

# 基于逆系统多模型内模主动容错控制

李 炜 程应峰 许德智

(兰州理工大学电气与信息工程学院,甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 针对现有非线性系统对故障容错的快速性和可靠性不足,从而导致容错失败的问题,为解决上述问题,研究了一类具有可能故障先验知识的非线性系统,提出了一种基于最小二乘支持向量机( LS - SVM) 建模的逆系统多模型内模主动容错控制方法。采用 LS - SVM 对系统正常以及各种先验故障情形的逆系统进行建模,构造系统的逆模型库,根据逆系统方法将逆模型与被控系统串联形成伪线性系统,设计具有良好鲁棒性能的内模控制器。系统在线运行时,监控决策机制基于对系统性能指标的仿真计算,结果表明在无需改变内模控制器的情况下达到对非线性系统故障容错的快速性和可靠性,证明方法的有效性。

**关键词:** 逆系统; 内模主动容错控制; 多模型; 逆模型库; 最小二乘支持向量机

**中图分类号:** TP 273      **文献标识码:** A

## Active Fault Tolerant Control Using Multi - Model Based on Inverse System Internal Model

LI Wei ,CHENG Ying - feng ,XU De - zhi

( College of Electrical and Information engineering , Lanzhou University of Technology , Lanzhou Gansu 730050 , China)

**ABSTRACT:** Because the existing nonlinear system is insufficient in quickness and reliability for fault - tolerant , which often results in failure , By researching a nonlinear system with priori knowledge of possible failure , the paper proposes an active fault - tolerant control using multi - models based on least square support vector machine( LS - SVM) inverse system internal model control method. First , the method uses LS - SVM to set up inverse system model for normal and faults with each kind of priori breakdown situation , then constitutes the inverse model bank. Based on inverse system method , the inverse model is connected to the system to form a pseudo - linear system and to design the internal model controller with good robust performance. When the system is running , the decision - making mechanism of monitor based on system performance index of calculation and analysis locates the movement patten which is called switching LS - SVM inverse model , so the system has always been connected with inverse model and remains unchanged pseudo - linear system , thus does not need to change the situation of internal model controller for nonlinear system , and achieves fault - tolerant of quickness and reliability. The effectiveness of this method can be seen from the simulation at last.

**KEYWORDS:** Inverse system; Internal model active fault - tolerant control; Multi - model; Inverse model bank; Least square support vector machine( LS - SVM)

### 1 引言

容错控制<sup>[1,2]</sup>是确保系统安全可靠运行的一种有效控制方法,但多数成果是针对线性系统或非线性系统在工作点附近线性化而提出的<sup>[3,4]</sup>。由于实际对象大多是非线性的,因此,针对非线性系统的容错控制研究越来越受到重视<sup>[5,6]</sup>。

非线性系统的控制研究一直是控制界研究的热点,利用反馈方法将非线性系统变换为线性系统,然后依照线性系统理论完成系统综合的方法称为反馈线性化方法,该方法是非线性系统控制研究方向的重要突破。逆系统方法是非线性反馈线性化方法中一种比较形象直观且易于理解的方法,这种方法将被控制系统的逆模型与被控系统串联形成为伪线性系统,但要求被控对象可逆且有精确的显示表达,然而在实际中,非线性系统模型多数难以以精确的显式表达其逆模型,从而限制了其在实际工程中的应用<sup>[7]</sup>。近年来基于输入和输出数据对被控系统进行逆建模已有许多成功应用<sup>[7,8]</sup>,这无疑

基金项目: 国家自然科学基金项目(60964003),甘肃省自然科学基金项目(096RJZA101)。

收稿日期: 2010-01-03 修回日期: 2010-03-10

为逆系统方法提供了有效可行的逆建模基础。而基于多模型思想的主动容错控制<sup>[9-11]</sup>,利用一种特殊的监控机制,在有效避免常规主动容错控制因需要故障检测与诊断子系统增加系统复杂度的同时,不失为一种提高主动容错快速性和可靠性的可行途径。

