

75,000 吨散货船模型阻力、流场数值计算

吴乘胜, 朱德祥, 顾民, 蒋乾伟

(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要: 本文采用 RANS 方程和 RNG $k-\varepsilon$ 二方程湍流模型对带自由表面的散货船模型的阻力及流场进行数值计算, 其中自由面采用 VOF 方法处理。数值计算时, 使用有限体积法离散控制方程, 对流项采用二阶迎风差分格式, 扩散项采用中心差分格式, 对一艘方形系数为 0.83 的 75,000 吨散货船模型进行一系列速度下阻力、流场、兴波的数值计算, 并与在中国船舶科学研究中心拖曳水池进行的模型试验结果进行了比较, 计算结果令人满意, 能够满足船型优化及性能预报等方面的工程应用要求。

关键词: 湍流模型; 阻力; 流场; 兴波; 数值计算

中图分类号: U661.31⁺1

1 引言

运用 CFD 技术研究、解决船舶流体力学领域的问题由来已久, 其中关于船舶自由面绕流的阻力和流场的数值计算得到了广泛的关注。在这类数值计算中, 早期大多采用势流方法, 不考虑粘性的影响, 计算船舶的兴波阻力, 如 Dawson 方法^[1]; 这种方法对于比较尖瘦的船型如 Wigley 船的兴波阻力可以得到相当精确的预报。由于势流方法计算速度快, 便于进行大量的数值计算, 并且对计算机硬件条件要求较低, 因此目前仍然被广泛应用^[2, 3]。

多年来, 一些研究人员也采用粘性理论对船舶自由面绕流进行数值计算, 如使用 RANS (Reynold Averaged Navier-Stokes) 方程, 结合适当的湍流模型, 并采用一定的方法处理自由面。文献[4]~[6]采用上述方法对不同的船型进行了数值计算, 结果总体上令人满意; 但对于某些方形系数较大的船型, 在一定速度下存在较大误差^[7]。

本文采用 RANS 方程和 RNG $k-\varepsilon$ 二方程湍流模型对一 75,000 吨散货船模型的流场、阻力和兴波进行数值计算, 其中自由面采用 VOF (Volume of Fluid) 方法处理。计算所得模型阻力与中国船舶科学研究中心拖曳水池进行的模型试验相比较, 结果相当吻合, 能够满足船型优化及性能预报等方面的工程应用要求。

2 数学模型和控制方程

船舶自由面绕流中, 自由面的处理和追踪是关键问题之一。20 世纪五六十年代以来, 自由面的数值模拟方法得到了快速发展, 出现了很多处理和追踪自由面的方法, 比较典型的有: PIC (Particle In Cell) 方法、MAC (Marker And Cell) 方法、VOF (Volume Of Fluid) 方法和 L-S (Level Set) 方法等等。近年来, VOF 方法和 L-S 方法应用较多。

本文采用 VOF 方法处理和追踪自由面。VOF 方法有着很明显的物理意义: 把自由面流动看作多相流动——这里是水和空气的两相流动, 自由面就是水和空气的交界面。一般认为水是不可压缩流体;

此外由于速度比较低，空气也作为不可压缩流体处理。

2.1 制方程

不可压缩流体的连续性方程为：

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

其中 \vec{V} 为速度矢量。

水的体积分数方程为：

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \alpha_w = 0 \quad (2)$$

计算区域内的每个控制体积都由水和（或）空气充满，它们的体积分数之和应为 1，即：

$$\alpha_w + \alpha_a = 1 \quad (3)$$

其中 α 表示体积分数，下标 a 和 w 分别代表空气和水。

两相流同样要满足动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T)] + \rho \vec{g} \quad (4)$$

其中： ρ 为流体密度； μ 是粘性系数； \vec{g} 为重力加速度； p 是压力。

2.2 湍流模型

RNG $k - \varepsilon$ 二方程模型是使用 “Renormalization Group (RNG)” 的数学方法，从 Navier - Stokes 方程导出的，其表达式如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \vec{V}) = \nabla \cdot (c_k \mu_{eff} \nabla k) + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{V}) = \nabla \cdot (c_\varepsilon \mu_{eff} \nabla \varepsilon) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (6)$$

下面给出上两式中各系数的表达形式（或值）。

湍流粘性系数 $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ；由 RNG 理论可得 $C_\mu = 0.0845$ 。

G_k 表示由时均速度的梯度产生的湍流动能，可以用下式表示：

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (7)$$

其中， $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ ， $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$

