文章编号:1000-8608(2023)04-0393-06

渔船减阻球鼻艏模型优化研究

张 亚*1, 庞洪祯1, 徐梦婷2, 刘冰清1, 白世阳1

> (1.大连海洋大学 航海与船舶工程学院, 辽宁 大连 116023; 2. 齐鲁工业大学 艺术设计学院,山东 济南 250353)

摘要: 为探究球鼻艏变化对渔船水动力性能的影响,在母型船直立艏方案的基础上,以总阻 力为优化目标,进行增设球鼻艏设计,首先对渔船进行参数化建模,采用自由变形(FFD)方法 对艏部的几何参数进行改造;然后使用拉丁超立方设计方法进行采样,将 CFD 数值模拟与 BP 神经网络相结合,建立以高度精确的数值模拟为优化特征的母型船预测模型;最后利用遗 传算法对渔船进行目标优化,寻求总阻力优解的设计点.结果表明:基本船型配合增设优解的 球鼻艏后,在3种航速情况下,总阻力分别减小0.30%、0.58%、1.02%.

关键词:总阻力;自由变形方法;球鼻艏;BP神经网络;优化 **中图分类号**:U674.3 文献标识码:A doi:10.7511/dllgxb202304009

0 引 葍

在国务院推进"海洋渔业战略产业化"的背景 下,我国已经开启了海洋渔业可持续健康发展的 新征程.国家加大了对渔船节能减排的支持力度, 设立了渔船节能减排专项,为全面推进渔船改造 升级、加强节能减排提供了有力支持.因此,对渔 船加装球鼻艏进行优化设计,提高渔船的阻力性 能,对节约能源、降低能耗、提高渔船的稳定性具 有重要意义.不同球鼻艏应用到船舶时的减阻效 果不一样,增设哪种类型球鼻艏,以及球鼻艏参数 与船体的配合度等是增设球鼻艏设计方案优化的 重点方向.

在船型优化方面国内外研究人员做过一系列 的研究. Pérez 等^[1] 基于三次 B 样条曲线对渔船 进行了球鼻艏设计,通过 CFD 计算验证了增加球 鼻艏的可行性.赵智萍[2] 对一艘玻璃钢拖网渔船 进行了增设球鼻艏设计,结果表明满载与设计航 速附近,球鼻艏在阻力性能上比直立艏有明显优 势,综上所述,国内外学者针对船舶增设球鼻艏做 了大量研究,证实增设球鼻艏后适用性良好,但探 究增设球鼻艏参数对阻力性能的影响并运用到船 型优化的并不多见.

本文以某渔船作为初始船型,设计以总阻力 最小为目标函数的船型优化方法,首先,通过 NURBS 曲线对渔船进行参数化建模,利用自由 变形(FFD)方法对渔船进行增设球鼻艏改造;其 次,针对设计变量运用拉丁超立方设计方法进行 样本空间采样,通过 CFD 数值模拟计算样本总阻 力;最后,利用 BP 神经网络进行模型预测,建立 总阻力与设计变量之间的变化曲线,并利用遗传 算法获得最小总阻力船体形状优化模型,以验证 新方法的可行性与优越性.

渔船参数化建模 1

一般参数化建模分为4个步骤:特性参数的 选择、纵向特性曲线的设计、横截面特性曲线的生 成、船体表面的确定^[3].利用 NURBS 曲线可对船 体型线进行参数化描述,即[4]:

$$P(\boldsymbol{u}) = \sum_{i=0}^{n} w_i N_{i,k}(\boldsymbol{u}) d_i \Big/ \sum_{i=0}^{n} w_i N_{i,k}(\boldsymbol{u})$$
(1)

式中: w_i 是权重因子, d_i 是控制点, $N_{i,k}(u)$ 是由节 点矢量确定的 k 次规范样条基函数, u 是节点矢量.

收稿日期: 2022-05-09; 修回日期: 2023-05-26. 基金项目: 辽宁省教育厅 2021 年度科学研究经费项目(LJKZ0728).

作者简介: 张 亚*(1981—),女,副教授,硕士生导师, E-mail; zhangya@dlou. edu. cn;庞洪祯(1998—),男,硕士生, E-mail; 2086398946@qq. com.

同理,可用 NURBS 曲线对船体曲面进行描述,即:

$$p(\boldsymbol{u},\boldsymbol{v}) = \frac{\sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} w_{i,j} d_{i,j} N_{i,k}(\boldsymbol{u}) N_{j,l}(\boldsymbol{v})}{\sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} w_{i,j} N_{i,k}(\boldsymbol{u}) N_{j,l}(\boldsymbol{v})}$$
(2)

式中: $d_{i,j}$ 是控制点网格, $N_{i,k}(u)$ 是节点矢量 u =($u_0 \quad \cdots \quad u_{n+k+1}$)的样条基函数, $N_{j,l}(v)$ 是节点 矢量 $v = (v_0 \quad \cdots \quad v_{n+l+1})$ 的样条基函数, $w_{i,j}$ 是 权重因子.

