

# 基于 FLUENT 软件的小水线面 双体船粘性流数值模拟\*

许 辉 邹早建

(武汉理工大学交通学院 武汉 430063)

**摘要:** 利用计算流体力学商业软件 FLUENT 对一实尺度小水线面双体船(SWATH)数学船型的粘性绕流进行了数值模拟,得到了不同航速下的船体表面总压力、表面剪切应力分布和相应的粘性阻力系数;将各航速下的粘性阻力计算结果和经验公式估算结果作了比较,验证了 FLUENT 用于计算小水线面双体船三维粘性流和粘性阻力的有效性

**关键词:** 小水线面双体船;商业软件;FLUENT;粘性流动;数值模拟

**中图分类号:** U 661

船型设计的关键技术之一是预报和优化设计其快速性,其中阻力预报是一项重要的内容。利用基于薄船理论和细长体理论的线性兴波理论来计算 SWATH 的兴波阻力,能达到相当满意的准确性。近年来,计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法已被成功地用来计算 SWATH 船体的三维势流绕流和兴波阻力<sup>[1]</sup>。对粘性阻力的计算,传统上是采用薄边界层理论进行计算或采用经验公式进行估算,但这些方法不能准确地反映船型对流动的影响,因而预报精度受到限制。在国际上,各种基于雷诺平均 Navier-Stokes 方程(Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations, RANSE)求解的三维粘性流计算方法已被成功地开发出来并应用于船舶粘性阻力的预报,从而使得精确预报 SWATH 的三维粘性流和粘性阻力成为可能。但就我国船舶水动力学学科的发展水平而言,目前尚无法应用自行开发的三维粘性流计算软件来预报 SWATH 的三维粘性流和粘性阻力,而必须寻求其它切实有效的途径。

目前,各种通用 CFD 商业软件包如 PHOENICS, FLUENT, STAR-CD, CFX, NUMECA 等<sup>[2]</sup>在我国市场上已经很流行,这些商业软件包为我国流体力学相关问题的研究提供了有

效的工具<sup>[3]</sup>。

文中应用现有 CFD 商业软件 FLUENT,计算了一 SWATH 数学船型的三维粘性流和粘性阻力,初步探讨了该软件包应用于船舶水动力学问题的能力。

## 1 计算模型及数值模拟

Fluent 公司是世界著名的 CFD 软件供应商,其软件设计基于 CFD 软件群的思想<sup>[4]</sup>。该公司开发的通用 CFD 软件包 FLUENT 含丰富的物理模型和各种湍流模型,可用于各种复杂流场的数值模拟,文中旨在探讨 FLUENT 软件用于解决船舶水动力学问题的能力。以一匀速直航的 SWATH 数学船型为例,利用 FLUENT 软件对 SWATH 船体的三维粘性流场进行数值模拟,并预报其粘性水动力。

SWATH 船体由深潜于水中的鱼雷状主体、高出水面的上船体以及连接上船体和水下主体的薄翼状支柱三部分组成。当 SWATH 在水面航行时,其水下主体和浸没于水下的部分支柱将受到水施加的流体阻力作用。和常规船型一样,SWATH 船体的总静水阻力主要由兴波阻力和粘

收稿日期: 2003-09-23

许 辉:女,23岁,硕士生,主要研究领域为船舶CFD

\*国家自然科学基金项目资助(批准号:10272085);交通部重点科技项目资助(部教高字[98]093号)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

