

船舶航向保持变论域模糊-最小二乘支持向量机复合控制

刘 胜, 王宇超, 傅荟璇

(哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对船舶航向运动具有强非线性, 并受各种不确定随机干扰的作用, 提出了基于最小二乘支持向量机与变论域模糊逻辑的船舶航向保持复合控制方案, 该控制方案利用最小二乘支持向量机良好的非线性映射能力建立船舶操纵系统的逆动力学模型, 引入协调控制因子, 与变论域模糊控制复合形成控制闭环, 提高控制系统的控制精度和鲁棒性. 仿真结果表明, 本文所设计的航向保持控制系统效果良好, 对海情的变化具有较好的自适应能力.

关键词: 船舶航向保持; 模糊控制; 变论域; 最小二乘支持向量机

中图分类号: U661.22 文献标识码: A

Variable universe fuzzy- least squares support-vector-machine compound control for ship course-keeping

LIU Sheng, WANG Yu-chao, FU Hui-xuan

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: A compound control strategy based on least squares support-vector-machine(LSSVM) inverse control and variable universe fuzzy control(VUFC) is proposed for a nonlinear process of ship motion subjected to random disturbances. This method utilizes the nonlinear mapping merit of the support vector machine inverse dynamic model and combines the fuzzy control to form a closed-loop control; it improves the control precision and guarantees the robustness by the coordination factor. The simulation results validate that the compound control algorithm has a high performance in ship course-keeping, and good adaptive ability in various ocean conditions.

Key words: ship course-keeping; fuzzy control; variable universe; least squares support-vector-machine

1 引言(Introduction)

船舶航向控制是一个复杂而又十分重要的船舶运动控制问题, 它对船舶的安全性、经济性都有很大的影响, 这使其在船舶运动控制领域越来越受到重视. 由于船舶运动的复杂性, 且受到环境的影响是随机和难以预测的, 以某一确定性数学模型为基础的控制算法并没有完全解决船舶航向控制问题, 设计非线性控制器不失为一种较好的思路. 近年来, 随着计算机技术和现代化控制理论不断发展, 研究者开始着眼于类似于人工操舵的智能控制方法, 并将遗传算法^[1]、神经网络^[2]、模糊控制^[3]和鲁棒控制^[4]等应用到船舶航向控制当中. 文献[5]中首次提出了变论域的思想, 同时指出在规则形式不变的情况下, 论域因误差变小而收缩, 而论域的收缩等同增加了规则, 提高系统的控制精度, 变论域模糊控制器相当于一种在线根据误差调整论域的自适应模糊控制器, 并在四阶倒立摆中成功应用. 支持向量机具有良好非线性映射能力、并行信息处理能力和自适应学习能力等优点, 为解决复杂非线性系统的建模

和控制问题提供了很好的思路. 最小二乘支持向量机(least squares support-vector-machine, LSSVM)^[6]是支持向量机的一种改进, 它是将传统支持向量机中的不等式约束改为等式约束, 将解线性方程组问题代替求解二次规划问题, 提高了求解问题的收敛精度和速度.

本文提出一种基于变论域模糊控制(variable universe fuzzy control, VUFC)和LSSVM补偿的船舶航向复合控制策略. 根据变论域模糊控制的动态逐点收敛插值特性, 设计两输入单输出闭环控制器, 降低了对专家经验的依赖性和实现难度, 且具有超调量小、较大稳定域等特点, 但两输入模糊控制器实质为PD调节器, 稳态精度较差; 同时, 针对船舶存在时变性、不确定性, 利用最小二乘支持向量机算法良好的非线性映射逼近能力, 动态辨识船舶航向运动逆模型, 构建船舶航向保持VUFC-LSSVM复合控制器, 并引入协调控制因子, 动态调整变论域模糊控制与最小二乘支持向量机补偿在控制中所占的权值, 使系统处于最佳控制状态.

2 船舶运动数学模型(Mathematical model of ship steering)

2.1 舵机数学模型(Mathematical model of rudder)

从设计控制系统角度可把舵机看作是在一个积分环节作用下并加以负反馈所构成的闭环,通常用下列模型表示舵机特性:

$$\dot{\delta} = -\frac{1}{T_E}\delta + \frac{1}{T_E}\delta_r, \quad (1)$$

其中: δ 为实际舵角; δ_r 为指令舵角; T_E 为舵机时间常数; 舵机模型的增益通常为1, 实际舵角以时间常数 T_E 跟踪舵令变化.

