

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.11.007

基于参数化建模和 CFD 数值模拟的 船舶球鼻艏优化设计*

兰林强¹, 罗伟林^{1,2*}

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116;

2. 福建省船舶与海洋工程结构性能联合创新重点实验室, 福建 福州 350116)

摘要:针对传统船舶球鼻艏形状设计存在的问题,对基于 NURBS 方法的船体完全参数化建模和基于 Rankine 源的面元法的船舶阻力数值计算进行了研究,对一类组合型优化策略结合设计变量、约束条件和优化目标进行了分析,通过建立一类自动优化平台对船舶球鼻艏型线进行了优化设计。通过优化平台对船体球鼻艏各项参数进行了自动优化调整直至满足减小船舶兴波阻力的优化目标。应用所构建的优化框架,以兴波阻力最小化为目标对某一滚装船球鼻艏型线进行了优化设计。研究表明,型线优化后的船体兴波阻力得到下降,船艏周围兴波得到了改善,验证了所提出型线优化设计方案的有效性。

关键词:船舶型线设计;参数化建模;CFD 计算;兴波阻力

中图分类号:TH122;U662.2

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)11-1329-06

Optimization of the lines of bulbous bow of a hull based on parametric modeling and CFD calculation

LAN Lin-qiang¹, LUO Wei-lin^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Fujian Province Key Laboratory of Structural Performances in Ship and Ocean Engineering, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Aiming at the problem of the traditional design of the bulbous bow of a hull, complete parameter modeling of the hull by using NURBS and the calculation of the hull resistance based on Rankine source panel method was investigated. A hybrid optimization strategy in combination of the design variables, constraints and optimization goal were analyzed. An automatic optimization platform at the ship design stage was constructed to optimize the lines of bulbous bow of a hull. The parameters of the lines of bulbous bow of a hull were automatically optimized and adjusted to meet the aim to reduce the wave-making resistance by using the automatic optimization platform. A lines of bulbous bow of a hull of a ro-ro ship was optimized by using the optimization method proposed, with the objective to minimize the wave-making resistance. The results indicate that wave-making resistance reduces obviously and the wave-shape of near bow becomes gentle after the lines of bulbous bow of a hull are optimized, which demonstrates the validity of the proposed optimization design strategy.

Key words: hull forms optimization; parametric modeling; CFD calculation; wave-making resistance

0 引言

计算机科学和数值科学的发展为船舶设计提供了

强有力的分析工具,代表性的技术如计算机辅助设计(CAD)和计算流体动力学(CFD)。其中,CFD 技术目前已被广泛用于计算船舶性能。但从船舶型线设计优

收稿日期:2016-05-31

基金项目:福建省教育厅资助省属高校专项课题(JK2015003)

作者简介:兰林强(1990-),男,湖南醴陵人,硕士研究生,主要从事船舶多学科设计优化方面的研究. E-mail:a626456917@qq.com

通信联系人:罗伟林,男,博士,副教授,硕士生导师. E-mail:wlluo@fzu.edu.cn

化角度,CFD 技术常常仅被作为一种型线确定后的性能评估工具,不仅延长了设计周期,也很难保证获得最优型线。为提高设计质量和效率,可将 CAD 技术与 CFD 技术结合并作为船型优化设计的一部分驱动模块。CAD 技术主要用于对船体进行参数化建模,已被证明是一种有效的船体建模方法^[1]。在基于 CAD + CFD 方法的船舶减阻研究方面,Yusuke 等^[2]利用 NAPA 软件进行参数化建模,结合 Rankine 源面元法对一艘集装箱船进行了优化;Percival 等^[3]应用船体表面 B 样条曲线的变换和一种简单 CFD 近似计算对 Wigley 船型进行了优化;Tahara 等^[4]应用 NAPA 软件进行建模,RANS 求解器进行 CFD 计算,对一艘集装箱船进行了设计优化;Zakerdoost 等^[5]结合 NURBS 方法和势流计算对 Wigley 船型进行了优化设计;Ang 等^[6]应用自由变形法(FFD)和势流计算对某海洋工程辅助船进行了型线优化设计;Wang^[7]结合 NURBS 方法和基于 Neumann-Michell 理论的 CFD 计算进行了船型优化设计;张宝吉等^[8]利用 Michell 积分法和 Rankine 源法对 Wigley 船型进行了优化;冯佰威采用融合叠加的方法对船体进行几何变换,结合 CFD 计算进行了船型设计优化研究^[9-10];邓贤辉等^[11]应用 NURBS 和势流方法对某集装箱船进行了优化设计。尽管基于 CAD + CFD 的船体型线设计方法已受到越来越多的关注,其研究取得了相当进展,但该方法的有效性和实用性仍有待于进一步验证和提高,包括:①许多研究的目标船型仍是简单的几何船型-Wigley 船型,对更多实际船型的计算仍需补充和完善;②从设计优化的角度,优化算法的构建是影响优化效率、精度和保证最优解的关键技术。

