

CFX 与 USAERO 的水下机器人操纵性仿真计算研究

康涛^{1,2}, 胡克¹, 胡志强¹, 林扬¹

(1 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 研究了借助计算流体力学软件 CFX 与 USAERO 对水下机器人的操纵性进行仿真计算的方法, 并将仿真计算结果与模型试验结果对比, 验证仿真计算的可行性, 指出仿真计算的适用范围. 该方法可以对某些现实中难以进行的操纵性试验进行仿真计算, 对于研究水下机器人的操纵性尤其是在方案设计阶段的操纵性设计和降低试验成本有一定的现实意义.

关键词: 水下机器人; 仿真; 操纵性; 水动力系数

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

Research on Maneuverability Simulation Calculation of Underwater Vehicle by CFX and USAERO

KANG Tao^{1,2}, HU Ke¹, HU Zhiqiang¹, LIN Yang¹

(1 Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences Shenyang 110016 China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences Beijing 100049 China)

Abstract The underwater vehicle manipulation simulation calculation is studied with the CFD (computational fluid dynamics) simulation softwares of CFX and USAERO, and the simulation calculation data is compared with the experimental data on a model. Feasibility of the simulation calculation is validated and the applied range of simulation calculation is pointed out. Some manipulation experiments that can't be done practically can be finished through simulation calculation, and it has practical significance for reducing the cost of model experiments and studying the underwater vehicle's manipulation, especially for manipulation design in the scheme design phase.

Keywords underwater vehicle; simulation; maneuverability; hydrodynamic coefficient

1 引言 (Introduction)

水下机器人操纵性的设计过程中需要进行大量的试验以确定水动力系数, 并在此基础上修正水下机器人的操纵面设计. 但是大量的模型试验需要花费大量的人力物力, 并且有的情况下试验会因为受到外界诸多客观因素限制而无法进行, 在这种情况下, 水动力的仿真计算被引入进来. 但是由于仿真计算存在精度不足的问题, 使得计算结果同模型试验存在一定误差, 不过这些误差可以通过设定仿真软件中的流体特性参数而限制在允许的范围内. 本文主要对自治水下机器人 (autonomous underwater vehicle) 模型在垂直面内的振荡运动进行仿真计算, 将计算结果同模型试验结果进行对比以验证仿真计算的

可行性, 并通过设定流体特性参数提高试验精度^[1,2].

2 计算原理 (Calculation theory)

仿真计算的动力学分析基于惯性坐标系和运动坐标系, 如图 1 所示. 仿真计算中的物理模型是用流体力学仿真分析软件 CFX 采用参数建模方法制作出来的, 尺寸采用与模型试验相同的尺寸. CFX 和 USAERO 的仿真计算原理分别基于湍流理论和势流理论^[2,3], 由于基本理论的不同, 在仿真计算方面各自存在优势和局限.

USAERO 可以直接仿真整个振荡运动在各个方向上的受力与力矩变化的全过程, 通过分析计算出较为精确的与惯性力相关的受力和转矩对加速

度、角加速度的水动力系数。但是其仿真原理基于势流理论, 仿真环境基本上是一个无粘性的、无涡旋的较为理想的环境, 即仿真过程对实际中的湍流影响近乎忽略不计, 主要进行势流作用的仿真计算, 所以对 USAERO 的仿真计算结果, 主要分析计算振荡运动中受力和转矩对加速度、角加速度的水动力系数。

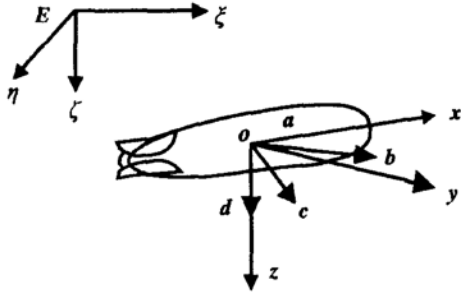


图 1 仿真计算坐标系

Fig 1 The coordinate system of simulation calculation

CFX 软件可以精确地仿真水下机器人的风洞试验和旋臂试验, 计算两种试验中水下机器人的受力与转矩大小。仿真计算首先计算水下机器人在无攻角与漂角的条件下所受的“零升力 Z_0 ”和“零力矩 M_0 ”, 然后合成水下机器人在不同时刻的垂向速度和纵向速度, 把合成速度与水下机器人中轴线的夹角作为机器人斜航的攻角, 计算不同攻角条件下其所受的力与转矩, 最后对所得的数据进行处理, 得出与粘性力相关的受力和转矩对速度、加速度的一阶与二阶水动力系数。具体计算公式如下:

$$Z = Z_0 + Z(w)$$

$$M = M_0 + M(w)$$

式中的 $Z(w)$ 和 $M(w)$ 分别为由 w 引起的受力和转矩增量。其中:

$$Z(w) = \frac{1}{2} \rho U L^2 (Z'_{w'} + Z'_{w'} |w| + Z'_{w''} w^2 + Z'_{w''} |w| |w|)$$

$$M(w) = \frac{1}{2} \rho U L^3 (M'_{w'} + M'_{w'} |w| + M'_{w''} w^2 + M'_{w''} |w| |w|)$$

然后根据斜航计算所得到的 4 个不同攻角条件下的模型受力(矩), 0 度直航的 Z 向受力与绕 Y 轴的力矩分别为“零升力”和“零力矩”, 根据上式进行矩阵计算即可得出相应的速度系数。将其与模型操纵性试验得出的水动力系数进行比较, 对仿真计算

误差进行分析, 验证仿真计算方法的可行性。

3 仿真计算过程 (Simulation calculation)

3.1 创建在垂直面内的振荡运动模型

在仿真计算中, 首先使用 CFX 的辅助建模部分建立起模型在垂直面内的振荡模型。为了与模型试验相对应, 仿真模型也采用与试验模型相同的尺寸, 基本参数如下:

载体长度 2.1m

主体直径 0.4m

3.2 利用 USAERO 与 CFX 进行仿真计算

首先对模型上的各个面分别划分网格, 然后在划分网格后生成的输入文件的头文件中写入仿真计算的主要参数, 其中参考速度和参考长度是用来计算无量纲的水动力系数的, 本试验中的参考速度设为 1m/s, 参考长度与模型实际长度相等。在 USAERO 中可以设置多个模型, 每个模型对应一个坐标系, 本试验中只有惯性坐标系与运动坐标系, 因而就需要在输入文件的坐标系文件中写入运动坐标系在垂直面内沿 z 轴做正弦振荡, 即 $z = \sin \omega t$, 具体程序如下所示:

```
TM = 0.0          HZF = 0
6.579 0 0.04 0 0 0
50 6.579
```

表示模型在垂直面内沿 z 轴做振幅为 40mm、周期为 6.579s (频率为 0.152 Hz) 的正弦振荡。第一行的时间与第三行表示仿真过程在 0~6.579s 这样一个时间段内进行, 并把仿真过程分为连续的 50 步。第一行的“HZF = 0”与第二行表示振荡起点在 z 轴原点, 振荡周期则为 6.579s。USAERO 将模型沿坐标轴的直线振荡或绕坐标轴的仰俯、偏航和横滚振荡方程设为一个如下式的方程:

$$Z = HZF + A_1 \cos \theta_t + B_1 \sin \theta_t + A_2 \cos 2\theta_t + B_2 \sin 2\theta_t$$

$$\theta_t = \omega t + DELTH$$

第二行中的后 5 个数字分别对应上式中的 A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 和 $DELTH$, 最后一个参数是偏移的相位。然后即可开始仿真计算, 最后按上述步骤计算频率分别为 0.187Hz、0.212Hz、0.245Hz 时的结果。

CFX 所进行的斜航仿真计算首先是根据模型大小在其外做一个实体流域, 在流域中设置流体的各种特性, 如密度、参考压力、动力粘度等; 在流域四周分别设置流入、流出、模型和整个流域的边界; 然后设置计算过程的次数, 通过若干次计算, 检验计算结

果是否收敛, 如果经过一定次数的计算后, 结果成收敛趋势, 则输出计算结果; 接着在模型上划分网格; 其余设置可以采用程序自动设置, 最后写出定义文件, 进行仿真计算。