基于此,本文针对一类具有可能故障先验知识的非线性系统,采用LS-SVM逼近被控对象逆模型,进而建立非线性系统正常和各种具有先验故障知识的逆模型库,并基于多模型切换技术,使动态逆系统与实际对象的串联形成伪线性系统,考虑到实际中存在建模误差和未知扰动,对伪线性系统引入内模控制,从而构建了基于LS-SVM的逆系统多模型内模主动容错控制系统。系统实时运行时,基于系统性能指标的模型切换函数在线计算分析结果,判断系统运行处于正常或某种故障状态,进而切换至与被控对象模型匹配的逆系统模型,使其与系统的串联为一不变的伪线性系统,从而在控制参数不变的情况下快速可靠地实现系统主动容错控制。

## 2 逆系统多模型内模主动容错控制

### 2.1 控制方案

针对现有非线性主动容错控制系统,在应对系统故障时,常因其中的故障诊断(FDD)、辅助决策、以及容错重组重构机制等的快速性和可靠性不足,而导致容错失败的问题,考虑实际中,许多非线性系统对于常见可能发生的故障具有一定先验知识,文中提出了一种基于LS-SVM的逆系统多模型内模主动容错控制方案,其结构框图如图1所示,主要包括LS-SVM逆系统模型库、监控机制和基于逆系统方法的内模控制等模块。

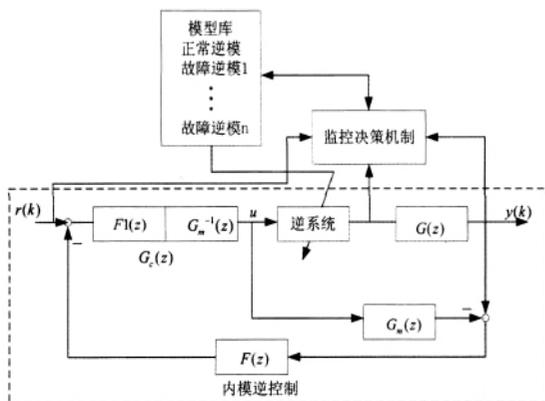


图1 系统结构框图

为了提高故障诊断及容错控制的快速性和可靠性,本文与传统主动容错控制的区别是该系统采用一个监控决策机制<sup>[10]</sup>取代了传统主动容错控制系统中的故障检测与诊断及相应的辅助决策子系统,从而能有效提高系统故障容错的快速性,而采用LS-SVM对被控系统进行逆建模能以很高的精度逼近被控系统逆模型,为系统故障容错的可靠性提供了保障。同时采用调节性好,鲁棒性强以及能消除不可测干扰

的内模控制器必将提高系统故障容错的可靠性。

逆模型库是监控决策机制进行在线监控指标计算分析决策的基础,监控机制依据指标切换函数最小原则,判断系统所处的运行模式,并进行与系统运行模式相匹配的逆模型切换,使系统始终保持与逆模型串联为不变的伪线性系统,在内模控制器参数无需调整的情况下快速可靠地实现系统故障的容错控制。

### 2.2 监控决策机制

监控决策机制是基于LS-SVM的逆系统多模型内模主动容错控制的核心,其功能是在每个采样时刻,根据指标切换函数计算结果,判断哪一个逆模型与被控对象串联后的输出最接近理想伪线性模型输出,即可决策切换调用相应的逆模型。

考虑到基于性能容忍度指标和模型失配度指标阈值的选取还缺乏相应的理论依据,本文仍以系统性能为出发点,采用如下具有积分性质的指标切换函数<sup>[12]</sup>

$$J_i(k) = \alpha e_i^2(k) + \beta \sum_{j=k-h+1}^{k-1} \exp(-\tau(k-j)) e_i^2(j)$$

式中  $\alpha \geq 0$   $\beta > 0$  为实常数,本文中分别取为0.90和0.85,分别决定当前误差和历史误差在性能指标中的权重,  $\tau > 0$  为遗忘因子为0.95,  $h$  为性能指标的误差记忆长度,  $e_i(k) = y_i(k) - r(k)$ ,  $r(k)$  为参考输入,  $y_i(k)$  为被控对象与第  $i$  个逆模型串联后的输出。

