



水下环形凹槽圆柱体散射声场空间指向性调控

周彦玲 范军 王斌 李兵

Manipulating spatial directivity of acoustic scattering from a submerged cylinder by means of annular grooves

Zhou Yan-Ling Fan Jun Wang Bin Li Bing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 174301 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210111

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210111>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水中微小波纹圆柱体声散射低频共振调控

Manipulation of low-frequency resonance scattering from submerged slightly deformed polymer cylinders

物理学报. 2021, 70(5): 054301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201535>

超声悬浮过程中圆柱体的旋转运动机理研究

Rotation mechanism of ultrasonically levitated cylinders

物理学报. 2017, 66(12): 124301 <https://doi.org/10.7498/aps.66.124301>

基于声散射的水下气泡群空间关联性研究

Spatial correlation of underwater bubble clouds based on acoustic scattering

物理学报. 2017, 66(1): 014305 <https://doi.org/10.7498/aps.66.014305>

旋涡声散射特性的尺度效应数值研究

Numerical investigation of scale effect on acoustic scattering by vortex

物理学报. 2021, 70(10): 104301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202206>

塑料类高分子聚合物材料水中目标声学参数反演

Inversion for acoustic parameters of plastic polymer target in water

物理学报. 2019, 68(21): 214301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190991>

超声场中空化泡对弹性粒子微流的影响

Effect of micro-bubble in ultrasonic field on microstreaming of elastic particle

物理学报. 2019, 68(24): 244301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191253>

水下环形凹槽圆柱体散射声场空间指向性调控*

周彦玲 范军† 王斌 李兵

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

(2021年1月17日收到; 2021年2月16日收到修改稿)

本文提出一种具有深度梯度的环形凹槽结构, 可用于调控水中有限长刚性圆柱体散射声场空间指向性. 基于声学相位阵列理论分析了环形凹槽圆柱体散射空间指向性改变的机理, 研究表明: 凹槽深度方向相位延迟和凹槽间 Bragg 散射的相互作用使得平面声波垂直于圆柱方向入射其正横方向散射声波发生偏转. 采用有限元方法讨论了凹槽结构参数如占空比、梯度等对圆柱散射声场空间分布特征的影响规律. 多个不同深度梯度环形凹槽单元组合圆柱体散射声场数值计算和实验结果显示: 具有环形凹槽结构圆柱体正横方向散射声波均匀偏转到预定的空间范围内, 使得圆柱体声散射场空间指向性均衡化, 改变了圆柱整体的散射特征, 这为水下目标声隐身设计和声波定向传播提供了新的方法.

关键词: 环形凹槽结构, 声波偏转, 圆柱体, 声散射**PACS:** 43.20.+g, 43.30.+m**DOI:** 10.7498/aps.70.20210111

1 引言

声学超表面打破传统超材料的限制, 在很小的尺度上实现调控, 具有紧凑、成本低、损耗小以及便于集成等优势, 具有广泛的应用前景, 对于声学领域的基础研究和新型声学器件的拓展具有重要的指导意义. 由于声学超表面具有界面相位突变的特点, 可以根据结构的几何尺寸任意调控 $0-2\pi$ 的相位分布, 实现声波波阵面的调控^[1], 声学超表面的出现为自由调控声波提供了一种新的途径. 近几年, 出现了很多声学超表面理论设计和实验验证, 实现了如声波特殊折射/反射^[2-5]、聚焦^[6-9]、完美吸收^[10-13]、声波全息成像^[14-17]等许多新现象. 梯度声学人工结构作为一种特殊的声学超表面, 在调控声波传播方向和能量的空间分布具有重要作用, 研究主要集中于空气声学. Christensen 等^[18]提出了利用凹槽结构产生的声表面波耦合实现声场调

控, 自此凹槽结构在声学超表面中被广泛研究. Zhu 等^[19]通过在刚性平板上设计具有深度梯度的凹槽阵列调控声波能量的空间分布. Jia 等^[20]在刚性表面上刻有宽度梯度凹槽阵列以减慢声表面波的传播. 文献^[21, 22]通过数值仿真和实验验证了刚性表面刻有圆孔半径梯度结构和圆孔深度梯度结构实现了声波的聚集和成像等. 在水声领域, 关于声学超表面的研究较少. Srivastava 等^[23]在平面上刻有周期性凹槽结构并利用其 Bragg 散射特征实现了对水下目标无源声学编码. Wu 等^[24]通过在黄铜圆板上刻有不同深度同心凹槽结构实现了水下超声波的聚焦. Liu 等^[25]通过实验验证了水下周期性凹槽表面的 Scholte-Stoneley 波不是频散的, 为利用凹槽结构进行宽带调控声波提供了理论依据. Lee 等^[26]通过在刚性平面上雕刻各类凹槽结构利用声波的热损耗实现声波的吸收. 以上这些基于凹槽结构的研究利用的是刚性散射, 要实现微变形表面的相位共振需要声波

* 国家自然科学基金 (批准号: 11774229) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: fanjun@sjtu.edu.cn

