DOI：10.20271/j.cnki.1673−9833.2026.5008

跨介质无人机螺旋桨动力性能分析及参数优化

徐　哲，孙　晓，文比强

（湖南工业大学 机械工程学院，湖南 株洲 412007）

摘　要：由于水与空气介质物理特性的差异，跨介质无人机螺旋桨的设计优化在航空航海环境中面临显著挑战。故针对传统单一介质螺旋桨设计的局限性，提出了一种基于多参考系（MRF）的跨介质螺旋桨性能分析方法并运用 Fluent 进行数值仿真以及参数优化分析。首先运用升力线理论和多目标优化对原型桨螺距进行参数优化，其次采用多参考系（MRF）划分流场区域，再引入 Realizable k-ε 与 SST k-ω 湍流模型分别对空气及水下工况进行计算分析，得到各自动力特性。结果表明，改变螺距可以提高螺旋桨在水下的推进效率，同时确保其在空气和水下工况能够稳定运转。

关键词：跨介质无人机；螺旋桨；MRF；升力线理论；Realizable k-ε；SST k-ω

中图分类号：V211.7　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673−9833(2026)05−0059−08

引文格式：徐　哲，孙　晓，文比强 . 跨介质无人机螺旋桨动力性能分析及参数优化 [J]. 湖南工业大学学报，2026，40(5)：59−66.

Analysis of the Dynamic Performance and Parameter Optimization of the Propeller of a Cross-Media UAV

XU Zhe，SUN Xiao，WENG Biqiang

（School of Mechanical Engineering，Hunan University of Technology，Zhuzhou Hunan 412007，China）

Abstract：Due to the difference in the physical properties of water and air media，the design optimization of cross-media UAV propellers faces significant challenges in the aeronautical environment. In view of the limitations of traditional single medium propeller designs, a performance analysis method has been proposed for cross media propellers based on multiple reference frames (MRF), with Fluent used for numerical simulation and parameter optimization analysis. The lift line theory and multi-objective optimization are adopted to optimize the parameters of the prototype propeller pitch, using multiple reference frames (MRF) to divide the flow field region, and then introducing and SST k- ω turbulence models to calculate and analyze the dynamic characteristics of air and underwater working conditions, respectively. The results show that changing the pitch improves the underwater propulsion efficiency of the propeller while ensuring its stable operation in both air and underwater conditions.

Keywords：cross-media UAV；propeller；MRF；lift line theory；Realizable k-ε；SST k-ω

1　研究背景

随着空－海一体化任务需求的日益增长，跨介质无人机逐渐成为智能装备发展的研究热点。相较于传统单介质飞行器，跨介质无人机能够在空中巡航与

收稿日期：2025−09−10

基金项目：湖南省重点领域研发计划基金资助项目（2022GK2068）；湖南省自然科学基金省市联合基金资助项目（2021JJ50053）

作者简介：徐　哲，男，湖南工业大学硕士生，主要研究方向为跨介质无人机螺旋桨，E-mail：2976875918@qq.com

通信作者：孙　晓，男，湖南工业大学教授，硕士生导师，主要研究方向为机电控制，智能机器人技术，E-mail：13873325228sxbug@163.com

水下潜行之间自由切换，在侦察、搜救、海洋监测等场景中展现出广阔的应用前景。由于水和空气的物理特性存在显著差异，如密度和黏性等，传统的单一介质桨叶设计无法满足跨介质航行的需求。跨介质无人机螺旋桨的设计面临着诸多挑战，其中水空介质切换带来的载荷突变和空化问题，对螺旋桨的优化设计提出了极高要求。

R. Siddall 等 [1] 设计的跨介质航行器，主要研究机翼形态变化对性能的影响，并对可变形设计进行实验验证。瑞士苏黎世理工学院研发出一款名为“Dipper”的跨介质无人机，提出了一种动态过渡的解决方案，研究表明主动可调机翼可在水空过渡中应用 [2]。A. C. Horn 等 [3] 针对跨介质无人机的水中性能提升进行了研究，其水下速度相较于其他跨介质无人机提升了大约 2 倍。

现有多数螺旋桨设计仍以空气或水下单一工况为主，未能考虑跨介质工况下的性能变化与优化机制，但也有少量文献针对跨介质工况进行了研究。例如，赵怡 [4] 指出，常规空气桨入水后因桨距不匹配和翼型失速导致效率大幅下降、推力不对称与空泡等问题。张宇川 [5] 针对水空推进器桨叶进行了结构分析与流体仿真，得出其螺旋桨在水下推进效率损失达 30% 以上，传统水下推进器桨叶在空气中工作时升力不足。李汶烨等 [6] 系统地解释了跨介质航行器的气动布局，强调推进器需在水－气转换过程中保持性能稳定和响应灵敏，提出桨叶几何参数的跨域优化仍是目前研究的技术瓶颈之一。单润柳等 [7] 利用面元法结合多目标粒子群优化算法对水空介质螺旋桨推力系数和效率进行了优化计算，优化后的螺旋桨水空推进效率均有显著提升，为螺旋桨在双介质运行中效率较低提供了一个较优的解决方法。