而 R_ε 则可表示为：

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (8)$$

其中： $\eta = Sk/\varepsilon$ ， $\eta_0 = 4.38$ ， $\beta = 0.012$ 。

常数 $c_k = c_\varepsilon \approx 1.393$ ； $C_1 = 1.42$ ， $C_2 = 1.68$ 。

2.3 边界条件

计算区域的边界包括：入口、出口、船体和对称面，这些边界条件的具体设置如下：

a. 在入口边界上，给定入口流动速度及水和空气的体积分数；

- b. 出口边界距离船体足够远，认为流动是充分发展的；
 - c. 在船体表面，定义无滑移边界条件；
 - d. 在对称面上，满足对称条件。
- 以均匀流场作为计算的初始条件。

3 研究对象

计算的 75,000 吨散货船模型曾于 2003 年 7 月在中国船舶科学研究中心深水拖曳水池进行过试验，其主尺度见表 1（缩尺比为 1: 33.2）。本文计算了吃水 0.37651m 时 1.20m/s、1.25m/s、1.30m/s、1.35m/s 和 1.40m/s 等不同速度下船模的静水阻力、兴波和流场，对应的傅汝德数分别为 0.149、0.155、0.161、0.167、0.173。由于问题的对称性，计算中在横向只取船模的一半进行研究。

表1 75,000吨散货船实船和模型主尺度（单位：m）

	总长	设计水线长	型宽	设计吃水
实船	225	220.75	32.26	12.5
模型	6.784	6.6491	0.9716	0.37651

4 数值计算

4.1 离散格式

控制方程使用基于单元中心的有限体积法离散，其中对流项采用二阶迎风差分格式，扩散项采用中心差分格式；压力与速度的耦合使用 SIMPLE 算法，离散得到的代数方程使用 Gauss-Seidel 迭代求解；使用多重网格技术加速解的收敛。

4.2 计算区域及网格划分

本文的研究对象具有对称性，因而在计算中只取船体的一半进行研究。

计算区域的边界包括以下几个部分（L 代表模型水线长）：

- a. 入口——模型艏部前约 0.7L 处；
- b. 出口——模型艉部后约 2.0L 处；
- c. 侧边界——模型侧方约 1.0L 处；
- d. 上边界——水线以上约 0.2L 处；
- e. 下边界——水线以下约 1.0L 处；
- f. 对称面——模型对称面；
- h. 船模表面。

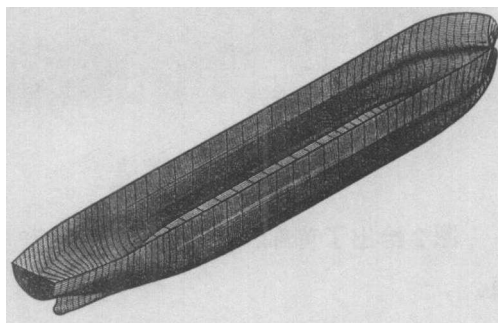


图 1 船模表面网格

网格划分的原则为：船模艏部和艉部网格适当加密，中部网格较为稀疏；在船模表面附近网格加密，其中第一层网格间距根据 y^+ 确定（ $y^+ \approx 30 \sim 60$ ），还要保证边界层内网格数约为 10 个左右；计算区域网格总数约为 300,000。图 1 为船体表面网格。

5 计算结果及对比分析

计算中,坐标轴的定义为: X 轴指向下游, Z 轴垂直水平面向上, Y 轴指向右舷,坐标的原点位于船体舭剖面、纵舭剖面和静水面的交点。

计算所得阻力系数见表 2,包括压差阻力系数、摩擦阻力系数和总阻力系数,表中同时还给出了试验结果。从表中可以看出,计算所得总阻力系数与试验值吻合得相当好,平均差别 2% 左右;而计算所得摩擦阻力系数比使用 ITTC'57 公式估算的摩擦阻力系数小。原因主要是 ITTC 公式为平板摩擦阻力近似值,而计算的摩擦阻力是根据船模表面各单元的摩擦阻力的主流方向(X 轴方向)分量积分得到,对于本文所研究的散货船这类船体表面曲率变化较大的船型(特别是艏部和艉部),应该要比相同面积平板的摩擦阻力小。

表 2 模型阻力系数

计算					试验	
V(m/s)	Fr	$C_p(10^{-3})$	$C_f(10^{-3})$	$C_d(10^{-3})$	$C_d(10^{-3})$	ITTC(10^{-3})
1.20	0.149	1.090	2.821	3.911	3.870	3.099
1.25	0.155	1.197	2.805	4.002	3.908	3.077
1.30	0.161	1.296	2.787	4.083	3.990	3.056
1.35	0.167	1.379	2.770	4.149	4.107	3.036
1.40	0.173	1.492	2.755	4.247	4.269	3.017

