



机器人
Robot
ISSN 1002-0446,CN 21-1137/TP

《机器人》网络首发论文

题目: 基于多块动态混合网格的 AUV 自航类物理数值模拟
作者: 吴利红, 李一平, 刘开周, 封锡盛, 王诗文, 艾晓锋
DOI: 10.13973/j.cnki.robot.180683
收稿日期: 2018-11-22
网络首发日期: 2019-05-10
引用格式: 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/OL]. 机器人.
<https://doi.org/10.13973/j.cnki.robot.180683>



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。

基于多块动态混合网格的 AUV 自航类物理数值模拟

吴利红^{1,2}, 李一平², 刘开周², 封锡盛², 王诗文¹, 艾晓锋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: 提出了一种采用多块动态混合网格进行 AUV (自主水下机器人) 自航试验的类物理数值模拟的方法. 对 AUV 带舵翼和螺旋桨的全附体进行建模, 采用 UDF (用户自定义函数) 实现推进器和 AUV 之间的力和速度传递, 结合 6DOF (自由度) 运动方程求解 AUV 的运动参数, 采用动态层方法进行网格更新, 最终实现 AUV 从静止到匀速的直航运动的自航推进数值模拟. 相对 MFR (多参考系坐标) 法, 自航速度误差为 2.6%, 伴流分数误差为 3.7%, 推力减额误差为 6.8%. 与非结构动网格法和重叠网格法相比, 该方法的计算收敛快. 同时, 数值模拟获得了 AUV 自航推进过程中的速度曲线, 推力和阻力变化曲线, 自航推进的尾迹和压力云图, 以及相应的动画, 揭示了自航推进过程中船、桨、舵相互作用的内在机理, 为进行更复杂的载体操纵运动提供类物理数值模拟方法.

关键词: 自主水下机器人; 自航推进; 动网格; 螺旋桨; 类物理数值模拟

中图分类号: TP24

文献标识码: A

Physics-based Numerical Simulation of AUV Self-propulsion Using Multi-block Hybrid Dynamic Mesh Method

WU Lihong^{1,2}, LI Yiping², LIU Kaizhou², FENG Xisheng², WANG Shiwen¹, AI Xiaofeng¹

(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: A multi-block hybrid dynamic mesh method for physics-based numerical simulation of AUV (autonomous underwater vehicle) self-propulsion motion is presented. The method models a fully appended AUV with rudders and propeller, uses UDF (user defined function) to transmit force and velocity between AUV and its propeller, adopts 6DOF (degree of freedom) motion equations to solve the motion parameters, and employs the dynamic layer method to update meshes. Finally, the numerical simulation of AUV self-propulsion motion is achieved which models the straight ahead run from the static state to the uniform velocity. The differences of the self-propulsion velocity, the wake fraction and the thrust deduction factor compared with MFR (multiple frames of reference) are 2.6%, 3.7%, and 6.8%, respectively. And the computation convergence is speeded up compared with the unstructured dynamic mesh method and the dynamic overset mesh method. By numerical simulation, the velocity curve, curves of thrust and resistance, contours of wake velocity and pressure, and related animations during AUV self-propulsion are obtained. The physical reasons of interaction among the hull, the propeller and the rudders are investigated, which provides a physics-based numerical simulation method for more complex maneuvering motions of marine vehicles.

Keywords: AUV (autonomous underwater vehicle); self-propulsion; dynamic mesh; screw propeller; physics-based numerical simulation

1 引言 (Introduction)

船模自航试验是预报船舶能否达到设计航速, 判定船、桨、主机是否匹配, 以及获得推进参数的有效途径. 运用 CFD (计算流体动力学) 模拟自航试验具有重要的工程应用价值. 根据对流场模拟的

简化程度可将自航模拟的方法分为 4 种: 基于系数的方法、基于体积力的方法、多参考系法 MFR 和类物理方法. 基于系数的方法不需要建立载体的几何模型, 如 Ueno 和 Nimura^[1] 针对深海水下机器人发射器的下降运动过程进行了数值模拟, Azarsina 等^[2] 对 MUN Explorer AUV 操纵性进行数值预报.

