

基于缩减控制顶点数和自适应遗传算法的船体水线NURBS拟合

陆丛红, 林焰*, 纪卓尚

(大连理工大学 船舶CAD工程中心, 辽宁 大连 116024)

摘要: 通过船体水线几何特点分析, 研究用尽可能少的 NURBS 控制顶点对水线进行拟合. 利用已有的水线型值数据、平边线边界点信息、首尾圆弧切点及其切线方向, 对首尾自由段分别设置平边线起止点控制顶点、切矢控制顶点以及形状控制顶点, 并以其权因子和相关坐标分量为设计变量, 设置合适的约束条件, 计算已知水线上半宽型值与所拟合的曲线上相应的半宽型值之间的误差, 以最小化其中的最大相对误差为目标函数, 建立优化模型, 采用自适应遗传算法求解该优化问题. 利用 NURBS 的特性, 构造组合曲线, 用单一 NURBS 函数构造任意一条由圆弧曲线、自由曲线和直线构成的水线. 实船舶体型线逼近和设计算例表明, 应用该方法对水线进行拟合是可行的, 并能满足工程设计要求, 同时还可以减少船体水线 NURBS 表达的数据量.

关键词: 船体型线; 水线; NURBS; 控制顶点; 权因子; 自适应遗传算法

中图分类号: U661.312 文献标识码: A

0 引 言

船体型线设计与船舶的快速性、适航性、操纵性、舱室布置、装载容积、纵倾调整及稳性, 以至于施工的工艺性和坞修都有关系, 是船舶技术和经济性能的全局性设计项目之一, 是评价船舶设计质量好坏的一个重要指标^[1]. 水线是船体型线的重要组成部分, 根据给定型值点对水线进行拟合是水线设计方法之一. NURBS (non-uniform rational B-spline) 是适合于水线拟合的较好工具, 其以优良的特性, 可以很好地用单一函数统一表达包括首尾圆弧曲线(或尾封板直线部分)、首尾段自由曲线以及中部直线部分在内的整个水线^[2], 可以通过调整控制网格或型值点来对曲线进行调整和光顺^[3,4]. 然而, 如果通过 NURBS 插值方法来拟合水线, 型值点的数量大, 导致对应 NURBS 曲线的控制顶点数增多, 会给水线的调整和光顺带来过多的约束; 另外, 利用插值得来的水线构造船体曲面也会造成因存在过多型值点约束而无法使曲面达到理想的光顺状态, 所以对曲线进行缩减控制顶点数处理, 即在一定精度范

围内, 通过减少控制顶点个数利用逼近的方法来拟合水线, 不仅可以减少水线以至于船体曲面定义的数据量, 而且可以使水线在更少的约束下得到灵活的调整和光顺, 从而更有利于船体型线的优化设计.

逼近比插值更困难. 在插值问题里, 控制顶点的数目由所选择的次数和数据点数目自动地确定, 由数据点的参数化直接决定节点矢量, 不存在曲线误差问题. 而在逼近问题里, 曲线误差界与要被拟合的数据点一并给出. 通常, 预先不知道需要用多少控制顶点才能达到所要求的逼近精度, 因此, 一般通过迭代的方法来进行曲线逼近^[5]. 但如果对所有曲线均采用这种迭代方法确定逼近的控制顶点数, 将付出很大代价. 节点删除算法是降低控制顶点个数的基本方法, 可以通过精确算法和逼近算法来进行^[6], 前者的实现比较困难, 难以得到实际应用, 后者在节点过于细密的情况下, 具有工程实际意义. 但对于具体的工程问题, 很难确定删除哪些节点能达到所期望的精度和控制顶点的分布. 所以, 本文根据船体水线的特点, 通过事先确定控制顶点个数以及

收稿日期: 2006-10-11; 修回日期: 2007-09-22.

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20060390305).

