弹性球壳声散射对矢量水听器测向影响研究

时胜国，杨德森
（哈尔滨工程大学水声工程学院，哈尔滨 150001）

摘要：以平面波在弹性球壳上声散射理论为基础，建立了弹性球壳近场声散射对矢量水听器目标定向性能影响计算模型，分析了入射声波信号频率、入射角度以及矢量水听器安装位置对目标定向的影响。计算和理论分析结果表明，弹性球壳声散射对矢量水听器测向性能的影响与壳体散射特性和水听器安装位置密切相关，在低频和高频段测向误差相对比较小，而在中频段则测向误差比较大，可通过选择工作频段，或者采用声学处理，降低壳体声散射强度，减小对矢量水听器测向性能的影响。研究结果为矢量水听器工程应用奠定了理论基础。

关键词：矢量水听器；弹性球壳；近场声散射；测向
中图法分类号：TB556 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2008)-05-0642-07

Influences of sound scattering by elastic spherical shell on DOA estimation performance of vector hydrophone

SHI Sheng-guo, YANG De-sen
(*School of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin* 150001, *China*)

Abstract: On the basis of the theory of sound scattering of plane wave on elastic spherical shell, the calculation model of influences of near-field sound scattering by elastic spherical shell on direction finding of the vector hydrophone is established. The influences by the incident wave frequency, the incident angle and the installation position of the vector hydrophone are also analyzed. The results of calculation and theoretical analysis show that the influences, which can be eliminated and decreased by choosing proper working frequency and taking acoustic methods, have close relations with sound scattering characteristics of the shell and the installation position of the hydrophone. The research results lay the theoretical foundation for practical engineering application of the vector hydrophone.

Key words: vector hydrophone; elastic spherical shell; near-field sound scattering; DOA estimation

1 引 言

矢量水听器作为一种新型水声测量设备，逐渐被广泛地应用于水声各个领域。当矢量水听器被应用于水雷引信、鱼雷声自导、水下潜器的导航定位、舰壳声纳等方面时，它会不可避免地受到安装平台散射声场的作用，从而影响矢量水听器的测向性能，这种影响与平台结构、安装相对距离等因素密切相关。因此，研究矢量水听器在有障板条件下的性能，对矢量水听器的实际应用具有非常重要意义。近些年来国内外许多学者均尝试开展此方面的研究工作，Kosobrodov 等人对钛合金薄壁球壳近场声散射对声压水听器和矢量水听器测量结果的影响进行了理论和实验研究[1]；生雪莉等人对矢量水听器应用于鱼雷声自导时鱼雷壳体对其指向性的影响进行了研究[2]，其理论计算模型是将鱼雷壳体近似视为球对称的封闭空气腔，而忽略弹性壳体的影响；李春旭则对无限长软边界圆柱障板对矢量水听器的影响进行了理论研究，并给出了数值计算结果，全面分析了无限长软边界圆柱障板对矢量水听器测向的影响[3]；侯玉敏等人采用板块元法计算了刚性曲面障板近场声散射声场[4]，分析了刚性曲面障板近场声散射

收稿日期：2007-10-13；修回日期：2007-12-18
基金项目：水声技术国防科技重点实验室基金资助项目(9140C200-204060C2003)
作者简介：时胜国(1973-)，男，山东人，博士研究生，副教授，研究方向为水下噪声及噪声控制和水声信号处理。
通讯作者：时胜国，E-mail：shishengguo@yahoo.com.cn

对多模球形水听器测向的影响；陈亚林等人采用 ANSYS 和 SYSNOISE 软件计算了刚性圆柱组合体声散射对矢量水听器指向性影响，并进行了实验研究[5]。上述文献均未考虑矢量水听器安装平台为弹性壳体的实际情况。最近，时胜国等人采用解析法计算了弹性球壳声散射对矢量水听器测量和指向性的影响，并在消声水池测量球壳和柱壳声散射对矢量水听器指向性的影响[6,7]。文中以弹性球壳为研究对象，讨论安装平台近场声散射对矢量水听器测向性能的影响，为矢量水听器在水下中小型平台（例如水雷、鱼雷等）上的工程应用提供了理论基础。

