



潜体水动力尾迹研究综述

唐翔宇 缪宇跃 夏林生 陈亮 韩阳 孙江龙 涂海文

A review of hydrodynamic wakes research on submerged bodies

TANG Xiangyu, MIAO Yuyue, XIA Linsheng, CHEN Liang, HAN Yang, SUN Jianglong, TU Haiwen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04434>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

转弯航行舰船开尔文尾迹散射特征研究

Study on Kelvin wake scattering characteristics of turning ship

中国舰船研究. 2023, 18(4): 129-139 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03153>

分层流中潜艇加减速对尾迹特征特性的影响

Influence of submarine's acceleration and deceleration on wake spectrum characteristics in stratified flow

中国舰船研究. 2022, 17(3): 67-77, 101 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02490>

海洋分层特征对合成孔径雷达图像内波尾迹可识别性的影响

Impact of ocean stratification characteristics on identifiability of internal wave trails in synthetic aperture radar images

中国舰船研究. 2025, 20(3): 296-304 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03935>

海洋内波影响水下航行体水动力特性数值模拟

Numerical simulation of influence of ocean internal waves on hydrodynamic characteristics of underwater vehicles

中国舰船研究. 2022, 17(3): 102-111 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02742>

船体伴流对直翼推进器水动力性能的影响

Influence of ship wake on hydrodynamic performance of cycloidal propeller

中国舰船研究. 2022, 17(1): 18-24 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02151>

波浪动力船水翼的推进性能分析

Propulsion performance analysis of hydrofoil on a wave-powered boat

中国舰船研究. 2020, 15(1): 119-126 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01672>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

引用格式: 唐翔宇, 缪宇跃, 夏林生, 等. 潜体水动力尾迹研究综述 [J]. 中国舰船研究. DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04434.
TANG X Y, MIAO Y Y, XIA L S, et al. A review of hydrodynamic wakes research on submerged bodies[J]. Chinese Journal of Ship Research (in Chinese). DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04434.

潜体水动力尾迹研究综述



扫码阅读全文

唐翔宇¹, 缪宇跃², 夏林生^{*2}, 陈亮², 韩阳³, 孙江龙⁴, 涂海文^{**1}

1 中国地质大学(武汉) 海洋学院, 湖北 武汉 430074

2 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

3 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

4 华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430074

摘 要: 潜体水动力尾迹研究是优化潜体非声隐身性能和提升探测能力的关键技术之一, 因此, 有必要对潜体水动力尾迹的研究现状进行系统的综述。首先, 对潜体水动力尾迹的类型及特征进行分析和总结。接着, 对水槽实验和数值模拟方面研究工作详细的综述, 分析水槽实验在尾迹形成和演化方面的研究成果, 总结数值模拟在尾迹流场动态特性方面的研究成果。最后, 探讨合成孔径雷达(SAR)技术在潜体尾迹探测中的应用现状, 分析其在复杂海洋环境中应用的优势和挑战。分析表明, 水槽试验、数值模拟和 SAR 技术等多种研究手段的综合运用和协同发展, 将为潜体尾迹探测提供更全面、高效的方法和手段。未来应构建“数值模拟-水槽实验-实航验证”互为支撑的研究体系, 重点突破深度学习模型在复杂海洋背景干扰下的弱尾迹特征提取难题, 同时提升其在有限样本条件下的泛化性能。

关键词: 水下航行器; 尾迹; 水动力尾迹; 尾迹探测; SAR 技术; 试验方法; 数值模拟

中图分类号: U661.1; U675.79; TN957.52

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04434

0 引 言

在当前快速发展的科技背景下, 潜体水动力学成为流体力学与海洋军事的重要交叉领域。潜体凭借其突出的机动性和隐蔽性, 在维护国家海洋安全中扮演着关键角色^[1]。水下潜体运动在水面产生的水动力尾迹, 不仅反映了其与流体的相互作用与航行状态, 还会提高潜体的被侦测风险^[2]。因此, 从生成机制到演变规律以及影响因素等方面对尾迹进行系统研究, 对于提升潜体非声探测隐身效果具有深远意义^[3]。

潜体水动力尾迹的研究最早可以追溯至 20 世纪初期, 当时学者们主要关注尾迹的基本流动结构和相关特性。随着技术的不断进步, 研究者逐渐认识到尾迹不仅表现出复杂的流体结构, 而且其特性深受环境条件(如波浪、温度梯度和

水体密度分层等)的影响。近年来, 借助先进的计算流体力学(CFD)技术和精密实验手段, 科学家们能够更为准确地模拟和观测潜体尾迹在不同水体环境中的表现, 从而为潜体性能优化提供了全新的视角, 并为潜体隐蔽技术的开发奠定了理论基础^[4-7]。

在具体研究方法上, 水槽实验由于其高度可控的实验条件, 可以直接观察尾迹的生成和演化过程, 这为深入揭示尾迹基本特征提供了直观依据。而数值模拟技术则因其灵活性和计算效率, 成为解析复杂流场中尾迹演变规律的重要工具。近年来, 合成孔径雷达(SAR)技术的引入, 为海上潜体尾迹的远程监测带来了革命性突破, 特别是在复杂海况下展现出显著优势, 可以实现高效的尾迹监测^[8]。

尽管已有大量研究成果, 潜体水动力尾迹的

收稿日期: 2025-03-31 修回日期: 2025-05-13

基金项目: 基础产品创新项目(KY61700230027, KY10100230067)

作者简介: 唐翔宇, 男, 1998 年生, 硕士。研究方向: 舰船水动力学。E-mail: impkz@163.com

夏林生, 男, 1988 年生, 博士, 高级工程师, 研究方向: 舰船水动力学。E-mail: xialinsheng@whu.edu.cn

涂海文, 男, 1986 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师。研究方向: 舰船水动力学。E-mail: tuhw@cug.edu.cn

*通信作者: 夏林生

**第二通信作者: 涂海文

研究仍面临诸多挑战。例如,尾迹在大尺度环境中的表现以及尾迹与海洋环境的相互作用等,仍是未来研究的重要方向。如何更有效地结合实验研究与数值模拟,以提高研究的可靠性和应用性,也是当前亟待解决的问题。

本文将系统地总结潜体水动力尾迹的最新研究进展,涵盖潜体典型水动力尾迹特征分析、潜体水动力尾迹水槽实验、潜体水动力尾迹数值模拟以及 SAR 潜体尾迹探测等方面的最新研究成果。通过对潜体水动力尾迹的深入探讨,为潜体的尾迹隐身性能优化和潜体水动力尾迹探测能力提升提供更加全面、有效的参考和启示。

1 潜体水动力尾迹特征

关于舰船尾迹的形成机理,其系统性理论的构建始于 19 世纪。Kelvin 研究发现在无风干扰且无背景波存在的理想深水环境下,舰船尾迹将在船尾固定保持一个约 39° 夹角的 V 形区域内分布,这种规律性尾迹被命名为 Kelvin 尾迹^[9]。如图 1 中的 (A) (B) 和 (C) 部分所示,图中 (A) 为船首 Kelvin 尾迹发散波, (B) 为船尾 Kelvin 尾迹发散波, (C) 为 Kelvin 尾迹横断波, (D) 为湍流尾迹, (E) 为近场湍流区域。

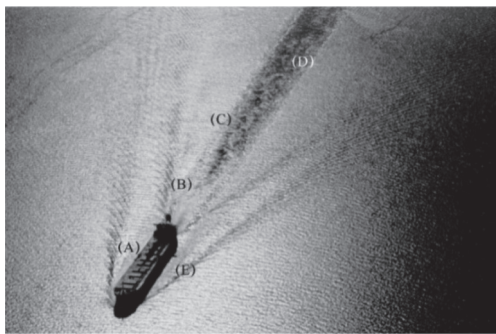


图 1 舰船尾迹结构示意图^[10]

Fig. 1 Structural image of ship wakes^[10]

Kelvin 尾迹是水面舰船尾迹典型特征,其呈现为明显的泡沫带,易于通过视觉和光学手段进行观测。而潜体尾迹是潜体运动引起的流体动力学效应在水面的微弱扰动,这些扰动在特定条件下通过水面上的细微变化表现出来。

潜体水动力尾迹包括多种类型的尾迹:表面波 (“V”形波尾迹和伯努利水丘)、湍流尾迹和内波尾迹^[11]。其中,“V”形波尾迹由潜体运动潜体在水下运动时引起的流体动力学效应,呈现出特定的“V”形波纹图案^[12],伯努利水丘是由于流体在局部速度变化下引起的水面抬升现象,湍流尾迹则是在潜体后方形成的旋涡和涡流结构,反映出流体的不稳定性,内波尾迹是在水体内部由盐

度分层和温度差异导致的密度梯度水体波动导致的。

上述这些尾迹类型不仅反映了潜体与周围水体之间复杂的流动耦合机制,也为深入揭示潜体运动所引发的流体动力学效应提供了关键依据。接下来的部分将详细介绍 3 种水动力尾迹的形成机制及特征。这些分析将帮助我们更好地理解潜体尾迹的动态变化及其对水下航行的潜在影响。

1.1 “V”形波尾迹

当潜体在接近海面的浅层航行时,其外部表面的动态压力分布会与自由水面相互作用,从而激发出一种波浪系统。该系统由分歧波和横向波组成,分歧波向潜体两侧扩散,横向波则主要向其后方传播,形态上与经典的 Kelvin 波型高度相似^[13-15]:整体呈现出典型的“V”形结构,称为“V”形波,如图 2 所示。航速与潜深是影响“V”形波特性最为关键的两个参数。