2.2 响应型船舶运动非线性数学模型(Nonlinear model of responding ship motion)

略去横漂速度, 响应模型法抓住了船舶动态 $\delta \rightarrow \dot{\psi} \rightarrow \psi$ 的主要脉络, 提供了一种物理意义明确且简单的数学模型结构, 其微分方程同时保留非线性影响因素, 可满足仿真中对模型精度的要求, 其非线性模型的标准形式为^[7]

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} + \alpha\psi^3 = K\delta, \quad (2)$$

式中: ψ 为转艏角速度, δ 为舵角, T 为稳定性参数; K 为回转性参数, α 是非线性项系数.

若考虑建模误差及外界干扰, 模型修正为

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} + \alpha\psi^3 + \Delta(\psi, \dot{\psi}) + w = K\delta, \quad (3)$$

式中: $\Delta(\psi, \dot{\psi})$ 为建模误差, 来源于模型参数误差、忽略的一些船舶高阶动态特性和模型的降阶处理; w 为不确定外界干扰, 包括风、浪等不确定性因素.

对式(3), $\Delta(\psi, \dot{\psi})$ 和 w 都难以用数学表达式精确描述, 传统的PID自动舵设计方法难以较好满足控制要求.

3 复合控制器设计(Design of compound controller)

设计基于变论域自适应模糊控制复合最小二乘支持向量机逆控制的结构如图1所示. 变论域模糊控制器作为反馈闭环控制器, 抑制船舶航行过程中的不确定因素造成的影响, 确保系统的稳定性; LSSVM通过样本数据训练建立船舶操纵系统的逆动力学模型, 并产生前馈补偿控制信号, 使船舶的航向输出按要求的精度跟踪给定期望航向.

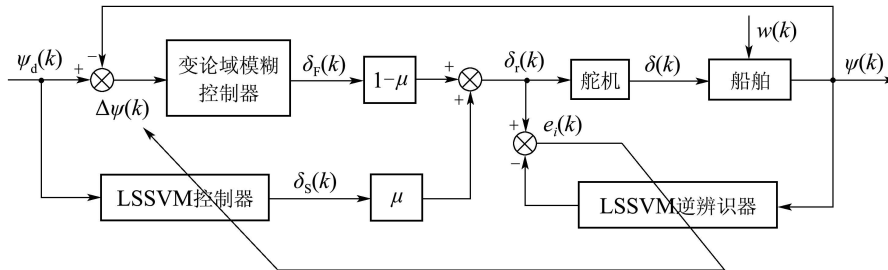


图1 VUFC-LSSVM复合控制结构

Fig. 1 VUFC-LSSVM compound control structure

图1中: $\psi_d(k)$ 为系统期望输入, $\psi(k)$ 为系统输出, $\delta_r(k)$ 为指令舵角, $\delta_F(k)$ 为模糊控制器输出舵角, $\delta_S(k)$ 为LSSVM控制器输出舵角, μ 为自动协调控制因子, $w(k)$ 为外界干扰.

通过自动协调控制因子 μ , 使系统处于最佳控制状态, VUFC与LSSVM控制器的输出可以用式(4)表示:

$$\delta_r(k) = \mu\delta_F(k) + (1 - \mu)\delta_S(k). \quad (4)$$

其中: μ 根据误差 $\Delta\psi(k)$ 的大小自动调节, 形式为: $\mu = e^{-\frac{v(\Delta\psi)^2}{2}}$, $\mu \in [0, 1]$. v 为调节因子, 可根据海情具体设定, 取值范围为 $v \in [0, 1]$.

3.1 变论域模糊控制器设计(Adaptive fuzzy controller based on variable universe design)

考虑船舶运动控制特点和可实现性, 设计双输入单输出变论域模糊控制系统的结构如图2所示.

图2中: e_ψ 为航向偏差, 函数 $\alpha(e)$ 与 $\beta(e, ec)$ 为输入论域伸缩因子, $\gamma(\delta)$ 为输出论域伸缩因子, δ_F 为模糊控制器输出舵角, $F(e, ec)$ 为控制函数, ψ_d , ψ 分别为期望航向角和系统输出航向角.

