

文章编号: 1001-0920(2010)04-0551-05

航向保持鲁棒最小二乘支持向量机控制

刘 胜, 宋 佳, 李高云

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 考虑到船舶航向控制中, 存在的大量不确定因素及对控制系统的实时性要求, 提出一种基于鲁棒最小二乘支持向量机(RLSSVM)的船舶航向保持控制方案. 该控制策略充分利用最小二乘支持向量机良好的非线性映射能力、自学习适应能力和并行信息处理能力, 并与 H^2/H^∞ 鲁棒控制算法相结合, 优势互补, 形成闭环控制. 仿真结果表明, 该系统对海情的变化有良好的自适应能力, 鲁棒性强, 实现了航向保持精确控制.

关键词: 航向保持; 最小二乘支持向量机控制; 鲁棒控制

中图分类号: U664; TP18

文献标识码: A

Robust LSSVM control for ship course-keeping system

LIU Sheng, SONG Jia, LI Gao-yun

(Department of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China. Correspondent: SONG Jia, E-mail: jia.sch@163.com)

Abstract: According to the conditions of ship course control, the massive uncertain factors and the control system real-time request, a ship course-keeping control scheme of robust least squares support vector machine(RLSSVM) is proposed, which makes full use of the nonlinear mapping ability, self-learning adaptability and parallel information processing of the least squares support vector machine. Combining with H^2/H^∞ robust control method, advantages are complemented, and the closed-loop control is formed. The simulation result shows that, the control system has good adaptive ability with sea condition variance, and robustness is strong, which realizes ship course-keeping accurate control.

Key words: Course-keeping; Least squares support vector machine; Robust control

1 引言

船舶在海上航行, 不可避免要受到风、浪、流的干扰, 受力关系十分复杂. 由于航行工况和环境不断变化, 使得船舶操控成为一个非线性的时变过程, 研究起来非常困难. 船舶运动所具有的强耦合、大干扰、参数时变等特性, 导致采用常规的控制策略往往不能满足系统的要求. 早在20世纪50年代, 经典控制理论被应用于航向控制, 产生了自动舵. 随着计算机技术和现代控制理论不断发展, 各种新的方法(如变结构控制、神经网络控制、鲁棒控制等)都先后应用于船舶航向控制^[1].

本文针对船舶航向控制系统中存在的大量不确定因素, 及对控制系统的实时性要求, 提出了一种基于鲁棒最小二乘支持向量机(RLSSVM)的船舶航向保持控制器设计方案. 该策略采用增量最小二乘支持向量机算法解决辨识器及控制器的在线学习问题, 并

利用线性矩阵不等式(LMI)方法设计的 H^2/H^∞ 鲁棒控制算法相结合, 优势互补, 最后形成闭环控制. 并以某实船为研究对象, 在航向保持, 海情变化的适应能力等方面, 与单纯形法确定参数的传统PID控制器及离线支持向量机直接逆控制器, 进行控制效果的对比仿真研究.

2 船舶运动非线性模型

当只考虑横荡、横摇、航向(艏摇)3个自由度运动, 忽略纵倾与升沉运动对上述3个自由度运动的耦合影响, 根据船舶动力学特点可以建立其横荡、横摇、艏摇3自由度非线性运动数学模型^[2], 记

$$\begin{aligned}
m(\dot{v} + ur) &= \\
&-m_y \dot{v} - m_x ur + Y_v v + Y_r r + Y_{v|v}|v| + \\
&Y_{r|r}|r| + Y_{vvr} v^2 r + Y_{vrr} vr^2 + Y_R + Y_D, \\
J_{xx} \dot{p} &= \\
&-J_{xx} \ddot{\varphi} - N(\dot{\varphi}) - Dh(\varphi) - z_H(Y_v v + Y_r r +
\end{aligned}$$

收稿日期: 2009-04-07; 修回日期: 2009-09-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(607040004, F030101).

