

# 基于 CFD 的起重船水动力系数数值模拟

黄常青 王学林 胡于进

华中科技大学, 武汉, 430074

**摘要:** 利用 CFD 方法计算了起重船船体垂荡、横荡和横摇运动的附加质量与附加阻尼。讨论了滑动面和流场的混合网格模型应用。进行了船模静水横摇试验, 测量了起重船体横摇运动的附加质量与附加阻尼, 比较了试验结果与数值计算结果, 对起重船水动力系数的理论预报做了有益探讨。

**关键词:** 起重船; CFD; 数值流场; 附加质量; 附加阻尼

**中图分类号:** U661.3

**文章编号:** 1004-132X(2011)17-2076-04

## Numerical Simulation of Hydrodynamic Coefficients of Crane Ship Based on CFD

Huang Changqing Wang Xuelin Hu Yujin

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

**Abstract:** In order to estimate the added mass and damping of a crane ship, the numerical simulation of the heave, sway and roll motion of the ship was performed based on CFD theory. The sliding faces and the mixed grid approach were used herein. A hydrostatic roll experiment of ship model was carried out. Comparing the experimental measurement with numerical results, the feasibility of CFD simulation used to predict the hydrodynamic coefficients of the crane ship is demonstrated.

**Key words:** crane ship; computational fluid dynamics(CFD); added mass; added damping

## 0 引言

船舶水动力系数是准确预报船舶在波浪中运动情况的基础。计算船舶运动时的附加质量与附加阻尼的常用方法有切片理论、细长体理论、频域理论及相应的各种改进方法。这些方法都是基于线性势流理论建立的, 但是由于线性势流理论没有考虑黏性和非线性的影响, 如果不给予修正, 船舶运动情况的预报精度将受影响, 因此在工程应用上, 常采用基于试验获得的经验公式或半经验公式对运动计算加以修正。船舶附加质量与附加阻尼试验方法主要有两种: 一种是船舶摇摆的自由衰减试验, 但是该试验只能得到在固有频率处的船舶附加质量和阻尼, 缺乏频率的相关性; 另一种是船舶的强迫振荡运动试验, 这种方法虽能给出多个频率下的附加质量、阻尼及水动力系数, 但是受到试验船模的限制, 并且对设备和测试系统要求很高, 对此, 有许多学者仍致力于试验测试系统的研究。

基于计算流体动力学(CFD)理论的船舶水动力学数值模拟, 因为具有费用低、无触点流场测量、可获得较为详细的流场信息、能消除物理模型中由传感器尺寸及模型变形等因素对流场的影响等优点而广受关注, 应用范围越来越广<sup>[1-2]</sup>。采用数值模拟方法对船舶水动力系数进行计算, 对船舶动力及外界环境影响进行建模, 已应用于潜艇<sup>[3-5]</sup>、两栖车辆等的计算<sup>[6-7]</sup>中。

本文以 CFD 理论为基础, 基于三维数值水池的船舶水动力系数分析方法, 建立了起重船及流场的数值计算模型, 用 Fluent 软件对起重船模型的受迫振荡进行了数值模拟。通过对比船模静水横摇试验的试验值来评价起重船在横摇固有频率下的附加质量计算模型。

## 1 基本理论和数值方法

### 1.1 控制方程与湍流模型方程

本文采用有限体积法对流场的微分方程进行离散。控制方程在移动网格中的积分表达式<sup>[4]</sup>为

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_{\partial V} (U - u_s) dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_{\partial V} (U - u_s) dS =$$

$$\int_V \nabla \cdot (\mu \nabla U) dV + \int_V \rho f dV - \int_V \nabla \cdot p dS - \int_{\partial V} \rho \overline{U'_i U'_j} dS \quad (2)$$

式中,  $\rho \overline{U'_i U'_j}$  为雷诺应力张量;  $\overline{U'_i U'_j}$  为雷诺应力项;  $u_s$  为网格表面的速度; 其他变量符号含义参见文献<sup>[4]</sup>。

