

引用格式:张迪,周富霖,李兵,等.分舱段圆柱壳声散射数值和试验研究[J].声学技术,2021,40(5):594-600.[ZHANG Di, ZHOU Fulin, LI Bing, et al. Numerical and experimental studies on acoustic scattering from multi-cabin cylindrical shells[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(5): 594-600.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.05.002

分舱段圆柱壳声散射数值和试验研究

张迪,周富霖,李兵,范军

(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)

摘要:基于有限元方法建立了填充不同介质的有限长分舱段圆柱壳声散射数值计算模型,仿真了填充空气-空气、空气-水、水-水三类两舱段圆柱壳声散射特性,并完成了三类两舱段圆柱壳体声散射试验,获取和分析了两舱段圆柱壳体声散射的时间角度谱和频率角度谱特性。利用物理声学方法分析了壳体表面、端面以及内部填充水介质对散射声场的影响,揭示了两舱段圆柱壳声散射频率角度谱中呈现的干涉条纹特征形成机理,为水下分舱段目标,如水下无人航行器的主动声呐探测和识别提供理论支撑。

关键词:分舱段圆柱壳;目标强度;声散射;回波特征;有限元方法

中图分类号:TB56

文献标识码:A

文章编号:1000-3630(2021)-05-0594-07

Numerical and experimental studies on acoustic scattering from multi-cabin cylindrical shells

ZHANG Di, ZHOU Fulin, LI Bing, FAN Jun

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

Abstract: Based on the finite element method, the numerical calculation model for the sound scattering from multi-cabin cylindrical shells filled with different media is established, and the sound scattering characteristics of a two-cabin cylindrical shell filled with air-air, air-water, and water-water respectively are simulated. The sound scattering experiments for the three types of two-cabin cylindrical shells are carried out, and the corresponding time-angle spectra and frequency-angle spectra are obtained and analyzed. The influences of the surface and end face of the shell and the internal water on the scattering sound field are analyzed by the physical acoustic method. The formation mechanism of the interference fringe characteristics in the frequency-angle spectra of the two-cabin cylindrical shell is revealed. The results of the research provide a theoretical support for the active sonar detection and identification of the underwater targets with sub-cabins, such as underwater unmanned vehicles.

Key words: multi-cabin cylindrical shell; target strength; acoustic scattering; echo characteristics; finite element method

0 引言

潜艇、水下无人航行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)、水下滑翔机(Underwater Glider, UG)等水下潜器通常为多舱段结构,根据填充介质各舱段可分为充水和充空气两类,舱段之间通常由横舱壁隔开^[1]。常见水舱有主压载水舱、辅助压载水舱、武器补重水舱、鱼雷环形间隙水舱、淡水舱、污水舱、发射水舱等,空气舱则有指挥舱、动力舱等。舱段内部填充的空气介质和水介质的声阻抗

差异很大,使得壳体对声波的透射能力不同。当舱段内部填充空气介质时,散射声场主要由外壳及端面散射引起^[2];当填充水介质时,声波将透射进入舱体内部,舱段内部结构如隔舱板等的散射声场将会影响舱段的总体散射声场^[3-4]。因此,填充不同内部介质的分舱段水中目标声散射会呈现出不同的目标外形和内部结构引起的散射特征。这些特征可应用于对水中目标,如UUV等的主动声呐探测和识别。

目前国内外学者针对水下规则形状目标如单/双层球壳、有限长/无限长的单/双层圆柱壳体、双层加肋圆柱壳等声散射开展了大量研究,但壳体内部为单一介质(水或空气),尚未考虑不同介质填充的多舱段组合情况。Faran^[5]给出了实心弹性球和无限长弹性圆柱在平面波入射时的散射声场解。Gaunard等^[6-7]用共振散射理论对弹性球和弹性球

收稿日期:2020-06-16;修回日期:2020-08-24

基金项目:预先研究基金项目(61404160307)

作者简介:张迪(1984—),男,河北衡水人,硕士研究生,研究方向为水中目标声特性研究。

通信作者:周富霖, E-mail: zhoufulin@sjtu.edu.cn

壳的共振散射特性进行了详细的讨论。国内的学者也在这一方面开展了许多研究。范军等^[8]对水中双层弹性壳体的回声特性进行了研究，导出水下双层弹性圆柱壳体在平面波正横和斜入射激励下的散射声场。郑国垠等^[3-4]采用薄壳理论结合边界条件完成了内部充水有限长圆柱薄壳的散射声场的详细推导，同时对双层加肋圆柱壳体声散射进行理论计算和试验验证，并开发出相应的近似数值算法。潘安等^[9]开展双层周期性加肋有限长圆柱壳声散射特性研究，并基于理论解析解给出远场收发合置周向目标强度的频率角度谱，并进行了试验验证。潘安等^[10]采用板块元法对 UUV/AUV 进行声目标强度计算并分析其目标强度分布特性，但结构内部仅视为真空情况。

