

基于 CFD 的船型自动优化技术研究

冯佰威, 刘祖源, 詹成胜, 常海超, 程细得

(武汉理工大学交通学院 湖北 武汉 430063)

摘 要

本文简要阐述了国内外基于 CFD 船型优化研究进展, 提出实现基于 CFD 的船型优化的关键是船型的参数化几何建模技术。在借鉴国内外船型参数化的基础上, 运用船型修改的调和模块, 开发了船型参数化调和模块。最后, 利用集成优化框架实现了船型参数化调和模块与 CFD 的集成, 实现了基于 CFD 的船型自动优化设计, 为船舶多学科设计优化 (MDO) 的研究打下了基础。

关键词: CFD 参数化建模 船型优化

1 前 言

船体型线设计是船舶总体设计的重要内容之一, 对船舶的技术性能和经济性有重大影响。目前, 船型设计中通常采用母型船改造方法, 根据船东提出的各项技术要求确定用途相仿、形状相似且又比较受船东满意的船作为母型船, 在此基础上进行修改, 设计结果作为初步设计方案。由于船舶设计工作中充满着各种错综复杂的矛盾, 这种经验设计和估算校核的工作要经过多次反复才能得到比较符合要求的设计方案, 尽管如此, 做出的方案常只是满足设计技术指标的可行方案而非最优设计方案。这种方法与现代船舶设计的趋势不相匹配, 迫切需要一种新的现代设计理论与方法来优化船体型线。

随着高性能计算机的广泛应用和船舶计算流体力学的迅速发展, 采用高精度数值计算方法分析、优化船型成为一种可能。在船舶水动力性能计算领域, CFD (Computational Fluid Dynamics) 已经成为船体型线设计及优化的新兴手段, 在国外得到广泛应用。它与以往先制作船模、再进行水池试验相比, 船型开发的时间和费用可以大幅度下降, 还有利于更好地提高所开发船型的性能, 大大减少对船模试验水池的依赖, 并且它显示的详细流场信息能为设计者提供方案改进的方向。所以在新船型开发阶段和初步设计阶段, 越来越多的研究机关、设计院开始应用计算流体力学 (CFD) 这一现代而快速的工具进行船舶性能的预报、优化工作。

2 基于 CFD 船型优化的研究进展

在基于 CFD 船型优化方面, 国内尚没有太多的研究。此方面的研究主要集中在意大利、日本、德国等。总体上来看, 这些研究工作均按照设计分析集成化、一体化的主线发展, 其思路可用下面的流程图 1 来表示:

* 863 项目: 国家 863 高技术研究发展计划(项目编号: 2006AA04Z124)

* 依托实验室: 高速船舶工程教育部重点实验室\部门开放

* 高等学校学科创新引智计划资助(B08031) Supported by the 111 Project(B08031)

