船坞登陆舰声散射时频特征数值及试验研究

刘 慧[1]，彭子龙[1]，范 军[1]，吴 锟[2]
(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院，上海 200240；2. 上海船舶电子设备研究所，上海 201108)

摘要：阐述了基于虚源法的板块元基本原理，以及目标强度和时域回波的计算方法。通过建立三维船坞登陆舰的网格模型，考虑水面反射以及船艉部分浸水的影响，计算得到了水平方位上的目标强度、由远场到近场回声强度的变化规律以及浅海水域下通过水雷正上方时回声强度的通过特性，并对这些结果进行的分析。通过开展运动水面舰船模型声散射湖上试验，获取了舰船模型时域回波特征，并与计算结果对比。研究结果表明，采用基于虚源法的板块元能够对船坞登陆舰的目标强度、回声强度以及时域回波结构给出比较准确的预报。研究结果将对提高船坞登陆舰声隐身特性，避开鱼雷和水雷等水中兵器的攻击提供一定的参考价值。

关键词：船坞登陆舰；目标强度；回声强度；板块元方法；时域回波
中图分类号：TB556 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-3630(2019)-02-0147-06
DOI 编码：10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.02.006

Numerical and experimental research on acoustic scattering time-frequency characteristics of dock landing ship

LIU Hui[1], PENG Zi-long[1], FAN Jun[1], WU Kun[2]
(1. *School of Naval Architecture,Ocean and Civil Engineering,Shanghai Jiao Tong University*, *Shanghai* 200240, *China*;
2. *Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute*, *Shanghai* 201108, *China*)

Abstract: The image-source method based Planar Element Method (PEM) and the calculation methods of target strength and its time domain echo are described. By establishing a 3D meshing model of dock landing ship and taking surface reflection and the effect of stern partial flooding into consideration, the target strength of dock landing ship in the horizontal direction, the variation of the echo strength of dock landing ship from far field to near field and the variation of the echo strength of dock landing ship passing over a mine in the shallow water area are calculated and analyzed. Through the acoustic scattering experiment of moving warship model on lake, the time domain echo characteristics of the warship model are obtained and compared with the results of calculation. Research results show that the image-source method based PEM can accurately predict the target strength, the echo strength and echo structure of the dock landing ship, which could provide a reference for improving the stealth characteristics of dock landing ships and avoiding the attack of underwater weapons such as torpedo and mine.

Key words: dock landing ship; target strength; echo strength; planar element method; time domain echo

0 引 言

当前在解决各种地区冲突或局部战争中，船坞登陆舰艇发挥着日益重要的作用，其船艉部分浸水的特点与一般舰艇有所不同。由于水面舰船时域回波中包含了大量自身的工作状态、位置以及运动姿态等信息，而且在近岸的浅海水域如何预防来自鱼雷、水雷等武器的定位和攻击等问题，都引起了国内外的广泛关注。

水面舰船参数识别按照声呐系统工作方式的不同可以分为主动和被动两类。其中，被动识别方式国内外现已有大量的研究。丁玉薇[1]分别从特征提取、特征选择和分类器等方面系统总结了被动声呐目标识别技术的现状与发展。目前研究水面目标声散射场的数值方法主要包括有限单元法[2-3]、边界元法[4]和板块元法等。其中，有限单元法和边界元法只适用于计算量较小的低频问题，而近年来发展起来的板块元法[5-6]能够较好地克服高频计算量大的问题。该方法基于基尔霍夫(Kirchhoff)近似，用一组平面板块元近似目标曲面，将所有板块元的散射声场叠加得到总散射声场。王新宁等[7]提出了采用基于虚源的板块元法，对 6 种不同尺度和吨位的典型渔船的声目标强度进行了理论预报，并分析了海面对船舶声呐目标强度的影响。王汝夯等[8]基于

收稿日期：2018-07-12；**修回日期：**2018-08-14
作者简介：刘慧(1984－)，女，江西鹰潭人，硕士研究生，研究方向为水下目标声散射特性。
通讯作者：范军，E-mail: fanjun@sjtu.edu.cn

