

水下航行器水动力系数计算方法

高婷¹, 庞永杰¹, 王亚兴², 陈庆龙¹

(1.哈尔滨工程大学 水下机器人技术重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150001; 2.中国科学院 沈阳自动化研究所,辽宁 沈阳 110016)

摘要:为了高效地求取水下航行器的水动力系数,本文提出了一种空间拘束运动模拟方法。该方法仅需一次算例就可求得方程中的全部水动力系数,在保证计算精度的同时极大地缩短了计算周期。为了验证该方法的准确性,利用航行器完成了平面机构运动试验并模拟分析该试验的数值。2种计算流体动力学方法得到的水动力系数值接近。说明在设计初期,用空间拘束运动模拟方法代替现有的常规平面拘束运动数值模拟,快速求得设计艇型的水动力系数是可行的。此外,该方法的计算结果与水池试验数据的误差较小,进一步表明该方法的可行性。

关键词:水动力系数; 水下航行器; 空间拘束运动; 操纵性; 计算流体力学; 平面运动机构; 水动力试验; 高效

DOI: 10.11990/jheu.201709100

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1390.u.20180710.0933.004.html>

中图分类号: U661.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2019)01-0174-07

Calculation method of hydrodynamic coefficients for underwater vehicles

GAO Ting¹, PANG Yongjie¹, WANG Yaxing², CHEN Qinglong¹

(1.State Key Laboratory of Science and Technology on Autonomous Underwater Vehicle, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2.Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: This paper proposes an approach for simulating spatial captive motion to increase the efficiency for estimating hydrodynamic coefficients of underwater vehicles. Instead, of the traditional repetitive and time-consuming process, the proposed spatial captive motion method could provide all necessary information for determination of all required coefficients in only one simulation while ensuring the accuracy of the calculation and considerably shortening the cycle. Numerical simulations were carried out based on planar motion mechanism tests for an underwater vehicle to validate the accuracy of the proposed method. The comparison results of two CFD simulation methods are close in the derived hydrodynamic coefficient. Hence, in the early stage of design, hydrodynamic coefficients of the design hull can be quickly obtained by substituting spatial captive motion simulation for existing CFD methods. The calculation results obtained by the proposed method have smaller errors in comparison with the test data in water tank, thereby confirming the feasibility of the method.

Keywords: hydrodynamic coefficients; underwater vehicles; spatial captive motion; maneuvering characteristics; CFD; planar motion mechanism (PMM); hydrodynamic experiment; high efficiency

计算流体力学(computation fluid dynamic, CFD)是水下航行器最重要的总体性能之一,研究航行器的操纵性对于保证其航行安全、充分发挥水下航行器工作效能,都有着极其重要的意义^[1]。准确高效的获得水动力系数是开展水下航行器操纵性研究与设计方案改进的重要前提。常用的水动力系数求取方法包括经验公式估算方法、拘束模型试验方法、自航模型试验方法。经验估算方法具有很强的经济性

和实用性,但其适用性和精确度难以保证。模型试验方法是当前计算水动力系数较为精确的一种方法,但是由于其试验周期长,耗费成本高,在水下航行器设计初期并不适用^[2]。随着计算机技术和CFD技术的飞速发展,人们逐渐用数值模拟代替真实的模型试验,分析的成本大幅降低,周期大大缩短。大量学者对数值模拟求解水动力系数做了相关研究。Racine^[3]基于重叠网格方法模拟了扁平体水下航行器 NNEMO 的斜航试验、回转臂试验和平面运动机构试验,求解了 11 个主要水动力系数。Kim^[4]、Ahmad^[5]及 Hiroyoshi^[6]等利用 CFD 的重叠网格技术模拟平面运动机构试验,通过与真实水池

收稿日期: 2017-09-22.

网络出版日期: 2018-07-10.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2011AA09A106).

作者简介: 高婷,女,博士研究生;

庞永杰,男,教授,博士生导师.

通信作者: 高婷, E-mail: gaoting880225@163.com.

