

利用 CFD 计算水下航行器直航附加质量的方法研究

郑志航¹ 张丽芳¹ 何波² 严天宏^{1*}

¹(中国计量大学机电工程学院 浙江 杭州 310016)

²(中国海洋大学信息科学与工程学院 山东 青岛 266100)

摘要 水下自主航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)是一种高度非标准化设备,理论计算不能准确地求取外形不一的 AUV 直航方向的附加质量。提出一种基于商业软件 ANSYS FLUENT 的计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)求解方法,与传统的基于动网格的 CFD 方法不同,该方法不需要使用动网格,在保证计算精度的同时降低了网格要求且极大地提升了计算速度。为验证本方法的准确性,对标准椭圆球分别进行 CFD 仿真及理论计算。该方法得到的附加质量值与理论计算值偏差小于 3%。说明在设计初期,用该方法计算任意外形的 AUV 直航方向的附加质量结果可靠。

关键词 AUV CFD 椭圆球 匀加速直线运动 附加质量

中图分类号 U661.6 TP3 文献标志码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2024.09.007

A METHOD OF CALCULATING THE ADDED MASS OF UNDERWATER VEHICLE IN DIRECT FLIGHT BY CFD

Zheng Zhihang¹ Zhang Lifang¹ He Bo² Yan Tianhong^{1*}

¹(College of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310016, Zhejiang, China)

²(Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China)

Abstract AUV is a highly nonstandard equipment, and the theoretical calculation can not accurately calculate the added mass of AUVs with different shapes in direct direction. In this paper, a CFD method based on commercial software ANSYS fluent is proposed, which is different from the traditional CFD method based on dynamic grid. This method does not need to use dynamic grid, which reduces the grid requirements and greatly improves the calculation speed while ensuring the calculation accuracy. In order to verify the accuracy of this method, CFD simulation and theoretical calculation of standard ellipsoid were carried out respectively. The deviation between the added mass value obtained by this method and the theoretical value is less than 3%. At the beginning of the design, the method can be used to calculate the added mass of AUV with arbitrary shape in direct direction, and the result is reliable.

Keywords AUV CFD Ellipsoid Uniformly accelerated linear motion Added mass

0 引言

AUV 是一种常用于海洋探测、监察的非标设备。AUV 会根据用户使用需求而对壳体进行定制,因此 AUV 外形不一。为了更好地操纵 AUV,就必须先了解其在水中的操纵性。附加质量是物体在理想流体中作非正常运动时所受到的水动力,是潜艇操纵性的其中

一个参数。而获得非标 AUV 附加质量的方法有经验流体力学(Empirical Fluid Dynamics, EFD)、CFD、Hess-Smith 面元法和水下实验。其中水下实验是最准确的方法, Lin 等^[1]通过水下实验得到 SUBOFF 模型的水动力系数, Lee^[2]对一个球形 UUV 进行了平面运动机构试验、理论计算和 CFD 分析,得到了附加质量和惯性导数。但实验成本高、耗时长,在 AUV 设计阶段普遍使用 EFD、Hess-Smith 面元法和 CFD 求解附加质量。

Korotkin 等^[3]、Blevins^[4] 和 Lamb^[5] 分别提供了椭圆球、圆柱体等形状的物体的附加质量查询表、计算式与估算式。但由于 AUV 形状多变,传统的 EFD 法已经无法准确地预测不同形状 AUV 附加质量大小。

随着计算机技术的发展,计算速度快精度但不高的 EFD 只能提供参考。Hess 等^[6] 提出 Hess-Smith 面元法高效地计算出物体的附加质量。文献[7-8]利用边界元方法准确预测螺旋桨的附加质量。Eng 等^[9]通过 WAMIT 和 MATLAB 准确地计算 ROV 的附加质量。Lin 等^[10]利用快速多边界元方法(FMBEM)和 BEM 计算复杂的三维水下物体的附加质量系数,发现 FMBEM 在计算上比传统的 BEM 效率高得多。文献[11-12]利用基于面元法的 Ansys-AQWA 程序进行数值研究,为计算 AUV 附加质量计算提供了一种有效的方法。王波^[13]利用 gambit 将物体表面划分四边形网格后,把物体的网格节点信息导入已编好求解程序的 Fortran 软件中,求解计算得出微小型水下航行器的附加质量系数。Yang 等^[14]也利用该方法计算求得水下滑翔机的附加质量。上述的方法精度都满足工程应用需求,但程序代码复杂,较难快速上手。

