

【引用格式】代笠, 崔凯兴, 陈海强, 等. 一种十字型鳍 X 型舵布局 UUV 流体动力特性分析[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8(1): 69-74.

一种十字型鳍 X 型舵布局 UUV 流体动力特性分析

代笠¹, 崔凯兴¹, 陈海强², 常开应², 黄 嫣³

- (1. 海装广州局, 广东 广州 510000;
2. 昆明船舶设备集团有限公司, 云南 昆明 650000;
3. 北京动力机械研究所, 北京 100074)

摘要 无人水下航行器 (Unmanned Underwater Vehicles, UUV) 的鳍舵布局形式是 UUV 总体设计过程中的重要组成部分, 直接决定着 UUV 的航行性能。研究了一种十字型鳍 X 型舵布局下 UUV 的流体动力特性, 建立了 UUV 流体动力计算流程, 包括几何建模、网格划分和流体动力仿真的基本方法, 分析了十字型鳍 X 型舵布局 UUV 本体的流体动力特性。研究结果表明: 十字型鳍 X 字型舵布局 UUV 的平衡攻角和平衡舵角均满足设计要求, 是一种有效的操纵面布局形式。

关键词 无人水下航行器; 鳍舵布局; 流体动力特性

中图分类号 TJ630

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2025)01-0069-06

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.01.009

Analysis of Hydrodynamic Characteristics of UUVs with Cross-fin/X-rudder Layout

DAI Li¹, CUI Kaixin¹, CHEN Haiqiang², CHANG Kaiying², HUANG Yan³

- (1. Guangzhou Bureau, Guangzhou 510000, China;
2. Kunming Shipbuilding Equipment Co., Ltd., Kunming 650000, China;
3. Beijing Institute of Power Machinery, Beijing 100074, China)

Abstract The fin-rudder layout of unmanned underwater vehicles (UUVs) is an important part of UUV overall design, which directly determines the navigation performance of the UUV. The fluid dynamic characteristics of UUVs with cross-fin/X-rudder layout are studied in this paper. The UUV hydrodynamic calculation flow is established, including the basic methods of geometric modeling, grid division and hydrodynamic simulation. The hydrodynamic properties of the UUV with cross-fin/X-rudder layout are analyzed. The research results show that the equilibrium angle of attack and equilibrium rudder angle of the UUV meet the design requirements, and it is an effective layout for surface control.

Key words unmanned underwater vehicle; fin-rudder layout; hydrodynamic characteristic

0 引言

近年来, 无人对抗技术成为世界各国军事武器

的研究重点。作为海洋装备的重要组成部分, UUV 被广泛应用于海底测绘、海洋环境监测、海洋资源开发、水下障碍物搜索定位等场景^[1-3]。诸多用途

使其成为世界各国争相研制的热点装备。

UUV 的鳍舵布局形式是整个设计过程中的重要组成部分,是 UUV 外形特性的直观表现,是 UUV 外形特征最明显的标志。同时,鳍舵布局设计的好坏决定着 UUV 的流体动力性能和航行特性。UUV 上相继出现了多种多样的鳍舵布局,如十字型、T 型、木字型、X 型等鳍舵布局^[4-5]。T 型和木字型鳍舵布局最早出现在潜艇上,随着操纵性研究的深入,这 2 种鳍舵布局形式逐渐被替代。

十字型是目前应用最多、发展最完善的鳍舵布局。2019 年亮相的俄罗斯“贝尔格罗德”号核潜艇及它搭载的“波塞冬”号 UUV^[6]、“大键琴”UUV 均为十字型鳍舵布局。X 型舵布局有效增大了舵的沾湿表面积,使其具有较大的操纵力矩。美国最新的战略核潜艇“哥伦比亚”级核潜艇^[7]采用 X 型尾舵,与传统十字型尾舵相比,其舵面积更大,且每个舵叶均具有垂直和水平操纵能力,通过联合控制使得舵的受力更加均匀^[8]。国内在 UUV 鳍舵布局方面也开展了相关的工作,张露等人^[9]与胡芳芳^[10]等人通过 CFD 数值方法分别计算了十字型舵和 X 舵的操纵性水动力,定量地比较了在舵面积相等的情况下 2 种舵的水动力性能。李雨田等人^[11]通过梳理国内外 UUV 操纵性设计及其流体动力布局方案,分析了各类鳍舵布局的特点,为总体及操纵性设计提供了参考。曹植珺^[12]等人利用 CFD 方法对某十字舵与 X 舵航行器在不同工况下进行数值仿真,比较研究了 2 种操纵面稳定性差异。

