水中规则波纹表面球回声特性研究

彭茜蕤，周彦玲，范 军
(上海交通大学海洋工程国家重点实验室，上海 200240)

摘要：运用声呐目标回声特性预报的板块元方法，研究了平面波入射水中规则波纹(正弦平方曲线波纹)表面球体的目标回声特性。分析了表面波纹高度、周期、入射平面波频率和入射方位角对声目标强度空间分布和频率响应特性的影响规律。讨论了不同频段目标强度空间分布特性的形成机理，得到了表面波纹参数与目标强度频率响应和空间分布特性的近似定量关系。通过水槽实验测量得到了 3D 打印的规则波纹表面尼龙球目标强度的频率响应和空间分布特性，测量结果与理论计算结果吻合较好。掌握规则波纹表面球体回声特性，有助于开展利用声学超构材料对散射声场调控的研究。

关键词：波纹表面；回声特性；目标强度
中图分类号：TB556 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-3630(2018)-06-0528-07
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.06.003

Echo characteristics of a regular corrugated surface ball in water

PENG Xi-rui, ZHOU Yan-ling, FAN Jun
(*State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai* 200240, *China*)

Abstract: Echo characteristics of a regular corrugated (sine squared curve) surface sphere in water with an incident plane wave are investigated by using the planar elements method which is used for forecasting echo characteristics of sonar targets. The effects of surface corrugation's height, period, incident plane wave frequency and incident azimuth angle on the spatial distribution and frequency response characteristics of acoustic target strength are analyzed. The formation mechanism of the spatial distribution characteristics of target strength in different frequency bands is discussed. The approximate quantitative relationship between the parameters of corrugated surface and the spatial distribution as well as the frequency response characteristics of target strength is obtained. The target strength of the 3D printed regular corrugated surface nylon sphere is measured in acoustic tank. The measured spatial distribution and frequency response characteristics of target strength are in good agreement with the theoretical results. A thorough understanding of the echo characteristics of regular corrugated surface sphere is helpful for conducting research on controlling the scattering sound field by using the acoustic metamaterials.

Key words: corrugated surface; echo characteristics; target strength

0 引 言

粗糙表面声散射研究是一个既有理论意义又有实际意义的问题[1]。对粗糙表面回声(反向散射)特性的研究可应用于医疗超声、超声无损检测、海底和海面混响建模与抑制、海洋浮游生物分类和探测等方面。从 Lord Rayleigh 开始，对粗糙表面声散射已经进行了长期的研究。大多数水中粗糙表面声散射的研究都以起伏海底、海面声散射和混响建模为背景[2-4]，针对粗糙平面声散射进行研究，其中，粗糙表面假设为满足高斯统计分布的随机起伏平面或正弦起伏平面。研究的方法包括 Kirchhoff 近似方法、基于瑞利假设的微扰方法、积分方程方法以及小斜率近似方法等。部分针对水下粗糙曲面目标声散射开展研究，T. K. Stanton 针对水下浮游生物声散射，基于 Sommerfeld-Watson 变换和变形柱方法，研究了满足高斯统计分布的随机粗糙表面的拉长弹性柱体目标平均散射声场[5-7]，P. Jansson 基于从 Helmholtz 积分方程推导得到的零场方法，研究了满足高斯统计分布的随机粗糙表面球形目标的声散射特性[8]。

确定性规则波纹(正弦波纹、正弦平方波纹只是其中的子类)表面目标是随机粗糙表面目标的一个特例，无论表面起伏幅度和斜率的大小程度如何改变，其散射声场总是相干的，这就使人们可以更为深入地研究粗糙表面目标的声散射特征，如 J. A. Fawcett[9]采用 Kirchhoff/衍射混合方法研究了具有

收稿日期：2017-12-13; **修回日期：**2018-03-15
基金项目：国家自然科学基金(11774229)资助项目。
作者简介：彭茜蕤(1993－)，女，湖北武汉人，硕士，研究方向为水下目标声散射。
通讯作者：范军, E-mail: fanjun@sjtu.edu.cn

正弦平方波纹起伏的刚性球和刚性圆柱的宽带脉冲信号声散射时域特征，但针对具有规则波纹表面的水下曲面目标声散射特性的研究较少。近年来，以目标表面微结构设计为基础的人工声学超材料的研究发现，表面规则波纹(狭缝)可以产生许多新的物理现象[10-11]，如人工牛眼结构就是平面表面上由多个周期性同心凹槽组成的，这也可以看成是一类具有规则波纹结构的目标，这类人工牛眼声学结构可以引起声波异常透射和声波能量的单向传输。掌握规则波纹表面目标回声特性有助于开展利用声学超构材料对散射声场调控的研究。