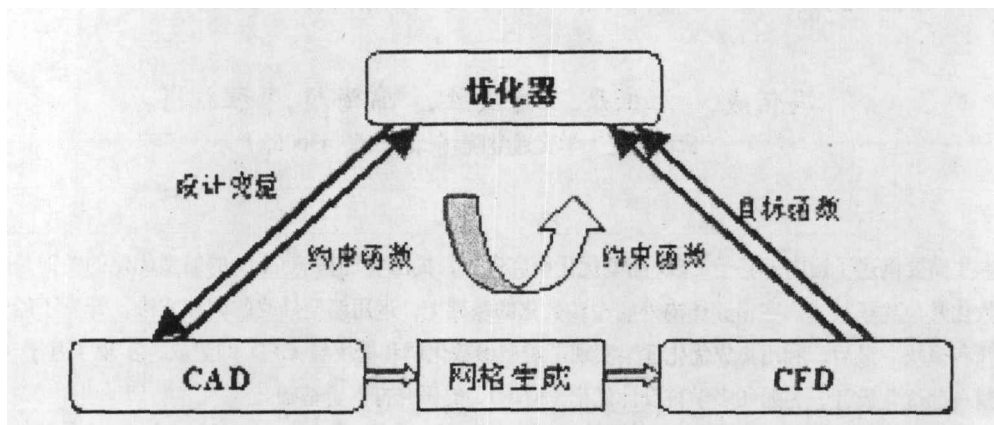


图1 国外船舶 CAD/CFD 集成优化流程图

下面分别对其研究情况进行简要介绍：

意大利罗马水池的 Peri.D 教授课题组主要完成了下面几方面的工作：（见文献[6]-[13]）

- （1）建立了基于 CAD/CFD 船型设计优化的框架，并对优化结果进行了模型试验验证；
- （2）基于 Bezier 曲面，开发扰动面法对船型的表面进行数学描述；
- （3）利用多学科设计优化方法（Multidisciplinary design optimization—MDO）方法求解阻力和耐波两专业的三目标优化问题；
- （4）应用试验设计技术及近似技术对多目标优化问题进行了求解，有效解决了 CFD 计算及优化时间长等问题。

日本东京大学的 Yusuke Tahara 教授课题组做了下面几方面的工作：（见文献[14]-[16]）

- （1）采用目前较为流行的船舶 CAD 软件 NAPA 进行参数化几何建模；
- （2）CFD 数值计算工具采用 FLOWPACK 软件，并利用该软件完成了相关性能的计算；
- （3）自行开发集成优化平台，在该平台上完成了集装箱船的球首优化。

德国柏林理工大学的 Stefan.harries 教授课题组主要完成了下面几方面的工作：（见文献[17]-[18]）

- （1）对船型特征进行分析，进行了参数化几何建模，并开发一套商业 CAD 软件 Friendship；
- （2）进行水动力分析，主要考虑了耐波性能及静水中阻力，并分别应用了两套数值求解软件；
- （3）在 FRONTIER 集成优化平台上对 CAD（Friendship）和 CFD 进行了集成，完成了多学科多目标的优化设计工作。

综合来看，国外在船型水动力优化方面已经实现了 CAD/CFD 的集成优化设计，达到了以性能驱动设计的目标。在船型参数化几何建模方面采用了 CAD 软件的二次开发(如：扰动面方法)或新开发船舶设计软件（如：friendship）。其研究的内容也不仅仅局限在单个性能，而是多个性能的综合优化。

3 船型参数化几何建模特点分析

对于基于 CFD 的船型优化而言，船型参数化几何建模是其必不可少的过程，它对于提高系统设计分析的效率具有重要作用。在船型优化设计中，传统的船型参数化描述主要有两类：一类为函数法（解析法）、另一类则是 B 样条的表示方法。函数法就是把船型和船舶主尺度及待定参数用函数联

系起来，恰当地选择这些尺度和参数就能生成完整、光顺的船型曲面。

而基于 B 样条的表示方法则是直接建立船体的曲面方程表示船体曲面，然后通过人机交互调整控制顶点，使最终曲面满足要求。下表则是从船型优化的角度来对两者作一比较。

项 目	解析方法	B 样条方法
优化设计变量	少	多
船体外形复杂程度	低	高
学科耦合	难	难
船型光顺	容易	容易
船体形状限制	很受限	不受限
船体局部控制	不能	很好
性能分析难易程度	简单	很难

两者对比分析，可以看到两种方法各有优缺点。尽管 B 样条的方法设计变量很多，计算成本很高，但可保证船型的连续和光滑，而且局部的改变不会影响其它地方的变形。另一方面基于 B 样条建立的三维模型可建立统一的数据库，可进行多性能的协同设计。而且随着计算机技术的发展，基于 NURBS (NonUniform Rational B-Splines) 的 CAD 系统也广泛应用到船舶设计当中，所建立的三维模型也必须保证和现有 CAD 系统的兼容性。因此，用 B 样条来表达船体曲面为研究的首选。

