

文章编号: 1007-7294(2010)07-0812-10

# 基于 CFD 的船型优化设计研究进展综述

赵 峰<sup>1</sup>, 李胜忠<sup>1</sup>, 杨 磊<sup>1</sup>, 刘 卉<sup>2</sup>

(1 中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082; 2 中国舰船研究院, 北京 100192)

**摘要:** 随着计算机技术的飞速发展以及最优化理论的不完善,最优化技术已被引入船舶设计领域,并与先进的 CFD 技术成功结合,发展形成了崭新的 SBD(Simulation Based Design)技术,该技术为船型优化设计和构型船型打开了新的局面,在国际船舶研究设计领域引起了广泛的关注。文中对船舶领域中的 SBD 技术的基本内涵及其所包含的主要关键技术进行了阐述和总结,同时对国内外该研究方向的发展现状与趋势进行了分析和评述。

**关键词:** 船型优化设计; CFD; SBD 技术; 船体几何自动重构; 优化技术; 近似技术

中图分类号: U662.9 文献标识码: A

## An overview on the design optimization of ship hull based on CFD techniques

ZHAO Feng<sup>1</sup>, LI Sheng-zhong<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>2</sup>

(1 China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China;

2 China Ship Research and Development Academy, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Optimization algorithms and CFD techniques are combined together into what is known as Simulation-Based Design (SBD) techniques. A worldwide attention was concentrated since the SBD presented. In this paper, essential connotation and crucial techniques of the SBD in the naval hydrodynamic context are reviewed. And then, the domestic and international research work and recent progress are introduced. Finally, the developing trends on the design optimization of ship hulls based on CFD techniques are unscrambled.

**Key words:** ship hull design optimization; CFD; SBD; hull geometry automatic modification; optimization techniques; approximation techniques

## 1 引言

船体型线设计是一门复杂的综合性技术,是船舶总体设计中的一个核心环节,设计水平和能力对船舶综合航行性能、经济绩效和产品竞争力都具有重要影响,也是促进船舶工业发展和实现船舶创新设计需求中亟待解决的关键技术问题。

目前,国内外常用的船型设计方法,通常是根据母型船型线、船模系列试验资料,按照某种规则对型线加以修改而得到,之后制作船模,进行模型试验验证。这类传统设计模式(见图 1),强烈地依赖于造船工程师的设计经验和型线数据库,而且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,成本高,设计周期长,尽管如此,做出的设计方案也只是满足设计技术指标的可行方案而非最优设计方案。

收稿日期: 2010-04-08

作者简介: 赵 峰(1964-),男,中国船舶科学研究中心研究员。

随着计算机技术的飞速发展和计算数学理论不断完善,计算流体力学CFD得到了蓬勃发展,评估能力显著增强,已逐步迈向实用化,并全面融入设计进程,但目前大多还局限于对给定船型的流体动力特性进行计算和预报(正问题),只是部分替代和减少模型试验,而没有将CFD技术系统地融入优化设计过程(逆问题),并使之能达到启发设计师创新思想的目的。如何进一步发挥CFD在工程设计优化中的作用,促使工程设计从传统经验设计模式向知识化设计模式的转变,成为当前CFD技术应用研究的一个重点<sup>[1]</sup>。

将最优化技术引入船舶设计领域,并与先进的CFD技术成功结合,发展形成的SBD技术<sup>[2]</sup>使得船型知识化设计模式成为一种可能。该技术是将CFD技术和最优化技术直接应用于新型船舶的设计,其原理见图2;通过利用CFD对设定的优化目标(船舶水动力性能)进行数值计算,同时利用最优化技术和几何重构技术对船型设计空间进行探索,最终获得给定约束条件下的性能最优的船体外形。

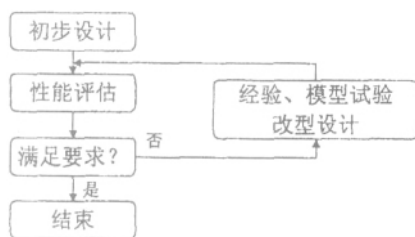


图1 传统船型设计模式

Fig.1 The flowchart of traditional ship hull design

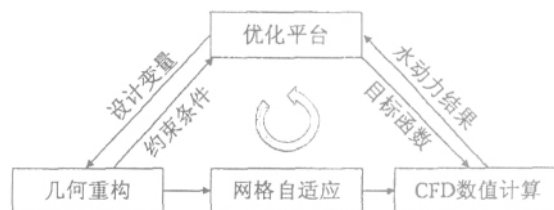


图2 SBD技术的基本原理

Fig.2 Basic elements of simulation based design environment

SBD技术为船型优化设计和构型船型打开了新的局面,并在国际船舶研究设计领域引起了广泛的关注,该项技术发展动态,对船型技术的发展将可能是一项革命性的技术推动。其意义主要体现在以下三个方面:

- (1) 推动船型设计从传统经验模式向基于先进数值评估理论的知识化模式迈进;
- (2) 突破传统CFD优化技术—选优/优选,使CFD技术系统地融入设计优化过程,加快推进已有的CFD技术在工程设计中的应用;
- (3) 从“正问题”到“逆问题”,实现以性能驱动设计的目标,进而提高船型创新设计水平,增强我国造船业的国际竞争力。