作者简介: 刘胜(1957-), 男, 吉林镇赉人, 教授, 博士生导师, 从事随机系统最优估计与控制、舰船航行与姿态控制等研究; 宋佳(1983-), 女, 哈尔滨人, 博士生, 从事智能控制、船舶姿态控制的研究.

$$\begin{aligned}
& Y_{v|v}|v|v| + Y_{r|r}|r|r| + Y_{vvr}v^2r + \\
& Y_{vrr}vr^2) + K_R + K_D, \\
& J_z G \dot{r} = \\
& -J_{zz} \dot{r} + N_v v + N_r r + N_\varphi \varphi + N_{v|v}|v|v| + \\
& N_{r|r}|r|r| + N_{v|\varphi}|v|\varphi| + N_{r|\varphi}|r|\varphi| + N_{vvr}v^2r + \\
& N_{vrr}vr^2 + N_R + N_D. \quad (1)
\end{aligned}$$

其中各项符号及意义见文献[2]. 水动力系数估算方法见文献[3], 海浪干扰力(力矩)的计算见文献[4].

航向保持系统一般工作于小舵角状态下, 忽略横摇的影响和方程中的非线性项. 假设初始状态为匀速直线运动, 得到船舶操纵线性运动数学模型为

$$T_1 T_2 \psi + (T_1 + T_2) \dot{\psi} + \psi = K(\delta + T_3 \dot{\delta}). \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned}
T_1 T_2 &= \frac{(m + m_y)(I_{zz} + J_{zz})}{C}, \\
T_1 + T_2 &= \frac{-(m + m_y)N_r - (I_{zz} + J_{zz})Y_v}{C}, \\
T_3 &= \frac{(m + m_y)N_\delta}{N_v Y_\delta - Y_v N_\delta}, K = \frac{N_v Y_\delta - Y_v N_\delta}{C}.
\end{aligned}$$

3 船舶航向保持RLSSVM控制

3.1 控制系统设计

船舶航向RLSSVM控制系统结构如图1所示. 支持向量机所具有的良好非线性映射能力、自学习适应能力和并行信息处理能力等, 为解决复杂非线性系统的建模和控制等问题提供了很好的思路. 然而, 支持向量机控制在实际中的应用大大受阻. 原因之一是在实际的工业控制中, 大量的干扰等不确定因素广泛存在, 使系统的控制效果等受到影响, 甚至失去稳定性. 考虑到控制系统的实时性要求, 对支持向量机不能无止境地在线训练直至其收敛. 因此, 引入鲁棒反馈控制器, 抑制船舶航行过程中的不确定因素造成的影响, 以确保系统的稳定性.

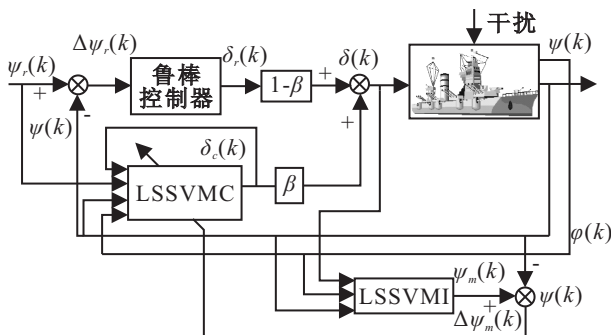


图1 船舶航向RLSSVM控制

图1中船舶为被控对象, $\psi_r(k)$ 为给定航向, 控制量为舵角 $\delta(k)$, 输出为航向角 $\psi(k)$. 船舶航向保持控制器由一个最小二乘支持向量机控制器(LSSVMC)和一个鲁棒控制器(RC)组成. 两个控制器的输出信号通过

加权综合后, 作为船舶操纵模型的控制输入^[5]

$$\delta(k) = \beta \delta_c(k) + (1 - \beta) \delta_r(k). \quad (3)$$

其中: $\delta_c(k)$ 为LSSVMC的输出; $\delta_r(k)$ 为鲁棒控制器输出; β 反应的是最小二乘支持向量机辨识器(LSSVM)的辨识精度, 称之为鲁棒因子. 鲁棒因子的取值随LSSVM精度的变化而自适应改变, 形式为

$$\beta = e^{-\tau E_m}. \quad (4)$$

其中: τ 为鲁棒因子的变鲁棒系数, 取值范围为 $\tau \in (0, 1)$; E_m 为LSSVM输出与系统实际输出差的平方, 即

$$E_m = \frac{1}{2}(y_m - y)^2. \quad (5)$$

由式(4)可知, 鲁棒因子的取值范围是 $\beta \in [0, 1]$. 如图2所示, $\beta = 1$ 表示LSSVM辨识精度很高, 可准确地反映船舶操纵模型的特性; $\beta = 0$ 表示LSSVM的精度很差, 此时不便作为船舶航向LSSVMC设计的依据.

