

一种无人水下航行器导管对转桨推进性能仿真分析

黄金华¹, 俞广庆²

¹中国兵器工业集团江南工业集团有限公司, 湖南 湘潭

²哈尔滨工程大学青岛创新发展基地, 山东 青岛

收稿日期: 2024年10月17日; 录用日期: 2024年10月29日; 发布日期: 2024年12月23日

摘要

无人水下航行器(UUV)在军事、民用和科研等领域扮演着越来越重要的角色, 导管对转桨(DCRP)作为UUV的一种常用推进方式, 其推进性能对UUV的航速、噪声等性能有着重要的影响。本文针对UUV拖曳声纳阵的应用, 设计了一型DCRP。采用计算流体力学(CFD)技术, 对DCRP的水动力性能进行了数值仿真, 模拟推进器在不同转速下的功率、扬程、效率、推力。结果表明, 所设计的DCRP在设计转速下, 其效率满足UUV推进技术指标要求。仿真结果为UUV拖曳声纳阵的推进技术设计提供了参考。

关键词

无人水下航行器(UUV), 导管对转桨(DCRP), 推进效率, CFD, 拖曳阵

Simulation and Analysis on Propulsion Performance of an Unmanned Underwater Vehicle with DCRP

Jinhua Huang¹, Guangqing Yu²

¹Jiangnan Industries Group Co., Ltd., NORINCO GROUP, Xiangtan Hunan

²Qingdao Innovation and Development Base of Harbin Engineering University, Qingdao Shandong

Received: Oct. 17th, 2024; accepted: Oct. 29th, 2024; published: Dec. 23rd, 2024

Abstract

Unmanned Underwater Vehicles (UUVs) are playing increasingly crucial roles in military, civilian, and research applications. The ducted contra-rotating propeller (DCRP) as a common propulsion

method for UUVs has a significant impact on the vehicle's speed, noise, and other performance. This study focuses on the application of UUV towed sonar arrays and designs a type of DCRP. Using computational fluid dynamics (CFD) technology, the hydrodynamic performance of the DCRP was numerically simulated, including the propulsion unit's power, head, efficiency, and thrust at different rotational speeds. The numerical simulations reveal that the designed DCRP satisfies the efficiency criteria for UUV propulsion technology at the designated condition, thereby validating its suitability for underwater applications. The simulation results provide a reference for the design of propulsion technology for UUV towed sonar arrays.

Keywords

Unmanned Underwater Vehicle (UUV), Ducted Contra-Rotating Propeller (DCRP), Propulsive Efficiency, CFD, Towed Array

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水下无人航行器(Underwater Unmanned Vehicle, UUV)是一种具有高度自主性、灵活性、隐身性、环境适应性、低成本等特点的自动化水下系统。随着无人技术的发展和成熟, UUV 技术近年来得到迅猛发展, 应用范围不断扩展, 涉及到军事、民用、科研等领域[1] [2]。军事方面, UUV 主要用于海军和海监等机构, 用于各种军事任务, 如情报侦察、海域警戒、目标搜索与处置等, 这些任务旨在提高海军的作战能力和海洋安全性。民用领域, UUV 广泛应用于海洋环境监测、资源勘探和救援搜索等, 这些应用有助于提高海洋环境的可持续性、资源的可持续开发和海洋搜索救援的效率。科研领域, UUV 可应用于海洋科学研究和工程研究, 实时监测海洋环境变化和工程施工过程。

推进技术是 UUV 的关键技术之一, 其性能直接决定了 UUV 的操控性、续航能力、可靠性、噪声水平等。目前 UUV 常用的推进方式包括螺旋桨推进、喷水推进、仿生推进、磁流体推进、质浮心调节推进、火箭推进等, 其中最常用的是螺旋桨推进。螺旋桨单桨容易产生振动、空泡、噪声等问题[3]。导管对转桨(Ducted Contra-Rotating Propeller, DCRP)是一种特殊的螺旋桨推进系统, 将两个传统的螺旋桨安装在同心的两轴上并包裹在一个导管内, 前后两桨以相反方向旋转, 协同推进, 使得水流经过前桨加速后形成的旋流得以在后桨处被有效回收, 共同产生强劲推力[4]-[6]。与普通螺旋桨相比, 其特点是结构复杂, 但同时 DCRP 具备许多优点, 导管有效回收尾流能量, 提升效率, 尤其在重载时更为显著; 促进了水流的均匀性, 减少了工况变化对性能的影响; 在相同推力下, DCRP 直径更小, 且以低振动和低噪音运行[7] [8]。

本文针对 UUV 搭载拖曳声纳阵的应用, 设计了一型 DCRP。采用计算流体动力学(CFD)技术, 对某水下无人航行器导管对转桨的推进性能进行仿真分析, 利用数值模拟的方法获取推进器在设计条件下的性能参数, 为无人航行器推进系统设计提供依据。