总体来看，目前水下壳体目标声散射还主要集中在各舱段内部全部填充同一种介质，如空气或水介质的情况，目前对于 UUV 等水下填充不同介质的分舱段壳体目标的声散射特性研究较少。本文以填充不同介质的有限长分舱段圆柱壳声散射计算的有限元数值模型，通过数值仿真和模型试验，获取填充空气-空气、空气-水、水-水三类两舱段圆柱壳声散射特性，利用物理声学方法分析了壳体表面、端面以及内部填充不同介质对散射声场的影响，为水下分舱段目标，如水下无人航行器的主动声呐探测和识别提供理论支撑。

1 分舱段圆柱壳声散射有限元建模

分舱段圆柱壳为轴对称结构，对于平面声波斜入射即非轴对称激励情况，不能直接采用二维轴对称模型进行计算。若采用直接的三维建模计算，则随着频率增大，三维网格数量急剧增大，进而遭遇计算瓶颈。本文采用文献[11]提出的计算方法，将三维有限元计算中声场-弹性场耦合弱形式的体积分转化为二维面上的面积分，并将二维弱形式编入有限元软件 COMSOL Multiphysics，结合软件内置的声场模块，将三维有限元声散射降维计算，实现非轴对称激励下水下轴对称结构目标声散射的二维有限元声散射计算。

填充不同介质的分舱段圆柱壳二维有限元模型示意图如图 1 所示。两舱段圆柱壳模型的几何和材料参数为：总长 L 为 0.60 m，直径 D 为 0.15 m，两舱长度相同，壳体和中间肋板厚度为 1.32 mm。壳体材料为普通碳钢，密度 ρ 为 7 850 kg·m⁻³，弹性模量 E 为 210 GPa，泊松比 ν 为 0.3。图 1 中 a、

b、c 分别为 2 个舱内部都填充空气、2 个舱分别填充空气和水以及 2 个舱都填充水的三个有限元模型。壳体模型外部为流体水介质，为了模拟无穷远条件，在外部流体层引入完美匹配层 (Perfectly Matched Layer, PML)。在网格划分过程中，对流体域和弹性结构体域均采用“自由剖分三角形”网格，其最大单元尺寸分别取为最高频率对应波长的 1/6 和 1/12。对于两舱段填充水介质的圆柱壳网格顶点数为 16 394、总单元数为 25 284。PML 层采用“映射”网格^[11]，层数设置为 10 层，确保声场的充分吸收，更好模拟无穷远边界条件。

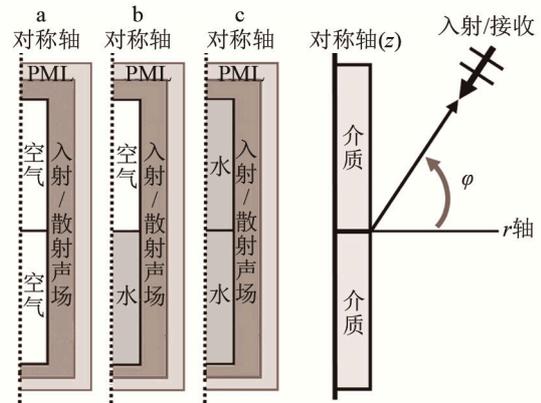


图 1 填充不同介质的两舱段圆柱壳声散射有限元模型示意图
Fig.1 Schematic diagram of the finite-element model of acoustic scattering of three two-cabin cylindrical shells filled with different media

首先，对斜入射平面声波在柱坐标系下进行周向展开，如式(1)所示，入射波波数矢量平行于 $r-z$ 平面并与正横方向(r 轴)形成入射角 φ ，各阶柱面波施加在轴对称目标上，分阶次进行计算，入射声压可表示为^[11]

$$p_m^{inc}(r, \theta, z) = \sum_m \varepsilon_m p_m^{inc}(r, z) \cos(im\theta) \quad (1)$$