频率较高(兆赫兹级),而水下高频声波随距离衰减较快,因此这类声学结构表面设计在水声领域难以应用。

常见的水下航行器外形近似为圆柱,因此本文提出了一种具有深度梯度的环形凹槽结构可用于调控水中圆柱体散射声场空间指向性,扩展了广义斯涅耳定律^[27,28]的应用,其最初设计用于调控二维平面界面超表面的异常反射、透射、吸声等。本文针对三维曲面目标散射声场的调控展开了研究。第2节基于有限元方法(以COMSOL multiphysics商业软件为计算平台)计算了具有环形凹槽结构圆柱的频域空间特性,并分析了调控环形凹槽圆柱散射声场空间指向性的物理机理。第3节讨论了环形凹槽结构参数如占空比、深度梯度对圆柱正横方向散射声波偏转的影响规律,并通过精心设计6个不同梯度环形凹槽单元,成功地将圆柱体正横方向散射声波偏转到预先设计好的空间范围内,改变了圆柱体的整体声散射特征,在水声中具有重要的应用价值。第4节进行了6个环形凹槽单元组合圆柱收发分置声散射水池实验,获取了其回波特性,并得到了与理论预估相一致的结果。

2 环形凹槽圆柱散射声场空间调控

为了实现水下圆柱体散射声场空间指向性调控,根据广义斯涅耳定律,在圆柱表面引入一个空间变化的相位突变,反射角 θ_r 为:

$$\theta_r = \arccos \left(-\cos \theta_i - \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\varphi(x)}{dx} \right), \quad (1)$$

其中 θ_r 和 θ_i 分别是反射角和入射角, λ 是波长, $\varphi(x)$ 为表面相位空间分布。图1(a)给出了环形凹

槽圆柱示意图,圆柱表面刻有不同深度环形凹槽结构,当入射波进入深度为 $h(x)$ 的凹槽后被封闭端反射,反射波和入射波在凹槽开口端的相移为 $\varphi(x) = 4\pi h(x)/\lambda$ 。通过在不同空间位置选择适当的凹槽深度,可以得到反射波相移的空间变化。由于多基地声纳探测水下目标时,正横方向散射最强,因此本文只考虑平面声波垂直于目标正横方向入射的情况,即 $\theta_i = 90^\circ$, (1)式可以简化为:

$$\theta_r = \arccos(-2g(x)), \quad (2)$$

其中 $g(x) = dh(x)/dx$ 为环形凹槽阵列的深度梯度。因此,当入射声波一定时,通过设计适当地凹槽深度梯度可以改变声波传播方向。

由于环形凹槽圆柱体周向均匀,散射声场与水平方位角无关。为了减少计算量,基于有限元方法采用COMSOL multiphysics软件中二维轴对称模型压力声学物理场对平面声波正横入射环形凹槽圆柱散射声场进行数值仿真。环形凹槽圆柱体半径 $a = 2.5$ cm,长度 $L = 6.1$ cm,两个相邻凹槽中心的距离 $d = 0.6$ cm,凹槽宽度 $w = 0.5$ cm,凹槽深度为 h_j , j 为凹槽序列号, $h_j = \begin{cases} h_{\max} - (N - j)gd, & g > 0, \\ h_{\max} + (j - 1)gd, & g < 0, \end{cases} (j = 1, 2, 3 \dots N)$,环形凹槽最深的深度 $h_{\max} = 1.95$ cm,深度梯度 $g = -0.35$,一个凹槽单元有 $N = 10$ 个凹槽。

为了分析环形凹槽圆柱散射声场频率和空间分布特征,分别计算刚性圆柱和环形凹槽圆柱目标强度的频率-角度谱如图2所示,计算频率为5—100 kHz,频率增量为1 kHz。其中横坐标为接收点角度 θ ,即观测点与 z 轴正向的夹角,纵坐标为频率,单位为kHz,伪彩色图像的亮度表示目标强度,单位为dB。

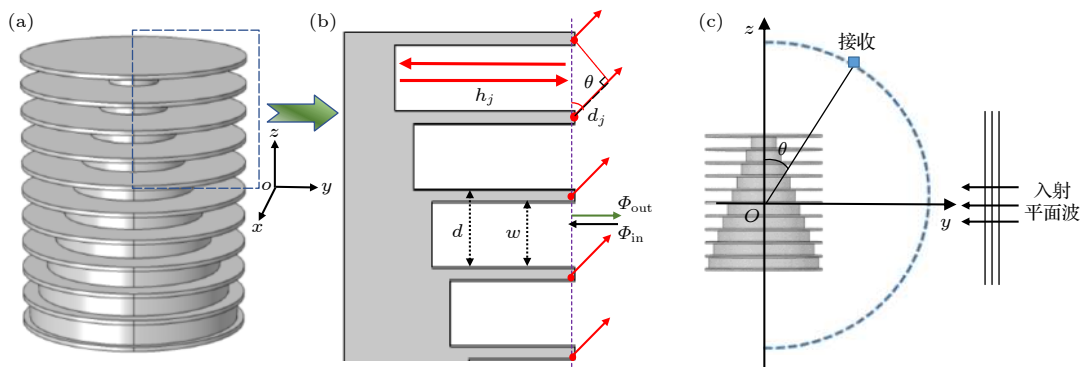


图1 (a) 具有环形凹槽结构圆柱示意图; (b) 蓝色虚线框局部放大; (c) 圆柱散射声场收发分置示意图

Fig. 1. (a) Schematic illustration of an annular groove cylinder; (b) details of the blue dotted box; (c) bistatic diagram of simulation.

