



哈尔滨工程大学学报
Journal of Harbin Engineering University
ISSN 1006-7043, CN 23-1390/U

《哈尔滨工程大学学报》网络首发论文

题目: 水下机器人试航速度的类物理数值方法预报
作者: 吴利红, 张爱锋, 李一平, 封锡盛, 王诗文
收稿日期: 2019-03-22
网络首发日期: 2019-10-18
引用格式: 吴利红, 张爱锋, 李一平, 封锡盛, 王诗文. 水下机器人试航速度的类物理数值方法预报. 哈尔滨工程大学学报.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20191018.0903.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

水下机器人试航速度的类物理数值方法预报

吴利红^{1,2}, 张爱锋¹, 李一平², 封锡盛², 王诗文¹

(1. 大连海事大学 船舶与海洋工程学院, 辽宁 大连 116026; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 水下机器人试航速度是评价推进系统性能和续航能力的重要指标。针对水下机器人试航速度预报问题, 提出类物理数值预报方法。建立水下机器人包含桨舵的全附体模型, 采用多块动态混合网格方法进行网格构建和更新, 编写用户自定义函数, 求解六自由度方程和非定常雷诺平均 NS 方程进行水下机器人和螺旋桨力和速度的计算和传递, 实现以螺旋桨旋转运动推进水下机器人自航的运动过程模拟。数值结果表明, 水下机器人试航速度 1.5m/s 对应的转速为 570r/min; 自航模拟可见螺旋桨梢涡曳出, 梢涡强度和螺旋桨推力随航速增加而降低。数值模拟再现了非定常运动过程中船桨舵相互作用机理, 有利于水下机器人复杂操纵运动的精确预报。

关键词: 自航试验; 水下机器人; 动网格; 类物理数值模拟; 螺旋桨; 试航速度; 计算流体力学; 操纵性

Doi: 10.11990/jheu.201903073

中图分类号: U661.33

文献标识码: A

文章编号: 1006-7043 (2019) xx-xxxx-x

Prediction of Autonomous Underwater Vehicle Cruising Velocity Using a Physics-based Numerical Method

WU Lihong^{1,2}, ZHANG Aifeng¹, LI Yiping², FENG Xisheng², WANG Shiwen¹

(1. College of Ship building and Ocean Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, 116026, China; 2. State key laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, 110016, China)

Abstract: The cruising velocity of autonomous underwater vehicle (AUV) plays an important role on evaluation of the thrust system performance and cruising endurance. This paper presented a physics-based numerical method for prediction of AUV's cruising velocity. The full model of AUV appended propeller and rudder was built. A multi-block hybrid dynamic grid method was used to mesh the domain and re-meshing. User defined functions (UDFs) were programmed. Six degree of freedom (6DOF) and unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes (URANS) were solved to transfer forces and velocities between AUV and propeller. Thus, the free motion of AUV pushed by the rotating propeller from stationary to uniform velocity was simulated. The numerical results showed that the rotating speed was 570 r/min at the cruising velocity of 1.5m/s. The tip vortexes were produced in self-propulsion motion. The strength of tip vortexes and propeller thrust decreased as AUV velocity increased. The simulation investigated the unsteady flow field among the hull, propeller and rudders in detail, which is helpful to conduct a precise maneuvering prediction of AUV in complex environment.

Keywords: self-propulsion test; autonomous underwater vehicle; dynamic mesh; physics-based simulation; screw propeller; cruising velocity; computational fluid dynamics; maneuverability

预报 AUV 定常航行的巡航速度和非定常运动的

操纵性能不仅是评估其推进系统性能的重要指标。还有助于提高 AUV 航程估计, 能量估算和减少定位误差和 AUV 丢失的风险。采用类物理的数值方法进行海洋载体操纵预报是数值模拟的目标。此方法应用真实模型模拟螺旋桨高速旋转, 能反映船桨舵内在作用机理, 再现流场特征。但它具有模型复杂, 网格尺度相差大, 载体各部件相对运动复杂, 高频与低频运动混合的模拟难点^[1]。自 20 世纪 90 年代

收稿日期: 2019-03-22

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0305901); 国家自然科学基金项目(51009016); 机器人学国家重点实验室开放课题(2016-004); 中央高校基本科研业务费专项资金(3132017030)。

作者简介: 吴利红, 女, 副教授, 硕士生导师

张爱锋, 女, 副教授, 硕士生导师

封锡盛, 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士

通信作者: 张爱锋, E-mail: afzhang@dlmu.edu.cn.

