

文章编号: 1000-8152(2005)02-0201-06

一类非最小相位系统分层递阶多模型解耦控制器

王 昕¹, 李少远¹, 岳 恒²

(1. 上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030; 2. 东北大学 自动化研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 针对多模型控制方法中模型数目巨大, 计算时间长等问题, 提出了分层递阶结构多模型自适应前馈解耦控制器. 该控制器中固定模型集采用分层递阶结构, 基于切换准则逐层搜索最优模型, 动态构造下一层固定模型集实现完全覆盖. 最后一层添加自适应模型消除稳态误差. 针对非最小相位系统, 将系统的耦合作用视为可测干扰, 采用前馈方法予以消除. 最后给出全局收敛性分析. 仿真结果表明, 与常规多模型控制方法相比, 极大地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、解耦效果得到极大改善.

关键词: 多模型; 分层递阶; 非最小相位; 自适应; 前馈; 解耦

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Hierarchical multiple model decoupling controller for non-minimum phase systems

WANG Xin¹, LI Shao-yuan¹, YUE Heng²

(1. Institute of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China ;

2. Research Center of Automation, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China)

Abstract: To solve such problem as too many models and long computing time, a hierarchical multiple model adaptive decoupling controller is designed. It consists of fixed models with two adaptive models. The fixed models adopt a hierarchical structure: in each level, the best model is searched according to the switching index; then in next level, based on the model selected in the last level, the dynamic fixed model set is set up to cover this model accordingly. At the last stage, two adaptive models are added to eliminate the steady state error. For a non-minimum phase system, the interaction of the system is viewed as measurable disturbance and decoupled using feedforward strategy. At last the global convergence is obtained. In the simulation, compared with the conventional multiple model adaptive controller, it reduces the number of the fixed models greatly. If the same number of the fixed models is used, the system transient response and decoupling result are improved.

Key words: multiple models; hierarchical; non-minimum phase; adaptive; feedforward; decoupling

1 引言(Introduction)

对于时不变或缓慢时变的参数未知系统, 可以采用常规自适应方法进行控制. 但当边界条件改变、子系统故障、外界干扰等因素导致系统参数发生大范围跳变时, 自适应控制方法往往会导致系统暂态响应变差^[1]. 这是因为系统参数跳变后, 自适应算法中辨识参数初值距离真值较远, 需要多个采样周期才能逼近系统参数真值. 为了解决上述问题, 文献[2]将系统分成若干不同区域, 采用多个初值不同的自适应模型同时辨识, 但一段时间以后多个自适应模型收敛到同一邻域而难以再次改善参数跳变系统的暂态响应. 文献[3]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. 并且推广到离散时间系统^[4]. 不过上述方法都是针对单变量系统, 采用间接自适应算法, 不但加大了计算量, 而且容易造成矩阵方程求解的病态问题^[5]. 文献[6]设计多变量多模型自适应控制器, 采用直接自适应算法解决上述问题. 文献[7]实现了动态解耦控制. 但以上方法都要求系统为最小相位系统. 对于计算机控制系统, 当采样周期变小时, 即使最小相位系统也可能变成非最小相位系统^[8], 因而上述算法难以得到实际应用.

另一方面, 多模型方法也带来了模型数目过多的问题. 文献[9]采用 300 多个固定模型覆盖一个参数的变化范围. 这大大增加控制系统的计算量, 影响

到采样周期的选择,所以模型集的优化问题是阻碍多模型控制器实际应用的主要问题.文献[10]采用 Localization 技术动态精简系统的待选模型集,文献[11]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.但上述方法仅减少部分固定模型,没有从根本上降低固定模型的数量.

本文针对一类非最小相位系统提出多模型自适应解耦控制器.由于采用分层递阶结构,大大减少了系统模型集的数量.该控制器采用前馈解耦策略,去除了最小相位系统的假设.文中给出了全局收敛性分析.仿真结果表明当模型数量相同时,控制效果明显优于常规多模型控制器.而当控制效果近似相同时,模型集的数目大大降低.

