

文章编号: 1001-0920(2005)01-0017-06

## 多模型分层递阶自适应前馈解耦控制器

王 昕, 李少远

(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

**摘 要:** 针对参数跳变系统, 提出一种基于分层递阶结构的多模型自适应前馈解耦控制器。该控制器采用多模型方法来提高系统的暂态性能; 采用自适应方法消除系统的稳态误差, 采用分层递阶结构减少系统模型集的数量和计算时间。为了在分布式计算机集散控制系统(DCS)中得到应用, 该控制器根据耦合的形成机理和 DCS 的结构特点, 将系统变量之间的耦合作用视为可测干扰, 采用前馈结构予以消除。通过加权多项式的选取, 不仅实现了极点配置, 而且可以动态解耦。最后给出了全局收敛性分析。仿真结果表明, 与常规多模型控制方法相比, 大大减少了固定模型的数量; 而当模型数目相同时, 系统的暂态响应、解耦效果都大为改善。

**关键词:** 多模型; 分层递阶; 间接自适应; 前馈; 解耦

中图分类号: TP273

文献标识码: A

## Hierarchical multiple model adaptive feedforward decoupling controller

WANG Xin, LI Shao-yuan

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China. Correspondent: WANG Xin, E-mail: wangxin26@etang.com)

**Abstract** A hierarchical multiple model adaptive decoupling controller is designed for systems with jumping parameters. Multiple fixed models are adopted to improve the transient response. The adaptive methods are used to eliminate the steady state error and a hierarchical structure is employed. In the distributed control system (DCS), according to the principle of the interactions and the structure characteristic of DCS, the interaction of the system is viewed as measurable disturbance and eliminated using feedforward strategy. By the choice of the weighting polynomial matrix, it not only places the poles of the closed loop system arbitrarily, but also decouples the system dynamically. The global convergence is obtained. Compared with the convenient multiple models adaptive controller, it reduces the number of the fixed models greatly. If the same number of the fixed models is used, system transient response and decoupling result are improved.

**Key words:** multiple models; hierarchical; indirect adaptive control; feedforward; decoupling

### 1 引 言

随着我国经济的迅猛发展, 自动化总体水平稳步提高。为了提高控制系统的可靠性和生产过程的安全性, 工业界越来越多地采用基于分布式计算机的集散控制系统(DCS)。DCS 所使用的技术都是成熟的单回路控制算法, 因此对于复杂的多变量工业

过程, 必须进行解耦控制方法的研究。

解耦控制就是通过设计解耦补偿器, 将一个具有耦合的多输入多输出系统, 解耦成多个独立的单输入单输出系统<sup>[1]</sup>。因此, 解耦控制效果的好坏严格依赖于工业过程的精确数学模型。当外界干扰或系统自身缓慢变化等不确定性因素导致系统模型参数

收稿日期: 2004-04-05; 修回日期: 2004-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(60074004); 国家 863 计划项目(2002AA 412130); 中国博士后科学基金项目(20040350130)。

作者简介: 王昕(1972—), 男, 辽宁沈阳人, 博士后, 从事智能解耦控制、多模型自适应控制等研究; 李少远(1965—), 男, 河北枣强人, 教授, 博士生导师, 从事预测控制、模糊控制等研究。

发生变化时,可将过程的辨识与解耦控制相结合,设计多变量自适应解耦控制器<sup>[2]</sup>。但当被控系统工况变化范围大、生产边界条件变更频繁等导致系统参数发生大范围跳变时,常规自适应辨识算法的收敛速度无法得到令人满意的控制效果<sup>[3]</sup>。而在实际工业过程中,DCS 往往只能实现静态解耦或近似动态解耦。如何提高DCS 的暂态性能,减少DCS 的过渡过程时间,以提高参数跳变系统的解耦效果,进而满足越来越高的控制精度的要求是当前解耦控制的一个难题。多模型控制理论为上述问题的解决提供了思路。

多模型控制方法将系统的参数变化区域分成多个子区域,在每个区域内设计初值不同的自适应模型,任一时间多个模型同时进行辨识,按切换准则选取最优模型设计控制器<sup>[4]</sup>。但由于一段时间以后多个自适应模型收敛到同一邻域而难以改善参数跳变系统的暂态响应<sup>[5]</sup>。文献[6]采用多个固定模型与两个自适应模型相结合的方法解决上述问题;文献[7]将以上结果推广到离散时间系统。但上述方法都是针对单输入单输出系统。为此,文献[8~10]设计了多模型自适应解耦控制器,采用闭环解耦方法解决最小相位、非最小相位和非线性系统的解耦问题。