其中：

$$p_m^{inc}(r, z) = i^m e^{(ikz \sin \varphi)} J_m(kr \cos \varphi) \quad (2)$$

式中： J_m 为第一类柱贝塞尔函数， k 为水中波数， θ 为周向角度， m 为周向展开阶次， ε_m 为各阶次展开系数，当 $m=0$ 时 $\varepsilon_m=1$ ；当 $m=1, 2, 3 \dots +\infty$ 时 $\varepsilon_m=2$ 。一般而言， $m \geq kr_{max} |\cos \varphi|$ 即可保证计算精度。

再将每个周向阶次 $p_m^{inc}(r, z)$ 作为背景场代入 COMSOL Multiphysics 软件，基于非轴对称激励下水下轴对称结构目标声散射的二维有限元声散射计算方法，计算不同阶次入射波的两舱段模型散射声场 $p_s(f, \varphi, m)$ ，最后目标的散射声场为各周向阶次模型散射声场之和^[11]，总目标强度可表示为

$$T_s(f, \varphi) = 10 \lg \left\{ \frac{\sum_m p_s(f, \varphi, m)}{p_i} \right\}^2 \quad (3)$$

其中, $T_s(f, \phi)$ 为在频率为 f 且入射角为 ϕ 下的目标强度, $p_s(f, \phi, m)$ 为在频率为 f 、入射角为 ϕ 且阶次为 m 时所对应的散射声压(折算到距目标等效声学中心 1 m 处), p_i 为入射声压。

2 数值仿真结果及理论分析

根据第 1 节两舱段声散射数值模型, 计算得到两舱段不同介质填充模型的目标强度随入射角和频率的变化结果, 即频率角度谱, 如图 2 所示, 其中 90° 表示正横入射, 0° 和 180° 表示端面入射。

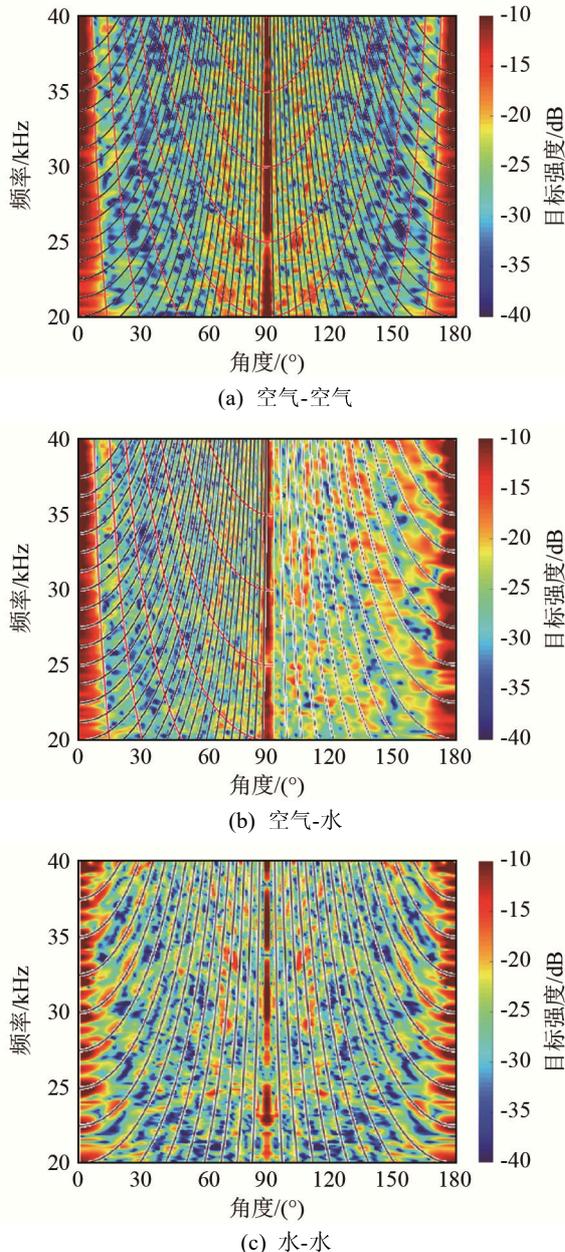


图 2 不同介质填充的分舱段圆柱壳模型频率角度谱数值仿真结果
Fig.2 Numerical simulation results of frequency-azimuth spectra of three two-cabin cylindrical shells filled with different media

