

FLUENT 计算任意二维剖面受迫振荡水动力

程红霞¹ 李积德²

(1 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082;

2 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 利用 FLUENT 求解二维任意剖面在深水中垂向强迫振荡问题。将矩型剖面的垂向非定常水动力计算结果与实验值两者进行比较, 结果吻合。在此基础上计算加装组合附体的船型剖面的辐射力, 验证了组合附体减纵向运动 (文中为“垂荡”) 的效果, 对深化组合附体优化设计具有重要的参考价值。

关键词: FLUENT; 计算流体力学; 水动力计算

中图分类号: U661.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-3185(2007)01-30-04

Forced-Heaving Hydrodynamic Computation of any Two-Dimensional Section by FLUENT

Cheng Hong-xia¹ Li Ji-de²

(1 China Ship Science Research Center, Wuxi 214082, China;

2 School of Shipbuilding Engineering, Harbin Eng Univ., Harbin 150001, China)

Abstract: The author solved the forced-heave of any two dimensional section in the deep water by FLUENT, based on VOF and dynamesh technique. The work of computing unsteady hydrodynamics forces of rectangle section with heaving was done, and the results were tallied with test ones. Furthermore the ship sections with built-up appendage and radiated effect of reducing longitudinal motion-heave were calculated. The work was important in the optimization design of the built-up appendage.

Key words: FLUENT; computational fluid dynamics; hydrodynamic computation

1 引 言

随着计算机技术的推广普及和计算方法的新发展, 计算流体力学 (CFD) 技术几十年来取得了蓬勃的发展。由于数值模拟相对于实验研究有很独特的优点, 比如成本低、周期短, 能获得完整的数据, 能模拟出实际运行过程中各种所测数据状态, 目前 CFD 技术在工程领域已得到了广泛的应用。

FLUENT 是目前国际上比较流行的商用 CFD 软件包, 在美国的市场占有率超过 60%, 涉及流体、热传递以及化学反应等众多领域。它具有丰富的物理模型、先进的数值方法以及强大的前后处理功能, 在航空航天、汽车设计、石油天然气、涡轮机设计等方面都有着广泛的应用。FLUENT 在石油天然气工业上的应用包括: 燃烧模拟、井下分析、喷射控制、环

境分析、油气消散/聚积、多相流、管道流动等等。近几年它在船舶流体动力计算方面的应用也越来越广泛。

物体在自由水表面附近作振荡运动的二维兴波及有关的水动力学问题的研究, 是解决船舶运动及很多海洋工程问题的基础。二维水动力的计算对研究船舶的纵向运动有着重要影响。迄今为止, 深水二维水动力的计算一般都用二参数或多参数的保角变换方法, 或者用 Frank 源分布方法。Frank 方法直观方便, 但是该方法将问题简化为线性势流理论的边值问题求解, 只适合于计算粘性效应影响弱的剖面水动力。而 FLUENT 则进一步考虑到流体的粘性, 能够计算粘性效应影响较强的诸如有半潜首及组合附体 (半潜首及艏鳍) 的二维剖面的水动力, 本文尝试了用 FLUENT 来计算二维剖面的水动力问题。

收稿日期: 2006-12-11

作者简介: 程红霞 (1981-), 女, 硕士。研究方向: 小水线面船、地效翼船等高性能船舶的水动力学性能研究

2 研究对象描述

本文利用了 4 个模型——矩形(宽 0.4 m,吃水 0.2 m)、某船、该船加半潜首及该船加装组合附体共 4 个剖面,如图 1 所示。后 3 个剖面吃水均为 3 m,水深 25 m。

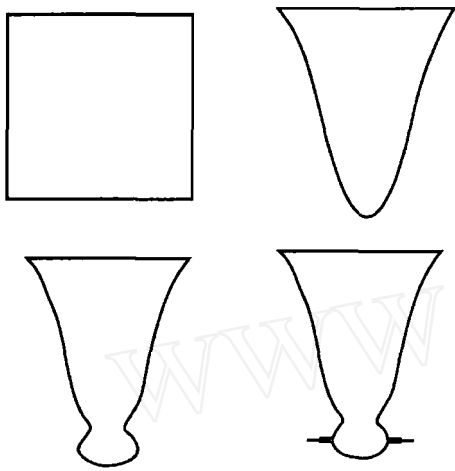


图 1 剖面

3 计算方法

3.1 计算模型

本文采用 $k-\epsilon$ 湍流模型,VOF 方法捕捉自由表面,通过 UDF 编程,运用动网格(dynamesh)技术,给定速度进口边界条件,通过求解连续性方程、运动方程、能量方程及 $k-\epsilon$ 方程,获得湍流特征量,按时间步长迭代计算。