本文对船舶设计领域中的SBD技术—基于CFD的船型优化设计的研究进展和发展趋势进行了较为详细的介绍和评述。首先,对基于CFD的船型优化设计的内涵及其主要关键技术进行了阐述和总结;之后,对国外该研究方向的发展现状与趋势进行了分析和评述,最后对国内的研究现状和存在的问题进行了总结。

## 2 基于CFD的船型优化设计的基本内涵

从数学的观点来看,基于CFD的船型优化设计实际上是求解一个最优化问题。最优化问题的数学模型<sup>[3]</sup>如下:

$$\min f(x) \quad S.T. g(x) \geq 0; \quad x \in D \quad (1)$$

式中 $f(x)$ 是优化问题的目标函数; $g(x)$ 为约束函数; $x$ 为设计变量;集合 $D$ 为问题的可行域,也称为设计空间;可行域中的点为可行点,其所对应的目标函数值为可行解。

从最优化问题的定义可以看出,最优化包括三个基本要素:目标函数,设计变量,约束条件。对于基于CFD的船型优化设计问题来说,目标函数 $f(x)$ 是船舶的水动力性能(如阻力、尾流场品质和适航性能等等);设计变量 $x$ 是能够表达船体几何的参数;约束条件 $g(x)$ 是船体几何外形的限制条件(如排水体积)。显然,该优化问题的目标函数与设计变量之间不能用简单的数学关系式进行表达,它们之间的

函数关系是未知的、隐式的;那么如何通过已知的设计变量(表达船体几何的参数)计算目标函数(船舶的水动力性能)的值呢? CFD 数值模拟方法成为计算该隐式函数值的一种快速、高效的途径,见图3。

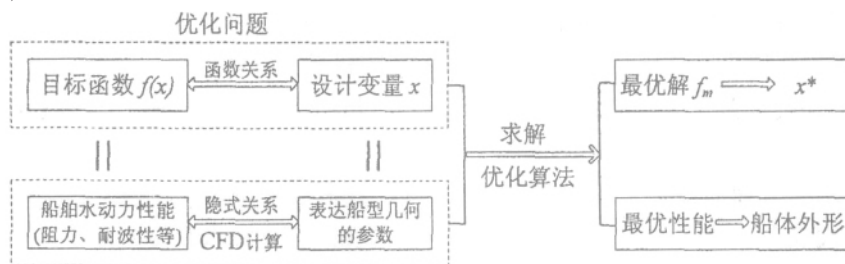


图 3 基于 CFD 船型优化设计问题的内涵

Fig.3 The connotation of design optimization of ship hull based on CFD

基于 CFD 船型优化设计问题的数学模型通过 CFD 数值计算方法建立起来后,需要对该优化问题进行求解,求解方法包括各种优化算法,如基于梯度算法、随机搜索算法等。通过对该优化问题的求解能够获得给定约束条件下的具有最优水动力性能的船型。当然,要获得该优化问题的最优解,还要解决船体几何的参数化表达与重构问题,以及优化过程中 CFD 数值计算带来的响应时长与计算费用问题。

以上是从最优化理论的观点出发,论述基于 CFD 的船型优化设计的基本内涵,值得说明的是,本文所述的船型优化是基于最优化理论的,而非传统船型设计过程中的“优选”或“选优”。

### 3 基于 CFD 的船型优化设计中的关键技术

从基于 CFD 的船型优化设计的内涵可以看出,要实现基于 CFD 的船型优化设计主要需要解决以下四个方面的关键技术问题:

(1) CFD 数值分析技术。该技术是建立船型优化设计问题的数学模型的基础;

(2) 船体几何自动重构技术(Hull Geometry Automatic Modification Techniques)。该技术是实现基于 CFD 的船型优化设计的前提条件。在船型优化过程中,设计变量将依据优化算法做相应的调整,而设计变量的调整将体现在船体几何外形的变化上,如何用尽可能少的设计变量的变化,获得范围尽可能广的几何设计空间(尽可能多的不同船型几何),是船体几何重构技术追求的一个目标,当然也是形状优化设计中的一个难点;

(3) 最优化技术(Optimization Techniques)。该技术是求解船型设计问题的主要方法和必要手段。采用何种优化算法使其能够在优化问题的设计空间内快速、准确地搜索到最优解,是船型优化设计研究的一个重点;

(4) 近似技术(Approximation Techniques)。该技术解决在优化过程中由高精度 CFD 求解器带来的响应时长、计算费用等问题,它是将“基于 CFD 的船型优化设计”应用于实际工程设计的有效途径。

以上关键技术中,CFD 数值分析技术和最优化技术目前已发展得相对较为成熟,并广泛应用于各个工程领域,本文在此不做详细介绍,只对当前船体几何自动重构技术和近似技术的发展现状做简要的介绍和总结。

#### 3.1 船体几何自动重构技术

船体几何自动重构需要遵从以下原则<sup>[4]</sup>:

(1) 保证船体几何重构后的光顺性。如果重构几何是船体的一部分,则修改后的几何与初始几何在交接处应该连续,即光顺;

(2) 设计变量的数量应该尽可能少,但对于复杂的船体几何而言,往往很难做到;

(3) 为了能够探索更广范围的可行解区域,船体几何重构方法应该有尽可能好的适应性。

目前,基于 CFD 的船型优化设计所采用的船体几何重构方法主要有以下几种:

### (1) 叠加调和方法(Morphing Approach)

叠加调和方法是通过对已知的两个或多个归一化后的初始船型进行线性叠加,通过调节叠加系数来实现船体几何重构。如图4所示( $\omega_i$ 为叠加系数, $\omega_1+\omega_2=1$ )。

叠加调和几何重构方法在基于 CFD 的船型优化设计中有所应用。Tahara(2008)<sup>[5]</sup>利用该法实现了双体船的几何重构。冯佰威等(2008)<sup>[6]</sup>采用该方法对两个初始船型进行线性叠加实现船体几何重构,并以设计航速下的总阻力作为优化目标,对船体的尾部线型进行了优化。该方法优点是设计变量的数量较少,易于满足光顺性要求;缺点是很难获得尽可能多的不同的船体几何外形。

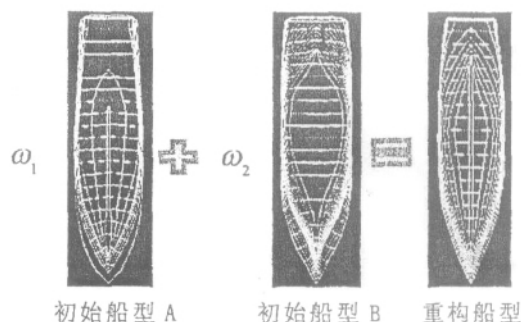


图4 叠加调和方法  
Fig.4 Morphing approach

### (2) 参数化模型方法(Parametric Modeling Approach)

参数化模型方法是通过利用参数化修正函数(Parametric Modification Functions)修正表达船体几何外形的一系列形状参数,来达到船体几何重构的目的。Kim(2008)<sup>[7]</sup>选择对横剖面面积曲线、水线和球鼻艏三个形状参数进行修正,实现船体几何重构(见图5),对船模 KVLCC2 进行了多目标全局优化。

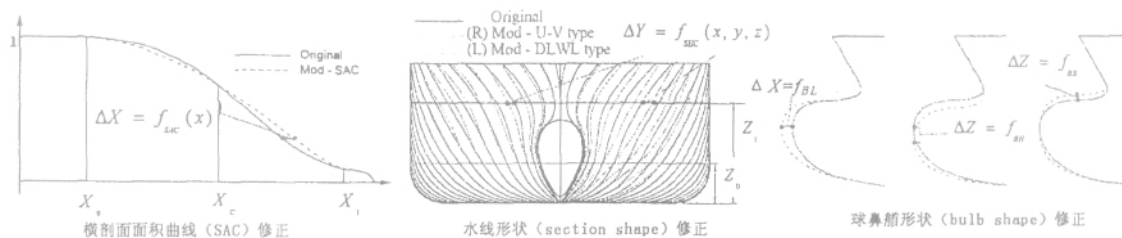


图5 参数模型方法的应用

Fig.5 The application of parametric modeling approach

参数化模型方法的设计参数可以直接作为优化问题的设计变量,对船舶整体和局部都能进行几何重构;该方法主要缺点是并不足够灵活,它只能根据已经定义的参数化修正函数获得被修正的船体几何。

### (3) Bezier 补丁方法(Bezier Patch Approach)

Bezier Patch 方法是在初始船体几何(部分)上叠加一片 Bezier 曲面,利用 Bezier 曲面的变形,实现船体几何重构。Bezier 曲面的位置与形状只与其特征网格节点的位置有关<sup>[8]</sup>。因此,可利用节点位置的变化获得不同的曲面形状,即可将节点位置直接作为优化问题的设计变量。该方法的优点是设计变量较少,光顺性容易满足。因此广泛应用于基于 CFD 的船体局部优化,如 Peri 等(2001,2003)<sup>[4,9]</sup>采用该几何重构方法对某油船(如图6所示)、DTMB5145 的球鼻艏进行了多目标优化设计。该方法的缺点是仅实用于局部几何的重构,并且随着设计变量的增加,约束条件成倍增加,导致需要大量的计算内存。

### (4) 自由变形方法 (Free-Form Deformation Approach)

自由变形方法(FFD)由 Sederberg 和 Parry<sup>[10]</sup>在计算机图形学中提出,是一种非常灵活的三维几何变形方法,它通过一系列的点来表示三维几何。该方法能够简化为四维 Bezier 曲面,用于表达船体几何。

Peri, Tahara(2006,2008)<sup>[11,5]</sup>采用 FFD 方法对船体形状参数化表达,并实现船体几何重构(如图7所示),对多体船进行了多目标优化设计,并对优化后的结果进行了模型试验验证。该方法可以用于整船的几何重构,但设计变量相对较多。

### (5) 基于 CAD 方法(CAD-based Approach)

基于 CAD 方法的船体几何重构包括两种形式<sup>[12]</sup>,一种是直接执行描述船体及其变化的 CAD 宏文件,即 CAD 直接方法;另一种是基于 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)曲面模拟 CAD 操作的方法,即 CAD 效仿方法(CAD Emulation Approach),与 CAD 直接方法相比,CAD 效仿方法具有如下优