有一部分研究通过引入仿生结构设计、折叠翼桨构型与可变桨距机制 [8–12]，或者优化叶型、桨距、弦长等关键参数提高螺旋桨的双工况适应能力 [13–15]。如廖保全等 [8] 基于 Fluent 对新型双介质航行器推进器开展气－水工况仿真分析，验证得出多介质耦合环境下传统螺旋桨推力波动显著。赵文迪等 [9] 通过仿生设计研究翼型和桨叶构型对流动特性的影响，得出在 CAD 设计与建模阶段需引入多目标参数优化策略以适应两种介质下的流动性能。王宝旭 [10] 将折叠翼推进形式引入水空推进系统，其螺旋桨在稳定性与结构可实现性方面仍面临挑战。闫雷 [11] 设计了新型折叠翼机构，确保其在水空两种介质中都能稳定运行，但折叠翼打开时间过长、水空介质转换过程太慢，还需继续优化。云忠等 [12] 仿生翠鸟的形态结构设计跨介质航行器，运用 CFD（computational fluid dynamics）仿真分析入水角度、高度等因素对入水性能的影响，验证当入水角度为 45~60 ° 时入水性能最佳。

由于空气与水在密度、黏性及声速等流体属性上的巨大差异，使得螺旋桨表现出显著的跨介质非线性耦合特性。既要满足水下推力与效率要求，还应兼顾空中能够产生足够升力与效率，这将成为跨介质螺旋桨设计的核心挑战。

基于此，本文提出了一种基于“工况解耦 + 响应面建模”的螺旋桨几何优化方法，以螺距为主变量构建性能响应面模型得出最优螺距比，针对空气与水下工作状态分别建立 CFD 仿真模型，提取各工况下的推力系数、扭矩系数与推进效率进行数值分析。该方法为跨介质推进器性能设计提供了全新的建模思路与实用解耦方案，也为后续仿真与物理验证提供了一定的理论基础。

2 基于升力线理论的螺旋桨主体参数优化

2.1 主体结构

跨介质无人机主体包括机身、螺旋桨、可变后掠机翼、收纳仓、电机、尾翼等部分，如图 1 所示。跨介质无人机采用常规气动布局，在跨介质螺旋桨翼型选择方面，根据文献 [16]，对比 NACA0012、NACA16、NACA4415 等螺旋桨翼型，选择在设计点工况下具备较高推力系数和效率的NACA0012翼型，其对称翼型能较好地在复杂的飞行姿态下工作，满足水空两种复杂工况的需要，如图 2 所示。螺旋桨直径为 570 mm，桨毂直径为 26 mm，根据螺旋桨翼型设计参数，利用三维坐标参数值在 Solidworks 中建立螺旋桨实体模型，如图 3 所示。

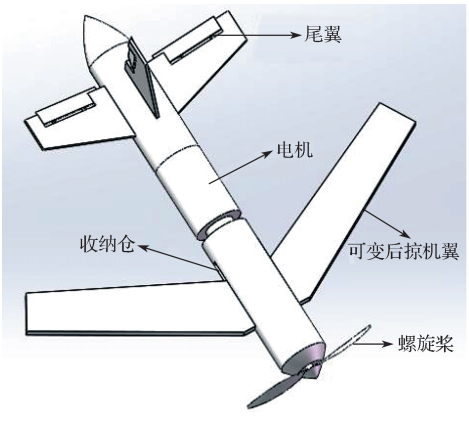


图 1 跨介质无人机结构示意图

Fig. 1 Cross-media drone structure diagram



图 2　NACA0012 翼型

Fig. 2　NACA0012 Airfoi



图 3　螺旋桨三维模型

Fig. 3　3D model of the propeller

2.2　升力线理论

跨介质螺旋桨在空气和水下均需保持较高的推进效率，其性能很大程度上取决于桨叶几何参数分布。基于升力线理论，可以将螺旋桨叶片看作由多个沿展向布置的二维翼型组成，每一翼段的空气动力可用环量分布 $\Gamma(y)$ 描述。

升力线理论的基本假设为机翼或螺旋桨叶片可等效为一条分布升力线，其环量强度 $\Gamma(y)$ 决定局部升力大小。根据库塔 – 茹科夫斯基定理，二维翼型的升力公式为

$$L=\rho V_{\infty}\Gamma(y)。$$

式中：L 为升力；ρ 为空气密度；V_{∞} 为来流速度；$\Gamma(y)$ 为环量分布，其公式为

$$\Gamma(y)=\frac{1}{2}V_{\infty}c(y)a_0\left[\alpha(y)-\alpha_{L0}\right],$$

其中 $c(y)$ 为螺旋桨弦长，a_0 为二维翼型升力曲线斜率 (2π/rad)，α_{L0} 为零升攻角，$\alpha(y)$ 为局部几何攻角，由桨叶螺旋角 $\phi(y)$ 与入流角 $\theta(y)$ 的差值决定，其表达式为

$$\alpha(y)=\phi(y)-\theta(y),$$

螺旋角 $\phi(y)$ 与螺距 P 有关，且 $\tan\phi(y)=P/\pi r$，其中 r 为桨叶上某点到旋转中心的径向距离。

综上可知，螺距 P 的改变会直接影响桨叶局部螺旋角，从而改变几何攻角与环量分布 $\Gamma(y)$，最终影响升力与推进效率。

2.3　螺距参数优化

螺旋桨的设计参数较多，考虑计算资源限制及对性能影响权重，本研究选取螺距比 P/P_0（其中 P_0 为原始桨距）为主优化变量，优化目标为最大化水下推进效率 η_w，确保空中推进效率 η_a 不低于某设定下限。为便于响应面构建与趋势识别，螺距比 P/P_0 取值范围设定为 0.85~1.15，步长为 0.05，共设计 7 组样本点，分别为

