

基于 CFD 计算水下机器人水动力导数

漆小舟, 万德成*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室
高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

*通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要: 良好的操纵性能, 对于水下机器人能够顺利高效得执行任务, 至关重要。因此研究 ARV 的操纵性能具有重要意义, 其中水动力导数的计算则是关键。目前, 计算水动力导数最流行的方法是船模实验法, 但需要复杂的实验设备, 成本高、耗费大量时间。而采用数值模拟方法计算水动力导数就克服了上述缺点。本研究采用基于开源 CFD 工具包 OpenFOAM 开发的水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU^[1], 对万米水下机器人 (ARV) 在不同漂角和攻角工况下, 进行了数值斜航实验。通过数值计算得到了作用在 ARV 上的水动力和力矩, 从而根据操纵性数学模型 (MMG) 得到相应的水动力导数值, 从而可以根据运动方程, 进行运动仿真模拟。对 ARV 进行数值模拟能够高效快速地计算 ARV 的水动力导数, 进而对 ARV 的操纵性能进行预报, 指导水下机器人的设计。

关键字: 水动力导数求解; 操纵性数学模型 (MMG); naoe-FOAM-SJTU 求解器

1 引言

进入 21 世纪, 伴随着陆上资源不断开产殆尽, 人类面临着更加严峻的资源紧缺问题, 而地球上广阔的海洋蕴含着丰富的矿产、鱼类、能量资源。因此世界各国都无不重视海洋的战略地位, 加大对海洋研究与开发的投入。其中水下机器人由于在军事与科研方面有重要应用, 引起广泛关注。水下机器人具有以下特点: 体积小, 航行阻力低, 噪声小, 突击能力强, 良好的隐身性, 成本低, 可批量生产。微型水下机器人的水动力性能预报对将来操纵性能的研究与建立运动仿真系统, 具有重要意义。本文就针对某微型水下机器人 (ARV) 的水动力性能进行研究, 并根据操纵运动方程, 通过线性回归方法, 计算得到水下机器人的水动力导数。

目前, 获得水下机器人水动力导数的方法有理论计算方法、近似计算方法、操纵性试验方法以及近年来发展起来的数值计算方法 (CFD)。

惯性类水动力计算可以采用势流理论,推导出积分方程,然后进行计算空间和积分方程的双重离散。对于机器人来说,计算空间的离散就是在机器人表面划分网格,其结果是得到一系列的四边形曲面。积分方程的求解采用数值解法,即用离散量来代替连续变量,将积分方程转化为线性代数方程求解。这种方法就是所谓的 Hess-Smith 方法。Hess-Smith 方法可以计算单个水下机器人的附加质量,也可以计算两个以上水下机器人在相对运动时的附加质量。但是该方法由于没有考虑流体黏性,所以存在着内在缺陷。

近似估算是在已有简单几何体理论公式基础上,根据具体计算所用的复杂模型,做出相应修正,得到近似的水动力系数。也有的是在大量船模试验结果的基础上整理得出的半经验公式或图谱。近似计算方法假定的前提是:潜水器的水动力系数等于艇体和各附体(舵、翼等)的水动力系数之和,并考虑艇体与各附体的相互影响;其中艇体和各附体分别可用等值椭球体和等值平板的理论计算结果来确定。如果计算模型与母型相近,那么使用近似计算方法可以得到较为可靠的结果,而且计算速度快。但是近似计算方法受制于母型船资料与以往经验。

目前计算水动力系数最为广泛、也是最有效的方法是模型试验,它是目前解决工程实际问题主要手段。操纵性模型试验可分为约束模型试验和自由航模试验,其中约束模型试验主要用于求得水动力导数。约束模型实验有:斜航试验;回转臂试验;平面运动机构试验(PMM)。平面运动机构试验有其特有的优势,可以很好地实现多个运动的叠加,但是同样它也有很多自身的缺点:设备成本高,需要进行重复性工作,对于传感器的灵敏度要求较高,物理试验不能给出船体周围流场的详细结构信息。