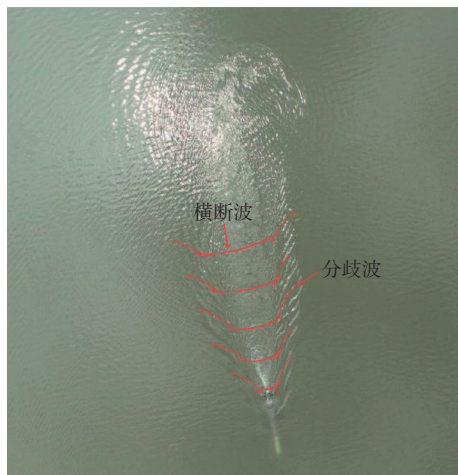


图 2 潜体“V”形波尾迹图^[17]

Fig. 2 The V-shaped wave wake image of submerged body^[17]

航速对波形结构的控制作用体现在波长、波幅以及波形夹角。在相同潜深条件下,随着航速的提高,波长明显拉长,波幅增大,波形夹角也逐渐扩大。这种参数间的关联性使得“V”形波具备反映潜体航行速度变化的能力,因而可被用作分析潜体运动速度的重要特征指标。

潜深对“V”形波的影响则主要集中于波幅的变化。在航速保持恒定的情况下,随着潜体深度的加深,波幅呈递减趋势,并在一定深度后趋近于零,但波长与波形夹角受潜深变化的影响相对较小^[16]。由于“V”形波对潜深变化具有一定程度敏感性,尤其在浅层区域反应更为显著,因此该波形特征亦可作为对潜体垂向位置进行间接判断的手段。

1.2 伯努利水丘

当潜体在水中以较高航速航行且潜深较浅时,其周围流体速度将发生显著变化。根据伯努利原理,潜体前部和侧面的流体速度增加,导致这些区域的压力降低。而在潜体艏部区域正上方,由于局部流体速度骤变,在一定条件下会形成一个相对的高压区,进而在水面上产生隆起现象,称为伯努利水丘^[18],如图3所示。



图3 潜体伯努利水丘图^[17]

Fig. 3 Bernoulli hump image of submerged body

该现象可由伯努利方程表示如下:

$$P + 1/2\rho v^2 + \rho gh = C$$

式中: P 为流体中某点的压强; v 为该点流体的流速; ρ 为流体密度; g 为重力加速度; h 为相对于参考面的高度; C 是一个常量。

伯努利水丘的形成和特征受到多个因素的影响,潜体的速度越高,下潜深度浅,速度差异和压力变化越显著,会形成更明显的水丘。当潜深够大,航速够小时,伯努利水丘现象几乎不可见^[19]。潜体的形状也会影响压力差异,流线型设计可以减小压力差异,从而减少水丘的高度^[20]。

1.3 湍流尾迹

湍流尾迹是潜体在水中运动时在经过后的水域形成的复杂流动结构,其特点是包含大量不规则的旋涡和涡流,这些旋涡的形成是由于流体的粘性和惯性之间的相互作用^[21]。当潜体以一定速度在水中穿行时,流体在其表面受到摩擦和压力的影响,流动速度在潜体后方迅速变化,导致流体层之间的剪切作用增强,最终破坏了层流状态,进入湍流状态^[22]。

湍流尾迹的特征包括速度波动大、压力变化剧烈、能量耗散快等。船体前进时在尾部形成低

压区,导致水流加速并产生旋转流动,形成明显的旋涡结构,如图4所示。



图4 潜体湍流尾迹图^[17]

Fig. 4 Turbulent wake image of submerged body^[17]

1.4 内波尾迹

当潜体在具有稳定密度分层的水体中航行时,其体积运动会扰动周围流体,引发水体微团在重力与浮力的共同作用下沿垂向方向振荡,从而激发形成内部波动,即内波尾迹^[23-26]。由于海水不同深度的密度存在差异,形成了天然的浮力分层结构。这种情况下,即便水下仅发生轻微活动,其产生的波动也会沿着密度分界面传播,最终在海面产生具有较大振幅和较长持续时间的内波尾迹图像^[27],如图5所示。

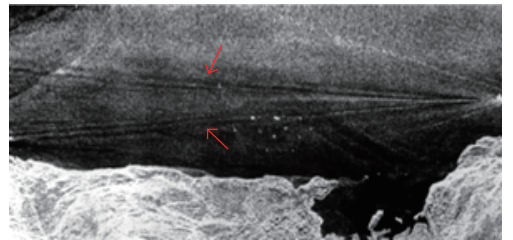


图5 机载 SAR 图像中的内波尾迹图^[87]

Fig. 5 Internal wave wake image from airborne SAR^[87]

按照内波的生成机理可将内波分为体效应内波和尾迹效应内波两大类^[28-29]。前者由潜体本身对分层流体的直接扰动引发,波动结构与潜体位置相对稳定,亦被称为稳态内波;后者则由尾流在发展过程中与分层水体相互作用所激发,常见于高速运动情形,具有位置不稳定和非稳态的特点,也被称为非稳态内波^[30]。

当潜艇在密度分层的水体中航行激发的内波传播时,其导致的辐聚区会使海面短波受压缩而趋于平滑,降低雷达回波强度;辐散区则通过流场拉伸作用增加波纹粗糙度,增强雷达回波^[31]。这种由流场调制形成的海面粗糙度差异,在

SAR 图像上呈现为明暗交替的条带特征, 会间接暴露潜艇航迹信息^[32]。因此, 研究分层海洋中潜体激发内波形成的尾迹结构, 不仅对海洋物理过程具有基础科学意义, 也在水下目标探测与反探测等军事领域中具有重要价值^[33]。

在潜体水动力尾迹研究中, 水槽实验与数值模拟是相辅相成的两大研究手段。水槽实验能够在受控条件下观察尾迹的形成过程和动态变化, 例如通过流场可视化技术直接记录尾迹形态和流体运动规律; 数值模拟则借助 CFD 工具, 高效解析复杂的三维流场特征, 揭示潜体运动参数与尾迹演化的内在关联。接下来的章节将系统阐述这两种方法的最新研究进展。

2 潜体水动力尾迹研究现状

2.1 水槽实验与数值模拟

水槽实验在潜体水动力尾迹研究中扮演着至关重要的角色。实验水槽不仅允许精确控制水流速度、密度分层以及其他环境条件, 还能通过高精度传感器和成像技术捕捉细微的流动变化。通过模拟尾迹的生成与演化, 水槽实验为研究潜体水动力尾迹提供了关键数据, 对于优化潜体设计和提高探测效率具有重要意义。随着 CFD 技术的迅猛发展, 使得数值模拟在潜艇尾迹研究中的应用变得越来越广泛和深入。数值模拟能够精确捕捉潜艇航行过程中自由液面和内界面的复杂流场特征, 帮助分析密度分层水体对尾迹的影响提供有力支撑, 而且能深入揭示潜艇运动状态及附体效应对尾流场扰动的影响机制。

水槽实验和数值模拟各自具有独特的优势和局限性。表 1 总结了水槽实验和数值模拟在潜体水动力尾迹研究中的优缺点, 帮助我们更好地地理解这两种方法的特点与应用。

2.2 尾迹水槽实验研究现状

实验水槽作为潜体水动力尾迹研究的基础性实验平台, 其核心价值在于构建了参数精确可控的流体环境, 这类装置(图 6)能够实现宏观流场结构的观察与记录。

目前, 国内许多高校和研究机构都配备了先进的实验水槽设备。表 2 总结了部分科研单位的实验水槽信息。

2.2.1 分层水体对尾迹的影响研究

分层水体广泛存在于海洋、湖泊等自然水域中, 其垂向密度梯度形成的层结环境对水下能量

表 1 水槽实验与数值模拟优缺点对比表

Table 1 Comparison of Advantages and Disadvantages of Towing Tank Experiments and Numerical Simulations

对比点	水槽实验	数值模拟
研究对象	优势: 适用于具体流动现象(“V”形波、湍流和内波等特征)的观察, 能够直观展示尾迹特征。 局限性: 难以处理复杂海洋环境和多种因素的交互作用, 受限于水槽的物理特性, 无法模拟动态变化。	优势: 能够处理复杂几何形状和分析复杂流场特征, 适合广泛的参数分析和多因素影响研究, 能够捕捉细微的流场特征, 适合瞬态流动分析。 局限性: 对模型假设和边界条件敏感, 易影响结果的准确性。
数据可控性	优势: 通过物理测量和观察获取数据, 数据真实性及重复性高。便于验证和校准。 局限性: 数据获取过程可能耗时且受限于设备精度。	优势: 通过数值计算生成大量数据, 适合进行全面分析。 局限性: 结果依赖于模型的假设, 模拟结果可能受计算误差影响, 重复性较低。
成本与效率	优势: 在小规模实验中, 成本相对可控。 局限性: 设备投资和维护成本高, 实验周期较长。	优势: 长期来看, 模拟可以节省实验成本, 适合大规模研究。 局限性: 初始开发和计算资源需求高, 可能需要昂贵的计算设施。

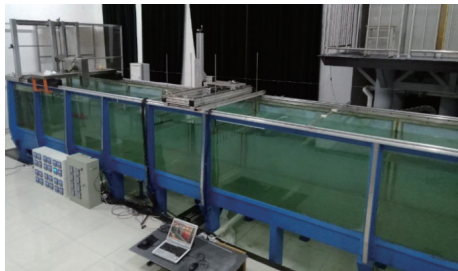


图 6 实验水槽实物图^[87]

Fig. 6 Photograph of the towing tank

传递与波动传播具有显著调控作用。杨立、初明忠等^[44]发现在具有较大水体分层梯度的环境中, 内波幅值的衰减速率显著高于分层梯度较小的水体。这是因为当水体密度层化梯度增大时, 相邻水层间的密度差异更为显著, 从而产生更高的浮力频率, 升高的浮力频率强化了层间恢复力, 当内波发生垂向传播时, 该恢复力会迫使内波能量向原密度面回弹, 形成显著的垂向运动抑制。这种运动限制效应导致波动能量无法有效实现垂向传递, 反而在水平方向形成能量聚集。由于水平传播过程中更易受粘性耗散和湍流混合作用的影响, 能量损失速率随之增大, 最终表现为振幅的加速衰减过程。

