

文章编号: 1001-0920(2003)01-0007-06

一类非最小相位系统的多变量多模型解耦控制器

王 昕, 岳 恒, 柴天佑

(东北大学 自动化研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 为解决系统暂态响应变差问题, 提出一种基于多模型切换的多变量直接自适应控制器。通过加权多项式矩阵的选择, 可消除稳态误差, 实现静态解耦控制。该控制器由多个参数已知固定模型和两个自适应模型构成, 多个固定参数控制器模型可由系统参数模型通过映射直接得到, 并与邻域一起完全覆盖控制器参数模型集。仿真结果表明, 对于非最小相位系统, 暂态响应可得到明显改善。

关键词: 多变量; 多模型切换; 非最小相位; 直接自适应算法; 解耦

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Multivariable decoupling controller using multiple models for a non-minimum phase system

WANG Xin, YUE Heng, CHAI Tian-yu

(Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: A multiple models direct adaptive decoupling controller is presented to improve the transient response. It consists of multiple fixed models and two adaptive models. The fixed models are mapped from the system parameter models directly and used to cover the controller parameter set with their neighborhoods. By the choice of the weighting polynomial matrix, it not only eliminates the steady output error, but also decouples the system statically. The analysis of global convergence is given. Simulation examples illustrate that the transient response of non-minimum phase systems is greatly improved, by using the multiple models adaptive decoupling controller.

Key words: Multivariable; Multiple models; Non-minimum phase; Direct adaptive algorithm; Decoupling

1 引 言

对于时不变或慢时变的参数未知系统, 可以采用自适应方法进行控制。但当边界条件改变、子系统故障及外界干扰等因素导致系统参数发生跳变时, 利用常规自适应方法将导致系统暂态响应变差^[1, 2]。为解决这一问题, 文献[3]引入多模型切换的方法进行控制; [4]对连续时间系统采用多个初值不同的自适应模型同时进行辨识, 但在一段时间后多个自适应模型收敛到同一邻域, 因而难以改善参数跳变系

统的暂态响应; [5, 6]采用多个固定模型和自适应模型相结合的方法解决上述问题; [7]将以上结果推广到离散时间系统; [8]将上述结果推广到多变量系统, 采用直接算法避免矩阵方程求解的病态问题, 但只能控制最小相位系统, 由于所有实际的离散时间系统从某种意义上说都是非最小相位系统, 因而无法得到实际应用。

本文针对一类非最小相位系统, 提出一种基于多模型切换的多变量直接自适应控制器。该控制器

收稿日期: 2001-09-03; 修回日期: 2001-12-20。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60074116); 辽宁省博士启动基金资助项目(001019)。

作者简介: 王昕(1972—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 从事自适应控制、多模型控制等研究; 柴天佑(1947—), 男, 甘肃兰州人, 教授, 博士生导师, 博士, 从事复杂工业过程建模、优化与控制等研究。

不但可消除稳态误差,而且能实现被控系统的解耦控制。为充分利用系统已有的运行信息,参数已知的多固定控制器模型可通过系统参数模型直接得到,无须对控制器参数模型集重新划分,并保证对控制器参数模型集的完全覆盖。仿真结果表明,对于非最小相位系统,暂态效果能够得到提高。

2 被控系统描述

对多入多出线性离散时间系统用 DARMA 模型

$$\begin{aligned} A(t, z^{-1})y(t) = \\ B(t, z^{-1})u(t-k) + \\ B_2(t, z^{-1})v(t-k_2) + d(t) \end{aligned} \quad (1)$$

描述。其中: $u(t)$, $v(t)$ 和 $y(t)$ 分别为 n 维输入、可测干扰和输出向量; $d(t)$ 为系统对于零输入产生的 n 维稳态输出向量; $A(t, z^{-1})$, $B(t, z^{-1})$ 和 $B_2(t, z^{-1})$ 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,且满足 $B_0(t)$ 非奇异, $\forall t$ 。

系统满足如下假设:

1) 系统为时不变系统或含跳变参数的时变系统,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;

2) 当 t 变化时,由 $A(t, z^{-1})$, $B(t, z^{-1})$, $B_2(t, z^{-1})$ 和 $d(t)$ 构成的参数矩阵在紧集 Σ 中变化;

3) $A(t, z^{-1})$, $B(t, z^{-1})$, $B_2(t, z^{-1})$ 的阶次上限 n_a, n_b, n_{b2} 及时延 k 和 k_2 已知,且有 $k < k_2$ 。