板块元法计算了水面舰船远场目标强度及方位分布特征。PENG Z L 等[9]采用板块元法研究了水面舰在运动过程中主动声呐时域回波的构成。

本文将通过构建船坞登陆舰几何模型，采用基于虚源法的板块元对其回波特性进行仿真计算。并从工程应用的角度出发，考虑了水面的影响、船艉部分浸水的特性以及水面舰船船体各部分声散射贡献，计算得到目标强度、回声强度和时域回波结构等，最后通过湖上实测对预报方法进行了验证。

1 三维建模及网格剖分

本文首先采用 UG 三维建模软件，构建了船坞登陆舰水线以下部分，该舰总长 198 m，船宽 25 m，平均吃水 7 m，船坞舱长 118.8 m，双舵布置在距船艉端面 6 m、水面以下 2.5 m 的位置，双舵间距 10m，如图 1 所示。船坞登陆舰大致可以分为船艏、船舯和船艉三个部分，船艏有显著凸起的球鼻艏，船舯两侧布置有减摇鳍，而船艉布置有双舵。这里忽略了螺旋桨对声散射的影响，但考虑了双舵和两侧减摇鳍的影响。将 UG 的三维几何模型导入到 COMSOL 软件中，按照每个波长内至少有 6 个单元格的基本原则，剖分三角形面网格。为了提高网格剖分的质量，优先采用掠扫的方式构建四边形网格，进而将其转化成三角形网格，网格模型如图 2 所示。

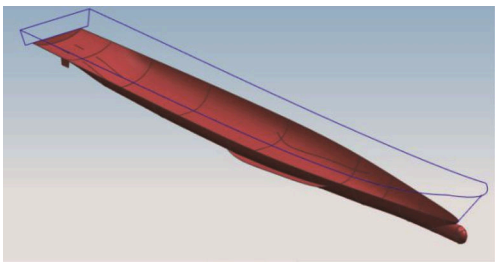


图 1 船坞登陆舰水下部分几何模型

Fig.1 Geometric model of the underwater part of dock landing ship



图 2 船坞登陆舰水下部分网格模型

Fig.2 Mesh model of the underwater part of dock landing ship

2 目标强度及时域回波的计算

水面舰艇是一种界面附近具有一定吃水深度的壳体结构目标，其目标强度与水中的运动目标(比如潜艇、无人潜航器(Unmanned underwater vehicle, UUV)等)有所不同。尽管其目标强度只取决于水面以下的部分，但由于海面、海底的引入，其目标强度的计算比自由场中的目标强度计算要复杂一些。当吃水深度和接收距离远小于水深时，其目标强度的计算可仅考虑海面，而忽略海底的影响。目前研究这类界面附近的问题主要采用的是物理声学的方法[10]。

对于自由场中目标强度计算来说，计算中高频最高效的方法就是板块元法。它以基尔霍夫(Kirchhoff)近似公式为基础，认为在声波波长远小于目标尺寸和它的面曲率半径的情况下，其目标表面声压与振动速度的比值可以近似为平面波的计算结果。因此，积分方程被极大地简化成一个面积分，可看成一个高频的平面波近似，同时忽略几何影区对声场的贡献，并且一般假定散射体表面满足刚性条件[5]。

忽略时间因子 $e^{-j\omega t}$，收发合置和收发分置情况下的散射波势函数分别为

$$\phi_s^m=\frac{-A}{2\pi}\int_S e^{jk_0 2r}V(\alpha)\left(\frac{jk_0 r-1}{r^3}\cos\alpha\right)dS \tag{1}$$

$$\phi_s^b=\frac{-A}{4\pi}\int_S e^{jk_0(r_1+r_2)}V(\alpha_1)\left(\frac{jk_0 r_2-1}{r_1 r_2^2}\cos\alpha_1+\frac{jk_0 r_1-1}{r_2 r_1^2}\cos\alpha_2\right)dS \tag{2}$$

式(1)为式(2)的特殊情况。其中：S 是散射体表面；r_1 和 r_2 分别为入射点和散射点矢径，相同时为 r；α_1 和 α_2 分别为表面外法线方向与入射点和散射点矢径间的夹角，两者相同时为 α；$V(\alpha)$ 为表面反射系数，绝对硬边界时为 1，绝对软边界为–1。对于更复杂的浸水结构，其值取决于入射角、频率、板厚等参数。

