

潜器水下悬浮 SVM 逆系统控制研究*

赵 琳, 齐霄强, 宋 佳

(哈尔滨工程大学自动化学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 由于潜器水下悬浮运动时水动力参数的不确定性以及各运动自由度之间的交叉耦合影响, 很难得到潜器水下悬浮运动的精确动力学模型。利用支持向量机(SVM)离线辨识系统的 α 阶静态非线性逆模型, 将 α 阶逆模型作为前馈控制器与原系统组成右逆系统, 复合系统解耦线性化为两个相对独立的SISO伪线性子系统。然后采用线性系统设计方法对已解耦系统设计闭环控制器。仿真结果表明, 该方法不需要知道原系统的精确数学模型, 跟踪精度高, 能很好的实现悬浮姿态控制。

关键词: 潜器; 悬浮控制系统; 逆系统; SVM; 解耦控制

中图分类号: U674.76; TP271.72 文献标志码: A

The SVM Inverse System Control for Underwater Vehicle Hovering

ZHAO Lin, QI Xiaoqiang, SONG Jia

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

Abstract: Because of the hydrodynamic coefficients uncertainties and the coupling affects of each degree of freedom, it is hard to establish the dynamics model of hovering system. Identify α th-order nonlinear offline static inverse model by using support vector machines (SVM). Use this inverse system as a feed-forward controller to construct relatively independent SISO pseudo-linear subsystems. The additional feedback linear controller is designed by using developed linear system theory. The simulation results show that this method does not depend on the accurate mathematical model, and realize the depth and pitch control effectively.

Keywords: underwater vehicle; hovering system; inverse system; support vector machines; decoupling control

0 引言

潜器在海底抽样、海底地形观察、海底救生、等实际应用中, 需要在低航速的工作状态下保持其潜深和姿态。此时潜器运动非线性更加显著, 再加上各自由度之间的耦合效应, 很难得到系统精确的数学模型, 因此制约了基于模型的逆系统方法的应用^[1]。一些学者研究了运用神经网络建模的逆系统方法^[2-4], 然而神经网络存在过学习、局部极小点、结构和类型设计依赖于专家经验等固有缺陷。文中利用支持向量机(support vector machine, SVM) 辨识潜器悬浮系统 α 阶

积分逆系统, 将潜器悬浮运动系统解耦线性化为简单的伪线性系统, 然后运用线性系统理论设计复合系统的闭环控制器。该控制律能够克服系统参数的不确定性, 保障系统的鲁棒性, 实现潜器的悬浮姿态精确控制。

1 潜器水下悬浮运动数学模型

根据潜器垂直面运动的标准动力学模型^[5], 结合潜器水下悬浮运动不用舵、航速 u 很小的特点, 可以得到潜器水下悬浮的基本动力学模型如下:

* 收稿日期: 2008-07-01

基金项目: 国防预研基金资助

作者简介: 赵琳(1968-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 研究方向: 惯性导航及定位。

$$\begin{cases}
 m\dot{w} = \frac{1}{2}\rho L^2 (Z'_{w|w} w | w | + Z'_{ww} w^2) + \\
 \frac{1}{2}\rho L^3 \cdot (Z'_{\dot{w}} \dot{w} + Z'_{w|q} w | q |) + \\
 \frac{1}{2}\rho L^4 \cdot (Z'_{\dot{q}} \dot{q} + Z'_{q|q} q | q |) + Z_d + Z_u \\
 I_y \dot{q} = \frac{1}{2}\rho L^3 (M'_{w|w} w | w | + M'_{ww} w^2) + \\
 \frac{1}{2}\rho L^4 \cdot (M'_{\dot{w}} \dot{w} + M'_{w|q} w | q |) + \\
 \frac{1}{2}\rho L^5 \cdot (M'_{\dot{q}} \dot{q} + M'_{q|q} q | q |) - \\
 mgh \cdot \theta + M_d + M_u
 \end{cases} \quad (1)$$

式中除了干扰项 Z_d 和 M_d 以及控制输入项 Z_u 和 M_u 外,各符号意义与文献[5]中相同, Z_d 为潜在垂向方向上的干扰力总和(M_d 为干扰力矩的总和), Z_u 为潜器浮力均衡水舱产生的均衡浮力, M_u 为艇体内纵倾调节装置产生的均衡力矩。