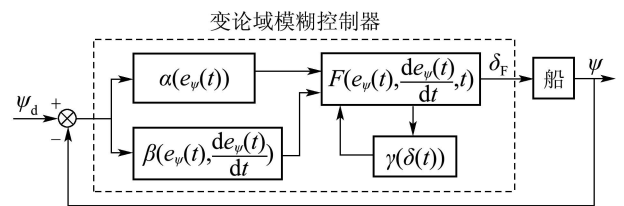


图2 变论域自适应模糊控制器结构

Fig. 2 Adaptive fuzzy controller with variable universe structure

设 $X = [-E, E]$, $Y = [-EC, EC]$ 分别为模糊控制器的偏差论域和偏差变化率输入论域, $V = [-U, U]$ 为输出论域. 所谓变论域是指论域 X, Y, V 可以分别随着变量 e_i, ec_j, δ 的变化而自适应调

整, 记为: $X = [-\alpha(x)E, \alpha(x)E]$ 等, $\alpha(x)$ 称为伸缩因子. 一般地, 伸缩因子满足单调性、对偶性、协调性、避零性、正规性^[8].

输入论域的伸缩因子 $\alpha(e)$ 与 $\beta(e, ec)$ 选用式(5)(6)形式^[9]:

$$\alpha(e) = \left(\frac{|x|}{E}\right)^\tau, \quad (5)$$

$$\beta(e, ec) = \left(\frac{1}{2}\left(\frac{|e|}{E} + \frac{|ec|}{EC}\right)\right)^\tau. \quad (6)$$

舵角输出论域伸缩因子为

$$\gamma(\delta) = \left(\frac{|\delta|}{U}\right)^\tau, \quad (7)$$

其中 τ 为可调参数 $0 < \tau < 1$.

注 1 由于偏差变化率依赖于误差, 即 ec 与 e 已经存在某种内在关系, 故 β 也可简单地取作 $\beta(ec)$.

令 $A = \{A_i\}_{1 \leq i \leq p}$, $B = \{B_j\}_{1 \leq j \leq p}$, $C = \{C_{ij}\}_{1 \leq i \leq p, 1 \leq j \leq q}$ 分别为 X, Y, V 上的模糊划分; e_i, ec_j, δ_{ij} 分别 A_i, B_j, C_{ij} 的峰值点, 达到条件:

$$\begin{aligned} -E &\leq e_1 < e_2 < \dots < e_p \leq E, \\ -EC &\leq ec_1 < ec_2 < \dots < ec_q \leq EC, \\ -U &\leq \delta_{11} < \delta_{12} < \dots < \delta_{pq} \leq U. \end{aligned}$$

令 $e_i(0) = e_i, ec_j(0) = ec_j, \delta_{ij}(0) = \delta_{ij}$. 视 A_i, B_j, C_{ij} 为模糊语言变量, 则模糊推理形成规则 R :

$$\text{If } e \text{ is } A_i \text{ and } ec \text{ is } B_j \text{ then } \delta \text{ is } C_{ij}. \quad (8)$$

参考文献^[9], 模糊控制器两输入单输出可以表示为插值函数如下:

$$\delta(t) \triangleq F(e(t), ec(t), t) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A_i(e(t), t) B_j(ec(t), t) \delta_{ij}(t). \quad (9)$$

注 2 $R(A, B)$ 关于 A 或 B 单调增(减)或 $R(A, B)$ 完全单调增(减); 或 $R(A, B)$ 混合单调的充分必要条件是 $F(e, ec)$ 具有与之对应的单调性, 且在论域伸缩的过程中, 不会产生规则之间的矛盾, 确保控制函数 $F(e, ec)$ 的有效性.

鉴于大多数情况下模糊控制通过微处理器(包括单片机)来实现, 故以下只考虑离散时间系统, 具体步骤如下:

Step 0 控制器的初值任意给定输入 $e(0) \in X$ 及 $ec(0) \in Y$ 微处理器的输出 $\delta(1)$:

$$\delta(1) = F(e(0), ec(0), 0) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A_i(e(0), 0) B_j(ec(0), 0) \delta_{ij}(0). \quad (10)$$

Step 1 $\delta(1)$ 施于对象后产生舵角的输出, 该输出同参考输入比较得到模糊控制器的输入 $e(1)$

及 $ec(1)$, 取 $e_i(1) = \alpha(e(1))e_i(0), ec_j(1) = \beta(e(1), ec(1))ec_j(0)$, 计算

$$\delta_{ij}(1) = F(e_i(1), ec_j(1), 0) = \sum_{s=1}^p \sum_{t=1}^q A_s(e_i(1), 0) B_t(ec_j(1), 0) \delta_{st}(0), \quad (11)$$

$$\delta(2) = F(e(1), ec(1), 1) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A_i(e(1), 1) B_j(ec(1), 1) \delta_{ij}(1). \quad (12)$$