在多模型控制器的设计过程中,为了提高系统的暂态性能,必须构造大量的固定模型来覆盖系统跳变参数的可能变化范围。例如文献[11]在仿真实验中,当仅有一个系统参数发生跳变时,亦需采用300多个固定模型覆盖其变化范围。而这势必大大增加DCS 的计算量,导致DCS 的硬件成本上升,甚至会影响离散时间控制系统采样周期的选择,阻碍了多模型控制器在实际工业过程中的应用。所以模型集的优化问题是困扰多模型控制器在实际中应用的主要问题。为了减少模型集的巨大数目,文献[12]采用Localization 技术动态精简系统的待选模型集;文献[13]采用Moving Bank 方法动态调节参数模型集的中心以覆盖系统的最优估计参数。但上述方法仅仅减少部分固定模型,没有从根本上降低固定模型的数量。文献[14]引入分层递阶结构,采用动态覆盖、逐层搜索的寻优策略,可有效地降低模型集的数目。该方法采用极点配置方法实现闭环解耦控制,并没有根据DCS 的结构特点和耦合的形成机理设计出适于DCS 使用的解耦器。

本文提出一种基于分层递阶结构的多模型自适应前馈解耦控制器。该控制器采用多模型方法来提高系统的暂态性能;采用分层递阶结构实现对系统跳变参数的可能变化范围的覆盖,可大大减少系统模型集的数量。该方法根据耦合的形成机理和DCS

的结构特点,将系统变量之间的耦合作用视为可测干扰,采用前馈结构予以消除。通过加权多项式的选取,不仅实现极点配置,而且可以动态解耦。虽然间接自适应方法会增加部分计算量,但可以得到各工况下系统参数的变化范围,便于现场工程技术人员进行维护和优化。

## 2 被控系统描述

设多输入多输出离散时间系统用DARMA 模型

$$A(t, z^{-1})y(t) = B(t, z^{-1})u(t-k) + d(t) \quad (1)$$

描述。式中:  $u(t)$  和  $y(t)$  分别为  $n$  维输入、输出向量;  $d(t)$  为系统对于零输入产生的  $n$  维稳态输出向量;  $k$  为系统的传输时延;  $A(t, z^{-1})$  和  $B(t, z^{-1})$  为单位后移算子  $z^{-1}$  的矩阵多项式,其系数矩阵是时间  $t$  的函数,具有如下形式:

$$A(t, z^{-1}) = I + A_1(t)z^{-1} + \dots + A_{n_a}(t)z^{-n_a}, \quad (2)$$

$$B(t, z^{-1}) = B_0(t) + B_1(t)z^{-1} + \dots + B_{n_b}(t)z^{-n_b}, \quad (3)$$

且  $B_0(t)$  非奇异,  $\forall t$ 。因为总可以通过适当的矩阵变换,如左乘  $A(t, z^{-1})$  的伴随矩阵,将  $A(t, z^{-1})$  化为对角形多项式矩阵,因此这里假设  $A(t, z^{-1})$  为对角形多项式矩阵而不失一般性。

系统满足如下假设:

**假设1** 系统为含跳变参数的时变系统,同时假设相邻跳变时间间隔足够长,系统在此期间内参数保持不变;

**假设2**  $t$  变化时,  $A(t, z^{-1}), B(t, z^{-1})$  构成的参数矩阵在一紧集  $\Sigma$  中变化;

**假设3**  $A(t, z^{-1}), B(t, z^{-1})$  的阶次上限  $n_a, n_b$  和时延  $k$  已知;

**假设4** 系统是最小相位系统

对于多变量系统,输入  $u_i(t)$  的变化会引起其他通道的输出  $y_j(t)$  ( $j \neq i$ ) 发生变化,因此相对于其他通道,  $u_i(t)$  的变化可以被视为干扰,而且是精确已知的干扰,可采用前馈补偿方法予以消除,实现解耦控制。式(1)可写成

$$A(t, z^{-1})y(t) = \overline{B}(t, z^{-1})u(t-k) + \overline{B}(t, z^{-1})u(t-k) + d(t). \quad (4)$$

式中:  $\overline{B}(t, z^{-1}) = \overline{B}(t, z^{-1}) + \overline{B}(t, z^{-1}), \overline{B}(t, z^{-1}) = \text{diag}[B_{ii}(t, z^{-1})]$  为对角形多项式矩阵,且满足  $\overline{B}_0(t)$  非奇异,  $\forall t, \overline{B}(t, z^{-1}) = (\overline{B}_{ij}(t, z^{-1}))$ , 且  $\overline{B}_{ii}(t, z^{-1}) = 0, i = 1, 2, \dots, n$ 。

由假设1可知,  $A_i(t), \overline{B}_j(t), B_j(t)$  为分段常值

矩阵,  $d(t)$  为分段常值向量 因此, 在相邻跳变时间间隔内, 系统(4) 可写成时不变形式

$$A(z^{-1})y(t) = \bar{B}(z^{-1})u(t-k) + B(z^{-1})u(t-k) + d \quad (5)$$

而不失一般性 下面针对式(5) 进行讨论

### 3 多模型集的建立

多模型控制方法将系统的参数变化区域分成多个不同的子区域, 在每个区域内设计一个参数固定不变模型来提高系统的暂态响应 为了消除系统的稳态误差, 加快辨识算法的收敛速度, 再添加常规自适应模型与可重新赋值的自适应模型一起构成多模型集 任一采样时刻基于切换准则选出最优模型, 并据此设计控制器, 实现解耦控制