由图 2(a)、2(b)、2(c)对比分析可知, 当两舱段内介质均填充空气时, 以 90° 为中心出现明暗相间的“八”字形条纹。此干涉现象原理图如图 3(a)中 A、B 棱角间的几何干涉效应, 入射波经过 A、B 棱角散射回来满足同相叠加共振, 满足:

$$2kL \cos \phi = 2n\pi \quad (4)$$

其中: L 为两舱段模型总长度, D 为模型直径, k 为水中波数, n 为干涉阶次, ϕ 为入射波与圆柱轴向夹角, 则频率与角度的关系:

$$f = nc / (2L \cos \phi) \quad (5)$$

由此给出共振亮线位置(图 2 中黑实线)。理论上在某些角度下如图 3(a)端面的 A、C 棱角也会出现几何干涉效应, 但条纹较弱并不明显。由于壳体弹性的影响, 上述“八”字形干涉条纹并不连续, 表现为离散的“亮点”。

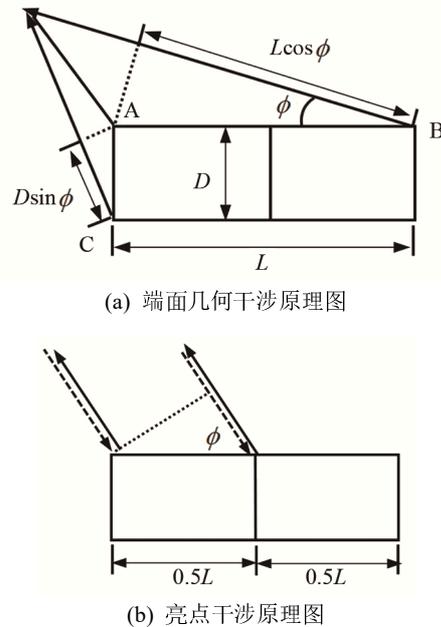


图 3 两舱段圆柱壳模型频率角度谱干涉条纹形成机理
Fig.3 Formation mechanism of interferometric fringe in the azimuth-frequency spectrum of two-cabin cylindrical shell

此外, 内部空气弹性圆柱薄壳可能存在三类波: 纵波、剪切波和弯曲波, 其中纵波和剪切波是超音速的, 在不同入射角情况下存在截止现象^[3,12], 截止角 ϕ_p 与传播速度 c_p 的关系为

$$\phi_p = \sin^{-1}(c_0/c_p) \quad (6)$$

入射角的截止角度较大的是剪切波, 截止角度较小的是纵波, 因此在正横附近 28° 范围内出现相对较为明显的弹性波散射条纹。

当两舱段内介质分别填充空气和水时, 该频段内声波易透射进入充水舱段从而形成来自端面和横舱壁等多个回波亮点, 干涉现象较为复杂。在原

有端面棱角波基础上，又引入横舱壁所带来的亮点回波，入射波经过端面和横舱壁散射回来满足同相叠加：

$$2kl \cos \phi = 2n\pi, l = 0.5L \tag{7}$$

其中： l 为一个舱段长度。则频率与角度的关系：

$$f = nc / (2l \cos \phi) \tag{8}$$

由于两舱段内介质不同，频率角度谱图并不关于正横方位对称，斜入射时以近舱段影响为主，远舱段的影响减弱。对于充水舱段，圆柱薄壳中弹性波也透射进入内部水域，使得正横附近截止角内弹性波条纹减弱。

当两舱段均填充水时，圆柱壳透射作用进一步增强，入射波经过端面和横舱壁的回波干涉效应增强，正横附近截止角内弹性波条纹进一步减弱。正横入射时，声波在圆柱壳体内来回反射，干涉增强或者减弱，在频谱图中正横处出现等频率间隔的节点，间隔满足圆柱直径等于声波半波长的整数倍（声波频率为 5 kHz）条件。

3 分舱段圆柱壳模型试验研究

为研究分舱段圆柱壳的时域回波特征以及验证数值计算结果，在某试验站的全消声水池开展了三种两舱段模型声散射试验。水池尺寸为 20 m×12 m×8 m，水面水底及四壁均铺设消声尖劈，水中干扰小，信噪比良好。试验采用工作频段为 20~40 kHz 的发射换能器，中心频率为 30 kHz，发射线性调频信号，带宽为 20~40 kHz、信号脉宽为 1 ms、长度为 500 ms、幅值为 1 V。RESON TC 8103 水听器作为信号接收器。试验设备及布放示意图如图 4 所示。

