

基于 FLUENT 的拖网渔船球鼻艏形状减阻优化研究

张维英^{*1}, 董震鹏², 陈静¹, 毛晓旭¹, 金钊¹, 胡丽芬¹

(1. 大连海洋大学 航海与船舶工程学院, 辽宁 大连 116023;

2. 大连海洋大学 海洋科技与环境学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 船舶阻力预报是反映船舶安全性与快速性的关键指标. 针对现有阻力计算方法存在的耗时长、精确度不够等问题, 提出一种利用 FLUENT 数值模拟技术来实现的拖网渔船阻力预报的快速优化法. 船舶球鼻艏对阻力性能具有非常大的影响, 应用参数设计法可生成一系列球鼻艏的型线, 实现模型的通用化表达, 提高流场转换和分析的灵活度, 解决经验设计中不可控变量所导致的偏差. 与试验结果比较证明该方法计算速度快、预报精度高, 设计模型适用于工程和研究.

关键词: 拖网渔船; 球鼻艏; 黏性阻力; FLUENT

中图分类号: U661.31

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201802003

0 引言

我国是渔业大国, 渔船拥有量世界排名第一. 目前, 渔船建造市场的发展方向从以往追求大批量生产转变为对新型渔船的研发和渔具配备的升级, 大量的渔船改良和升级使得渔船建造师不断更新技术, 研发出新的产品. 随着原油成本的不断上涨, 我国渔船捕捞业正逢能源的高消耗期, 柴油成本已占到渔船营运成本的 60% 以上, 捕捞油耗成为制约渔业可持续发展的关键问题. 因此开发性能优良、节能降耗、绿色清洁的新型渔船已成为渔业船舶发展的方向, 针对船舶阻力优化等课题研究也成为学术界的热门课题.

近年来, 我国学者针对船舶阻力优化展开了深入研究, 取得了显著的成果. 李超等利用 CFD 技术设计了金枪鱼延绳钓渔船减阻效果较好的球鼻艏形状^[1]; 詹成胜等利用船型参数化融合方法, 提出以兴波阻力为目标函数的船型优化流程^[2]. 彭力等针对肥大型船舶球鼻艏进行了参数化设计, 实现艏部形状多项式表达, 但横剖面容易存在波动和多余拐点, 局部也难以得到控制^[3]. 2014 年汪敏等提出船体 NURBS 型线优化方法, 克服

了以往基于母型船改造法演变的型线所存在的盲目性, 可通过查看流动分离现象追踪分离点进而修改局部线型实现减阻优化, 但选取离散修正方程的收敛周期长, 工程验证的难度增大^[4].

船舶的球鼻艏形状对船舶的阻力有较大影响, 合理选择球鼻艏形状能起到降低阻力、提高航速的作用. 目前有关球鼻艏资料都是针对某一特定船型, 同种球鼻艏应用在不同船型上未必达到满意的效果, 因此为得到较好阻力性能的球鼻艏形状, 需建立对应的船舶模型, 通过计算机完成船舶阻力性能预报^[5-14], 得到相匹配的球鼻艏几何参数. FLUENT 阻力优化法结合了船舶数学建模方法和计算流体力学理论^[15], 因此具有现实可行的意义.

近年来, 随着计算机硬件的提升和 CFD 在造船领域的广泛应用, FLUENT 软件也得到了进一步开发. 迄今为止, 应用 FLUENT 仿真技术实现船舶水动力性能研究已取得显著成果, FLUENT 也逐渐成为解决流体问题的主要软件之一. 本文以 2015 年辽宁省渔检局在大连海洋大学实测的一艘 48.35 m 拖网渔船为研究对象, 通过参数化

收稿日期: 2017-10-15; 修回日期: 2018-01-22.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51309045); 国家自然科学基金资助项目(51509124); 辽宁省高校杰出青年学者支持计划项目(LJQ2014075).

作者简介: 张维英*(1963-), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, E-mail: zwy@dlou.edu.cn.

设计球鼻艏形状，建立可行的水池模型，运用 FLUENT 完成船体阻力的数值模拟，确定一种减阻效果最好并适配于该渔船的球鼻艏形状，以期为同类型渔船的设计与建造提供参考。

1 基于 FLUENT 的控制方法

1.1 FLUENT 阻力优化的控制流程

首先，构建 FLUENT 阻力优化流程，确定系统的工作原理。流程建立遵循船舶生产工序和 FLUENT 操作原理，其组织架构的核心为模型验证，通过设立对照实验实现对阻力优化方法的宏观调控。

利用 FLUENT 阻力优化的控制流程，可直观、简洁地把握拖网渔船球鼻艏形状减阻优化研究的关键环节，提供清晰的思路，更有效地达到预期结果。控制流程图如图 1 所示。

