



中国舰船研究

Chinese Journal of Ship Research

ISSN 1673-3185, CN 42-1755/TJ

《中国舰船研究》网络首发论文

题目: “虎鲸”超大型无人潜航器目标强度特性研究
作者: 郝雅, 程玄, 李宇坤, 张帆晨, 范军, 龚志雄
DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04599
收稿日期: 2025-07-07
网络首发日期: 2025-08-27
引用格式: 郝雅, 程玄, 李宇坤, 张帆晨, 范军, 龚志雄. “虎鲸”超大型无人潜航器目标强度特性研究[J/OL]. 中国舰船研究.
<https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04599>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

引用格式：郝雅, 程玄, 李宇坤, 等. “虎鲸”超大型无人潜航器目标强度特性研究[J]. 中国舰船研究. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04599.

HAO Y, CHENG X, LI Y K, et al. Research on target strength characteristics of the Orca extra-large unmanned underwater vehicle[J]. Chinese Journal of Ship Research (in Chinese). DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04599.

“虎鲸”超大型无人潜航器目标强度特性研究



扫码阅读全文

郝雅¹, 程玄¹, 李宇坤², 张帆晨², 范军¹, 龚志雄^{*1}

1 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程全国重点实验室, 上海 200240

2 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430205

摘要: [目的] 为了解超大型无人潜航器的声目标强度特性, 以“虎鲸”(Orca)超大型无人潜航器为研究对象, 系统地分析 1~10 kHz 频段内的目标强度特性。[方法] 基于 Orca 模型, 分别采用有限元法计算 1~3 kHz 频段内、采用板块元法计算 3~10 kHz 频段内的目标强度, 并与 Benchmark 模型进行对比, 提出将角检测率作为更全面评价无人潜航器隐身性能的指标。同时, 在水箱环境开展缩比模型实验, 提出实验测量目标强度的修正方法。[结果] 初步掌握了 Orca 模型的目标强度特性, 对比 Benchmark 模型发现, Orca 模型在周向方向上具有更好的隐身性能, 高频段下在环向方向上也具有一定优势, 并且随着频率的升高, 其优势更加明显。针对水听器与换能器之间的距离不满足远场条件的情况, 通过对实验测量目标强度进行修正, 即可更加吻合仿真值, 验证了数值仿真结果的正确性。[结论] 研究成果可为水下探测系统优化及无人潜航器隐身设计提供理论依据。

关键词: 超大型无人潜航器(XLUUV); 目标强度; 有限元法; 板块元法; 水箱测量修正

中图分类号: U674.941

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04599

0 引言

无人潜航器(unmanned underwater vehicle, UUV)作为现代海洋装备体系的重要组成部分, 是一种具备自主航行能力、可长期潜伏水下并搭载多种任务载荷的智能化平台^[1]。UUV 按照尺寸大小可分为小型(直径 0.07~0.25 m)、中型(直径 0.25~0.53 m)、大型(直径 0.53~2.3 m)和超大型(直径大于 2.3 m)^[2], 其中超大型无人潜航器(extra-large unmanned underwater vehicle, XLUUV)因其高载荷能力(大于 5 t)、长续航时间(60 天以上)以及模块化的任务系统等优势, 在军事领域展现了接近传统潜艇的作战潜力, 已成为各海洋强国竞相发展的战略装备^[3]。美国在 XLUUV 技术领域长期保持着领先地位, 其发展历程可追溯至 20 世纪 80 年代, 经过数十年的积累, 目前已形成了包括“曼塔”(Manta)、“回声航行者”(Echo

Voyager)、“虎鲸”(Orca)等在内的完整装备体系^[4]。

“虎鲸”超大型无人潜航器(Orca XLUUV, 图 1)基于美国波音公司“回声航行者”改进而来, 于 2022 年 4 月命名并进行了首次水下测试, 代表了当前 XLUUV 的技术前沿。该平台宽 2.6 m, 长 15.5 m, 加装模块化载荷舱后的长度可拓展至 25.9 m, 其正常排水量为 45.36 t, 最大航速 8 kn, 最大工作深度 3 000 m, 最大航程可达 12 000 km; 系统架构包含控制、载荷、平台、动力、推进五个模块, 其性能指标明显优于同类装备^[1,4]。布雷是 Orca XLUUV 的首要任务, 并逐步扩展至反潜作战、水雷对抗、对陆打击等任务领域^[5]。

目前, 国内对于水下 UUV 的声目标强度特性研究大多集中于小型和中型, 鲜有大型和超大型的相关研究成果。刘博^[6]分析了微小型 UUV 的声散射特性, 并通过数值仿真与外场实验相结合的方法, 研究了入射频率、入射方向对其目标强

收稿日期: 2025-07-07 修回日期: 2025-07-23

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年科学基金资助项目(海外)(24Z990200542)

作者简介: 郝雅, 女, 2001 年生, 硕士生。研究方向: 复杂目标 TS 快速预报方法研究。E-mail: 13303036511@sjtu.edu.cn

龚志雄, 男, 1990 年生, 博士, 副教授。研究方向: 水中目标声特性、声场空间相位。

E-mail: zhixiong.gong@sjtu.edu.cn

*通信作者: 龚志雄

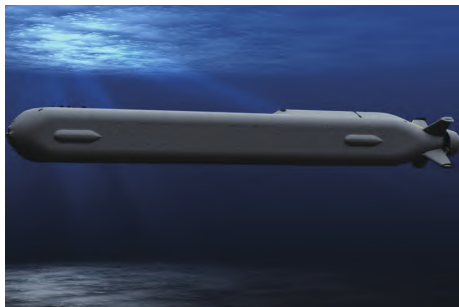
图1 “虎鲸”超大型无人潜航器^[7]

Fig. 1 Orca XLUV

度的影响规律。为了解超大型无人潜航器的声目标强度特性,本文拟以 Orca XLUV 作为研究对象,建立其包含外壳和附体的 1:1 还原模型,系统地分析 1~10 kHz 频段内的目标强度特性,以填补 XLUV 目标强度数据库的空白,从而为水下探测系统优化及 UUV 隐身设计提供理论依据。

不同于典型 UUV 的圆柱体外壳,Orca XLUV 的外壳是带有圆角的长方体,所以本文将对 Orca XLUV 与具有典型圆柱体外壳的 Benchmark。Benchmark 于 2002 年在目标强度数值仿真研讨会上提出,是基准目标强度仿真(benchmark target strength simulation, BeTSSi)标准潜艇模型的简称^[8],也是用于验证水下声学、流体动力学和控制系统仿真性能的标准化模型。本文将采用双基地声学简易集成结构(bistatic acoustic simple integrated structure, BASIS)方法中的 simple 模型,其具有典型的圆柱体外壳。Benchmark 艇体全长 62 m,直径 7.5 m,本文将其按一定比例缩小,即可得到与 Orca 模型横截面积相同的 Benchmark 模型,进而对比分析二者在目标强度特性方面的差异。

综上所述,本文的研究内容为:1)应用有限元法和板块元法,在 1~10 kHz 频段内对比 Orca 模型和 Benchmark 模型的刚性目标强度特性,主要关注正横、艏、艉方向以及周向、环向,以掌握 Orca XLUV 的目标强度特性,并将对去除附体之后的简化模型进行分析,从而进一步探究长方体外壳与典型圆柱体外壳的目标强度差异。2)基于角检测率的概念,绘制 Orca 模型和 Benchmark 模型的角检测率曲线,并对比分析二者在角检测率为 75% 和 50% 时的目标强度检测阈,从而更全面地评价 UUV 的隐身性能。3)在水箱中开展 Orca 简化模型在 5 kHz 环向工况下的缩比模型实验,并与目标强度仿真值进行对比,以验证数值仿真结果的正确性;同时,针对水听器与换能器之间的距离不满足远场条件的情况,提出实验测量目标强度的修正方法。

