

# 基于 CFD 的船舶尾部伴流数值计算方法

胡健<sup>1</sup> 黄胜<sup>2</sup> 王陪生<sup>3</sup>

(1, 2, 3, 4, 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江省哈尔滨市 150001)

**摘要:** 用黏性方法计算了喷水推进器的水动力特性。在质量守恒定理和动量守恒定理的基础上建立不可压缩流体的积分方程, 以 SIMPLE 为基本算法, 结合速度修正方程和压力修正方程, 求解船舶尾部伴流场, 采用基于二方程雷诺数时均方程方法研究喷水推进的湍流模型。用数值方法建立船体的三维数学模型, 用混合网格布置方法提高计算精度。分析了船后不同轴向位置和不同半径处的速度场分布, 包括轴相、切向伴流和径向半流, 并对结果进行了讨论。

**关键词:** 计算流体力学; 船舶; 伴流

## 1 引言

近代, 随着计算机的迅速发展, 数值模拟技术日益成熟, 各种模型、算法层出不穷, 而且计算效果非常理想, 有的甚至能够满足工程应用的要求。计算流体力学<sup>[1]</sup> (CFD) 是数值模拟的一种, 它主要研究描述各种流动现象, 它的目标是在工程上尽可能用数值试验代替实物试验, 用计算机模拟自然环境、设计生物体和工程机械装置<sup>[2]</sup>。计算机的大量使用, 计算流体力学通用软件的成熟, 彻底改变了人们在工程和工业产品试验和设计中的传统观念。通过数值模拟对工作过程细节的了解, 对物体进行优化设计已成为一种全新的设计手段。可以做到预报真实的流动细节、换热、工业炉、大气污染等现象的全过程。可以得到设计所需的各种定量数据, 又能把试验所需的人力、财力减到最低程度, 实现了真正意义上的设计革命。目前, CFD 技术在船舶行业中也得到了广泛的应用, 可以用来模拟船舶周围的绕流场<sup>[3]</sup>、螺旋桨的尾流场以及各种附体的流场等等; 能够给出流动的细节、物体所受到的力和力矩、物体表面的压力分布和速度分布等等。目前阶段, 只要选择好合适的模型和参数, 其计算结果还是非常理想的, 基本上能满足工程的要求<sup>[4]</sup>。

## 2 船舶尾流场的 CFD 计算方法

### 2.1 控制方程

质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律是流体流动所遵循的三大基本守恒定律。流体动力学控制方程是一组包括质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律构成的微分方

程组。连续性方程和运动方程中除了未知的速度矢量和压力外，还有密度和动力黏度两个物性参量，一般说来密度和动力黏度也是变量，动力黏度主要取决于温度，当流体在恒温下或温度变化不大时，动力黏度的变化可以忽略不计。液体的压缩性小，密度的变化常被忽略。本研究的数值计算仅涉及恒定不可压缩流体。

## 2.2 连续性方程

任何流动问题都必须满足质量守恒定律。可以用连续性方程描述质量守恒定律。

直角坐标系下的连续性方程表示为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

写成张量形式为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (2)$$

式中， $\rho$  是密度， $t$  是时间， $u$  是速度矢量。此式是瞬态三维可压流体的质量守恒方程。若流

体不可压 $\left(\frac{d\rho}{dt} = 0\right)$ ，或者密度  $\rho$  为常数，上式写成散度形式：

$$\text{div}(\vec{u}) = 0 \quad (3)$$

## 2.3 动量守恒方程

动量守恒定律也是任何流动问题都必须满足的定律。分析微小控制体受力和运动情况可得到其如下微分形式：

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(\rho u)}{dt} + \frac{d(\rho u^2)}{dx} + \frac{d(\rho uv)}{dy} + \frac{d(\rho uw)}{dz} &= \rho X + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \\ \frac{d(\rho v)}{dt} + \frac{d(\rho uv)}{dx} + \frac{d(\rho v^2)}{dy} + \frac{d(\rho vw)}{dz} &= \rho Y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \\ \frac{d(\rho w)}{dt} + \frac{d(\rho uv)}{dx} + \frac{d(\rho vw)}{dy} + \frac{d(\rho w^2)}{dz} &= \rho Z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  是单位质量力沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向上的分量； $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  是法向拉应力，

