

可预测期望航向的船舶航迹控制器设计

胡耀华, 徐素武

(东莞理工学院 电子工程学院, 广东 东莞 523808)

摘要: 为了提高航迹控制器的跟踪性能, 节省航程, 本文推导了期望航向和航迹偏差的数学模型, 设计了可预测期望航向的船舶航迹预测控制器, 它不仅能预测系统的输出(船首向和航迹偏差), 而且可以提前多步预测系统的参考输入(期望航向), 以提前修正命令舵角. 对货船的航迹控制计算机仿真结果表明, 算法提高了控制器的跟踪速度和精度, 缩短了船舶的实际航程. 本文还给出了求解控制器中逆矩阵的递推算法, 其计算量为通常算法的1/3.

关键词: 广义预测控制; 航迹保持; 矩阵求逆; 递推算法

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Controller design for ship tracking based on prediction of desired headings

HU Yao-hua, XU Su-wu

(School of Electrical Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan Guangdong 523808, China)

Abstract: To improve the tracking performance and shorten the length of the journey, we introduce a generalized predictive controller(GPC) for ship tracking. It adjusts the commanded rudder angles based on the predicted heading angles and track errors, and the predicted desired heading angles in multiple steps ahead. The simulation of the tracking of a cargo ship shows that the new controller improves the tracking speed and precision, and shortens the length of the journey. A recursive algorithm for matrix inversion employed in the controller design is also presented. The computational time required by the recursive algorithm for matrix inversion is only 1/3 of that in general matrix inversion algorithms.

Key words: generalized predictive control(GPC); track keeping; recursive algorithms; matrix inversion

1 引言(Introduction)

船舶自动操纵一直是一个复杂的控制问题, 表现在船舶动态具有非线性、大滞后、大惯性等特性, 且风浪流干扰的随机性以及航行工况(装载和航速等)的频繁变化使船舶运动数学模型呈现明显的不确定性. 针对船舶的运动控制问题, 各国学者设计了多种自动舵控制器, 采用的控制算法典型的有预测控制^[1]、遗传算法^[2]、模糊控制^[3,4]、内模控制^[5]等.

现有的各种航迹控制器基本都以船舶当前的位置到下一个转向点(若干转向点构成预定航线)的方向作为期望航向, 通过间接控制船舶的航向来实现航迹控制. 在不同的控制时刻, 控制器根据最新的船舶位置信息自动计算并实时修订期望航向^[6,7]. 但由于将来时刻的输入未知, 现有的各种控制算法还无法预测船舶的航迹偏差和期望航向. 从本质上讲, 现有的各种航迹控制器就是期望航向时变的航向控制

器, 其期望航向只由当前船位决定.

为了进一步改善控制效果, 本文分别推导了预测船舶航向、航迹偏差、期望航向随将来时刻输入舵角变化的数学模型, 在每个控制周期内多步预测将来时刻的船舶航向、航迹偏差, 在此基础上多步预测并修订期望航向的向量, 以提前修正命令舵角, 进一步缩短调节时间, 节省航程, 降低能耗, 改善控制效果. 此外, 为了减小控制器的计算量, 本文也给出了控制器中求逆矩阵的递推算法, 其计算量是通常的增广矩阵求逆算法的1/3.

2 广义预测航向控制的基本算法^[1](Basic generalized predictive controller for ship course keeping)

船舶航向和命令舵角的关系可简化为如下形式的CARIMA模型:

$$\psi(t+1) = \sum_{i=1}^n a_{1,i} \psi(t+1-i) + \sum_{i=0}^m b_{1,i} \Delta\delta(t-d-i) + \sum_{i=0}^{r_1} c_{1,i} \xi_1(t+1-i), \quad (1)$$