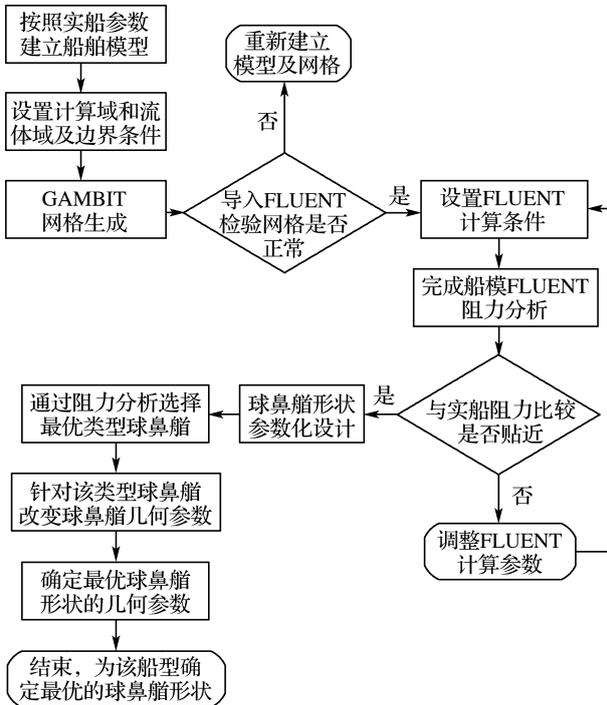


图 1 FLUENT 阻力优化控制流程图

Fig. 1 Flowchart of resistance optimization by FLUENT

1.2 FLUENT 阻力优化的控制方程

FLUENT 阻力优化是流体力学在船舶水动力研究中的实际应用，船舶流体理论的核心为湍流模型，本文基于流体力学基本方程，采用雷诺平均 N-S(RANS) 方程构建合适的湍流模型对流场进行求解，通过黏性阻力理论基础对优化结果进行定量的分析，最终确定减阻形状的最优值。典型

的控制方程为质量守恒方程、动量守恒方程和雷诺平均 N-S 方程。

1.2.1 质量守恒方程 在流场中任取一封闭的空间，此空间称为控制体，其表面称为控制面。流体通过一部分控制面流入控制体，同时通过另一部分控制面流出控制体，在这期间控制体内部的流体质量也会发生变化。按照质量守恒定律，流入的质量与流出的质量之差，应该等于控制体内部流体质量的增量，由此可导出流体流动连续性方程的积分形式：

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dx dy dz + \iint_A \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA = 0 \quad (1)$$

式中： V 表示控制体， A 表示控制面， ρ 是流体密度， v 是速度， n 表示时间通量。等式左边第一项表示控制体 V 内部质量的增量，第二项表示通过控制面流入控制体的净通量。

对于不可压缩均质流体，质量密度为常数，在直角坐标系下可将其化为如下微分形式：

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

式中： u_x, u_y, u_z 是速度矢量 \mathbf{u} 在 x, y, z 方向的分量。

在质量守恒方程的控制下，对不同类型的流场和对应的各个变量之间确立了统一的形式，同时也对变量施加了有效的约束条件。船舶阻力性能分析也是基于质量守恒方程的特定流场形式。

1.2.2 动量守恒方程(N-S 方程) 黏性流体的运动方程首先由 Navier 针对不可压缩流体的流动提出，后来 Stokes 独立地提出黏性系数为一常数的形式，现在统称为 Navier-Stokes 方程，简称 N-S 方程。

动量守恒定律也是任何流动系统必须满足的基本定律。该定律可表述为微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上各种力之和。其形式为

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (5)$$

式中: t 为时间; \mathbf{u} 为速度矢量; p 为微元体上的压力; $\boldsymbol{\tau}$ 为作用于微元表面上的黏性应力; \mathbf{F} 为微元体上的体力, 若体力只有重力, 并且 z 轴竖直向上, 则 $F_x = F_y = 0, F_z = -\rho g$.

N-S 方程比较准确地描述了实际的流体流动, 黏性流体的流动分析均可归结为对此方程的拓展研究. 由于其形式甚为复杂, 实际上只有极少量情况可以求出精确解, 故产生了通过数值求解的研究. 所有的流体流动问题都是围绕对 N-S 方程求解进行的. 在 FLUENT 船舶流体力学计算中动量守恒方程也是必不可少的控制方程.

1.2.3 雷诺平均 N-S(RANS) 方程 基于雷诺平均 N-S(RANS) 方程模型是工程应用中湍流数值模拟的一大类. 所谓湍流模式理论, 就是依据湍流的理论知识、实验数据或直接数值模拟结果, 对雷诺应力做出各种假设, 即假设各种经验的和半经验的本构关系, 从而使湍流的雷诺平均方程封闭.

对于低雷诺数的情形, 选择低雷诺数 $k-\epsilon$ 模型. 近壁区的湍流雷诺数很低, 对湍流动力学而言, 黏性效应非常重要, 此时湍流雷诺数的效应必须加以考虑. 研究摩擦阻力的计算关注的恰恰是近壁区, 因此低雷诺数 $k-\epsilon$ 模型更为适用.