2　测向影响计算模型

对于鱼雷、水雷等水下作战平台，鱼雷的声自导头和水雷的声引信均安装在其头部，且工程上经常采用布阵技术来提高水下作战平台的测向和远程探测能力，因此，需要考虑内充空气雷壳近场散射对不同位置处基元的影响。取如图 1 所示的计算模型，假设矢量水听器安装在弹性球壳的顶部，弹性球壳的坐标系为 $oxyz$，矢量水听器的坐标系为 $o'x'y'z'$，两坐标系的坐标轴相互平行，入射声波沿 so 方向入射。不失一般性，假设水听器位于 soz 平面内，两坐标系原点连线与 z 轴夹角为 θ'，取在 soz 平面内顺时针旋转角度 θ' 为负，在 soz 平面内逆时针旋转角度 θ' 为正。根据文献[6]所介绍的平面声波在弹性球壳上的声散射，则可以求得矢量水听器各通道的接收信号为：

$$\begin{cases} p(r,t)=p_2(r,t) \\ v_x(r,t)=[u_{2\theta}(r,t)\cos\theta'-u_{2r}(r,t)\sin\theta']\cos\phi \\ v_y(r,t)=[u_{2\theta}(r,t)\cos\theta'-u_{2r}(r,t)\sin\theta']\sin\phi \\ v_z(r,t)=[u_{2\theta}(r,t)\sin\theta'-u_{2r}(r,t)\cos\theta'] \end{cases} \tag{1}$$

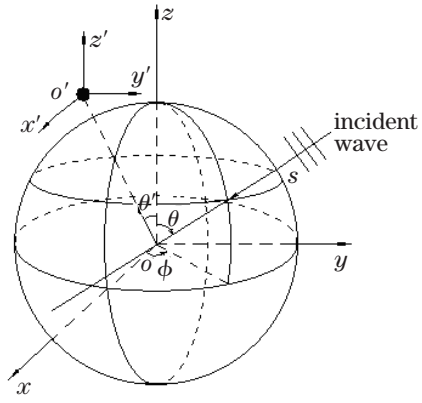


图 1　矢量水听器与弹性球壳安装示意图

Fig.1　Sketch map of geometry arrangement for vector hydrophone and elastic spherical shell

式中 $p_2(r,t)$、$u_{2r}(r,t)$ 和 $u_{2\theta}(r,t)$ 分别为弹性壳体外部声场中某点处的声压和正交的质点振速振速分量，其数学表达式分别为：

$$p_2=p_0\mathrm{e}^{-\mathrm{i}k_2r\cos\theta}-p_0\sum_{n=0}^{\infty}(-\mathrm{i})^n(2n+1)\frac{j_n'(\mu_2)}{h_n^{(2)}{}'(\mu_2)}\times$$
$$\left(1-\frac{\rho_2c_2}{\mu_2^2j_n'(\mu_2)h_n^{(2)}{}'(\mu_2)[Z_n+Z_{s1}+Z_{s2}]}\right)\times$$
$$h_n^{(2)}(k_2r)P_n(\cos\theta)$$

$$u_{2r}=\frac{p_0}{\rho_2c_2}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}k_2r\cos\theta}\cos\theta+\frac{p_0}{\mathrm{i}\rho_2c_2}\sum_{n=0}^{\infty}(-\mathrm{i})^n(2n+1)\frac{j_n'(\mu_2)}{h_n^{(2)}{}'(\mu_2)}\times$$
$$\left(1-\frac{\rho_2c_2}{\mu_2^2j_n'(\mu_2)h_n^{(2)}{}'(\mu_2)[Z_n+Z_{s1}+Z_{s2}]}\right)\times$$
$$h_n^{(2)}{}'(k_2r)P_n(\cos\theta)$$

$$u_{2\theta}=-\frac{p_0}{\rho_2c_2}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}k_2r\cos\theta}\sin\theta+\frac{p_0}{\mathrm{i}\rho_2\omega r}\sum_{n=0}^{\infty}(-\mathrm{i})^n(2n+1)\frac{j_n'(\mu_2)}{h_n^{(2)}{}'(\mu_2)}\times$$
$$\left(1-\frac{\rho_2c_2}{\mu_2^2j_n'(\mu_2)h_n^{(2)}{}'(x_2)[Z_n+Z_{s1}+Z_{s2}]}\right)\times$$
$$h_n^{(2)}(k_2r)P_n^{(1)}(\cos\theta)\mathrm{sgn}(\sin\theta)$$

式中，$\mu_1=k_1a_1$，$Z_{s1}=\mathrm{i}\rho_1c_1j_n(\mu_1)/j_n'(\mu_1)$，$\mu_2=k_2a_2$，$Z_{s2}=-\mathrm{i}\rho_2c_2\cdot h_n^{(2)}(\mu_2)/h_n^{(2)'}(\mu_2)$；$k_1=\omega/c_1$，$k_2=\omega/c_2$，$c_1$ 和 c_2 分别为球壳内外区域介质中声传播速度，ω 为角频率；a_1 和 a_2 分别为弹性球壳内外半径，ρ_1 和 ρ_2 分别为球壳内外区域介质密度；p_0 为单频入射平面波场中声压的幅值，j_n 为球贝塞尔函数，P_n 为勒让德函数，$h_n^{(2)}$ 为第二类汉克尔函数；$\mathrm{sgn}(x)$ 表示符号函数。