基于体积力的方法建立载体模型,但对于复杂的螺旋桨模型采用量化公式替代,如 Bettel 等^[3]采用基于体积力的方法对潜艇的紧急上浮操纵运动进行了数值模拟. Simonsen 和 Stern 等^[4]对 Series 60 标准船模的直航运动、带附体舵的 Ezzo Osaka 油轮的操纵性进行了仿真. 孙小帅等^[5]和李亮等^[6]采用 MFR 法通过改变螺旋桨载荷模拟了船模的自航点. 而类物理的自航数值模拟则模拟真实的自航运动:建立载体的全附体模型,模拟螺旋桨的旋转,将螺旋桨的推力传递到载体,推进载体的运动,直到阻力和推力达到平衡,进入匀速航行状态. 这种方法是 CFD 数值模拟追求的目标和难点. 近几年,国内外研究者对此进行了探索. Chase 和 Carrica^[7]对全附体潜艇自航运动采用动态重叠网格法进行了数值模拟; Mofidi 和 Carrica^[8]对集装箱船 KCS (KRISO container ship) 带全附体桨舵的 ZigZag 操纵运动,采用移动舵和直接螺旋桨离散的方法进行了数值模拟. 沈志荣^[9]对水面船舶操纵运动进行数值模拟.

以上类物理的自航数值模拟主要采用重叠网格法^[7-9]. 动网格法也是广泛应用于边界移动的一种数值模拟方法^[10-12]. 重叠网格法中的交界面插值会导致计算精度变差的问题,而动网格法模拟 3 维大位移高频响应问题,随着边界运动,会产生网格畸变,需要对网格进行大量更新,由此导致计算精度变差和计算时间增长,这是束缚其发展的重要因素^[12]. 解决以上问题,是将动网格应用在自航模拟的前提. 同时,类物理数值模拟方法的计算量大,通常需要在超算中心上计算,计算时间长,通常需

要几个月的时间^[7-9]. 为了提高类物理数值模拟方法的精度和计算速度,本文作者^[13-14]一直从事动网格数值模拟的研究,探索采用多块动态混合网格方法^[15]来实现 AUV 的自航数值模拟,从网格技术方面提高动网格方法进行自航操纵运动数值模拟的精度和计算速度.

2 网格模型 (Mesh model)

所采用的 AUV 为类 REMUS AUV, $L = 1.33 \text{ m}$, $D = 0.191 \text{ m}$, 具有椭球型艏、圆柱形平行中体和圆锥型尾. 艏部有“十”字形舵翼, 以及一个直径 $d = 0.126 \text{ m}$ 的 MAU4-40 螺旋桨. 数值模拟中, AUV 艏、中和艉 3 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 $OXYZ$, 其中 OX 为 AUV 对称轴, 艏向为正 (向前), OY 指向左舷, OZ 垂直向上为正.

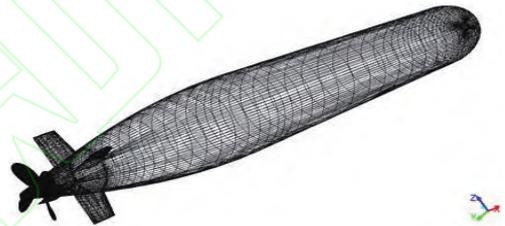


图 1 带舵翼和螺旋桨的 AUV 网格模型

Fig.1 Mesh model of AUV with rudders and propeller

本文采用多块动态混合网格进行 AUV 自航运动模拟. 根据物体的运动趋势, 建立如图 2 所示的 AUV 对称面上的动网格分区, 总共包括 6 个分区.