性阻力两部分组成, 而粘性阻力又可分为摩擦阻力和粘压阻力 通过求解绕 SWATH 船体的粘性流场可以计算其粘性阻力

在此, 取右手坐标系  $o-xyz$ , 坐标原点  $o$  位于 SWATH 片体纵中剖面 and 静水面的交线上支柱中部,  $x$  轴向后为正,  $z$  轴向上为正 计算对象为一数学船型, 其支柱为等截面的柱体, 支柱的半宽水线为由式(1)表达的抛物线

$$y = \frac{B}{2} \left( 1 - \frac{4x^2}{L_s^2} \right) \quad (1)$$

式中:  $B$  为支柱宽度;  $L_s$  为支柱长度

主体的平行中体为一圆柱体, 首尾两端各为半个椭球体, 如图 1 所示

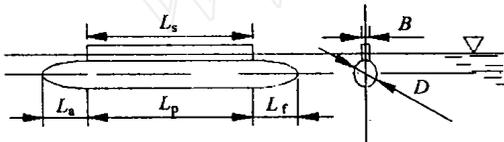


图 1 SWATH 数学船型

SWATH 数学船型特征尺度取值见表 1

表 1 SWATH 数学船型特征尺度 m

$L_s$	$B$	$L_a$	$L_p$	$L_t$	$D$
21	1	5.75	21	5.75	3

由于船体及其绕流的左右对称性, 可以只对一个片体的流动进行数值模拟 同时, 由于片体之间的距离通常很大, 在计算其粘性绕流时可以忽略片体之间的相互影响 计算中取航速分别为 1.1, 1.6, 2.1, 2.6, 3.1 m/s, 主体中心线距自由面距离为 2.2 m, 计算中忽略兴波对粘性流动和粘性阻力的影响, 采用合模流动模型

建模及网格划分均采用专用的前处理软件 GAMBIT, 生成的是非结构网格, 共 823 881 个四面体网格单元 求解区域为一个 1/4 圆柱, 其范围为  $-1.5 x/L_h, 3.5, 0 y/L_h, 1, -1 z/L_h, 0$  其中  $L_h$  为主体长度 求解域的边界包括物面、来流速度进口、水平及垂直的对称面、出流边界

采用 FLUENT 求解器来求解流动控制方程 RANS 方程, 在计算过程中选取  $k-\epsilon$  湍流模型, 采用 SIMPLE 法进行压力场和速度场的耦合求解, 对流项的离散采用一阶迎风差分

## 2 计算结果及比较

计算过程中发现收敛较快 以 3.1 m/s 为例, 计算得到的船体表面总压力、表面切应力等值线分布如图 2 和图 3 所示



图 2 物面总压力等值线图



图 3 物面切应力等值线图

图 4 中给出了计算得到的粘性阻力系数  $C_v$  随雷诺数  $Re$  变化的曲线  $C_v$  和  $Re$  的定义为

$$C_v = \frac{R_v}{\frac{1}{2} \rho U^2 S}, \quad Re = \frac{UL_h}{\nu}$$

式中:  $R_v$  为粘性阻力;  $\rho$  为流体密度;  $U$  为航速;  $S$  为湿表面积;  $\nu$  为流体运动粘性系数

为了验证用 FLUENT 软件计算得到的结果, 将其和经验公式估算结果进行了比较, 如图 4 所示 图中经验公式估算结果按以下方法得到

将 SWATH 粘性阻力分解为

$$R_v = R_{vs} + R_{vh} \quad (2)$$

式中: 下标  $s$  代表支柱;  $h$  代表主体

根据三因次换算方法<sup>[5]</sup>

$$R_{vs} = \frac{1}{2} \rho U^2 S_s C_{fs} (1 + K_s) \quad (3)$$

$$R_{vh} = \frac{1}{2} \rho U^2 S_h C_{fh} (1 + K_h) \quad (4)$$

式中:  $S_s$  和  $S_h$  分别是支柱和主体的湿表面积;  $C_{fs}$  和  $C_{fh}$  是对应的相当平板摩擦阻力系数, 可用 8 届 ITTC 公式来计算;  $1 + K_s$  和  $1 + K_h$  是相应的形状因子

SWATH 的支柱可看成一狭长的机翼, 由于其下部与主体相连接, 使竖向水流流动受到约束, 可将其绕流近似看成是二维流动 这样, 可利用二维翼型的粘性阻力经验公式来计算支柱部分粘性阻力, 由此得到支柱的形状因子公式<sup>[6]</sup>

$$1 + K_s = 1 + (t/L_s) + 30(t/L_s)^4 \quad (5)$$

式中:  $t$  为支柱的最大厚度(在此即支柱宽度)