美国海军提出这个概念以来，直至 2010 左右陆续有研究成果。如 Chase 等^[1]、Pankajakshan 等^[2]、Poremba 等^[3]对潜艇自航运动进行了数值模拟；Mofidi 等^[4]对集装箱船 KCS 带全附体桨舵的 ZigZag 操纵运动的模拟；Carrica 等^[5]对水面战舰的随浪横甩运动进行自航模拟；沈志荣^[6]对水面船舶操纵运动进行数值模拟。以上研究均采用动态重叠网格法，在边界移动时无需网格更新，但须实时确定移动边界与背景网格的重叠区域，这是数值误差的源头^[7]。而移动网格法在边界移动时网格也随着运动，运动更符合拉格朗日描述法，但边界移动常导致复杂的网格运动，从而引起网格畸变和网格质量降低，影响数值计算精度。受此限制，移动网格法主要应用在二维物体的运动：圆球的振动，鱼类的摆鳍运动^[8]和三维物体的有限区间或简单的运动，如翼的偏转^[9]，预定义 AUV 直航对接运动^[10]。而本文则采用多块动态混合网格方法^[11]解决移动网格的网格畸变和数值精度差的问题^[12]，实现 AUV 自航试验的数值模拟，获得了 AUV 巡航速度预报，再现了 AUV 自航过程非定常运动的航行特性。

1 水下机器人自航模型建立

AUV 为改进型 REMUS AUV， $L=1.7m$ ， $D=0.191m$ ^[13]。具有椭球型首，圆柱形平行中体和圆锥型尾。尾部有“十字”型舵翼，以及一个 MAU4-40，直径 $d=0.156m$ 的螺旋桨。AUV 首、中和尾三段以及舵翼采用结构网格绘制，螺旋桨采用非结构网格离散。图 1 为 AUV 带舵翼和螺旋桨的网格图。大地坐标系为 $oxyz$ ， ox 为 AUV 对称轴，向

首为正（向前）； oy 垂直向上为正； oz 指向右舷。

图 2 为 AUV 带桨舵流域在对称面上网格分区，分区划分是根据 AUV 的运动趋势确定的。流域包含 6 个分区。分区 I 包含 AUV 和舵翼表面的四边形网格以及近场边界层区域的六面体结构网格；分区 II 包括螺旋桨表面的三角形网格以及螺旋桨扰动子区域的四面体非结构网格；分区 III 包含 AUV、螺旋桨和舵翼扰动区域的六面体结构网格；分区 IV 为 AUV 从首部延伸到远场的航行区域网格，靠近首部加密，远场较为稀疏，由六面体结构网格构成；分区 V 为从 AUV 尾部延伸到远场的结构网格区域，靠近 AUV 尾部为加密区，远场为稀疏区，也由六面体结构网格构成；外围非结构网格区域为分区 VI。

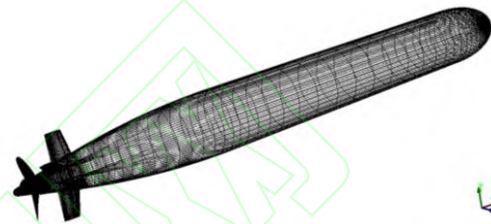


图 1 带桨和舵的 AUV 网格模型

Fig.1 Grid model of AUV appended propeller and rudders

在 AUV 自航推进数值模拟过程中，网格运动区域限制在图 2 的 AUV 直航窄条带区域，这有利于局部扰动区域梯度的捕捉。其中分区 II 既有随螺旋桨的旋转运动，又有随 AUV 的直航运动；分区 I 和 III 仅随 AUV 作直航运动；分区 IV 和 V 分别为网格压缩区域和拉伸区域，在分区 IV 的最前端为静止壁面，采用动态层方法对区域 IV 的最前端网格进行压缩合并，因此最前端为网格消亡区域；分区 V 的最后

