

引用格式: 唐轶桐, 王斌, 范军. 充水透声结构声目标强度预报方法研究[J]. 声学技术, 2021, 40(3): 316-323. [TANG Yitong, WANG Bin, FAN Jun. Study on target strength prediction method of water-filled acoustic transparent structure[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(3): 316-323.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.03.003

充水透声结构声目标强度预报方法研究

唐轶桐, 王 斌, 范 军

(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)

摘要: 充水透声结构是水下航行体重要的结构类型之一, 主动声呐作用于目标时, 声波可以透射充水透声结构外表面进入结构内部, 在充水透声壳体结构内表面产生内部散射, 从而影响目标的目标强度。文章提出了一种适用于透声结构目标强度预报的考虑透声的修正板块元方法, 此方法假设散射声场近似为内表面板块散射声场和与之对应的外表面板块散射声场叠加, 基于 Z-Buffer 算法确定充水透声结构的外、内表面板块之间的透射遮挡对, 再考虑外表面板块的反射和透射系数、内表面的反射系数, 采用非刚性表面板块元方法对两部分声场进行分别计算, 相干叠加后预报总目标强度。此方法考虑了充水透射结构内表面的一次散射, 物理概念清晰, 提高了板块元方法预报精度。通过双层平板算例验证方法的正确性, 并将此方法应用于 BeTSSi II 潜艇模型中的典型透声结构——围壳部分的目标强度仿真计算, 最后通过围壳缩比模型目标强度水池试验, 验证了提出的方法预报精度。

关键词: 透声结构; 目标强度; 板块元方法

中图分类号: TB56

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-03-0316-08

Study on target strength prediction method of water-filled acoustic transparent structure

TANG Yitong, WANG Bin, FAN Jun

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

Abstract: The water-filled acoustic transparent structure is one of the important structural types of underwater vehicles. When active sonar acts on the target vehicle, sound wave can penetrate the outer surface of this structure and enter the target's interior to cause internal scattering which influences target strength. A modified planar element method suitable for prediction of target strength of acoustic transparent structures is proposed. This method assumes that the scattering field is approximately the superposition of the scattering fields of planar elements on the inner surface and the corresponding planar elements on the outer surface. The shielding pairs between the inner and outer planar elements are determined by the Z-Buffer algorithm, while the transmission and reflection coefficients of the planar elements are also considered. The two parts of scattering field are calculated separately by using the non-rigid planar element method, and then the total target strength is predicted after coherent superposition. This method considers the primary scattering of the inner surface of the water-filled acoustic transparent structure, so the physical concept is clear, and the prediction accuracy of planar element method is improved. The correctness of the method is verified by a double-layer plate model. This method has been applied to the sail part of BeTSSi II, which is a typical acoustic transparent structure. The prediction accuracy of the proposed method is verified by the target strength experiment of the sail shrinkage model.

Key words: acoustic transparent structure; target strength; planar element method

0 引 言

主动声探测是识别和对抗潜艇的重要手段, 掌握潜艇各典型部位的声散射特性是提高主动声呐

识别率的重要手段。潜艇等水下结构包含有充水和不充水壳体结构, 如双层壳体结构潜艇的外壳、指挥台围壳就是典型的充水透声结构, 双层壳体结构潜艇的内壳以及指挥台围壳内部人员通道、装置通道都是不充水结构。主动声呐作用于目标时, 声波可以透射进入充水透声结构内部, 在充水透声壳体结构内表面或内部包含结构表面形成多次散射, 影响目标的散射特性。潜艇等水中目标特性预报早期都是采用刚性近似^[1], 对于高频和单层壳体潜艇是适用的。随着主动声呐向低频方向发展, 对于双层

收稿日期: 2020-04-09; 修回日期: 2020-05-08

基金项目: 国防科技创新特区项目资助。

作者简介: 唐轶桐(1995—), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 研究方向为水中目标声散射。

通信作者: 王斌, E-mail: bin_wang@sjtu.edu.cn

壳体潜艇和敷设吸声材料潜艇的声散射特性预报逐渐引起重视。汤渭霖等^[2]和范军等^[3]推导了双层弹性球壳、双层无限长圆柱壳等共形简单结构的散射声场解析解,从理论角度说明充水透声结构回声由结构外表面、结构内表面和内部包含的其他结构表面回声,以及其间的多次散射回声共同构成,内部散射不可忽略,并对目标散射声场产生重要影响。

针对工程应用的需要,范军和汤渭霖提出了非刚性目标目标强度预报的板块元方法^[4-5],并应用于敷设吸声覆盖层或双层结构壳体目标强度工程预报中,但一般仅仅考虑充水透声结构外表面作用。张玉玲^[6]针对非共形双层壳体结构,从能量角度引入外壳的等效透射系数,考虑内壳散射作用,实现了复杂双层壳体目标强度的预报,但是等效透射系数是整个空间角度透射系数的平均效果,预报的目标强度也是一个空间平均效果。