Step k $\delta(k)$ 施于对象后产生舵角的输出, 该输出同参考输入比较得到模糊控制器的输入 $e(k)$ 及 $ec(k)$, 取 $e_i(k) = \alpha(e(k))e_i(0), ec_j(k) = \beta(e(k), ec(k))ec_j(0)$ 计算

$$\delta_{ij}(k) = F(e_i(k), ec_j(k), 0) = \sum_{s=1}^p \sum_{t=1}^q A_s(e_i(k), 0) B_t(ec_j(k), 0) \delta_{st}(0), \quad (13)$$

$$\delta(k+1) = F(e(k), ec(k), k) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A_i(e(k), k) B_j(ec(k), k) \delta_{ij}(k). \quad (14)$$

定理 1 上述双输入单输出自适应模糊控制算法具有下列计算公式:

$$\begin{aligned} \delta(k+1) &= \sum_{s=1}^p \sum_{t=1}^q \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A_i(e(k)/\alpha(e(k))) \cdot \\ &A_s(\alpha(e(k))e_i(0)) \cdot \\ &B_j(ec(k)/\beta(e(k), ec(k))) \cdot \\ &B_t(\beta(e(k), ec(k))ec_j(0)) \delta_{st}(0). \end{aligned} \quad (15)$$

此外, 当 $e(k) \rightarrow 0$ 且 $ec(k) \rightarrow 0$ 时, $\delta(k+1) \rightarrow 0$.

证 由式(13)(14)容易得到式(15), 往证 $\delta(k)$ 的收敛性. 记

$$\begin{aligned} E(0) &\triangleq E, E(k) \triangleq \alpha(e(k))E; \\ X(k) &\triangleq [-E(k), E(k)], k = 0, 1, 2, \dots; \\ EC(0) &\triangleq EC, EC(k) \triangleq \beta(e(k), ec(k))EC; \\ Y(k) &\triangleq [-EC(k), EC(k)], k = 0, 1, 2, \dots. \end{aligned}$$

由伸缩因子保零性, 知 $\alpha(0) = 0, \beta(0, 0) = 0, \gamma(0) = 0$. 令

$$M(k) \triangleq \sup \{|F(e, ec, 0)| \mid e \in X(k) \mid ec \in Y(k)\}, k = 0, 1, 2, \dots.$$

因 $F(e, ec, 0)$ 单调且在 $(0, E]$ 及 $(0, EC]$ 或 $[-EC, 0)$ 取值异号于在 $[-E, 0)$ 及 $[-EC, 0)$ 或 $(0, EC]$ 中取值. 故 $F(0, 0, 0) = 0$, 于是 $e(k) \rightarrow 0$ 且 $ec(k) \rightarrow 0$ 时, $M(k) \rightarrow 0$.

若 $e_i(k) \in X(k), ec_j(k) \in Y(k)$, 可知 $|F(e_i(k),$

$ec_j(k, 0) \leq M(k)$. 因此,

$$|\delta(k+1)| = \left| \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A_i(e(k), k) B_j(ec(k), k) \delta_{ij}(k) \right| \leq \max_{ij} \{|\delta_{ij}(k)|\} = \max_{ij} \{|F(e_i(k), ec_j(k), 0)|\} \leq M(k) \rightarrow 0, k \rightarrow \infty,$$

则 $\delta(k+1) \rightarrow 0 (k \rightarrow \infty)$. 证毕.

3.2 最小二乘支持向量机逆控制器设计 (LSSVM inverse controller design)

利用LSSVM逼近船舶航向运动逆向模型, 输出补偿信号. 由实际系统的输出经中间存储而获得航向角 $\psi(k)$ 、舵角 $\delta(k)$ 、转艏角速率 $r(k)$ 作为输入向量, 给定训练样本为