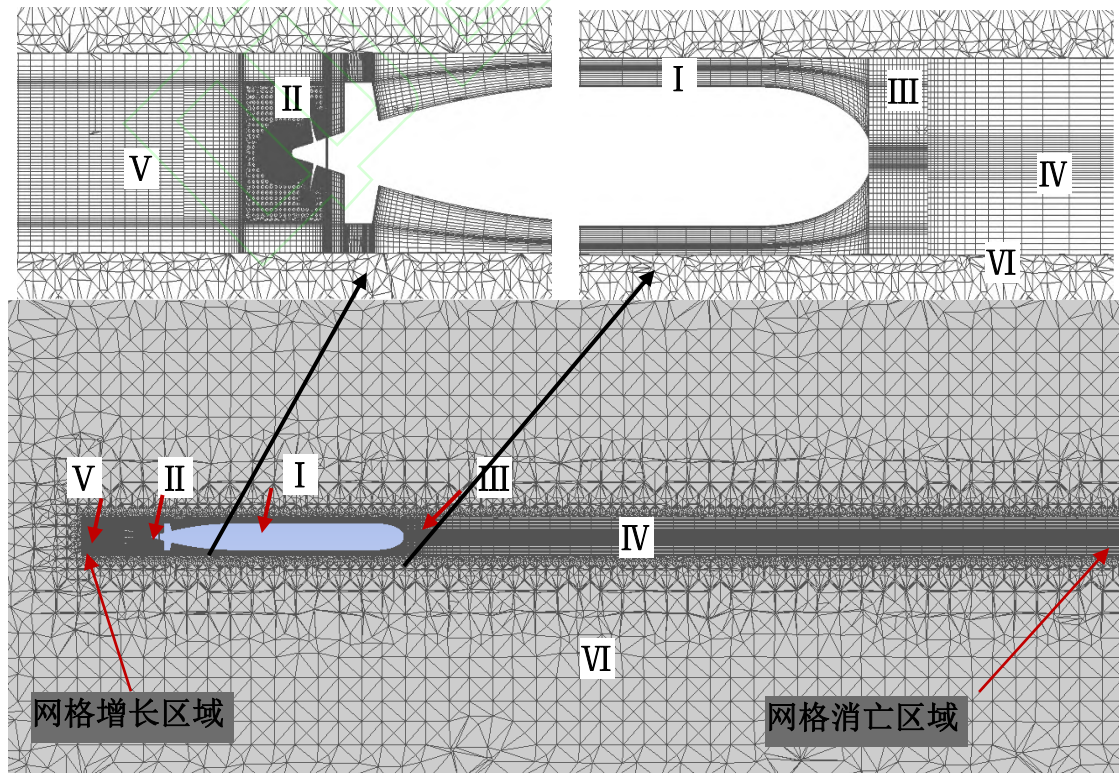


图 2 动网格分区

Fig.2 Dynamic meshing zones

端为动态层网格的拉伸区域，为网格增长区域。外围区域VI为网格变形区。各个分区之间的连接采用非一致连接。这种多块结构网格和非结构网格混合的网格构成方法，以及采用动态层网格更新方法，是借鉴了动态重叠网格的子区域网格运动的思想，从网格构建质量、网格更新质量和网格更新速度方面着手，提高数值求解的速度和计算精度。

AUV 自航推进过程数值模拟中，AUV 和螺旋桨之间的力和速度的传递可以采用用户自定义函数 UDF (User Defined Function) 进行编写，嵌入到程序中^[14]：首先，AUV 静止，螺旋桨以恒定转速旋转，产生推力，将此推力保存同时将推力传递给 AUV；AUV 读取螺旋桨推力，同时实时求解 URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes) 方程，获得 AUV 的阻力。AUV 在推力和阻力的联合作用下，通过在 6DOF 方程加载推力和实时阻力，求解载体的加速度，并采用龙格库塔积分获得 AUV 实时速度 V ；此速度传递给螺旋桨，使 AUV 拖曳螺旋桨以 V 航速运动；随着 AUV 航行，AUV 的尾流场更新，影响螺旋桨的进流场，螺旋桨在新的进速和转速下将产生新的推力，重新记录此推力并传递给 AUV；AUV 在阻力作用下，获得新的航速，如此重复，直到 AUV 的推力 T 与其航行阻力 R 接近平衡，速度曲线趋于稳定，加速度接近为零。或对比航速与多参考系坐标^[15] (Multiple Frames of Reference, MFR) 的定常自航点航速，两者误差在 5% 内，也认为达到自航点。记录此时的推力，阻力，速度历史数据，保存和分析。

2 水下机器人自航数值结果与分析

2.1 受力和速度

AUV 以不同转速从静止自航推进，最终会趋于匀速状态。分别假定 AUV 以 300, 450, 600 r/min 3 种转速航行，每种转速自航一次，迭代步长为螺旋桨旋转 1° 对应的时间，每个外循环包含内循环 20 次，收敛精度为 10^{-4} 。如图 3 分别为转速为 300, 450 和 600 r/min 的自航螺旋桨推力和 AUV 阻力的历史变化曲线。推力和阻力曲线在数值求解中有点振荡，这是动网格数值求解引起的不稳定现象。阻力部分振荡主要是由于载体低速巡航采用了和螺旋桨高速旋转的小时间步引起的。随着速度增加，推力减小，阻力增大，最终推力和阻力平衡，速度会趋于一个恒定的速度，这个速度即为该转速下的自航点。3 种转速可得 3 次航速历史变化，如图 4 所示，可得 3 个不同的自航点。转速越大，达到匀速的时间越短。600 r/min，需要约 9s，可达到匀速 1.55m/s；450 r/min，需要约 10.53s，可达到匀速 1.15m/s；300 r/min，需要约 14.39s，可达到匀速 0.74m/s。同时，转速越大，起始加速度越大。