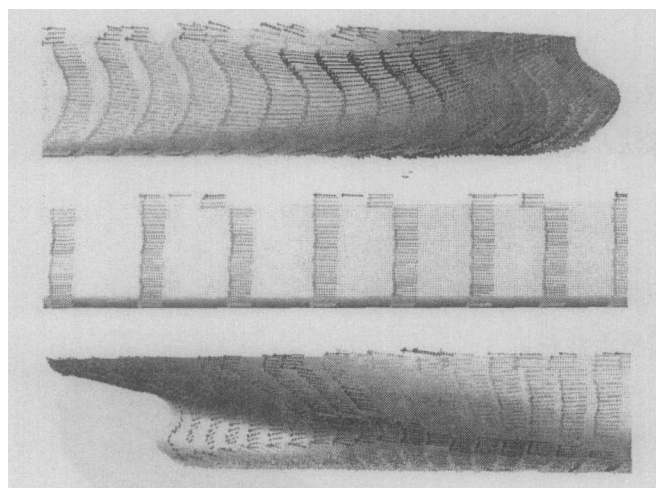


图 2 船体表面流动

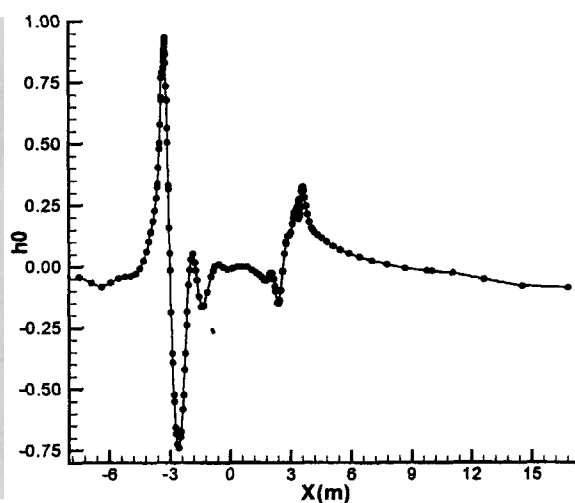


图 3 无量纲波形

图 2 给出了首部、中部和尾部船体表面速度矢量,对各种附体如舭龙骨的安装具有重要的参考价值。

图 4 给出了 $V=1.30\text{m/s}$ 时波高无量纲化后的兴波轮廓图。纵坐标 h_0 为无量纲波高,其表达式为:

$$h_0 = g(z - T) / \left(\frac{1}{2} v^2 \right) \quad (9)$$

其中: $g=9.8\text{m/s}^2$ 为重力加速度, z 为实际波高(相对于基线), T 为吃水, v 为模型运动速度。

本文研究的散货船模型艏部在设计吃水附近较为平直, 其对称面处流体相对于船模基本是静止的, 根据 Bernoulli 方程, 无量纲波高 h_0 应该接近 1。从图中可以看出, 计算所得无量波高完全符合上述分析结果。因此, 虽然试验中没有进行波形测量, 无法定量评价计算所得波形, 但根据以上的分析, 可以看出计算所得波形是合理的。

6 结 论

综上所述, 使用本文的方法对散货船的粘性自由面绕流问题进行数值模拟, 计算所得阻力系数与试验结果吻合得相当好, 能够比较准确地预报模型的阻力系数; 计算所得波形也是合理的。这表明在适当地布置网格的情况下, 选择合适的湍流模型、算法和差分格式, 使用合理的边界条件, 对于散货船这类船型性能的数值预报, 能够得到比较好的结果, 可以作为试验研究有效的辅助手段和补充, 为船舶设计和性能研究服务。

参 考 文 献:

- [1] Dawson, C W. A practical computer method for solving ship-wave problems. 2nd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Berkeley, USA, 1977.
- [2] Miao Q M, Chwang A T. The effect of submerged vertical walls on ship waves. The 14th Engineering Mechanics Conference, EM2000 (CD-Rom), Austin, Texas, USA, 2000.
- [3] 刘晓东, 李百齐, 朱德祥. 方艏船流动的数值模拟. 水动力学研究与进展 A, 2003, 18(2): 168-175.
- [4] Azcueta R.. Computations of Turbulent Free-Surface Flows around Ships and Floating Bodies, Ship Technology Research, 2002, 49: 46-69.
- [5] Gao Qiu-xin. Numerical Simulation of Free Surface Flow around Ship Hull. Journal of Ship Mechanics, 2002, 6(3): 1-13.
- [6] Gao Qiu-xin, Shu lei. Numerical Simulation of Free Surface Flow around Frigate Model 5415. Journal of Ship Mechanics, 2002, 6(6): 1-9.
- [7] 顾 民, 吴乘胜, 蒋耀军, 缪泉明. 箱形船水动力特性的数值计算. 船舶力学, 2003, 7 (4): 15-20.