$$\begin{aligned} & \{(\mathbf{X}_k, \delta_k), \dots, (\mathbf{X}_{k+l}, \delta_{k+l})\} \in (\chi \times \rho)^{l+1}, \\ & \mathbf{X}_k, \dots, \mathbf{X}_{k+l} \text{ 为 } k \text{ 时刻到 } k+l \text{ 时刻的输入向量, 记} \\ & \mathbf{X}_k = [\psi(k) \ \psi(k-1) \ \dots \ \psi(k-n) \ r(k) \\ & \quad r(k-1) \ \dots \ r(k-n) \ \delta(k-1), \\ & \quad \delta(k-2) \ \dots \ \delta(k-m)]^T, \\ & \mathbf{X}_{k+1} = [\psi(k+1) \ \psi(k) \ \dots \ \psi(k-n+1), \\ & \quad r(k+1) \ r(k) \ \dots \ r(k-n+1), \delta(k), \\ & \quad \delta(k-1) \ \dots \ \delta(k-m+1)]^T, \\ & \quad \vdots \\ & \mathbf{X}_{k+l} = [\psi(k+l) \ \psi(k+l-1) \ \dots \\ & \quad \psi(k+l-n) \ r(k+l) \ r(k+l-1) \ \dots, \\ & \quad r(k+l-n) \ \delta(k+l-1) \ \delta(k+l-2) \\ & \quad \dots \ \delta(k+l-m)]^T, \end{aligned}$$

其中: $\mathbf{X}_{k+i} \in \chi = \mathbb{R}^{2(n+1)+m}, i = 1, \dots, l; \delta_{k+i} \in \rho = R; \mathbf{X}_k$ 表示为在第 k 时刻的输入向量; n, m 分别为航向角、转艏角速率和舵角的阶数.

LSSVM逆模型输出为舵角指令信号 $\delta_r(k)$, k 时刻到 $k+l$ 时刻的输出量, 即为 $\delta_k = \delta(k), \dots, \delta_{k+l} = \delta(k+l)$, LSSVM逆控制系统结构如图3所示.

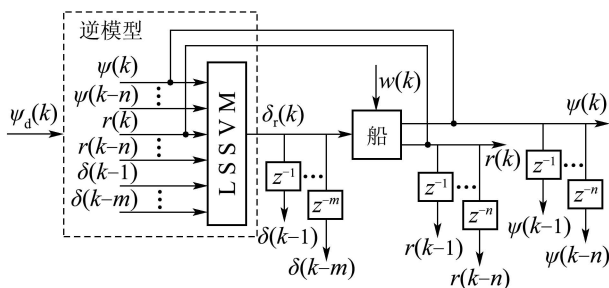


图3 船舶运动LSSVM逆模型

Fig. 3 Ship motion inverse model based on LSSVM

LSSVM采用如下形式的函数对未知函数进行估计:

$$\delta(x) = \omega^T \phi(x) + b, \quad (16)$$

其中: $\phi(x)$ 是将输入映射到高维特征空间非线性函数; ω, b 分别表示权系数和偏置系数.

最小二乘支持向量机表示为求解下述约束优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{\omega, e} J(\omega, e) &= \frac{1}{2}(\omega^T \omega) + \frac{1}{2} \varepsilon \sum_{i=1}^l e_i^2, \quad (17) \\ \text{s.t. } \delta_i &= \omega^T \varphi(x_i) + b + e_i, \end{aligned}$$

其中: e_i 是第 i 个数据的实际输出和估计输出间的误差; ε 是惩罚因子, 实现在允许的回归误差和算法复杂度之间的折中.

为了求解上述优化问题, 将约束优化问题变为无约束优化问题, 其对偶问题的Lagrange函数为

$$L(\omega, b, e, \alpha) = J(\omega, e) - \sum_{i=1}^l \alpha_i \{\omega^T \varphi(x_i) + b + e_i - \delta_i\}, \quad (18)$$

其中 $\alpha_i \in \mathbb{R}$ 是Lagrange算子.

根据最优性条件, 即求 L 对 ω, b, e, α 的偏导数等于0.

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \omega} = 0 \rightarrow \omega = \sum_{i=1}^l \alpha_i \varphi(x_i), \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^l \alpha_i = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial e_i} = 0 \rightarrow \alpha_i = \varepsilon e_i, \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = 0 \rightarrow \omega^T \varphi(x_i) + b + e_i - \delta_i = 0, \end{cases} \quad (19)$$

其中: $\delta = [\delta_1 \ \dots \ \delta_l]^T, Z = [\varphi(x_1) \ \varphi(x_2) \ \dots \ \varphi(x_l)]^T, e = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_l]^T, \mathbf{1} = [1 \ \dots \ 1]^T, \alpha = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_l]^T.$

再利用Mercer条件记: $\Omega_{i,j} = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) = K(x_i, x_j), i, j = 1, 2, \dots, l.$

核函数取径向基(RBF)函数:

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{\sigma^2}\right). \quad (20)$$

消除变量 ω 及 e , 可得以下矩阵方程, 经过变换可以写成

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{1}^T \\ \mathbf{1} & \Omega + \gamma^{-1} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \delta \end{bmatrix}. \quad (21)$$

解线性方程组得到 b, α 的解, 则利用LSSVM建立的船舶航向保持系统控制逆模型为

$$\delta(k) = f(\mathbf{X}(k)) = \sum_{i=1}^l \alpha_i K(\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(k)) + b. \quad (22)$$

4 仿真结果(Simulation results)

为了验证船舶航向保持VUFC-LSSVM复合控制器的有效性, 分别对单纯形法设计的PID控制器和本文所提出的复合控制方法进行了数字仿真研究. 实船主要参数为: 水线长105 m, 船宽11.5 m, 吃水3.2 m, 排水量2050 t, 舵面积14.8 m², 方形系数为0.442, 航速18节. 船舶非线性操纵模型参数为: $K = 0.1013$, $T = 16.897$, $\alpha = 127.62$, $\Delta(\psi, \dot{\psi}) = \sin \phi$, 随机干扰 w 采用国际ITTC单参数海浪谱模型^[10]; 舵机参数: $T_E = 2.5$ s, $|\delta| \leq 35^\circ$, $|\dot{\delta}| \leq 3$ (°)/s; 航向角、转舵角速率阶数 $n = 3$, 舵角阶数 $m = 3$; 变论域模糊控制器输入航向偏差论域 $X = [-2, 2]$, 伸缩因子 $\alpha(e) = 1 - 0.9 \exp(-e^2)$,

输入航向偏差变化率论域 $Y = [-3, 3]$, 伸缩因子

$$\beta(e, \dot{e}) = 1 - 0.9 \exp(-0.2e^2 - 0.8e\dot{e}^2),$$

舵角输出论域 $V = [-35, 35]$, 伸缩因子

$$\gamma(t) = 4 \sum_{i=0}^2 \int_0^t e_i(\tau) d\tau + 1;$$

LSSVM惩罚参数 $\varepsilon = 900$, 核参数 $\sigma = 0.9$, 训练样本数 $l = 500$, 阶数 $n = m = 3$.

图4和图5分别给出有义波高3.8 m, 遭遇角60°下单纯形法PID和VUFC-LSSVM复合控制航向仿真曲线. 图6和图7分别给出有义波高3.8 m, 遭遇角120°下单纯形法PID和VUFC-LSSVM复合控制航向仿真曲线.

