

局部固体填充的水中复杂目标声散射计算与实验

张培珍 李秀坤 范军 王斌

Acoustic scattering of a complex target with partially solid-filling immersed in water: numerical simulation and experiment

Zhang Pei-Zhen Li Xiu-Kun Fan Jun Wang Bin

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 184301 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.184301

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.184301>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大深度接收时深海直达波区的复声强及声线到达角估计

[Complex acoustic intensity with deep receiver in the direct-arrival zone in deep water and sound-ray-arrival-angle estimation](#)

物理学报.2016, 65(16): 164302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164302>

水下目标声散射信号的时频域盲抽取

[Blind source extraction based on time-frequency characteristics for underwater object acoustic scattering](#)

物理学报.2016, 65(16): 164301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164301>

海洋环境噪声场对称性分析及噪声消除方法

[Analysis of the symmetry of the ambient noise and study of the noise reduction](#)

物理学报.2016, 65(14): 144302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.144302>

陆架斜坡海域声场特性对常规波束形成阵增益的影响

[Array gain of conventional beamformer affected by structure of acoustic field in continental slope area](#)

物理学报.2016, 65(14): 144303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.144303>

基于矢量水听器的深海直达波区域声传播特性及其应用

[Analysis of sound propagation in the direct-arrival zone in deep water with a vector sensor and its application](#)

物理学报.2016, 65(9): 094302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094302>

局部固体填充的水中复杂目标声散射计算与实验*

张培珍¹⁾²⁾ 李秀坤^{1)†} 范军³⁾ 王斌³⁾

1) (哈尔滨工程大学水声工程学院, 水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

2) (广东海洋大学信息学院, 海洋遥感与信息技术实验室, 湛江 524088)

3) (上海交通大学, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

(2016年4月18日收到; 2016年6月20日收到修改稿)

利用二维有限元方法研究水中局部填充的带球冠柱体目标声散射特性, 所采用的数值方法可高效地实现精细化、宽带、复杂轴对称模型散射声场计算. 根据数值结果解释壳体、填充物以及入射方位对目标散射远场的影响, 确定复杂目标散射研究中所必须考虑的重要物理和几何构成. 完成水中悬浮目标自由场声散射实验, 收发合置条件下将目标旋转 360° 接收并测量不同传播路径回波到达时刻得到距离-角度伪彩色图像. 以表面环绕波和“回廊波”产生理论为基础, 解释内真空和局部填充模型正横入射时目标散射信号中几何回波和各种弹性波成分产生的机理. 由于固体填充与弹性壳的耦合作用, 频率-角度谱的正横方向两侧呈现外八字“碗”形共振曲线. 通过对比, 理论计算和实验得到的散射函数关键频谱峰值特性符合较好.

关键词: 二维有限元, 局部填充的带球冠柱壳, 距离-角度时域回波, 频率-角度谱

PACS: 43.30.+m, 43.20.+g, 43.60.+d

DOI: 10.7498/aps.65.184301

1 引言

研究目标为局部填充带球冠弹性柱体模型, 该模型为高仿真度水雷, 具有显而易见的工程实用价值. 其中柱体部分是由钢性薄壳构成, 内部填充了沙, 球冠部分为真空, 内部填充与壳体的耦合作用以及复杂的端部结构对其回声特性产生重要影响. 目前, 为数不多的几何形状目标如球体、无限长或有限长弹性柱体的声散射问题的研究成果已经完备^[1]. 共振散射理论是在分析弹性柱体和球体目标基础上得出相应形态函数公式, 在理论上指出了共振现象的存在, 这种方法被广泛地用于弹性目标的识别与探测. 较多的研究针对水中弹性圆柱体声散射实验研究, 从时域和频域上论证了共振峰值以及频散现象^[2]. 基于解析表达式求解的前后散射形态函数、谐振模态以及声场分布在含有覆盖层目标消

声机理的研究中得到有效验证^[3,4]. 有效的实验检测和识别方案^[5]逐步提出, 借助于散射频谱的共振特征采用单频信号映射和形态学方法可进一步实现水下目标弹性声散射信号分离^[6]. 为有效模拟水下航行器的舱室结构, 将柱体目标研究拓展至充水圆柱薄壳、双层圆柱壳、加肋与周期加肋柱壳^[7-9], 以薄壳理论为基础, 从理论和实验上严格解析由于物理结构不同所带来的频率-角度谱的特殊性. 带球冠圆柱是一种广泛用于水雷目标的结构体, 这类目标的研究主要集中在简化的刚性模型, 高华和徐海亭^[10]利用单一矩方法对浅海声波导内的刚性球冠圆柱散射问题进行研究讨论, 得到目标在浅海波导内散射与目标深度的相关性, 关于目标的复杂结构、复杂材料对散射影响分析并没有涉及.

有限元法突破目标材质和形状得限制, 可实现任意形状目标散射声场的求解^[11-13]. Rajabi等^[14]利用三维有限元法完成分层的复合材质的柱壳散

* 国家自然科学基金(批准号: 51279033)、黑龙江省自然科学基金(批准号: F201346)和海洋工程国家重点实验室(上海交通大学)开放课题(批准号: 1417)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lixukun@hrbeu.edu.cn

射远场的数值计算, 给出远场指向分布的高精度结果, 但是运算效率不高. 本文基于变分原理建立二维有限元 (2D-FE) 轴对称模型^[15,16], 通过数值计算和实验深入探讨入射方向、目标几何结构及局部填充与声散射特性的相关性. 但是一直以来, 局部固体填充与弹性壳体的耦合在目标回声中的作用缺乏严格的理论计算和实验验证. 为正确解析和验证, 水下自由场实验分两次完成, 采用的模型分别为局部固体填充带球冠柱壳和真空带球冠柱壳, 利用关于时域回波特性的时间-距离伪彩图像和频率-角度谱解释目标散射机理. 本文的研究成果可以拓展至水下更为复杂目标的建模和声散射特性快速高精度预报.

