

复杂构型潜器附加质量的研究

李刚, 段文洋, 郭志彬

(哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 哈尔滨 150001, ligang1@hrbeu.edu.cn)

摘要: 为了研究粘性和涡动对水下物体附加质量的影响, 尤其是低雷诺数流动、复杂构型物体和强涡动情况下的影响, 分别针对球体、椭球体和某型深潜器的附加质量采用数值和实验的方法进行了测定. 数值方法采用了包括基于粘流和无粘流的 CFD 求解器及基于势流的 Hess-Smith 面元法 3 种途径, 实验方法为常规船模约束实验, 数值方法和实验都得到了物体的附加质量, 并进行对比分析. 提出了一种利用 Fluent 标准 $k-\epsilon$ 模型及动网格的考虑粘性和涡动的附加质量计算方法. 结果表明, 粘性和涡动对简单物体附加质量的影响非常小, 即使是面元法也已非常准确; 而粘性和涡动对复杂构型物体的附加质量的影响可达到 9%, 数值方法只有在粘性流模型下才能得到可靠的结论. 该研究对潜水器的水动力设计具有重要的指导意义.

关键词: 复杂构型潜器; 附加质量; 粘性和涡动; 潜水器水动力.

中图分类号: TB126; U661

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)07-1145-04

Added mass of submerged vehicles with complex shape

LI Gang, DUAN Wen-yang, GUO Zhi-bin

(College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China, ligang1@hrbeu.edu.cn)

Abstract: In order to reflect the effect of viscousness and vortex on added mass of submerged vehicles, especially these with complex shape in low Reynolds flow and strong vortex, the measurement on added mass of vehicles with sphere, ellipsoid and complex shapes was carried out by numerical simulation and model test. Programs in numerical simulation include viscous and non-viscous fluent CFD solvers and potential Hess-Smith procedure. After simulation a series of experiments was carried out in towing tank. By comparing the results from simulation and experiments, it is found that for simple shape bodies, the viscousness and vortex have little effects on added mass, and each numerical simulation program does the work even based on potential flow. While for vehicles with complex shape, their effects are large and up to 9%, only viscous solver results are relative to model test results. These conclusions are useful in hydrodynamic design of submerged vehicles.

Key words: submerged vehicles with complex shape; added mass; viscousness and vortex; hydrodynamics of submerged vehicle

深潜器是海洋考察和开发的重要工具, 其体型比较复杂, 它要求在水中完成停悬、横向平移、原地回转、纵摇、滚转以及水下对接等特殊操作任务, 因此, 正常工作时必须具有更为优秀的操纵性能和控制精度. 随着国内外对深潜器的研究不断展开和深入^[1-4], 对潜器的操纵性预报的要求变得更高, 而操纵预报的惯性类水动力可由附加

质量进行推算, 国内外在数值计算潜器附加质量和水动力方面已经做了大量的研究工作^[5-12], 但针对复杂线型潜器附加质量的数值计算方法和复杂绕流场中粘性和涡动对附加质量的影响却很少见到. 目前, 附加质量可以通过数值方法或实验获得, 实验方法复杂、耗时, 特别当物体尺寸较大或线型复杂时, 就会给实验带来巨大的困难; 数值方法可采用基于势流理论的面元法, 该方法忽略了粘性和涡, 也可以采用 CFD 粘性求解器进行计算, 如 Fluent 和 CFX, 该方法可同时考虑粘性和涡. 上海交通大学马焯^[13]提出了一种利用 Fluent

收稿日期: 2009-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50779008).

作者简介: 李刚(1977—), 男, 博士研究生;

段文洋(1967—), 男, 教授, 博士生导师.