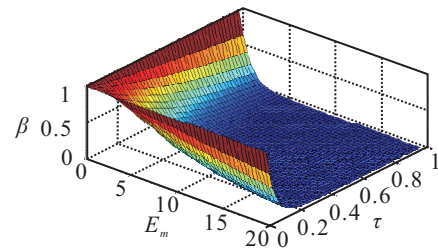


图2 鲁棒因子

当LSSVM有偏差, 或学习尚未完全收敛时(在航向控制初期, 这一情况较为严重), 鲁棒控制器根据系统的航向角输出跟踪误差, 产生一反馈信号, 保证控制过程的连续性和闭环系统的稳定性, 同时为LSSVMC的训练提供实时数据; 当LSSVM已经收敛而船舶航向控制系统受外干扰影响较大时, 鲁棒控制器还可以通过鲁棒因子, 引入补偿控制, 减小外干扰对航向保持的影响. 因此, 整个控制系统不仅具有很好的跟踪性能, 而且具有很好的鲁棒特性.

3.2 最小二乘支持向量机辨识器

利用最小二乘支持向量机辨识器LSSVM逼近船舶航向运动正向模型, 将航向角 $\psi(k)$ 和舵角 $\delta(k)$ 作为输入量, 同时考虑到船舶横摇运动对其航向运动的耦合影响, 将横摇角 $\varphi(k)$ 引进为输入量, 其输入量为^[6]

$$\begin{aligned}
\mathbf{X} = & [\psi(k), \psi(k-1), \dots, \psi(k-n+1), \delta(k-1), \dots, \\
& \delta(k-m+1), \varphi(k), \varphi(k-1), \dots, \varphi(k-p+1)].
\end{aligned}$$

其中: n, m, p 分别为航向角、舵角及横摇角的阶数. LSSVM模型的输出为系统的输出量, 即航向角信号 $\psi(k)$. 给定训练样本为 $\{(\mathbf{X}_1, \psi_1), (\mathbf{X}_2, \psi_2), \dots, (\mathbf{X}_l, \psi_l)\} \subset \mathbf{R}^N \times \mathbf{R}$, $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_l$ 为 k 时刻到 $k+l-1$ 时刻的输入向量, 记

$$\begin{aligned}
\mathbf{X}_1 = & [\psi(k), \psi(k-1), \dots, \psi(k-n+1), \delta(k-1), \dots, \\
& \delta(k-m+1), \varphi(k), \varphi(k-1), \dots, \varphi(k-p+1)],
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_2 &= [\psi(k+1), \psi(k), \dots, \psi(k-n+2), \delta(k), \dots, \\ &\quad \delta(k-m+2), \varphi(k+1), \varphi(k), \dots, \varphi(k-p+2)], \\ &\quad \vdots \\ \mathbf{X}_l &= [\psi(k+l-1), \psi(k+l-2), \dots, \psi(k-n+l), \\ &\quad \delta(k+l-2), \dots, \delta(k-m+l), \varphi(k+l-1), \\ &\quad \varphi(k+l-2), \dots, \varphi(k-p+l)]. \end{aligned}$$

其中: ψ_1, \dots, ψ_l 为 $k-1$ 时刻到 $k+l-1$ 时刻的输出量, 即 $\psi_1 = \psi(k-1), \dots, \psi_l = \psi(k+l-1)$.