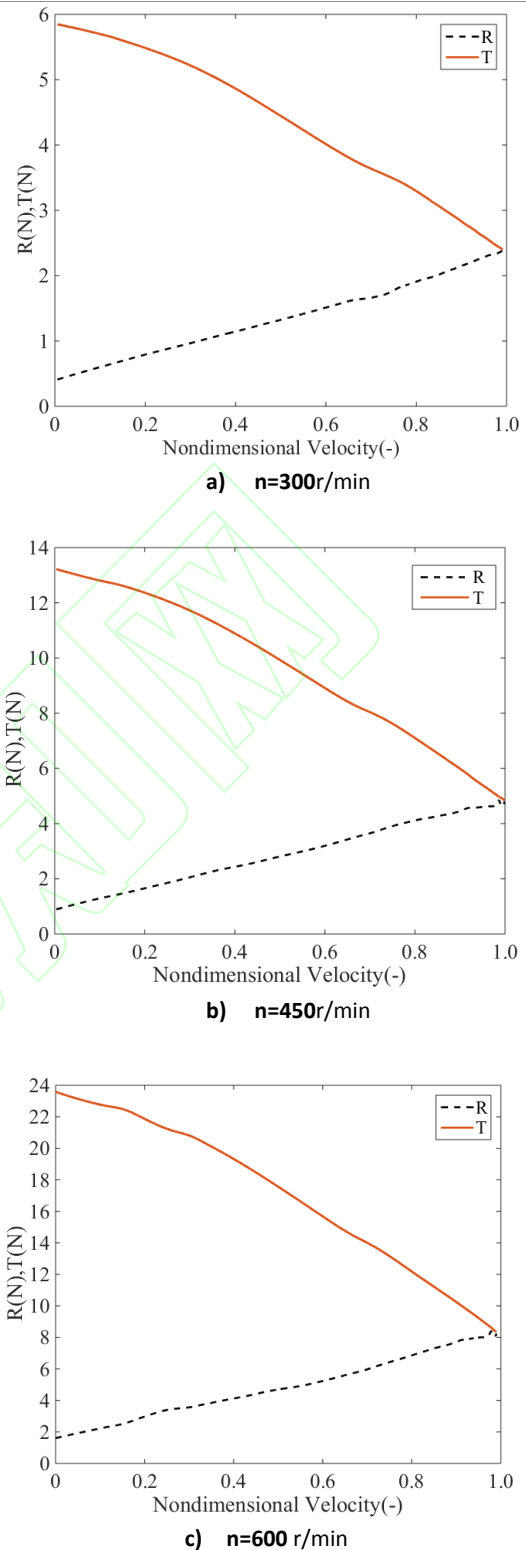


图 3 不同转速下 AUV 自航阻力和推力变化

Fig.3 The resistance (R) and Thrust (T) of AUV self-propulsion at different rotation speeds

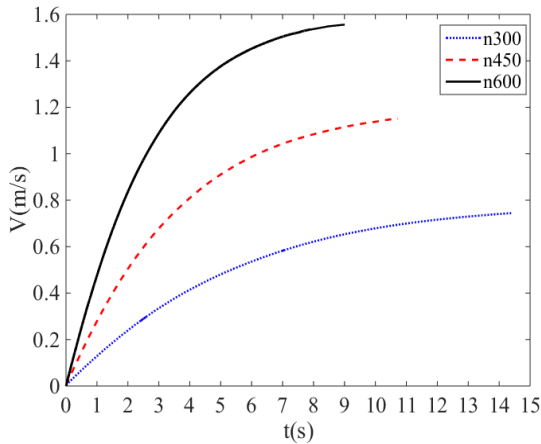


图4 不同转速下 AUV 自航过程的航速变化

Fig.4 Velocity history (V) in AUV self-propulsion at different rotation speeds (n)