1 方法原理

1.1 目标强度解析公式

在水声领域,目标强度(target strength, TS)是反映目标声反射能力的物理量,与目标体积、入射方向、入射频率等因素有关,是评估 UUV 水下隐身性能的一个重要指标^[9]。目前有多种方法可以计算水下目标的目标强度,包括简正级数法^[10-11]、有限元/边界元法^[12-18]、板块元法^[19-21]、 T 矩阵法^[22-25]等。

本节将以刚性球为例,推导其目标强度的简正级数解(理论解)^[26]。首先,在球坐标系 (r, θ, φ) 中 (r, θ, φ) 分别为球坐标系中的半径、极角、方位角),将入射平面波 ϕ_i 按照球面波进行分解:

$$\phi_i(r, \theta) = e^{ikr \cos \theta} = \sum_{n=0}^{\infty} i^n (2n+1) j_n(kr) P_n(\cos \theta) \quad (1)$$

式中: i 为虚数; k 为波数; $j_n(\cdot)$ 为 n 阶球 Bessel 函数,其中 $n=0, 1, \dots, \infty$; $P_n(\cdot)$ 为 n 阶 Legendre 函数。

在球坐标系 (r, θ, φ) 中,散射波 ϕ_s 可以表示为

$$\phi_s(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} i^n (2n+1) b_n h_n^{(1)}(kr) P_n(\cos \theta) \quad (2)$$

式中: b_n 为刚性球的散射系数; $h_n^{(1)}(\cdot)$ 为 n 阶第一类球 Hankel 函数。

其中

$$b_n(x) = -\frac{j'_n(x)}{h_n^{(1)'}(x)} \quad (3)$$

式中: $x=ka$, 为无量纲频率,其中 a 为特征尺度(即球的半径); $j'_n(x)$ 为 n 阶球 Bessel 函数的导数; $h_n^{(1)'}(x)$ 为 n 阶第一类球 Hankel 函数的导数。

将式(3)代入式(2),则刚性球的散射场为

$$\phi_s(r, \theta) = -\sum_{n=0}^{\infty} i^n (2n+1) \frac{j'_n(x)}{h_n^{(1)'}(x)} h_n^{(1)}(kr) P_n(\cos \theta) \quad (4)$$

定义形态函数 $f(x, \theta)$ 为

$$f(x, \theta) = \frac{2r}{a} \frac{\phi_s(x, \theta)}{\phi_i(x)} e^{-ikr} \quad (5)$$

则平面波从刚性球散射的形态函数为

$$|f(x, \theta)| = \frac{2}{x} \left| \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \frac{j'_n(x)}{h_n^{(1)'}(x)} P_n(\cos \theta) \right| \quad (6)$$

目标强度 TS 的计算公式为

$$TS = 10 \lg \left| \frac{a}{2} f(x, \pi) \right|^2 = 10 \lg \left| \frac{a}{x} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) \frac{j'_n(x)}{h_n^{(1)'}(x)} (-1)^n \right|^2 \quad (7)$$

在测定目标强度的水声实验中,目标强度的定义为距离目标等效声中心 1 m 处,由目标反射回来的声压与远处声源入射至目标上的声压之比的分贝 (dB) 数^[26]:

$$TS = 20 \lg \frac{P_s|_{r=1}}{P_i} \quad (8)$$

式中: P_i 为入射至目标上的声压,即设想目标不存在时该处的声压; $P_s|_{r=1}$ 为距离目标 1 m 处的回波声压。实验中平面波换能器发射出的是球面波,在远场中其传播服从球面扩展规律,且局部可近似为平面波,由于实验无法直接测量 P_i 和 $P_s|_{r=1}$,所以需要将水听器处测得的声压按照球面扩展规律进行折算,将水听器处测得的入射声压折算至目标处以得到 P_i ,将水听器处测得的回波声压折算到距离目标 1 m 处以得到 $P_s|_{r=1}$ 。需要注意的是,1 m 只是一个参考距离,并非实际测量距离,在缩比模型实验中,如果模型缩小为原型的 1/N,则其距离单位应取 (1/N) m,这样测得的目标强度值才等于原型按 1 m 距离定义的目标强度。

1.2 有限元法

在水下目标强度的数值计算中,有限元法^[12-18] (finite element method, FEM) 因其在模拟复杂声学问题方面的优势而备受青睐。有限元法可以有效模拟声波与目标的相互作用,包括声波的反射、散射和透射,通过构建 UUV 的几何模型并划分网格,即可精确计算 UUV 模型的散射声场和目标强度。有限元法具有广泛的适用性,可以不受目标几何形状的限制而处理任意复杂外形的 UUV 模型,并且适用于多种材料属性的声学计算,理论上可在全频段范围内进行目标强度的计算。然而,为保证计算结果的精度,在划分网格时一般应满足最大单元不超过入射波长的 1/5;随着频率的升高,模型的网格数量将呈指数级增长,导致其对计算资源的需求急剧增加,受限当前计算机硬件的性能,有限元法在高频段的应用面临着显著挑战,故需结合高频近似方法进行研究。

在工程实践中,常用的有限元分析软件包括 COMSOL Multiphysics, ANSYS 和 Virtual.Lab 等,本文将选用 COMSOL Multiphysics 作为计算平台,其完整的声学模块和灵活的多物理场耦合能力适用于水下目标强度的模拟。在 COMSOL 中计算模型目标强度的基本步骤如下: 1) 预置设置并选择声学物理场; 2) 设置全局参数和材料属性; 3) 构建几何模型; 4) 定义声学区域、边界条件和背景

压力场; 5) 设置完美匹配层 (perfectly matched layer, PML) 以消除边界反射; 6) 划分模型、水域和完美匹配层的网格; 7) 执行频域声学求解; 8) 提取目标强度数据并进行可视化展示。需要特别说明的是,本文的所有计算均在刚性边界条件假设下开展,所以无需在物理场中定义目标的材料属性。这一简化处理既保证了计算效率,又与水下目标强度的常规测试条件保持一致,从而确保了计算结果的工程适用性。

1.3 板块元法

板块元法^[19-21] (planar element method, PEM) 主要基于 Kirchhoff 近似原理^[26], 是计算高频段目标强度的常用方法。Kirchhoff 近似将散射表面划分为亮区和影区,并假设仅有亮区对散射声场产生贡献,且亮区的声反射遵循局部平面波的反射规律。该方法通过将目标表面离散化为若干面元,将散射声场的计算转化为亮区表面的面积分,从而避免了直接求解复杂的 Kirchhoff-Helmholtz 积分方程,显著降低了计算复杂度。Kirchhoff 近似作为一种高频近似方法,理论上适用于任意复杂几何构型的目标强度计算,但其精度主要依赖于目标表面的离散化程度。虽然增加面元数量可以提高计算精度,但同时将大幅增加数值积分的工作量,为了兼顾计算精度和效率,范军等^[27] 在 Kirchhoff 近似的基础上提出了板块元法,该方法采用一组平面板块元逼近目标曲面,并通过坐标变换将三维积分问题转化为局部坐标系下的二维代数运算,从而大幅提升了计算效率。虽然板块元法不受限于 UUV 模型的外形,但仅适用于高频段刚性边界条件下的目标强度计算,其原则上要求 $ka > 2\pi$ 。

鉴于本文主要关注 UUV 的刚性目标强度,且在高频段满足 $ka > 2\pi$, 因此可以采用板块元法进行计算,具体流程如下: 1) 利用 COMSOL 进行建模,并生成边界单元网格; 2) 导出 .mptxt 格式的网格文件,从中获取各节点的三维坐标及面元拓扑关系; 3) 将网格数据导入 Matlab,基于板块元法计算程序进行后处理,并叠加所有板块元的散射声场,最终得到目标强度的板块元结果。

2 方法验证

2.1 刚性球壳

虽然有限元法可以较为精准地计算模型的目标强度,但随着频率的升高,模型划分所得的网格数量将大幅增加,计算时间、计算成本也将随

之大幅增涨,因此,宜采用板块元法来快速计算模型在高频段的目标强度。基于 Kirchhoff 近似,板块元法在原则上要求 $ka>2\pi$,但低频声波易激发模型的弹性振动,而板块元法通常假设目标为刚性体,忽略声固耦合效应,所以将导致散射场计算产生偏差。为进一步明确有限元法和板块元法的适用范围,本节建立了半径为 1 m 的刚性球壳,分别应用简正级数法(理论解)、有限元法和板块元法计算 0~10 kHz 频段内(对应 ka 为 0~40,其中 a 为球壳的特征尺度 1 m)的目标强度,得到的结果如图 2 所示。