2. DCRP 设计

2.1. UUV 及 DCRP 主要设计参数

UUV 搭载拖曳声纳阵是一种先进的海洋探测技术, 具有小型化、高机动性和高隐蔽性的特点[3]。本方案中的 UUV 主要任务是搭载拖曳声纳阵, 开展海洋环境噪声测量以及海洋哺乳动物探测。为方便拖

曳, 声纳阵从桨毂中间穿出, 为确保声纳阵列与对转桨之间的集成不会相互干扰, DCRP 桨毂直径需要设计较大, 同时采用对转桨减小水动力噪声。由于螺旋桨轮毂直径较大, 减小了螺旋桨的有效工作面积, 可能对螺旋桨的推进性能造成影响, 因此需要对 DCRP 进行仿真分析, 确认推进器的设计参数满足系统设计要求。

UUV 及 DCRP 主要设计参数如表 1 和表 2。

Table 1. Main design indicators of UUV

表 1. UUV 主要设计指标

长度	直径	最大速度	续航时间	最大工作深度
2 m	200 mm	18 kn	24 h @ 3 kn	200 m

Table 2. Main design indicators of DCRP

表 2. DCRP 主要设计指标

直径	额定转速	推力	效率
170 mm	2600~3000 r/min	380 N	$\geq 80\%$

2.2. DCRP 设计

UUV 导管对转桨的设计过程包括需求分析、概念设计、CFD 数值模拟、模型测试、性能优化、详细设计、最终测试和系统集成调试, 以确保推进效率和系统兼容性。建立螺旋桨的三维模型, 采用计算流体动力学(CFD)软件进行流场的数值模拟, 预测螺旋桨的水动力性能。加工螺旋桨试验样机, 进行水池试验, 测试并验证设计的性能参数。根据数值模拟和测试结果, 对螺旋桨设计进行优化, 包括调整螺距比、桨叶数、导管形状和大小等, 以提高推进效率和降低振动噪音。完成优化后, 进行螺旋桨和导管的详细设计, 包括结构设计、材料选择和制造工艺等。然后对样机进行最终的测试, 以确保螺旋桨在实际工作条件下的性能满足设计要求。最后, 将设计好的导管对转桨集成到 UUV 上, 并进行系统调试, 确保与其他系统如动力系统、控制系统等性能匹配。DCRP 的设计过程如图 1。

使用开源软件 OpenProp 设计一对同轴螺旋桨。设计完成后, 导出螺旋桨 20 个截面的样条曲线, 将这些数据导入 SolidWorks, 创建完整的导管螺旋桨模型, 如图 2 所示。

3. 基于 CFD 的 DCRP 数值仿真

3.1. CFD 数值仿真

(1) 湍流模型

目前, 直接法和非直接法是湍流数值模拟中的两种方法。直接法是指直接求解瞬时湍流控制方程。非直接法不直接对湍流脉动特性进行计算, 而是通过对湍流做出一些合理的简化处理和一定程度上的近似后, 再进行数值计算, 常见的湍流模型有标准 $k-\varepsilon$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型、Realizable $k-\varepsilon$ 模型和 SST $k-\varepsilon$ 湍流模型等[9]。

本研究采用 SST $k-\varepsilon$ 湍流模型进行数值计算, 该湍流模型吸收了标准 $k-\varepsilon$ 模型与标准 $k-\varepsilon$ 模型的优点, 在边界层采用自动函数, 能够较好地捕捉边界层的流动, 采用基于有限元的有限体积法对控制方程进行离散, 并采用 SIMPLEC 算法进行求解。

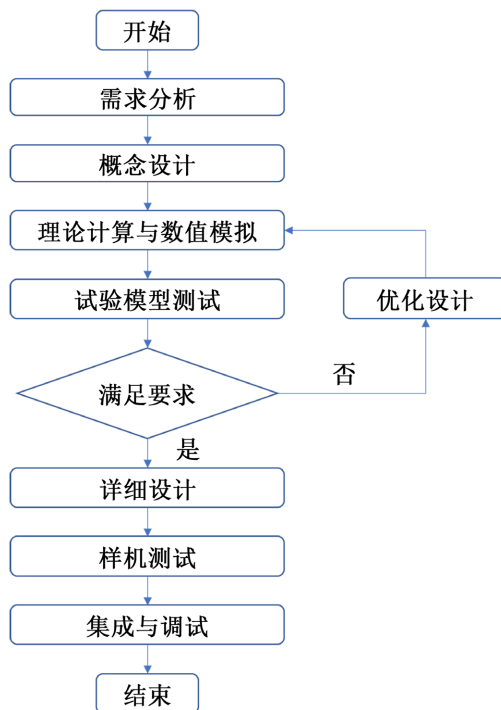


Figure 1. Design process of DCRP
图 1. DCRP 设计流程图

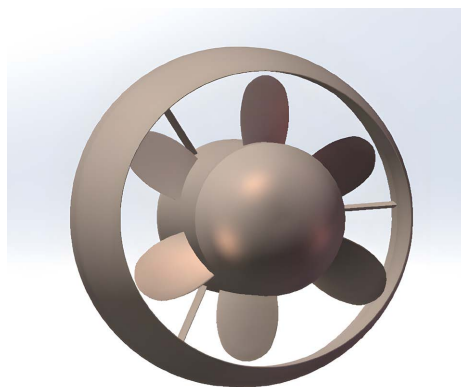


Figure 2. 3D model of DCRP
图 2. DCRP 三维模型示意图

SST k - ε 湍流模型的运输方程可以表示为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_k + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega \quad (2)$$