湍流模型采用的是  $k-\epsilon$  双方程模型, 是在标准  $k-\epsilon$  模型基础上分别增加了与湍流速度和湍流长度尺度有关的两个偏微分方程的湍流模型, 最典型的双方程模型是在单方程模型的基础上, 新引入一个关于耗散率  $\epsilon$  的方程, 该模型是目前使用最广泛的湍流模型<sup>[3]</sup>。在该模型中, 表示湍流耗散率的  $\epsilon$  定义为

$$\epsilon = \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left( \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \mathbf{u}_i \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_i}{\sigma_1} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right) + v_i \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \mathbf{u}_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_i}{\sigma_2} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\epsilon}{\kappa} - C_2 \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (5)$$

$$v_i = C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon}$$

其中,  $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_1 = 1.0, \sigma_2 = 1.3$ , 这些都是经验常数,  $\epsilon$  表示耗散率,  $\kappa$  表示湍流动能,  $\rho$  为液体密度,  $\mu$  为黏性系数,  $u'_i$  为脉动速度,  $\bar{u}_i$  为平均速度,  $\mathbf{u}_i$  为速度向量。  $\kappa$  方程和  $\epsilon$  方程与连续方程、动量方程一起, 构成了求解流动问题的基本控制方程组。

关于时间积分的处理方法有很多种, 本文模拟中采用 Euler 隐式算法和 Backward 差分方法<sup>[4]</sup>。

Euler 隐式方法:

$$\frac{(\rho_p \phi_p V_P)^n - (\rho_p \phi_p V_P)^0}{\Delta t} + [\sum F \phi_f - \sum (\rho \Gamma_\phi)_f]^n = [S_u V_P + S_P (V_P \phi_P)]^n$$

Backward 差分方法:

$$\frac{\frac{3}{2}(\rho_p \phi_p V_P)^n - 2(\rho_p \phi_p V_P)^0 + \frac{1}{2}(\rho_p \phi_p V_P)^{\infty}}{\Delta t} + [\sum F \phi_f - \sum (\rho \Gamma_\phi)_f S(\nabla \phi)_f]^n = [S_u V_P + S_P (V_P \phi_P)]^n$$

式中各变量符号意义见文献[4]。

### 1.2 网格的生成与滑动网格

网格质量对 CFD 计算的精度和效率有着决定性的影响, 因此, 流场模型网格的划分在 CFD 计算中是很重要的。本文采用了混合网格模型, 整个流场分为外流场和起重船附近的流场, 如图 1 所示。

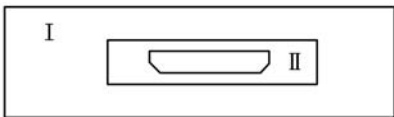


图 1 纵剖面网格分区示意图

图 1 中, I 区为外流场, II 区为船体附近的流场。对于外流场 I, 由于计算区域很大, 而且远离船体, 流场的区域为规则形状, 故采用了结构化的网格, 适当地增大网格尺寸, 可减少网格的数量, 且结构化网格数据结构简单, 可以缩短计算时间, 提高效率。对于起重船船体附近的流场 II, 采用适应性较强的非结构化网格, 船体周围的网格也划分得较为细密, 能比较实际地反映流场的湍流情况, 计算结果更加准确。

由于流场网格的分区划分, 外流场的网格尺寸相比船体附近的流场网格尺寸大很多, 所以在两部分区域的网格界面处属于外流场的网格交

界面网格较为粗糙, 而流场 II 的界面网格划分得相对细密。由于本文关心的主要是船体周围的流场, 故为了节省计算时间, Fluent 在计算时采用滑动网格计算模型。

由于网格的区域划分, 在外流场和船体附近流场的界面会存在如图 2 所示的情形, 分界面区域由 AB 面、BC 面、DE 面和 EF 面组成, 面与面的交界处产生 ad 面、db 面、be 面、ec 面、cf 面。其中, 重叠的部分是 db、be、ec。采用滑动网格模型进行计算, 在计算进出分界面 IV 单元的流量时, 用 db、be 两个面代替 DE 面。同理, 计算 VI 单元的进出流量时, 用 ec、cf 两个面代替 EF 面。这样就增大了在界面处的离散度, 在网格划分密集程度不一样而产生的网格不一致的情况下, CFD 计算仍然能进行而且能保证比较准确的计算结果。

