

# 一类MIMO非线性系统的LSSVM广义逆控制

刘国海<sup>1</sup>, 张 懿<sup>1</sup>, 魏海峰<sup>2</sup>, 赵文祥<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013;

2. 江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

**摘要:** 针对神经网络逆控制存在的不足, 对一类模型未知且某些状态量较难测得的多输入多输出(MIMO)非线性系统, 在状态软测量函数存在的前提下, 提出一种最小二乘支持向量机(LSSVM)广义逆辨识控制策略. 通过广义逆将原被控系统转化为伪线性复合系统, 并可使其极点任意配置, 采用LSSVM代替神经网络拟合广义逆系统中的静态非线性映射. 将系统的状态量辨识与LSSVM逆模型辨识结合, 通过LSSVM训练拟合合同时实现软测量功能. 最后以两电机变频调速系统为对象, 采用该控制策略进行仿真研究, 结果验证了本文算法的有效性.

**关键词:** 非线性系统; 广义逆; 辨识; 最小二乘支持向量机; 两电机变频调速系统

**中图分类号:** TP29      **文献标识码:** A

## LSSVM generalized inverse control for a class of MIMO nonlinear systems

LIU Guo-hai<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>, WEI Hai-feng<sup>2</sup>, ZHAO Wen-xiang<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China;

2. School of Electrical and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China)

**Abstract:** Considering the deficiency of neural network inverse control method, for a class of multi input and multi output (MIMO) nonlinear systems with unknown model and some state variables difficult to detect, a new identification and control strategy based on least squares support vector machines (LSSVM) generalized inverse is proposed on the premise that soft-sensing functions for those state variables exist. Generalized inverse can transform the controlled nonlinear system into a pseudo linear combined system with the poles approaching to the expected positions. LSSVM instead of neural network is applied to fit the static nonlinear mapping of the generalized inverse system. Identification of the system state variables and LSSVM inverse model identification are combined, and soft-sensing is implemented through LSSVM training and fitting meanwhile. Finally taking two-motor variable frequency speed-regulating system as research subject, simulation of the control strategy is performed. The simulation results show that the proposed control strategy is feasible and efficient.

**Key words:** nonlinear systems; generalized inverse; identification; least squares support vector machines; two-motor variable frequency speed-regulating system

### 1 引言(Introduction)

逆系统方法是实现多输入多输出(multi input and multi output, MIMO)非线性系统线性化和解耦控制的有效途径, 物理意义清晰直观, 已得到了广泛应用. 通过神经网络加积分器形式构建系统动态逆模型, 戴先中等<sup>[1~3]</sup>提出了神经网络逆控制策略, 弥补了逆系统方法过于依赖精确数学模型及解析逆难以求解的缺陷, 拓宽了其在MIMO非线性系统中的应用领域.

对于MIMO非线性系统控制, 神经网络逆仍存在如下几个方面的不足, 有待改进: 1) 得到的各伪线性子系统为不稳定的纯积分型系统, 无法根据期望的

控制性能进行极点的任意配置. 2) 逆系统实现及闭环控制中, 通常需要反馈某些状态变量, 由于技术或经济条件限制, 其中一些物理量难以测得. 3) 神经网络自身存在过学习、局部极小、结构选择等缺陷<sup>[4]</sup>.

针对上述问题, 本文提出了一种新型最小二乘支持向量机(least squares support vector machines, LSSVM)逆辨识控制策略. 由LSSVM代替神经网络用于非线性逆模型映射的逼近, 用易于检测的状态变量实现对难以检测状态量的软测量, 并将状态量的软测量与逆模型辨识相结合, 通过LSSVM训练拟合实现. 利用广义逆将得到的伪线性复合系统的极点配置在所期望的位置, 降低附加控制器设计难度.