4 仿真计算结果 (Result of simulation calculation)

4.1 振荡计算结果

由于模型所受的惯性力主要是由 Z 向的加速 \dot{w} 度产生, 图中无量纲化值 CFZ 中第一行的一阶正弦值即为由加速度 \dot{w} 产生的 Z 向惯性力 Z_1 的无量纲化值, 余弦值为速度 w 产生的 Z 向力 Z_2 的无量纲化值, 同理, CMY 的一阶正弦值即为加速度 \dot{w} 产生的 Z 向惯性力矩 M_1 的无量纲化值, 余弦值为速度 w 产生的 Z 向力矩 M_2 的无量纲化值. Z 向惯性力 (矩) 与其无量纲化值的关系如下:

$$Z' = Z / (0.5\rho U^2 L^2)$$

$$M' = M / (0.5\rho U^2 L^3)$$

根据操纵性设计理论中的计算公式^[3,6], 即可计算出模型的加速度系数:

$$Z_{\dot{w}} = \frac{Z_1}{a\omega^2} + m \quad Z'_{\dot{w}} = Z_{\dot{w}} / (0.5\rho L^3)$$

$$M_{\dot{w}} = \frac{M_1}{a\omega^2} - mx_c \quad M'_{\dot{w}} = M_{\dot{w}} / (0.5\rho L^4)$$

根据上面的公式可以计算出振动频率为 0.152Hz 时受力与转矩的加速度系数分别为 $Z'_{\dot{w}} = -0.08481$ $M'_{\dot{w}} = -0.003451$

其他 3 个频率下的结果为:

$$Z'_{\dot{w}} (f=0.187) = -0.08375$$

$$M'_{\dot{w}} (f=0.187) = -0.003371$$

$$Z'_{\dot{w}} (f=0.212) = -0.08127$$

$$M'_{\dot{w}} (f=0.212) = -0.003246$$

$$Z'_{\dot{w}} (f=0.245) = -0.07705$$

$$M'_{\dot{w}} (f=0.245) = -0.003081$$

4.2 斜航计算结果

根据模型的斜航试验, 攻角为 2.465° 时斜航仿真计算受力结果如下所示, 各向受力包括压力阻力 (pressure force) 与粘性阻力 (viscous force). 由于惯性坐标系与运动坐标系存在 2.465° 夹角, 所以模型在运动坐标系 Z 向受力应为惯性坐标系内 X 与 Z 向受力分量之和, 其中 $Z = (3.548 - 0.1257 - Z_w) \cos 2.465^\circ$

$$+ (4.743 + 6.869) \sin 2.465^\circ = 4.671\text{N}, \text{ 零升力 } Z_w = -0.7814$$

同理可得, 攻角分别为 -2.465° 、 4.93° 、 -4.93° 时的 Z 向受力分别为 -4.548N 、 10.457N 、 -10.866N .

5 结果对比 (Comparison of result)