1) 连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

2) 运动方程:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) \\ &= X_i \frac{\partial \bar{p}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) \end{aligned} \tag{2}$$

3) 能量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\rho}{2} u_i u_i \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[u_j \cdot \frac{\rho}{2} u_i u_i \right] = \\ & - \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (p + h)] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) u_i \right] - \\ & \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \end{aligned} \tag{3}$$

4) $k-\epsilon$ 方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] +$$

$$\begin{aligned} & V \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial}{\partial x_i} \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} - C_2 \frac{k^2}{k} \end{aligned} \tag{4}$$

式中, k 为湍流脉动动能; $k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i}$; 为湍流动能耗散率; $\epsilon = \overline{\left(\frac{\partial u}{\partial x_j} \right)^2}$; $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ 。

“标准型 $k-\epsilon$ 二方程湍流模型”至今已在工程科学领域广泛范围的流动数值计算中应用,并得到了很大的成功^[6]。模型常数(经验系数)的取值为:

$$\begin{aligned} C_\mu &= 0.09 \quad C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \\ \sigma_k &= 1.0 \quad \sigma_\epsilon = 1.3^{[7]} \end{aligned}$$

3.2 计算域及边界条件

3.2.1 计算域

上游边界距物面最前端约为物面 10 倍宽;下游边界距物面最后端约为物面 10 倍宽;顶部距物面最顶端约为物面 7 倍高;底部距物面最低端约为物面 7 倍高。

3.2.2 边界条件

顶部为压力入口边界条件;上游、下游和底部均简化定义为壁面边界条件;矩形及船表面定义为滑动壁面边界条件(moving wall),采用 UDF 编程接口。

3.3 网格生成

对前述的 4 个剖面,采用非结构化网格技术,运用 GAMBIT 生成网格。其计算的网格数分别为 5 872, 15 388, 17 092, 18 830。网格的划分如图 2 所示,采用尺寸函数(size function)给物面附近网格加密。

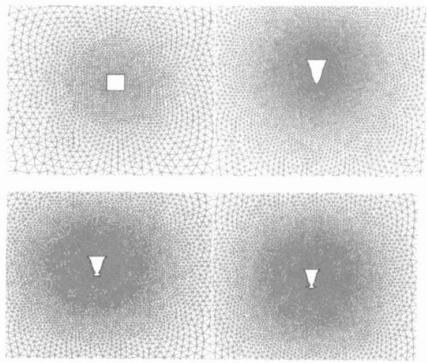


图 2 网格生成

4 计算结果及分析

4.1 矩形剖面计算及结果比较分析

在下文中,实验^[1]的垂向水动力计算所采用物理量有:矩形宽 B 、吃水 D 、垂荡频率 ω 、垂荡附加质量 μ_{33} 、垂荡阻尼系数 μ_{33} 、垂荡幅值为 A 、初相位 ϕ_0 。

垂荡位移为 Z 表达式:

$$Z=A\cos(\omega t+\phi_0)$$

垂荡速度 \dot{Z} 表达式:

$$\dot{Z}=-A\omega\sin(\omega t+\phi_0)$$

垂荡加速度 \ddot{Z} 表达式:

$$\ddot{Z}=-A\omega^2\cos(\omega t+\phi_0)$$

辐射力:

$$F_Z=-\mu_{33}\ddot{Z}-\mu_{33}\dot{Z}$$

恢复力:

$$F_S=-gBZ$$

垂向非定常力:

$$F=F_Z+F_S$$

矩形剖面振荡的幅值为 0.001 m ,无因次频率 $\bar{\omega}=\sqrt{B/2g}$,分别取 $0.20,0.25,0.30,0.50,0.75$ 。矩形剖面计算的垂向非定常水动力与实验值进行了比较,如图3~图7所示:

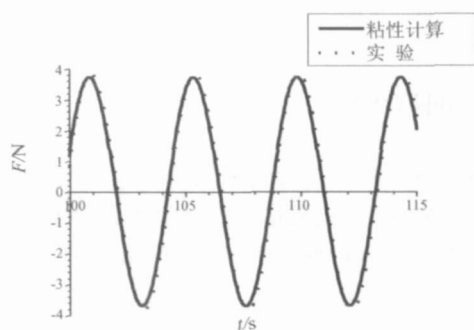


图3 矩形剖面 $\bar{\omega}=0.20$ 时垂向非定常水动力

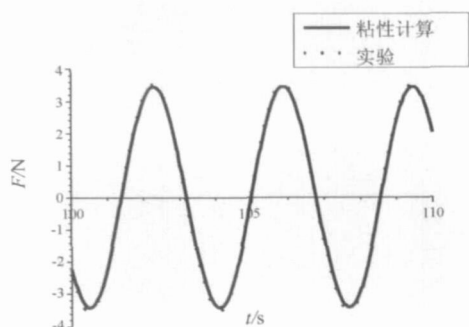


图4 矩形剖面 $\bar{\omega}=0.25$ 时垂向非定常水动力

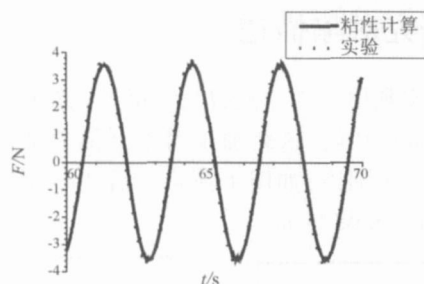


图5 矩形剖面 $\bar{\omega}=0.30$ 时垂向非定常水动力

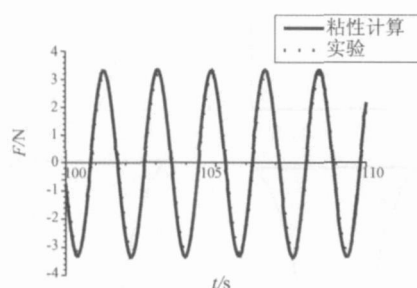


图6 矩形剖面 $\bar{\omega}=0.50$ 时垂向非定常水动力

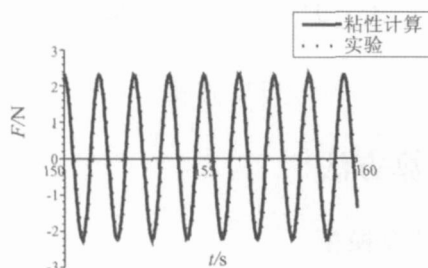


图7 矩形剖面 $\bar{\omega}=0.75$ 时垂向非定常水动力

从以上系列图中可以看出,用 FLUENT 计算的矩形剖面结果与实验值很接近。但矩形剖面是受粘性影响较弱的剖面,下文则通过对某船的剖面的辐射力计算,来验证 FLUENT 可以计算受粘性影响较强的剖面。

4.2 船型剖面计算及分析

鉴于上述结果,本文对某船及其改装的3个剖面的辐射力 (F_Z) 进行了计算 (ω 为振荡频率),给出4个频率结果。各剖面振荡幅值为 0.01 m ,如图8~图11所示。

