中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 10 期: 2462 ~ 2482
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 低空技术与工程专刊

跨介质机器人水动力分析及一体化推进器设计

孙宇锋[1], 何玉龙[1], 周晶[1,2*], 赵黎明[1], 刘妹琴[1]

1. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027
2. 浙江大学海南研究院, 三亚 572025
* E-mail: jingzhou@zju.edu.cn

收稿日期: 2025-09-29; 接受日期: 2026-02-05; 网络版发表日期: 2026-09-22
国家重点研发计划(编号: 2024YFB4710602)和浙江省杰出青年基金(编号: R25F030023)资助项目

摘要 随着机器人技术的发展, 跨介质运动逐渐成为智能无人系统的重要研究方向. 相比传统单一介质的机器人, 水空跨域机器人能够在复杂环境中实现模式切换与持续作业, 显著提升任务适应性与执行效率. 然而, 由于空气与水在密度、黏性和流动特性方面存在巨大差异, 推进系统设计成为制约跨域装备性能的核心问题. 本文提出了一种水空多介质兼容的一体化推进器设计方案, 通过单电机双螺旋桨与行星齿轮减速器的组合, 实现了空中与水下双模式高效推进. 首先, 对机器人本体结构进行简述, 明确了推进系统在整体布局中的作用; 随后, 基于三维计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟方法, 分别对单螺旋桨和整机进行了水动力分析, 揭示了推力、阻力及尾流特性; 进一步地, 结合仿真结果与设计需求, 完成了螺旋桨、电机的选型与优化, 并提出了一体化推进器总体设计方案. 研究结果表明, 所设计的推进器在水下3 kn工况下推力可克服阻力, 推进效率约44%; 此外, 一体化设计使推进器能够实现跨介质切换的稳定性与可靠性. 本研究为新型三栖机器人及低空跨域装备的推进系统研发提供了理论基础与工程参考.

关键词 跨介质机器人, 一体化推进器, 水动力分析, 螺旋桨设计, 电机选型

1 引言

随着机器人技术的飞速发展, 机器人正朝着智能化和专业化的方向不断演进, 其应用已渗透到生活娱乐、工业生产、医疗服务、航空航天等多个关键领域[1]. 当前, 如何有效提升机器人的环境适应性, 使其能够在复杂多变的环境和多样化的任务需求下实现自主作业, 已成为机器人研究领域的核心挑战与难点. 尽管在单一介质空间中运行的机器人技术已取得显著进展, 形成了丰富的种类, 例如陆地上的轮式机器人[2~4]、腿式机器人[5]、履带式机器人[6]及蛇形机器人[7], 水下的螺旋桨推进机器人[8]与仿生推进机器人[9], 以及空中的螺旋桨推进机器人与喷气式推进机器人[10], 但这类机器人的共同局限在于其环境适应能力较弱, 通常只能在预设的特定环境中工作, 从而使其活动范围和任务执行能力受到极大限制. 尤其是在灾害救援、环境监测、海岸巡查等需要同时面对水面、空中甚至水下等多类复杂工况的任务中, 传统单一介质机器人的作业空间往往被严格限制在某一介质内部, 难以实现跨环境、跨介质的连续作业. 这种矛盾客观上催生了

引用格式: 孙宇锋, 何玉龙, 周晶, 等. 跨介质机器人水动力分析及一体化推进器设计. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 2462–2482
Sun Y F, He Y L, Zhou J, et al. Hydrodynamic analysis of cross-medium robots and integrated propulsion system design (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 2462–2482, doi: 10.1360/SST-2025-0286

© 2026《中国科学》杂志社

能够在水、空等不同介质之间自主转换工作模式的跨介质机器人及其一体化推进系统的需求.

针对上述挑战, 能够跨越水、空等不同介质的智能无人系统正逐渐成为学术界与工程界的研究热点. 与传统的单一环境无人机或水下航行器相比, 水空跨域装备能够在复杂环境中实现介质的快速切换和持续作业, 极大地扩展了作业空间并提升了任务执行的灵活性. 近年来, 该领域涌现出多项创新研究. 2011年, 麻省理工学院的研究团队率先提出了一种仿飞鱼的水空两栖机器人原型[11], 通过建立数学模型并结合实验, 深入探究了跨介质运动所需的推力与功率特性. 2012年, 麻省理工学院林肯实验室开发了一款模仿北方鲣鸟的小型俯冲式两栖飞行器[12], 该设计巧妙地采用了机翼折叠机构和中性浮力设计, 确保了在空中与水下均能维持良好的稳定性. 随后, 麻省理工学院的研究人员在2014~2015年间发现, 在扑翼运动中引入直线振荡能显著提升升力与推进效率, 并基于此原理设计了一套可同时适用于空气和水环境的扑翼驱动系统[13]. 宾夕法尼亚大学的Piccoli等人则在2013年设计了一种可密封打包的三栖无人平台[14], 通过创新的折叠与拆卸结构实现了多模态转换, 兼具便携性与低成本优势. 在基于螺旋桨推进的水空跨域平台方面, 也涌现出一系列具有代表性的工作. 美国罗格斯大学研制了“Naviator”双层四旋翼跨水空介质机器人[15,16], 采用上下布置的双层多旋翼推进系统, 可实现空中飞行、水下航行以及垂直跨越水空界面的运动, 其两栖运动能力已在水池实验中得到验证. 美国加利福尼亚大学伯克利分校的Zha等人研制了一款微小型四旋翼跨介质机器人[17], 通过同一套四旋翼推进系统在空中和水下均提供推力, 并提出了突破平静水面的跨介质运动策略, 实验验证了其跨越水面的可行性, 但仍存在轨迹跟踪误差和跨越过程延迟等问题. 国内方面, 同济大学的Liu等人提出了带有倾斜结构的矢量推进四旋翼跨介质机器人“同济飞鱼”[18], 其四个螺旋桨可独立倾转, 在跨介质运动中兼顾姿态调节与推力分配; 为提高空用螺旋桨在水下的推进效率, 该团队在推进系统中引入了由电机正反向驱动的双速变速箱, 为不同流体环境提供两档工作转速. Chen等人进一步提出了一种新型折叠翼混合空水飞行器[19], 采用“前部折叠螺旋桨+流线型艇体机身+前后折叠机翼+尾部水下推进器”的总体布局, 并通过数值分析与原理样机试验验证了该构型在空-水跨介质过渡中的可行性和稳定性. 上海交通大学Wei等人通过可控速度/加速度/姿态的约束实验测得HAUV[20]出水过程时变载荷, 指出当速度大于0.1 m/s时自由液面吸力随速度先增大后趋于稳定, 最大约为重力的10%, 且姿态对过渡力矩影响明显、除时变浮力外的水动力矩不可忽略. 同时, 上海交通大学针对多旋翼混合空水平台[21]也开展了出水/入水水动力试验研究, 指出跨介质过程中总阻力不可忽略, 且机臂等非流线部件对阻力贡献显著; 在恒速出水/入水条件下, 总阻力主要受浸深与速度共同影响, 并随速度增大而增大, 在特定浸深位置阻力随速度呈近似线性增长, 不同浸深下斜率差异与水下投影面积变化相关. 该类研究表明, 跨介质推进系统不仅需满足空中飞行与水下航行的稳态推力需求, 还需在介质切换阶段为突增阻力与附加质量效应预留足够的推力裕度与能量余量, 从而对推进器选型、结构集成提出更高要求. 总体来看, 上述工作在跨介质构型设计、多旋翼布局及空中/水下推进机理方面取得了丰富成果, 但多采用空、水分体推进或多转子冗余等方案, 在推进系统结构集成度、水下推进效率以及面向工程应用的一体化推进器设计方面仍存在改进空间.

在实现水空跨域运动的众多技术挑战中, 推进系统是决定其性能的核心. 然而, 空气与水在密度、黏性及流动特性上存在巨大差异, 现有多旋翼与折叠翼跨介质平台虽然通过空、水分体推进, 多转子冗余或在空用螺旋桨基础上增加变速机构等方式, 在跨越水空界面和姿态控制方面取得了良好效果, 但也不可避免地引入了结构冗余、质量与能耗增加以及控制系统复杂化等问题, 在一定程度上制约了装备的小型化和工程实用性.

针对上述问题, 本文面向跨域特种机器人平台, 提出了一种水空多介质兼容的一体化推进器设计方案. 该方案采用单电机双螺旋桨+行星齿轮减速器构型, 通过正反转及传动切换在空中和水下实现不同工作模式, 以减少推进装置数量、提高结构集成度并兼顾两种介质下的推进效率与可靠性. 为实现此目标, 本文首先建立了推进器的流体力学模型, 并运用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)仿真方法, 对螺旋桨在不同工况下的水动力特性进行了系统性分析. 在此基础上, 本文深入研究了推进器电机的最优参数匹配与螺旋桨的最佳结构设计, 并结合行星齿轮减

速器在传动系统中的高效能特性，致力于全面提升推进器的推重比、推进效率及运行可靠性. 本研究旨在为新型低空跨域装备的推进系统研发提供坚实的理论基础与可行的工程实现路径.

2 系统设计概述

本研究所采用的三栖机器人由机身主体、空中推进系统、水下推进系统以及电气控制与能源模块组成, 如图1所示. 整体布局兼顾空气动力学与水动力学性能，确保在空中与水下均具备良好的稳定性与推进效率. 机器人外形采用流线型设计，以减小空气阻力和水下压差阻力，同时为内部推进器布置提供合理空间. 空中推进系统由四组对称布置的螺旋桨组成，类似四旋翼布局，主要用于空中飞行阶段的升力与姿态控制. 该系统采用高转速、轻量化桨叶，以保证良好的飞行稳定性和机动性. 水下推进系统由四组布置在机身中下部的螺旋桨组成，主要用于水下航行与姿态调整. 水下桨叶采用小直径、低转速设计，以避免空化并提高推进效率. 在垂直运动中，该系统提供轴向推力支持, 使机器人能够实现下潜与上浮.

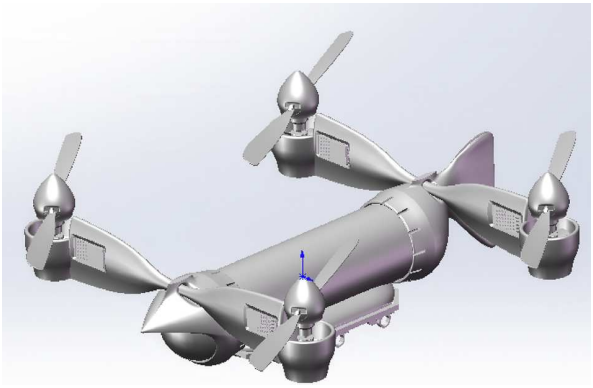


图 1 (网络版彩图)本体结构图
Figure 1 (Color online) Schematic of the body structure.