本文提出一种适用于充水透声结构目标强度预报的考虑透声的修正板块元方法。首先对于此方法的原理和计算步骤给出详细说明与公式,并针对双层圆板目标算例,对比了有限元计算和本方法的计算结果,检验了方法的正确性;其次针对典型透声结构——BeTSSi II 潜艇围壳缩比模型目标强度进行了预报,对比分析了不同入射角条件下内表面散射作用与机理;最后通过缩比模型水池试验测量了围壳目标强度,并与理论预报结果进行对比,分析了预报误差,证明本文提出的方法相比于传统板块元,其试验结果更为吻合。

1 考虑透声的修正板块元方法

1.1 考虑透声的修正板块元方法的物理基础

当声波入射到充水透声结构外表面,声波一部分能量在外表面反向散射,另一部分能量透射进入目标内部,在充水透声壳体结构内表面形成内部散射,再透射出结构表面形成反向散射,从而影响目标的反向散射声场。假设我们将充水透声结构表面离散化为表面板块,可以用相互遮挡板块对进一步解释散射声场形成机理。以典型的充水透声结构围壳为例,如图1所示,当声波沿声线 $\mathbf{r}_0$ 入射至充水透声结构时,声波在结构外表面板块 A 产生反向散射声场,同时声波透射进入结构内部(这里我们假设壳体很薄,透射声线近似与入射方向一致,也就是折射角等于入射角),此时透射声线传播过程中与壳体内表面某个板块 B 相交,称板块 B 为板块 A 的透射对(可近似认为板块 A 与板块 B 互为遮挡),

透射声线在板块 B 产生反向散射,此反向散射声波又可通过板块 A 透射进入外部流体,形成内表面的一次反向散射声场;同时透射声波也可在板块 B 形成反射声场,在板块 C 透射进入流体介质,或在板块 C 反射后,经过板块 D 再次形成散射和反射形成多次的散射效应。

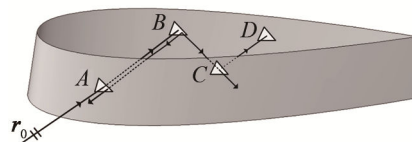


图1 透声结构声散射示意图

Fig.1 Schematic illustration of acoustic scattering in a typical acoustic transparent structure

由于多次散射过程中声波能量逐渐降低^[7],从工程应用角度出发,本文只考虑透射声波在结构内表面的一次反向散射效应,就是板块 B 的一次反向散射效应。这样充水透声结构某个处于声波照射亮区的外表面板块 A 的总反向散射声场 φ_i 可近似为声波照射亮区的外表面板块 A 的直接反向散射声场 φ_{wi} 和与之对应的内表面板块 B 的反向散射声场 φ_{ni} 叠加形成,如图2所示。

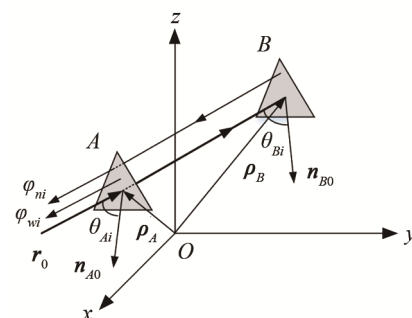


图2 散射声场计算示意图

Fig.2 Diagram of calculating the acoustic scattering field

φ_{wi} 计算公式为

$$\varphi_{wi} = \int_A e^{2ik\Delta r_A} \cos \theta_{Ai} R(\theta_{Ai}) ds \quad (1)$$

其中: $\Delta r_A = \boldsymbol{\rho}_A \cdot \mathbf{r}_0$, $\cos \theta_{Ai} = \mathbf{n}_{A0} \cdot \mathbf{r}_0$, $\mathbf{r}_0$ 为入射方向的单位矢量, $\boldsymbol{\rho}_A$ 为板块 A 所在点的矢径, $\mathbf{n}_{A0}$ 为板块 A 的法向矢量。 $R(\theta_{Ai})$ 是板块 A 的复反射系数,这里按两边为水的无限大单层介质反射公式计算^[8]。积分区域为板块 A 区域面积。式(1)可以采用板块元公式,将积分转化为板块 A 顶点求和形式进行计算^[5-6]。

φ_{ni} 计算公式为

$$\varphi_{ni} = \int_B e^{2ik\Delta r_B} T^2(\theta_{Ai}) \cos \theta_{Bi} R(\theta_{Bi}) ds \quad (2)$$

其中: $\Delta r_B = \boldsymbol{\rho}_B \cdot \mathbf{r}_0$, $\cos \theta_{Bi} = \mathbf{n}_{B0} \cdot \mathbf{r}_0$, $\mathbf{r}_0$ 为入射方向的