5.1 振荡运动计算结果对比

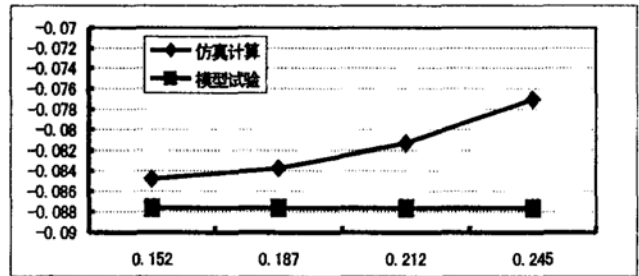


图 2 受力系数曲线图

Fig 2 Force coefficient chart

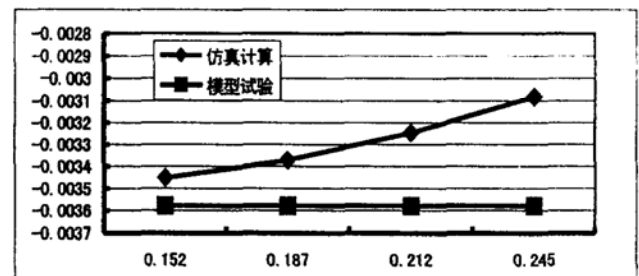


图 3 转矩系数曲线图

Fig 3 Torque coefficient chart

上图分别是不同频率下的水动力系数曲线, 图 2 为受力系数曲线, 模型试验结果为 -0.08764 图 3 为转矩系数曲线, 模型试验结果为 -0.003579 从图中可以看出, 仿真计算结果的绝对值均比模型试验偏小, 并且频率越大, 仿真计算结果的绝对值则偏小越多, 这主要是由于 USAERO 软件主要是基于势流理论^[3,4], 忽略了实际试验中存在的大部分粘性力与涡旋作用 (仿真计算中也加入了雷诺数的参量, 所以并未完全忽略粘性力), 同时仿真计算中未考虑模型表面的粗糙度, 也是存在误差的一个原因, 而仿真结果随频率增大而减小则是由于频率的增大导致雷诺数增大, 从而使得粘性力在水动力中的比例增加, 惯性力比例减小所致. 图中仿真结果对模型试验结果的误差最大达到 13.7%. 随着频率的不断增大, 误差会越来越大, 最终使仿真计算失去意义, 所以仿真计算应在频率较小的情况下进行, 频率过大时则不宜进

行仿真计算.

5.2 斜航运动计算结果对比

根据试验原理中描述的计算方法可得 $Z_w = -76.024$, $Z_{|w|} = 3.8994$, $Z_{ww} = -5.813$, $Z_{w|w|} = -15.247$, 其中攻角大于 0 时的水动力系数为 $Z_w + Z_{|w|} = -72.125$, 攻角小于 0 时的水动力系数为 $Z_w - Z_{|w|} = -78.079$. 将其无量纲化即可分别得到 -0.03271 和 -0.03541 , 与模型试验 (结果为 -0.03713) 的误差分别为 8.22% 和 4.40%.

根据计算结果得到转矩的水动力系数在攻角大于 0 时为 387.85, 攻角小于 0 时为 377.34. 无量纲化后分别为 0.08149 和 0.08376. 与模型试验 (结果为 0.08574) 的误差分别为 7.56% 与 5.15%.

斜航运动的仿真计算结果一律比实际的模型试验偏小, 这主要是由于仿真过程中忽略了模型表面粗糙度的影响. 但由于 CFX 软件的仿真计算基于湍流理论, 所以仿真计算误差相对于基于势流理论的 USAERO 软件仿真计算的误差要小.

6 结论 (Conclusion)

综上所述, 水动力学仿真软件 CFX 与 USAERO 适于进行水下机器人的水下仿真动力学计算分析, 其中 CFX 适于进行匀速直航、斜航仿真并计算一系列关于速度与角速度的大部分水动力系数, 而 USAERO 则适合进行振荡运动仿真以测定其加速度系

数. 但基于 USAERO 的振荡仿真计算一般在振荡频率不大的条件下可以获得较为精确的结果, 在振荡频率较大时, 由于误差过大, 会使仿真计算失去意义.

由上所述, 仿真计算方法在一定程度下可以替代模型试验, 尤其适用于方案论证和线型优化阶段的操纵性设计, 对缩短设计周期和降低设计成本有一定的现实意义.

参考文献 (References)

- [1] 蒋新松, 封锡盛, 等. 水下机器人 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2000.
- [2] 吴宝山. 潜艇艇水平翼加端板的操纵性设计预报研究 [J]. 船舶力学, 1999, 3(6): 12-17.
- [3] 休斯 W F, 布莱顿 J A, 徐燕侯, 等. 流体力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] 吴子牛. 计算流体力学基本原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [5] 陈厚泰, 等. 潜艇操纵性 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [6] 孙元泉, 马运义, 邓志纯, 等. 潜艇和深潜器的现代操纵理论与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

作者简介:

康涛 (1977-), 男, 硕士. 研究领域: 水下机器人, 水动力分析.

胡克 (1977-), 男, 工程师. 研究领域: 水下机器人, 结构设计, 水动力分析.