在分层水体环境中, 内波尾迹按照生成机理可分为体积效应内波与尾迹内波。研究两类内波的模式转换机制, 对水下装备设计与探测技术具有双重意义。从隐身性能优化视角, 体积效应内波的波长与幅值是 SAR 雷达等非声探测技术的关键识别标志——研究^[44]表明内波水平传播距离

表 2 科研单位实验水槽的规格与功能

Table 2 Functions and Specifications of Research Facility Experimental Towing Tanks

归属单位	规格(长×宽×高)/m	功能
解放军理工大学 ^[34]	12×1.2×1.0	分层流中潜体内波尾迹研究; 内波的传播演化研究
上海交通大学海洋工程国家重点实验室 ^[35]	25×0.6×1.2	内波生成演化机理与规律研究; 分层流中潜艇综合航行性能与尾流特征研究等。
北京大学湍流与复杂系统国家重点实验室 ^[36]	16×1×1.2	可实现不同盐水密度的分层流模拟
国防科技大学重力式分层流实验室 ^[37-38]	12×1.2×1.0	静水中模型运动产生的内波尾迹试验; 分层海洋中航行体水动力试验
中国海洋大学物理海洋实验室 ^[39]	15×0.35×0.7	内孤立波传播演化研究、内波对潜体的作用研究
中国船舶科学研究中心(七〇二研究所) ^[40]	25×3×1.5	静水中模型运动产生的内波尾迹试验; 分层水体中潜体水动力试验
中国辐射防护研究院 ^[41]	21.6×1.2×1.2	分层水体中潜体水动力试验
解放军陆军工程学院 ^[42]	12×1.2×1.0	分层水体中潜体水动力试验
哈尔滨工程大学 ^[43]	6×0.5×0.6	分层流潜体尾流特征研究

可达潜体尺度的数十倍。从能量耗散调控视角,尾迹内波通过湍流-波动能量串级加速局部耗散,可能降低尾迹可探测性。赵先奇和魏岗等^[45-46]采用多点组合探头阵列的动态测量方法,研究发现了半球体模型与球体模型产生的体积效应内波向尾迹内波转变的临界内弗劳德数 Fr 分别为 1.6 和 2.2,即在有限深度的线性分层盐水中,当 Fr 小于临界值时,模型生成的内波为体积效应内波;当 Fr 大于临界值时,模型生成的内波为尾迹内波。

在密度分层海洋中,潜体定常航行时因体积效应与流体相互作用,会激发与经典 Kelvin 波相似的定常内波,称为 Lee 波^[47];而尾迹湍流演化形成的大尺度涡结构通过非定常排水效应,则会产生具有随机特性的拟 Lee 波。王进和尤云祥等^[48]发现在 Lee 波与拟 Lee 波之间存在一个临界转换 Froude 数 Fr_c ,它与长径比 λ 之间近似满足线性关系 $Fr_c \approx 0.2391\lambda + 1.7679$ 。

2.2.2 螺旋桨效应对尾迹的影响研究

水下潜体的航行依赖于螺旋桨的推动,但螺旋桨对艇体尾迹效应有着明显的衰减作用。源于其复杂的流体动力学影响,螺旋桨的旋转会产生强烈的湍流,这种湍流促进了能量的快速耗散,使尾迹的涡流结构变得更加紊乱,难以保持一致性。螺旋桨引发的旋转流场还促进流体的混合,削弱了尾迹中的速度梯度,导致其更快地衰减,降低了尾迹的可识别性。研究螺旋桨效应对内波尾迹的影响至关重要。

李万鹏和魏岗等^[49]基于动态多点阵列测量技术,对连续密度跃层条件下 Suboff 自航模型螺旋桨扰动场开展定量研究。研究发现自航模型体积效应内波向尾迹内波转变的临界内 Froude 数相比于拖曳模型的 2.0 提升至 4.4。通过对比分析发现,螺旋桨效应在低速条件下能够维持体积效应

内波的稳定性,而在高速条件下则通过增强湍流混合效应,显著缩短湍流尾迹的充分发展时间。

通过水槽实验,能够观察到均匀流或分层流中尾迹的基本变化规律。但在实际海洋环境中,许多复杂因素(如风浪流干扰、非均匀分层等)难以在实验室完全复现。这时候,数值模拟就能发挥重要作用——它通过计算机模型模拟流场,可以灵活调整参数,研究水槽实验难以实现的工况。接下来的部分将系统梳理尾迹数值模拟的研究进展

2.3 尾迹数值模拟研究现状

数值模拟不仅能帮助研究者分析密度分层水体对潜艇尾迹的影响^[50],还能深入研究潜体运动状态、潜体附体等因素对尾迹的影响。通过对自由面扰动和内界面波动的动态捕捉,数值模拟能够定量分析尾迹波幅、波长、波形夹角等关键参数,还可以直观展现典型尾迹特征如伯努利水丘(图 7 中圈画区域)、“V”形波(图 7 中红线标记区域)的空间分布。

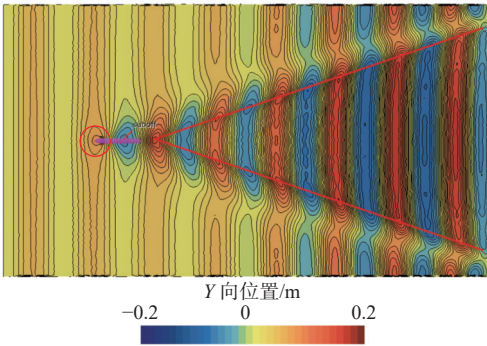


图 7 潜体自由面兴波特征模拟图

Fig. 7 Free-surface wave pattern simulation image of submerged body

为了更好地理解数值模拟方法在潜艇尾迹研究中的应用,表 3~表 5 详细展示了不同模拟方

表 3 雷诺平均纳维-斯托克斯 (RANS) 模型优缺点总结

Table 3 Summary of Advantages and Disadvantages of Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) Models

模型名称	优点	缺点
标准 $k-\epsilon$ 模型	计算成本低; 对壁面流动的模拟较好	对分离流动和旋涡捕捉不够准确; 适用于稳态流动, 瞬态效果差
标准 $k-\omega$ 模型	对近壁面流动有更好表现; 适合复杂几何形状	对自由剪切流动的预测不如 $k-\epsilon$ 模型
SST $k-\omega$ 模型	结合 $k-\epsilon$ 和 $k-\omega$ 的优点; 对分离流动预测较好	复杂度增加, 调参难度较大
RNG $k-\epsilon$ 模型	改进了标准 $k-\epsilon$ 的不足; 可以更好地处理旋涡流动	对高旋涡流动敏感; 低雷诺数流动表现不佳; 对强非均匀流动敏感

表 4 大涡模拟 (LES) 模型的优缺点总结

Table 4 Summary of Advantages and Disadvantages of Large Eddy Simulation (LES) Models

模型名称	优点	缺点
动态亚格子模型	能捕捉大尺度涡流; 瞬态流动预测准确	计算成本高; 对网格依赖性强
Smagorinsky 模型	实现简单; 对大尺度涡流有较好模拟	对小尺度涡流精度不高; 需要细网格

表 5 混合 RANS/LES 方法的优缺点总结

Table 5 Summary of Advantages and Disadvantages of Hybrid RANS/LES Methods

模型名称	优点	缺点
延迟分离涡 (DES)	结合 RANS 和 LES 的优点; 对分离流动有较好预测	过渡区域处理复杂; 需要合理规划区域
延迟分离涡大涡模拟 (DDES)	改进了 DES 的不足; 对分离流动和尾迹模拟更准确	计算复杂度增加; 参数调节困难
跨尺度模拟 (IDDES)	进一步提高了对不同尺度的适应性	需要更多计算资源; 实施复杂

法的湍流计算模型的优缺点。

除了表格提到的数值模拟方法外, 还有一种重要的方法是直接数值模拟 (DNS)。DNS 是通过直接求解纳维-斯托克斯方程, 精确捕捉所有湍流尺度, 它不依赖湍流模型, 可以提供最详细的流动结构信息。但由于需要极高的计算资源, DNS 仅适用于低雷诺数和简单几何形状的流动研究。

上述基于黏性流体力学方法在处理复杂湍流和边界层结构方面具有显著优势, 但它们普遍面临计算成本高、求解复杂、参数依赖性强等问题, 尤其在大尺度海洋工程或长时间模拟中效率受限。相较之下, 势流方法在忽略黏性影响的前提下, 通过求解速度势函数实现对流场的高效建模, 特别适用于以波浪传播与自由面扰动为主的物理过程模拟。

苏焱和吉健^[51]开发了一种基于高阶 Boussinesq 方程的三维势流数值模型, 将潜体简化为水池底部隆起体, 从而高效模拟其在水下运动时对自由液面的扰动效应。该方法成功再现了如伯努利水丘与“V”形波等典型尾迹特征, 验证了其在波浪传播研究中的适用性。相较传统的黏性求解方法, 该模型在保障基本物理机制表达的同时, 显著提升了运算效率, 特别适合用于快速评估潜体尾迹引发的表面响应。在研究波动主导机制的尾迹问题时, 势流方法为建模与分析提供了一种高效且物理合理的替代路径。

2.3.1 分层流对尾迹的影响研究

分层流环境对潜体尾迹的作用机制研究是揭示水下潜体跨介质流动特征的核心课题。相较于传统水槽实验, 数值模拟方法在分层流研究中展现出显著效率优势, 其通过参数化建模手段可有效复现复杂海洋环境下的多相流动特征^[52-53]。研究人员^[54-55]通过对不同分层水平下的潜体水动力性能、尾流演化特征、自由表面特征及速度衰减的研究, 这为分层海洋环境中的尾迹隐身设计提供了理论支撑。