本文应用声呐目标回声特性预报板块元方法，研究了平面波入射到水中规则波纹(正弦平方曲线波纹)表面(刚性和非刚性)实心球体目标的回声特性；分析了表面波纹高度、周期、入射平面波频率和入射方位角对声目标强度空间分布和频率响应特性的影响规律，讨论了不同频段目标强度空间分布特性的形成机理；并开展了 3D 打印的规则波纹表面尼龙球回声目标强度的频率响应和空间分布特性的水声水槽测量实验。

1　规则波纹表面球体目标

本文采用 x-y 平面内满足式(1)的正弦平方波纹曲线绕 x 轴旋转得到的三维规则波纹表面球作为典型目标开展研究，其表面方程见式(2)。

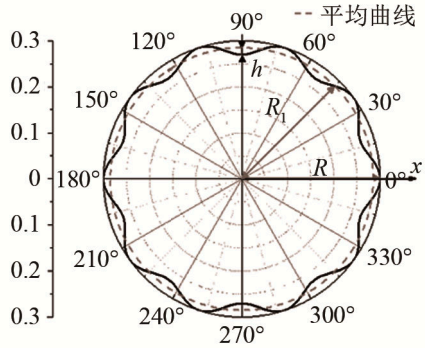
$$r(R,\varphi)=R\left(1-\xi\sin^2(n\varphi)\right),\quad n=0,1,2\cdots \tag{1}$$

$$\begin{cases} x(R,\theta,\varphi)=r(R,\varphi)\cos(\varphi)\cos(\theta) \\ y(R,\theta,\varphi)=r(R,\varphi)\sin(\varphi)\cos(\theta) \\ z(R,\theta,\varphi)=r(R,\varphi)\sin(\theta) \end{cases} \tag{2}$$

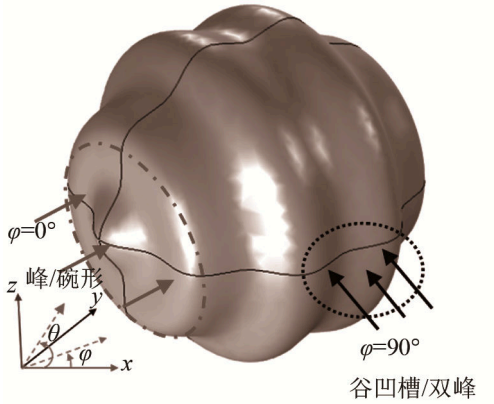
其中，R 为球外半径，ξ 为波纹起伏高度 h 的 2 倍与外半径 R 的比值，$\xi=2h/R$，n 为 $(0,\ \pi)$ 范围内波纹周期个数，θ 为掠射角，φ 为方位角。图 1 给出了 n=5、8 时 x-y 平面内正弦平方波纹曲线(图 1(a)、1(c))和三维渲染的波纹球(图 1(b)、1(d))，其中 R=0.3 m，ξ=10%，图中虚线为波纹的平均曲线，其半径为 $R_1=R-h$，经由简单推导可以得到平均曲线的周长等于波纹曲线的周长。

从图 1 可以看到规则波纹球表面呈现峰谷结构，当 n 为奇数时，方位角 φ=0° 附近呈现峰/碗形结构，方位角 φ=90° 附近呈现谷凹槽/双峰结构；当 n 为偶数时，方位角 φ=0° 附近呈现峰/碗形结构，方位角 φ=90° 附近呈现峰/双谷凹槽结构，如图中点划线圈出的区域和点线圈出的区域。峰谷周期弧长为：

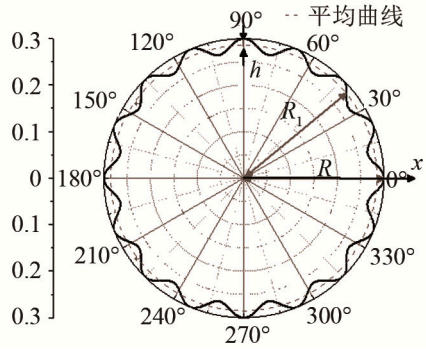
$$\hat{l}=\pi(R-h)/n \tag{3}$$



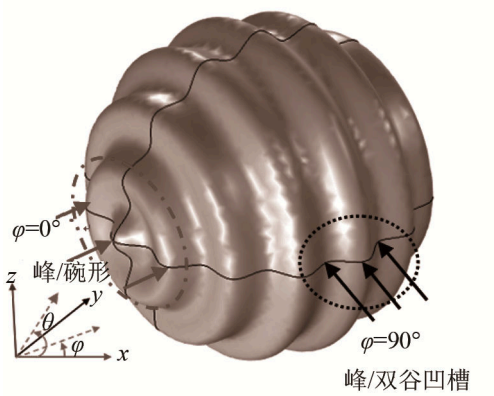
(a) n=5 时的波纹曲线



(b) n=5 时三维渲染波纹球



(c) n=8 时的波纹曲线



(d) n=8 时三维渲染波纹球

图 1　正弦平方波纹曲线(a,c)和三维渲染的波纹表面球(b,d)