中的试验结果对比证明了数值模拟方法的可靠性。林兆伟等^[7]提出了一种在三维操纵性数值水池中模拟测试水下航行器水动力系数的计算方法,以解决数值计算过程中的精度和效率的问题。文献[8-11]利用 CFD 软件结合湍流模型、动网格等技术对水下航行器的拘束平面运动进行模拟,进而分析其水动力性能。文献[12-14]为提高旋转导数的预报精度,采用添加动量源项的方法将水下航行器旋臂试验的数值模拟转化为定常问题进行求解,计算结果与试验数据吻合良好。这些研究成果充分说明数值模拟进行水下航行器水动力研究的可靠性和广阔应用前景。

基于平面机构运动模拟、拘束模型试验等方法对求取水下航行器水动力系数的研究已经相当成熟,且应用极为广泛。但是,上述方法的不足之处在于:首先,计算周期较长,因为需要进行多种运动频率或航行速度下的仿真分析,以便求取系数的平均值进而提高结果的准确性;其次,求解过程中每个系数自身都带有一定的误差,因此,分别获取导致动力学模型整体的可靠性不可评估,也难以对建立的动力学模型进行改进或简化。

本文以水下航行器为例,采用 3 种方法计算其水动力系数,并提出了一种高效的空间拘束运动模拟方法。

1 数值计算方法

为了确定航行器的位置和姿态,研究其运动状态及艇体的水动力特性,本文引入固定坐标系 $O_E-\xi\eta\zeta$ 以及运动坐标系 O_b-xyz ,如图 1 所示。固定坐标系的原点可以任意选取计算域中某一点;运动坐标系的原点位于航行器的重心处。基于载体坐标系描述航行器运动时常用参量的符号如表 1 所示。

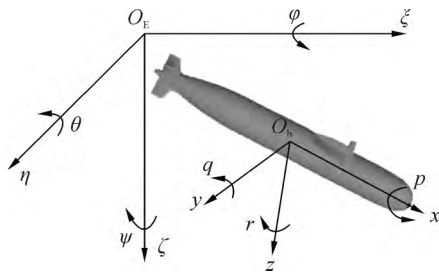


图 1 坐标系示意图

Fig.1 Definition of coordinate systems

本文水下航行器模型由主艇体、围壳、围壳舵及十字型艏舵 4 部分组成。围壳舵、十字型艏舵翼断面采用 NACA0012 翼型。该航行器模型由哈尔滨工程大学设计,参考了德国的 U212 A,日本的苍龙号等多个典型的潜艇布局。模型艇长为 3.08 m,艇高

为 0.37 m,直径为 0.3 m,重量为 220 kg。

表 1 运动坐标系的各参量符号

Table 1 Parameters of moving coordinate system

参量	x 轴	y 轴	z 轴
线速度 l	u	v	w
角速度 Ω	p	q	r
力 F	X	Y	Z
力矩 l	K	M	N

计算域设置为一长方体区域,艏部距入口边界 2 倍艇长;艉部距出口边界 5 倍艇长;四周距边界 2 倍艇长。

选取自适应切割体网格技术对计算域进行网格离散,该网格技术能够确保计算域内绝大部分网格为计算性能优良的六面体网格,同时通过边界层网格设置可对艇体近壁面网格进行控制。计算中合理的布置第 1 层网格的高度,保证 20~100,并应用整体动网格技术来模拟水下航行器的六自由度空间运动。在网格生成过程中考虑到计算潜艇结构的复杂性,在对网格相关参数设置时采取在近艇体区域设定较密的网格然后以一定膨胀系数外推。同时适当的加密各附体处的网格以便较准确的捕捉到该处的流动特性。为了避免网格粗糙时引起的计算结果的误差过大,文中在考虑计算资源的基础上,尽可能的对网格进行细化,总的网格数为 590 万。生成的网格模型如图 2 所示。

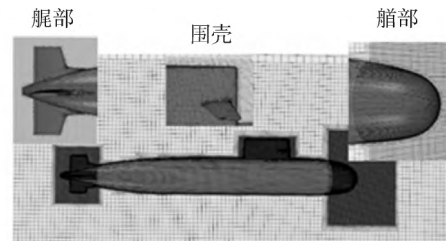


图 2 网格划分

Fig.2 Grid diagram

2 平面运动机构试验模拟

平面运动机构试验是所有拘束模型试验方法中能够获得水动力系数最多的一种方法,通过纯横荡运动、纯摇艏运动、纯升沉运动和纯俯仰运动几个工况的重复模拟,可以获得线/角速度,以及线/角加速度相关的水动力系数。

