X 舵操纵的水下航行器水动力性能分析

王广航1吴虹明1,2 王文晋1,2 徐国华1,2* 王一伟3

(1. 华中科技大学 船舶与海洋工程学院, 2. 船舶和海洋水动力湖北省重点实验室,

武汉,430074, Email: <u>hustxu@vip.sina.com</u>) 3. 中国科学院力学研究所,北京,100190)

摘要:本文主要结合华中科技大学船舶与海洋工程学院轮机实验室参考德国 U212A 型 潜艇建造的 X 舵操纵的水下航行器,采用计算流体力学商业软件 FLUENT 进行水动力性能 及操纵性能分析,并讨论了计算域局部网格运动与全局网格运动对计算结果的影响。首先, 进行了不同航速的阻力试验的数值仿真,实现了不同航速的阻力预报,并验证计算方法的 可靠性。然后,针对平面运动机构试验仿真,采用动网格技术求得水动力系数,发现在全 局网格运动方法中不仅能够有效节省仿真时间,同时对仿真数据进行线性拟合的误差也相 对较小,可以作为 X 舵操纵的水下航行器相关操纵性试验仿真中更为合适的仿真方法。

关键词: X 舵水下航行器; 水动力系数

1 引言

在水下航行器的水动力性能及操纵性能诸多影响因素中,水下航行器的尾操纵面结构 扮演者十分重要的角色,故世界各国对其尾舵的设计结构进行了长期坚持不懈的探索,如 X型、十字型、T型及木字型等结构的发展。考虑到十字舵的水平舵与垂直舵分别控制浮 潜与转向,并无耦合关系,故主要的潜艇大国采用十字型尾舵较多。但愈发增加的新型潜 艇更倾向于采用 X型尾舵,使得与潜艇尾舵相关的研究重点放在了十字舵与 X 舵的对比中^[1]。

X 舵较传统十字舵具有诸多的优点及潜能^[2],逐渐被世界各国的海军所接受,诸如瑞 典、挪威及德国等潜艇强国的主战潜艇均采用了 X 舵结构,故 X 舵潜艇也将成为我国未来 新型潜艇的发展方向之一。水动力系数是评估航行器操纵性能的重要指标,通常可由实船 试验、模型试验或近似公式求出^[34]。但考虑到上述方法的高成本及低精度的问题,基于势 流理论或者黏性流计算方法被广泛的应用到求解水动力系数上^[5]。Racine^[6]采用重叠网格方 法模拟了扁平体水下航行器 NNEMO 的平面运动机构试验等,求解了多个水动力系数。 Kim^[7]、Hiroyoshi^[8]及 Ahmad^[9]等模拟平面运动机构试验,与真实水池中的试验结果对比证 明了重叠网格技术数值方法的可靠性。高婷^[10]提出空间拘束运动模拟方法,仅需一次算例 就可求得全部水动力系数,并与平面机构运动试验结果对比验证了该方法的适用性。在水

- 1746 -

下航行器水动力系数求解的研究内容还有很多。

以上诸多研究成果充分说明数值模拟在水下航行器水动力研究的可靠性和广阔应用前 景。本文采用 FLUENT 求解 X 舵航行器的水动力系数,分析其水动力性能,并讨论了计算 域局部网格运动与全局网格运动对计算结果的影响。

2 基本理论与数值方法

2.1 计算模型

本文水下航行器计算模型如图1所示。实体模型是参考德国的U212A等多个典型的潜艇布局后,由华中科技大学船海学院建造,模型主尺寸如表1所示。



图1 X 舵水下航行器计算模型

衣1 计算模型尺度参数				
参数	参数值			
艇长 L(m)	2.96			
艇宽 B(m)	0.38			
艇高 H(m)	0.443			
全排水体积 🕫 (m³)	0.223			
总质量 m(kg)	232			
最大推力 T(N)	75.6			

2.2 控制方程

RANS 方程常被用来求解不可压黏性流体流动中的各种问题,其方程可表达如下:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \overline{u}_i) = 0 \tag{1}$$