根据某渔船的主要参数,采用 NURBS 曲线 进行船体参数化建模,见表 1. 船体的参数化建模 是 CFD 计算分析的前提,为后续数值计算的准确 性提供保证.在 CFD 计算中采用 1:1 的模型比 例,如图 1 所示.

表 1 渔船主要参数 Tab.1 Main parameters of fishing boat

总长/m	垂线间 长/m	型宽/ m	型深/ m	平均吃 水/m	设计航速/ kn
37.8	30.6	6.30	2.85	2.20	10



2 增设球鼻艏设计

y x

本文运用自由变形方法针对母型船船体进行 型线改造.自由变形方法是由 Sederberg 等^[5]在 计算图形学中提出,经过多年的发展已经普遍应 用于各个领域.自由变形方法的工作原理^[6]如下: (1)在待变形对象的立方体中按照三维坐标系构 造一个长方体格子;(2)对长方体格子上的控制点 定义;(3)调整长方体格子上的控制点,变形物体 通过格子上控制点的形变进行定义.

通过自由变形方法对母型船型线进行修改的 流程如下^[7]:

(1)将母型船船体表面按照纵向与横向进行 划分,即纵向 m 个点,横向 n 个点,母型船船体表 面表示为 m×n 个网格. (2)将网格点坐标由原先的(x,y,z)转变为 (x/L,y/B,z/H),其中 L 为船长,B 为型宽,H 为型深,再将转变的坐标放入长方体控制点之中, 两者之间的映射关系式为

$$X(s,t,u) = \sum_{i=0}^{l} \sum_{j=0}^{m} \sum_{k=0}^{n} B_{k,n}(u) B_{j,m}(t) \times B_{i,l}(s) Q_{i,j,k}$$
(3)

式中:l与 $B_{i,l}(s)$ 、m与 $B_{j,m}(t)$ 、n与 $B_{k,n}(u)$ 是 Bernstein 多项基函数的关系, $Q_{i,j,k}$ 为控制点三维 坐标.

(3)根据船体几何特点设计若干变量,长方体的若干控制点则是由每个设计变量组成,通过改动设计变量,经过式(3)计算获得变动后的网格点坐标,变动后的网格点由 NURBS 曲线连接,重组成新的船体曲面.

根据有关球鼻艏船型优化研究,在一定速度 范围内,控制船体球鼻艏的大小和位置,对于船体 球鼻艏产生的波系与船体波系可能有干扰作 用^[8],本文在此基础上进行增设球鼻艏研究.球鼻 艏大致可分为 SV 型、柱状撞角型、水滴型、上翘 SV 型等形式^[9],目前渔船多采用 SV 型和水滴型 球鼻艏.据资料统计,SV 型球鼻艏在较为宽广的 速度范围都可降低船体总阻力并提高推进性能, 因此采用 SV 型球鼻艏对船体进行了增设球鼻艄 设计.

总共选择了 12 组顶点,由两个设计参数控制 船体艏部增设球鼻艏的走向,并且实现水线以下 的船体自动变形,如图 2 所示.根据特征参数对球 鼻艏设计进行了约束条件的设定,球鼻艏的长度 约束 $l/L_{pp} = 0\% \sim 7.5\%$,球鼻艏浸湿比 h/T =55%~65%.增设球鼻艏设计变量约束条件见表 2.为了通过减少设计空间来降低计算成本,同时 又能在不丢失几何信息的情况下表示出球鼻艏, 本研究只考虑了两个设计参数.



图 2 增设球鼻艏控制点图

Fig. 2 Diagram of control points of adding bulbous bow

在设计初期,通过拉丁超立方采样(Latin hypercube sampling,LHS)方法^[10]生成具有空间 填充和映射性能的试验设计点,以较少的设计点

表	2	设计	参数	及乡	約束	条件

Tab. 2 Design parameters and constraints

上下限	球鼻艏长度/m	球鼻艏浸湿高度/m
上限	2.295	1.43
下限	0	1.21

获得较为精确的响应. 拉丁超立方采样的具体内容如下:首先,确定变量的个数N,每个变量 x_i 都有设计空间[x_i^{\min}, x_i^{\max}], $i \in [1, N]$;其次,将每个变量 x_i 的设计空间均分为M份;最后,得到 $M \times N$ 的矩阵,行代表独立变量,列对应随机从设计空间挑选的变量.

3 增设球鼻艏优化设计

3.1 目标函数及评估方法

以船模在设计航速 10 kn 时,控制球鼻艏浸 湿高度与球鼻艏长度两个设计参数下总阻力最小 为优化目标.为保证优化结果的精确度,文中采用 非稳态 RANS 方法对渔船阻力进行数值模拟预 报.湍流模型选取 Realizable *k*-ε,数值求解时自由 液面采用 VOF 法处理.