由假设 1) 知, $A_i(t)$, $B_j(t)$, $B_{2l}(t)$ 和 $d(t)$ 为常值矩阵(时不变系统)或分段常值矩阵(含跳变参数的时变系统)。因此,在相邻跳变时间间隔内,系统(1)可写成时不变形式

$$\begin{aligned} A(z^{-1})y(t+k) = \\ B(z^{-1})u(t) + B_2(z^{-1})v(t+k-k_2) + d \end{aligned} \quad (2)$$

3 多模型自适应控制器

多模型直接自适应控制器首先采用多个模型子集覆盖系统参数模型集,然后按照映射关系构造控制器参数模型集及其模型子集,从中选取 m 个参数已知的固定模型与两个自适应模型一起构成多模型集,基于切换指标直接选取最优控制器作为当前控制器。

3.1 系统参数模型集的构成

定义 1 由矩阵多项式 $A(z^{-1})$, $B(z^{-1})$, $B_2(z^{-1})$ 和 d 的各系数矩阵构成的矩阵 Φ 称为系统参数模型。由 $\Phi(t)$ 所有取值构成的集合称为系统参数模型集,记为 Σ 。

将系统参数模型集划分为 m 个模型子集 $\Sigma_s (s=1, \dots, m)$, 并且 Σ 满足:

$$1) \bigcup_{s=1}^m \Sigma_s \supseteq \Sigma \text{ 非空, } s=1, \dots, m;$$

2) $\forall \Phi \in \Sigma_s (s=1, \dots, m), \exists \Phi_s \in \Sigma_s, 0 < r_s < \infty$, 满足 $\Phi - \Phi_s \leq r_s$, 称 Φ_s 为模型子集 Σ_s 的中心, r_s 为半径,其存在性由假设 2) 保证。

由上述 1) 和 2) 知,系统参数模型集 Σ 被有限个模型子集 Σ_s 完全覆盖,每个模型子集又被其中心 Φ_s 及邻域完全覆盖。因此可用各模型子集的中心 Φ_s 作为系统参数已知的固定模型集,以覆盖系统参数模型集。

3.2 控制器参数模型集的构成

对于被控系统(2),类似于文献[9],采用如下性能指标和 Diophantine 方程

$$\begin{aligned} J_c = \\ P(z^{-1})y(t+k) - R(z^{-1})w(t) + \\ Q(z^{-1})u(t) + S(z^{-1})v(t+k-k_2) + r^{-2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$P(z^{-1}) = F(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-k}G(z^{-1}) \quad (4)$$

为使式(4)中 $F(z^{-1})$ 和 $G(z^{-1})$ 可解且存在唯一解^[10],令其阶次分别为

$$n_f = k-1, \quad n_g = n_a-1 \quad (5)$$

定义广义输出向量

$$\begin{aligned} \Phi(t) = P(z^{-1})y(t+k) - Q(z^{-1})u(t) - \\ S(z^{-1})v(t+k-k_2) - r \end{aligned}$$

广义期望输出向量

$$y^*(t+k) = R(z^{-1})w(t)$$

$w(t)$ 为参考输入。可得最优控制律和系统闭环方程

$$\begin{aligned} G(z^{-1})y(t) + H(z^{-1})u(t) + \\ H_2(z^{-1})v(t+k-k_2) + \bar{r} = \\ R(z^{-1})w(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} [P + QB^{-1}A]y(t+k) = \\ Rw(t) + [QB^{-1}B_2 - S] \times \\ v(t+k-k_2) + QB^{-1}(1-d) - r \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $H(z^{-1}) = FB + Q$, $H_2(z^{-1}) = FB_2 + S$, $\bar{r} = Fd + r_0$ 。

对于非最小相位系统,令

$$P(z^{-1}) = I, \quad Q(z^{-1}) = \lambda I \quad (8)$$

则闭环方程变为

$$\begin{aligned} [B + \lambda A]y(t+k) = \\ BRw(t) + [\lambda B_2 - BS] \times \end{aligned}$$

$$v(t + k - k_2) + \lambda d - B(1)r \quad (9)$$

式中 λ 为一常数。当 $B(z^{-1})$ 不稳定时, λ 值可选得较大; 当 $A(z^{-1})$ 不稳定时, λ 值可选得较小, 以保证闭环系统稳定。即

$$\det[B(z^{-1}) + \lambda A(z^{-1})] \neq 0, \quad |z| = 1 \quad (10)$$

为消除稳态误差, 可测干扰和零输入误差的影响, 令

$$\begin{cases} R(z^{-1}) = I + \lambda B^{-1}(1)A(1) \\ S(z^{-1}) = \lambda B^{-1}(1)B_2(1) \\ r = \lambda B^{-1}(1)d \end{cases} \quad (11)$$