2 被控系统描述(Description of the controlled system)

设多输入多输出参数跳变系统模型集为

$$\Sigma = \{S(t)\} = \{(A_1, B_1, d), \dots, (A_n, B_n, d), \dots\}. \quad (1)$$

式中 $S(t), t: 0 \rightarrow \infty$ 可以用线性时变 ARMA 模型 $S(t): A(t, z^{-1})y(t) = B(t, z^{-1})u(t - k) + d(t)$ 描述, $u(t), y(t)$ 分别为 n 维输入、输出向量, $d(t)$ 是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. $A(t, z^{-1}), B(t, z^{-1})$ 是单位后移算子 z^{-1} 的矩阵多项式,其系数矩阵是时间 t 的函数,且 $B_0(t)$ 非奇异, $\forall t$. 由于 $A(t, z^{-1})$ 可以通过左伴随矩阵变换为对角形矩阵,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, $S(t)$ 在一紧集中变化;
假设 3 $A(t, z^{-1}), B(t, z^{-1})$ 的阶次上限和时延 k 已知.

为了实现解耦控制,将系统第 j 个通道的输入 $u_j(t)$ 对第 i 个通道的输出 $y_i(t) (i \neq j)$ 的耦合作用视为可测干扰,采用前馈补偿方法予以消除.于是,式(1)可以写成

$$A(t, z^{-1})y(t + k) = \bar{B}(t, z^{-1})u(t) + \bar{B}(t, z^{-1})u(t) + d(t). \quad (3)$$

式中 $\bar{B}(t, z^{-1}) = \text{diag}[B_{ii}(t, z^{-1})]$ 为对角形多项式矩阵,且满足 $\bar{B}_0(t)$ 非奇异, $\forall t$. $\bar{B}(t, z^{-1}) =$

$(B_{ij}(t, z^{-1}))$ 且 $\bar{B}_{ii}(t, z^{-1}) = 0$.

由假设 1 可知, $A_i(t), \bar{B}_j(t), \bar{B}_j(t)$ 和 $d(t)$ 为分段常值矩阵.因此,在相邻跳变时间间隔内,系统(3)可写成时不变形式

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

而不失一般性.以后,本文针对式(4)进行讨论.

3 固定模型分层递阶结构设计(Design of hierarchical multiple fixed models)

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

3.1 分层递阶结构设计方法(Method of the hierarchical design)

1) 根据先验知识构造第 1 层 m_1 个固定参数模型:

$$\Phi_{1,s} = f(p_1, \dots, p_{n_1}), \quad s = 1, \dots, m_1. \quad (5)$$

式中 $p_1, \dots, p_k, \dots, p_{n_1}$ 是系统变化参数,然后根据切换准则选出第 1 层最优固定参数模型 Φ_{1,j_1} ;

2) 确定 Φ_{1,j_1} 中 p_k 变化区间 $[p_{k_low}, p_{k_high}]$, $k \in [1, n_1]$. 线性等分为 m_2 段,则 p_k 第 h 段表示为

$$p_{k,h} = p_{k_low} + h \cdot \frac{p_{k_high} - p_{k_low}}{m_{i+1}}; \quad (6)$$

3) 将每个参数的第 h 段表示合成为第 2 层的第 h 个参数模型 $\Phi_{2,h} = f(p_{1,h}, \dots, p_{n_1,h}), h = 1, \dots, m_2$, 根据切换准则选出第 2 层最优固定参数模型;

4) 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 ;

3.2 分层递阶结构设计原则(Principle of the hierarchical design)

对于实际工业过程中算法可靠性、理解性、现场维护及控制精度等的考虑,整体结构可以分为工作点定位级、控制模型定位级和最优模型级.工作点定位级采用各种运行工况的工作点模型汇集起来构成.控制模型定位级则由固定模型动态构成,一般为 2~3 层,用于快速定位控制器模型所在的区域.而最优模型级则在最优固定模型的基础上添加自适应模型和可重新赋值自适应模型,用于逼近控制器参数的真值、消除系统稳态误差.