单位矢量, ρ_b 为板块 B 所在点的矢径, n_{b0} 为板块 B 的法向矢量。 $R(\theta_{bi})$ 是目标表面的复反射系数, 这里也按无限大两边为水的层状介质反射公式计算^[8], $T(\theta_{ai})$ 为板块 A 的复透射系数, 由于板块 B 形成反向散射声有两次经过板块 A 的透射, 在积分项 $T(\theta_{ai})$ 应取平方。积分区域为板块 B 区域面积。式(2)也可以采用板块元公式, 将积分转化为板块 B 顶点求和形式进行计算^[5-6]。

这样外表面板块 A 的总反向散射声场 φ_i 可以表示为

$$\varphi_i = \varphi_{wi} + \varphi_{ni} \quad (3)$$

将所有亮区板块的散射声场按相干叠加方式求和, 就可以得到充水透声结构的目标强度, 如公式(4)所示:

$$S_T = 10 \lg \left(\frac{1}{\lambda^2} |I|^2 \right) \quad (4)$$

其中: $I = \sum_{i=1}^N \varphi_i = \sum_{i=1}^N (\varphi_{wi} + \varphi_{ni})$ 。

1.2 考虑透声的修正板块元方法的计算步骤与方法

针对充水透声结构目标强度计算的考虑透声的修正板块元方法可按照以下三个步骤进行。首先, 在给定的声波入射角度下, 判断声波照射的亮区, 确定结构外表面板块 A ; 其次, 基于 Z-Buffer 算法(即深度缓存算法, 是图像学中常用的图像空间消隐算法)来寻找外表面板块 A 的遮挡对, 也就是确定内表面板块 B , 同时遍历处于亮区的所有外表面板块, 确定其对应的遮挡对板块; 随后根据式(1)~(3)计算每一对遮挡对的回波贡献, 最后根据公式(4)计算充水透声结构的总目标强度。下面介绍这三个步骤的具体实现方法。

步骤 1: 判断声波照射的亮区, 确定结构外表面板块。

如图 3 所示, 声波入射矢量为 i , 板块 ABC 的法向量为 n 。若 $i \cdot n < 0$, 则板块 ABC 被声波直接照射到, 则其为外表面板块; 反之若 $i \cdot n > 0$, 则其为内表面板块。

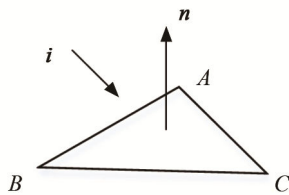
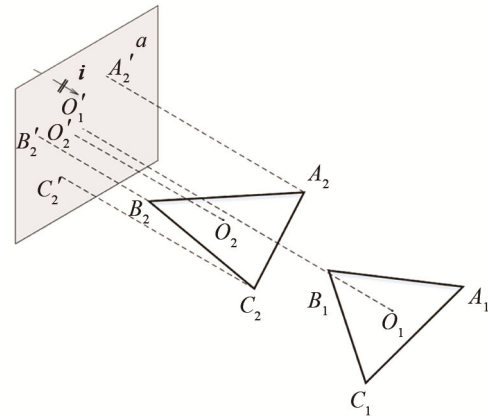


图 3 声波照射区(内或外表面板块)判断
Fig.3 Judgment of sound wave irradiation area (inner or outer shell)

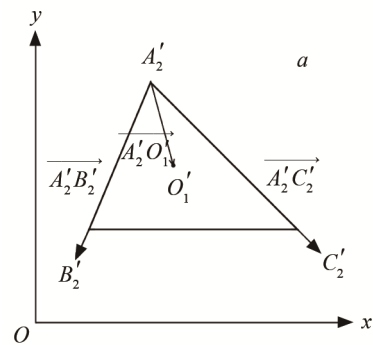
步骤 2: 在外表面板块与内表面板块之间寻找所有遮挡对。

这里借鉴图像学中常用的 Z-Buffer 算法来寻找遮挡对, 其基本思想是将两个板块在指定方向上进行投影, 以平面几何的方法判断两者是否存在遮挡关系。

如图 4(a)所示, 为了判断内表面上板块 $A_1B_1C_1$ 和外表面上板块 $A_2B_2C_2$ 是否存在遮挡关系, 将两者投影至平面 α 成为 $A'_1B'_1C'_1$ 和 $A'_2B'_2C'_2$, 平面 α 是与声波入射矢量垂直的平面, 两者的重心 O_1 、 O_2 也分别投影成为 O'_1 、 O'_2 。



(a) 投影过程



(b) 投影后的平面 α

图 4 Z-Buffer 算法判断两板块是否为遮挡对
Fig.4 The Z-Buffer algorithm for judging whether two shells forms a shielding pair or not

如图 4(b)所示, 根据平面几何理论, 在平面 α 内, 必有

$$\overrightarrow{A'_2O'_1} = m\overrightarrow{A'_2B'_2} + n\overrightarrow{A'_2C'_2} \quad (5)$$

m 、 n 为实数。若 $m \geq 0$, $n \geq 0$ 且 $m+n \leq 1$, 则点 O'_1 位于三角形 $A'_2B'_2C'_2$ 内, 进而说明板块 $A_1B_1C_1$ 与 $A_2B_2C_2$ 存在相互间的遮挡关系, 因此两者为遮挡对; 若不满足该条件, 则两者不构成遮挡对。将外表面板块与内表面板块进行遍历和判断, 即可寻找到所有的遮挡对。