本研究以某一滚装船为研究对象,兴波阻力最小化为目标,首先应用 NURBS 对船体进行完全参数化建模,然后应用基于 Rankine 源的面元法求解兴波阻力;应用 FRIENDSHIP 软件构建一类自动集成优化平台,在优化算法方面,将 Ensemble Investigation 算法与 TSearch 算法结合对设计变量进行寻优。

1 船体参数化建模

船体模型的构建不仅应尽量研究快速简单,而且在船型优化修改过程中也应允许大量可能船型的存在,因此本研究运用了基于 NURBS 曲线和曲面技术来构建和变换船体,除了允许大量的几何外型存在外,且能够以较少的设计变量控制船体生成,同时可保证生成船型曲面的光顺性。通常,传统船体型线往往是利用横剖面 and 纵剖面型线来描述船体。在运用基于 NURBS 曲线和曲面技术来构建船体是利用船体曲面

的主要特征曲线和剖面曲线来表达船体,而主要特征曲线包括描述船体外形特征曲线(如球艏中剖面曲线、平底线、平边线、设计水线等)和控制参数变化的取值曲线(如球艏剖面丰满度变化曲线)。定义完主要特征曲线之后,则要构建参数化的特征横剖面曲线。对于一光顺船体曲面,它的横剖面形状变化是有规律的,是沿船体纵向平滑变化的,其主要变化也是横剖面曲线上的特征点(起终点、拐点等)。因此,可以通过这些主要特征点为参数来构建横剖面曲线,提取已经定义好的特征曲线上的特征点作为横剖面曲线参数就可以得到所需要的横剖面曲线。最后,利用 NURBS 反算原理,通过特征横剖面曲线得到光顺的船体曲线。描述船体的各个基本特征曲线如表 1 所示。

表 1 船体参数化建模基本特征曲线

	特征曲线	符号
位置曲线	设计水线	DWL
	平边线	FOS
	中心平面线	SPC
	平底线	FOB
	甲板线	DEC
区域曲线	横截面面积曲线	SAC
曲率曲线	起点曲率曲线	CAB
	终点曲率曲线	CAE
区域形心	剖面垂直矩曲线	VMS
	剖面横向矩曲线	LMS