- 1747 -

$$\frac{\partial(\rho\overline{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\overline{u}_i\overline{u}_j) = -\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu(\frac{\partial\overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{u}_j}{\partial x_i}) - \rho\overline{u_iu_j})$$
(2)

利用 Boussinesq 涡黏假设,引入涡黏性系数 μ_i ,建立雷诺应力相对于平均速度梯度的关系,即雷诺应力可以表述为:

$$\rho \overline{u_i u_j} = -\mu_i (\nabla U + \nabla^T U)$$
(3)

本文在仿真阻力试验及平面运动机构试验中分别采用了 RNG k-e 模型与 SST k-w模型 来封闭 RANS 方程,方程如下所示。

RNG k-e 模型:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon + S_k$$
(4)

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_{\varepsilon} \mu_{eff} \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_{\varepsilon} + S_{\varepsilon}$$
(5)

SST k-w模型:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \widetilde{G}_k - Y_k + S_k$$
(6)

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\omega u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_{\omega} \frac{\partial\omega}{\partial x_j} \right] + G_{\omega} - Y_{\omega} + D_{\omega} + S_{\omega}$$
(7)

式中, ρ 为密度, 上标 T 表示矩阵转置, ∇ 为哈密顿算子, g_i 为重力加速度, $\rho u_i u_j$ 为雷诺应力项, k 为湍动能, ε 为湍动耗散率, ω 为比耗散率, Γ_k 、 Γ_ω 表示扩散系数, $\widetilde{G_k}$ 和 G_ω 为为湍流产生项, Y_k 及 Y_ω 为湍流耗散项, S_k 和 S_ω 为用户自定义源项, $G_k = -\rho u_i u_j \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ 是平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项。

2.3 边界条件

为了探究不同运动计算域对仿真结果的影响,将计算域划分成两种形式。计算域全局 网格运动(A 方法,图 2 所示)是常见运动形式,即整个计算域 M 均为运动网格区域;局部 网格运动(L 方法,图 3 所示)是通过采用 INTERIOR 将计算域分为 M 与 N 两个区域,其中 将 N 域与航行器均视为刚体,仅 M 区域内网格可以运动,由于默认情况下 INTERIOR 内 外流域是连通的,故可以通过 INTERIOR 实现 M 域与 N 域流场信息交换,除此以外,两

- 1748 -

种方法的其他条件均是相同的。



图 2 A 方法计算域



航行器艏部距入口边界大于 1.5 倍艇长, 艉部距出口 3 倍艇长, 四周距边界大于 1.5 倍 艇长, 两种方法 M 计算域入口及侧面均为速度入口, 航行器表面为无滑移边界, 出口为压 力出口其中 L 方法的 M 与 N 域交界面设置为 INTERIOR。

2.4 求解算法

本文中阻力试验采用 RNG k-e 模型, SIMPLE 算法及标准壁面函数,并对压力与动量 采用二阶离散,其他均为一阶离散格式。平面运动机构试验采用 SST k-ω模型, SIMPLE 算 法,压力项采用 PRESTO!格式,其他均为一阶离散格式。

- 1749 -

3 阻力试验

阻力试验常用来作为检验当前 CFD 算法合理性及阻力预报,全文采用 ICEM 非结构网 格划分,并针对 A、L 两种方法进行了以下 5 种不同网格的仿真,在求解 X 舵航行器阻力 的同时,对其进行网格无关性验证、阻力预报及讨论两种方法对计算结果的影响。仿真结 果如表 2 所示。

方法	网故事		航速			
	門位里	2 Kn	4 Kn	6 Kn	8 Kn	
A方法	133 万	5.080	20.42	45.43	80.74	
	273 万	5.140	20.56	45.50	81.15	
	335 万	5.062	19.98	44.74	78.94	
	400 万	4.991	19.65	43.17	77.44	
	500 万	5.034	19.73	44.69	78.26	
L方法	133 万	5.049	19.97	44.88	79.17	
	273 万	5.041	19.81	44.75	79.53	
	335 万	5.020	19.97	43.53	78.99	
	400 万	4.980	19.87	44.14	78.07	
	500 万	5.012	19.72	44.47	78.94	

