

# 基于 CFD 的船舶回转运动水动力数值预报

高行<sup>1</sup>, 邹早建<sup>1,2</sup>, 袁帅<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海, 200240;

2. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海, 200240)

**摘要:** 本文以集装箱船 KCS 标模为研究对象, 应用 CFD 软件 STAR-CCM+, 采用基于 RANS 方程求解的黏性流方法, 对船舶在不同漂角和横倾角下回转运动时的船体水动力进行了数值预报, 通过与试验数据进行比较, 对所建立的数值模型和所采用的数值方法进行了验证, 并研究了兴波与横倾角对船舶水动力的影响。计算结果表明, 兴波对船体横向力及转艏力矩影响较小, 而对纵向力及横倾力矩影响较大; 横倾角对纵向力、横向力及转艏力矩影响较小, 而对横倾力矩影响较大。研究结果验证了利用 CFD 对船舶回转操纵水动力进行预报的可行性, 对认知船舶回转过程中出现的回转横倾等问题具有一定的指导意义。

**关键词:** 计算流体动力学; 回转运动; 船舶水动力; 兴波; 横倾

## 1 引言

在船舶进行回转操纵时, 会出现一些伴随现象, 例如回转横倾等<sup>[1]</sup>。这些伴随现象会对船舶适航性及使用性能等造成很大影响, 甚至会导致船舶倾覆<sup>[2-3]</sup>。为了提高船舶航行的安全性, 减少以至避免因海难事故造成的生命财产损失和海洋环境污染<sup>[4]</sup>, 有必要加强对船舶回转运动的衡准和预报工作, 以保证设计、建造的船舶具有可靠的安全回转性能。研究船舶在静水中的操纵运动是研究船舶在波浪中的操纵运动问题的基础<sup>[5]</sup>, 将应用 CFD 方法对船舶在静水中定常回转时的水动力特性进行一定的探讨。

本文以 KCS 船模为研究对象, 应用 CFD 软件 STAR-CCM+, 采用基于 RANS 方程求解的黏性流方法, 在忽略兴波和考虑兴波影响两种情况下, 对船模在不同漂角和横倾角下回转运动时的船体水动力进行了数值计算, 并分析了兴波与横倾角对船体水动力的影响。

## 2 基本方程

### 2.1 控制方程

对于连续性方程和动量方程, 将方程中的变量分解为时均变量和脉动变量两部分, 然后对方程两边求平均, 得到雷诺平均的连续性方程与雷诺平均 N-S 方程 (RANS 方程)。将其写成采用求和约定的笛卡尔张量形式如下:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) \right] = \rho f_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

式中： $\rho$ 为流体质量密度； $\mu$ 为流体动力黏性系数； $\bar{u}_i$ 为流体时均速度分量； $\bar{P}$ 为时均流体压力； $u_i'$ 为流体相对于时均速度的湍流脉动分量； $\overline{\rho u_i' u_j'}$ 为雷诺应力项； $f_i$ 为体积力。

## 2.2 湍流模型

采用 SST  $k-\omega$  湍流模型封闭控制方程。该湍流模型引入了混合函数，在近壁区域采用 Standard  $k-\omega$  模型，在远场区域采用变形的  $k-\epsilon$  模型。因此 SST  $k-\omega$  模型结合了  $k-\omega$  模型在近壁区域的准确性及  $k-\epsilon$  模型在远场的自由流动特点，适用广泛，准确可靠。大量研究表明，SST  $k-\omega$  模型是一种适合计算船舶流场的湍流模型<sup>[6]</sup>。

## 3 数值计算

### 3.1 计算对象

选择集装箱船 KCS 船模为研究对象，其几何模型取自 SIMMAN2014<sup>[7]</sup>，缩尺比为 1:105.023。该船模主尺度参数见表 1。船模舵面积为 0.0042 m<sup>2</sup>。