P/P_0={0.85，0.90，0.95，1.00，1.05，1.10，1.15}。

综合考虑水空双工况性能表现，本文设定优化目标函数为

$$\max\ \eta=W_1\cdot\eta_w+W_2\cdot\eta_a。$$

式中：η_w 与 η_a 分别为水下与空气工况下的推进效率；W_1 与 W_2 为权重因子。

当前阶段主要关注水下性能，设定 W_1=0.7，W_2=0.3，且加入如下约束条件：

1）空气工况下效率 $\eta_a \geqslant 0.70$；

2）水下空泡指数≤阈值，以抑制空化；

3）推力不低于原桨所需最小值。

为获得较高的预测精度，采用如下二阶多项式响应面拟合效率与螺距比之间的函数关系：

$$\eta=a\left(P/P_0\right)^2+b\left(P/P_0\right)+c。$$

通过求解该模型极值点，获得最优螺距比 P/P_0 对应值，并通过仿真验证拟合结果的有效性，7 组不同螺距比的仿真效率如表 1 所示。

表 1　不同螺距比的仿真效率

Table 1　Simulation efficiency at different pitches

螺距比 (P/P_0)	推进效率 η_w	螺距比 (P/P_0)	推进效率 η_w
0.85	0.68	1.05	0.63
0.90	0.73	1.10	0.58
0.95	0.71	1.15	0.52
1.00	0.68		

为描述螺距比与推进效率之间的函数关系，本文基于 7 组 CFD 效率结果，采用二次多项式形式拟合响应面函数。拟合模型如下：

$$\eta\left(P/P_0\right)=-1.857\,1\cdot\left(P/P_0\right)^2+3.342\,9\cdot\left(P/P_0\right)-0.818\,6。$$

模型拟合精度采用决定系数 R^2 进行衡量，R^2 越接近 1 表明拟合效果越好，计算公式为

$$R^2=1-\sum\left(y_i-\hat{y}_i\right)\Big/\sum\left(y_i-\bar{y}\right)。$$

式中：y_i 为 CFD 仿真效率值；$\hat{y}_i$ 为响应面模型预测值；$\bar{y}$ 为效率平均值。

经计算，本模型 $R^2\approx0.98$，说明二次多项式响应面可较好地描述螺距比与推进效率之间的关系，拟合结果可靠。

对拟合模型求导可得最优螺距比 $P/P_0\approx0.9$。为验证响应面拟合所得最优螺距比 P/P_0=0.9 的有效性，本文在 P/P_0= 0.9 及其邻域 0.88 与 0.92 处进行了高精度数值求解。计算与对比结果见表 2。

表 2　局部 CFD 仿真效率与拟合效率预测值对比

Table 2　Comparison of local CFD simulation efficiency and predicted value of fitting efficiency

螺距比 (P/P_0)	推进效率	拟合预测效率	误差 /%
0.88	0.705	0.715	1.42
0.90	0.712	0.726	1.97
0.92	0.709	0.725	2.26

由表 2 可知，拟合预测效率与直接 CFD 计算的

效率差异均小于 3%，证明了最优螺距比 P/P_0= 0.9 的可靠性。

因此将 NACA0012 翼型螺旋桨螺距调为 $0.9P_0$ 和 $1.1P_0$，对 2 种不同螺距比和原桨进行对比分析，同时分析调整螺距之后的螺旋桨在空气工况下的推进效率等参数。

3 湍流模型

3.1 控制方程

本文主要使用连续性方程和动量守恒方程对流体力学的流动特征进行描述，水、空两种介质所使用的模型为湍流模型。由于空气与水环境下流动特性差异显著（如雷诺数、分离行为、空化风险等），单纯改变流体密度不能适配两种介质中不同强度的湍流结构，为兼顾空气与水下两类典型工况的流动特征，本文分别选择 Realizable *k-ε* 与 SST *k-ω* 湍流模型进行计算与分析。

1）空气工况（Realizable *k-ε*）。空气中螺旋桨流动具有高雷诺数与自由剪切层等特征。Realizable *k-ε* 模型在传统 *k-ε* 框架基础上引入旋转 / 曲率修正与涡黏度约束，能够准确地预测旋转域湍流发展，配合标准壁面函数，在 $y^+\approx$ 30~300 的网格范围内具有较好的稳定性，适合用于空气工况下大范围参数扫描与响应面分析。