4 基于 NURBS 的船型修改调和方法的提出

进行船舶 CFD 的优化设计研究，对船型参数化几何建模的要求是：要有一种灵活有效的办法来描述和修改船体的几何形状。定义船体形状的数字模型应当是灵活的，允许大量可能的几何外形存在，能够以较少的设计变量控制不同的船型生成，且生成的船型要保证曲面光顺性。对比此要求，若使用目前的基于 NURBS 的船型描述方法来进行船型 CFD 优化，同时取 NURBS 的控制顶点坐标为优化变量，那么优化变量的数目将是非常多，以至于难以进行优化。针对此问题，课题组在基于 NURBS 的船型描述基础上，开发了基于 NURBS 的船型修改调和方法。

4.1 NURBS 参数化几何建模理论^{[2][3]}

对于给定 $n+1$ 个控制顶点 $d_i (i=0, 1, \dots, n)$ 且节点矢量为 $U=[u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}]$ 的 k 次 NURBS 曲线可表示为：

$$\bar{p}(u) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i \bar{d}_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,k}(u)}$$

其中： $w_i (i = 0,1,\dots,n)$ 为权重因子，分别与控制顶点 $\bar{d}_i (i = 0,1,\dots,n)$ 相联系； $N_{i,k}(u)$ 为 B 样条基函数，第 1 个下标 i 表示 B 样条的序号，第 2 个下标表示 B 样条的幂次（等于阶数-1），其递推定义如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & \dots, u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \dots, \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+k}-u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1}-u}{u_{i+k+1}-u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \\ 0=0 \\ 0 \end{array} \right.$$

与 NURBS 曲线类似，NURBS 曲面可相应写成两个参数 u, v 方向上的形式：

$$\bar{p}(u,v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{ij} \bar{d}_{ij} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{ij} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}$$

图 2 为某一集装箱船船型 NURBS 表示：

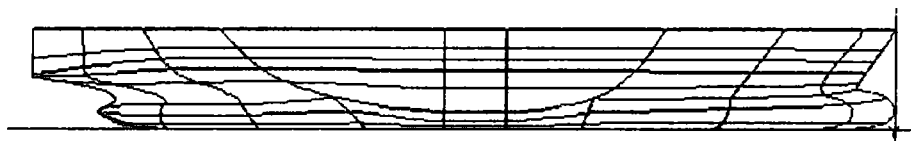


图 2 集装箱船船型 NURBS 表示

4.2 基于 NURBS 的船型修改调和方法的数学描述

基于 NURBS 的船型修改调和方法的数学描述可用图 2—4 表示。图 2 表示一条抛物线的 NURBS 表示，图 3 表示顶部平直的曲线 NURBS 表示。在两图中 X 与 Y 坐标的最大值均相同。

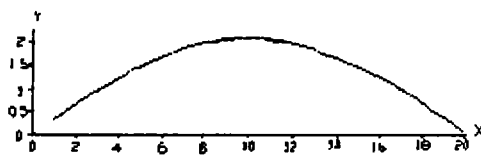


图 2

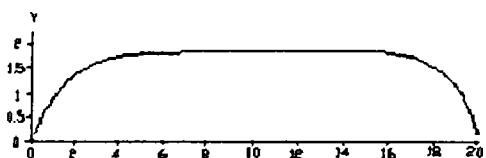


图 3

利用调和公式： $H=C_1*H_1+C_2*H_2$ $C_1+C_2=1$ 其中 H_1 、 H_2 分别为图 2 和图 3 曲线的 NURBS 控制顶点坐标。 C_1 、 C_2 为调和系数，其范围为 $[0, 1]$ ，两者之和为 1。调节 C_1 、 C_2 的值则可以得到介于图 2 和图 3 曲线之间的不同的曲线形状，如图 4。

