

实桨自航模拟及线型优化效果预报

陈骞, 查晶晶, 李嘉宁

(上海外高桥造船有限公司, 上海 200137, Email: rd@chinasws.com)

摘要: 本文选取一超大型油轮, 对吃水设计航速点的自航进行 CFD 数值模拟。考虑船桨舵的相互作用, 采用滑移网格模拟螺旋桨真实转动。为减少网格数量并尽量保证精度, 对网格进行采用局部加密处理。通过与水池船模试验数据对比, 本方法具有较高的数值精度。在此基础上, 对优化后的线型后进行收到功率的预报, 并再次进行试验对比。

关键词: CFD; 自航模拟; 实桨模拟; 线型优化; 实尺度功率预估

1 引言

当前船舶线型优化主要集中在阻力性能方面, 对于推进性能的主要还是依靠船舶试验综合评判。船舶线型优化中, 由各专业的协调等因素, 需要进行前后多轮的优化, 船舶试验存在成本高, 周期长的缺点。利用计算流体力学进行自航的模拟能够在阻力优化的基础上, 考虑船桨舵的相互作用, 对线型的水动力性能进行综合评估。

各研究人员对不同类型的船舶, 采用不同的方式进行了计算流体力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 自航数值模拟。戴原星^[1]对三体船进行了阻力与自航模拟, 贾力平^[2]采用激励盘方法模拟 JBC 标模船桨耦合, 没有真实的螺旋桨, 采用添加体积力方式实现桨对船的作用。孙文愈^[3]采用黏流与势流结合的方法模拟一箱船船桨的相互作用, 庄丽帆^[4]分析了箱船船桨舵耦合时阻力、推力等的变化。各家对螺旋桨的处理方式等各有不同, 精度也存在差异。

本文采用全黏流理论, 对一肥大型 VLCC 进行船桨舵耦合的数值模拟, 其中螺旋桨采用滑移网格的方式模拟真实转动。将 CFD 模拟数据与试验数据进行对比, 根据 ITTC 推荐方法对模型尺度数据进行实尺度换算。并对优化后的线型, 进行性能预报及验证。

2 船舶流体理论基础

在船舶的流场中，黏性起到主要作用，计算必须考虑到流体黏性。黏性流体运动满足质量守恒定律、动量守恒定律、动量矩守恒定律及能量守恒定律。当考虑流体为不可压缩时，密度 ρ 为常数，基本方程只剩下连续方程和动量方程，将本构方程代入得到雷诺方程。雷诺平均 N-S 方程应用较广^[5]。

2.1 雷诺 Navier-stokes 方程

对于不可压缩的牛顿流体，N-S 方程为

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{v} \quad (1)$$

N-S 方程为一非线性的二阶偏微分方程，方程中的每一项都表示作用于单位质量流体上的某种力^[5]。等式左边为惯性力，右边依次为质量力、压力合力和黏性力。其中黏性力又分为剪应力与附加法向应力。

虽然 N-S 方程能描述湍流的瞬时运动，但对湍流空间中每一点的物理量进行描述和预测是相当困难的。目前湍流的数值计算方法主要有 3 种：直接数值模拟方法、大涡模拟方法和雷诺平均 N-S 方程方法。其中的雷诺平均 N-S 方程方法是在工程计算中运用最广的^[6]。雷诺认为湍流的瞬时速度场满足 N-S 方程，因而采用时间平均法建立了雷诺方程：

$$\rho\left(\frac{\partial\mu_i}{\partial t} + \frac{\partial\mu_i\mu_j}{\partial t}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu\nabla^2\mu_i + \frac{\partial}{\partial x_i}(-\rho\overline{\mu_i\mu_j}) \quad (2)$$

由雷诺方程看出，湍流中出了平均运动的黏性应力 $\mu\nabla^2\mathbf{u}_i$ 外，还多了与脉动速度相关的一项 $-\rho\overline{\mathbf{u}_i\mathbf{u}_j}$ ，称为雷诺应力，它是一个二阶张量。由于在原有 N-S 方程上增加了雷诺应力这一新变量，方程不再封闭，因此需要在湍流应力与平均速度之间建立补充关系，即所谓的湍流模式^[7]。