4 多模型控制器 (Multiple models adaptive controller(MMAC))

定义 2 最后一层第 $l+1$ 层由第 l 层最优模型 $\Theta_{l,j}$ (设为 $\Theta_{l+1,1}$) 和自适应模型 $\Theta_{l+1,2}$ 及可重新赋值的自适应模型 $\Theta_{l+1,3}$ 构成。

4.1 固定模型控制器(Fixed controller models)

类似于文献[12],设性能指标为

$$J_c = \| P(z^{-1})y(t+k) - R(z^{-1})w(t) + Q(z^{-1})u(t) + S(z^{-1})u(t) + r \|^2. \quad (7)$$

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

引入 Diophantine 方程

$$P(z^{-1}) = F(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-k}G(z^{-1}), \quad (8)$$

用 $F(z^{-1})$ 左乘式(4),由式(8)和性能指标(7),为使 J_c 最小,可得最优控制律为

$$G(z^{-1})y(t) + H(z^{-1})u(t) + H_2(z^{-1})u(t) + \bar{r} = R(z^{-1})w(t). \quad (9)$$

式中

$$H(z^{-1}) = F(z^{-1})\bar{B}(z^{-1}) + Q(z^{-1}), \quad (10)$$

$$H_2(z^{-1}) = F(z^{-1})\bar{\bar{B}}(z^{-1}) + S(z^{-1}), \quad (11)$$

$$\bar{r} = Fd + r. \quad (12)$$

为了消除耦合影响,联立式(4)和(9),得

$$[P(z^{-1})\bar{B}(z^{-1}) + Q(z^{-1})A(z^{-1})]y(t+k) = \bar{B}(z^{-1})R(z^{-1})w(t) + [Q(z^{-1})d - \bar{B}(z^{-1})r] + [Q(z^{-1})\bar{\bar{B}}(z^{-1}) - \bar{B}(z^{-1})S(z^{-1})]u(t). \quad (13)$$

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

$$P(z^{-1}) = I, \quad (14)$$

$$Q(z^{-1}) = \lambda I, \quad (15)$$

$$R(z^{-1}) = I + \lambda \bar{B}^{-1}(1)A(1), \quad (16)$$

$$S(z^{-1}) = \lambda \bar{B}^{-1}(1)\bar{\bar{B}}(1), \quad (17)$$

$$r = \lambda \bar{B}^{-1}(1)d. \quad (18)$$

式中 λ 为一常数,用于保证闭环系统的稳定性.

由式(9)可得最优控制律的另一种表达形式

$$G(z^{-1})y(t) + \bar{H}(z^{-1})U(t) + \bar{r} = R(z^{-1})w(t), \quad (19)$$

$$\bar{H}(z^{-1}) = H(z^{-1}) + H_2(z^{-1}). \quad (20)$$

联立式(4)和(19),并考虑式(8),(14)~(18),得系统的闭环方程为

$$[B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1) + \lambda A(z^{-1})]y(t+k) = [B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1) + \lambda A(1)]w(t). \quad (21)$$

为了保证系统的稳定性,下面对系统做如下假设:

假设 4 对于系统(4),一定存在一个常数 λ 保证闭环系统的稳定性,即

$$\det[B(z^{-1})B^{-1}(1)B(1) + \lambda A(z^{-1})] \neq 0, |z| \geq 1. \quad (22)$$

一般情况下,当 $B(z^{-1})$ 稳定时,可以选取较小 λ 的值用以保证系统的稳定性;当 $A(z^{-1})$ 稳定时,可以选取较大的 λ 值用以保证系统的稳定性.因此可以根据先验知识离线选取 λ 值.由式(21)知,系统消除了稳态误差、零输入误差,实现了静态解耦.

