

# 基于 NSGA2 算法与模型树的球鼻艏多航速阻力性能优化

张乔宇, 金建海, 陈京普

(中国船舶科学研究中心, 无锡, 214082, Email: [1520049868@qq.com](mailto:1520049868@qq.com).)

**摘要:** 安装球鼻艏是船舶减少兴波阻力的一种有效方式。本文以标模 KCS 球鼻艏为例, 采用 FFD 几何重构、均匀设计法和 SHIPFLOW 软件建立了球鼻艏几何参数每个样本的兴波阻力系数, 采用模型树和 NSGA2 算法相结合的优化方法, 考虑两种航速下的兴波阻力对球鼻艏参数进行优化, 求解出了兴波阻力系数的 Pareto 最优解集。采用该方案对球鼻艏进行阻力优化同基于 CFD 技术的优化方法相比, 提高了优化效率、缩短了优化周期, 对球鼻艏参数和兴波阻力系数之间的非线性关系进行了描述, 可为今后其他船型球鼻艏的进一步优化研究提供参考。

**关键词:** 球鼻艏; 兴波阻力; 模型树; 多航速优化

## 1 引言

近年来, 许多学者对球鼻艏的阻力性能优化设计进行了研究, 优化方法从多方案优选到 CFD 技术与优化技术的结合<sup>[1]</sup>, 优化设计质量得到了明显的提升。然而, 大多数优化设计仅考虑了单个航速下的优化, 优化的本质在于优化过程中应综合考虑多个工况才能获得较优的设计方案<sup>[2]</sup>, 为了解决多工况优化时计算周期长、工作量大等问题, 近似模型方法在保证精度的前提下可起到提高优化效率, 缩短优化周期的作用。

目前数据挖掘与机器学习技术中的许多非线性预测模型已得到应用, 根据优化问题的特点选取合适的模型尤为重要。模型树作为一种处理回归任务的经典模型, 在许多实例中预测效果满足要求, 具有较好的泛化能力, 同时该模型可根据样本集构造出分段多元线性回归模型, 对各参数关系进行函数表达。

本文采用模型树方法建立船舶兴波阻力系数与浮心位置的预报模型, 选取 4 组球鼻艏参数作为优化变量<sup>[3]</sup>, 即相对突出长度  $l_b/l_{pp}$  ( $l_b$  是球鼻最前端至首柱的距离,  $l_{pp}$  是两柱间长)、相对浸深  $h_b/T$  ( $h_b$  是球鼻最前端至静水面的距离,  $T$  为船的吃水)、最大宽度比  $b_{max}/B$  ( $b_{max}$

是首柱处球鼻横剖面的最大宽度,  $B$  为船宽)、相对排水体积变化  $\delta/\nabla$  ( $\delta$  是球鼻变化引起的全船排水体积改变量,  $\nabla$  是原船排水体积)。

## 2 模型树算法原理

M5 模型树算法由 Quinlan 在 1992 年提出<sup>[4]</sup>, 其基本原理是根据分裂标准以二元切分的形式将数据集分割, 在每个叶节点上包含了能预测数值的多元线性回归模型。对于分裂标准的确定, M5 是利用节点样本目标属性值的标准差减小准则, 即

$$\Delta error = sd(T) - \sum_i \frac{|T_i|}{|T|} \times sd(T_i) \quad (1)$$

其中,  $T$  是某节点的实例集合,  $T_i (i=1, 2, \dots)$  是根据所选属性分裂该节点产生的第  $i$  个子集,  $sd(T)$  是集合  $T$  中实例目标值的标准差,  $\Delta error$  很小时分裂终止。为了避免过拟合现象的出现, 需通过误差分析及剪枝操作来降低树的复杂度, M5 利用每个节点下子树属性通过线性回归方法拟合出回归方程, 并计算出预测的均方误差及每个节点到其子节点均方误差减小量, 直到该减小量不再减少时生成叶子节点<sup>[5]</sup>, 之后采用平滑算法避免相邻线性模型的突变, 计算公式为

$$p' = (np + kq) / (n + k) \quad (2)$$

其中  $p'$  是传输到上层节点的预测值,  $p$  是下层节点传输上的预测值,  $q$  是当前节点提供的预测值,  $n$  是下层节点的训练实例数目,  $k$  为平滑常量<sup>[6]</sup>。

