

文章编号: 1000-4882 (2009) 04-0007-06

# 一种快速评估方法在船舶线型优化中的应用

陈京普, 朱德祥, 何术龙, 黄少锋, 杨 奕

(中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

## 摘 要

采用一种势流兴波数值优化方法与 RANS 求解器的优化结合的方法对某中速船的首部进行线型优化, 以便使其速度达到设计要求。经过多轮数值优化试验, 取得一个优化方案。最终的优化方案经模型试验验证, 总阻力下降约 2.7%, 预报航速提高约 0.4kn。

**关 键 词:** 船舶、舰船工程; 非线性兴波; RANS; 线型优化; CFD

**中图分类号:** U662.9 **文献标识码:** A

## 0 引 言

用于船舶阻力预报及船型优化的 CFD 方法主要有两类: 基于势流的兴波数值预报的优化方法和基于粘性流场 RANS 求解的优化方法。已经有不少成功应用势流兴波数值方法进行船型优化的先例<sup>[1~3]</sup>。近些年来我国部分研究院所及船厂<sup>[4~7]</sup>也在船舶势流兴波数值方法的研究与应用上, 取得了不少进展。随着计算机能力的进一步发展, 考虑自由面效应的粘流求解(RANS)已经较广泛地应用于船舶研究与设计, 粘流 CFD 计算结果数据信息量丰富, 不仅可以进行船体阻力、自由面以及伴流计算, 还可以考虑船、桨、舵以及附体相互干扰<sup>[8,9]</sup>。近年来的研究资料表明, 考虑自由面效应的 RANS 求解器预报精度有很大提高, 应用范围在逐步扩大, 而且某些研究机构已经将 RANS 求解器应用于实际船舶的线型优化<sup>[10]</sup>, 不过这种运算对计算机的要求很高, 文献[10]提及的船型优化系统依赖于 64 个 CPU 的并行机。近些年来, 国内通过对商业软件的开发应用, 也将考虑自由面效应粘流 CFD 计算在水动力学问题的某些范围得到有效应用<sup>[11,12]</sup>。

某中速船在给定功率条件下, 原始线型的预报航速低于设计航速 0.3kn, 为此须进行线型优化。该船是一种比较特殊的船型, 其方型系数  $C_b$  在 0.75 左右, 与三大主力船型的方型系数范围有较大区别。由于同类船型的资料较少, 时间又紧迫因此如何优化这条船将是一次很大的挑战。在较短的时间内, 要完成线型优化方案、船模修改, 水池试验等一系列工作, 唯一可以争取的是线型优化时间。传统的单纯依靠经验的优化方法效率较低, 很难按期完成任务。为此本文引入计算流体力学手段, 用于这条中速船的线型优化。

## 1 优化方案

对于这条船的优化主要从首部线型出发,选择兴波阻力作为目标函数。兴波的预报,可选择势流兴波预报方法或者考虑自由面效应的 RANS 求解器。如果采用计及自由面效应的 RANS 求解器,则计算时间过长、难以保证时间节点的要求。本文采用势流兴波数值计算预报船体兴波,通过波形分析,评估改型方案的优劣。由于势流兴波数值方法只能预报兴波情况,为判断优化方案是否会引起粘压阻力的增加,本文还对选定的优化方案用 RANS 求解器计算其叠模阻力(不考虑自由面),以检验优化方案粘压阻力的变化。

## 2 势流兴波数值方法

受约束的船舶以常速  $U$  沿  $x$  轴的正向运动,  $o-xyz$  为固定在船上的直角坐标系,  $xy$  平面与静水面重合,  $z$  轴垂直向上。在  $o-xyz$  坐标系中流动为定常势流,忽略表面张力的影响,水域为无限深,船舶绕流速度势为  $\phi$ 。根据以上假设,船舶绕流速度势  $\phi$  满足 Laplace 方程以及自由面、船体表面和辐射条件等三个边界条件。

求解兴波问题的一个难点就是自由面边界条件的非线性,且自由面初始位置不可知。通常采用线性化逐项迭代的方法处理<sup>[13~15]</sup>,即在一个已知基本解的基础上对自由面边界条件线性化处理。假设本次迭代的结果是对上一次迭代的小扰动,进一步对这小扰动做线性化处理,在上一次迭代得到的自由面上满足边界条件。因此这样每次迭代均是线性问题,求解线性问题后就可以更新基本流动和自由面,然后开始下一次迭代。