4.2 自适应模型控制器(Adaptive model controller)

对于自适应模型 $\hat{\Theta}_{l+1,2}(t)$,用 $F(z^{-1})$ 左乘式(4),利用式(8),(14)可得辨识方程为

$$y(t+k) = G(z^{-1})y(t) + H'(z^{-1})u(t) + H'_2(z^{-1})u(t) + r'. \quad (23)$$

式中

$$H'(z^{-1}) = F(z^{-1})\bar{B}(z^{-1}), \quad (24)$$

$$H'_2(z^{-1}) = F(z^{-1})\bar{\bar{B}}(z^{-1}), \quad (25)$$

$$r' = F(1)d. \quad (26)$$

当系统的参数未知时,定义 $n(n_a + 2n_b + 2k) + 1$ 维数据向量 $X(t)$ 和 $[n(n_a + 2n_b + 2k) + 1] \times n$ 控制器参数矩阵 Θ 为

$$X(t) = [y(t)^T, \dots; u(t)^T, \dots; u(t)^T, \dots; 1]^T, \quad (27)$$

$$\Theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n] =$$

$$[G_0, G_1, \dots; H'_0, H'_1, \dots; H'_{20}, H'_{21}, \dots; r']^T, \quad (28)$$

$$\theta_i = [g_{i1}^0, \dots, g_{in}^0; g_{i1}^1, \dots, g_{in}^1, \dots; h'_{i1}^0, \dots]^T. \quad (29)$$

采用如下辨识算法:

$$\hat{\theta}_i(t) = \hat{\theta}_i(t-1) + \frac{a(t)X(t-k)}{1 + X(t-k)^T X(t-k)} \cdot [y_i(t) - X(t-k)^T \hat{\theta}_i(t-1)]. \quad (30)$$

式中 $a(t)$ 为一变化实数,当 $u(t)$ 系数矩阵奇异时,改变 $a(t)$ 的值由式(30)重新求出 $\hat{\Theta}(t)$,其变化范围为 $\sigma < a(t) < 2 - \sigma, 0 < \sigma < 1$ ^[13]. 最优控制律为

$$\hat{G}(z^{-1})y(t) + \hat{H}(z^{-1})u(t) + \hat{r} = R(z^{-1})w(t). \quad (31)$$

式中: $\hat{H}(z^{-1}) = \hat{H}'(z^{-1}) + \hat{H}'_2(z^{-1})$; 加权多项式

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

$$Q(z^{-1}) = \lambda I, \tag{32}$$

$$R(z^{-1}) = I + \lambda H'^{-1}(1)[I - G(1)], \tag{33}$$

$$S(z^{-1}) = \lambda H'^{-1}(1)H_2'(1), \tag{34}$$

$$r = \lambda H'^{-1}(1)r'. \tag{35}$$

4.3 可重新赋值自适应控制器 (Reinitialized adaptive controller model)

选取 j_{l+1} 作为第 $l + 1$ 层最优控制器. 如果 $j_{l+1} \neq 3$, 则对 $\hat{\Theta}_{l+1,3}(t)$ 重新赋初值为最优控制器参数, 即 $\hat{\Theta}_{l+1,3}(t) = \Theta_{l+1,3}$. 否则 $\hat{\Theta}_{l+1,3}(t)$ 采用式(30)辨识.

4.4 切换准则 (Switching index)

对于第 $i (i = 1, \dots, l + 1)$ 层多模型控制器, 采用如下切换准则选取各层的最优模型:

$$J_{i,s} = \frac{\|e(t)\|^2}{1 + X(t-k)^T X(t-k)}. \tag{36}$$

式中: $X(t)$ 为数据向量, $e_{i,s}(t) = y_{i,s}(t) - \hat{y}_{i,s}(t)$ 为第 i 层多模型集中第 s 个模型的输出误差向量, $y(t)$ 为系统实际输出, $\hat{y}(t)$ 为第 i 层多模型集中第 s 个模型的输出. 最后一层第 $l + 1$ 层多模型集采用相同的切换准则, 只不过 $s = 1, 2, 3$. 令 $j_i = \arg \min_{i,s} (J_{i,s}), s = 1, \dots, m_i, i = 1, \dots, l + 1$, 选取 Θ_{j_i} 为第 i 层当前控制器.