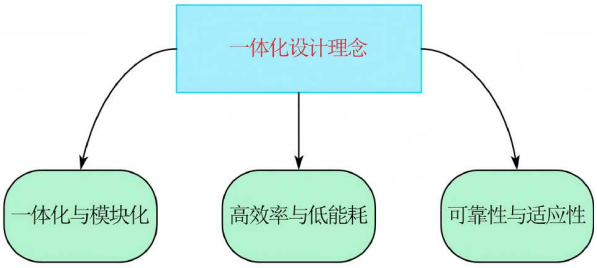


图 2 (网络版彩图)一体化设计图
Figure 2 (Color online) Schematic of the integrated design.

2.1 推进系统设计理念

如图2所示, 为实现跨介质高效推进并提升系统适应性, 本研究在一体化推进器设计中遵循以下原则.

(1) 一体化与模块化: 推进系统高度集成, 同时核心部件(如桨叶、电机)具备模块化特性，便于维修与升级.

(2) 高效率与低能耗: 针对水、空两种差异巨大的介质，通过优化桨叶、传动与控制策略，最大限度地提升两种模式下的推进效率.

(3) 可靠性与适应性: 整体结构坚固, 具备优良的防水、防腐蚀与抗冲击能力，确保系统在复杂的水空环境中稳定运行.

2.2 水下螺旋桨设计准则

在三栖机器人推进系统中，水下螺旋桨的性能直接决定了其在水下航行时的效率与可靠性. 与空中螺旋桨相比，水下推进环境密度更大、流体特性更复杂，需在设计中综合考虑空化、噪声和多工况适应性等因素.

水下螺旋桨的设计主要包括以下几点.

(1) 工作环境特殊: 水下流体密度约为空气的1000倍，压力随深度增加，桨叶需具备足够强度与耐压能力.

(2) 低噪声需求: 任务场景可能涉及科考或隐蔽作业, 需降低空化噪声与湍流噪声.

(3) 小尺寸高功率密度: 受机身空间约束, 桨叶直径较小, 但仍需在低转速下产生足够推力.

(4) 多工况适应性: 需兼顾巡航、加速与悬停等模式, 部分应用要求正反转能力.

水下螺旋桨的设计原则在以下列出.

(1) 抗空化优先: 通过控制叶尖速度和优化翼型曲率，避免叶片表面出现空化，确保推力稳定性和结构寿命.

(2) 低噪声设计: 采用前缘钝圆、尾缘平缓的翼型, 适度增加叶片数量, 并对叶梢进行优化, 以降低湍流与叶梢涡噪声.

(3) 效率与续航平衡: 在保证推力的前提下, 匹配螺距与转速, 减小滑失率, 从而提升推进效率并延长续航时间.

在具体参数选型过程中, 本文并未直接采用单一经验参数, 而是依据上述设计准则, 对螺距、转速及翼型参数进行了前期筛选与权衡分析. 在效率方面, 在给定桨径和目标航速条件下, 基于螺旋桨相似理论与推进效率表达式对不同螺距比与转速组合对应的进速系数区间进行了估算. 结果表明, 螺距过小或转速过低会导致推进效率显著下降, 而螺距过大或转速过高则会引起轴功率需求增加及噪声风险上升. 因此, 本文选取位于效率峰值附近, 且对转速变化不敏感的螺距-转速组合作为设计基准, 以兼顾推进效率与工况适应性. 在抗空化方面, 结合目标航速与工作深度, 对桨叶表面局部流速和压力水平进行了估算, 并参考常用水下螺旋桨翼型的空化特性. 通过控制叶尖线速度、采用前缘圆钝、尾缘平缓的翼型轮廓, 并对叶梢进行圆角优化, 优先规避在设计工况下可能出现的低压集中区域, 从而降低空化发生风险. 基于上述效率与抗空化等因素的综合权衡, 本文最终确定了一种在典型工况下性能较优的桨型, 并在后续章节中针对该桨型开展CFD数值仿真分析, 以验证一体化推进器在水下及跨介质应用中的水动力性能.

3　仿真实验

推进器的水动力性能直接决定了三栖机器人在水下航行时的速度、效率与可靠性. 为此, 本研究分别开展了螺旋桨水动力仿真与整机水动力仿真, 并基于数值结果对流场特性、阻力变化规律及效率进行分析, 为后续推进器设计提供理论依据.

3.1　水下螺旋桨水动力仿真

螺旋桨的三维建模使用SolidWorks进行, 确保了精确的几何设计和模型生成. 关键几何参数包括桨径、螺距、叶片数等水下螺旋桨的核心参数和桨叶的三维模型分别如表1和图3所示.

采用STARCCM+软件对水下螺旋桨近水面航行时的水动力进行仿真计算, 选取SST k-ω湍流模型, 对于计算域选择, 本文选择了三维长方体形的流域, 将水下螺旋桨放置在自由液面下方5 m处, 前端面设置为速度进口, 给定进流速度3 kn, 后端面设置为压力出口, 参考压力取一个标准大气压强, 流域侧面设置为对称边界, 螺旋桨表面设置为无滑移壁面.

表 1　水下螺旋桨核心参数
Table 1　Key parameters of the underwater propeller

参数	值
直径 (mm)	134
转速 (r/min)	1500
螺距 (mm)	142
桨叶数量	3

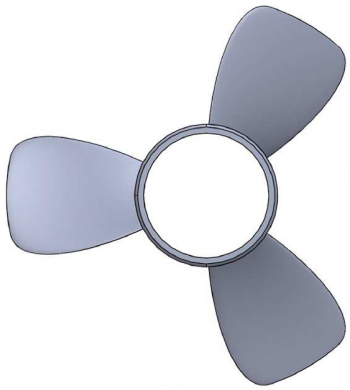


图 3　水下螺旋桨三维模型图
Figure 3　Three-dimensional model of the underwater propeller.

采用切割体网格对计算域进行划分, 共设置4层网格过渡区域, 且模型曲率过渡较大的位置采用较小尺寸的网格进行划分, 以保证计算结果的准确, 此外, 采用滑移网格的方法模拟水下螺旋桨的旋转运动, 整体计算域的网格数量为6028379, 旋转域内的网格数量为3963841.

在三栖机器人水下螺旋桨的水动力特性研究当中, 螺旋桨的性能评估通常依赖于一些重要参数. 例如, 螺旋桨的工作条件通常采用进速系数J来描述, 其定义为螺旋桨在前进方向上的移动速度与自身转速及桨叶直径乘积的比值, 进速系数的公式为

$$J = \frac{V}{nD}, \tag{1}$$

式中, V为机器人的航行速度(m/s), n为螺旋桨的转速(r/s), D为桨叶直径(m).

进速系数可用于定义三栖机器人的水下推进工

况，而螺旋桨的基本性能还需用推力系数等无量纲参数来描述.

推力系数为

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}. \tag{2}$$

转矩系数为

$$K_Q = \frac{T}{\rho n^2 D^5}. \tag{3}$$

推进效率为

$$\eta = \frac{JK_T}{2\pi K_Q}, \tag{4}$$

式中, T为螺旋桨的推力(N), Q为螺旋桨的转矩(N m), ρ为气体介质的密度(kg/m^3), η为螺旋桨的推进效率.

经过仿真，得到水下螺旋桨的水动力性能统计结果, 如表2所示.

为量化螺旋桨桨叶上的压力分布，引入压力系数C_{pressure}, 其定义如下:

$$C_{\text{pressure}} = \frac{2p}{\rho n^2 D^2}, \tag{5}$$

式中, p为静压力(Pa), ρ为空气密度(kg/m^3), n为螺旋桨转速(r/s), D为螺旋桨直径(m).

螺旋桨正面和反面的压力系数见图4, 可以明显发现背流面的压力明显高于迎流面的压力，因此螺旋桨产生正向推力，且前、后压差较大的位置存在于叶梢位置. 另外螺旋桨每个叶片在迎流面上的压力分布并不均匀，甚至其中一个叶片存在明显的低压区，这是由于流体的进流方向与螺旋桨的法向垂直，导致叶片的实际作用攻角增加.

表 2 水下螺旋桨水动力性能

Table 2 Hydrodynamic characteristics of the underwater propeller

参数	值
航速 (kn)	3
推力系数	0.4406
转矩系数	0.0731
推进效率	0.4417

3.2 三栖机器人水动力仿真

3.2.1 水平运动

采用软件STARCCM+对三栖机器人进行水下水平运动时的水动力进行仿真计算, 选取SST k-ω湍流模型，对于计算域选择，本文选择了三维长方体形的流域，将三栖机器人放置在无限深海域，针对水平纵向运动, 前端面设置为速度进口, 给定进流速度, 后端面设置为压力出口, 参考压力取一个标准大气压强, 相对压力为零, 流域侧面设置为对称边界, 水下机器人表面设置为无滑移壁面.

采用切割体网格对计算域进行划分, 共设置4层网格过渡区域，且模型曲率过渡较大的位置采用较小尺寸的网格进行划分，以保证计算结果的准确，整体计算域的网格数量为3172862，图5和6分别为水下机器人表面网格和计算域中纵剖面的网格.

三栖机器人在水下水平航行时，其自身阻力是影响其航行姿态和水动力性能的关键因素，本节分别计算了该机器人在航速1、3和6节下的水动力和流场特

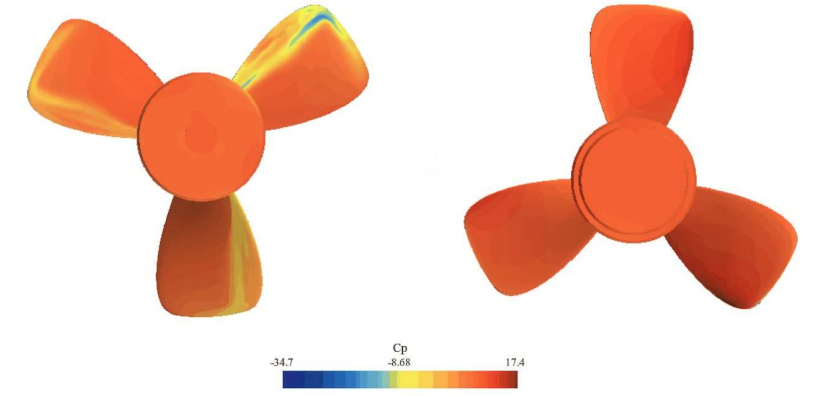


图 4 (网络版彩图)水下螺旋桨的压力系数

Figure 4 (Color online) Pressure coefficient distribution of the underwater propeller.

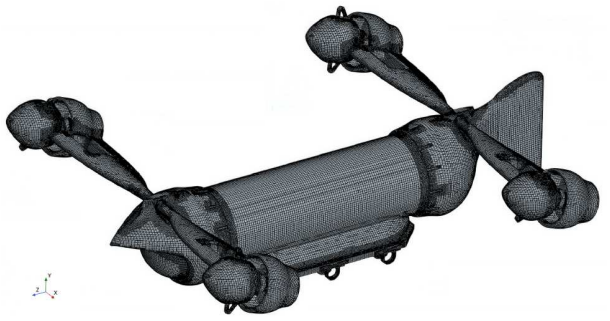


图 5　(网络版彩图)机器人表面的网格划分图
Figure 5　(Color online) Mesh generation of the robot surface.