数值求解过程,将船体和自由面的离散为四边形单元,自由面的离散采用静水面上的贴船体水线网格。将物面和自由面离散后,先求解基本流动  $\phi$  对应的流场。然后利用扰动速度势  $\phi$  满足线性化自由面条件,求解扰动流场,进而可求解出总的自由面流动。下一次迭代开始时则采用上次迭代所得的总的自由面流动作为基本流动,进入本次迭代。经过若干次迭代,直到波面与联合自由面边界条件收敛为止<sup>[13]</sup>。

计算中自由面划分范围如下:船首向前取  $0.5L$ ,船尾向后取  $1L$ ,舷侧取  $0.7L$ ,  $L$  为船长。自由面纵向网格划分按照每基本横波长内分布 25 个面元,横向则采用渐变网格划分形式。

## 3 粘流 CFD 方法

### 3.1 控制方程

控制方程为三维不可压缩 RANS 方程,张量形式的连续性方程和动量方程可以分别写为式(1)和式(2):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{F}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right) \quad (2)$$

式中  $i, j = 1, 2, 3$ 。

### 3.2 计算区域与边界条件

粘流计算中的区域划分与对应的边界条件如下:

- (1) 入口: 船首向前取  $1L$ ;
- (2) 外场: 取  $2L$ , 定义速度入口;
- (3) 出口: 船尾向后取  $3L$ , 定义为出流条件;
- (4) 壁面: 船体表面, 应用无滑移条件;
- (5) 对称面: 应用对称条件。

数值模拟中求解三维定常不可压缩 RANS 方程, 湍流模型使用两方程的 SSTk- $\omega$  模式。控制方程的离散使用基于单元中心的有限体积法, 扩散项使用二阶精度的中心差分格式来离散, 对流项使用二阶迎风格式来离散, 压力与速度的耦合使用 SIMPLE 方法, 离散得到的代数方程组用逐点 Gauss-Seidel 法迭代求解, 并使用代数多重网格技术来加快数值计算过程的收敛速度。

## 4 优化方案分析

### 4.1 优化方案初选

限于该船的主参数已经确定, 特别是球首长度不能变化, 只能修改首部部分船体, 这极大地限制了优化空间。本文采用传统的线型修改方法, 通过修改水线进流角以及球首形式等实现优化, 可以保证线型光滑, 节省后续线型光滑的工作时间。共设计出 10 个线型。采用设计航速( $Fn=0.19$ )下的兴波阻力系数比较, 分析改型的优劣, 表 1 是 10 个改型中第一次优选的 5 个改型与原型的计算兴波系数。通过波形比较发现, 第 5 个改型方案(M5)的兴波阻力系数最小, 其兴波阻力小于原型。而其他线型则兴波阻力减小不多。据此初步选定改型 5 作为优化方案, 下一步工作将验证改型是否会增加其粘压阻力。

表 1 原型与改型计算兴波系数比较

船型	原型	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>
兴波系数/ %	100.0	98.6	97.0	99.7	97.4	95.8

### 4.2 叠模验证

采用三维定不可压缩粘流场的 RANS 方程对改型 M5 的叠模进行粘压阻力计算, 耗时 4h。

为保证计算结果的准确度, 在计算网格生成策略上采用同样的网格数量以及网格划分形式。结果表明, 设计航速时改型 5 的叠模阻力略小于原型, 约 0.5%。由此可以得出结论, 所得到优化船型 5 没有增加船体的粘压阻力, 保证了改型阻力优化的可靠性。

### 4.3 试验验证

综合应用以上两种方法快速得出一个优化方案, 表 2 给出了原型与改型 M5 的主参数。由表可知, 本文改型的船体湿表面积减小约 0.3%, 排水体积减小 0.12%, 总体主参数变化微小, 可忽略不计。图 1 为原型与改型的首轮廓比较。改型方案为一种扁平球首, 其特点是水线进流角收缩, 球首扁平、首端直壁; 这种球首能对兴波以及船体压力分布产生较大影响。对数值计算所得的优化船型 M5, 进行水池模型试验验证。图 2 为改型 M5 与原型在设计吃水状态下模型试验测得的剩余阻力系数, 由图可见改型的剩余阻力有明显减少, 设计航速的总阻力系数降低约 2.7%。给定功率下, 改型 5 的实船预报航速提高约 0.4kn, 满足了航速要求。