#### 3.1 固定模型集的建立

##### 3.1.1 分层递阶结构设计原理

本文采用分层递阶结构的固定参数模型集 首先将系统的参数变化区域分成几个子区域, 在每个区域内设计固定参数模型, 根据切换准则选出本层的最优模型; 然后根据所选模型的参数变化范围, 动态设计下一层模型子集, 直到最后一层得到最优固定模型 这种每层动态覆盖, 逐层渐进寻优的分层递阶结构可大大减少模型的数目, 其原理如下:

- 1) 根据先验知识构造第 1 层  $m_1$  个不同的固定参数模型覆盖系统参数的可能变化范围, 然后根据切换准则选出第 1 层最优固定参数模型  $j_1$ ;
- 2) 根据第 1 层最优模型  $j_1$  动态构造第 2 层  $m_2$  个不同的固定参数模型覆盖最优模型  $j_1$  的参数变化范围, 根据切换准则选出第 2 层最优固定参数模型  $j_2$ ;
- 3) 依此类推, 直到选出最后一层第  $l$  层最优固定参数模型  $j_l$

##### 3.1.2 分层递阶结构设计原则

对于实际的工业过程, 出于对算法可靠性、理解性、现场维护以及控制精度等多方面的考虑, 层数并不是越多越好 按照设计的目的, 整体结构可分为工作点定位级、控制模型定位级和最优模型级

1) 工作点定位级: 将实际工业过程可能运行的各种工况, 每个工况的各个工作点模型汇集起来构成工作点定位级, 用于定位当前的运行工况及所在工作点 如果工况多变、工作点众多, 可进一步分成工况定位级和工作点定位级

2) 控制模型定位级: 该级的主要目的是提高系统的暂态性能, 快速定位控制器模型所在的区域 该级完全由固定模型组成, 一般分为 2 或 3 层即可满足控制精度

3) 最优模型级: 为了逼近控制器参数的真值, 消除系统的稳态误差, 在最优模型级中添加了自适应模型和可重新赋值的自适应模型 一般情况下, 为了减少模型集的层数, 常将该级与控制模型定位级的最后一层合并

#### 3.1.3 第 1 层固定参数多模型集的建立

定义 1 由矩阵多项式  $A(z^{-1}), \bar{B}(z^{-1}), B(z^{-1}), d$  的各系数矩阵构成的矩阵  $\Phi$  称为系统参数模型  $\Phi(t)$  所有取值构成的集合称为系统参数模型集, 记作  $\Sigma$

根据先验知识, 将第 1 层系统参数模型集分为  $m_1$  个模型子集  $\Sigma_{1,s}, s = 1, \dots, m_1$ , 且  $\Sigma$  满足:

性质 1  $\Sigma \supseteq \bigcup_{s=1}^{m_1} \Sigma_{1,s}$  非空,  $s = 1, \dots, m_1$ ;

性质 2  $\forall \Phi_{1,s} \in \Sigma_{1,s}, \exists \Phi_{1,s}^c \in \Sigma_{1,s}$  和  $0 < r_{1,s} < \infty$ , 满足  $\Phi_{1,s} - \Phi_{1,s}^c \leq r_{1,s}$ , 称  $\Phi_{1,s}^c$  为模型子集  $\Sigma_{1,s}$  的中心,  $r_{1,s}$  为半径, 其存在性由假设 2 保证

由性质 1 和性质 2 知, 系统参数模型集  $\Sigma$  被第 1 层  $m_1$  个模型子集  $\Sigma_{1,s}$  完全覆盖, 每个模型子集被其中中心  $\Phi_{1,s}^c$  及邻域完全覆盖 因此, 可采用各模型子集的中心  $\Phi_{1,s}^c$  构成系统参数已知的固定模型集

#### 3.1.4 第 $i+1$ 层动态多模型集的建立

设第  $i$  层得到的最优模型为第  $j_i$  个模型  $\Phi_{i,j_i}$ , 其代表的模型子集为  $\Sigma_{i,j_i}$  模型  $\Phi$  可表示成

$$\Phi_{i,j_i} = f(p_{1,i}, p_{2,i}, \dots, p_{n_i,i}) \quad (6)$$

式中:  $p_{1,i}, p_{2,i}, \dots, p_{k,i}, \dots, p_{n_i,i}$  为系统变化参数 下面介绍第  $i+1$  层动态多模型集的建立过程:

1) 确定第  $i$  层得到的最优模型  $\Phi_{i,j_i}$  中系统变化参数  $p_{1,i}, \dots, p_{k,i}, \dots, p_{n_i,i}$  的变化区间, 即确定  $p_k$   $[p_{k-low}, p_{k-high}], k \in [1, n_i]$ ;