求解器测定物体附加质量的方法,作者只针对简单物体进行了计算,该方法对于简单物体的结果和理论值吻合良好,而对于复杂线性物体,该方法是否适用却没有进行验证,文中作者假定流体为理想流体,忽略了粘性的影响,势必对解算的精度造成影响.武汉大学黄社华^[14]利用涡量分析的方法,证明了在任意雷诺数并忽略粘性成分情况下,颗粒在粘性和理想流体中的附加质量具有相同的形式,作者将附加质量定义为与粘性成分无关的物体“质量”的改变.这些研究方法和成果对于复杂线型物体引起的流场是否适用,以及粘性和涡动对于附加质量的影响到底有多大均未有结论.

本文针对不同的水下物体进行流场的模拟计算和物理模型试验,进而推算附加质量,分析粘性和涡动对附加质量的影响.

1 利用 Fluent 求解器数值模拟及附加质量的获得方法

利用 Fluent 求解器计算物体附加质量时,使用动网格技术使物体在一静止的流场中非正常运动,得到物体运动方向上的受力曲线,经过换算就可以得到物体的附加质量,下面给出利用 Fluent 求解器计算附加质量的方法.

1.1 Fluent 求解器模拟的流场控制方程

利用标准 $k - \varepsilon$ 模型和无粘模型两种计算模型求解物体的附加质量, $k - \varepsilon$ 模型具备数值稳定性好和求解压力梯度精确等优点,是目前粘性水动力求解应用最广泛的湍流模型.

不可压缩流动满足连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0. \tag{1}$$

无粘流动 (Inviscid 模型) i 方向应该满足的动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho} F_i.$$

其中: g_i 和 F_i 为 i 方向的重力体积力和其他体积力, p 为静压. 粘性流动 (标准 $k - \varepsilon$ 模型) 满足的动量方程 (粘性时均 N - S 方程) 为

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i \cdot u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(v \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i.$$

其中: v 为运动粘度系数, 湍动能方程和耗散率方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k,$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon.$$

其中: G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项, G_b 是由浮力引起的湍动能 k 产生项, Y_M 代表可压湍动中脉动扩散的贡献, $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ 为经验常数, σ_ε 和 σ_k 分别是湍动能 k 和耗散率 ε 对应的 Prandtl 数, S_k 和 S_ε 是用户定义的源项.

1.2 附加质量的获得方法

设物体在流场中按某一自由度强迫运动方程为

$$x = A \sin(\omega t).$$

则物体运动速度和加速度分别为

$$\dot{x} = A \omega \cos(\omega t),$$

$$\ddot{x} = -A \omega^2 \sin(\omega t).$$

其中: x, \dot{x}, \ddot{x} 分别表示物体位移、速度和加速度, A 为运动振幅, ω 为频率. 则物体受力 F 可表达为

$$F_A \sin(\omega t + \varepsilon) = - \frac{F_A \cos(\varepsilon)}{A \omega^2} \ddot{x} + \frac{F_A \sin(\varepsilon)}{A \omega} \dot{x}.$$

其中: $F_A \sin(\varepsilon)/(A \omega)$ 为阻尼项, 与加速度无关; $-F_A \cos(\varepsilon)/(A \omega^2)$ 为惯性水动力, 与速度无关, 其大小与附加质量只差一个正负号, 则附加质量可表达如下:

$$m' = \frac{F_A \cos(\varepsilon)}{A \omega^2}. \tag{2}$$

式中: A 和 ω 已知, 可得到物体的附加质量 m' . F_A 为物体受力幅值, 可通过 Fluent 求解器给出, ε 为物体受力曲线与运动曲线的相位差.

2 球体和椭球附加质量的数值计算

球体和椭球体的附加质量有理论解析值, 也有比较可靠的试验资料. 因此采用 Fluent 粘流和无粘计算模型对球体和椭球体的附加质量进行了模拟计算, 以验证此方法的可靠性.

2.1 球体附加质量的数值结果

使用 Fluent 软件的动网格技术针对球体 (直径 $D = 1 \text{ m}$, 网格数 32 112, 球面网格数 1 600) 在无粘和湍流模型流场域内作小幅振荡运动, 运动方程为式 (1), 此时利用公式 (2) 可得到球体的附加质量值. 按照势流理论利用 Hess-Smith 方法计算球体的附加质量为 2 068. 135 (球体表面划分 1 600 个四边形和三角形单元). 3 种计算途径的结果如表 1 所示.