由式(1)可以看出,潜器水下悬浮是一个非线性过程。由于其初始不均衡量、周围海洋环境等条件的不断变化都会对悬浮运动产生一定的干扰影响。根据潜器悬浮姿态控制的目的是控制其下潜深度 H 和纵倾角 θ 的大小,故可以选择系统的状态变量、输出变量及控制量分别为:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x} &= [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [w, q, H, \theta]^T \\
 \mathbf{y} &= [y_1, y_2]^T = [H, \theta]^T \\
 \mathbf{u} &= [u_1, u_2]^T = [Z_u, M_u]^T
 \end{aligned} \quad (2)$$

则原系统可以表示为状态方程形式(其中状态变量 x 用输出变量 y 的相应阶次导数表示):

$$\begin{cases}
 m \cdot \ddot{y}_1 = Z_{w|w} \cdot \dot{y}_1 | \dot{y}_1 | + Z_{ww} \cdot (\dot{y}_1)^2 + \\
 Z_{\dot{w}} \ddot{y}_1 + Z_{w|q} \cdot \dot{y}_1 | \dot{y}_2 | + \\
 Z_{\dot{q}} \cdot \ddot{y}_2 + Z_{q|q} \cdot \dot{y}_2 | \dot{y}_2 | + Z_d + u_1 \\
 I_y \cdot \ddot{y}_2 = M_{w|w} \cdot \dot{y}_1 | \dot{y}_1 | + M_{ww} \cdot (\dot{y}_1)^2 + \\
 M_{\dot{w}} \cdot \ddot{y}_1 + M_{w|q} \cdot \dot{y}_1 | \dot{y}_2 | + M_{\dot{q}} \cdot \ddot{y}_2 + \\
 M_{q|q} \cdot \dot{y}_2 | \dot{y}_2 | - mgh \cdot \theta + M_d + u_2
 \end{cases} \quad (3)$$

2 多变量仿射非线性系统的逆系统

对于一类用状态方程形式描述的 q 维输入 q 维输出连续 MIMO 仿射非线性系统:

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^q \mathbf{g}_i(\mathbf{x}) \cdot u_i, \\ \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \in \mathbf{M} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\mathbf{M} \subset \mathbf{R}^n$ 为状态空间,是一个连续解析域, $\mathbf{f}(\mathbf{x}), \mathbf{g}_i(\mathbf{x})$ 为 \mathbf{M} 域中的实解析向量, $\mathbf{u}, \mathbf{y} \in \mathbf{R}^r$ 分别为输入、输出向量。

将上述系统表示为由输入 \mathbf{u} 映射到输出 \mathbf{y} 的算子 $\theta: \mathbf{y}(\cdot) = \theta(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}(\cdot))$ 。若系统在两个不同的允许输入 \mathbf{u} 和 $\tilde{\mathbf{u}}$, 输出:

$$\mathbf{y}(\cdot, \mathbf{u}, \mathbf{x}_0) \neq \mathbf{y}(\cdot, \tilde{\mathbf{u}}, \mathbf{x}_0) \quad (5)$$

称系统在 $\mathbf{x}_0 \in \mathbf{M}$ 附近的某个邻域内是右可逆的^[6]。

设 $\hat{\Sigma}_\alpha$ 表示另一系统,其传递关系算子为 $\hat{\theta}_\alpha$:

$$\hat{\theta}_\alpha: \mathbf{y}_d^{(\alpha)} \rightarrow \mathbf{u}_d, (\mathbf{u}_d(\cdot) = \hat{\theta}_\alpha(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_d^{(\alpha)}(\cdot))) \quad (6)$$

若系统满足 $\theta \hat{\theta}_\alpha(D^\alpha \mathbf{y}_d) = \theta \mathbf{u}_d = \mathbf{y}_d$, 则系统 $\hat{\Sigma}_\alpha$ 称为原系统的 α 阶积分逆系统。