其中 G_k 、 G_ω 为方程的产生项; Y_k 、 Y_ω 为扩散作用的产生项; S_k 、 S_ω 为用户定义的源项; D_ω 为正交发散产生的项。

(2) 网格划分

利用 Spaceclaim 软件对模型进行前处理, 在螺旋桨周围建立旋转域。为消除诸如反向流动和诱导压力对航行体和螺旋桨性能的潜在影响, 航行器的流体域尺寸需要足够大, 本研究所设计的流体域尺寸经过多次仿真验证和调整, 最终确定为最佳参数。流体域尺寸如图 3 所示, 其中进口边界距航行器前端的距离为航行器的一倍长度, 出口边界距航行器后端的距离为航行器的三倍长度, 径向边界为航行器的一倍长度。

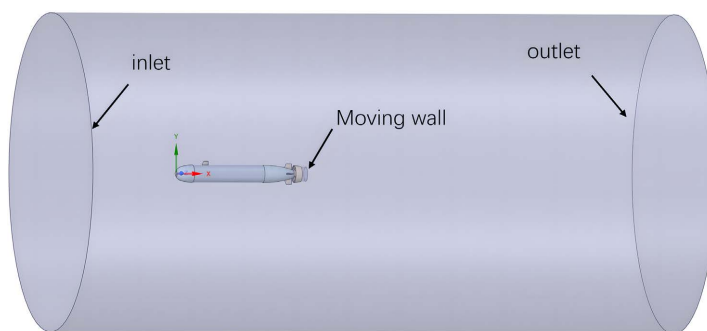


Figure 3. Simulation fluid domain of UUV
图 3. 航行器仿真流体域

在 Fluent Meshing 软件中对三维模型进行网格划分, 网格计算区域主要包括: 海水流体、导叶、第一级叶轮、第二级叶轮。为了提高仿真精度, 对两个叶轮进行了网格加密处理。使其能够更加细致地捕捉叶轮在运行过程中的复杂流场变化, 从而确保仿真结果更加接近实际工况。网格划分如图 4 所示, 网格总数为 2,498,536, 网格的正交质量为 0.11, 经验证网格的适应性较好。

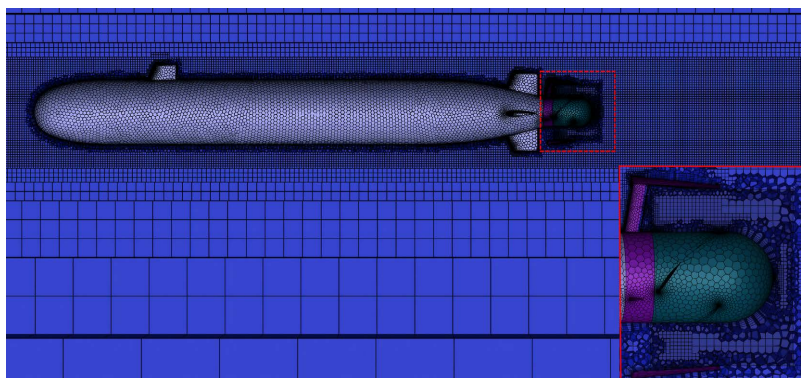


Figure 4. Meshing of UUV and fluid field
图 4. 航行器及流场网格划分

(3) 仿真参数设置

将整体域的入口(inlet)设置为速度入口, 给定一个平行于 X 轴的来流速度。出口设置为压力出口。静止域的圆柱面则设置为固壁, 无滑移。计算域内的流体则选择 SST $k-\epsilon$ 模型, 对螺旋桨旋转域采用多重参考系模型 MRF (Multiple Reference Frame), MRF 方法是一种稳态方法, 具有设置简单、计算快速、易于收敛等优点。具体设置见表 3。

在固体边壁处规定无滑移条件(即 $u = v = w = 0$), 在近壁区的流速分布按照壁面定律确定。将第一级叶轮设置为从进水方向看逆时针旋转, 转速 2600 r/min、2100 r/min; 第二级叶轮设置为从进水方向看顺

时针旋转, 转速 2600 r/min、2100 r/min。计算得到敞水实验 DCRP 的速度云图如图 5 所示, 以及 DCRP 与航行器耦合后的速度云图如图 6 所示。

