

【引用格式】李晨, 陈帅, 谢涛涛. 采用泵喷补偿技术的近底拖体水压场数值模拟研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(2): 195-199.

采用泵喷补偿技术的近底拖体水压场数值模拟研究

李晨¹, 陈帅², 谢涛涛³

- 海军装备部驻宜昌地区军事代表室, 湖北 宜昌 443003;
- 中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;
- 海军工程大学 兵器工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要 采用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 结合 Fluent 软件, 对采用泵喷补偿技术的拖体水下被拖行运动所产生的压力场变化进行了数值模拟实验。结果表明: 采用泵喷补偿技术对拖体水压场的“马鞍形”分布特性影响较小, 但随着喷水速度的增加, 拖体首端压力负值略有增加, 而中段的负峰幅值显著增加, 当喷水速度达到一定值后, 拖体的压力特性曲线已经较为接近期望值, 证明泵喷补偿技术具有一定的可行性。

关键词 泵喷技术; 近底拖体; 水压场; 数值模拟

中图分类号 TP274; 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2024)02-0195-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.02.008

Numerical Simulation of Hydraulic Pressure Field of Near-bottom Towed Body Using Pump Spray Compensation Technology

LI Chen¹, CHEN Shuai², XIE Taotao³

- Military Representative Bureau of the Naval Armaments Department in Yichang, Yichang 443003, China;
- No.710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China;
- College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract In this paper, by using standard $k-\varepsilon$ model and Fluent software, numerical simulation experiments are carried out to simulate the changes of pressure field generated by the underwater towing motion of a towed body using pump spray compensation technology. The results show that the use of pump spray compensation technology has little influence on the saddle-shaped distribution characteristics of the water pressure field of the towed body, but with the increase of the water spraying speed, the negative pressure at the head of the towed body increases slightly, while the negative peak amplitude in the middle section increases significantly. When water spraying speed reaches a certain value, the pressure characteristic curve of the towed body is close to the expected value, which proves that the pump spray compensation technology is feasible.

Key words pump spray technology; near-bottom towed body; hydraulic pressure field; numerical simulation

0 引言

水下舰艇推进装置通常为螺旋桨、导管螺旋

桨、对转螺旋桨和泵喷推进器等, 随着水下声探测技术的迅速发展, 水下对抗愈演愈烈, 在保证水下舰艇运动速度的前提下, 如何降低辐射噪声、提高

平台的隐身性能成为了当下研究热点。

泵喷推进器（简称泵喷）是一种多部件组合式水动力推进装置，由导管及导管内的旋转叶栅（转子）和静止叶栅（定子）组成具有高临界航速、重载、高效率 and 低辐射噪声等特点。最早于 20 世纪中叶在国外出现，初期主要用于鱼雷推进，后拓展到潜艇推进。目前国外潜艇、高速鱼雷普遍采用泵喷推进。相比传统的螺旋桨推进受制于水动力和空化噪声，导致隐身性能不佳，泵喷推进可以有效降低舰艇辐射噪声，使得其隐身性能大幅提升。

目前，水下武器主要通过探测舰艇产生的物理场，包括磁场、电场、声场、重力场、水压场等（包含了大量舰船类别信息）来实现对舰船的探测与识别^[1-4]。近年来，随着舰船目标探测识别技术的迅速发展，以及多物理场联合探测识别技术的应用，复杂背景环境下的舰船目标也可被探测识别。因此，如何减小舰船本身的物理场，降低舰船目标的可探测性，从而提高舰船生存性也成为了研究的热点。从相反的思路出发，隐身也可以通过使用外部设备（如水下诱饵），在无法降低部分固有物理场量级的情况下，通过增大诱饵的物理场信号并使其符合实际舰船物理场的特性，就可以实现对水中武器的诱骗^[5-8]，从而实现舰艇的隐身，提高战场生存性。