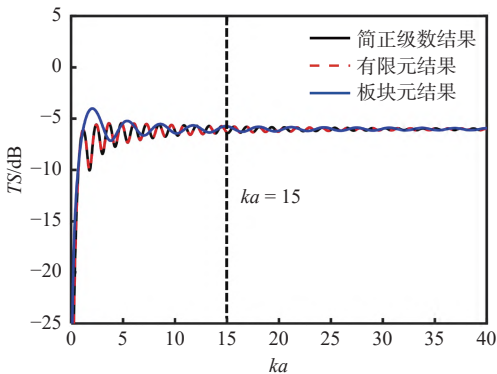


图 2 刚性球壳的目标强度计算方法对比
Fig. 2 Comparison of TS calculation methods for rigid spherical shells

经观察发现: 1)有限元法的计算结果与理论解在全频段内基本重合,这说明有限元法具有较高的计算精度; 2)板块元法的计算结果在低频段内与理论解的偏差较大,但随着频率的升高,其

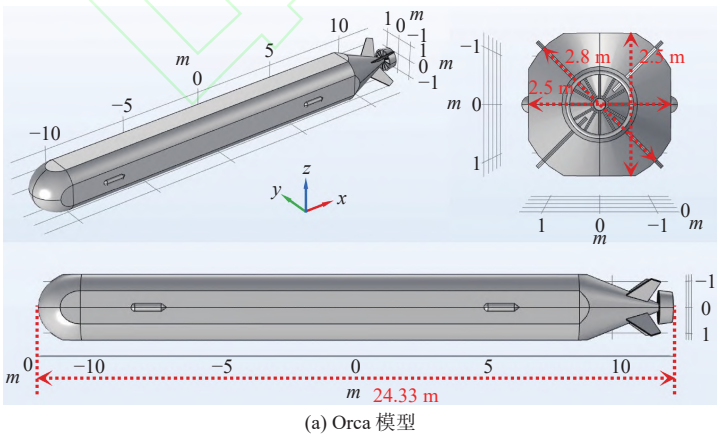
与理论解的差值逐渐减小,在 $ka>15$ 的高频段内,板块元结果与理论解具有较好的一致性。

2.2 Orca 简化模型

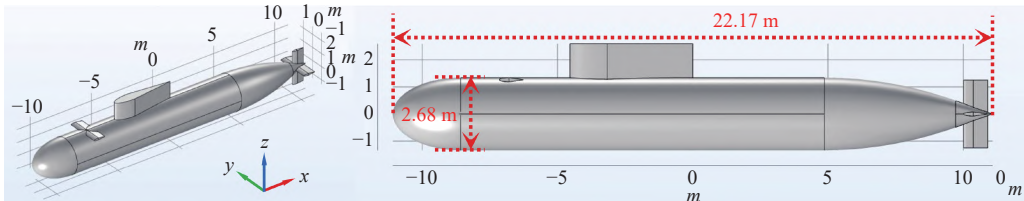
本节根据美军 Orca XLUUV 图片^[7]在 COMSOL 中建立了 Orca 模型,其船艏线型、舵翼、推进器的尺寸为等比例估算值,虽然模型尺寸与 Orca 的实际尺寸存在一定偏差,但不会影响目标强度的主要分布规律,整体建模过程较为简单且较大程度上还原了实物,如图 3 所示。Orca 模型的艏部为半椭球体,外壳为带有圆角的长方体,艏部为圆锥台,舵舵翼为 X 型,并搭配了更安静高效的泵喷推进器。为控制 Benchmark 模型与 Orca 模型的横截面积基本相同,本节将原 Benchmark 按照 1/2.8 的比例因子进行缩小,此时 Orca 模型和 Benchmark 模型的横截面积均约为 5.65 m²。

为进一步验证板块元法在高频段的准确性,将针对去除附体的 Orca 简化模型展开计算。在 3 kHz 时,Orca 简化模型的 ka 值就达到了 15.7(此时 a 为 Orca 简化模型的特征尺度 1.25 m),根据 2.1 节刚性球壳计算方法对比的结论, $ka>15$ 时板块元结果即可很好地近似理论解。为此,本节将分别应用有限元法和板块元法计算 Orca 简化模型在 3 kHz 时的目标强度值,计算方向为周向和环向。

计算坐标如图 4(a) 所示,三维空间 $Oxyz$ 中存在入射点 $(r_i, \theta_i, \varphi_i)$ 和接收点 $(r_s, \theta_s, \varphi_s)$, 本文的目标强度计算都是收发合置的情况,此时入射点和接



(a) Orca 模型

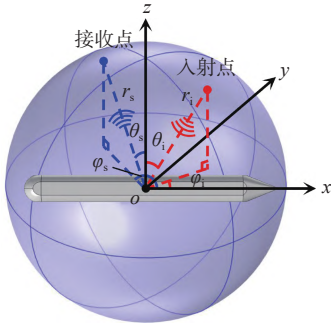


(b) Benchmark 模型

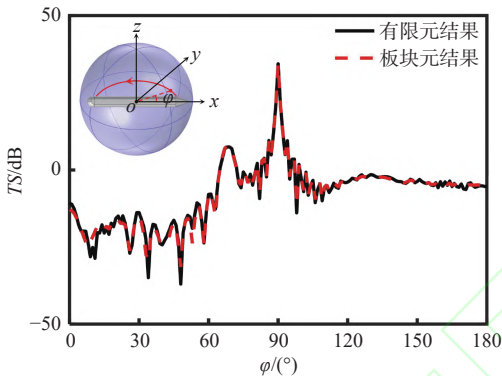
图 3 COMSOL 中建立的模型

Fig. 3 Model built in COMSOL

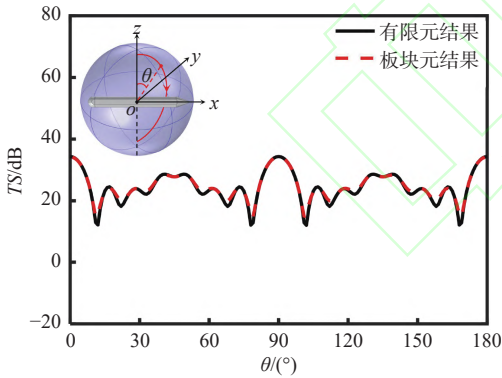
收点重合,即 $r_i=r_s=r$, $\theta_i=\theta_s=\theta$, $\varphi_i=\varphi_s=\varphi$ 。当计算方向为周向时, $\angle\theta$ 固定为 90° , 三维空间退化为 xOy 平面, $\angle\varphi$ 的变化范围为 $0^\circ\sim 180^\circ$; 当计算方向为环向时, $\angle\varphi$ 固定为 90° , 三维空间退化为 yOz 平面, $\angle\theta$ 的变化范围为 $0^\circ\sim 180^\circ$ 。



(a) 计算坐标示意图



(b) 周向方向对比



(c) 环向方向对比

图4 Orca简化模型的目标强度计算方法对比

Fig. 4 Comparison of TS calculation methods for simplified Orca model

计算结果如图4(b)和图4(c)所示,可见有限元结果与板块元结果的吻合较好,周向和环向的平均误差不超过0.4 dB,这说明在3 kHz及以上频率应用板块元法进行计算时,可以保证计算结果的精度。同时,板块元法还能大幅提高计算效率,在COMSOL中进行有限元计算时的计算机处理器为Intel(R) Core(TM) i9-14900K, 3.20 GHz, 机带RAM为128 GB, Orca简化模型在3 kHz环向工况下的计算时长为28 min 53 s,而应用板块元