则稳态时系统可以实现解耦控制。

定义 2 系统参数模型 Φ 经式 (4) ~ (6), (8), (10), (11) 变换后, 得到 $G(z^{-1}), H(z^{-1}), H_2(z^{-1})$ 和 \bar{r} 的各系数矩阵构成的矩阵 Θ 称为控制器参数模型。对应于 $\Phi(t)$ 的 $\Theta(t)$ 的所有取值构成的集合 Ω 称为控制器参数模型集。对应于 $\theta(t) = \sum_{s=1}^m \Phi_s(t)$ ($s = 1, \dots, m$) 的 $\Phi(t)$ 的所有取值构成的集合 Ω 称为控制器参数模型子集。对应于 $\Phi = \sum_{s=1}^m \Phi_s$ ($s = 1, \dots, m$) 的 Θ 称为模型子集 Ω 的中心。

下面证明上述变换得到的 Ω 仍为一紧集, 并且被有限个 Ω_s 完全覆盖, 而 Ω 又被其中心 Θ 及邻域完全覆盖。这样, 控制器模型子集的中心可由系统模型子集的中心经上述变换直接得到, 无须重新划分计算, 可以最大限度地利用已有的系统信息。

引理 1 由式 (4) ~ (6), (8), (10), (11) 构成的变换 f 是集合 Σ 到集合 Ω 的映射。

证明 $\forall \Phi \in \Sigma$ 即 $\forall A, B, B_2, d$ 。由式 (8) 和 (11) 知, 存在唯一的 P, Q, R, S, r ; 由式 (4) 和 (5) 知, 存在唯一的 F 和 G ^[10]。所以由 G, H, H_2 和 r 的各系数矩阵构成的 $\Theta \in \Omega$ 唯一存在。

显然, $f: \Sigma \rightarrow \Omega$ 为一连续映射。

定理 1 控制器参数模型集 Ω 为一紧集。

证明 Σ 为一紧集, 并且 $f: \Sigma \rightarrow \Omega$ 是一连续映射。由文献 [11] 定理 6 知 Ω 也为一紧集。

引理 2 由式 (4) 所得的 $F(z^{-1})$ 和 $G(z^{-1})$ 各参数矩阵在一紧集中变化。

证明 将式 (8) 代入式 (4), 即可得证。

定理 2 控制器参数模型子集 Ω_s 具有如下性质:

- 1) $\bigcap_{s=1}^m \Omega_s \supseteq \Omega$, Ω_s 非空, $s = 1, \dots, m$;
- 2) $\forall \Theta \in \Omega_s (s = 1, \dots, m), \exists 0 < R_s < \infty$, 满足

$\Theta \in \bigcap_{s=1}^m \Omega_s$, Θ 为该模型子集的中心, R_s 为半径。

证明 1) $\forall \Theta \in \Omega$ 存在原像 $\Omega = \sum_{s=1}^m \Omega_s \supseteq \Sigma$ 则一定 $\exists j \in \{1, \dots, m\}$, 满足 $\Theta \in \Omega_j$ 由 Ω_j 及 f 的定义知 $\Theta \in \Omega_j$ 即 $\Omega \subseteq \bigcap_{s=1}^m \Omega_s$

2) 由范数的定义 $\|A\| = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij}^2 \right]^{1/2}$, 可知

$$\|\Theta\| = \left[\sum_{i=0}^{n_g} G_i^2 + \sum_{j=0}^{n_h} H_j^2 + \sum_{l=0}^{n_{h_2}} H_{2l}^2 + \|\bar{r}\|^2 \right]^{1/2}$$

由引理 2 知 G_i 有界, 则 $\sum_{i=0}^{n_g} G_i^2 \leq K_1$ 。由引理 2 知 F_i 有界, 由假设 2) 知 B_i 有界, 且 λ 有界。则

$$\|H_j\| = \left\| \sum_{k=0}^j F_k B_{j-k} + \lambda I \right\| \leq \sum_{k=0}^j \|F_k\| \|B_{j-k}\| + \lambda \leq K_2$$