## 3 NSGA2 算法原理

NSGA2(带有精英保留策略的快速非支配多目标优化遗传算法)是由 Deb 等提出的一种基于 Pareto 最优解的多目标优化算法, 该算法有效克服了 NSGA(非支配排序遗传算法)计算效率低、收敛性差等问题, 由于其具有不存在求导和函数连续性的限定、概率化自动获取和指导优化搜索空间、自适应调整搜索方向、内在隐并行性等优点, 已广泛应用于机器学习、组合优化、自适应控制等诸多领域<sup>[7]</sup>。本文采用下式所示的罚函数法处理约束条件:

$$P(X) = \sum_{i=1}^m [\max[0, g_i(X)]]^2 \quad (3)$$

其中,  $g_i(X)$  为优化问题不等式约束条件,  $m$  为不等式个数,  $P(X)$  为惩罚项( $X$  为设计变量集合), 即当个体满足约束条件时,  $P(X)=0$ , 否则  $P(X)$  对适应度进行惩罚。

## 4 球鼻艏阻力近似模型建立与优化

本文以 KCS 球鼻艏为初始原型，优化目标考虑  $F_r=0.26$ 、 $0.27$ ，淡水温度为  $11^\circ\text{C}$  的两种工况下的兴波阻力系数，KCS 的模型主尺度如表 1 所示。

表 1 KCS 模型船型要素

船长 $L_{pp}$ (m)	型宽 $B$ (m)	型深 $D$ (m)	吃水 $T$ (m)	方形系数 $C_b$
7.2786	1.019	0.6013	0.3418	0.6505

本试验采用 FFD 自由变形方法对球鼻艏进行变换，球鼻艏 4 组参数的约束范围如表 2 所示。

表 2 参数约束范围

参数	原船	约束下限	约束上限
$L_b/L_{pp}$	0.031	0.024	0.035
$h_b/T$	0.462	0.372	0.55
$b_{max}/B$	0.147	0.122	0.184
$\delta/\nabla$	0	-0.01	0.01

为了保证训练模型的鲁棒性，以均匀设计法在上述参数范围内选取 136 个样本点，采用基于非线性自由面势流理论和雷诺平均 N-S 方程的 SHIPFLOW 软件，对每个样本点进行三种工况下的兴波阻力系数数值计算，并利用 10 折交叉验证方式建立模型树近似模型。为了检验近似模型的准确度，选取相关系数、平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、相对平均误差(MRSE)作为评价指标来判断近似模型的可行性，船舶浮心位置变化与 3 种工况下兴波阻力系数预报模型具体情况如表 3 所示。

表 3 评价指标情况

预报目标	相关系数	MAE	RMSE	MRSE
浮心位置变化	0.995	0.0353	0.0418	0.987%
兴波阻力系数( $F_r=0.26$ )	0.997	0.0012	0.0015	0.7%
兴波阻力系数( $F_r=0.27$ )	0.998	0.0012	0.0017	0.4%

由此可见，模型树近似模型的预报效果符合该优化命题的精度要求，4 组预报目标的具体函数形式如下：

$$\text{LM1: } \delta/\nabla \leq -0.4\%$$

$$\Delta XCB = -7.74 \times (l_b/l_{pp}) + 0.3 \times (h_b/T) - 6.61 \times (b_{max}/B) + 100.28 \times (\delta/\nabla) + 1.2$$

$$\text{LM2: } -0.4\% < \delta/\nabla \leq -0.3\%, b_{max}/B \leq 0.177$$

$$\Delta XCB = -9.39 \times (l_b/l_{pp}) + 0.3 \times (h_b/T) - 7.9 \times (b_{max}/B) + 84.19 \times (\delta/\nabla) + 1.42$$

$$\text{LM3: } -0.4\% < \delta/\nabla \leq -0.3\%, b_{max}/B > 0.177$$

$$\Delta XCB = -11.09 \times (l_b/l_{pp}) - 0.73 \times (h_b/T) - 9.27 \times (b_{max}/B) + 28.1 \times (\delta/\nabla) + 1.96 \quad (4)$$

$$\text{LM4: } -0.3\% < \delta/\nabla \leq 0, b_{max}/B \leq 0.151$$

$$\Delta XCB = -10.95 \times (l_b/l_{pp}) + 0.29 \times (h_b/T) - 8.5 \times (b_{max}/B) + 83.55 \times (\delta/\nabla) + 1.56$$

$$LM5: -0.3\% < \delta/\nabla \leq 0, b_{max}/B > 0.151$$

$$\Delta XCB = -19.81 \times (l_b/l_{pp}) + 0.3 \times (h_b/T) - 15.82 \times (b_{max}/B) + 8.45 \times (\delta/\nabla) + 2.84$$

$$LM6: \delta/\nabla > 0$$

$$\Delta XCB = -21.92 \times (l_b/l_{pp}) + 0.05 \times (h_b/T) - 16.5 \times (b_{max}/B) + 2.86 \times (\delta/\nabla) + 3.11$$