作者简介: 陆丛红(1972-), 女, 博士, 目前在做博士后工作; 林焰*(1963-), 男, 教授, 博士生导师; 纪卓尚(1938-), 男, 教授, 博士生导师.

各自的坐标分布范围，确定基于缩减控制顶点数的水线拟合优化模型，通过自适应遗传算法进行求解，为基于缩减控制顶点数的船体曲面表达提供数据基础。

1 NURBS 曲线定义

p 次 NURBS 曲线定义为如下形式的分段有理参数曲线^[6]：

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)\omega_i V_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)\omega_i} \quad (0 \leq u \leq 1) \quad (1)$$

其中 $\{V_i\}$ 为控制点列(组成控制多边形)， $\{\omega_i\}$ 为对应的权值序列， $\{N_{i,p}(u)\}$ 为定义在非周期非均匀节点矢量 $U = (0 \quad \cdots \quad 0 \quad u_{p+1} \quad \cdots \quad u_n$

$\underbrace{1 \quad \cdots \quad 1}_{p+1})$ 上的 p 次 B 样条基函数^[6]。

2 水线拟合优化模型

2.1 水线逼近控制顶点设置

水线通常是由首尾圆弧曲线、首尾段自由曲线和中部的直线部分所构成的组合曲线，首(尾)段的自由曲线是与首(尾)圆弧和中部直线部分光滑连接的，所以当水线首尾端点、首尾圆弧半径和中部直线部分首尾端点已知时，对水线的逼近就转化为对首尾段自由曲线的逼近。通过反复对比分析，利用三次 NURBS 曲线逼近水线，对控制顶点作如图 1 所示的设置，可达到逼近的精度和调整的灵活性等目的。

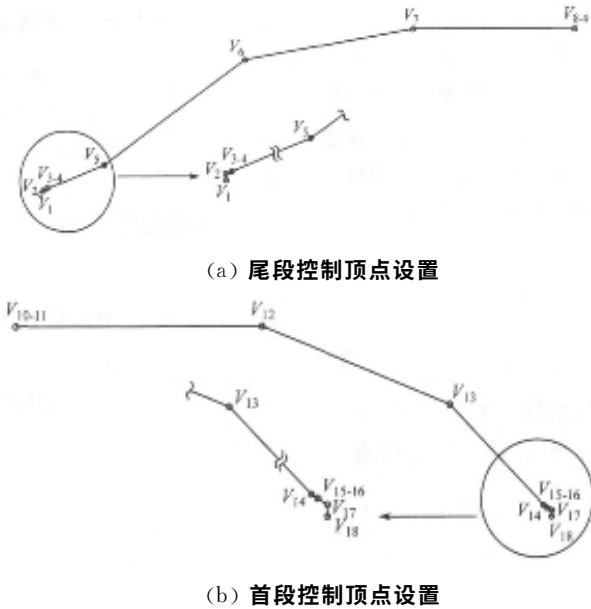


图 1 水线拟合控制顶点设置

Fig.1 Control points for waterline fitting

图中共 18 个控制顶点(14 个独立位置)，分为以下 4 类：

(1) 首尾圆弧控制顶点： $V_1 \sim V_{3-4}$ 、 $V_{15-16} \sim V_{18}$ ，由水线进、去流角和圆弧半径决定；这种方法确定的圆弧曲线是二次 NURBS 曲线，需要通过升阶方法变换为三次 NURBS 曲线^[6]，再与其他部分曲线进行组合得到组合曲线，来表达船体水线^[2]。

(2) 平边线起止点控制顶点： $V_{8-9} \sim V_{10-11}$ ， V_{8-9} 和 V_{10-11} 分别为二重控制点，处在后体和前体

平边线起止点上，确定中部的直线部分。

(3) 切矢控制顶点： V_5 、 V_7 、 V_{12} 和 V_{14} ，其中 V_7 和 V_{12} 处于 V_{8-9} 和 V_{10-11} 所确定的直线上， V_5 和 V_{14} 分别处于 V_2 和 V_{3-4} 以及 V_{15-16} 和 V_{17} 所确定的直线上，用来调整端部切矢，以达到自由段曲线与直线和圆弧部分光滑连接的目的。