陆炜^[56]基于 RANS 方程与 VOF 多相流模型, 引入 SST $k-\omega$ 湍流模型, 系统研究分析了航行速度、潜深位置及密度分层比对航行阻力、内界面兴波与自由表面波系演化的非线性关联机制。研究发现, 水面兴波的波幅与内界面弗劳德数 Fr_n 成正相关, 而波长和波形夹角则与之成负相关。

尤云祥等^[57-58]研究分析了分层水体密度比对自由面和内界面尾迹的影响。结果表明, 随着流体密度比的增加, 尾迹波形张角也随之增大。罗恒^[59]基于 VOF 方法构建了融合随机海浪谱的高性能并行计算框架, 通过粘性流 CFD 技术实现了分层流中潜体尾迹-海面波耦合效应的数值解析。研究表明海面波波长与潜体尾迹波长相等时, 其对潜体尾迹干扰程度较大, 其波高与干扰程度成正相关。分析可以得知, 潜体可以通过控制航速继而控制潜体尾迹波长, 使之接近于海面

波波长,从而实现降低潜体尾迹特征,可有效减小被侦测风险。

张皓清和杨立伟^[60]提出了一种基于势流理论的建模框架,将潜体简化为等效源汇系统,在分层流体中分别构建伯努利水丘、“V”形波和内波尾迹的解析模型。分析了不同潜深与速度组合下的尾迹结构变化,并定量评估其对水下重力梯度测量的干扰影响。研究发现潜体的航速越快、潜深越浅,其尾迹在重力场中引起的扰动越明显。

2.3.2 潜体附体对尾迹的影响研究

附体构型对潜体尾迹的调制效应研究也是水下潜体隐身设计与水动力性能优化的重要课题。基于 CFD 的精细化数值模拟方法,可系统解析附体与艇体耦合作用下的尾迹生成机理及其演化规律。

胡开业和杨哲超等^[61-64]深入研究发现,指挥台围壳是影响海表尾迹的主要因素之一,围壳的凸起破坏了艇体的流线型,使潜体运动产生的尾迹更明显,而尾舵又削弱了围壳对尾迹的影响,这体现了附体间流动耦合的水动力学机制。通过分析可以得知,通过合理设计围壳外形并研究出与尾舵的最佳组合情况,可以有效地提升潜体的隐身性能。梁秋凤等^[65-66]还研究了不同舵面积对潜艇操纵性能和尾迹特征的影响。研究结果显示,X 型舵尾控制平面是影响潜艇尾迹的关键因素之一,较小的 X 舵面积能够有效提高尾流场的质量。这意味着在设计过程中,需要在机动性和潜艇隐身之间进行精细的权衡。根据实际应用需求,可以适当减少 X 舵面积,以改善尾流质量,从而增强潜艇的隐身性能,并提高螺旋桨的推进效率。

2.3.3 潜体运动状态对尾迹的影响研究

潜体运动状态对尾迹特征具有显著调控作用。基于 RANS 方程与 VOF 多相流模型的动态网格技术,研究者可以构建涵盖非定常机动过程的数值分析体系,实现了复杂运动工况下尾迹演化特征的精细化解析。通过改变潜体运动速度、潜深以及加速度和减速度等参数,研究潜体运动对尾迹流场和演化特征的影响,发现潜艇尾迹受多种因素影响:

吴建威、李丹梦等^[67-68]发现随着潜体潜深的增加,自由面的波高减小,尾迹特征也随之减弱,加大潜深可以有效地降低潜体被发现的概率。于祥、胡开业等^[69]基于 RANS 方程组,针对分层流体中潜体变速航行工况开展研究。发现航速提升会显著增加自由面尾迹波的波长及传播范围,加速机动会强化尾迹流场的辐散流强度,导致可探

测性显著提升。段菲、王兴茹等^[70-75]基于 RANS 方程研究发现增加纵倾角和下潜速度能够降低兴波高度,可以有效减少潜体被发现的概率。

3 SAR 潜体尾迹探测研究现状

3.1 SAR 探潜的现状

SAR 在潜体尾迹探测方面展现出卓越的技术优势。该技术通过主动发射频段可调的电磁波信号,并接收海面微形变引发的后向散射回波^[76],利用平台移动过程中多次采样和 SAR 技术生成高分辨率图像(图 8),从而精确捕捉水面上的微小扰动和涡流结构,以探测和跟踪水动力尾迹^[77]。

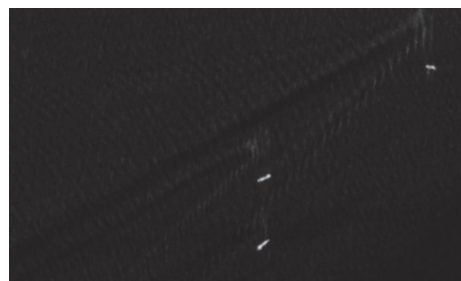


图 8 Terra-SAR 水动力尾迹图像^[87]

Fig. 8 Hydrodynamic wake image from Terra-SAR

相较于传统声学、光学探测手段,SAR 技术具备 3 大核心优势:

- 1) 全天候全天时探测能力,穿透云雨层实现复杂气象条件下的稳定监测^[78];
- 2) 被动探测模式规避了自身位置暴露风险,显著提升军事应用的隐蔽性^[79];
- 3) 广域覆盖特性(单次扫描范围超 5 000 km²)与多平台适配性(星载、机载、无人机载),满足战略级海洋监测需求^[80]。它在潜体尾迹探测方面提供了全面、高效且隐蔽的探测手段。

尽管 SAR 在潜体尾迹探测方面具有显著优势,但其应用仍然面临一些局限性。SAR 的探测精度受到多个因素的影响,导致实际应用效率较低,目前的应用仍较为有限。SAR 的成本和技术门槛也限制了其在某些场合的应用,如环境监测和搜救行动。随着技术的不断进步,未来 SAR 的应用潜力有望逐渐显现,尤其是在提高探测精度和降低成本方面。

3.2 影响 SAR 尾迹成像因素

SAR 尾迹成像的质量和效果受到多种因素的影响,这些因素包括 SAR 雷达参数以及海况背景等^[81-82]。SAR 图像的分辨率和噪声特性直接关系到尾迹的识别能力,低分辨率图像可能导致尾迹

特征模糊不清,难以进行有效检测。深入研究这些影响因素不仅能够提高尾迹成像的准确性和可靠性,还能为优化检测算法和设计新型成像系统提供理论支持和技术指导。

SAR 雷达的参数设置对尾迹成像精度至关重要,研究人员发现内波尾迹的纹理特征在同极化条件、低海情和沿着雷达视向传播时更容易分辨出^[83-84]。另有研究发现^[85],雷达入射角的增大会显著增强尾迹后向散射系数随角度的敏感性。当尾迹散射系数与背景海面形成显著差异时,尾迹可检测性增强。当雷达方位角与尾迹对称轴平行时,图像中尾迹纹理特征呈现最优解析度。高分辨率雷达成像质量显著提高,图像中噪声越弱。

海况背景也是影响 SAR 尾迹成像的重要外部因素,研究^[86]表明在高海况下,海面波浪和其他干扰会显著降低尾迹的可见性,影响成像质量。在高海况下,海面波浪和其他干扰会显著降低尾迹的可见性,在低海况时的尾迹可见性较高。内波尾迹的理想观测条件是低海况,还包括雷达视向需与航向垂直和保持中等入射角^[87]。

由于海水是一种典型的密度分层水体,其密度受温度和盐度影响,在垂直方向上呈现出分层结构,通常在一定深度处形成明显的密度跃变层。杨哲超、任立群等^[88]研究了密度分层水体环境对内波尾迹幅值及其在 SAR 图像中可识别度的影响。研究结果表明,密度跃变层强度越大、所在深度越浅,海表面内波尾迹的幅值越大, SAR 图像中内波尾迹的可识别度也越高。

这些研究成果不仅在海洋监测和军事领域中具有重要应用价值,还为环境保护等领域提供了新的技术手段和方法。

3.3 尾迹检测方法研究进展

在尾迹检测方法的研究中,各大高校和研究机构在图像处理算法、SAR 成像机理等方面取得了显著进展。在图像处理算法方面,研究者们基于不同的理论提出了拥有不同情况下优势的检测算法。

研究人员^[89]基于 MaskR-CNN 模型构建了船舶尾迹检测方法,在多种干扰条件下表现出较强的抑制干扰能力和鲁棒性。通过引入平衡特征金字塔串联结构^[90],增强了特征信息的融合与判别能力,并结合 GCNet 网络提升整体特征提取水平,从而进一步优化了检测性能。

小波域分析方法则通过构建多尺度特征表达模型,能够自适应地提取尾迹的空间分布形态与纹理信息。研究表明,该方法不仅在 SAR 海洋数

据中具备良好的内波参数反演能力^[91-92],其与 Hough 变换的联合使用还能实现尾迹线型结构的稳健识别,提升了检测效果^[93]。

姬渊等^[94]基于湍流尾迹的线性结构特点,采用 Radon 变换对尾迹进行提取,有效提升了检测精度。通过进一步分析 SAR 成像过程对尾迹表现形式的影响,对检测策略进行了针对性优化,增强了检测的准确性与稳定性^[95]。王志鹤等^[96]则提出了一种融合尾迹物理模型与 Radon 变换的检测方法,适用于大范围 SAR 图像中水动力尾迹的识别。该方法结合归一化梯度信息增强了 Radon 变换域中的显著特征,并通过成对搜索机制提取潜在尾迹线条,随后进行筛选以去除误检,最终确定真实尾迹的起始位置与方向。实验证明,该方法在 Terra-SAR-X 图像数据中检测准确率达 87%。周鹏等^[97]提出了一种融合稀疏低秩分解的鲁棒主成分分析与形态学处理的内波尾迹检测方法。该算法能够有效提取内波尾迹的空间分布特征和几何形态。实验结果表明,该方法在复杂海面背景下具有良好的尾迹分离与识别能力,展现出较强的鲁棒性和环境适应性。