将目标划分网格，每个小板块的尺寸满足 $R_{\min}>D^2/\lambda$ 条件，保证此计算场点为远场。其中，$R_{\min}$ 为散射点矢径可计算的最小距离，D 为每个板块的最大尺寸，λ 为入射波波长，这样总的散射声场仍可表示为所有板块散射声场的和。最后将式(1)、(2)中的积分转化为平面内三角形顶点坐标的和，从而得到目标的散射声场[5]。

当考虑单界面的影响时，根据物理声学方法计

算界面附近目标的回波可知，散射声场分为直达波的散射场（路径 1）、入射波或散射波之一经过水面的散射场（路径 3），以及船壳相对水面的镜像“收发合置”的散射场（路径 2）等三部分，如图 3 所示。需要说明的是，图 3 中基阵的工作方式为收发合置工作方式。

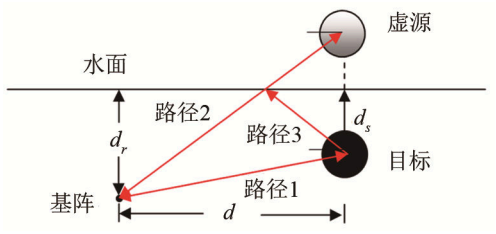


图 3　考虑水面的目标回波路径示意图

Fig.3　Schematic diagram of the target echo paths taking into account the sea surface

考虑水面的影响，水面舰散射的总声场为

$$\phi_s=-\frac{\mathrm{j}k}{2\pi}\int[\frac{\mathrm{e}^{\mathrm{j}2kr}}{r^2}\cos\alpha+V(\theta)\frac{\mathrm{e}^{\mathrm{j}k(r+r_1)}}{rr_1}(\cos\alpha+\cos\alpha_1)+V^2(\theta)\frac{\mathrm{e}^{\mathrm{j}2kr_1}}{r_1^2}\cos\alpha_1]\mathrm{d}S\sqrt{a^2+b^2} \tag{3}$$

式(3)中 4 项分别表示自由空间中回波、直达波经目标反射后沿水面反射回到源点或者水面反射波经目标反射后直接回到源点的散射波、入射和反射波都沿水面反射途径传播的波。其中，反射系数 $V(\theta)$ 在理想水面时取为–1。

计算水面舰船回波的主要思路是：首先构造上述的入射波信号，根据板块元计算目标的传递函数，入射信号与传递函数做卷积运算，得到目标的回波信号 $y(\tau)$ 为

$$y(\tau)=x(\tau)\otimes h(\tau,r_i,\rho) \tag{4}$$

式中：$x(\tau)$ 为入射信号；$h(\tau,r_i,\rho)$ 为目标传递函数，r_i 与 ρ 分别为目标中心到坐标原点的距离和基阵到坐标原点的距离；$\otimes$ 表示卷积运算。

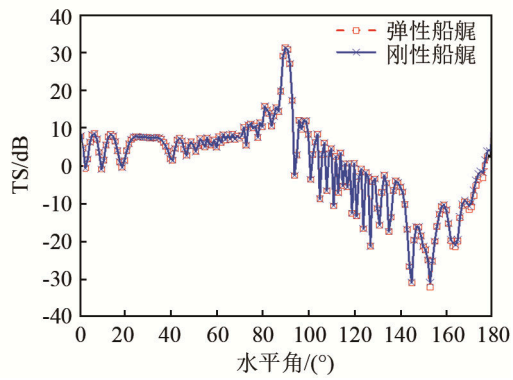
3　目标强度及回声强度仿真计算

按照第 2 节介绍的方法，当最高分析频率为 10 kHz 且不考虑船艉部分浸水时，船坞登陆舰的几何模型经过网格剖分后，共得到 8 968 576 个三角形网格，将网格的节点及单元的拓扑信息分别导出，再根据编写的板块元程序，读取上述网格和拓扑信息，计算时还应当确保法线方向垂直于目标表面朝外。但船坞登陆舰的工作状态与常规舰船有所不同，由于船艉部分浸水，因此其目标强度的计算也比常规的舰船复杂一些。目前处理这类问题，普遍采用的是“先分部计算后合成”的思想，即将船坞登陆舰分成未浸水部分和浸水部分分别计算，然后按照式(5)进行合成：

