

文章编号: 1001-0920(2009)02-0206-06

非最小相位逐维定位多模型自适应解耦控制器

王 昕^{1a,2}, 杨 辉², 李少远^{1b}, 郑益慧^{1a}

(1. 上海交通大学 a. 电工与电子技术中心, b. 自动化系, 上海 200240;

2. 华东交通大学 电气与工程学院, 南昌 330013)

摘 要: 针对多变量系统中多个参数同时跳变导致模型数目巨大、计算时间长等问题, 提出了采用逐维定位技术的多模型自适应解耦控制器. 该方法将多维空间的并行寻优问题转化为多个一维空间的串行寻优问题, 可大大减少系统模型集的数量. 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. 仿真结果表明当采用相同数目的模型时, 其控制效果明显优于常规多模型控制器.

关键词: 多模型; 逐维定位; 解耦; 非最小相位; 参数跳变

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Multiple models adaptive decoupling controller for nonminimum phase system using DBD technology

WANG Xin^{1a,2}, YANG Hui², LI Shaoyuan^{1b}, ZHENG Yi-hui^{1a}

(1a. Center of Electrical and Electronic Technology, 1b. Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China. Correspondent: WANG Xin, E-mail: wangxin26@sjtu.edu.cn)

Abstract: In a multivariable system, when multiple parameters jump simultaneously, a multiple models adaptive decoupling controller using dimension-by-dimension (DBD) is presented to solve the problems such as too many models, long computing time and so on. To find the optimal parameter, adopts one-dimension optimization method in series is adopted instead of multiple-dimension optimization method in parallel, which can reduce the number of the system fixed models greatly. For a non-minimum phase system, the interaction of the system is viewed as measurable disturbance and decoupled by using feedforward strategy. Finally, the global convergence is obtained. The simulation example shows that if the same number of the fixed models is used, system transient response and decoupling result are improved.

Key words: Multiple models; Dimension-by-dimension; Decoupling; Non-minimum phase; Jumping parameter

1 引 言

解耦器的设计严格依赖于实际工业过程的真实模型. 当实际过程模型参数缓慢变化时, 可以采用常规自适应方法实现解耦控制. 当待辨识参数初值的选取距真实值很近时, 可以得到较好的解耦效果. 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, 远离参数初值时, 会导致自适应算法收敛速度减慢, 时间延长, 进而降低系统的各项暂态性能指标^[1].

为了提高自适应系统的暂态性能, 文献[2]提出

了多模型切换的方法. 将系统参数的变化范围分成若干个不同区域, 采用多个初值不同的自适应模型同时进行辨识, 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. 在此基础上, 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. 文献[4]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, 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]. 为此, 设计多变量多模型自适应控制器, 采用

收稿日期: 2007-12-09; 修回日期: 2008-05-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60504010, 60774015, 60864004); 国家 863 计划项目(2008AA04Z129); 教育部科学技术研究重点项目(208071); 江西省自然科学基金项目(0611006)

作者简介: 王昕(1972—), 男, 沈阳人, 副教授, 从事智能解耦控制、多模型控制等研究; 杨辉(1965—), 男, 南昌人, 教授, 从事复杂系统建模、控制与优化等研究.

直接自适应算法^[6]实现动态解耦控制^[7].

多模型方法的引入也带来了自身的问题.一方面,为了提高系统的暂态性能,需要构造大量的模型.如文献[1]中,针对单变量系统且仅有一个参数发生变化的情况,构造了数百个模型.另一方面,大量模型的采用势必增加系统的计算量,延长计算时间,反而降低了系统的暂态性能.所以,如何在保证控制精度的基础上减少模型的数目,即模型集的优化问题是困扰多模型控制器实际应用的主要问题.文献[8]利用 Localization 技术动态精简系统的待选模型集;[9]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;[10]采用动态覆盖、逐层搜索的分层递阶结构以减少模型总数.但将上述方法推广到多变量系统时,由于变量数目的增加导致模型数量以指数形式激增,无法实现实时控制.为此,作者提出逐维定位技术,但必须要求系统为最小相位系统^[11].而对于连续时间最小相位系统,当采样周期较小时,也可能变成非最小相位系统^[12],因而上述算法难以在实际工业过程计算机控制系统中得到应用.

本文针对一类非最小相位系统设计逐维定位多模型自适应前馈解耦控制器.该控制器将系统中的耦合作用视为可测干扰,采用前馈策略予以消除,实现静态解耦控制.与文献[11]相比,不但适用于非最小相位系统,而且去除了参数跳变系统中“相邻跳变时间间隔足够长”的假设,使之更接近于实际应用.