其中: ψ 为系统的输出(航向), δ 为输入(舵角), $d+1$ 为系统的纯滞后, $\xi_1(t)$ 为外部白噪声, $\Delta = 1 - q^{-1}$ 为一步延迟算子. 由式(1)可递推出 t 时刻后输出的 k 步最小方差预报器为

$$\psi(t+k|t) = \begin{cases} \psi_m(t+k), & k \leq d, \\ \psi_m(t+k) + \sum_{i=d}^{k-1} b_{k-i,0} \Delta\delta(t-d+i), & k > d. \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\psi_m(t+k)$ 是 t 时刻后假设输入增量为 0 时的预测输出, 它完全由已知信息确定:

$$\psi_m(t+k) = \sum_{i=1}^n a_{1,i} \psi_m(t+k-i) + \sum_{i=0}^{r_1} c_{1,i} \xi_1(t+k-i|t) + \sum_{i=0}^m b_{1,i} \Delta\delta(t+k-d-i-1|t). \quad (3)$$

式(2)可表示为如下的向量形式:

$$\begin{aligned} \Psi &= \Psi_m + G\Delta\delta, \\ \Psi &= [\psi(t+d+1|t) \cdots \psi(t+d+p|t)]^T, \\ \Psi_m &= [\psi_m(t+d+1|t) \cdots \psi_m(t+d+p|t)]^T, \\ \Delta\delta &= [\Delta\delta(t) \cdots \Delta\delta(t+p-1)]^T, \\ G &= \begin{bmatrix} b_{1,0} & 0 \\ \vdots & \ddots \\ b_{p,0} & \cdots b_{1,0} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

相关的推导和参数的计算请参考文献[1].

实际操船要求航向变化以近似一阶惯性系统的形式逐步逼近期望的航向 ψ_{ref} , 考虑系统的滞后, 取参考轨迹向量 Ψ_r 为

$$\begin{cases} \Psi_r = [\psi_r(t+d+1) \cdots \psi_r(t+d+p)]^T, \\ \psi_r(t+d) = \psi_m(t+d), \\ \psi_r(t+d+j) = \alpha\psi_r(t+d+j-1) + (1-\alpha)\psi_{\text{ref}}(t+d+j), \end{cases} \quad (5)$$

其中 α 为柔化系数, 在航向控制时 ψ_{ref} 为常数. 航向控制时要求航向偏差和舵机动作尽量小, 因此取目标函数为

$$J = (\Psi_r - \Psi)^T (\Psi_r - \Psi) + \lambda \Delta\delta^T \Delta\delta, \quad (6)$$

λ 为舵机的加权系数. 极小化目标函数 J , 得转向时 t 时刻命令舵角为

$$\Delta\delta(t) = (1, 0, \cdots, 0)[G^T G + \lambda I]^{-1} G^T (\Psi_r - \Psi_m). \quad (7)$$

3 航迹保持控制器设计(Controller design for ship track keeping)

航迹控制是通过间接控制航向来实现的. 从式(5)可见, 航向控制的参考轨迹计算中, 由于将来时刻的期望航向未知, 在实际应用中都是以当前时刻的期望航向作为将来各个时刻的期望航向值, 即在同一控制周期内式(5)中的期望航向 ψ_{ref} 是常量(注: 但在不同的控制周期内 ψ_{ref} 是变化的). 针对这种情况, 本节根据船位和航向信息, 建立了船舶期望航向的预测模型, 在每个控制周期内, 递推预测将来各个时刻的期望航向, 构成期望航向向量, 替代式(5)中的常值的期望航向, 以便进一步提前调整命令舵角, 获取更好的控制效果.

3.1 期望航向的预测模型(Predict model for desired heading)

在现有的各种航迹控制方法中, 控制系统根据传感器获得的船舶位置信息和预定的转向点来计算期望航向. 如图1所示, A和B是预定的转向点, C为船舶当前的位置, 则期望的航向由下式计算:

$$\psi_{\text{ref}} = \tan^{-1} \left(\frac{y_{\text{wp}} - y_p}{x_{\text{wp}} - x_p} \right), \quad (8)$$

其中: (x_p, y_p) 是当前船位C的坐标, $(x_{\text{wp}}, y_{\text{wp}})$ 是下一个预定的转向点B的坐标^[4], 这里定义正北方向(X轴方向)为 0° , 右舷方向(Y轴方向)舵角为正, 左舷方向舵角为负.