法计算仅需0.4 ms。因此,本文将选取有限元法计算Orca模型在1~3 kHz频段内的目标强度,选取板块元法计算Orca模型在3~10 kHz频段内的目标强度,从而既可以保证计算结果的精度,又能有效地节约时间和算力。

3 仿真计算

3.1 原模型计算

选取1, 5, 10 kHz的工况进行分析,分别绘制Orca模型和Benchmark模型在周向、环向上的目标强度对比图和角检测率图。角检测率 $P(E)$ 的定义为对于目标强度的某个阈值 E ,模型所有能够被检测到(即 $TS \geq E$)的角度的和与总探测角度之比^[26]。角检测率曲线从空间统计意义上反映了目标强度及其方位特性对模型隐身性能的影响,相同角检测率时目标强度检测阈大的模型容易暴露,因此可以将其作为评价UUV隐身性能的依据。设定75%和50%作为评价UUV的2个典型角检测率,通过对角检测率为75%和50%时的目标强度检测阈进行对比,即可判断UUV隐身性能的优劣。

观察周向可以发现(xOy 平面内,图5): Orca模型在艏部方向的目标强度与Benchmark模型相差较小;艉部方向的目标强度在1 kHz时大于Benchmark模型,在5, 10 kHz时均小于Benchmark模型。当 $P(E)$ 固定为75%和50%时(黑色虚线), Orca模型的目标强度检测阈在1 kHz时大于或略小于Benchmark模型,在5, 10 kHz时均小于Benchmark模型。由此可见, Orca模型在周向方向上具有更好的隐身性能,并且随着频率的升高,其优势更加明显。由图5可知,在当 $P(E)$ 固定为50%时,随着频率的升高,二者目标强度检测阈的差值分别为0.92, 4.71, 8.12 dB。

观察环向可以发现(yOz 平面内,图6): 相较于Benchmark模型, Orca模型的目标强度随角度的起伏更大,且Orca模型在正横方向的目标强度大于Benchmark模型,随着频率的升高,二者的差值更为明显。当 $P(E)$ 固定为75%和50%时, Orca模型的目标强度检测阈在1 kHz时大于Benchmark模型,而在5, 10 kHz时均小于Benchmark模型。由此可见,虽然Orca模型在正横方向的目标强度更大,但整体而言,高频段下在环向方向上具有更好的隐身性能,并且随着频率的升高,其优势更加明显。由图6可知,在当 $P(E)$ 固定为75%时,随着频率的升高,二者目标强度检测阈

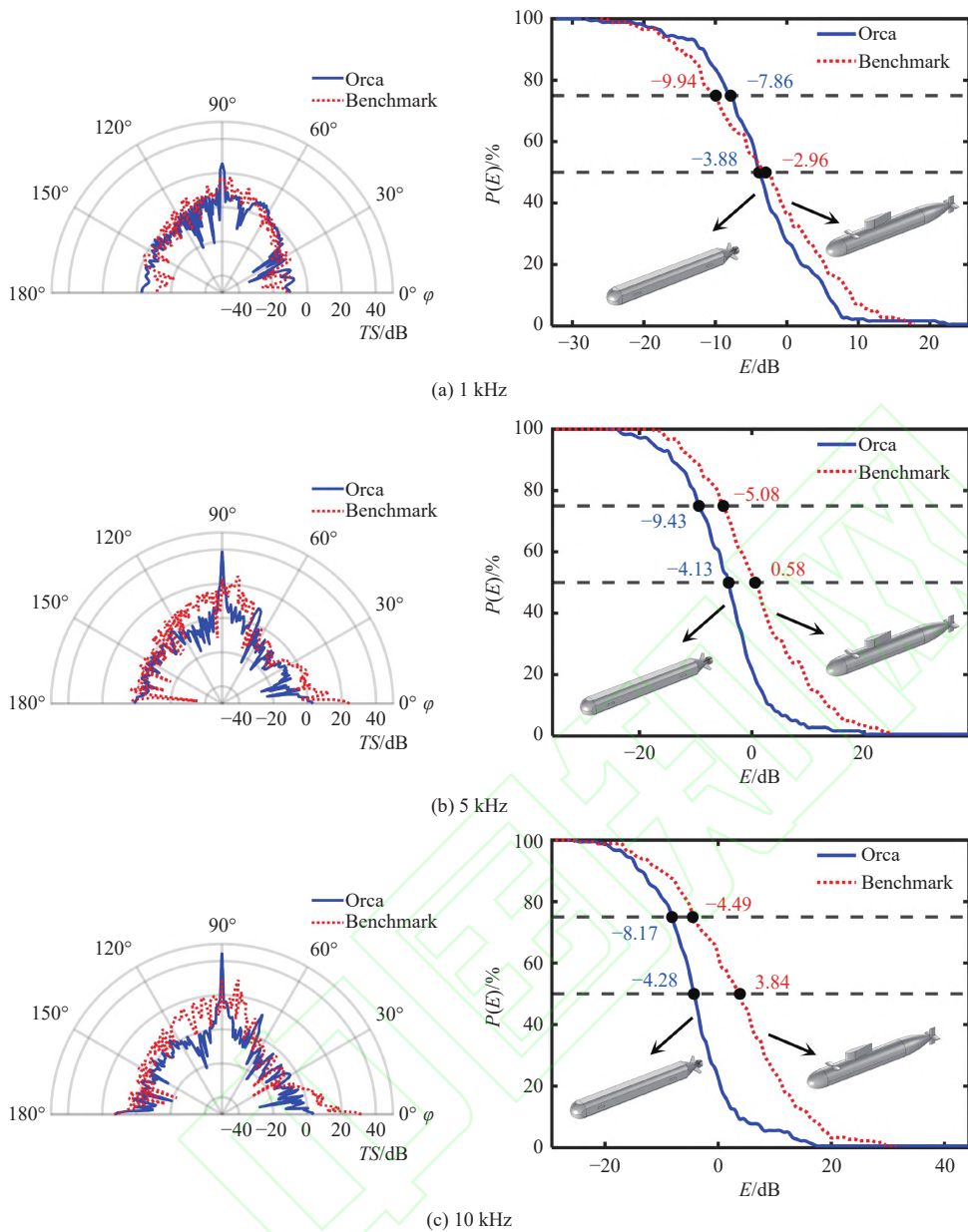


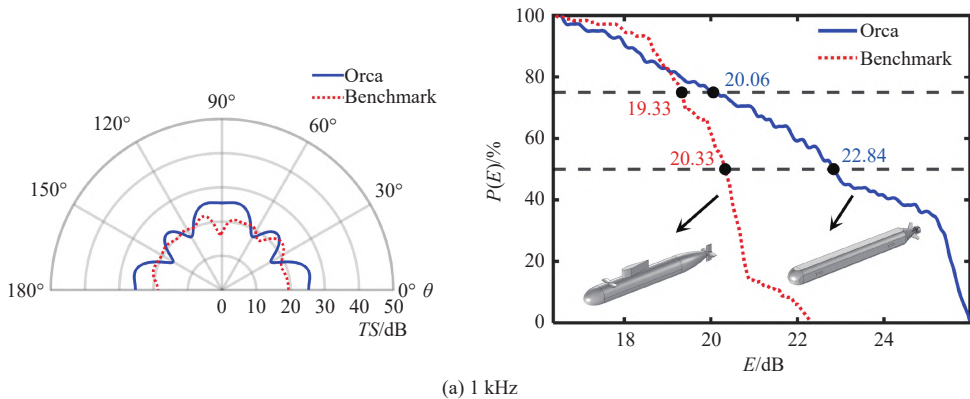
图 5 周向的目标强度对比图和角检测率图

Fig. 5 TS comparison chart and angular detection probability chart in the azimuthal direction

的差值分别为-0.73, 3.63, 5.17 dB。

综上所述,相较于 Benchmark 模型,Orca 模型在正横方向的目标强度更大;根据角检测率的分析结果,Orca 模型在周向方向上具有更好的隐身性能,且高频段下在环向方向上也具有更好的隐