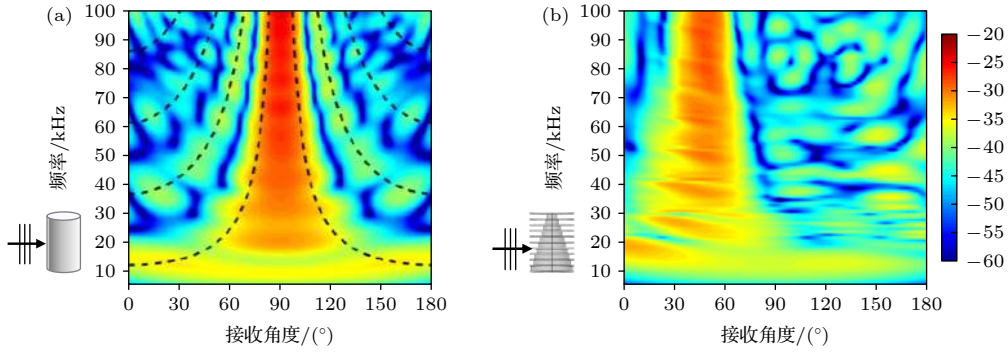


图 2 频率-角度谱 (a) 刚性圆柱; (b) 环形凹槽结构圆柱

Fig. 2. Frequency-angle spectra of target strength of the finite: (a) Rigid cylinder; (b) annular groove cylinder.

对于光滑表面圆柱, 当入射声波垂直于圆柱方向入射时, 正横方向散射目标强度最强, 具有很强的方向性, 但由于有限长圆柱两端边界的限制, 图 2(a) 中以 90° 为中心两边出现明暗相间的“八”字形条纹, 这是圆柱侧面两个亮点之间的几何干涉效应^[29,30]. 而当圆柱表面具有环形凹槽结构时, 散射声波方向发生偏转, 如图 2(b) 所示, 目标强度最强的位置由正横偏转到 45° 方向, 且声波偏转方向与频率无关, 但具有一定的宽度, 随着频率升高, 宽度变窄. 为了更好地理解深度梯度环形凹槽圆柱正横散射声波偏转的物理机理, 引入声学相位阵列理论. 如图 1(b) 中红色箭头所示, 入射声波沿着凹槽深度方向传播在封闭端反射然后到达观测点, 声波的传播可以简单地看作是一系列具有相位延迟的阵元组成的线列阵, 远场散射声压可以近似表示为:

$$p_s(\rho, \theta, \omega) \approx \sum_{j=1}^N A_j e^{i[\omega t + k_0(\rho_j + 2h_j)]}, \quad (3)$$

其中 ρ_j 为观测点和第 j 个凹槽中心的距离, $\rho_j = \rho_0 + L \cos \theta / 2 + (j-1) d \cos \theta$, 线列阵总长度 $L = Nd$, ρ_0 为观测点到阵中心的距离. 入射波是单位振幅的平面波且每个凹槽宽度相同, 所以每个凹槽幅度因子相同, 即 $A_j \equiv A$, 则 (3) 式化简为:

$$p_s(\rho, \theta, \omega) \approx A e^{ik_0 \rho_0} e^{ik_0 d(\cos \theta + 2g)(N-1)/2} \times \frac{\sin[k_0 d(\cos \theta + 2g)N/2]}{\sin[k_0 d(\cos \theta + 2g)/2]}. \quad (4)$$

根据 (4) 式获取散射声压幅值最大时的角度 $\theta_0 = \arccos(-2g)$, 散射声压为 $p(\rho, \theta_0, \omega) \approx NA e^{ik_0 \rho_0}$, 则 (4) 式可以表示为 $p(\rho, \theta, \omega) = p(\rho, \theta_0, \omega)D(\theta)$,

归一化指向性函数 $D(\theta)$ 为

$$D(\theta) = \frac{1}{N} e^{ik_0 d(\cos \theta + 2g)(N-1)/2} \times \frac{\sin[Nk_0 d(\cos \theta + 2g)/2]}{\sin[k_0 d(\cos \theta + 2g)/2]}. \quad (5)$$

根据 (5) 式得到环形凹槽圆柱体归一化指向性函数的频率-角度谱 (见图 3), 在 $\theta = 45^\circ$ 方向散射声波最强, 且偏转声波具有一定宽度, 主波束宽度与频率相关, 频率越高, 宽度越窄, 与数值计算结果吻合较好.