2.1 纯横荡运动

本文模拟循环水槽中的平面运动机构试验,纯横荡运动中,来流速度沿 x 方向为 U ,仅在水平面内的 y 方向给艇体施加一个按正弦规律变化的位移。其运动参数如下:

$$\begin{cases} \eta = a \sin(\omega t) \\ \dot{v} = \dot{\eta} = a\omega \cos(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: η 为水下航行器在水平面 y 方向的位移 a 为振幅 ω 为振动的圆频率。艇体的振荡频率依次取 0.1、0.15、0.2 Hz, 轴向来流速度恒定 1.2 m/s, 振幅取固定值 a 为 0.04 m。文中计算的小振幅的平面运动, 在满足线性假设的前提下水平面内的运动方程为:

$$\begin{cases} Y = Y_v \dot{v} + Y_v v + Y_r \dot{r} + Y_r r \\ N = N_v \dot{v} + N_v v + N_r \dot{r} + N_r r \end{cases} \quad (2)$$

将横荡运动参数设置带入上述运动方程中并进行无因次化, 得到水动力表达式如下:

$$\begin{cases} Y' = -\frac{a\omega^2 L}{U^2} Y'_v \sin(\omega t) + \frac{a\omega}{U} Y'_v \cos(\omega t) \\ N' = -\frac{a\omega^2 L}{U^2} N'_v \sin(\omega t) + \frac{a\omega}{U} N'_v \cos(\omega t) \end{cases} \quad (3)$$

分别计算每种工况下艇体所受的侧向力和转首力矩的变化情况。利用最小二乘法即可求得不同工况下的水动力系数 Y'_v, Y'_r, N'_v, N'_r , 通过不同工况的重复模拟求解水动力系数的平均值来消除频率对试验结果的影响。

2.2 纯摇艏运动

数值模拟水下航行器纯摇艏运动是在艇模上施加一个艏向角的正弦变化, 运动时要求模型迎流方向与中心处轨迹曲线相切。相应的运动参数为:

$$\begin{cases} \psi = \psi_0 \sin(\omega t) \\ r = \dot{\psi} = \psi_0 \omega \cos(\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

式中 ψ_0 为艇体的转艏幅值。

将参数设置代入运动线性方程中得到艇体做纯摇艏运动时的无因次化水动力为

$$\begin{cases} Y' = -\frac{\psi_0 \omega^2 L^2}{U^2} Y'_r \sin(\omega t) + \frac{\psi_0 \omega L}{U} Y'_r \cos(\omega t) \\ N' = -\frac{\psi_0 \omega^2 L^2}{U^2} N'_r \sin(\omega t) + \frac{\psi_0 \omega L}{U} N'_r \cos(\omega t) \end{cases} \quad (5)$$

与横荡运动相似, 通过运动方程的拟合, 并将各工况下的计算结果求取平均值得到水动力导数 Y'_r, Y'_v, N'_r, N'_v 。垂直面内的拘束运动求解方法与水平面的相似, 此处不再详述。

3 空间拘束运动模拟

通过模拟平面运动机构试验可以求得动力学模型中的部分水动力系数, 但是需要进行多次数值计算。此外, 为了保证所得系数的可靠性, 计算中需要拟合不同频率的运动工况, 通过求取其平均值作为

最终的结果。这增加了计算周期, 并且限制了水下航行器设计的进度。为解决这一问题, 本文提出一种高效的水动力系数计算方法-空间拘束运动模拟方法。利用该方法仅通过一次计算即可求得动力学模型中的全部水动力系数。

3.1 运动方程

水下航行器六自由度空间运动方程以格特勒用于潜艇模拟研究的标准运动方程为基础^[15], 该方程含 108 个水动力系数。在现实中由于试验的困难很难全部得到^[14]。此外, 水下航行器做定速直航等弱机动运动时, 由于整体受到的水的作用力变化较小, 动力学模型中的非线性项影响很小。因此, 本文仅通过数值模拟求取与艇体速度和加速度直接相关的线性水动力系数, 在不考虑舵翼影响的前提下, 格特勒的标准运动方程可简化为:

$$X = X_u \dot{u} + X_{uu} u^2 \quad (6)$$

$$Y = Y_r \dot{r} + Y_v \dot{v} + Y_r u r + Y_v u v \quad (7)$$

$$Z = Z_q \dot{q} + Z_w \dot{w} + Z_q u q + Z_w u w + Z_0 \quad (8)$$

$$K = K_p \dot{p} + K_p u p + K_v \dot{v} + K_v u v \quad (9)$$

$$M = M_q \dot{q} + M_w \dot{w} + M_q u q + M_w u w + M_0 \quad (10)$$

$$N = N_r \dot{r} + N_v \dot{v} + N_r u r + N_v u v \quad (11)$$

尽管线性方程略去了几十个不易计算和测量的耦合项水动力系数, 但其仍然有足够的拟合能力对水下航行器小扰动状态下的直航运动进行动力学建模, 后续的空间拘束运动模拟结果将进一步证明。