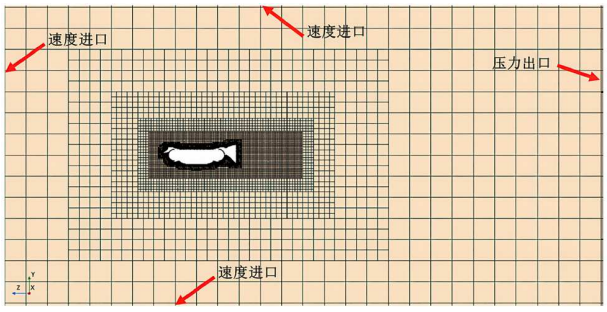


图 6　(网络版彩图)中纵剖面的网格划分图
Figure 6　(Color online) Mesh generation of the longitudinal section.

征, 其中阻力和升力的计算结果见表3, 阻力和升力的方向定义见图7. 随着航速升高, 机身受到的阻力和升力均呈现非线性升高的趋势, 当航速达到6节时, 阻力为538.63 N, 升力为605.71 N, 时域结果见图8.

三栖航行器在水下沿水平方向航行时, 由于机身整体呈现流线型, 因此尾部出现明显低速区, 且主要存在于下半部分. 另外由于机身首部与机身中部之间采用机械嵌套的形式实现连接, 存在较大的曲率变化, 因此机身中部存在低速区, 但低速区的分布区域随着航速增加而减小, 航速1、3和6节时中纵剖面的速度场分布见图9.

水平航速1、3和6节时螺旋桨位置的速度场分布见图10, 若不搭配空中螺旋桨, 前侧螺旋桨毂帽的尾流对后侧螺旋桨毂帽的影响较小.

三栖机器人在水下沿水平方向航行时, 机身首部和螺旋桨的毂帽位置存在压力驻点, 见图11和12. 随着航速增大, 压力也逐渐升高. 当机器人在低速航行时, 机身前、后侧的压差阻力是影响总阻力的重要因

表 3　水平运动升阻力计算结果
Table 3　Computed lift and drag in horizontal motion

航速 (kn)	阻力 (N)	升力 (N)
1	16.48	10.18
3	139.89	142.54
6	538.63	605.71

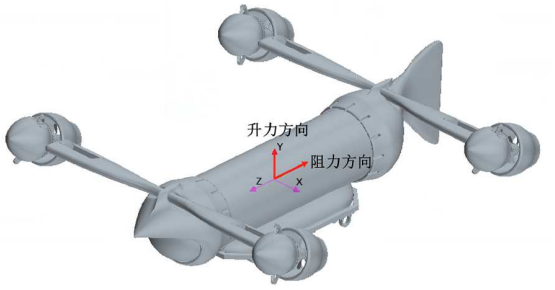


图 7　(网络版彩图)水平运动升阻力的方向定义图
Figure 7　(Color online) Illustration of lift and drag directions in horizontal motion.

素, 因此在设计时尽可能优化外形以降低压差阻力.

3.2.2　垂直运动

本文采用STARCCM+软件对三栖机器人进行水下垂直运动时的水动力进行仿真计算, 选取SST k-ω 湍流模型. 本节选择三维长方体形的流域, 针对垂直运动, 上端面设置为速度进口, 给定进流速度, 下端面设置为压力出口, 参考压力取一个标准大气压强, 相对压力为零, 流域侧面设置为对称边界, 三栖机器人表面设置为无滑移壁面.

采用切割体网格对计算域进行划分, 共设置4层网格过渡区域, 且模型曲率过渡较大的位置采用较小尺寸的网格进行划分, 以保证计算结果的准确, 整体计算域的网格数量为4009443, 三栖机器人的表面网格见图13, 计算域中纵剖面的网格见图14.

本节针对三栖机器人的上升运动工况, 分别计算了航速1、2和3节下的机身水动力和流场特征, 其中阻力和轴向力的计算结果见表4, 阻力和轴向力的方向定义见图15. 随着航速升高, 机身受到的阻力和轴向力均呈现非线性升高的趋势, 当航速达到3节时, 阻力为266.72 N, 轴向力为−27.42 N.

机身垂直运动时的阻力和轴向力时域结果见图16.

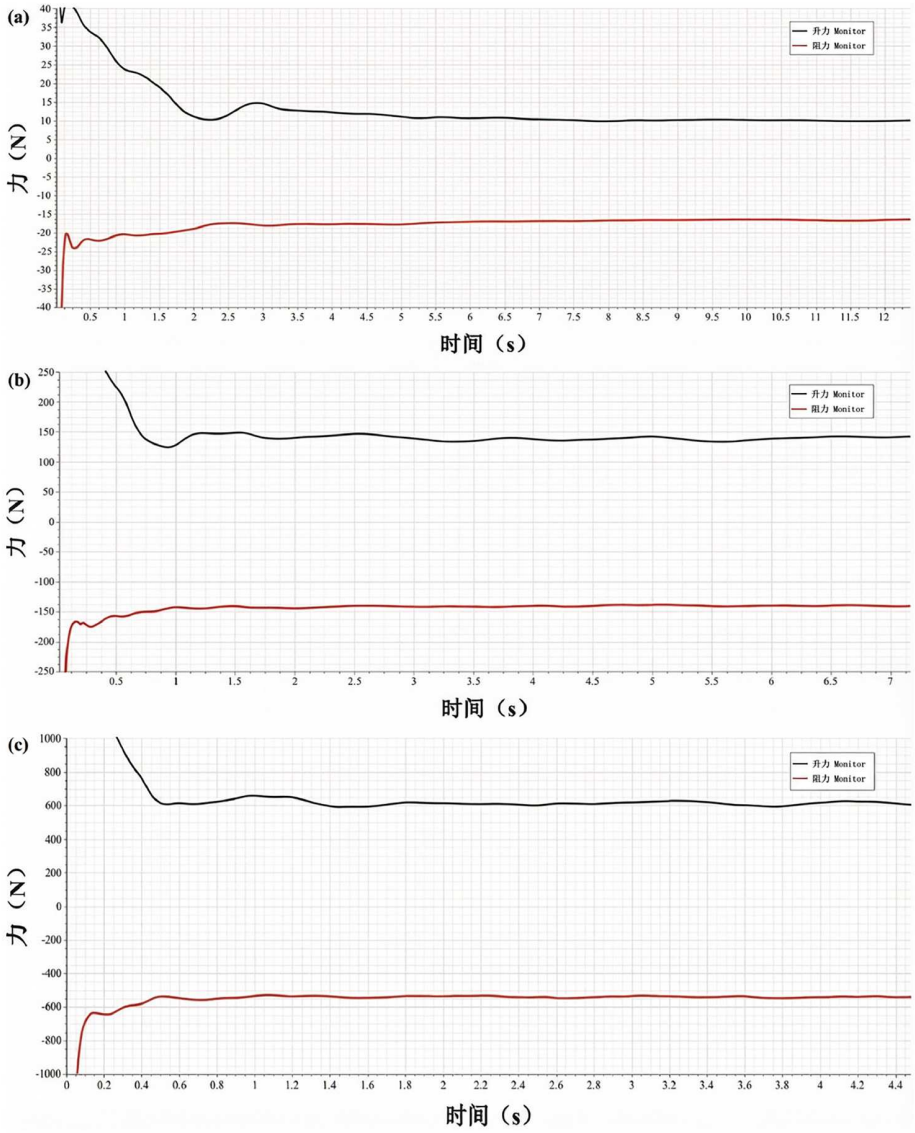


图 8 (网络版彩图)水平运动升阻力的时域结果图. (a) 航速1节; (b) 航速3节; (c) 航速6节

Figure 8 (Color online) Time-domain results of lift and drag in horizontal motion. (a) Velocity 1 kn; (b) velocity 3 kn; (c) velocity 6 kn.

三栖航行器在水下沿垂直方向航行时，机身下侧出现明显低速区. 航速1、2和3节时中纵剖面的速度场分布见图17.

上升航速1、2和3节时螺旋桨位置的速度场分布见图18. 前侧螺旋桨毂帽的尾流长度明显长于后侧螺旋桨，即前侧螺旋桨下方的尾流恢复速度较慢，在多个机器人编队上升航行时，应注意该位置的速度分布.

三栖机器人在水下沿垂直方向航行时，机身和螺旋桨毂帽的上侧存在压力驻点，见图19和20. 随着航速增大，压力也逐渐升高. 当机器人以较低速度上升时，机身上、下侧的压差阻力是影响总阻力的重要因素, 因此在设计时尽可能优化外形以降低压差阻力.

由仿真结果可知，三栖机器人在3节高速运动时，理论推力F为440 N，实际推力F_1为193 N，总推力F_2为772 N，所需扭矩T为44 N m，由此可知最大阻力266.72 N<<总推力772 N, 此水下推进器桨叶理论上可满足要求. 即如以下公式所示.