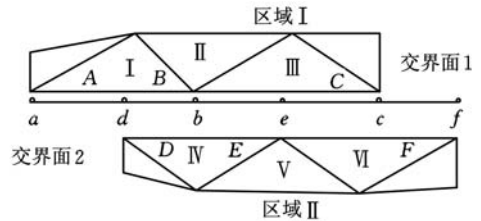


图 2 两区域网格结合示意图

边界条件为: 流场上端面设置为压力出口条件, 船体、船池侧壁面、船池底面设置为壁面边界。采用 SIMPLE 算法进行流场的压力、速度的模拟计算, 采用二阶迎风差分算法离散对流项和扩散项, 动量方程中的瞬态项采用二阶隐格式差分格式, 采用流体体积函数 (VOF) 方法来追踪自由面波动, 起重船的强迫运动采用 Fluent 中的 UDF 实现。

### 2 起重船水动力系数的计算

起重船船体水动力系数的数值模拟计算方法借鉴了在实际船池中对起重船模型进行的强迫振荡运动试验。数值计算方法比在实际船池中进行的强迫振荡试验更加容易控制, 更容易实现数据的采集、测量。本文采用一起重船模尺寸进行计算。设船体只做单一模态的强迫振动, 如起重船做横荡运动时, 设: 横荡位移  $\xi_1 = A_0 \sin \omega t$ , 横荡速度  $\dot{\xi}_1 = A_0 \omega \cos \omega t$ , 横荡加速度  $\ddot{\xi}_1 = -A_0 \omega^2 \sin \omega t$ 。其中,  $A_0, \omega$  分别为起重船做横荡运动的幅值和频率。其他运动如垂荡、横摇运动与此类似。在数值模拟计算时, 对于船体所受到的单一模态强迫振动, 以速度的方式通过 UDF 导入到 Fluent 中进行计算, 即给定船体周期性运动速度  $\dot{\xi}_1 = A_0 \omega \cos \omega t$ 。

通过对振荡运动的船体周围流场的数值模拟计算,获得力(矩)的时间历程,再进行相位分解,便可得到船体横荡的附加质量  $\Delta_{11}$  和附加阻尼  $B_{11}$ <sup>[4]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{11} &= \frac{F_0}{A_0 \omega^2} \\ B_{11} &= -\frac{F_0 \sin\theta}{A_0 \omega} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中,  $F_0$  为船体受迫振动时流体力的幅值;  $\theta$  为阻力滞后位移的相位。

当船体做纯横荡运动时,可以获得横荡附加质量和附加阻尼。用同样的方法可以获得“纯垂荡”,“纯纵荡”,“纯横摇”,“纯纵摇”时的附加质量和附加阻尼。本文计算中横荡时取  $A_0 = 0.01\text{m}$ ,横摇时取  $A_0 = 0.07\text{rad}$ 。

图 3 和图 4 所示是取不同频率时,船模垂荡运动时的垂荡力和横摇时的横摇力矩的时间历程。

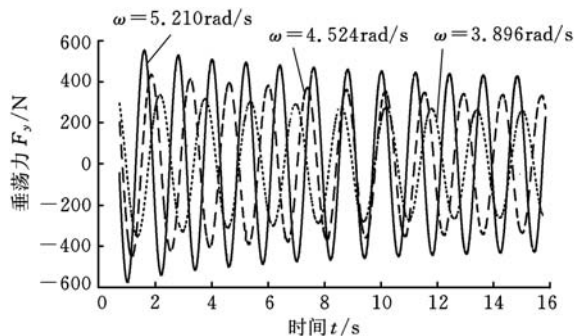


图 3 起重船垂荡力时间历程

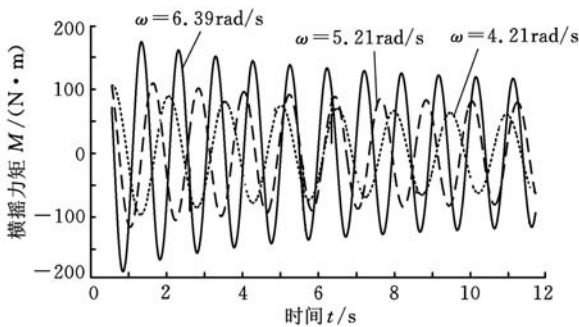


图 4 起重船横摇力矩时间历程

图 5~图 10 所示是船舶在不同激励频率下做横荡、横摇、垂荡运动时的无因次化附加质量和附加阻尼的计算结果。其中,附加质量和附加阻尼的无因次化方法如表 1 所示<sup>[8]</sup>,其中,  $\rho$  表示水