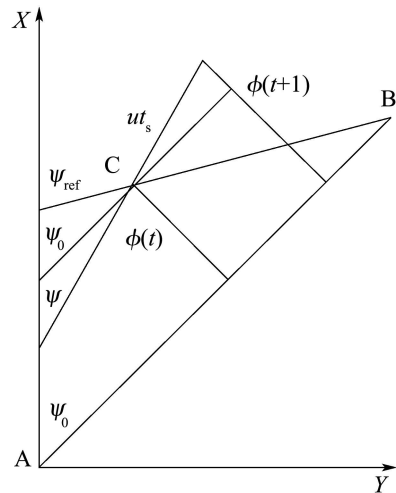


图1 期望航向和航迹偏差

Fig. 1 Desired heading and track error

如图1示, ψ_0 是预定的航线AB与正北向的夹角, 定义 $\phi(t)$ 为 t 时刻的航迹偏差(当前船位C与AB的

最短距离), $l(t)$ 是C到转向点B的距离, 则从图可知在 t 和 $t+1$ 时刻有如下关系式:

$$\sin(\psi_{\text{ref}}(t) - \psi_0) = \phi(t)/l(t), \quad (9)$$

$$\sin(\psi_{\text{ref}}(t+1) - \psi_0) = \phi(t+1)/l(t+1). \quad (10)$$

在每个控制周期, C和B的距离变化很小, 即 $l(t+1) - l(t) \ll l(t)$. (当 $l(t)$ 很小, 小于一个规定的转向半径时, 船舶将驶向下一个转向点, 此时将采用转向控制). 用式(10)减去式(9), 得

$$\begin{aligned} & \sin(\psi_{\text{ref}}(t+1) - \psi_0) - \sin(\psi_{\text{ref}}(t) - \psi_0) = \\ & 2\sin\left(\frac{\psi_{\text{ref}}(t+1) - \psi_{\text{ref}}(t)}{2}\right) \times \\ & \cos\left(\frac{\psi_{\text{ref}}(t+1) + \psi_{\text{ref}}(t)}{2} - \psi_0\right) = \\ & \frac{\phi(t+1)}{l(t+1)} - \frac{\phi(t)}{l(t)} \approx \\ & \frac{\phi(t+1) - \phi(t)}{l(t)} = \frac{\Delta\phi(t+1)}{l(t)}. \end{aligned} \quad (11)$$

同样在每个控制周期内期望航向的修正量也很小, 当 θ 接近0时应用近似公式 $\sin\theta \approx \theta$, 则式(11)可近似为

$$\psi_{\text{ref}}(t+1) \approx \psi_{\text{ref}}(t) + \Delta\phi(t+1)/k_l, \quad (12)$$

$$k_l = l(t)\cos(\psi_{\text{ref}}(t) - \psi_0). \quad (13)$$

式(12)(13)就是航迹控制中期望航向的预测模型.

3.2 航迹偏差的预测模型(Predict model for track error)

式(12)中期望航向的计算涉及航迹偏差, 航迹偏差 $\Delta\phi(t)$ 由船舶的位置决定. 影响船舶位置的因素主要有两个: 船舶以速度 u 沿首向角 $\psi(t)$ 航行, 流以速度 V_c 沿流向 ψ_c 作用于船舶, 改变船舶的位置. 如图1, 当船以速度 u 沿航向 ψ 运行时, 经过一个控制周期 t_s 后, 航迹偏差的增量为

$$\Delta\phi_1(t+1) = ut_s \sin(\psi_0 - \psi), \quad (14)$$

其中航向 ψ 可以由 $\psi(t)$ 或 $\psi(t+1)$ 近似, 这里选择 $\psi(t+1)$ 与 $\Delta\phi(t+1)$ 对应. 类似地, 由流引起的航迹偏差增量可由下式表示, 它近似为一个常数:

$$\Delta\phi_2(t+1) = V_c t_s \sin(\psi_0 - \psi_c). \quad (15)$$

综合式(14)(15), 考虑未建模动态和近似处理后的舍入误差, 航迹偏差 $\phi(t)$ 的预测模型可表示为:

$$\begin{aligned} \phi(t+1) = & \phi(t) + k_u(\psi_0 - \psi(t+1)) + k_c + \\ & \sum_{i=0}^{r_2} h_{1,i} \xi_2(t+1-i), \end{aligned} \quad (16)$$

$$k_c = V_c t_s \sin(\psi_0 - \psi_c),$$

$$k_u = ut_s,$$

其中 $\xi_2(t)$ 假设为白噪声. 将式(16)带入式(12), 得期望航向的预测模型为

$$\begin{aligned} & \psi_{\text{ref}}(t+1) = \\ & \psi_{\text{ref}}(t) + \\ & \frac{k_c + k_u(\psi_0 - \psi(t+1)) + \sum_{i=0}^{r_2} h_{1,i} \xi_2(t+1-i)}{k_l}. \end{aligned} \quad (17)$$

3.3 航迹偏差和期望航向预测(Predictor for track error and desired heading)

由式(16)可递推 t 时刻后航迹偏差的 k 步最小方差预报器为

$$\begin{aligned} \phi(t+k|t) = & \phi(t) + k_u \sum_{i=0}^{k-1} (\psi_0 - \psi(t+i+1|t)) + \\ & k_c k + \sum_{i=1}^{r_2} h_{k,i} \xi_2(t+1-i), \end{aligned} \quad (18)$$

其中: $h_{k,i} = h_{1,i+k-1} + h_{k-1,i}$, $i = 1, 2, \dots, r_2$.

利用式(2), 式(18)可表示为

$$\phi(t+k|t) = \begin{cases} \phi_m(t+k), & k \leq d, \\ \phi_m(t+k) - \\ k_u \sum_{i=d+1}^k \sum_{j=d}^{i-1} b_{i-j,0} \Delta\delta(t-d+j), & k > d. \end{cases} \quad (19)$$

其中 $\phi_m(t+k)$ 是假设将来时刻命令舵角增量为0时, $t+k$ 时刻的航迹偏差的预测值, 它完全由已知的信息确定:

$$\begin{aligned} \phi_m(t+k) = & \phi(t) + k_u \sum_{i=0}^{k-1} (\psi_0 - \psi_m(t+i+1)) + \\ & k_c k + \sum_{i=1}^{r_2} h_{k,i} \xi_2(t+1-i). \end{aligned} \quad (20)$$

利用式(4), 式(19)(20)可改写为如下的向量形式:

$$\Phi = \Phi_m - k_u F G \Delta\delta, \quad (21)$$

$$\Phi = [\phi(t+d+1|t) \cdots \phi(t+d+p|t)]^T,$$

$$\Phi_m = [\phi_m(t+d+1) \cdots \phi_m(t+d+p)]^T,$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}.$$

对期望航向的表达式(17)进行上述类似的推导, 可得:

$$\Psi_{\text{ref}} = \Psi_{\text{ref}}^m - \frac{k_u}{k_l} F G \Delta\delta, \quad (22)$$

$$\begin{aligned}\Psi_{\text{ref}} &= [\psi_{\text{ref}}(t+d+1|t) \cdots \psi_{\text{ref}}(t+d+p|t)]^T, \\ \Psi_{\text{ref}}^m &= [\psi_{\text{ref}}^m(t+d+1) \cdots \psi_{\text{ref}}^m(t+d+p)]^T, \\ \psi_{\text{ref}}^m(t+k) &= \\ \psi_{\text{ref}}(t) &+ \frac{k_u}{k_l} \sum_{i=0}^{k-1} (\psi_0 - \psi_m(t+i+1)) + \\ \frac{k_c k}{k_l} &+ \sum_{i=1}^{r_2} \frac{h_{k,i}}{k_l} \xi_2(t+1-i).\end{aligned}$$

实际应用时, $\Delta\phi_m(t+k)$ 和 $\psi_{\text{ref}}^m(t+k)$ 可采用下式直接递推计算:

$$\Delta\phi_m(t+k) = k_u(\psi_0 - \psi_m(t+k)) + k_c + \sum_{i=1}^{r_2} h_{1,i} \xi_2(t+k-i|t), \quad (23)$$

$$\xi_2(t+i|t) = \begin{cases} 0, & i > 0, \\ \xi_2(t+i), & i \leq 0. \end{cases}$$

$$\psi_{\text{ref}}^m(t+k) = \psi_{\text{ref}}^m(t+k-1) + \frac{\Delta\phi_m(t+k)}{k_l}. \quad (24)$$