身性能,并且随着频率升高,其优势更加明显,当频率为 10 kHz 时,Orca 模型在周向和环向方向典型角检测率下的目标强度检测阈分别降低了 8.12 dB(周向 50%), 5.17 dB(环向 75%)。



(a) 1 kHz

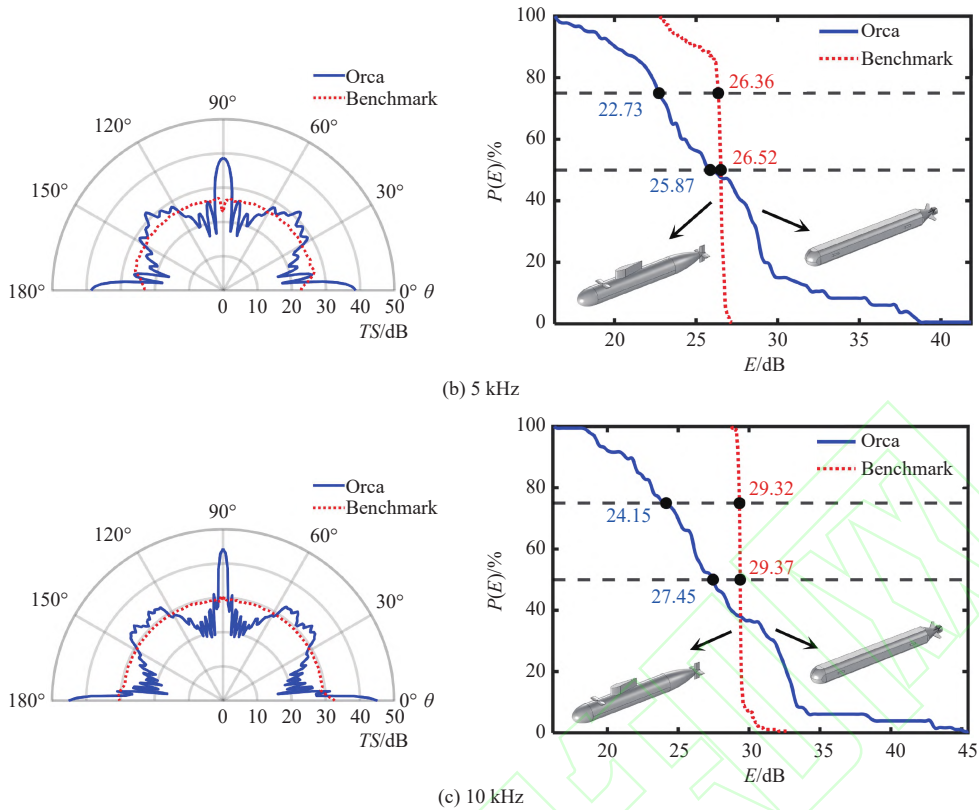


图 6 环向的目标强度对比图和角检测率图

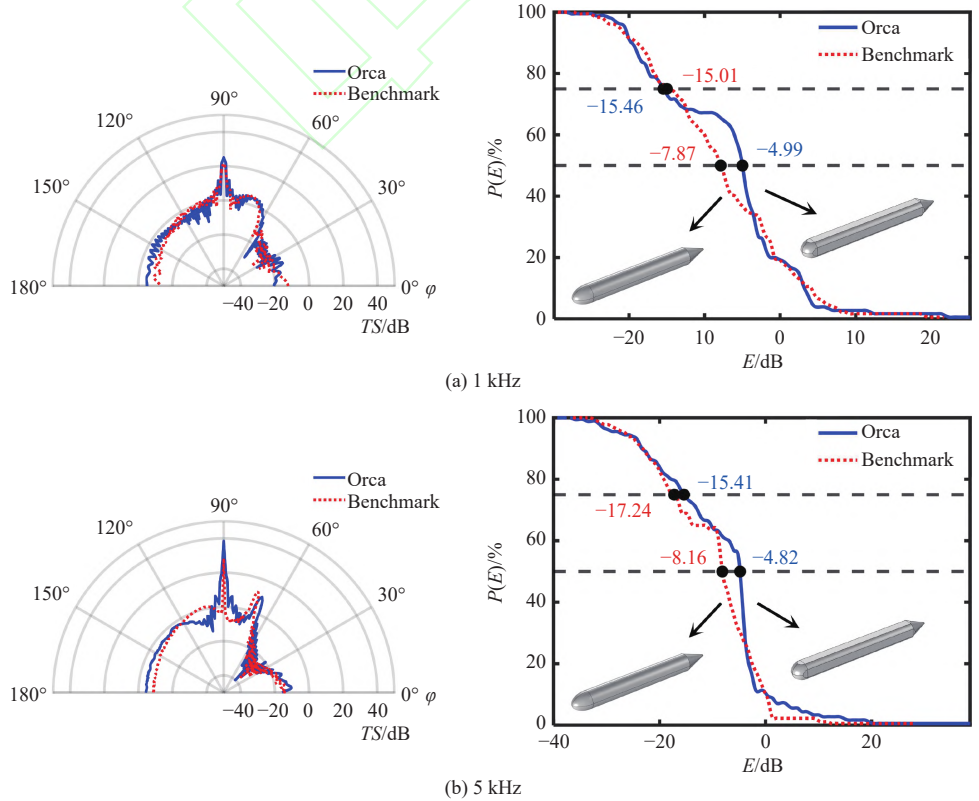
Fig. 6 TS comparison chart and angular detection probability chart in the circumferential direction