表 1 KCS 船模主尺度

船长 $L_{PP}$ (m)	船宽 $B$ (m)	吃水 $d$ (m)	排水体积 $\nabla$ (m <sup>3</sup> )	方形系数 $C_B$	重心纵向位置 $LCG$ (m)	重心垂向位置 $KG$ (m)
2.190	0.307	0.103	0.0412	0.651	1.063	0.130

### 3.2 计算域及边界条件

采用长方体计算域，其尺寸为船前  $1.5L_{PP}$ 、船后  $3.0L_{PP}$ 、船两侧  $2.0L_{PP}$ 、静水面上下分别为  $1.0L_{PP}$  和  $1.5L_{PP}$ 。考虑兴波影响时，计算域边界均设置为速度入口；忽略兴波影响时，不考虑静水面上方的部分，并将无扰动自由面设置为对称边界。

### 3.3 网格划分

采用切割体网格生成器生成非结构化网格，并对船艏、船艉、舵表面和船体附近网格进行局部加密。控制船体表面第一层网格尺寸，使得  $Y^+$  值在 30~60 之间，以便能正确地应用壁面函数。考虑兴波时，对自由面附近和船后兴波区域进行局部加密。图 1 给出了计算域网格。

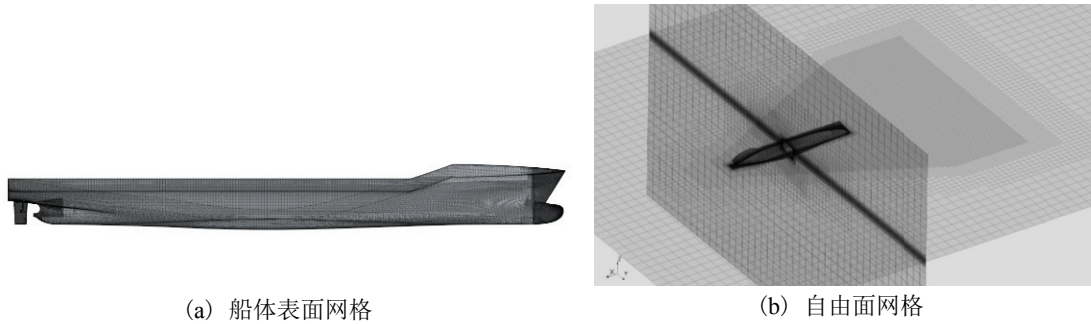


图 1 计算域网格

### 3.4 数值方法

应用 CFD 商业软件 STAR-CCM+ 对该问题进行数值计算, 采用基于 SIMPLE 算法的分离式求解器求解速度压力耦合方程。对流项采用二阶迎风格式进行离散; 扩散项采用中心差分格式进行离散; 时间离散采用一阶欧拉隐式格式。采用 VOF (Volume of Fluid) 方法捕捉自由面。

## 4 计算结果及分析

计算中选取船模速度为  $U = 1\text{m/s}$ , 对应的佛汝德数为  $Fr = 0.216$ 。考虑带漂角定常回转的船模以数值模拟 CMT (圆周运动试验, 试验中舵角为零)<sup>[7]</sup>, 设置回转角速度为  $0.195\text{rad/s}$ , 对应的回转半径为  $5.128\text{m}$ ; 船模横倾角分别为外倾  $10.2^\circ$ 、 $0^\circ$ 、内倾  $10.2^\circ$ ; 漂角分别为  $-11.6^\circ$ 、 $0.3^\circ$ 、 $3.4^\circ$ 、 $6.4^\circ$ 、 $9.4^\circ$ 、 $12.4^\circ$ 。将纵向力  $X$ 、横向力  $Y$ 、转艏力矩  $N$  及横倾力矩  $K$  无因次化:

$$X' = \frac{X}{0.5\rho L_{pp} dU^2}, \quad Y' = \frac{Y}{0.5\rho L_{pp} dU^2}, \quad N' = \frac{N}{0.5\rho L_{pp}^2 dU^2}, \quad K' = \frac{K}{0.5\rho L_{pp} d^2 U^2} \quad (3)$$