2.2 湍流模式

研究表明采用 $k-\omega$ 湍流模型的仿真结果较好。SST $k-\omega$ 湍流模型是由 Menter 在 1994 年提出，该模型在近壁面处采用 $k-\omega$ 模型，在远处自由剪切流动采用 $k-\varepsilon$ 模型，考虑了剪切力的影响，能够对强逆压梯度的流场进行较好的模拟，并对逆压梯度导致的流动分离进行准确预报，因此在计算船舶黏性绕流场时有很大的优势。

3 CFD 数值模拟

3.1 模拟对象

研究对象为一肥大型 VLCC，螺旋桨为 4 叶桨。主尺度见表 1 和表 2。

表 1 VLCC 主尺度参数

主尺度或参数	数值	单位
垂线间长	324.00	m
型宽	60.00	m
型深	30.00	m
设计吃水	20.50	m

表 2 螺旋桨几何参数

主尺度或参数	数值	单位
螺旋桨直径	10.6	m
螺距比	0.808	-
毂桨比	0.143	-
桨数	4	-
旋向	右	-

3.2 船体阻力计算

首先进行该 VLCC 船体模型尺度下的阻力计算,与试验报告数据对比见表 3。

表 3 阻力数值对比

佛汝德数 Fn	试验阻力值 (N)	CFD 阻力值 (N)
0.10	19.83	20.00
0.11	23.63	23.82
0.12	27.73	27.86
0.13	32.03	32.08
0.14	36.96	37.00
0.15	42.26	42.20
0.16	48.04	47.92

从表 3 阻力数据对比可以看出，该线型模型尺度下不同速度时，CFD 的阻力偏差在均 1%以内。说明当前网格与参数设置对于阻力具有较高的数值精度和稳定性。

3.3 自航模拟

采用滑移网格模拟螺旋桨转动。将计算域分为内外两个不同区域，并在每一个区域内建立不同的参考系与控制方程。针对螺旋桨的旋转，将包围螺旋桨的桨叶与桨毂部分建立圆柱形的子区域，并在这一区域内建立与螺旋桨的转速、转向相一致的旋转坐标系。如下图 1 所示，圆柱区域为包围螺旋桨的旋转区域，外部为整个计算域。

中纵剖面与水线面在 0 站处的交点为坐标原点，从船艏指向船首为 X 轴正向，从船艏指向左舷为 Y 轴正向，垂直向上为 Z 轴正向。选取的计算域为 $-3L_{pp} < X < 3L_{pp}$ ， $-3L_{pp} < Y < 3L_{pp}$ ，

$-3L_{pp} < Z < L_{pp}$ 。为在网格设置中,各区域网格尺度均以基础尺寸为基准,这样可以快速对网格进行疏密的变化。一般来说,网格越细,所求得的精度越高,同时需要的计算资源就越多。在生成网格时,要平衡网格大小与计算时间。整个计算域无需全部加密,主要对螺旋桨特征局部加密,对船体首尾进行加密,并适当建立过渡的网格。船桨舵面网格见图2。