即 $\sum_{i=0}^{n_h} H_i^2 \leq K_3$ 。同理, $\sum_{l=0}^{n_{h_2}} H_{2l}^2 \leq K_4$, $\|\bar{r}\|^2 \leq K_5$ 。由上可得 $\|\Theta\| \leq K_6$ 。显然, K_6 的大小与 Φ 值有关。同理可得 $\|\Theta\| \leq K_7$ 。由上可得 $\|\Theta\| \leq K_8 < \infty$ 。令 $R_s = K_8$, 即可得证。

显然, R_s 的大小与 Φ, Φ 和 r_s 有关。

3.3 多模型控制器的设计

定义 3 多模型集由 m 个参数已知的固定模型 $\Theta_s (s = 1, \dots, m)$ 和常规自适应模型 Θ_{m+1} 及可重新赋值的自适应模型 Θ_{m+2} 构成。常规自适应模型 Θ_{m+1} 用于保证系统的稳定性, 自适应模型 Θ_{m+2} 重新赋值为最优控制器的参数值, 可进一步改善系统的暂态响应。

自适应模型 Θ_{m+1} 和 Θ_{m+2} 采用如下辨识算法

$$y(t+k) = G y(t) + F B u(t) + F B_2 v(t+k-k_2) + F(1)d \quad (12)$$

$$\hat{\Theta}_s(t) = \hat{\Theta}_s(t-1) + \frac{a(t)X(t-k)}{1 + X(t-k)^T X(t-k)} \times$$

$$[y_i(t)^T - X(t-k)^T \hat{\Theta}(t-1)] \quad (13)$$

其中: 控制器参数矩阵 $\Theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m]$, $\theta = [g_{i1}^0, \dots, g_{im}^0; g_{i1}^1, \dots, g_{im}^1; \dots; h_{i1}^0, \dots, h_{im}^0; \dots]^T$; 数据向量 $X(t) = [y(t)^T, \dots, u(t)^T, \dots, v(t+k-k_2)^T, \dots, 1]^T$; $a(t)$ 为一变化的实数, 当 $u(t)$ 的系数矩阵奇异时, 改变 $a(t)$ 的值可由式(13) 重新求出 $\hat{\Theta}(t)$ 。

对于多模型自适应控制器, 采用如下切换指标

$$J_s = \frac{e(t)^2}{1 + X(t-k)^T X(t-k)} \quad (14)$$

其中: $e_s(t) = y(t) - y_s(t)$ 为系统实际输出与各模型输出间的误差, $y_s(t) = \Theta_s^T X(t-k)$ 为第 s 个模型的输出。令 $j = \arg \min(J_s), s = 1, \dots, m+2$, 则选取 Θ_j 作为当前控制器。

1) 当 $j = m+2$ 时, 对 Θ_{m+2} 重新赋值为最优控制器参数, 以提高暂态性能, $\hat{\Theta}_{m+2}(t) = \Theta_j, \hat{\Theta}_{m+1}(t)$ 和 $\hat{\Theta}_{m+2}(t)$ 采用式(13) 进行辨识, 控制器参数 $\Theta(t) = \Theta_j$

2) 当 $j = m+1$ 时, $\hat{\Theta}_{m+1}(t)$ 和 $\hat{\Theta}_{m+2}(t)$ 采用式(13) 进行辨识, 控制器参数 $\Theta(t) = \hat{\Theta}_{m+2}(t)$ 。最优控制律为

$$\begin{aligned} & \Theta^T(t) X(t) = \\ & R(z^{-1})w(t) - Q(z^{-1})u(t) - \\ & S(z^{-1})v(t+k-k_2) - r \end{aligned} \quad (15)$$

式中 $R(z^{-1}), Q(z^{-1}), S(z^{-1})$ 和 r 选择如下

$$\begin{cases} Q(z^{-1}) = \lambda I \\ R(z^{-1}) = I + \lambda(FB)^{-1}(1) [I - G(1)] \\ S(z^{-1}) = \lambda(FB)^{-1}(1) (FB_2)(1) \\ r = \lambda(FB)^{-1}(1) (Fd) \end{cases} \quad (16)$$