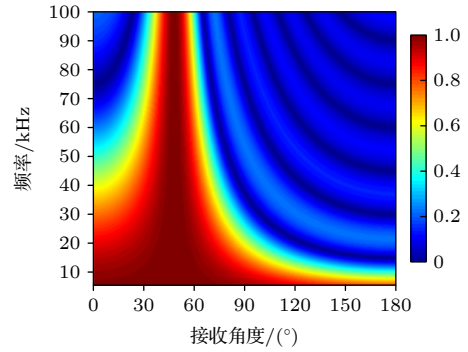


图 3 凹槽圆柱归一化指向性函数频率-角度谱

Fig. 3. Frequency-angle spectra of the normalized directional factors for the annular groove cylinder by Eq. (5).

3 结构参数影响

由于环形凹槽深度方向相位延迟和凹槽间 Bragg 散射的相互作用使得平面声波垂直入射圆柱正横散射声波发生偏转. 详细讨论环形凹槽结构参数, 如占空比、梯度对环形凹槽圆柱散射声场偏转效果的影响.

3.1 占空比

定义环形凹槽结构占空比为 $\delta = w/d \times 100\%$, $d = 0.6 \text{ cm}$, 环形凹槽结构梯度 $g = -0.35$. 基于有限元方法计算占空比 $\delta = 0$ 和 83.3% 的环形凹槽圆柱在频率 $f = 80 \text{ kHz}$ 目标强度的空间指向性如图 4 所示, 占空比 $\delta = 0$ (即刚性圆柱, 图 4 中黑色线) 在 $\theta = 90^\circ$ 方向目标强度最强, 当圆柱表面具有凹槽结构 $\delta = 83.3\%$ 时, $\theta = 45^\circ$ 方向目标强度最强, $\theta = 90^\circ$ 方向相较于圆柱目标强度约减小了 15 dB . 图 5 显示了环形凹槽圆柱在 $\theta = 45^\circ$ (黑色线) 和 $\theta = 90^\circ$ (红色虚线) 方向目标强度随占空比变化规律, 显然随着占空比增大, 环形凹槽圆柱反向散射 ($\theta = 90^\circ$) 目标强度单调下降; 当 $\delta < 30\%$ 时, 随着 δ 增大, 散射声波偏转方向 (即 $\theta = 45^\circ$) 目标强度单调增加, 当 $\delta > 30\%$, 其目标强度基本不变. 为了不改变圆柱整体外部结构而使圆柱

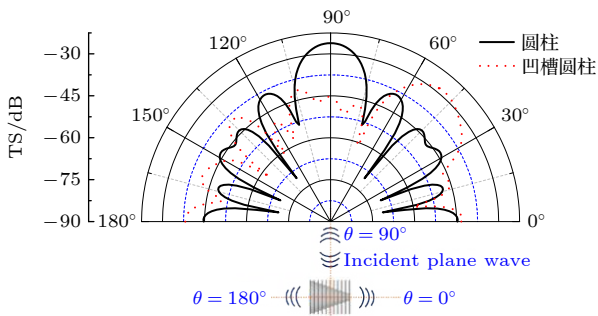


图 4 频率 $f = 80 \text{ kHz}$ 占空比 $\delta = 0$ 和 $\delta = 83.3\%$ 凹槽圆柱目标强度空间指向性

Fig. 4. Spatial directivity of target strength of the annular groove cylinder with $\delta = 0$ and 83.3% at $f = 80 \text{ kHz}$.

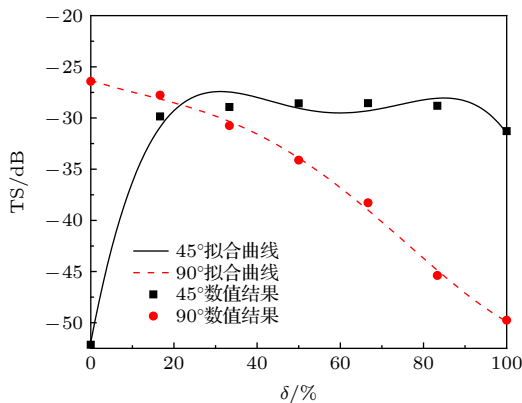


图 5 $f = 80 \text{ kHz}$, 不同占空比凹槽圆柱在 45° 和 90° 方位目标强度

Fig. 5. Target strength of the annular groove cylinder with varying δ in the 45° and 90° direction at $f = 80 \text{ kHz}$.

散射声波偏转且正横方向目标强度较低, 文中数值仿真均选定凹槽宽度 $w = 0.5 \text{ cm}$, 此时环形凹槽圆柱正横目标强度相较于光滑圆柱降低了 15 dB 左右.