2）水下工况（SST *k-ω*）。水下流体密度较高、压力梯度比较显著，容易产生边界层分离与空化风险。SST *k-ω* 模型在近壁区保持标准 *k-ω* 形式（要求 $y^+\approx$ 1~5），可准确解析边界层发展，在远场区则平滑过渡至 *k-ε* 模型，避免了标准 *k-ω* 模型对自由流比较敏感的问题，适合用于捕捉螺旋桨叶片表面压力分布与推力特性。

连续性方程通常描述流体在螺旋桨周围的流动特性，对于不可压缩流体的连续性方程可表示为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0\,,$$

式中：u_i 为流体的速度分量；x_i 为空间坐标。

动量方程通常用于描述螺旋桨对流体的作用以及流体对螺旋桨的反作用，其形式为

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]-\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\overline{u_i'u_j'}\right)。$$

式中：ρ 为流体密度；P 为压力；u_i、u_j 为平均速度分量；t 为时间；μ 为动力黏度；$\rho\overline{u_i'u_j'}$ 为雷诺应力项。

基于雷诺平均的 N-S 方程存在无法封闭的问题，故需引入湍流模型建立雷诺应力与平均流场之间的本构关系。

本文在空气仿真中采用 Realizable *k-ε* 两层湍流模型，但该模型在水下工况进行仿真容易忽略近壁低湍流扩散，空化影响严重。

Realizable *k-ε* 两层湍流模型的具体公式如下。

湍动能 *k* 方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+P_k-\rho\varepsilon。$$

湍动能耗散率 *ε* 方程为

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho\varepsilon u_j\right)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_1\frac{\varepsilon}{k}P_k-C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k}。$$

式中：u_t 为湍流黏性系数；ε 为湍动能耗散率；k 为湍动能；P_k 为湍动能的产生项，由平均速度梯度产生；σ_ε 为方程普朗特数；C_1、C_2 为经验常数。

螺旋桨处于水下运行工况时选用 SST *k-ω* 湍流模型，该模型相较于空气工况在边界层解析与压力梯度适应性方面更有优势，表现更稳定，具体公式为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho k u_j\right)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\sigma_k\mu_t\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-Y_k\,,$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho\omega u_j\right)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\mu+\sigma_\omega\mu_t\right)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right]+\alpha\frac{\omega}{k}P_k-\beta\rho\omega^2+2\left(1-F_1\right)\rho\sigma_{\omega_2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial\omega}{\partial x_j}。$$

式中：G_k 为湍流动能生成项；Y_k 为湍流动能耗散项；σ_k 为方程常数；ω 为比耗散率；α、β、σ_ω、σ_{ω_2} 为模型常数；F_1 为混合函数，用于在近壁区与远场之间平滑过渡。

3.2 螺旋桨流体域划分

为模拟螺旋桨周围流场，本文采用多参考系模型（MRF）将计算域设为两个同轴圆柱体：外部静止域（直径 5*D*，长度 9*D*，*D* 为螺旋桨直径）模拟螺旋桨流场，其一端设为速度入口，另一端设为压力出口；内部旋转域（直径 1.2*D*，长度 2*D*）模拟螺旋桨旋转。旋转域采用 HypeMesh 生成高密度非结构网格，静止域则采用低密度结构网格。边界条件设定如下：入口为压力入口，出口为压力出口，静止域外壁面施加无滑移壁面条件。螺旋桨流体域划分示意图如图 4 所示。

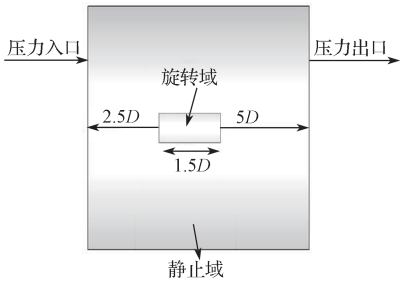
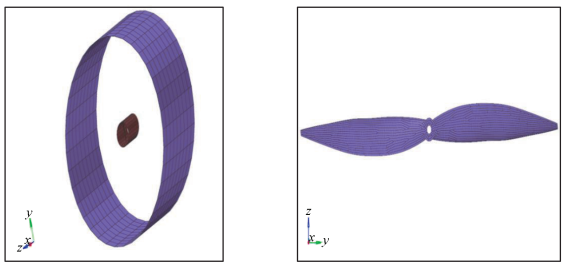


图 4　螺旋桨流体域划分示意图

Fig. 4　Schematic diagram of propeller fluid domain division

3.3　螺旋桨实体网格划分

在 HypeMesh 中对模型进行网格划分，网格选用四面体网格，对边界进行膨胀处理，螺旋桨网格划分如图 5 所示。



a）旋转域网格　　b）螺旋桨网格

图 5　螺旋桨网格划分图

Fig. 5　Ropeller meshing diagram

网格导入 Fluent 后，质量检测确认无负体积，最小正交质量大于 0.01，满足计算要求。针对水空介质工况设置差异化湍流模型：空气工况湍流模型选择 Realizable k-ε 配合标准壁面函数，水中工况湍流模型设置为 SST k-ω 模型，其余参数保持不变。在 Fluent Meshing 中定义流体域、静止域及螺旋桨区域网格密度并确保质量收敛，数值求解设置速度入口边界、压力出口边界、无滑移壁面条件。