点;NURBS 曲面控制点可以直接作为优化问题的设计变量,能够给出初始船型和重构船型几何的 IGES 格式文件。基于 CAD 方法较为复杂,且设计变量较多。

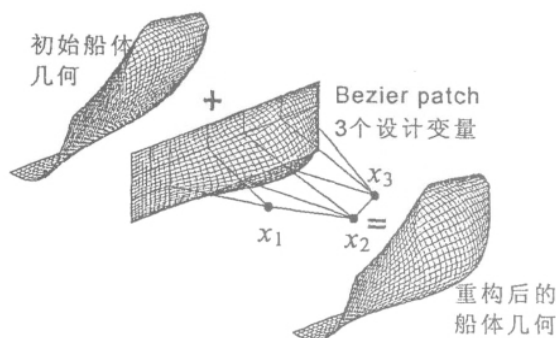


图 6 Bezier Patch 方法几何重构示意图  
Fig.6 The application of Bezier patch approach

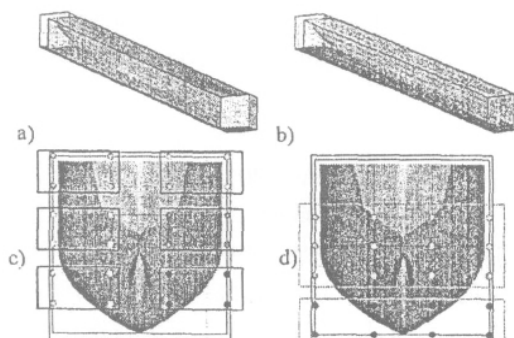


图 7 FFD 几何重构方法的应用  
Fig.7 The application of FFD approach

### 3.2 近似技术

对于复杂工程优化设计来说,进行一次完整系统的优化,工作量是巨大的,即在优化迭代的每一步完整地执行整个系统分析(高精度 CFD 求解器)几乎是不可能的。如何采用合适的优化策略解决由高精度 CFD 求解器带来的响应时长、计算费用等问题,是当前研究的一个重点。

采用近似模型来代替真实计算模型,在近似模型上进行优化,从而在允许的计算难度下得到满足工程精度的优化解,成为解决这一问题的一种有效的手段。因此,近似技术研究成为优化设计研究领域的一个热点。

近似技术<sup>[13]</sup>主要包括:响应面方法(Response Surface Method)、变精度模型(Variable-fidelity Model)、Kriging 模型和径向基函数(Radical Basis Function, RBF)模型等。

响应面方法(RSM)是采用多项式回归技术对试验数据进行最小二乘拟合,求出待定系数,从而确定近似模型的一种方法。

变精度模型通过对同一物理现象采用两种不同精度的计算工具进行仿真而构造。一种是精确的、代价高的仿真软件(如求解 N-S 方程的 CFD 软件),另一种是粗略的、代价低的仿真软件(如求解欧拉方程的 CFD 软件)。其实质是一种倍乘或相加校正因子,即用高精度软件的准确度对低精度软件的输出结果进行修正,修正因子通过处理来自两种软件的结果而得到。Peri 和 Campana(2008)<sup>[14]</sup>对基于 CFD 的船型优化设计中的变精度模型进行较为深入的研究,采用两种不同的变精度模型框架应用于船型优化设计(见图 8~9),有效地解决了优化设计过程中的计算时长问题。

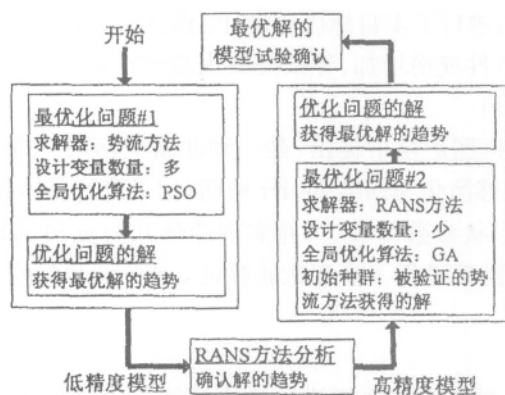


图 8 变精度模型框架(分离型)  
Fig.8 The framework of variable-fidelity model (Decoupled)

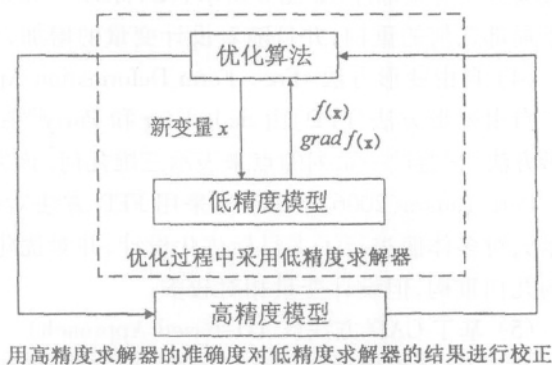


图 9 变精度模型框架(嵌套型)  
Fig.9 The framework of variable-fidelity model (Nested)

Kriging 模型从统计意义上说,是从变量相关性和变异性出发,在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏、最优估计的一种方法,由全局响应近似函数和局部导数组合而成。全局响应近似函数根据平均响应一般取常数项,局部导数根据任意两个取样点的相互关系用通行的高斯修正函数确定,取样点通过插值得到。Kriging 模型的优点是能够捕获真实物理问题中简单多项式无法代表的某些非线性特征。