最后,以两电机变频调速系统的解耦控制为例,通过仿真结果验证新型辨识控制策略对MIMO非线性系统的有效性。

## 2 广义逆系统(Generalized inverse system)

给定 $p$ 维输入 $\mathbf{u}(t) = [u_1, u_2, \dots, u_p]^T$ ,  $q$ 维输入 $\mathbf{y}(t) = [y_1, y_2, \dots, y_q]^T$ 的非线性系统 $\Sigma$ :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \end{cases} \quad (1)$$

记描述 $\Sigma$ 非线性映射的算子为 $\theta$ , 则 $\Sigma$ 可表示为 $\mathbf{y} = \theta\mathbf{u}$ ; 令 $\Sigma$ 的期望输出为 $\mathbf{y}_d$ .

设 $\Pi_g$ 是具有映射关系 $\mathbf{u} = \bar{\theta}_g\boldsymbol{\varphi}$ 的 $q$ 维输入、 $p$ 维输出系统, 输入 $\boldsymbol{\varphi}(t) = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_q]^T$ 为取值于某域内的任意给定连续函数向量, 并在初始时刻 $t_0$ 处满足一定的初始条件; 输出 $\mathbf{u}(t) = [u_1, u_2, \dots, u_p]^T$ . 若取 $\boldsymbol{\varphi}(t) = \mathbf{a}_\alpha \mathbf{y}_d^{(\alpha)} + \mathbf{a}_{\alpha-1} \mathbf{y}_d^{(\alpha-1)} + \dots + \mathbf{a}_0 \mathbf{y}_d$ ,  $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_q]^T$ , 且 $\bar{\theta}_g$ 满足:

$$\begin{aligned} \theta\bar{\theta}_g\boldsymbol{\varphi} &= \theta\bar{\theta}_g(\mathbf{a}_\alpha \mathbf{y}_d^{(\alpha)} + \mathbf{a}_{\alpha-1} \mathbf{y}_d^{(\alpha-1)} + \dots + \mathbf{a}_0 \mathbf{y}_d) \\ &= \theta\mathbf{u} = \mathbf{y}_d \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_\alpha$ 为实数且 $\mathbf{a}_\alpha \neq \mathbf{0}$ , 则称 $\Pi_g$ 为 $\Sigma$ 的 $\boldsymbol{\alpha}$ 阶广义逆系统,  $\Pi_g$ 的输出正是用来驱动 $\Sigma$ 产生 $\mathbf{y}_d$ 的所需控制量 $\mathbf{u}$ .

若系统向量相对阶 $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_q]^T$ 存在, 且满足 $\sum_{j=1}^q \alpha_j = n$  ( $n$ 为非线性系统的阶数), 在向量相对阶等于向量本性阶的情况下,  $\Pi_g$ 表示为

$$\mathbf{u} = \hat{\phi}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{v}}) \quad (3)$$

式中,  $\hat{\mathbf{v}} = [\hat{v}_1, \hat{v}_2, \dots, \hat{v}_q]^T$ ,  $\hat{v}_j = a_{j0}y_j + a_{j1}\dot{y}_j + \dots + a_{j(\alpha_j-1)}y_j^{(\alpha_j-1)} + a_{j\alpha_j}y_j^{(\alpha_j)}$ ,  $j \in q$ . 将式(3)所示的广义逆系统 $\Pi_g$ 串联到原系统 $\Sigma$ 之前, 所组成的复合系统输入输出传递函数满足:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(s) &= \text{diag}(G_{11}(s), \dots, G_{qq}(s)) \\ &= \text{diag}\left(\frac{1}{a_{1\alpha_1}s^{\alpha_1} + a_{1(\alpha_1-1)}s^{\alpha_1-1} + \dots + a_{10}}, \right. \\ &\quad \left. \dots, \frac{1}{a_{q\alpha_q}s^{\alpha_q} + a_{q(\alpha_q-1)}s^{\alpha_q-1} + \dots + a_{q0}}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4), 广义逆系统不仅可以实现原非线性系统的线性化与解耦, 而且通过调节元素 $a_{j0}, a_{j1}, \dots, a_{j\alpha_j}$ ,  $j \in q$ , 能够合理配置解耦后的各伪线性子系统的极点, 得到理想的开环特性。