(4) 形状控制顶点： V_6 和 V_{13} ，用来调整曲线的具体形状，包括曲线的凸凹，与 V_5 、 V_7 和 V_{12} 、 V_{14} 结合来逼近自由曲线部分。

当水线处于尾封板最低点以上时， V_{3-4} 点与

V_2 点重合, 构成尾部水线的折角点.

2.2 输入参数

通过 2.1 节水线逼近控制顶点设置方法, 可以看出, 拟合一根水线需要输入的参数包括: 首尾段水线的型值点坐标, 水线首尾起止点, 首尾圆弧半径 R_n, R_f , 进流角 α_e , 去流角 α_r , 平边线起点和终点的 x 坐标, 记为 x_{st}, x_{ed} .

2.3 设计变量

通过以上分析, 设立如下设计变量:

尾段设计变量 ($V_{5,y}, V_{6,x}, V_{6,y}, V_{7,x}, \omega_5, \omega_6, \omega_7$)

首段设计变量 ($V_{12,x}, V_{13,x}, V_{13,y}, V_{14,y}, \omega_{12}, \omega_{13}, \omega_{14}$)

其中 $V_{i,x}, V_{i,y}$ 分别为控制顶点 V_i 的纵向和横向坐标值, ω_i 是控制顶点 V_i 的权值.

2.4 目标函数

设原水线尾段自由段型值点列为 $P_a = \{P_{a_0}, P_{a_1}, \dots, P_{a_n}\}$, 拟合水线上对应各型值点 x 坐标位置的 y 坐标值为 $\{F_{a_0,y}, F_{a_1,y}, \dots, F_{a_n,y}\}$, 目标函数为最小化各型值点 y 坐标值与对应的拟合曲线上点的 y 坐标值的相对误差中的最大值, 即

$$\min f(X) = \max(|F_{a_0,y} - P_{a_0,y}|/|P_{a_0,y}|, |F_{a_1,y} - P_{a_1,y}|/|P_{a_1,y}|, \dots, |F_{a_n,y} - P_{a_n,y}|/|P_{a_n,y}|) \tag{2}$$

同理, 设原水线首段自由段型值点列为 $P_f = \{P_{f_0}, P_{f_1}, \dots, P_{f_n}\}$, 拟合水线上对应各型值点 x 坐标位置的 y 坐标值为 $\{F_{f_0,y}, F_{f_1,y}, \dots, F_{f_n,y}\}$, 目标函数为

$$\min f(X) = \max(|F_{f_0,y} - P_{f_0,y}|/|P_{f_0,y}|, |F_{f_1,y} - P_{f_1,y}|/|P_{f_1,y}|, \dots, |F_{f_n,y} - P_{f_n,y}|/|P_{f_n,y}|) \tag{3}$$

拟合水线上对应型值点 x 坐标的 y 坐标值是利用过原有水线上型值点且平行于横剖面的平面与曲线求交得到的^[7].

2.5 约束条件

因为水线不可能产生迂回曲折现象, 根据 NURBS 的凸包性, 缩减控制顶点个数将导致曲线向原曲线凸包内部移动, 所以需要通过调整 (增大) 权值, 将拟合曲线向原有曲线拉近. 故对首尾段自由曲线拟合, 分别设置如下约束条件:

尾段的约束条件

$$\begin{cases} V_{3-4,x} < V_{7,x} < x_{st} \\ V_{3-4,x} < V_{6,x} < V_{7,x} \\ V_{3-4,y} < V_{6,y} < V_{8-9,y} \\ V_{3-4,y} < V_{5,y} < V_{6,y} \\ (V_{5,y} - V_{3-4,y})/(V_{5,x} - V_{3-4,x}) = \tan \alpha_r \\ 0 < \omega_i < 50, i = 5, 6, 7 \end{cases} \tag{4}$$