2 被控系统描述

设多输入多输出参数跳变系统模型集为

$$= \{ P(t) \}, \tag{1}$$

式中 $P(t), t:0$ 可以用 DARMA 模型

$$P(t): A(t, z^{-1}) y(t) = B(t, z^{-1}) u(t - k) + d(t) \tag{2}$$

描述.式中 $u(t), y(t), d(t)$ 为 n 维输入、输出和测量误差向量; k 为系统传输时延.

$$A(t, z^{-1}) = I + A_1(t) z^{-1} + \dots + A_{n_a}(t) z^{-n_a}, \tag{3}$$

$$B(t, z^{-1}) = B_0(t) + B_1(t) z^{-1} + \dots + B_{n_b}(t) z^{-n_b}, \tag{4}$$

且 $B_0(t)$ 非奇异, $\forall t$. 由于 $A(t, z^{-1})$ 可通过左乘伴随矩阵方法变换为对角形矩阵,因此假设 $A(t, z^{-1})$ 为对角形多项式矩阵而不失一般性.

假设系统满足如下条件:

假设 1 系统为含跳变参数的时变系统,且跳变次数有限.

假设 2 t 变化时, $A(t, z^{-1}), B(t, z^{-1}), d(t)$ 构成的参数矩阵在一紧集 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.

由假设 1 可知,系统参数仅在某些时刻发生大范围跳变,而在相邻跳变时间间隔内保持不变.因此系统参数矩阵可写为分段常值矩阵,即

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) y(t) &= B(z^{-1}) u(t - k) + d, \\ \mu &= 1, 2, \dots, n_p. \end{aligned} \tag{5}$$

对于多变量系统(5),可写成

$$\begin{aligned} A(z^{-1}) y(t) &= \overset{\mu}{B}(z^{-1}) u(t - k) + \\ &\overset{\mu}{B}(z^{-1}) u(t - k) + d. \end{aligned} \tag{6}$$

式中

$$\begin{aligned} \overset{\mu}{B}(z^{-1}) &= \overset{\mu}{B}(z^{-1}) + \overset{\mu}{B}(z^{-1}), \\ \overset{\mu}{B}(z^{-1}) &= \text{diag}[\overset{\mu}{B}_{ii}(z^{-1})], \\ \overset{\mu}{B}(z^{-1}) &= (\overset{\mu}{B}_{ij}(z^{-1})) \text{ 且 } \overset{\mu}{B}_{ii}(z^{-1}) = 0. \end{aligned}$$

$\overset{\mu}{B}(z^{-1}) u(t)$ 中的 $u(t)$ 被视为多变量系统各通道的控制量,而 $\overset{\mu}{B}(z^{-1}) u(t)$ 中的 $u(t)$ 被视为通过耦合通道引起耦合作用的可测干扰.

3 多模型集的建立

3.1 采用逐维定位技术的最优固定模型

3.1.1 固定模型集的建立

定义 1 在任一跳变时间间隔内,由被控系统矩阵多项式 $\overset{\mu}{A}(z^{-1}), \overset{\mu}{B}(z^{-1}), \overset{\mu}{B}(z^{-1}), d$ 的各系数矩阵构成的矩阵 称为系统参数模型. μ 取不同值时(即 t 变化时),所有可能取值构成的集合称为系统参数模型集,记做 .

由定义 1 可知,系统参数模型 由矩阵多项式各系数矩阵构成,因此可以写成如下形式: $= f(p_1, \dots, p_d, \dots, p_h)$. 式中, $p_1, \dots, p_d, \dots, p_h$ 为 $\overset{\mu}{A}(z^{-1}), \overset{\mu}{B}(z^{-1}), \overset{\mu}{B}(z^{-1}), d$ 各系数矩阵中的系数, $p_d (d = 1, 2, \dots, h)$ 称为第 d 维参数.

定义 2 系统参数模型 由系数 p_1, \dots, p_h 构成的矩阵形式称为系统逐维参数模型,仍记作 . μ 取不同值时(即 t 变化时),第 d 维系统参数 $p_d (d = 1, 2, \dots, h)$ 所有可能取值构成的集合称为系统第 d 维参数模型集,记为 d .

将系统第 $d (d = 1, 2, \dots, h)$ 维参数模型集 d 划分为 m 个模型子集 $^d_f (f = 1, 2, \dots, m)$,并且每个模型子集 d_f 满足:

$$\text{性质 1 } \bigcap_{f=1}^m \bigcap_{d=1}^d \supseteq \bigcap_{f=1}^m \bigcap_{d=1}^d \text{ ; 非空, } f = 1, 2, \dots, m;$$

性质 2 $\forall p_d$, $\exists p_f$ 和 $0 < r_f < \dots$, 满足 $|p_d - p_f| < r_f$, 称 p_f 为 d 维模型子集的中心, r_f 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 被 h 个逐维参数模型集 ($d = 1, 2, \dots, h$) 张成的空间完全覆盖, 而 被 m 个模型子集 ($f = 1, 2, \dots, m$) 完全覆盖, 每个模型子集 又被其中心 p_f 及邻域完全覆盖. 因此可采用各模型子集的中心 p_f 构成固定模型集.