2) 将系统参数变化区间线性等分为  $m_{i+1}$  段, 则  $p_k$  参数第  $h$  段表示为

$$p_{k,h} = p_{k-low} + h \frac{p_{k-high} - p_{k-low}}{m_{i+1}}; \quad (7)$$

3) 将  $p_{1,i}, \dots, p_{k,i}, \dots, p_{n_i,i}$  的第  $h$  段参数表示合成为第  $i+1$  层的第  $h$  个固定参数模型  $\Phi_{i+1,h}$ , 即  $\Phi_{i+1,h} = f(p_{1,i,h}, \dots, p_{k,i,h}, \dots, p_{n_i,i,h})$ ;

4) 将所有  $m_{i+1}$  个固定参数模型  $\Phi_{i+1,1}, \dots, \Phi_{i+1,m_{i+1}}$  合成为第  $i+1$  层动态固定参数模型集, 用来覆盖第  $i$  层模型子集  $\Sigma_{i,j_i}$

显然, 动态构成的固定参数模型集满足:

$$1) \Sigma_{i+1} \supseteq \bigcup_{s=1}^{m_{i+1}} \Sigma_{i+1,s} \text{ 非空, } s = 1, \dots, m_{i+1};$$

2)  $\forall \Phi_{i+1,s} \sum_{s=1, \dots, m_{i+1}}, \exists 0 < r_{i+1,s} < r_{i,s}$ , 满足  $\Phi_{i+1,s} \subset \Phi_{i+1,s}$ , 称  $\Phi_{i+1,s}$  为模型子集  $\Sigma_{i+1,s}$  的中心,  $r_{i+1,s}$  为半径, 其存在性由假设 2 保证

依此类推, 便可动态建立参数模型直到第  $l$  层从而得到基于分层递阶结构的系统参数模型集

定义 2 第  $i$  层多模型集由  $m_i$  个参数已知的固定模型  $\Phi_{i,s} (s = 1, \dots, m_i; i = 1, \dots, l)$  构成 最后一层第  $l+1$  层由第  $l$  层最优模型  $\Phi_{l,j_l}$  (设为  $\Phi_{l+1,1}$ ) 和自适应模型  $\Phi_{l+1,2}$  及可重新赋值的自适应模型  $\Phi_{l+1,3}$  构成

### 3.2 自适应模型

对于自适应模型, 定义  $n(n_a + n_b + 1) + 1$  维数据向量  $X(t-1)$  和  $[n(n_a + n_b + 1) + 1] \times n$  的系统参数矩阵  $\Theta$  为

$$X(t-1) = [-y(t-1)^T, \dots; u(t-k)^T; \dots; 1]^T, \quad (8)$$

$$\Theta = [\theta_1, \dots, \theta_n] = [A_1, \dots; B_0, \dots; d]^T, \quad (9)$$

$$\theta_i = [a_{i1}, \dots; b_{i1}^0, \dots; d_i]^T, i = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

当系统的参数未知时, 采用如下辨识算法:

$$y(t) = -A(z^{-1})y(t-1) + B(z^{-1})u(t-k) + d, \quad (11)$$

$$\hat{\theta}_i(t) = \hat{\theta}_i(t-1) + \frac{a(t) \cdot X(t-1)}{1 + X(t-1)^T X(t-1)} \times [y_i(t)^T - X(t-1)^T \hat{\theta}_i(t-1)] \quad (12)$$

式中:  $a(t)$  为一变化的实数, 它的作用是保证可从式(12)中求出系统的最优控制输入  $u(t)$  [15]. 当  $u(t)$  的系数矩阵奇异时, 改变  $a(t)$  的值可由式(12)重新求出  $\hat{\theta}_i(t)$ .  $a(t)$  的变化范围为  $\sigma < a(t) < 2 - \sigma, 0 < \sigma < 1$ .

### 3.3 可重新赋值的自适应模型

根据切换准则, 当该模型为最优模型 ( $j_{l+1} = 3$ ) 时, 采用式(12)进行辨识, 否则对  $\hat{\theta}_{l+1,3}(t)$  重新赋初值为最优控制器参数, 即  $\hat{\theta}_{l+1,3}^{\ominus} = \hat{\theta}_{l+1,j_{l+1}}$ .