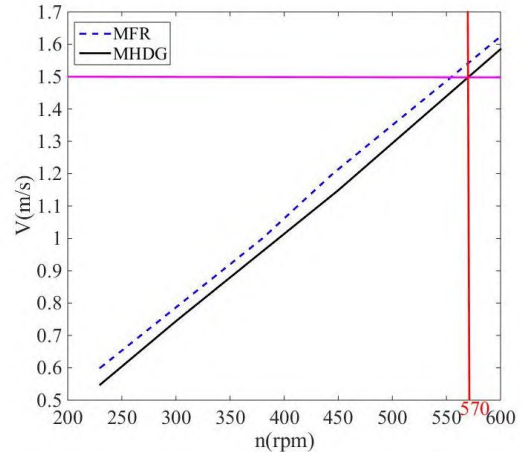


图6 自航点对应的转速

Fig.6 Approaching velocities vs. rotating speeds

2.2 数值验证

为了验证数值模拟结果的准确性，将 AUV 自航的数值结果与水池试验（试验在中国科学院沈阳自动化所的深水水池：L25m × B15m × D9m）结果进行对比。图 5 记录了螺旋桨转速为 300RPM 的 AUV 速度历史数据。包括 5 次试验结果，以离散数据点表示：Exp1、Exp2、Exp3、Exp4 和 Exp5；数值结果以实线表示。数值模拟不受试验水池边界的限制，因此数值模拟的时间较长。数值结果和试验结果吻合良好。此外，为了验证不同转速下 AUV 自航点的可靠性，将本文的结果与多参考坐标系 MFR（multi-frame of reference）的结果进行对比验证，如图 6 所示，获得的自航点速度略低于 MFR，误差在 5% 以内。在一段转速范围内，航速和转速成正比。这是因为相近的一段转速范围内，推力系数接近常数，阻力系数接近常数。螺旋桨推力与转速成平方，匀速后推力与阻力相等，阻力与速度成平方，则自航点速度和转速成正比。这个结论有助于更快找到不同转速下的自航点。由转速和航速的关系，根据设计航速 1.5m/s 的要求，对图 6 进行插值，可得对应自航点的转速为 570 r/min。

2.3 流场分析

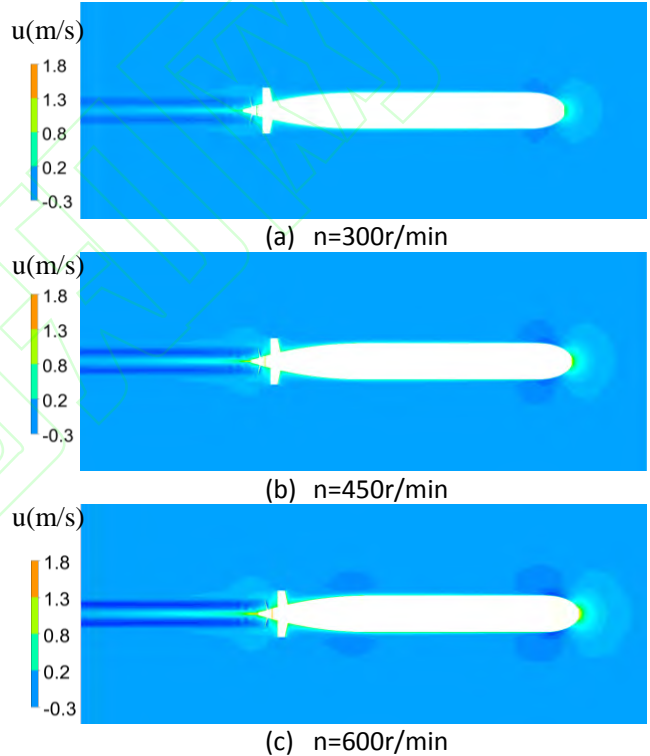


图7 AUV 不同转速对应的自航点速度云图

Fig.7 Velocity contours of AUV at different self-propulsion points with varying rotation speeds

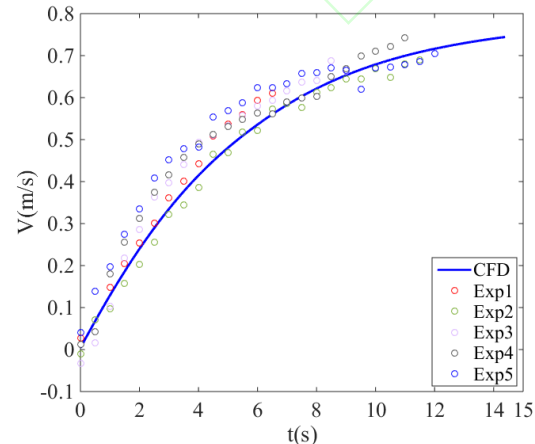


图5 AUV 自航速度变化的试验和数值结果 (n=300 r/min)

Fig.5 The velocity history from experimental and numerical results in AUV self-propulsion at n=300 r/min

图 7 为转速 n 为 300、450 和 600 r/min 时达到匀速直航的 AUV 对称面上的速度云图（注：远场速度为零）。可见，转速越大，螺旋桨的尾迹越明显，梢涡强度越大，向后推水的水速度越大，反作用力越大，则推力越大。且转速越大，AUV 首部的速度扰动流场范围越大，表明 AUV 达到自航点对应的速度越大。三种匀速状态时，AUV 首部最大截面处都产生了首涡，且随着速度增加，首涡范围加大，表明 AUV 首部粘压阻力增加。随着 AUV 速度增加，AUV 尾部截面变化区域开始产生尾涡 (n=600r/min)，表明尾部速降增加，尾部粘压阻力增加。同时，三种航速时，AUV 表面都有较明显的边界层，从首至尾逐步增厚。

