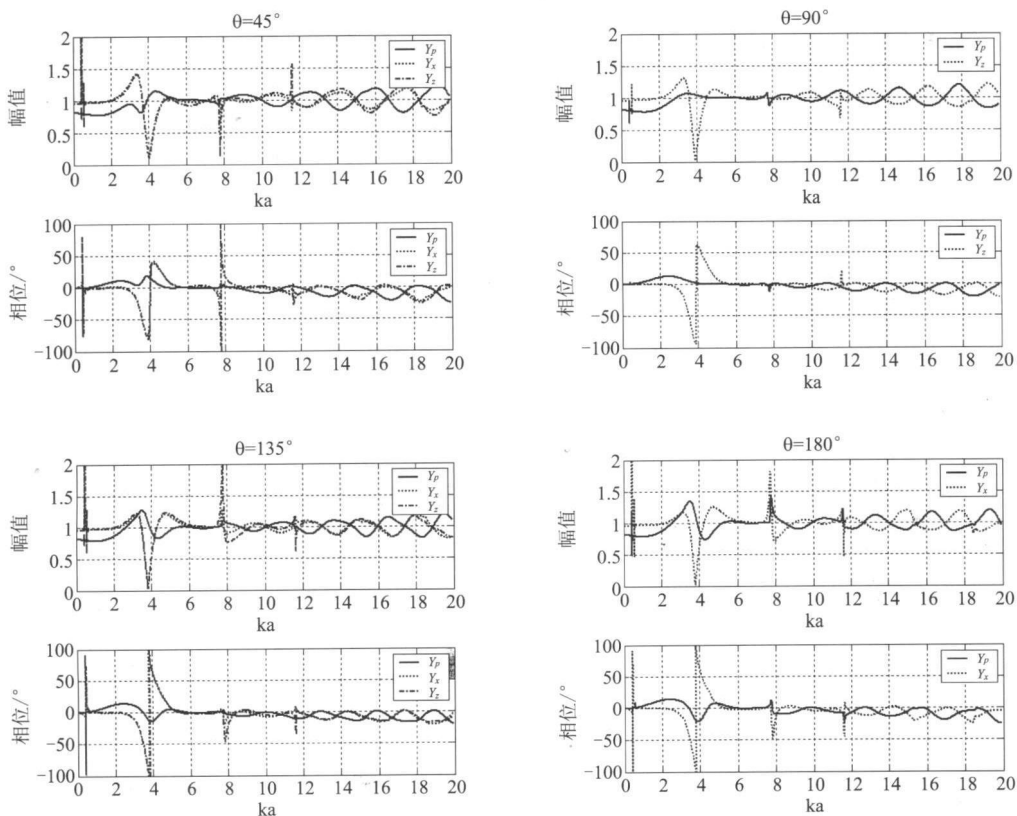


图 6 在不同 θ 情况下, 钛合金壳体声透射对声压和振速无量纲量幅值和相位影响

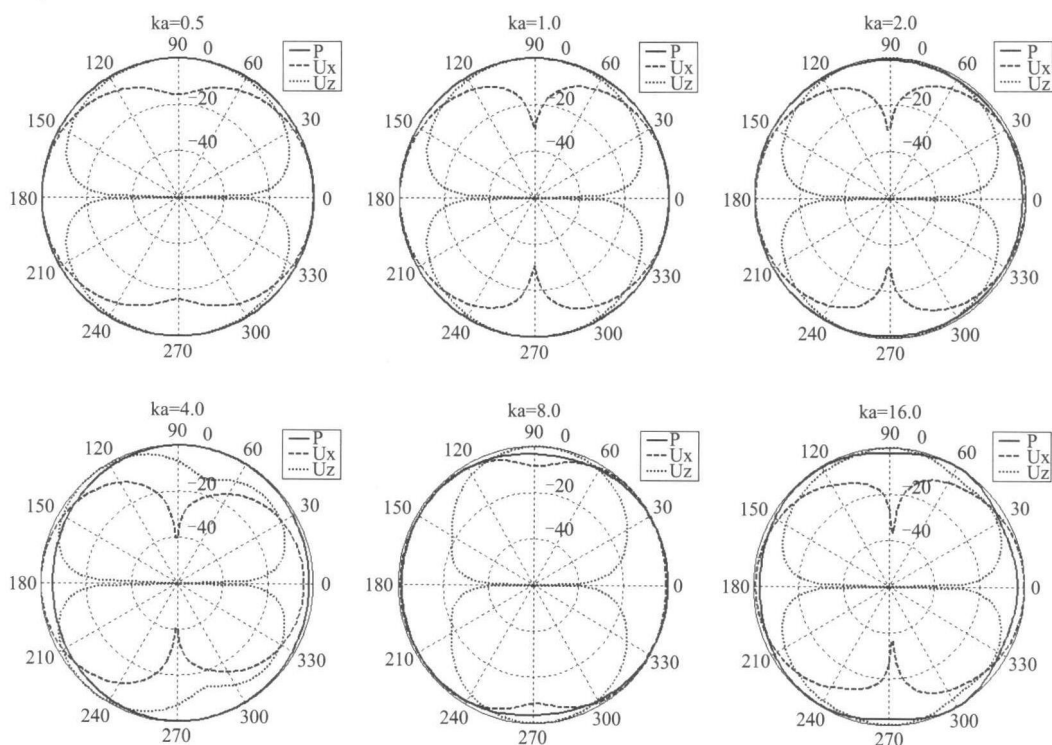


图7 钛合金球壳声透射对矢量水听器声压和振速各通道的指向性影响

4 结论

本文以弹性球壳为研究对象,从理论上推导了平面声波通过薄壁弹性球壳的透射声压场和振速场的数学表达式,计算了不同壳体参数下,内充水的弹性薄球壳,其透射声场对矢量水听器的各通道声波接收响应和接收指向性的影响。得到主要结论有:

(1) 弹性球壳声透射对矢量水听器接收声场的影响与壳体机械阻抗和水听器安装位置密切相关。当频率低于壳体谐振频率时,壳内声压和振速幅值下降,振速在谐振频率附近存在一个极小值;当频率高于壳体谐振频率时,壳内声压和振速幅值、相位随频率增加起伏越来越大;壳体半径越大、壳厚越薄,对壳内声压和振速影响越小。

(2) 若矢量水听器安装位置偏离壳体几

何中心时,矢量水听器的接收声压和振速在低频和高频均会出现“尖锐”谐振峰,偏差越大,谐振峰数量越多,且越“尖锐”。在谐振峰处接收指向性畸变严重,但仍具有良好的空间对称性。

(3) 理论计算结果表明,在同样参数条件下,合成树脂壳体的透声性能明显地好于钢和钛合金壳体,而钛合金壳体的透声性能又好于钢壳体。

(4) 在实际工程中应合理选择导流罩的材料,且尽量保证矢量水听器安装在导流罩壳体几何中心处,以减小导流罩的透射损失对矢量水听器接收性能的影响。

参考文献

- [1] Bruce D. Keller. Gradient hydrophone flow noise. J. Acoust. Soc. Am.: 1977, 62(1): 205-208.
- [2] Robert A. Finger, Louis A. Abbagnaro, and Benjamin B.

- Bauer. Measurements of low-velocity flow noise on pressure and pressure gradient hydrophones. *J. Acoust. Soc. Am.*: 1979, 65(6): 1407-1412.
- [3] James F. McEachern and Gerald C. Lauchle. Flow-induced noise on a bluff body. *J. Acoust. Soc. Am.*: 1995, 97(2): 947-953.