各基本特征曲线的位置情况如图 1 所示。

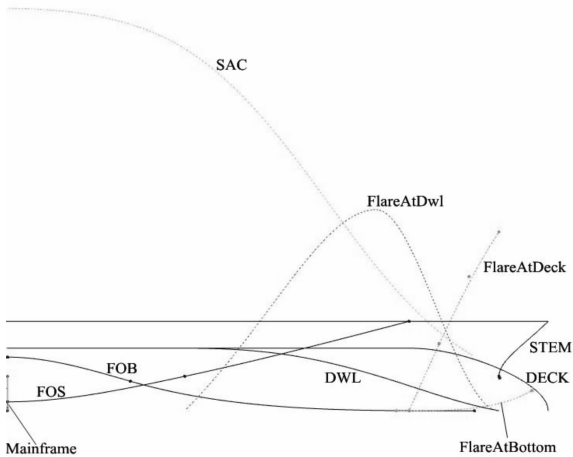


图 1 船体特性参数曲线

因为各个特征曲线是参数化的,通过修改特征参数就可得到大量不同的船体曲线进而得到不同的光顺船体曲面,这样大大减少了船体修改的工作量,提高了修改船体可用率。

在 Friendship 中参数化建模具体构建流程是:开始定义船体外形特征曲线和参数取值曲线,之

后构建曲面截面线曲线特征,调用并设定好曲线引擎的各项参数,曲线引擎通过结合一个“模板”曲线来定义连续的特征曲线;然后再调用曲面引擎的各项参数,曲面引擎能由曲线引擎中给定的任意复杂曲线来构建参数化曲面;最终即可生成船体曲面。

一般地,船型参数化建模过程如图 2 所示。

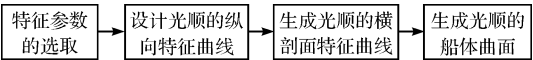


图 2 船体参数化建模过程

对于船体型线的参数化描述,运用 NURBS 曲线来对各个站线和一系列特征曲线等进行表达:

$$Q(t)=\begin{pmatrix}x(t)\\y(t)\end{pmatrix}=(\sum_{i=0}^nw_iN_{i,k}(t)d_i)/(\sum_{i=0}^nw_iN_{i,k}(t))$$

(1)

式中: w_i —权重因子,曲线参数 $t(0\leq t\leq 1)$ —变化范围, $d_i(0\leq i\leq n)$ —控制顶点, $N_{i,k}(t)$ —由节点向量控制的第 i 个 k 次 B 样条基函数。

船体曲面是一种复杂的三维曲面,采用 NURBS 曲面来完整表达:

$$S(u,w)=\frac{\sum_{i=0}^n\sum_{j=0}^mB_{i,p}(u)B_{j,q}(w)W_{i,j}V_{i,j}}{\sum_{i=0}^n\sum_{j=0}^mB_{i,p}(u)B_{j,q}(w)W_{i,j}}$$

(2)

式中: $V_{i,j}$ —控制点网格; $B_{i,p}(u),B_{j,q}(w)$ —在节点向量 $U=\{u_0,\cdots,u_{n+p+1}\}$ 和 $W=\{w_0,\cdots,w_{m+q+1}\}$ 方向的样条基函数; $W_{i,j}$ —权重因子。

2 阻力计算

本研究以兴波阻力最小化为优化目标,假设流体无粘性且不可压缩,用面元法中的 Rankine 源法求解流体速度势:

$$\varphi(P)=-\frac{1}{4\pi}\iint_{SB}\sigma(Q)\left(\frac{1}{r(P,Q)}+\frac{1}{r'(P,Q')}\right)ds-\frac{1}{4\pi}\iint_{SF}\sigma(Q)\left(\frac{1}{r(P,Q)}+\frac{1}{r'(P,Q')}\right)ds$$

(3)

式中: P —场点; Q,Q' —源点; $\sigma(Q)$ —在表面上 ds 处源点的强度, r,r' —场点到源点的相对距离。

压力可进一步计算为:

$$p=\rho(U\varphi_x-(\nabla\varphi\cdot\nabla\varphi)/2+gz)$$

(4)

式中: ρ —流体密度。

对流体的压力沿着船体湿表面进行积分,进而求解出船体受力:

$$\vec{F}=(F_1,F_2,F_3)=\iint_{SB}p\vec{n}dS$$

(5)

式中: $\vec{n}=(n_1,n_2,n_3)$ —船体表面一点 P 处的单位法

向量。

兴波阻力和兴波阻力系数可相应计算为:

$$R_w=-F_1=-\iint_{SB}pn_1dS$$

(6)

$$C_w=R_w/(0.5\rho U^2S_0)$$

(7)