图 3 是势流兴波数值方法模拟的自由面波形图, 由图可见改型减小了第一个波谷的波幅值, 特别是在纵切波型图 4 及图 5 中, 明显可以观察到改型在一定程度上减小了兴波峰谷值, 有效降低了兴波阻力。图 6 和图 7 为原型与改型首尾的压力分布比较, 由图可见, 尾部压力分布变化不大。而改型 5 首部压力分布的最大值明显减小, 这样由压差构成的兴波阻力必然会有所减小。

表 2 原型与改型的模型主参数比较

主参数	原型 M0	改型 M5
船 长 $L_{pp}/m$	7.15	7.15
船 宽 $B/m$	1.1	1.10
吃 水 $T/m$	0.29	0.29
湿表面积 $S/m^2$	9.78	9.75
排水体积 $V/m^3$	1.712	1.710
方型系数 $C_b$	0.751	0.750

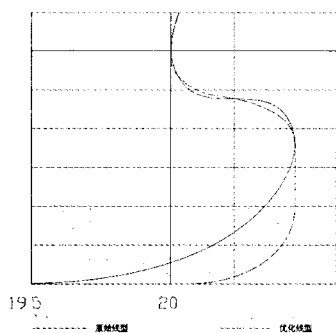


图 1 原型与改型的首轮廓比较

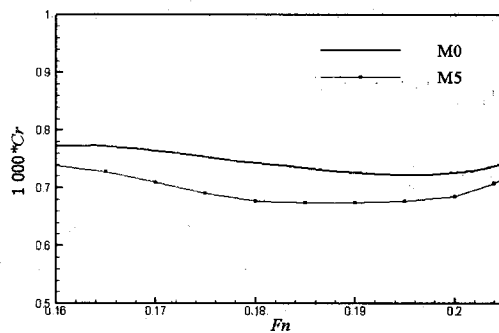


图 2 试验得到剩余阻力系数比较

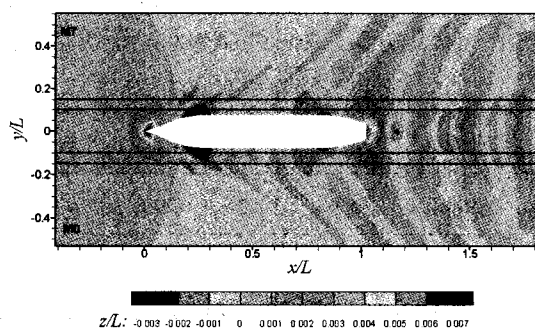


图 3 原型与改型的计算波形云图

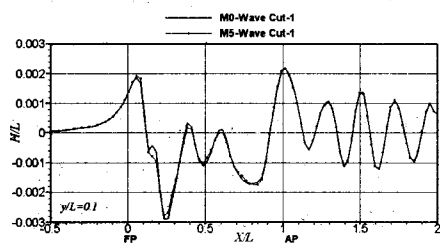
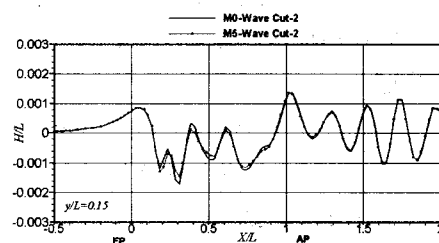
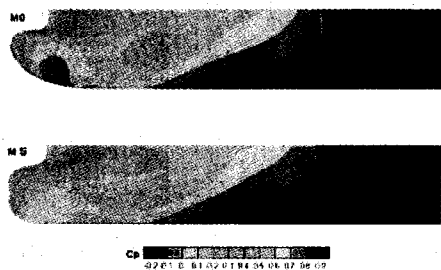
图 4 原型与改型的纵切波型图( $y/L=0.1$ )图 5 原型与改型的纵切波型图( $y/L=0.15$ )

图 6 原型与改型首部动压力分布

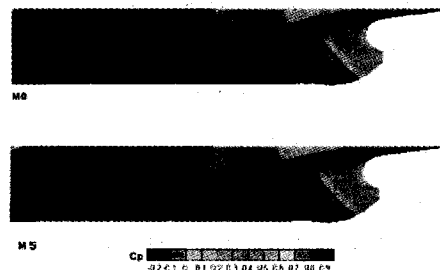


图 7 原型与改型尾部动压力分布

## 5 结 语

利用势流非线性兴波数值计算与粘流场 RANS 求解器相结合, 提出一种快速的船型优化方法, 成功地应用于某中速船的船型优化。为今后基于 CFD 的船型优化在实际工程项目中的应用, 积累了经验。通过实例证明:

- (1) 势流兴波数值计算可以有效地进行船体首部线型优化, 通过兴波阻力系数、纵切波型以及压力分布等, 可以可靠地判断船体兴波性能的优劣。
- (2) 船模试验结果证明, 该中速船的优化线型阻力下降约 2.7%, 预报航速提高约 0.4kn。
- (3) 采用势流兴波数值计算与粘流场 RANS 求解器结合的办法, 提高了优化效率和可靠性, 这种方法不仅适合于中高速船, 对中低速船也有较强的适用性。

## 参 考 文 献:

- [1] MARZI J. Use of CFD methods for hull form optimization in a model basin[C]. MARNET – CFD Workshop, Haslar, 2003.
- [2] HARRIES S, ABT C. Formal hydrodynamic optimization of a fast mono-hull on the basis of parametric hull design[C]. Fifth International Conference on Fast Sea Transportation FAST' 99, 1999, Seattle, Washington, USA.
- [3] HARRIES S, ABT C, HOCHKIRCH K. Hydrodynamic modeling of sailing yachts[C]. The 15th CHESAPEAKE SAILING YACHT SYMPOSIUM, 2000.
- [4] 李定. 计算兴波阻力的 Dawson 方法的数值改进及其实用化[D]. 中国船舶科学研究中心硕士论文, 1986.
- [5] 刘晓东. 加装尾板的高速水面舰的兴波水动力性能研究[D]. 中国船舶科学研究中心博士论文, 2002.
- [6] 陈京普, 朱德祥, 刘晓东. 兴波阻力数值预报方法研究及其在集装箱船船型优化中的应用[J]. 水动力学研究与进展, 2006, 21(1): 113-121.
- [7] 张红玲, 朱丽萍, 钟应华. 应用计算流体力学进行 VLCC 船型的线型优化[J]. 上海造船, 2006, (3): 5-8.
- [8] 张志荣. 水面舰船综合粘性流场的实用化 CFD 研究[D]. 中国船舶科学研究中心博士论文, 2004.
- [9] 王金宝. 考虑粘性、自由面和螺旋桨非定常旋转效应的集装箱船的快速性能 CFD 实用化研究[D]. 上海船舶与海洋工程研究所博士论文, 2007.
- [10] CAMPANA E F, PERI D, TAHARA Y, et al. Comparison and validation of CFD based local optimization methods for surface combatant bow[C]. 25th Symposium on Naval Hydrodynamics. St. John's, Newfoundland and Labrador, CANADA, 8-13 August 2004.
- [11] 黄少峰, 张志荣, 赵峰, 李百齐. 带自由面肥大船粘性绕流场的数值模拟[J]. 船舶力学, 2008, 12(1): 46-53.
- [12] ZHANG N, YING L, YAO H, et al. Numerical simulation of free surface viscous flow around submarine[J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(3): 29-39.
- [13] JANSON C E. Potential flow panel methods for the calculation of free-surface with lift[D]. Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, 1997.
- [14] LARSSON L. CFD in ship design-prospects and limitations. Ship Technology Research[J], 1997, 44: 1-30.
- [15] RAVEN H. Inviscid calculations of ship wave making-capabilities, limitations, and prospects[C]. 2nd Symposium on Naval Hydrodynamics, 1998.

# Application of a Fast Computing Approach in Hull Lines Optimization

CHEN Jing-pu, ZHU De-xiang, HE Shu-long, HUANG Shao-feng, YANG Yi  
(China Ship Scientific Research Center, Wuxi Jiangsu 214082, China)

## Abstract

A potential wave-making numerical method in combination with the RANS solver is used to optimize the forward part line of a middlespeed ship in this paper, so that the design speed of the ship meets the predetermine speed. The model test of the optimized hull is carried out, the results show the speed could be increased about 0.4kn compared with that before optimization, so this speed satisfies the design requirement.

**Key words:** ship engineering; nonlinear wave-making; RANS; lines optimization; CFD

## 作者简介

陈京普 男, 1982 年生, 工程师。主要从事船舶水动力学、船型优化等方面的研究工作。

朱德祥 男, 1960 年生, 研究员。主要从事船舶水动力学、船型开发等方面的研究工作。

何术龙 男, 1971 年生, 高工。主要从事船舶水动力学、高性能船等方面的研究工作。

黄少锋 男, 1981 年生, 工程师。主要从事 CFD 与船型优化等方面的研究工作。

杨 奕 男, 1972 年生, 高工。主要从事船舶快速性试验研究工作。