### 4.1 不确定度分析

在进行后续计算之前, 采用 GCI 方法对由网格尺寸及时间步长导致的空间和时间离散误差进行不确定度分析<sup>[8]</sup>。采用以  $\sqrt{2}$  为增长率的 3 套不同密度的网格尺寸 ( $0.0177\text{m}$ 、 $0.0250\text{m}$ 、 $0.0354\text{m}$ ) 和 3 种不同的时间步长 ( $0.0113\text{s}$ 、 $0.0160\text{s}$ 、 $0.0226\text{s}$ ) 进行不确定度分析, 结果见表 2。其中  $R$  和  $GCI_{\text{fine}}^{21}$  分别为收敛比和收敛指数。对发散的情况 ( $|R| > 1$ ) 不进行不确定度分析。

表 2 不确定度分析结果

项目		$X'$	$Y'$	$N'$	$K'$
网格尺寸	$R$	0.3498	3.0352	0.8122	-0.1437
	$GCI_{fine}^{21}$	0.225%	-	2.562%	0.003%
时间步长	$R$	-0.6012	0.7860	1.2686	0.2772
	$GCI_{fine}^{21}$	0.489%	16.950%	-	0.061%

由表 2 可知, 对于由网格尺寸导致的空间离散误差, 除  $Y'$  外,  $X'$ 、 $N'$  和  $K'$  均收敛, 且其空间离散不确定度均很小; 对于由时间步长导致的时间离散误差, 除  $N'$  外,  $X'$ 、 $Y'$  和  $K'$  均收敛, 且  $X'$  和  $K'$  的时间离散不确定度均很小, 但  $Y'$  的时间离散不确定度较大。综合考虑计算精度和成本, 后续数值计算采用中等网格尺寸和中等时间步长。

#### 4.2 船舶水动力计算结果

图 2 至图 4 分别给出船模定常回转时, 外倾  $10.2^\circ$ 、无横倾角和内倾  $10.2^\circ$  时的无因次化船舶纵向力、横向力、转艏力矩和横倾力矩, 以及和相关试验数据<sup>[7]</sup>的对比。