- [4] 俞孟萨, 徐新发, 袁昌华. 密肋薄壁结构的声呐导流罩设计. *舰船科学技术*: 2001, 23(1): 15-18.
- [5] 李源源, 陈炜, 朱泉, 等. 舰艇球鼻艏金属导流罩的结构声学设计. *中国舰船研究*: 2007, 2(1): 39-41, 55.
- [6] 陈敏康, 高峰. 舰船导流罩声传播特性研究. *声学 & 电子工程*: 2005, 78(2): 8-11.
- [7] 陈建伟. 全壳体导流罩力学性能研究. *声学 & 电子工程*: 1994, 35(3): 39-42, 46.
- [8] Goodman R. R. and Stern R. Reflection and transmission of sound by elastic spherical shells. *J. Acoust. Soc. Am.*: 1962, 34(3): 338-344.
- [9] 闫再友, 姜楫, 严明. 无界流场中充流弹性壳体声透射数值研究. *上海交通大学学报*: 2000, 34(8): 1065-1073.
- [10] E. Л. 沈杰罗夫著, 何祚镛, 赵晋英译. 水声波动问题. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [11] KOSOBRODOV R A, NEKRASOV V N. Effect of the diffraction of sound by the carrier of hydroacoustic equipment on the results of measurements. *Acoust Phys*: 2001, 47(3): 382-388.
- [12] 时胜国, 杨德森, 王三德. 弹性球壳声衍射对矢量传感器测量影响. *哈尔滨工程大学学报*: 2006, 27(1): 84-89.
- [13] 时胜国. 矢量水听器及其在平台上的应用研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.9.
- [14] Junger M. C., Feit D.. *Sound, structure and their interaction*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 1986.