RBF 模型是生物和函数逼近理论的结合,多运用于复杂函数逼近,只需较少的神经元就能获得很好的逼近效果,且具有唯一的最佳逼近点。

## 4 国外研究进展综述

基于 CFD 的船型优化设计是随着 CFD 技术、CAD 技术以及最优化技术的发展,而出现的一种新的研究方向。它突破了传统 CFD 优化技术所指的多方案选优/优选,将 CFD 技术系统地融入优化过程,实现对目标函数的直接寻优。当前这方面研究主要集中在意大利、日韩等国。其中,意大利 INSEAN 水池的 Campana 教授是将先进的 CFD 技术应用于船型优化设计的倡导者和该技术领域的开拓者。近年来,他及其课题组在基于 CFD 的船舶水动力性能优化设计方面开展了大量的研究工作,对船体几何自动重构技术、多目标全局优化技术、近似技术、综合集成技术(并行计算)等进行了较为系统的研究。此外,欧盟数值水池项目<sup>[15]</sup>,在增强和完善现有 CFD 技术的评估能力的同时,十分注重 CFD 在工程优化设计中的应用,该项目中的 VIP(VIRTUE Integrated Platform)模块已能够实现对已有的各种不同 CFD 工具的综合集成,并提供了一套完整的(开放式)船舶水动力综合优化设计系统。

下面对国外在该方向的发展进程及研究现状进行简要的介绍。

90 年代末,最优化理论被引入船型设计领域,并结合 CFD 技术,开始以总阻力为目标对船型进行优化设计。该阶段研究主要集中在船型优化设计中的优化方法、船体几何参数化表达、数值计算等方面。Harries 等(1998)<sup>[16]</sup>在 LNG 船的设计过程中,基于快速性的要求采用分步优化技术对船体线型进行设计。首先运用经验方法(海军部系数法)对船体尺度与线型进行了初步优化,其后应用 CFD 对船体线型进行了进一步的优化;Huan 等(1998)<sup>[17]</sup>采用基于梯度的伴随矩阵优化方法(Adjoint Optimization Method),利用势流求解器(求解非线性自由表面流动),对船型进行了优化设计;

Tahara 等(2000)<sup>[18]</sup>采用参数模型法,选择六个参数控制船型生成,用序列二次规划方法(SQP)对非线性优化问题进行求解,分别对 DTMB5415 的船艏、声纳罩、船艉线型进行了优化设计;

Peri 等(2001)<sup>[4]</sup>以总阻力和船艏兴波波幅作为目标函数,对某油轮球鼻艏进行了优化设计,采用势流方法和经验公式对目标函数进行计算,利用 Bezier Patch 方法实现船体几何重构,分别选用 CG(变梯度法)、SQP(序列二次规划)、SD(最速下降法)三种不同的优化算法进行优化计算,并对优化结果进行了模型试验验证;

Campana, Peri 等(2003, 2004, 2005, 2008)<sup>[2,9,12,19]</sup>以 DTMB5415 船模作为优化对象,以兴波阻力、耐波性(垂荡和纵摇峰值)、尾流场(桨盘面轴向速度的不均匀度和声纳罩后的轴向涡)作为优化目标,对多目标全局优化算法和近似技术(变精度模型)以及船型几何重构方法(分别采用 Bezier Patch 和基于 CAD 的几何重构方法)进行了较为详细的研究。此外,还对优化策略进行了研究:将优化过程分为全局搜寻阶段和局部优化阶段。在全局搜寻阶段,利用低精度求解器,计算目标函数(近似值),采用全局优化算法获得最优解所在的区域;缩小设计空间之后,在局部优化阶段采用高精度求解器计算目标函数、采用基于梯度的局部优化算法进行优化设计。该优化策略对解决整个优化进程中计算时长与目标函数计算精度之间的矛盾提供了一种新的思路。对优化设计方案的模型试验验证结果表明:优化设计方案的总阻力比初始设计方案减小 5.23%,且获得了更好的耐波性以及桨伴流场品质(见图 10 和图 11)。

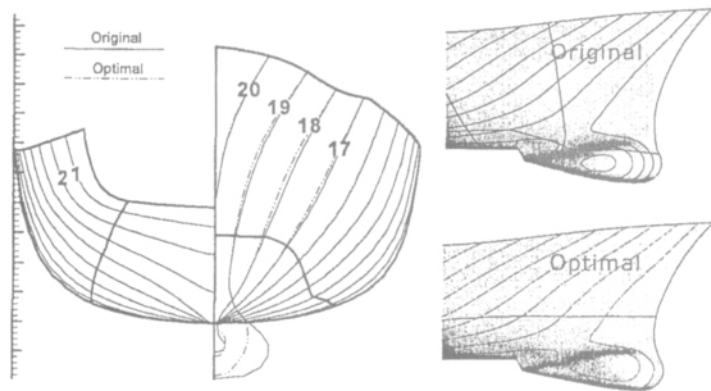


图 10 优化船型与初始船型比较

Fig.10 Body plans of the original and optimal hull

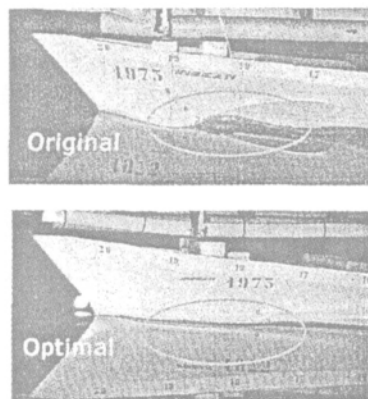


图 11 模型试验验证

Fig.11 Model tests validation

Peri 和 Tahara 等(2006,2008)<sup>[11,5]</sup>采用两种多目标全局优化算法(MOGA、PSO 与 DRAGO 混合算法)对高速双体船分别进行了给定航速下的单目标(阻力)优化设计、单目标多点(对应三个航速)优化设计以及多目标(阻力和耐波性)优化设计,船体几何重构分别采用 FFD 自由变形方法和基于 CAD 方法。对其中一个优化方案的模型试验验证结果表明:优化设计方案的总阻力比初始设计方案减小了 9.3%,垂荡和横摇峰值分别减少 50.5%和 27.4%,见图 12 和 13。