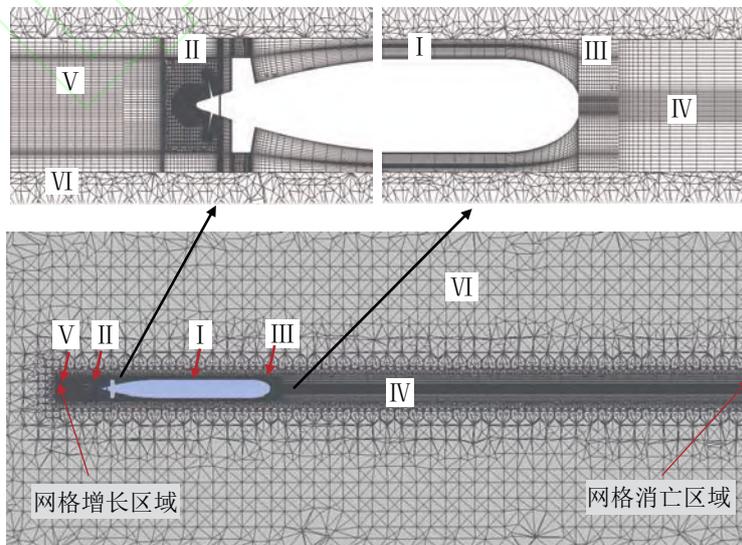


图 2 动网格分区

Fig.2 Dynamic zones and mesh

各个分区的尺度和网格类型如表 1 所示. 分区 I 为 AUV 和舵翼的流场区域, 包含 AUV、舵翼的表面结构网格以及近场边界层区域的结构网格; 分区 II 为螺旋桨运动区域, 包含螺旋桨表面的非结构网格, 以及螺旋桨扰动子区域的非结构网格; 分区 III 为包含 AUV、舵翼和螺旋桨的近流场区域的结构网格; 分区 IV 为 AUV 航行需要经过的艏部加密区域, 由结构网格构成; 分区 V 为 AUV 运动后的区域, 由结构网格构成; 分区 VI 为外围非结构网格区域.

表 1 AUV 自航的网格尺度

分区	长度	宽度	网格数	网格类型
I	1.05L	1.27D	27 M	结构网格
II	0.08L	1.27D	42 M	非结构网格
III	1.20L	1.41D	4.6 M	结构网格
IV	5.11L	1.41D	15 M	结构网格
V	0.18L	1.41D	3.7 M	结构网格
VI	7.48L	2.00L	15 M	非结构网格
总共			107.3 M	

数值模拟 AUV 自航推进过程中, 分区 II 随着螺旋桨进行旋转运动, 同时随 AUV 做直航运动; 分区 I 和 III 随 AUV 做直航运动; 分区 IV 和 V 做直航运动, 但是在分区 IV 的最前端为静止壁面, 采用动态层方法对区域 IV 进行网格压缩后的合并, 因此最前端为网格消亡区域; 分区 V 的最后端为动态层网格的拉伸区域, 为网格增长区域. 外围区域 VI 为网格变形区域, 网格变化与交界面的网格点对应. 这种方法让 AUV 扰动子区域 (采用重叠网格的子区域网格运动的思想) 随着 AUV 做刚体运动, 保证扰动子区域的网格正交性, 提高了 AUV 边界层的摩擦阻力求解精度; 同时运动区域包含了物体的扰动区域, 保持了网格运动中近场网格的质量, 也提高了压力场求解精度. 使网格消亡和增长区域远离扰动区域, 由此降低了网格更新数量和频率, 提高了数值计算速度.

3 UDF 函数 (User defined function)

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) 来实现, 可以描述为图 3 所示的流程图: 首先, 载体静止, 螺旋桨以一定转速旋转运动, 产生推力, 并将推力传递给 AUV, AUV 在推力作用下开始加速运动, 同时 AUV 受到航行中的水阻力,

使得 AUV 以一定速度 V 航行; 螺旋桨固定在 AUV 上, 则 AUV 拖曳螺旋桨以 V 航速运动; AUV 的尾流场改变了螺旋桨的进流场, 使得螺旋桨产生新的推力, 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 所受到的推力 T 与其航行阻力 R 平衡, 则航速与 MFR 的自航点航速之间的误差在 5% 内, 认为达到自航点.