### 3.4 切换准则

对于第  $i (i = 1, 2, \dots, l+1)$  层多模型集, 采用如下切换准则:

$$J_{i,s} = \frac{e_{i,s}(t)^2}{1 + X(t-1)^T X(t-1)} \quad (13)$$

式中:  $X(t)$  为数据向量;  $e_{i,s}(t) = y(t) - y_{i,s}(t)$  为第  $i$  层多模型集中第  $s$  个模型的输出误差向量;  $y(t) = \Theta_0^T X(t-1)$  为系统输出;  $\Theta_0$  为系统参数真值;  $y_{i,s}(t) = \Theta_{i,s}^T X(t-1)$  为第  $i$  层多模型集中第  $s$  个模型的输出,  $s = 1, \dots, m_i$ ; 最后一层第  $l+1$  层多模型集采用相同

的切换准则, 但  $s = 1, 2, 3$

令  $j_i = \arg \min_{i,s} (J_{i,s}), s = 1, \dots, m_i; i = 1, \dots, l$  选取  $\Theta_{j_i}$  为第  $i$  层当前最优模型 对于最后一层第  $l+1$  层, 令  $j_{l+1} = \arg \min_{i,s} (J_{i,s}), s = 1, 2, 3$  选取  $j_{l+1}$  作为系统最优模型

## 4 自适应解耦控制器设计

设性能指标为

$$J_c = P(z^{-1})y(t+k) - R(z^{-1})w(t) + Q(z^{-1})u(t) + S(z^{-1})u(t) + r^2. \quad (14)$$

式中:  $w(t)$  为已知系统参考输入;  $P(z^{-1}), Q(z^{-1}), R(z^{-1})$  为对角形加权多项式矩阵;  $r$  为加权向量;  $Q(z^{-1})$  对控制量  $u(t)$  加权;  $S(z^{-1})$  用来对被视为可测干扰的耦合作用  $u(t)$  加权

引入 Diophantine 方程

$$P(z^{-1}) = F(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-k}G(z^{-1}), \quad (15)$$

令其阶次分别为

$$n_f = k - 1, n_g = n_a - 1. \quad (16)$$

则式(15)可解且有唯一解  $F(z^{-1}), G(z^{-1})$  存在 用  $F(z^{-1})$  左乘式(5), 由 Diophantine 方程(15)和性能指标(14), 为使  $J_c$  最小, 可得最优控制律为

$$G(z^{-1})y(t) + H(z^{-1})u(t) + H_2(z^{-1})u(t) + \bar{r} = R(z^{-1})w(t). \quad (17)$$

式中

$$H(z^{-1}) = F(z^{-1})\bar{B}(z^{-1}) + Q(z^{-1}), \quad (18)$$

$$H_2(z^{-1}) = F(z^{-1})\bar{B}(z^{-1}) + S(z^{-1}), \quad (19)$$

$$\bar{r} = Fd + r. \quad (20)$$

为了消除耦合作用的影响, 联立式(5)和(17), 得

$$[P(z^{-1})\bar{B}(z^{-1}) + Q(z^{-1})A(z^{-1})]y(t+k) = \bar{B}(z^{-1})R(z^{-1})w(t) + [Q(z^{-1})d - \bar{B}(z^{-1})r] + [Q(z^{-1})\bar{B}(z^{-1}) - \bar{B}(z^{-1})S(z^{-1})]u(t). \quad (21)$$

式中的  $u(t)$  作为系统耦合作用被视为可测干扰, 可通过加权多项式矩阵的选择予以消除 令

$$Q(z^{-1}) = R\bar{B}(z^{-1}), \quad (22)$$

$$S(z^{-1}) = R\bar{B}(z^{-1}). \quad (23)$$

式中  $R_1$  为定常对角形矩阵 考虑到  $P(z^{-1}), Q(z^{-1}), R(z^{-1}), \bar{B}(z^{-1}), A(z^{-1})$  均为对角形矩阵, 则式(21)变为  $[P(z^{-1}) + R_1A(z^{-1})]y(t+k) = R(z^{-1})w(t) + R_1d - r$  由此可知, 通过  $Q(z^{-1}), S(z^{-1})$  的选取, 消除了系统的耦合作用, 实现了动态解耦 同样, 为了消除稳态误差和  $d$  的影响, 实现极点配置, 可令  $P(z^{-1}) + R_1A(z^{-1}) = T(z^{-1}), R(z^{-1}) = T(1), r = R_1d$  其中  $T(z^{-1}) = T_0 + T_1z^{-1} + \dots + T_nz^{-n}$  为稳

定的对角形多项式矩阵, 其零点为期望的闭环系统极点, 满足  $n_p = n_a, n_i < n_a, n_p, n_i$  分别为  $P(z^{-1}), T(z^{-1})$  的阶次 因此, 由式(17) 可得最优控制律为

$$G(z^{-1})y(t) + \bar{H}(z^{-1})u(t) + \bar{r} = R(z^{-1})w(t), \tag{24}$$

式中  $\bar{H}(z^{-1}) = H(z^{-1}) + H_2(z^{-1})$ .