2 散射远场计算与分析

2.1 基于2D-FE模型的远场积分公式

目标为轴对称而入射波为非轴对称激励条件下, 在柱坐标系中, 入射声波按照 Fourier 级数形式展开, 同时将声压、表面法向位移均按照 m 阶展开, 将格林函数及其导数代入 Helmholtz-Kirchhoff 积分方程, 可得到散射远场积分公式^[17]为

$$p(\mathbf{r}) = \frac{e^{-ik|\mathbf{r}|}}{4\pi|\mathbf{r}|} I_{1\infty}, \quad (1)$$

其中,

$$I_{1\infty} = \sum_m \int_{\ell} r_0 \exp \left[ik \left(\frac{z_1 z_0}{|\mathbf{r}|} \right) \right] \times \left[ik \frac{p_m(\mathbf{r}_0)}{|\mathbf{r}|} (r_1 n_r C_m(\zeta) + z_1 n_z E_m(\zeta)) - \rho_f \omega^2 E_m(\zeta) (u_m(\mathbf{r}_0) n_r + w_m(\mathbf{r}_0) n_z) \right] d\ell, \quad (2)$$

式中, ρ_f 为流体介质密度; k_0 为入射声波波数; 符号 ζ 等于 $k r r_0 / |\mathbf{r}|$; p_m 为二维轴对称目标表面声压周向分解形式; u_m, w_m 为表面法向位移的周向分解形式; 单位法向量 $\mathbf{n}(\mathbf{r}) = n_r \mathbf{e}_r + n_z \mathbf{e}_z$. 且有:

$$E_m(\zeta) = I_m^e(\zeta) e^{im\theta_i},$$

$$C_m(\zeta) = I_m^{ec}(\zeta) e^{im\theta_i},$$

其中 θ_i 为入射角, I_m^e 和 I_m^{ec} 为如下积分表达:

$$I_m^e = \int_0^{2\pi} e^{i(\zeta \cos \psi + m\psi)} d\psi$$

$$= 2\pi i^m J_m(\zeta),$$

$$I_m^{ec} = \int_0^{2\pi} e^{i(\zeta \cos \psi + m\psi)} \cos \psi d\psi$$

$$= -2\pi i^{m+1} J'_m(\zeta),$$

$J_m(\zeta)$ 和 $J'_m(\zeta)$ 分别为 m 阶 Bessel 函数及其导数.

2.2 目标建模与声学参数

为了详细解析不同物理结构对散射特性的影响, 采用无填充和局部填充两种仿真模型, 二维轴对称模型如图 1 所示, 相应的几何与声学参数见表 1 所示.

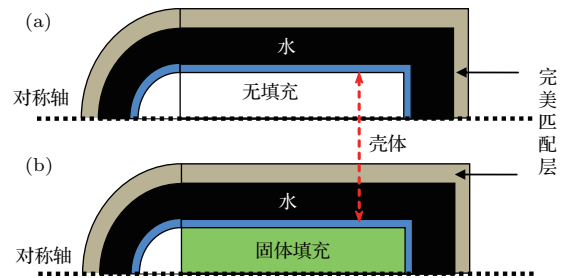


图 1 2D 轴对称模型 (a) 无填充真空模型; (b) 局部填充模型

Fig. 1. 2D-axis symmetric models: (a) Air-filling model; (b) partially solid-filling model.

表 1 目标几何与声学参数

Table 1. Geometry and acoustic parameters of target.

目标	半径/m	壳厚/m	总长/m
模型几何尺寸	0.25	0.008	2
材料	Longitudinal wave c_p /m·s ⁻¹	Shear wave c_s /m·s ⁻¹	Density ρ /kg·m ⁻³
水	1500	0	1000
钢壳	5940	3100	7800
填充	2500	1200	2000

2.3 数值计算与分析

若采用收发合置方式计算散射远场, 利用 2D-FE 方法计算两种模型散射频谱函数. 频率增量 50 Hz. 数值计算得到的频率-角度谱如图 2, 其中 $\theta = 0^\circ$ (球冠方向照射), 90° (正横方向), 180° (平顶端入射). 在 $0^\circ-180^\circ$ 范围内改变入射波方向, 入射声波频率 50 Hz—10 kHz, 频率增量 50 Hz. 伪彩色图像的亮度表示目标散射强度, 单位为 dB.