表 2 不同航速下的阻力预报的网格无关性验证

观察可知,针对两种方法,在同一航速下,不同网格量的计算结果与对应方法的 500 万网格计算结果相比,误差多数维持在 1%以内,所有误差均维持在 5%以内,且随着计算 网格的增加,同一航速下的阻力值趋于收敛,验证了网格的无关性。而针对两种方法的同 一网格同一航速情况下,误差值均小于 4%,即上述两种方法阻力计算差异并不大。



图 4 8 kn 航速,不同网格量相对 500 万网格量计算值误差百分比的绝对值

图 4 所示为 8kn 航速下,两种方法中不同网格量相对 500 万网格量计算值误差百分比 的绝对值曲线,由图可知,随着网格量的增加,计算结果整体是趋于收敛的过程,考虑到 计算精度与计算时间,两种方法均折中选取了 335 万网格量的计算工况(图 5 和图 6)。以 2kn 航速为例,分析两种方法的压力云图发现,A 方法的压力幅值较大,高压区的压力峰

- 1750 -



图7 A、L方法阻力预报曲线

由式(8)得到了两种方法不同航速下航行器的阻力系数,通过取均值可得,艇体阻力 系数为 *x*, =0.06039。对仿真数据进行样条拟合可得到两种方法下的阻力预报曲线如图 7 所 示,可见随着航速的不断增加过程,两种方法之间的预报误差呈现逐渐减小的趋势,且在 航速 2~8kn 范围内,两种方法预报值最大差异不超过 2%。

- 1751 -

$$X'_{u} = \frac{X}{0.5\rho U^2 S} \tag{8}$$

式中,U、S、X分别为来流速度、垂直来流的最大投影面积及阻力。

4 平面运动机构试验

.

平面运动机构试验(Planar Motion Mechanism test, PMM)是求取水动力系数最多的试验,包括纯横荡运动、纯首摇运动、纯升沉运动及纯俯仰运动。本节采用了动网格技术,结合用户自定义函数(User Defined Functions, UDF)完成 PMM 试验仿真。区别于阻力试验,PMM 试验是一种瞬态模拟,考虑到其四种运动形式具有很大的相似性,故本文对以上所提及的 A 方法、L 方法而言,以纯升沉运动为例,纯升沉运动形式可采用如下数学表达:

$$\zeta = a \sin \omega t$$

$$\theta = \dot{\theta} = 0$$

$$w = \dot{\zeta} = a\omega \cos \omega t$$

$$\dot{w} = -a\omega^{2} \sin \omega t$$
(7)

式中 ζ 为航行器重心垂向位移; *a* 为振荡幅值,取 0.04m; ω 为升沉运动圆频率; 航速 均取 2Kn; θ、 θ 为航行器绕横轴倾斜角度及角速度; w、 w 为垂向速度及加速度。本文计 算的是小振幅的平面运动,故满足线性假设,即在垂直面内有:

$$\begin{cases} Z = Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{w}w + Z_{0} \\ M = M_{\dot{w}}\dot{w} + M_{w}w + M_{0} \end{cases}$$

$$\tag{8}$$

无因次化可得:

$$\begin{cases} Z' = \frac{-aw^2L}{V^2} Z_{w}' \sin \omega t + \frac{aw}{V} Z_{w}' \cos \omega t + Z_{0}' \\ M' = \frac{-aw^2L}{V^2} M_{w}' \sin \omega t + \frac{aw}{V} M_{w}' \cos \omega t + M_{0}' \end{cases}$$
(9)