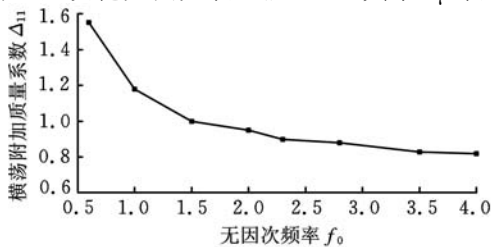


图 5 横荡附加质量系数

的密度;  $V$  表示船模排水体积;  $L$  是船体长度;  $g$  表示重力加速度。频率的无因次化是在给定的  $\omega$  值上乘以  $\sqrt{g/L}$ 。

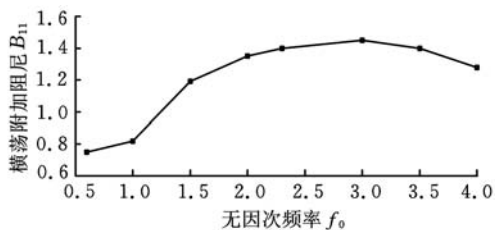


图 6 横荡附加阻尼

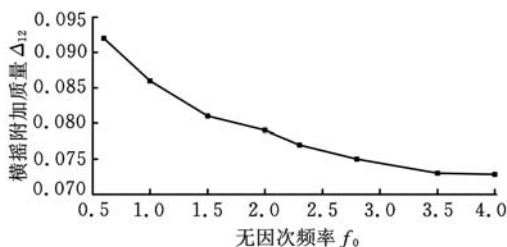


图 7 横摇附加质量

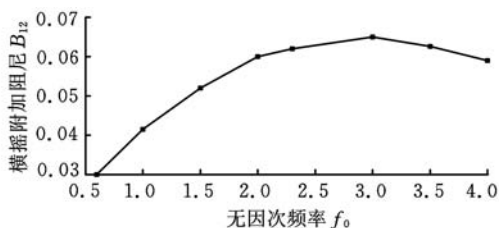


图 8 横摇附加阻尼

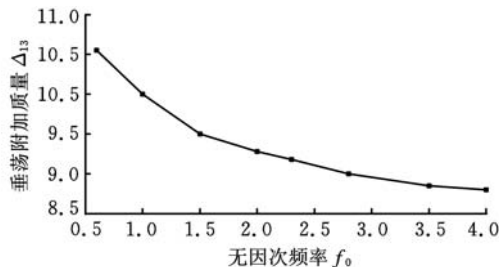


图 9 垂荡附加质量

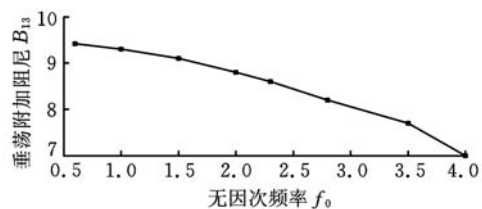


图 10 垂荡附加阻尼

表 1 无因次化方法

自由度	无因次方法	
	附加质量	附加阻尼
横荡	乘 $\frac{1}{\rho V}$	乘 $\frac{(gL)^{1/2}}{\rho g V}$
垂荡	乘 $\frac{1}{\rho V}$	乘 $\frac{(gL)^{1/2}}{\rho g V}$
横摇	乘 $\frac{1}{\rho V L^2}$	乘 $\frac{(gL)^{1/2}}{\rho g V L^2}$

### 3 船模横摇水动力系数测试

本文试验所用的起重船模型主体尺寸按某起重船尺寸 1/50 缩小。如图 11 所示,船模由船体、起重基座、吊臂、吊重 4 个部分组成。固定于船体中心附近的陀螺仪和激光跟踪仪分别用来测定起重船模型的横摇角和船体的运动轨迹。船模试验在华中科技大学船池进行。

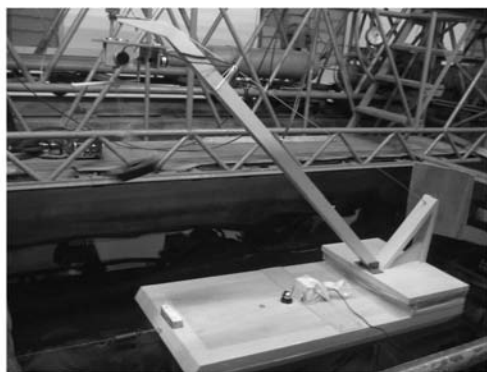


图 11 测试用船模

试验用船模的主要尺度如表 2 所示。

表 2 起重船模型主尺度

船长 $L$ (m)	型宽 $B$ (m)	吃水 $d$ (m)	排水量 $D$ (kg)	重心高 $Z_g$ (m)
1.32	0.612	0.062	43.950	0.140