图1 螺旋桨运动域

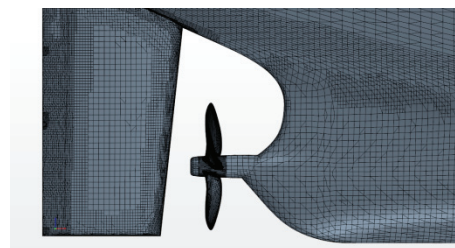


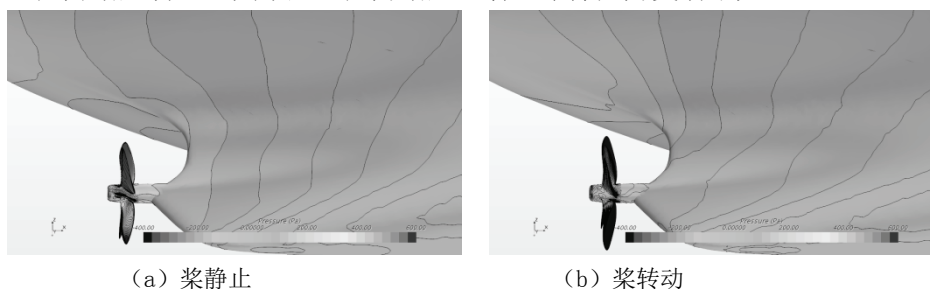
图2 艉部船桨舵面网格

选取设计吃水 20.5m, 设计航速 15kn 为模拟速度点。

在船模自航试验中,当满足傅氏数 F_n 及进速系数 J 相同的条件时,则模型与实船之间的各种力基本上是缩尺比的三次方关系,唯阻力之间不存在这种关系。为了使试验中各种力都存在缩尺比三次方的关系,需对阻力进行修正(实际上是对摩擦阻力修正)。在船模自航试验中,当船模速度为 V_m 时,我们设法预先对船模加一个拖曳力 F_D ,则螺旋桨模型发出的推力 T_m 仅需克服阻力 $(R_m - F_D)$,此点称为实船自航点,即相当于实际螺旋桨发出推力 T_s 克服实船的总阻力 R_s [7]。在 CFD 模拟中,选取同样的 F_D 进行模拟。

3.3.1 船桨模拟

在船后增加螺旋桨,螺旋桨运动前后的流场对比见图3。船体流场发生明显变化,特别是后体部分。左侧为增加螺旋桨但静止的流场,右侧为螺旋桨转动的流场。增加螺旋桨后,压力分布图3中看出,由于螺旋桨的运动使船尾表面的压力分布发生变化,从速度分布图4中看出由于螺旋桨的抽吸作用使螺旋桨附近的流速增加明显。且从阻力数值上看,船体总阻力增加明显,其中压差阻力增加显著,摩擦阻力变动不大。



(a) 桨静止

(b) 桨转动

图3 船桨压力分布图

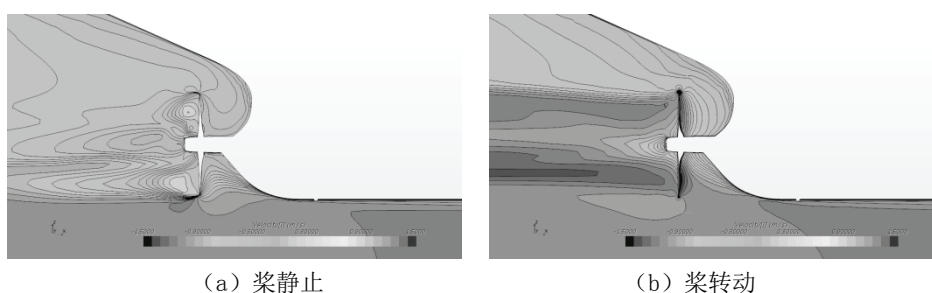


图 4 Y=0 处速度分布图

3.3.2 船桨舵模拟

从图 5 舵中速度矢量图和图 6 舵后速度矢量图可以看出，由于舵叶的作用，流场的旋转得到减弱。从流线图可以看出，经过螺旋桨后的水流产生了旋转。桨帽后的流线旋转明显，结合压力分布图 7 看，桨帽后有一低压区域，这与试验中的毂涡现象一致。后续可以采取相应措施如舵球或消涡鳍，减轻桨帽后的低压区与周向诱导速度。从图 8 舵叶的压力分布图可以看出，在舵叶的上方和下方有明显的高低压区，由于该桨为右旋，上方的桨叶从左侧转向右侧，下方相反。高低压区域与实船中舵的腐蚀区域一致。