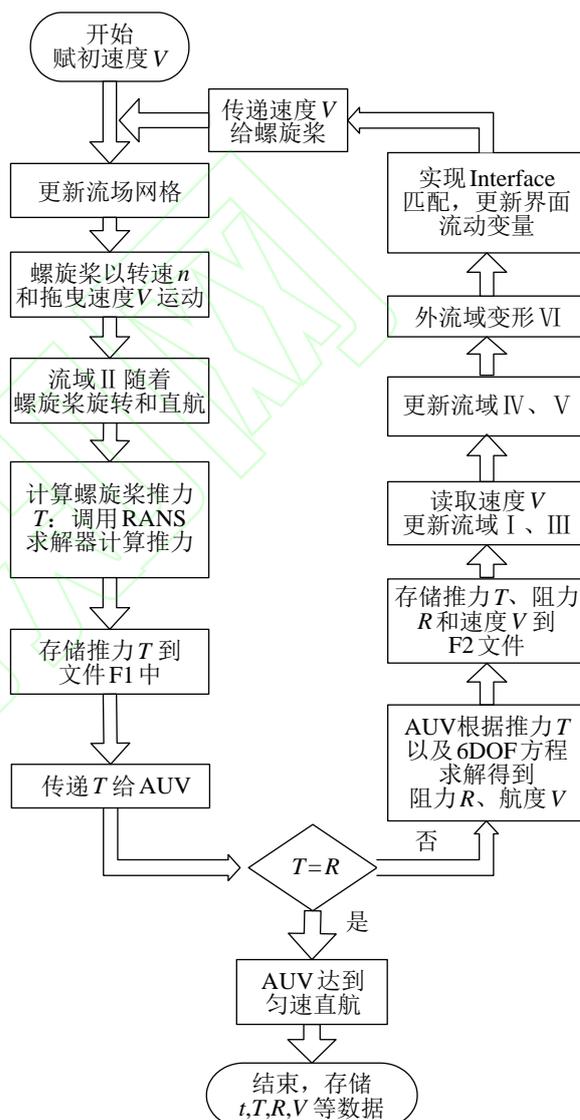


图 3 UDF 定义的 AUV 自航运动流程图

Fig.3 Flow chart of AUV self-propulsion defined by UDF

4 数值验证 (Numerical validation)

在缺少试验的条件下, AUV 自航运动的类物理数值模拟方法可以通过以下 3 种方法进行逐步验证^[9]: 首先进行螺旋桨的敞水试验, 然后进行 AUV 阻力的拖曳试验, 最后采用 MFR 法进行定常自航点数值模拟. 图 4 为敞水试验图谱值和数值模拟的结果, 可见数值模拟的螺旋桨水动力性能和图谱的一致, 证明了螺旋桨模型和数值方法的准确性. 在

对 AUV 带舵不带桨的拖曳阻力试验中，以 1.5 m/s 航行，其阻力为 6.81 N，与试验结果一致^[14]。根据对应转速（AUV 自航运动中，初始速度为 0，螺旋桨转速 900 r/min），改变进速，采用 MFR 方法进行定常自航点验证，对比结果将在第 5 节给出。

5 数值模拟结果与分析 (Numerical simulation results and analysis)

非定常数数值模拟中，根据螺旋桨的旋转速度，单个时间步长对应螺旋桨旋转 1° 的时间，总计算时间步长达 14000。每步外循环含内循环 20 次，达到每步都收敛于 10⁻⁴。AUV 从静止到匀速的自航推进经历时间约 7.7 s，经历不同的速度。

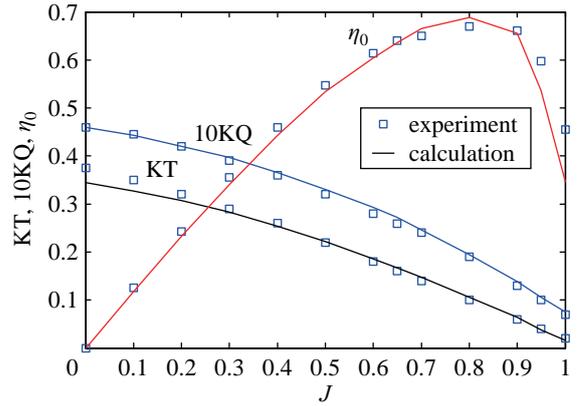


图 4 敞水试验的试验结果与数值结果对比图
Fig.4 Comparison between experimental results and numerical results in open-water tests