ANSYS Fluent 是成熟的流体仿真软件,能准确地对不同形状的物体在不同的工况下求解 RANS 方程。文献[15-17]利用动网格,分别模拟椭圆球在水中做规律的正弦运动和水平匀加速直线运动,并通过分析仿真所得数据,准确地求得直航方向附加质量。由于需要使用动网格技术,网格质量对仿真十分关键。仿真过程中部分网格会移动重建,所以动网格仿真的最大步长取决于最小网格尺寸,对于复杂外形的物体便无法快速求解附加质量。本文提出一种无需使用动网格快速求解直航方向附加质量的 CFD 求解方法。本方法通过改变流体速度模拟 AUV 变速的过程,监控阻力值并通过计算求解附加质量。

1 理论计算

1.1 计算模型与坐标系建立

附加质量的大小与物体运动的加速度成比例,本文用 m_{ij} 表示物体在 i 方向以单位加速度(角加速度)运动时,在 j 方向的附加质量、附加质量静矩或附加转动惯量^[18]。附加质量 m_{ij} 恒为正值。如图 1 所示,对 AUV 建立笛卡尔坐标系,沿 x 、 y 、 z 方向移动用 1、2、3 表示,绕 x 、 y 、 z 方向转动用 4、5、6 表示。

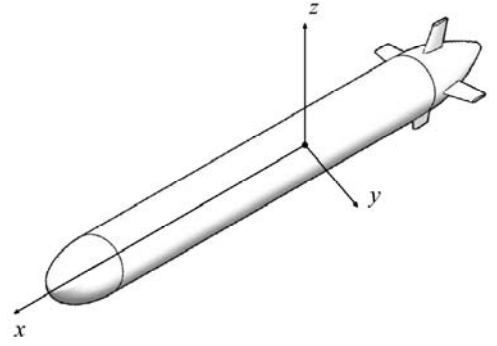


图 1 AUV 坐标系

为高效准确地验证本文提出的方法能准确计算水下航行器的附加质量,选取 3 个简单的、可进行理论计算的椭圆球模型,如图 2 所示, L 为椭圆球长度, D 为椭圆球截面直径, M 为椭圆球的质量。

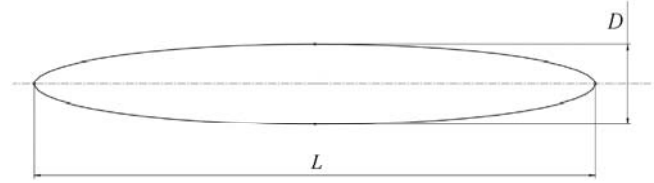


图 2 椭圆球模型

为降低尾流效应和增加水动力性能,AUV 的长径比一般为 $10^{[19]}$ 。实际生产的 AUV 长径比一般为 7 ~ 10。本文选取长径比为 5、7、10 的 3 个椭圆模型进行仿真验证。模型的具体几何参数如表 1 所示。其中 α 是由 Blevins 测量的经验参数,由椭圆的长度与直径之比确定。 m_{11} 为根据理论计算的模型附加质量值。

表 1 椭圆球模型参数

模型	L/m	$L/D/m$	M/kg	α	m_{11}
Model1	2.5	5.0	327.332	0.059 12	19.312
Model2	3.5	7.0	458.407	0.035 85	16.395
Model3	5.0	10.0	654.565	0.020 71	15.533

1.2 理论计算

一个任意形状的物体运动时共有 36 个附加质量,可列成方阵如下:

$$\begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{15} & m_{16} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} & m_{25} & m_{26} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} & m_{35} & m_{36} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} & m_{45} & m_{46} \\ m_{51} & m_{52} & m_{53} & m_{54} & m_{55} & m_{56} \\ m_{61} & m_{62} & m_{63} & m_{64} & m_{65} & m_{66} \end{pmatrix} \quad (1)$$

由势流理论式(2)可得式(3)。由于 AUV 基于 XOZ 面对称,且各附体较小,对附加质量影响较小,可近似看作 AUV 基于 XOY 对称,所以方阵可简化为式(4)。方阵中除了 m_{11} 和 m_{44} ,其他均可通过平面运动