4 全局收敛性分析

引理 3 对于任意模型 $s \in \{1, \dots, m, m+1, m+2\}$, 将控制律(6) 及加权多项式矩阵(8) 和(11) 应用于系统(2), 则有如下特性

$$\begin{aligned} & [B + \lambda A]y(t+k) = \\ & B e(t+k) + BRw(t) - [BS - \lambda B_2] \times \\ & v(t+k-k_2) - [B r - \lambda d] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & [B + \lambda A]u(t) = \\ & A e(t+k) + ARw(t) - [AS + B_2] \times \\ & v(t+k-k_2) - [A r + d] \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & e(t+k) = \\ & P y(t+k) - R w(t) + \\ & Q u(t) + S v(t+k-k_2) + r \end{aligned} \quad (19)$$

证明 联立式(19) 和系统(2), 得

$$\begin{aligned} e(t+k) = & [P + QB^{-1}A]y(t+k) - R w(t) + \\ & [S - QB^{-1}B_2]v(t+k-k_2) + r - QB^{-1}d \end{aligned}$$

利用式(8) 和(11) 可证式(17)。同理, 联立式(19) 和系统(2), 并利用式(8) 和(11) 可证式(18)。

定理 3 在上述假设条件下, 将多模型自适应控制算法作用于系统(2), 则 $\{y(t)\}$ 和 $\{u(t)\}$ 有界, 且 $\lim_t e(t) = 0$ 。

证明 1) 当 $e_s(t) = 0 (s = 1, \dots, m)$ 时, 令 $\epsilon(t)$

$$\begin{aligned} & = \min_{1 \leq s \leq m} |e_s(t)|。由式(12) 和(13), 有 \\ & \lim_t \frac{e_{m+1}(t)^2}{1 + X(t-k)^T X(t-k)} = 0 \end{aligned}$$

则一定存在有限时刻 t_s , 当 $t_s < t$ 时, 有

$$\begin{aligned} & \frac{e_{m+1}(t)^2}{1 + X(t-k)^T X(t-k)} \\ & \frac{\epsilon(t)^2}{1 + X(t-k)^T X(t-k)} \\ & i = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

由切换指标知

$$\begin{aligned} & \frac{e_i(t)^2}{1 + X(t-k)^T X(t-k)} \\ & \frac{e_{m+1}(t)^2}{1 + X(t-k)^T X(t-k)} \\ & \lim_t \frac{e_i(t)^2}{1 + X(t-k)^T X(t-k)} = 0 \\ & i = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

由引理 4 及 $[B + \lambda A]$ 稳定, 且 $w_i(t), v_i(t+k-k_2)$ 和 d_i 有界, 由文献[12] 得

$$\begin{aligned} & |y_i(t)| \leq K_1 + K_2 \max_{\tau, t, 1 \leq j \leq n} |e_j(\tau)| \\ & 0 < K_1 < \infty, \quad 0 < K_2 < \infty \\ & 1 \leq t \leq N, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ & |u_i(t-k)| \leq K_3 + K_4 \max_{\tau, t, 1 \leq j \leq n} |e_j(\tau)| \\ & 0 < K_3 < \infty, \quad 0 < K_4 < \infty \\ & 1 \leq t \leq N, \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

由文献[12] 引理 3 1 知 $\{y(t)\}$ 和 $\{u(t)\}$ 有界, 且 $\lim_t e(t) = 0$ 。

2) 当 $e_s(t) = 0 (s = 1, \dots, m)$ 时, 意味着存在一固定控制器模型, 其控制器参数 Θ_s 等于真值 Θ_0 或与数据向量 $X(t-k)$ 正交。此时 $J_s = 0$ 最小, Θ_s 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。