从技术手段来讲，声场、磁场的模拟技术已经较为成熟，国内外现役扫雷具也以模拟舰船声场和磁场为主。船舶水压场是航行船舶在水中引起的压力变化，受制于舰船水压场压力变化幅值较大且与航速密切相关、信号频率较低等特性，导致舰船水压场模拟较为困难^[9-13]，而拖曳一个大的物体难以产生可控的水压场，所以水压场模拟技术的开发迄今也未达到最终的功能状态，因此世界上各海军强国在水下对抗中常以水压场信号作为水下武器动作依据。如何使用水下小型平台模拟舰艇目标水压场特征信号，是本文研究内容。文献[14]对垂直高度距海床 10 m 的细长拖体对海底的水压场进行了理论计算，计算得负峰幅值约在 200 Pa 左右，结果表明，使用体积较小的拖体可在一定的水线倍长范围内模拟较大舰船的水压场，从而诱使水压引信动作。

水压场的压力变化与舰船的航速密切相关，在

原理上，只要在低傅汝德数的范围内给予舰船周围流体足够的流速，就可以实现以小仿大。但因为舰船所需功率与其航速的平方成正比^[15]，所以在实际工程中，单纯依靠增加舰船航速来增大水压场不现实。因此通过以泵喷的形式，实现在不增加舰船自身航速的前提下，增大船身周围流体的流速，从而实现“以小仿大”。

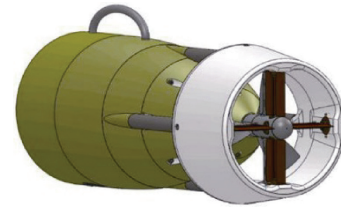


图 1 泵喷推进系统图

Fig. 1 Pump jet propulsion system diagram

本文提出一种泵喷补偿技术，并利用数值模拟方法进行研究。

1 理论公式与数值模型

1.1 理论公式

本文采用 $k-\varepsilon$ 模型^[16]，结合 Fluent 软件，对泵喷增速细长拖体在水下运动所产生的压力场变化进行了数值模拟。

标准 $k-\varepsilon$ 模型是求解时均化 Navier-Stokes 方程中 Reynolds 应力项的一种湍粘模型，是湍流模型中 Reynolds 平均法（RANS）的一种。标准 $k-\varepsilon$ 模型中 μ_t （湍动粘度）的确定是关键，需要根据湍流动能和耗散方程来确定。标准 $k-\varepsilon$ 模型不考虑分子粘性，并且假定流动发展为完全湍流。

模型中湍动耗散率 ε 被定义为

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \quad (1)$$

式中： μ_t （湍动粘度）表示 k 和 ε 的函数，即

$$\mu_t = \rho C_\rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

式中， C_ρ 为经验常数。

标准 $k-\varepsilon$ 方程中，求解 k 和 ε 的输送方程如下：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_h - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中: G_k 表示湍动能 k (平均速度梯度导致) 的产生项; G_b 表示湍动能 k (浮力产生) 的产生项; Y_M 表示脉动扩张项 (可压缩); $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $G_{3\varepsilon}$ 由经验数值确定; σ_k 和 σ_ε 表示 Prandtl 数 (湍动 k 和耗散率 ε); S_k 和 S_ε 表示自定义项。各项的计算公式和经验常数如下:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \mu_t = \rho C_\mu \sqrt{k} l \quad (5)$$

在标准 $k-\varepsilon$ 模型中, 模型常数 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $G_{3\varepsilon}$ 、 σ_k 和 σ_ε 的取值为

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, \quad C_{2\varepsilon} = 1.92, \quad G_{3\varepsilon} = 0.09, \\ \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

对于不可压缩流动且没有用户自定义源项时, 标准 $k-\varepsilon$ 模型变为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

1.2 数值模型

本文拖体模型以文献[14]所提出的细长拖体为基准, 增加泵喷管喷水设计, 拖体全长 20 m, 中段为半径 1 m 的圆柱体, 首尾为半径 1 m 的半球体, 对使用泵喷补偿后垂直高度距海床 20 m 的拖体对海床的水压场进行研究。