机构试验模拟(Planar Motion Mechanism, PMM)纯升沉、纯横荡、纯俯仰、纯艏摇直接或间接求得^[20-23],本文提出一种 CFD 仿真方法计算附加质量 m_{11} 。

$$m_{ij} = \rho \iint_s \varphi_i \frac{\partial \varphi_j}{\partial n} ds \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

$$m_{ij} = m_{ji} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & m_{24} & 0 & m_{26} \\ 0 & 0 & m_{33} & 0 & m_{35} & 0 \\ 0 & m_{42} & 0 & m_{44} & 0 & m_{46} \\ 0 & 0 & m_{53} & 0 & m_{55} & 0 \\ 0 & m_{62} & 0 & m_{64} & 0 & m_{66} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式(2)中 s 为物体表面积; n 为微元面积 ds 的外法线方向; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 分别是物体沿坐标轴 x, y, z 以单位速度平移运动所引起的流体速度势; $\varphi_4, \varphi_5, \varphi_6$ 分别是物体以单位角速度绕 x, y, z 轴作转动运动所引起的流体速度势。

Blevins^[4]给出了椭圆球的附加质量 m_{11} 的经验公式:

$$m_{11} = \frac{4\alpha\rho\pi}{3} \left(\frac{L}{2} \right) \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (5)$$

式中: ρ 是水的密度, α 是由 Blevins 测量的经验参数, 由椭圆的长度与直径之比确定, 为 L 长轴长度, D 为短轴长度。由式(5)计算得椭圆 1、椭圆 2 和椭圆 3 的理论值如表 1 所示。

2 CFD 计算

2.1 CFD 计算附加质量分析

在水下直航时, AUV 只受到由加速度引起的惯性力和速度引起的粘性力。当 AUV 做匀速直线运动时, AUV 的推进力 F_p 大小如式(6)所示, 其中 $Drag$ 为匀速运动时的阻力。

$$F_p = Drag \quad (6)$$

而当 AUV 做加速恒为 a 的水平直线运动时, 在 t 时刻 AUV 的瞬时推力大小等于在 t 时刻由速度产生的阻力大小加上在匀加速度 a 下的 AUV 质量与附加质量所产生的惯性力, 关系式为式(7)。

$$F_{p,t} - Drag_t - ma = m_{11} \cdot a \quad (7)$$

将匀加速运动过程离散化, 则匀加速运动近似为 AUV 在时间差 Δt 内做匀速直线运动, 并将上一迭代的结果代入下一迭代的开始。利用 CFD 瞬态计算, 通过监控 AUV 的阻力实现记录每个时间差的阻力 $Drag_{t-n\Delta t+i}$ 。并通过最小二乘法拟合 t 时刻前后一段

时间的数值, 来推算某时刻的推力 $F_{p,t}$, 以保证拟合而得的推力 $F_{p,t}$ 为 t 时刻的瞬时推力。

$$F_{p,t} = \overline{Drag_t} = \frac{\sum_{i=\Delta t}^{2n\Delta t} Drag_{t-n\Delta t+i}}{2n\Delta t} \quad (8)$$

将式(6) - 式(8)结合, 便可得出式(9), 其中 ε 为修正系数。

$$m_{11} \cdot a = \varepsilon \cdot \left(\frac{\sum_{i=\Delta t}^{2n\Delta t} Drag_{t-n\Delta t+i}}{2n\Delta t} - Drag_t - ma \right) \quad (9)$$

2.2 运动方程

考虑到在瞬态仿真的初期, 结果会有较大的偏差。所以先使用恒定来流速度仿真, 直到匀速直线运动阻力基本保持不变后, 来流速度将按指定规律变化。拟取速度为 1 m/s 为研究条件, 椭圆球初始速度为 0.8 m/s, 初始速度保持时间为 2.4 s。本文利用 ANSYS Fluent 中的用户自定义函数(User-Defined Functions, UDF)规定入口速度, 入口速度方程式为:

$$\begin{cases} U = 0.8 \\ U = 0.8 + a \cdot (t - 2.4) \end{cases} \quad (10)$$

式中: U 为来流速度; a 为加速度; t 为 Flow-Time。

2.3 控制方程

获得 AUV 直航阻力的方法有 EFD、CFD 和水下实验, 其中水下实验是最准确的方法, 但实验成本高、耗时长, 在 AUV 设计阶段大多使用 EFD 和 CFD, 随着计算机技术的发展, 计算速度快精度但不高的 EFD 只能提供参考, CFD 在保证较高精度的同时较低成本地计算水动力。CFD 求解雷诺平均方程(RANS 方程)已经得到验证并已广泛应用。商业软件 ANSYS Fluent 中包含了众多模型用于求解计算无黏、层流以及湍流情况, 求解雷诺数 Re 。雷诺数公式如下:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (11)$$

式中: ρ 为流体密度, 单位为 kg/m^3 ; U 为来流速度, 单位为 m/s ; L 为特征尺寸, 单位为 m ; μ 为流体的运动粘度, 单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。本文所有模型的 Re 均大于 20 000, 判断本文所有模型适用湍流模型。RANS 方程为^[24]:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial u'_i u'_j}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (13)$$