## 3 LSSVM逆控制(LSSVM inverse control)

实际中的MIMO非线性系统机理复杂, 参数众多, 系统模型部分或完全未知, 难以建立精确数学模型; 且至今尚无求取广义逆的通用解析方法, 影响了广义逆模型的获得. 支持向量机(support vector

machines, SVM)能精确逼近任意一类非线性函数, 较好解决了小样本、局部极小等问题, 克服了神经网络的缺点<sup>[5,6]</sup>. 利用逆系统方法, 特别是支持向量机逆构建的闭环控制系统的稳定性, 文献[7]、[8]分别进行了理论证明. LSSVM是支持向量机的扩展, 将SVM的不等式约束变成等式约束, 仅求解一个线性方程组, 计算效率高<sup>[9]</sup>. 将广义逆系统方法与具有对未知非线性映射逼近能力的LSSVM结合, 借助LSSVM实现逆系统中的静态非线性映射, 提出适于工程应用的LSSVM广义逆模型, 可发挥两者之长.

作为一种反馈线性化控制方法, 并由式(3), 广义逆需要通过系统输出或状态的反馈实现非线性系统的线性化和解耦. 由于检测的技术或经济性条件制约, 某些物理量检测困难, 阻碍了逆系统方法的应用. 对于一类MIMO非线性系统, 若较难检测的物理量与易于检测的变量间存在某种函数关系, 则可将该函数代入广义逆表达式, 一并通过LSSVM训练拟合, 在逆模型辨识的同时实现软测量功能, 逆系统方法可继续适用.

对于原系统 $\Sigma$ , 状态变量 $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_{um}, \mathbf{x}_m]^T \in \mathbf{R}^n$ , 其中 $\mathbf{x}_{um} \in \mathbf{R}^l$ 为较难检测的状态变量,  $\mathbf{x}_m \in \mathbf{R}^{n-l}$ 为易于检测的状态变量. 假设 $\Sigma$ 中存在一个内含传感器<sup>[10]</sup>, 输入为 $\mathbf{x}_{um}$ , 输出为 $\mathbf{x}_m$ ,  $\mathbf{u}$ 为参变量. 建立内含传感器的一般表达式为

$$\mathbf{x}_m = \mathbf{g}(\mathbf{x}_{um}, \dot{\mathbf{x}}_m, \ddot{\mathbf{x}}_m, \dots, \mathbf{u}) \quad (5)$$

如果内含传感器在系统运行范围内的反函数存在, 则将 $\mathbf{x}_m$ 作为反函数的输入,  $\mathbf{x}_{um}$ 作为输出,  $\mathbf{x}_{um}$ 的软测量函数:

$$\mathbf{x}_{um} = \mathbf{g}_c(\mathbf{x}_m, \dot{\mathbf{x}}_m, \ddot{\mathbf{x}}_m, \dots, \mathbf{u}) \quad (6)$$

将该函数引入逆系统时, 若选取的 $x_{m(i)}$  ( $i = 1, \dots, n-l$ )或其求导表达式中包含输入 $\mathbf{u}$ , 会形成控制器设计的自反馈, 将严重影响系统的稳定性及控制效果<sup>[11]</sup>. 此时应舍去此次求导结果, 考虑下一个变量 $x_{m(i+1)}$ . 尽管理论上可对 $x_{m(i)}$ 不断求导, 但工程应用中高阶微分难以实现, 该软测量方法不再适用, 算法结束. 为保证检测精度, 只研究 $\mathbf{x}_{um}$ 软测量函数仅需 $x_{m(i)}$ 及其1阶导数的情况, 则软测量函数改写为

$$\mathbf{x}_{um} = \tilde{\mathbf{g}}_c(\mathbf{x}_m, \dot{\mathbf{x}}_m) \quad (7)$$

将式(7)代入式(3), 得到新的广义逆控制律:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \hat{\phi}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{v}}) = \hat{\phi}(\mathbf{x}_m, \tilde{\mathbf{g}}_c(\mathbf{x}_m, \dot{\mathbf{x}}_m), \hat{\mathbf{v}}) \\ &= \bar{\phi}(\mathbf{x}_m, \dot{\mathbf{x}}_m, \hat{\mathbf{v}}) \end{aligned} \quad (8)$$