Table 3. CFD simulation setup
表 3. CFD 仿真设置

参数	设置
湍流模型	SST $k-\varepsilon$
运动类型	Moving Reference Frame
耦合方式	SLMPLEC
压力离散格式	Standard

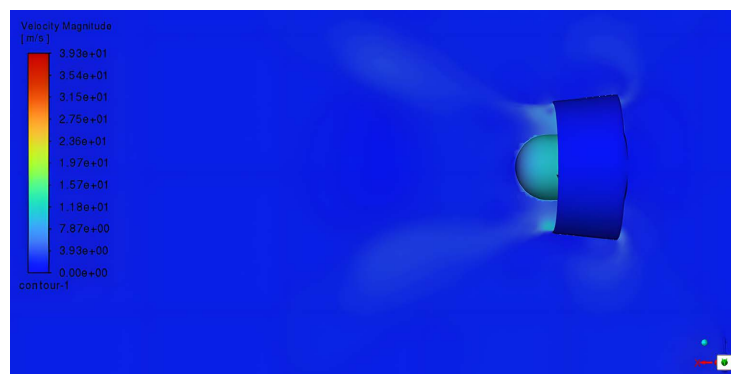


Figure 5. Velocity cloud of DCRP under open water experiment
图 5. 敞水实验 DCRP 速度云图

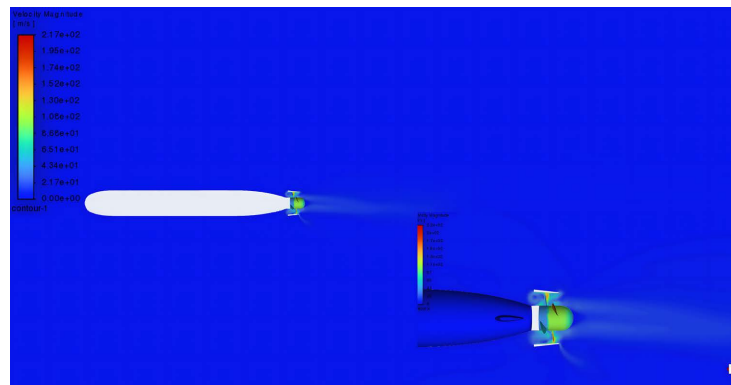


Figure 6. Velocity cloud of UUV and DCRP
图 6. UUV 与 DCRP 耦合速度云图

图 7 是螺旋桨沿轴向提取四个截面的压力云图。螺旋桨的流场表现出相对对称的特征, 压力云图的形状表现出一定程度的对称性, 压力分布更加均匀。

(4) 非定常计算

采用 LES 大涡模拟, 旋转区域与静止区域的交界面改为瞬态静子(Transient Rotor Stator)模型, 时间步长取 $\Delta t = 1.9231 \times 10^{-4} \text{ s}$, 即一个时间步长叶轮旋转 3° 。当被监测参数呈现规律性的周期变化之后, 完成全流场的非定常运算。