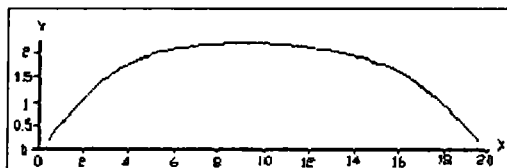


图 4

4.3 基于 NURBS 的船型修改调和方法

将上述数学原理应用到船型变化当中，调和的过程实际上就是以现有的多条不同船型特征的母型船为基础，通过调节调和系数，从而可产生一系列光顺的船型。而这一调和的过程则是直接操纵

母型船的 NURBS 控制顶点，再由合成后的控制顶点产生船体曲面的网格，进而生成船体曲面，在调和过程中一定要保证调和系数（权重因子）的总和为 1。下面的公式及图 5 也可说明这一调和过程。

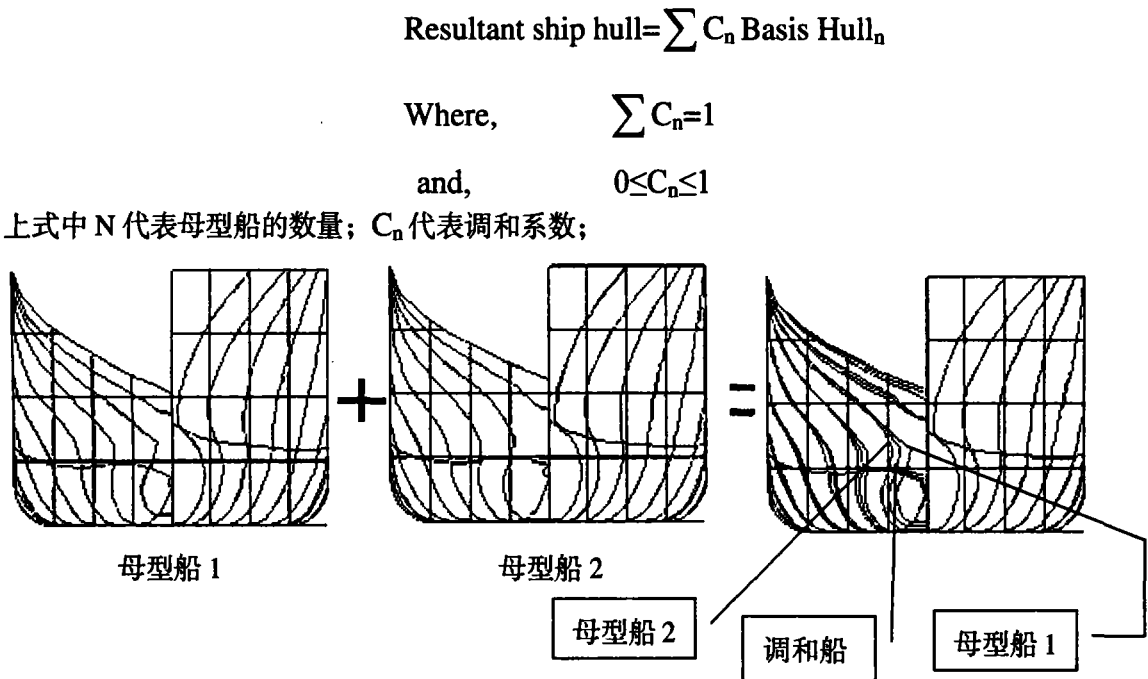


图 5 母型船的调和过程

从上面的调和过程可以看到，因调和系数的和为 1，因此无论如何调节 C_n 的值，调和后生成的船型则总是在以母型船为边界所构成的船型空间内，如果母型船的船型特征各不相同，那么经调和后生成的线型也必然是丰富多彩且光顺的。

