

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.05.028

基于LSSVM-PID的船舶航向控制*

付 宾, 罗伟林*

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 针对船舶航向运动控制中船舶模型辨识困难的问题,将最小二乘支持向量机(LSSVM)应用到船舶航向运动模型的辨识建模中,提出了一种基于LSSVM和PID的船舶航向复合逆系统控制方案。利用最小二乘支持向量机良好的非线性映射能力和并行信息处理能力,建立了船舶航向运动系统的逆模型,并把该逆模型作为前馈控制器,形成了船舶航向直接逆控制;同时,为了提高船舶航向控制系统的精度和抗干扰能力,增加了PID控制回路。研究表明,LSSVM具有良好的辨识精度和非线性函数拟合能力,该复合控制系统具有比传统船舶航向PID控制系统更优的动态跟踪性能和更好的抗干扰能力。

关键词: 船舶航向控制; 最小二乘支持向量机; 逆模型控制; 比例积分微分控制

中图分类号: U661.33*4; TP273

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)05-0632-04

LSSVM-PID based ship course control

FU Bin, LUO Wei-lin

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to solve the problems of the ship model identification in ship course control, the least squares vector machine (LSSVM) was applied to identification for ship heading model, and an inverse control system for ship course based on combined LSSVM-PID was investigated. Making full use of nonlinear mapping and parallel processing of the least squares vector machine, an inverse model of the ship course system was established, and this model was used as a feed-forward controller to design direct inverse control. Moreover, to improving the accuracy and anti-jamming ability of the control system, a PID control loop was added. The results indicate that LSSVM enjoys a sound nonlinearity and identification accuracy, and the compound control system has better dynamic tracking performance and anti-interference ability than the PID control system.

Key words: ship course control; least squares support vector machine (LSSVM); inverse model control; proportion integral derivative (PID) control

0 引 言

在船舶的姿态控制中,航向控制是最基本的内容。船舶动态是一个具有大惯性、非线性和时滞性的系统,此外船舶在航行时,有可能受到不确定的风、浪、流等海洋环境力影响,使得船舶逐渐偏离预定的航向。这就要求航向控制系统能及时给出相应的操舵信号使舵叶偏转,产生所需要的转船力矩,及时矫正航向偏差。但是由于船舶运动的复杂性,且航向工况和环境的不断变化,在自动舵设计中,很难

建立一个精确的船舶航向运动模型。随着现代测量技术和自动控制理论的发展,各种先进的控制策略开始应用于船舶航向控制^[1-3],一些学者研究了运用神经网络建模的逆系统方法^[4],然而神经网络存在过学习、局部最小值和结构设计过于依赖专家经验等缺点,使得该方法应用于船舶航向控制时具有一定局限性。

支持向量机(SVM)^[5-6]是在统计学习理论基础上发展起来的一种新的学习方法,与神经网络相比,它在解决小样本、非线性和高维模式识别中,表现出了

收稿日期: 2012-12-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079031;50979060);福建省自然科学基金资助项目(2010J01004)

作者简介: 付 宾(1986-),男,河南安阳人,主要从事水下机器人系统建模和控制方面的研究.E-mail:315621304@qq.com

通信联系人: 罗伟林,男,博士,副教授,硕士生导师. E-mail:wlluo@fzu.edu.cn

许多特有优势,如全局最优解、良好泛化性能及维数灾难的避免等。通常,用于回归分析的SVM有标准型SVM和各种改进型SVM,如最小二乘支持向量机(LSSVM)。与标准型SVM相比,LSSVM不仅有结构风险最小化和泛化能力强等优点,而且通过把二次规划问题变成了线性方程组求解问题,使得计算和参数选择更为简单。近年来,LSSVM在系统辨识和控制中应用越来越多,并取得了一些进展^[7-8]。