在零航速下作用于船模一个瞬时的横倾力矩,使船模在最大的横倾角做复位的横摇衰减运动,使用陀螺仪实时记录下横摇角的变化,测定船模在静水中横摇衰减运动的固有周期  $T$ ,从而可以得到附加水质量惯性矩  $\Delta_{44}$ <sup>[7]</sup>:

$$\Delta_{44} = \rho \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 Vgh - I_x \quad (7)$$

式中, $h$  为船模的初稳高; $I_x$  为船模的横摇转动惯量。

使用陀螺仪测得船模静水横摇衰减曲线,测得静水横摇周期  $T=1.69\text{s}$ ,则船舶模型的横摇固有频率  $\omega=3.716\text{rad/s}$ 。

试验测得起重船模  $h=0.40\text{m}$ ,计算得到船模的转动惯量  $I_x=4.7\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。由式(7)算得  $\Delta_{44}=7.79\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。乘上横摇附加转动惯量无因次化系数,得到船模横摇附加转动惯量的值为 0.101。根据图 7 横摇附加质量的 CFD 计算结果,得到固有频率  $\omega=3.716\text{rad/s}$  处附加质量为 0.078。计算结果和静水横摇试验结果比较,数值计算得到起重船模型的横摇附加转动惯量较大,造成这种误差的原因主要有两个:一是在进行 CFD 模拟时,使用的是强迫运动,测量采用自由衰减;二是试验中的附加水质量惯性矩是间接获得的,还包括其他影响因素。此外,计算模型和物理模型的缩尺比例也有差别,对计算结果有一定影响,这些

问题有待进一步探讨。

在静水横摇衰减试验中,通过船舶横摇振荡的衰减曲线,测得起重船模在固有频率下的阻尼系数为 0.0565;从图 8 中得到固有频率  $\omega=3.716\text{rad/s}$  处的阻尼系数为 0.054。

CFD 计算克服了试验结果只能得到在共振频率处的船舶附加质量和附加阻尼,缺乏频率相关性的缺点,较好地解决了船舶水动力系数随波浪频率的非线性问题。

### 4 结束语

本文以 CFD 理论为基础,建立了起重船水动力系数计算模型。就某起重船的缩小模型,对船体给予谐受迫振荡运动,模拟出了船体附近的流场情况,求得船舶水动力系数。同时测量了船模横摇水动力系数。结果表明 CFD 方法具有良好的适应性,与实际物理模型试验相比,基于 CFD 的方法具有易测量和易控制等优点,对起重船舶水动力系数的计算具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 郭海强,朱仁传,缪国平,等. 数值波浪水池中船舶水动力系数测试与分析技术[J]. 中国造船,2008,49(2):58-64.
- [2] 朱仁传,郭海强,缪国平,等. 一种基于 CFD 理论的船舶附加质量与阻尼计算方法[J]. 上海交通大学学报,2009,43(2):198-203.
- [3] 詹成胜,刘祖源,程细德. 潜艇水动力系数数值计算[J]. 船海工程,2008,6(3):1-4.
- [4] 庞永杰,杨路春,李宏伟,等. 潜水水动力导数的 CFD 计算方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2009,8(4):903-908.
- [5] 林小平,刘祖源,程细德. 操纵运动潜艇水动力计算研究[J]. 船海工程,2006,35(3):12-15.
- [6] 徐国英,王涛,齐永胜. 基于 CFD 的两栖车绕流场模拟[J]. 船舶,2005,4(2):21-24.
- [7] 王仁康,刘家新,杨克俭. 工程船舶横摇水动力系数实验与研究[J]. 船舶工程,1987(3):3-11.
- [8] 王学亮,董艳秋,张艳芳. 大型起重船水动力系数的研究[J]. 中国海上油气(工程),2003,15(5):12-15.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:黄常青,男,1987 年生。华中科技大学机械科学与工程学院硕士研究生。主要研究方向为动力系统分析与 CFD 仿真。王学林,男,1963 年生。武汉华中科技大学机械科学与工程学院教授、博士研究生导师。胡于进,男,1958 年生。武汉华中科技大学机械科学与工程学院教授。