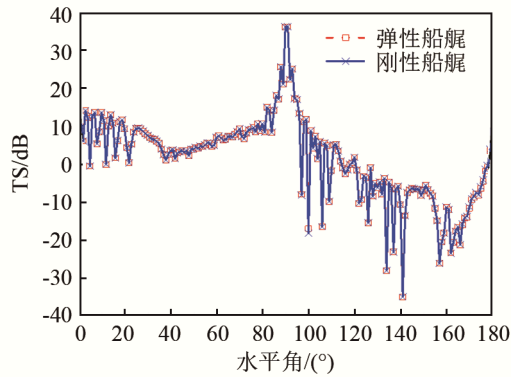
$$\mathrm{TS}_{\mathrm{total}}=10\lg\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}10^{\mathrm{TS}_i/10}\right) \tag{5}$$

式中，TS_i 为每一部分的目标强度，$\mathrm{TS}_{\mathrm{total}}$ 为合成后总的目标强度，N 为划分的部分数目。

图 4 分别给出了船坞登陆舰在 5 kHz 和 10 kHz 频率下，船艉部分浸水和没有浸水情况下的目标强度随水平方位角的变化情况(0°和 180°分别对应船艏和船艉方向)。



(a) f=5 kHz



(b) f=10 kHz

图 4　船坞登陆舰模型不同频率时的目标强度

Fig.4　Target strengths of the dock landing ship model at different frequencies

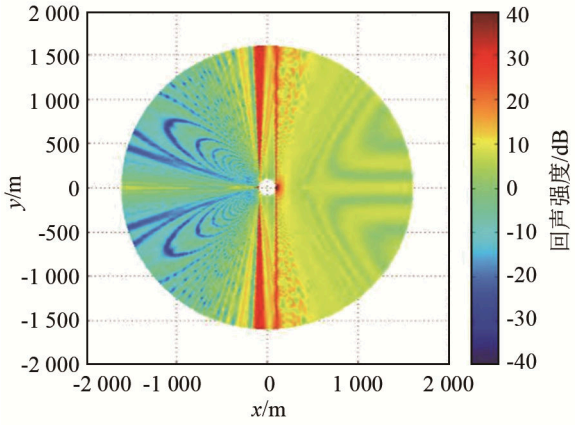
由图 4 可以得到如下结论：

(1) 对 5 kHz 和 10 kHz 两个不同的频点来说，船坞登陆舰在船艏方向(0°)的目标强度约为 7～15 dB；在正横方位(90°)附近，其目标强度呈现最大值，约为 32～37 dB；随着角度偏离正横附近(90°±5°)，其目标强度迅速下降；在船艉方向由于平整船壳强烈的镜反射作用，其目标强度又迅速提高，约为 12～15 dB；

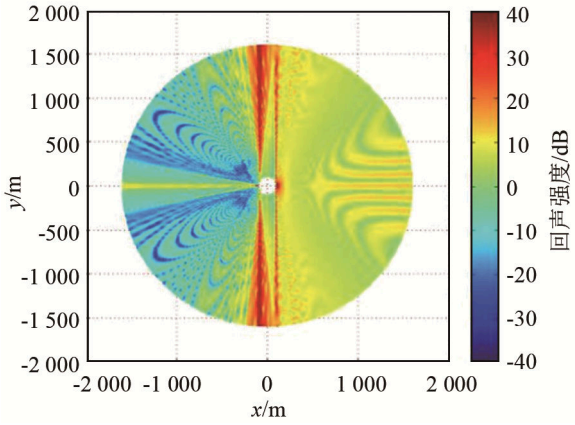
(2) 在正横到船艉过渡的角度(110°～170°)内，目标强度有显著的下降趋势，一般在 150°附近出现低谷，其目标强度值比船艏到正横过渡的角度(10°～80°)整体上要低许多。此外，10°～80°范围内