该控制律复合了系统的辨识与控制, 且其中的变量均易于检测, 可进一步利用LSSVM拟合其非线性映射, 构成适用于复杂MIMO非线性系统的新

型LSSVM广义逆辨识控制策略。

#### 4 仿真试验(Simulation test)

工业中常用的两电机变频调速系统是一个典型的非线性、强耦合MIMO系统,张力和速度的有效控制是实现多电机同步运行的关键<sup>[12]</sup>。张力传感器由于成本昂贵,安装要求高,成为两电机同步系统推广应用的瓶颈<sup>[13]</sup>。若张力与容易测取的速度具有确定的函数关系,则可将LSSVM广义逆辨识控制策略应用于两电机同步系统,在LSSVM逆模型辨识过程中同时实现张力软测量,继而实现整个系统的线性化和解耦控制。

##### 4.1 两电机同步系统(Two-motor synchronous system)

变频器工作在矢量控制运行模式下时,两电机变频调速系统的数学模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \end{cases} \quad (9)$$

状态变量 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T = [\omega_{r1}, \omega_{r2}, F]^T$ , 输入 $\mathbf{u} = [u_1, u_2]^T = [\omega_1, \omega_2]^T$ , 输出 $\mathbf{y} = [y_1, y_2]^T = [\omega_{r1}, F]^T$ 。其中,

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{n_{p1}}{J_1} [(u_1 - x_1) \frac{n_{p1}}{R_{r1}} \psi_{r1}^2 - (T_{L1} + r_1 x_3)] \\ \frac{n_{p2}}{J_2} [(u_2 - x_2) \frac{n_{p2}}{R_{r2}} \psi_{r2}^2 - (T_{L2} - r_2 x_3)] \\ \frac{K}{T} (\frac{1}{n_{p1}} r_1 k_1 x_1 - \frac{1}{n_{p2}} r_2 k_2 x_2) - \frac{x_3}{T} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中,  $\omega_r$  为电气角速度,  $\omega$  为定子频率的同步角速度,  $n_p$  为电机极对数,  $J$  为转子转动惯量,  $\psi_r$  为转子磁链,  $R_r$  为转子绕组电阻,  $T_L$  为负载转矩,  $F$  为皮带张力,  $K = E/V$  为传递系数,  $E$  为皮带杨氏弹性模量,  $V$  为期望速度,  $T = L_0/AV$  为张力变化时间常数,  $L_0$  为机架间距离,  $A$  为皮带截面积,  $r$ 、 $k$  分别为带轮半径和速比, 下标1、2表示第1台和第2台交流电机。

由文献[14], 两电机变频调速系统本性阶 $\alpha = [1, 2]^T$ 存在,  $\alpha_1 + \alpha_2 = 3$ , 且向量相对阶等于向量本性阶, 其广义逆:

$$\mathbf{u} = \hat{\Phi}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{v}}) \quad (11)$$

式中,  $\hat{\mathbf{v}} = [\hat{v}_1, \hat{v}_2]^T$ ,  $\hat{v}_1 = a_{10}y_1 + a_{11}\dot{y}_1$ ,  $\hat{v}_2 = a_{20}y_2 + a_{21}\dot{y}_2 + a_{22}\ddot{y}_2$ 。

又 $x_1 = y_1$ ,  $x_3 = y_2$ , 由式(10)中的第3行:

$$x_2 = \delta(\dot{y}_2, x_1, x_3) = \delta(y_1, y_2, \dot{y}_2) \quad (12)$$

有

$$\mathbf{u} = \tilde{\Phi}(y_1, y_2, \dot{y}_2, \hat{\mathbf{v}}) \quad (13)$$

对张力进行软测量, 即待测变量 $x_{um} = F$ , 待测变量个数 $l = 1$ , 选取 $x_m = \omega_{r1}$ , 利用 $\omega_{r1}$ 辨识 $F$ 。按转

子磁链定向矢量控制时, M-T两相同步旋转坐标系下, 转子磁链的T轴分量 $\psi_{rt1} = 0$ , 则其导数 $\dot{\psi}_{rt1} = 0$ , 构造辅助方程<sup>[15]</sup>:

$$\dot{\psi}_{rt1} = -(\omega_1 - \omega_{r1})\psi_{r1} + \frac{L_{m1}R_{r1}}{L_{r1}}i_{st1} = 0 \quad (14)$$