本研究设计一种基于LSSVM-PID的船舶航向复合逆控制设计方案。笔者利用最小二乘支持向量机良好非线性映射能力和并行信息处理能力,建立船舶运动系统的逆模型,为了避免逆模型辨识误差,增加PID控制回路,以提高控制系统的实时性和鲁棒性。

1 船舶模型

以某船为例,船长3.16 m,吃水为0.159 m,船速为1.2 m/s,笔者采用的船舶非线性响应模型如下^[9]:

$$\ddot{\psi} + \alpha_1 \dot{\psi} + \alpha_3 \psi^3 = \gamma \delta \tag{1}$$

式中: ψ —航向角; δ —舵角。

模型参数 $\alpha_1 = 20$, $\alpha_3 = -0.074$, $\gamma = -617.4$ 。

2 回归型最小二乘支持向量机

给定输入样本 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_l, y_l)$, $x_i \in R^d$, $y_i \in R$, $i = 1, 2, \dots, l$, l 为样本个数。回归型SVM的基本思想为:用一个非线性映射 $\Phi(\cdot)$ 把样本数据映射到一个高维特征空间,使输入空间中的非线性函数估计问题转化为高维特征空间里的线性函数估计问题,回归函数形式如下:

$$f(x) = \omega^T \cdot \Phi(x) + b \tag{2}$$

式中: ω —权向量, $\omega \in R^n$; b —偏移量, $b \in R$ 。

根据结构风险最小化原则,回归问题可以转化为约束优化问题:

$$\min\{J(\omega, \xi_i) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + \frac{1}{2} C \sum_{i=1}^l \xi_i^2\} \tag{3}$$

$$\text{s.t. } y_i = \omega^T \cdot \Phi(x_i) + b + \xi_i \quad (i = 1, 2, \dots, l) \tag{4}$$

式中: C —规则因子; ξ_i —松弛变量。

引入Lagrange乘子 α_i , 相应的Lagrange函数为:

$$L(\omega, b, \xi_i, \alpha_i) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + \frac{1}{2} C \sum_{i=1}^l \xi_i^2 - \sum_{i=1}^l \alpha_i [\omega^T \cdot \Phi(x_i) + b + \xi_i - y_i] \tag{5}$$

由KKT优化条件可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial \omega} = 0 \rightarrow \omega = \sum_{i=1}^l \alpha_i \Phi(x_i) \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^l \alpha_i = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \xi_i} = 0 \rightarrow \alpha_i = C \xi_i \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = 0 \rightarrow \omega^T \cdot \Phi(x_i) + b + \xi_i - y_i = 0 \end{cases} \tag{6}$$

从而所求解的优化问题转化为求解如下的线性方程组问题:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & [\Phi(x_1)]^T \Phi(x_1) + \frac{1}{C} & \dots & [\Phi(x_1)]^T \Phi(x_1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & [\Phi(x_l)]^T \Phi(x_l) & \dots & [\Phi(x_l)]^T \Phi(x_l) + \frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_l \end{bmatrix} \tag{7}$$

求解该矩阵方程并定义相应核函数 $K(x_i, x)$, 最终可得到样本在高维线性空间的回归形式为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K(x_i, x) + b \tag{8}$$

式中: n —支持向量的个数。

$K(x_i, x)$ 必须满足 Mercer 条件。本研究中核函数选取径向基函数:

$$K(x_i, x) = \exp\left(\frac{-\|x_i - x\|^2}{2\sigma^2}\right) \tag{9}$$

式中: σ —核宽度。

3 基于LSSVM-PID的船舶航向复合逆控制

3.1 LSSVM直接逆模型控制

系统(1)可表示为一个SISO非线性系统:

$$\psi(k+1) = f(\psi(k), \psi(k-1), \dots, \psi(k-p), \delta(k), \dots, \delta(k-q)) \tag{10}$$

式中: $\psi(k)$, $\delta(k)$ — k 时刻的输出和输入; p, q —输出延时和输入延时。

如果系统可逆^[10-11], 则系统(10)的逆模型为:

$$\delta(k) = f^{-1}(\psi(k+1), \psi(k), \dots, \psi(k-p), \delta(k-1), \dots, \delta(k-q)) \tag{11}$$