近年来伴随着计算流体力学(CFD)在船舶水动力学领域的迅猛发展,使得采用黏性流场模拟复杂船型在操纵运动中的水动力特性成为可能。在很多情况下,数值计算已达到与模型试验相当的精度,数值计算不仅能提供一般的阻力、尾流场等结果,更可贵的是它还能提供更详细的流场信息,特别是如附体周围流场、桨和舵对船体流场的影响,这是模型试验很难得到的信息。目前关于数值分析潜水器操纵性方面的研究有很多,中国科学院沈阳自动化研究所^[2]采用计算流体力学软件 CFX 计算了某型水下机器人的黏性水动力,获得了操纵仿真时使用的全套水动力系数;武汉理工大学^[3]用 FLUENT 软件数值计算了某潜艇在不同漂角下运动的升力系数和表面压力分布,结果与试验及理论计算结果吻合较好,在此基础上,对作操纵运动的潜艇主体和带附体的全艇体,在一定攻角和漂角下的垂向力、俯仰力矩和横向力、纵倾力矩进行计算,取得了工程上较为满意、实用的精度;哈尔滨工程大学黄昆仑等^[4]应用商用软件 FLUENT,选择标准 $k-\epsilon$ 湍流模型及使用标准壁面函数法及利用动网格技术数值模拟计算了椭球体和潜器纯升沉、纯俯仰、纯首摇、纯横荡等运动中的水动力。并使用傅氏分析法计算出潜水器的多种惯性类水动力系数和黏性类水动力系数。根据计算所得,发现关于水动力系数的椭球体计算值与理论值相互吻合。

2 数学模型

2.1 流体控制方程

本研究采用 naoe-FOAM-SJTU 求解器进行数值模拟求解。其控制方程为非定常不可压的 RANS 方程：

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = -\nabla p + (\mu + \mu_t) \nabla^2 \bar{u} \quad (2)$$

其中， ρ 为密度， \bar{u} 为脉动平均速度， p 为压力， μ 为动力黏性系数， μ_t 为湍流黏性系数。

采用 SST $k-\omega$ 湍流模型来实现 RANS 方程的封闭，其中 k 为流体质点的湍动能， ω 为特征耗散率。该湍流模型综合了标准 $k-\omega$ 模型和 $k-\varepsilon$ 模型的优点，能保证在壁面处求解的精确性和可靠性。

求解器采用的是一种 PISO 与 SIMPLE 的耦合算法-PIMPLE 算法来进行解耦。PIMPLE 的基本思想是：将每个时间步长内用 SIMPLE 稳态算法求解（也就是将每个时间步内看成稳态流动），时间步长的步进用 PISO 算法来完成。

2.2 操纵性数学模型

目前研究操纵性的主要方法是通过物理实验或者数值实验得到水动力导数值，然后带入船舶运动数学模型来研究船舶操纵性能。关于船舶运动数学模型主要有两种：一种是整体式水动力模型，是阿勃柯维奇^[5]等提出的简化数学模型，它把包括船体、螺旋桨和舵在内的船舶视为一个不可分割的整体，不考虑他们之间的流体动力干扰，研究船、桨和舵的整体受力情况，相应的数学模型如式（3），但它包括的因素较多，不便于对水动力进行理论计算和组织系列化船模实验；而第二种是分离式水动力模型，把船体、螺旋桨和舵作为三个分离体来表达，分别考虑船体、敞水桨和敞水舵的单独受力情况及其之间的相互干扰。每一部分包括的因素较少，便于进行水动力理论计算和系列化的模型试验。现在应用比较广泛的是 Inoue 等^[6]提出的数学模型，如式（4）。

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_* + X_{vv}v'^2 + X_{rr}r'^2 + X_{vr}vr' \\ Y_vv' + Y_{\alpha_y}\alpha_y' + Y_{\omega}\omega' + Y_{vv}v'^3 + Y_r r' + Y_{vr}vr'^2 + Y_{rv}rv'^2 + Y_{rr}r'^3 \\ N_{\alpha_y}\alpha_y' + N_{\omega}\omega' + N_vN' + N_{vv}v'^3 + N_{vr}vr'^2 + N_r r' + N_{rr}r'^3 + N_{rv}rv'^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_* + X_{vv}v'^2 + X_{rr}r'^2 + X_{vr}v'r' \\ Y_{\alpha_y}\alpha'_y + Y_{\omega}\omega' + Y_vv' + Y_{|v|}v'|v'| + Y_r r' + Y_{|r|}r'|r'| + Y_{|v|r} |v'|r' + Y_{|v|}v'|r'| \\ N_{\alpha_y}\alpha'_y + N_{\omega}\omega' + N_vv' + N_{|v|}v'|v'| + N_r r' + N_{|r|}r'|r'| + N_{|v|r} |v'|r' + N_{|v|}v'|r'| \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中， r 代表漂角， ω 代表 \dot{r} 即角加速度， α_y 代表 \dot{v} 即 y 方向的线加速度，即 X' 、 Y' 、 N' 分别为船舶所受到的无因次化水动力和水动力矩，其余则代表各种无因次化水动力导数，包括位置导数、加速度导数以及高阶混合导数等。