3.4 参考轨迹(Reference trajectory)

航向的参考轨迹(5)可重新表示为如下的矩阵形式:

$$\begin{aligned}\Psi_r &= \begin{bmatrix} \alpha \\ \alpha^2 \\ \vdots \\ \alpha^p \end{bmatrix} \psi_m(t+d) + \\ &\begin{bmatrix} 1-\alpha & & & \\ \alpha(1-\alpha) & 1-\alpha & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ \alpha^{p-1}(1-\alpha) & \cdots & \cdots & 1-\alpha \end{bmatrix} \Psi_{\text{ref}} = \\ &K_{\alpha 1} \psi_m(t+d) + K_{\alpha 2} \Psi_{\text{ref}}. \quad (25)\end{aligned}$$

航迹偏差的期望值为0, 以一阶系统的形式取航迹偏差参考轨迹向量 Φ_r 为:

$$\begin{aligned}\Phi_r &= [\phi_r(t+d+1) \cdots \phi_r(t+d+p)]^T, \quad (26) \\ \phi_r(t+d+1) &= \phi_m(t+d+1), \\ \phi_r(t+d+1+j) &= \alpha_2 \phi_r(t+d+j),\end{aligned}$$

其中 α_2 为柔化系数.

3.5 目标函数及控制增量(Cost function and controller increment)

航迹控制时希望航迹偏差和航向偏差尽量小, 且舵角变化不要过于频繁, 因此取目标函数为

$$J = \{\mu(\Phi_r - \Phi)^T(\Phi_r - \Phi) + (\Psi_r - \Psi)^T(\Psi_r - \Psi) + \lambda \Delta\delta^T \Delta\delta\}, \quad (27)$$

将式(4)(21)(22)(25)带入式(27), 极小化目标函

数, 取 $\Delta\delta$ 向量的第1个元素, 得 t 时刻的命令舵角增量为:

$$\begin{aligned}\Delta\delta(t) &= \\ [1 \ 0 \ \cdots \ 0] &[\mu k_u^2 G^T F^T F G + H^T H + \\ \lambda I]^{-1} &\cdot \{\mu k_u G^T F^T (\Phi_m - \Phi_r) + \\ H^T (K_{\alpha 1} \psi_m(t+d) &+ K_{\alpha 2} \Psi_{\text{ref}}^m - \Psi_m)\}, \quad (28)\end{aligned}$$

$$H = G + \frac{k_u}{k_l} K_{\alpha 2} F G. \quad (29)$$

在转向时主要考虑航向的跟踪能力, 此时选用航向控制, 即用式(7)计算命令舵角增量.

4 逆矩阵的递推求逆公式(Recursive algorithm for matrix inversion)

由式(29)可得:

$$S = (I + \frac{k_u}{k_l} K_{\alpha 2} F) = \begin{bmatrix} s_1 & & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ s_p & s_{p-1} & \cdots & s_1 \end{bmatrix}, \quad (30)$$

$$s_1 = 1 + (1 - \alpha)k_u/k_l,$$

$$s_i = (1 - \alpha)^i k_u/k_l, i = 2, \cdots, p,$$

$$H_p = S G = \begin{bmatrix} h_1 & & 0 \\ \vdots & \ddots & \\ h_p & h_{p-1} & \cdots & h_1 \end{bmatrix}, \quad (31)$$

$$h_i = \sum_{j=1}^i s_j b_{i+1-j,0}, i = 1, \cdots, p. \quad (32)$$

式(28)中待求逆矩阵的各个元素 G, F, H 都有如下特殊性: 它们是下三角矩阵, 且各对角线上的元素值相同. 利用矩阵求逆引理, 可推导简化求逆的递推公式.