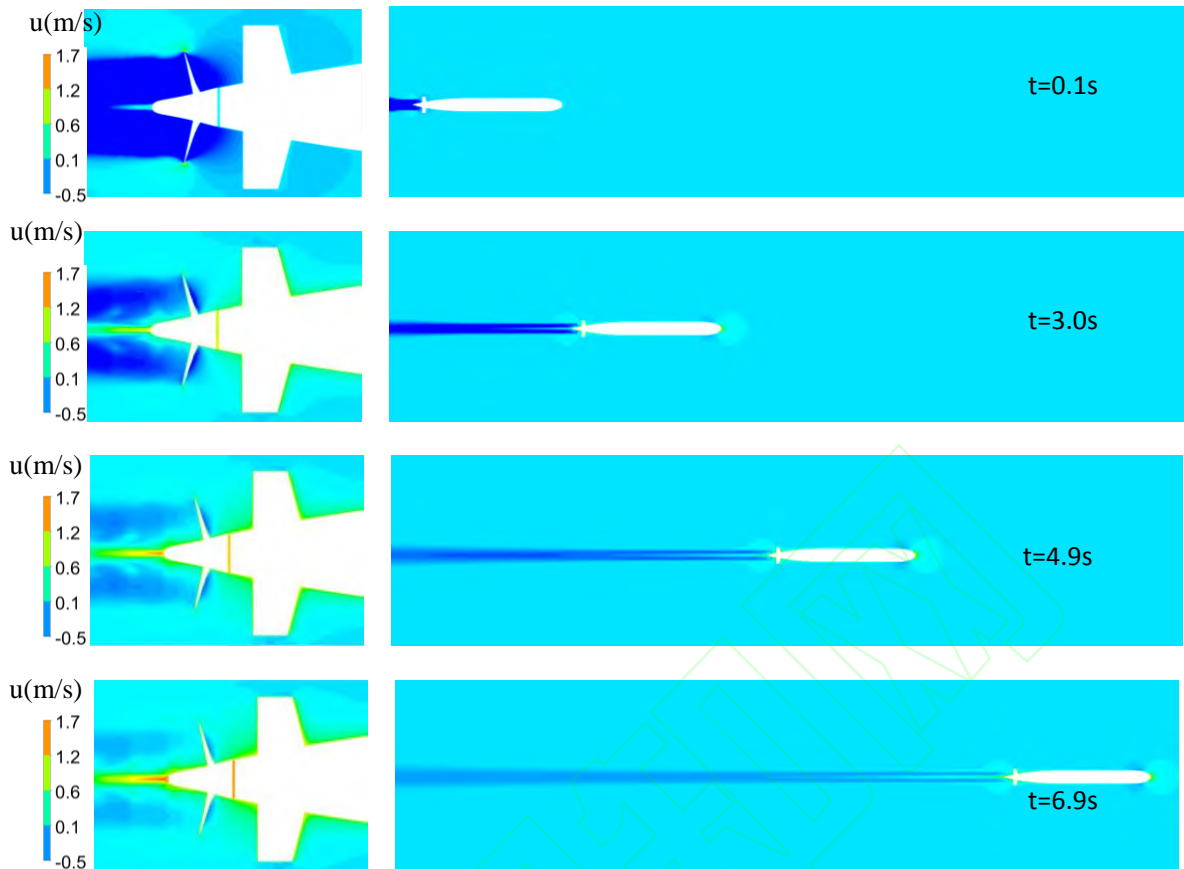


图 8 AUV 自航对称面上不同时刻的速度云图 ($n=570$ r/min)