Fig.1　The sine squared curve(a, c)and the three-dimensional rendering of corresponding corrugated surface sphere(b, d)

等效于将平均曲线周长 $2n$ 等分。

在计算仿真中假设表面具有以下两种声学特性[12-13]，假设 1 是刚性表面，表面满足式(4)的刚性边界条件，假设 2 是非刚性表面，表面满足式(5)的边界条件：

$$\begin{cases}\varphi_i=\varphi_s\\ \dfrac{\partial(\varphi_i+\varphi_s)}{\partial n}=0\end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases}\varphi_s=V(\theta_1)\varphi_i\\ \dfrac{\mathrm{i}\omega\rho(\varphi_s+\varphi_i)}{\partial(\varphi_s+\varphi_i)/\partial n}=-Z_n\end{cases} \tag{5}$$

其中，φ_i 为入射波势函数，φ_s 为散射波势函数，ω 为入射波圆周频率，ρ 为水的密度，c 为水中声速，ρ_1 为球的密度，c_l 为纵波声速，c_t 为剪切波声速，平面波反射系数 $V(\theta_1)$ 如式(6)所示[14]：

$$V(\theta_1)=\frac{Z_l\cos^2 2\gamma_t+Z_t\sin^2 2\gamma_t-Z}{Z_l\cos^2 2\gamma_t+Z_t\sin^2 2\gamma_t+Z} \tag{6}$$

其中，Z、Z_l、Z_t 分别为流体中、固体中纵波和固体中剪切波的声阻抗，如式(7)所示：

$$Z=\frac{\rho c}{\cos\theta_1},\ Z_l=\frac{\rho_1 c_l}{\cos\alpha_l},\ Z_t=\frac{\rho_1 c_t}{\cos\gamma_t} \tag{7}$$

式中：入射波与表面法向量夹角为 θ_1，纵波折射角为 α_l，剪切波折射角为 γ_t；Z_n 为表面声阻抗，在无限大平面界面上，无论界面多么复杂，平面波反射系数与表面声阻抗总可以用式(8)联系：

$$Z/Z_n=[1-V(\theta_1)]/[1+V(\theta_1)] \tag{8}$$

2 回声特性预报的板块元方法

基于 Kirchhoff 近似所建立的板块元方法是一种相对较为成熟的对声呐目标中高频回声特性进行预报的数值方法[12]。对于收-发合置的情况，基于物理声学或 Kirchhoff 近似的非刚性声呐目标的远场目标强度(TS)为[13]

$$\mathrm{TS}=20\lg\left|-\frac{\mathrm{i}k_0}{2\pi}I\right| \tag{9}$$

$$I=\int_{s_0}\mathrm{e}^{2\mathrm{i}k_0\boldsymbol{\rho}\cdot\boldsymbol{r}_0}(\boldsymbol{n}_0\cdot\boldsymbol{r}_0)V(\theta_1)\mathrm{d}s \tag{10}$$

其中，$\boldsymbol{\rho}$ 为面元所在点到参考点的矢量，$\boldsymbol{n}_0$ 为面元的单位法向矢量，$\boldsymbol{r}_0$ 为接收点到参考点的单位矢量，$k_0=\omega/c$ 为水中波数，$V(\theta_1)$ 为局部表面反射系数，θ_1 为入射波与表面法向量夹角。

板块元方法首先将目标的三维几何表面进行空间板块离散划分，用一组三维平面板块来近似复杂形状的目标曲面，一般采用三角形板块进行划分。所有板块的散射声场之和就是总散射声场的近似值。算法中将单个三维板块变化到局部二维平面，式(10)中的面积分则转化为与板块顶点坐标相关的代数运算，如式(11)所示，从而避免了面积分运算，提高了计算速度。

$$I=V(\theta_1)w\sum_{m=1}^{3}\frac{\mathrm{e}^{2\mathrm{i}k_0(x_m u+y_m v)}(p_{m-1}-p_m)}{(u+p_{m-1}v)(u+p_m v)} \tag{11}$$