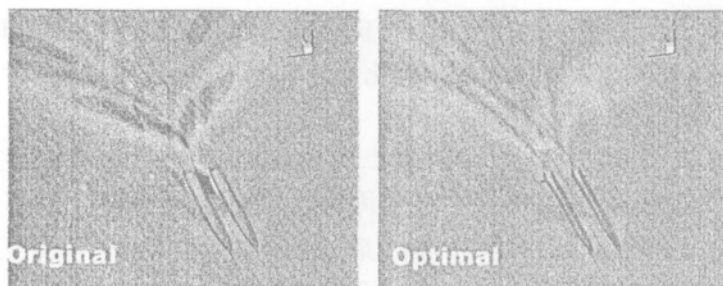


图 12 初始设计和优化设计的波形云图

Fig.12 Free surface elevation of the original and optimal catamaran design

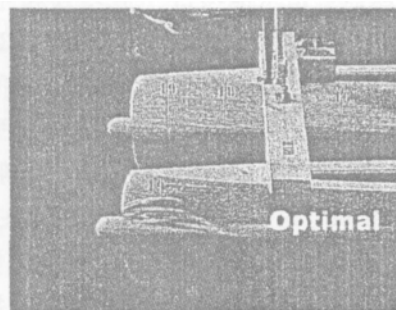


图 13 模型试验验证

Fig.13 The optimized catamaran during model tests

Peri 等(2008,2009)<sup>[14,20]</sup>以解决 CFD 数值计算带来的响应时长和计算费用问题为目标,对基于 CFD 船型优化设计中的近似技术进行了详细的总结和研究,包括 RSM、VFM、Kriging、RBF 等近似模型;结果表明采用合适的近似方法在保证优化精度的条件下能够大大减少整个优化问题的求解时间。

Campana, Pinto 等(2007,2009)<sup>[21-22]</sup>对粒子群优化算法(PSO)进行了研究,提出了一种新的用于解决复杂优化问题的多目标全局优化算法—DDFPSO(Deterministic Derivative-Free Particle Swarm Optimization),采用标准测试函数对该算法进行了测试,结果表明该算法效率高且能够获得全局最优解;并以耐波性作为优化目标,对 S175 船模进行了优化。

综上所述,国外已经突破了诸多关键技术,初步建立了基于 CFD 的船型优化设计框架,取得了可喜的成果,并已开始将其用于船舶工程设计。从中我们可以理出基于 CFD 船型优化设计的研究进程与发展方向(见图 14):

- (1) 在优化方法方面,从基于梯度的局部优化算法(如:CG、SQP、SD)向随机搜索全局优化算法(GA、DRAGO、PSO 等)发展;
- (2) 在优化目标方面,从最初以阻力作为目标函数到现在多目标优化(总阻力、尾流场品质、兴波波幅等);从单学科优化到多学科优化;所解决的优化问题越来越接近于实际工程设计问题;
- (3) 在 CFD 数值计算方法的选择方面,由于近似技术的应用、计算机及其并行技术快速发展,从最



初采用低精度势流方法逐渐向现在的高精度粘流方法(RANS 方法)发展;

(4) 在优化对象方面,从船体局部优化(球鼻艏等)到整体船型优化、多体船优化;

(5) 在船体几何重构技术方面,从叠加调和方法到基于曲线曲面理论的 Bezier Patch 方法,再到 FFD 方法和基于 CAD 方法;