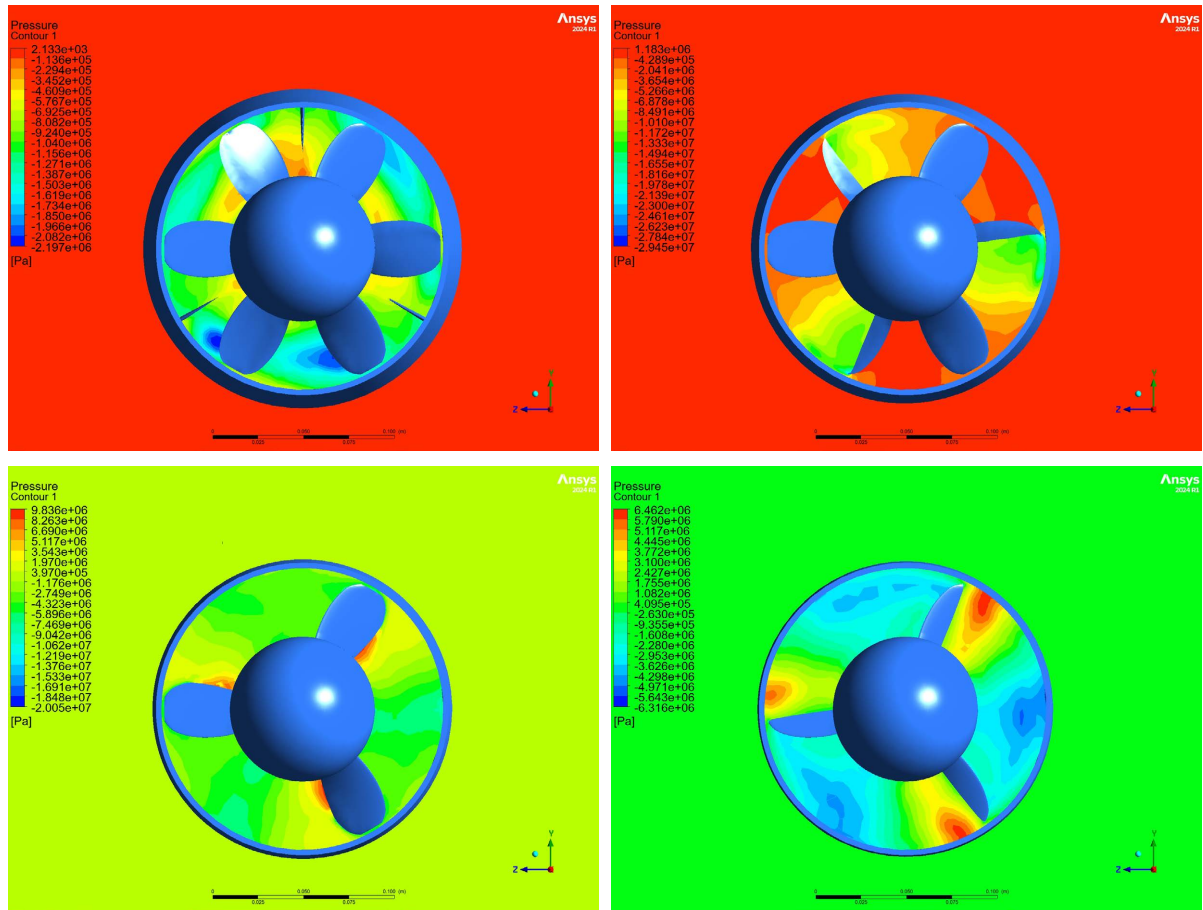


Figure 7. Pressure cloud of each section of the DCRP
图 7. 螺旋桨各截面压力云图

3.2. 扬程、效率及轴功率计算

螺旋桨的扬程的计算公式为[10]:

$$H_{net} = \left(\frac{\int_{s_2} P_2 u_t ds}{\rho Q g} + H_2 + \frac{\int_{s_2} u_2^2 u_{t2} ds}{2 Q g} \right) - \left(\frac{\int_{s_1} P_1 u_t ds}{\rho Q g} + H_1 + \frac{\int_{s_1} u_1^2 u_{t1} ds}{2 Q g} \right) \quad (3)$$

式中: 等式右边第一项为出水口断面总压, 第二项为进水口断面总压; Q 为流量, m^3/s ; H_1 、 H_2 为进、出水断面高程, m ; s_1 、 s_2 为进、出水断面面积, m^2 ; u_1 、 u_2 为进、出水口各点流速, m/s ; u_{t1} 、 u_{t2} 为进、出水口断面各点流速法向分量, m/s ; P_1 、 P_2 为进、出水断面各点静压, Pa ; g 为重力加速度, m/s^2 。

效率的计算公式为:

$$\eta = \frac{\rho g Q H_{net}}{N_1 + N_2} \quad (4)$$

式中, N_1 为第一级叶轮的轴功率, N_2 为第二级叶轮的轴功率。

轴功率的计算公式为:

$$N = \frac{\pi}{30} T n \quad (5)$$

式中: T 为扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$; n 为转速, r/min 。

4. 仿真计算结果与分析

将数值模拟的结果取出, 代入计算公式(3)、(4)、(5), 分别得到转速 2600 r/min 和 2100 r/min 下螺旋桨的扬程、效率和轴功率, 结果如表 4、表 5 及图 8、图 9 所示。

Table 4. Hydraulic performance data ($n = 2600$ r/min)

表 4. 水力性能数据表($n = 2600$ r/min)

流速(m/s)	流量(m ³ /s)	功率(W)	扬程(m)	效率(%)	推力(N)
1.54	0.03	6390.56	3.736	14.99	907.78
2.31	0.04	5386.15	3.423	24.45	758.79
3.08	0.05	6027.49	5.516	46.94	859.32
3.85	0.07	3547.79	4.187	75.68	490.15
4.62	0.08	3474.23	3.728	82.56	488.62
5.39	0.09	2857.32	2.655	83.41	379.00
6.16	0.10	2156.66	1.588	75.54	265.13
6.93	0.12	1293.88	0.562	50.10	140.89
7.7	0.13	377.77	-0.49	/	4.46
8.47	0.14	1071.07	-1.63	/	-154.46
9.24	0.16	2637.22	-2.87	/	-337.12