记待求逆矩阵为:

$$P_n = \mu k_u^2 G_n^T F_n^T F_n G_n + H_n^T H_n + \lambda I_n, \quad (33)$$

$$K_n = [h_n \ h_{n-1} \ \cdots \ h_1], \quad (34)$$

$$Q_n = [k_u \sum_{i=1}^n b_{i,0} \ k_u \sum_{i=1}^{n-1} b_{i,0} \ \cdots \ k_u b_{1,0}]. \quad (35)$$

则矩阵(33)可分解为:

$$P_n = \begin{bmatrix} P_{n-1} & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} + K_n^T K_n + \mu Q_n^T Q_n, \quad (36)$$

记

$$M_n = \mu \begin{bmatrix} P_{n-1} & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix}^{-1} Q_n^T, \quad (37)$$

$$S_n = \begin{bmatrix} P_{n-1} & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix}^{-1} - \frac{M_n M_n^T}{\mu(1 + Q_n M_n)}, \quad (38)$$

$$L_n = S_n K_n^T, \quad (39)$$

对(33)应用矩阵求逆引理, 则有如下的递推求逆公式:

$$P_n^{-1} = S_n - L_n L_n^T / (1 + K_n L_n), \quad (40)$$

初始值为

$$P_1^{-1} = (b_{1,0}^2 + \mu k_u^2 b_{1,0}^2 + \lambda)^{-1}, \quad (41)$$

递推算法的计算流程如下:

$$P_1^{-1} \rightarrow M_2 \rightarrow S_2 \rightarrow L_2 \rightarrow P_2^{-1} \rightarrow \dots \rightarrow P_n^{-1}. \quad (42)$$

本算法避免了直接求逆矩阵, 设待求逆矩阵维数为 n , 采用通常的增广矩阵求逆法需要完成约 $2n^3$ 次乘除和 $2n^3$ 次加减运算(已考虑了矩阵的对称问题), 采用递推求逆算法只需要 $2n^3/3$ 次乘除和 $n^3/2$ 次加减运算, 其计算量仅为增广矩阵求逆法的 $1/3$.

5 仿真试验(Simulation)

采用一种适合常速、低速、大漂角等各种运动情况的船舶操纵数学模型^[8]来模拟实际船舶, 在模型中包括了浅水、岸壁、风浪流等因素的影响, 利用船舶运动控制仿真系统^[9]模拟“hongqi177”在满载情况下的操纵进行试验, 该船的具体参数如表1. 把舵机模型看作是具有时滞的一阶惯性系统, $\delta(s) = \frac{e^{-4s}}{4s + 1}$. 航向预测模型采用二阶CARIMA模型, 控制周期4 s, 纯滞后 $d = 1$. 控制器的参数选择为:

$$n = 2, m = 2, r_1 = 2, r_2 = 2, p = 19.$$

取航行环境参数为:

船速15 kn, 主机转速175 rad/min;

风速12.28 m/s(6级), 风向180°;

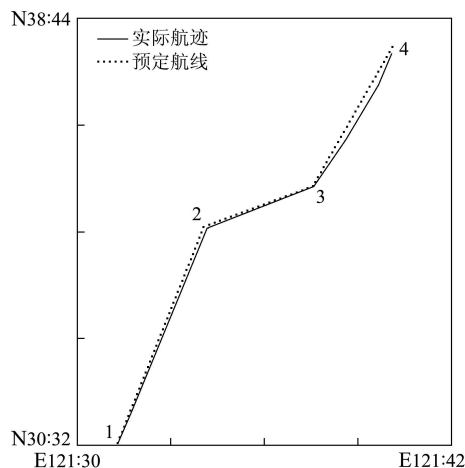
浪高4 m, 浪向180°;

流速2 kn, 流向135°.

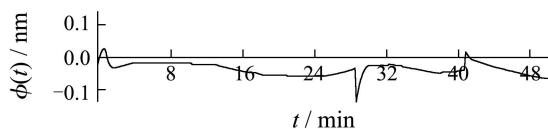
船舶从起点1(E121:31.34, N38:32.00, 即东经121度31分34, 北纬38度32分, 后面类似)出发, 经转向点2(E121:34.13, N38:38.12)、转向点3(E121:37.56, N38:39.23), 到达目的地4(E121:40.14, N38:43.22). 正常航行采用航迹控制; 当船舶距离转向点的距离小于0.2(n mile/h), 采用航向控制, 船舶转向下一条航线. 当船舶距离目的地小于0.2(n mile/h)停止仿真, 试验结果如图2所示.