3.2 简化模型计算

为进一步探究 Orca 长方体外壳与 Benchmark 典型圆柱体外壳的目标强度差异,现将围壳、舵翼、推进器等附体结构去除,从而提取模型的主

体部分作为 Orca 简化模型和 Benchmark 简化模型,进一步开展计算分析。

观察周向可知(xOy 平面内,图 7): Orca 简化模型在艏、艉方向的目标强度与 Benchmark 简化模型相差较小;同时二者的角检测率曲线也大致



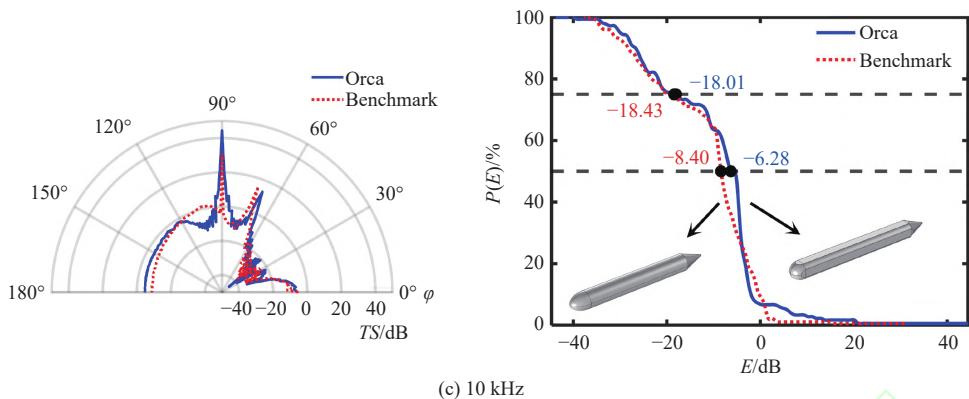


图 7 简化模型周向方向的目标强度对比图和角检测率图

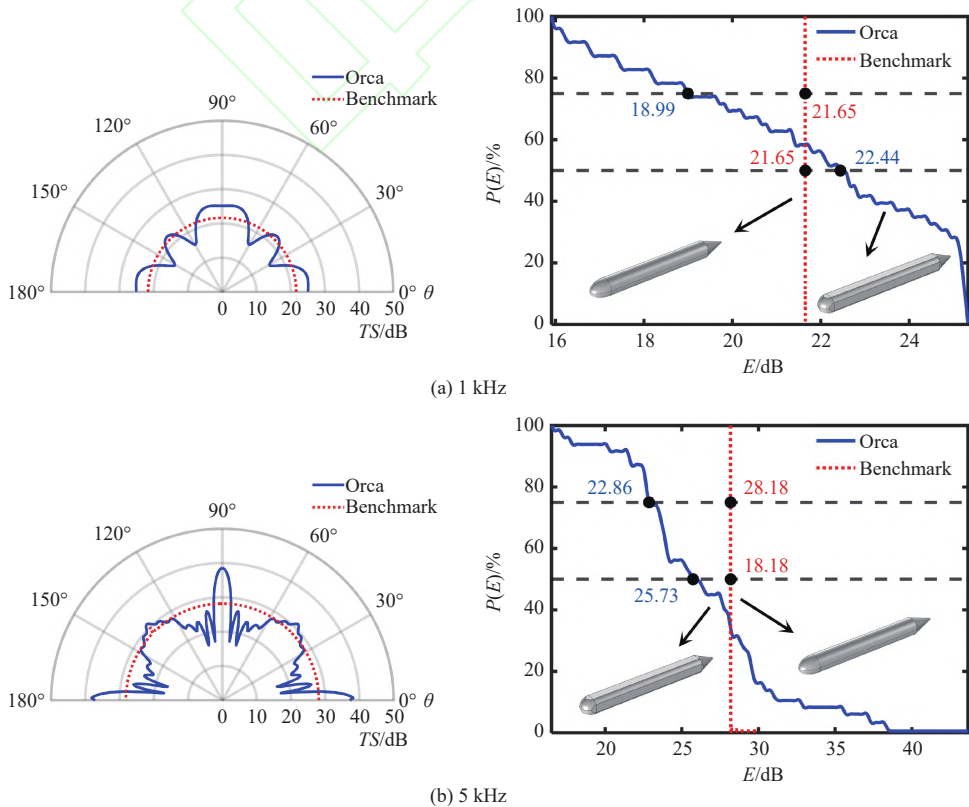
Fig. 7 TS comparison chart and angular detection probability chart of the simplified model in the azimuthal direction

重合,当 $P(E)$ 固定为75%时,二者的目标强度检测阈基本相同;当 $P(E)$ 固定为50%时,Orca简化模型的目标强度检测阈大于Benchmark简化模型,但随着频率的升高,二者的差值逐渐减小。由此可见,Orca长方体外壳与Benchmark圆柱体外壳在周向方向上的隐身性能区别较小。

观察环向可知(yOz 平面内,图8):相较于Benchmark简化模型,Orca简化模型的目标强度随角度的起伏更大,且Orca简化模型在正横方向的目标强度大于Benchmark简化模型,随着频率的升高,二者的差值更加明显。当 $P(E)$ 固定为75%时,Orca简化模型的目标强度检测阈小于Benchmark简化模型;当 $P(E)$ 固定为50%时,Orca简化模型的目标强度检测阈在1 kHz时大

于Benchmark简化模型,而在5, 10 kHz时均小于Benchmark简化模型。由此可见,虽然Orca长方体外壳比Benchmark圆柱体外壳在正横方向的目标强度更大,但整体而言,环向方向上具有更好的隐身性能,并且随着频率的升高,其优势更加明显。由图8可知,当 $P(E)$ 固定为75%时,二者的差值随频率升高分别为2.66, 5.32, 7.27 dB;当 $P(E)$ 固定为50%时,二者的差值随频率升高分别为-0.79, 2.45, 3.37 dB。

通过对比3.1节原模型与本节简化模型的计算结果,可以进一步探究模型附体对其目标强度的影响。分别计算各工况下 $P(E)$ 为75%和50%时目标强度检测阈的平均差值,其中差值即原模型减去简化模型,结果如表1所示,可以发现,Orca



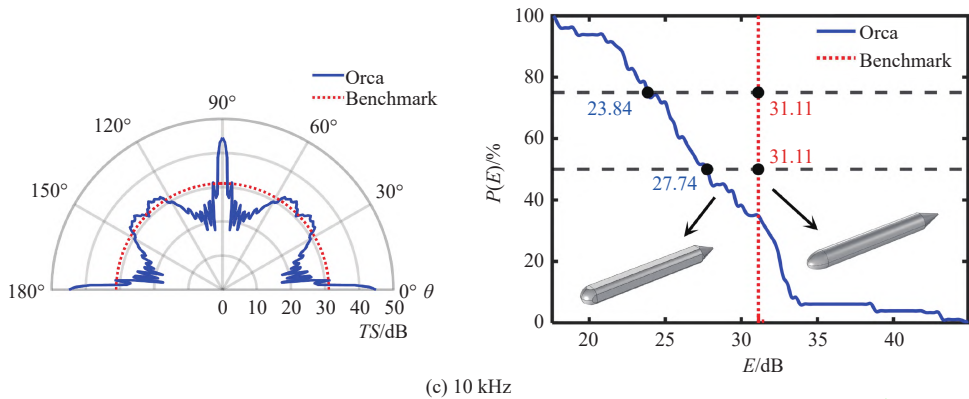


图 8 简化模型环向方向的目标强度对比图和角检测率图

Fig. 8 TS comparison chart and angular detection probability chart of the simplified model in the circumferential direction

模型和 Benchmark 模型的附体对周向方向上的目标强度贡献较大,并随着频率的升高而贡献增加。其中 Benchmark 模型附体的贡献更大,在 10 kHz 时附体可使其目标强度检测阈增大 13.09 dB,而 Orca 模型此时仅为 5.92 dB,这与前文中得到的结论一致(“去除附体的 Orca 长方体外壳与 Benchmark 圆柱体外壳在周向方向上的隐身性能区别较小,但增加附体后的 Orca 模型在周向方向上具有更好的隐身性能,并且随着频率的升高,其优势更加明显”)。Orca 模型的附体对环向方向上的目标强度几乎没有贡献,因为本文计算环向工况时,入射方向在 xOy 平面内(图 4),该方向上 Orca 模型不存在附体;而 Benchmark 模型的附体略微减小了环向的目标强度,减小值在 2 dB 以内。

表 1 原模型与简化模型的目标强度检测阈对比

Table 1 Comparison of TS detection thresholds between the original model and the simplified model

频率/kHz	TS检测阈平均差值/dB			
	Orca周向	Orca环向	Benchmark周向	Benchmark环向
1	4.36	0.74	4.99	-1.82
5	3.34	0.01	10.45	-1.74
10	5.92	0.01	13.09	-1.77

经综合对比,Orca 长方体外壳在正横方向的目标强度更大,通过分析角检测率可知,Orca 长方体外壳与 Benchmark 圆柱体外壳在周向方向上的隐身性能区别较小,但在环向方向上长方体外壳具有更好的隐身性能,并且随着频率的升高,其优势更加明显;当频率为 10 kHz 时,Orca 简化模型在环向方向典型角检测率下的目标强度检测阈降低了 7.27 dB(环向 75%)。除此之外,Orca 模型和 Benchmark 模型的附体对周向方向上的目标强度贡献较大,并且随着频率的升高而贡献增加,其中 Benchmark 模型附体的影响更大,在 10 kHz

时附体对其目标强度的贡献达到了 13.09 dB,而附体对环向方向上目标强度的贡献则微乎其微。

4 实验验证

本节将针对 Orca 简化模型 5 kHz 的环向工况进行缩比模型实验,以验证上文的数值仿真结果,该实验将遵守标准《舰船缩比模型回声特性测试方法》。实验在长 1 m×宽 0.6 m×高 0.6 m 的水箱中开展,其中 Orca 简化模型长度约为 20 m,按照缩尺比 1/200(1/N)缩小后得到长度约为 10 cm 的 Orca 简化缩比模型。缩比模型采用 316 不锈钢材料 3D 打印制作,内部进行了掏空处理,测试频率为 1 MHz,使原模型和缩比模型的 ka 保持不变。实验设备布放如图 9 所示。