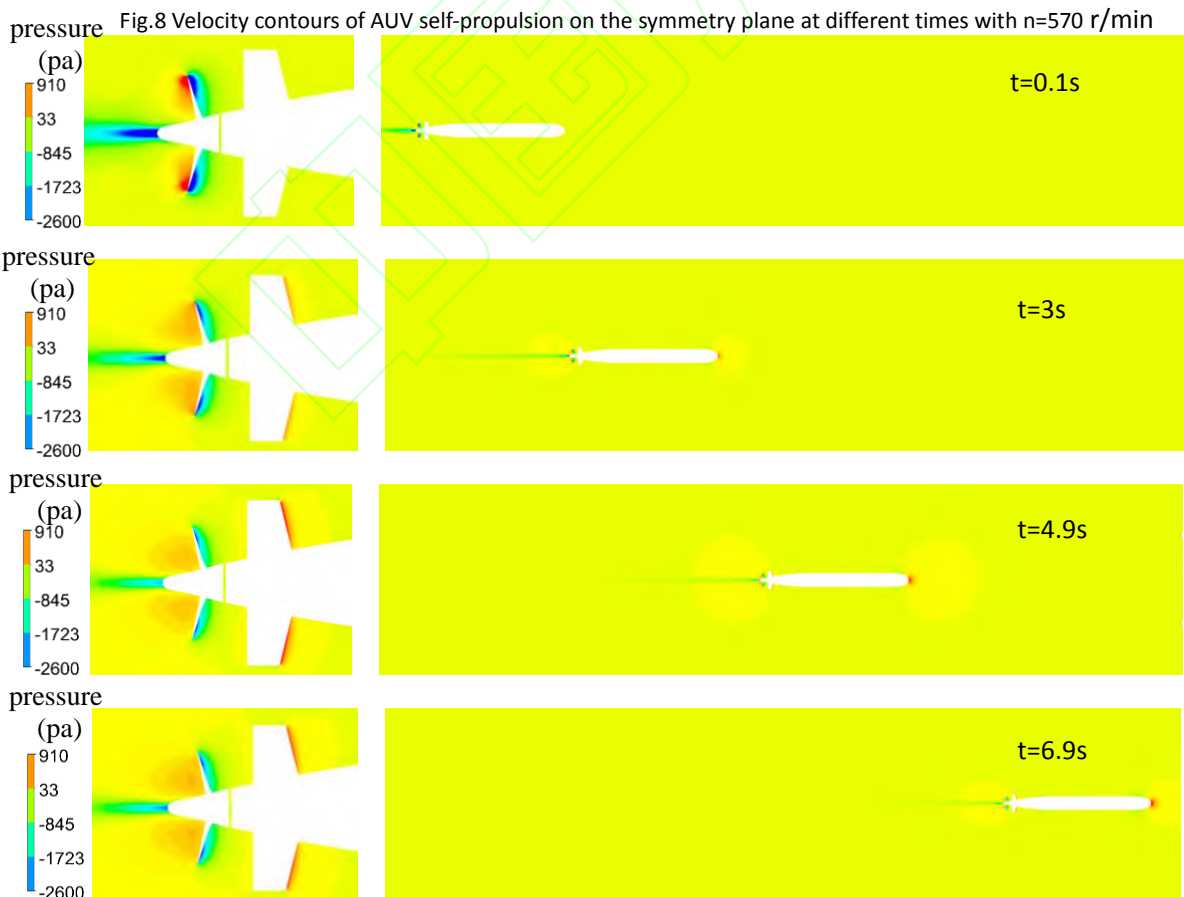


Fig.8 Velocity contours of AUV self-propulsion on the symmetry plane at different times with $n=570$ r/min

图 9 AUV 自航对称面上不同时刻的压力云图 ($n=570$ r/min)

Fig.9 Pressure contours of AUV self-propulsion at the symmetry plane at different times with $n=570$ r/min

图 8 为设计航速 1.5m/s 对应转速 570r/min 的 AUV 自航过程 4 个典型时刻 ($t=0.1s, 3s, 4.9s$ 和 $6.9s$) 对称面上 AUV 的速度分布 (右图) 和螺旋桨尾迹局部放大图 (左图)。相应的压力云图如图 9 所示。可见, 当转速一定时, AUV 速度较低时, 螺旋桨尾迹强, 表明螺旋桨此时的推力较大 (这与螺旋桨的敞水性能曲线一致, 和图 3 的推力曲线一致)。螺旋桨叶梢曳出的梢涡出现重叠; 随着 AUV 航速增加, 梢涡强度降低, 表明螺旋桨推力减少。但是梢涡分离清晰可见, 这是由 AUV 航行时的尾迹反向作用引起的。

随着 AUV 航速的增加, 螺旋桨产生的推力在变小, 这点在图 9 的左侧压力云图中清晰可见。低速时, 螺旋桨叶面的高压值很大, 叶背的低压值也较大, 导致两者的压差较大, 因此推力较大; 随着 AUV 速度增加, 叶面高压值减小, 叶背低压值也减小, 两者的压差变小, 则推力也在减少。但是, 随着螺旋桨持续旋转, 只要 AUV 推力大于阻力, AUV 就获得加速, 随着 AUV 速度增加, AUV 首部速度绕流场范围加大, 首部驻点的压强增加, 导致 AUV 首尾压差阻力增加; 同时首肩部速度增加, 导致摩擦阻力增加, AUV 总阻力也在增加, 直至与逐渐减小的推力平衡, 达到匀速直航, 即达到自航点。随着螺旋桨推进 AUV 自航, AUV 尾迹延长。螺旋桨尾迹梢涡强度随 AUV 速度增加弱化。同时, 在螺旋桨毂帽附近有一股根涡, 和 AUV 航行方向一致, 流速大小随着 AUV 速度增加而增加。