为减少网格数量, 缩短计算时间, 本次计算仅使用细长拖体的 1/4 模型进行计算, 采用正四面体网格进行网格划分, 环境计算域为 50 m×30 m×20 m (长×宽×深) 的长方体区域, 文献[17]–[18]进行的是理论计算, 而本文采用的是数值计算, 需要重新设置部分环境参数, 所以先对模型设计计算结果进行验证, 环境参数模型验证无误后, 通过后

再代入新设计模型进行计算。

计算时仅设定了拖体喷水速度分别为 7 m/s、14 m/s、21 m/s, 其余环境变量与网格划分情况均一致, 因此只展示采用 7 m/s 的计算域模型图, 其余模型图不再重复, 计算域模型图如图 2 所示。

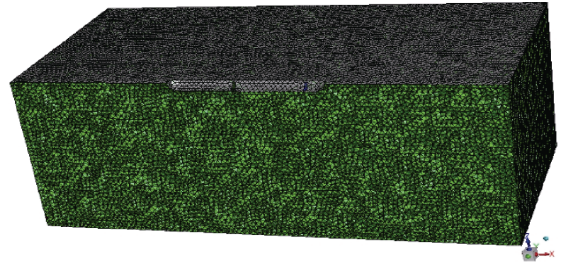


图 2 计算域模型

Fig. 2 Computational domain model

边界条件设置方面设定底、顶、左右边界均为壁面边界, 拖体外表面为壁面边界, 拖体喷水出水口为速度出口, 分别按 7 m/s、14 m/s、21 m/s 设置^[10], 考虑重力影响, 重力加速度值设置为 9.8。求解时选择基于压力求解器求解, 湍流模型选取 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 根据以上条件对 4 组实验进行了数值模拟。

2 拖体水压场分布特征及压力分析

2.1 拖体对照组水压场分布特性

由距海床 10 m 无变化对照组结果图 3 可知, 拖体水压场特性曲线相较文献[19]吻合度较好, 因此, 后 3 组实验环境变量均可与对照组相同。

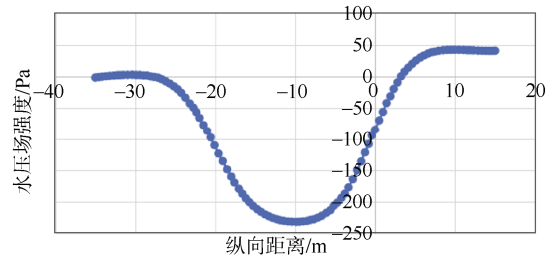


图 3 距海床 10 m 无变化对照组的水压场分布特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of hydraulic pressure field distribution of a control group with no change at a distance of 10 m from the seabed

无泵喷能力的拖体水压场纵向特性曲线具有较为明显的规律性: 在拖体首、尾部压力有一个低幅正峰值, 而在拖体的中部则有一个高幅负峰值。

2.2 使用泵喷补偿后的拖体水压场特性

在使用对照组的环境变量参数后, 分别对使用 7 m/s、14 m/s、21 m/s 泵喷补偿喷水速度的拖体进行了数值模拟, 提取得拖体水压场数据并相应进行分析。

图 3 为 7 m/s、14 m/s、21 m/s 喷水速度下拖体在其下 20 m 处海床的水压场特性数值模拟结果图, 由图可知, 无论泵喷补偿喷水速度如何变化, 拖体水压场总体呈“马鞍形”分布特点, 首、尾附近 2 处低幅正峰与拖体中部的高幅负峰位置基本没有变化, 且变化趋势较为接近。差别主要体现在正、负峰峰值的变化。