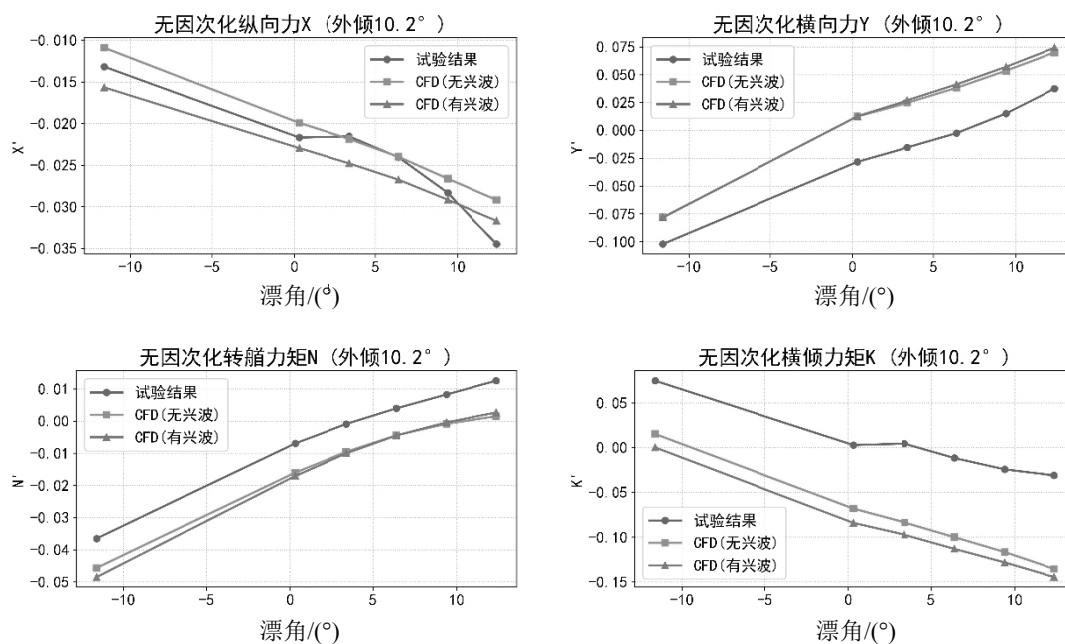


图 2 外倾  $10.2^\circ$  时的水动力计算结果

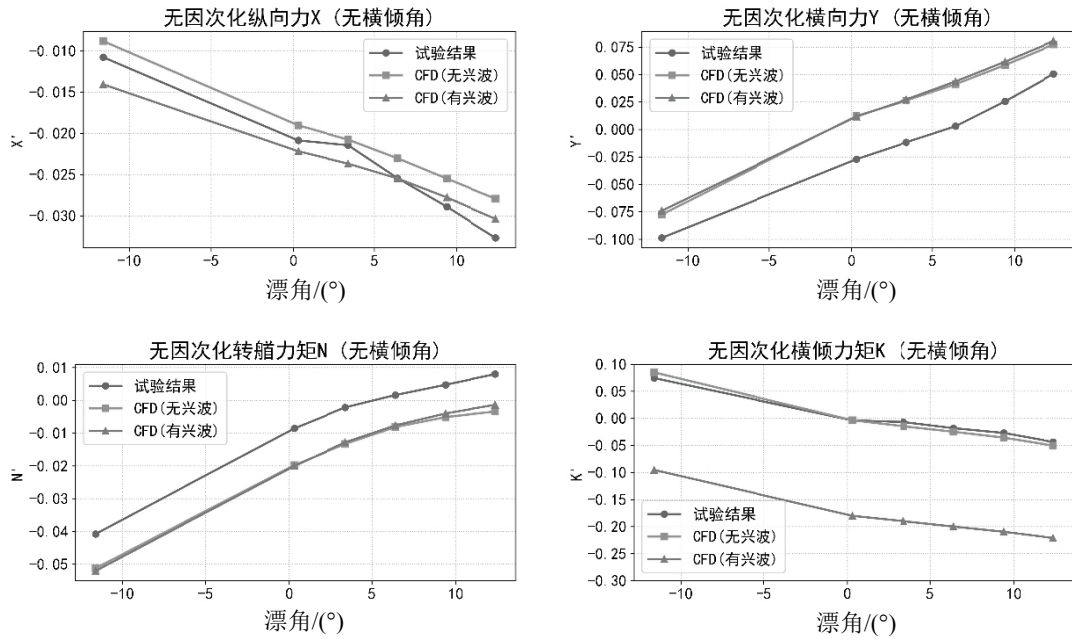


图3 无横倾角时的水动力计算结果

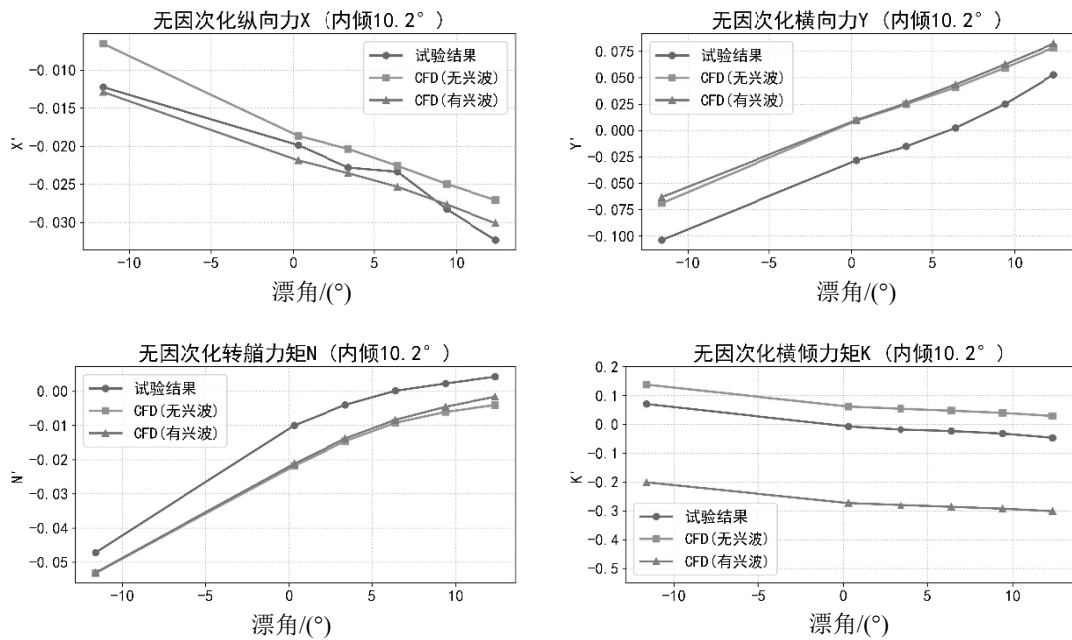


图4 内倾 10.2° 时的水动力计算结果

由图3和图4可知，船模在不同漂角和横倾角下回转运动时纵向力的数值计算结果与

试验结果较接近；横向力和转艏力矩与试验结果之间存在一定的误差，该误差在不同的漂角下接近常数。试验结果中不同横倾角对横倾力矩几乎没有影响，而计算结果中横倾角对横倾力矩有一定影响。实际上，横倾力矩数量级较小，试验中难以测量，也难以准确计算。本节通过将数值计算结果与船模试验结果进行比较，验证了在误差允许的范围内，所建立的数值模型和所采用的数值方法的有效性。

#### 4.3 兴波和横倾角的影响

对图 2 至图 4 进行分析可知，兴波对横向力和转艏力矩影响较小，对纵向力和横倾力矩影响较大。考虑兴波影响后，纵向力增大，增大值为船舶所受的兴波阻力。船舶在一定横倾角下会产生复原力矩，考虑兴波时的横倾力矩数值计算结果随横倾角的变化趋势与该结论一致，而忽略兴波时的数值计算结果的变化趋势与该结论相反，这说明忽略兴波影响会对横倾力矩的数值计算结果造成较大误差。

此外，为对比横倾角对船舶水动力的影响，绘制不同横倾角下的无因次化船舶纵向力、横向力、转艏力矩和横倾力矩曲线（图 5）。从图 5 中可以发现，横倾角对船体所受的纵向力、横向力和转艏力矩影响较小，对横倾力矩影响较大。