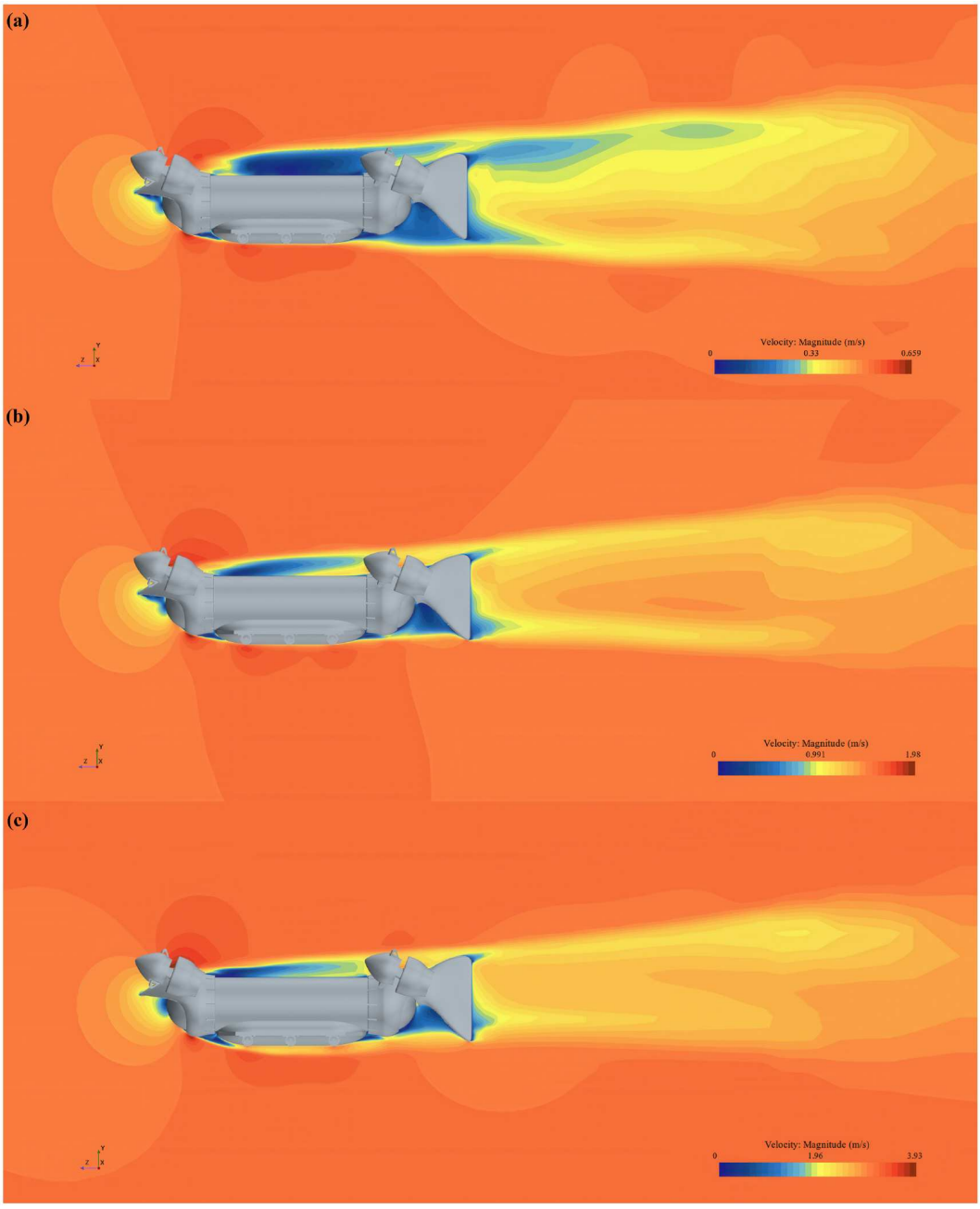


图 9　(网络版彩图)中纵剖面的速度分布(水平运动)图. (a) 航速1节; (b) 航速3节; (c) 航速6节

Figure 9　(Color online) Velocity distribution on the central longitudinal section (horizontal motion). (a) Velocity 1 kn; (b) velocity 3 kn; (c) velocity 6 kn.

理论推力为

$$F = K_T \rho n^2 D^4. \tag{6}$$

实际推力为

$$F_1 = F\eta. \tag{7}$$

总推力为

$$F_2 = 4F_1. \tag{8}$$

所需扭矩为

$$T = \frac{K_T \rho n^2 D^5}{2}. \tag{9}$$

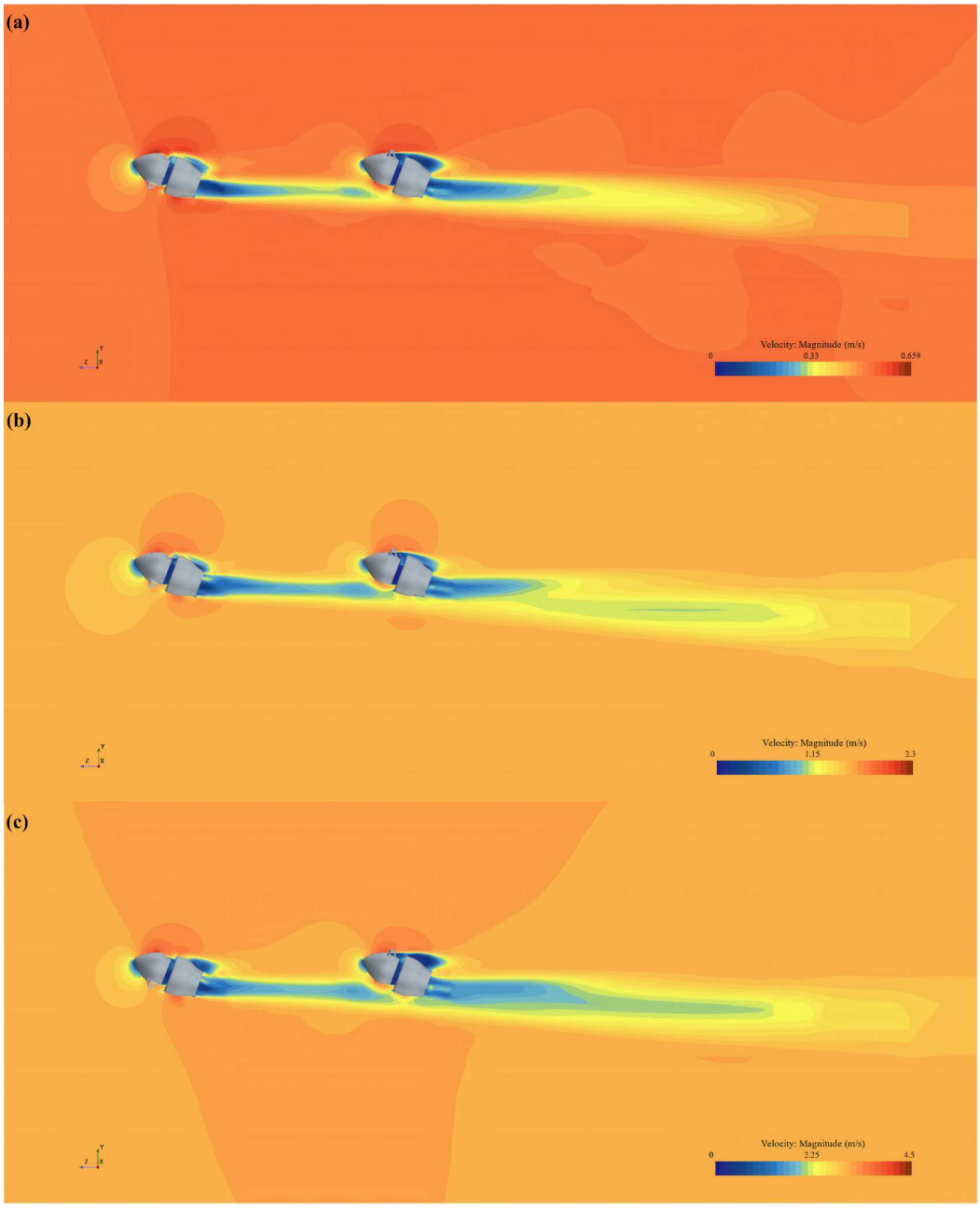


图 10 (网络版彩图)螺旋桨位置的速度分布(水平运动)图. (a) 航速1节; (b) 航速3节; (c) 航速6节

Figure 10 (Color online) Velocity distribution at the propeller position (horizontal motion). (a) Velocity 1 kn; (b) veloc-ity 3 kn; (c) velocity 6 kn.

4 推进器设计方案

推进器是跨介质机器人动力系统的核心部件, 其性能直接决定了机器人在空中与水下的机动性、效率与可靠性. 本节将从螺旋桨设计、电机选型以及一体化方案三个方面展开论述, 提出满足水空多介质兼容需求的推进系统设计方案.

4.1 螺旋桨设计选择

跨介质机器人在空气与水两种差异巨大的介质中

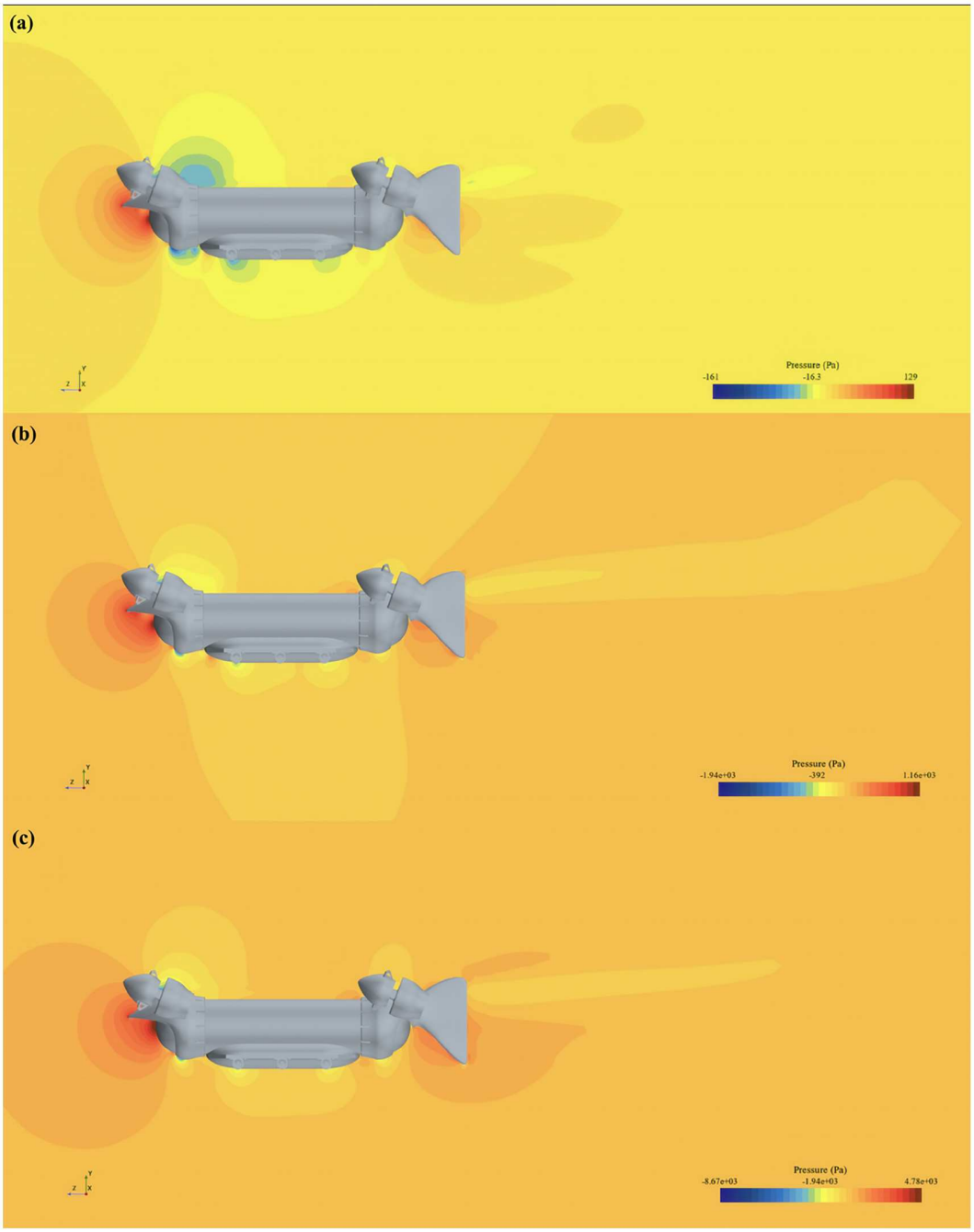


图 11　(网络版彩图)中纵剖面的压力分布(水平运动)图. (a) 航速1节; (b) 航速3节; (c) 航速6节

Figure 11　(Color online) Pressure distribution on the central longitudinal section (horizontal motion). (a) Velocity 1 kn; (b) velocity 3 kn; (c) velocity 6 kn.

运行, 螺旋桨有不同要求, 在空气中提供高转速、低扭矩输出, 以满足飞行所需升力; 在水下提供低转速、大扭矩推力, 以克服高密度流体阻力. 在水下航行中还需避免桨叶表面空化, 同时降低尾流噪声, 以提升隐蔽性与稳定性. 此外, 螺旋桨直径受机身空间限制, 但需在有限尺度下保证推重比.