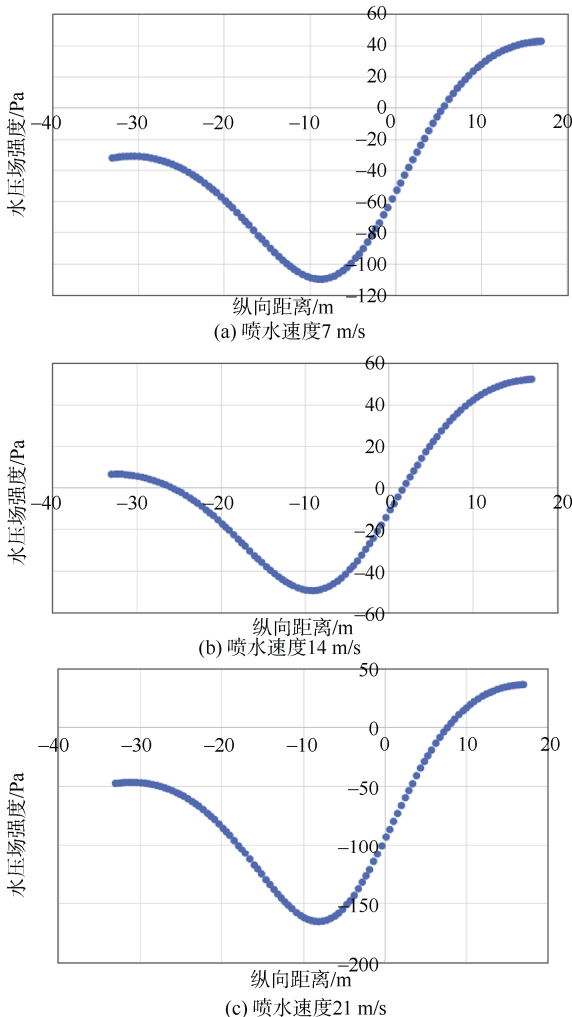


图 4 不同喷水速度泵喷拖体水压场分布特性曲线
Fig. 4 Characteristic curves of hydraulic pressure field distribution of a towed body with pump jet propulsion system at different spray speeds

为了进一步分析不同喷水速度对拖体水压场

影响程度, 图 5 将 4 组数值实验水压场强度随纵向距离的分布情况进行了汇总。由图可明显看出, 不同喷水速度对拖体水压场有较大影响, 水压场负峰强度随喷水速度的增加而增强, 当拖体喷水速度为 7 m/s 时, 负峰强度仅为 50 Pa, 当喷水速度达到 21 m/s 时, 则增加至 170 Pa 左右, 强度显著增加; 且拖体首端的水压场负峰强度值随喷水速度的增加而少量增加, 从 0 增至 50 Pa。显然, 以泵喷的形式, 可以实现在不增加舰船自身航速的前提下, 增大船身周围流体的流速, 从而实现“以小仿大”, 为水压场特征信号的仿真提供了一种新的思路。

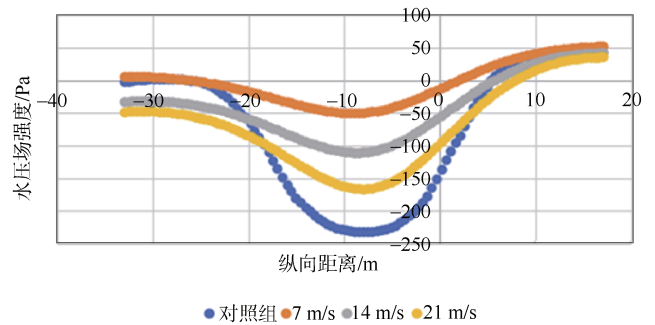


图 5 不同喷水速度泵喷拖体水压场分布特性曲线汇总
Fig. 5 Summary of characteristic curves of hydraulic pressure field distribution for a towed body with pump jet propulsion system at different spray speeds

3 结束语

本文利用 Fluent 软件对带泵喷补偿技术的近底拖体水压场进行了数值模拟研究。首先通过设置对照组进行数值模拟计算, 对照文献[14]进行数据验证, 获得合理的环境参数, 而后利用对照组所取得的环境参数, 分别对喷水速度 7 m/s、14 m/s、21 m/s 的拖体于其下 20 m 处海床的水压场进行了 3 组数值模拟实验, 得出以下结论:

1) 采用泵喷补偿技术对拖体的水压场变化趋势影响不大, 不论喷水速度如何变化, 拖体水压场基本保持了“马鞍形”的分布特点, 负峰极值点基本都保持于拖体几何中心附近, 拖体首、尾两端变化趋势也基本一致。