在水下航行器高速运动过程中,良好的操纵性能是航行器具有较强的航向控制能力和姿态改变能力的基础^[13-14]。X 型全动舵可提高航行器的机动能力,但稳定性有所降低;十字型鳍可提高航行器的稳定性,但机动能力有所降低。随着 UUV 的发展,越来越多的 UUV 开始使用如十字型鳍和 X 型舵相结合的鳍舵布局来提高 UUV 的机动性和稳定性。美国研制出的 MK48 系列鱼雷的鳍板延周向呈十字型布置,舵板呈 X 型布置,鳍舵呈 45° 夹角。相较于后缘舵布局的鳍、舵处于同一平面,十字型鳍 X 型舵布局减小了鳍对舵的干扰,有利于提高舵效并减小阻力,具有十分优越的性能。因此,对于十字型鳍 X 型舵布局 UUV 的流体特性的研究具有重要的意义。张锐^[15]等人对 X 形全动舵十字形鳍布局高速水下航行器的操纵

性进行了研究,结果表明:X 形全动舵十字形鳍布局的高速水下航行器纵平面稳定度和侧平面的动稳定度均在 0.4 以上,具有良好的操纵稳定性与机动能力。

针对十字型鳍 X 型舵布局 UUV 的流体动力特性问题,本文建立了 UUV 流体动力计算流程,包括几何建模、网格划分和流体动力仿真的基本方法,通过分析 UUV 的流体动力参数及航行特性,确立了十字型鳍 X 型舵布局 UUV 的设计要求。研究结果表明:十字型鳍 X 型舵布局 UUV 的平衡攻角、平衡舵角和纵向动稳定度均满足设计要求,是一种有效的操纵面布局形式。

1 UUV 流体动力计算流程

1.1 计算流体力学基本理论

UUV 流体动力特性研究本质上是粘性不可压缩流动问题,因此需要利用 N-S 方程对其进行分析求解。控制方程包括连续性方程和 N-S 方程,其具体公式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right] = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体的密度; t 为时间; \mathbf{V} 为流体的速度矢量; \mathbf{g} 为重力加速度; p 为压力; μ 为动力粘性系数; ∇^2 为拉普拉斯算子。

对于不可压缩流动问题, $\partial \rho / \partial t = 0$ 连续性方程 (1) 可以表示为

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

式中, u 、 v 、 w 分别为速度 \mathbf{V} 在 x 、 y 、 z 3 个方向上的分量。

由于 N-S 方程中的粘性项中含有二阶导数项,使得获得方程的精确解较为困难,因此很多近似模型被用以进行数值迭代求解。目前,求解 RANS 方程成为了解决工程问题最普遍的方式。RANS 方程的核心思想是将瞬时变化的湍流表示成时间平均和波动的集合^[16],通常使用 SST $k-\omega$ ^[17] 模型以封闭 RANS 方程求解过程带来的雷诺应力项。

1.2 UUV 模型建模

UUV 外形主要由主体、鳍、舵、推进器等组成,一般采用回转体作为主体结构。本文采用 MK46 本体以及十字型鳍 X 型舵的进行计算,雷体

本体的总长度为 2 790 mm, 最大直径为 324 mm。十字型鳍弦长为 240 mm, 距前端面距离为 2 220 mm。X 型舵弦长为 160 mm。十字型鳍 X 型舵布局在十字型鳍后缘舵 UUV 的基础上, 将舵板绕周向旋转 45° 得到。十字型鳍 X 型舵布局 UUV 的具体布局形式如图 1 所示。