低雷诺数下的涡黏性方程为

$$\mu_t = C_\mu f_\mu \rho \frac{k(k + \sqrt{\nu \epsilon})}{\epsilon} \quad (6)$$

式中: μ_t 为涡黏性, ρ 为流体密度, k 为湍动能, ϵ 为湍流耗散率, ν 为流体的运动黏度, C_μ 、 f_μ 为模型函数. 实验表明, 对边界层流动和均匀切变流, C_μ 的值是不同的, 为实现对模型的约束, 采用以下形式的 C_μ :

$$C_\mu = \frac{1}{4 + A_s U^* \frac{k}{\epsilon}} \quad (7)$$

式中各参数的计算公式如下:

$$U^* = \sqrt{S_{ij}^* S_{ij}^* + \Omega_{ij} \Omega_{ij}} \quad (8)$$

$$S_{ij}^* = S_{ij} - \frac{1}{3} U_{k,k} \delta_{ij} \quad (9)$$

式中: Ω_{ij} 是平均旋转速率, U^* 、 S_{ij}^* 为主流时速和主流速度应变率张量, 根据涡黏性方程反映出不同属性流体具有的黏性特征, 是研究船舶水动力性能及阻力性能的前提.

低雷诺数下的 $k-\epsilon$ 模型方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{\rho u_i u_j U_{i,j}} - \rho \epsilon \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \epsilon)}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ & C_1 f_1 \rho S \epsilon - C_2 f_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + \\ & C_3 \frac{\mu \mu_t}{\rho} \frac{\partial S}{\partial x_j} \frac{\partial S}{\partial x_i} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$, $S_{ij} = \frac{1}{2} (U_{i,j} + U_{j,i})$, S_{ij} 为平均速度应变率张量, $U_{i,j}$ 为平均速度; $-\overline{\rho u_i u_j} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \mu_t (U_{i,j} + U_{j,i} - \frac{2}{3} U_{k,k} \delta_{ij})$, δ_{ij} 为克罗内克算子, 以上参量为船舶模化常数.

另外, 给出以下流体模化常数:

$$C_1 = \max \left\{ 0.43, \frac{\eta}{5 + \eta} \right\} \quad (12)$$

$$\eta = \frac{Sk}{\epsilon} \quad (13)$$

模化常数 $C_2 = 1.9$, $C_3 = 1.0$; 湍动能及其耗散率的湍流普朗特数 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.2$. 这 4 个常数在 FLUENT 中作为默认值常数, 针对低雷诺数流动问题可保留设置.

$$f_\mu = 1 - \exp \left[- (a_1 R + a_2 R^2 + a_3 R^3 + a_4 R^4 + a_5 R^5) \right] \quad (14)$$

$$f_1 = 1 - \exp \left[- (a'_1 R + a'_2 R^2 + a'_3 R^3 + a'_4 R^4 + a'_5 R^5) \right] \quad (15)$$

$$f_2 = 1 - 0.22 \exp \left(- \frac{R_1^2}{36} \right) \quad (16)$$

式中: f_μ 和 f_1 、 f_2 称为阻尼函数, 是用来反映近壁区低雷诺数效应的一个经验函数, 系数 a_i 、 a'_i 可通过资料查询, R 与 R_1 通过下式计算:

$$R = \frac{k^{\frac{1}{2}} (k + \sqrt{\nu \epsilon})^{\frac{3}{2}}}{\nu \epsilon} \quad (17)$$

$$R_1 = \frac{k^2}{\nu \epsilon} \quad (18)$$

此方程为低雷诺数条件下的流体控制方程, 是船舶阻力计算中的基础方程之一. 船体表面为近壁区, 其黏性效应较为显著, 根据船舶阻力产生的原因, 黏性效应形成摩擦阻力, 进而与黏压阻力相结合形成黏性阻力. 因此, 在 RANS 方程控制下, 可实现船舶黏性阻力分析. 船体表面受来流冲撞所产生的力学效应为叠模定常绕流问题, 考虑船体流线弯曲程度较大, 曲面应力表达复杂, 该方

程给出理论层面上无面积单位计算雷诺应力的方法,极大地减小了计算误差,保留了雷诺应力的有效值。

2 数值模型建立及验证

2.1 全船模型和计算域模型

2015年辽宁省渔检局于大连海洋大学检测的一艘总长为48.35 m拖网渔船,船舶主尺度如表1所示。实船为水滴型球鼻艏,如图2所示。根据拖曳水池原理:水池横剖面面积(池宽×水深)应超过船模水线以下中横剖面面积250倍,池壁效应方可忽略不计。为确立船模合适尺寸,确定缩尺比为1:13。计算域取艏部1倍船长、艉部4倍船长、底部以下1倍船长、舷侧各取1倍船长,流体域为外域与船体体积之差,内部介质设置为15℃的海水,如图3所示。为保证计算阻力性能更加准确,采用全船模型进行模拟,保持船体表面光滑完整,避免曲线分割,船体姿态正浮,不考虑船艏升沉和纵倾现象。