2) 采用泵喷补偿技术对拖体水压场的数值大小有一定的影响, 随着喷水速度的增加, 拖体首端的压力负值略有增大, 而中部的负峰幅值有显著

增强, 由喷水速度 7 m/s 时不足期望值的 1/4, 增长到 21 m/s 时超过期望值的 4/5, 可以预计, 当喷水速度进一步加大时, 负峰幅值可进一步增强。

3) 由上文可知, 使用泵喷补偿技术的近底拖体来模拟其他航行体的水压场具有一定的可行性, 但本研究在其他方面仍存在许多问题, 值得深究, 包括但不限于数值试验次数过少; 在使用泵喷补偿时只约束了拖体喷水速度, 而没有在喷水流量、喷口面积、喷水方向、实际所需功率上做更多研究; 对为什么拖体首端负值会随着拖体喷水速度增加而略有增加, 这些问题值得进一步进行研究。

参考文献

- [1] 蔡鹏. 水雷引信技术: 水雷引信技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [2] 王毅刚, 侯发林, 罗晓强. 自航水雷作战效能分析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2019, 2(3): 47-50.
- [3] WISSINK J G. DNS of separating, low Reynolds number flow in a turbine cascade with incoming wakes[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(4): 626-635.
- [4] 林春生, 龚沈光, 程锦房, 等. 水雷引信系统设计原理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2013.
- [5] NAUNG S W, NAKHCHI M E, RAHMATI M. Prediction of flutter effects on transient flow structure and aeroelasticity of low-pressure turbine cascade using direct numerical simulations[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 119: 107-151.
- [6] 宋利伟, 贾连徽. 潜体水压场数值模拟[C]//中国船舶重工集团公司第七六〇研究所水中测控技术重点实验室. 2016年中国造船工程学会水中目标特性学组学术交流会论文集. 大连: 声学技术, 2016.
- [7] 马振富, 孙云鹏, 黄鹏飞, 等. 潜艇水压场及其判别方法的数值模拟研究[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(2): 67-73.
- [8] ZHU H B, PANG X Y, WU F, et al. High fidelity numerical simulations on the unsteady flow field of low-pressure turbine cascades with and without upstream disturbance at moderate Reynolds number[J]. Advances in Aerodynamics, 2022, 4(11): 42774.
- [9] 姜润翔, 史建伟, 李俊, 等. 舰船水压场信号实时检测方法研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2010, 34(1): 146-149, 166.
- [10] 王嘉睿, 姜润翔, 张伽伟, 等. 舰船低频水压场特征分析及其探测技术研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(9): 143-148.
- [11] DENG H, WANG K B, ZHANG Z H, et al. A modeling and comparative study of bottom pressure signals generated by waves and ship in shallow water[J]. Ocean Engineering, 2022, 263: 112399.
- [12] 邓辉, 张志宏, 易文彬, 等. 有界流场中潜艇水压场特性的预报方法和重要特征[J]. 兵工学报, 2024, 45(2): 527-540.
- [13] BIELANSKI J, LISTEWNIK K. Comparison between measured and calculated underwater pressure of merchant ship[J]. Hydroacoustics, 2015, 18: 7-16.
- [14] 张新国, 刘忠乐. 近底拖曳拖体的水压场计算方法研究[J]. 水雷战与舰船防护, 2011, 19(4): 16-20, 64.
- [15] 马帅. 船体形状对骑浪/横甩薄弱性影响分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2023.
- [16] 李德顺, 马国林, 郭涛, 等. 基于 $k-\varepsilon$ 模型的剪切流中湍流动能衰减规律研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2021, 49(9): 83-87.
- [17] 马振富, 孙云鹏, 黄鹏飞, 等. 潜艇水压场及其判别方法的数值模拟研究[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(2): 67-73.
- [18] 孙帮碧, 张志宏, 刘巨斌, 等. 浅水航道舰船水压场理论解及其计算[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(4): 11-16.
- [19] 郑安宾, 胡举喜, 田忠殿. 船舶喷水推进介绍及设计方法[J]. 船舶工程, 2019, 41(S2): 156-159.

(责任编辑: 肖楚楚)