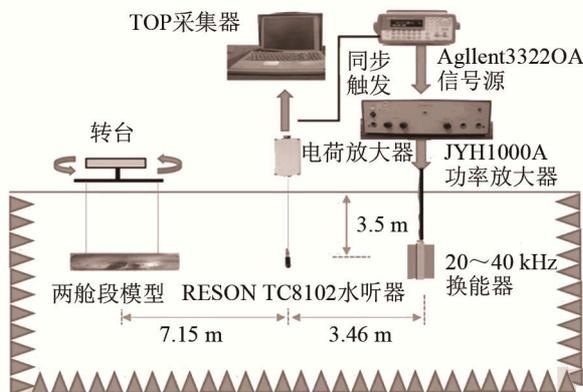


图 4 试验设备及布放示意图
Fig.4 Test equipment and layout diagram

试验模型为填充不同介质的三种两舱段圆柱壳体，材料为 316 不锈钢，在两舱段分别填充空气-

空气、空气-水和水-水三种模型，以模拟潜艇或 UUV 内部舱段在不同工况下的装载状态，如图 5 所示。



(a) 三种两舱段圆柱壳模型示意图



(b) 三种两舱段圆柱壳实物模型

图 5 两舱段圆柱壳试验模型

Fig.5 Experimental models of three two-cabin cylindrical shells

首先，针对填充空气-空气的两舱段圆柱壳模型，通过对水平全方位的采集信号进行匹配滤波可得到随方位角和时间变化的角度-时间谱图，如图 6(a)所示。由于模型为轴对称结构，180°范围即反映了模型的水平方位特性，其中 0°和 180°表示端面入射，90°表示正横入射。可以看出，在端面以及正横方位出现了清晰的回波结构，其回波原理的几何解释如图 6(b)所示(箭头表示声波传播路径，不同编号及其颜色表示图 6(a)中回波亮点)。由于两个舱段均充空气，空气与钢和水的特性阻抗差异巨大，因此空气起了隔声作用，可忽略其透声能力。在端面(0°和 180°)入射情况下，绝大部分声波能量在近端面即发生强反射，因此仅出现一次强回波，图中表示为①。在正横(90°)入射情况下，声波在亮区圆柱面发生强反射，其散射截面积也较大，出现第一个强回波，表示为①；影区圆柱面被遮挡导致回波较弱，声波一部分沿着圆柱面传播返回，一部分入射到圆柱顶端和底端直接返回，形成第二个回波，相对较弱，表示为②。在从端面到正横的斜入射情况下，可以发现从端面的一个强回波逐渐分叉为两个回波的轨迹，验证了圆柱端面前后沿两个亮点的回波结构。

其次，针对填充空气-水的两舱段圆柱壳模型，其角度-时间谱图如图 7(a)所示，清晰的回波结构几何解释如图 7(b)所示。可以看出，由于水与钢的耦合效应显著，充水舱段的透声能力较强，与充空

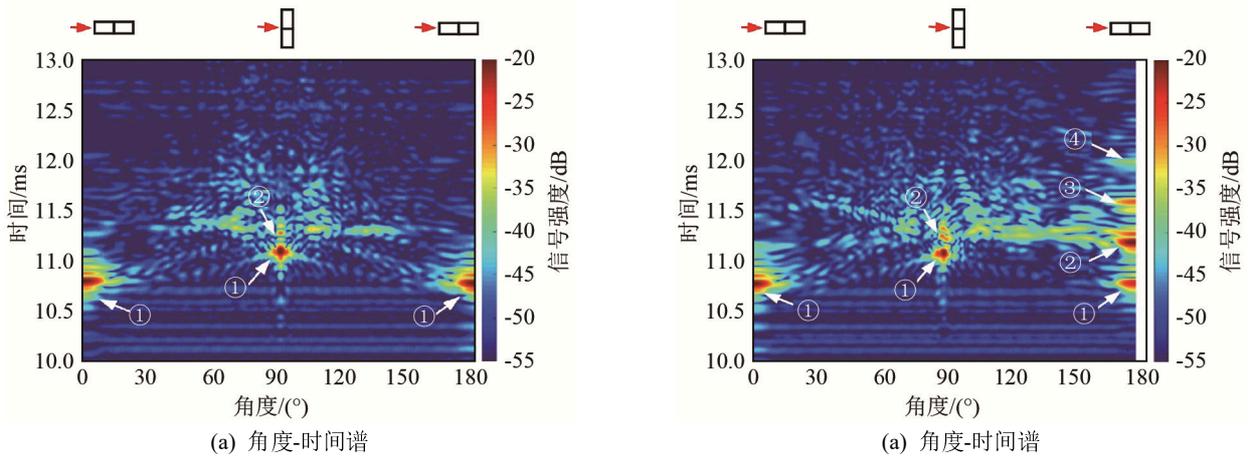


图 6 填充空气-空气的两舱段圆柱壳模型的时域结果
 Fig.6 Time-domain results of a two-cabin cylindrical shell model filled with air and air