同理, 首段的约束条件

$$\begin{cases} x_{ed} < V_{12,x} < V_{15-16,x} \\ V_{12,x} < V_{13,x} < V_{15-16,x} \\ V_{15-16,y} < V_{13,y} < V_{10-11,y} \\ V_{15-16,y} < V_{14,y} < V_{13,y} \\ (V_{14,y} - V_{15-16,y})/(V_{15-16,x} - V_{14,x}) = \tan \alpha_i \\ 0 < \omega_i < 50, i = 12, 13, 14 \end{cases} \tag{5}$$

这里, 为了计算方便, 将作为自由段曲线端点的控制顶点 $V_{3-4}, V_{8-9}, V_{10-11}$ 和 V_{15-16} 对应的权值设为 1.

3 水线拟合自适应遗传算法

遗传算法是当今求解优化问题最有效的方法之一^[8]. 近年来, 遗传算法已被成功用于型线设计和光顺^[9]、船型优化^[10,11]、分舱设计^[12] 以及性能计算^[13,14] 等. 本文将自适应遗传算法应用于上述水线拟合优化问题中.

3.1 染色体

遗传算法中的染色体即优化设计中的设计变量, 染色体上的每一位即每一个设计变量称为基因. 这里采用实数编码的染色体, 即每一个染色体由一个实数编码表示, 其长度与设计变量的维数相同.

设计变量

$$X = (x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n)^T$$

染色体

$$V_k = (v_{k1} \quad v_{k2} \quad \dots \quad v_{kn})^T; k = 1, 2, \dots, m$$

式中: $x_i^l \leq v_{ki} \leq x_i^u, x_i^l$ 和 x_i^u 分别为设计变量 x_i 的下限和上限; n 为染色体长度; m 为染色体的总数, 称为种群规模. 初始种群用随机方法产生. 实数编码的染色体长度即设计变量的维数, 由 2.3 节可知, 该问题染色体的长度为 7, 则第 k 个染色体为 $V_k = (v_{k1} \quad v_{k2} \quad \dots \quad v_{k7})^T$.

3.2 评 估

对染色体进行评估, 就是建立恰当的适值函数, 使染色体的适值与其优劣成正比. 因为是最小化问题, 且理想最优值是 0, 所以这里以目标值的倒数作为适值函数, 即

$$eval(V_k) = 1.0/f(V_k) \tag{6}$$

3.3 选 择

采用轮盘赌方法作为选择方法. 它是一种正比选择策略, 能够根据与适值成正比的概率选出新的种群. 轮盘赌方法由以下 4 步构成:

(1) 根据式(6), 计算各个染色体 V_k 的适值 $eval(V_k) = 1.0/f(V_k); k = 1, 2, \dots, m$

(2) 计算种群中所有染色体适值的和

$$F = \sum_{k=1}^m eval(V_k)$$

(3) 对各染色体 V_k , 计算选择概率

$$p_k = eval(V_k)/F; k = 1, 2, \dots, m$$

(4) 对各染色体 V_k , 计算累积概率

$$q_k = \sum_{j=1}^k p_j$$

选择过程就是旋转轮盘, 按如下方式选出待操作的染色体:

(1) 在 $[0, 1]$ 区间产生一个均匀分布的伪随机数 r .

(2) 若 $r \leq q_1$, 则选第一个染色体 V_1 ; 否则, 若 $q_{k-1} < r \leq q_k$ 成立, 则选择第 k 个染色体 $V_k (2 \leq k \leq m)$.