3.2 模拟方法

与平面拘束运动数值模拟方法不同, 空间拘束运动模拟是一种在现实环境中较难实现, 但在数值环境中很容易完成的模拟方法。在潜艇的 6 个自由度上人为定义互不相同的 6 个不规则扰动。使艇体在各个自由度上的速度和加速度都不为 0, 而且呈现不规则的变化。其定义形式可表示为:

$$\varphi = \varphi_0 + \varphi_p \sin(2\pi f_{\varphi_1} t) \sin(2\pi f_{\varphi_2} t) \sin(2\pi f_{\varphi_3} t) \quad (12)$$

式中: φ 表示艇体的任一运动参数 u, v, w, p, q, r ; φ_0 是一个持续的速度, 对于潜艇的 x 方向来说, φ_0 代表其巡航速度, 对于其他方向的线速度和角速度 $\varphi_0 = 0$; φ_p 表示运动中所加扰动的幅值, 计算中合理的设置该参数使得运动限制于小幅度的振动。3 个正弦函数的乘积是施加于艇体上的一个不规则的扰动, 用于调整艇体的运动状态, 使其更接近于潜艇在深海中的运动。合理的调整式中正弦函数的圆频率使得各方向的运动尽可能不相关。为了便于与试验结果的比较, 除速度 u 和角速度 p 外的运动参数, 其设定参考拘束模型试验的振幅和频率。

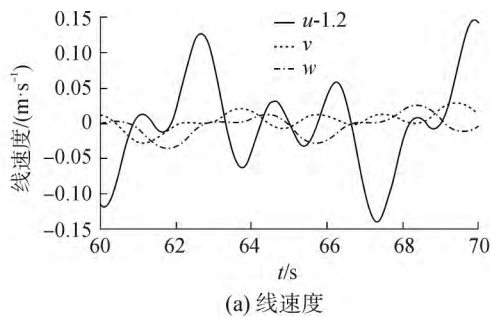
3.3 相关性分析

在空间拘束运动模拟的基础上采用最小二乘法对水下航行器的水动力系数进行辨识。为保证样本数据的不相关性,在参数设定后选取部分样本点对各速度之间的相关性进行分析。皮尔逊相关系数为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (13)$$

式中: \bar{X} 为 X 的均值; \bar{Y} 为 Y 的均值。

依次计算出各方向速度之间的相关性系数,根据该系数确定各方向运动是否相关进而判断设置的



圆频率参数的可行性。该系数的取值 $[-1, 1]$, 当 $r < 0$ 时, 对应的 2 个变量是负相关的; 若 $r > 0$, 则二者是正相关的; 当 $r = 0$ 时表示各方向速度不存在相关关系。文中设定的圆频率参数得到的速度之间相关系数几乎为 0, 可见水下航行器各方向的运动相关性很小。

利用 CFD 仿真分析软件 STAR-CCM+模拟水下航行器的空间拘束运动, 在计算收敛后监测得到每一时刻艇体各方向的受力和力矩值 X, Y, Z, K, M, N , 运动时间持续 150 s。图 3 所示是 60~80 s 内艇体的线速度以及角速度的变化情况。