式中: U_i 为时均速度; u'_i 为脉动速度; $u'_i u'_j$ 为雷诺应力项; x 为坐标轴方向; f 为质量力强度; P 为压强; t 为时间。

2.4 边界条件及网格划分

仿真模型的流域尺寸如图 3 所示:速度入口边界距离椭圆前端 13 倍椭圆最大截面直径,自由出口距离椭圆尾端 33 倍椭圆最大截面直径。外流域采用占用计算资源少的结构网格,内流域采用非结构网格。

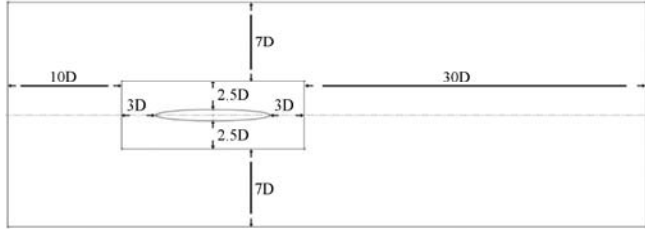
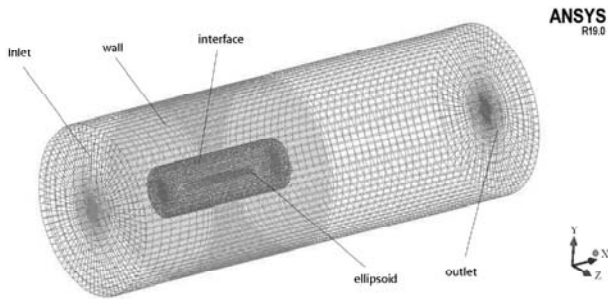
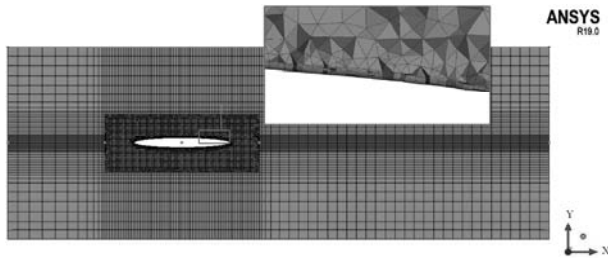


图 3 流域设置

如图 4(a) 所示,边界条件设置如下:入口设置为速度入口 (Velocity-inlet),出口设置为自由流 (Outflow), wall 设置为对称面 (Symmetry),将流域交界面 interface 的结构网格与非结构网格的节点融合并将类型设置为 interior。



(a) 网格整体图



(b) 网格截面图

图 4 网格图

对不可压湍流模型仿真,使用 FLUENT 进行有限体积法求解雷诺平均方程,采用有限体积法对二阶迎风格式的控制方程进行离散。压力-速度方程采用半隐式方程组 (SIMPLE),湍流模型选择自由剪切流动和壁面限制边界层流动优势明显的 SST k- ω [25],同时需要在网格模型中添加边界层。边界层的首层高度为:

$$y^+ = \frac{y^+ \cdot \nu}{u^*} = \frac{\sqrt{2} \cdot y^+ \cdot \nu}{u^* \cdot \sqrt{0.057 \cdot Re^{-0.2}}} \quad (14)$$

式中: y^+ 是无量纲, ν 为流体运动粘度; u^* 为近壁面摩

擦系数, $u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$; τ_w 为壁面剪切应力。庞永杰等 [26]

通过对 Myring 型回转体不同的 y^+ 模型仿真结果与实

际水下阻力实验对比得出仿真结果误差小于 2%。由此,本文取 $y^+ = 30$ 。

2.5 网格独立性及仿真准确性验证

在 CFD 分析之前,必须进行网格独立性试验,选取合适的网格文件进行后续分析。对一个几何模型进行流体仿真分析,结果往往会因为生成不同的网格而不同。为合理地使用计算机资源,本文基于一个初始网格,生成一系列连续细化的网格,网格数量变化比率为 $\sqrt{2}$ 。以 Model3 为对象,依次生成网格数量不同的 4 个网格文件,并分别以来流速度为 1 m/s 进行匀速直航流体仿真网格独立性试验如表 2 所示。

表 2 网格独立性验证

网格文件	网格数量/万	阻力/N
MESH1	59.2	10.395 5
MESH2	83.1	9.763 8
MESH3	116.7	9.805 3
MESH4	184.0	9.779 0