基于前文的水动力仿真, 最终确定水下螺旋桨直径为119 mm, 螺距为142 mm, 叶片数为3片. 该组合在

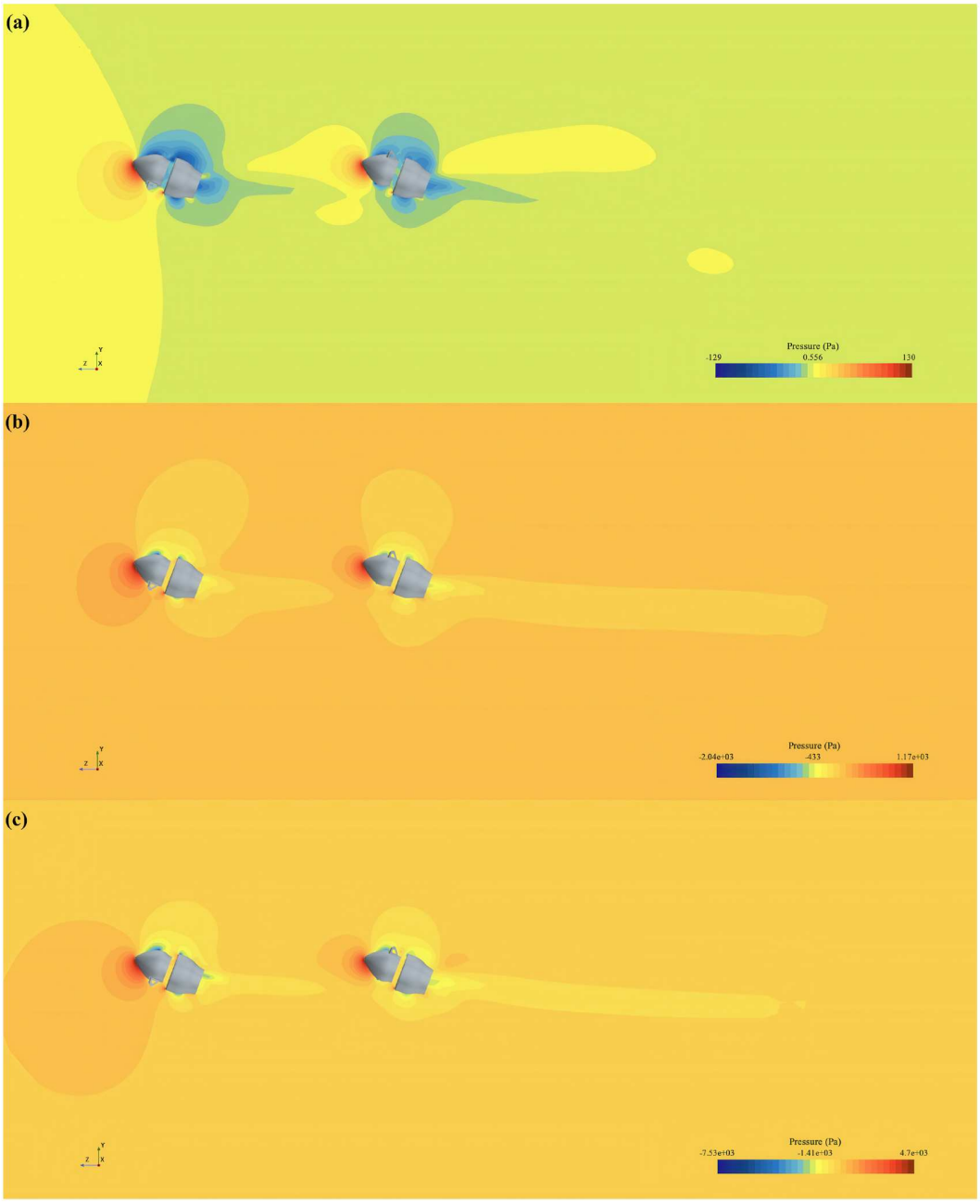


图 12 (网络版彩图)螺旋桨位置的压力分布(水平运动)图. (a) 航速1节; (b) 航速3节; (c) 航速6节

Figure 12 (Color online) Pressure distribution at the propeller position (horizontal motion). (a) Velocity 1 kn; (b) velocity 3 kn; (c) velocity 6 kn.

3 kn航速下能够满足推力要求, 推进效率约为44%. 此外, 在翼型优化方面, 对叶片前缘采用钝圆设计, 尾缘平滑过渡, 以降低空化倾向.

在叶梢处理方面, 叶梢引入小角度后掠, 削弱叶梢涡, 降低噪声. 在强度设计方面, 采用TC4钛合金材料, 兼具高强度与耐腐蚀性能.

4.2 电机设计选择

为实现水空一体化推进, 电机需满足一些特性要求. 在扭矩与转速方面, 根据CFD仿真结果, 确定电机



图 13　机器人表面的网格划分图
Figure 13　Mesh generation of the robot surface.

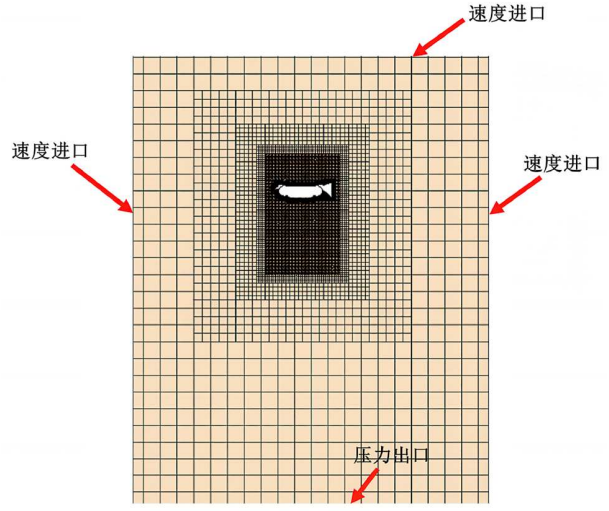


图 14　(网络版彩图)中纵剖面的网格划分图
Figure 14　(Color online) Mesh generation of the longitudinal section.

在水、空两种模式下所需的最大扭矩为44 N m和最高转速为1500 r/min. 水下模式要求大扭矩、低转速; 空中模式要求高转速、中等扭矩. 在动态响应方面, 要求电机具备快速的加减速能力, 以应对姿态变化和模式切换. 在功率需求方面, 根据前面的计算结果, 水下推进器的峰值功率和持续功率分别如下:

$$P_{\text{peak}} = \frac{Tn}{9550} = 6.9\ \text{kW}, \tag{10}$$

$$P_{\text{continuous}} = \frac{Tn\eta}{9550} = 3.03\ \text{kW}. \tag{11}$$

针对上述需求, 可选用外转子无刷直流电机, 该电机结构紧凑, 功率密度高, 低速扭矩特性好, 散热相对

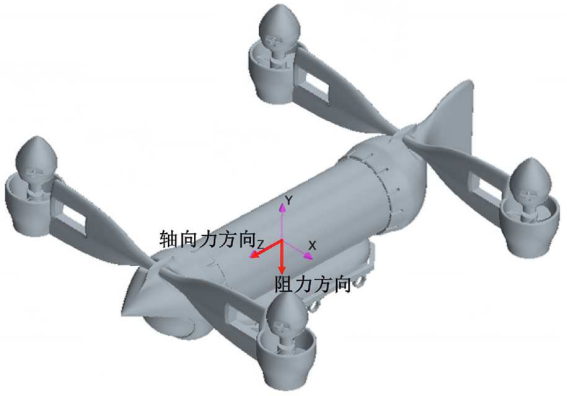


图 15　(网络版彩图)垂直运动阻力和轴向力的方向定义图
Figure 15　(Color online) Illustration of drag and axial force directions in vertical motion.

表 4　垂直运动阻力和轴向力计算结果
Table 4　Calculation results of drag and axial force in vertical motion

航速 (kn)	阻力 (N)	轴向力 (N)
1	31.62	−3.80
2	123.34	−14.16
3	266.72	−27.42

容易, 但需要做严格的防水和防腐蚀处理. KV值是电机的关键参数, 针对水、空两种模式不同转速, 选择KV须在28~64 r/(min v)之间. 最大功率需大于两种模式的峰值需求, 并留有20%~30%的裕量, 即电机峰值功率在8.62 kW以上. 重量与尺寸在满足性能前提下, 尽可能轻量化、小型化. 在水中还需做防水防腐处理, 定子线圈采用环氧树脂真空灌封, 在磁钢与铁芯表面做防腐涂层处理(如电泳漆), 轴承选用不锈钢轴承或陶瓷轴承, 出线口采用防水密封处理. 该电机的最大扭矩为17.24 N m, 为满足水下低速大扭矩需要, 需配合微型行星减速器使用, 减速器具体参数如表5所示.

4.3　一体化机械设计

针对三栖跨域机器人推进器设计, 为满足不同介质兼容需求, 本研究突破传统冗余配套方案, 采用独特的集成式推进器一体化设计思路. 该设计方式有效降低三栖特种机器人组件的体积与重量, 实现系统整体布局的优化并为外形设计提供坚实的理论支持.