3.4　网格无关性验证

网格划分疏密程度会直接影响计算结果精度、浪费计算资源，网格划分得太粗，计算结果无法准确反映流体运动中的细节变化，导致关键区域的数据误差较大。网格划分得过于细密虽能够提升精度，但是会延长计算时间，浪费大量计算资源。

网格无关性验证的作用就是找到合理的网格密度，使得这种密度既能保证计算精度，又不会占用过多计算资源。研究人员通过对比不同疏密程度的网格计算结果，先采用较粗的网格进行初步模拟，再逐步细化关键区域的网格。持续加密网格时，计算结果的变化幅度小于预设的误差范围，这种状态下选用的网格方案才是最合理的。转速为 5 000 r/min 时，确定 3 种不同粗细的网格大小，对螺旋桨进行网格无关性验证，得出结果如表 3 所示。

表 3　螺旋桨网格划分计算结果

Table 3　Propeller meshing calculations

网格种类	网格数量 /10^4	扭矩 /(N·m)	推力 /N
细网格	126.5	4.982	119.64
中网格	276.0	4.548	118.79
粗网格	535.8	4.473	120.14

为提高扭矩数据的准确性并减少资源浪费，需协调计算精度与成本，最终选择 276×10^4 的网格数量作为螺旋桨数值仿真计算的参考值。

4　螺旋桨水空动力特性分析

4.1　螺旋桨的水动力性能分析

在跨介质动力特性分析研究中，螺旋桨水动力特性分析是评估推进效率与载荷特性的关键内容。本文运用 CFD 计算方法，对水下环境中螺旋桨的推力、扭矩及无量纲水动力系数进行分析，其参数方程如下：

$$J=V_a/nD,\quad K_T=T/\rho n^2D^4,$$

$$K_Q=Q/\rho n^2D^5,\ \eta=JK_T/2\pi K_Q。$$

式中：V_a 为来流速度；n 为螺旋桨转速；T 为推力；Q 为扭矩；D 为螺旋桨直径；J 为进速系数；K_T 为推力系数；K_Q 为扭矩系数；η 为推进效率。

本文选择的物理模型为 SST k-ω 湍流模型，液体密度为 1 023 kg/m^3，动力黏度为 1.01×10^{-3} Pa·s。

通过 CFD 数值模拟方法求解水下环境中螺旋桨的推力与扭矩随转速变化的定量关系，结果见表 4。

表 4　螺旋桨水下静推 CFD 仿真计算结果

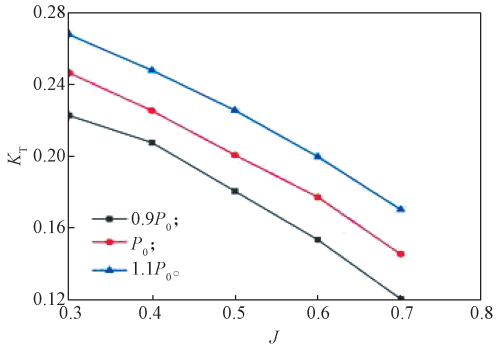
Table 4　Blade numerical calculation results

转速 /(r·min^{-1})	推力 /N	扭矩 /(N·m)
100	26.229 89	0.916 409
200	90.937 03	1.956 660
300	135.567 80	3.541 800
400	373.846 93	5.250 770
500	531.880 72	7.801 860

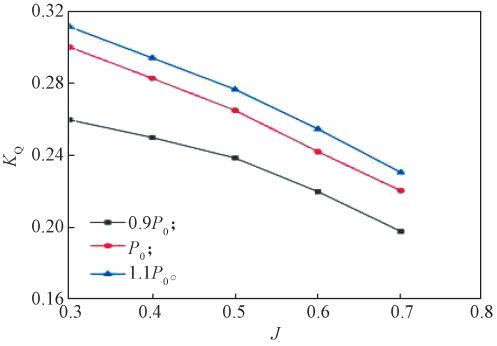
通过计算螺距分别为 $0.9P_0$、P_0 和 $1.1P_0$（P_0 为原桨螺距）的螺旋桨在不同进速系数 J=0.3~0.7 下的敞水性能。图 6 为 J=0.3~0.7 范围内，K_T、K_Q 及 η 值随螺距变化而变化的对比图。

通过图 6a~c 可知，螺距变化对 K_T、K_Q 及 η 均存在显著影响。K_T 与 K_Q 随螺距的增大整体呈上升趋势，且均随进速系数的提高而逐渐降低。而 3 种螺距的 η 均呈先升高后降低的变化规律，其中 $0.9P_0$ 在 J=0.5 ~ 0.7 内效率峰值更突出、整体表现更稳定，$0.9P_0$ 螺旋桨的敞水效率优于 $1.1P_0$ 螺旋桨及原型桨，因此在原型桨基础上适度减小螺距，可提高螺旋桨跨介质水下