3.2 梯度

环形凹槽深度梯度分别为 $g = -0.25$, $g = -0.13$ 和 $g = 0.25$, $g = 0.13$ 的凹槽圆柱在频率 $f = 80 \text{ kHz}$ 的目标强度空间指向性如图 6 所示, 凹槽圆柱目标强度最大值分别出现在 $\theta = 60^\circ$, 75° , 105° 和 120° 方向, 与公式理论预报的声波偏转方向一致. 因此, 通过设计不同环形凹槽的深度梯度可以使得环形凹槽圆柱正横散射目标强度偏转到任意角度, 从而实现对有限长刚性圆柱散射声场空间分布的调控. 利用此特征, 设计不同深度梯度的环形凹槽单元组合使得圆柱正横方向目标强度在一定空间范围内均衡化, 从而改变圆柱整体的回波特征. 环形凹槽圆柱结构参数为: 半径 $a = 3.5 \text{ cm}$, $L = 38 \text{ cm}$, 每个凹槽单元中凹槽最深的深度相同 $h_{\text{max}} = 1.95 \text{ cm}$. 6 个环形凹槽单元梯度依次为 $g_1 = -0.13$, $g_2 = 0.25$, $g_3 = -0.35$, $g_4 = 0.35$, $g_5 = -0.25$, $g_6 = 0.13$. 由公式可知, 6 个环形凹槽单元对应声波偏转方向依次为 $\theta_1 = 75^\circ$, $\theta_2 = 120^\circ$, $\theta_3 = 45^\circ$, $\theta_4 = 135^\circ$, $\theta_5 = 60^\circ$ 和 $\theta_6 = 105^\circ$.

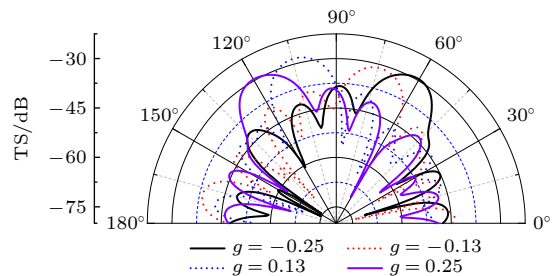


图 6 $f = 80 \text{ kHz}$, 不同梯度环形凹槽结构圆柱目标强度空间指向性

Fig. 6. Spatial directivity of target strength of the annular groove cylinder with different g at $f = 80 \text{ kHz}$.

获取了频率 $f = 80 \text{ kHz}$ 6 个环形凹槽单元组合圆柱不同接收角度的目标强度 (图 7 中红色虚线), 对比相同尺度光滑圆柱 (图 7 中黑色线) 目标强度的指向性可以发现: 环形凹槽圆柱在正横方向 (即 90°) 较光滑圆柱目标强度约降低了 15 dB , 正横方向散射声波均衡分布在 $45^\circ - 135^\circ$ 范围内. 利用此结构使得圆柱正横方向较为集中的散射能量被分散到其他区域内, 使得散射声场均衡化, 改变了圆柱整体的散射特征.

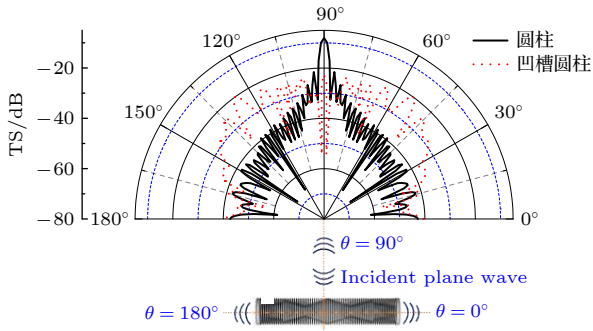


图 7 6 个环形凹槽单元组合圆柱目标强度指向性, $f = 80$ kHz

Fig. 7. Spatial directivity of target strength of the cylinder with six annular groove units at $f = 80$ kHz.

4 实验

4.1 实验布置

开展了 6 个环形凹槽单元组合结构圆柱收发分置声散射特性水池实验, 此次实验是在上海交通大学水声工程所水池完成. 两个实验模型 (圆柱和环形凹槽圆柱) 均为实心不锈钢材料, 近似为刚性, 几何结构参数与 3.2 节中 6 个环形凹槽单元组合圆柱相同. 测试模型水平置于空间尺寸为 $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的充水水池中, 发射换能器采用刚性连接吊放位置距离目标 2.15 m , 水听器为 B&K8103, 固定于悬臂梁上距离目标 1.05 m , 均匀旋转悬臂梁从而获取收发分置条件下测试模型正横方向入射, 不同接收方向的散射声场. 发射换能器、水听器和目标三者处于同一深度, 距离水面 2.4 m , 实验模型及具体布放如图 8 和图 9 所示. 为排除市电干扰, 测量过程中所有设备全程处于 UPS 直流供电状态.

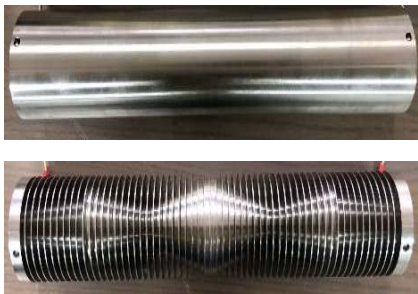


图 8 实验模型

Fig. 8. Experimental models.

4.2 实验数据分析

发射信号为线性调频信号, 中心频率 $f_0 =$

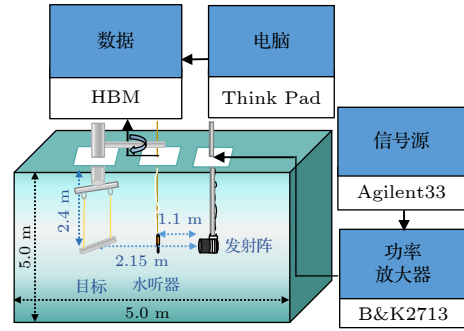


图 9 实验装置布放图

Fig. 9. Diagram of experimental system setup.