5 全局收敛性分析 (Analysis of the global convergence)

引理 1 对于任意模型 s , 将控制律(19)和加权多项式矩阵(14)~(18)应用到系统(4)中, 有如下输入输出特性:

$$\begin{aligned} [B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1) + \lambda A(z^{-1})]y(t+k) &= \\ B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1)e(t+k) + \\ B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1)Rw(t), \end{aligned} \tag{37}$$

$$\begin{aligned} [B(z^{-1} + \lambda A(z^{-1})\bar{B}^{-1}(1)B(1))]u(t) &= \\ A(z^{-1})e(t+k) + A(z^{-1})Rw(t) - [Ar + d], \end{aligned} \tag{38}$$

$$e(t+k) = Py(t+k) - Rw(t) + Qu(t) + Su(t) + r. \tag{39}$$

式中 $e(t+k)$ 为系统广义输出误差向量.

证 将式(39)变为

$$\begin{aligned} e(t+k) &= \\ y(t+k) - Rw(t) + [\lambda \bar{B}^{-1}(1)B(1)]u(t) + r. \end{aligned} \tag{40}$$

联立式(40)和系统(4), 利用式(14)~(18)消去 $u(t)$ 可证式(37). 同理可证式(38).

多模型直接自适应控制算法的全局收敛性由下面定理给出.

定理 1 在上述假设条件 1)~4)下, 多模型直接自适应控制算法作用于系统(4)时, 有 $\{y(t)\}, \{u(t)\}$ 有界且 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0$.

证 1) 当 $e_{l+1,1}(t) \neq 0$ 时, 则最优固定模型无法保证被控系统的收敛性. 令 $\epsilon_i(t) = \min_{l+1,1} |e_{l+1,1}(t)|$, 表示采用固定模型时导致的最小误差.

对于自适应模型 2, 由式(23)、(30)构成的自适应控制算法, 有^[13]

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{e_{l+1,2_i}(t)^2}{1 + X(t-k)^T X(t-k)} = 0, \tag{41}$$

则一定存在时间 t_s , 满足当 $t_s < t$ 时,

$$\frac{e_{l+1,2_i}(t)^2}{1 + X(t-k)^T X(t-k)} \leq \frac{\epsilon_i(t)^2}{1 + X(t-k)^T X(t-k)}, \quad i = 1, \dots, n. \tag{42}$$

由切换准则(36)可知, 系统的辅助输出误差满足

$$0 \leq \frac{e_i(t)^2}{1 + X(t-k)^T X(t-k)} \leq \frac{e_{l+1,2_i}(t)^2}{1 + X(t-k)^T X(t-k)}, \tag{43}$$

则由式(41), 根据夹逼准则可知

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{e_i(t)^2}{1 + X(t-k)^T X(t-k)} = 0, \quad i = 1, \dots, n. \tag{44}$$

因引理 1 及 $[B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1) + \lambda A(z^{-1})]$ 稳定, 且 $w_i(t)$ 有界, 由文献[13]有

$$|u_i(t-k)| \leq K_1 + K_2 \max_{\substack{1 \leq \tau \leq t \\ 1 \leq j \leq n}} |y_j(\tau)|, \tag{45}$$

$$|y_i(t)| \leq K_3 + K_4 \max_{\substack{1 \leq \tau \leq t \\ 1 \leq j \leq n}} |e_j(\tau)|, \tag{46}$$

$$|u_i(t-k)| \leq K_5 + K_6 \max_{\substack{1 \leq \tau \leq t \\ 1 \leq j \leq n}} |e_j(\tau)|. \tag{47}$$

根据文献[13]知 $\{y(t)\}, \{u(t)\}$ 有界且 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0$.

2) 当 $e_{l+1,1}(t) = 0$ 时, 表示最优固定模型的控制参数 $\Theta_{l+1,1} = \Theta_{l+1,1}^0$ (参数真值) 或者 $\Theta_{l+1,1} = \Theta_{l+1,1}^0$ 与数据向量 $X(t-k)$ 正交. 由式(36)知 $\Theta_{l+1,1}^0$ 被选为当前控制器参数, 即多模型控制器退化成一固定模型控制器.