其中，$p_m=(y_{m+1}-y_m)/x_{m+1}-x_m$，这里定义 $p_0=(y_1-y_3)/x_1-x_3$。m 是三角形板块顶点号，(x_m,y_m) 是三角形板块顶点的坐标，$\boldsymbol{r}_{01}=u\mathbf{i}+v\mathbf{j}+w\mathbf{k}$ 为发射点到板块参考中心的矢量，$\theta_1=\arccos(w)$ 是板块法线和入射声线的夹角。

假如划分为 M 个平面板块，则式(10)可以写成：

$$I=\sum_{i=1}^{M}V(\theta_{1i})w_i'\sum_{m=1}^{3}\frac{\mathrm{e}^{2ik(x'_m u'_i+y'_m v'_i)}(p_{i(m-1)}-p_{im})}{(u'_i+p_{i(m-1)}v'_i)(u'_i+p_{im}v'_i)} \tag{12}$$

式中，(x'_m,y'_m) 是变换到二维平面后第 i 个板块的顶点坐标，$\boldsymbol{r}_{i01}=u'_i\mathbf{i}+v'_i\mathbf{j}+w'_i\mathbf{k}$ 为发射点到第 i 个板块参考中心矢量，$V(\theta_{1i})$ 是局部表面反射系数，$\theta_{1i}=\arccos(w_i')$ 第 i 个板块法线和入射声线夹角。

板块元方法比通常的面元积分法计算速度快，不仅适用于远场、刚性目标的回声特性预报，还可推广应用于近场和非刚性表面的回声特性预报，目前板块元方法已经较为广泛应用于声呐目标中高频回声特性预报[15-18]。

本文将整个模型表面剖分成多个三角形，三角形的边长满足 $l\leqslant\lambda/6$，其中，l 为三角形边长，λ 为声波波长。

本文将采用板块元方法对规则波纹表面球回声特性进行仿真计算，需要说明的是目前考虑的波纹球波纹起伏相对较小，计算中忽略了声波在波纹凹槽之间的多次散射[19-20]。

3 数值计算与分析

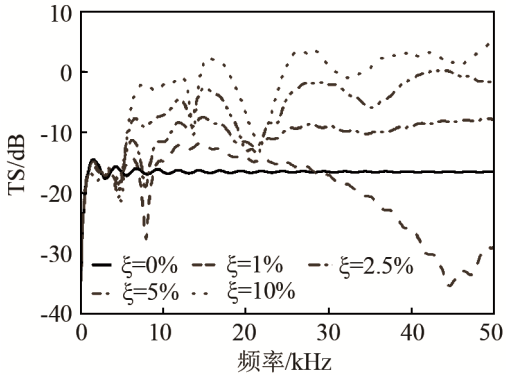
以正弦平方波纹球为例，采用板块元方法对其回声特性进行数值仿真。波纹球的半径 R=0.3 m，在仿真中假设球面为刚性边界条件。

3.1 目标强度的频率响应特性

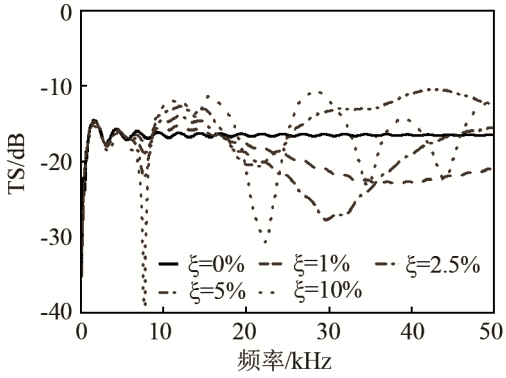
图 2(a)和图 2(b)分别给出了入射角 φ=0° 和 φ=90°，在不同 ξ 条件(ξ=10%，5%，2.5%，1%，0%，其中 ξ=0%为光滑球体)和 n=8 时范围波纹球的目标强度频率响应特性。计算频率范围为 100 Hz～50 kHz，间隔 100 Hz。

从图 2 可以看出对于不同入射角、不同起伏幅度，刚性波纹球的目标强度频率响应特性有很大差异。总体来看，对于 R=0.3 m 的波纹球，低频目标

强度随频率的变化规律接近光滑球目标强度随频率的变化规律，在低频时波纹效应没有显现。随着频率的增加，不论入射角是 $\varphi=0^0$ 还是 $\varphi=90^0$，波纹球目标强度随频率的变化规律逐渐偏离光滑球目标强度随频率的变化规律，也就是表面波纹效应对目标强度逐渐产生影响。