将上述 3 式中变量 θ 变换为 $\pi-(\theta+\theta')$，变换后变量 θ 为目标的俯仰角。根据文献[8]可求得目标的水平方位角 ϕ 和俯仰角 θ 分别为：

$$\begin{cases} \hat{\phi}=\phi \\ \hat{\theta}=\arctan\left\{\dfrac{[u_{2\theta}(r,t)\cos\theta'-u_{2r}(r,t)\sin\theta']}{[u_{2\theta}(r,t)\sin\theta'-u_{2r}(r,t)\cos\theta']}\right\} \end{cases} \tag{2}$$

若矢量水听器安装在弹性球壳的正上方，即 $\theta'=0°$，则式(2)变为：

$$\begin{cases} \hat{\phi}=\phi \\ \hat{\theta}=\arctan\left[\dfrac{u_{2\theta}(r,t)}{u_{2r}(r,t)}\right] \end{cases} \tag{3}$$

因此，对于轴对称的水下安装平台（例如水雷、鱼雷等）来讲，若矢量水听器采用图 1 所示的安装方式，则水下平台的近场声散射对矢量水听器水平方

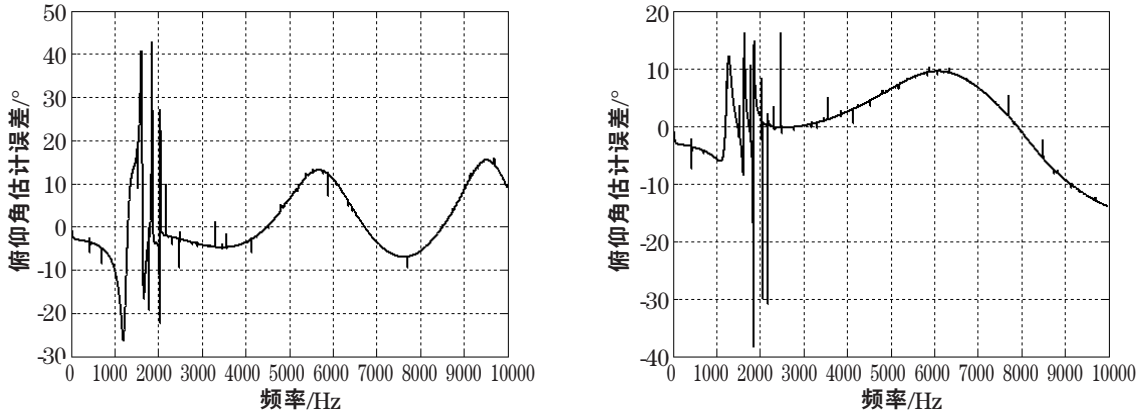
位角估计没有影响,但对俯仰角估计有很大影响。

3 数值计算和分析

取弹性球壳几何参数为:外半径 a_2=0.533/2m、壳厚 h=0.005m;弹性球壳材料的物理参数:密度 ρ=7850kg/m^3、泊松系数 σ=0.28、弹性模量 E=2.1×10^{11}N/m^2;弹性球壳内外部介质的密度和声速分别为 ρ_1=1.29kg/m^3、c_1=346m/s、ρ_2=1000kg/m^3、c_2=1500m/s;令矢量水听器声中心与弹性球壳球心间距为 r。下面分两种情况分别进行讨论。

3.1 θ'=0°情况

根据式(3)计算弹性球壳近场声散射对矢量水听器测向的影响。图 2 是安装距离 r=0.5m,入射信号仰角分别为 30°和 60°时,弹性球壳近场声散射对矢量水听器测向影响。由图中矢量水听器测量的俯仰角随频率的变化曲线可知:在频率 f<1kHz 的低频段,弹性球壳声散射作用对矢量水听器测向影响较小;在频率 1kHz<f<3kHz 的中频段,弹性球壳与入射声波相互作用发生共振产生许多明显的谐振峰,使矢量水听器测向随频率变化关系变得复杂;在频率 f>3kHz 的高频段,弹性球壳的声散射作用明显,使得矢量水听器测向随频率呈慢起伏变化。另外,弹性球壳近场声散射对矢量水听器测向的影响还与声波的入射角度密切相关,如图 3 计算结果所示。图 3 给出了安装距离 r=0.5m 时,在不同频率和俯仰角入射声信号的情况下,弹性球壳近场声散射对矢量水听器测向的影响。由图 3 计算结果可知:频率 f<1kHz 时,测向误差小于±10°,但随着频率降低其测向误差变小;在频率 1kHz<f<3kHz 范围内,测向误差变大,在某些频点和方位上测向误差达到±70°,主要原因是壳体产生了共振声散射;频率 f>3kHz 时,测向误差变小,在某些方位上测向误差达到±20°,测向误差随仰角呈起伏变化。若增大矢量水听器与壳体之间的安装距离,弹性球壳声散射对水听器测向影响将会有明显减小趋势;但在频率 1kHz<f<3kHz 范围内,测向误差仍然比较大;频率 f>3kHz 时,测向误差仍然随仰角呈起伏变化。