为得到原系统的 α 阶积分逆系统,需知道原系统输出 \mathbf{y} 与输入 \mathbf{u} 之间的显式解析表达。从而得到对应逆系统输出 \mathbf{u} 与相应阶次的输入 $\mathbf{y}^{(\alpha)}$ 之间的解析关系。

由微分几何的知识可知^[7],多变量系统的相对阶 $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_q]^T$, 并且满足:

$$\alpha = \sum_{i=1}^q \alpha_i, (\alpha \leq n) \quad (7)$$

其中: α_i 表示原系统的各输出 $y_i(t)$ 对 t 求连续导数, $y_i^{(\alpha_i)} = h_i^{(\alpha_i)}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 在工作点 $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ 的邻域内显含输入 \mathbf{u} , 并且使得对应向量 \mathbf{Y} 的 Jacobian 矩阵 $\partial \mathbf{Y} / \partial \mathbf{u}^T$ 满秩。其中 \mathbf{Y} 表示:

$$\mathbf{Y} = [y_1^{(\alpha_1)}, \dots, y_q^{(\alpha_q)}]^T \quad (8)$$

即原系统满足 MIMO 系统的可逆性定理^[6]。

将得到的 α 阶逆系统与原系统构成右逆复合系统,则解耦为多个相对独立的简单 SISO 积分线性系统,称该开环复合控制系统为伪线性系统。

对于上述仿射非线性系统,假设其系统向量相对阶为 $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_q]^T$, 则 α 阶积分逆系统可以表示为原系统输出 y_i 相应微分的函数:

$$\mathbf{u} = \hat{\theta}_\alpha(y_1^{(\alpha_1)}, y_1^{(\alpha_1-1)}, \dots, y_1, y_2^{(\alpha_2)}, \dots, y_q^{(1)}, y_q) \quad (9)$$

将该 α 阶积分逆系统串联在原系统之前,定义输入为:

$$\boldsymbol{\varphi} = y_d^{(\alpha)}(t), (\varphi_1 = y_1^{(\alpha_1)}, \dots, \varphi_q = y_q^{(\alpha_q)}) \quad (10)$$

则该解耦线性化后的复合系统的传递函数为:

$$\mathbf{G}(s) = \text{diag} \{s^{-\alpha_1}, s^{-\alpha_2}, \dots, s^{-\alpha_q}\} \quad (11)$$

综上所述,只要能构造出多变量系统的 α 阶逆系统,就可实现对原系统的解耦,再利用线性系统理论的相关方法,对各 SISO 系统设计相应的闭环控制器,就可以实现对整个复合系统的控制。

3 利用 SVM 辨识原系统的 α 阶逆系统

对于一般非线性系统来说,只能观测到系统的输入输出数据,很难得到准确的系统模型参数。文献[8]中提出了利用 SVM 辨识 SISO 非线性系统逆模型的方法,利用 SVM 对非线性函数的逼近能力,用相应阶次的积分器组来反映逆系统中各变量之间的动态关系。

由于基于离散系统输入输出数据 $\{u(k), y(k)\}$ 的逆系统建模比连续系统的逆系统建模要来得方便。在采样周期(或计算步长)足够小的条件下,运用连续系统的分析与设计方法、离散化实现已成为应用较为广泛的方法。以下的连续系统逆模型和逆模控制都采用了相应的离散化处理。

考虑到 SVM 只能用于多输入单输出函数的逼近问题,为了实现对 MIMO 系统的模型辨识,这里对逆系统的每个输出分别设计相应的学习机。

假设双输入-双输出系统可以用形如式(4)所示的状态方程形式描述,且原系统可逆。系统相对阶为 $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2]^T$ 。若式(9)所示的逆系统在平衡点 (x_0, u_0) 附近一邻域内存在连续有解解:

$$\begin{bmatrix} u_1^{(m_1)} \\ u_2^{(m_2)} \\ g_1(y_1^{(\alpha_1)}, y_2^{(\alpha_2)}, \dots, y_1, y_2, u_1^{(m_1-1)}, u_2^{(m_2-1)}, \dots, u_1, u_2) \\ g_2(y_1^{(\alpha_1)}, y_2^{(\alpha_2)}, \dots, y_1, y_2, u_1^{(m_1-1)}, u_2^{(m_2-1)}, \dots, u_1, u_2) \end{bmatrix} = \quad (12)$$