步骤 3: 用式(3)、(4)计算每一遮挡对的散射声场, 并相干叠加计算充水透声结构的目标强度。

1.3 修正方法验证

为了验证考虑透声的修正板块元方法的正确性, 构建如图 5 所示的算例模型。该结构是相对简单、同时又比较典型的透声结构。将两个完全相同的圆形平板平行放置于水中, 材料为钢, 半径为 1 m, 厚度为 4 mm, 间距为 0.1 m, 声波的入射角为 α 。运用不同方法计算收发合置目标强度计算结果如图 6 所示。

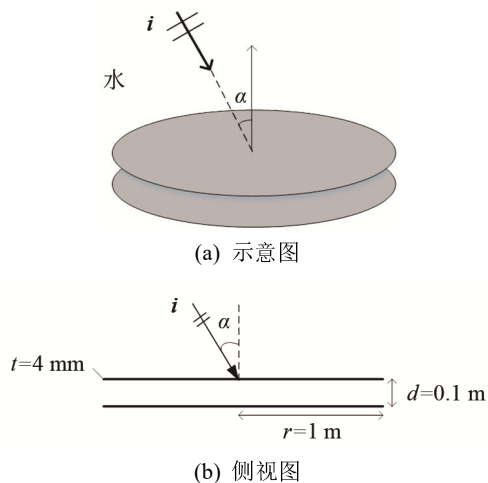
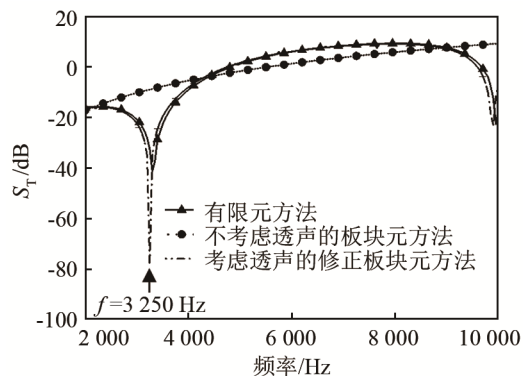
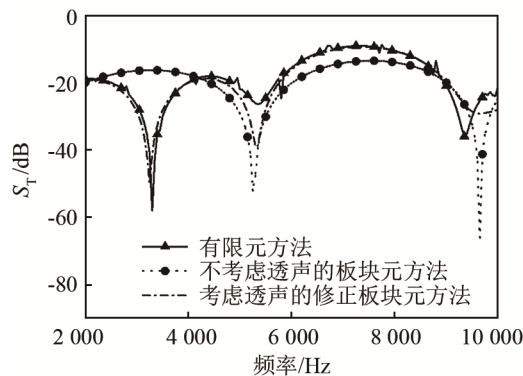


图 5 双层平板算例模型

Fig.5 Calculation model of double-layer plates



(a) $\alpha=0^\circ$



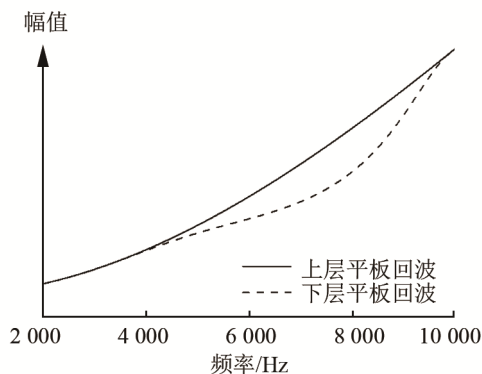
(b) $\alpha=10^\circ$

图 6 双层平板算例的目标强度计算结果

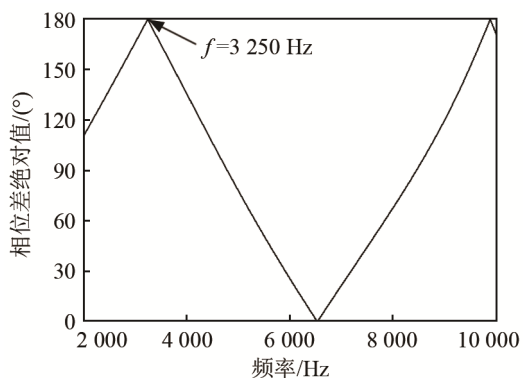
Fig.6 Calculation results of the target strength of double-layer plate model

由图 6 可见, 相较于不考虑透声的板块元方法, 考虑透声的修正板块元方法的目标强度预报结果与有限元方法的计算结果较为吻合, 证明了这一方法的正确性。

同时注意到在某些频点处, 双层平板的目标强度出现了极小值, 这是由于上层平板回波与下层平板回波反相叠加导致的。以入射角 $\alpha=0^\circ$ 即垂直入射时为例, 绘制上、下层平板的回波幅值及两者相位差的绝对值, 如图 7 所示。