核函数取径向基(RBF)函数为

$$K(x, x_k) = \exp(-\|x - x_k\|^2 / \sigma^2).$$

最小二乘支持向量机模型辨识基于结构风险最小化, 能够较好地协调经验风险最小化和学习机器VC维之间的关系. 并且在SVM的基础上, 选择误差的二范数为损失函数^[7], 目标优化函数为

$$\begin{aligned} \min \quad & \frac{1}{2} w^T w + \frac{1}{2} \gamma \sum_{k=1}^n \zeta_k^2, \\ \text{s.t.} \quad & y_k = w^T \Phi(x_k) + b + \zeta_k, \quad k = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (6)$$

其中: γ 为调节参数, 它能够在训练误差和模型复杂度之间取折衷, 以便使所求函数具有较好的泛化能力, 并且 γ 越大, 模型的回归误差越小. LSSVM定义了与标准SVM不同的损失函数, 并将其不等式约束改为等式约束, 可在对偶空间上求 w , 引入如下Lagrange函数:

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} w^T w + \frac{1}{2} \gamma \sum_{k=1}^n \zeta_k^2 - \sum_{k=1}^n a_k [w^T \Phi(x_k) + \\ &\quad b + \zeta_k - y_k]. \end{aligned} \quad (7)$$

对上式进行优化, 即求 L 对 w, b, ζ, a 的偏导数等于0, 可得

$$\begin{cases} \partial L / \partial w = 0 \rightarrow w = \sum_{k=1}^n a_k \Phi(x_k); \\ \partial L / \partial b = 0 \rightarrow \sum_{k=1}^n a_k = 0; \\ \partial L / \partial \zeta_k = 0 \rightarrow a_k = \gamma \zeta_k, \quad k = 1, 2, \dots, n; \\ \partial L / \partial a_k = 0 \rightarrow w^T \Phi(x_k) + b + \zeta_k - y_k = 0, \\ \quad k = 1, 2, \dots, n. \end{cases}$$

所求解的优化问题转化为求解如下线性方程:

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{1}_n^T \\ \mathbf{1}_n & \Omega + (1/\gamma)I_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{y} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

其中: $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$, $\mathbf{1}_n = [1, 1, \dots, 1]^T$, $\mathbf{a} = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$. 因此, 利用LSSVM建立的船舶操纵模型为

$$\psi_m(k) = f(\mathbf{X}(k)) = \sum_{k=1}^n \alpha_k K(\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(k)) + b. \quad (9)$$

3.3 最小二乘支持向量机控制器

在船舶航向鲁棒最小二乘支持向量机控制器设计方面, 考虑到传统的直接逆建模方法存在当系统模型的逆不存在时, 可能会得到一个不可靠的逆模型问题. 而船舶操纵模型具有不确定性、时变性及非线性, 难以建立精确数学模型的特点. 本文采用正-逆建模法, 即在LSSVM的基础上建立LSSVMC, 如图1所示. LSSVM通过在线学习船舶操纵动力学模型, 不断逼近系统的非线性前馈映射特性; LSSVMC通过在线学习逼近船舶操纵系统的逆动力学模型, 并产生一前馈控制信号, 使船舶的航向输出按要求的精度跟踪任意给定指令航向.

本文针对船舶运动模型的特点, 采用文献[8]中回归最小二乘支持向量机的增量在线式学习算法, 完成LSSVM及LSSVMC的在线学习.

建立LSSVMC, 输入量为航向角 $\psi(k)$, 舵角 $\delta(k)$, 指令航向角 $\psi_r(k)$, LSSVM辨识误差反馈调节量 $\Delta\psi_m(k)$, 同时考虑船舶横摇运动对其航向运动的耦合影响, 将横摇角 $\varphi(k)$ 引进为输入量.

3.4 H^2/H^∞ 鲁棒控制器设计

为了既能优化系统的性能指标, 又能保证系统的稳定性^[9], 本文采用基于LMI求解算法进行 H^2/H^∞ 状态反馈鲁棒控制器设计.