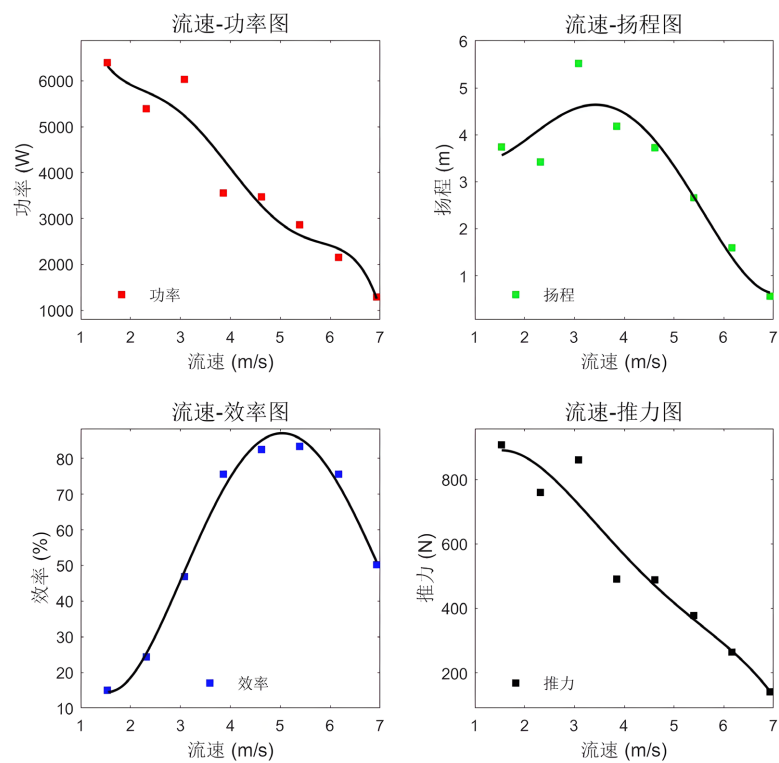


Figure 8. Hydraulic performance result ($n = 2600$ r/min)

图 8. 水力性能计算结果($n = 2600$ r/min)

Table 5. Hydraulic performance data ($n = 2100$ r/min)
表 5. 水力性能数据表($n = 2100$ r/min)

流速(m/s)	流量(m ³ /s)	功率(W)	扬程(m)	效率(%)	推力(N)
1.54	0.03	3058.29	2.019	16.93	528.37
2.31	0.04	3367.04	3.741	42.74	601.65
3.08	0.05	1901.81	2.726	73.53	324.56
3.85	0.07	1769.46	2.288	82.91	304.39
4.62	0.08	1361.31	1.427	80.64	216.23
5.39	0.09	843.75	0.578	61.50	118.90
6.16	0.10	194.62	0.261	/	11.40

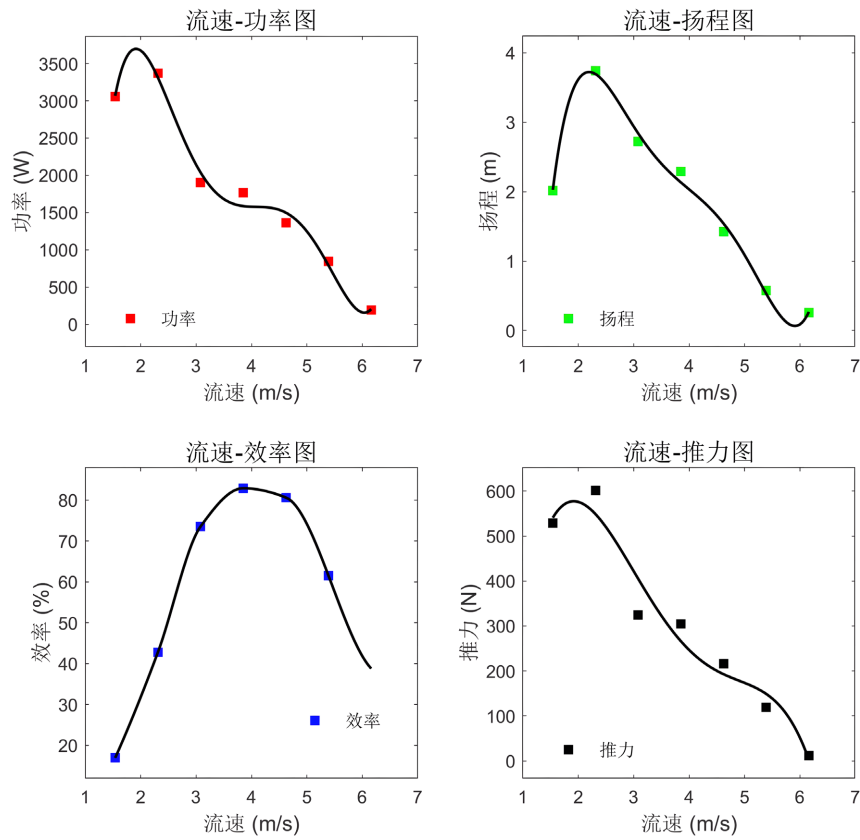


Figure 9. Hydraulic performance result ($n = 2100$ r/min)
图 9. 水力性能计算结果($n = 2100$ r/min)