80 kHz , 带宽 $B = 40\text{ kHz}$, 脉宽 $\tau = 0.5\text{ ms}$, 发射周期 $T = 500\text{ ms}$. 首先对实验获取的时域信号进行脉冲压缩再取对数, 得到时间-角度谱, 横轴表示接收角度, 纵轴表示时间, 单位为 ms . 由于圆柱两个端面产生的镜反射回波, 在光滑圆柱时域图 (图 10(a)) 中出现两条相交的亮线. 对于环形凹槽圆柱, 不同凹槽单元由于接收角度、距离不同产生时延, 所以在空间上分离出 6 个强亮区, 在时域图中表现为三个强亮点. 由第 2 节可知, 声波偏转具有一定宽度, 所以在凹槽圆柱时域图中出现 6 个具有一定宽度的亮线, 如图 10(b) 所示, 黑色、红色和绿色虚线框分别对应声波偏转方向 $\theta_3 = 45^\circ$, $\theta_5 = 60^\circ$ 和 $\theta_1 = 75^\circ$ 的环形凹槽单元的散射回波.

对水听器接收到的凹槽圆柱时域信号进行宽带信号目标强度处理得到其目标强度的频率-角度谱, 如图 11(b) 所示, 凹槽圆柱散射声场空间指向性发生变化, 6 个预设角度在其主瓣偏转方向有所增强, 且存在干涉效应, 这是由于偏转声波具有一定宽度, 且凹槽单元的周期性结构之间的干涉. 由于具有相同深度梯度方向的环形凹槽单元之间存在相位差发生干涉, 在 $45^\circ - 75^\circ$ 和 $105^\circ - 135^\circ$ 角度范围内出现很强的条纹, 从几何关系 (图 11(c)) 点 A、点 B 和点 C (各凹槽单元几何中心) 推导了预测干涉条纹的近似公式:

$$f = \frac{nc}{l \cos \theta}, \quad (6)$$

其中 $n = 1, 2, 3 \dots$, $l = 4Nd$, 图 11 中黑色虚线是根据 (6) 式预测的干涉条纹. 从图 11 中提取出频率 $f = 80\text{ kHz}$ 凹槽圆柱目标强度随接收角度变化的曲线, 在 $45^\circ - 75^\circ$ 和 $105^\circ - 135^\circ$ 角度范围内凹槽圆柱散射声场均衡化, 90° 方向散射声场较弱, 实验结果 (红色虚线) 与数值计算结果 (黑色实线) 一致.

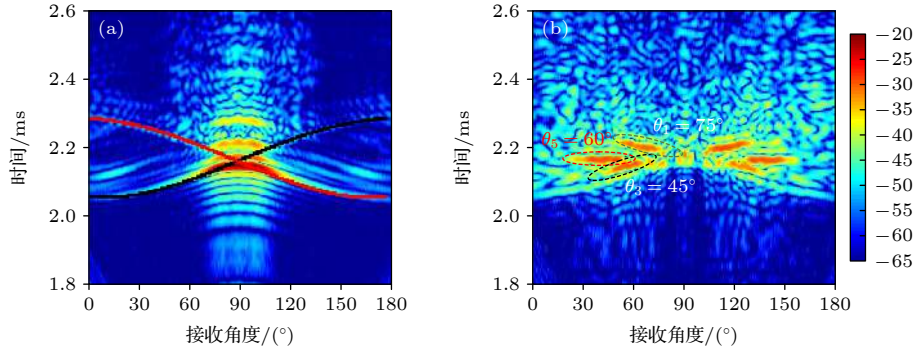


图 10 时间-角度谱 (a) 刚性圆柱; (b) 环形凹槽单元组合圆柱
Fig. 10. Time-angle spectra: (a) Rigid cylinder; (b) annular groove cylinder.

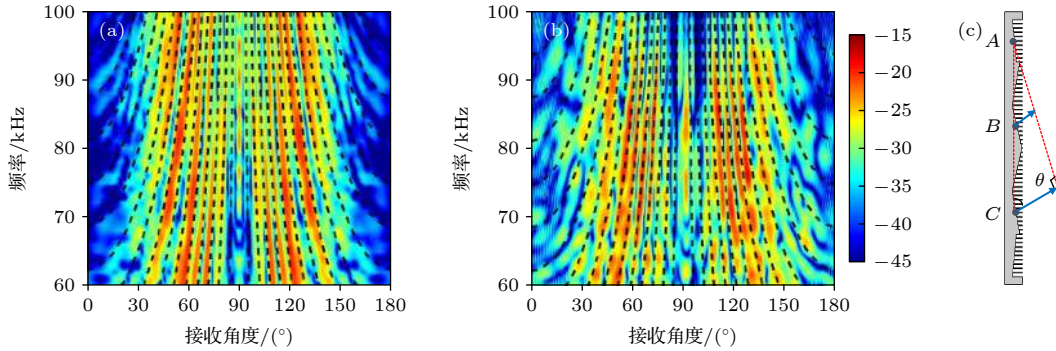


图 11 凹槽单元组合圆柱目标强度频率-角度谱 (a) 数值计算结果; (b) 实验结果; (c) 6个凹槽单元圆柱二维图
Fig. 11. Frequency-angle spectra of target strength for annular groove cylinder: (a) Numerical result; (b) experimental result; (c) 2-D geometry of the annular groove cylinder.