(a) θ=30° (b) θ=60°

图 2 在不同信号频率时,球壳近场散射对矢量水听器测向影响(θ'=0°)

Fig.2 Effect of sound scattering of elastic spherical shell on DOA estimation (θ'=0°)

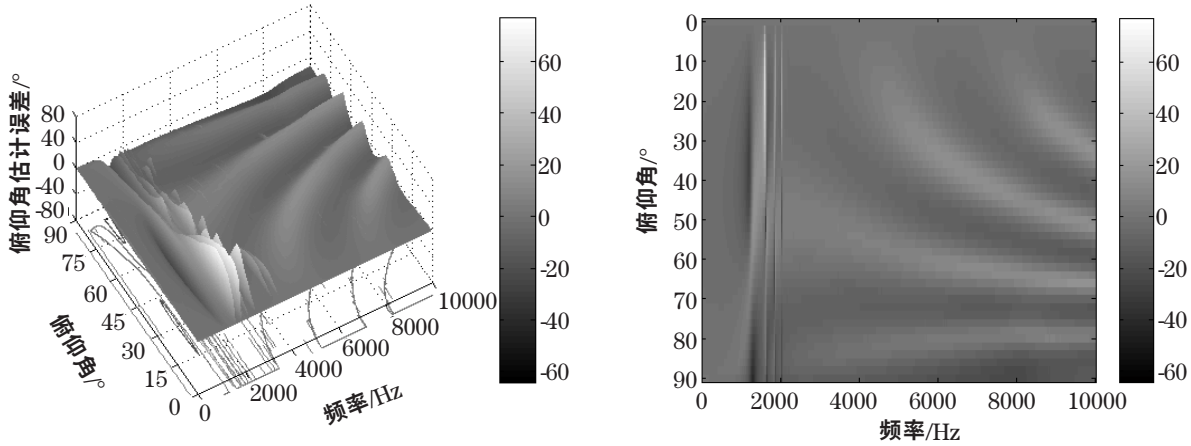


图 3 在不同信号频率和俯仰角时,球壳近场散射对矢量水听器测向影响(θ'=0°)

Fig.3 Effect of sound scattering of elastic spherical shell on DOA estimation (θ'=0°)

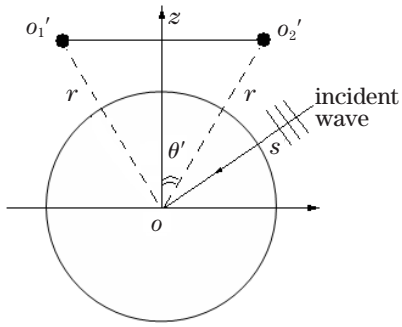


图 4　矢量水听器与弹性球壳位置示意图

Fig.4　Sketch map of geometry arrangement for vector hydrophone and elastic spherical shell

3.2　$\theta' \neq 0°$情况

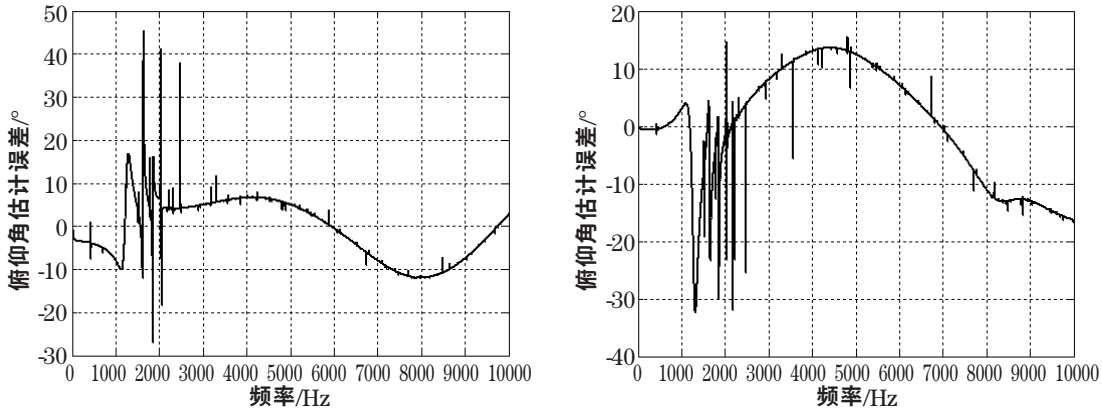
取矢量水听器的声中心与弹性球壳球心之间距离 r=0.5m，水听器安装偏角 θ'=25°，则可以估计出在球壳顶端对称安装两元基阵的间距约为 0.42m，即如图 4 所示，图中 o_1'和 o_2'为两水听器位置。下面分析壳体近场声散射对两只水听器影响。