本方案由直流无刷电机、驱动器、减速器、轴承、水下桨叶以及相关固定件组成, 各部件之间相互

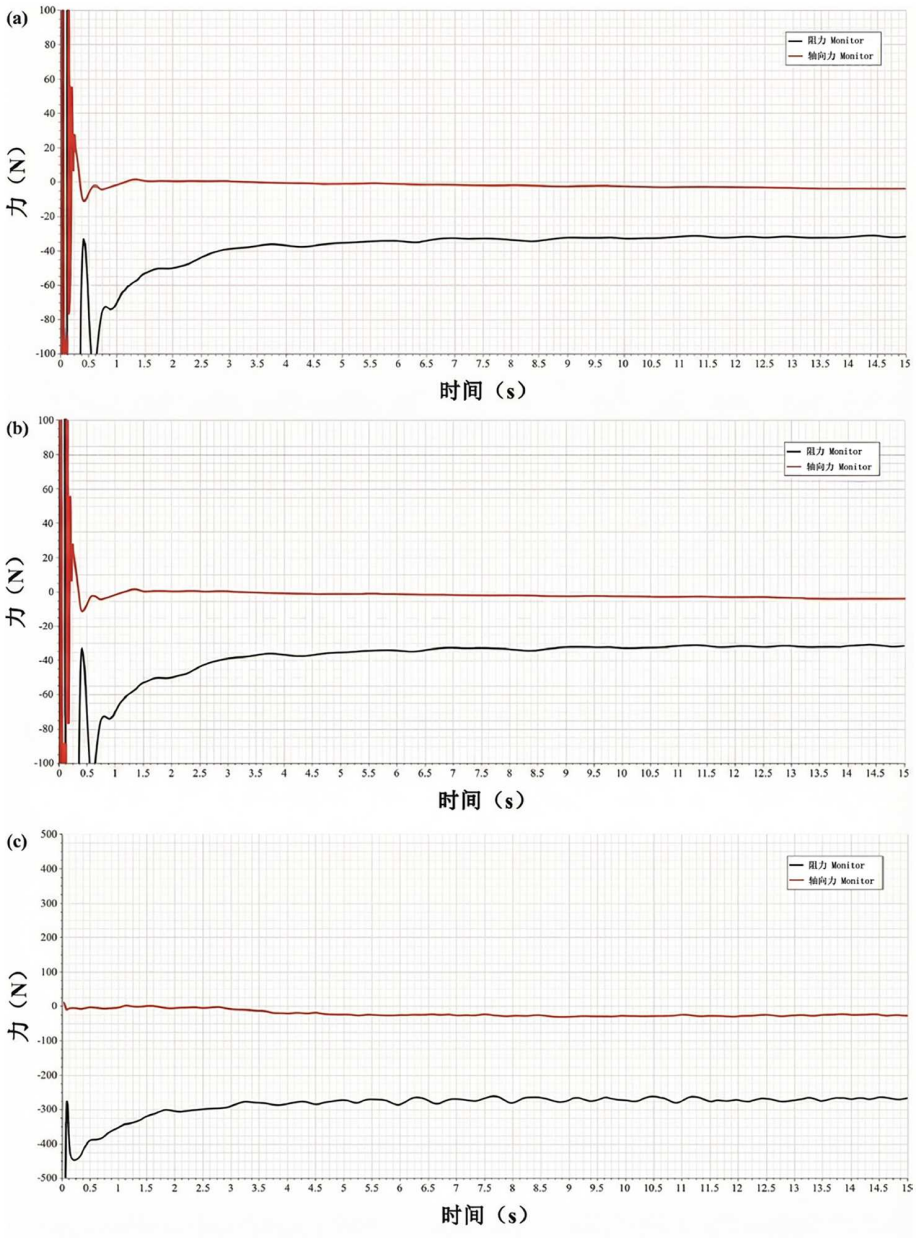


图 16 (网络版彩图)垂直运动阻力和轴向力的时域结果图. (a) 航速1节; (b) 航速2节; (c) 航速3节

Figure 16 (Color online) Time-domain results of drag and axial force in vertical motion. (a) Velocity 1 kn; (b) velocity 2 kn; (c) velocity 3 kn.

配合，实现不同介质的兼容需求，推进器组成如图21所示.

4.3.1 方案设计

本方案为实现水、空两用推进器的独立输出，保证一套电机能够有两根分别通往空中和水下部分的动力输出轴，此方案在直流无刷电机的转子部分做了改进，具体改进为在外转子中心内中心部分加了一根传动轴，此传动轴穿过定子轴心通往水下部分，为水下推进器提供动力.

此直流无刷电机相关指标完全能够满足空中运行的要求，只需在通往空中推进器部分加入一个支撑轴承, 用来保证输出轴的同心和稳定.

水下部分由于和空中部分有不同的转速和扭矩要

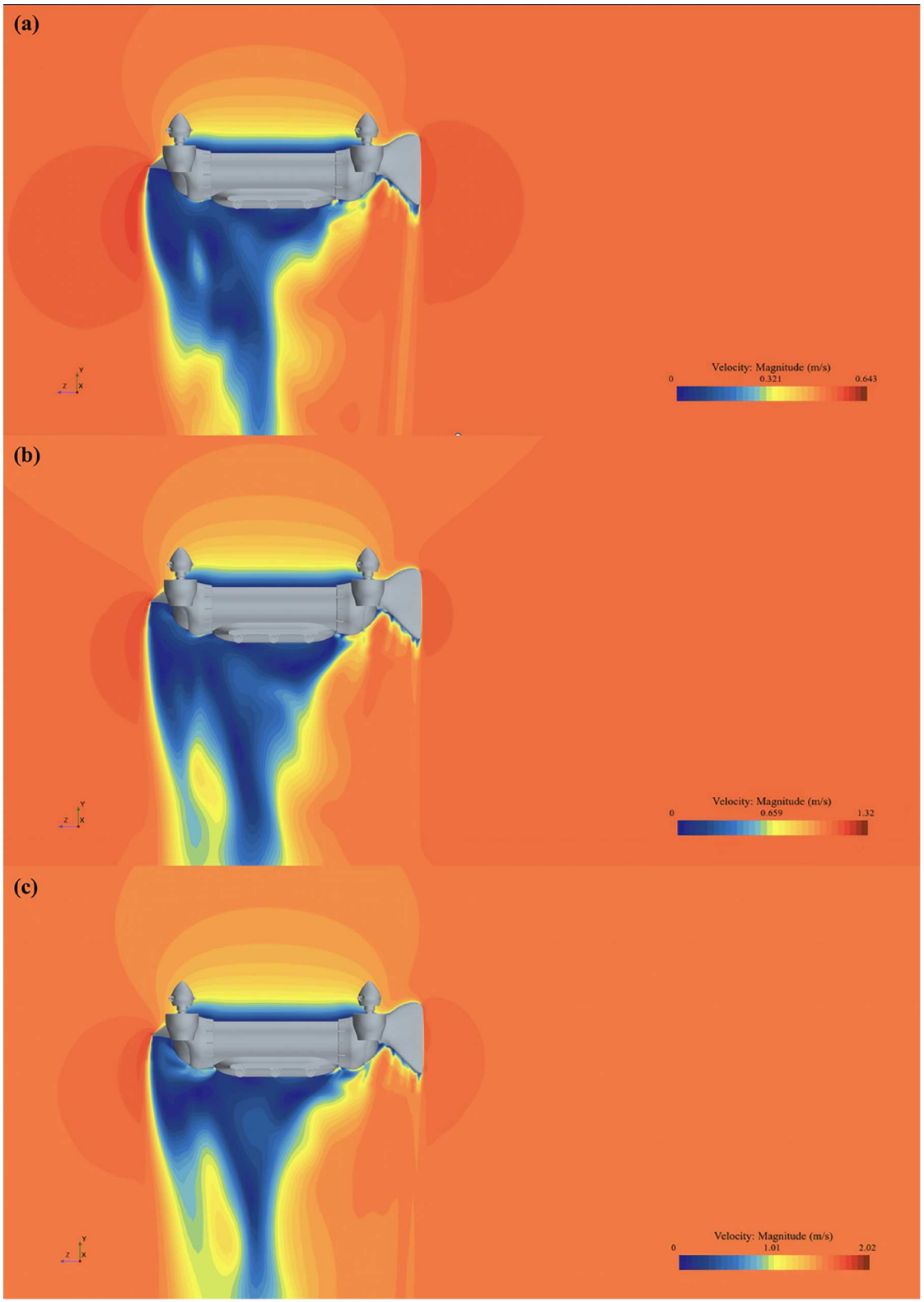


图 17　(网络版彩图)中纵剖面的速度分布(垂直运动)图. (a) 航速1节; (b) 航速2节; (c) 航速3节

Figure 17　(Color online) Velocity distribution on the central longitudinal section (vertical motion). (a) Velocity 1 kn; (b) velocity 2 kn; (c) velocity 3 kn.

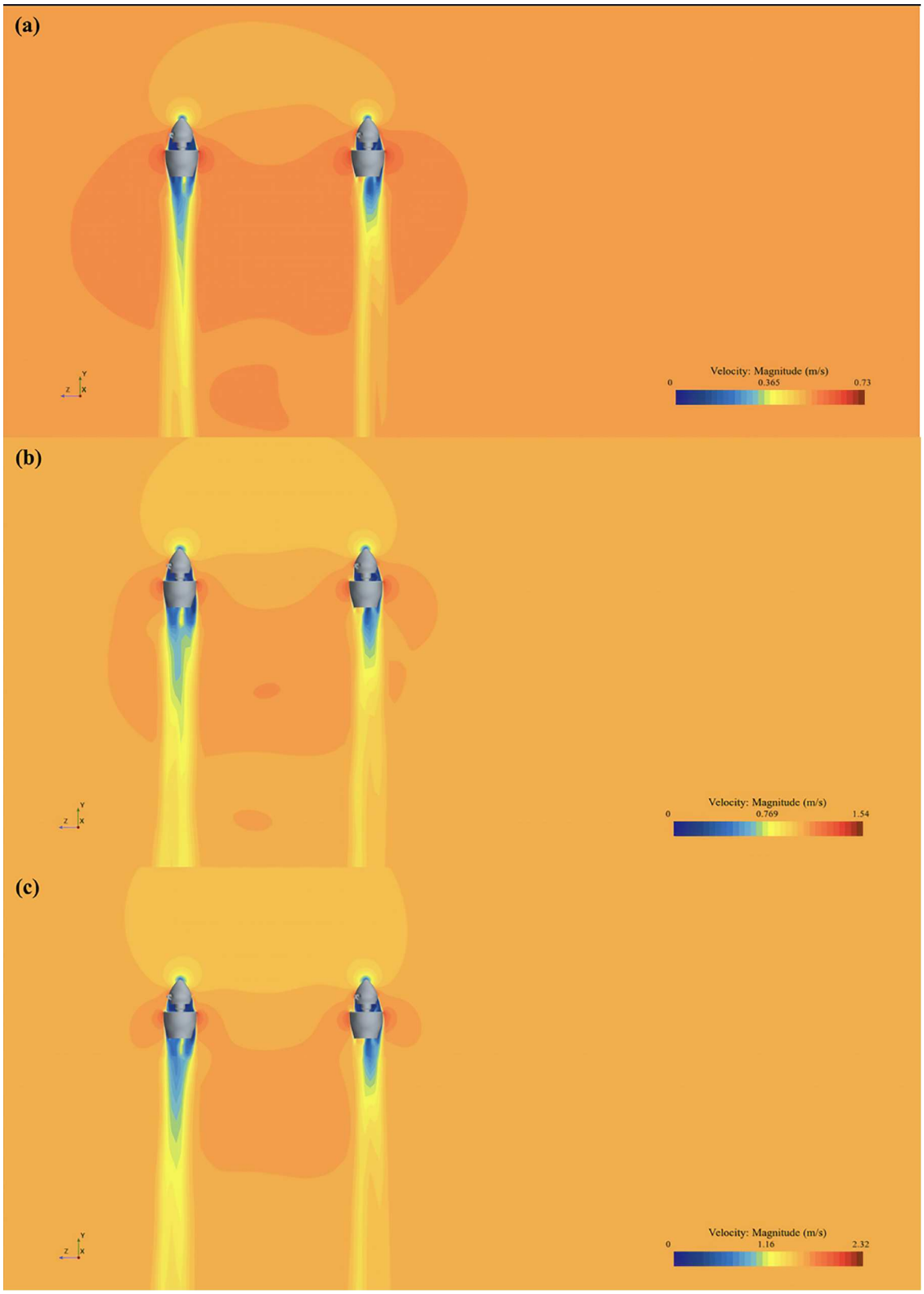


图 18 (网络版彩图)螺旋桨位置的速度分布(垂直运动)图. (a) 航速1节; (b) 航速2节; (c) 航速3节

Figure 18 (Color online) Velocity distribution at the propeller position (vertical motion). (a) Velocity 1 kn; (b) velocity 2 kn; (c) velocity 3 kn.