代入式(10)中的第1行:

$$\dot{x}_1 = \frac{n_{p1}}{J_1} [\frac{n_{p1}L_{m1}}{L_{r1}}\psi_{r1}i_{st1} - (T_{L1} + r_1x_3)] \quad (15)$$

则

$$\begin{aligned} \text{rank}(\frac{\partial[\omega_{r1}, \dot{\omega}_{r1}]^T}{\partial x_3}) &= \text{rank}([0, -\frac{n_{p1}r_1}{J_1}]^T) \\ &= 1 = l \end{aligned} \quad (16)$$

存在由 $\omega_{r1}$ 到 $F$ 的映射, 软测量函数为

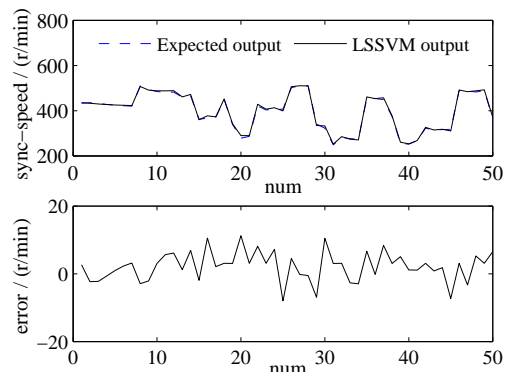
$$F = \tilde{g}_c(\omega_{r1}, \dot{\omega}_{r1}) \quad (17)$$

将式(17)代入式(13), 构建两电机变频调速系统的LSSVM广义逆复合辨识控制律。根据系统设计要 求, 取 $a_{10} = 1$ ,  $a_{11} = 1$ ,  $a_{20} = 1$ ,  $a_{21} = 1.414$ ,  $a_{22} = 1$ , 复合伪线性系统的期望传递函数:

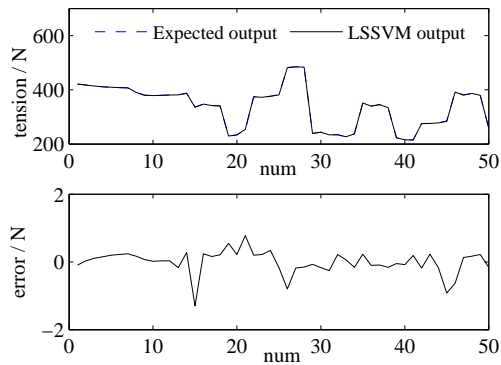
$$\begin{aligned} \mathbf{G}(s) &= \text{diag}(G_{11}(s), G_{22}(s)) \\ &= \text{diag}(\frac{1}{s+1}, \frac{1}{s^2+1.414s+1}) \end{aligned} \quad (18)$$

##### 4.2 仿真结果(Simulation results)

两电机变频调速系统仿真试验样机参数如下:  $U_{e1} = U_{e2} = 380\text{V}$ ,  $f = 50\text{Hz}$ ,  $P_{e1} = P_{e2} = 2.2\text{kW}$ ,  $n_{p1} = 2$ ,  $J_1 = 0.6\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $L_{m1} = 0.1\text{H}$ ,  $R_{r1} = 0.4\Omega$ ,  $L_{r1} = 0.2\text{H}$ ,  $r_1 = 0.1\text{m}$ ,  $k_1 = 1/15$ ,  $n_{p2} = 2$ ,  $J_2 = 0.5\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $R_{r2} = 0.6\Omega$ ,  $L_{r2} = 0.3\text{H}$ ,  $r_2 = 0.09\text{m}$ ,  $k_2 = 1/15$ ,  $K = 10$ ,  $T = 1$ 。采用具有不同幅值的方波信号激励系统, 对采样数据平滑滤波, 获得200组样本数据。随机选择150组样本用于LSSVM训练。采用剩余50组样本测试, 得到的测试结果如图1所示。图1(a)为逆模型输出结果(以 $\omega_1$ 为例), 图1(b)为张力软测量效果。由图1可知, LSSVM建模方法测试误差小, 预测精度较高, 具有优良的泛化性能, 可以进一步利用辨识模型进行控制系统的设计和性能分析。