切向应力  $\tau_{yx} = \tau_{xy}$ 、 $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ 、 $\tau_{zy} = \tau_{yz}$  第一个脚标表示作用面的法线方向，第二个脚标表示

应力分量的作用方向。对于不可压缩流体，结合方程 (3)，就得到著名的纳维埃 - 斯托克斯 (Navier—Stokes) 方程<sup>[1]</sup>。

写成张量形式为：

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (5)$$

这就是不可压缩流体的控制方程。

### 3 船尾伴流的求解

#### 3.1 几何模型的建立

首先, 根据船体的型值在 CAD 中绘制船体的横剖面曲线, 对型线进行适当的光顺处理以后, 构建横剖面的二维面域, 再经过适当的处理, 输出可导入 GAMBIT 的文件类型。

然后, 在专用前处理软件 GAMBIT 中, 导入在 CAD 中建好的船体各站的二维横剖面面域。应用 GAMBIT 对其进行由点生成线, 由线生成面, 由多个面封闭组合生成体, 最后合成为一个完整的船模实体模型。具体几何模型见图 1。

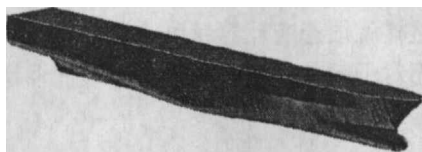


图 1 船体计算模型

#### 3.2 构建控制域

模拟的目的是得到船模以一定的航速在静水中运动时船后的流场, 根据运动的相对性, 进行数值模拟的时候是给定一个来流速度, 而船模相对处于一个固定位置。

从理论上讲, 数值模拟时应该把船模置于一个无限大的流场中, 才能保证船模周围的流场与实际情况比较相符, 因为实际船舶在航行过程中, 其周围的流场范围相对于船本身来说可以考虑作为无界。然而在实际运算中, 控制域不可能取到无限大, 我们只能根据模型的尺寸及计算的要求建立恰当的控制域。

所取控制域分上、下两部分, 上部分的流体为空气, 下部分的流体为水。控制域为一长方体, 该长方体长 (船长方向) 为 768m, 宽 (船宽方向) 为 256m, 高 (吃水方向) 为 256m。以坐标原点为参考点, 确定船模在控制域内的位置: 原点距控制域前端 (沿  $X$  反向) 是 128m, 距后端 (沿  $X$  正向) 是 640m, 距上下左右四个边界各 128m。船模置于控制域内的具体情况见图 2。

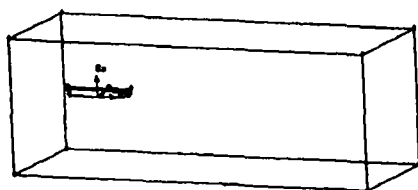


图 2 船模在控制域内的示意

### 3.3 网格划分

根据计算机硬件配置,在上述控制域内共生成了 546 999 个网格,计算结果还比较令人满意。图 3 为网格划分完成后的控制域示意图。

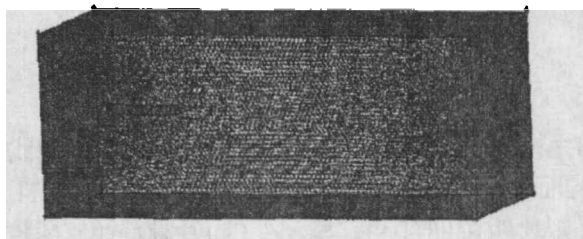


图 3 网格划分完成后的控制域示意图

由于船体形状比较复杂,导致计算模型的边界复杂,因此在包含船体的控制域内应生成非结构网格。但是,使用非结构网格不能直接生成令人满意的网格,网格质量不是很好,而且大扭曲率的网格数较多,这样就很影响计算精度。鉴于此,一般只是将船体表面曲率变化较小的小面合成较大的面,而对于船首以及船尾等船体表面曲率变化较大的部分的小面则不做合并处理。