根据式(2)计算弹性球壳近场声散射对不同安装位置处的矢量水听器测向的影响。图 5 是入射信号仰角分别为 30°和 60°时，弹性球壳近场声散射对 θ'=25°位置处矢量水听器测向影响。图 6 是入射信号仰角分别为 30°和 60°时，弹性球壳近场声散射对 θ'=−25°位置处的矢量水听器测向的影响。图 7 是不同信号频率和俯仰角时，弹性球壳近场声散射对 θ'=25°位置处的矢量水听器测向的影响。图 8 是不同信号频率和俯仰角时，弹性球壳近场声散射对 θ'=−25°位置的处矢量水听器测向的影响。由图 7~8 计算结果可知，在频率 f>1kHz 时，弹性球球壳近场散射对水听器的测向影响比较大，且规律较为复杂；在频率 f<1kHz 的低频段，弹性球球壳近场散射对水听器的测向影响比较小；另外，弹性球壳近场声散射对不同安装位置处水听器测向的影响是不一样的，且影响规律也不相同。

4　实验和结果

4.1　实验概况

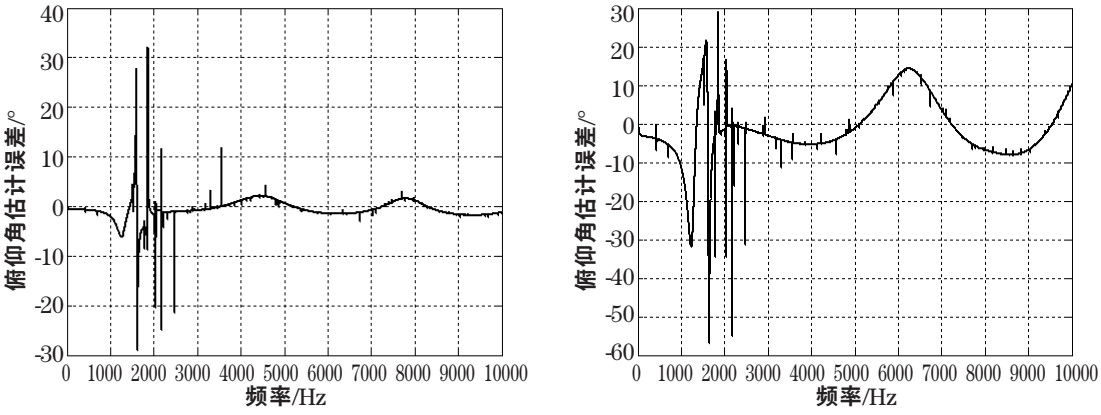
试验是在非消声水池中进行的。试验模型为球壳尺寸为：外半径 a_2=0.11m、厚度 h=0.004m；模型



(a)　θ=30°　　(b)　θ=60°

图 5　在不同信号频率时，球壳近场散射对矢量水听器测向影响(θ'=25°)

Fig.5　Effect of sound scattering of elastic spherical shell on DOA estimation (θ'=25°)



(a)　θ=30°　　(b)　θ=60°

图 6　在不同信号频率时，球壳近场散射对矢量水听器测向影响(θ'=−25°)

Fig.6　Effect of sound scattering of elastic spherical shell on DOA estimation (θ'=−25°)