(a) 逆模型输出

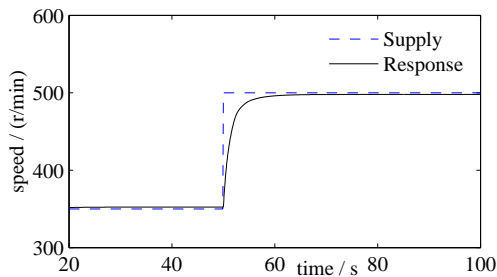


(b) 张力软测量

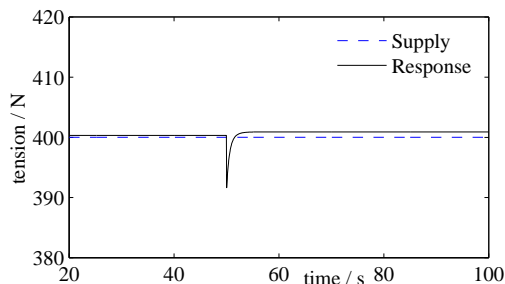
图 1 LSSVM 辨识效果

Fig. 1 LSSVM identification performances

图2为LSSVM广义逆与两电机变频调速系统串联形成开环控制时的速度、张力响应波形. 此时系统已经被线性化为2个子系统, 可见各子系统在开环稳定的同时基本实现了解耦. 从该图亦可看出, 响应波形仍存在一定的稳态误差, 这是由LSSVM辨识逼近过程中的建模误差等因素引起的. 为此, 对伪线性化的子系统附加闭环控制器, 进一步改进控制性能.



(a) 速度响应

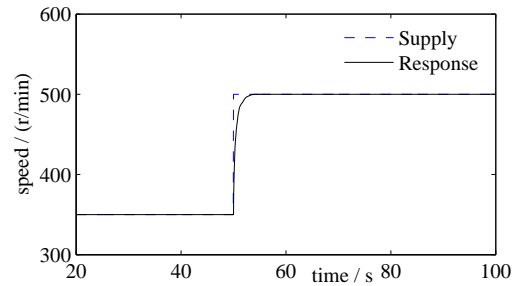


(b) 张力响应

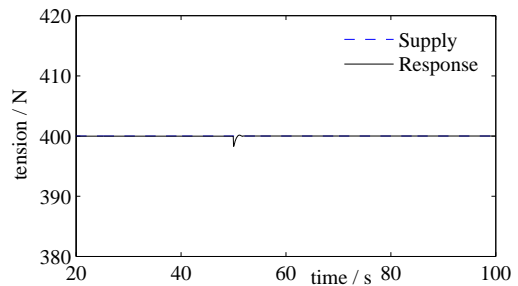
图 2 开环控制效果

Fig. 2 Open loop control performances

采用简单成熟的PID调节器实现伪线性复合系统的闭环控制, 系统响应波形如图3所示. 与图2相比, 速度、张力响应的稳态误差较小; 且速度突变情况下, 张力波动显著减小, 说明二者间的耦合关系进一步弱化, 解耦控制效果良好.



(a) 速度响应



(b) 张力响应

图 3 闭环控制效果

Fig. 3 Close loop control performances

## 5 结论(Conclusion)

为解决神经网络逆在MIMO非线性系统中应用的不足, 对于一类模型未知且部分系统状态量不易测量的复杂非线性系统, 提出了LSSVM广义逆辨识控制策略. 解决了传统逆方法得到的伪线性复合系统开环不稳定, 附加控制器设计困难的问题, 通过广义逆可使复合系统的极点在复平面上任意配置. 将难以检测状态量的软测量与LSSVM广义逆模型辨识相结合, 不依赖模型机理与具体参数, 拓展了逆系统控制方法的应用范围. 非线性系统的辨识与控制在一个框架内实现, 控制结构紧凑, 且LSSVM辨识精度和计算效率较高, 易于工程应用. 将该控制策略应用于两电机变频调速系统的同步控制, 仿真结果表明控制策略取得了满意的线性化和解耦效果, 适用于MIMO非线性系统. 同时, 为拓宽控制方法的适用范围, 下一步需深入研究系统状态变量的降维观测及软测量所需高阶导数的工程实现, 确保辨识和控制的精确性.