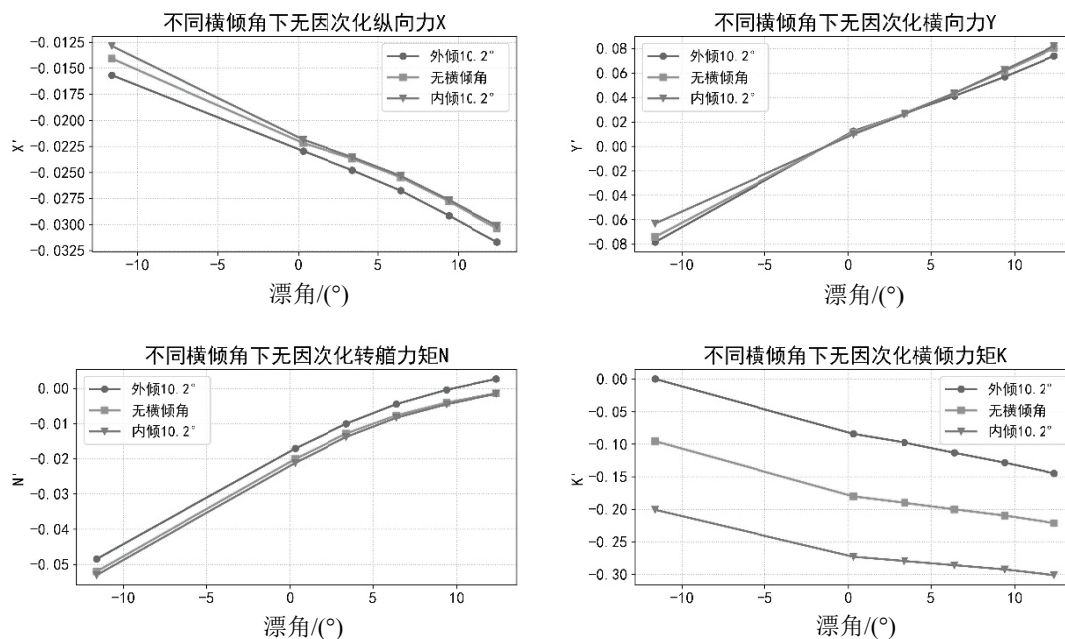


图 5 不同横倾角下的船舶水动力计算结果

## 5 结语

本文以集装箱船 KCS 标模为研究对象，应用 CFD 软件 STAR-CCM+，采用基于 RANS

方程求解的黏性流方法,在忽略兴波和考虑兴波影响两种情况下,对船模在不同漂角和横倾角下回转运动时的船体水动力进行了数值计算,采用 GCI 方法对由网格尺寸及时间步长导致的空间和时间离散误差进行了不确定度分析,并研究了兴波与横倾角对船体水动力的影响。计算结果表明,兴波对船体横向力及转舵力矩影响较小,而对纵向力及横倾力矩影响较大;横倾角对纵向力、横向力及转舵力矩影响较小,而对横倾力矩影响较大。

在不确定度分析中,部分物理量存在发散的情况,需要采用其他方法进行分析。另外,本文侧重对船舶定常回转时的水动力进行定性分析,计算结果与试验结果相比还存在一定误差,还需要进行进一步的验证。

## 致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目(批准号:51779140)资助。

## 参考文献

- 1 姜彭. 客滚船纯稳性丧失及回转安全性研究[D]. 大连:大连理工大学. 2016.
- 2 徐静, 顾解冲, 马宁. 波浪中回转船舶横摇运动研究[J]. 中国造船, 2014(4):1-10.
- 3 刘正江, 吴兆麟, 李桢. 国际海事组织海事安全类公约的最新发展[J]. 中国航海, 2012(1):61-65.
- 4 邹早建. 船舶操纵性研究进展[C]. 第六届船舶力学学术委员会全体会议专集. 2006.
- 5 徐静, 顾解冲, 马宁. 规则波六自由度回转运动预报[J]. 中国舰船研究, 2014(3):20-27.
- 6 张志荣, 李百齐, 赵峰. 全附体水面船模型尾流场数值预报[C]. 2004 年船舶水动力学学术会议论文集. 2004.
- 7 SIMMAN2014. <http://www.simman2014.dk>
- 8 CELIK I B, GHIA U, ROACHE P J. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications[J]. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 2008, 130(7).

## CFD-based numerical prediction of ship hydrodynamics during turning motion

GAO Hang<sup>1</sup>, ZOU Zao-jian<sup>1,2</sup>, YUAN Shuai<sup>1</sup>

1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract:** Taking the containership KCS model as the study object, numerical prediction of ship hydrodynamics during turning motions under different drift angles and heeling angles is carried out by using the CFD software STAR-CCM+ to solve the RANS equations for the viscous flow. The numerical results are compared with the model test data to validate the numerical model and method, and the effects of the wave-making and the heeling angle on the ship hydrodynamics are investigated. The numerical results show that the effect of the wave-making on the lateral force and the yaw moment is small but significant on the longitudinal force and the heeling moment; the effect of the heeling angle on the longitudinal force, lateral force and yaw moment is small but significant on the heeling moment. The results indicate the feasibility of the CFD method for the numerical prediction of the ship hydrodynamics during turning motions, and the results have a certain guiding significance for understanding the phenomenon of ship heeling etc. during turning motions.

**Key words:** CFD; turning motion; ship hydrodynamics; wave-making; heeling