(a) 上、下层平板回波幅值



(b) 上、下平板回波相位差的绝对值

图 7 $\alpha=0^\circ$ 时上、下平板回波分析

Fig.7 Echo analysis of upper and lower plates when $\alpha=0^\circ$

由图 7(a) 可以看到, 在 2~4 kHz 范围内, 上、下平板回波的幅值相当; 而由图 7(b) 发现, 当 $f=3250$ Hz 时, 上、下层平板回波的相位差达到 180° , 两者相位相反。在回波幅值相近、相位相反的情况下, 上、下平板的回波相干叠加, 在图 6(a) 中该频点的目标强度呈现为极小值。

仍然以入射角 $\alpha=0^\circ$ 为例, 如果不考虑上、下平板回波的相位, 而是将两者的回波直接以幅值相加 (即能量叠加), 目标强度计算结果与考虑相位 (即相干叠加) 的对比如图 8 所示。

可以看到, 当不考虑上下平板回波之间的相位关系后, 其目标强度的极小值也随之消失。这也说明图 6 中出现的目标强度极小值是由于两层平板回波反相叠加导致的。

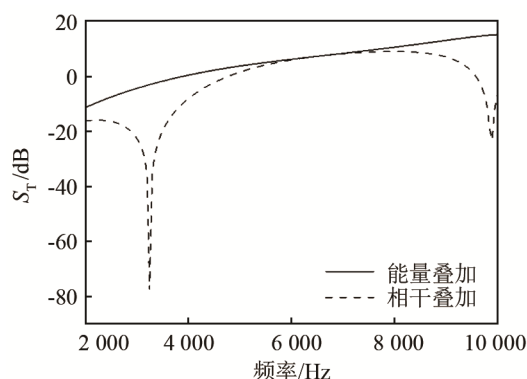


图8 能量叠加与相干叠加目标强度对比

Fig.8 Target strength comparison between energy stacking and coherent stacking

2 典型透声结构——指挥室围壳目标强度预报及分析

2.1 围壳模型的建立及预报结果

实现了考虑透声的修正板块元方法后,将其应用于典型的充水透声结构——指挥室围壳,预报其在给定频率下的目标强度。

选择BeTSSi II^[9]围壳部分的缩比模型作为计算模型。BeTSSi II是业界常用的评价潜艇目标强度的数值计算方法的基准模型。以其中指挥室围壳部分的尺寸为参照,以1:10的比例建立缩比模型。缩比模型材料为钢,高度为0.35 m,厚度为1.5 mm。模型的水平截面为翼型,在图9的 xOy 坐标系中,曲线参数由式(6)给出:

$$y=0.5t(a_0x^{0.5}-a_1x-a_2x^2+a_3x^3-a_4x^4) \quad (6)$$

式中: $0 \leq x \leq 1$, $a_0=0.2969$, $a_1=0.1267$, $a_2=0.3523$, $a_4=0.1022$ 。对于模型上平面, $t=0.1626$; 对于下平面, $t=0.1816$ 。由于本文侧重于对一般透声结构的研究,因此建模时仅考虑其外壳结构,暂不考虑围壳特有的立管、肋骨等内部结构,对于该类结构的研究工作将在未来开展。



图9 围壳模型的线型示意图

Fig.9 Illustration of the line-type of enclosure model

对模型进行网格剖分,以便代入仿真算法。计算设定的频率在30 kHz,在划分网格时设定网格最大尺寸为声波频率在30 kHz时对应波长的1/6,以确保网格划分的足够精度。构建的围壳模型网格划分如图10所示。

将建模完成的围壳模型代入修正方法,预报在

30 kHz下围壳模型目标强度如图11所示。作为对比,同时使用板块元方法预报该模型同一频率下的目标强度一并绘于图中。其中方位角为 0° 时对应声波从艏部入射,方位角为 180° 时对应声波从艉部入射,下文若没有说明,方位角对应的方向与此一致。

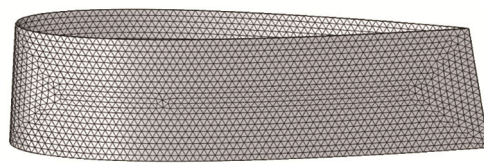
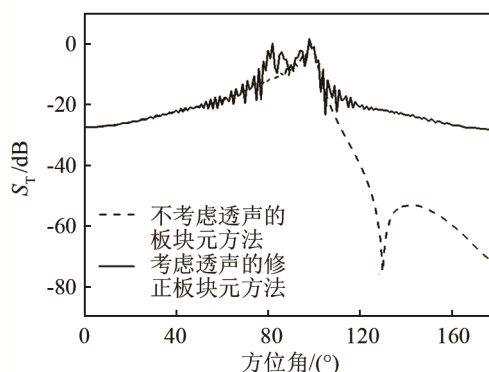