表1 船舶主尺度表

Tab.1 Table of ship master scale

总长 L_{oa}/m	垂线间长 L_{pp}/m	型宽 B/m	型深 D/m
48.35	42.35	10.9	4.6
设计吃水 d/m	湿表面积 S/m^2	方形系数 C_b	
3.8	572.27	0.529	

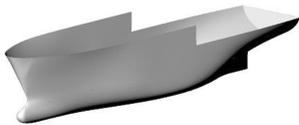


图2 三维船体模型图

Fig.2 3D picture of ship model

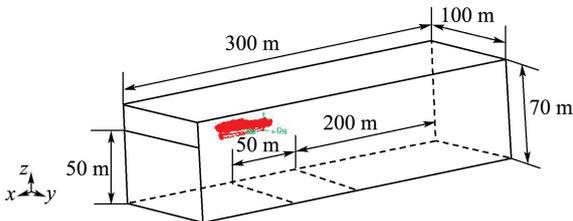


图3 计算域图

Fig.3 Picture of computational domain

2.2 网格划分

网格划分是计算流体力学的核心,由于

FLUENT使用非结构化网格技术,可以兼容各种各样的网格单元,本文利用FLUENT前处理软件GAMBIT进行网格划分。通过GAMBIT智能划分技术,可使储存在网格上的求解因子最大程度的保留,同时大幅减少计算机的运算时间。

在网格生成方面保持稀疏合理和分布均匀,对船舶艏部网格局部加密,流场底部和船体中部附近相对疏松,如图4所示。靠近船体舭部的网格需加密以捕捉边界层,设置第一个网格点距边界的距离为0.05,网格比例因子1.26,边界层网格点数为10。计算域为结构网格,有利于运算精度的提高,船体表面扭曲较大,艏艉曲线变化不规则,因此采用非结构网格可以更加精确地计算。另外,网格尽量正交,沿流动方向布置保持光滑,经检验后网格没有出现负体积,方可导入FLUENT继续计算。

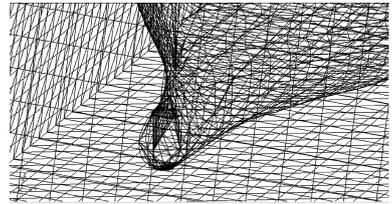


图4 局部加密网格图

Fig.4 Picture of grid generation in local refinement

2.3 边界条件设置

保证船体正浮并姿态固定,假定前方均匀来流,来流水为黏性不可压缩。入口边界为速度入口,分为空气速度入口和水速度入口,空气在上水在下,来流以给定速度流入船舶;出口边界设为出流边界,即允许流体离开流体区而不发生回流现象;流体区两侧及底部设为不可穿透的壁面边界,保证建立的数值拖曳水池封闭,无流体外流;流体区上表面设为压力出口边界,连通外界大气压;船体表面设为壁面边界,由于对全船进行数值模拟,无须设置对称边界。

2.4 黏性阻力计算

将生成网格后的模型导入FLUENT检查无误后开始计算,采用VOF方法捕捉自由液面,设置空气-水两相流模式,调节两相中水的比重,定义参考点压强和重力。基于船体叠模绕流场问题选取SIMPLE方法,求解器的离散格式为二阶迎风格式,以便提高收敛精度,求解数据最大值不超

过 1×10^{20} . 设置残差监视窗口, 观察收敛曲线, 对流场进行初始化并设置水的区域, 显示成功捕捉到空气-水液面. 壁面无滑移, 温度设为 15°C , 迭代时间步长为 0.001, 迭代步数 1 500, 松弛因子设为稳定值.

考虑该拖网渔船实际作业情况, 拖网作业航速不超过 7 kn, 速度条件为低速航行, 其黏性阻

力占 90% 以上, 兴波阻力理论上占不到 10%, 可忽略不计, 因此经过 FLUENT 计算的黏性阻力可以近似看作船舶总阻力. 根据道森慢船理论对阻力计算值进行修正, 补贴一部分兴波阻力, 其结果相当于总阻力^[16-17]. 通过计算, 得到船模试验值和计算值, 结果如表 2 所示.