3 计算模型和网格划分

3.1 计算模型

本文的 ARV 模型由双体、底盘、立柱、光纤包组成，ARV 的三维模型见图一。环境条件设置为：4℃条件下海水；密度 1027.77kg/m^3 ；运动黏性系数为 $1.61\text{e-}6\text{ m}^2/\text{s}$ 。

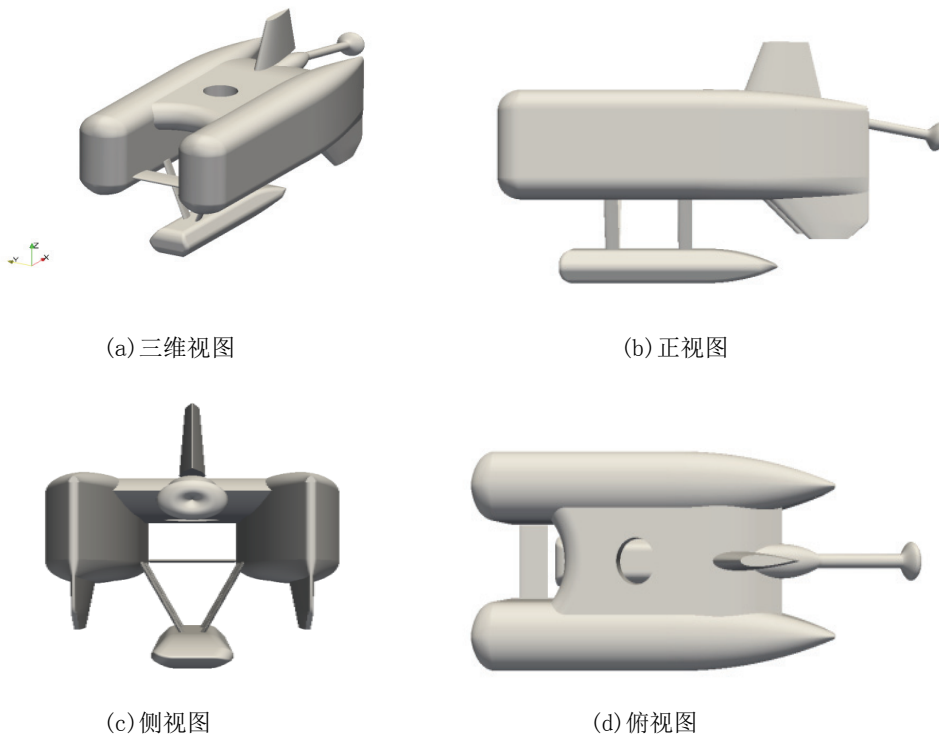


图 1 ARV 三维模型

3.2 计算域和网格划分

计算分为两套网格，一个是 ARV 周围网格；另外一个则是背景网格。计算网格由 OpenFOAM 自带的网格生成工具 SnappyHexMesh 生成。为了提高计算精度，捕捉模型附近的流场相关参数的变化情况，模型壁面附近处的网格进行了适当加密，两套网格在船体周围的局部分布如图 2 所示。