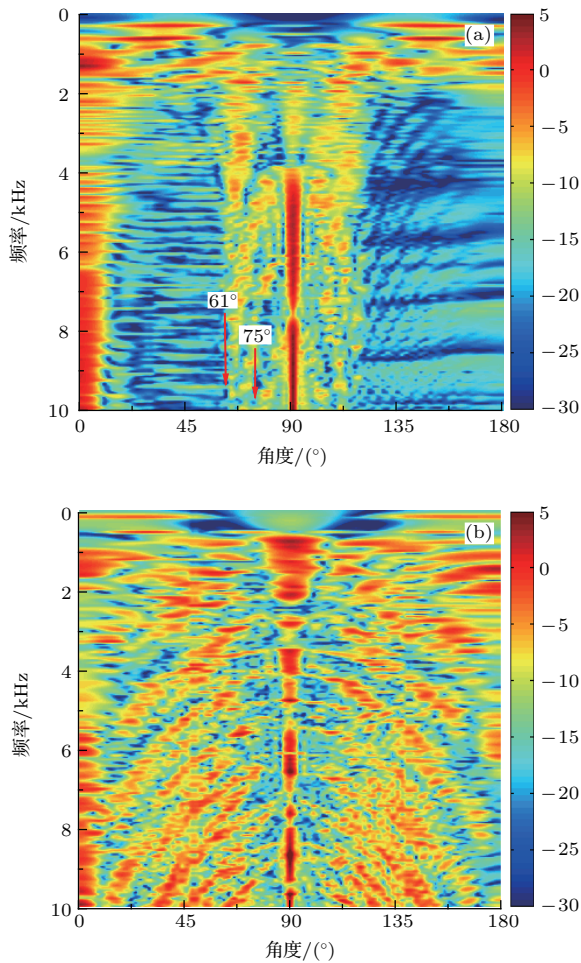


图2 频率-角度谱 (a)内真空模型; (b)局部固体填充模型

Fig. 2. Frequency-angle function in spectral domain: (a) Air-filling model; (b) partially solid-filling model.

在图2所示的频率-角度谱中,可以明显看到以下特性. 1)内真空模型目标:壳体纵波和剪切波所引起的共振频率存在截止角度,理论计算值分别为75.4°和61°.由于仿真雷两个端面物理结构不同,受棱角散射的影响在截止角度以外内真空模型出现明显的非对称性. 2)正横方向散射回波为壳体和填充物共同作用的结果;声波斜入射时,填充物的回波为主要贡献.因此,固体填充模型的频率-角度谱出现“碗”型共振曲线,并且正横两侧不对称性减弱.

文中所涉及目标模型中填充物的密度高于水,图2(b)出现的“碗形”共振曲线与文献[7]中所描述的充水圆柱薄壳散射很类似,但是由于填充物的弹性特性,使得碗形共振更为复杂.当入射角在0°—360°大范围变化时,局部填充且球冠处为真空的模型散射特性与典型有限长柱体壳相比具有特殊性.为进一步说明散射机理,图3选取了

三个特殊方向 $\theta = 0^\circ$ (球冠方向), 90° (正横方向), 180° (平顶方向)的频谱函数加以说明,计算频率50 Hz—20 kHz,频率增量为50 Hz.

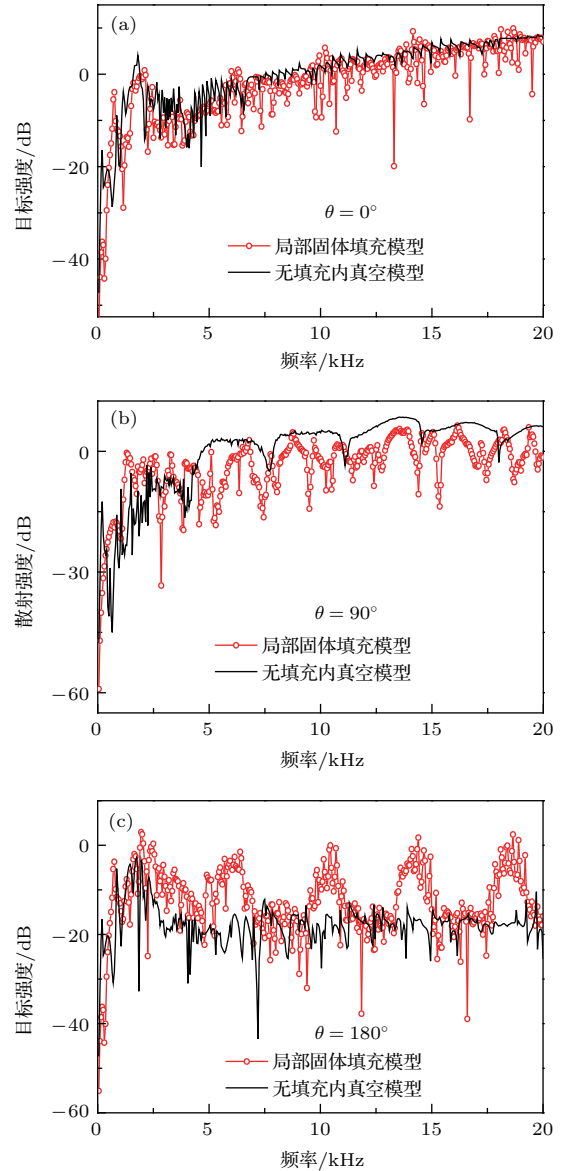


图3 频谱函数对比 (a) $\theta = 0^\circ$,入射声波正对球冠入射; (b) $\theta = 90^\circ$,入射声波正横方向入射; (c) $\theta = 180^\circ$,入射声波正对平顶端入射

Fig. 3. Comparison of spectral function at different incident angle: (a) $\theta = 0^\circ$, the sound wave incident right against air-filling cap; (b) $\theta = 90^\circ$, the sound wave incident normally against axis of cylinder; (c) $\theta = 180^\circ$, the sound wave incident right against flat face.