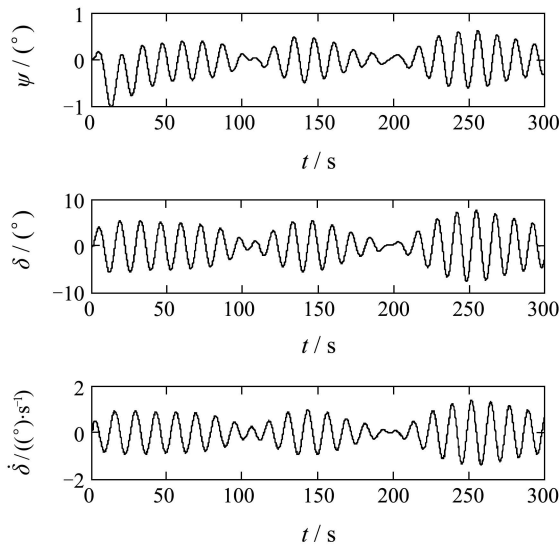


图4 遭遇角60°下单纯形法PID控制

Fig. 4 Simplex method PID control with encounter angle 60°

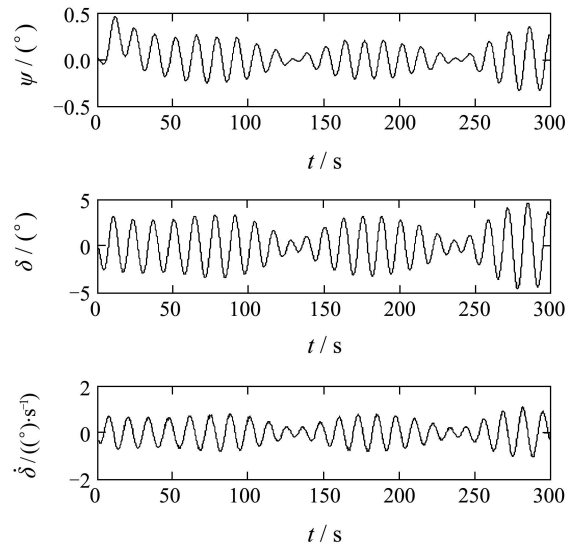


图5 遭遇角60°下VUFC-LSSVM复合控制

Fig. 5 VUFC-LSSVM compound control with encounter angle 60°

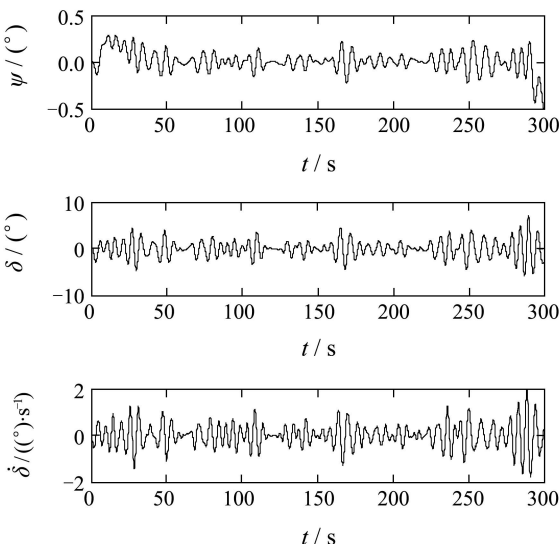


图6 遭遇角120°下单纯形法PID控制

Fig. 6 Simplex method PID control with encounter angle 120°

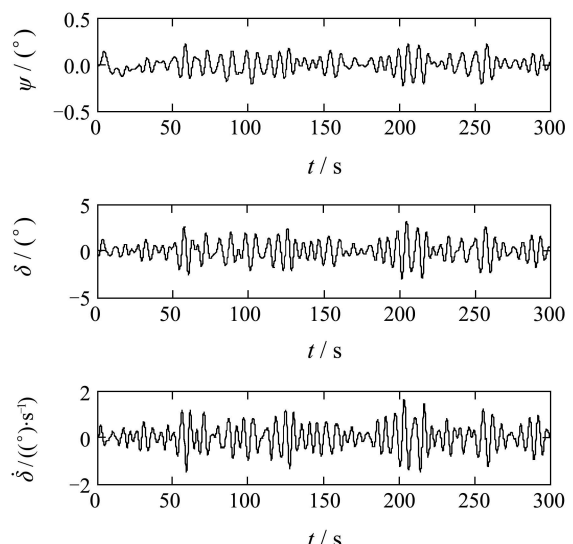


图7 遭遇角120°下VUFC-LSSVM复合控制

Fig. 7 VUFC-LSSVM compound control with encounter angle 120°

仿真采样时间0.1 s, PID控制器参数为: $k_p = 2.24079$, $k_i = 0.02128$, $k_d = 0.60533$. 由于海浪干扰存在随机性, 表1给出了有义波高3.8 m, 不同遭

遇浪向角下的仿真结果统计值, 其中: $E(\cdot)$ 为均值, $STD(\cdot)$ 为标准差, ψ 为航向角, δ 为舵角, r 为转舵角速度, 角的量纲均为度.

表1 船舶航向单纯形法PID控制与VUFC-LSSVM复合控制仿真结果统计值

Table 1 Simulation statistics of course-keeping simplex PID and VUFC-LSSVM compound control

控制方式	遭遇角	$E(\psi)$	$STD(\psi)$	$E(\delta)$	$STD(\delta)$	$E(\dot{\delta})$	$STD(\dot{\delta})$
单纯形法PID	30°	-0.0079	0.3202	-0.0363	1.476	-0.0077	0.9764
	60°	-0.0107	0.2628	0.0489	1.3821	0.0087	0.9521
	90°	0.0018	0.1627	0.0039	1.0762	-0.0029	0.6511
	120°	0.0092	0.1421	-0.0066	0.9311	0.0035	0.6503
	150°	0.0013	0.079	0.0036	0.8366	0.0075	0.5027
VUFC-LSSVM	30°	-0.0101	0.3026	0.0324	1.3894	-0.0189	0.9239
	60°	0.0096	0.2711	0.021	1.3719	0.0103	0.9477
	90°	0.0042	0.1437	0.0161	0.8693	0.0014	0.6016
	120°	-0.0038	0.1392	-0.0099	0.871	0.0046	0.5746
	150°	0.0017	0.0807	0.0068	0.7372	0.0025	0.539

由仿真结果和表1统计数据可知, 有义波高为3.8 m, 在不同遭遇浪向角下, VUFC-LSSVM复合控制系统的艏摇角标准差与舵角标准差小于单纯形法PID控制器, VUFC-LSSVM复合控制方法对船舶航向控制系统对模型不确定性、非线性以及外界随机干扰等产生的不良影响具有较强的适应能力和控制精度, 操舵的物理实现合理.