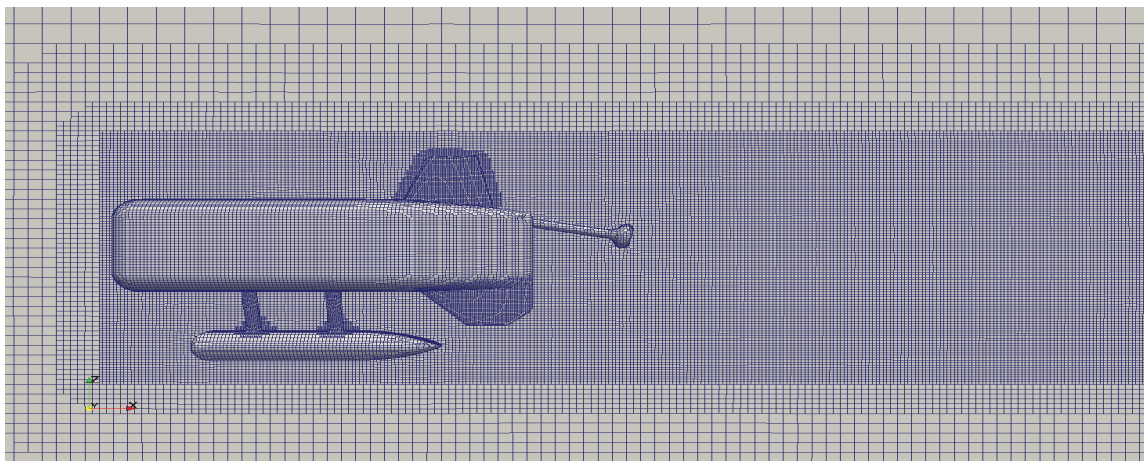


图 2 ARV 周围网格分布

3.3 网格收敛性验证

本研究中所有工况下采用同一套网格，为减少计算量和分析计算结果的不确定性，本文对该网格进行网格收敛性的验证。所采用的方法为 ITTC 推荐的不确定性分析中关于网格收敛性的建议，这里采用 3 套不同的网格，网格缩放的比例为 $\sqrt{2}$ 。为了节省计算时间，我们仅选取单体模型进行网格收敛验证，网格收敛性的验证结果如表 1。

表 1 网格收敛性验证

计算网格量	总阻力 R_t /N	
	U=0.7716m/s	U=1.5432m/s
18W	14.90	53.65
48W	11.285	39.78
128W	10.94	38.15

从表 1 中可以看出，随着网格量的增大，模型受到的总阻力有收敛趋势，但是考虑到计算效率，最终选择 48W 的中等网格量级的背景网格布置，加密方式一样。

4 计算工况及数值结果分析

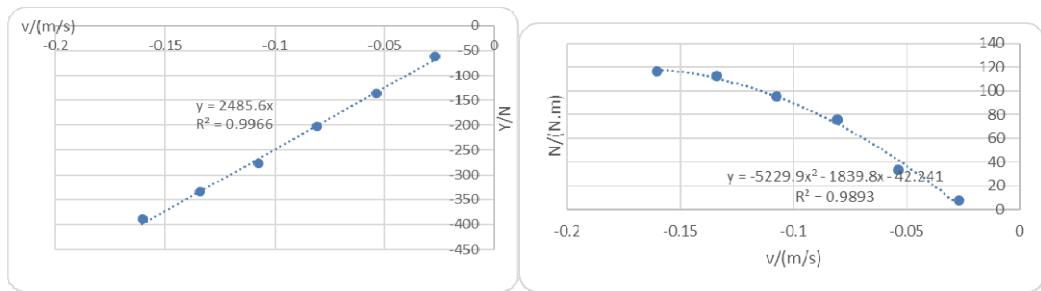
4.1 计算工况

由船舶运动数学模型可知，每一个水动力导数，都有明确的物理意义，它表示船舶在匀速直线运动时，保持其他一切参数不变，只把某个运动参数改变单位值时所引起的作用于船舶的水动力（或力矩）分量的变化量。当船舶在小漂角下斜航时，可以认为，这时相当于在船舶以速度 u 沿 x 轴方向匀速直线运动上叠加一侧向扰动速度 v ，改变漂角，可得不同的侧向速度，做出侧向力和力矩关于 v 的曲线图，则在原点切线的斜率就是相应的位置导数 Y_v ， N_v 。

数值模拟斜航试验时采用同直航阻力试验相同的参数设置。本文中，以来流速度为 0.7716m/s ，漂角选择以每隔 2° 设置，从 2° 至 12° ；攻角以每隔 2° 设置，从 -12° 至 12° 分别依次计算了模型的水动力导数。