基于高光谱图像处理的尾迹检测技术^[98]更侧重于对光谱信息的高效筛选与利用,该方法通过智能选择高光谱数据中的关键波段,显著减少了冗余信息,提高了整体处理效率。这种波段筛选策略还能有效保留对尾迹具有高度敏感性的光谱特征,有助于增强检测的针对性与可靠性。接着用主成分分析技术提炼出最能体现尾迹形状的核心信息,再结合图像形状识别技术精准锁定尾迹边界,提高了尾迹检测的精度。

在上述基于传统图像处理和模型驱动方法取得良好效果的基础上,近年来深度学习技术在 SAR 图像尾迹检测中展现出更为显著的优势^[99]。相较于传统方法在成本、效率和特征提取能力上的局限,深度学习依托多层神经网络结构,能够自动从数据中学习复杂的高层特征,显著提升了识别精度和适应性。研究人员^[100]采用 YOLOv8 神经网络架构,在不同海况、多个目标及多种速度条件下对尾迹目标进行检测,发现 YOLOv8m 模型的检测准确率达到 95.9%,不仅有效降低了对人工特征构建的依赖,还提升了模型在复杂场景下的检测能力。

与传统算法相比,深度学习方法在面对海面干扰、目标多样性和成像复杂度等挑战时,更具鲁棒性和扩展性。随着训练数据的不断丰富和网络结构的优化,深度学习正逐步成为尾迹检测领域的重要技术方向。

4 总结与展望

当前水槽实验、数值模拟与 SAR 技术构成了尾迹研究的 3 大技术支柱。水槽实验以高可控性和高精度测量优势, 为研究提供了可靠的实验依据; 数值模拟依托 CFD 技术, 可模拟复杂环境下的多尺度流动行为, 是理解尾迹演化机制的有效工具; SAR 则因其全天候、大范围成像能力, 在实际海洋环境中的尾迹遥感探测中发挥了不可替代的作用。但潜体尾迹研究依然面临诸多挑战, 如尾迹与海洋环境(包括温盐梯度、湍流、密度分层)之间的非线性耦合机制仍不明确, 非稳态复杂流场的建模精度有限, 实验与模拟结果之间缺乏高效一致的验证机制, 而 SAR 技术在高海况下的探测稳定性与图像解译精度仍待进一步提升, 许多尾迹检测方法虽在特定条件下表现出优势, 但仍面临算法稳定性、实时性和工程适应性的制约。

随着研究的不断深入, 未来潜体水动力尾迹的研究可以从以下两个方向来开展:

1) 构建“高精度数值模拟—实验室测试—实海域验证”研究方法。

高精度数值模拟依托 CFD 技术, 能够精准复现潜体航行过程中尾迹区域的复杂流动结构。通过多物理场耦合建模, 可深入研究温盐分层、流速变化等环境因素对尾迹演化路径和稳定性的影响。实验室水槽试验在可控环境下可对典型尾迹结构进行可视化捕捉与高分辨率测量。实验数据可有效验证数值模拟的可信度, 并反向用于模型校准, 提高模拟结果在实际环境中的可靠性。最后实海域验证是实现尾迹研究从理论到应用跨越的核心环节。通过在真实海况中部署多参数传感器与遥感观测系统, 可获取风浪、流速、温盐剖面等背景场数据, 并与潜体航迹相关联, 观测实际尾迹在多扰动耦合条件下的演化特征。依托如中船集团与国家海洋局共建的海上试验平台^[10], 可进行大比例自航模型实验, 形成模拟—实验—实测互为支撑的动态验证机制。

2) 深度学习在尾迹探测中的深化方向。

随着人工智能技术的快速发展, 深度学习凭借其多层次特征表征能力与非线性模式挖掘能力, 在尾迹检测中展现出强大的特征提取与复杂模式识别优势。未来, 其发展将主要集中在提升模型对复杂背景下弱尾迹的适应能力以及在样本有限条件下的泛化能力。通过引入多尺度结构、注意力机制、自监督学习等手段, 检测模型将更具鲁棒性和智能性, 推动尾迹探测向自动化、工程化方向发展。

参考文献:

- [1] 刘洋, 朱飞定, 谭佩钰, 等. 潜艇水动力尾迹与热尾迹耦合作用的数值模拟 [J]. 红外技术, 2018, 40(1): 62–67.
LIU Y, ZHU F D, TAN P Y, et al. Numerical simulation of the coupling effect of submarine hydrodynamic wake and thermal trail[J]. Infrared Technology, 2018, 40(1): 62–67 (in Chinese).
- [2] 方尔正, 桂晨阳, 王欢. 潜艇的非声学探测技术 [J]. 国防科技工业, 2020(6): 66–68.
FANG E Z, GUI C Y, WANG H. Non-acoustic detection technologies for submarines[J]. Defence Science & Technology Industry, 2020(6): 66–68 (in Chinese).
- [3] 刘腾蛟, 王丹, 刘金国. 潜艇非声探测技术综述 [J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(4): 521–526.
LIU T J, WANG D, LIU J G. Review of non-acoustic detection technologies of submarines[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2023, 31(4): 521–526 (in Chinese).
- [4] 常煜, 洪方文. 两层流体中潜艇水下运动尾迹的数值模拟 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2006, 21(1): 76–83.
CHANG Y, HONG F W. Numerical simulation of wakes for moving submarine in a two-layer fluid[J]. Journal of Hydrodynamics A, 2006, 21(1): 76–83 (in Chinese).
- [5] 罗恒, 陈科, 尤云祥, 等. 运动潜体尾迹及其与随机海面相互作用的数值模拟 [J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(9): 1435–1440.
LUO H, CHEN K, YOU Y X, et al. The numerical simulation of interaction between free-surface wake generated by a moving submerged body and stochastic ocean waves[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(9): 1435–1440 (in Chinese).
- [6] 洪方文, 常煜. 均匀流中潜艇水下运动表面尾迹的数值模拟 [J]. 船舶力学, 2005, 9(4): 9–17.
HONG F W, CHANG Y. Numerical simulation of surface wake for submarine moving in homogeneous fluid[J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(4): 9–17 (in Chinese).
- [7] 张效慈, 张军. 变密度深水中的内波向水面的垂直传播 [J]. 船舶力学, 2004, 8(1): 12–18.
ZHANG X C, ZHANG J. Perpendicular propagation of internal waves in a stratified deep-water towards water surface[J]. Journal of Ship Mechanics, 2004, 8(1): 12–18 (in Chinese).
- [8] 彭亮, 王建勋, 邓海华, 等. 水下非声探测与隐身技术综述 [J]. 舰船科学技术, 2014, 36(5): 6–10.
PENG L, WANG J X, DENG H H, et al. Review of the non-acoustic detection and stealth technology[J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(5): 6–10 (in Chinese).

- Chinese).
- [9] THOMSON W. On ship waves[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1887, 38(1): 409–434.
 - [10] JACKSON C R, APEL J R. Synthetic aperture radar: marine user's manual[R]. Washington: NOAA, 2004: 227–303.
 - [11] 张军, 张效慈, 赵峰, 等. 源于水动力学的潜艇尾迹非声探测技术研究之进展 [J]. *船舶力学*, 2003, 7(2): 121–128.
 - ZHANG J, ZHANG X C, ZHAO F, et al. Progress of investigation on non-acoustic detection for submarine wake originated from naval hydrodynamics[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2003, 7(2): 121–128 (in Chinese).
 - [12] 张昊. 水下航行体的兴波尾迹实验和基于 SPH 方法的仿真研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023. doi: [10.27061/d.cnki.ghgdu.2023.004945](https://doi.org/10.27061/d.cnki.ghgdu.2023.004945).
 - ZHANG H. Experimental investigation and SPH simulation on the wake of an underwater vehicle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023. doi: [10.27061/d.cnki.ghgdu.2023.004945](https://doi.org/10.27061/d.cnki.ghgdu.2023.004945) (in Chinese).
 - [13] 张民, 王乐天, 江旺强, 等. 舰船尾迹的电磁成像机理及特征提取技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2023.
 - ZHANG M, WANG L T, JIANG W Q, et al. Electro-magnetic imaging mechanism and feature extraction technology of ship wakes[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2023 (in Chinese).
 - [14] 秦朝峰, 陈旭, 于佳. 跃层中运动小球产生的内波对表层流场的影响 [J]. *中国海洋大学学报*, 2009, 39(S1): 303–310.
 - QIN C F, CHEN X, YU J. Surface effects of internal wave generated by a towed sphere in mid-pycnocline[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(S1): 303–310 (in Chinese).
 - [15] 高德宝, 张军, 周根水, 等. 拖曳体内波尾迹水下/水面波流特征试验研究 [J]. *船舶力学*, 2023, 27(1): 1–9.
 - GAO D B, ZHANG J, ZHOU G S, et al. Experimental study on characteristics of water surface flow and underwater flow for internal waves generated by a towed body in a stratified fluid[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2023, 27(1): 1–9 (in Chinese).
 - [16] LI D, YANG Q, ZHAI L, et al. Numerical investigation on the wave interferences of submerged bodies operating near the free surface[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2021, 13: 65–74.
 - [17] 师俞晨. 基于遥感影像水下目标尾迹探测综述 [J]. *现代防御技术*, 2024, 52(1): 83–91.
 - SHI Y C. Review of underwater target wake detection in remote sensing[J]. *Modern Defence Technology*, 2024, 52(1): 83–91 (in Chinese).
 - [18] 陈夫余, 王东阳. 潜航体激发海洋内波概述 [J]. *船舶物资与市场*, 2020(4): 7–8.
 - CHEN F Y, WANG D Y. An overview of internal waves induced by submersibles[J]. *Marine Equipment/Materials & Marketing*, 2020(4): 7–8 (in Chinese).
 - [19] 徐世昌, 姚雄亮. 分层流体中水平运动潜体产生的内波分析 [J]. *海军工程大学学报*, 2006, 18(4): 60–64.
 - XU S C, YAO X L. Internal waves generated by a horizontal moving submarine in a stratified fluid[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2006, 18(4): 60–64 (in Chinese).
 - [20] ROBEY H F. The generation of internal waves by a towed sphere and its wake in a thermocline[J]. *Physics of Fluids*, 1997, 9(11): 3353–3367.
 - [21] 邵武. 潜航体湍流尾迹特征及尾流热特性数值研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2023. doi: [10.26989/d.cnki.gdlhu.2023.001964](https://doi.org/10.26989/d.cnki.gdlhu.2023.001964).
 - SHAO W. Numerical research on turbulent wake characteristics and thermal characteristics of submarine wake[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023. doi: [10.26989/d.cnki.gdlhu.2023.001964](https://doi.org/10.26989/d.cnki.gdlhu.2023.001964) (in Chinese).
 - [22] 牛明昌, 丁勇, 马卫状, 等. 基于温度异重流模型的连续分层流数值模拟方法研究 [J]. *船舶力学*, 2017, 21(8): 941–949.
 - NIU M C, DING Y, MA W Z, et al. Research on the numerical simulation methods of continuously stratified flows based on thermal density current model[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2017, 21(8): 941–949 (in Chinese).
 - [23] 李宇航, 李广华, 侯冬冬, 等. 南海分层环境水下航行体内波尾迹水面响应特性研究 [J]. *力学学报*, 2024, 56(8): 2212–2230.
 - LI Y H, LI G H, HOU D D, et al. Surface signature characteristics of the internal wave generated by a submerged body in the South China Sea[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56(8): 2212–2230 (in Chinese).
 - [24] 李林杰, 赵彬彬, 段文洋. 海底物体运动生成内波问题研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44(9): 1487–1493.
 - LI L J, ZHAO B B, DUAN W Y. Investigation of the problem of internal waves generated by the movement of a seafloor object[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(9): 1487–1493 (in Chinese).
 - [25] 马卫状, 丁勇, 李云波, 等. 稳定分层流数值模拟方法及圆球绕流特征研究 [J]. *船舶力学*, 2020, 24(10): 1278–1287.
 - MA W Z, DING Y, LI Y B, et al. On the numerical methods of the stable stratified flows and wake characteristics around a sphere[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2020, 24(10): 1278–1287 (in Chinese).
 - [26] 吴炎, 李宇航, 陈科, 等. 温度分层流体中潜航器激发内波试验 [J]. *江苏科技大学学报 (自然科学版)*, 2022, 36(3): 1–9.