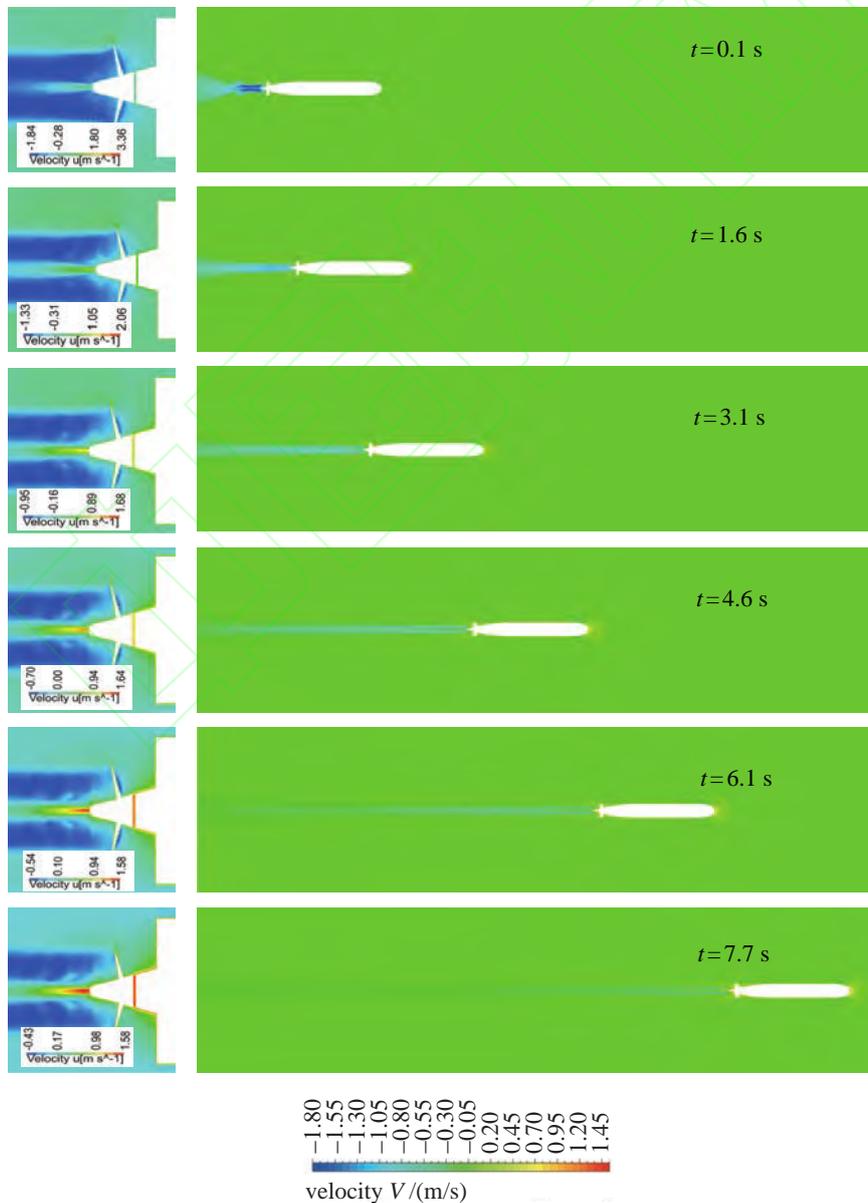


图 5 AUV 自航运动不同时刻的尾迹 (XOY 面)
Fig.5 Wake in AUV self-propulsion at different times (XOY plane)