气舱段差异较大，正横角度两侧图像差异也较大。在 0°端面入射的情况下，首舱段为透射较弱的空气舱段，挡住了尾舱段的声波，即首舱段为亮区，尾舱段为影区，因此绝大部分声波能量在近端面即发生强反射，仅出现一次强回波，图中表示为①。在 180°端面入射的情况下，首舱段为透射较强的充水舱段，一部分声波在近端面发生反射形成第一个回波亮点①，剩余部分声波经过充水舱段透射至空气舱段处，在中间横舱壁处发生强反射，而后其中一部分经由近端面透射形成第二个回波亮点②，另一部分则在近端面反射回充水舱段，且能在内部反复传播，在不同时刻形成逐渐衰减的回波③和④(如图 7(b)中箭头所示)。在正横(90°)入射情况下，声波在亮区圆柱面发生的第一次强反射①，部分声波在充空气舱段反射与前一工况相同，另一部分声波透入充水舱段，在影区圆柱面发生反射，此时影区的贡献增大，表示为②。在从端面到正横的斜入射情况下，除第一个模型的回波结构外，在 90°~180°处由于充水舱段的强透声作用，横舱壁产生的强回波清晰可见。

最后，针对填充水-水的两舱段圆柱壳模型，其角度-时间谱图及其回波结构几何解释如图 8 所示。可以看出，由于两个充水舱段的强透射效应，

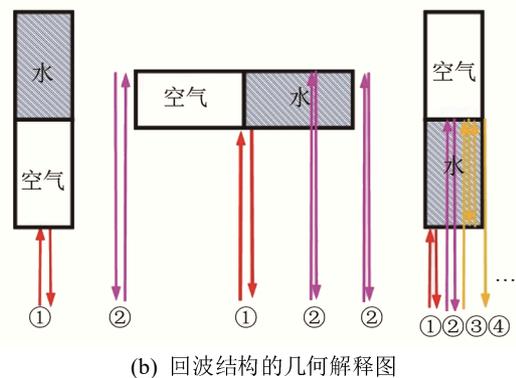


图 7 填充空气-水的两舱段圆柱壳模型的时域结果
 Fig.7 Time-domain results of a two-cabin cylindrical shell model filled with air and water

回波结构更为丰富。在 0°和 180°端面入射的情况下，部分声波能量在首舱段近端面发生强反射，形成第一个回波亮点①，剩余部分声波经过首个充水舱段透射至横舱壁处，在中间横舱壁处发生反射，另一部分透射横舱壁进入第二个充水舱段，在后端面产生反射，因此声波在两个充水舱段内能反复传播，形成多个回波亮点②、③和④等(如图 8(b)中箭头所示)。在正横(90°)入射情况下，回波结构同样包含了充空气-水舱段的回波结构，区别在于影区圆柱面的反射更强。在从端面到正横的斜入射情况下，充水舱段的近端面、横舱壁以及后端面均出现回波条纹，特别是横舱壁和后端面与圆柱面形成的角反射体效应。

通过对三个两舱段模型的水平全方位信号进行频谱分析，得到随方位角和频率变化的频率角度谱图，如图 9 所示，与图 2 中的仿真结果进行对比可知：

(1) 两舱段均填充空气时，棱角波的几何干涉效应与壳体弹性波共振的叠加作用，使得回波的“八”字干涉亮线出现离散，表现为不连续亮点，与数值结果吻合较好；

(2) 仅一舱段充水时，横舱壁和影区圆柱面的反射使得回波条纹有所增强，由此可分辨不同充液舱段的方位信息。同时，当声波照射到水舱端面附近时，回波开始出现周期性亮区，这是因为声波在充水舱端面和空气舱端面之间形成的多次反射，产生多次同相或反向散射叠加，此现象对识别充水舱段部位和方位信息有一定帮助；

(3) 两舱段均充水时，声波在横舱壁和两个舱段的影区圆柱面的反射使得回波条纹进一步增强，端面和横舱壁的棱角波几何干涉条纹、圆柱壳内充水舱段的多次反射和壳体弹性波共振效应以及流体附加波之间叠加，亮点离散性增强，与数值仿真结果吻合较好。