### 5 全局收敛性分析

多模型自适应解耦控制算法的全局收敛性由如下定理给出:

**定理 1** 在上述假设条件 1~ 假设条件 4 下, 多模型自适应解耦控制算法作用于系统(5) 时,  $\{y(t)\}$  和  $\{u(t)\}$  有界且  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$

证明 1) 当  $e_{i+1,1}(t) = 0$  时, 意味着参数已知的固定模型无法保证被控系统的收敛性 令  $\epsilon(t) = \min_{i+1,1} |e_{i+1,1}(t)|$  表示采用固定模型时导致的最小误差

对于自适应模型, 由式(11), (12) 构成的自适应控制算法, 有<sup>[15]</sup>

$$\lim_t \frac{e_{i+1,2}^2(t)}{1 + X(t-1)^T X(t-1)} = 0 \tag{25}$$

由式(25) 知, 自适应模型具有性能收敛能力, 则一定存在时间  $t_s$ , 满足当  $t_s < t$  时, 有

$$\frac{e_{i+1,2}^2(t)}{1 + X(t-1)^T X(t-1)} < \frac{\epsilon_i^2(t)}{1 + X(t-1)^T X(t-1)}, \quad i = 1, \dots, n$$

此后, 控制器便在两个自适应控制器之间进行切换 由切换准则(13) 可知, 系统的输出误差满足

$$0 < \frac{e_i(t)^2}{1 + X(t-1)^T X(t-1)} < \frac{e_{i+1,2}^2(t)}{1 + X(t-1)^T X(t-1)}$$

则由式(25), 由夹逼准则可知

$$\lim_t \frac{e_i(t)^2}{1 + X(t-1)^T X(t-1)} = 0, \quad i = 1, \dots, n$$

又由于系统为最小相位系统, 且  $w(t)$  有界, 由文献[15] 有

$$\begin{aligned} |u_i(t-k)| & \leq K_5 + K_6 \max_{\tau, t, 1, j, n} |e_j(\tau)|, \\ 0 & < K_5 < \infty, 0 < K_6 < \infty, \\ & 1 \leq t \leq N, i = 1, \dots, n; \\ |y_i(t)| & \leq K_3 + K_4 \max_{\tau, t, 1, j, n} |e_j(\tau)|, \\ 0 & < K_3 < \infty, 0 < K_4 < \infty, \\ & 1 \leq t \leq N, i = 1, \dots, n; \end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned} |u_i(t-k)| & \leq K_5 + K_6 \max_{\tau, t, 1, j, n} |e_j(\tau)|, \\ 0 & < K_5 < \infty, 0 < K_6 < \infty, \\ & 1 \leq t \leq N, i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

由文献[15] 中的引理 1 知,  $\{y(t)\}$  和  $\{u(t)\}$  有界且  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$

2) 当  $e_{i+1,1}(t) = 0$  时, 意味着固定模型的控制器参数  $\Theta_{i+1,1}$  等于控制器参数的真值  $\Theta_0$  或  $\Theta_{i+1,1} - \Theta_0$  与数据向量  $X(t-1)$  正交 由式(13) 知, 此时切换指标  $J_{i+1,1} = 0$  最小, 则  $\forall t$ , 有  $j_{t+1} = 1$ ,  $\Theta_{i+1,1}$  被选为当前控制器参数 于是, 多模型控制器便退化成一固定模型控制器

因为系统为最小相位系统, 且  $w(t)$  有界, 同理由文献[15] 有

$$\begin{aligned} |y_i(t)| & \leq K_7 + K_8 \max_{\tau, t, 1, j, n} |e_j(\tau)|, \\ 0 & < K_7 < \infty, 0 < K_8 < \infty, \\ & 1 \leq t \leq N, i = 1, \dots, n; \\ |u_i(t-k)| & \leq K_9 + K_{10} \max_{\tau, t, 1, j, n} |e_j(\tau)|, \\ 0 & < K_9 < \infty, 0 < K_{10} < \infty, \\ & 1 \leq t \leq N, i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

由于  $e_i(t) = 0$ , 则  $\{y(t)\}$  和  $\{u(t)\}$  有界且  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$

综合 1) 和 2), 得证  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$

### 6 仿真研究

多变量被控系统为

$$\begin{aligned} (I + A_1 z^{-1} + A_2 z^{-2})y(t) & = \\ (B_0 + B_1 z^{-1})u(t-2) + d \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned} A_1 & = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 5 \\ 0 & 5 & 0 & 2 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 03 & 0 & 04 \\ 0 & 04 & 0 & 03 \end{bmatrix}, \\ B_0 & = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 10 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 3 \\ 0 & 3 & 0 & 2 \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} 0 & 7 \\ 1 & 5 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

参考输入  $w_1$  是幅值为 50 的方波,  $w_2$  是幅值为 20 的方波, 两个方波不完全同步, 用以检测系统的解耦效果 当  $t = 50$  步时,  $b_{11}^0$  由 1 跳变至 0.125; 当  $t = 85$  步时,  $b_{11}^0$  由 0.125 跳变至 9.888 这里采用  $[0, 10]$  作为参数  $b_{11}^0$  的变化区间, 而对其他参数采用自适应方法 多模型中的两个自适应模型都采用相同的距离真值很近的初值 为了比较常规多模型自适应控制器与基于分层递阶结构的多模型自适应控制器, 本文采用 3 层, 每层 10 个模型的分层递阶结构, 可以覆盖 1 000 个固定模型(见图 1). 常规多模型自适应控制器分别采用 30 和 1 000 个固定模型 30 个模型代表与分层递阶结构的模型集总数相同(见图 2),

1 000 个模型代表与分层递阶结构所覆盖的模型集总数相同(见图 3).