3 结论

1) 水下机器人不同转速对应的最终巡航速度不同。300r/min, 450r/min 和 600r/min 分别对应的巡航速度为 0.74m/s, 1.15m/s 和 1.55m/s。AUV 的巡航速度 1.5m/s 对应的转速是 570r/min。

2) AUV 自航稳定所需时间与 AUV 转速大小有关。转速越大, 加速度越大, 稳定需要时间越短。300 r/min, 450 r/min 和 600r/min 稳定分别需要 14.39s, 10.53s 和 9s。

3) 在螺旋桨转速变化较小的范围内, AUV 的自航点速度和转速成正比关系。

4) AUV 自航时, 螺旋桨旋转运动曳出梢涡和根涡。梢涡强度随着 AUV 航速增加而降低, 运动方向与 AUV 航行方向相反。根涡大小随 AUV 航速增加而增加, 方向与 AUV 航行方向一致。

5) 螺旋桨推力的变化起源于其叶面和叶背压差变化。AUV 以恒定转速自航, 推力随速度增加而减小。

参考文献:

[1] Chase N, Carrica P M. Submarine propeller computations and application to self-propulsion of DARPA SUBOFF [J]. Ocean Engineering, 2013, 60:68-80.
[2] Pankajakshan,R., Remotigue, S., Taylor, L., et al. Validation

of control-surface induced submarine maneuvering simulations using UNCLE [C]// In: Proceedings of 24th symposium on naval hydrodynamics, Fukuoka, Japan.2002.
[3] John E. Poremba III. Hydrodynamics and maneuvering simulations of a non-body-of-revolution submarine [D]. PA, USA, The Pennsylvania state university.2009.
[4] Mofidi A, Carrica P M. Simulation of ZigZag maneuvers for a container ship with direct moving rudder and propeller [J]. Computers & Fluids, 2014, 96:191-203.
[5] Carrica, P. M., Hosseini, H. S., Stern, F. CFD analysis of broaching for a model surface combatant with explicit simulation of moving rudders and rotating propellers [J], Computers & Fluids 53, 117-132.
[6] 沈志荣. 船桨舵相互作用的重叠网格技术数值方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014:133-162.
Shen Zhi-rong. Development of overset grid technique for hull-propeller-rudder interactions [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014:133-162.
[7] 于军, 聂义勇. 不可压缩流场多体运动问题的两种数值解法[J]. 计算力学学报, 2006, 23(5): 583-587.
YU jun, NIE Yiyong. Two numerical methods of multi-body movement in incompressible fluid [J]. Chinese Journal of computational mechanics. 2006,23(5):583-587.
[8] Furquan, M., Navrose, Mittal, S. A fast mesh moving scheme for flow-induced vibrations of rigid bodies [J]. Computers and Fluids,2016,141,116-123.
[9] Murayama, M., Togashi, F., Nakahashi, K. Simulation of aircraft response to control surface deflection using unstructured dynamic grids[C]// AIAA 2002-2940.20TH AIAA Applied Aerodynamics Conference, 24-26 June 2002, St, Louis, Missouri.
[10] Wu, L. H., Li, Y. P., Su, S. J., et al. Hydrodynamic analysis of AUV underwater docking with a cone-shaped dock under ocean currents [J]. Ocean Engineering,2014,85, 110-126.
[11] Zhan, J. M., Cai, W. H., Hu, W. Q., et al. Numerical study on the six-DOF anchoring process of gravity anchor using a new mesh update strategy [J]. Marine Structures, 2017,52,173-187.
[12] 张来平, 邓小刚, 张涵信. 动网格生成技术及非定常计算方法进展综述[J]. 力学进展, 2010, 40(4): 424-446.
Zhang Lai-ping, DENG Xiao-gang, ZHANG Han-xin. Reviews of moving grid generation techniques and numerical methods for unsteady flow[J]. Advances in mechanics, 2010, 40 (4): 424-446.
[13] Allen, B., Austin, T., Forrester, N., et al. Autonomous Docking Demonstrations with Enhanced REMUS Technology[C]// OCEANS 2006. IEEE, 2006.
[14] 吴利红,李一平,刘开周,封锡盛,王诗文,艾晓锋. 基于多块动态混合网格的 AUV 自航类物理数值模拟[J]. 2019. 机器人 DOI: 10.13973/j.cnki.robot.18-683.
Wu Lihong, Li Yiping, Liu Kaizhou, et.al. Physics-based numerical simulation of AUV self-propulsion using multi-block hybrid dynamic mesh method [J].robot. DOI: 10.13973/j.cnki.robot.18-683.
[15] Wei, Y.S., Wang, Y.S. Unsteady hydrodynamics of blade forces and acoustic responses of a model scaled submarine excited by propeller's thrust and side-forces[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332, 2038-2056.