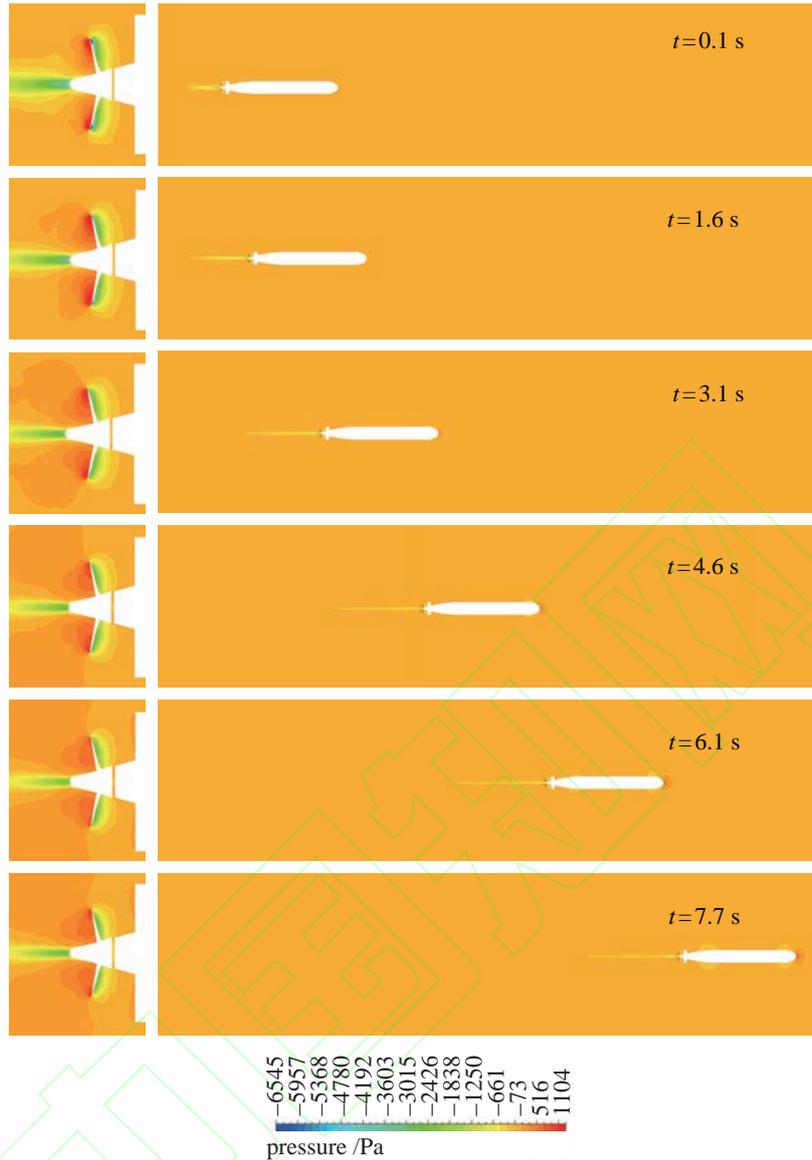


图 6 AUV 自航运动不同时刻压力云图 (XOY 面)

Fig.6 Pressure contours of AUV self-propulsion at different times (XOY plane)

图 5 给出 6 个典型时刻: $t = 0.1\text{ s}$, 1.6 s , 3.1 s , 4.6 s , 6.1 s 和 7.7 s 的 AUV 速度 (右侧图) 和螺旋桨尾迹局部放大图 (左侧图). 可见, 在螺旋桨推进作用下, AUV 速度在逐步增加. 刚开始时, AUV 速度近乎 0, 则螺旋桨尾迹中只有向后的反向速度, 反向速度值大 (推力较大); 随着螺旋桨持续将作用力传递给 AUV, AUV 获得加速度, 速度增加, AUV 的尾迹 (向前) 和螺旋桨的尾迹 (向后) 叠加, 使最终的螺旋桨向后作用于水的速度强度变弱 (推力变小). 随着 AUV 的航行距离增加, 螺旋桨运动拖曳出的尾流场越来越长. 此外, 从左图对比可见, 螺旋桨叶梢有明显对称梢涡泻出, 刚开始时梢涡强度大, AUV 速度小, 则梢涡出现重叠, 不明显; 随着 AUV 航速增加, 梢涡受 AUV 尾迹作用,

显得更清晰, 随着水流传播得更远.

图 6 给出了与图 5 相对应时间的 AUV 轴对称平面的压力云图, 左侧为全局, 右侧为螺旋桨附近的局部放大图. 从图中可以看出, 在推力的持续作用下, AUV 速度不断增加, 艏部驻点的压力增大; 而相应螺旋桨叶片的压力, 其叶面压力大于叶背压力, 航速较低的时刻, 叶面与叶背压力差较大, 即产生的推力较大, 随着航速增加, 两者压差变小, 推力变小. 这与螺旋桨敞水性能曲线一致.

图 7 给出自航模拟过程的 AUV 速度随时间变化图. 采用均一化的速度表示, 为了显示速度的变化量, 基准速度是最终的匀速速度 (图 8 同理). 从图 7 可见, 初始时刻: 推力较大, 阻力较小, 速度的斜率较大, 即加速度加大; 随着航速增加, 阻

力增加, 阻力与速度的关系非简单的二次方关系; 当合力变小, 速度的斜率渐渐变小, 加速度慢慢减小, 直至达到匀速状态.