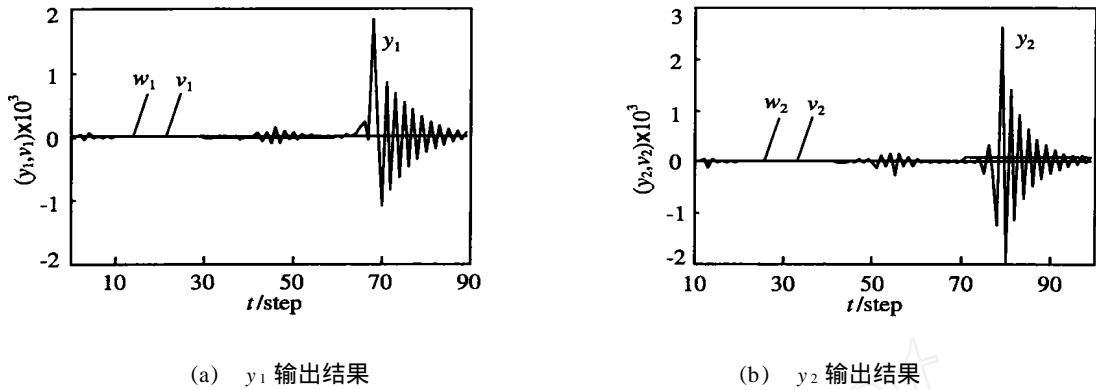


图 1 常规自适应控制器仿真结果

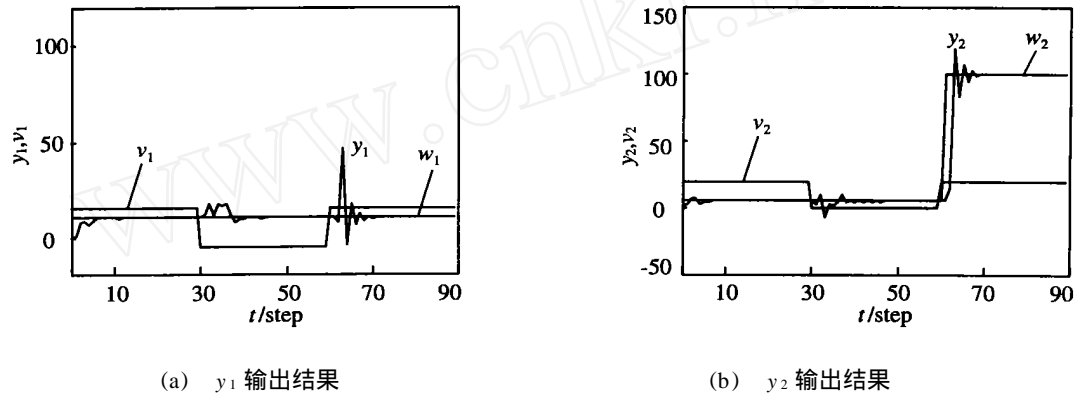


图 2 多模型自适应控制器仿真结果

同上, 由引理 4 及 $[B + \lambda A]$ 稳定, 且 $w_i(t), v_i(t) + k - k_2$ 和 d_i 有界, 由文献 [12] 及 $e_i(t) = 0$ 知 $\{y(t)\}$ 和 $\{u(t)\}$ 有界, 且 $e(t) = e_s(t) = 0$ 。综合上述两种情况, 即证 $\lim_t e(t) = 0$ 。

5 仿真研究

多变量非最小相位系统模型如下

$$(I + A_1 z^{-1} + A_2 z^{-2})y(t) = (B_0 + B_1 z^{-1})u(t-2) + (B_{20} + B_{21} z^{-1})v(t-2) + d$$

其中

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 5 \\ 0 & 5 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0 & 0.4 \\ 0 & 0.4 & 0 & 0.3 \end{bmatrix}$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 5 & 2 \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 3 \\ 0 & 3 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

$$B_{20} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 7 \\ 0 & 5 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad B_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 0 & 3 \\ 0 & 5 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$$

可测干扰 v 是一振幅为 20 的方波。 B_0 在 $t = 30$ 步时跳变为 $B_0 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 4 & 8 \end{bmatrix}$, 仍为非最小相位系统。参考输入 $w = [10 \ 5]^T$, 并在 $t = 60$ 步时变为 $w =$

$[10 \ 100]^T$ 。
首先构造多个固定模型覆盖系统参数 B_0 , 对 b_{22}^0 采用 $[4 \ 5 \ 5 \ 5]$ 范围内间隔为 0.04 的 25 个模型覆盖可能的变化范围, 特意选取固定模型集不包括系统的真实模型值; 然后利用映射构造对应的 25 个控制器固定模型。无论常规自适应模型还是多模型中的自适应模型, 均采用相同的距离真值很近的初值。
采用常规自适应方法时, 系统的响应如图 1 所示; 采用 25 个固定模型和 2 个自适应模型构成的多模型控制器时, 系统的响应如图 2 所示。由图可以看出系统的暂态响应, 无论幅值还是收敛速度, 即使在参数发生跳变的情况下也能得到明显改善, 特别是解耦效果明显优于常规自适应控制算法。