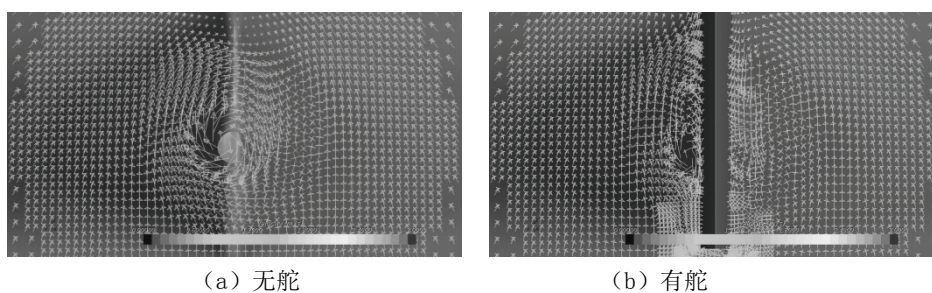


图 5 舵中速度矢量图

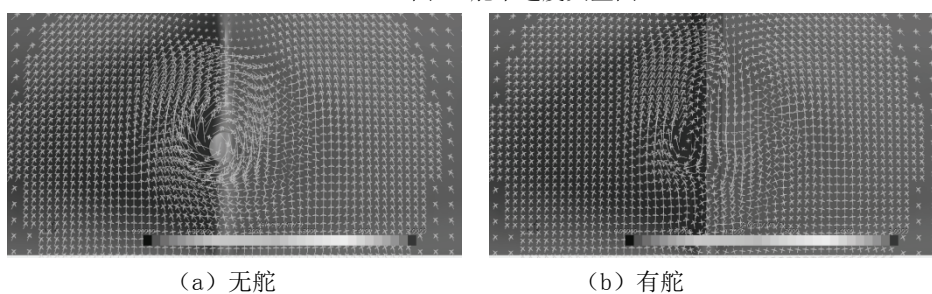


图 6 舵后速度矢量图

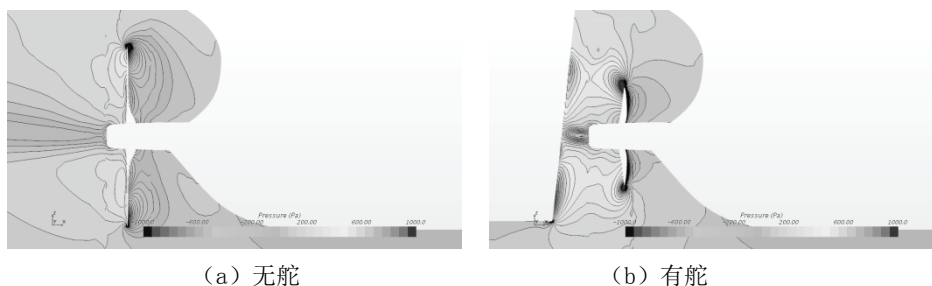


图 7 Y=0 处压力分布

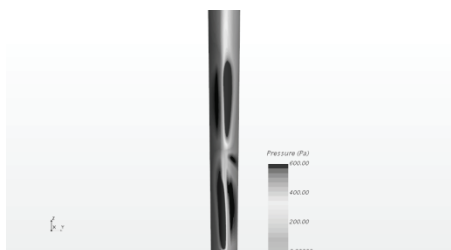


图 8 舵叶压力分布

该 VLCC 初始线型 CFD 自航数据与水池报告对比见表 4，经过实船换算后，15kn 时 PD 与试验报告数据偏差 1.4%，认为具有较高的数值精度。

表 4 实船收到功率对比

	VS(knt)	PDS(kW)	Delta
试验数据	15	17526	
CFD 数据	15	17275	-1.43%

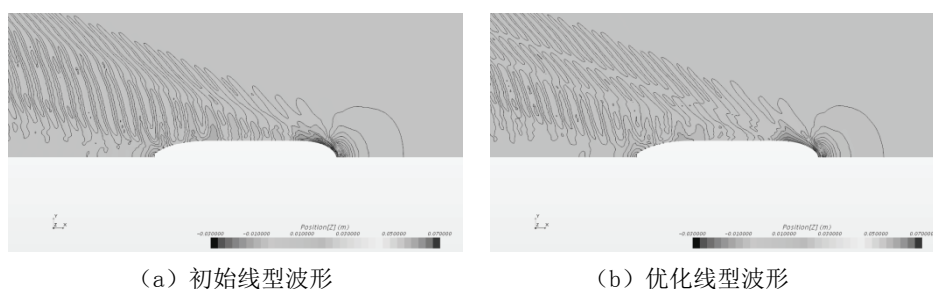
4 线型优化效果预报

4.1 降阻预报

采用上述相同的网格设置与模型参数，进行优化线型的阻力对比，模型尺度下阻力数值见表 3。在 15kn 时，降低了 2.3%。

表 5 模型尺度船体阻力对比

	VS(kn)	VM(m/s)	RTM(kg · m/S ²)	Delta
初始线型	15	1.091	27.63	
优化线型	15	1.091	27.00	-2.3%



