

滑行艇在规则波中运动数值模拟

Numerical Simulation of the Planing Craft Motion in Regular Waves

孙华伟, 姚添

(哈尔滨工程大学船舶工程学院)

摘要: 本文利用 STAR CCM+软件结合六自由度运动模块对滑行艇在规则波中的运动进行数值模拟, 将计算得到的波浪增阻、纵摇、升沉以及重心加速度同船模试验结果进行对比, 计算结果同模型试验结果总体趋势一致, 能够满足定性对比分析的需要。

关键词: 滑行艇, 耐波性, CFD, STAR-CCM+

Abstract: This paper is numerical simulation planing craft in regular waves of motions by STAR CCM + software combines six degrees of freedom motion module, the calculated wave added resistance, trim, heave, and the center of gravity acceleration compared with the ship model test results, the overall trend is consistent with the model test results, and can meet the needs of qualitative comparative analysis.

Key words: Planing Craft, Seakeeping, CFD, STAR-CCM+

1 前言

滑行艇是最早出现的利用流体动力原理获得动力增生的“动力航行艇”, 目前滑行艇已被广泛的用于军事、运输、救护、娱乐以及体育竞技等方面。尽管关于滑行理论的研究有近 80 年的历史, 但与现有各类滑行艇的庞大数量相比, 滑行艇的水动力研究是比较少的。由于滑行艇高速运动本身所固有的非线性, 使得其耐波性的理论预报非常复杂, 传统的理论计算方法并不适用^[1]。本文利用当前较成熟的商业软件 STAR CCM+结合六自由度模块对滑行艇在规则波中的运动进行数值模拟, 并将计算结果和耐波性模型试验进行比较, 证明了 STAR CCM+模拟滑行艇在波浪中的运动、研究耐波性能的可行性。

2 数学模型及边界条件

(1) 控制方程^[2]

不可压缩流体连续性方程与 RANS 方程的张量形式为:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{F}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2-2)$$

其中, \bar{u}_i 为时均速度, u'_i 为脉动速度, 脉动速度相关项 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 称作雷诺应力。

(2) 湍流模型

采用 $k-\omega$ SST 湍流模型计算滑行艇的流场和阻力。SST 湍流模型首先在航空领域的研究中得到使用, 随后以其卓越预报性能得以被众多的工业、商业研究软件所采纳。此处直接给出 SST 湍流模型的方程^[3]。

k 的输运方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ \nu_t \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] - \beta^* f_\beta k \omega \end{aligned} \quad (2-3)$$

ω 的输运方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ \alpha \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] - \beta \omega^2 + D_\omega \end{aligned} \quad (2-4)$$

(3) 边界条件

根据对流场模拟计算的需要, 并参考相关文献及其经验, 采用的控制域为一长方体。按如下方案设置计算控制域的范围和船模在控制域中位置:

进流边界条件: 滑行艇船艏前 2 倍船长, 采用速度进口边界条件。

出流边界条件: 由于滑行艇的速度较高, 会出现较长的尾流, 为了很好的捕捉到尾流, 所以加长控制体, 使后端在船艉 4 倍船长处。

物面边界条件: 滑行艇外表面, 设定无滑移条件。

对称面边界条件: 垂直于对称面的速度分量为零, 平行于对称面的速度分量的法向导数为零。

模型周向条件: 上下边界在离龙骨 1.5 倍船长处, 侧面边界在离船纵舢剖面 1.5 倍船长处, 速度为未受扰动的主流区速度。

(4) 数值计算方法

采用有限体积法离散动量方程。对流项采用二阶迎风差分格式, 扩散项采用中心差分格式, 时间步长为 0.001 秒, 每时间步最大叠代次数为 10, 利用代数多重网格法加速收敛。

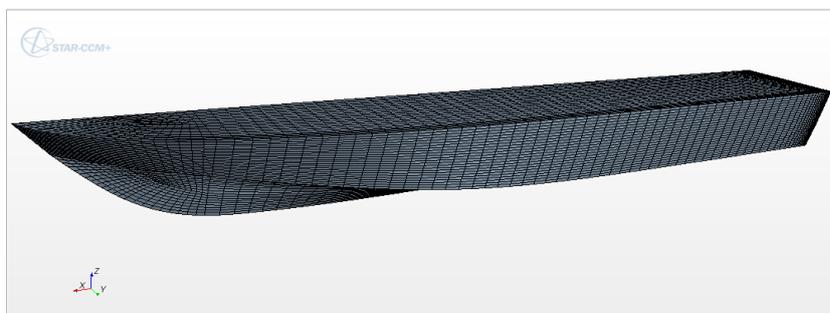
3 计算模型及网格划分

滑艇试验船模长 2.4m, 平均折角线宽 0.6m, 船舢斜升角 15° , 船艉斜升角 11° , 排水量 62kg, 中心纵向位置 0.76m。船模如下图所示:

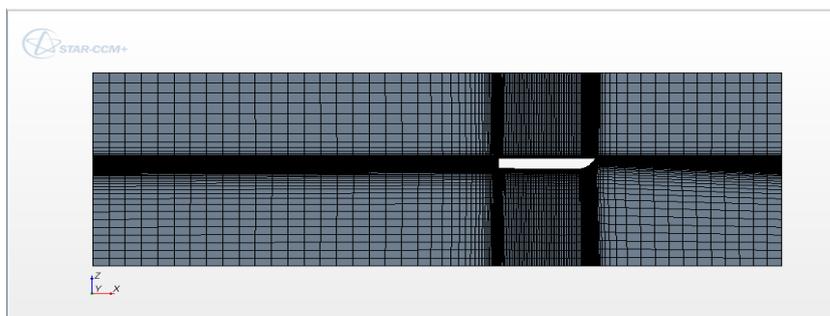


图 3.1 滑艇船模在水池静止状态

采用分块结构化网格对流域进行划分, 如下图所示:



(a) 艇体网格



(b) 计算域网格

图 3.2 网格情况

4 计算结果及分析

本文主要计算滑艇在航速 6m/s, 波高 0.06m, 波长分别 1.9m、2.9m、3.4m、4.8m、5.8m、6.7m、7.2m、7.7m、8.2m、10.1m、12m 时的波浪增阻、纵摇、升沉以及重心加速度并和试验结果进行对比。