采用LSSVM算法回归估计船舶航向系统的逆模型,其表达式为:

$$\delta_1(k) = \sum_{i=1}^l \alpha_k K(X(i), X(k)) + b \tag{12}$$

式中: $X(k) = [\psi(k+1), \psi(k), \dots, \psi(k-p), \delta(k-1), \dots, \delta(k-q)]$, l —样本数, $X(k)$ —逆模型的输入, $\delta_1(k)$ —逆模型的输出。

LSSVM直接逆模型控制如图1所示。

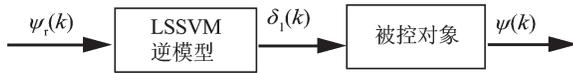


图1 LSSVM直接逆模型控制

3.2 LSSVM-PID复合逆控制

LSSVM-PID复合逆控制原理图如图2所示。其中LSSVMI为被控对象的动态辨识逆模型。本研究采用文献[12]中的回归最小二乘支持向量机的增量式在线学习算法,完成LSSVMI的在线学习,以确保模型的实时性。LSSVMC为被控对象逆模型的拷贝,加在被控对象前面,构成LSSVM控制器。LSSVM与被控对象构成一个LSSVM直接逆控制系统,如图1所示。

为了提高精度,增强适应性,本研究又增加了一条PID反馈控制回路,实现对原对象的有效控制,其结构如图2所示。

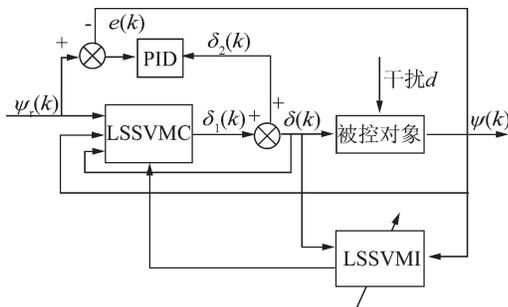


图2 基于LSSVM-PID的船舶航向复合逆控制

其中:

$$\delta(k) = \delta_1(k) + \delta_2(k)$$

$$\delta_2(k) = k_i \cdot e(k) + k_p [e(k) - e(k-1)] + k_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]$$

式中: k_i, k_p, k_d —PID的3个参数。

4 数值仿真

利用式(1)的船舶航向非线性响应模型和基于SVM的逆模型辨识,本研究对所设计的控制器进行了数值仿真以验证其有效性,取 $p=2, b=1$,规则因子 $C=8.9$,核参数 $\sigma=2.2$,令:

$$X = [\psi(k), \psi(k-1), \psi(k-2), \delta(k-1)], Y = \delta(k)$$

把 $\{X(i), Y(i)\} (i=1, 2, \dots, 100)$ 作为样本数据供LSSVM学习,通过100组数据样本回归辨识逆模型。航向角假设为一连续的谐波信号,取 $\psi = \sin(t)$ 。逆模型辨识结果如图3所示,其均方根误差为 $RMSE=0.0122$,从图3中可以看出,LSSVM具有很好的辨识能力。

本研究选取控制系统中PID的参数为 $k_p=0.6, k_i=4, k_d=0.05$,仿真步数 $k=200$,步长 $t_s=0.01$,跟踪信号为 $\psi_r = \cos(2 \times \pi \times k \times t_s) + 1.5$ 。作为对比,笔者给出了传统PID控制和基于LSSVM-PID的复合控制数值仿真结果,如图4、图5所示。