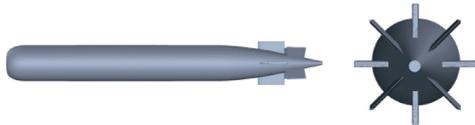


图 1 十字型鳍 X 型舵 UUV 的布局形式
Fig. 1 Layout of UUV with cross-fin/X-rudder

1.3 UUV 网格划分及计算方法

1.3.1 网格划分

在流体动力计算前, 首先要对 UUV 的计算区域完成网格划分。本文使用 ICEM 非结构化网格对 UUV 外形外流场进行划分, 在 UUV 本体附近进行网格加密并在表面生成边界层网格以精确捕获表面流动, 通过网格无关性验证发现计算域网格在 400 万左右能满足精度需求, 且不会耗费太多的计算资源, 如表 1 所示, 因此采用中等网格开展本研究数值计算。数值结果与 MK46 模型^[18]的实验结果 0.094 9 进行对比, 误差为 2.1%, 在接受范围内, 表明所采用数值算法具有较高的准确性。UUV 流体计算域具体剖分结果如图 2 所示。

表 1 UUV 网格无关性验证
Table 1 UUV grid independence verification

网格类型	网格数	阻力系数	与细致网格结果对比
稀疏网格	3 000 000	0.091 1	0.020 4
中等网格	4 000 000	0.092 9	0.001 1
细致网格	6 000 000	0.093 0	—

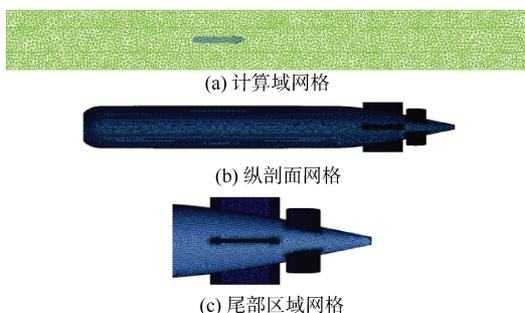


图 2 网格划分结果
Fig. 2 Grid division results

1.3.2 边界条件的设置

UUV 流体计算域是一个长 27.9 m、宽 3.24 m、高 3.24 m 的长方形区域, 如图 3 所示。入口处在流体分析时采用速度入口, 来流速度设置为航速, 湍流强度 5%, 为了计算不同攻角下的升力系数, UUV 攻角变化分别为 2°、4°及 6°, 对应于边界条件的设置即为 UUV 速度分量的变化; 出口边界设置为压力出口, 取平均相对静压为 0; 壁面设置为滑移壁面, UUV 表面为无滑移壁面。计算时控制迭代步为 1 200 步, 残差设置为 1e-6, 采用 SIMPLEC 算法进行计算求解。

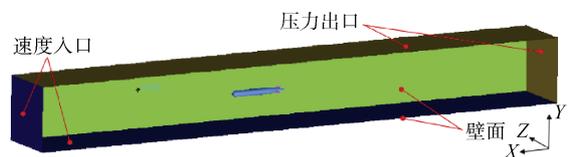


图 3 UUV 流体计算边界条件
Fig. 3 UUV fluid calculation boundary conditions

2 十字型鳍 X 型舵流体动力特性分析

2.1 流体动力参数

UUV 以速度 v 和流体动力攻角 α 、侧滑角 β 做定常直线平移运动时的力和力矩, 分别称为航行器的流体位置力和位置力矩, 它们是 UUV 流体动力的主要组成部分^[18], 本文主要分析阻力、升力、俯仰力矩等流体动力参数。

2.2 UUV 航行特性

1) 平衡攻角和平衡舵角。

UUV 作定常水平直线运动时, 根据力与力矩的平衡方程可以得到 UUV 的攻角和水平舵角, 称为平衡攻角 α_0 和平衡舵角 δ_{h0} 。

平衡攻角与平衡舵角都不宜过大。平衡攻角应越小越好, 以降低 UUV 的航行阻力。平衡舵角也越小越好, 有利于增强 UUV 的操纵性。

2) 纵向动稳定度。

UUV 保持运动状态的能力称为运动的稳定性。若 UUV 的运动在受扰动后, 能够随着时间的推移恢复到原来动的运动状态, 则称 UUV 的运动是稳定的, 反之是不稳定的。