### 2.3 基于LS-SVM逆系统建模

考虑一般的单输入单输出非线性离散系统

$$\Sigma: y(k+1) = f[y(k), y(k-1), \dots, y(k-n), u(k), \mu(k-1), \dots, \mu(k-m)] \quad (1)$$

式中:  $u(k)$  为系统的输入,  $y(k)$  为系统的输出,  $m$  和  $n$  分别为系统的输入和输出阶次。

对于系统  $\Sigma$  的逆系统  $\Sigma^{-1}$ , 定义  $\varphi(k) = y(k+1)$  为一个新的输入,  $\varphi(k)$  一般选取参考轨迹, 取  $u(k)$  为逆系统的输出,  $\varphi(k)$  为参考输入,  $y(k)$  为逆系统的输入, 则逆系统的方程为

$$u(k) = g[\varphi(k), y(k), y(k-1), \dots, y(k-n), u(k-1), \dots, \mu(k-m)] \quad (2)$$

构造

$$Y(i) = [\varphi(i), y(i), y(i-1), \dots, y(i-n), u(i-1), \dots, \mu(i-m)]$$

其中:  $i = 1, 2, \dots, l$  为样本个数。

由于实际工程中被控对象的数学模型很难取,且得到的数学模型又很难求出  $u(k)$  显式方程,因此,通过输入输出数据辨识出逆系统的结构对逆系统方法的实现更有实用价值。在众多的建模方法中,LS-SVM因其能逼近任意非线性函数,且所需样本少、计算简单、收敛速度快、精度高,在函数估计和控制中得到广泛应用,为逆系统控制方法中构造逆系统模型提供了理论依据。因而本文采用LS-SVM为被控对象建立正常及有先验故障知识的逆模型。

考虑到被建模对象在特征空间中可表示为

$$u = \omega^T \Phi(Y) + b \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为权向量  $b$  为常数, 非线性映射  $\Phi(\cdot)$  将样本空间映射到高维特征空间, 再在高维特征空间中进行线性回归。

根据结构风险最小化原则, 求  $\omega, b$ , 使

$$\min R = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + cR_{emp} \quad (4)$$

式中:  $R$  为优化目标函数  $c$  为惩罚因子  $R_{emp}$  为不敏感损失函数, 选择不同的不敏感损失函数, 就可以构造不同的 SVM, 由于本文采用 LS-SVM, 所以不敏感损失函数采用松弛因子  $\xi_i$  的二次项。则优化问题变为

$$\min J(\omega, \xi) = \frac{1}{2} \omega^T \omega + c \sum_{i=1}^l \xi_i^2 \quad (5)$$

$$\text{s. t. } u_i = \omega^T \Phi(Y_i) + b + \xi_i, (i = 1, 2, \dots, l) \quad (6)$$

由拉格朗日法求解, 构造拉格朗日函数

$$L(\omega, b, \xi_i, \alpha) = \frac{1}{2} \omega^T \omega + c \sum_{i=1}^l \xi_i^2 - \sum_{i=1}^l \alpha_i (\omega^T \Phi(Y_i) + b + \xi_i - u_i) \quad (7)$$

式中:  $\alpha_i (i = 1, 2, \dots, l)$  为拉格朗日乘子。对  $L$  求  $\omega, b, \xi, \alpha$  的一次导数

$$\frac{\partial L}{\partial \omega} = 0, \frac{\partial L}{\partial b} = 0, \frac{\partial L}{\partial \xi} = 0, \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \quad (8)$$

定义核函数  $K(Y_i, Y_j) = \langle \Phi(Y_i) \cdot \Phi(Y_j) \rangle$  是满足 Mercer 条件的对称函数, 最后, 优化问题就转化为求解

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & k(Y_1, Y_1) + 1/c & \dots & k(Y_1, Y_l) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & k(Y_l, Y_1) & \dots & k(Y_l, Y_l) + 1/c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_l \end{bmatrix} \quad (9)$$