表 2 试验值与计算值对照表

Tab. 2 Table of comparison of test and calculated values

实船速度 v_s/kn	船模速度 $v_m/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	雷诺数 $Re/10^6$	总阻力试验值 R_t/N	总阻力计算值 R_c/N	误差/%
3	0.428 0	1.223 5	1.712 9	1.795 5	4.6
5	0.713 3	2.039 1	4.237 3	4.561 1	7.1
6	0.856 0	2.445 3	5.847 6	6.363 0	8.1
7	0.998 7	2.854 9	7.813 3	8.428 6	7.3
9	1.284 0	3.670 5	12.093 4	13.333 4	9.3
10	1.426 7	4.075 5	14.786 7	16.160 3	8.5
11	1.569 3	4.486 1	18.967 3	19.230 5	11.7

由表 2 可以看出计算值与试验值误差较小, 验证模型与实船阻力性能较吻合, 可近似替代实船进行阻力预报. 模型所设置的边界条件、湍流模型、求解参数及建立的水池模型流体域和计算域都较为成功, 可在此模型基础上进一步优化球鼻艏形状.

黏性阻力分析说明 FLUENT 软件适用于船舶阻力计算, 其计算精度可达到预期效果, 但人为调试过程中存在技术不足或数据丢失现象, 为尽量减小误差, 进一步提高优化效率, 对该模型设置对照环境, 即在同一模型条件下设计出不同类型和不同参数的一系列球鼻艏形状, 通过阻力分析选择最优的球鼻艏形状.

3 球鼻艏参数化设计

3.1 船舶球鼻艏的形状表述

由实船参数可知其长宽比为 3.885 3, 方形系数 $C_b = 0.529$, 中部船体曲线快速扩张, 艏部尖瘦, 不存在平行中体, 实船作业航速较低. 母型船球鼻艏横剖面为 V 形, 即水下部分较瘦, 水上部分较丰满, 其参数化设计结果近似看作对该船型球鼻艏形状的表述.

取坐标原点为首垂线和基线的交点, 按照船舶型线图正轴规定标准建立三维直角坐标系, 取首垂线处球鼻艏面积最大. 假设球鼻艏面积曲线

为 $f(x) = ax^2 + bx + c, x \in [0, x_L]$, 根据型心在 x 轴位置、球鼻艏体积和首垂线距球鼻艏最前端距离可求得 a, b, c 的值, 当 $x = x_L$ 时, 即长度为最大距离时所求面积为首垂线处球鼻艏面积.

3.2 首垂线处横剖面

图 5 为首垂线处横剖面图, 将横剖面线由下到上分成 3 部分, 第 1 部分采用椭圆弧表示, 第 2 部分用多项式和椭圆弧组合表示, 第 3 部分用多项式表示.

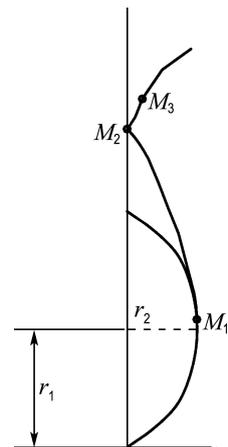


图 5 首垂线处横剖面图

Fig. 5 Picture of perpendicular transverse section

M_1 处以下部分用椭圆公式表达:

$$(z/r_1)^2 + (y/r_2)^2 = 1 \quad (19)$$

r_1, r_2 为一系列值, 得到

$$z=r_1\sqrt{1-(y/r_2)^2}, \quad y\in[0,r_2] \quad (20)$$

给定球鼻艏最大宽度 b_{\max} , 则有 $r_2 = \frac{1}{2}b_{\max}$,

取 r_1/r_2 系列值可得到对应的 r_1 .

若 M_1 处坐标为 (y_1, z_1) , 令参数 $h = z_1/2r_1$, 则取一系列值如 0.6、0.7、0.8、0.9 等, 由上述方程可求得 M_1 处的型值。

将 $M_1 \sim M_2$ 处曲线划分为凸曲线和凹曲线分别进行多项式表达。

当曲线为凸曲线时, 表达式为

$$z=f(y)=a_1y^4+a_2y^3+a_3y^2+a_4y+a_5 \quad (21)$$

当曲线为凹曲线时, 表达式为

$$y=f(z)=a_1z^4+a_2z^3+a_3z^2+a_4z+a_5 \quad (22)$$

若 M_2 处坐标为 $(0, z_2)$, 已知该处设计水线下的球鼻艏横剖面面积可用式(21)表达, 又由于 M_1 处曲线连续, 则椭圆弧公式与多项式在 M_1 处一阶导数相同, 两式联立组成方程组求得公式内参数具体值, 同理, 多项式的表达式也可求出。

M_3 处曲线为设计水线以上部分, 一般不在球鼻艏形状范围内, 因此不作考虑。

对于 V 形剖面, 表达形式则是上部为椭圆弧、下部为多项式。

3.3 球鼻艏各处横剖面形状的形成

首先给定球鼻艏边界线, 如图 6 所示。

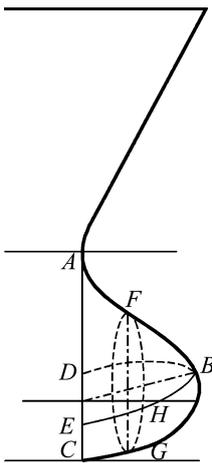


图 6 球鼻艏边界线图

Fig. 6 Picture of boundary line of bulbous bow

ABC 为纵向边界线, 是一条光滑的二维曲线; DBE 是球鼻艏各剖面最宽处的连线, 也为横向边界线, 其中 BD 和 BE 关于 xy 面对称, 取一半考虑可减小工作量。