纵向动稳定度 G 的取值范围为

$$0 < G < 1 \quad (4)$$

因此, UUV 鳍舵布局设计目标是: 平衡攻角和

平衡舵角越小越好，纵向动稳定度范围在 0~1 之间。

3 流体动力性能分析

十字型鳍 X 型舵中的 X 型舵是指 4 个尾舵在径向上呈 X 形正交布置方式，UUV 的纵中对称面和舵轴中心线成 45° 夹角。为了便于分析，首先需要对舵的各分舵舵角正负号作统一规定。如图 4 所示， δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 皆规定向右打舵为正，左舵为负。由于每个舵板的偏转都能改变 UUV 的航向和深度，所以必须采用 4 个舵板综合控制。

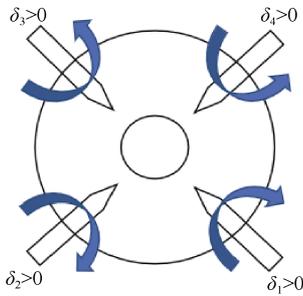
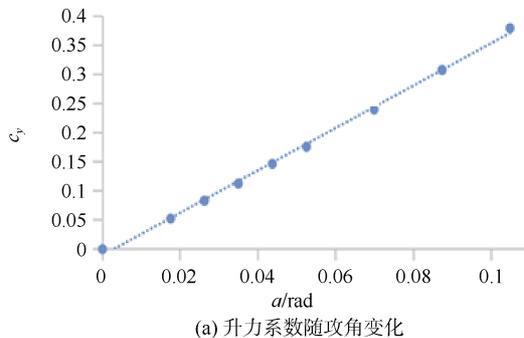


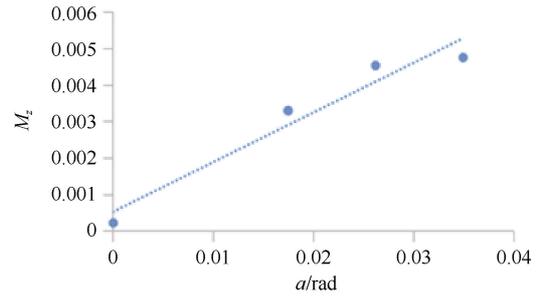
图 4 舵的正负号规定

Fig. 4 Positive and negative sign regulations of rudders

在攻角 α 为 2°、4° 以及 6° 时分别计算 UUV 的流体动力参数，得到 UUV 鳍舵布局随攻角变化的升力系数和俯仰力矩系数。如图 5 所示，在攻角范围 0°~2° 内，升力系数与攻角的关系呈良好的线性趋势，而当攻角大于 2° 时，俯仰力矩系数的非线性可能会导致 UUV 的操纵性复杂化。因此，选择 0°~2° 度攻角变化范围进行线性化处理，以简化计算并便于通过位置导数分析 UUV 的纵向动稳定性，得到升力系数随攻角变化的位置导数为 3.645 4，俯仰力矩系数随攻角变化的位置导数为 0.136 1。位置导数描述了流体动力系数对几何参数变化(如攻角、舵角)的敏感性，是衡量航行器流体动力响应的一种重要指标。