(a) φ=0°, n=8



(b) φ=90°, n=8

图 2　不同 ξ 条件下的波纹球目标强度频率响应(a) φ=0°；(b) φ=90°

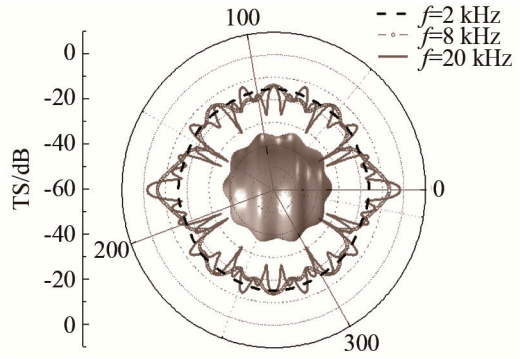
Fig.2　TS-frequency responses for different ξ in (a) φ=0°and (b) φ=90°

同时，不同波纹起伏幅度即不同 ξ 对目标强度的影响规律也不相同，随着波纹起伏幅度的增加，即 ξ 值越大，在中高频对目标强度的影响越大。如对于 φ=0°，当 $\xi\geqslant$2.5%时，在中高频情况下虽然目标强度随频率的变化存在一定起伏，但总体目标强度增强了。对于 φ=90°，虽然没有体现出目标强度随频率升高而明显增加，但是随着波纹起伏幅度增加，其目标强度起伏幅度偏离光滑球目标强度起伏幅度的程度也增加。

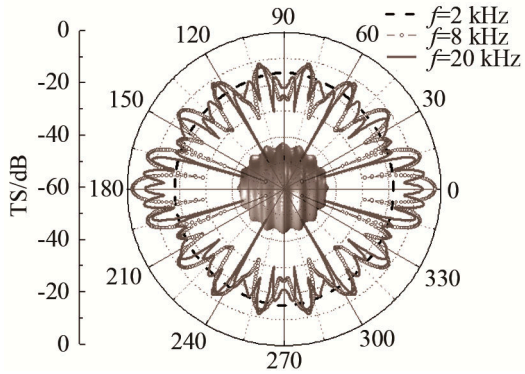
在 φ=0° 和 φ=90° 时，随着波纹起伏幅度的增加，中高频目标强度随频率变化呈现不同的规律，主要原因是不同入射角时起主要散射作用的球表面区域不同(对应的菲涅尔半波带区域不同[21])。如当 φ=0° 入射时，对中高频散射起主要作用的是波纹球峰/碗形区域，当 φ=90° 入射时，对中高频散射起主要作用的是波纹峰/双凹槽沟区域，如图 1(d)中点划线区域和点线区域，不同的区域形成的目标强度随着频率变化必然会呈现不同的规律。值得注意的是，在中高频波纹球目标强度随频率的增加呈现一定的振荡起伏，并且 n 和 ξ 越大振荡程度越大，振荡周期越小。形成这种现象的原因是随着频率的增加，入射波波长变短，空间分辨率提高，在主要散射区域内的各强散射点或面作用也逐渐显现，这些强散射点的回声形成干涉，导致目标强度随频率变化出现振荡起伏的现象。波纹起伏程度 ξ 增加，各强散射点回声时间延迟增加，如 φ=90° 时波纹的峰和谷凹槽两个强反射面回声时延增加，从而导致干涉振荡的周期变小。

3.2　目标强度的空间分布特性

图 3(a)和图 3(b)分别给出了 n=5 和 n=8 的正弦波纹球(ξ=10%，R=0.3 m)在不同频率下收发合置时目标强度的空间分布特性。计算频率为 2、8、20kHz。



(a) n=5



(b) n=8

图 3　波纹球目标强度的空间分布特性

Fig.3　The spatial distribution characteristics of corrugated sphere target strength

由图 3 可以看出，在低频(2 kHz)处波纹球目标强度的空间分布基本是均匀的，如图中虚线所示，接近光滑球的目标强度空间分布，即波纹效应没有体现。随着频率的升高，波纹球目标强度随入射角

变化呈现“花瓣状”峰谷空间分布，并且频率越高“花瓣状”峰谷结构分支越密集。相对来说，n=8 的波纹球目标强度呈现的“花瓣状”峰谷分支结构比 n=5 的更为密集。

值得注意的是，当频率升高到波纹效应呈现的频段，目标强度“花瓣状”峰谷空间分布的峰谷与波纹球表面波纹的峰/凹槽结构基本对应。并且随着频率升高到不同的频段，目标强度“花瓣状”分支峰谷结构对应表面波纹结构的不同部分。图 4 为 n=8 的波纹球局部放大图。