通过求解每种频率下航行器的垂向力与纵倾力矩,结合最小二乘法即可得到不同频率 下的水动力系数,最后采用线性回归对不同频率所得结果进行拟合,进而排除频率的影响。

考虑时间步长独立性的验证,验证结果如表 3 所示,对比发现,对每一种方法而言,3 种时间步长所得的水动力系数误差很小,且随着时间步长的缩短有逐渐趋于收敛的趋势, 验证了时间步长的无关性。本文最终选取了时间步长为 t=0.1s,实验中采用了周期运动频 率从 0.2~0.6Hz,间隔为 0.1Hz。



第三十一届全国水动力学研讨会论文集

以 A 方法为例,采用 CFTOOL 工具对仿真计算离散点进行拟合,图 8 为计算数据稳定时,计算频率为 0.20Hz、0.30Hz 的垂向力系数与纵倾力矩随仿真时间的曲线变化,结合所

学知识,纵倾力矩为垂向力对力矩中心沿航行器纵向长度的积分。由图可知,纵倾力矩系 数峰值对应时间节点恰为垂向力斜率绝对值最大处,观察可知,亦与理论相符合。同理对 于 PMM 的其他 3 种周期运动,对所得计算数据进行拟合后,得到了平面运动机构试验的 水动力系数(表 4)。

	表 4 平面运动机构数值模拟实验结果表 4 平面运动机构数值模拟实验结果				
the table for here and	水动力系数	$Z_{\dot{q}}$	Z_q	$M_{\dot{q}}$	$M_{q}^{'}$
纯俯仰运动	A方法	0.0036	- 0.0015	0.0008	- 0.0170
	L 方法	0.0036	- 0.0014	0.0008	- 0.0169
纯升沉运动	水动力系数	$Z_{\dot{w}}$	Z_w	M_{w}	M_w
	A方法	-0.0205	-0.1256	-0.0005	0.0042
	L 方法	-0.0204	-0.1217	-0.0005	0.0049
纯横荡运动	水动力系数	Y	Y _v '	$N_{\dot{v}}$	N_{v}
	A方法	-0.0337	-0.19	0.0002	-0.0193
	L方法	-0.0337	-0.1903	0.0002	-0.0193
纯首摇运动	水动力系数	Y,'	Y,	Nŗ	N _r '
	A方法	-0.0009	0.0097	0.0009	-0.0215
	L 方法	-0.0009	0.01	0.0009	-0.0216

由表 5 可知,采用 A 方法与 L 方法所得水动力系数计算结果十分接近,计算误差多数 维持在 5%以内,考虑到计算模型表面粗糙、非结构网格质量不高、运动的耦合作用以及非 结构网格在航行器左右两侧不对称分布等导致了两种方法之间的差异。但 A 方法在线性拟 合仿真行数据时较 L 方法具有更高的拟合度,能够更准确的贴合 CFD 仿真结果,流场也是 更加连续,在仿真过程中耗用时间更少。两种方法之间的误差是相对较小的,但 A 方法相 对而言更优一些。最终采取了两种方法水动力系数计算结果的均值。

虽然缺乏真实试验数据比较,但多数水动力系数的正负号是正确的^[11],图9是L方法 流体流动时刻为 40s 时,航行器纯俯仰运动的表面压力分布,此刻来流直接作用在航行器 艏部偏上位置,使得艏部偏上位置压力增加,而艏部偏下位置压力减少,流速增加,压力 分布情况亦与实际相符,可见,采用两种方法在求解水动力系数上是具有一定可行性的。

- 1754 -

v 的時に襲火ホーズ券

~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~					
水动力系数	数值	水动力系数	数值	水动力系数	数值
$X_u$	0.06065	$Z_q$	- 0.00145	$N_{i}$	0.0002
Y,	-0.1902	$M_{\dot{q}}$	0.0008	Y,	-0.0009
$N_{v}$	-0.0193	$M_{q}$	- 0.01695	N,	0.0009
$Z_w$	-0.1237	$Z_{\dot{w}}$	-0.02045	Y,	0.00985
	0.00455	$M_{\dot{w}}$	-0.0005	N _r '	-0.02155
$Z_{\dot{q}}$	0.0036	$Y_{\dot{v}}$	-0.0337		