表 1 “Hongqi177” 参数
Table 1 Parameters of ‘hongqi 177’

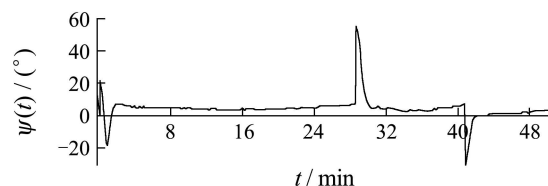
船长/m	船宽/m	型深/m	平均吃水/m	方形系数
99	16	9	6.5	0.703



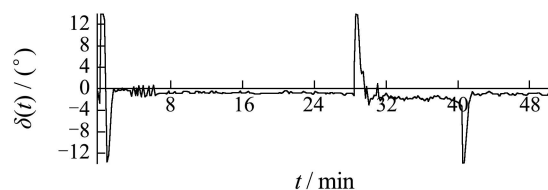
(a) 预定航线和实际航迹曲线



(b) 航迹偏差



(c) 航向偏差



(d) 命令舵角

图 2 仿真结果

Fig. 2 Simulation results

与文献[1]的仿真结果相比, 通过预测船舶的航迹偏差、航向偏差以及期望的航向, 控制器可以及时地调整命令舵角, 航迹控制时的航迹最大偏差从0.1 n mile降到了约0.05 n mile.

6 结论(Conclusion)

本文建立了船舶航迹控制时的航向、航迹偏差和期望航向的预测模型, 设计的航迹控制器能预测航迹偏差的变化, 进而预测船舶的期望航向, 以及时地调整控制舵角, 从而进一步降低了航迹偏差, 缩短航程, 降低能耗.

参考文献(References):

- [1] 胡耀华, 贾欣乐. 广义预测控制应用于船舶航向和航迹控制[J]. 中国造船, 1998, 140(1): 36 – 41.
(HU Yaohua, JIA Xinle. The application of Generalized Predictive Control to ship course and track keeping[J]. *Shipbuilding of China*, 1998, 140(1): 36 – 41.)
- [2] MCGOOKIN E W, MURRAY DJ, LIN Y, et al. Ship steering control system optimisation using genetic algorithms[J]. *IFAC Journal of Control Engineering Practise*, 2000, CEP(8): 429 – 443.
- [3] YANG Y S, REN J S. Adaptive fuzzy robust tracking controller design via small gain approach and its application[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2003, 11(6): 783 – 795.
- [4] 李铁山, 杨盐生, 洪碧光, 等. 船舶航迹控制鲁棒自适应模糊设计[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 445 – 448.
(LI Tieshan, YANG Yansheng, HONG Biguang, et al. Robust adaptive fuzzy design for ships track-keeping control[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 445 – 448.)
- [5] VELASCO F J, RUEDA T M, LOPEZ E, et al. Marine course-changing manoeuvre: a comparative study of control algorithms[C] // *Proceedings of 2002 International Conference on Control Applications*. Glasgow, U.K: IEEE, 2002, 2: 1064 – 1069.
- [6] FOSSEN T I. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [7] HEALEY A J, LIENARD D. Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned underwater vehicles[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1993, 18(2): 327 – 339.
- [8] YANG Y S. Study on ship manoeuvring mathematical model in shiphandling simulator[C] // *Proceedings of the 1996 International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability*. Copenhagen, Denmark: Balkema Publishers, 1996: 607 – 615.
- [9] 胡耀华. 船舶运动控制仿真平台[J]. 大连海事大学学报, 2000, 26(2): 25 – 28.
(HU Yaohua. A simulation system for ship motion control[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2000, 26(2): 25 – 28.)

作者简介:

胡耀华 (1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为预测控制及其在船舶运动控制中的应用、集成电路设计与测试, E-mail: huyao-hua@hotmail.com;

徐素武 (1970—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为自适应控制, E-mail: xswabc@163.com.