由引理 1 及 $[B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1) + \lambda A(z^{-1})]$ 稳定, 且 $w_i(t)$ 有界, 由文献[13]及 $e_i(t) = 0$ 得 $\{y(t)\}, \{u(t)\}$ 有界且 $\|e(t)\| = \|e_{l+1,1}(t)\| = 0$.

综合 1),2) 两种情况,得证 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0$.

6 仿真研究(Simulation example)

多变量非最小相位系统如下所示:

$$(I + A_1 z^{-1} + A_2 z^{-2})y(t) = (B_0 + B_1 z^{-1})u(t-2) + d, \quad (48)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.6 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0.03 & 0 \\ 0 & 0.09 \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} 0.7 \\ 1.5 \end{bmatrix},$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1.5 \\ 0.2 & -0.66 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} -0.5 & 0.2 \\ 1.3 & 1.5 \end{bmatrix}.$$

当 $t = 30$ 步时,参数 b_{22}^0 由 -0.66 跳变至 1.84 ; 当 $t = 60$ 步时,参考输入 w_2 发生变化,参数 b_{22}^0 同时发生跳变,由 1.84 跳变至 3.37 ,仍为非最小相位系统. 这里采用 $[-4,5]$ 作为参数 b_{22}^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,同时特意选取固定参数模型集不包括系统的真实模型值.本文采用 3 层每层 10 个模型的分层递阶结构,常规多模型自适应控制器分别采用 30 和 1000 个固定模型. 30 个模型代表与分层递阶结构模型集总数相同,1000 个模型代表与分层递阶结构所覆盖的模型集总数相同.从仿真图形中可以看出,随着模型数目的增加,系统的暂态响应也得到明显地改善,但计算量也越来越大,见图 1,2. 图 3 采用分层递阶多模型自适应控制方法,其控制效果接近于 1000 个固定模型的多模型控制方法,明显优于 30 个固定模型的多模型控制方法,但模型数目、计算量和计算时间与图 1 相同.