分析图3可得出以下结论. 1)当 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 180^\circ$ 时,声波分别正对球冠和平顶端入射.无填充模型壳体的弹性波是散射的惟一成分,因此在两个方向的散射波因壳体形状的不同而存在显著差异. 2)对局部填充模型来说,壳体和填充物均为散射回波的因素,其特殊性在于球冠部分为真空,

所以 $\theta = 0^\circ$ 时贡献较大的是壳体, 散射函数的总体趋势与空壳模型类似, 同时因填充材料的影响频响振荡加大. 而平顶端 ($\theta = 180^\circ$), 填充物的存在一定程度上抑制了壳体的弹性波共振, 在总散射场中起主要作用. 因为壳材料比水的刚度要远远大于填充物比水的刚度, 要激励壳材料的弹性振动较固体填充物要难. 而固体填充物的材料属性与水相差并不大, 因此水中弹性振动相对剧烈, 散射函数在较宽频带内近似出现等幅振荡. 这类目标散射现象在文献 [18] 中有相关描述. 3) 当 $\theta = 90^\circ$ 时, 目标几何回波为正横方向散射的主要贡献, 所以两种模型散射函数都是在刚性背景的不同频率处增添了谐振峰. 无填充模型共振峰和弹性壳体相关, 而有填充模型因填充物的存在共振峰特性更为复杂.

3 声散射实验与解释

3.1 实验布局

自由场声散射实验在哈尔滨工程大学消声水池完成, 分别测量了带球冠空心柱壳模型以及局部填沙模型的回波. 消声水池空间尺寸为 $25\text{ m} \times 15\text{ m} \times 10\text{ m}$, 发射阵中心距水面 4.5 m , 收发合置阵距目标中心 6.6 m . 实验布局满足自由空间条件, 采用收发合置方式在 $0^\circ\text{--}360^\circ$ 范围内旋转目标, 完成回波测量. 探测实验通过控制吊放深度使目标模型与收发合置阵在同一水平面上, 保持换能器位置固定不动, 目标模型悬挂在可匀速旋转的装置上, 设换能器正对目标模型平顶端时为入射角 $\theta = 0^\circ$ 和 360° , 通过旋转目标模型获得 $0^\circ\text{--}360^\circ$ 全角度目标声散射信号. 发射信号为 $10\text{--}40\text{ kHz}$ 的线性调频信号, 脉冲宽度 0.5 ms . 图 4 给出自由场回波测试实验布局示意图.

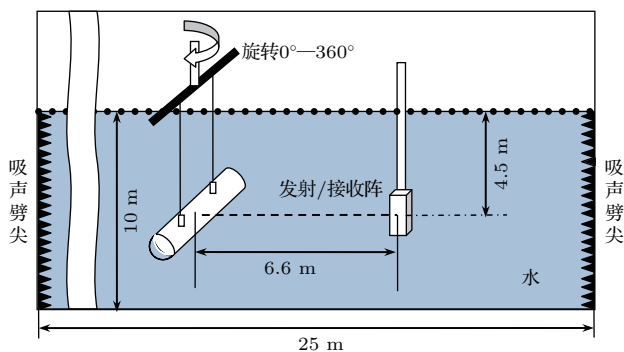


图 4 自由场声散射实验布置

Fig. 4. Arrangement of free field for acoustic scattering experiment.

3.2 实验解释

图 5 (a) 和图 5 (b) 所示的伪彩色图像描述了两种目标的距离-角度时域回波幅度, 它们傅里叶变换后的频谱如图 6 (a) 和图 6 (b) 所示. 其中 0° 和 360° 为目标平顶端面对准发射接收基阵, 90° 和 270° 为圆柱壳体正横对准发射接收基阵, 180° 为目标球冠对准发射接收基阵.

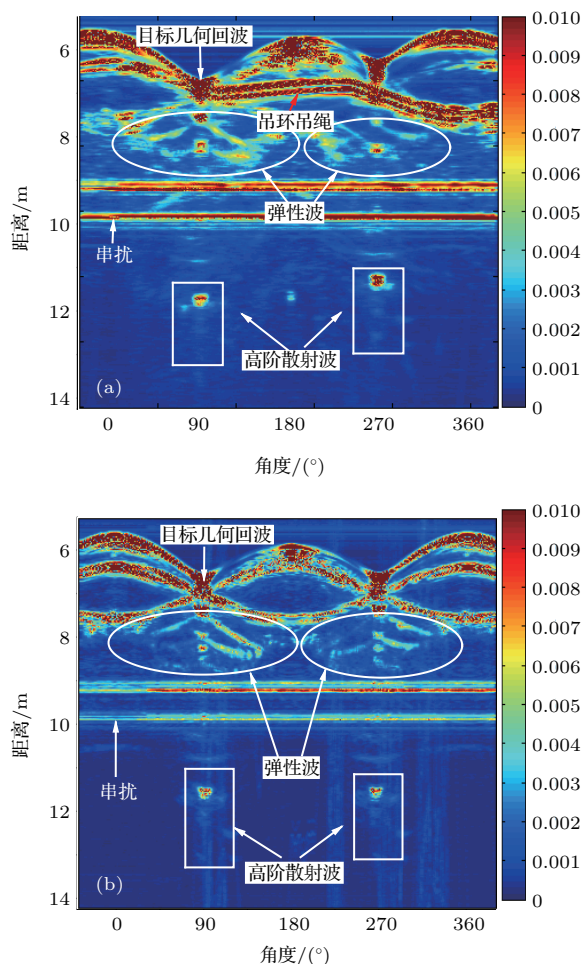


图 5 距离-角度时域回波 (a) 内真空模型; (b) 局部固体填充模型

Fig. 5. Pseudo-color image of distance-angle in time domain: (a) Air-filling model; (b) partially solid-filling model.