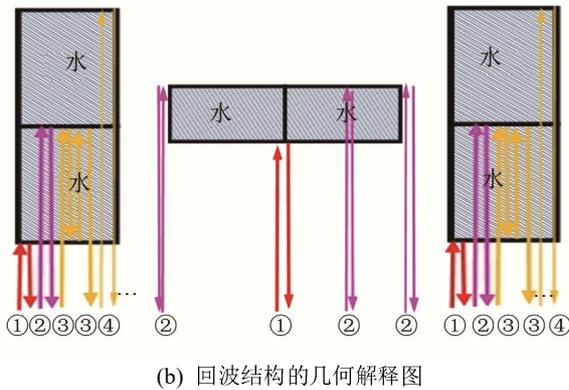
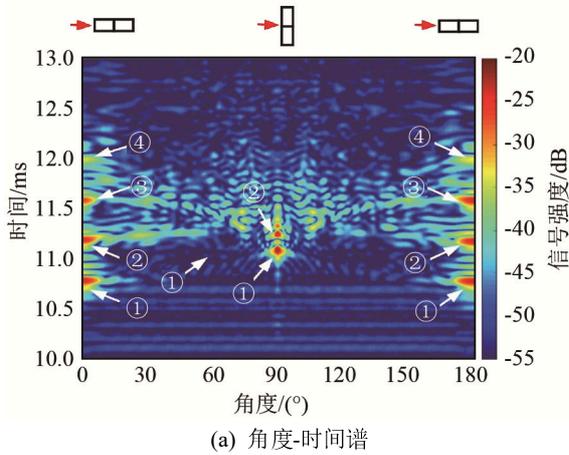


图 8 填充水-水的两舱段圆柱壳模型的时域结果
Fig.8 Time-domain results of a two-cabin cylindrical shell model filled with water and water

比较图 9 和图 2 会发现细微不同：试验与仿真的频率角度谱颜色深浅不完全一致，但是条纹分布得到的散射规律一致，这是由于试验所得到的频率角度谱的幅值存在微小误差造成的；几何干涉条纹是由断续的亮点连接而成且都不连续，这是由于多次散射及壳体弹性及不同信噪比等影响造成的；两种结果的间断点位置不同，是由一定的随机性造成的；试验结果图中产生的多余条纹是由于试验过程

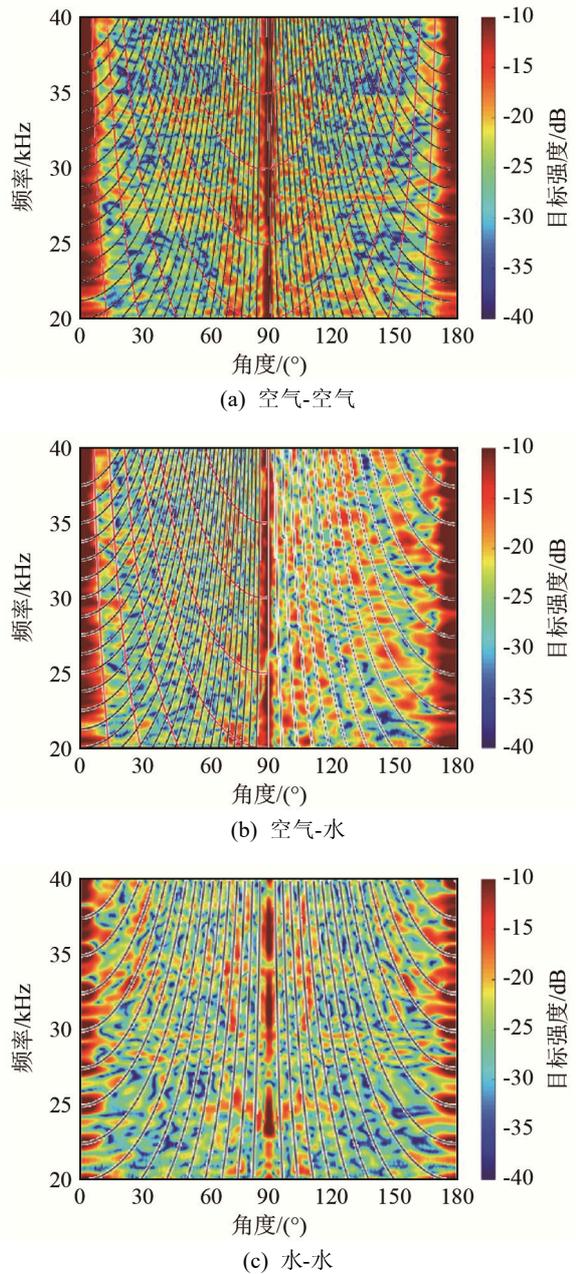


图 9 填充不同介质的两舱段圆柱壳频率角度谱试验结果
Fig.9 Experimental results of frequency-azimuth spectra of three two-cabin cylindrical shells filled with different media