由此可得到非线性 (1) 的 LS-SVM 逆模型

$$u_j = g(Y_j) = \sum_{i=1}^l \alpha_i K(Y_j, Y_i) + b \quad (10)$$

## 2.4 内模控制器

通过 LS-SVM 对非线性被控对象进行逆建模, 并将其串联在被控对象之前, 复杂的非线性控制则会转化为一个伪线性系统控制问题。由于系统在逆建模过程中不可避免地存在建模误差, 加之各种未知干扰的影响, 对串联后的伪线性系统引入图 1 中具有良好鲁棒性的内模控制。其中鲁棒滤波器  $F_1(z)$  通常被用来降低系统的灵敏度,  $G_c(z)$  为控制器,  $G(z)$  为原系统, 内部模型  $G_m(z)$  是一个与伪线性系统匹配的理想线性系统,  $F(z)$  为反馈系统的滤波器,  $u(k)$  和  $y(k)$  分别是伪线性系统的输入和输出,  $r(k)$  为参考输入, 用以提高闭环系统的鲁棒性和跟踪能力。

## 3 仿真算例

### 3.1 不同运行模式下系统对象的逆模型建立

考虑如下非线性系统<sup>[8]</sup>

$$y(k+1) = ay(k) / (1 + y(k)^2) + bu(k) + cu(k)y(k) + d(k) \quad (11)$$

其中:  $a, b, c$  为系统参数,  $d(k)$  为未知外界扰动。

采用 2.3LS-SVM 逆建模方法对系统正常及具有先验知识故障 1、2、3 模式建模, 并假设以上模式下  $[a, b, c]$  取值分别为  $[1.00, 1.00, 1.00]$  及  $[0.80, 1.00, 0.60]$ 、 $[1.00, 0.70, 0.80]$ 、 $[1.10, 0.60, 0.70]$ 。由于各种状态下逆模型的建模方法相同, 这里只给出正常时 LS-SVM 逆模型辨识输出曲线  $u(k)$  及辨识误差曲线  $e(k)$  如图 2、3 所示。

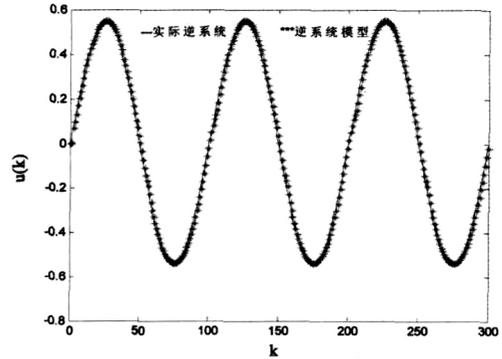


图 2 LS-SVM 逆模型辨识

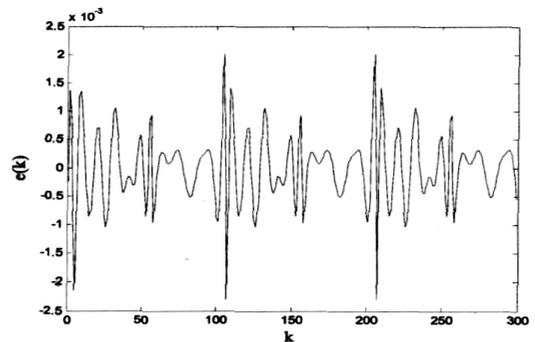


图 3 LS-SVM 逆模型辨识误差

可以看出, 基于 LS-SVM 建立的逆系统模型能很好地逼近逆系统。

### 3.2 内模控制器设计

对系统 (11) 不同模式建立 LS-SVM 逆模型, 并将其与被控对象串联形成具有一拍时延的单位伪线性系统, 依据文献 [8] 取内部模型  $G_m(z)$  为  $z^{-1}$ , 滤波器  $F_1(z) = 0.08 / (1 - 0.92z^{-1})$ , 内模控制器  $G_c(z) = F_1(z) G_m^{-1}(z) = zF_1(z)$ , 确保内模控制器  $G_c(z)$  正则。  $|F(z)| = 1$  被选为常矩阵,  $|F(z)| = 1$ , 闭环系统跟踪阶跃信号  $r(k) = 1$ 。