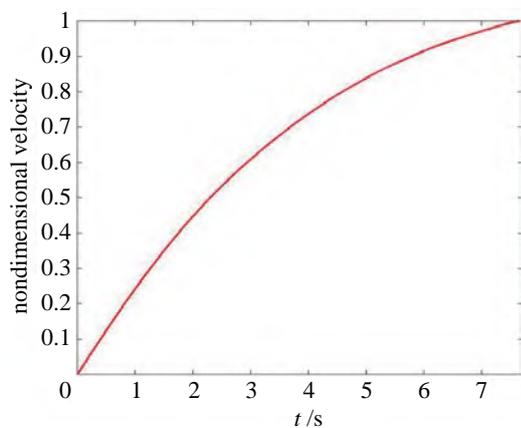


图7 自航过程中的速度曲线
Fig.7 Velocity curve in self-propulsion

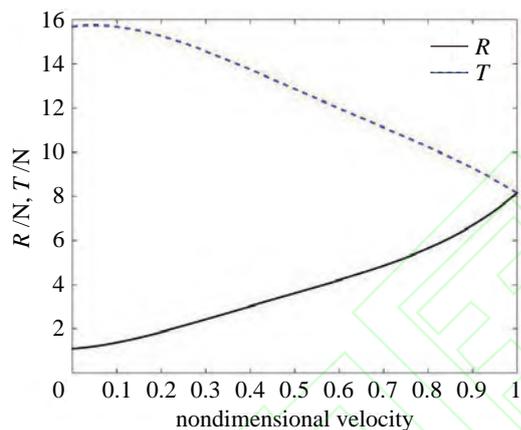
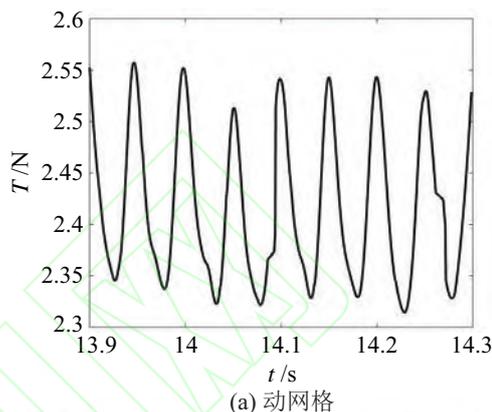


图8 自航过程中的阻力与推力曲线
Fig.8 Curve of the thrust and resistance in self-propulsion

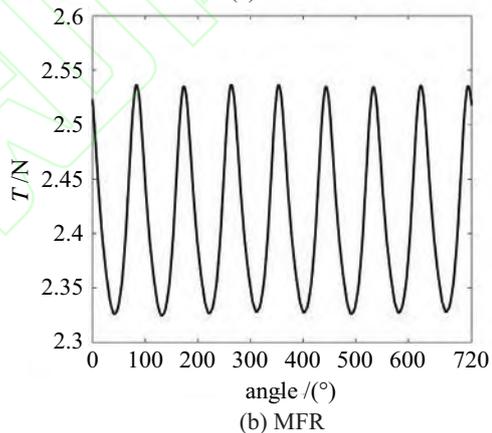
图8给出自航推进过程中推力和阻力随速度的变化图. 可见, 随着速度增加, 推力减小, 而阻力增大, 直到两者渐趋相等达到匀速状态. 此时推力系数 K_T 为 0.156, 采用等推力法查图4的敞水性能曲线得进速系数 $J = 0.7$, 由此可得伴流分数 $w = 0.2915$, 敞水效率 $\eta_0 = 0.7$. 与不带桨的AUV同等速度的拖曳阻力对比, 可以获得推力减额分数 $t_1 = 0.175$. 采用MFR进行定常自航点计算, $w = 0.303$, $t_1 = 0.163$, 2个参数的误差分别为3.7%、6.8%. 数值模拟中得到的载体同速下阻力较大, 达到的最终匀速状态略低, 约比MFR低2.6%, 原因可能是: 由于多块动态混合网格存在多个交界面, 不同交界面随着物体边界的运动, 网格需要不同的更新和动态匹配, 交界面存在一定的通量损失, 因此相同速度下阻力略微偏大.

此外, 图8中的推力和阻力曲线都比较平滑,

实际计算中存在振荡, 这是经过滤波处理的. 推力振荡量相对于最大推力(系柱推力)较小, 因此振荡值在全自航过程中被掩盖了. 对AUV达到自航点时螺旋桨旋转2转时的推力, 分别采用动网格和MFR计算, 可见推力具有周期振荡特性, 这是由艏部舵翼非回转对称性引起的, 且动网格计算结果具有脉动特性, 如图9所示.



(a) 动网格



(b) MFR

图9 AUV自航点的螺旋桨推力特性

Fig.9 Thrust characters of the propeller at AUV self-propulsion point

6 结论 (Conclusion)

本文采用多块动态混合网格法实现了将AUV自航运动在普通台式机上数值模拟的过程, 在i5-6400 CPU @2.70 GHz, 内存16.0 GB的计算机上进行计算, 4个处理器并行, 需要7~14天时间, 与非结构动网格方法和动态重叠网格法(采用非结构动网格方法进行数值模拟需要大概20~30天的时间^[16]; 采用重叠网格法进行自航数值模拟在高性能机上通过减少质量进行加速计算, 仍需1~2个月^[7-9]), 且其计算结果只有匀速后的定常结果)相比, 计算速度快, 精度高, 数值模拟不需要减小质量, 能得到自航全程的计算结果. 数值模拟得到了如下的结论:

1) AUV 从静止状态在螺旋桨恒定转速作用下做加速运动, 历时 7.7 s 达到匀速状态。

2) 自航过程中, AUV 的速度开始增加很快, 后来加速度渐渐降低, 最后加速度趋于 0。

3) AUV 静止时, 推力最大, 阻力最小; 随着速度增加, 推力减小, 阻力增加, 最终两者接近平衡。螺旋桨推力呈现周期振荡, 主要是由舵翼的非回转对称引起的, 同时动网格计算结果还有脉动特性。