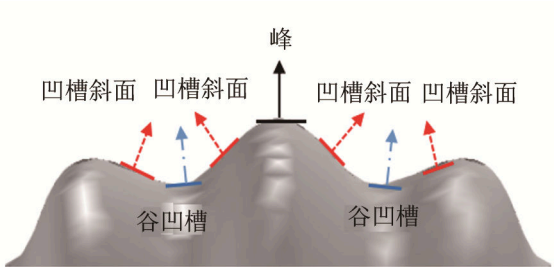


图 4 表面波纹局部结构
Fig.4 The local structure of corrugated surface

图 4 中给出了波纹的峰(局部镜反射面)、谷凹槽(局部镜反射面)以及凹槽斜面(近似局部镜反射面)部位的结构，可见在中高频情况下规则波纹表面反射呈现出局部多镜反射面特征。产生这种现象的主要决定因素是入射波频率对应的波长 λ 与波纹峰谷起伏周期弧长 $\hat{l}$ 或起伏高度 $h(\xi)$ 的可比拟程度。由于我们所感兴趣的是小起伏波纹，h 相对较小，其对应较高的频率，波纹峰谷起伏周期弧长 $\hat{l}$ 相对较大，对应频率相对较低，此时在所关心的频段范围对目标强度空间分布产生影响的主要因素是起伏周期弧长 $\hat{l}$ 。

按如下原则得到频段划分近似公式：

当起伏周期弧长 $\hat{l}$ 等于入射波半波长($\lambda/2$)时，波纹效应呈现，频率 f_e 近似公式为

$$f_e=cn/[2\pi(R-h)] \tag{13}$$

当起伏周期弧长 $\hat{l}$ 等于入射波波长(λ)时，可分辨波纹峰/谷凹槽结构，此时表现为波纹峰/谷凹槽局部多镜面反射，频率 f_{fg} 近似公式为

$$f_{fg}=cn/[\pi(R-h)] \tag{14}$$

当起伏周期弧长 $\hat{l}$ 等于入射波波长的 2 倍(2λ)时，可分辨峰/凹槽斜面/谷凹槽结构，此时表现为波纹峰/凹槽斜面/谷凹槽局部多镜面反射，频率 f_{fxg} 近似公式为

$$f_{fxg}=2cn/[\pi(R-h)] \tag{15}$$

为了进一步深入分析波纹球回声目标强度与频率和空间分布的关系，仿真计算了 n=5 的正弦平方波纹球(ξ= 10%，R= 0.3 m)目标强度的频率-空间分布谱，如图 5 所示。计算频率范围为 100 Hz～50 kHz，频率增量为 200 Hz。其中横坐标为方位角，纵坐标为频率。伪彩色图像的亮度表示目标强度。

图 5 显示，f_e 为波纹效应开始呈现的频率，表现为伪彩图的亮度随着方位角明暗变化；f_{fg} 为可分辨波纹峰/谷凹槽局部多镜面反射作用的频率，黑色圆形点线对应波纹峰结构位置，蓝色方形点线对应波纹谷凹槽结构位置；f_{fxg} 为可分辨峰/凹槽斜面/谷凹槽结构局部多镜面反射作用的频率，红色三角形点线对应波纹凹槽斜面结构位置。

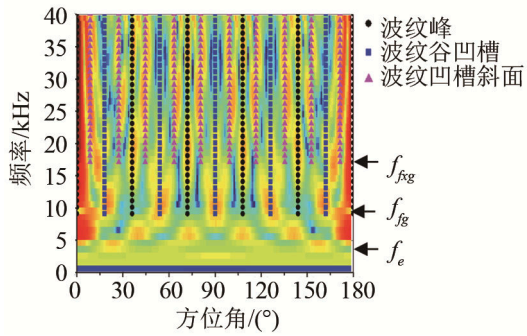


图 5 频率-角度谱
Fig.5 Frequency-angle picture

因正弦平方波纹球具有局部多镜面反射(波峰、谷凹槽、凹槽斜线)，使得其散射声场在空间形成多峰结构，这种多峰结构与入射波频率、入射角度紧密相关，可以通过调整表面波纹周期、起伏幅度对散射声场的空间分布特性进行调控。

4 声散射实验

4.1 实验布局

本实验是在某实验室的水槽中进行的，水槽空间尺寸为 2 m×1.8 m×2 m。发射阵中心与水听器的距离 r_1=15.6 cm，目标与水听器的距离 r_2=21.5 cm。发射阵、水听器和目标三者中心位于同一直线上，距离水面 1 m。保持换能器、水听器位置固定不动，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凸顶端(波纹峰/碗形，如图 1 所示)时为入射角 0°和 180°，通过旋转目标模型，获得在 0°～360°范围内的目标全向声散射信号。发射信号为线性调频信号，频段为 60～120 kHz 和 120～240 kHz，脉冲宽度均为 0.01 ms。在实验中，我们使用了由 3D 打印机打印的规则波纹表面尼龙球，实验模型尺寸：R=0.03 m，ξ=10%，n=10。图 6 给出了测