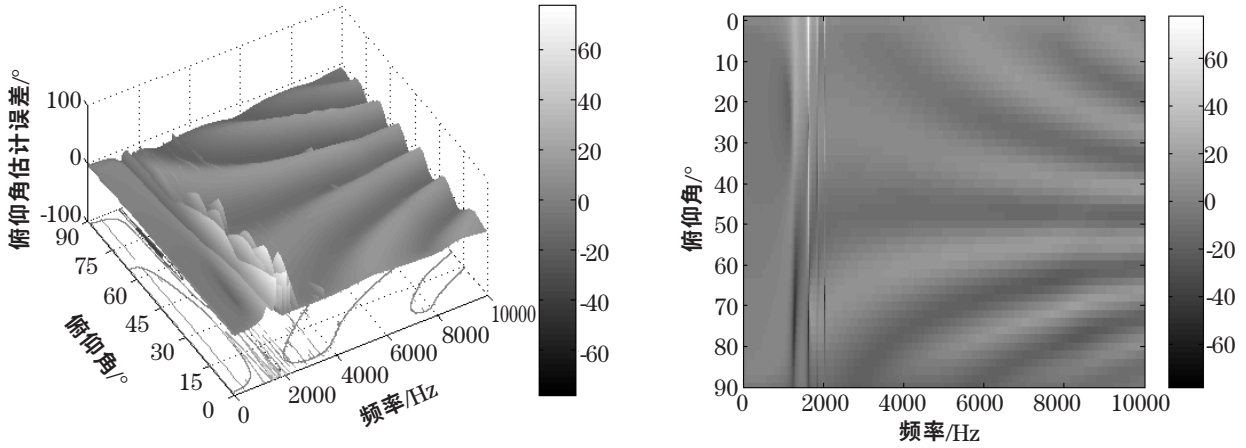


图 7 在不同信号频率和俯仰角时,球壳近场散射对矢量水听器测向影响(θ'=25°)

Fig.7 Effect of sound scattering of elastic spherical shell on DOA estimation (θ'=25°)

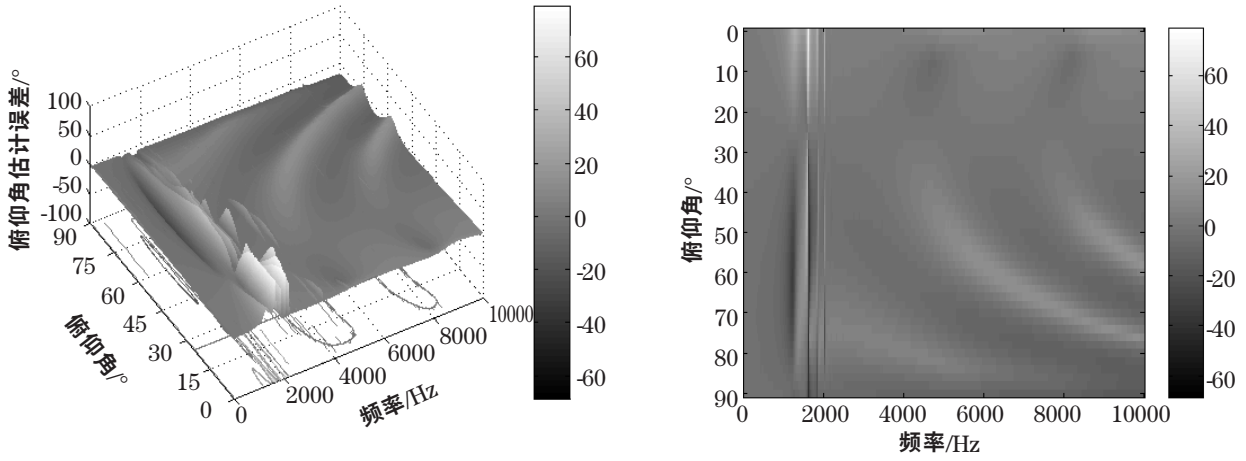


图 8 在不同信号频率和俯仰角时,球壳近场散射对矢量水听器测向影响(θ'=-25°)

Fig.8 Effect of sound scattering of elastic spherical shell on DOA estimation (θ'=-25°)

材料物理参数为:密度 ρ=7850kg/m^3、泊松系数 σ=0.28、杨氏模量 E=2.1×1011N/m^2。

试验中选用的发射声源为复合棒式发射换能器,接收换能器为三维惯性型高频矢量水听器,工作频带为 1.0kHz~10.0kHz。矢量水听器通过橡皮筋柔性地悬挂在金属框架内,试验中将壳体与矢量水听器通过连接杆固定在一起,并通过吊杆安装在旋转装置上, 矢量水听器中心距壳体表面距离为 0.1m。发射声源和接收系统(包括矢量水听器和壳体)吊深均为 2.3m,且两者相距 1.1m。试验测试时通过调整旋转装置改变发射声源与接收系统之间的相对位置关系,可测量得到声源在不同角度入射时矢量水听器声压和振速各通道的接收信号。