表 1 球体的附加质量结果

计算方法	附加质量	理论值	误差	相对误差/%
无粘流	2 063. 4	2 094. 3	30. 9	0. 014 4
粘流	2 061. 4	2 094. 3	32. 9	0. 015 7
Hess-Smith	2 068. 1	2 094. 3	26. 2	0. 012 5

表1中对球体附加质量的计算结果均和理论值吻合良好,误差较小,这说明两种方法计算球体的附加质量均具有较高精度,粘性和无粘区别不大。

2.2 椭球体附加质量的数值结果

采用与计算球体附加质量相同的方法,计算出了椭球体(长轴 $a = 10$ m,短轴 $b = c = 2.667$ m,共划分网格 242 311)的附加质量 $M_{11}, M_{22}, M_{33}, M_{55}, M_{66}$ 。由于对称性可知: $M_{22} = M_{33}, M_{55} = M_{66}$ 。

表2中的椭球体附加质量计算值与解析值近似相等,说明这3种方法计算物体附加质量均具有较高精度。而 Hess-Smith 法在计算 M_{55}, M_{66} 时与理论值差距较大。

表2 椭球体的附加质量

附加质量	M_{11}	M_{22}	M_{33}	M_{44}	M_{55}	M_{66}
理论值	32.8	302.8	302.8	-	4 378	4 378
无粘	32.2	300.3	300.3	-	4 376	4 376
粘流	32.3	299.8	299.8	-	4 393	4 393
Hess-Smith	33.1	301.0	301.0	-	4 665	4 665

利用 Fluent 对球体和椭球体附加质量的模拟计算表明,利用 Fluent 测定简单物体的附加质量是可行的,粘性对附加质量的影响可以忽略不计,这为潜艇等线型相对简单的物体的附加质量的数值计算提供了一种手段,这种手段已经在潜艇上进行了使用^[14],但此方法是否也适用于复杂线型物体及此方法是否能反映附加质量中粘性的影响呢?下面就以一复杂线型物体为例验证该方法的可行性。

3 载人潜器附加质量的数值计算

3.1 计算模型的建立

某载人深潜器按照缩尺比缩小后,主尺度变为:长 1.57 m,宽 0.412 m,高 0.485 m,下挂电池仓围裙等附体共 10 个,由 Gambit 建立的几何模型如图 1 所示。

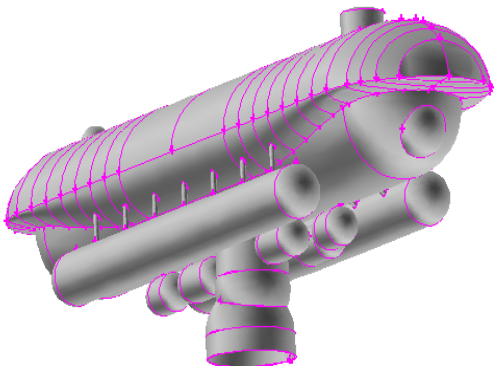


图1 载人深潜器示意图

几何建模:迎流方向取 L 长(L 为潜器特征长度),通过观察设计流速下的尾流场和出流断面

流速分布和湍动强度,发现其后取 $1.5L$ 比较合适,该处流速分布均匀,流场稳定,上下左右边界距潜器距离取为 $0.7L$,并设定为循环边界。

网格生成:潜器表面使用三角形或三角形与四边形混合非结构网格,流体计算域内使用四面体与六面体混合非结构网格,这样可适应所有的复杂线型,而不用过分担心网格质量。由于潜器形状非常复杂,划分网格困难,所以把面积和曲率较大的曲面分割成若干个小曲面,潜器表面共分成 238 个曲面。在曲面相接的地方,先生成面积较小曲面的网格,再生成面积较大曲面的网格。共划分 478 293 个计算单元,网格划分如图 2 所示。