分析图 5 和图 6 的实验结果可以看出: 1) 回波中可以清晰地看到几类回波, 其中白色椭圆内所标注的是弹性波, 红色箭头所标注的是吊环及其吊绳回波, 最先到达的是目标自身的几何回波; 2) 当发射声波斜入射时, 弹性波的运动从圆周环绕波变成螺旋环绕波, 这时回波在时域结构中将出现图 5 (a) 中白色椭圆内所呈现的弧形轨迹, 这种结构已经从有限长充水圆柱声散射理论和试验中得到验证, 环

绕表面波和“回音廊”式波两种理论很好地解释了柱体目标的散射机理,目标几何回波的二次散射也在实验中测试得到,用白色矩形框标注出;3)频域上由于内部填充物引起弹性波,所以入射波正对平顶方向强度减弱,并在较大角度范围出现“外八字”并且分簇干涉条纹,如图6红色椭圆所示区域,这一现象在空壳模型的频域-角度谱中并不存在。

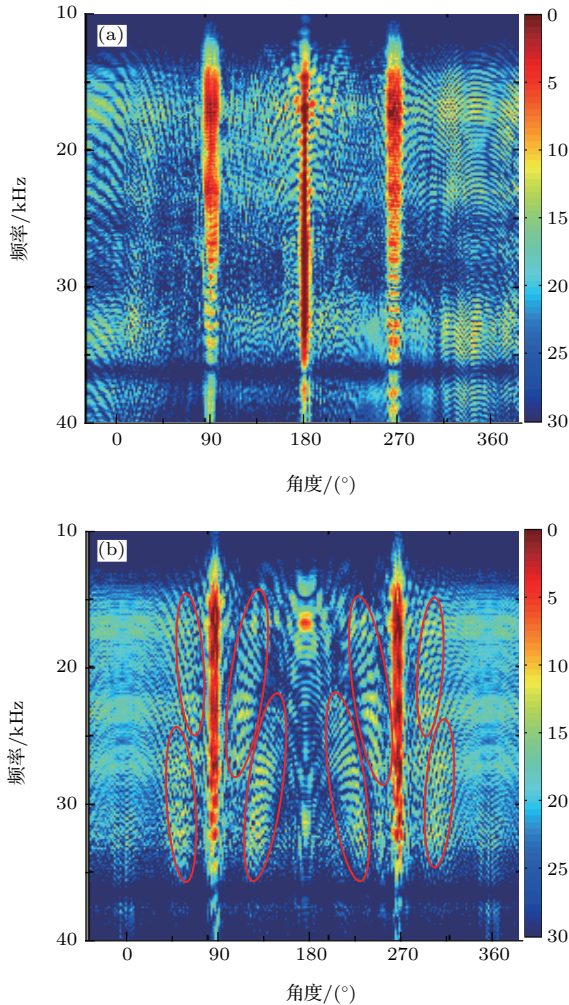


图6 频域-角度谱 (a) 内真空模型; (b) 固体填充模型
Fig. 6. Pseudo-color image of frequency-angle in spectral domain: (a) Air-filling model; (b) partially solid-filling model.

下面对于回波最强的正横附近回波数据进行深入分析,图7(a)给出无填充模型正横方向时域回波波形,为清楚地描述各种回波,图7(b)给出维纳滤波处理后信号波形。

分析图7中不同回波成分产生的机理,其中a1为目标几何回波,出现距离为6.6 m,这是实际发射/接收阵到达目标正横方向的距离。b1为吊环回波,吊环距离镜反射点约0.25 m,其回波出现距离

约为6.85 m,与6.84 m处出现这个回波符合,b2为吊环附近吊绳所产生的干扰波。c1为沿着壳体表面传播而后再辐射到接收换能器的弹性波,其传播速度按照水中声速进行估算,则沿圆柱壳体传播距离为 $2\pi r = 3.14 \times 0.5 = 1.57$,折算单程为0.785 m,即相对于目标几何回波距离为0.785 m,回波相对于水听器出现距离为 $0.785 + 6.6 = 7.385$ m,在试验中获得距离为7.4 m,误差仅为0.015 m,两者非常接近。可以再次预测第二阶弹性波,也就是再沿壳体按红色箭头继续传播一周再辐射,出现距离为8.17 m,在图7(b)中表示为回波c2,其距离为8.05 m,误差为0.12 m。具体回波描述见表2,正横方向回波产生机理见图8。

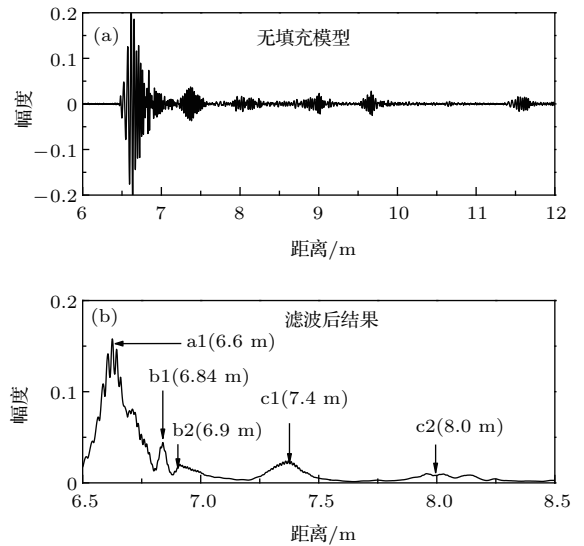


图7 无填充目标正横方向时域回波和滤波结果 (a) 时域回波; (b) 滤波信号
Fig. 7. Echoes and filtered results when the sound wave incidents normally to the axis of cylinder: (a) Echoes; (b) filtered results.