### 3.3 容错效果验证

为较全面地验证文中所述系统对故障容错的快速性和可靠性, 以下分 3 个组合在 MATLAB 软件下进行仿真分析。

1)  $d(t) = 0$ , 模型无失配, 系统由正常到故障再恢复正常, 此后系统连续发生不同故障。

假设系统开始正常, 在  $t = 3.5s$  时发生故障 1, 并在  $t = 7.0s$  时排除故障恢复正常, 之后在  $t = 10.5s, 14s$  发生故障 2、

3 系统输出响应曲线与模型切换曲线如图 4、5 所示。

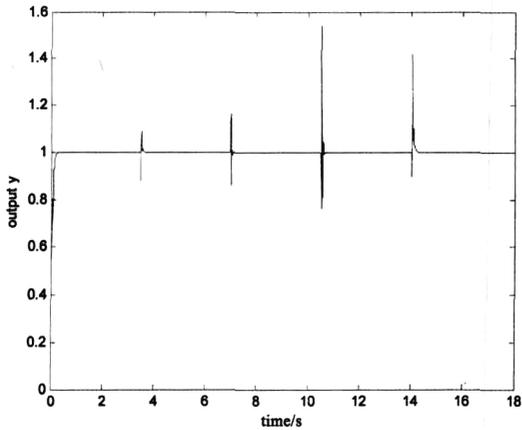


图 4 模型无失配时系统输出响应曲线

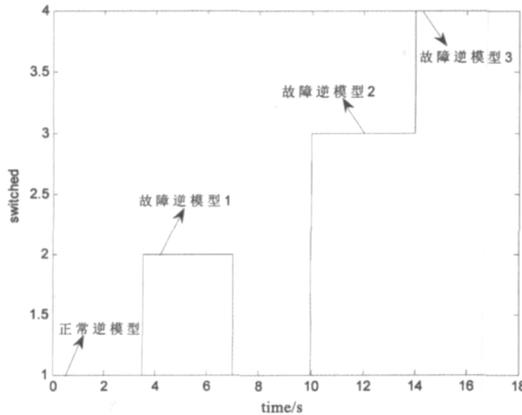


图 5 模型无失配时模型切换曲线

由图 4、图 5 可以看出,起初系统处于正常,当发生故障或恢复正常时,响应曲线都会产生波动,而当监控决策机制根据性能指标切换函数的计算,做出故障模式的正确判断,并快速可靠地完成模型切换后,响应曲线则随之恢复到期望值,实现了对故障的安全容错。

2)  $d(t) = 0$  模型失配,系统连续发生不同故障之后恢复正常。

假设系统正常及故障 1、2、3 时模型失配的  $[a \ b \ c]$  取值分别为  $[1.10 \ 1.08 \ 0.95]$  和  $[0.75 \ 1.00 \ 0.65]$ 、 $[1.03 \ 0.75 \ 0.74]$ 、 $[1.05 \ 0.65 \ 0.73]$ 。系统分别在  $t = 3.5s$ 、 $7.0s$  和  $10.5s$  发生故障 1、故障 2 和故障 3,系统输出响应曲线与模型切换曲线如图 6、7 所示。

由图 6、图 7 可以看出,即使系统模型失配,监控决策机制仍能对发生故障模式做出正确的判断,并快速可靠地完成模型切换,使系统响应曲线恢复到期望值,实现对故障的安全容错。