(a) 初始线型波形

(b) 优化线型波形

图 9 不同线型波形

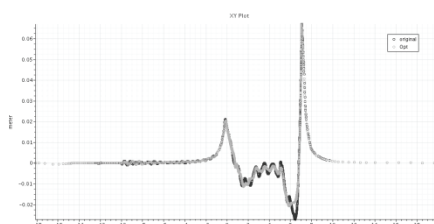
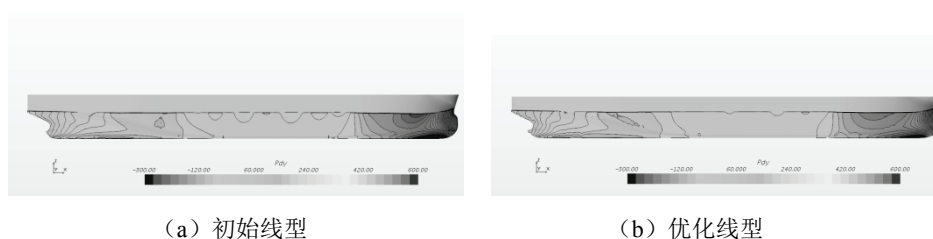


图 10 船侧波高图对比



(a) 初始线型

(b) 优化线型

图 11 船身压力分布

图 9 为 CFD 计算得到的兴波图，图 10 为船侧波高图。可以看出前体兴波下降，波谷区域减弱，兴波阻力降低。结合图 11 压力分布图看出，原型方案在艏部低压区明显，压力梯度较大，与波形图中较大的波谷对应。改型方案压力分布与波形情况均有所改善，压力梯度减缓，波谷变小。

4.2 自航对比

采用上述摩擦阻力修正值进行自航模拟，模型尺度 CFD 模拟数据经过实船尺度换算对比，自航收到功率 PD 对比见下表 6，收到功率降低了 2.5%。

表 6 实船收到功率对比

	VS(kn)	PDS(kW)	Delta
初始线型	15	17275	
优化线型	15	16838	-2.5%

4.3 试验验证

上述初始线型和优化线型，在同一家水池进行了对比试验。设计吃水设计航速下，换算到实船尺度，收到功率降低了 3.5%。本文 CFD 仿真结果与试验结果一致，具有较高精度。

5 结论

本文采用黏流 CFD 软件，基于 RANS 理论和滑移网格方法对船桨舵进行自航模拟，通过与试验数据对比，具有较高的工程精度。综合评估船桨舵的相互作用，可以看出舵对流场有明显的影响，在自航中舵不能忽略。在线型优化中，对最终效果的评估需要综合考虑船桨舵之间的影响。在本文线型优化中，船桨舵 CFD 自航评估收到功率 PD 降低了 2.5%，与试验结果趋势一致，该方法具有重要的工程意义和使用价值。

参 考 文 献

- 1 戴原星, 张志远, 刘建国, 等. 喷水推进三体船阻力与自航数值模拟研究[J/OL]. 船舶, 2019(01), 2019. 03.
- 2 贾力平. 基于敞水桨数据的船模自航数值仿真预报[A]. 第二十九届全国水动力学研讨会论文集[C]. 北京:海洋出版社, 2018.
- 3 孙文愈. 基于改进的螺旋桨体积分力模型的船舶自航性能黏势耦合预报方法[A]. 第二十九届全国水动力学研讨会论文集[C]. 北京:海洋出版社, 2018:7.
- 4 庄丽帆, 王志东, 凌宏杰, 等. 大型集装箱船船桨舵干扰特性数值模拟与分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2016, 30(03):205-212.
- 5 张亮, 李云波. 流体力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2008.
- 6 董世汤, 王国强, 唐登海, 等. 船舶推进器水动力学[M]. 北京:国防工业出版社, 2009: 175-178
- 7 盛振邦, 刘应中. 船舶原理[M]. 上海: 上海交通大学出版, 2003.

Ship self-propulsion simulation with actual propeller and hull lines optimization

CHEN Qian, ZHA Jing-jing, LI Jia-ning

(Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co. Ltd., Shanghai 200137, China. Email: rd@chinasws.com)

Abstract: The matching of the hull、propeller and Rudder has always been the focus of ship propulsion. In order to study the comprehensive performance, one VLCC was selected to carry out CFD simulation of self-propulsion at design draft and velocity. Considering the symmetry of the hull, use half model to simulate the resistance, and use local refinement domains to get the dense mesh. Compare the results of CFD and basin data following ITTC procedure, this method has good numerical accuracy. Use self-propulsion simulations to evaluate the optimized hull lines.

Key words: CFD ; self-propulsion; actual propeller; hull form optimization; ship scale performance prediction