由表 2 可知,网格数量最少的 MESH1 结果与 MESH2、MESH3 和 MESH4 的结果相差较大,可认定 MESH1 网格的精度不高,不满足工程应用需求。MESH2、MESH3 和 MESH4 的仿真结果相近,可认定 MESH2、MESH3、MESH4 精度都符合工程应用需求,考虑到 MESH2 的网格数量最少,占用计算机资源最少,计算时间最短,故本文选取 MESH2 作为后续 Model3 的仿真对象,同时按照相同网格参数绘制 Model1 和 Model2 的网格文件用于后续仿真。

为验证本文直航仿真的准确性,本文对 ITTC 公布的 SUBOFF 标准模型进行不同航速下的直航仿真, SUBOFF 标准模型主要几何参数 [27] 如表 3 所示。

表 3 SUBOFF 物理参数

单位:m

船部长度	1.016
中部长度	2.229
艉部长度	1.111
最大直径	0.508
整体长度	4.356

由于 SUBOFF 模型与椭圆 3 的外形尺寸相似,按照 MESH2 相同网格参数对 SUBOFF 标准模型进行三维结构网格划分, SUBOFF 模型如图 5 所示。



图 5 SUBOFF 模型

通过 CFD 计算得出的阻力值与 ITTC 实验值进行对比,如表 4 所示,仿真值与实验值偏差不超过 5.0%,

本文的仿真方法可靠。

表 4 仿真准确性验证

速度/(m · s ⁻¹)	ITTC 实验值/N	仿真值/N	误差/%
3.045	87.4	88.3	1.0
5.14	242.2	234.3	3.3
6.09	332.9	316.4	5.0
7.16	451.5	430.6	4.6
8.23	576.9	555.7	3.7
9.25	697.0	685.6	1.6

3 结果与应用

3.1 仿真流程

利用 CFD 计算水下航行器直航附加质量的方法的实际操作流程如图 6 所示。将网格独立性分析后选取的较优网格导入 FLUENT 中,先选用稳态求解器,求解模型以 1 m/s 匀速直航时所受阻力 $Drag_{1\text{ m/s}}$ 。记录后选用瞬态求解器,进行匀加速直线运动仿真,记录每个时间步长的数据。最后根据式(9)对 m_{11} 求解。

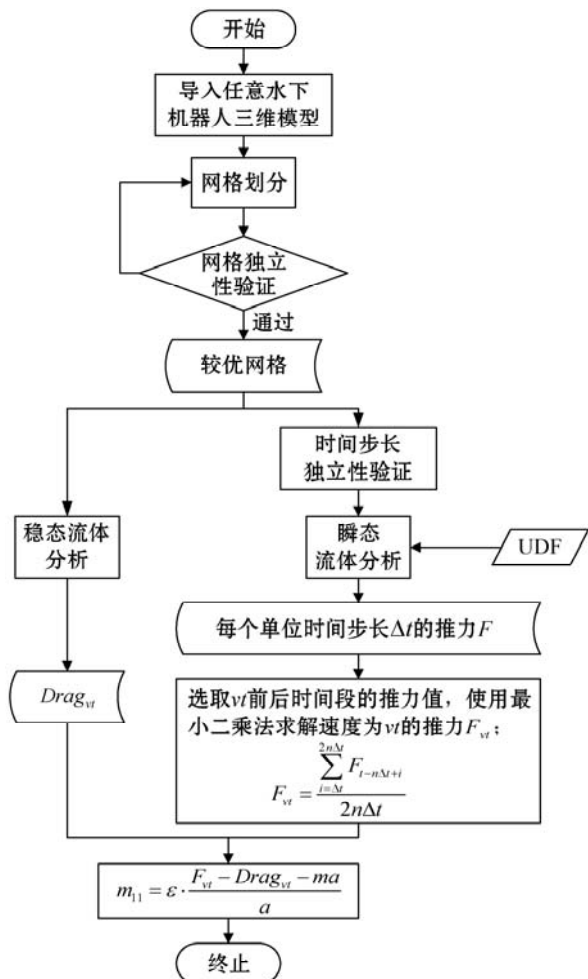


图 6 本文计算直航附加质量流程

3.2 仿真结果

实验计算机配置为: Intel(R) Xeon(R) E5-2680 v4 双 CPU @ 2.40 GHz。

如图 7 所示, Model1 以 0.1 m/s² 匀加速运动瞬态仿真后, 仿真数据较多。为更好地对数据进行处理分析、曲线拟合时使用原数据, 本文对原数据进行删减, 删减法则为: 每隔 0.08 s 取 1 个数据, 删减后并对特定区间数据进行拟合。以 Model 1 为模型, 加速度为 0.1、0.2、0.4 m/s² 为例, 监控瞬态每个时间步长的阻力, 阻力与时间、速度的关系图分别如图 8、图 9、图 10 所示。