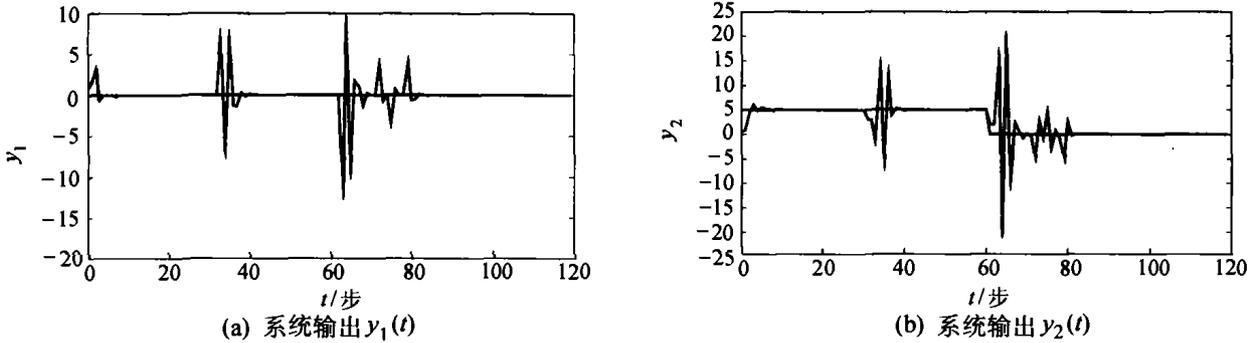


图 1 32 个模型的常规多模型控制器的仿真结果
Fig.1 Simulation results of the MMAC with 32 models

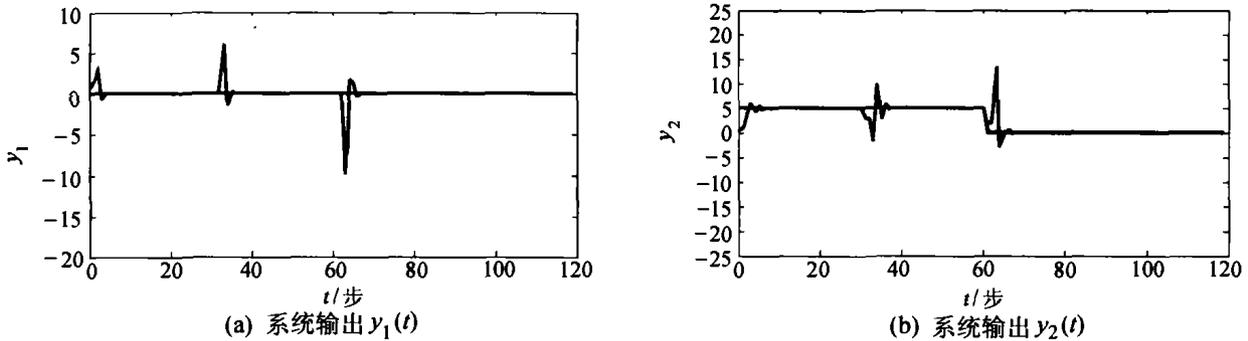


图 2 1002 个模型的常规多模型控制器的仿真结果
Fig.2 Simulation results of the MMAC with 1002 models

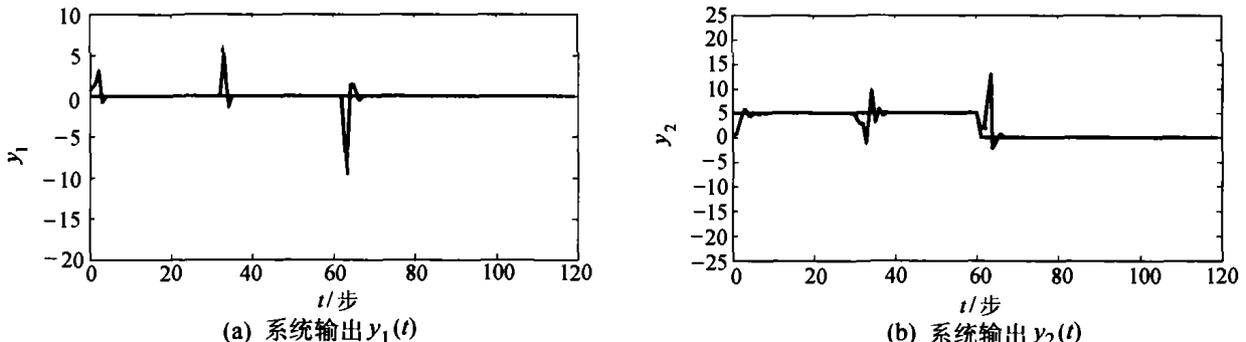


图 3 分层递阶结构多模型控制器仿真结果
Fig.3 Simulation results of the hierarchical MMAC

另一方面,对由切换造成的扰动,减少切换次数就可以减少扰动对系统的影响.在模型总数相同均为30个的情况下,分层递阶结构在一两次切换后即可结束切换过程,而常规多模型控制器的切换次数明显增加,见图4和图5.