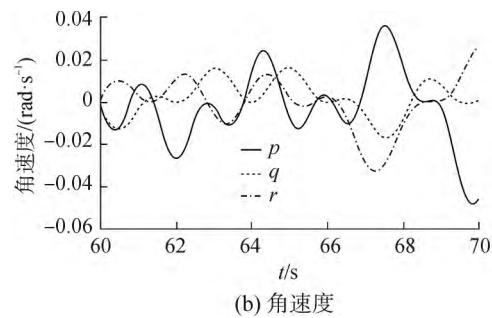


图 3 线速度、角速度变化

Fig.3 Linear velocity and angular velocity variations with perturbations

3.4 拟合优度检验

回归模型的准确度是判断设定的圆频率参数的否合理性。本文以 15~120 s 的计算数据为基准, 设定了置信区间为 95%。运用最小二乘法求解线性运动方程的回归模型, 并基于剩余 20% 的数据对模型的准确性进行交叉验证, 确保模型的拟合度良好。引入度量拟合优度的统计量确定系数 R^2 ^[16-17], 作为衡量回归模型拟合程度的指标。 R^2 值越接近于 1, 说明建立的回归模型精度越好。文中艇体各方向的受力及力矩拟合得到的回归模型其系数 R^2 均大于 0.95, 说明该模型误差较小, 能够满足后续计算的需求。

果如表 2 所示。



图 4 试验模型的安装示意图

Fig.4 Submarine model under test conditions

4 计算结果与分析

4.1 水动力试验

为了验证空间拘束运动模拟计算水动力系数方法的可靠性, 在循环水槽对潜艇模型开展平面运动机构试验, 将试验结果与数值模拟结果进行对比验证。平面运动机构试验包括纯横荡、纯摇艏、纯升沉以及纯俯仰试验, 试验中艇体模型的安装情况如图 4 所示。

各个试验中流速均为 1.2 m/s, 振幅为 0.04 m; 振荡频率区间为 0.1 ~ 0.2 Hz。平面运动机构试验和空间拘束运动模拟计算得到的水动力系数对比结

4.2 2 种数值方法的比较

基于平面拘束运动模拟方法可以求得速度和角速度相关的线性水动力系数, 但是为了降低误差需要通过多次计算模拟不同工况下的运动性能, 求取系数的平均值, 如表 3 所示。若使用如下的计算工作站配置: 双 CPU(Intel Xeon E5-2640 @ 2.50 GHz) 且内存储器为 48 G。采用该方法完成水动力系数的计算需要进行不少于 12 个算例的模拟, 计算周期超过 10 d。而相同的条件下基于空间拘束运动模拟方法仅通过一个算例、一次计算就可求得所需的全套水动力系数, 计算时间约为 35 h。

比较平面运动机构试验模拟与文中提出的新方法的计算结果, 可以看出对于大部分水动力系数, 基于 2 种 CFD 方法求得的值较为接近。因此, 在设计

初期,可以用空间拘束运动模拟方法代替现有的常规数值模拟方法,快速求得设计艇型的水动力系数。分析计算值与试验结果的误差,可以看出大部分数值估计的水动力系数值具有较好的精度,能够满足工程实际的需要,进一步说明了空间拘束运动模拟方法的可行性。

表2 各方法水动力系数

Table 2 Hydrodynamic coefficients of various methods

水动力系数	平面拘束/CFD	空间拘束/CFD	试验	误差/%
Y'_v	-0.021 430	-0.022 712	-0.021 600	5.1
Y'_r	0.007 322	0.006 768	0.007 263	-6.8
Y'_v	-0.052 410	-0.046 160	-0.053 310	13.4
Y'_r	-0.000 105	-0.000 123	-0.000 725	83.0
Z'_w	-0.013 140	-0.013 040	-0.013 200	1.2
Z'_q	-0.010 140	-0.009 026	-0.010 065	10.3
Z'_w	-0.036 254	-0.032 663	-0.034 633	5.7
Z'_q	-0.000 227	-0.000 217	-0.000 250	13.2
M'_q	-0.000 894	-0.000 913	-0.000 854	-6.7
M'_q	-0.005 146	-0.004 943	-0.005 307	6.9
M'_w	0.003 409	0.003 542	0.004 780	-25.9
M'_w	-0.000 412	-0.000 403	-0.000 500	19.8
N'_r	-0.001 151	-0.001 170	-0.001 130	-3.5
N'_r	-0.005 446	-0.005 421	-0.005 906	8.2
N'_v	-0.011 774	-0.011 645	-0.012 233	4.8
N'_v	0.000 976	0.000 233	0.000 639	63.5