4) 速度变化的动态云图显示了螺旋桨尾迹随着 AUV 速度的增加, 强度减弱, 但是尾迹拖曳得更长, 艏部梢涡更为明显。

5) 压力变化的动态云图显示, 随着 AUV 的速度增加, 叶面和叶背压差变化越来越小, 而 AUV 艏部驻点的压强越来越大, 阻力随着速度的增加而增加, 但是为非二次方关系。

本文为进行大位移的载体操纵运动提供了类物理的数值模拟方法。数值仿真中的网格构建、数值计算结果的稳定性、多块网格之间的交界面动态耦合问题是影响动网格计算稳定性和可靠性的关键因素, 今后将进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] Ueno M, Nimura T. An analysis of steady descending motion of a launcher of a compact deep-sea monitoring robot system [C]//MTS/IEEE OCEANS 2002 Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2002: 277-284.
- [2] Azarsina F, Williams D C. Manoeuvring simulation of the MUN Explorer AUV based on the empirical hydrodynamics of axisymmetric bare hulls[J]. Applied Ocean Research, 2010, 32(4): 443-453.
- [3] Bettel M C, Gerber A G, Watt G D. Unsteady analysis of the six DOF motion of a buoyantly rising submarine[J]. Computers & Fluids, 2009, 38(9): 1833-1849.
- [4] Simonsen C D, Stern F. RANS maneuvering simulation of Esso Osaka with rudder and a body-force propeller[J]. Journal of Ship Research, 2005, 49(2): 98-120.
- [5] 孙小帅, 董文才, 姚朝帮. 全附体多桨船模自航点数值求解方法研究 [J]. 海军工程大学学报, 2016, 28(2): 40-45. Sun X S, Dong W C, Yao C B. Numerical simulation on self-propulsion point of multi-screw ship with appendages[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2016, 28(2): 40-45.
- [6] 李亮, 王超, 孙帅, 等. 实船自航试验数值模拟及尺度效应分析 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(7): 901-907. Li L, Wang C, Sun S, et al. Numerical simulation and scale effect of self-propulsion test of a full-scale ship[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(7): 901-907.
- [7] Chase N, Carrica P M. Submarine propeller computations and application to self-propulsion of DARPA Suboff[J]. Ocean Engineering, 2013, 60: 68-80.
- [8] Mofidi A, Carrica P M. Simulations of ZigZag maneuvers for a container ship with direct moving rudder and propeller[J]. Computers & Fluids, 2014, 96: 191-203.
- [9] 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. Shen Z R. Development of overset grid technique for hull-propeller-rudder interactions[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [10] 段旭鹏, 常兴华, 张来平. 基于动态混合格网的多体分离数值模拟方法 [J]. 空气动力学学报, 2011, 29(4): 447-452. Duan X P, Chang X H, Zhang L P. A CFD-and-6DOF-coupled solver for multiple moving object problems based on dynamic hybrid grids[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(4): 447-452.
- [11] 张玉东, 纪楚群. 包含动边界的非定常流场动网格数值模拟 [J]. 计算物理, 2006, 23(2): 165-170. Zhang Y D, Ji C Q. Numerical methods with dynamic structured meshes for unsteady flows with moving boundaries[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2006, 23(2): 165-170.
- [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): 424-447. Zhang L P, Deng X G, Zhang H X. Reviews of moving grid generation techniques and numerical methods for unsteady flow[J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(4): 424-447.
- [13] 吴利红, 封锡盛, 胡志强. 三维动态混合格网在 AUV 发射过程中的应用 [J]. 船舶力学, 2010, 14(7): 717-722. Wu L H, Feng X S, Hu Z Q. Application of 3-D hybrid dynamic grids to simulate the flow in AUV swim-out [J]. Journal of Ship Mechanics, 2010, 14(7): 717-722.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 艾晓锋. 基于动网格技术的 AUV 自航数值模拟研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2017. Ai X F. Numerical simulation of AUV self-propulsion based on moving mesh method[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.

作者简介:

- 吴利红 (1978-), 女, 博士, 副教授。研究领域: 水下机器人技术, 水动力, CFD。
- 李一平 (1963-), 女, 研究员。研究领域: 水下机器人技术。
- 刘开周 (1976-), 男, 博士, 研究员。研究领域: 水下机器人技术, 系统仿真, 虚拟现实等。