5 结论(Conclusions)

针对具有强非线性、模型复杂的船舶航向控制系统, 提出了一种将最小二乘支持向量机逆控制算法和变论域模糊闭环控制相结合的控制器的设计方案, VUFC-LSSVM复合控制充分利用变论域模糊控制不需要依靠精确的数学模型且具有较高的控制精度和最小二乘支持向量机简单高效的非线性系统建模能力, 通过协调控制因子实现控制策略间的自适应协调转换, 使系统处于最佳控制状态. 仿真结果表明, 船舶航向VUFC-LSSVM控制系统具有较强的鲁棒性和较高的控制精度, 应用前景较好.

参考文献(References):

- [1] 刘胜, 方亮, 葛亚明, 等. 船舶航向GA-PID自适应控制研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(16): 3783-3786.
(LIU Sheng, FANG Liang, GE Yamin, et al. GA-PID adaptive control research for ship course-keeping system[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(16): 3783-3786.)
- [2] 张显库, 吕晓菲, 郭晨, 等. 船舶航向保持的鲁棒神经网络控制[J]. 船舶力学, 2006, 10(5): 54-28.
(ZHANG Xianku, LU Xiaofei, GUO Chen, et al. Robust neural network control for ship's course-keeping[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2006, 10(5): 54-28.)
- [3] 李铁山, 杨益生, 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.)
- [4] 罗伟林, 邹早建, 李铁山. 船舶航向非线性系统鲁棒跟踪控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(8): 893-895.
(LUO Weilin, ZOU Zaojian, LI Tieshan. Robust tracking control of nonlinear ship steering[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(8): 893-895.)
- [5] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学(E辑), 1999, 29(1): 10-20.
(LI Hongxing. Variable universe adaptive fuzzy controller[J]. *Science in China(Series E)*, 1999, 29(1): 10-20.)
- [6] SUYKENS J A K. Nonlinear modelling and support vector machines[C]. //IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Budapest, Hungary: IEEE, 2001: 287-294.
- [7] 罗伟林, 邹早建, 李铁山. 基于神经网络和L₂增益的船舶航向自动舵设计[J]. 中国造船, 2009, 50(2): 40-45.
(LUO Weilin, ZOU Zaojian, LI Tieshan. Neural-network and L₂-gain based autopilot design of ship course-keeping[J]. *Shipbuilding of China*, 2009, 50(2): 40-45.)
- [8] 郑宏, 徐红兵, 朱贵平. 变论域自适应模糊控制在航机发电中的应用[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 253-256.
(ZHENG Hong, XU Hongbin, et al. Adaptive fuzzy control based on variable universe and its application to aero engine turbine power generator[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 253-256.)
- [9] 李洪兴, 苗志宏, 王加银. 非线性系统的变论域稳定自适应模糊控制[J]. 中国科学(E辑), 2002, 32(2): 211-223.
(LI Hongxing, Miao Zhihong, Wang Jiayin. Variable universe stable adaptive fuzzy control of nonlinear system[J]. *Science in China(Series E)*, 2002, 32(2): 211-223.)
- [10] 于萍, 刘胜. 基于H_∞设计法的非线性舵鳍联合控制系统仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(8): 1040-1044.
(YU Ping, LIU Sheng. Simulation on nonlinear rudder/fin joint control based on H_∞ control theory[J]. *Journal of System Simulation*, 2002, 14(8): 1040-1044.)

作者简介:

刘胜 (1957—), 男, 博士, 教授, 目前研究方向为人工智能理论及其应用、船舶航行与姿态控制等, E-mail: wf.3@163.com;

王宇超 (1979—), 男, 博士研究生, 目前研究方向为先进控制理论与应用、船舶运动控制, E-mail: wangyuchao@hrbeu.edu.cn;

傅荟璇 (1981—), 女, 讲师, 目前研究方向为先进控制理论与应用, E-mail: fuhuixuan@163.com.