式中: S_0 —在静水情况下船体的湿表面积。

3 型线修改

由于参数化船型变换导致了庞大的可能存在船型的参数几何变换空间,在优化设计变量时必须采用一种高效而又可靠的优化算法。本研究将 Ensemble Investigation 算法与 TSearch 算法结合设计了一类组合优化算法。Ensemble Investigation 算法属于全局性优化算法,可对一系列给定的设计优化变量进行重新排序交换,再以一定的形式分布在整个变量空间中,进一步得到均匀的设计方案,具有稳定性好、覆盖率高等特点。此外,该算法可用于在整个设计空间中构造试验设计(DOE)空间并进行全局搜索最优解。切线搜索法 TSearch(Tangent Search Method)是一种“可行方向法”,该方法在解空间中寻找一个下降的搜索方向,以确保目标函数能在可行搜索方向上得到快速改善,并让搜索过程始终都在可行域内,因此在解决存在不等式约束的小范围单目标优化问题上具有准确性高、可靠性强、收敛速度快等优点。将 Ensemble Investigation 算法与 TSearch 算法结合形成的组合优化策略保证了优化过程的高效性和优化结果的最优性。

4 优化实例

4.1 目标模型

该船的主要参数如表 2 所示,其设计航速 U 为 22 kn,相应的弗劳德数 F_r 为 0.28。

表 2 船舶主尺度 and 船型参数

参数	数值
船长/m	165
船宽/m	24.8
吃水/m	8.7
方形系数	0.65

4.2 优化问题描述

球鼻艏的形状控制特征曲线主要包括:球鼻艏上轮廓线、下轮廓线、半宽宽度曲线和半宽宽度线等。对球鼻艏进行参数化建模时,本研究选取以下参数和曲线来控制:球鼻艏上横轴方向距离、球鼻艏前端点高度、球鼻艏上半纵剖面轮廓线、下半纵面轮廓线、最大宽度线、最大宽度沿横轴方向截面丰满度和最大高度

线。通过调整控制这几条特征曲线和特征点的参数便能够对球鼻艏进行变形。

优化目标:设计航速下,兴波阻力系数最小,即 $\min\{C_w\}$;优化变量:球鼻艏形状控制参数,包括球鼻艏上半纵轴方向距离、球鼻艏前端点高度、球鼻艏上半纵剖面轮廓线丰满度、下半纵剖面轮廓线丰满度、半宽曲线丰满度、上半纵剖面轮廓线丰满度正切值、下半纵剖面轮廓线丰满度正切值;约束条件为^[12]:

- (1) 排水量约束 $|\Delta_o - \Delta_p|/\Delta_o \leq 1\%$,其中: Δ_o —初始船型排水量, Δ_p —优化后船型排水量;
- (2) 浮心纵向位置 $|L_o - L_p|/L_o \leq 1\%$,其中 L_o —初始船型浮心纵向位置, L_p —优化后船型浮心纵向位置;
- (3) 船体长度 L 、船体宽度 B 、吃水 T 均不发生变化,只改变船体球鼻艏的形状。

4.3 自动优化集成框架构建

该优化框架主要包括 3 个模块:①参数化建模。应用 NURBS 技术结合船体特征参数进行参数化建模。②水动力数值计算。结合参数化建模结果应用 CFD 技术进行阻力计算。③型线修改。结合阻力计算结果,运用组合型优化算法对在给定约束条件下的设计变量进行修改,从而通过参数化控制对船体型线进行优化。基本优化流程如图 3 所示。

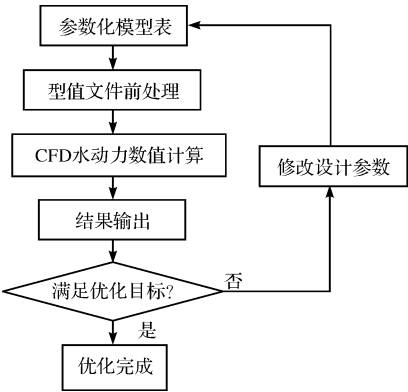


图 3 优化流程

本研究应用 FRIENDSHIP 构建自动优化集成框架。进行参数化建模时,可通过各特征曲线和曲线引擎获得光顺的剖面线,然后再通过 MetaSurface 工具即可得到设计目标船型。应用于笔者研究对象-滚装船时,本研究在确定船体的主尺度及各项船体参数后,进一步定义各纵向特征曲线和相关曲线;在参数定义范围内,经由曲面引擎以及曲线生成器可得到一系列曲面的横剖面曲线;最后经过曲面对象生成器将这些横剖面曲线进行处理就可以得到船体曲面。通过这种方法得到的曲面会自动光顺,不再需要人工手动进行光