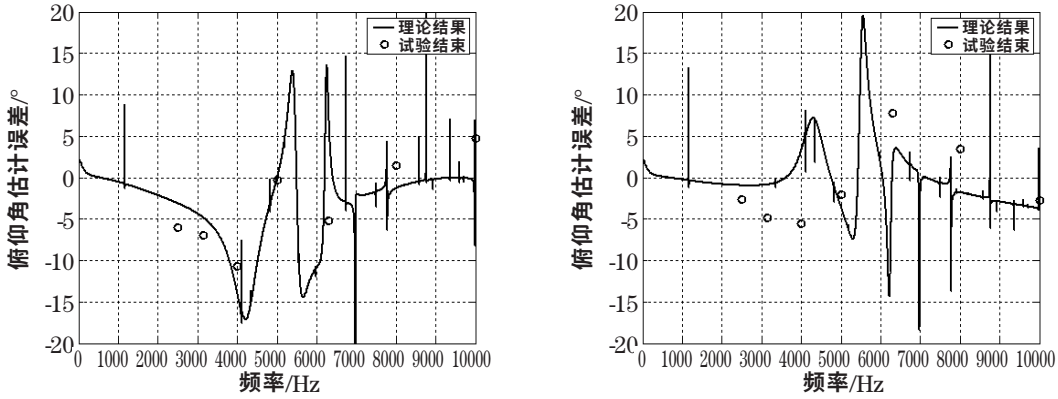
4.2 实验结果

实验共测量了 2.5kHz~10kHz 频率范围内的 7 个 1/3 倍频程中心频率的频点数据。采用矢量水听器质点振速法可估计声源信号的入射角度[3,8]。图 9 为 θ'=0 时,弹性球壳近场声散射对矢量水听器测向影响的实验估计结果。图 10 和图 11 分别为 θ'=25° 和 θ'=-25°时, 弹性球壳近场声散射对矢量水听器测向影响的实验估计结果。图中实线为理论计算结果,圆圈为实验估计结果。

由图 9~11 实验测量结果和计算结果可知,在多数频点上试验测量结果与理论计算结果吻合得比较好,在个别频率点两者相差较大,其主要原因有:(1)实验测量频段处于弹性壳体强共振区。在壳体强共振范围内,水听器的接收频率响应曲线起伏剧烈,即对壳体参数、测试频率、测试环境等参数比较敏感。(2)矢量水听器各通道接收指向性对称性偏差。(3)矢量水听器安装偏差等。

5 结 论

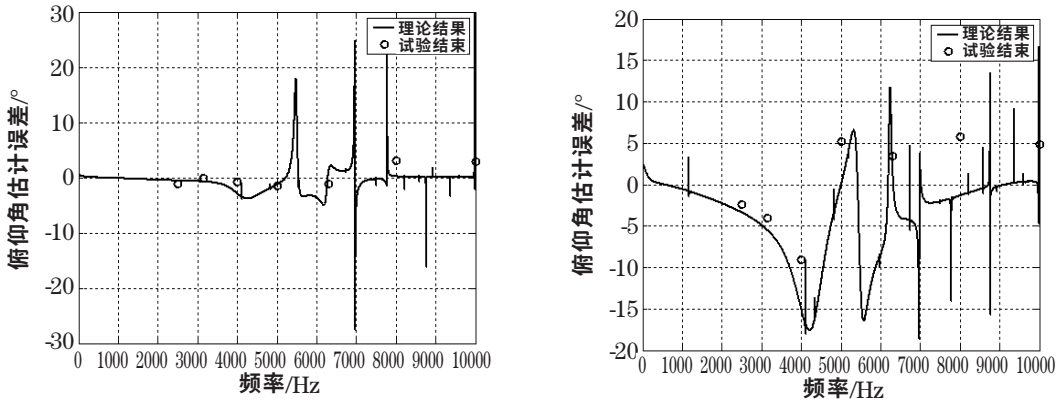
文中建立了弹性球壳近场声散射对矢量水听器



（a） θ=30°　　（b） θ=60°

图 9　在不同信号频率时，球壳近场散射对矢量水听器测向影响实验结果（θ'=0）

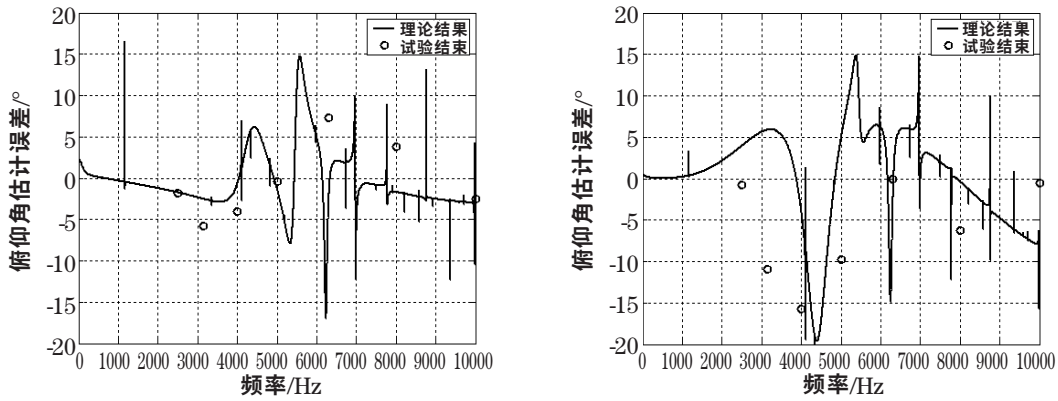
Fig.9　The experimental results of effect of sound scattering of elastic spherical shell on DOA estimation （θ'=0°）