3.4 交叉率 P_c 和变异率 P_m 的自适应控制

遗传算法中的交叉率 P_c 和变异率 P_m 的合理选择将直接影响到遗传算法的收敛速度和解的质量. 在简单遗传算法中, P_c 和 P_m 在整个遗传进程中保持不变, 这使得遗传算法在应用过程中收敛速度慢. 为加快收敛速度, 在进化过程中对 P_c 和 P_m 进行自适应调整, 这里采用文献[15]提出的调整方法:

$$P_c = \begin{cases} \frac{P_{cmax} - P_{cmin}}{1 + \exp\left(A\left(\frac{2(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}\right)\right)} + P_{cmin}; & f' \geq f_{avg} \\ f_{max}; & f' < f_{avg} \end{cases} \tag{7}$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{P_{mmax} - P_{mmin}}{1 + \exp\left(A\left(\frac{2(f - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}\right)\right)} + P_{mmin}; & f \geq f_{avg} \\ f_{max}; & f < f_{avg} \end{cases} \tag{8}$$

式中: f_{max} 为每代群体中最大的适值; f_{avg} 为每代群体的平均适值; f' 为待交叉的两个染色体中适值较大的个体适值; f 为待变异染色体的适值.

$P_{cmax}, P_{cmin}, P_{mmax}, P_{mmin}$ 为指定值, 一般取 $P_{cmax} = 0.8, P_{cmin} = 0.3, P_{mmax} = 0.1, P_{mmin} = 0.05$. 该方法实现了交叉率和变异率的非线性自适应调整.

3.5 杂 交

依 3.3 节的方法, 选择 $m/2$ 对待杂交个体, 记为 parForCross0 和 parForCross1, 对每一对待杂交个体, 依式(7) 计算杂交率 P_c , 在 $[0, 1]$ 区间产生随机数 r , 若 $r < P_c$, 对 parForCross0 和 parForCross1 进行单点杂交[16], 如图 2 所示, 交换两父代杂交点之后的基因, 得到两个子代 child0、child1. 如果子代好于父代, 则用子代代替父代, 反之父代保留, 杂交后所得个体组成新的种群, 参与变异操作.

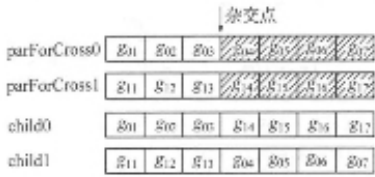


图 2 单点杂交遗传操作

Fig. 2 Single-point crossover operation

3.6 变 异

对杂交后产生新种群的每个个体, 按式(8) 计算变异率 P_m , 在 $[0, 1]$ 区间产生随机数 r , 如果 $r < P_m$, 则对该个体的每位基因 $g_k (k = 1, 2, \dots, 7)$, 随机地按如下两种可能的机会完成非均匀变异操作[16]:

$$\left. \begin{aligned} g'_k &= g_k + \delta(t, g_k^u - g_k) \\ g'_k &= g_k - \delta(t, g_k - g_k^l) \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

其中 g_k^u 和 g_k^l 分别是 g_k 的上下界. 函数 $\delta(t, y)$ 给出 $[0, y]$ 间的一个值, 使得 $\delta(t, y)$ 随着 t 的增加而趋于 0 (t 是遗传代数), 一般取 $\delta(t, y) = y \times r \times (1 - t/M)^\beta$, 这里 r 是 $[0, 1]$ 间的随机数; M 为最大代数, 或足够大的数; β 为确定非均匀度的参数, 一般取 2. 可以验证, 对于凸的可行集, 这种方法产生的后代也是可行的.

3.7 终止条件

大多数传统遗传算法都选择达到给定循环次数作为终止条件, 这种方法可能造成未达到计算精度就被迫终止或已达到计算精度还要继续循环的不良后果, 故这里将最优染色体的目标值达到给定精度 ϵ 作为终止条件, 将这个染色体解码为问题的解输出.