SWATH 的主体一般为一回转体或近似回转体 所以, 可应用霍纳(Hoerner)建议的回转体形状因子公式来计算主体的形状因子<sup>[6]</sup>

$$1 + K_h = 1 + 1.5(D/L_h)^{1.5} + 7(D/L_h)^3 \quad (6)$$

式中:  $D$  为主体最大直径或相当直径 ( $D =$

$2\sqrt{A_0/\pi}, A_0$  是主体最大横剖面面积)

从图 4 中可以看出, FLUENT 计算结果和经验公式估算结果曲线的趋势一样, 同一雷诺数下的阻力系数也比较接近 这从一个方面说明了用 FLUENT 软件来预报 SWATH 粘性阻力是可行的 经验公式估算方法固然可以用来预报

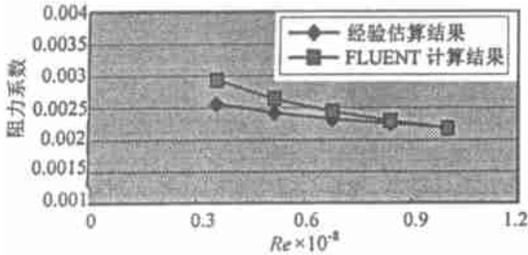


图4 阻力系数比较曲线

SWATH 船型的粘性阻力,但从估算式(3)至式(6)可以看到,经验公式估算方法不能精确预报船型与粘性阻力的关系,更无法得到粘性绕流场的流动细节.要做到这一点,还需借助成熟的自行开发的船舶CFD软件或市面上流行的通用CFD软件和船舶CFD软件.

### 3 结束语

船舶粘性流数值模拟是当前船舶水动力学领域的国际前沿研究课题,它为船舶水动力性能预报和优化设计提供了强有力的工具.在目前尚未有自行开发的成熟的船舶CFD软件的情况下,求助于商业软件不失为一种切实有效的途径.文中利用FLUENT商业软件对一SWATH数学船型的粘性绕流场进行了数值模拟,计算了粘性阻力,

得到了满意的结果.文中的研究结果表明,将FLUENT用于SWATH船型的粘性流数值模拟和粘性阻力计算是可行的.应用FLUENT软件,可以精确地预报常规船型和SWATH船型的粘性流场和粘性阻力,并分析船型和阻力的关系,从而指导船型设计;同时,应用FLUENT软件可以为自行开发船舶CFD软件提供验证数据.

### 参考文献

- 1 邹早建,罗青山,徐海祥等. SWATH船型及其阻力性能计算. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2002, 26(3): 300~302
- 2 姚征,陈康民. CFD通用软件综述. 上海理工大学学报, 2002, 24(2): 137~144
- 3 陈耀松,陈沪东. 力学小议. 力学与实践, 2001, 23(4): 74~75
- 4 李勇,刘志友,安亦然. 介绍计算流体力学通用软件——Fluent. 水动力学研究与进展, 2001, 16(2): 254~258
- 5 李世谟. 船舶阻力. 北京:人民交通出版社, 1989. 64~68
- 6 黄鼎良. 小水线面双体船性能原理. 北京:国防工业出版社, 1993. 60~63

## Numerical Simulation of Viscous Flows Around SWATH Based on CFD Code FLUENT

Xu Hui Zou Zaojian

(School of Transportation, WUT, Wuhan 430063)

### Abstract

In this paper the viscous flows around a mathematical SWATH in full scale are simulated based on the computational fluid dynamics commercial software FLUENT. The numerical results of total pressure, wall shear stress and the corresponding viscous resistance coefficient at different velocity are obtained. The computational viscous resistance coefficients are compared with the estimated ones using empirical formula. The validity of the software to predict the three-dimensional viscous flows and viscous resistance of SWATH is proved.

**Key words:** SWATH; commercial software; FLUENT; viscous flow; numerical simulation