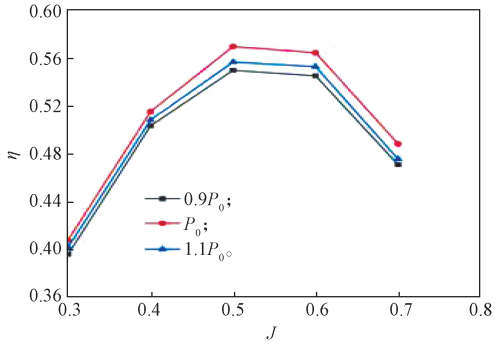
运行时的效率。



a）推力系数



b）转矩系数



c）效率

图 6 不同螺距的各参数变化对比图

Fig. 6 Comparison chart of each parameter of different pitches

4.2 螺旋桨空气动力性能分析

为验证最优螺距方案在空气介质下的工作特性，对 0.9P_0 螺旋桨在空气工况下的动力性能进行仿真分析。计算采用 Realizable k-ε 湍流模型与增强壁面函数，流体介质为标准空气，动力黏度取 $1.789\ 4\times10^{-5}$ Pa·s，转速设为 1 000~5 000 r/min，分析推力、扭矩随转速的变化规律，并与实验拟合结果进行对比。不同转速下的空气静推 CFD 仿真结果见表 5 与图 7。

由表 5 可知，随着转速提升，螺旋桨静推力与扭矩均呈近似二次曲线增长，转速由 1 000 r/min 升至 5 000 r/min 时，静推力由 2.44 N 提升至 91.39 N，扭矩由 0.53 N·m 提升至 15.76 N·m，整体增长趋势平滑，说明 0.9P_0 螺旋桨在空气工况下气动特性稳定。将仿真结果与实验拟合推力对比可知，误差随转速升高逐步降低，由 22.77% 降至 13.30%，整体偏差控制在 24% 以内。误差主要来源于稳态 MRF 计算的固有局限性、网格离散以及建模与实验测量的几何偏差，在工程允许范围内，表明仿真模型具备可靠性。

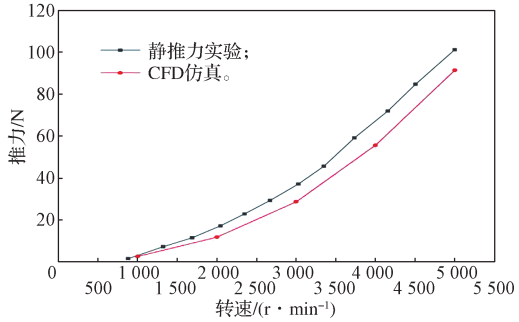


图 7 空气工况下 CFD 仿真与实验静推力对比图

Fig. 7 Comparison of CFD simulation and experimental static thrust under air conditions

表 5 空气工况下 CFD 仿真与静推力实验结果

Table 5 CFD simulation and experimental static thrust test results under air conditions

转速 /(r·min^{-1})	扭矩 /(N·m)	CFD 仿真推力 / N	实验静推力 / N	误差 /%
1 000	0.53	2.44	3.16	22.77
2 000	2.27	11.67	15.38	24.14
3 000	5.29	28.59	36.32	21.29
4 000	9.83	55.57	67.66	17.87
5 000	15.76	91.39	105.41	13.30

通过计算 0.9P_0 与原桨在不同进速系数 J=0.3~0.7 下的 K_T、K_Q 及 η 值的对比结果，如图 8 所示。

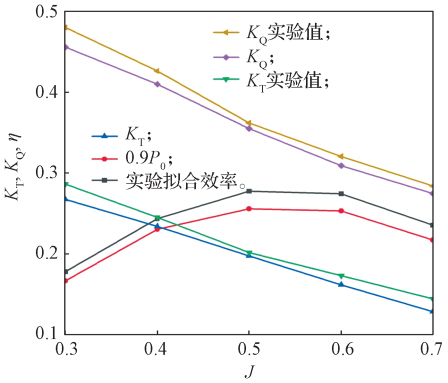


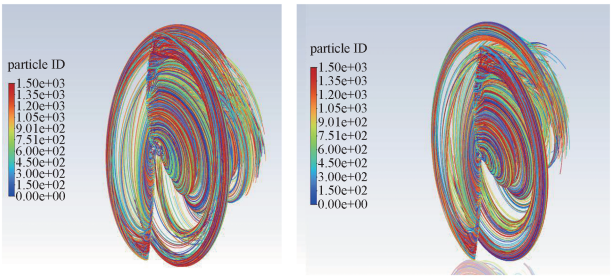
图 8 推力系数、转矩系数和效率实验值和仿真值对比图

Fig. 8 Comparison of the experimental and simulated values of the thrust coefficient, torque coefficient and efficiency

由图 8 可知，0.9P_0 螺旋桨的 K_T、K_Q 曲线与实验值变化趋势一致，效率曲线整体贴合度良好，效率仿真值与实验拟合值误差小于 8%，推力系数 K_T 与 K_Q 仿真值与实验拟合值误差在 5% 以内，结果表明 0.9P_0 螺旋桨适用于空气工况下正常航行。