图10 指挥室围壳计算模型网格划分

Fig.10 Mesh division of the calculation model of command room enclosure

图11 $f=30$ kHz 围壳模型目标强度预报结果Fig.11 Target strength values of the enclosure model at $f=30$ kHz predicted by the original and the modified methods

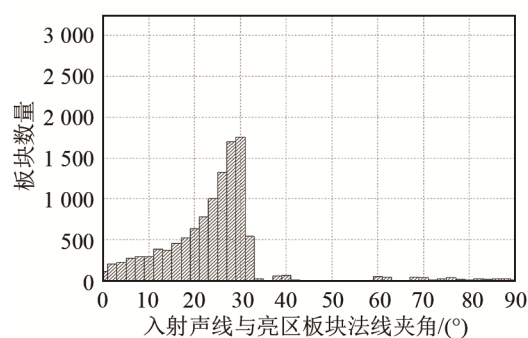
由对比可以明显发现,在艏部至接近正横的范围内(方位角为 $0^\circ \sim 70^\circ$),两种方法的预报结果并无明显差别;而在靠近正横至艉部范围内(方位角为 $100^\circ \sim 180^\circ$),考虑透声的修正板块元方法预报结果显著高于不考虑透声的板块元方法,方位角从约 140° 开始二者的差值始终在20 dB以上。

2.2 预报结果分析

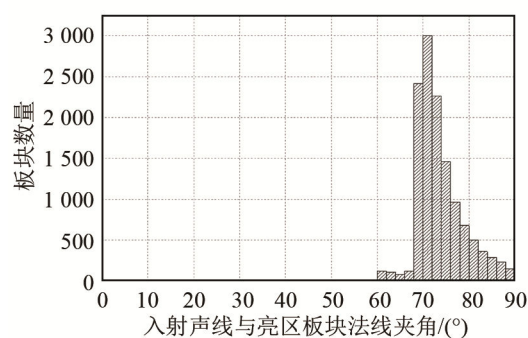
结合围壳的外形特征对图10的结果进行分析。图12给出了在 60° 和 140° 两个方位角下,外表面板块的法线与入射矢量的夹角分布情况。在方位角为 60° 时,绝大部分外表面板块的法线与入射矢量夹角在 $0^\circ \sim 35^\circ$ 范围内,夹角较小;而在方位角为 140° 时,大部分外表面板块的法线与入射矢量的夹角集中在了 $70^\circ \sim 80^\circ$ 范围内,夹角较大。

进一步结合不同角度下平板的反射、透射系数进行分析。以声波频率为30 kHz、材料为钢、厚度为1.5 mm的平板为例,由图13可见,随着夹角从 0° 增大到 90° ,平板的反射系数迅速从约0.6减小至0,而透射系数却随之从约0.8增加到1。

由此可以发现,对于围壳结构来说,在声波从艏部入射至接近正横入射的范围内,声线与绝大多



(a) 方位角为 60°



(b) 方位角为 140°

图 12 不同方位角下亮区板块法线与入射声线夹角分布
Fig.12 The angle distribution between the incident ray and the normal of irradiated outer planar element under different direction angles

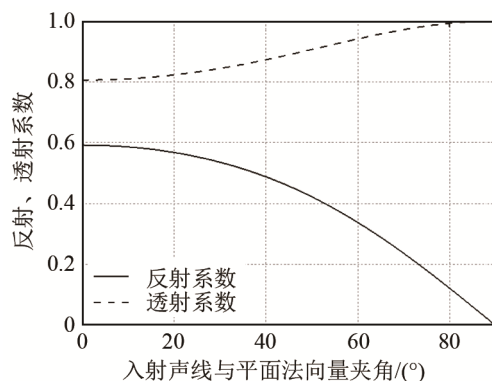


图 13 30kHz 时平板反射系数和透射系数随平板法线与入射声线夹角的变化
Fig.13 Variations of reflection and transmission coefficients of a plate with the angle between the incident ray and the normal of the plate at 30 kHz

数外表面板块法线的夹角较小, 使得板块反射系数较大、透射系数较小, 大部分能量直接被外表面反射, 因此外表面成为散射声场的主要贡献区域。由于两种方法均考虑了外表面的声场贡献, 因此两者计算结果并无明显差别。而在声波从靠近正横入射至艏部入射的范围内则恰好相反, 由于声线与外表面板块法线的夹角增大, 板块的反射系数减小、透射系数增大, 更多的能量穿透进入围壳内部照射到内表面, 此时内表面成为散射声场的主要贡献区域。板块元方法忽略了内表面的贡献, 因此其计算