4.2 水平面斜航

为了得到不同计算工况，采用的方法是将 ARV 模型固定不动，改变来流与 X 轴夹角，来得到相应的漂角，这样的好处在于不需要旋转计算模型，从而避免在每个漂角下重新生成网格，最终得到机器人所受横向力 Y 和垂向力矩 N 与横向速度 v 的关系绘制成曲线如下所示：



(a) 横向力 Y 与横向速度 v 曲线图

(b) 横向力矩 N 与横向速度 v 曲线图

图 3 机器人所受水动力与速度关系曲线

根据回归分析处理计算所得结果，并无因次化得到无因次化水动力系数（表 2）。

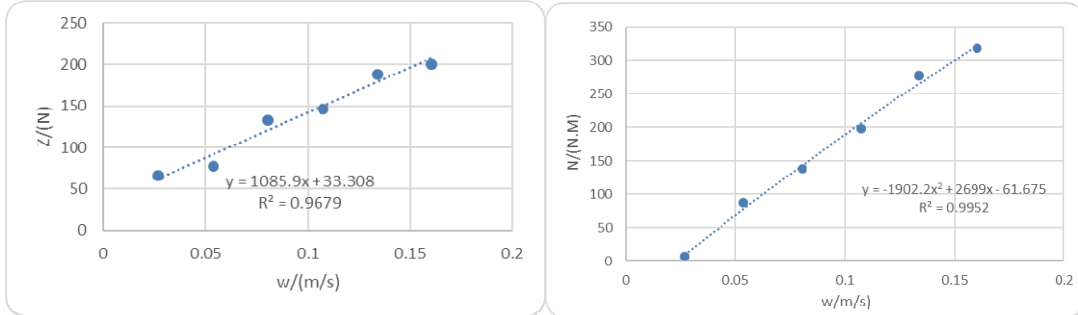
表 2 不同漂角下斜航时所得水动力系数

Y_v'	$N_{v v}'$	N_v'
0.270946	0.091452	0.041672

4.3 垂直斜航

由于整个机器人上下并无对称关系，以正负攻角斜航时应分开分析。将计算所得机器人所受垂向力 Z 和横向力矩 N 与垂向速度 w 的关系绘制成曲线如下所示：

4.3.1 机器人前端朝上倾斜



(a)垂向力 Z 与垂向速度 w 关系曲线

(b)横向力矩 N 与垂向速度 w 关系曲线

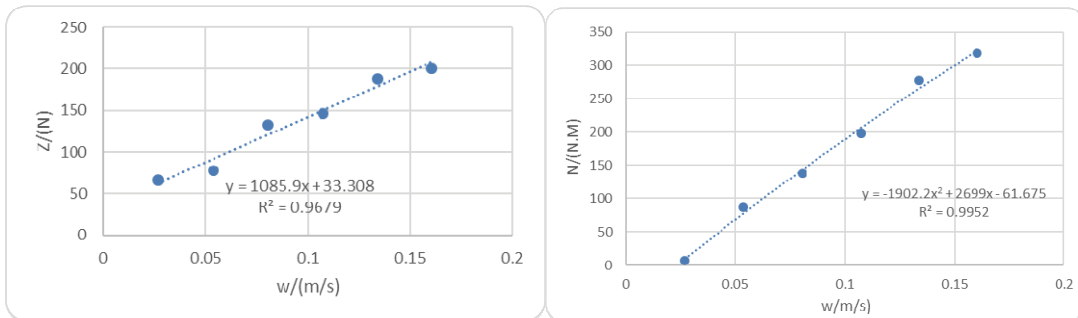
图 4 机器人所受水动力与速度关系曲线

根据回归分析处理计算所得结果，并无因次化得到无因次化水动力系数（表 3）。

表 3 不同攻角下斜航时所得水动力系数

Z_w'	$N_{w w}'$	N_w'
0.11837	0.033263	0.061166

4.3.2 机器人前端朝下倾斜



(a)垂向力 Z 与垂向速度 w 关系曲线

(b)横向力矩 N 与垂向速度 w 关系曲线

图 5 机器人所受水动力与速度关系曲线

根据回归分析处理计算所得结果，并无因次化得到无因次化水动力系数，见表 4。

表 4 不同攻角下斜航时所得水动力系数

Z_w'	$N_{w w}'$	N_w'
0.197814	0.147873	0.074779

以上水动力系数无因次化方式如下：

$$Y'_v = \frac{Y_v}{0.5\rho L^2 U} \quad N'_{v|v|} = \frac{N_{v|v|}}{0.5\rho L^3} \quad N'_v = \frac{N_v}{0.5\rho L^3 U}$$