(a) 升力系数随攻角变化

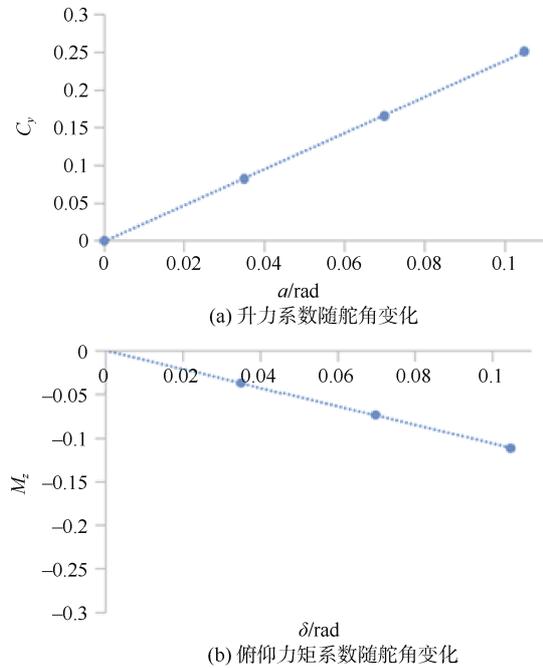


(b) 俯仰力矩系数在 0°~2° 攻角变化

图 5 UUV 流体动力系数随攻角变化曲线

Fig. 5 UUV hydrodynamic coefficient changing with angle of attack

在舵角 δ 为 2°、4° 以及 6° 时分别计算 UUV 的流体动力参数，统计 UUV 随舵角变化的升力系数和俯仰力矩系数，得到如图 6 所示的曲线。可以看出：UUV 升力系数及俯仰力矩系数在舵角变化范围内线性拟合得很好，得到升力系数随舵角变化的位置导数为 2.396 4，俯仰力矩系数随舵角变化的位置导数为 -1.065 5。



(b) 俯仰力矩系数随舵角变化

图 6 UUV 流体动力系数随舵角变化曲线

Fig. 6 UUV hydrodynamic coefficient changing with rudder angle

基于以上数据，计算 UUV 在不同负浮力 ΔG 、不同浮心与重心的纵向距离 x_G 下的平衡攻角、平衡舵角以及纵向动稳定度。首先根据负浮力和浮心位置，设定初始重心位置，并计算航行器在该姿态

下的升力和俯仰力矩,接着判断是否满足力与力矩平衡条件,若不满足,则调整重心位置并重复计算,最终得到满足平衡条件的攻角和舵角,即为平衡攻角和平衡舵角。为了更直观地分析平衡攻角、平衡舵角的绝对值大小变化规律,选取了负浮力 ΔG 在 0 和 -9.8 N 这 2 种情况下 UUV 的平衡攻角、平衡舵角、纵向动稳度随重心与浮心的纵向距离 x_G 的变化趋势,如图 7 所示。