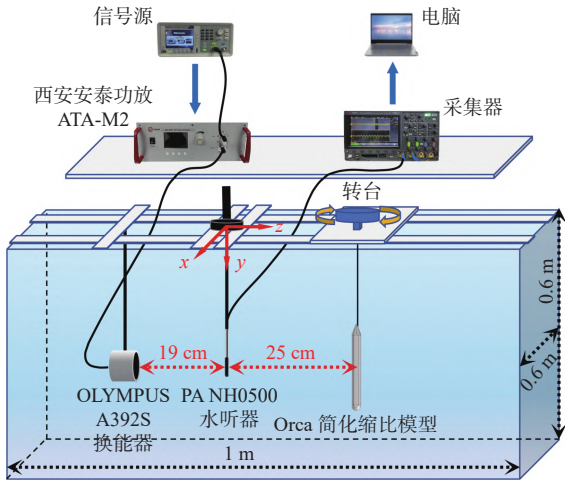


图 9 实验设备布放图

Fig. 9 Layout diagram of experimental equipment

在环向缩比模型实验中,采用不锈钢杆固定换能器;水听器则采用碳纤维杆固定在三自由度步进电机上,使水听器能够在 x, y, z 方向自由移动,并设置单次移动步长和移动点数;缩比模型采用渔线竖直吊放在转台上,可以设置转台转速。实验开始之前,首先将换能器固定至适当位

置,并使水听器分别在 x 和 y 方向进行线扫,从而确定声压最大值的位置,并移动水听器到该位置,调整缩比模型的高度,使其与换能器、水听器位于同一水平线上,最终测得换能器至水听器的距离为 19 cm,缩比模型至水听器的距离为 25 cm。

然后,将水听器移动步长设置为 0,此时水听器不再移动,使缩比模型以 0.1 rad/min 的速度开始旋转,选择线扫模式开始正式采集,等待缩比模型旋转了 2 圈以上后终止采集,即得到实验数据。绘制距离角谱图,其中横坐标 ω 为旋转角度,纵坐标 z 为水听器与换能器之间的距离,从图中可以清晰看到直达波和目标回波的位置,根据角度即可截取出模型旋转 1 圈的实验数据,如图 10(a) 所示。

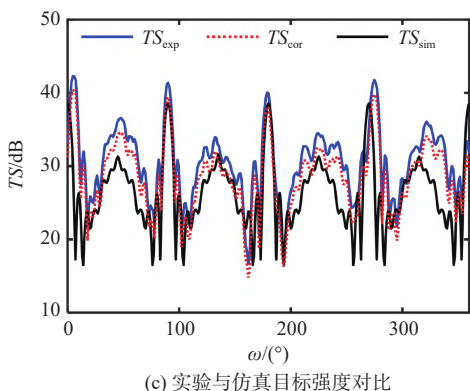
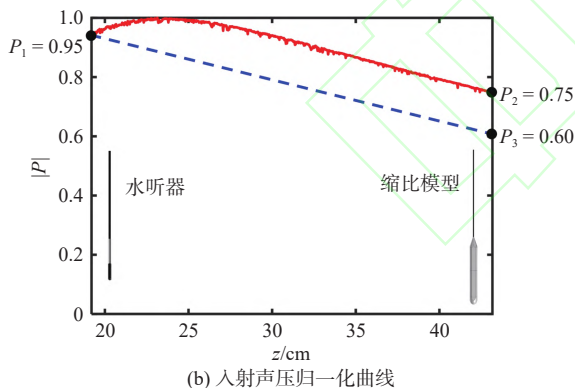
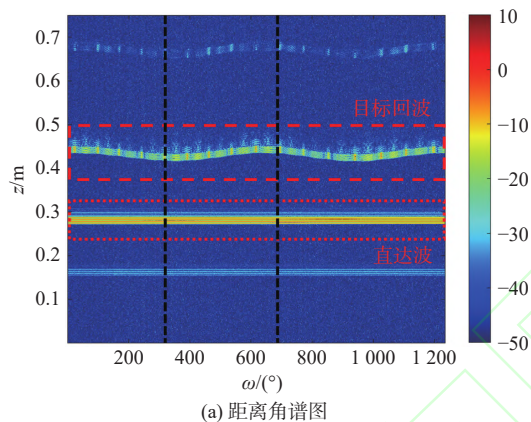


图 10 实验结果

Fig. 10 Experimental results

受水箱尺寸的限制,实验时水听器与换能器

之间的距离不满足远场条件 ($z > a^2/\lambda = 26.67$ cm, a 为换能器的特征尺度 2 cm, λ 为入射波波长 1.5 mm),此时将水听器处测得的入射声压折算至模型处,即与缩比模型处的实际入射声压产生差值,因此需对实验测量目标强度进行修正。设置水听器移动步长为 0.3 mm,使其沿 z 轴进行线扫,即可得到从水听器至缩比模型的入射声压归一化曲线,如图 10(b) 所示,其中纵坐标 z 为水听器与换能器之间的距离。由此可知,水听器处的入射声压 $P_1=0.95$,缩比模型处的实际入射声压 $P_2=0.75$,将实验数据(红色实线)进行拟合,水听器处的入射声压可以按照实验规律折算至缩比模型处(蓝色虚线),从而得到折算后的缩比模型处入射声压 $P_3=0.60$ 。实验测量缩比模型目标强度 TS_{exp} 的计算公式为^[26]

$$TS_{\text{exp}} = 20 \lg \left(\frac{P_s|_{r=1}}{P_3} \right) + 20 \lg N \quad (9)$$

式中: $P_s|_{r=1}$ 为距离目标 1 m 处的回波声压; N 为缩比模型的缩小倍数,即 200。

修正后的缩比模型目标强度 TS_{cor} 计算公式为

$$TS_{\text{cor}} = 20 \lg \left(\frac{P_s|_{r=1}}{P_2} \right) + 20 \lg N \quad (10)$$

$$TS_{\text{cor}} - TS_{\text{exp}} = 20 \lg \left(\frac{P_3}{P_2} \right) = 20 \lg \left(\frac{0.60}{0.75} \right) = -1.94 \text{ dB} \quad (11)$$

因此,需要对实验测量缩比模型目标强度 TS_{exp} 进行 -1.94 dB 的修正,从而得到修正后的目标强度 TS_{cor} ,再与目标强度仿真值 TS_{sim} 进行对比,如图 10(c) 所示。

由图 10 可知,修正后的目标强度 TS_{cor} 与仿真值 TS_{sim} 的变化趋势吻合较好,最大值处的 TS_{cor} 比 TS_{sim} 高 1.78 dB,最小值处则低 1.70 dB,均在误差允许的范围。内。 TS_{cor} 在角度方向与 TS_{sim} 存在一定错位,可能是由于水阻力的影响,转台的旋转与模型的旋转也存在一定偏差。总体而言,Orca 简化缩比模型实验测量的目标强度与仿真值一致,可以验证上文的数值仿真结果。

5 结 论

本文以 Orca XLUV 为研究对象,系统分析了 1~10 kHz 频段内的声目标强度特性,得到如下结论:

1) 根据 Orca 模型和 Benchmark 模型的对比结果,在 1~10 kHz 频段内,Orca 模型在正横方向的目标强度更大;通过分析去除附体的简化模型可

知, Orca 长方体外壳在正横方向的目标强度更大, 二者在艏、艉方向的差别较小。

2) 角检测率可以作为更全面评价 UUV 隐身性能的指标, 通过对比模型在角检测率为 75% 和 50% 时的目标强度检测阈, 发现 Orca 模型在周向方向上具有更好的隐身性能, 高频段下在环向方向上也具有一定优势, 并且随着频率的升高, 其优势更加明显; 然而, 去除附体后的 Orca 长方体外壳在周向方向上的隐身性能并无明显优势, 仅在环向方向上具有较好的隐身性能, 这说明附体主要影响了周向方向上的目标强度。

3) 在 Orca 简化模型 5 kHz 环向工况下的水箱缩比模型实验中, 针对水听器与换能器之间的距离不满足远场条件的情况, 提出了实验测量目标强度的修正方法, 对比发现修正后的目标强度与仿真值更加吻合, 验证了本文数值仿真结果的正确性。