令 $x = [x_1 \ x_2]^T$, $x_1 = \psi$, $x_2 = \dot{\psi}$, 船舶航向鲁棒 H^2/H^∞ 控制系统数学模型为

$$\begin{cases} \dot{x} = (A + \Delta A)x + (B_1 + \Delta B_1)u + B_2 w, \\ z_\infty = C_1 x + D_{12} u, \\ z_2 = C_2 x + D_{22} u, \\ y = Cx + Du. \end{cases} \quad (10)$$

系统 H^∞ 性能主要与航向角有关, 要求提高航向控制精度, 增强系统对海浪干扰和模型参数摄动的鲁棒性; 对于系统 H^2 性能而言, 则需要综合考虑航向角、航向角速度以及对控制量的约束. 据此定义船舶航向控制系统的性能评价信号为

$$z_\infty = \psi = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} x, \quad (11)$$

$$z_2 = \begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u. \quad (12)$$

考虑模型参数的摄动量为30%, 得到增广受控对象 P 的系数矩阵为

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.05342 & -0.01254 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.354271 \end{bmatrix}, \\ E_2 = 0_{2 \times 1}, B_2 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 3.0124e-004 \end{bmatrix}, C_1 = [1 \ 0], \end{aligned}$$

$$D_{12} = 0, C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, D_{22} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = I_{2 \times 2},$$

$$D = 0_{2 \times 1}, E_1 = I_{2 \times 2},$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1.2935e-004 & 0.0005472 \end{bmatrix}.$$

通过Matlab中的LMI工具箱计算得到船舶航向 H^2/H^∞ 状态反馈鲁棒调节器为

$$u = Kx = [5.3284 \quad 26.5324]x.$$

其中： w 到 z_∞ 的闭环系统 H^∞ 性能指标 $\gamma_\infty = 0.0328$ ， w 到 z_2 的闭环系统 H^2 性能指标 $\gamma_2 = 0.5175$ 。

4 计算结果与比较

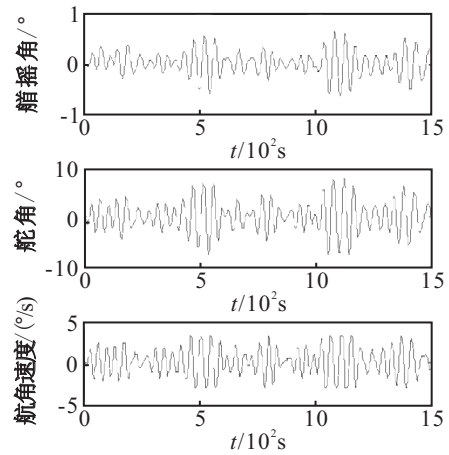
为了验证航向保持RLSSVM控制器的有效性，以船舶运动数学模型(1)作为研究对象，分别对船舶航向传统PID控制、船舶航向SVM离线直接逆系统控制和船舶航向RLSSVM控制系统进行仿真。某实船主要参数为：排水量为 13.79×10^4 t，水线长为252 m，船宽为46 m，吃水为14.8 m，舵面积 39 m^2 ，展弦比1.6，平衡系数0.2，设计航速为18 Kn。仿真海情分别为：有义波高3.8 m和5 m，遭遇角分别为 30° 、 60° 、 90° 、 120° 和 150° 。

船舶航向传统PID控制系统设计，鉴于现行工程实际，以船舶操纵线性模型(2)作为研究对象，采用单纯形法设计控制器^[10]，以 k_p 、 k_i 、 k_d 作为优化参数，调用Matlab最优化工具箱函数fminsearch。在这里采用误差绝对值与时间乘积积分(ITAE)准则作为目标函数，即 $J = \text{ITAE} = \int t|e(t)| dt$ 。PID控制器参数设定为 $k_p = 8.21$ ， $k_i = 0.213$ ， $k_d = 1.59$ 。

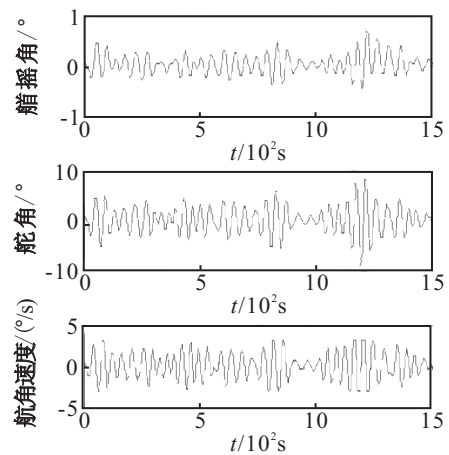
船舶航向SVM离线直接逆系统控制。将辨识好的SVM逆模型与船舶操纵模型串联起来，构成逆控制。SVM离线逆控制由于其不具有在线学习的能力，采用的是针对不同海情下不同模型的学习结果^[7]。图3分别给出了在有义波高3.8 m，浪向角 90° 的仿真结果曲线。