3)  $d(t) = 0.2$  模型无失配或失配,系统发生不同故障之后恢复正常。

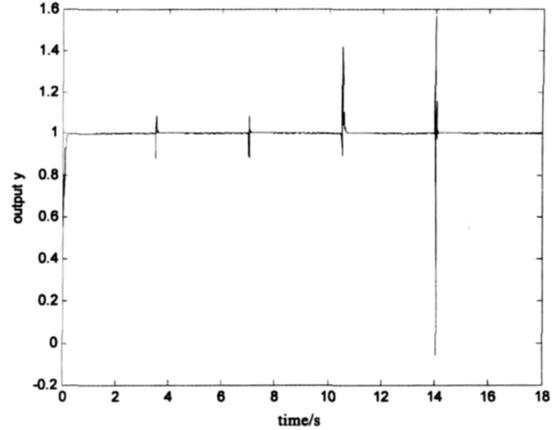


图 6 模型失配时系统输出响应曲线

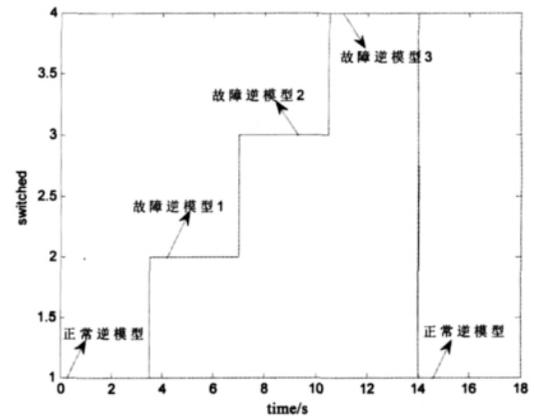


图 7 模型失配时模型切换曲线

假设系统开始正常,在  $t = 3.5s$  时出现扰动  $d = 0.2$ ;在  $t = 7.0s$  发生故障 1 且故障模型无失配,之后在  $t = 8.5s$  出现扰动  $d = 0.2$ ;在  $t = 10.5s$  系统发生故障 2 且故障模型有一定的失配,  $[a \ b \ c]$  取值为  $[1.03 \ 0.75 \ 0.74]$ ,同时出现扰动  $d = 0.2$ ,系统输出响应曲线与模型切换曲线如图 8、9 所示。

由图 8、图 9 可以看出,即使系统模型失配且存在外界扰动,监控决策机制仍能对发生故障模式做出正确判断,并通过模型切换实现对故障的安全容错,使系统响应曲线及时恢复到期望值。

综合以上仿真结果可以得出:

1) 当模型无失配,且无外界扰动时,无论系统从正常到故障再恢复正常,或连续发生不同故障,监控决策机制均会根据性能指标切换函数的计算,快速可靠地完成模型的正确切换和对故障的安全容错,说明文中所述方法对具有先验知识的故障容错是有效的。

2) 当模型存在失配,但无外界扰动时,即使系统连续发生不同故障,监控决策机制仍会根据性能指标切换函数的计算,正确地判断故障模式,并可靠地对连续故障的安全容错,

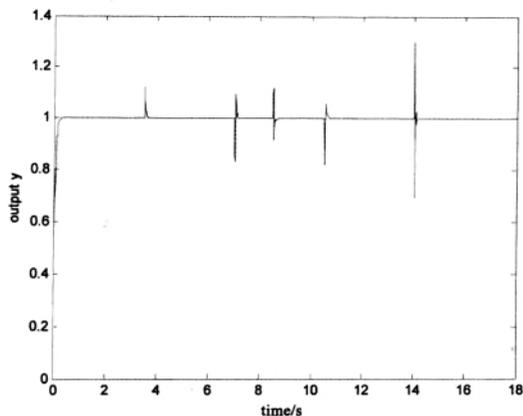


图8 存在扰动时系统输出响应曲线

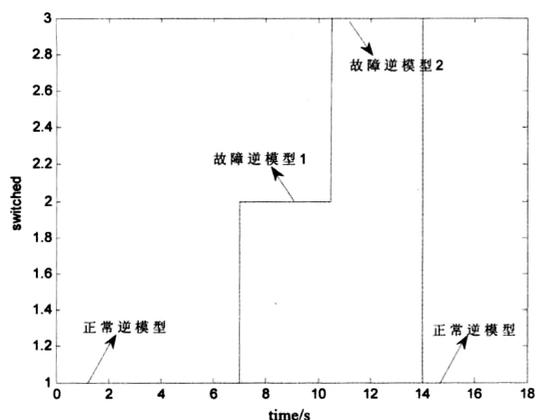


图9 存在扰动时模型切换曲线

说明文中所述逆系统内模容错控制方法对建模误差有良好的鲁棒性和对故障容错的可靠性。

3) 当模型无失配或失配,且存在外界扰动时,无论系统正常或发生故障,监控决策机制均能给出正确的判断,并通过模型切换对故障安全容错,揭示出逆系统内模容错控制对外界扰动和建模误差的不敏感性。