根据数值计算结果可知,当进水流速大于 7.7 m/s 时,推力较小,扬程为负值,说明此时流速过大,流量较大,不满足设计要求。根据表 4 可知,转速为 2600 r/min 时,最高效率点流速为 5.39 m/s,推力 $F = 379$ N,效率为 83.41%,功率 $P = 2857.32$ W。根据表 5 可知,转速为 2100 r/min 时,最高效率点流速 $v = 3.85$ m/s,推力 $F = 304.39$ N,效率为 82.91%,功率 $P = 1769.46$ W。

由计算结果可以看出,DCRP 在设计转速下达到了推力和推进效率等设计指标。

DCRP 与航行器耦合后的结果如表 6、表 7 及图 10、图 11 所示。

Table 6. Hydraulic performance data under coupling ($n = 2600$ r/min)
表 6. 耦合下水力性能数据表($n = 2600$ r/min)

流速(m/s)	流量(m³/s)	功率(W)	扬程(m)	效率(%)	推力(N)
1.54	0.019	7668.67	3.624	11.90	682.93
2.31	0.022	6194.07	3.523	19.56	556.19
3.08	0.03	5212.18	3.468	36.61	515.59
3.85	0.04	4683.08	3.512	64.32	343.10
4.62	0.05	4585.62	3.46	70.17	347.40
5.39	0.06	3714.63	2.13	72.56	276.67
6.16	0.07	2695.86	1.48	64.20	191.42
6.93	0.08	1707.92	1.1	42.58	112.71

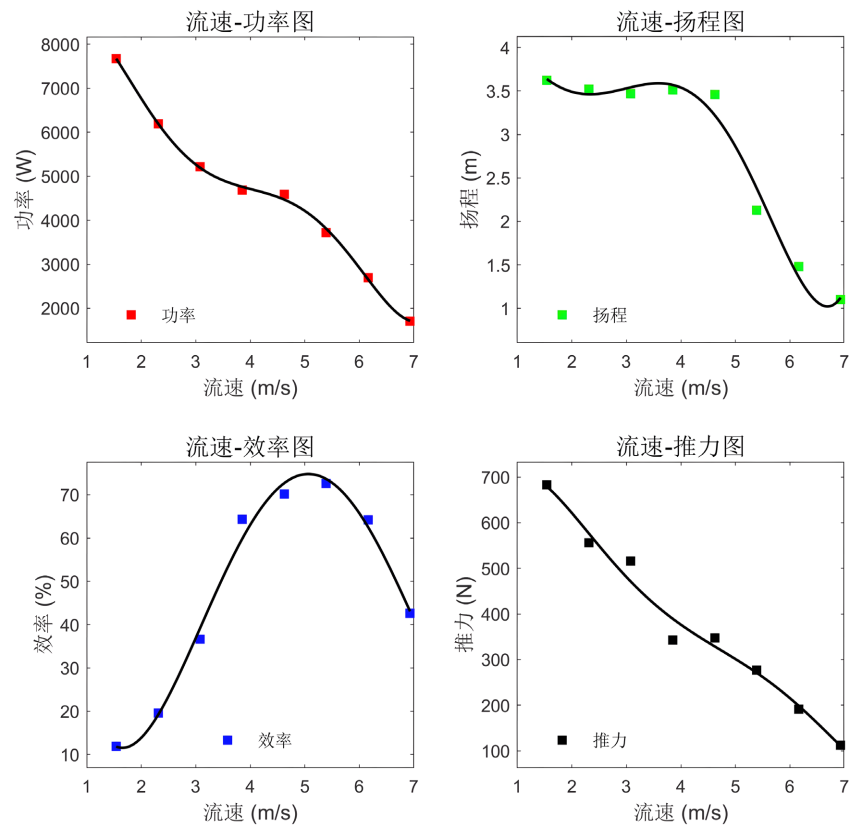


Figure 10. Hydraulic performance result under coupling ($n = 2600$ r/min)
图 10. 耦合下水力性能计算结果($n = 2600$ r/min)

Table 7. Hydraulic performance data under coupling ($n = 2100$ r/min)
表 7. 耦合下水力性能数据表($n = 2100$ r/min)

流速(m/s)	流量(m³/s)	功率(W)	扬程(m)	效率(%)	推力(N)
1.54	0.019	3700.53	1.655	12.88	449.23
2.31	0.022	4074.12	2.88	35.9	517.19

续表

3.08	0.03	2282.17	2.26	58.82	236.8
3.85	0.04	2141.04	1.98	64.67	210.32
4.62	0.05	1565.5	1.22	66.13	185.52
5.39	0.06	970.31	0.48	51.05	102.35