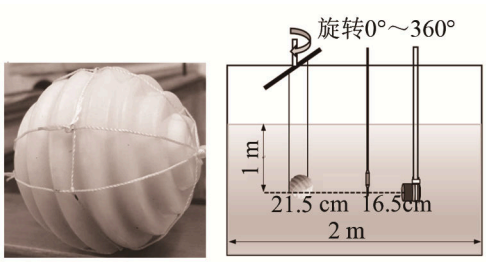


图 6　3D 打印的波纹实验模型和实验布置图

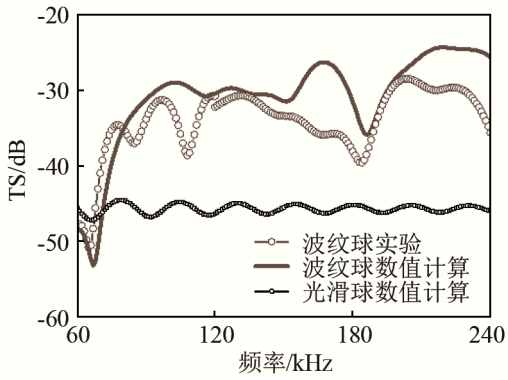
Fig.6　Arrangement of acoustic scattering experiment and the 3D printed corrugation model

试实验的布局示意图和实验模型。

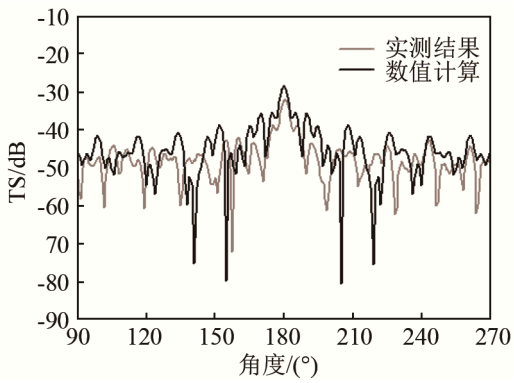
4.2　实验数据分析

数值计算材料参数：密度 ρ_1=1 150 kg·m^{-3}，纵波速度 c_d=2 680 m·s^{-1}，剪切波速度 c_t=1 010 m·s^{-1}；水的密度 ρ=1 000 kg·m^{-3}，水中声速 c=1 500 m·s^{-1}。

图 7(a)给出的是从方位角 φ=0° 入射，即发射阵正对着目标凸顶端(波纹峰/碗形，如图 1 所示)位置时的目标强度随频率的变化曲线，由于波纹的影响，其目标强度随频率的变化呈起伏变化。频率低时(频段 60～150 kHz)两者吻合较好，频率高于 150 kHz 时，由于实测波纹球可能存在吸收，数值计算



(a) 0°入射目标强度的频率特性曲线



(b) 频率为 200 kHz 时的目标强度的空间分布特性曲线

图 7　目标强度的实验与数值计算结果对比

Fig.7　Comparison of target strengths by experiment and numerical calculation

未考虑材料吸收，因此数值计算的目标强度比实验结果要高。但总体来看，在此频率范围内，波纹球的目标强度大于光滑球，目标强度平均大约 10 dB。图 7(b)是频率为 200 kHz 时，目标旋转半周的目标强度，可见其目标强度出现多个峰值。在方位角 φ=180° 附近，即模型凸顶端(波纹峰/碗形)正对着发射和接收时回波最强，目标强度最大，在其它方位角由于局部多镜面反射(波峰、波谷凹槽和凹槽斜面)的影响呈现多个峰值，经比较验证，数值计算与实验结果基本吻合。

5　结 论

通过板块元数值计算和实验，研究了平面波入射水中规则波纹(正弦平方曲线波纹)表面球体的目标回声特性。结果表明：低频时波纹高度、周期对声目标强度基本没有影响，随着频率的升高，多镜面反射(波峰、波谷凹槽和凹槽斜面)的影响清晰显示出来，且波纹高度越高和周期越大，声目标强度起伏越大、峰值越密集。通过水槽实验测量得到了 3D 打印的规则波纹表面尼龙球目标强度的频率响应和空间分布特性，测量结果与数值计算结果吻合较好。规则波纹表面球体回声特性的掌握有助于开展利用声学超构材料对散射声场调控的研究。

参　考　文　献

[1] OGILVY J A. Theory of wave scattering from random rough surfaces[M]. Bristol: Hilger, 1991.