#### 4 结语

本文针对一类具有可能故障先验知识的非线性系统,提出了一种基于LS-SVM逆系统的多模型内模主动容错控制方法。系统实际运行时,依据性能指标函数最小原则,在线计算分析判断系统运行所处状态,进而切换至与被控对象模型最为匹配的逆系统模型,使其与系统的串联为一不变的伪线性系统,从而在控制器参数不变的情况下快速可靠地实现系统主动容错控制。基于多模型思想的逆模型切换提高了故障诊断与容错的快速性;将逆模型串联在被控对象前构成伪线性系统,实现了非线性控制问题的线性化;而内模容错控制则在对建模误差不敏感的同时有效抑制了扰动。仿真实验也进一步验证了文中所述方法对具有先验知识故障容

错的快速性和可靠性以及对未知外部扰动的鲁棒性。同时由于实际中,多数系统总可以根据以往的运行状况得出常见故障的先验知识,而依据这些故障信息则可建立故障系统的逆模型,应用本文的方法即可实现对已知故障的可靠容错。对未知故障容错将是下一步研究的工作。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Youmin, Jiang Jin. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems [J]. Annual Reviews in Control. 2008, 32(1): 229-252.
- [2] R J Patton, C Kanbhampti. Fault-tolerance as a key Requirement for the Control of Modern Systems [C]. Proc of IFAC/IMACS symposium on Fault Detection and Safety for Technical. Beijing, China, 2006. 26-35.
- [3] D Ufuk, K Feza. Fault Tolerant Control With Re-Configuring Sliding-Mode Schemes [J]. Turk J Elec Engin. 2005, 13(1): 175-187.
- [4] Z Weng, R J Patton, P Cui, Active fault tolerant control of a double inverted pendulum [J]. Systems and control engineering, 2007, 22(1): 895-904.
- [5] LYao, A P Wang. Design of a fault tolerant control scheme for two collaborative subsystems [J]. Systems and Control Engineering, 2005, 27(29): 875-883.
- [6] Jiang Bin, M Staroswiecki. Fault accommodation for nonlinear dynamic systems [J]. IEEE transactions on Automatic control, 2006, 51(9): 1578-1583.
- [7] 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆控制方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2005. 93-122.
- [8] 宋夫华. 基于支持向量机的逆系统方法的研究 [D]. 浙江大学信息科学与工程学院, 2006.
- [9] Gary G Yen and Pedro G DeLima. Improving the Performance of Globalized Dual Heuristic Programming for Fault Control Through an Online Learning Supervisor [J]. IEEE transactions on automation science engineering, 2005, 2(2): 121-131.
- [10] 李炜, 马克, 鲁保云. 一种基于BP网络的多模型预测主动容错控制方法 [J]. 甘肃科学学报, 2008, 20(2): 107-111.
- [11] 李炜, 鲁保云. 基于多模型切换的智能主动容错控制方法研究 [J]. 计算机仿真, 2008, 25(1): 328-343.
- [12] 翟军勇. 基于多模型切换的智能控制研究大论文 [D]. 东南大学研究生院, 2006.



#### [作者简介]

李炜(1963-),女(汉族),陕西西安人,教授,中国计算机用户协会仿真应用分会理事,《计算机仿真》编委,主要从事故障诊断与容错控制、工业过程先进控制研究;

程应峰(1977-),男(汉族),甘肃金昌人,硕士研究生,主要研究领域为故障诊断与容错控制研究;

许德智(1985-),男(汉族),江苏南通人,硕士研究生,主要研究领域为故障诊断与容错控制研究。