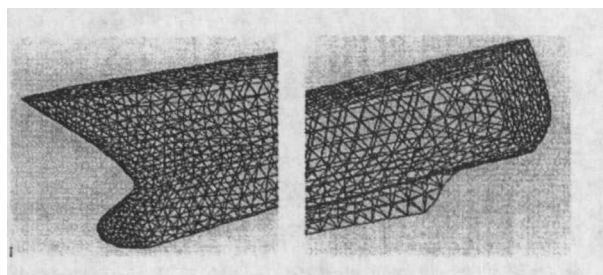


图 4 船体网格布置

### 3.4 计算结果

完成上述工作后,便可以从速度入口进行流场的初始化,给定初始时刻的自由液面,在水、气两相流的条件下进行计算。图 5 显示的为船主体在 13kn 的速度行驶时的计算示意图。

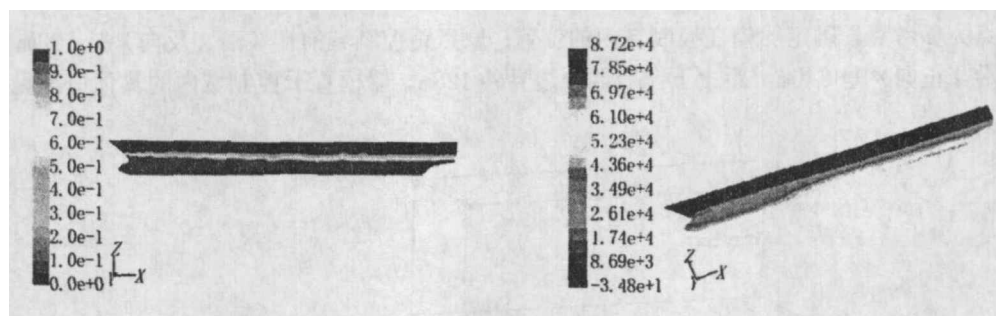


图 5 船体压力分布

## 4 尾流场计算结果

计算达到收敛以后, 就可以报告出所需点的轴向、径向、切向的流场速度。取距离船尾 1m、2m、3m 三个剖面位置处的点的速度。在三个剖面上取圆心坐标分别为 (67, 0, 2)、(68, 0, 2)、(69, 0, 2), 半径为 2m 的圆。在该圆的不同半径上取出相应的点的速度, 通过计算可得出相对应的伴流值以及伴流分数, 从而描述船尾伴流的分布情况。