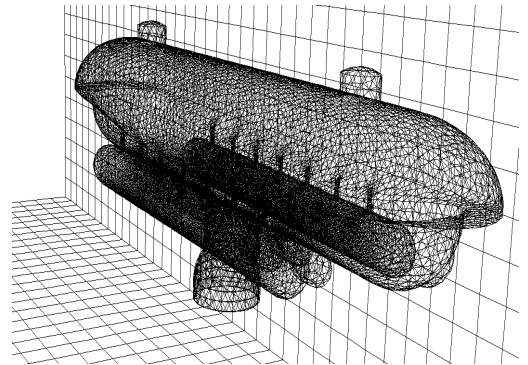


图2 网格划分示意图

网格质量基本上决定了动网格的成败。依据物体瞬时速度及网格的尺寸,选取合适的时间步长,以一个时间步长内物体运动不超过一个网格尺寸为宜,初始计算应尽量使时间步长小些,逐渐放大时间步长,Fluent 求解器就能稳定工作。根据经验,每时间步长内迭代计算不宜小于 100 次^[15],可同时采用网格重构和弹性光顺两种网格调整方法。

边界条件:入口为速度入口;出口为自由出流 outflow;为模拟无限大流场,在几何模型上下左右 4 个面设置循环边界条件;入口流速按设计航速给定为 1.8 m/s,湍动能按照公式估算为 0.004,耗散率估算为 $0.000\ 38$ ^[16];潜器物面采用标准壁面函数法,设定为无滑移边界。其他设置与计算球体和椭球体附加质量方法一致。模拟计算中采用了标准 $k-\varepsilon$ 粘流模型和无粘模型两种计算模型。

3.2 数值方法与实验结果的对比分析

数值方法与实验结果的对比见表 3,可以看出,标准 $k-\varepsilon$ 有粘模型和无粘模型的结果存在一定差异,采用标准 $k-\varepsilon$ 粘性模型的每一项计算结果比采用无粘模型的计算值要大。根据 Hess-Smith 方法编写程序,该程序能够计算物体在不考虑粘性条件下的附加质量。首先使用 Gambit 软件对该穿梭救生潜器表面进行网格划

分,共划分面网格25 421个,输出每个网格的所有坐标点.导入面元法程序中计算出的该穿梭救生潜器的附加质量.该潜器左右对称,前后对称,根据势流理论^[17]可知 $M_{ij} = M_{ji}(i \neq j)$,所以有 $M_{13} = M_{31}, M_{15} = M_{51}, M_{24} = M_{42}, M_{26} = M_{62}, M_{35} = M_{53}, M_{46} = M_{64}$ 等结论,这些值均为小量,忽略不计.该型载人深潜器操纵性实验已完成,约束船模试验得到的各项水动力导数与附加质量的关

系为 $M_{11} = -X_u, M_{22} = -Y_v, M_{33} = -Z_w, M_{44} = -M_p, M_{55} = -M_q, M_{66} = -N_r$,因此该潜器的附加质量经整理见表4.

表3 Fluent 计算载人深潜器附加质量的结果

模型	M_{11}	M_{22}	M_{33}	M_{44}	M_{55}	M_{66}
粘性	0.012 7	0.103 4	0.084 7	0.000 4	0.007 0	0.012 0
无粘	0.010 6	0.091 8	0.070 2	0.000 3	0.006 0	0.011 0

表4 3种方法计算的结果

计算方法	M_{11}	M_{22}	M_{33}	M_{44}	M_{55}	M_{66}
Hess-Smith	0.010 219	0.983 441	0.081 410	0.000 364	0.006 982	0.011 311
粘流模型	0.012 758	0.103 414	0.084 761	0.000 426	0.007 928	0.012 487
无粘模型	0.010 641	0.091 812	0.070 215	0.000 343	0.006 937	0.011 022
船模试验		0.105 834	0.088 817		0.007 665	0.012 371

由表4可见,使用标准 $k-\varepsilon$ 模型的结果与实验值吻合良好,而采用无粘模型及势流理论的Hess-Smith方法的结果比实验结果要小9%左右,因此考虑了粘性的湍流模型更为适合复杂构型潜器的附加质量计算.