表3 两种数值计算方法的比较

Table 3 A comparison of two simulation methods

计算方法	模拟运动方式	求得系数	计算工况
平面拘束运动模拟	横荡运动	Y'_v, Y'_r, N'_r, N'_v	3
	摇艏运动	Y'_r, Y'_v, N'_r, N'_v	3
	升沉运动	Z'_w, Z'_q, M'_w, M'_q	3
空间拘束运动模拟	俯仰运动	Z'_q, Z'_w, M'_q, M'_w	3
	空间拘束运动	全部线性系数	1

解耦方法更注重单个系数的精度,基于该方法计算整合出来的动力学模型整体精度无法评估。本方法更注重动力学模型整体精度,高效计算后可以评估动力学模型的整体精度并进行深入分析。虽然表2中基于本文方法求取的部分水动力系数误差较平面运动机构试验模拟结果的误差稍大,但是依然能够保证动力学模型的整体精度。

图5为某时间段内艇体的受力及力矩变化曲线图。基于本文方法求得的水动力系数线性拟合得到的曲线与基于试验的EFD结果进行比较,可以看出2条曲线很接近,充分说明了所建立动力学模型的可靠性。上述回归模型的建立是基于航行器简化后的线性空间运动方程。图中的另一条曲线为CFD数值模拟结果,为数值模拟得到的真实运动受力分析。CFD的线性拟合结果与其相比可以看出线性方程能准确的反应艇体的水动力变化趋势,且其计算数值与艇体的实际模拟值相当接近,说明水下航行器在做小扰动状态下的直航运动时,非线性项的影响较小,可以忽略不计。

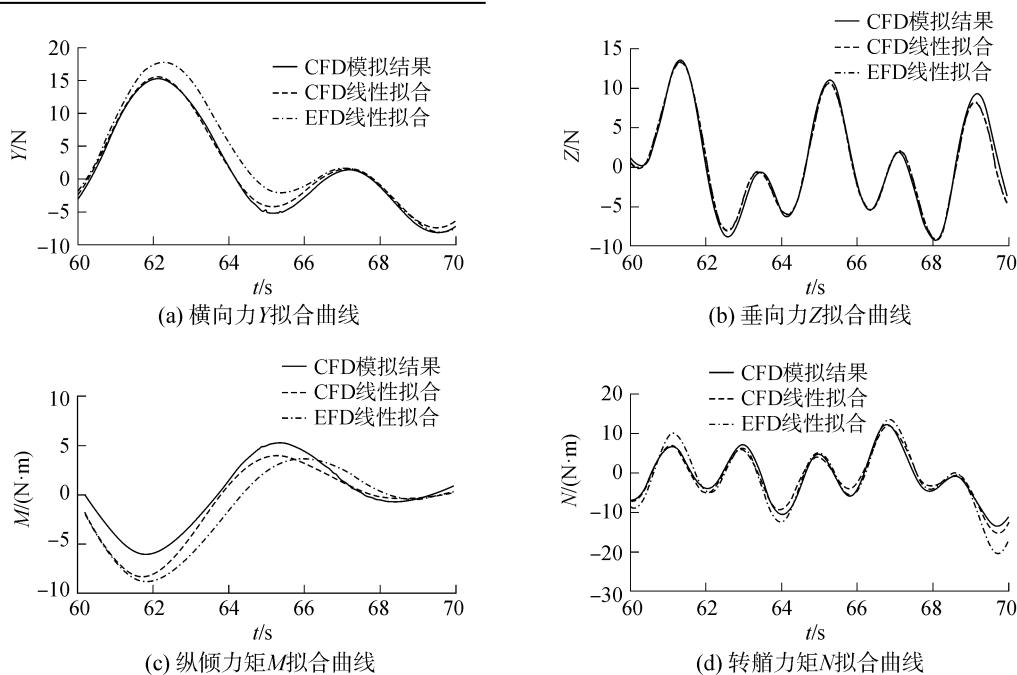


图5 CFD模拟与基于线性方程的CFD和EFD拟合结果比较

Fig.5 Forces and Moments comparison between CFD result and fitting of CFD and EFD

4.3 计算误差分析

计算结果中系数 Y_r 和 N_r 与试验值虽然在同一个量级,但是误差偏大。两种 CFD 的拟合结果较为接近。造成该误差的原因可能有以下几个方面: 1) 模型试验中的尺度效应、试验仪器以及 PMM 运动机构中两支杆运动引起的误差^[18]; 2) 数值计算中网格、湍流模型等不确定因素引起的误差; 3) 模型的主艇体横截面尺寸基本满足不大于水槽截面积的 3%, 但是该模型带有较大的指挥台围壳, 当艇体艏部下倾槽底时带来了较大的“堵水”效应, 因此引起了试验值测定结果的误差^[19]; 4) 依据文献 [20] 中对水动力导数的灵敏