4.3　水空动力特性对比分析

基于计算流体力学数值仿真方法，可解析螺旋桨绕流区域的流场特性，涵盖速度矢量分布、压力梯度场、湍动能演化及涡量输运等关键物理量。为确保数值收敛性及结果可靠性，所有工况均通过统一收敛判据设置，迭代步数限定为 2 000 步。水下和空气两个设计工况的计算参数如下：水下工况转速为 500 r/min，空气工况转速为 3 000 r/min；两工况进速系数均设定为 J=0.52，仿真计算均执行 2 000 次迭代。螺旋桨空气与水下工况流线状况如图 9 所示。



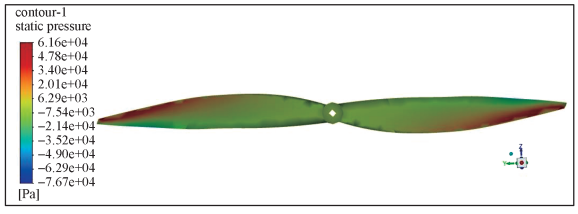
a）空气工况　　b）水下工况

图 9　螺旋桨空气与水下工况流线图

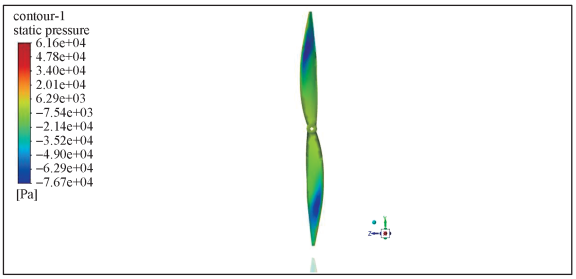
Fig. 9　Treamline diagram of propeller operating conditions in water

仿真结果表明，在空气工况下，螺旋桨叶片流线容易受到叶片表面形状的影响，呈现出更为弯曲的形态，表明流体在叶片周围的流动受到了更大的影响。在水下工况下，螺旋桨叶片流线呈现出螺旋状的涡旋结构，这些涡旋会相互作用，导致涡旋合并或分裂，影响整体流场的稳定性。

图 10 为螺旋桨叶片表面压力梯度分布云图可视化分析，可观察到叶片压力场在展长方向和弦长方向的演化规律，这是评价桨叶升力与阻力性能的关键。



a）叶面



b）叶背

图 10　螺旋桨叶面叶背压力云图

Fig. 10　Propeller blade surface blade back pressure contour

由图 10 可知螺旋桨表面压力分布情况，螺旋桨叶面压力为正，叶背面压力为负。当进速系数 J=0.52 时，叶面压力分布从桨毂向叶尖逐渐增大，叶背压力分布由中心向边缘逐渐减少。随着进速系数 J 的提高，螺旋桨攻角减小，叶面高压区压强降低，叶背低压区负压减弱，导致压力逐渐减小。若来流速度增幅不足以抵消推力系数下降的影响，则总推力可能随 J 增大而减小。

5　结论与展望

本文针对跨介质无人机螺旋桨在空气与水下双介质工况下推进性能不匹配、效率偏低等问题，基于升力线理论与多参考系（MRF）数值仿真方法，开展螺旋桨水空动力特性分析与螺距参数优化，得到的主要结论如下：

1）本文基于升力线理论建立了桨叶几何参数与推进性能的关联关系，以螺距比为优化变量，采用二阶多项式响应面拟合得到效率与螺距比的映射关系，决定系数 $R^2 \approx 0.98$，拟合精度较高；通过求导获得最优螺距比为 $0.9P_0$，经局部 CFD 验证，预测误差小于 3%，优化结果可靠。

2）本文通过 CFD 方法对水下工况和空气工况进行性能分析，分别得到不同工况下的推力系数、扭矩系数和效率等参数。对比 $0.9P_0$ 螺旋桨、原型桨和 $1.1P_0$ 螺旋桨的水下性能，$0.9P_0$ 螺旋桨与实验静推力的空气性能。结果表明，优化后的 $0.9P_0$ 螺旋桨能够满足空气中飞行的需要，同时在水下的航行能力也有所提高，确保满足跨介质无人机双介质连续工作需求。

后续研究可在本文基础上进一步拓展：一是将翼型、弦长、叶片数、桨毂比等几何参数纳入多目标优化，构建水空综合性能更优的推进系统；二是开展气、水跨介质瞬态仿真，考虑入水和出水过程中的空化、气液混合与非稳态载荷，完善全工况动力特性分析；三是采用滑移网格开展非稳态计算，并加工样机开展风洞与水洞实验，提升数值结果的工程验证度。

参考文献：

[1] SIDDALL R，ORTEGA ANCEL A，KOVAČ M. Wind and Water Tunnel Testing of a Morphing Aquatic Micro Air Vehicle[J]. Interface Focus，2017，7(1)：20160085.

[2] ROCKENBAUER F，JEGER S，BELTRAN L，et al. Dipper：A Dynamically Transitioning Aerial-Aquatic Unmanned Vehicle[C]//Robotics：Science and Systems

XVII. Robotics：Science and Systems Foundation，2021. DOI:10.15607/rss.2021.xvii.048.

[3] HORN A C，PINHEIRO P M，GRANDO R B，et al. A Novel Concept for Hybrid Unmanned Aerial Underwater Vehicles Focused on Aquatic Performance[C]//2020 Latin American Robotics Symposium (LARS)，2020 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2020 Workshop on Robotics in Education (WRE). Natal：IEEE，2021：1-6.