4 实船算例

以常规方尾平底海船为例验证上述方法的可行性和工程精度. 图 3 为某成品油船的水线拟合结果, 图中给出了平底线(No. 1)、尾封板最低点以下(No. 2 包含首尾圆弧曲线)和尾封板最低点以上(No. 3 包含尾部直线部分及折角)共 3 条水线的拟合结果, 并给出拟合曲线的控制顶点分布. 表 1、2 给出了各条水线拟合的输入数据和结果数据以及拟合的相对误差, 误差精度设为 0.5%.

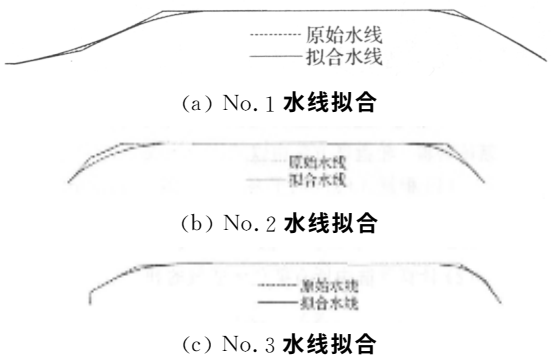


图 3 水线拟合结果及控制顶点分布

Fig. 3 Waterline fitting and control points distribution

表 1 水线逼近输入数据

Tab. 1 Input data of the waterline approximation

型号	尾段				首段			
	$(x_i, y_i)/\text{m}$	$\alpha_r/(\text{^\circ})$	尾圆弧切点 $(x, y)/\text{m}$	R_n/m	$(x_i, y_i)/\text{m}$	$\alpha_e/(\text{^\circ})$	首圆弧切点 $(x, y)/\text{m}$	R_f/m
No. 1	(- 101.575, 0.236)	0.117	(- 103.340, 0.210)	0.210	(59.750, 19.905)	32.965	(107.461, 0.161 8)	0.193
	(- 95.600, 1.087)				(71.700, 18.216)			
	(- 83.850, 3.776)				(83.650, 13.593)			
	(- 71.700, 7.354)				(89.625, 10.734)			
	(- 59.750, 12.064)				(95.600, 7.527)			
	(- 47.800, 16.280)				(101.575, 3.936)			
	(- 35.850, 18.986)							
	(- 23.900, 19.905)							
No. 2		46.992	(- 115.816, 0.826)	1.211	(71.700, 22.000)	55.985	(121.693, 0.236)	0.422
	(- 113.525, 3.157)				(83.650, 21.529)			
	(- 107.550, 7.654)				(89.625, 20.586)			
	(- 101.575, 11.150)				(95.600, 18.899)			
	(- 95.600, 14.132)				(101.575, 16.326)			
	(- 83.650, 18.294)				(107.550, 12.805)			
	(- 71.700, 20.568)				(110.538, 10.807)			
	(- 59.750, 21.873)				(113.525, 8.572)			
No. 3	(- 47.800, 22.000)	27.681	(- 124.628, 6.862)	—	(116.513, 6.045)	54.223	(120.165, 0.533)	0.911
					(119.500, 3.202)			
					(121.552, 0.502)			
					(71.700, 22.000)			
	(- 119.500, 9.537)				(83.650, 21.851)			
	(- 113.525, 12.539)				(89.625, 21.198)			
	(- 107.550, 15.291)				(95.600, 19.767)			
	(- 101.575, 17.556)				(101.575, 17.605)			