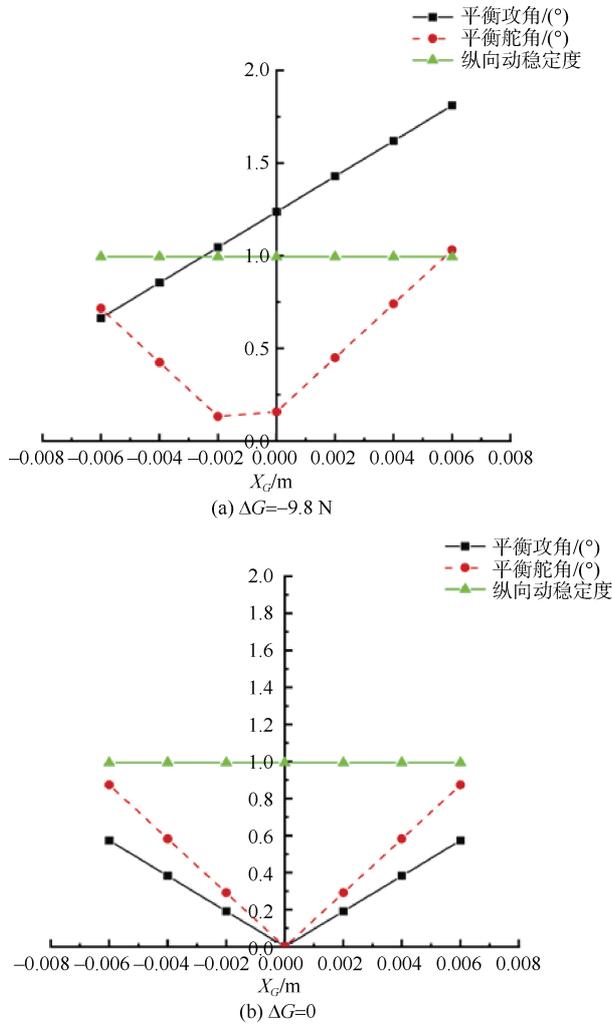


图 7 UUV 的平衡攻角、平衡舵角、纵向动稳度随 x_G 的变化

Fig. 7 UUV equilibrium angle of attack, equilibrium rudder angle, and longitudinal dynamic stability changing with x_G

由图 7 可以看出,该舵布局下 UUV 的航行特性随重心与浮心的纵向距离 x_G 的变化趋势:

1) UUV 的平衡攻角在 $\Delta G = -9.8\text{ N}$ 时随 x_G 的

增大而增大,在 $\Delta G = 0$ 时随 x_G 先减小后增大;

2) UUV 的平衡舵角在 2 种情况下随 x_G 先减小后增大;

3) 纵向动稳度 G 在 2 种情况下变化不大且均接近 1,表明在稳定性和操纵性之间取得良好平衡,满足设计要求。

为了更直观地分析 UUV 随负浮力 ΔG 的变化趋势,分别选取了重心与浮心的纵向距离 x_G 等于 0、0.006 m 这 2 种情况下平衡攻角、平衡舵角、纵向动稳度随负浮力 ΔG 的变化趋势,如图 8 所示。

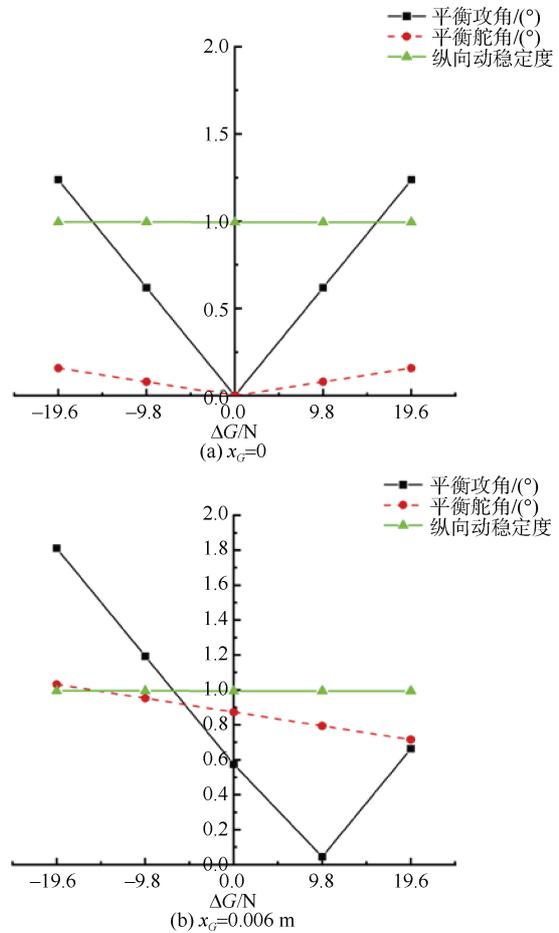


图 8 平衡攻角、平衡舵角、纵向动稳度随负浮力 ΔG 的变化

Fig. 8 Equilibrium angle of attack, equilibrium rudder angle, and longitudinal dynamic stability changing with negative buoyancy ΔG

由图 8 可以看出,该鳍舵布局下 UUV 的航行特性随负浮力 ΔG 的变化趋势:

1) UUV 的平衡攻角随负浮力 ΔG 先减小后增

大, $x_G = 0.006\text{ m}$ 时相对于 $x_G = 0$ 时平衡攻角的最小值位置向右平移;

2) UUV 的平衡舵角在 $x_G = 0$ 时随负浮力 ΔG 先减小后增大, 在 $x_G = 0.006\text{ m}$ 时随负浮力 ΔG 的增大而呈减小趋势;