4 结 论

1) Fluent 有粘无粘及 Hess-Smith 方法对于简单线型物体附加质量的计算都很准确,粘性和涡动的影响甚微.

2) 对于复杂线型物体, Hess-Smith 面元法程序和 Fluent 无粘模型得到的附加质量和试验值相差约9%, Fluent 粘性模型的计算结果和试验值非常接近,这是由于粘性影响和复杂的涡动造成了结果之间的差别,粘性和涡动对于复杂线型物体附加质量的计算不可忽略,这对复杂构型潜水器和多体潜水器的水动力设计具有重要的指导意义.

3) 本文同时提供了一种利用 Fluent 标准 $k-\varepsilon$ 模型及动网格来获得附加质量的方法,通过和物理模型实验结果的对比分析,验证了这种方法在计算复杂线型物体附加质量上的可行性.

参 考 文 献:

[1] 崔维成,徐芑南,刘 涛,等.“和谐”号载人深潜器的研制[J]. 舰船科学技术,2008,30(1):17-25.
 [2] 陈建平. 发展我国载人深潜器的几点思考[J]. 机器人技术与应用,2001(2):33-36.
 [3] 窦光宇. 深潜器载人探龙宫[J]. 海洋世界,2002(9):21-22.
 [4] 沈明学,胡 震,刘正元,等. 一种新型潜水器 HROV 及其关键技术综述[J]. 海洋工程,2006,24(3):119-123.

[5] HESS J L. Calculation of potential flow about bodies of revolution having axes perpendicular to the free-stream direction[J]. Journal of the Aerospace Sciences, 1962, 29:726-742.
 [6] HESS J L. A Higher Order Method for 3-D Potential Flow[R]. 1974, AD-A074751.
 [7] 刘 涛. 深海载人潜水器耐压球壳设计特性分析[J]. 船舶力学,2007,11(2):214-220.
 [8] 廖又明. 载人深潜器 HOV 在海洋开发中的运用及现状——海洋考察中的 HOV 特征、用途、能力及作用[J]. 江苏船舶,2002,19(5):38-42.
 [9] SHENG C, TAYLOR L, WHTITFIELD D. Multiblock multigrid solution of three-dimensional incompressible turbulent flows about appended submarine configuration [R]. 1995, AIAA-95-0203.
 [10] DEBARROS E A, PASCOAL A, DESA E. Investigation of a method for predicting AUV derivatives[J]. Ocean Engineering, 2008,35(16):1627-1636.
 [11] PERRAULT D, BOSE N. Sensitivity of AUV added mass coefficients to variations in hull and control plane geometry[J]. Ocean engineering, 2003,30(5):645-671.
 [12] 林超友,朱军. 潜艇近海底航行附加质量数值计算[J]. 船舶工程,2003,25(1):26-29.
 [13] 马 焯,单雪雄. 数值计算复杂外形物体附加质量的新方法[J]. 计算机仿真,2007,24(5):75-78.
 [14] 黄社华,李 炜. 粘性流中刚性颗粒非恒定运动的附加质量[J]. 武汉大学学报,2002,35(4):13-17.
 [15] 黄昆仑,庞永杰,苏玉民,等. 潜器线性水动力系数计算方法研究[J]. 船舶力学,2008,12(5):697-703.
 [16] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004:115-131.
 [17] 戴遗山. 舰船在波浪中运动的频域与时域势流理论[M]. 北京:国防工业出版社,1997:22-25.

(编辑 杨 波)