结果迅速减小, 与考虑透声的修正板块元方法计算结果形成较大差异。

3 围壳模型水池试验

为了验证围壳模型的预报结果, 进行了围壳模型水池试验。围壳模型实物与 2.1 节介绍的一致, 材料为钢, 其实物如图 14 所示。

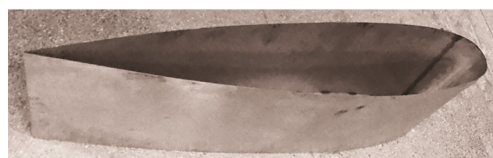


图 14 钢制围壳模型实物照片

Fig.14 The photo of a steel enclosure model

试验在中科院声学研究所北海研究站消声水池进行, 水池尺寸为 12 m×10 m×8 m, 水池四壁、底部及水面均铺设消声尖劈, 可有效避免池壁周围的散射声波对试验结果的影响, 因此试验环境可近似视为自由场。试验设备布放示意图如图 15 所示, 发射阵中心、水听器及模型中心深度均为 3.77 m, 且保证三者位于同一条直线上。为了满足远场条件, 分别设置发射换能器与水听器之间的距离及水听器与模型之间的距离分别为 3.3 m 和 7.6 m。试验中采用连续旋转围壳模型并同时采集数据的方式进行测量, 模型旋转速度为 1°·s⁻¹, 信号采集间隔为 500 ms。

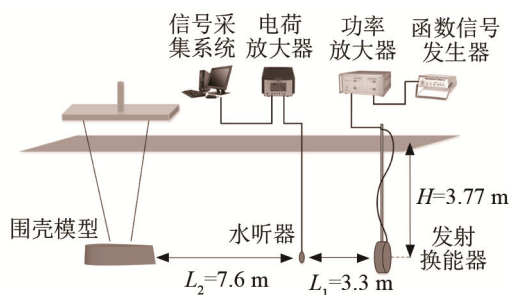


图 15 仪器布放示意图

Fig.15 Layout of the experimental instruments

试验频段为 20~40 kHz, 信号形式为线性调频信号。将回波信号经过匹配滤波处理, 得到图 16 中的围壳回波角度-时间谱, 同时给出采用修正板块元方法和频域间接法^[10]仿真得到的围壳回波角度-时间谱, 图中虚线填充区域为仿真结果。

从试验结果可以得到以下结论:

(1) 艏部至正横附近(0°~120°)的范围内, 强时域回波对应时间范围为约 0.012 s~0.0125 s, 根据反射点距离反推可确认此回波为围壳外表面回波;

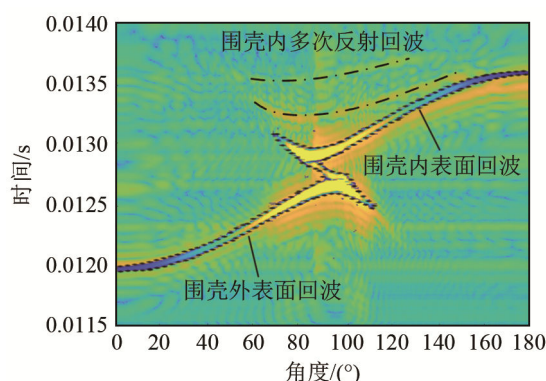


图 16 围壳回波角度-时间谱
Fig.16 Angle-time spectrum of the echoes from the enclosure model

而在正横附近至艏部($70^{\circ} \sim 180^{\circ}$)的范围内, 回波对应时间范围为约 $0.013 \sim 0.0135$ s, 同样可以确认此回波为围壳内表面一次散射回波。理论仿真回波结构与实验吻合较好, 只在艏部($160^{\circ} \sim 180^{\circ}$)存在一定误差。 $0^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 范围内围壳内表面回波较弱, 外表面回波较强, $70^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 范围内围壳内表面回波较强, 外表面回波较弱, 如图 16 中标示, 这与 2.2 节对于不同角度下围壳散射声场主要贡献区域的分析是吻合的。

(2) 在图 16 中角度范围 $60^{\circ} \sim 160^{\circ}$ 内, $0.013 \sim 0.014$ s 还出现了两条较亮的回波结构, 如图中两条点划线所示, 这对应着围壳内部多次散射回波。但是其回波强度相对于同角度范围围壳外壳和内壳表面一次散射较弱, 对总体散射声场的贡献有限, 可以忽略, 再次确认修正板块元方法仅考虑外表面和内表面的一次散射是可行的。

图 17 给出发射频率为 24 kHz 时围壳模型目标强度试验实测结果与预报结果进行对比。

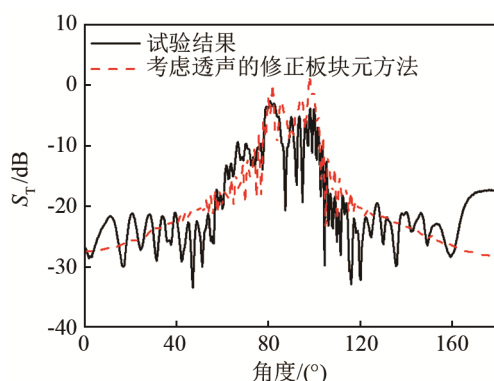


图 17 频率为 24 kHz 的目标强度试验结果与预报结果对比
Fig.17 Comparison between experimental and predicted target strengths at 24 kHz