5 结论

本文采用两种方法实现了不同航速的阻力预报及水动力系数的求解。结果表明,相比 于 L 方法仿真流场部分不连续现象,采用 A 方法能够获得较为连续完整的流场,且仿真时 间相对较短,同时对仿真数据进行线性拟合的拟合方差也相对较小,具有相对较好的结果, 更适合作为 X 舵航行器操纵性试验仿真。

## 参考文献

- 1 焦玉超. 潜艇X舵研究综述[C]. 华中科技大学、武汉理工大学、海军工程大学.第十届武汉地区船舶与海洋工程研究生学术论坛论文集.华中科技大学、武汉理工大学、海军工程大学:武汉地区船舶与海洋工程研究生学术论坛,2017:124-130.
- 2 哈里 杰克逊.美国"大青花鱼"号潜艇对潜艇设计的影响[A].4Th 伦敦国际潜艇会议文集[C], 1993.
- 3 Minnick L.A parametric model for predicting submarine dynamic stability in early stage design[D].Master thesis of the Faculty of Vignia Polytechnic Institute and State Universith, 2006.
- 4 Determination of undersea vehicle hydrodynamic derivatives using the USAF dattom[Z].IEEE, 1993.283-288.
- 5 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.
- 6 RACINE B, PATERSON E. CFD—based method for simulation of marine-vehicle maneuvering [C] //35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. Toronto, Canada, 2013.

- 1755 -

- 7 KIM H, AKIMOTO H, ISLAM H. Estimation of the hydrodynamic derivatives by RaNS simulation of planar motion mechanism test [J]. Ocean engineering, 2015, 108:129-139.
- 8 Hiroyoshi Suzuki, Junki Sakaguchi, Tomoya Inoue, Yoshitaka Watanabe, Hiroshi Yoshida. Evaluation of methods to Estimate Hydrodynamic Force Coefficients of Underwater Vehicle based on CFD[C]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(33).
- 9 Ahmad Hajivand,S. Hossein Mousavizadegan. Virtual simulation of maneuvering captive tests for a surface vessel[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering,2015,7(5).
- 10 高婷,庞永杰,王亚兴,等.水下航行器水动力系数计算方法[J].哈尔滨工程大学学报,2019,40(01):174-180.
- 11 施生达.潜艇操纵性[M].第1版.北京:国防工业出版社.1995:7-8.

# The analysis of hydrodynamic performance for an underwater vehicle equipped with X-shaped rudder

WANG Guang-hang¹, WU Hong-ming^{1,2}, WANG Wen-jin^{1,2}, XU Guo-hua^{1,2*}, WANG Yi-wei³

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering ,Huazhong University of Science and Technology,

2. Hubei Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering Hydrodynamics, Wuhan, 430074.

Email: hustxu@vip.sina.com)

(3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190)

Abstract: By using the commercial software FLUENT, this paper mainly analyzes the hydrodynamic performance and maneuverability of the autonomous underwater vehicle equipped with X-rudder built in the Marine Engineering Laboratory of Huazhong University of Science and Technology by referring to the German U212A submarine, and discusses the influence of local grid motion and global grid motion on the simulation results. Firstly, this paper carries on the numerical simulation of the resistance test, realizing the purpose of predicting the resistance at different speed, and verifies the reliability of the method. Then, aiming at the simulation of planar motion mechanism, the dynamic grid technique is used to obtain the hydrodynamic coefficient, and the influence of local grid motion and global grid motion on the simulation time can be effectively saved by the latter method, but the error of linear fitting of the simulation data is relatively small. To sum up, the global grid motion method can be more suitable in related to the maneuverability test simulation of X-rudder autonomous underwater vehicle.

Key words: X-rudder autonomous underwater vehicle; Hydrodynamic coefficients.