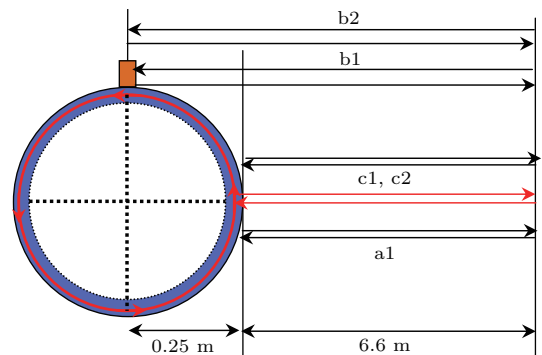


图8 正横方向内真空模型回波机理
Fig. 8. Echo characteristic of air-filling target when the sound wave incidents at $\theta = 90^\circ$.

表2 内真空目标正横方向时域回波

Table 2. Echoes in time domain when wave incident normally to the axis of air-filling target.

序号	回波来源	实验测试距离/m	计算距离/m
a1	目标几何回波	6.6	6.6
b1	吊环回波	6.84	6.85
b2	吊绳回波	6.9	靠近吊环
c1	弹性波	7.4	7.385
c2	二阶弹性波	8.05	8.17

图9和图10对正横方向固体填充模型回波机理进行解释,其中与无填充目标回波出现在相同位置的a1, b1, b2分别为目标几何回波、吊环与吊绳回波.它们出现的位置分别在6.6, 6.84, 6.9 m.内部有填充的情况下弹性波的产生机理相对复杂,声波可以透过壳体,在目标内部沿着不同路径反射和透射后再次辐射到水听器.图9(b)中第一个红色框内所表示的c1,对应图10中红色线所描述路径传播的回波,为进入壳体后由于内部填充物的存在,沿着径向传播到壳体的另一侧,然后由壳壁反射后再辐射到接收换能器的弹性波,其传播速度接近并略大于水中声速,若按照水中声速进行估算,沿圆柱壳体径向传播距离为 $2R = 0.5 \times 2 = 1$ m,折算单程为0.5 m,也就是相对于目标几何回波距离为0.5 m,回波相对于水听器出现距离为7.1 m,在实验中获得距离为7.04 m,误差为0.06 m,两者非常接近.有填充目标正横方向时域回波描述见表3.

填充物内部“回音廊式”传播路径一般为正多边形,若 N 为边的个数,则正横入射条件下,在目标内部沿不同多边形传播距离为

$$L_i = 2r(N - i) \sin(\pi/N),$$

$$N \geq 4; i = 1, 2, \dots \quad (3)$$

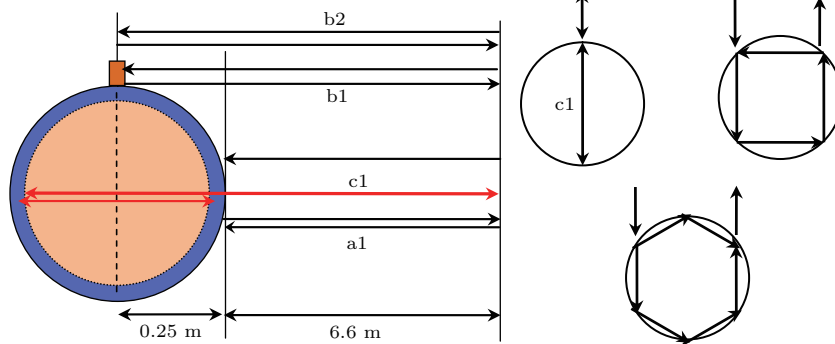


图10 (网刊彩色) 正横方向($\theta = 90^\circ$) 固体填充模型内部声波传播形式与机理

Fig. 10. (color online) Sound propagating in solid-filling model ($\theta = 90^\circ$).

值得注意的是, c4为多路径的“回音廊波”,比壳体二阶弹性波略滞后到达,它的出现对弹性波起到了抑制作用.

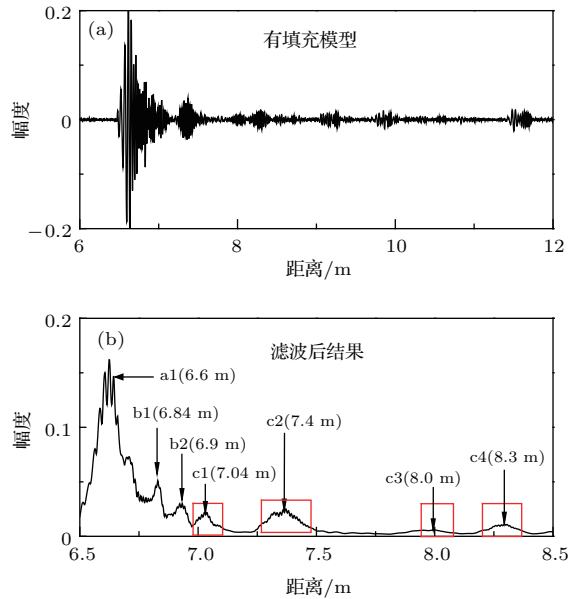


图9 (网刊彩色) 正横方向局部填充模型回波机理 (a) 时域回波; (b) 滤波信号

Fig. 9. (color online) Echo characteristic of partially solid-filling model when the sound wave incidents at $\theta = 90^\circ$. (a) Echoes; (b) filtered results.