表 2 水线逼近结果数据

Tab. 2 Result data of the waterline approximation

型号	尾段				首段			
	控制顶点	(<i>x</i> , <i>y</i>)/m	<i>ω_i</i>	拟合误差 / %	控制顶点	(<i>x</i> , <i>y</i>)/m	<i>ω_i</i>	拟合误差 / %
No. 1	<i>V</i> ₁	(− 103. 550, 0)	1. 0	0. 462	<i>V</i> ₁₀₋₁₁	(59. 750, 19. 905)	1. 0	0. 197
	<i>V</i> ₂	(− 103. 550, 0. 210)	0. 708		<i>V</i> ₁₂	(70. 972, 19. 905)	3. 382	
	<i>V</i> ₃₋₄	(− 103. 340, 0. 210)	1. 0		<i>V</i> ₁₃	(92. 781, 9. 369)	6. 034	
	<i>V</i> ₅	(− 99. 726, 0. 217)	8. 743		<i>V</i> ₁₄	(100. 740, 4. 521)	3. 124	
	<i>V</i> ₆	(− 74. 255, 5. 108)	9. 635		<i>V</i> ₁₅₋₁₆	(107. 461, 0. 162)	1. 0	
	<i>V</i> ₇	(− 42. 04, 19. 905)	4. 125		<i>V</i> ₁₇	(107. 550, 0. 105)	0. 879	
	<i>V</i> ₈₋₉	(− 23. 900, 19. 905)	1. 0		<i>V</i> ₁₈	(107. 550, 0)	1. 0	
No. 2	<i>V</i> ₁	(− 116. 141, 0)	1. 0	0. 450	<i>V</i> ₁₀₋₁₁	(71. 700, 22. 000)	1. 0	0. 420
	<i>V</i> ₂	(− 116. 141, 0. 477)	0. 930		<i>V</i> ₁₂	(77. 955, 22. 000)	20. 191	
	<i>V</i> ₃₋₄	(− 115. 816, 0. 826)	1. 0		<i>V</i> ₁₃	(100. 467, 21. 201)	20. 771	
	<i>V</i> ₅	(− 114. 713, 2. 008)	32. 010		<i>V</i> ₁₄	(119. 499, 3. 487)	16. 552	
	<i>V</i> ₆	(− 103. 671, 13. 726)	4. 472		<i>V</i> ₁₅₋₁₆	(121. 693, 0. 236)	1. 0	
	<i>V</i> ₇	(− 84. 409, 22. 000)	2. 368		<i>V</i> ₁₇	(121. 766, 0. 129)	0. 956	
	<i>V</i> ₈₋₉	(− 47. 800, 22. 000)	1. 0		<i>V</i> ₁₈	(121. 766, 0)	1. 0	
No. 3	<i>V</i> ₁	(− 124. 628, 0)	1. 0	0. 415	<i>V</i> ₁₀₋₁₁	(71. 700, 22. 000)	1. 0	0. 332
	<i>V</i> ₂	(− 124. 629, 6. 862)	1. 0		<i>V</i> ₁₂	(95. 231, 22. 000)	8. 352	
	<i>V</i> ₃₋₄	(− 124. 629, 6. 862)	1. 0		<i>V</i> ₁₃	(110. 066, 13. 197)	23. 332	
	<i>V</i> ₅	(− 115. 213, 11. 801)	39. 749		<i>V</i> ₁₄	(119. 048, 2. 082)	13. 178	
	<i>V</i> ₆	(− 97. 001, 20. 673)	40. 947		<i>V</i> ₁₅₋₁₆	(120. 165, 0. 533)	1. 0	
	<i>V</i> ₇	(− 69. 454, 22. 000)	14. 040		<i>V</i> ₁₇	(120. 337, 0. 294)	0. 952	
	<i>V</i> ₈₋₉	(− 59. 750, 22. 000)	1. 0		<i>V</i> ₁₈	(120. 337, 0)	1. 0	

5 结 语

在分析常规海船船体水线特点的基础上, 研究用尽可能少的控制顶点对水线进行拟合, 对控制顶点进行合理设置, 建立水线拟合的优化模型, 采用自适应遗传算法, 对该优化问题进行求解. 计算实例表明, 该水线拟合方法可行, 可达到工程需要的精度. 利用该方法还可以进一步研究如何用更少的数据量对船体曲面进行 NURBS 表达、光顺、型线变换, 以及通过该方法在主尺度及主要水线参数确定且缺少母型的前提下, 进行船体曲面自行设计和新颖船型开发; 另外, 如何用该方法进行空间曲线如甲板边线的逼近也将是今后努力的方向.