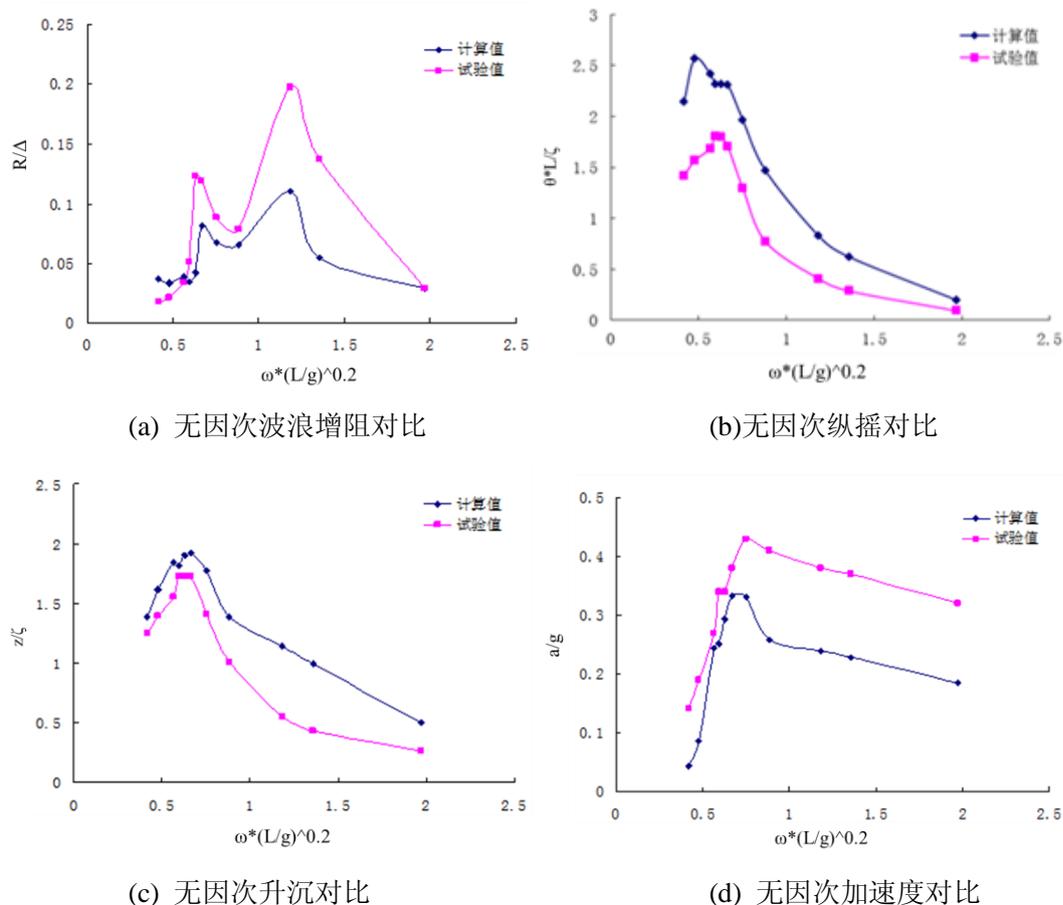


图 4.1 计算结果与模型试验对比

上图为计算结果与模型试验结果无因次对比图，图中横坐标为无因次圆频率，无因次圆频率等于遭遇频率乘上船长比上重力加速度后的二分之一一次方（即 $\omega_e \sqrt{L/g}$ ），无因次升沉等于计算升沉值比上波幅，无因次纵摇等于纵摇值比上波数与波幅的乘积，无因次波浪增阻等于波浪增阻比上船模质量，无因次重心加速度等于重心加速度比上重力加速度 g 。

从上图中可以看出，波浪增阻、重心加速度、升沉的对比结果在波长较小的情况下，船模试验与数值模拟结果误差相对比较大；在较大波长时，船模试验与数值模拟结果误差相对较小。从纵摇的对比结果来看，在波长较大时，其船模试验与数值模拟结果误差较大；在波长较小时，其船模试验与数值模拟结果误差较小。但从总体上来看，波浪增阻、纵摇、重心加速度及升沉方面试验结果与数值模拟结果两者变化的总体变化趋势符合的都较为理想，两者都在同一频率（或同一波长/折角线长）的情况下达到峰值，能够很好的模拟滑行艇船模在规则波中的运动规律。

(a) $\lambda = 1.9\text{m}$

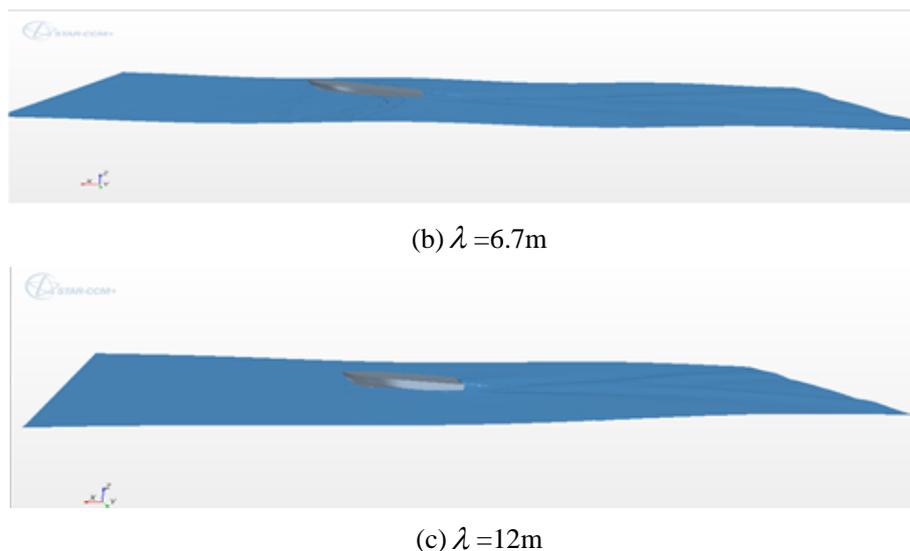


图 4.2 不同波长下自由液面

上图为三个典型波长下自由液面捕捉情况，从图中可以看到，对于运动姿态以及自由液面波高的捕捉与实际情况相符，能够较好地反映滑行艇在规则波中运动响应。

5 结论

本文针对滑行艇在规则波中的运动响应使用 STAR CCM+软件结合六自由度模块进行了数值模拟，并将计算结果和试验结果进行了对比，得到以下结论：

- 1、通过 CFD 方法对滑行艇耐波性能进行研究具有可行性，能够对滑行艇在规则波中的运动规律进行定性分析。
- 2、未来应开展对滑行艇耐波性计算的网格以及数值方案研究，进一步地提高计算精度。

5 参考文献

- [1] 董祖舜. 快艇动力学. 华中理工大学出版社. 1991
- [2] 张楠, 沈泓萃, 姚惠之. 潜艇阻力与流场的数值模拟与验证及艇型的数值优化研究. 船舶力学. 2005, 9(1):1-13 页
- [3] F. R. Menter, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications". AIAA Journal, V32, pp. 1598-1605, 1994.