从试验结果可以得到以下结论:

(1) 修正板块元方法的目标强度预报结果在绝大部分角度范围内与试验结果吻合较好, 表明对于

围壳这类透声结构来说该预报方法是有效的。但同时注意到, 在艏部入射($160^{\circ} \sim 180^{\circ}$)附近, 修正方法的预报结果与试验结果存在一定差异。这与时间角度谱观察到的回波时域在此角度范围内也存在一定误差的现象是一致的。结合围壳艏部弧形的结构特点, 推测此时围壳的艏部实际上构成了类似于“凹面镜”的结构, 该结构可能对声能产生了一定的集聚效果, 如图 18 所示, 使其散射声场产生较为复杂的变化, 需要进行进一步探究。

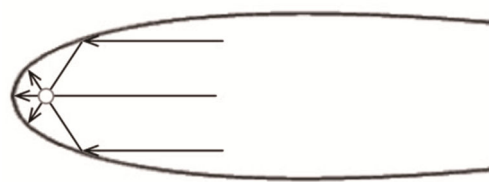


图 18 声波集聚效果示意图
Fig.18 Schematic diagram of acoustic wave gathering

(2) 理论预报结果随角度变化起伏较小, 试验结果目标强度随角度变化起伏较大, 特别是在 $80^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 范围内起伏更为剧烈, 目前修正方法只考虑了内表面的一次散射回波, 但是试验中观察到的多次散射回波的叠加可能是产生这种差异的主要原因, 需要进行进一步进行精细建模。

4 结 论

本文以板块元方法为基础, 提出了一种适用于充水透声结构目标强度预报的考虑透声的修正板块元方法。该方法考虑了透射声波在结构内表面的一次反向散射效应的影响, 并通过双层圆板目标算例检验了方法的正确性; 随后针对典型透声结构——BeTSSi II 潜艇围壳的目标强度进行了预报及分析, 指出声波在艏部至正横入射的范围内入射时, 外表面为散射声场的主要贡献区域, 声波在正横至艏部的范围内入射时, 内表面为散射声场的主要贡献区域; 最后进行了围壳缩比模型水池试验, 考虑透声的修正板块元方法的预报结果在时域与频域上与试验结果均较为吻合, 验证了该预报方法的可行性。

由于多次散射的作用, 围壳这样艏部为弧形的结构对于透射进入内部的声波在某些角度下可能会产生类似“凹面镜”的效果, 对入射声波进行一定的集聚, 该效果使得修正方法在这些角度下的预报结果并不准确, 需要进行进一步探究。此外, 本文仅针对一般的透声结构, 对于透声结构特有的内部结构(如围壳的肋骨、立管等)以及由其带来的复杂多

次散射的影响将在未来工作中开展。

参 考 文 献

- [1] 刘伯胜, 雷家煜. 水声学原理[M]. 2 版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
- [2] 汤渭霖, 范军. 水中双层弹性球壳的回声特性[J]. 声学学报, 1999, 24(2): 174-182.
TANG Weilin, FAN Jun. Echoes from double elastic spherical shell in water[J]. Acta Acustica, 1999, 24(2): 174-182.
- [3] 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.
- [4] 范军, 朱蓓丽, 汤渭霖. 非刚性表面声呐目标回波的修正几何亮点模型[J]. 声学学报, 2001, 26(6): 545-550.
FAN Jun, ZHU Beili, TANG Weilin. Modified geometrical highlight model of echoes from nonrigid surface sonar target[J]. Acta Acustica, 2001, 26(6): 545-550.
- [5] 范军, 汤渭霖, 卓琳凯. 声呐目标回声特性预报的板块元方法[J]. 船舶力学, 2012, 16(Z1): 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(Z1): 171-180.
- [6] 张玉玲. 敷设吸声层的水下复杂目标回波特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 29-46.
- [7] 范军, 刘涛, 汤渭霖. 水下目标壳体的镜反射亮点回波结构[J]. 声学技术, 2002, 21(4): 153-157, 170.
FAN Jun, LIU Tao, TANG Weilin. The structure of highlight echoes due to specular reflection from shells of immersed target[J]. Technical Acoustics, 2002, 21(4): 153-157, 170.
- [8] (苏) 布列霍夫斯基赫 Л. М. 分层介质中的波[M]. 杨训仁, 译. 北京: 科学出版社, 1960.
- [9] 冯雪磊, 李晓伟, 孔昕, 等. 有限元方法分析 BeTSSi-II 标准潜艇模型低频目标强度[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(17): 68-74.
FENG Xuelei, LI Xiaowei, KONG Xin, et al. Analyzing the target strength of BeTSSi-II benchmark submarine at low frequency by using coupling finite element method[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(17): 68-74.
- [10] 汤渭霖, 范军, 马忠成. 水中目标声散射[M]. 北京: 科学出版社, 2018.