表1和表2分别给出了有义波高为3.8 m，5 m，不同遭遇浪向角下仿真结果的统计值。其中： $E(\Delta\psi)$ 为航向角偏差的均值， $\text{STD}(\Delta\psi)$ 为航向角偏差的均方差值， $E(\delta)$ 为舵角的均值， $\text{STD}(\delta)$ 为舵角的均方差值， $E(\dot{\delta})$ 为舵角速度的均值， $\text{STD}(\dot{\delta})$ 为舵角速度的均方差值。

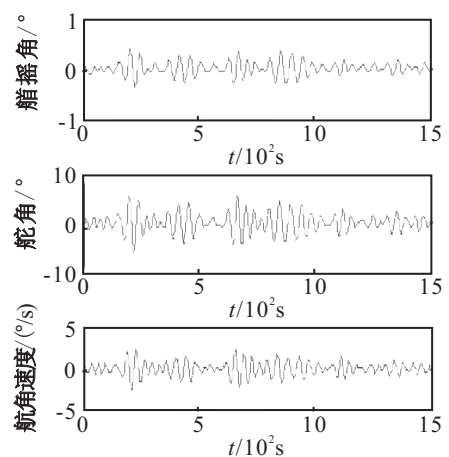
对于船舶航向控制系统而言，与单纯形法确定参数的传统PID控制相比，采用最小二乘支持向量机控制器有效提高了航向控制精度，从而增强了系统鲁棒性。由表1和表2可知，在有义波高为3.8 m， 90° 浪向角的情况下，传统PID控制航向角偏差的均方差值为



(a) 船舶航向PID控制



(b) 船舶航向SVM离线直接逆控制



(c) 船舶航向RLSSVM控制

图3 有义波高3.8 m浪向角 90° 的航向控制

0.17° ，SVM离线直接逆控制航向角偏差的均方差值为 0.15° ，船舶航向RLSSVM控制航向角偏差的均方差值仅为 0.13° ；在有义波高为5 m， 90° 浪向角的情况下，传统PID控制航向角偏差的均方差值为 0.35° ，SVM离线直接逆控制航向角偏差的均方差值为 0.30° ，船舶航向RLSSVM控制航向角偏差的均方差值为 0.26° 。由此可见，采用船舶航向RLSSVM控制，使得船舶航向保持的精度及鲁棒性得到提高。

表1 海浪有义波高3.8m的仿真结果统计值

算法	浪向角/ $^{\circ}$	统计值					
		$E(\Delta\psi)$	$STD(\Delta\psi)$	$E(\delta)$	$STD(\delta)$	$E(\dot{\delta})$	$STD(\dot{\delta})$
PID	30	-0.643 1	0.335 7	-0.815 6	2.254 7	0.716 2	1.433 2
	60	0.226 5	0.305 2	0.526 7	2.853 2	-0.824 2	1.815 2
	90	-0.126 4	0.172 4	-0.197 0	3.752 6	-0.151 3	2.222 4
	120	0.410 2	0.154 3	-0.177 6	3.056 4	1.040 6	2.457 6
	150	-0.056 8	0.086 2	0.059 2	2.514 4	0.512 5	2.713 2
SVM	30	0.450 2	0.302 4	-0.520 9	2.176 1	0.681 9	1.234 2
	60	0.702 4	0.221 3	0.513 9	2.455 2	-0.241 8	1.657 6
	90	-0.291 8	0.154 9	0.242 0	3.378 7	0.051 6	1.912 4
	120	-0.213 4	0.115 7	-0.067 8	2.856 4	-0.247 6	2.111 2
	150	-0.207 5	0.054 2	-0.064 9	2.308 9	0.754 1	2.244 7
RLSSVM	30	0.457 2	0.281 2	-0.210 9	1.997 6	-0.241 1	1.165 2
	60	-0.142 4	0.207 1	0.624 1	2.255 2	0.812 4	1.485 2
	90	-0.922 8	0.132 5	0.012 2	2.877 7	0.519 6	1.752 3
	120	0.353 4	0.098 6	0.167 8	2.578 5	0.622 8	2.055 5
	150	0.147 5	0.038 4	-0.641 9	2.008 9	-0.516 7	2.155 1