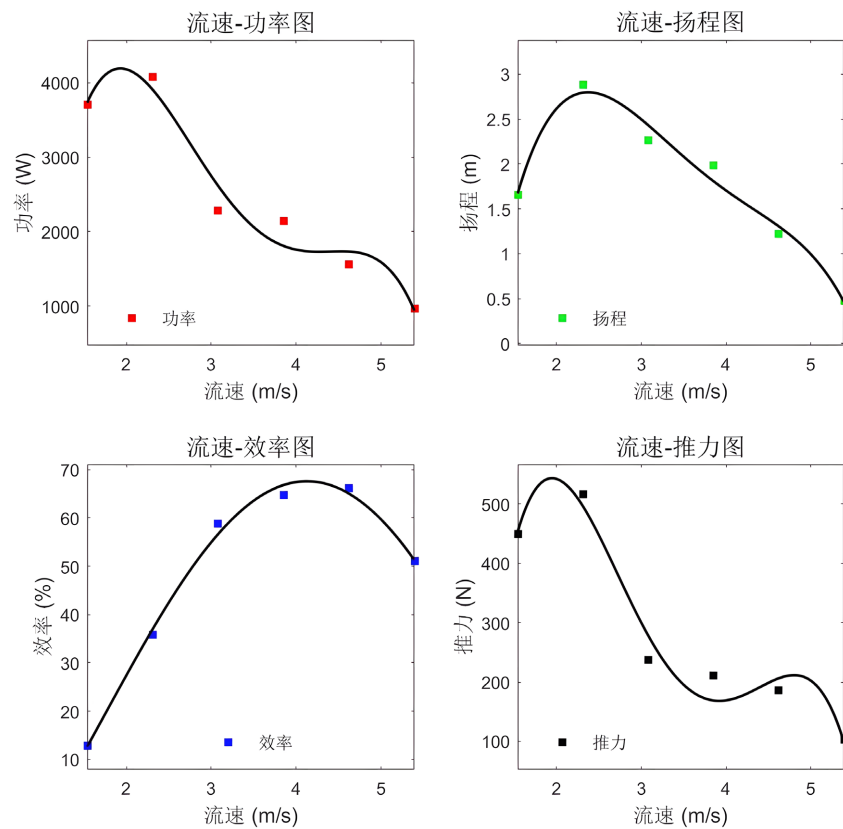


Figure 11. Hydraulic performance result under coupling ($n = 2100$ r/min)
图 11. 耦合下水力性能计算结果($n = 2100$ r/min)

可以看出,与航行器耦合后,DCRP 的功率提升了约 20%,且在耦合状态下,DCRP 的各项性能并未出现显著下降,表明所设计的 DCRP 与 UUV 适配性较好。

5. 结论

本文针对水下无人航行器(UUV)的推进系统,特别是导管对转桨(DCRP)的设计和性能进行了深入的分析与研究。通过采用计算流体动力学(CFD)方法,对 DCRP 推进器进行了仿真分析,以期 UUV 推进系统设计提供理论依据和技术支持。

通过 CFD 数值模拟,对 DCRP 的水动力性能进行了预测,初步仿真结果显示,DCRP 在设计工况下表现出良好的推进性能和高效率,在 2600 r/min 和 2100 r/min 的转速下,DCRP 分别达到了 83.41%和 82.91%的高效率,以及 379 N 和 304.39 N 的推力,满足了 UUV 的推进性能需求。

DCRP 推进器在设计转速下实现了预期的推进性能,对于 UUV 搭载拖曳声纳阵的应用具有重要意义,为水下无人航行器在海洋作业中的广泛应用提供了技术支撑。

参考文献

- [1] 傅仁琦, 曹焱, 王晓林. 无人水下航行器声呐装备现状与发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(2): 82-87.
- [2] 张洪酥, 王涛, 苗建明, 等. 水下无人航行器的研究现状与展望[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(2): 1-7, 40.
- [3] 倪豪良. 导管对转桨的水动力优化设计及噪声性能分析[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [4] 韩耀羽. AUV 对转桨设计及流场特性研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [5] 王浩天, 向巩, 袁在思, 等. 基于改进体积力法的导管螺旋桨水动力性能数值研究[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(4): 186-196.
- [6] 陆德顺, 孙铁志, 张桂勇. 导管螺旋桨水动力特性仿真分析[J]. 船舶, 2023, 34(6): 102-110.
- [7] 吴家鸣, 赖宇锋, 李江伟, 等. 水下潜器系统导管螺旋桨水动力特性及周围流场分布预报与分析[J]. 船舶力学, 2018, 22(5): 540-551.
- [8] 李海涛, 姜壮威. 导管螺旋桨水动力性能试验及数值研究[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(2): 1-7.
- [9] Liu, B. and Vanierschot, M. (2021) Numerical Study of the Hydrodynamic Characteristics Comparison between a Ducted Propeller and a Rim-Driven Thruster. *Applied Sciences*, **11**, Article 4919. <https://doi.org/10.3390/app11114919>
- [10] Stark, C. and Shi, W. (2021) Hydroacoustic and Hydrodynamic Investigation of Bio-Inspired Leading-Edge Tubercles on Marine-Ducted Thrusters. *Royal Society Open Science*, **8**, Article 210402. <https://doi.org/10.1098/rsos.210402>