中受到了模型姿态、背景噪声等的影响。

4 结论

本文以填充空气-空气、空气-水和水-水的三种典型两舱段圆柱结构为研究对象，利用基于有限元原理及降维技术的非轴对称激励下轴对称目标声散射快速建模方法，计算得到了三种模型的随水平方位角和频率变化的目标强度，即频率角度谱，并对其干涉条纹进行了分析。通过开展三种模型的声

散射试验,详细分析了目标的回波结构,并将其频率角度谱与仿真计算结果对比,两者的干涉条纹吻合良好。得到结论如下:

(1) 填充空气与填充水的舱段回波结构差异较大,由于前后端面以及横舱壁的存在,声波在充水舱段中存在多路径传播的特点。在时间角度谱中突出表现为:端面入射下逐渐减弱的多回波亮点,正横入射下影区圆柱面的反射作用增强,斜入射下充水舱段的近端面、横舱壁以及后端面均出现回波条纹,特别是横舱壁和后端面与圆柱面形成角反射体效应。

(2) 对于等长度的两舱段结构,等间距不连续结构由于回波的相位差会产生几何干涉效应,频率角度谱中表现为“八”字形干涉效应,与周期加肋结构的几何声散射特征机理一致。

(3) 对于充水舱段,声波在横舱壁和两个舱段的影区圆柱面的反射使得回波条纹增强,端面和横舱壁的棱角波几何干涉条纹、圆柱壳内充水舱段的多次反射和壳体弹性波共振效应以及流体附加波之间相互叠加,充水舱段时域回波和频谱特征均较为丰富,可为潜艇或 UUV 集群的探测和回波识别奠定基础。

参 考 文 献

- [1] 钱东,唐献平,赵江. UUV 技术发展与系统设计综述[J]. 鱼雷技术, 2014, 22(6): 401-414, 419.
QIAN Dong, TANG Xianping, ZHAO Jiang. Overview of technology development and system design of UUVs[J]. Torpedo Technology, 2014, 22(6): 401-414, 419.
- [2] 汤渭霖,范军,马忠成. 水中目标声散射[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [3] 郑国垠,范军,汤渭霖. 充水有限长圆柱薄壳声散射: I. 理论[J]. 声学学报, 2009, 34(6): 490-497.
ZHENG Guoyin, FAN Jun, TANG Weilin. Acoustic scattering from fluid-filled finite cylindrical shell in water: I. theory[J]. Acta Acustica, 2009, 34(6): 490-497.
- [4] 郑国垠,范军,汤渭霖. 充水有限长圆柱薄壳声散射: II. 实验[J]. 声学学报, 2010, 35(1): 31-37.
ZHENG Guoyin, FAN Jun, TANG Weilin. Acoustic scattering from fluid-filled finite cylindrical shell in water: II. experiment[J]. Acta Acustica, 2010, 35(1): 31-37.
- [5] FARAN J J. Sound scattering by solid cylinder and spheres[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1951, 23(4): 405-418.
- [6] GAUNAURD G C, ÜBERALL H. RST analysis of monostatic and bistatic acoustic echoes from an elastic sphere[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1983, 73(1): 1-12.
- [7] GAUNAURD G C, WERBY M F. Lamb and creeping waves around submerged spherical shells resonantly excited by sound scattering[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 82(6): 2021-2033.
- [8] 范军,刘涛,汤渭霖. 水中双层无限长圆柱壳体声散射[J]. 声学学报, 2003, 28(4): 345-350.
FAN Jun, LIU Tao, TANG Weilin. Acoustic scattering from double infinite concentric cylindrical shells in water[J]. Acta Acustica, 2003, 28(4): 345-350.
- [9] 潘安,范军. 水下无人潜器的回波特性计算[C]//中国声学学会 2009 年青年学术会议论文集. 长沙, 2009: 85-86.
- [10] 潘安,范军,王斌,等. 双层周期加肋有限长圆柱壳声散射精细特征研究[J]. 物理学报, 2014, 63(21): 214301.
PAN An, FAN Jun, WANG Bin, et al. Acoustic scattering from the finite periodically ribbed two concentric cylindrical shells[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(21): 214301.
- [11] 卢笛. 基于有限元原理的弹性目标声散射计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [12] ZHOU Fulin, FAN Jun, WANG Bin, et al. Numerical and experimental studies of the acoustic scattering from an externally ring-stiffened cylindrical shell[J]. Journal of Ship Mechanics, 2019, 23(6): 728-740.