表2 海浪有义波高5m的仿真结果统计值

算法	浪向角/ $^{\circ}$	统计值					
		$E(\Delta\psi)$	$STD(\Delta\psi)$	$E(\delta)$	$STD(\delta)$	$E(\dot{\delta})$	$STD(\dot{\delta})$
PID	30	0.060 2	0.654 2	-0.015 8	3.031 6	0.019 3	1.545 7
	60	0.024 0	0.533 4	-0.206 5	3.957 2	0.029 7	1.818 6
	90	-0.011 8	0.354 2	-0.004 4	5.256 7	-0.116 6	2.224 2
	120	0.323 4	0.296 8	0.941 0	4.456 5	0.058 9	2.415 1
	150	0.007 5	0.172 4	-0.009 0	4.062 8	-0.059 0	2.633 4
SVM	30	0.029 3	0.596 5	0.885 6	3.524 0	-1.539 2	1.524 2
	60	0.363 9	0.424 5	0.126 7	4.053 2	1.126 7	1.732 6
	90	-0.022 9	0.302 4	-0.097 0	4.663 1	-0.184 6	2.024 2
	120	0.678 1	0.254 2	0.077 6	3.556 4	0.227 6	2.210 2
	150	-0.054 5	0.148 5	0.059 2	3.099 1	-0.285 4	2.421 5
RLSSVM	30	-0.268 9	0.575 3	-0.130 3	2.324 0	0.915 6	1.424 1
	60	-0.426 8	0.404 6	-0.090 1	2.955 7	-0.158 2	1.651 6
	90	0.859 6	0.258 6	-0.016 6	3.763 1	0.455 3	1.921 4
	120	0.692 6	0.235 1	0.052 3	3.074 5	0.842 6	2.101 2
	150	0.316 7	0.127 7	-0.040 6	2.789 9	0.218 5	2.312 5

从仿真结果的统计值可以看出,传统PID控制器设计方法,将被控系统的参数考虑为定常数,并且不考虑外界扰动的影响,它们只能在一定的范围内有效,由于海况的复杂性、不确定性,当系统模型发生变化时,其控制性能变差;SVM离线逆控制的控制效果优于传统PID控制器,但此控制器是针对不同工况的具体模型设计的,并不具有自适应能力,其精度受模型的影响较大.本文提出的鲁棒最小二乘支持向量机控制策略,能克服因大量的干扰等不确定因素的广泛存在给系统的控制效果带来的影响,具有良好的控制性能.

5 结 论

本文提出的船舶航向RLSSVM控制器,综合了 H^2/H^∞ 和LSSVM控制的优点,通过鲁棒因子及变鲁棒系数实现控制策略间的自适应协调转换.利用增量LSSVM算法,解决模型在线辨识和控制器在

线设计问题,克服了通常存在的实时性差的缺点.利用 H^2/H^∞ 鲁棒反馈控制器,保证控制初期和模型精度较差时闭环系统的稳定性.仿真结果表明,船舶航向RLSSVM控制系统具有较强的鲁棒性,对于系统的不确定性具有良好的适应能力.

参考文献(References)

- [1] Roberts G N, Sutton R, Zirilli A, et al. Intelligent ship autopilots — A historical perspective[J]. *Mechantronics*, 2003, 13(10): 1091-1103.
- [2] Liu Sheng, Fang Liang. GA-PID adaptive control research for ship course-keeping system[J]. *J of System Simulation*, 2007, 19(16): 3783-3786.
- [3] Inoue S. Hydrodynamic derivatives of ship maneuvering motion at heeled condition [R]. Japan: Technical Committee of the West Japan Society of Naval Architect, 1979.