在给定边界线后取几个典型横剖面, 假设取 GF 剖面, 平面面积已知, 平面内 G 、 F 、 H 三点可根据首垂线横剖面方法表达该特征剖面的横剖面的形状, 然后根据各水线处的型值点采用样条曲线连接得到各水线形状, 最终对全部水线进行扫描得到整个球鼻艏的形状。

3.4 实船球鼻艏形状设计

实船水滴型球鼻艏参数如表 3 所示。

表 3 球鼻艏几何参数表

Tab. 3 Geometric parameter table of bulbous bow

长/m	浮心纵向位置/m	最大面积/ m ²	最大宽度/m	体积/m ³
1.909 9	0.636 6	8.251 3	1.484 4	17.150 6

按照参数化法设计 S-V 上翘型和撞角型球鼻艏。其中, 规定 S-V 上翘型球鼻艏攻角抬升 10° , 撞角型球鼻艏突出长度增加 10%, 限定参数修改的范围可有效防止曲线变换过大引起额外阻力的产生, 或计算阻力的激增和剧减, 最大程度地保留船舶初始性能完整。同时, 还需对设计球鼻艏曲线进行光滑调整, 在保证美观的基础上与船体型线相匹配。

设计出两种新球鼻艏形状如图 7 所示。新型球鼻艏的设计也进一步论证应用参数化设计实船球鼻艏的可行性。

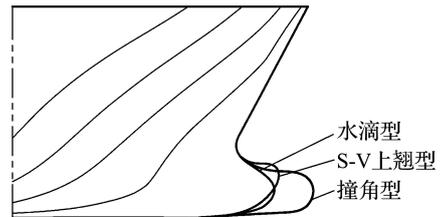


图 7 3 种球鼻艏形状

Fig. 7 Shapes of three bulbous bows

4 球鼻艏形状优化

4.1 切应力云图结果

根据相当平板假定, 船舶所受到的摩擦阻力取决于摩擦切应力, 在湍流条件下水质点相互撞击产生能量交换, 摩擦切应力较大^[18], 利用应力云图可以直观描述切应力分布及变化规律。

利用 FLUENT 图像技术生成切应力云图, 如图 8 所示。随着雷诺数的增加, 阻力由集中在球

鼻艏柱的拐点处转向球鼻艏前端处, 针对球鼻艏发生的应力集中前移现象, 需对球鼻艏突出长度进行适当调整. 该船采用的球鼻艏结构, 将应力大部分汇集在球鼻艏附近, 其他位置的型表面所受应力得到一定的发散, 产生的应力相对较小. 船身处切应力随雷诺数的增大而显著增加, 但球鼻艏处应力基本不发生变化, 可见该球鼻艏结构对于一定雷诺数的来流减阻效果显著.

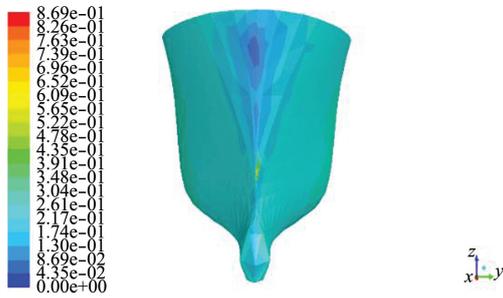
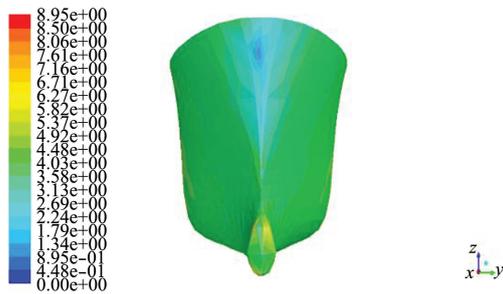
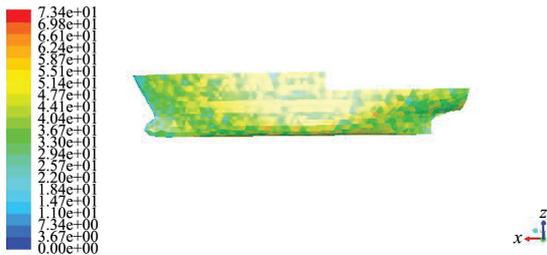
(a) $Re=0.4280$ (b) $Re=1.8547$ (c) $Re=0.7133$ (d) $Re=1.2804$

图 8 切应力云图

Fig. 8 Cloud picture of shear stress

4.2 阻力优化结果

通过 FLUENT 进行对照试验, 求解条件按

上文要求设置. 对新设计的两种球鼻艏形状进行 FLUENT 模拟, 将计算结果与水滴型球鼻艏进行比较, 为方便观察三者黏性阻力的大小, 绘制阻力性能曲线如图 9 所示.