目标强度基本比较稳定。

(3) 不论船艉是否浸水，其目标强度随水平角度的变化规律却差别不大，仅在 160°～180°的范围，稍微有所区别(<1.5 dB)，其它角度基本不变。这是由于一方面浸水的部位相比整个船体来说仍然很小，另一方面由于船艉在 110°～170°范围内本身目标强度就比较低，因此，浸水以后船壳的目标强度降低并不明显。



(a) f=5 kHz



(b) f=10 kHz

图 5 船坞登陆舰模型不同频率随距离变化的回声强度

Fig.5 Variations of the echo strength of dock landing ship model with distance at different frequencies

由于具备声制导功能的鱼雷在攻击和定位船坞登陆舰的过程中，经历了由声学远场向声学近场的动态变化，因此单一的参数“目标强度”往往不能满足作战的需求，这就需要充分考虑距离和方位角对回声强度的影响。为此，我们仍然考虑船坞登陆舰船艉部分浸水，计算了船坞登陆舰从远场(1 600 m 处)向近场(50 m 处)过渡时随水平方位角度变化的回声强度，图 5 为回声强度的计算结果。

由图 5 可以得到如下结论：

(1) 对比 5 kHz 和 10 kHz 的计算结果，不难发现：频率越高，近场相干叠加越显著，这是由于频率较高时近场半波带数目更多引起的[11]。当达到一定的距离后，散射声场进入远场区。而且频率越低，波长越长，越容易在更近的距离上达到声学远场，这一点很容易从近远场判定的经验公式上得到证实。

(2) 由于船坞登陆舰是一个几何高度上各向异性的复杂目标，在不同方位角上其近远场的起伏特性差别显著。在船艏附近±80°范围内，回声强度基本接近稳定，更容易达到远场。这是由于位于船艏的球鼻艏结构凸出且光滑，其回声强度随距离的变化规律更接近刚性球的变化规律。而在正横附近，上下各出现了两条非常强且很狭窄的回声强度带，这两条回声强度带分别是由船舯鼓出的线型以及船艉的艉舵引起的。在船艉附近±80°范围内，回声强度呈显著的“蝶形”条纹，它的形成和船艉的双舵有关。当两条声线同时达到左右双舵的舵面时，经过回波的干涉叠加就会形成这种特殊的条纹。此外，需要说明的是，由于板块元没有考虑遮挡的作用，因此可能出现部分虚假的干涉条纹。

当船坞登陆舰在近岸的浅海区执行任务时，由于面临着来自海底水雷攻击的威胁，因此研究其主动声呐探测的通过特性就显得尤其重要。假定水雷探照波束全开角为 10°，水雷深度 30 m，船坞登陆舰通过水雷上方(如图 6 所示)。在其通过水雷上方的整个过程中，其回声强度的计算结果如图 7 所示。可见在–40～40 m 的船舯范围内，回声强度最强，这是由船坞登陆舰船舯偏宽的线型决定的。随着距离向两头增大，回声强度逐渐减弱。但在 100 m 的船艉附近，回声强度又有所提高，这是由于双舵以及船艉平整的船底导致的。

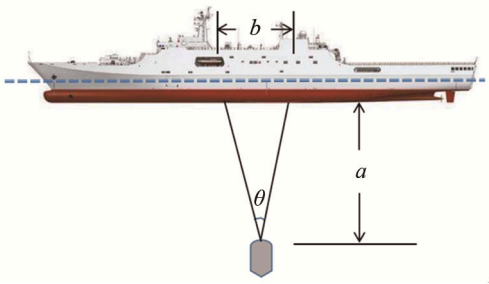


图 6 船坞登陆舰通过水雷上方示意图

Fig.6 Schematic diagram of the dock landing ship passing over a mine

4 时域回波结构试验验证

为研究水面舰艇的时域回波特征，在某水库开展了水面舰模型声散射回波试验。试验区水域开阔，平均水深 24 m。试验中所用的发射阵为收发合置换能器阵，发射频率范围为 100～200 kHz，脉宽