表3 有填充目标正横方向时域回波

Table 3. Echoes in time domain when wave incident normally to the axis of solid-filling target.

序号	回波来源	实验测试距离/m	计算距离
a1	目标几何回波	6.6	6.6
b1	吊环回波	6.84	6.85
b2	吊绳回波	6.9	6.9
c1	填充物弹性波	7.04	7.1
c2	柱壳弹性波	7.4	7.385
c3	柱壳二阶环绕弹性波	8.00	8.17
c4	填充物回音廊波	8.3	8.1—8.4

3.3 结果比较

图 11 给出了固体填充目标正横方向收发分置回波信号的傅里叶变换频谱分析结果, 其中红色曲线表示数值计算结果, 为了减少系统传输特性的影响, 利用发射 LFM 调频信号对其进行了权值调整. 在不同方向上散射回波频率响应中存在多个峰值起伏, 这些峰值对应几何回波和弹性回波频率特征, 是水中目标识别和分类的关键, 经比较验证, 数值计算与实验结果关键峰值出现的位置基本符合.

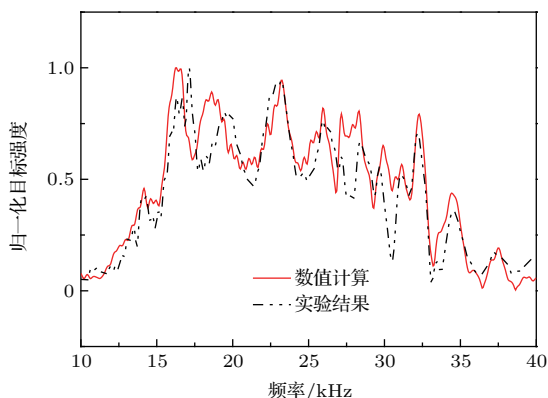


图 11 (网刊彩色) 固体填充目标正横方向回波频域特征
Fig. 11. (color online) Frequency response function of solid-filling model when azimuth angle $\theta = 90^\circ$.

观察图 11 也可以明显看到理论和实际测量结果之间存在误差, 产生误差的主要原因有三个, 一是吊绳的强干扰覆盖了几乎所有角度范围, 使得测试结果幅度上存在误差. 二是目标内部填充物的声学参数是经验选取的, 和实际实验所选用的有差距, 另外, 计算频率响应特性时忽略了高阶散射项, 使得频率峰值出现的位置与理论计算相比略有偏差. 三是受实验系统传输特性影响, 所以与理论计算结果相比共振峰位置理论计算和实际测量幅度不可避免存在误差.

4 结 论

通过理论和实验研究了局部固体填充的圆柱壳收发合置散射特性, 以内真空的同形状壳体作为对比, 详细解释目标不同成分时域回波产生的机理, 利用频谱函数的关键共振峰作为理论和测试结果符合的评价. 后向散射的距离-角度时域回波和频率-角度谱反映出各种成分在目标散射场分析中所发挥的作用, 内部填充和壳体是构成仿真水雷散射的主要因素, 其中正横方向刚性散射为主要贡

献, 有无填充壳体目标仅在刚性背景中增添了不同的共振峰; 球冠后向散射和壳体以及内部填充弹性特性密切相关, 虽然两种模型的球冠部分均为真空壳, 有填充模型的散射仍然受填充物的影响, 只不过壳体散射为主要贡献. 而平顶端入射条件下, 有填充模型的散射特征中填充物承担主要贡献, 主要共振峰的位置与填充材料相一致.