根据上文所述的调和原理，开发了船型参数化调和模块，并利用集成优化框架，实现了同 CFD 的集成，初步建立了基于 CFD 的船型优化集成平台（见如图 6）。

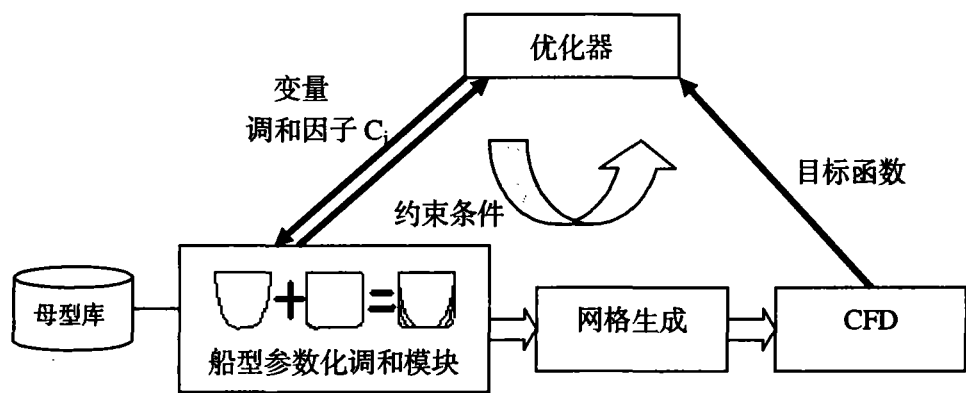


图 6 基于 CFD 船型自动优化流程

由图 6 所示，若实现基于 CFD 的船型自动优化，其组件主要由三部分构成，分别是船型参数化调和模块、网格生成及 CFD 数值求解工具、优化器。各部分的功能如下：

- (1) 船型参数化调和模块：根据调和因子 C_i 的变化生成一系列的 NURBS 船型，同时可进行静水力计算，以判断约束条件是否满足。
- (2) 网格生成及 CFD 数值求解器：将船型参数化调和模块中生成的船型导入网格生成工具

- 中，自动划分网格，同时进行 CFD 的自动求解目标函数。
- (3) 优化器：根据不同的优化问题，提供各种优化算法，可对设计空间进行有效的探索。

5 验证

5.1 设计分析模块的集成

若实现基于 CFD 的船型自动优化，必须得有一个稳定的集成框架，利用该框架可实现船型参数化调和模块、网格生成工具及 CFD 求解器的设计分析过程集成及数据集成。作者所在团队经广泛调研，最终选用多学科设计优化工具 ISIGHT 为集成框架，完成了各设计分析模块的集成工作，从而建立了基于 CFD 的船型自动优化集成平台。