[2] JACKSON D R, RICHARDSON M D. High-frequency seafloor acoustics[M]. New York: Springer, 2007.

[3] WELTON P J. Three dimensional analyses of scattering by pressure release sinusoidal surfaces[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2012, **131** (1): 54-68.

[4] CHOO Y M, SONG H C, SEONG W J. Numerical study of three-dimensional sound reflection from corrugated surface waves [J]. J. Acoust. Soc. Am., 2016, **140**(4): 2290-2296.

[5] STANTON T K. Sound scattering by rough elongated elastic objects. I: Means of scattered field[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1992, **92**(3): 1641-1664.

[6] STANTON T K, CHU D. Sound scattering by rough elongated elastic objects. II: Fluctuations of scattered field[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1992, **92**(3): 1665-1678.

[7] GURLEY J V, STANTON T K. Sound scattering by rough elongated elastic objects. III. Experiment[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1993, **94**(5): 2746-2755.

[8] JANSSON P. Acoustic scattering from a rough sphere[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1993, **93** (6): 3032–3042.

[9] FAWCETT J A. Modeling of high-frequency scattering from objects using a hybrid Kirchhoff/diffraction[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2001, **109**(4): 1312-1319.

[10] MEI J, HOU B, KE M Z, et al. Acoustic wave transmission through a bull's eye structure[J]. Appl Phys Lett, 2008, **92**: 1-3.

[11] WANG J W, YUAN B G, CHENG Y, et al. Unidirectional acoustic transmission in asymmetric bull's eye structure[J]. 2015, **58**(2): 1-5.

[12] 范军, 汤渭霖, 卓琳凯. 声呐目标回波特性预报的板块元方法[J]. 船舶力学, 2012, **16**(1-2): 171-180.
FAN Jun, TANG Weilin, ZHUO Linkai. Planar elements method for forecasting the echo characteristics from sonar targets[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, **16**(1-2): 171-180.

[13] 汤渭霖. 用物理声学方法计算非硬表面的声散射[J]. 声学学报, 1993, **18**(1): 45-53.
TANG Weilin. Calculation of acoustic scattering of a nonrigid surface using physical acoustic method[J]. Acta Acustica, 1993, **18**(1): 45-53.

[14] 布列霍夫斯基赫著. 分层介质中的波[M]. 杨训仁译. 北京: 科学出版社: 1960.
BREKHOVSKIKH L. Wave in layered medium[M]. YANG Xunren, translate. Beijing: Science Press: 1960.

[15] 邓伟, 范军. 基于鱼雷导引弹道的目标回声特性研究[J]. 声学技术, 2014, **33**(5): 402-407.
DENG Wei, FAN Jun. Research on target echo characteristics in torpedo guidance trajectory[J]. Technical Acoustics, 2014, **33**(5): 402-407.

[16] 卜考英, 范军. 基于多波束系统的水下目标近程回波亮点声图像[J]. 声学技术, 2007, **26**(4): 570-573.
BU Kaoyin, FAN Jun. Acoustic image of bright spots of near-field underwater targets based on multi-beam system[J]. Technical Acoustics, 2007, **26**(4): 570-573.

[17] 王二庆, 卓琳凯, 王华奎. 单双层壳体潜艇的高频回波特性研究[J]. 声学技术, 2012, **31**(5): 486-489.
WANG Erqing, ZHUO Linkai, WANG Huakui. High-frequency echo characteristics of single and double shell submarine[J]. Technical Acoustics, 2012, **31**(5): 486-489.

[18] 王汝夯, 李冰, 魏强. 基于板块元的水面舰船远场声目标强度预报方法[J]. 声学技术, 2015, **34**(1): 6-10.
WANG Ruhang, LI Bing, WEI Qiang. A method for predicting far-field target strength of surface ship based on planar elements theory[J]. Technical Acoustics, 2015, **34**(1): 6-10.

[19] 郑国垠, 范军, 汤渭霖. 考虑遮挡和二次散射的修正板块元算法[J]. 声学学报, 2011, **36**(4): 377-383.
ZHENG Guoyin, FAN Jun, TANG Weilin. A modified planar elements method considering occlusion and secondary scattering[J]. Acta Acustica, 2011, **36**(4): 377-383.

[20] 张阳, 李桂娟, 王振山, 等. 改进的板块元遮挡算法[J]. 声学技术, 2016, **35**(4): 319-324.
ZHANG Yang, LI Guijuan, WANG Zhenshan, et al. An improved plate element sheltering algorithm[J]. Technical Acoustics, 2016, **35**(4): 319-324.

[21] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1993.
LIU Bosheng, LEI Jiayu. Principles of underwater acoustics[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1993.