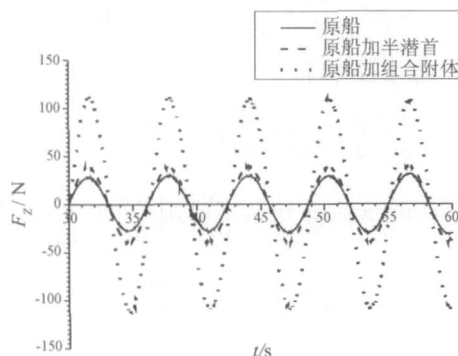


图8 某船原剖面装半潜首及加装组合附体 $\omega=1$ 时辐射力

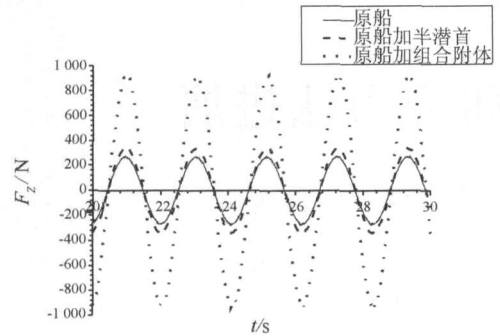


图 9 某船原剖面加装半潜首及加装组合附体 $\omega = 3$ 时辐射力

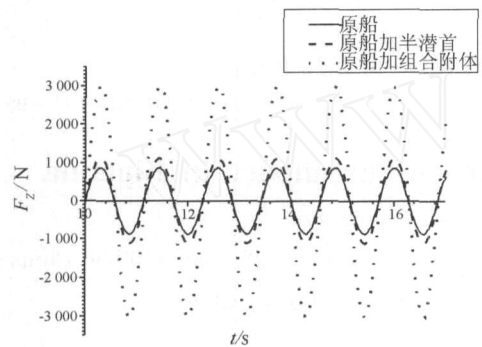


图 10 某船原剖面加装半潜首及加装组合附体 $\omega = 5.5$ 时辐射力

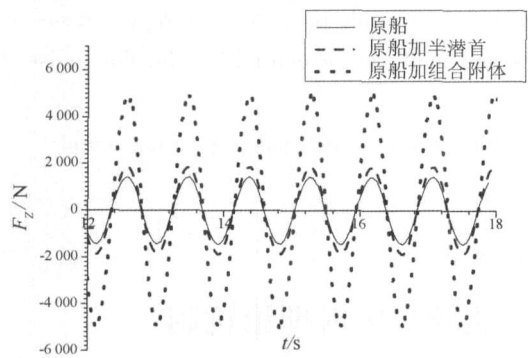


图 11 某船原剖面加装半潜首及加装组合附体 $\omega = 7$ 时辐射力

本文提出的减纵摇组合附体,是采用倒三角翼型和椭圆剖面流线型半潜体。加装该组合附体后可以显著地抑制船舶的纵向运动,船舶的纵向稳定力矩由艏鳍和半潜体共同承担,鳍安装于半潜体上,沉深较大,不易引起鳍出水。理论及以往

试验结果表明,减纵摇组合附体结构合理,强度满足工程要求,不会诱发船体振动,阻力性能良好,减摇效果显著。

用 FLUENT 计算船二维剖面水动力反映了加装半潜首后剖面水动力有所增加;而加装组合附体后水动力急剧增加。这说明组合附体可以显著减小船的垂荡,这与理论及以往的试验结果一致。这为船型设计及船舶的耐波性研究提供了重要依据。同时,船舶加装半潜首的剖面 and 组合附体的剖面,均是受粘性影响较强的,可见 FLUENT 可以计算类似这样的二维剖面的水动力,具有一定的工程价值。

5 结 论

通过对矩形、某船、给该船加装半潜首及加装组合附体共 4 个剖面的计算,可以得出如下结论: FLUENT 软件可以用来计算任意二维剖面受迫振荡的水动力,其计算方便,结果准确,值得在船舶设计与研究领域推广应用。目前,还有待进一步深化研究的问题是能否用 FLUENT 计算三维物体振荡的水动力、半潜首的优化设计以及如何提高 FLUENT 计算结果的精度等。

参考文献

[1] 刘应中, 缪国平. 船舶在波浪上的运动理论 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.

[2] 邢福, 吴宝山. 全部件地效翼船近地面粘性流场数值模拟 [C]. 第十届全国海事技术研讨会文集, 2005.

[3] 朱宇. FLUENT 软件在飞机进气道内流的应用 [C]. FLUENT 第一届中国用户大会论文, 2002.

[4] 杜军, 饶文涛, 朱彤. CHD 在蓄热式烧嘴设计上的应用 [J]. 工业加热, 2002 (3): 29 - 31.

[5] 张艳英, 苏杰先. 多维流场的贴体网格生成方法 [J]. 空气动力学学报, 1998, 20 (3): 78 - 82.

[6] 程红霞. 单体复合船型水动力计算研究 [D]. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2005.

[7] 杜拥军. 穿浪双体船加装组合附体优化设计 [D]. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2004.

[8] FLUENT 6.1 User's Guide, 2003.