## Reference(References):

- [1] DAI X, HE D, ZHANG X, et al. MIMO system invertibility and decoupling control strategies based on ANN  $\alpha$ th-order inversion[J]. *IEE Proceedings-Control Theory and Application*, 2001, 148(2): 125 - 136.
- [2] DAI Xianzhong, LIU Guohai. Neural network inverse synchronous control of two-motor variable frequency speed-regulating system[J]. *ACTA Automatica Sinica*, 2005, 30(6): 890 - 900.  
(戴先中, 刘国海. 两变频调速电机系统的神经网络逆同步控制[J]. *自动化学报*, 2005, 31(6): 890 - 900.)

- [3] DING Y, DAI X, ZHANG T. Low-cost fiber-optic temperature measurement system for high-voltage electrical power equipment[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(4): 923 – 933.
- [4] FERHAT D, NURETTIN U, KERIM G. Phase inductance estimation for switched reluctance motor using adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(5):485 – 493.
- [5] BEIJIA Z, KEVIN O, JIN A K, et al. Support vector machine and neural network classification of metallic objects using coefficients of the spheroidal MQS response modes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 159 – 171.
- [6] SONG Fuhua, ZHENG Enhui. Nonlinear internal-model control based on support vector machine[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(6): 1067 – 1071.  
(宋夫华, 郑恩辉. 基于支持向量机的非线性内模解耦控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(6): 1067 – 1071.)
- [7] CHEN Qingwei, LU Zhaoxia, HU Weili, et al. Nonlinear internal model control based on inverse system method[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(5): 715 – 721.  
(陈庆伟, 吕朝霞, 胡维礼. 基于逆系统方法的非线性内模控制[J]. 自动化学报, 2002, 28(5): 715 – 721.)
- [8] LIU Luzhou, XIAO Jian. Inverse control based on support vector machines and its stability analysis[J]. *Computer Applications*, 2008, 28(11): 2978 – 2980.  
(刘陆洲, 肖建. 基于支持向量机的逆控制及其稳定性分析[J]. 计算机应用, 2008, 28(11): 2978 – 2980.)
- [9] LI X, HUANG Z, WANG B, et al. A new method for the online voidage measurement of the gas-oil two-phase flow[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(5): 1571 – 1577.
- [10] DAI X, WANG W, DING Y, et al. Assumed inherent sensor inversion based ANN dynamic soft-sensing method and its application in erythromycin fermentation process[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2006, 30(8): 1203 – 1225.
- [11] ELWAKIL A S, OZOGUZ S. Chaos in pulse-excited resonator with self feedback[J]. *IET Electronics Letters*, 2003, 39(11): 831 – 833.
- [12] VALENZUELA M A, BENTLEY J M, AGUILERA P C, et al. Improved coordinated response and disturbance rejection in the critical sections of paper machines[J]. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 2007, 43(3): 857 – 869.
- [13] ABJADI N R, SOLTANI J, ASKARI J, et al. Nonlinear sliding-mode control of a multi-motor web-winding system without tension sensor[J]. *IET Control Theory and Applications*, 2009, 3(4): 419 – 427.
- [14] LIU Guohai, LIU Pingyuan, SHEN Yue, et al. Neural network generalized inverse decoupling control of two-motor variable frequency speed-regulating system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(36): 98 – 102.  
(刘国海, 刘平原, 沈跃, 等. 两电机变频调速系统的神经网络广义逆解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(36): 98 – 102.)
- [15] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统- 运动控制系统[M]. 北京, 中国: 机械工业出版社, 2005.

#### 作者简介:

**刘国海** (1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电机控制、复杂系统控制、非线性智能控制等, E-mail: gh-liu@ujs.edu.cn;

**张懿** (1982—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为非线性智能控制, E-mail: zyi82@126.com;

**魏海峰** (1981—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电机控制, E-mail: whf21@126.com;

**赵文祥** (1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电机控制, E-mail: zwx@ujs.edu.cn.