为精确捕捉开尔文波在船体周围的运动情况 变化,对船体附近的网格进行了细化,如图 3(a) 所示.计算的收敛性直接影响船体表面的网格质 量,为了更好地捕捉复杂流动特征,对船体表面进 行了网格细化,如图 3(b)所示.为保证优化结果 分析的准确性,增设球鼻艏时进行数值模拟仿真 的方法均保持一致,其目的是对增设不同参数球





鼻艏得到的船舶阻力性能采用相同的标尺.

3.2 BP 神经网络的应用

BP 神经网络^[11]是基于误差反向传播算法的 人工神经网络,主要由 3 个部分组成,分别是输入 层、输出层和隐含层,如图 4 所示.





对于 3 层 BP 神经网络,假设输入层变量 n 个,输出层变量 m 个,隐含层神经元 s 个,隐含层 的输出为 b_i ,隐含层的阈值为 θ_i ,输出层的阈值为 θ_k ,隐含层的传递函数是 f_1 ,输出层的传递函数是 f_2 ,输入层到隐含层的网络权重为 w_{ij} ,隐含层到 输出层的网络权重为 w_{jk} ,可以得到隐含层的神 经元输出^[12]:

$$b_j = f_1 \left(\sum_{i=1}^n w_{ij} x_i - \theta_j \right) \tag{4}$$

其中i=1,2,...,n;j=1,2,...,s.

计算输出层的结果为 yk,即:

$$y_k = f_2 \left(\sum_{j=1}^s w_{jk} b_j - \theta_k \right) \tag{5}$$

其中 $j=1,2,\cdots,s; k=1,2,\cdots,m$.

由神经网络实际输出定义误差函数为

$$e = \sum_{k=1}^{m} (t_k - y_k)^2$$
 (6)

其中 t_k 为期望输出.

在优化过程中,增加的每一个球鼻艏参数对 目标函数的影响结果是不一样的,如果能从中选 出最优变量,可以提高增设球鼻艏的效率.采用拉 丁超立方采样方法生成 40 个样本集构建 BP 神 经网络的样本值.图 5 为设计变量在二维空间的 投影.

BP 神经网络模型表达式如下: $Y = w_{11}^{(2,3)} \operatorname{tansig}(w_{11}^{(1,2)} x_1 + w_{21}^{(1,2)} x_2 + b_1^{(2)}) + w_{21}^{(2,3)} \operatorname{tansig}(w_{12}^{(1,2)} x_1 + w_{22}^{(1,2)} x_2 + b_2^{(2)}) + w_{31}^{(2,3)} \operatorname{tansig}(w_{13}^{(1,2)} x_1 + w_{23}^{(1,2)} x_2 + b_3^{(2)}) + b_1^{(3)}$ (7)







式中:*w*^(1,2)是第1层的第2个节点到第2层的第1 个节点的权重;*b*⁽³⁾是第3层的第1个节点的阈值.

BP 神经网络算法对样本值进行迭代训练,通 过不停调整,使误差满足精度要求,得到最佳网 络,如图 6 所示.





由图 6 可知,神经网络的预测误差较小,说明 此网络训练较好,预测模型可作为代理模型用于 船型优化.

3.3 优化算法

遗传算法(genetic algorithm,GA)^[13] 是一种 基于种群和搜索的启发式方法,是通过交叉和变 异等遗传功能操作染色体产生新种群的迭代过 程.在设计空间搜索设计航速 10 kn 时总阻力最 小和满足排水量约束的优化船型.设置初始种群 数量为 50,迭代次数为 200.优化结果如图 7 所示.

从图 7 中可以看出, Pareto 解在 40 代之前处于振荡状态, 40 代以后开始趋于平稳.



图 7 遗传算法优化结果 Fig. 7 Optimization results of GA

4 增设球鼻艏效果分析

利用遗传算法求解 BP 神经网络预测模型的 最优解见表 3. 在不改变垂线间长的情况下进行 增设球鼻艏设计,并考虑浸湿高度的影响,模型对 比如图 8 所示.

优化结果

表 3

Ta	b. 3 Optimizatio	n results
相对长度/%	相对高度/%	相对排水体积/%
4.89	62.3	3.18
	图 8 模型对	比

Fig. 8 Model comparison

表 4 阻力组成误差比中的误差是原始值与优 化值相比的百分比,在增设球鼻艏优化过程中,提 高航速,总阻力的变化会越来越大.