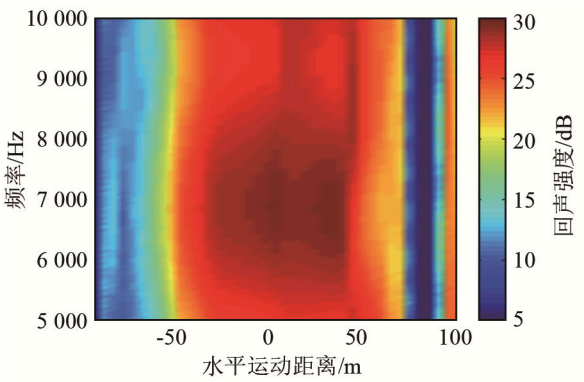


图 7　船坞登陆舰通过水雷上方的回波强度计算结果
Fig.7　The calculation result of echo strength of the dock landing ship passing over the mine

为 0.5 ms，发射周期为 100 ms，中心频率为 150 kHz 时水平开角为 38°，垂直开角为 18°。接收换能器为 32 元阵，频率 150 kHz 时水平开角为 6°，垂直开角为 19.4°。接收换能器的灵敏度为–179.7～–190.2 dB ref 1V/μPa。测量时发射阵发射深度为 2 m，阵面垂直于水面舰驶过的方向。水面舰试验测量系统布置图如图 8 所示。此外，试验设备还包括激光测距仪、基阵固定架、水面舰遥控器等，其中激光测距仪的测量范围为 5～1 463 m，测量误差为±1 m。

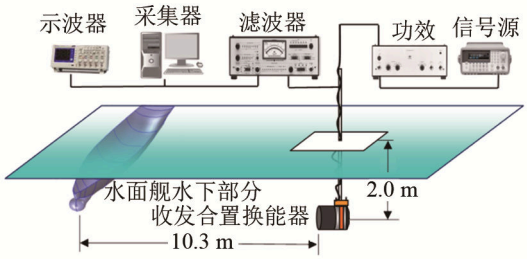
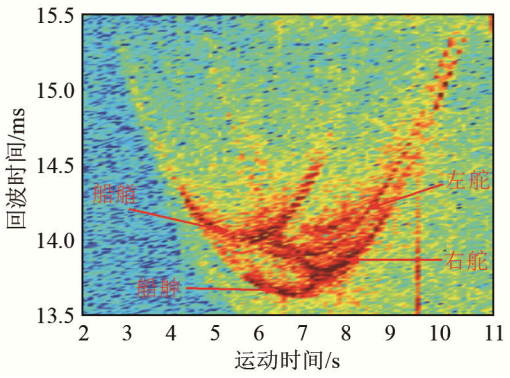
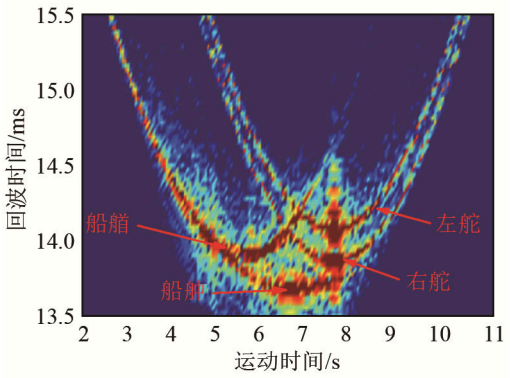


图 8　水面舰试验测量系统布置图
Fig.8　The layout of the experimental system for testing surface ship

这里的水面舰模型总长 3.7 m，船宽 0.46 m，吃水深度 0.16 m；船艉布置双舵，舵长 0.14 m，宽 0.1 m，平均厚度 0.02 m，双舵中心距 0.2 m。模型内部采用铁棒压载，因而可以不必考虑压载水舱声透射的影响。试验测得的时域回波特征如图 9(a)所示，水面舰的回波特征由若干条 U 型曲线构成。图 9(b)为根据第 2 节介绍的方法得到的水面舰回波。可见，利用板块元法可以计算出水面舰运动过程中的 4 条主要的回波曲线，且位置、形状和亮度都较符合，试验和仿真结果符合得较好。进一步分析，可以确定水面舰时域回波特征的几条 U 型曲线分别是由船艏、船舯和两个艉舵引起的。由于板块元计算中并未考虑板块元间的遮挡效应，因此使得仿真结果中的左舵引起的 U 型曲线的左半部分以及船艏引起的 U 型曲线的右半部分清晰可见，而试验中则分别由于右舵和船艉的遮挡而观察不到该部分的曲线特征。