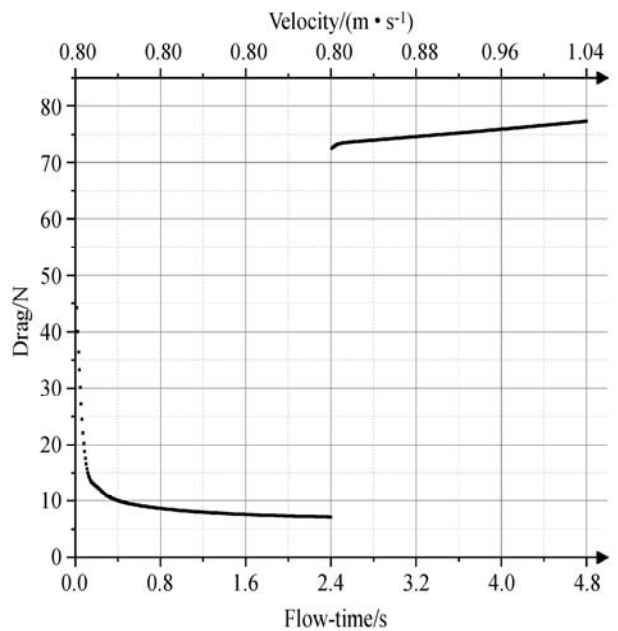


图 7 Model1 以 0.1 m/s² 匀加速运动仿真原数据

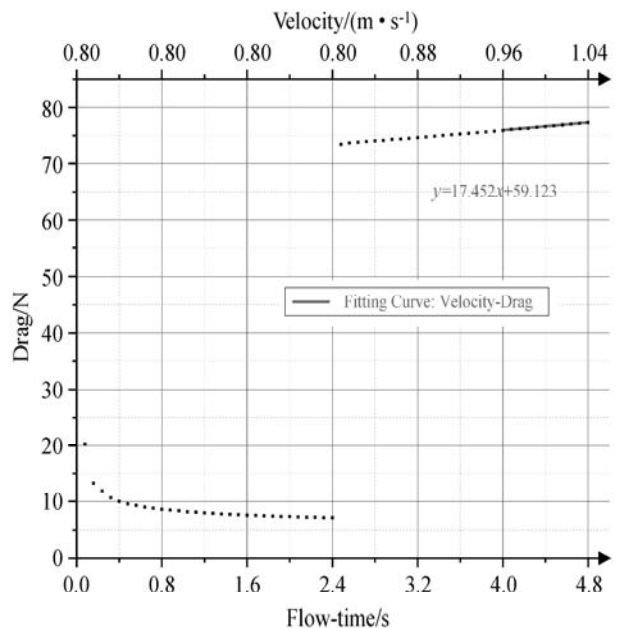


图 8 Model1 以 0.1 m/s² 匀加速运动仿真数据

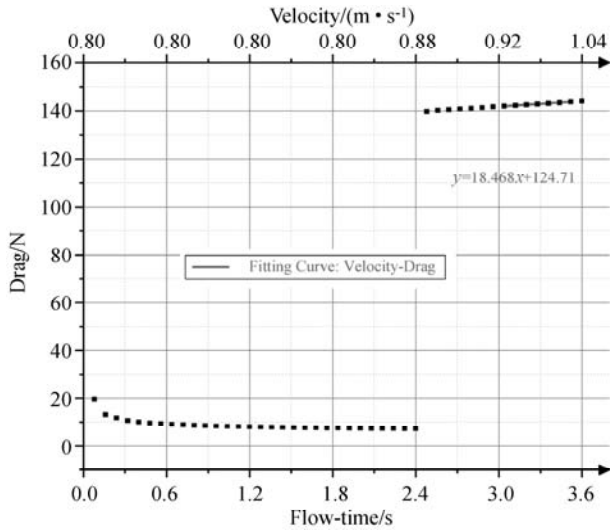


图9 Model1 以 0.2 m/s^2 匀加速运动仿真数据

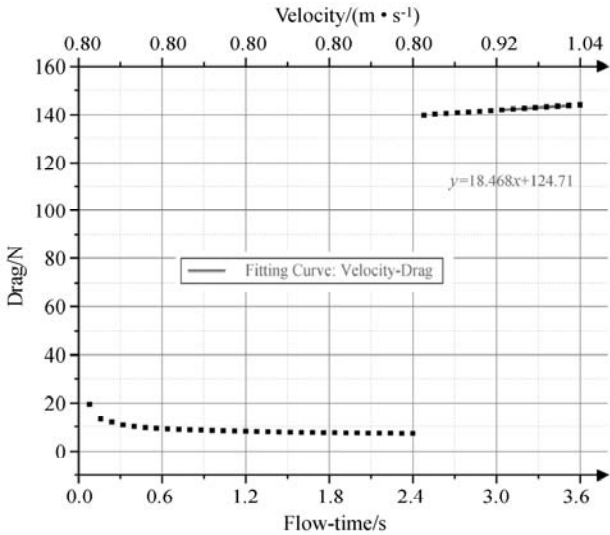


图10 Model1 以 0.4 m/s^2 匀加速运动仿真数据

如图8所示,运算时间在2.4 s之前,Model1 以 0.8 m/s 匀速直线运动,但 Model1 的阻力(推力)却不是一个恒定的值,说明瞬态仿真初期数据偏差较大,由此本文不选该部分数据进行分析,并在稳定后再进行后续仿真。在2.4 s后,Model1 便以 0.1 m/s^2 匀加速直线运动。可以看到,由于突然物体在水下加速,瞬间便会受到流体惯性力,推进力大小发生跃迁。

对特定区间的速度与推力关系进行拟合,由数据可明显看出拟合方程选用一阶线性方程。拟合结果如图中方程式所示。

同样的,将 Model2 和 Model3 分别以相同步骤进行仿真及数值拟合,结果如表5所示。其中 $Drag_{1\text{m/s}}$ 表示模型以 1 m/s 速度匀速直航时的阻力(推力)大小,单位为 N; a 为模型的加速度大小,单位为 m/s^2 ; $F_{p-1\text{m/s}}$ 为模型在特定加速度下进行匀加速直线运动时,瞬时速度为 1 m/s 时的推力大小; $m_{11\text{CFD}}$ 为根据式(9)计算得出的附加质量大小。 m_{11} 为根据理论计算的模型附

加质量值, m_{11} 大小如表1所示。

表5 匀加速直线运动的椭圆球仿真数据

Ellipsoid	$Drag_{1\text{m/s}}$ (N)	a / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	$F_{p-1\text{m/s}}$ /N	$m_{11\text{CFD}}$	$\varepsilon = \frac{m_{11}}{m_{11\text{CFD}}}$