其中,  $\Delta XCB$  表示浮心位置变化。

兴波阻力系数 ( $F_r=0.26$ ) 的预报情况为:

$$LM1: b_{max}/B \leq 0.123$$

$$C_w = -0.39 \times (l_b/l_{pp}) - 0.01 \times (h_b/T) - 0.79 \times (b_{max}/B) + 1.98 \times (\delta/\nabla) + 0.65$$

$$LM2: 0.123 < b_{max}/B \leq 0.142$$

$$C_w = -0.03 \times (l_b/l_{pp}) - 0.01 \times (h_b/T) - 0.63 \times (b_{max}/B) + 2.27 \times (\delta/\nabla) + 0.62$$

$$LM3: 0.142 < b_{max}/B \leq 0.161 \quad (5)$$

$$C_w = 0.07 \times (l_b/l_{pp}) - 0.004 \times (h_b/T) - 0.43 \times (b_{max}/B) + 2.15 \times (\delta/\nabla) + 0.59$$

$$LM4: b_{max}/B > 0.161$$

$$C_w = 0.23 \times (l_b/l_{pp}) - 0.004 \times (h_b/T) - 0.16 \times (b_{max}/B) + 2.66 \times (\delta/\nabla) + 0.54$$

兴波阻力系数 ( $F_r=0.27$ ) 的预报情况为:

$$LM1: b_{max}/B \leq 0.142$$

$$C_w = -1.59 \times (l_b/l_{pp}) - 0.01 \times (h_b/T) - 1.32 \times (b_{max}/B) + 0.56 \times (\delta/\nabla) + 1.1$$

$$LM2: 0.142 < b_{max}/B \leq 0.161$$

$$C_w = -1.43 \times (l_b/l_{pp}) - 0.01 \times (h_b/T) - 0.94 \times (b_{max}/B) + 1.06 \times (\delta/\nabla) + 1.04$$

$$LM3: 0.161 < b_{max}/B \leq 0.171 \quad (6)$$

$$C_w = -1.25 \times (l_b/l_{pp}) - 0.03 \times (h_b/T) - 0.44 \times (b_{max}/B) + 1.56 \times (\delta/\nabla) + 0.97$$

$$LM4: b_{max}/B > 0.171$$

$$C_w = -1.06 \times (l_b/l_{pp}) - 0.02 \times (h_b/T) - 0.54 \times (b_{max}/B) + 2.4 \times (\delta/\nabla) + 0.98$$

本文的优化模型为

优化目标: 使两种航速下的兴波阻力系数最小, 即  $\min C_w$ ;

优化变量:  $l_b/l_{pp}$ 、 $h_b/T$ 、 $b_{max}/B$ 、 $\delta/\nabla$ ;

约束条件: 排水量约束  $\varphi_1 = \frac{|\Delta_{basis} - \Delta_{opti}|}{\Delta_{basis}} \leq 1\%$ ; 浮心纵向位置约束

$$\varphi_2 = \frac{|L_{cb basis} - L_{cb opti}|}{L_{cb basis}} \leq 1\%$$

适应度函数为:

$$F = C_w(LM1, LM2, LM3, LM4) + \gamma P(X) \quad (7)$$

其中  $\Delta_{basis}$ 、 $L_{cb basis}$  分别为原 KCS 船型的排水量、浮心纵向位置;  $\Delta_{opti}$ 、 $L_{cb opti}$  分别为优化船型的排水量、浮心纵向位置,  $\gamma$  为惩罚因子 (本文取 6)。

在采用 NSGA2 算法的优化过程中,选择实数编码法进行参数编码,初始种群大小为 200,选择算子采取锦标赛选择法,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.06,交叉方式为 SBX(模拟二进制交叉),变异方式为多项式变异,最大进化代数为 200 代,独立运行 10 次,最终搜索出 Pareto 前沿解集如下图所示,同原船型对应航速下的兴波阻力系数相比均下降明显(原船型数值模拟计算在  $Fr$  为 0.26,0.27 时的兴波阻力系数分别为  $5.23 \times 10^{-4}$ ,  $8.6 \times 10^{-4}$ ),可为考虑多航速下的优化方案确定提供依据。