参考文献

- [1] Flax L, Dragonette L R, Uberall H 1978 *J. Acoust. Soc. Am.* **63** 723
- [2] Hua D C, Peng L H, Yu X T 2010 *Periodical of Ocean University of China* **40** 141 (in Chinese) [华大成, 彭临慧, 于小涛 2010 中国海洋大学学报 **40** 141]
- [3] Shun Y, An J Y, Xu H T 2013 *Acta Acoustic* **38** 699 (in Chinese) [孙阳, 安俊英, 徐海亭 2013 声学学报 **38** 699]
- [4] Jin G L, Yin J F, Wen J H, Wen X S 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 014305 (in Chinese) [金国梁, 尹剑飞, 温激鸿, 温熙森 2016 物理学报 **65** 014305]
- [5] Aubrey L E, Kevin L W, Daniel S P, Philip L M 2014 *J. Acoust. Soc. Am.* **136** 109
- [6] Li X K, Liu M Y, Jiang S 2015 *Marine Sci. Appl.* **14** 208
- [7] Pan A, Fan J, Zhuo L K 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 214301 (in Chinese) [潘安, 范军, 卓琳凯 2012 物理学报 **61** 214301]
- [8] Pan A, Fan J, Wang B 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **134** 3452
- [9] Zheng G Y, Fan J, Tang W L 2009 *Acta Acoustic* **34** 490 (in Chinese) [郑国垠, 范军, 汤渭霖 2009 声学学报 **34** 490]
- [10] Gao H, Xu H T 2006 *The Acoustic Academic Conference Xiamen, China, October 18–22, 2006* p105 (in Chinese) [高华, 徐海亭 2006 全国声学学术会议论文集, 厦门, 10月18–22日, 2006 第105页]
- [11] Thompson L L 2006 *J. Acoust. Soc. Am.* **20** 1315
- [12] Ihlenburg F 1998 *Finite Element Analysis of Acoustic Scattering* (Applied Mathematical Science) (New York: Springer-Verlag) pp189–210
- [13] Chai Y B, Li W, Gong Z, Li T Y 2016 *Ocean Eng.* **116** 129
- [14] Rajabi M, Ahmadian M T, Jamali J 2015 *Compos. Struct.* **128** 395
- [15] Zampolli M, Tesei A, Finn B J 2007 *J. Acoust. Soc. Am.* **122** 1472
- [16] Zampolli M, Alessandra T, Canepa G 2008 *J. Acoust. Soc. Am.* **123** 4051
- [17] Hu Z, Fan J, Zhang P Z, Wu Y S 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 064301 (in Chinese) [胡珍, 范军, 张培珍, 吴玉双 2016 物理学报 **65** 064301]
- [18] Zhang P Z, Wang S Z, Wang R T, Chen Y F, Wang L X 2013 *Acta Acoustic* **39** 331 (in Chinese) [张培珍, 王朔中, 王润田, 陈云飞, 王露贤 2013 声学学报 **39** 331]

Acoustic scattering of a complex target with partially solid-filling immersed in water: numerical simulation and experiment*

Zhang Pei-Zhen¹⁾²⁾ Li Xiu-Kun^{1)†} Fan Jun³⁾ Wang Bin³⁾

1) (*Acoustic Science and Technology Laboratory, College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Haerbin 150001, China*)

2) (*Laboratory of Ocean Remote Sensing and Information Technology, College of Information, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China*)

3) (*State Key Laboratory of Ocean Engineering, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

(Received 18 April 2016; revised manuscript received 20 June 2016)

Abstract

Resonance peaks of spectral function transformed from echoes are the most important characteristics for distinguishing the different targets. So in frequency domain, response function is usually calculated with small interval in a wider frequency band to satisfy the demand of fast and high precision prediction in practical engineering. According to axis-symmetric model, we use 2 dimensional finite element method to solve the acoustic scattering problem efficiently, even when the scattering target has a large size and complex structure. This article focuses on the explanation of scattering characteristics of a special target, namely, a partially solid-filling cylinder with hemispherical cap and thin-shell. Supposing that the receiver and transmitter are in monostatic arrangement, we calculate scattering strength in far field in a frequency range of 50 Hz–10 kHz, and give pseudo-color image represented by frequency-angle to describe influences of shell, filling and the orientation of the incident wave on scattering properties. According to the numerical results, the following conclusions are given: when the transmitter is facing the hemispherical cap (the cap has a vacuum inside, and the incident angle θ is equal to 0°), the main contribution of scattered wave comes from the shell of target. When $\theta = 180^\circ$, the internal filling inhibits the elastic resonance of the shell, and plays an important role in the total scattering field. Because the acoustic impedance of the shell is much larger than that of the water, elastic resonance of the shell is more difficult to excite than that of the solid filling. While the material property of the solid filling is not significantly different from that of the water, so the elastic resonance of the filling fluctuates relatively fast, and the scattering function vibrates approximately with equal amplitude in a wider frequency band. When $\theta = 90^\circ$, the sound wave is perpendicular to the axis of the cylinder, the shell and the filling work together on scattered waves. Once the incident angle deviates from 90° and the sound wave obliquely illuminates target with respect to the axis of the cylinder, the echo of the filling material plays a predominant role in the total scattering field. The frequency-angle spectrum of the solid filling model presents the “bowl” type resonance curve. In order to validate which physical and geometrical structure must be considered in solution of scattered far field, the acoustic scattering experiments are performed in tank with a target suspending in water, which is in monostatic arrangement and satisfies the free field condition. Frequency of incident wave is in a frequency range of 10–40 kHz. For obtaining pseudo-color image of distance-angle, echoes are received and measured when the target is rotated from 0° – 360° . The scattered waves are divided into mirror reflection and various

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51279033), the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China (Grant No. F201346), and the State Key Laboratory of Ocean Engineering of Shanghai Jiao Tong University, China (Grant No. 1417).

† Corresponding author. E-mail: lixikun@hrbeu.edu.cn

components of elastic wave, and the mechanisms of these echoes are explained based on circumferential wave around the surface. Whispering gallery waves are also considered and clearly seen in the experiment. Due to the coupling interaction between the filling and elastic shell, the resonance curve of frequency-angle spectrum splays “bowl” curve outward the sides of normally direction. Experimental and numerical results are in good agreement, which is indicated by comparing the resonance peaks characteristic in spectral domain. The results of this article will be helpful in studying underwater target with more complicated structure.

Keywords: 2-dimensional finite element, partially solid-filling cylindrical shell, pseudo-color image of distance-angle echoes, frequency-angle spectrum

PACS: 43.30.+m, 43.20.+g, 43.60.+d

DOI: [10.7498/aps.65.184301](https://doi.org/10.7498/aps.65.184301)