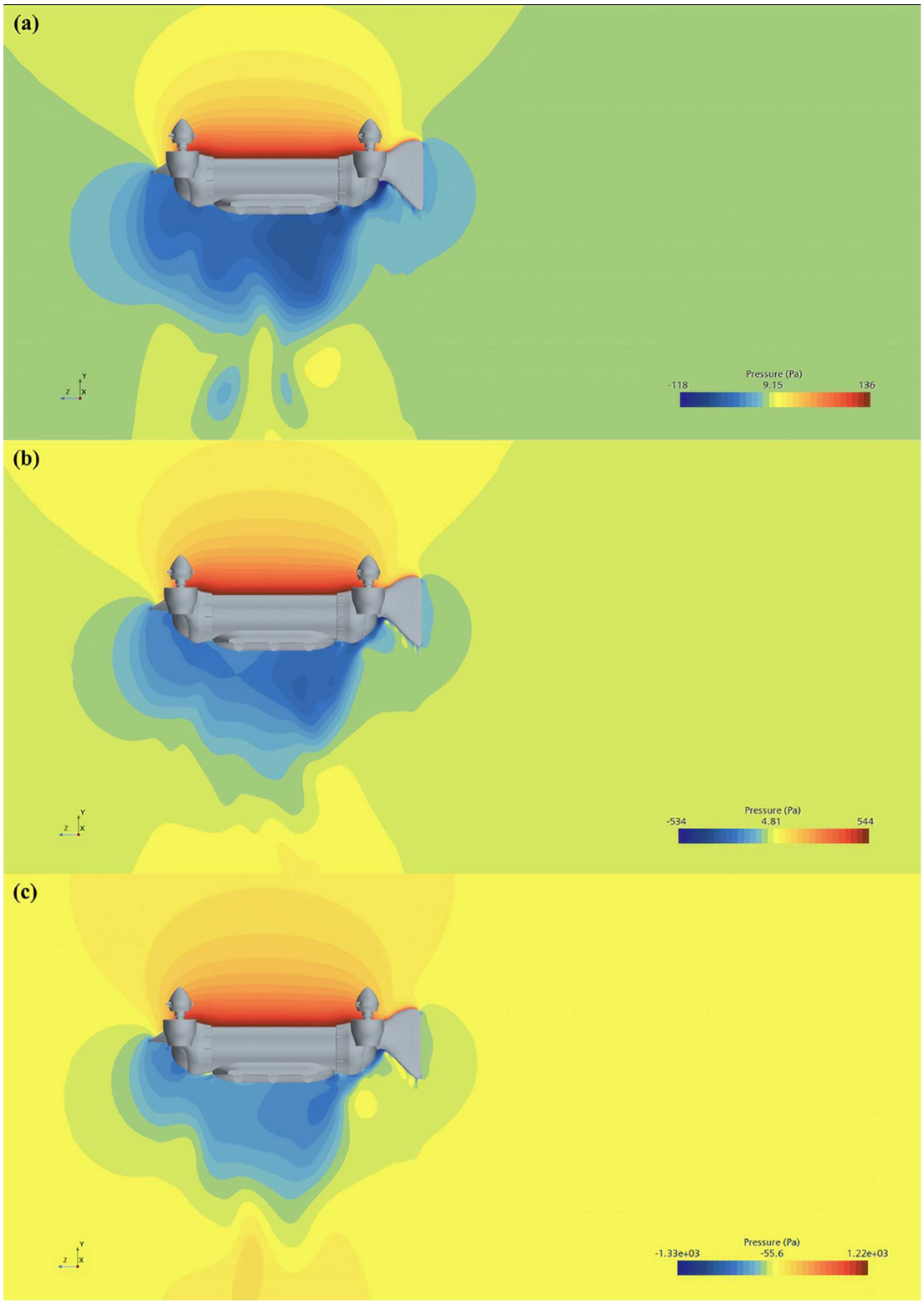


图 19　(网络版彩图)中纵剖面的压力分布(垂直运动)图. (a) 航速1节; (b) 航速2节; (c) 航速3节

Figure 19　(Color online) Pressure distribution diagram along the central longitudinal section (vertical motion). (a) Velocity 1 kn; (b) velocity 2 kn; (c) velocity 3 kn.

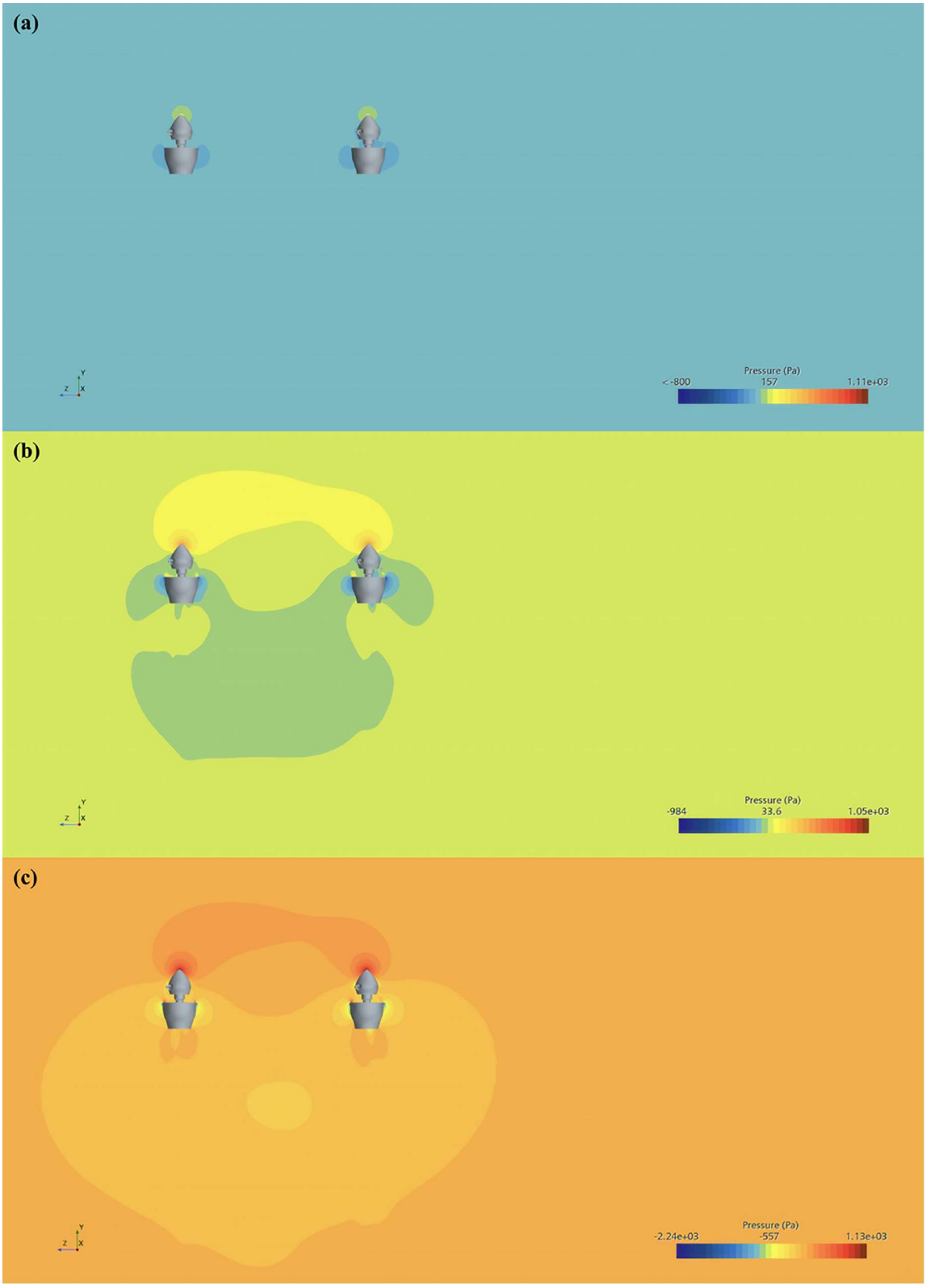


图 20 (网络版彩图)螺旋桨位置的压力分布(垂直运动)图. (a) 航速1节; (b) 航速2节; (c) 航速3节

Figure 20 (Color online) Pressure distribution at the propeller position (vertical motion). (a) Velocity 1 kn; (b) velocity 2 kn; (c) velocity 3 kn.

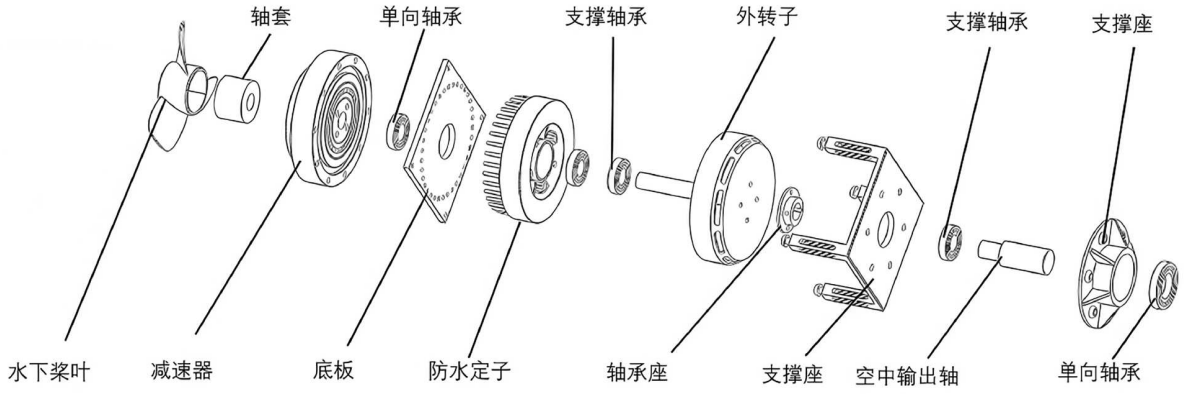


图 21　推进器组成图
Figure 21　Composition of the propulsion system.

求(空中需要高转速、低扭矩, 水下需要低转速、高扭矩), 所以除了需要支撑轴承外还需要加一个定制款行星减速器, 用来减小转速提高扭矩, 此外减速器还需要做防水密封设计.

为保证水、空两用推进器的独立输出, 此方案在水、空输出轴末端分别加入了一个单向轴承, 由于单向轴承单一方向自由转动、反方向机械锁止的功能, 当电机正转时, 空中螺旋桨开始工作, 水下推进器停止工作; 当电机反转时, 水下推进器开始工作, 空中螺旋桨停止工作.

为了保证电机水下正常工作, 本方案在定子部分进行了树脂灌封, 保证了线圈的防水密封性, 并且为了避免电机内部过热, 本方案从定子内部伸出数根铜触角, 使需散热结构增加了与空气、水的接触面积, 保证了电机的良好散热, 一体化推进器如图22.

4.3.2　核心零部件参数统计

核心零部件参数如表6所示.