(6) 优化策略。从试验设计、响应面方法到变精度模型、kriging 模型、RBF 模型以及面向工程应用的稳健性优化设计。

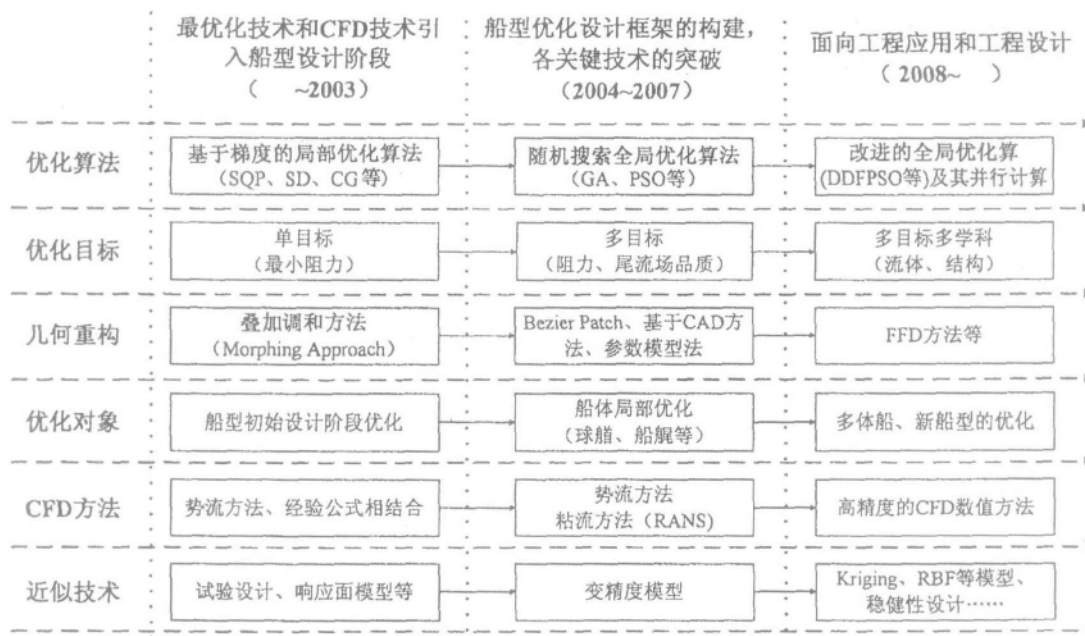


图 14 基于 CFD 船型优化设计发展历程与趋势

Fig.4 The development trends and processes of design optimization of ship hull based on CFD

## 5 国内发展现状与差距

目前国内 CFD 发展水平在理论研究方面与国外相当,如湍流 DNS 数值模拟技术研究,非定常动态数值模拟技术等。但 CFD 技术的软件化程度,以及在工程应用的深度和广度方面与发达国家存在较大差距。特别是船舶工程领域中 CFD 工具和最优化技术的系统应用还远远不够的。可以说,基于 CFD 的船型优化设计还处于发展的幼年期。此外,国内有许多“船型优化设计”并没有用到最优化理论,而是在做多方案“选优”或“优选”。如:次洪恩(2009)<sup>[23]</sup>采用荷兰 MARIN 水池开发的船体阻力计算软件 RAPID,对肥大型油船球艏进行组合选优(共 18 个设计方案);陈京普等(2009)<sup>[24]</sup>采用一种势流兴波数值方法与 RANS 求解器相结合的数值计算方法对某船的艏部进行线型优选(共 10 个方案),以便使其速度达到设计要求,经过多轮数值“优化”试验,最终获得一个相对较优的设计方案。

关于基于 CFD 的船型优化设计研究,国内刚刚开始跟踪,其焦点主要集中在自动化平台的构建、单目标流体动力(阻力)优化设计、优化算法、数值计算方法等方面的研究。

梁军等(2008)<sup>[25]</sup>利用 OPTIMUS5.2 优化平台集成商业软件以阻力作为优化目标,采用响应面方法,对 DTRC Model 5470 潜艇模型艏部线型进行了优化,并做了相应的模型试验验证。

程成(2007)<sup>[26]</sup>利用 ISIGHT 优化平台集成 FLUENT、UG 等商业软件,以螺旋桨效率和最小压力系数为目标函数对螺旋桨进行了优化设计,并对近似模型、稳健性设计方法等进行了初步的研究。

张宝吉(2009)<sup>[27]</sup>以兴波阻力作为优化目标,并采用 Michell 积分法和 Rankine 源法对其进行计算,分别利用传统的非线性规划方法和遗传算法对 Wigley 和 S60 船模进行了单目标优化设计,船体几何重



构采用参数模型法。

冯佰威等(2008)<sup>[6]</sup>利用 ISIGHT 优化平台及 FLUENT 数值计算软件,采用叠加调和方法实现船体几何重构(两个母型船线性叠加,只有一个设计变量),对船体尾部线性进行了单目标(总阻力)优化;由于在数值计算过程中,采用非结构化网格,使得数值计算精度及优化结果的可靠性需要做进一步的验证和确认。

综上所述,国内研究主要还集中在优化设计平台的构建(大多数采用商用优化软件)、船体局部单目标(阻力)水动力优化等方面,基本上还处于初始探索阶段,与世界先进水平相比还有相当大的差距。主要存在以下问题:

(1) 由于未能解决优化过程中的海量计算与响应时长问题,在 CFD 数值方法的选择上还限于低精度的势流方法(甚至采用经验公式),现有的高精度的 CFD 数值方法基本上没有得到应用;

(2) 国内研究人员大多采用商用优化软件(如 ISIGHT、OPTIMUS5.2 等)或者采用传统的基于梯度的优化算法,新的全局优化算法没有得到应用;

(3) 船体几何的参数化表达与重构技术没有取得突破,使得国内研究大多限于对简单的船型进行局部优化,同时,船型几何设计空间也受到限制,很难获得给定条件下的性能最优船型;

(4) 目前依然没有建立一个开放的、高效的基于 CFD 的船型优化设计框架,即:没有很好地解决各技术模块的接口、数据交换、并行技术等综合集成问题。

## 6 结 论

基于 CFD 的船型优化设计研究主要涉及最优化理论、CAD 技术、CFD 技术、流体动力学等多个学科,是一项复杂的、综合的、集成性很强的系统工程。目前国外已经初步建立了基于 CFD 的船型优化设计框架,并取得了可喜的成果。而国内的研究基本上还处于初始探索阶段。虽然国内的船舶设计研究机构 and 人员在船型优化设计方面做了不少工作,也取得了一些进展,但由于起点低,以及技术缺乏创新性的理论指导等多方面因素,使得我国船型优化的手段、能力和水平都与世界先进水平有相当大的差距,如不积极采取措施,这一差距不但不能缩小,甚至还有继续扩大的趋势。这种状况势必严重影响我国造船业的创新能力和国际竞争力,对我国成为世界第一造船大国的努力无疑也是很不利。当务之急,必须加快突破基于 CFD 的船型优化设计中的各项关键技术,尽早建立基于 CFD 的船型优化设计的框架,推进已有 CFD 技术在实际船舶工程设计中的应用,使船舶设计从传统经验模式向基于先进数值评估理论的知识化模式迈进,跨越式提升我国船型创新设计的能力。