该集成平台的具体配置如下：

母型库：采用两条集装箱船 NURBS 船型，尾部横剖线形状不同；（见图 5）

参数化船型几何生成：自开发船型参数化调和模块；

网格生成工具：采用 GAMBIT 软件；

CFD 数值求解工具：采用 FLUENT 软件；

接口模块：自开发。

图 7 为基于 ISIGHT 的设计优化平台的集成界面。

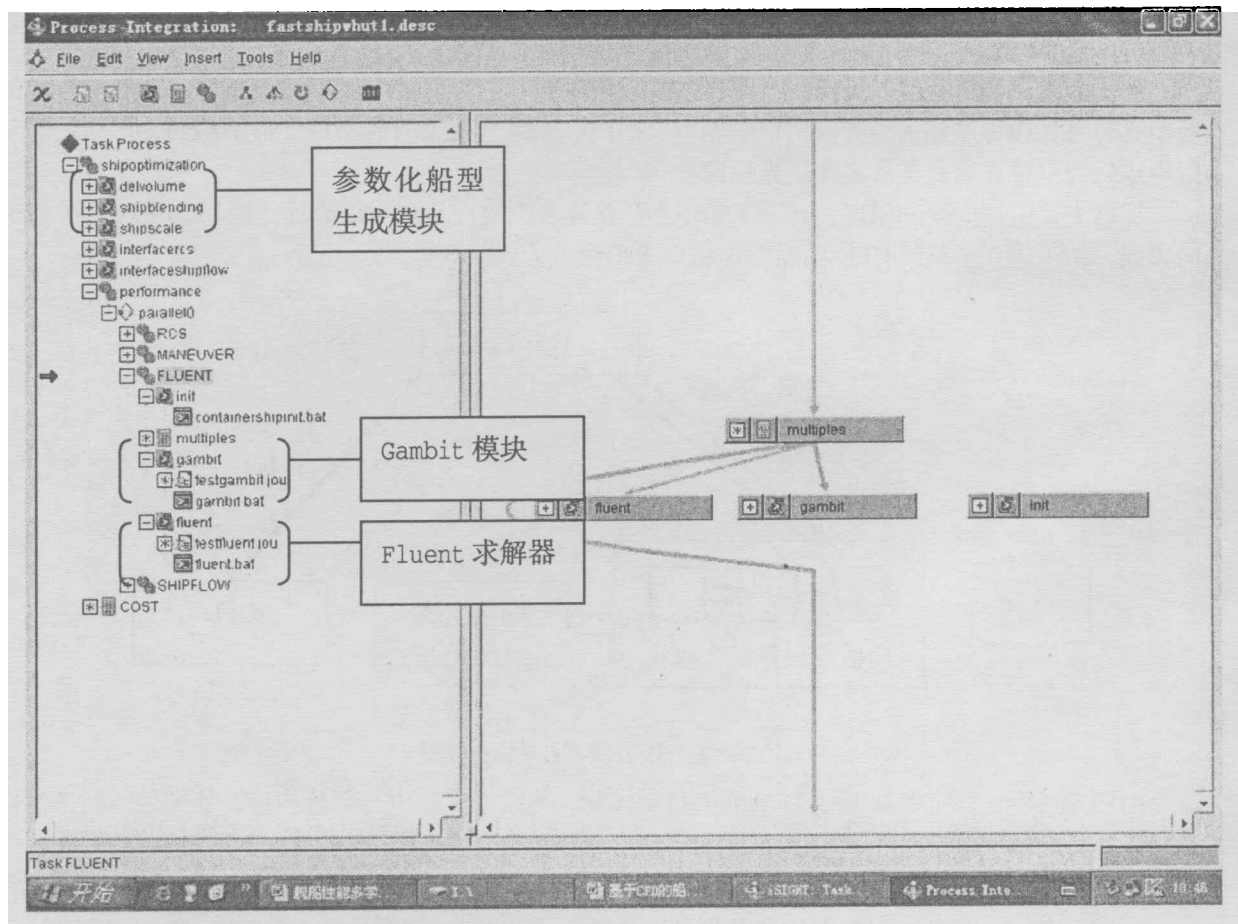


图 7 各设计分析模块的集成

5.2 优化的数学模型

主尺度: $L_{pp}=145\text{m}$, $B=24.4\text{m}$, $T=8.1\text{m}$, 船首部线型不变;

目标: 设计航速为 15kn 时的单位排水量总阻力最小, 即 $\text{Min } \frac{R_t}{\Delta}$;

变量: 调和因子 C_1 , 且 $0 \leq C_1 \leq 1$, 根据变量 C_1 可生成尾部线型不同的船型;

约束条件: $\frac{|\Delta - \Delta_{opt}|}{\Delta} \leq 1\%$ 。

5.3 计算模型

① 计算网格

本例的流体计算域为如图 8 所示的一个长方体, 计算坐标系为卡笛尔直角坐标系, 坐标原点位于尾柱, x 轴正方向平行于船尾指向船长的方向, y 轴正方向指向船侧, xoy 平面与船基线平面重合, z 轴正方向竖直向上。船体表面取其一侧, 因计算船舶总阻力, 包括兴波阻力, 摩擦阻力及粘压阻力, 需计及自由面的影响, 设计水线平面将计算区域分为上下两部分。下部分为水域, 其边界范围为 $-3.0 \leq x/L_{pp} \leq 2.0$, 船前方为 1 倍船长, 船尾为 3 倍船长, y 轴方向取 1 倍船长, z 轴方向基线以下取 1 倍船长。上部分为空气域, 其 z 轴方向设计水线面以上取 $1/3$ 倍船长。根据计算的需要, 人为增加了一部分船舶的干舷。