6 结 语

本文提出一种基于多模型切换的多变量直接自适应控制算法。该算法可利用系统参数模型集直接构造出控制器参数模型集, 并保证该模型集不但为紧集, 而且为控制器参数模型子集所覆盖。仿真研究表明, 对于参数发生跳变的非最小相位系统, 该算法可改善系统的暂态响应, 实现解耦控制。

参考文献(References):

- [1] Goodwin G C, Hill D J, Palaniswami M A. Perspective on convergence of adaptive control algorithms [J]. *Automatica*, 1984, 20(5): 519-531.
- [2] Wittenmark B, Astrom K J. Practical issues in the implementation of self-tuning control [J]. *Automatica*, 1984, 20(5): 595-605.
- [3] Narendra K S, Balakrishnan J, Ciliz M K. Adaptation and learning using multiple models, switching and tuning [J]. *IEEE Contr Syst Mag*, 1995, 15(3): 37-51.
- [4] Narendra K S, Balakrishnan J. Improving transient response of adaptive control systems using multiple models and switching [J]. *IEEE Trans Autom Contr*, 1994, 39(9): 1861-1866.
- [5] Narendra K S, Balakrishnan J. Intelligent control using fixed and adaptive models [A]. *Proc IEEE 33rd CDC [C]*. Vista, 1994. 1680-1685.
- [6] Narendra K S, Balakrishnan J. Adaptive control using multiple models [J]. *IEEE Trans Autom Contr*, 1997, 42(2): 171-187.
- [7] Narendra K S, Xiang C. Adaptive control of discrete-time systems using multiple models [A]. *Proc IEEE 37th CDC [C]*. Tampa, 1998. 3978-3983.
- [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]. *Contr Theory Appl*, 2001, 18 (Suppl): 23-27.)
- [9] 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. 66-74.
- [10] 孙增圻. 计算机控制理论及应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1989. 109-115.
- [11] 夏道行, 舒五昌, 严绍宗, 等. 泛函分析第二教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1987. 135-136.
- [12] Goodwin G C, Ramadge P J, Caines P E. Discrete-time multivariable adaptive control [J]. *IEEE Trans Autom Contr*, 1980, 25(3): 449-456.

(上接第6页)

- [19] Yu Lian, Ohsato Ario, Kawakami Terujiyu, et al. CORBA-based design and development of distributed scheduling systems: An application to flexible flow shop scheduling systems [A]. *Proc IEEE Int Conf SMC [C]*. Tokyo, 1999. 4: 522-527.
- [20] 赵博. 结构化集成调度系统理论及基于该理论的虚拟车间智能支撑平台的体系结构研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2000.
- [21] Chen Y Y, Fu L C, Chen Y C. Multi-agent based dynamic scheduling for a flexible assembly system [A]. *Proc IEEE Int Conf Robot Autom [C]*. Leuven, 1998. 3: 2122-2127.
- [22] Ouelhadj D, Hanachi C, Bouzouia B. Multi-agent system for dynamic scheduling and control in manufacturing cells [A]. *IEEE Int Conf Robot Autom [C]*. Leuven, 1998. 3: 2128-2133.
- [23] Ouelhadj D, Hanachi C, Bouzouia B, et al. Multi-contract net protocol for dynamic scheduling in flexible manufacturing systems (FMS) [A]. *Proc IEEE Int Conf Robot Autom [C]*. Detroit, 1999. 1114-1119.
- [24] Rabelo R J, Camarinha L M. Multi-agent-based agile scheduling [J]. *Robot Autom Syst*, 1999, 27(1): 15-28.
- [25] 王艳红, 尹朝万, 张宇. 基于多代理和规则调度的敏捷调度系统研究 [J]. *计算机集成制造系统*, 2000, 6(4): 45-49.
(Wang Y H, Yin C W, Zhang Y. Multi-agent and rule based dynamic scheduling system for agile manufacturing job shop [J]. *Comp Integ Manuf Syst*, 2000, 6(4): 45-49.)
- [26] Brun A, Portoli A. Agent-based shop-floor scheduling of multi-stage systems [J]. *Comp Ind Eng*, 1998, 37(1): 457-460.
- [27] Weiming Shen, Douglas H Norrie. Dynamic manufacturing scheduling using both functional and resource related agents [J]. *Integ Comp Aided Eng*, 2001, 8(1): 17-30.
- [28] Knotts Gary, Dror Moshe, Hartman Bruce C. Agent-based project scheduling [J]. *IIE Trans*, 2000, 32(5): 387-401.