顺。生成的参数化船体曲面如图 4 所示。

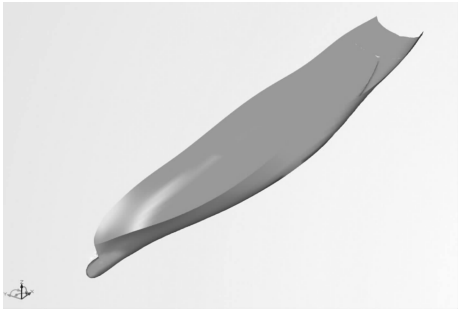


图 4 参数化船体曲面

进一步,笔者利用 FRIENDSHIP 中的试验设计(DOE)功能,先应用 Ensemble Investigation 算法对试验设计变量空间进行全局性搜索,对船体球鼻艏所需的设计变量进行修改,使得设计空间缩小,得到多个符合约束的拥有较小兴波阻力系数的船型,然后利用 TSearch 优化算法在缩小的设计方案内搜寻兴波阻力系数的局部性最小点,最终通过对比从而获得兴波阻力系数的全局性最小点。

4.4 优化结果及分析

优化前后各设计变量的结果如表 3 所示。

表 3 球鼻艏优化设计变量取值对比

变量名	初始值	变量取值区间	优化值
横轴方向距离/m	0.624	[0,1]	0.237
前端点高度/m	4.287	[1,5.5]	4.856
上半纵剖面轮廓线丰满度	0.41	[0.1,0.6]	0.34
下半纵剖面轮廓线丰满度	1.28	[1.12,1.37]	1.31
半宽曲线丰满度	1.64	[1.4,2.0]	1.873
半宽宽度	2.301	[2.1,2.58]	2.384
上半纵剖面轮廓线丰满度正切值	0.73	[0.52,0.91]	0.842
下半纵剖面轮廓线丰满度正切值	0.85	[0.65,0.96]	0.943

从表 3 中可以看出,优化后各个参数均在可行范围之内,其中横轴方向距离和上半纵剖面轮廓线丰满度两者均减小了,而横轴方向距离相对于其他变量变化最大,说明其对球鼻艏兴波阻力性能影响最大,同时较小的横轴方向距离有助于降低兴波阻力;而前端点高度、半宽曲线丰满度等其余变量的增加也有利于减小兴波阻力。

优化后船型的计算结果和初始船型对比如表 4 所示。

表 4 优化前、后各项性能对比

	兴波阻力系数 C_w	排水量 $\Delta(t)$	浮心纵向位置 L_{cb}
初始船	0.002 036 8	22 357.695	0.515 798
优化船	0.001 948 8	22 382.706	0.515 262
比较(%)	4.32	0.112	0.104

可以看出,优化前后船体的排水量和浮心纵向位

置的变化均在约束范围内,而优化后的船型比初始船型的兴波阻力系数减小了 4.32%。从优化前、后结果可以看出排水量对兴波阻力的影响并不是很大,而浮心纵向位置的后移对于降低兴波阻力有一定作用。