表 5　减速器参数
Table 5　Parameters of the reducer

参数	值
减速比	3
允许最高输入转速 (r/min)	1800
满载效率 (%)	96~97
额定输出扭矩 (N m)	28~40
最大输出扭矩 (N m)	45~64
最高输入转速 (r/min)	14000

综上, 整体重量约3.5 kg, 整体外观尺寸如图23所示.

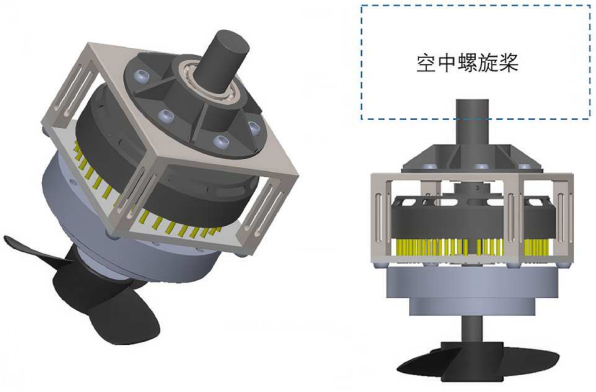


图 22　(网络版彩图)一体化推进器示意图
Figure 22　(Color online) Illustration of the integrated propulsion system.

表 6　核心零部件参数
Table 6　Core component parameters

零件名称	数量	材质	重量 (g)
轴承座	1	TC4	199
支撑轴承	2	陶瓷	35
单向轴承	2	陶瓷	60
输出轴	2	TC4	133
底板	1	TC4	343
支撑座	1	TC4	483
无刷电机	1	铝合金	1200
减速器	1	–	1500

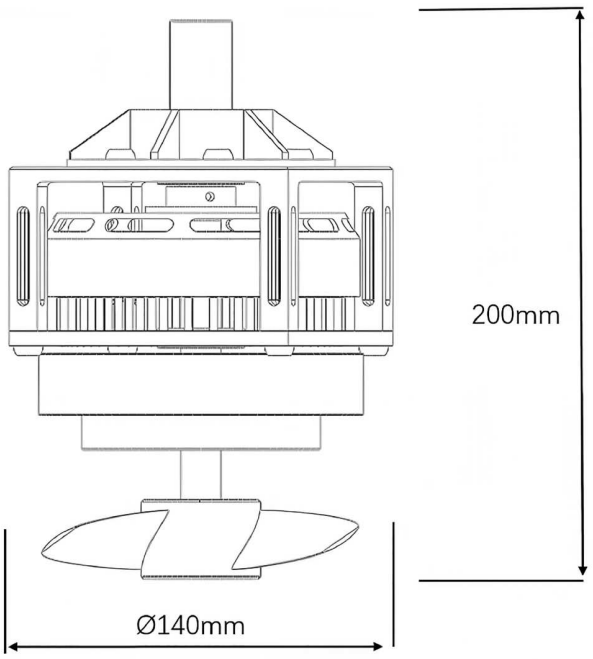


图 23 整体外观尺寸图
Figure 23 Figure of the overall appearance and dimensions.

5 结论与讨论

本文围绕跨域三栖机器人推进系统, 提出了一种水-空多介质兼容的一体化推进器设计方案. 通过流线化机身与模块化推进单元布置, 仿真结果表明该方案具备支持空中与水下稳定运动的潜力, 并在结构强度、空间利用率与控制灵活性之间实现了较好的折中. 与此同时, 本文对机器人水动力特性进行了分析: 单螺旋桨CFD仿真结果表明, 在3 kn航速下可输出超过270 N推力, 推进效率约44%, 能够满足水下航行的动力需求; 整机仿真进一步揭示了水平高速航行时阻力快速增长、垂直航行时尾流干扰明显等现象, 为机体外形与推进器布置优化提供了依据.

与传统空/水分体推进或多转子冗余方案相比, 本文提出的单电机双螺旋桨一体化推进系统在跨介质作业中具有以下优势: 其一, 采用“单电机双螺旋桨+行星齿轮减速器”构型, 在满足推力需求的同时减少推进装置数量, 提高结构集成度, 有利于降低系统体积与质量; 其二, 通过正反转模式与减速器组合, 实现空中与水下两类工况下差异化的转速与力矩输出, 使同一推进器兼顾空中机动与水下巡航需求, 从而改善两种介质下的能效表现; 其三, 推进器布置与机身外形一体化设计可降低水下附加阻力与尾流干扰, 减小过渡阶段扰动载荷, 有助于提升跨介质切换过程的平稳性与可靠性. 上述性能提升源于本文采用的“需求反推-水动力优化-机械集成”的设计思路: 首先基于目标工况反推推力与功率需求, 确定螺旋桨直径、螺距与转速的匹配范围; 其次在抗空化优先、低噪声与效率-续航平衡等准则约束下选定桨型, 并结合CFD对不同工况下推力与效率进行评估; 最后利用行星齿轮减速器实现电机-螺旋桨速比匹配, 并完成推进器与机身一体化布置及密封结构设计, 从而在有限空间内实现空、水跨介质作业能力与推进性能的综合提升.

尽管本研究在理论与仿真层面取得了较为理想的结果, 但仍存在一定局限性: 一方面, 目前工作主要基于数值仿真, 尚缺乏样机水池试验与实海试验对模型进行标定与修正; 另一方面, 螺旋桨几何参数与工作点选择仍以典型工况为主, 尚未开展多工况、多目标的系统优化; 此外, 仿真中对过渡瞬态因素的简化处理可能影响极端工况下的预测精度. 未来工作将围绕一体化推进器与三栖机器人样机开展实验研究, 完成水池与实海验证并量化评估(推力-转速-效率曲线、过渡姿态扰动、速度损失、切换成功率等)关键指标, 同时引入多学科设计优化方法, 在桨叶翼型、电机-减速器匹配以及控制策略等方面进一步提升系统综合性能. 本文研究为跨介质三栖机器人与低空跨域装备的一体化推进系统研发提供了可参考的技术路径与工程实现思路.

参考文献

1 Boxerbaum A S, Werk P, Quinn R D, et al. Design of an autonomous amphibious robot for surf zone operation: Part I mechanical design for multi-mode mobilit. In: Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2005. 1459–1464
2 Sohl G, Jain A. Wheel-terrain contact modeling in the ROAMS planetary rover simulation. In: Proceedings of the International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 2005. 89–97

3 Iagnemma K, Shibly H, Dubowsky S. On-line terrain parameter estimation for planetary rovers. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2002. 3142–3147

4 Wong J Y. Theory of Ground Vehicles. Hoboken: John Wiley & Sons, 2022

5 Cavagna G A, Heglund N C, Taylor C R. Mechanical work in terrestrial locomotion: Two basic mechanisms for minimizing energy expenditure. Am J Physiol-Regulatory Integr Comp Physiol, 1977, 233: R243–R261

6 Bakker M G. Theory of Land Locomotion: The Mechanics of Vehicle Mobility. Ann Arbor: University of Mich. Press, 1956

7 Hu D L, Nirody J, Scott T, et al. The mechanics of slithering locomotion. Proc Natl Acad Sci USA, 2009, 106: 10081–10085

8 Rayner J M V, Jones G, Thomas A. Vortex flow visualizations reveal change in upstroke function with flight speed in bats. Nature, 1986, 321: 162–164

9 Dickinson M H, Farley C T, Full R J, et al. How animals move: An integrative view. Science, 2000, 288: 100–106

10 Tritton D J. Physical Fluid Dynamics. Oxford: Clarendon Press, 1988

11 Gao A, Techet A H. Design considerations for a robotic flying fish. In: Proceedings of the Oceans'11 MTS/IEEE Kona. 2011. 1–8

12 Fabian A, Feng Y, Swartz E, et al. Hybrid Aerial Underwater Vehicle. Lexington: MIT Lincoln Lab, 2012

13 Izraelevitz J S, Triantafyllou M S. A novel degree of freedom in flapping wings shows promise for a dual aerial/aquatic vehicle propulsor. In: Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2015. 5830–5837

14 Piccoli M, Revzen S, Yim M. SEAL pack versatile, portable, and rapidly deployable sea, air, and land vehicle. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR). 2013. 1–6

15 Maia M M, Mercado D A, Diez F J. Design and implementation of multirotor aerial-underwater vehicles with experimental results. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2017. 961–966

16 Maia M M, Soni P, Diez F J. Demonstration of an aerial and submersible vehicle capable of flight and underwater navigation with seamless air water transition. arXiv: 1507.01932

17 Zha J, Thacher E, Kroeger J, et al. Towards breaching a still water surface with a miniature unmanned aerial underwater vehicle. In: Proceedings of the International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2019. 1178–1185

18 Liu X, Dou M, Huang D, et al. TJ-FlyingFish: Design and implementation of an aerial-aquatic quadrotor with tiltable propulsion units. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2023. 7324–7330

19 Chen G, Yan L, Cao A, et al. Novel design and computational fluid dynamic analysis of a foldable hybrid aerial underwater vehicle. Drones, 2024, 8: 669

20 Wei T, Hu R, Li J, et al. Experimental study on trans-media hydrodynamics of a cylindrical hybrid unmanned aerial underwater vehicle. Ocean Eng, 2022, 252: 111190

21 Wei T, Li J, Zeng Z, et al. Trans-media resistance investigation of hybrid aerial underwater vehicle base on hydrodynamic experiments and machine learning. Ocean Eng, 2022, 266: 112808

Hydrodynamic analysis of cross-medium robots and integrated propulsion system design

SUN YuFeng[1], HE YuLong[1], ZHOU Jing[1,2], ZHAO LiMing[1] & LIU MeiQin[1]

[1] *College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*
[2] *Hainan Research Institute, Zhejiang University, Sanya 572025, China*

With the rapid development of robotics, cross-medium mobility has gradually become an important research direction for intelligent unmanned systems. Compared with traditional single-medium robots, aerial-aquatic robots can switch modes and perform continuous operations in complex environments, significantly enhancing task adaptability and operational efficiency. However, due to the large differences in density, viscosity, and flow characteristics between air and water, the design of propulsion systems has become the key challenge restricting the performance of cross-medium platforms. This paper proposes a multi-medium compatible integrated propulsion system that achieves efficient dual-mode propulsion in both air and water by combining a single motor, dual propellers, and a planetary gear reducer. First, the overall structure of the robot is outlined, clarifying the role of the propulsion system in the integrated layout. Then, based on three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) simulations, hydrodynamic analyses of both a single propeller and the entire robot are conducted, revealing thrust, drag, and wake characteristics. Furthermore, according to the simulation results and design requirements, the selection and optimization of the propeller and motor are carried out, and an integrated propulsion system design scheme is proposed. The results show that under a 3-kn underwater condition, the designed propulsion system can overcome drag with a propulsion efficiency of approximately 44%. In addition, the integrated design ensures the stability and reliability of cross-medium mode switching. This study provides a theoretical foundation and engineering reference for the development of new amphibious robots and low-altitude cross-medium equipment.

cross-medium robot, integrated propulsion system, hydrodynamic analysis, propeller design, motor selection

doi: 10.1360/SST-2025-0286