- WU Y, LI Y H, CHEN K, et al. Investigation on internal wave induced by an underwater vehicle in a thermally stratified fluid via experiments[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 36(3): 1-9 (in Chinese).
- [27] 闫大海, 张晗, 苗金林, 等. 潜艇隐身技术分析[J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(21): 128-133.
- YAN D H, ZHANG H, MIAO J L, et al. Research on submarine stealth technology[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(21): 128-133 (in Chinese).
- [28] 周根水, 姚志崇, 洪方文. 分层流体中尾流混合效应数值模拟[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2018, 33(1): 40-47.
- ZHOU G S, YAO Z C, HONG F W. Numerical research on the mixing of wake in stratified fluids[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics A*, 2018, 33(1): 40-47 (in Chinese).
- [29] 洪方文, 姚志崇, 高丽瑾, 等. 水下运动体体效应内波理论分析研究[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2012, 27(4): 471-477.
- HONG F W, YAO Z C, GAO L J, et al. Theoretical analysis of internal wave generated by an underwater moving body[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics A*, 2012, 27(4): 471-477 (in Chinese).
- [30] 赵先奇, 尤云祥, 陈科, 等. 分层流体中细长体生成内波的试验研究[J]. *上海交通大学学报*, 2009, 43(8): 1298-1301.
- ZHAO X Q, YOU Y X, CHEN K, et al. Experimental study on the generation of internal waves by a slender body in stratified fluid[J]. *Journal of Shanghai Jiao-tong University*, 2009, 43(8): 1298-1301 (in Chinese).
- [31] 侯建军, 李大伟, 高元博, 等. 层化环境下自由表面散度场的数值与实验研究[J]. *舰船科学技术*, 2022, 44(15): 60-65.
- HOU J J, LI D W, GAO Y B, et al. Numerical and experimental analysis of divergence of free surface in a stratified fluid[J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(15): 60-65 (in Chinese).
- [32] 陈科, 王宏伟, 盛立, 等. 拖曳体激发内波时空特性实验及其理论模型[J]. *物理学报*, 2018, 67(3): 034701.
- CHEN K, WANG H W, SHENG L, et al. Theoretical models and experiments for the time-space characteristics of internal waves generated by towed bodies[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(3): 034701 (in Chinese).
- [33] 张效慈, 张军. 潜艇内波波波迹——航空猎潜的新对象[J]. *船舶力学*, 2007, 11(4): 508-513.
- ZHANG X C, ZHANG J. Internal wave wake of submarine—a new target of aerial submarine hunting[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2007, 11(4): 508-513 (in Chinese).
- [34] 魏岗, 田俊杰, 杨建国. 潜航体内波水动力性能试验平台[C]//2009年船舶结构力学学术会议暨中国船舶学术界进入 ISSC30 周年纪念会论文集. 南京: 中国造船工程学会船舶力学学术委员会, 2009: 95-100.
- WEI G, TIAN J J, YANG J G. Experimental platform of Internal wave hydrodynamics on moving submerged body[C]//Proceedings of the 2009 Conference on Ship Structural Mechanics and the Commemorative Meeting for the 30th Anniversary of China's Shipbuilding Industry Entering ISSC. Nanjing: Ship Mechanics Academic Committee of China Shipbuilding Engineering Society, 2009: 95-100 (in Chinese).
- [35] 尤云祥, 魏岗, 胡天群. 船舶与海洋工程内波水动力学试验平台[C]//第七届全国实验流体力学学术会议论文集. 北戴河: 中国力学学会, 2007: 263-267.
- YOU Y X, WEI G, HU T Q. On the stratified fluid tank of the naval architecture and ocean engineering [C]//Proceedings of the 7th National Conference on Experimental Fluid Mechanics. Beidaihe: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2007: 263-267 (in Chinese).
- [36] 刘辉志, 梁彬, 朱凤荣, 等. 山谷中热力环流的水槽实验研究[J]. *自然科学进展*, 2003, 13(9): 1005-1008.
- LIU H Z, LIANG B, ZHU F R, et al. Water tank experimental study of thermal circulation in valleys[J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(9): 1005-1008 (in Chinese).
- [37] 段宁远. 分层流体中螺旋桨效应对潜航体内波影响特性实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- DUAN N Y. Experimental investigation on propeller effect on internal waves generated by a moving submarine in a stratified fluid[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018 (in Chinese).
- [38] 武军林. 斜向内孤立波与细长潜体相互作用的实验研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017. doi: [10.27052/d.cnki.gzjgu.2017.001056](https://doi.org/10.27052/d.cnki.gzjgu.2017.001056).
- WU J L. Experimental study on the interaction of oblique propagating internal solitary wave with a submerged slender body[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. doi: [10.27052/d.cnki.gzjgu.2017.001056](https://doi.org/10.27052/d.cnki.gzjgu.2017.001056) (in Chinese).
- [39] 郭海燕, 吴凯锋, 王飞, 等. 周期性内波对横置圆柱体作用的试验研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2016, 46(5): 111-118.
- GUO H Y, WU K F, WANG F, et al. Experimental investigations on the interaction of periodic internal waves with a horizontal cylinder[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2016, 46(5): 111-118 (in Chinese).
- [40] 牛猛. 分层流实验室造波系统的设计与开发[J]. *工程建设*, 2022, 5(12): 129-132.
- NIU M. Design and development of wave making system in stratified flow laboratory[J]. *Engineering Construction*, 2022, 5(12): 129-132 (in Chinese).
- [41] 王梓健, 范丹, 姚仁太. 拖曳式水槽模拟实验系统及实