由于发射信号直接到达水听器的信号和水听器接收到的圆柱散射波信号在接近圆柱两端一定范围内发生混叠, 因此实验和数值结果在接近 0° 和 180° 范围内存在一定的误差. 由于实验用模型加工精度的限制和实验测量引起的误差使得图 12 中数值计算结果和实验结果存在一定的误差.

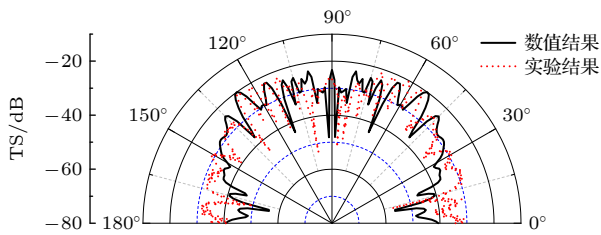


图 12 频率 $f = 80$ kHz 凹槽圆柱目标强度指向性
Fig. 12. The normalized directivity of target strength for cylinder with six annular groove units at $f = 80$ kHz.

实验中获取频率 $f = 80$ kHz 圆柱和凹槽圆柱不同角度的目标强度, 如图 13 所示, 黑色线代表圆柱实验结果, 红色虚线为凹槽圆柱实验结果. 当

入射波垂直于圆柱方向入射时, 目标强度指向性比较尖锐, 且在 90° 目标强度值最大, 具有很强的方向性. 环形凹槽单元组合圆柱目标强度在 90° 方向约减小了 12 dB, 在 $45^\circ - 75^\circ$ 和 $105^\circ - 135^\circ$ 的角度范围内增大. 对比圆柱和环形凹槽圆柱目标强度指向性显示: 具有不同梯度环形凹槽单元组合圆柱正横散射声波均匀偏转到预定的空间范围内, 使得散射声场均衡化, 改变了圆柱整体的散射特征.

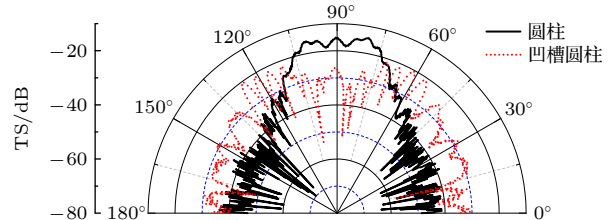


图 13 频率 $f = 80$ kHz 圆柱和凹槽圆柱目标强度实验结果对比

Fig. 13. The comparison of target strength in experiment between cylinder and annular groove cylinder at $f = 80$ kHz.

5 结 论

本文基于有限元方法对具有环形凹槽结构圆柱的声散射机理进行了分析. 详细讨论了环形凹槽结构参数如占空比、梯度等对圆柱散射声场空间指向性的影响规律: 圆柱正横散射目标强度随着占空比增大单调下降; 而散射声波偏转方向目标强度在占空比 $\delta < 30\%$ 时随着占空比增大而增大, 当占空比 $\delta > 30\%$, 其目标强度基本不变. 当入射声波一定时, 通过设计适当的环形凹槽梯度可以使圆柱反向散射声波发生定向偏转, 且声波偏转方向与频率无关. 另外, 对多个深度梯度环形凹槽单元组合圆柱进行数值计算和实验验证, 研究发现通过设计不同梯度环形凹槽单元组合圆柱可以使得圆柱反向散射声波目标强度均匀偏转到一定区域内, 使得散射声场均衡化, 改变了圆柱整体的散射特征. 因此通过改变环形凹槽梯度、多个深度梯度环形凹槽单元间不同组合等结构参数调控目标散射声场, 为水下目标声隐身设计提供新思路.