[4] 赵 怡 . 水空跨介质航行器推进系统设计与性能分析 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2023.
ZHAO Yi. Propulsion System Design and Performance Analysis of Water-Air Amphibious Vehicle[D]. Harbin：Harbin Engineering University，2023.

[5] 张宇川 . 水空两用推进器桨叶设计与优化 [D]. 沈阳：东北大学，2019.
ZHANG Yuchuan. Design and Optimization of Water-Air Propeller Blade[D]. Shenyang：Northeastern University，2019.

[6] 李汶烨，张 华，缪泉明，等 . 跨介质水空无人航行器关键技术研究综述 [J]. 舰船科学技术，2025，47(10)：1-7.
LI Wenye，ZHANG Hua，MIAO Quanming，et al. A Review of Key Technologies of Cross-Medium Air-Water Unmanned Vehicles[J]. Ship Science and Technology，2025，47(10)：1-7.

[7] 单润柳，童贤东，李家盛，等 . 水空两用螺旋桨优化设计与性能仿真 [J]. 计算机仿真，2023，40(3)：5-10，180.
SHAN Runliu，TONG Xiandong，LI Jiasheng，et al. Optimization Design and Dynamic Performance Calculation of Hybrid Aerial-Aquatic Propeller[J]. Computer Simulation，2023，40(3)：5-10，180.

[8] 廖保全，冯金富，齐 铎，等 . 基于 FLUENT 的新型跨介质航行器气动水动特性研究 [J]. 数值计算与计算机应用，2016，37(4)：265-272.
LIAO Baoquan，FENG Jinfu，QI Duo，et al. Study of Aerodynamic and Hydrodynamic Characteristics for a New Trans-Media Vehicle Based on Fluent[J]. Journal on Numerical Methods and Computer Applications，2016，37(4)：265-272.

[9] 赵文迪，刘静华，梁建宏，等 . 浅析水空跨介质航行器仿生设计研究中的 CAD 技术应用 [J]. 图学学报，2014，35(2)：243-249.
ZHAO Wendi，LIU Jinghua，LIANG Jianhong，et al. The Application of CAD Technology in the Process of Aircraft Bionic Design[J]. Journal of Graphics，2014，35(2)：243-249.

[10] 王宝旭 . 折叠翼式跨介质航行器运动控制研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2024.
WANG Baoxu. Research on Motion Control of Foldable Wing Type Unmanned Aerial-Aquatic Vehicle[D]. Harbin：Harbin Engineering University，2024.

[11] 闫 雷 . 新型机翼可折展水空跨介质飞行器设计与分析 [D]. 北京：北京交通大学，2024.
YAN Lei. Design and Analysis of a Novel Hybrid Aerial Underwater Vehicle with Foldable Wings[D]. Beijing：Beijing Jiaotong University，2024.

[12] 云 忠，温 猛，罗自荣，等 . 仿翠鸟水空跨介质航行器设计与入水分析 [J]. 浙江大学学报（工学版），2020，54(2)：407-415.
YUN Zhong，WEN Meng，LUO Zirong，et al. Design and Plunge-Diving Analysis of Underwater-Aerial Transmedia Vehicle of Bionic Kingfisher[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science)，2020，54(2)：407-415.

[13] 邢文中，蒋 蓁 . 海空无人机的构型设计与气动水动分析 [J]. 弹箭与制导学报，2015，35(4)：113-117.
XING Wenzhong，JIANG Zhen. Configuration Design and Aerodynamic and Hydrodynamic Performance Analysis of Sea-Air Unmanned Aerial Vehicle[J]. Journal of Projectiles，Rockets，Missiles and Guidance，2015，35(4)：113-117.

[14] 武 璇，仉永超，靳良真，等 . 螺距与拱度对螺旋桨水动力性能影响研究 [J]. 江苏船舶，2021，38(3)：24-26，35.
WU Xuan，ZHANG Yongchao，JIN Liangzhen，et al. Research on the Influence of Pitch and Camber on the Propeller's Hydrodynamic Performance[J]. Jiangsu Ship，2021，38(3)：24-26，35.

[15] 叶礼裕，王 超，黄 胜，等 . 不同螺距拟合方式对螺旋桨优化效果的影响分析 [J]. 中国造船，2015，56(3)：96-107.
YE Liyu，WANG Chao，HUANG Sheng，et al. Analysis of Optimization Design of Marine Propeller Pitch with Different Fitting Methods[J]. Shipbuilding of China，2015，56(3)：96-107.

[16] 刘加伟 . 基于等离子体热效应的 NACA0012 翼型增升减阻的数值研究 [D]. 合肥：合肥工业大学，2020.
LIU Jiawei. Numerical Study on Lift Enhancement and Drag Reduction of NACA0012 Airfoil Based on Plasma Thermal Effects[D]. Hefei：Hefei University of Technology，2020.

（责任编辑：姜利民）