从仿真结果可以看出,随着模型数目的增加,系统的暂态响应越来越好,但计算量也越来越大.图 1 为采用分层递阶结构的多模型自适应控制方法,其控制效果接近于图 3 采用 1 000 个固定模型的常规多模型控制方法,明显优于图 2 采用 30 个固定模型时的常规多模型控制方法.但模型数目却仅为 30 个,计算量与图 2 相同(见图 4).

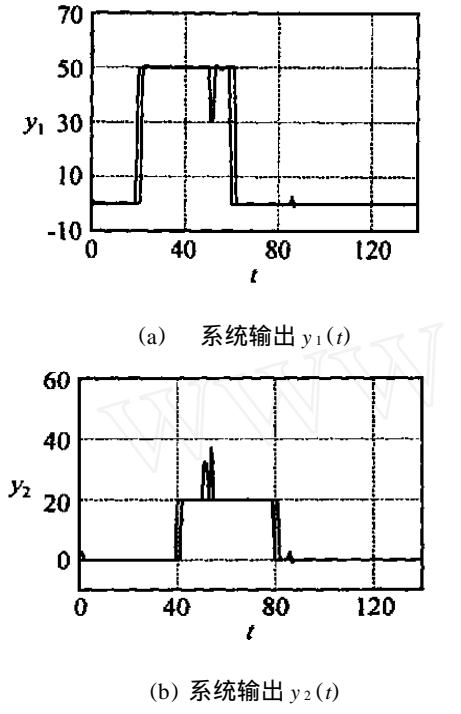


图 1 分层递阶多模型控制器的仿真结果

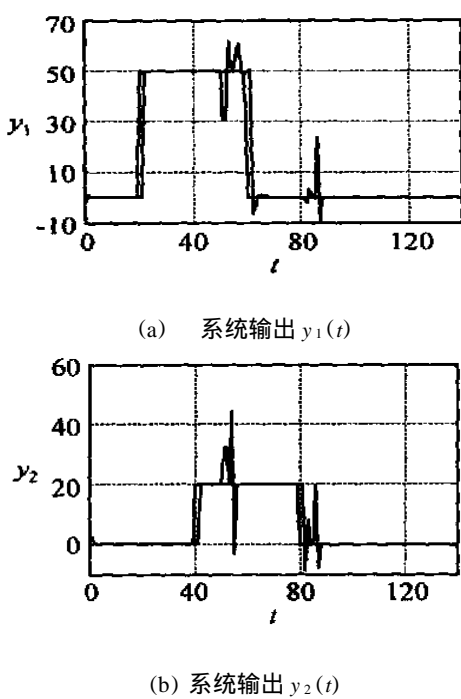
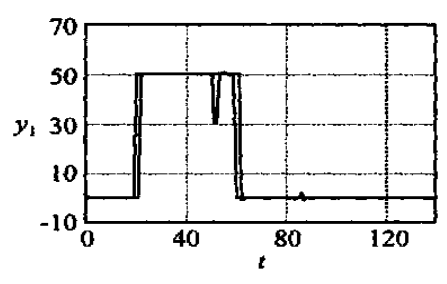
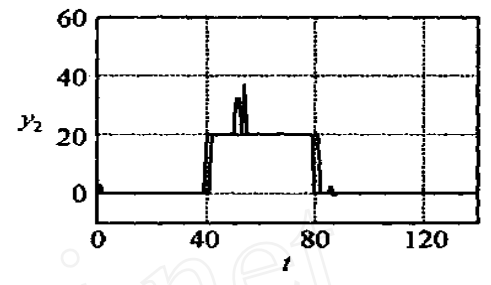


图 2 32 个模型的常规多模型控制器仿真结果



(a) 系统输出  $y_1(t)$



(b) 系统输出  $y_2(t)$

图 3 1002 个模型的多模型控制器仿真结果

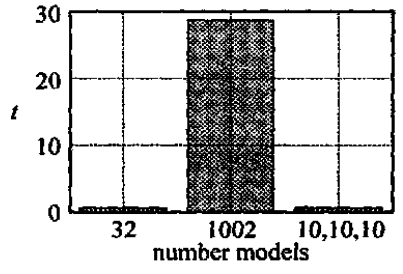


图 4 模型数量不同的多模型控制器计算时间

### 7 结 论

本文提出了一种基于分层递阶结构的多模型直接自适应前馈解耦控制器.系统的耦合作用被视为可测干扰,采用前馈方法予以消除,不仅实现了极点配置,而且可以动态解耦.该控制器采用分层递阶结构,动态构建各层模型子集覆盖上一层最优模型的参数变化范围.与常规多模型控制器相比,不但大大减少了模型数量,而且得到了良好的控制效果.