图 8 流体计算域

在计算域内划分三角形、四边形混合面网格及四面体非结构体网格, 基于减小优化计算时间的考虑, 总计算网格取为约 40 万网格。

② FLUENT 计算模型

控制方程:

RANS 方程和雷诺时均连续性方程:

$$\frac{\partial(U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial(\overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} + f_i \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

式中 $-\overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力项。

湍流模型:

本文选用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 它具备数值稳定性好和求解压力梯度精确等优点, 是目前船舶粘性

流动和粘性水动力求解应用最广泛的湍流模型。

边界条件:

- 入口处边界条件: 入口流体速度预先给定为均匀来流的速度, 湍动能 k 和耗散率 ϵ 预先给定;
- 出流边界条件: 选用出流条件;
- 在固壁处边界: 选用速度和湍动能 k 的无滑移边界条件;
- 靠近壁面的区域: 采取 Launder 和 Spalding 提出的壁函数方法来处理。

自由面拟合:

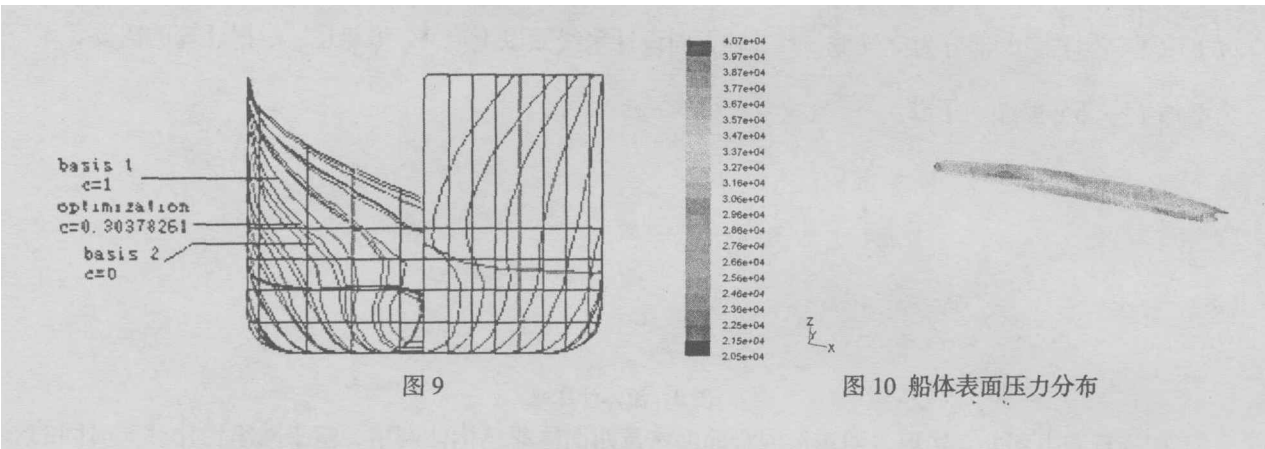
采用流体体积法 (VOF)、几何重构方案 (Geo-Reconstruct) 对自由面进行跟踪模拟。

求解算法:

采用 SIMPLE 算法进行压力场和速度场的耦合求解。

5.4 优化结果

本例的优化算法采用多岛遗传算法。经过 500 次运行, 最终优化结果为, 当 $C_1 = 0.30378261$, 阻力系数为, 优化的线型见图 9, 其船体表面压力分布如图 10。