- 验验证[J]. *辐射防护通讯*, 2016, 36(2): 17–22.
- WANG Z J, FAN D, YAO R T. An introduction to CIRP's towing tank simulation system[J]. *Radiation Protection Bulletin*, 2016, 36(2): 17–22 (in Chinese).
- [42] 吴炎, 李宇航, 陈科, 等. 温度分层流体中潜航器激发内波试验[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 36(3): 1–9.
- WU Y, LI Y H, CHEN K, et al. Investigation on internal wave induced by an underwater vehicle in a thermally stratified fluid via experiments[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 36(3): 1–9 (in Chinese).
- [43] 王泽航. 潜艇阵列运动生成大幅内波方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022.
- WANG Z H. Study on the method of generating large internal waves from submarine array motion[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2022 (in Chinese).
- [44] 杨立, 初明忠, 张健, 等. 潜艇尾迹内波的实验研究[J]. *船舶力学*, 2008, 12(1): 18–24.
- YANG L, CHU M J, ZHANG J, et al. Experimental investigation on internal wave produced by submarine[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2008, 12(1): 18–24 (in Chinese).
- [45] 魏岗, 赵先奇, 苏晓冰, 等. 分层流体中尾迹时间序列结构的实验研究[J]. *中国科学 G 辑: 物理学 力学 天文学*, 2009, 39(9): 1338–1347.
- WEI G, ZHAO X Q, SU X B, et al. Experimental study on time series structures of the wake in a linearly stratified fluid[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2009, 39(9): 1338–1347 (in Chinese).
- [46] 魏岗, 吴宁, 徐小辉, 等. 线性密度分层流体中半球体运动生成内波的实验研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(4): 044704.
- WEI G, WU N, XU X H, et al. Experiments on the generation of internal waves by a hemispheroid in a linearly stratified fluid[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(4): 044704 (in Chinese).
- [47] JANOWITZ G S. Lee waves in three-dimensional stratified flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1984, 148: 97–108.
- [48] 王进, 尤云祥, 胡天群, 等. 密度分层流体中不同长径比拖曳潜体激发内波特性实验[J]. *科学通报*, 2012, 57(8): 606–617.
- WANG J, YOU Y X, HU T Q, et al. The characteristics of internal waves excited by towed bodies with different aspect ratios in a stratified fluid[J]. *Chinese science bulletin*, 2012, 57(8): 606–617 (in Chinese).
- [49] 李万鹏, 魏岗, 杜辉, 等. 分层流体中螺旋桨效应激发内波的实验分析[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 15(6): 576–582.
- LI W P, WEI G, DU H, et al. Experimental study on internal wave generated by a propeller in a stratified fluid[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 15(6): 576–582 (in Chinese).
- [50] 刘双, 何广华, 王威, 等. 密度分层流中浅航艇兴波尾迹分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2021, 53(7): 52–59.
- LIU S, HE G H, WANG W, et al. Analysis on the wake of a shallow navigation submarine in the density-stratified fluid[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(7): 52–59 (in Chinese).
- [51] 苏焱, 吉健. 基于高精度 Boussinesq 方程的数值模拟潜艇尾迹[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(4): 99–103.
- SU Y, JI J. Numerical simulation of submarine wake based on high accuracy Boussinesq equation[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(4): 99–103 (in Chinese).
- [52] 缪宇跃, 孙江龙. CFD 敞水螺旋桨性能计算分析[J]. *中国舰船研究*, 2011, 6(5): 63–68.
- MIAO Y Y, SUN J L. CFD analysis of hydrodynamic performance of propeller in open water[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2011, 6(5): 63–68 (in Chinese).
- [53] 田畅, 夏林生, 付敏飞, 等. 潜艇伴流场对螺旋桨激振力的影响[J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(3): 111–121.
- TIAN C, XIA L S, FU M F, et al. Influence of wake field on propeller exciting force of submarine[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2023, 18(3): 111–121 (in Chinese).
- [54] HUANG F L, MENG Q J, CAO L S, et al. Wakes and free surface signatures of a generic submarine in the homogeneous and linearly stratified fluid[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 250: 111062.
- [55] CAO L S, GAO G, GUO E K, et al. Hydrodynamic performances and wakes induced by a generic submarine operating near the free surface in continuously stratified fluid[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2023, 35(3): 396–406.
- [56] 陆炜, 孙克帅, 姜胜超. 层化海洋环境下潜艇水下航行阻力及兴波数值研究[J]. *船舶工程*, 2021, 43(12): 69–76.
- LU W, SUN K S, JIANG S C. Numerical research on underwater navigation resistance and travel waves of submarine in stratified ocean environment[J]. *Ship Engineering*, 2021, 43(12): 69–76 (in Chinese).
- [57] 朱伟, 尤云祥, 缪国平, 等. 两层流体中运动物体的兴波特性[J]. *船舶力学*, 2004, 8(5): 1–9.
- ZHU W, YOU Y X, MIAO G P, et al. Wave-making characteristics of a moving body in a two-layer fluid[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2004, 8(5): 1–9 (in Chinese).
- [58] 张海伟, 尤云祥, 魏岗, 等. 两层粘性流体中运动球体

- 尾流的数值模拟 [J]. *上海交通大学学报*, 2007, 41(2): 194–198.
- ZHANG H W, YOU Y X, WEI G, et al. The numerical simulation for waves generated by a moving body in a viscous two-layer fluid[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2007, 41(2): 194–198 (in Chinese).
- [59] 罗恒. 粘性分层流中水下航行体尾迹在随机海面中的表现特征研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- LUO H. The surface wake generated by a submerged moving body in a stratified viscous fluid and its interaction with the stochastic ocean waves[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007 (in Chinese).
- [60] 张皓清, 杨立伟. 水下重力梯度导航中的潜艇尾迹影响分析 [J/OL]. *大地测量与地球动力学*, 2025: 1–7 (2025-03-27)[2025-05-03]. <https://link.cnki.net/doi/10.14075/j.jgg.2024.11.515>.
- ZHANG H, YANG L W. Analysis of submarine wake influence in underwater gravity gradient navigation [J/OL]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2025: 1–7 (2025-03-27)[2025-05-03]. <https://link.cnki.net/doi/10.14075/j.jgg.2024.11.515> (in Chinese).
- [61] 胡开业, 杨哲超, 于祥, 等. 分层流中附体对潜航体尾迹频谱特性影响研究 [J]. *舰船科学技术*, 2021, 43(17): 19–24.
- HU K Y, YANG Z C, YU X, et al. Influence of appendages on spectrum characteristics of submarine wake in stratified flow[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(17): 19–24 (in Chinese).
- [62] 杨哲超. 潜艇水动力尾迹特性与改善措施研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- YANG Z C. Research on the characteristics and improvement measures of submarine hydrodynamic wake[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021 (in Chinese).
- [63] 卢云涛, 张怀新, 潘徐杰. 全附体潜艇的流场和流噪声的数值模拟 [J]. *振动与冲击*, 2008, 27(9): 142–146.
- LU Y T, ZHANG H X, PAN X J. Numerical simulation of flow-field and flow-noise of a fully appendage submarine[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(9): 142–146 (in Chinese).
- [64] 何广华, 刘双, 张志刚, 等. 附体对潜艇兴波尾迹的影响分析 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2019, 47(10): 56–62.
- HE G H, LIU S, ZHANG Z G, et al. Analysis of influence of appendages on wave-making of submarine[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(10): 56–62 (in Chinese).
- [65] XIAO X, LIANG Q F, KE L, et al. Effects of X rudder area on the horizontal mechanical properties and wake flow field of submarines[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2095(1): 012089.
- [66] 梁秋凤, 叶金铭, 张露. 附体及尾操纵面对潜艇尾流场影响研究综述 [J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(10): 1–7.
- LIANG Q F, YE J M, ZHANG L. Summary of influence of appendage and tail control surface on submarine wake flow field[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(10): 1–7 (in Chinese).
- [67] 吴建威, 余昊成, 王赟, 等. 连续分层环境中 Suboff 激发的自由面尾迹数值仿真 [J]. *舰船科学技术*, 2021, 43(21): 20–26.
- WU J W, YU H C, WANG Y, et al. Numerical investigation of free surface wake excited by Suboff in continuously stratified fluid[J]. *Ship Science and Technology*, 2021, 43(21): 20–26 (in Chinese).
- [68] 李丹梦, 金伟其, 李力, 等. 水下运动目标的水面波纹数值模拟及分析 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1126004.
- LI D M, JIN W Q, LI L, et al. Numerical simulation and analysis of free-surface wake generated by moving submerged target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1126004 (in Chinese).
- [69] 于祥, 胡开业. 分层流中潜艇加减速对尾迹特征特性的影响 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(3): 67–77, 101.
- YU X, HU K Y. Influence of submarine's acceleration and deceleration on wake spectrum characteristics in stratified flow[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(3): 67–77, 101 (in both Chinese and English).
- [70] 丁勇, 段菲, 韩盼盼, 等. 两层流中潜体运动与诱发内波特征关系研究 [J]. *船舶力学*, 2016, 20(5): 523–529.
- DING Y, DUAN F, HAN P P, et al. Research on the relationship between moving patterns of submerged body and the features of induced internal waves in two layer fluid[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2016, 20(5): 523–529 (in Chinese).
- [71] 胡开业, 于祥, 丁勇. 分层流中潜艇下潜运动对尾迹特性影响研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44(1): 65–72, 108.
- HU K Y, YU X, DING Y. Research on the influence of submarine diving in stratified flow on the wake characteristics[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(1): 65–72, 108 (in Chinese).
- [72] 王兴茹. 潜艇尾流空间演化及流场特性仿真分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- WANG X R. Simulation of submarine wake evolution and flow field characteristics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 (in Chinese).
- [73] 黄璐. 潜艇近水面航行尾流空间演化分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- HUANG L. Spatial evolution analysis of wake of submarine sailing near water[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020 (in Chinese).
- [74] 于祥. 机动模式对潜艇水动力尾迹的影响研究 [D]. 哈