可采用图 1 所示的 SVM 逆系统辨识结构,利用高速采样得到的一组训练数据对 SVM 进行训练,就可得到对应的 α 阶积分逆系统。其中逆系统输出 $u_1^{(m_1)}(t), u_2^{(m_2)}(t)$ 的阶数 m_1, m_2 分别表示使原系统的输出 Jacobian 矩阵满秩时的输入导数的最高阶次。

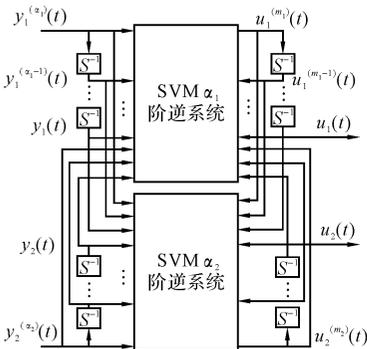


图 1 SVM 逆系统结构

通过给原系统加上适当的激励 $u_d(t)$, 得到相应的输出 $y(t)$ 。原系统输出 $y_i(t)$ 经过其相应的 α_i 阶微分器组,同时通过高速采样可以得到其对应的一组离散化后的微分信号 $\varphi_i = [y_i, \dots, y_i^{(\alpha_i)}]^T$; 同理,逆系统输出 $u_i^{(m_i)}(t)$ 经过对应的积分器组和高速采样后,可以得到 $u_i = [u_i, \dots, u_i^{(m_i-1)}]^T$ 。可获得 n 组原系统输入、输出离散数据,采用高阶数值微分方法,得到所需的各阶离散数据,然后等间隔地抽取出 l 组构成训练样本集,令:

$$X_i(k) = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}, Y_i(k) = u_i(k) \quad (13)$$

将式(13)中定义的拟合因子 $X_i(k)$ 和得到的逆系统输出 $Y_i(k)$ 构成 l 对训练数据 $\{X_i^j(k), Y_i^j(k)\}, j = 1, \dots, l$, 通过 SVM 的学习,可以获得相应的输入向量系数 a_{ij}, a_{ij}^* 和阈值 b_i , 这里采用径向基(RBF)函数^[9]作为 SVM 的核函数:

$$k(x_i, x_j) = \exp \left\{ -\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (14)$$

根据当前的输入可得第 i 个逆系统的输出为:

$$u_i(k) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^l (a_{ij} - a_{ij}^*) k(x_i, X_j) + b_i \quad (15)$$

同理,通过 p 个 SVM 的学习,即可获得对应逆系统各自相应的系数。

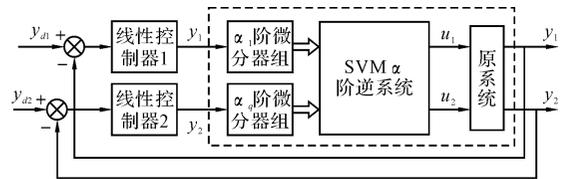


图 2 α 阶直接逆系统控制示意图

其中虚线内表示原系统与 α 阶逆系统组成的伪线性复合系统,具有 α 阶积分性质。

4 潜器水下悬浮控制系统仿真研究

根据上面所述计算逆系统的方法可以得到原系统的逆系统解析表达如下:

$$\begin{cases} (m - Z_{iw}) \cdot \ddot{y}_1 - Z_q \cdot \ddot{y}_2 = Z_{w|w} \cdot \dot{y}_1 | \dot{y}_1 | + Z_{ww} \cdot (\dot{y}_1)^2 + Z_{w|q} \cdot \dot{y}_1 | \dot{y}_2 | + Z_{q|q} \cdot \dot{y}_2 | \dot{y}_2 | + Z_d + u_1 \\ (I_y - M_q) \cdot \ddot{y}_2 - M_w \cdot \ddot{y}_1 = M_{w|w} \cdot \dot{y}_1 | \dot{y}_1 | + M_{ww} \cdot (\dot{y}_1)^2 + M_{w|q} \cdot \dot{y}_1 | \dot{y}_2 | + M_{q|q} \cdot \dot{y}_2 | \dot{y}_2 | - mgh \cdot y_2 + M_d + u_2 \end{cases} \quad (16)$$