6 结 语

目前, 我国船舶行业在整个设计开发过程中充分利用 CFD 技术进行辅助分析、优化的手段和能力还不够, 设计过程中经验还是占主导地位, CFD 主要用来检验设计的结果, 而不是用来驱动产品设计。因此, 将船舶型线设计与 CFD 有机结合, 利用集成优化平台, 实现船型生成与 CFD 集成优化, 最终达到船舶型线“设计—分析—再设计”任务的自动化, 这具有重要的现实意义。而若实现这一目标, 其首要的关键技术就是要实现船舶参数化几何建模, 因此本文重点阐述了基于 CFD 的船型优化设计的参数化几何建模技术, 开发了船型参数化调和模块, 并利用集成优化框架实现了同 CFD 的集成, 首次建立了基于 CFD 的船型优化集成平台, 并以实例进行了验证, 初步实现了船型“设计—分析—再设计”任务的自动化。本文的进一步研究将可实现基于 CFD 的船型水动力性能的综合优化, 从而为船舶多学科设计优化 (Multidisciplinary Design Optimization--MDO) 的研究打下坚实的基础。

参考文献:

- [1] 王振国 陈小前等 《飞行器多学科设计优化理论与应用研究》 国防工业出版社
- [2] 赛特达公司学术讨论会论文集, 2004;
- [3] Parsons Randall L.Scott formulation of Multicriterion Design Optimization problems for Solution With Scalar Numerical optimization Methods JSR,2004.
- [4] 施法中 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条, 北京航空航天大学出版社, 1994
- [5] W.L.Neu W.H.Mason A multidisiplinary design optimization scheme for containerships
- [6] D Peri, EF Campana, A. Di Mascio Development of CFD-based design optimization architecture
- [7] D Peri, M Rossetti, EF Campana Design Optimization of Ship Hulls via CFD Techniques
- [9] EF Campana, D Peri,U.P Bulgarelli Optimal Shape Design of a Surface Combatant With Reduced wave Pattern.
- [10] M Valorani, D Peri, EF Campana Sensitivity Analysis Techniques to Design Optimal Ship Hulls
- [11] D Peri, EF Campana High fidelity models in the multi-disciplinary optimization of a frigate ship
- [12] Daniele Peri; Emilio F. Campana High-Fidelity Models and Multiobjective Global Optimization Algorithms in Simulation-Based Design
- [13] EF Campana, D. Peri, Y. Tahara, F. Stern Shape Optimization in Ship Hydrodynamics using Computational Fluid Dynamics
- [14] Yusuke Tahara , SatoshiTohyama and Tokihiro Katsui CFD-based multi-objective Optimization method for ship design
- [15] Yusuke Tahara , F.Stern and Y.Himeno Computational Fluid Dynamics-Based Optimization of a Surface Combatant
- [16] Yusuke Tahara ,So Sugimoto Development of CAD/CFD/Optimizer-Integrated Hull-Form Design System
- [17] J.J Malsonneuve,S.Harries,S.Mariz,etc Towards Optimal Design of Ship hull shapes
- [18] S.Harries,F.valdenazzi,Claus Abt Investigation on optimization Strategies for the Hydrodynamic Design of Fast Ferries

Automatic Optimization Techniques of Ship Hull Based on CFD

Feng Baiwei Liu Zuyuan Zhan Chengsheng Chang Haichao Cheng Xide

(Wuhan University of Technology School of Transportation Hubei Wuhan 430063)

Abstract

This article elaborated the developments of domestic and foreign ship hull optimization research based on CFD briefly, proposed that the key for optimization of ship hull based on the CFD is the technology of geometry modeling parameterized. On the foundation of research works done by the domestic and foreign researchers, this paper proposed the ship blending method, and developed the body form parameterized blending module. By integrated the body form parameterized blending module and the CFD on the integrated optimization frame, automatic optimization design of body form based on the CFD has realized. This research has built the foundation for the research of ship multi-disciplinary optimization.

Key words: CFD geometry modeling parameterized ship hull optimization

作者简介

冯佰威 男, 1974 年生, 博士研究生。主要从事计算机辅助船舶设计、船舶多学科设计优化技术研究。

刘祖源 男, 1963 年生博士导师, 主要从事船舶性能、船舶多学科设计优化技术研究。