本文在研究 Orca XLUUV 的目标强度特性时, 采用了刚性边界条件假设, 没有考虑 UUV 外壳材料以及消声瓦对目标强度的影响, 该简化处理方式虽然可以有效降低计算复杂度, 但会导致结果与实际情况存在偏差。此外, 本文主要关注了模型在正横、艏、艉方向以及周向、环向的目标强度特性, 没有考虑随机入射情况, 上述问题将在后续工作中进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 刘彦伯, 刘志浩. 大型无人潜航器研究现状及作战应用分析 [J]. 舰船电子工程, 2022, 42(11): 1-3, 7.
- [2] 宋保维, 潘光, 张立川, 等. 自主水下航行器发展趋势及关键技术 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(5): 27-44.
- [3] 叶效伟, 刘一夫, 郁文浩, 等. 国外超大型无人潜水器发展动态研究 [J]. 船舶物资与市场, 2023, 31(5): 1-4. doi: 10.19727/j.cnki.cbwzysc.2023.05.001.
- [4] 张翔鸾, 花吉. 国外超大型无人潜航器发展与运用研究 [J]. 中国舰船研究, 2024, 19(5): 17-27.
- [5] 李经. 水下无人作战系统装备现状及发展趋势 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39(1): 1-5, 36.
- [6] 刘博. 微小型无人潜航器典型结构声散射特性研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020. doi: 10.27307/d.cnki.gsjsu.2020.002589.
- [7] Global Defence Technology. Orca XLUUV: Boeing's whale of an unmanned sub[EB/OL].[2025-07-07]. https://defence.nridigital.com/global_defence_technology_jun19/orca_xluuv_boeing_s_whale_of_an_unmanned_sub.
- [8] NELL C W, GILROY L E. An improved BASIS model for the BeTSSi submarine: DRDC-ATLANTIC-TR-2003-199[R]. Dartmouth, Canada: Defence R&D Canada-Atlantic, 2003.
- [9] 兰同宇, 刘本奇, 刘亮. 反 UUV 探测声呐系统发展综述 [J]. 水下无人系统学报, 2022, 30(6): 704-713.
- [10] 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [11] BOWMAN J J, SENIOR T B A, USLENGHI P L E. Electromagnetic and acoustic scattering by simple shapes (revised edition)[M]. New York: Hemisphere Publishing Corp, 1987: 747.
- [12] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [13] 商德江, 何祚镛. 加肋双层圆柱壳振动声辐射数值计算分析 [J]. 声学学报, 2001, 26(3): 193-201.
- [14] 郭新毅, 马力, 吴国清. 水下加筋圆柱壳结构声散射特性研究 [J]. 海洋技术, 2007, 26(3): 36-41.
- [15] ZHANG X Y, HUA J. Study on the development and application of foreign extra-large unmanned underwater vehicles[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(5): 17-27 (in Chinese).
- [16] LI J. Existence and development trend of navy autonomous underwater combat system[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(1): 1-5, 36 (in Chinese).
- [17] LIU B. Research on acoustic scattering characteristics of typical structures of MUUV[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020. doi: 10.27307/d.cnki.gsjsu.2020.002589 (in Chinese).
- [18] HE Z Y, ZHAO Y F. Theoretical foundations of acoustics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981 (in Chinese).
- [19] WANG X C, SHAO M. Finite element method fundamentals and numerical methods[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997 (in Chinese).
- [20] GUO X Y, MA L, WU G Q. Study on the acoustics

- scattering of a submerged stiffened cylindrical shell structure[J]. *Ocean Technology*, 2007, 26(3): 36–41 (in Chinese).
- [15] 魏克难, 李威, 雷明, 等. 基于耦合边界元法的水下目标低频声散射特性 [J]. *舰船科学技术*, 2014, 36(10): 32–36.
- WEI K N, LI W, LEI M, et al. The low-frequency acoustic scattering characteristics study on underwater targets by the coupled boundary element method[J]. *Ship Science and Technology*, 2014, 36(10): 32–36 (in Chinese).
- [16] LIU Q H, TAO J P. The perfectly matched layer for acoustic waves in absorptive media[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1997, 102(4): 2072–2082.
- [17] LIU Q H. Perfectly matched layers for elastic waves in cylindrical and spherical coordinates[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1999, 105(4): 2075–2084.
- [18] 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. doi: 10.7666/d.D750132.
- LU D. Researches on acoustic scattering of elastic target on finite element methods[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014. doi: 10.7666/d.D750132 (in Chinese).
- [19] 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(1-2): 171–180.
- FAN J, TANG W L, ZHUO L K. Planar elements method for forecasting the echo characteristics from sonar targets[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2012, 16(1-2): 171–180 (in Chinese).
- [20] 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 G Y, FAN J, TANG W L. A modified planar elements method considering occlusion and secondary scattering[J]. *Acta Acustica*, 2011, 36(4): 377–383 (in Chinese).
- [21] 王汝芬, 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 R H, LI B, WEI Q. A method for predicting far-field target strength of surface ship based on planar elements theory[J]. *Technical Acoustics*, 2015, 34(1): 6–10 (in Chinese).
- [22] WATERMAN P C. New formulation of acoustic scattering[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1969, 45(6): 1417–1429.
- [23] WATERMAN P C. Matrix theory of elastic wave scattering[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1976, 60(3): 567–580.
- [24] BOSTRÖM A. Scattering of stationary acoustic waves by an elastic obstacle immersed in a fluid[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 67(2): 390–398.
- [25] 刘敬喜, 赵耀, 张涛, 等. 基于 T 矩阵法的水下任意刚硬体声散射场计算 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2007, 35(9): 31–33.
- LIU J X, ZHAO Y, ZHANG T, et al. Computation of the acoustic scattering field from submerged rigid objects with arbitrary shapes by T-matrix method[J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Nature Science Edition)*, 2007, 35(9): 31–33 (in Chinese).
- [26] 汤渭霖, 范军, 马忠成. 水中目标声散射 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- TANG W L, FAN J, MA Z C. Acoustic scattering of targets in water[M]. Beijing: Science Press, 2018 (in Chinese).
- [27] 范军, 汤渭霖. 声呐目标强度 (TS) 计算的板块元方法 [C]//中国声学学会 1999 年青年学术会议 [CYCA'99] 论文集. 武汉: 中国声学学会, 1999: 40–41.
- FAN J, TANG W L. The planar element method for computing target strength (TS) of sonar[C]//Proceedings of 1999 Youth Academic Conference of the Acoustical Society of China. Wuhan: Acoustical Society of China, 1999: 40–41 (in Chinese).

Research on target strength characteristics of the Orca extra-large unmanned underwater vehicle

HAO Ya¹, CHENG Xuan¹, LI Yukun², ZHANG Fanchen², FAN Jun¹, GONG Zhixiong^{*1}

1 School of Ocean and Civil Engineering, State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2 Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China

Abstract: [**Objectives**] To investigate the acoustic target strength (TS) characteristics of extra-large unmanned underwater vehicles (XLUUVs), a systematic analysis is conducted on the TS characteristics of the “Orca” XLUUV in the 1k-10kHz frequency band. [**Methods**] Based on the Orca model, the finite element method is employed to calculate the TS of the Orca model in the 1k-3kHz frequency band, while the planar element method is used for the 3k-10kHz band. The results are compared with those of the Benchmark model. The angular detection probability is proposed as a more comprehensive indicator for evaluating the stealth performance of unmanned underwater vehicles (UUVs). Additionally, a scaled model experiment is conducted in a water tank, and a correction method is proposed for the experimental TS measurements. [**Results**] The TS characteristics of the Orca model are studied at first. Compared with the Benchmark model, the Orca model exhibits better stealth performance in the azimuthal direction, with additional advantages in the circumferential direction at higher frequencies, which becomes more pronounced as frequency increases. For cases where the distance between the hydrophone and transducer fails to satisfy the far-field condition, the experimental target strength measurements are corrected, resulting in improved agreement with simulation values. This validates the accuracy of the numerical simulation results. [**Conclusions**] The research findings provide a theoretical basis for optimizing underwater detection systems and the stealth design of UUVs.

Key words: extra-large unmanned underwater vehicle (XLUUV); target strength; finite element method; planar element method; water tank measurement correction