## 参 考 文 献:

- [1] 沈泓萃. ITTC 及船舶水动力学研究方向与重点分析[C]. 中国杭州: 中国造船工程学会, 2008: 373-399.
- [2] Peri D, Campana E F. High-fidelity models and multiobjective global optimization algorithms in simulation-based design[J]. Journal of Ship Research, 2005, 49(3): 159-175.
- [3] 郭 科, 陈 聆, 魏友华. 最优化方法及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [4] Peri D, Rossetti M, Campana E F. Design optimization of ship hulls via CFD techniques[J]. Journal of Ship Research, 2001, 45(2): 140-149.
- [5] Tahara Y, Peri D, Campana E F, Stern F. Single and multiobjective design optimization of a fast multihull ship: Numerical and experimental results [C]// 27th Symposium on Naval Hydrodynamics. Seoul, Korea, 2008: 25-33.
- [6] 冯佰威, 刘祖源, 詹成胜, 常海超等. 基于 CFD 的船型自动优化技术研究[C]// 2008 年船舶水动力学学术会议. 中国杭州, 2008: 137-146.
- [7] Kim H J, Chun H H. Optimizing using Parametric Modification Functions and Global Optimization Methods [C]// 27th Symposium on Naval Hydrodynamics. Seoul, Korea, 2008.

- [8] 吉贝尔. 德忙热, 让皮尔. 甫热著, 王向东译. 曲线与曲面的数学[M]. 北京: 商务印书馆, 2000.
- [9] Peri D, Campana E F. Multidisciplinary Design Optimization of a naval surface combatant[J]. Journal of Ship Research, 2003, 47(1): 1–12.
- [10] Sederberg T W, Parry S R. Free-form deformation of solid geometric models[J]. Proc. SIGGRAPH '86, Computer Graphics, 1986, 20(4): 151–159.
- [11] Peri D, Campana E F. Simulation based design of fast multi-hull ship[C]// 26th Symposium on Naval Hydrodynamics. Rome, Italy, 2006.
- [12] Campana E F, Peri D, Tahara Y, Stern F. Comparison and validation of CFD based local optimization methods for surface combatant bow[C]// The 25th Symposium on Naval Hydrodynamics. Canada, 2004.
- [13] Jin R, Chen W, Simpson T W. Comparative studies of metamodeling techniques under multiple modelling criteria[J]. Struct Multidisc Optim. 2001, 23: 1–13.
- [14] Peri D, Campana E F. Variable fidelity and surrogate modeling in simulation-based design[C]// 27th Symposium on Naval Hydrodynamics. Seoul, Korea, 2008.
- [15] 李胜忠, 李 斌, 赵 峰, 李力枫. VIRTUE 计划研究进展综述[J]. 船舶力学, 2009, 13(4): 662–675.
- [16] Harries S. Parametric design and hydrodynamic optimization of ship hull forms[D]. Germany: Institut für Schiffs-und Meerestechnik, Technische University Berlin, 1998.
- [17] Huan J, Huang T T. Sensitivity analysis methods for shape optimization in nonlinear free surface flow[C]// Proceedings, 3rd Osaka Colloquium on Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design. Osaka Prefecture Univ. and Osaka Univ., Japan, 1998.
- [18] Tahara Y, Patterson E, Stern F, Himeno Y. Flow- and wave-field optimization of surface combatants using CFD-based optimization methods[C]// Proceedings, 23rd ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, September, 2000. Val de Reuil, France, 2000.
- [19] Tahara Y, Peri D, Campana E F, Stern F. Computational fluid dynamics-Based multiobjective optimization of a surface combatant[J]. Marine Science and Technology, 2008, 13(2): 95–116.
- [20] Peri D. Self-learning metamodels for optimization[J]. Journal Ship Research, 2009, 56(3): 94–108.
- [21] Campana E F, Liuzzi D, Lucidi S, Peri D, Piccialli V. New global optimization methods for ship design problems[J]. Optimization Engineering, 2009(2): 533–555.
- [22] Pinto A, Peri D, Campana E F. Multiobjective optimization of a containership using deterministic particle swarm optimization[J]. Journal of Ship Research, 2007, 51: 217–228.
- [23] 次洪恩. 船体阻力数值计算在肥大船型球首优化中的应用[J]. 船舶, 2009(1): 24–29.
- [24] 陈京普, 朱德祥, 何术龙, 黄少锋, 杨 奕. 一种快速评估方法在船舶线型优化中的应用[J]. 中国造船, 2009, 50(4): 7–12.
- [25] 梁 军, 许劲松, 谢 杰等. 基于设计空间探索的型线自动优化[C]. 中国杭州: 中国造船工程学会, 2008: 50–63.
- [26] 程 成. 基于 iSIGHT 的螺旋桨优化系统的开发及运用研究[D]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2007.
- [27] 张宝吉. 船体线型优化设计方法及最小阻力船型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.