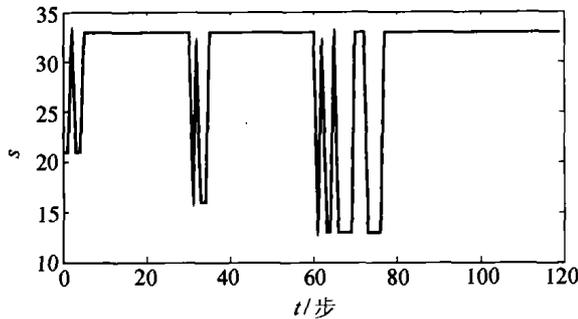


图4 32个多模型控制器的模型切换

Fig. 4 Switching result of the MMAC with 32 models

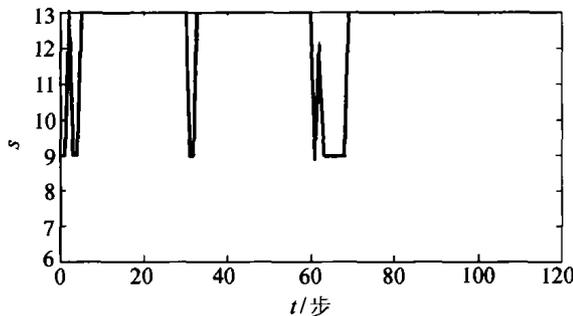


图5 分层递阶结构多模型控制器最后一层的模型切换

Fig. 5 Switching result of the hierarchical MMAC

7 结论(Conclusion)

本文提出了一种基于分层递阶结构的多模型直接自适应解耦控制器.该控制器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,搜索最优控制器实现控制.系统的耦合作用被视为可测干扰,采用前馈方法予以消除,实现了静态解耦控制.与常规多模型控制器相比,该控制器在得到良好控制效果的同时,可以极大地减少模型的数量,进而减少计算量和计算时间,利于在复杂工业过程中实现实时控制.

参考文献(References):

- [1] WITTENMARK B, ASTROM K J. Practical issues in the implementation of self-tuning control [J]. *Automatica*, 1984, 20(5): 595 - 605.
- [2] NARENDRA K S, BALAKRISHNAN J. Improving transient response of adaptive control systems using multiple models and switching [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(9): 1861 - 1866.
- [3] NARENDRA K S, BALAKRISHNAN J. Adaptive control using multiple models [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(2):

171 - 187.

- [4] NARENDRA K S, XIANG C. Adaptive control of discrete-time systems using multiple models [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(9): 1669 - 1686.
- [5] WITTENMARK B, ASTROM K J. Practical issues in the implementation of self-tuning control [J]. *Automatica*, 1984, 20(5): 595 - 605.
- [6] 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 Xin, YUE Heng, CHAI Tianyou, et al. Multivariable direct adaptive pole placement controller using multiple models [J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(Suppl.): 23 - 27.)
- [7] 王昕, 岳恒, 柴天佑. 基于多模型切换的多变量直接自适应控制器[J]. 东北大学学报, 2002, 23(1): 1 - 4. (WANG Xin, YUE Heng, CHAI Tianyou. Multivariable direct adaptive controller using multiple models [J]. *J of Northeastern University*, 2002, 23(1): 1 - 4.)
- [8] CLARK D W. Self-tuning control of nonminimum-phase systems [J]. *Automatica*, 1984, 20(3): 501 - 517.
- [9] 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.
- [10] ZHIVOGLYADOV P V, MIDDLETON R H, FU M. Localization based switching adaptive control for time-varying discrete-time systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(4): 752 - 755.
- [11] 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.
- [12] 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 Xin, YUE Heng, CHAI Tianyou. Multivariable decoupling controller using multiple models for a non-minimum phase system [J]. *Control & Decision*, 2003, 18(1): 7 - 13.)
- [13] GOODWIN G C, RAMADGE P J, CAINES P E. Discrete-time multivariable adaptive control [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1980, 25(3): 449 - 456.

作者简介:

王昕 (1972—), 男, 在上海交通大学自动化研究所作博士后研究工作, 1993年毕业于上海交通大学获学士学位, 1998、2002年毕业于东北大学获硕士、博士学位, 主要研究方向为智能解耦控制、多模型自适应控制、复杂工业过程建模、优化与控制等, E-mail: wangxin26@sjtu.edu.cn;

李少远 (1965—), 男, 上海交通大学自动化研究所教授, 博士生导师, 1997年南开大学计算机与系统科学系获得博士学位, 2000年上海交通大学控制科学与工程博士后出站后留校, 主要研究领域为自适应预测控制、满意优化控制和智能控制的理论、方法和应用, E-mail: syli@sjtu.edu.cn;

岳恒 (1968—), 男, 东北大学自动化研究中心副教授, 1999年东北大学获博士学位, 研究方向为多变量智能解耦控制和复杂工业过程优化与控制, E-mail: yueheng1968@163.com.