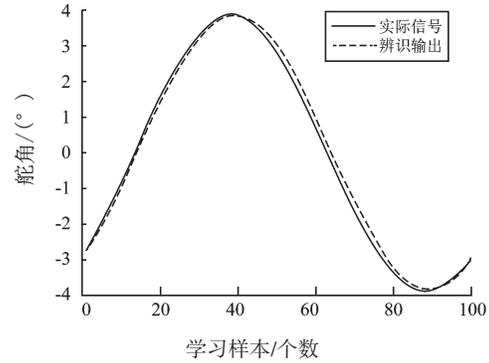


图3 LSSVM辨识的逆模型

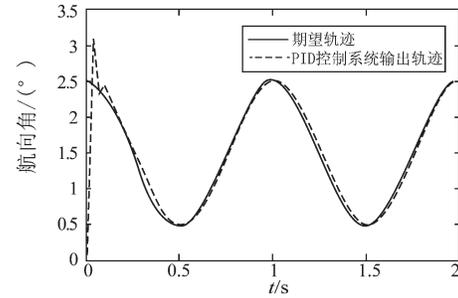


图4 船舶航向PID控制

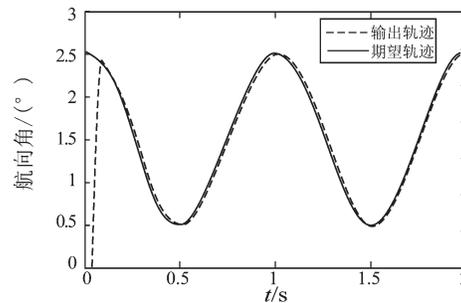


图5 船舶航向LSSVM-PID控制

船舶航向传统PID控制如图4所示,其均方根误差 $RMSE=0.1074$ 。船舶航向LSSVM-PID复合逆系统控制如图5所示,其均方根误差 $RMSE=0.0854$ 。从图中可以看出,基于LSSVM逆模型辨识的控制器跟踪误差较小,能够很好地跟踪给定信号,具有良好的控制精度。相对而言,LSSVM-PID复合控制比传统的PID控制具有更好的控制品质,这是由于传统的PID控制在不考虑外界干扰的情况下,只能在一定的范围内有效,而且初始阶段误差较大。而LSSVM-PID复合逆控制在初始阶段能快速收敛于给定信号,而且通过增加的PID反馈回路,克服了SVM直接逆控制系统过于依赖样本数据的选择和逆模型的辨识精度等缺陷,从而改善了系统的控制性能。

为了进一步验证LSSVM-PID复合逆控制的抗干扰性,笔者对被控对象 $k=0.8s$ 和 $k=1.3s$ 各加一个随机扰动,干扰幅值分别为 $+0.4$ 和 -0.4 ,其他条件不变,仿真结果如图6所示。可以看到,当存在干扰信号

时,控制器可以快速地抵消干扰的影响,表明此控制系统具有很好的抗干扰性能。

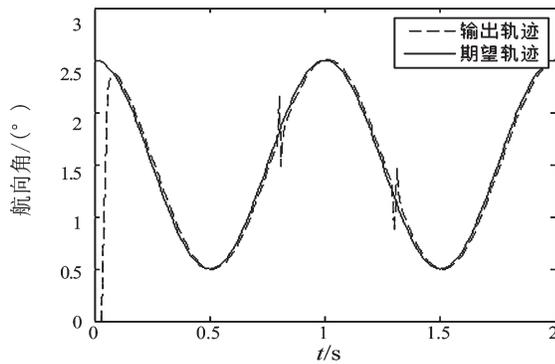


图6 加干扰后LSSVM-PID复合逆控制仿真

5 结束语

本研究针对船舶运动的特点,提出了LSSVM-PID复合逆控制系统,该系统综合了LSSVM和PID控制的优点,通过用增量式LSSVM算法,解决模型在线辨识,克服了实时性差的缺点;同时,利用PID反馈控制回路,避免了因模型辨识误差而影响控制性能的问题。研究表明,LSSVM-PID航向复合逆控制系统具有较强的控制精度。