参考文献

- [1] Li Y, Liang B, Gu Z M, Zou X Y, Cheng J C 2013 *Sci. Rep.* **3** 2546
- [2] Zhao J J, Li B W, Chen Z N, Qiu C W 2013 *Sci. Rep.* **3** 2537
- [3] Zhao J J, Li B W, Chen Z N, Qiu C W 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 151604
- [4] Li Y, Xue J, Li R Q, Liang B, Zou X Y, Yin L L, Cheng J C 2014 *Phys. Rev. Appl.* **2** 064002
- [5] Mei J, Wu Y 2014 *New J. Phys.* **16** 123007
- [6] Fan X D, Zhu Y F, Liang B, Yang J, Cheng J C 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 243501
- [7] Zhu Y F, Fan X D, Liang B, Yang J, Yang J, Yin L L, Cheng J C 2016 *AIP Adv.* **6** 121702
- [8] Ye Y T, Ke M Z, Li Y X, Wang T, Liu Z Y 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 154504
- [9] Chen J, Sun Z Q, Fan Z 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 254102
- [10] Li J F, Wang W Q, Xie Y B, Popa B I, Cummer S A 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 091908
- [11] Long H Y, Cheng Y, Liu X J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 143502
- [12] Long H Y, Gao S X, Cheng Y, Liu X J 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 033507
- [13] Li Y and M. Assouar B 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 063502
- [14] Melde K, Mark A G, Qiu T, Fischer P 2016 *Nature* **537** 518
- [15] Tian Y, Wei Q, Cheng Y, Liu X J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 191901
- [16] Xie Y B, Shen C, Wang W Q, Li J F, Suo D J, Popa B, Jing Y, Cummer S A 2016 *Sci. Rep.* **6** 35437
- [17] Zhu Y F, Assouar B 2019 *Phys. Rev. Mater.* **3** 045201
- [18] Christensen J, Fernandez D A I, De L P F, Martin M L, Garcia V F J 2007 *Nat. Phys.* **3** 851
- [19] Zhu J, Chen Y Y, Zhu X F, Garcia V F J, Yin X B, Zhang W L, Zhang X 2013 *Sci. Rep.* **3** 1728
- [20] Jia H, Lu M H, Ni X, Bao M, Li X D 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 124504
- [21] Jia H, Lu M H, Wang Q C, Bao M, Li X D 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 103505
- [22] Zhu Y F, Zou X Y, Li R Q, Jiang X, Tu J, Liang B, Cheng J C 2015 *Sci. Rep.* **5** 10966
- [23] Srivastava P, Nichols B, Sabra K G 2017 *J. Acoust. Soc. Am.* **142** EL573
- [24] Wu X X, Xia X X, Tian J X, Liu Z Y, Wen W J 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 163502
- [25] Liu J F, Declercq N F 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 261603
- [26] Lee H K, Jung M, Kim M, Shin R, Kang S, Ohm W, Kim Y T 2018 *J. Acoust. Soc. Am.* **143** 1534
- [27] Cheng J C 2019 *Acoustical Principle* (Beijing: Science Press) pp89–90 (in Chinese) [程建春 2019 声学原理 (北京: 科学出版社) 第89—90页]
- [28] Zhu Y F, Liang B, Cheng J C 2018 *J. Appl. Acoust.* **37** 53 (in Chinese) [朱一凡, 梁彬, 程建春 2018 应用声学 **37** 53]
- [29] Tang W L, Chen D Z 1988 *Acta. Acustica.* **1** 29 (in Chinese) [汤渭霖, 陈德智 1988 声学学报 **1** 29]
- [30] Tang W L, Fan J, Ma Z C 2018 *Acoustic Scattering of Underwater Targets* (Beijing: Science Press) pp55–66 (in Chinese) [汤渭霖, 范军, 马忠诚 2018 水中目标声散射 (北京: 科学出版社) 第55—66页]

Manipulating spatial directivity of acoustic scattering from a submerged cylinder by means of annular grooves*

Zhou Yan-Ling Fan Jun[†] Wang Bin Li Bing

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

(Received 17 January 2021; revised manuscript received 16 February 2021)

Abstract

An annular groove (AG) structure with depth gradient is proposed which can manipulate the spatial distribution of the acoustic scattering field for a finite rigid cylinder in water. An analytical analysis is given for better understanding the underlying mechanism of the abnormal scattered wave, which can be accomplished by using the phased array theory. When the plane acoustic wave is normally incident, the scattering acoustic wave in the transverse direction of the cylinder deflects, which is due to the interaction between the phase delay modulated by the AG structure with varying groove depths and the Bragg scattering of adjacent grooves. The finite element method is used to calculate the acoustic scattering field of a finite rigid cylinder with annular grooves and obtain the frequency and spatial distribution characteristics. How the structural parameters such as depth, gradient, and duty ratio of the annular grooves affect the acoustic scattering field is discussed in detail. The results show that the target strength in the transverse direction decreases linearly with duty ratio increasing while the target strength in the deflection direction of the acoustic wave increases with the duty ratio until $\delta = 30\%$, after which it remains almost constant. When the incident acoustic wave is fixed, the acoustic scattering wave of the AG cylinder can be deflected by designing the gradient appropriately, and the deflection direction is independent of the frequency. Numerical and experimental results for a cylinder with multiple annular-groove units show that the spatial directivity of the scattering field of the grooved cylinder changes, and the target strength is enhanced at six pre-designed deflection angles. Meanwhile, the deflected acoustic wave has a certain width and the interference among periodic structures of the AG units exists, which makes the spatial directivity of the scattering field of the cylinder equalize and changes the scattering characteristics of the cylinder, thereby providing a theoretical basis for designing three-dimensional underwater objects each with an acoustic stealth.

Keywords: annular grooves, acoustic deflection, cylinder, acoustic scattering

PACS: 43.20.+g, 43.30.+m

DOI: [10.7498/aps.70.20210111](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210111)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11774229).

[†] Corresponding author. E-mail: fanjun@sjtu.edu.cn