- 尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- YU X. Research on the influence of maneuver mode on submarine hydrodynamic wake[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021 (in Chinese).
- [75] 许英豪. 全附体潜艇海面映波及目标特性仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- XU Y H. Simulation research on sea surface reflection and target characteristics of full appendage submarine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021 (in Chinese).
- [76] 陈标, 高国兴, 徐世昌, 等. SAR 探测水下运动物体波浪尾迹的模拟研究[J]. *遥感技术与应用*, 2003, 18(1): 19–22.
- CHEN B, GAO G X, XU S C, et al. Simulation research of wave wake detect of underwater mobile using SAR[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, 18(1): 19–22 (in Chinese).
- [77] 李春升, 王伟杰, 王鹏波, 等. 星载 SAR 技术的现状与发展趋势[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(1): 229–240.
- LI C S, WANG W J, WANG P B, et al. Current situation and development trends of spaceborne SAR technology[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(1): 229–240 (in Chinese).
- [78] 贺丰收, 张涛, 芦达. 机载对海探测雷达发展趋势[J]. *科技导报*, 2017, 35(20): 28–35.
- HE F S, ZHANG T, LU D. Progress of airborne maritime detection radar[J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(20): 28–35 (in Chinese).
- [79] 高国兴, 王振占, 陈标, 等. 水下运动源内波尾迹海面作用量谱扰动分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2011, 41(12): 17–21, 68.
- GAO G X, WANG Z Z, CHEN B, et al. Analysis of the perturbation of oceanic surface action spectrum caused by internal-wave wake due to underwater moving object[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(12): 17–21, 68 (in Chinese).
- [80] 贾浩文. 复杂环境电磁散射建模与 SAR 成像研究[D]. 延安: 延安大学, 2024. doi: [10.27438/d.cnki.gyadu.2024.000336](https://doi.org/10.27438/d.cnki.gyadu.2024.000336).
- JIA H W. Research on electromagnetic scattering modeling and SAR imaging in complex scenes[D]. Yan'an: Yanan University, 2024. doi: [10.27438/d.cnki.gyadu.2024.000336](https://doi.org/10.27438/d.cnki.gyadu.2024.000336) (in Chinese).
- [81] 夏云青. 基于傅里叶变换的 SAR 图像舰船尾迹检测[J]. *舰船科学技术*, 2023, 45(23): 186–189.
- XIA Y Q. Ship wake detection in SAR images based on Fourier transform[J]. *Ship Science and Technology*, 2023, 45(23): 186–189 (in Chinese).
- [82] 徐世昌, 范植松. 运动潜体湍流尾迹的 SAR 遥感仿真研究[J]. *海军工程大学学报*, 2009, 21(2): 59–65.
- XU S C, FAN Z S. Simulation research of SAR remote sensing of turbulent wake of underwater moving body[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2009, 21(2): 59–65 (in Chinese).
- [83] 王佳坤. 运动舰船尾迹 SAR 成像的电磁散射机理和模型研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- WANG J K. Study on the scattering mechanism of ship wakes in SAR imaging[D]. Xi'an: Xidian University, 2017 (in Chinese).
- [84] 贾惠. Kelvin 尾迹的 SAR 成像及舰船参数估算研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2019.000512](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2019.000512).
- JIA H. Research on the SAR imaging and the estimation of ship parameters about Kelvin wake[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2019.000512](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2019.000512) (in Chinese).
- [85] 任杰. 基于合成孔径雷达的潜艇探测技术[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- REN J. Submarine detection technology based on synthetic aperture radar[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017 (in Chinese).
- [86] 车梦虎, 秦锋. 水下航行体机动兴波尾迹遥感探测概率研究[J]. *兵工自动化*, 2023, 42(2): 59–64.
- CHE M H, QIN F. Study on detection probability of maneuvering wave-making wake of underwater vehicle by remote sensing[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2023, 42(2): 59–64 (in Chinese).
- [87] 王乐天. 海洋目标尾迹电磁散射特性与 SAR 成像研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2020.003340](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2020.003340).
- WANG L T. Study on the electromagnetic scattering characteristics of wakes induced by marine targets and its SAR imaging[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. doi: [10.27389/d.cnki.gxadu.2020.003340](https://doi.org/10.27389/d.cnki.gxadu.2020.003340) (in Chinese).
- [88] 杨哲超, 任立群, 郅长红, 等. 海洋分层特征对合成孔径雷达图像内波尾迹可识别性的影响[J]. *中国舰船研究*, 2025, 20(3): 296–304.
- YANG Z C, REN L Q, ZHI C H, et al. Impact of ocean stratification characteristics on identifiability of internal wave trails in synthetic aperture radar images[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2025, 20(3): 296–304 (in Chinese).
- [89] 舒服. 高分辨率光学遥感影像舰船尾迹检测及运动参数估计方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021. doi: [10.27157/d.cnki.ghzku.2021.005678](https://doi.org/10.27157/d.cnki.ghzku.2021.005678).
- SHU F. Wake detection and motion parameters estimation in high-resolution optical image[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021. doi: [10.27157/d.cnki.ghzku.2021.005678](https://doi.org/10.27157/d.cnki.ghzku.2021.005678) (in Chinese).
- [90] 吴荣峰, 唐希源. 一种改进的 Mask R-CNN 卫星影像船舶尾迹检测方法[J]. *智能计算机与应用*, 2022, 12(2): 73–78.
- WU R F, TANG X Y. An improved satellite image ship wake detection method based on Mask R-CNN[J].

- Intelligent Computer and Applications*, 2022, 12(2): 73–78 (in Chinese).
- [91] 邬烨文. 一种基于小波变换的 SAR 图像舰船尾迹检测算法 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- WU Y W. Detection of ship wakes in SAR images based on wavelet transforms[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009 (in Chinese).
- [92] 陈捷, 陈标, 陶荣华, 等. SAR 图像海洋内波参数自动提取方法 [J]. 海洋技术学报, 2014, 33(6): 20–27.
- CHEN J, CHEN B, TAO R H, et al. An automatic extraction method of SAR images of ocean internal wave parameters[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2014, 33(6): 20–27 (in Chinese).
- [93] 贾延明, 张永涛. 基于 Hough 变换的舰船尾迹检测研究 [J]. 舰船科学技术, 2016, 38(4): 19–21.
- JIA Y M, ZHANG Y T. Research on ship wake detection based on Hough transform[J]. *Ship Science and Technology*, 2016, 38(4): 19–21 (in Chinese).
- [94] 姬渊, 付春龙, 毛丽, 等. 基于船只尾迹遥感特征的航向提取方法研究 [J]. *海洋测绘*, 2021, 41(1): 75–78.
- JI Y, FU C L, MAO L, et al. Research on directions extraction method based on remote sensing features of ship wake[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2021, 41(1): 75–78 (in Chinese).
- [95] 陈标, 侯海平, 陶荣华, 等. 舰船尾迹 SAR 图像特征的谱分析研究 [J]. *舰船科学技术*, 2008, 30(6): 95–98.
- CHEN B, HOU H P, TAO R H, et al. Study on the spectrum analysis of SAR image characteristic of ship wake[J]. *Ship Science and Technology*, 2008, 30(6): 95–98 (in Chinese).
- [96] 王志鹤, 行坤, 崔宁, 等. 一种基于 Radon 变换和尾迹模型的尾迹检测算法 [J]. *电子设计工程*, 2022, 30(12): 1–6.
- WANG Z H, XING K, CUI N, et al. A wake detection algorithm based on Radon transform and wake model[J]. *Electronic Design Engineering*, 2022, 30(12): 1–6 (in Chinese).
- [97] 周鹏, 石丽波, 张晰. 潜艇内波尾迹 SAR 成像模拟与检测方法研究 [J/OL]. *雷达科学与技术*, 2025: 1–8(2025-04-15)[2025-05-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1264.TN.20250414.1848.007.html>.
- ZHOU P, SHI L B, ZHANG X. Simulation and detection methods of submarine internal wave wakes in SAR imaging[J/OL]. *Radar Science and Technology*, 2025: 1–8(2025-04-15)[2025-05-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1264.TN.20250414.1848.007.html> (in Chinese).
- [98] 成媛媛. 基于无人机高光谱图像的舰船尾迹检测方法研究及应用 [D]. 大连: 大连海事大学, 2020. doi: 10.26989/d.cnki.gdlhu.2020.000456.
- CHENG Y Y. Research and application of ship wake detection method based on UAV hyperspectral image[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020. doi: 10.26989/d.cnki.gdlhu.2020.000456 (in Chinese).
- [99] 徐东, 杨健, 徐亚范. 基于机器学习的 SAR 图像目标识别方法研究 [J]. *微电子学与计算机*, 2004, 21(7): 110–111, 146.
- XU D, YANG J, XU Y F. Method and study of machine learning based SAR image target recognition[J]. *Microelectronics & Computer*, 2004, 21(7): 110–111, 146 (in Chinese).
- [100] 刘倩倩, 李轲. 基于深度学习的水下目标尾迹探测技术研究 [J/OL]. *光通信研究*, 1-8 4-06-11]. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认) LIU Q Q, LI K. Research on wake detection of underwater target based on deep learning technology [J/OL]. *Study on Optical Communications*, 1-8[2024-06-11] (in Chinese).
- [101] 马帅, 王勋龙, 王丽, 等. 海上试验场建设现状分析及经验借鉴 [J]. *中国工程咨询*, 2023(4): 46–51.
- MA S, WANG X L, WANG L, et al. Analysis of the current status and experience in the construction of offshore test sites[J]. *China Engineering Consultants*, 2023(4): 46–51 (in Chinese).

A review of hydrodynamic wakes research on submerged bodies

TANG Xiangyu¹, MIAO Yuyue², XIA Linsheng^{2*}, CHEN Liang², HAN Yang³, SUN Jianglong⁴, TU Haiwen^{***}

1 College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China

2 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

3 College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

4 School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: Research on hydrodynamic wakes of submerged bodies is crucial for optimizing non-acoustic stealth and enhancing anti-submarine detection. This review covers the types, characteristics, experimental and

numerical methods, and SAR technology applications in wake detection. **Types and Characteristics:** Hydrodynamic wake studies, dating back to the early 20th century, focus on complex fluid structures influenced by environmental factors like waves, temperature gradients, and water density stratification. Advances in CFD and experimental techniques have improved simulations and observations of these wakes. Wakes are categorized into surface waves ("V"-shaped and Bernoulli humps), turbulent wakes, and internal wave wakes, each influenced by different physical interactions. **Experimental and Numerical Methods:** Water tunnel experiments and numerical simulations are key research tools. Experiments provide direct observations of wake formation, while simulations offer flexible analysis of complex flow fields. Combining these methods offers comprehensive insights into wake dynamics. **SAR Technology:** SAR technology has revolutionized wake detection in complex maritime environments. It offers all-weather detection, passive modes, and wide-area coverage but faces limitations due to radar parameters, sea conditions, cost, and technical barriers. **Future Directions:** Future research should integrate numerical simulations, lab experiments, and field validation to enhance weak wake detection using deep learning, improving generalizability with limited data. This will optimize submerged body design, reduce costs, and enhance stealth performance.

Key words: submerged body; wakes; hydrodynamic wakes; wake detection; SAR; experimental methods; numerical simulations