Model1	6.835	0.1	41.471	19.663	0.984
		0.2	76.133	19.346	0.998
		0.4	145.367	18.982	1.017
Model2	8.072	0.1	55.603	16.900	0.970
		0.2	103.062	16.540	0.991
		0.4	197.836	16.000	1.025
Model3	9.764	0.1	76.575	13.547	0.999
		0.2	143.178	12.506	1.082
		0.4	276.015	11.063	1.223

3.3 求某型 AUV 直航方向附加质量

某型 AUV 是一种用于海洋探测与监察的大尺寸深海 AUV,排水量为 925 kg ,其最大直径为 0.533 m ,长度为 4.65 m ,三维外形如图11所示。

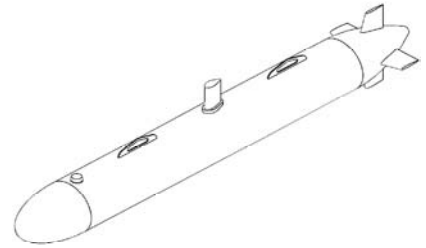


图11 某型 AUV 的三维图

使用本文 CFD 法计算该型 AUV 进行直航方向附加质量,将某型 AUV 在 0.1 m/s^2 下匀加速直航仿真,经曲线拟合后代入式(9)计算可得某型 AUV 直航附加质量 $m_{11} = \frac{116.449 - 925 \times 0.1 - 20.501}{0.1} = 34.48$ 。

将某型 AUV 直航附加质量 m_{11} 应用到水下航行六自由度控制方程中并进行控制实验,水下实验如图12所示,控制效果良好,加速时间理想。



图12 某型 AUV 水下实验图

4 结语

本文利用 CFD 计算方法在加速度为 0.1 m/s^2 、

0.2 m/s²和0.4 m/s²下能准确地计算出椭圆球直航下附加质量 m_{11} , 加速度为0.1 m/s²下仿真计算值与理论计算值偏差小于3%, 加速度为0.2 m/s²下仿真计算值与理论计算值偏差小于8.2%, 满足工程应用的需求。实际利用 CFD 计算 AUV 直航附加质量时应使用加速度为0.1 m/s²进行仿真计算。