参考文献:

[1] 李树范, 纪卓尚, 王世连. 船舶设计原理[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1998

[2] 陆丛红. 基于 NURBS 表达的船舶初步设计关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005

[3] NAM J H, PARSONS M G. A parametric approach for initial hull form modeling using NURBS representation [J]. J Ship Prod, 2000, 16(2-4): 76-89

[4] 赵成璧, 邹早建. 基于 NURBS 的船舶型线设计程序 EHULL[J]. 武汉造船, 2001, 136(1): 28-31

[5] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条 (CAGD&NURBS)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1994

[6] PIEGL L A, TILLER W. The NURBS Book [M]. Berlin: Springer, 1997

[7] LU C H, LIN Y, JI Z S. An algorithm for plane-surface intersection and its application to ship building [J]. Ship Technol Res, 2005, 52(3): 103-106

[8] GEN M, CHENG R W. Genetic Algorithms and Engineering Optimization [M]. New York: John Wiley & Sons, 1997

- Wiley & Sons, Inc., 2000
- [9] ISLAM M M, KHONDOKER M R H, RAHMAN C M. Application of artificial intelligence techniques in automatic hull form generation [J]. *Ocean Eng*, 2001, **28**(12): 1531-1544
- [10] DEJHALLA R, MRSA Z, VUKOVIC S. Application of genetic algorithm for ship hull form optimization [J]. *Int Ship Building Progress*, 2001, **48**(2): 117-133
- [11] LEE D. Hybrid system approach to optimum design of a ship [J]. *Artif Intell for Eng Des, Anal and Manuf*, 1999, **13**(1): 1-11
- [12] LEE K Y, HAN S N, ROH M I. Optimal compartment layout design for a naval ship using an improved genetic algorithm [J]. *Marine Technol*, 2002, **39**(3): 159-169
- [13] LU C H, LIN Y, JI Z S. Precise calculation of minimum stability of ship using fuzzy genetic algorithm [J]. *Int J Maritime Eng*, 2006, **148**(1): 25-33
- [14] 陆丛红, 林 焰, 纪卓尚. 遗传算法在船舶自由浮态计算中的应用 [J]. *上海交通大学学报*, 2005, **39**(5): 701-705
- [15] 邝航宇, 金 晶, 苏 勇. 自适应遗传算法交叉变异算子的改进 [J]. *计算机工程与应用*, 2006, **12**: 93-107
- [16] GEN M, CHENG R W. *Genetic Algorithms and Engineering Design* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997

NURBS approximation of hull waterline based on reduced control points number with adaptive genetic algorithm

LU Cong-hong, LIN Yan*, JI Zhuo-shang

(Ship CAD Eng. Cent., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the analysis of the geometrical properties of the hull waterline, the waterline was approximated with as few NURBS control points as possible. Using the given waterline offset, the end points of its flat side line, tangent points of the fore and aft arc curves and the tangent vector, the start tangent control point, end tangent control point and form control point are set for the aft and fore free curve respectively. The optimization model is constructed with the weights and the coordinates of the control points as the design variables. The appropriate constraints are set. The objective function of this optimization problem is set to minimize the maximum value among the relative errors between the half breadth values of the given waterline and the corresponding ones of the fitted waterline. An adaptive genetic algorithm is applied to solving this optimization problem. And then, a waterline, combined with arc curves, free curves and lines, is described with a single NURBS curve function. The instances of the hull form approximation and design for full-scale ship indicate that it is feasible and can satisfy the requirements of the engineering design to fit the waterline. Applying this method, the data used for hull waterline representation can be reduced.

Key words: hull form; waterline; NURBS; control point; weight factor; adaptive genetic algorithm