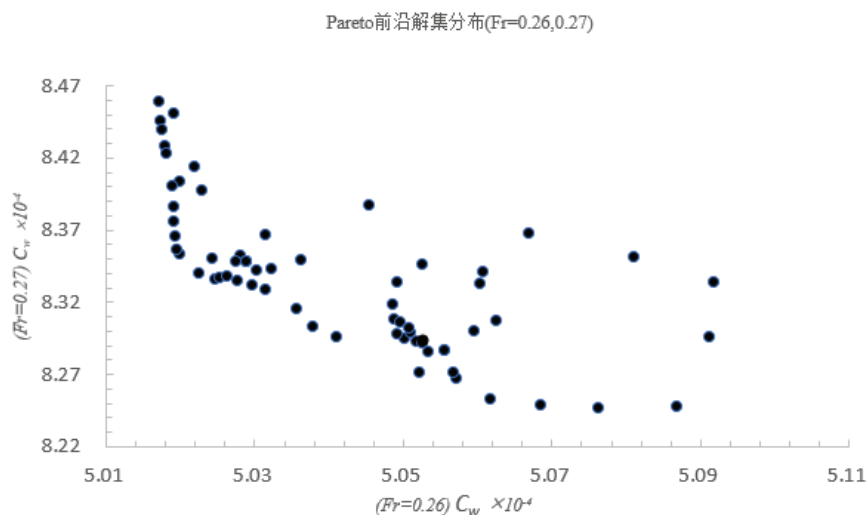


图 1 Pareto 前沿分布

## 5 总结

采用模型树近似模型与 NSGA2 算法相结合的方式,在球鼻艏多航速下阻力性能优化过程中,可以在保证精度的要求下显著降低计算成本,提高优化效率,得出一定数目的最优解。同时,模型树近似模型可以对优化变量和优化目标非线性关系之间建立较为清晰的函数关系,这对以后优化方案的选择提供了很好的参考。

## 参考文献

- 1 赵峰,李胜忠,杨磊,刘卉. 基于 CFD 的船型优化设计研究进展综述[J].船舶力学,2010,14(7):812-820.
- 2 刘祖源,冯佰威,詹成胜. 船体型线多学科设计优化[M]北京:国防工业出版社,2010.
- 3 盛振邦,刘应中. 船舶原理(上册)[M]上海:上海交通大学出版社,2003.

- 4 Quinlan J R. Learning with continuous classes[C]. Proceedings of the 5th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, Hobart, Australia, 1992: 343-348.
- 5 Breiman L, Friedman JH, Olshen R A, etal. Classification and regression trees[M]. Wadsworth, BelmontCA, 1984.
- 6 Li Chaoqun, Li Hongwei. A SVM and Model Tree Based Regression Model and Its Application in Predicting the Amount of Gas Emitted from Coalface[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(3): 370-378.
- 7 Franklin Y Cheng, Dan Li. Multiobjective optimization design with pareto genetic algorithm[J]. Journal of Structure Engineering, 1997; 123(9): 1252-1261.

## **Multi-speed resistance performance optimization of bulbous bow based on NSGA2 algorithm and model tree**

ZHANG Qiao-yu, JIN Jian-hai, CHEN Jing-pu

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi, 214082

Email: [1520049868@qq.com](mailto:1520049868@qq.com).)

**Abstract:** Installation of bulbous bow is an effective way to reduce wave-making resistance. In this paper, standard model-KCS bulbous bow is chosen as the example, the FFD geometry reconstruction, uniform design method is adopted and SHIPFLOW software established the wave making resistance coefficient of each sample about geometric parameters of bulbous bow. The model tree and NSGA2 algorithm is combined as an optimization method, considering two kinds of speed under the wave resistance of bulbous bow parameters optimization, solving the wave-making resistance coefficient under multi-speed of Pareto optimal solution set. Compared with the optimization method based on CFD technology, this scheme can improve the optimization efficiency and shorten the optimization period, and describe the nonlinear relationship between the parameters of the bulbous bow and the wave-making resistance coefficient, which can provide reference for further optimization research of other ship-type bulbous bow in the future.

**Key words:** Bulbous bow; Wave-making resistance; Model tree; Multi-speed optimization method.