原系统是一个可逆系统,系统相对阶 $\alpha_1 = 2, \alpha_2 = 2$, 输入最高阶次 $m_1 = m_2 = 1$ 。由于 $\alpha = n = 4$, 故原系统可实现完全线性化。

利用图 1 所示的逆系统辨识结构,对系统两输入端施加随机信号,得到输入输出数据序列。其中 200 个数据用作训练集,200 个数据用作测试集。如图 3 所示为 SVM 辨识得到的逆系统输出 Z_u ; 图 4 为逆系统纵倾均衡力矩 M_u , 仿真结果显示逆系统的输出非常接近原系统输入,且解耦效果明显。

将利用 SVM 辨识得到的 4 阶逆系统与原系统串联得到两个相对独立的 2 阶积分伪线性复合系统,对已解耦的两个子系统分别设计超前滞后控制器 $\frac{10s+1}{0.03s+1}$, 可以得到如图 5 所示的潜器悬浮 SVM 逆系统复合控制系统。

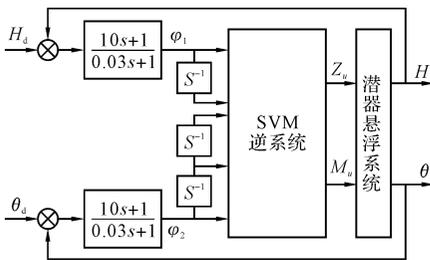


图 5 潜器悬浮 SVM 逆系统复合控制系统
 设潜器的初始潜深 H_0 为 30m, θ_0 为 10° , 需在 $t = 10$ 时下潜至 33m, $t = 40$ 时上浮到 25m 并保持无纵倾。采用上述控制结构对系统进行仿真(忽略干扰力的影响), 仿真结果如图 6、图 7 所示。

其中虚线表示系统的期望输出 H_r, θ_r 。由仿真结果可以看出,潜器的下潜深度和纵倾角能够

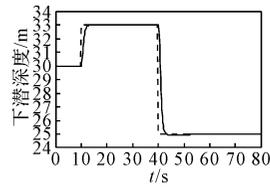


图 6 下潜深度响应曲线

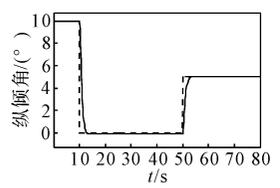


图 7 纵倾姿态角响应曲线

很好的跟踪期望值,达到工作要求。

5 结论

仿真研究表明,用多个 SVM 组合所辨识得到的 MIMO 系统逆模型具有良好的逼近性能。将辨识得到 SVM 逆系统串联在原系统之前,原悬浮控制系统解耦线性化为两个 SISO 伪线性积分系统。通过对解耦后的深度控制系统和纵倾姿态控制系统分别设计相应的线性控制器,实现了潜器悬浮姿态的精确控制。

参考文献:

- [1] 戴先中,刘军,冯纯伯. 连续非线性系统的神经网络 α 阶逆系统控制方法[J]. 自动化学报,1998,24(4):463-468.
- [2] 戴先中,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.
- [3] 陈小红,侯春海,钱积新. 逆系统方法的径向基函数网络实现[J]. 控制与决策,1998,13(2):146-150.
- [4] Zeng-Zhou Jia, Yu Huang, et al. Robotic manipulators decoupling control based on ANN α th-order inverse system method[C]// Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou,2005.
- [5] 刘鹰,赵琳. 潜艇控制和仿真的数学模型[J]. 船舶工程,2000(1):49-52.
- [6] 李春文,冯元琨. 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.
- [7] Isidori A. Nonlinear control systems[M]. New York: Springer Press,1989:234-281.
- [8] 宋夫华,李平. 基于支持向量机 α 阶逆系统方法的非线性内模控制[J]. 自动化学报,2007,33(7):778-781.
- [9] 张浩然,韩正之,李时刚. 基于支持向量机的未知非线性系统辨识与控制[J]. 上海交通大学学报,2003,37(6):927-930.