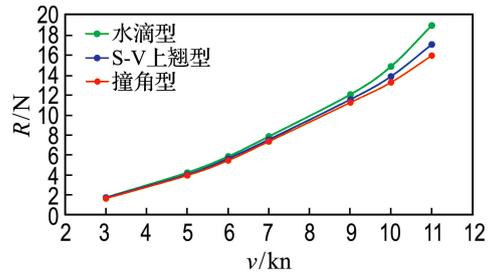


图 9 阻力优化图

Fig. 9 Picture of resistance optimization

由图 9 所示的结果可知, 两种设计球鼻艏都起到了一定的减阻作用, 随着航速的增加, 设计球鼻艏的减阻效果也越来越显著, 其中撞角型球鼻艏比 S-V 上翘型球鼻艏减阻能力更好.

4.3 系列球鼻艏阻力研究

针对该拖网渔船选取的撞角型球鼻艏, 为使得到的阻力结果更为精确, 改变撞角型球鼻艏主要几何参数, 建立一系列参数模型. 为方便计算, 取雷诺数 3×10^6 为速度参照值, 总阻力 9.34 N.

规定以实船原球鼻艏形状的突出长度和体积为基础依次增加 10%, 通过 FLUENT 对系列球鼻艏进行阻力性能分析, 得到阻力优化效率, 结果如表 4 所示.

表 4 球鼻艏阻力优化效率表

Tab. 4 Table of optimization efficiency of bulbous bow

增值比/%	突出长度/m	球鼻艏体积/ m^3	阻力/N	优化效率/%
0	1.909 9	17.150 6	9.34	0
10	2.100 9	18.865 7	8.80	5.8
20	2.291 9	20.580 7	7.74	17.1
30	2.482 9	22.295 8	7.54	19.3
40	2.673 9	24.011 0	7.82	16.3
50	2.864 9	25.725 9	10.23	-9.8
60	3.055 8	27.441 0	11.28	-20.7

通过对照试验, 设计球鼻艏与实船球鼻艏所产生的船舶阻力比较吻合, 并没有发生阻力激增或剧减, 因此, 可确定经修改后的球鼻艏形状与该船型相匹配, 可作为该类型船舶系列球鼻艏形状的模板. 综上所述, 该拖网渔船选取撞角型球鼻艏

减阻效果最好。

由表4可知,随着该撞角型球鼻艏的突出长度和体积不断增加,优化效率由正效率变为负效率,说明增值比在超过40%后所设计的撞角型球鼻艏反而不具备阻力优化效果,因此改变球鼻艏形状的控制范围不超过基础参数的40%。在满足系列球鼻艏优化的有利范围内,确定最优的几何参数。当增值比达到30%时,优化效率最大,为19.3%,可认为此种形状下的撞角型球鼻艏减阻效果最好。

5 结 语

为还原船舶所在真实流场的运动情况,提高阻力预报精度,本文采用基于 FLUENT 软件的数值模拟方法,结合拖网渔船实船参数,建立了三维船舶模型和拖曳水池数值模型。在阻力分析过程中,通过设置对照试验验证模型的实用性,并根据球鼻艏参数设计法设计 S-V 上翘型和撞角型球鼻艏,经过 FLUENT 数值计算得出结论:该拖网渔船选择撞角型球鼻艏减阻效果最好;通过进一步系列优化,得到该型球鼻艏的最优设计方法为增大球鼻艏突出长度和球鼻艏体积的30%。试验结果表明,基于 FLUENT 的球鼻艏形状阻力优化方法满足运算快速、预报准确的要求,在优化同类型船舶球鼻艏形状时均可采用此方法,其实用性较为突出。

参 考 文 献:

- [1] 李超,郑建丽,张怡,等. 基于 CFD 的金枪鱼延绳钓渔船球鼻艏形状研究[J]. 船舶, 2015(4):28-31.
LI Chao, ZHENG Jianli, ZHANG Yi, *et al.* On shape of bulbous bow of tuna longline fishing vessel by CFD [J]. **Ship & Boat**, 2015(4):28-31. (in Chinese)
- [2] 詹成胜,刘祖源,冯佰威,等. 基于 CFD 的船舶球鼻艏型线自动优化[J]. 船舶力学, 2012, 16(4):350-358.
ZHAN Chengsheng, LIU Zuyuan, FENG Baiwei, *et al.* CFD-based automatical optimization of bulbous bow lines [J]. **Journal of Ship Mechanics**, 2012, 16(4):350-358. (in Chinese)
- [3] 彭力,陈顺怀. 基于肥大型船舶球鼻艏的参数化设计[J]. 船海工程, 2008, 37(1):29-31.
PENG Li, CHEN Shunhuai. Parameterized design method for bulbous bow of voluminous ships [J]. **Ship & Ocean Engineering**, 2008, 37(1):29-31. (in Chinese)
- [4] 汪敏,吴静萍,许玲. 基于 FLUENT 的船体 NURBS 型线优化[J]. 船海工程, 2014, 43(6):52-53, 59.
WANG Min, WU Jingping, XU Ling. Ship form NURBS lines optimization based on FLUENT [J]. **Ship & Ocean Engineering**, 2014, 43(6):52-53, 59. (in Chinese)
- [5] 余建伟. 基于 CFD 的船舶阻力计算与预报研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
YU Jianwei. Research on calculation and prediction for ship resistance based on CFD theory [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese)
- [6] 倪崇本. 基于 CFD 的船舶阻力性能综合研究[D]. 上海:上海交通大学, 2011.
NI Chongben. A comprehensive investigation of ship resistance prediction based on CFD theory [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011. (in Chinese)
- [7] 许辉,陈克强. 渔船型线优化及水动力性能研究[J]. 船海工程, 2013, 42(6):85-88.
XU Hui, CHEN Keqiang. Line optimization and hydrodynamic performance research of fishing boats [J]. **Ship & Ocean Engineering**, 2013, 42(6):85-88. (in Chinese)
- [8] 张盛龙,吴恭兴. 基于 Maxsurf 球鼻艏型线的船舶减阻方法[J]. 船舶标准化工程师, 2014(6):5-8.
ZHANG Shenglong, WU Gongxing. Method of reducing ship resistance of the bulbous bow based on Maxsurf [J]. **Ship Standardization Engineer**, 2014(6):5-8. (in Chinese)
- [9] 张杨,陈林,张忠宇,等. 基于 FLUENT 的多体船阻力研究[J]. 船舶, 2012, 23(5):23-30.
ZHANG Yang, CHEN Lin, ZHANG Zhongyu, *et al.* Research on resistance of multi-hull ships with FLUENT [J]. **Ship & Boat**, 2012, 23(5):23-30. (in Chinese)
- [10] 韩占忠,王敬,兰小平. FLUENT-流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2004.
HAN Zhanzhong, WANG Jing, LAN Xiaoping. **FLUENT-Fluid Engineering Simulation and Application Examples** [M]. Beijing: Beijing

- Institute of Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [11] 龚喜, 袁晓宇, 吴小兵. 运用 FLUENT 优化设计某水下航行体外形[J]. 水雷战与舰船防护, 2012, 20(4):57-59.
- GONG Xi, YUAN Xiaoyu, WU Xiaobing. Design optimization of the profile of a certain underwater vehicle by FLUENT [J]. *Mine Warfare & Ship Self-Defence*, 2012, 20(4):57-59. (in Chinese)
- [12] RAVEN H C. Nonlinear ship wave calculation using the RAPID method [C] // **6th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics**. Iowa City: DTNSRDC, 1993:1-19.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 常欣, 郭春雨, 王超, 等. FLUENT 船舶流体力学仿真计算工程应用基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011.
- CHANG Xin, GUO Chunyu, WANG Chao, *et al.* **Engineering Application of FLUENT in Ship Hydrodynamics Simulation** [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2011. (in Chinese)
- [16] RAVEN H C. Variations on a theme by Dawson [C] // **17th Symposium on Naval Hydrodynamics**. Hague: U. S. Office of Naval Research and Australian Maritime College of the University of Tasmania, 1988:151-171.
- [17] DAWSON C W. A practical computer method for solving ship wave problems [C] // **Proceedings of the 2nd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics**. Berkeley: DTNSRDC, 1977: 30-38.
- [18] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.
- SHENG Zhenbang, LIU Yingzhong. **Principle of Ship** [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2003. (in Chinese)

Study of resistance optimization for shape of bulbous bow of stern trawler based on FLUENT

ZHANG Weiying^{*1}, DONG Zhenpeng², CHEN Jing¹, MAO Xiaoxu¹, JIN Zhao¹, HU Lifeng¹

(1. School of Navigation and Naval Architecture, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2. School of Marine Science and Environment Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: It is important to predict the ship resistance in terms of security and quickness of the ship. Aiming at solving the problem in the present resistance calculation which is time-consuming and is not enough accurate, the optimization method of resistance prediction on the bulbous bow for a stern trawler is presented by FLUENT in numerical simulation technology. The bulbous bow has a big impact on resistance performance of ship. In order to reduce errors caused by uncontrollable variables in experience design, the parametric design method is used to complete the universal expression of the models and increase the flexibility of flow field conversions and analysis by generating a series of molded lines of bulbous bows. After comparing the experimental results, it is shown that the optimization method is fast and accurate, and the model is practical for engineering and research.

Key words: stern trawler; bulbous bow; viscous resistance; FLUENT