### 参考文献 (References)

- [1] 曹永岩,毛维杰,孙维贤,等.现代控制理论的工程应用[M].浙江:浙江大学出版社,2000.
- [2] 柴天佑.多变量自适应解耦控制及应用[M].北京:科学出版社,2001.
- [3] Wittenmark B, Astrom K J. Practical issues in the implementation of self-tuning control[J]. Automatica, 1984, 20(5): 595-605.
- [4] Narendra K S, Drölet O A, Feilevr M, et al. Adaptive control using multiple models, switching and tuning [J]. Int J of Adaptive Control and Signal Processing, 2003, 17(2): 87-102.

(下转第 54 页)

控制的同步方法都能使主、从系统在较短的时间内进入同步状态。这说明本文所述方法不仅是有效的,而且具有较高的同步效率。

## 5 结 语

本文基于开环-闭环控制法提出了一种新的离散动力系统同步方法,并从理论上严格论证了该方法的鲁棒性。借助于数字模拟展示了该方法具有较高的同步效率,也验证了其良好的适用性:1)既可以实现两个混沌系统间的同步,又可以实现混沌系统与非混沌系统的同步;2)既可以实现同类系统间的同步,又可以实现异类系统间的同步。因此,该方法必将具有广阔的应用前景。

## 参考文献(References)

- [1] Peng J P, Ding E J, Ding M, et al. Synchronizing hyperchaos with a scalar transmitted signal [J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(2): 904-907.
- [2] Kocarev L, Parlitz U. Generalized synchronization, predictable, and equivalence of unidirectionally coupled dynamical systems [J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(3): 1816-1819.
- [3] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization of chaotic systems [J]. *Physical Review Letters*, 1990, 64(2): 821-824.
- [4] Viera M d S, Lichtenberg A J, Lieberman M A. Synchronization of regular and chaotic systems [J]. *Physics Review A*, 1992, 46(12): 7359-7362.
- [5] Cuomo KM, Oppenheim A V. Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications [J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(7): 65-68.
- [6] Ömer Morgül. On the synchronization of logistic maps [J]. *Physics Review A*, 1998, 247(10): 391-396.
- [7] Jackson E A, Grosu I. An open-plus-closed-loop (opcl) control of complex dynamical systems [J]. *Physica D*, 1995, 85(1): 1-9.
- [8] Chen LiQun. An open-plus-closed control for discrete chaos and hyperchaos [J]. *Physics Letters A*, 2001, 281(4): 327-333.
- [9] 岳毅宏, 韩文秀. 基于有限外力扰动的OGY控制法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2003, 25(1): 61-64. (Yue Y H, Han W X. OGY control method based on bounded outer-force perturbation [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(1): 61-64.)
- [5] Narendra K S, Balakrishnan J. Improving transient response of adaptive control systems using multiple models and switching [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, 39(9): 1861-1866.
- [6] Narendra K S, Balakrishnan J. Adaptive control using multiple models [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(2): 171-187.
- [7] Narendra K S, Xiang C. Adaptive control of discrete-time systems using multiple models [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(9): 1669-1686.
- [8] 王昕, 岳恒, 柴天佑, 等. 基于多模型切换的多变量直接自适应极点配置控制器 [J]. *控制理论与应用*, 2001, 18(增刊): 23-27. (Wang X, Yue H, Chai T Y, et al. Multivariable direct adaptive pole placement controller using multiple models [J]. *Control Theory and Application*, 2001, 18(S): 23-27.)
- [9] 王昕, 岳恒, 柴天佑. 一类非最小相位系统的多变量多模型解耦控制器 [J]. *控制与决策*, 2003, 18(1): 7-13. (Wang X, Yue H, Chai T Y. Multivariable Decoupling Controller Using Multiple Models for a non-minimum phase system [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(1): 7-12.)
- [10] 王昕, 李少远, 岳恒. 一类非线性系统的多模型神经网络解耦控制器 [J]. *控制与决策*, 2004, 19(4): 424-428. (Wang X, Li S Y, Yue H. Multiple Models Neural Network Decoupling Controller For a Nonlinear System [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(4): 424-428.)
- [11] Narendra K S, Balakrishnan J, Ciliz M K. Adaptation and learning using multiple models, switching, and tuning [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 1995, 15(3): 37-51.
- [12] Zhivoglyadov P V, Middleton R H, Fu M. Localization based switching adaptive control for time-varying discrete-time systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(4): 752-755.
- [13] Maybeck P S, Hentz K P. Investigation of moving-bank multiple model adaptive algorithms [J]. *J of Guidance Control Dynamics*, 1987, 10(1): 90-96.
- [14] 王昕. 多模型自适应解耦控制器的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2002.
- [15] Goodwin G C, Ramadge P J, Caines P E. Discrete-time multivariable adaptive control [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1980, 25(3): 449-456.

(上接第22页)