此外,控制系统中的船舶水平运动(3个自由度)的在线控制策略,以及对LSSVM本身的参数(核参数 σ 和规则因子 C)的寻优等将有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 刘绍满,王 宁,吴兆麟. 船舶领域研究综述[J]. 大连海事大学学报,2011,37(1):51-54.
- [2] 林 锐,吴 波,陈捷捷. 基于CADD5的坐标自动转换程序开发[J]. 机械,2011,38(9):51-53.
- [3] 成 文,张 珂,石彦平. 舰用某型测风传感器[J]. 机械,2011,38(8):69-71.
- [4] 先 中,孟正大,沈建强,等. 神经网络 α 阶逆系统控制方法在机器人解耦控制中的应用[J]. 机器人,2001,23(4):363-367.
- [5] VAPNIK V N. 统计学习理论[M]. 徐建华,张学工,译. 北京:电子工业出版社,2004.
- [6] 邓乃杨,田英杰. 支持向量机-理论、算法与拓展[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [7] DREZET P M L, HARRISON R F. Support vector machines for system identification [C] // Proc. of UKACC Int. Conf. on Control '98. UK: University of Wales Press, 1998: 668-692.
- [8] 王定成. 支持向量机建模预测与控制[M]. 北京:气象出版社,2009.
- [9] LUO Wei-lin, ZOU Zao-jian. Identification of response models of ship maneuvering motion using support vector machines [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2007, 11(6): 832-838.
- [10] 李春文,冯元现. 多变量非线性控制的逆系统方法[M]. 北京:清华大学出版社,1991.
- [11] 袁小芳,王耀南,杨辉前. 基于支持向量机的非线性逆控制及其仿真[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2006,33(1):71-74.
- [12] 张浩然,汪晓东. 回归最小二乘支持向量机的增量和在线式学习算法[J]. 计算机学报,2006,29(3):400-406.

[编辑:李 辉]

(上接第564页)

数字伺服阀滞环均小于5%,不对称度均小于10%,非线性度均小于7.5%,完全达到伺服阀静态特性的标准值;-3 dB处幅频宽至少可达110 Hz(25%额定流量),阶跃响应上升时间至少可达10.8 ms;6只6 mm口径正开口2D数字伺服阀均具有较理想的静、动态特性和良好的加工一致性,不存在静、动态特性不稳定问题。

参考文献(References):

- [1] LI Qi-peng, DING Fan, WANG Chuan-li. Novel bidirectional linear actuator for electrohydraulic valves [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, 41(6): 2199-2201.
- [2] 王春行. 液压控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [3] 周曲珠. 图解液压与气动技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [4] MURRENHOFF H. Trends in valve development [J]. *Ölhydraulik und Pneumatik*, 2003(46): 1-36.
- [5] 肖俊东,王占林,陈克昌. 新型高性能直接驱动电液伺服阀[J]. 机械科学与技术,2005,24(12): 136-139.

- [6] 骆涵秀,李世伦,朱 捷,等. 机电控制[M]. 杭州:浙江大学出版社,2003.
- [7] 王传礼,丁 凡,崔 剑,等. 基于GMA喷嘴挡板伺服阀的动态特性[J]. 机械工程学报,2006,36(10): 23-26.
- [8] NASCUTIU L. Voice coil actuator for hydraulic servo valves with high transient performances [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Automation, quality and Festing, Robotics Cluj-Napoca, Romania: IEEE, 2006: 185-190.
- [9] ANDERSSON B, ANDREW D, MARTIN A. Vickers new technologies applied to electronic hydraulic controls [C] // SAE International Off-highway and Power Plant Congress and Exposition. Indian, USA: [s.n.], 1996: 71-76.
- [10] 阮 健,李 胜,裴 翔,等. 数字阀的分级控制及非线性[J]. 机械工程学报,2005,41(11): 91-97.
- [11] 阮 健,裴 翔,李 胜. 2D数字换向阀[J]. 机械工程学报,2000,36(3): 65-68.

[编辑:张 翔]