(a) 回波特征实测结果



(b) 回波特征仿真结果

图 9　水面舰回波特征试验和仿真对比结果
Fig.9　Comparison between the echo characteristics obtained by simulation and experiment

5　结 语

本文简要介绍了基于虚源法的板块元基本原理以及目标强度、时域回波的计算方法。采用 UG 和 COMSOL 软件建立了船坞登陆舰的三维网格模型，考虑水面反射以及船艉部分浸水的影响，计算得到了水平方位上的目标强度、由远场到近场回声强度的过渡特性以及浅海水域下通过水雷正上方时回声强度的通过特性。最后通过开展运动水面舰船模型声散射湖上试验，获取了舰船模型时域回波特征，并与计算结果做了对比，得出以下结论：

(1) 船坞登陆舰在正横方位附近，其目标强度呈现最大值；随着角度偏离正横附近，其目标强度迅速下降；在船艉方向由于平整船壳强烈的镜反射作用，其目标强度又相应提高。

(2) 不论船艉是否浸水，其目标强度随水平角

度的变化规律差别不大，仅在船艉的 160°～180°的范围，稍微有所区别(<1.5 dB)，其它角度基本不变。

(3) 对由近场到远场回声强度的过渡来说，频率越高，近场相干叠加越显著。在不同方位角上其近远场的起伏特性差别显著。在船艏附近±80°范围内，回声强度基本接近稳定。而在正横附近，上下各出现了两条非常强且很狭窄的回声强度带，这两条回声强度带分别是由船舯鼓出的线型以及船艉的艉舵引起的。在船艉附近±80°范围内，回声强度呈现显著的“蝶形”条纹，它的形成和船艉的双舵有关。

(4) 船坞登陆舰在通过水雷上方的整个过程中，其回声强度在–40～40 m 的船舯范围内最强，这是由船坞登陆舰船舯偏宽的线型决定的。随着距离向两头增大，回声强度逐渐减弱。但在 100 m 的船艉附近，回声强度又有所提高，这是由于双舵以及船艉平整的船底导致的。

(5) 利用板块元法可以计算出水面舰运动过程中的 4 条主要的回波曲线，且位置、形状和亮度都较符合，试验和仿真结果符合得较好。

参 考 文 献

[1] 丁玉薇. 被动声呐目标识别技术的现状与发展[J]. 声学技术, 2004, **23**(4): 253-257.
DING Yuwei. Review on passive sonar target recognition[J]. Technical Acoustics, 2004, **23**(4):253-257.

[2] IHLENBURG F. Finite element analysis of acoustic scattering[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2006.

[3] MARBURG S, Nolte B. Computational acoustics of noise propagation in fluids: finite and boundary element methods[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.

[4] WROBEL L C. The boundary element method, applications in thermo-fluids and acoustics[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2002.

[5] 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 methods for forecasting the echo characteristics from sonar targets[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, **16**(1-2):171-180.

[6] 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.

[7] 王新宁, 范军. 典型钢质海洋渔船目标强度及海面的影响[J]. 上海交通大学学报, 2013, **47**(10): 1515-1519.
WANG Xinning, FAN Jun. Computation of target strength of the steel fish vessels and the influence of water surface[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, **47**(10): 1515-1519.

[8] 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.

[9] PENG Z L, WANG B, FAN J. Simulation and experimental studies on acoustic scattering characteristics of surface targets[J]. Applied Acoustics, 2018, **137**: 140-147.

[10] 汤渭霖. 用物理声学方法计算界面附近目标的回波[J]. 声学学报, 1999, **24**(1): 1-5.
TANG Weilin. Calculation of acoustic scattering from object near an interface using physical acoustic method[J]. Acta Acustica, 1999, **24**(1): 1-5.

[11] 李建鲁, 范军, 汤渭霖. 水下简单形状目标回声的近远场过渡特性[J]. 上海交通大学学报, 2001, **35**(12): 1846-1850.
LI Jianlu, FAN Jun, TANG Weilin. Transition from near field to far field of echoes from simple shape targets in water[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2001, **35**(12): 1846-1850.