图 6 至图 8 为 13kn 航速下, 圆心坐标为 (67, 0, 2) 的剖面上的不同半径处伴流分数沿圆周方向的分布曲线。

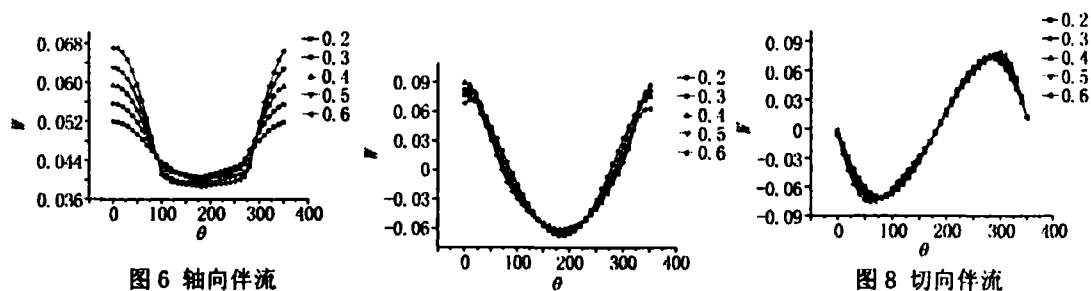


图 6 轴向伴流

图 8 切向伴流

图 9 至图 11 为 13kn 航速下, 圆心坐标为 (68, 0, 2) 的剖面上的不同半径处伴流分数沿圆周方向的分布曲线。

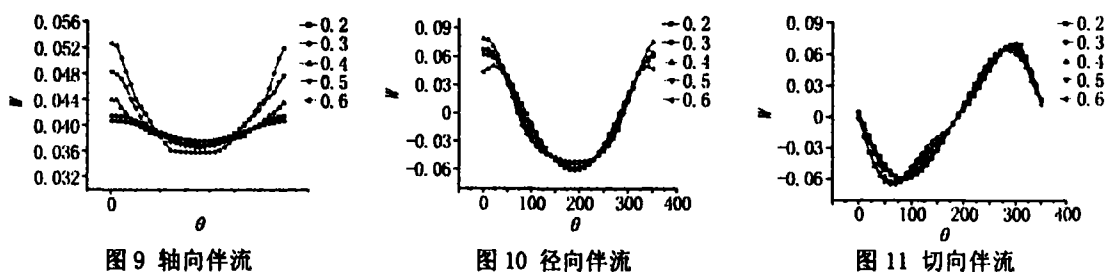


图 9 轴向伴流

图 10 径向伴流

图 11 切向伴流

## 5 结论

CFD 技术在船舶行业中已经得到了比较广泛的应用, 可以用来模拟船舶周围的绕流场、螺旋桨的尾流场以及各种附体的流场等等从计算结果中即可取出所需点的速度矢量, 通过计算得到不同航速下三个剖面处的伴流值, 通过对比可知, 在同一航速下, 距离船身越远, 伴流值越小。伴流在所取三个面上的分布趋势基本一致, 伴流分布的周向不均匀度沿半径的增大而增大。在距离船身较远的面上, 伴流值普遍小于距离船身较近的面上伴流值, 而伴流的周向变化曲线也比距离船身较近的面上伴流的周向变化曲线更平缓一些。将计算所得各个剖面处的伴流分数平均值与统计值做对比, 发现所得计算结果比较理想, 可以用于进行下一步的性能计算。除此之外, 数值模拟还可以得到描述流场细节的压力, 速度矢量, 流线等特征分布图。这对进一步了解船身周围流场的流动细节有很大的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用. 北京: 清华大学出版社, 2004. 22-23.
- 2 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用. 北京: 北京理工大学出版社, 2004. 6.
- 3 李栋. 湍流数值模拟在工程应用中的一些问题研究. 见: 湍流研究最新进展-中国科学技术协会青年科学家论坛第 41 次活动论文集. 北京: 中国科学出版社, 2001. 2.
- 4 刘儒勋, 王志峰. 数值模拟方法和界面追踪. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- 5 Achkinadze A S, Krasilnikov V I. A new velocity based BEM for analysis of non-cavitating and cavitating propellers and foils. Oceanic Engineering International, 2003. 7(1): 33-47, Szantyr J A. A surface panel method for hydrodynamic.

## Calculating method of ship wake with cfd

HU Jian<sup>1</sup>, HUANG Sheng<sup>2</sup>, WANG Pei-sheng<sup>3</sup>

(1,2,3.Department of shipbuilding, Harbin Engineering University, Harbin, 150001, China)

**Abstret:** Calculate the hydrodynamic performance of ship hull with viscous method. On the base of conservation of mass and conservation of momentum, integral equation of incompressible flow was established. Use SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) as basic calculating method combined with velocity-modified equation and pressure-modified equation, velocity field of ship wake was solved. Turbulent model of waterjet propeller was studied by using RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes), Three dimensional model of ship hull was founded and composite grid distribution method was adopted to improve calculating precision. Velocity distribution of ship wake at different radius and axis location was calculated, which include axes wake, tangential wake and radial wake. The calculating result was analyzed.

**Key words:** CFD; ship; wake