表 4 阻力组成误差比

Tab. 4 Resistance composition error ratio

航速/kn	压差阻力误差/%	黏性阻力误差/%	总阻力误差/%	
10	-1.75	1.45	-0.30	
15	-1.45	0.87	-0.58	
18	-1.51	0.49	-1.02	

由图 9 可以看出,航速为 18 kn 的优化船型 艏部波形比航速 15、10 kn 的艏部波形有明显改 善,图上半部分为原始船型,下半部分为优化船

型. 由图 10 可以看出, 航速为 18 kn 的 艏部压力 分布较航速 15、10 kn 的改善较为明显.



8

5 结 论

(1)采用拉丁超立方设计方法对设计参数进 行空间样本采样,避免了优化时的耗时问题.

(2)对计算误差图的分析发现,在进行预测时 输入设计参数可以得到相应的渔船总阻力,这避 免了 CFD 计算耗时问题,同时给船舶设计者提供 了便捷.

(3)阻力组成误差分析表明,在航速为10、 15、18 kn的情况下,优化后的渔船受到的总阻力 分别减小了 0.30%、0.58%、1.02%,说明航速越 大减阻效果越好.

参考文献:

- [1] PÉREZ F, SUÁREZ J A, CLEMENTE J A, et al. Geometric modelling of bulbous bows with the use of non-uniform rational B-spline surfaces [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2007, 12(2): 83-94.
- [2] 赵智萍.小型渔船球鼻艏减阻效果探讨[J].大连 水产学院学报,1998,13(1):70-74.
 ZHAO Zhiping. Investigation of resistance test for small fishing vessel with bulbous bow [J]. Journal of Dalian Fisheries University, 1998, 13(1):70-74. (in Chinese)

- [3] 张 萍,冷文浩,朱德祥,等.船型参数化建模[J].船舶力学,2009,13(1):47-54.
 ZHANG Ping, LENG Wenhao, ZHU Dexiang, et al. Parametric modeling approach of hull form [J].
 Journal of Ship Mechanics, 2009, 13(1):47-54. (in Chinese)
- [4] PIEGL L. On NURBS: A survey [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1991, 11(1): 55-71.
- [5] SEDERBERG T W, PARRY S R. Free-form deformation of solid geometric models [J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1986, 20(4): 151-160.
- [6] LIU Xinwang, WANG Jinkai, WAN Decheng. Hull form optimization design of KCS at full speed range based on resistance performance in calm water [C]// Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, 2018. Cupertino: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2018: 626-632.
- [7] SHEN Yang, HUANG Wei, YAN Li, et al. Constraint-based parameterization using FFD and multi-objective design optimization of a hypersonic vehicle [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 100: 105788.
- [8] 应业炬. 船舶快速性 [M]. 北京: 人民交通出版

社,2007.

YING Yeju. **Ship Speed** [M]. Beijing: People's Communications Press, 2007. (in Chinese)

[9] 林杰人. 船舶设计原理 [M]. 北京: 国防工业出版 社, 1981.

LIN Jieren. **Principles of Ship Design** [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981. (in Chinese)

- [10] PARK J S. Optimal Latin-hypercube designs for computer experiments [J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 1994, 39(1): 95-111.
- [11] 郭浩成. 基于 CFD 和神经网络的三体船快速性优化研究 [D].大连:大连理工大学,2021.
 GUO Haocheng. Research on speed optimization of trimaran ship based on CFD and neural network [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [12] DING Shifei, SU Chunyang, YU Junzhao. An optimizing BP neural network algorithm based on genetic algorithm [J]. Artificial Intelligence Review, 2011, 36(2): 153-162.
- [13] DEJHALLA R, MRŠA Z, VUKOVIĆ S. Application of genetic algorithm for ship hull form optimization [J]. International Shipbuilding Progress, 2001, 48(2): 117-133.

Optimization study of drag reduction bulbous bow model of fishing boat

ZHANG Ya^{*1}, PANG Hongzhen¹, XU Mengting², LIU Bingqing¹, BAI Shiyang¹

(1. School of Navigation and Naval Architecture, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;
2. School of Art and Design, Qilu University of Technology, Jinan 250353, China)

Abstract: In order to explore the influence of the change of bulbous bow on the hydrodynamic performance of fishing boat, taking the total resistance as the optimization objective, an additional bulbous bow is designed based on the vertical bow scheme of the mother ship. Firstly, the parametric modeling of the fishing boat is carried out, and the geometric parameters of the bow are transformed by using free-form deformation (FFD) method. Then, the Latin hypercube design method is used for sampling, and the method combining CFD numerical simulation and BP neural network is used to establish the mother ship prediction model with highly accurate numerical simulation as the optimization feature. Finally, the genetic algorithm is used to optimize the fishing boat and find the design point of the optimal solution of the total resistance. The results show that the total resistance decreases by 0.30%, 0.58% and 1.02% respectively at three speeds after the basic ship type is combined with the addition of the optimal bulbous bow.

Key words: total resistance; free-form deformation method; bulbous bow; BP neural network; optimization