(5)

$$Z'_w = \frac{Z_w}{0.5\rho L^2 U} \quad N'_{w|w|} = \frac{N_{w|w|}}{0.5\rho L^3} \quad N'_w = \frac{N_w}{0.5\rho L^3 U}$$

(6)

其中 U 为航速, 0.7716m/s ; ρ 为海水密度, 1027.77kg/m^3 ; L 为模型的纵向长度, 4.81m 。

5 结论

基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器对某万米水下机器人在不同漂角与攻角工况下,进行了数值斜航模拟,计算得到了水动力系数。本研究对计算所用的网格进行了收敛性验证,通过三套不同网格计算同一模型,验证了当前网格的可靠性。给出了 $U=0.7716\text{m/s}$ 下,不同漂角和攻角下水下机器人所受的力和力矩曲线。根据 MMG 操纵性数学模型,通过回归方法,得到了相应的水动力导数值。当我们得到了全套水动力导数以后,我们可以依据船舶运动方程进行数值仿真,来进一步研究水下机器人的操纵性能,包括反映水下机器人回转性能的回转直径 D ,以及 K 、 T 指数等。接下来的工作是进行包括纯横荡、纯摇艏等在内的数值模拟,得到数值仿真所需要的所有水动力导数。然后,进行水下机器人的数值仿真模拟,研究相关因素对水下机器人的操纵性能的影响,进而指导水下机器人设计工作。

致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099),上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022),上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300),上海市船舶工程重点实验室基金项目(K2015-11),以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)的资助。在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 1 Shen, Z. R., Zhao, W. W., Wang, J. H. and Wan, D. C. "Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU." Technical Report for Solver Manual, Shanghai Jiao Tong University. 2014.
- 2 胡志强, 林扬, 谷海涛. 水下机器人粘性类水动力数值计算方法研究[J]. 机器人, 2007(02): 145-150.
- 3 林小平, 刘祖源, 程细得. 操纵运动潜艇水动力计算研究[J]. 船海工程, 2006(03): 12-15.

- 4 黄昆仑,庞永杰,苏玉民,朱军. 潜器线性水动力系数计算方法研究[J]. 船舶力学,2008,(05):697-703.
- 5 ABKOWITZ M A, LIU G. Measurement of ship resistance, powering and maneuvering coefficients from simple trials during a regular voyage[J]. Transaction Society of Naval Architects and Marine Engineers,1988, 96: 97-128.
- 6 INOUE S, HIRANO M. A practical calculation method of ship maneuvering motion[J]. International Ship building Progress, 1981, 28(325): 207-222.
- 7 王建华,万德成. 基于重叠网格技术数值模拟船舶纯摇首运动[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2016,(05):567-574.

Calculation on hydrodynamic derivatives of Underwater Vehicle based on CFD

QI Xiao-zhou, WAN De-cheng*

(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

*Corresponding author: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstract: Having a good maneuverability is essential to Underwater Vehicle for carrying out assignment efficiently. So it is significant to study the maneuverability of Underwater Vehicle. The calculation of the hydrodynamic derivatives is the key. At present, the most popular method to calculate the hydrodynamic derivatives is ship model experiment. But it needs complex equipment and costs lots of money and time. Adopting numerical simulation method to calculate the hydrodynamic derivatives can overcome these disadvantages. In this paper, the numerical simulation of the underwater vehicle (ARV) at different drift and attack angles is carried out by using in-house solver naoe-FOAM-SJTU to predict the hydrodynamic derivatives. We can get the hydrodynamic forces and moments acting on the hull through numerical calculation. According to the MMG mathematical model, the hydrodynamic derivatives are obtained, then we can carry out kinetic simulation of underwater vehicle. We come to a conclusion that we can calculate the hydrodynamic derivatives of ARV by numerical simulation method efficiently, which can make us predicting the maneuverability of Underwater Vehicle and guide us to design ARV.

Key words: MMG; Maneuverability; Underwater Vehicle; naoe-FOAM-SJTU solver