优化前后的波形轮廓的对比如图 5 所示。

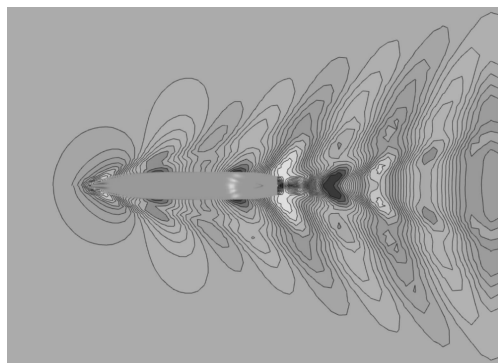


图 5 优化前、后船体自由液面兴波波形对比

注:上半部分为初始的船型,下半部分为优化后的船型

由图 5 可知优化后的船体周围总体的兴波并没有太大变化,但在船体球鼻艏周围的兴波波形数有所减少。

波切的对比如图 6 所示。

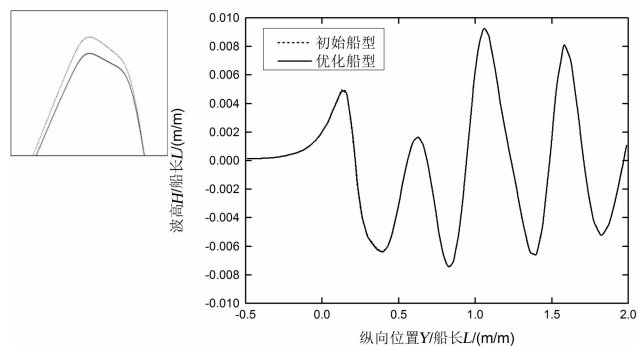


图 6 优化前、后船体纵向波切对比($y/L=0.1$)

而由图 6 则可以看出,优化后船体艏部周围的波形切片幅值有所减小。这都表明了优化后船舶的兴波阻力性能比原船型更好。

优化前、后船体球鼻艏形状变化对比如图 7 所示。优化前、后型线变化对比如图 8 所示。从优化前、后船体鼻艏形状可以看出,船体球鼻艏在一定范围内向上延伸有利于降低兴波阻力。

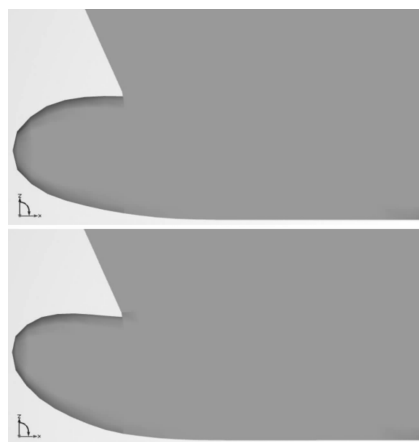


图 7 优化前、后船体球鼻艏形状对比

注:上边为初始的船型形状,下边为优化后的船型形状

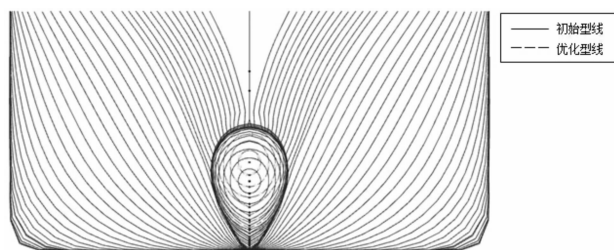


图 8 优化前、后船体球鼻艏型线对比

5 结束语

本研究以某一滚装船为例,兴波阻力最小化为目标,构建一类自动优化集成平台对球鼻艏型线进行优化设计。笔者基于 NURBS 方法对船体进行完全参数化建模,应用基于 Rankine 源的面元法对阻力进行数值计算,设计一类组合型优化策略结合约束条件和优化目标对设计变量进行调整直至满足优化目标。结果表明,型线优化后的船体其兴波阻力得到下降,船艏周围兴波得到改善,验证了所提出的型线优化设计方案的有效性。和传统的船舶型线的设计方法有所不同,通过参数化建模的设计方法在船体的一系列曲面的生成阶段就确定了多个可以控制船体各项特征的参数。在 FRIENDSHIP 平台上集成建模和 CFD 数值计算软件 SHIPFLOW,从而形成一个自动优化集成框架。该

(下转第 1353 页)

本文引用格式:

兰林强,罗伟林. 基于参数化建模和 CFD 数值模拟的船舶球鼻艏优化设计[J]. 机电工程,2016,33(11):1329-1333,1353.

LAN Lin-qiang, LUO Wei-lin. Optimization of the lines of bulbous bow of a hull based on parametric modeling and CFD calculation[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(11):1329-1333,1353.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>