3) 纵向动稳定度在 2 种情况下变化不大, 随 ΔG 的增大而缓慢减小且接近 1, 满足设计要求。

4 结束语

本文在 UUV 外形流体动力分析模型的基础上, 对十字型鳍 X 型舵布局 UUV 的流体动力性能进行了分析, 通过分析 UUV 的几何模型、网格划分以及 CFD 分析的基本步骤和方法, 建立了 UUV 流体动力特性研究过程。主要结论如下:

1) 通过分析 UUV 在定常直线运动时的流体动力参数, 得到十字型鳍 X 型舵布局 UUV 的设计要求为平衡攻角和平衡舵角越小越好, 约束条件为纵向动稳定度的取值范围为 0~1。

2) 在十字型鳍 X 型舵布局下, 对 UUV 进行了流体动力计算, 得到 UUV 在变攻角、变舵角工况下的流体动力参数。发现舵角 δ_h 和攻角 α 在小范围变化时, UUV 的升力系数和俯仰力矩系数与 α 、 δ_h 的关系基本呈线性关系。

3) 对 UUV 进行流体动力分析, 计算 UUV 在不同负浮力 ΔG 、不同浮心与重心的纵向距离 x_G 下的平衡攻角、平衡舵角以及纵向动稳定度。发现纵向动稳定度 G 在 2 种情况下变化不大, 随 x_G 的增大而缓慢增大且接近 1, 满足设计要求。

基于本文的研究结果, 建议在实际设计中优先选择较小的平衡攻角和平衡舵角获取较优的操纵性, 还可以通过调整负浮力和重心位置来优化纵向动稳定度。本研究结论可以为 UUV 的鳍舵布局设计提供一定的理论指导。

参考文献

[1] 陈强, 张林根. 美国军用 UUV 现状及发展趋势分析[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(7): 130-134.
[2] 钟宏伟. 国外无人水下航行器装备与技术现状及展望[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(4): 215-225.

[3] 潘光, 宋保维, 黄桥高, 等. 水下无人系统发展现状及关键技术[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(2): 44-51.
[4] 焦玉超, 肖昌润, 等. 潜艇 X 舵研究综述[C]// 第 10 届武汉地区船舶与海洋工程研究生学术论坛. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
[5] 王京齐, 施生达. 现代潜艇尾操纵面的发展状况[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(1): 33-36.
[6] 张鑫明, 韩明磊, 余益锐, 等. 潜艇与 UUV 协同作战发展现状及关键技术[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(5): 497-508.
[7] 薛敏, 钱家昌, 柳超, 等. 美国“哥伦比亚”级核潜艇发展情况及特点分析[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(12): 160-165.
[8] 胡坤, 徐亦凡. 舵型对潜艇操纵特性影响的仿真分析[J]. 船舶工程, 2005, 27(1): 41-45.
[9] 张露, 肖昌润, 焦玉超. 十字舵与 X 舵潜艇的水动力性能数值比较[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(7): 24-28.
[10] 胡芳芳, 章君强, 李旺, 等. X 舵与十字舵水下航行体水动力系数的对比[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(4): 35-39.
[11] 李雨田, 雷敏, 雷阳, 等. UUV 操纵性设计及流体动力布局[J]. 数字海洋与水下攻防, 2020, 3(2): 100-105.
[12] 曹植珺, 肖昌润, 李士强, 等. X 舵与十字舵潜艇稳定性对比分析[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(7): 51-55.
[13] 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.
[14] 赵涛, 刘明雍, 周良荣. 自主水下航行器的研究现状与挑战[J]. 火力与指挥控制, 2010, 35(6): 1-6.
[15] 张锐. X 形全动舵十字形鳍布局高速水下航行器设计参数对操纵性影响分析[J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(5): 750-759.
[16] REYNOLDS O. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mechanical, Physical and Engineering Science, 1995(451): 123-164.
[17] WILCOX D C. Turbulence Modeling for CFD[M]. Mississippi: DCW Industries, 1998.
[18] 严卫生. 鱼雷航行力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.

(责任编辑: 曹晓霖)