度与其辨识精度的关系的分析, 对灵敏度较大的水动力导数往往能够得到比较接近真值的估计值, 而对模型贡献较小的参数一般很难得到。因此, 文中进一步分析了 Y 方向受力和绕 Z 轴转矩方程中, 几个水动力系数的比重, 如图 6 所示。图中 CFD 和 EFD 曲线分别是依据数值模拟结果和水动力系数实验数据拟合得到的。可见在上述拘束运动中, 与其余参数相比, 系数 Y_r 和 N_r 所对应的项在方程中所占的比重微小, 图中几乎为一条趋近于 0 的线。因此, 要想准确求得系数 Y_r 和 N_r 的值, 需要分析该系数作用显著的其他运动。

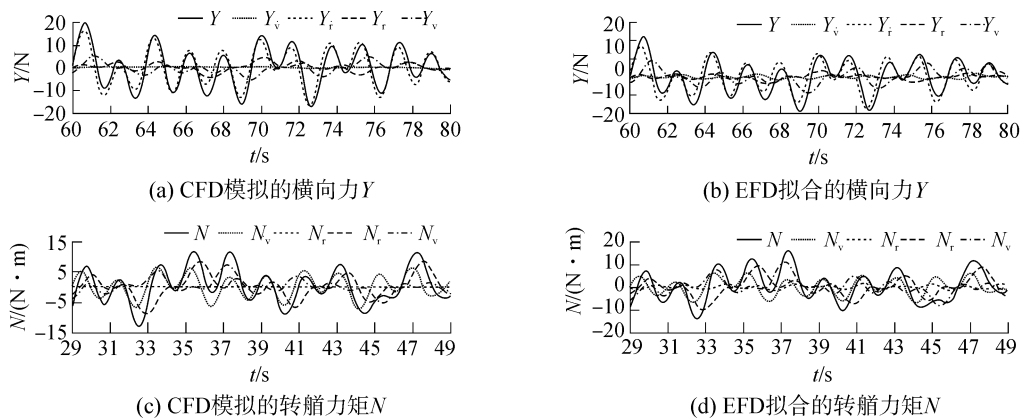


图6 横向力 Y 和转艏力矩 N 的组成成分分析

Fig.6 Component analysis of force Y and moment N

5 结论

1) 该方法计算所得的大部分水动力系数误差小于 15%, 能够满足工程应用的需求^[21]。与现有数值方法相比, 空间拘束运动模拟方法在保证计算精度的同时, 极大的缩减了水动力系数计算的周期。

2) 水池试验中由于模型带有较大的指挥台围壳, 当艇体艏部下倾槽底时带来了较大的“堵水”效应, 故使试验值产生一定的误差。在今后此类带附体试验中, 可以考虑尽量增大缩尺比, 以减小模型的尺寸。

3) 基于该方法可依据水动力系数的敏感性进一步对水下航行器的动力学模型进行简化。

4) 空间拘束运动方法不局限于小扰动状态时线性水动力系数的求解, 同样可应用于各种复杂工况下水下航行器动力学模型的建立。

本研究为水下航行器操纵运动数学模型的建立提供了一种新的途径, 为其操纵性预报和仿真系统的设计提供了便利。

参考文献:

[1] 朱怡. 水下潜器水动力模型简化及参数辨识研究[D].

哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007: 10-12.

ZHU Yi. The model simplification and hydrodynamic coefficients identification research on underwater vehicle [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007: 10-12.