本文提出的方法虽然可行, 但同一模型的 m_{11_CFD} 随着加速度的增加而减少, 同一加速度下的 m_{11_CFD} 会随着长径比的增加而增加。为了更准确且方便地使用本文的方法求解附加质量 m_{11} , 修正系数 ε 与长径比、加速度的关系是下一步的研究方向。

参 考 文 献

- [1] Lin Y H, Tseng S H, Chen Y H. The experimental study on maneuvering derivatives of a submerged body SUBOFF by implementing the planar motion mechanism tests[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 170:120 – 135.
- [2] Lee S K, Joung T H, Cheon S J, et al. Evaluation of the added mass for a spheroid-type unmanned underwater vehicle by vertical planar motion mechanism test[J]. *International Journal of Naval Architecture & Ocean Engineering*, 2011, 3(3):174 – 180.
- [3] Korotkin A I. Added masses of ship structures[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2009:83 – 85.
- [4] Blevins R D. Formulas for natural frequency and mode shape [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 67(5):407 – 408.
- [5] Lamb H S. Hydrodynamics[M]. 6th Edition. New York: Cambridge University Press, 1945:152 – 155.
- [6] Hess J L, Smith A M O. Calculation of potential flow about arbitrary bodies[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 1967, 8:1 – 138.
- [7] Ghassemi H, Yari E. The added mass coefficient computation of sphere, ellipsoid and marine propellers using Boundary Element Method[J]. *Polish Maritime Research*, 2011, 18(1):17 – 26.
- [8] Yari E, Ghassemi H. Boundary element method applied to added mass coefficient calculation of the skewed marine propellers[J]. *Polish Maritime Research*, 2016, 23(2):1607 – 1617.
- [9] Eng Y H, Chin C S, Lau W S. Added mass computation for control of an open-frame remotely-operated vehicle: Application using Wamit and MATLAB[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2014, 22(4):405 – 416.
- [10] Lin Z L, Liao S J. Calculation of added mass coefficients of 3D complicated underwater bodies by FMBEM[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011, 16(1):187 – 194.
- [11] Malik S A, Guang P, Yanan L. Numerical simulations for the prediction of wave forces on underwater vehicle using 3D panel method code[J]. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2013, 5(21):5012 – 5021.
- [12] Chen C W, Yan N M. Prediction of added mass for an autonomous underwater vehicle moving near sea bottom using panel method[C]//4th International Conference on Information Science & Control Engineering, 2017:1094 – 1098.
- [13] 王波. 微小型水下机器人运动仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [14] Yang L, Cao J J, Cao J L, et al. Hydrodynamic and vertical motion analysis of an underwater glider[C]//IEEE OCEANS, 2016:1 – 6.
- [15] Moelyadi M A, Riswandi B. CFD based added mass prediction in cruise condition of underwater vehicle dynamic[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2018, 1005(1):012011.
- [16] Raza N, Mehmood I, Rafiuddin H, et al. Numerical simulation of added mass determination of standard ellipsoids [C]//9th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology, 2012:270 – 273.
- [17] 姚保太, 康宁, 郑伟奇. 变加速运动圆球附加质量和阻力仿真分析[J]. *计算机辅助工程*, 2014, 23(3):82 – 87.
- [18] 施生达. 潜艇操纵性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995:22 – 23.
- [19] Hayati A N, Hashemi S M, Shams M. A study on the behind-hull performance of marine propellers astern autonomous underwater vehicles at diverse angles of attack [J]. *Ocean Engineering*, 2013, 59:152 – 163.
- [20] Pan Y C, Zhang H X, Zhou Q D. Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2012, 24(6):840 – 847.
- [21] 于宪钊. 微小型水下机器人水动力性能计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [22] 华小见. 近水面航行的欠驱动水下航行器水动力性能研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [23] 余飞翔. 自主式水下机器人动力学建模及水动力性能分析[D]. 杭州: 中国计量大学, 2018.
- [24] 何广华, 刘双, 张志刚, 等. 附体对潜艇兴波尾迹的影响分析[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(10):56 – 62.
- [25] 王福军. 计算流体力学分析: CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004:202 – 204.
- [26] 庞永杰, 王亚兴, 杨卓懿, 等. Myring 型回转体直航阻力计算及艇型优化[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2014, 35(9):1093 – 1098.
- [27] Groves N C, Huang T, Chang M S. Geometric characteristics of DARPA SUBOFF models: (DTRC Model Numbers 5470 and 5471) [EB/OL]. [2021-03-21]. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA210642.pdf>.