（a） θ=30°　　（b） θ=60°

图 10　在不同信号频率时，球壳近场散射对矢量水听器测向影响实验结果（θ'=25°）

Fig.10 The experimental results of effect of sound scattering of elastic spherical shell on DOA estimation （θ'=25°）



（a） θ=30°　　（b） θ=60°

图 11　在不同信号频率时，球壳近场散射对矢量水听器测向影响实验结果（θ'=−25°）

Fig.11 The experimental results of effect of sound scattering of elastic spherical shell on DOA estimation （θ'=−25°）

目标定向性能影响的计算模型，计算了由弹性球壳近场声散射引入的矢量水听器定向误差，分析了入射声波信号频率和入射角度以及矢量水听器安装位置对目标定向的影响，它与壳体近场声散射特性密切相关，在低频和高频段测向误差相对比较小，在高频段测向误差随仰角呈现慢起伏变化，而在中频段则测向误差比较大，这与壳体的共振密切相关；另外，壳体近场声散射对安装不同位置处矢量水听器测向性能的影响规律也不一样。水池实验测量结果与理论计算结果基本一致，也验证了理论分析的正确性。因此，在实际工程应用中，必须选择合适的工作频段，或对矢量水听器工作平台进行声学处理，降低壳体的声散射强度，例如在壳体上敷设阻尼材料层，避免壳体近场声散射对矢量水听器测向性能的影响。

参 考 文 献

[1] Kosobrodov R A, Nekrasov V N. Effect of the diffraction of sound by the carrier of hydroacoustic equipment on the results of measurements[J]. Acoust Phys, 2001, **47**(3): 382-388.

[2] **生雪莉，郭龙祥，梁国龙. 球形软障板矢量传感器指向性研究**[J]. **声学技术**, 2002, **21**(**增刊**):59-60.
SHENG Xueli, GUO Longxiang, LIANG Guolong. Study on the directivity of the vector sensor with spherical soft baffleplate[J]. Technical Acoustics, 2002, **21**(suppl): 59-60.

[3] **李春旭. 声压、振速联合信息处理**[D]. **哈尔滨：哈尔滨工程大学**, 2000.
LI Chunxu. Combined signal processing technology with acoustic pressure and particle velocity[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2000.

[4] **侯玉敏，毛卫宁. 刚性曲面障板散射对多模球形水听器测向的影响**[J], **声学技术**, 2005, **24**(2): 94-97, 124.
HOU Yumin, MAO Weining. Effect of acoustic scattering from curved rigid surfaces on direction-finding of multimode spherical hydrophone[J]. Technical Acoustics, 2005, **24**(2): 94-97, 124.

[5] **陈亚林，杨博，马远良. 复杂边界条件下矢量传感器的指向性分析及实验研究**[J]. **声学技术**, 2006, **25**(4): 381-386.
CHEN Yalin, YANG Bo, MA Yuanliang. Analysis and experiment study on directivity of vector sensors located on complicated boundaries[J]. Technical Acoustics, 2006, **25**(4): 381-386.

[6] **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**[J]. **哈尔滨工程大学学报**, 2006, **27**(1): 84-89.
SHI Shengguo, YANG Desen, WANG Sande. Influences of sound diffraction by elastic spherical shell on acoustic vector sensor measurement[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, **27**(1): 84-89.

[7] **时胜国，杨德森. 弹性球壳衍射声场对矢量传感器指向性影响实验研究**[A]. **第十届船舶水下噪声学术讨论会论文集**(**烟台**)[C]. 2005: 299-303.
SMI Shengguo, YANG Desen. Experiment study on influences of sound diffraction by elastic spherical shell on directivity of acoustic vector sensor [A]. The 10th symposium on ship underwater noise (Yantai)[C]. 2005: 299-303.

[8] **时胜国，杨德森. 矢量水听器的源定向理论及其定向误差分析**[J]. **哈尔滨工程大学学报**, 2003, **24**(2): 132-135.
SHI Shengguo, YANG Desen. Analysis of bearing errors and theory of localizing acoustic sources with acoustic vector-sensor[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2003, **24**(2): 132-135.

[9] **时胜国. 矢量水听器及其在平台上的应用研究**[D]. **哈尔滨：哈尔滨工程大学**, 2006.
SHI Shengguo. Research on vector hydrophone and its application for underwater platform[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.

[10] Abramowitz M, Stegun I A. Handbook of mathema-tical functions with formulas, graphs, and mathematical tables[M]. New York: National Bureau of Standards Applied Mathematics Series, 1965.