- [2] 李刚. 穿梭潜器水动力特性的数值模拟和试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011: 14-22.
 LI Gang, Numerical and experimental research on hydrodynamic characters of shuttle submersible [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011: 14-22.
- [3] RACINE B, PATERSON E. CFD-based method for simulation of marine-vehicle maneuvering [C]//35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. Toronto, Canada, 2013.
- [4] 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.
- [5] HAJIVAND A, MOUSAVIZADEGAN S H. Virtual simulation of maneuvering captive tests for a surface vessel [J]. International journal of naval architecture and ocean engineering, 2015, 7(5): 848-872.
- [6] SUZUKI H, SAKAGUCHI J, INOUE T, et al. Evaluation of methods to estimate hydrodynamic force coefficients of underwater vehicle based on CFD [J]. IFAC proceedings volumes, 2013, 46(33): 197-202.
- [7] 林兆伟, 孟生, 殷洪, 等. 潜器操纵性水动力系数的数值预报方法[J]. 中国造船, 2016, 57(1): 59-68.
 LIN Zhaowei, MENG Sheng, YIN Hong, et al. Numerical

- prediction of maneuverability of underwater vehicle [J]. Ship building of China, 2016, 57(1): 59-68.
- [8] 杨勇. 非定常操纵运动船体水动力数值计算[D]. 上海: 上海交通大学, 2011: 62-74.
YANG Yong. Calculation of unsteady hydrodynamic forces on a maneuvering ship [D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2011: 62-74.
- [9] 赵金鑫. 某潜器水动力性能计算及运动仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011: 20-50.
ZHAO Jinxin. The hydrodynamic performance calculation and motion simulation of an AUV with appendages [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011: 20-50.
- [10] 程捷, 张志国, 蒋奉兼, 等. 平面运动机构试验的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2013, 28(4): 60-64.
CHEN Jie, ZHANG Zhiguo, JIANG Fengjian, et al. Numerical simulation of the planar motion mechanism tests [J]. Journal of hydrodynamics, 2013, 28(4): 60-64.
- [11] 刘山. 基于 CFD 技术数值模拟平面运动机构试验[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 62-75.
LIU Shan. Numerical simulation of planar motion mechanism test based on CFD technology [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2012: 62-75.
- [12] WU Xiaocui, WANG Yiwei, HUANG Chenguang, et al. An effective CFD approach for marine-vehicle maneuvering simulation based on the hybrid reference frames method [J]. Ocean engineering, 2015, 109: 83-92.
- [13] 刘帅, 葛彤, 赵敏. 基于源项法的潜艇旋臂试验模拟[J]. 大连海事大学学报, 2011, 37(2): 1-4.
LIU Shuai, GE Tong, ZHAO Min. Simulation for submarine rotating-arm test based on added momentum source method [J]. Journal of Dalian maritime university, 2011, 37(2): 1-4.
- [14] 肖昌润, 刘瑞杰, 许可, 等. 潜艇旋臂回转试验数值模拟[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2014, 28(4): 313-316.
XIAO Changrun, LIU Ruijie, XU Ke, et al. Simulation for submarine rotating-arm tests [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (natural science edition), 2014, 28(4): 313-316.
- [15] 李慧, 赵琳, 毛英. 海况干扰下潜艇六自由度运动分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(1): 94-100.
LI Hui, ZHAO Lin, MAO Ying. Analysis of six-degree-of-freedom motion in submarines under sea disturbance [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(1): 94-100.
- [16] 谢兰, 高东红. 非线性回归方法的应用与比较[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(10): 117-121.
XIE Lan, GAO Donghong. The application and comparison of different nonlinear fit methods [J]. Mathematics in practice and theory, 2009, 39(10): 117-121.
- [17] 施生达. 潜艇操纵性[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 149-169.
- [18] 王庆云, 庞永杰, 李伟坡, 等. 系列舵翼潜艇水动力系数数值计算及试验研究[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(11): 24-26.
WANG Qingyun, PANG Yongjie, LI Weipo, et al. Numerical calculation and experimental study of hydrodynamic coefficients of submarine of a series of rudder and wing [J]. Ship science and technology, 2015, 37(11): 24-26.
- [19] 王庆云. 操纵装置对潜艇操纵性能的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
WANG Qingyun. Research on the influence of control device to maneuverability of submarine [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [20] RHEE K P, KIM K. A new sea trial method for estimating hydrodynamic derivatives [J]. Journal of ship and ocean technology, 1999, 3(3): 25-44.
- [21] PAN Yucun, ZHANG Huaixin, ZHOU Qidou. Numerical prediction of submarine hydrodynamic coefficients using CFD simulation [J]. Journal of hydrodynamic, Ser. B, 2012, 24(6): 840-847.

本文引用格式:

- 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(1): 174-180.
GAO Ting, PANG Yongjie, WANG Yaxing, et al. Calculation of hydrodynamic coefficients for underwater vehicles [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(1): 174-180.