3.1.2 逐维定位方法

1) 根据先验知识确定第 d 维跳变参数 p_d 的变化区间, 即 $p_d = [p_{d,low}, p_{d,high}]$;

2) 将上述变化区间分成 m 个子区间, 确定每个子区间中心

$$p_f^d = p_{d,low} + \frac{p_{d,high} - p_{d,low}}{m - 1} \cdot (f - 1);$$

3) 由 m 个 p_f^d 构成第 d 维 m 个固定参数模型;

4) 根据跳变参数 p_d 的变化区间, 确定变化区间中心

$$p_c^d = p_{d,low} + \frac{p_{d,high} - p_{d,low}}{2};$$

5) 由各维参数变化区间中心 p_c^d 构造系统参考固定模型, 即 $c = f(p_1, \dots, p_c^d, \dots, p_h)$.

6) 对于第 1 维参数, 固定其他维参数使之等于参考固定模型的参数值, 代入 m 个 p_1^d ($f = 1, 2, \dots, m$) 构成固定模型

$$f_1 = f(p_1^d, p_c^2, \dots, p_c^d, \dots, p_c^h), f = 1, 2, \dots, m;$$

7) 根据切换准则选出第 1 维参数的最优值 p_1^* ;

8) 重复 5) ~ 7), 直到选出最后一维第 h 维固定参数模型 p_h^* ;

9) 将上述诸维最优参数 p_1^*, \dots, p_h^* 组合起来得到最优固定模型 $1 = f(p_1^*, \dots, p_h^*)$.

定义 3 多模型集由最优固定参数模型 1, 自适应模型 2 及可重新赋值的自适应模型 3 构成.

3.1.3 切换准则

对于逐维定位策略, 采用切换准则

$$J_{fix} = J_{d,f} = \frac{e_{d,f}(t)^2}{f},$$

$$f = 1, 2, \dots, m, d = 1, 2, \dots, h. \quad (7)$$

式中 $e_{d,f}(t) = y(t) - \hat{y}_{d,f}(t)$ 为第 d 维多模型集中第 f

个模型的输出误差向量. 令 $fix = \arg \min(J_{d,f})$, 则 p_{fix}^d 为第 d 维参数的最优值, 即 $p_d^* = p_{fix}^d$.

3.2 自适应模型

对于自适应模型 2, 定义数据向量 $X(t-1)$ 和系统参数矩阵 为

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

$$= [\phi_1, \dots, \phi_n] = [\overset{\mu}{A}_1, \dots; \overset{\mu}{B}_0, \dots; \overset{\mu}{B}_0, \dots; \overset{\mu}{d}]^T, \quad (9)$$

$$\phi_i = [a_{i1}^{\mu}, \dots; b_{i1}^{\mu}, \dots; \bar{b}_{i1}^{\mu}, \dots; d_i^{\mu}]^T, i = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

当系统的参数未知时, 采用如下辨识算法:

$$y(t) = -\overset{\mu}{A}(z^{-1})y(t-1) + \overset{\mu}{B}(z^{-1})u(t-k) + \overset{\mu}{B}(z^{-1})u(t-k_2) + d, \quad (11)$$

$$\phi_i(t) = \phi_i(t-1) + \frac{a(t) \cdot X(t-1)}{1 + X(t-1)^T X(t-1)} \cdot [y_i(t) - X(t-1)^T \phi_i(t-1)]. \quad (12)$$

3.3 可重新赋值的自适应模型

当选出的最优模型为可重新赋值的自适应模型 3 时, 采用式 (12) 辨识; 否则, 对 $3(t)$ 重新赋初值.

3.4 最优模型选取

多模型集中最优模型的选取, 采用准则

$$J_s = \frac{e_s(t)^2}{1 + X(t-1)^T X(t-1)}, s = 1, 2, 3, \quad (13)$$

式中 $e_s(t) = y(t) - \hat{y}_s(t)$ 为第 s 个模型的输出误差向量. 令 $switch = \arg \min(J_s)$, 则 $switch$ 为系统最优模型.

4 多模型自适应解耦控制器设计

对于上面选出的任何最优模型, 采用相同的控制器设计方法. 将最优模型写成标准形式如下:

$$A(z^{-1})y(t) = \bar{B}(z^{-1})u(t-k) + B(z^{-1})u(t-k) + d. \quad (14)$$

设性能指标为

$$J_c = P(z^{-1})y(t+k) - R(z^{-1})w(t) + Q(z^{-1})u(t) + S(z^{-1})u(t) + r^2. \quad (15)$$

式中 $w(t)$ 是参考输入; $P(z^{-1}), R(z^{-1}), Q(z^{-1})$ 为对角形加权多项式矩阵; r 为加权向量.

引入 Diophantine 方程

$$P(z^{-1}) = F(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-k}G(z^{-1}), \quad (16)$$

使 J_c 最小, 可得最优控制律为

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

式中

$$\begin{aligned} \bar{H}(z^{-1}) &= F(z^{-1})\bar{B}(z^{-1}) + Q(z^{-1}), \\ \bar{H}(z^{-1}) &= F(z^{-1})\bar{B}(z^{-1}) + S(z^{-1}), \bar{r} = Fd + r. \end{aligned}$$

为了消除耦合作用,联立式(14)和(17),得

$$\begin{aligned} [P(z^{-1}) + Q(z^{-1})\bar{B}^{-1}(z^{-1})A(z^{-1})]y(t+k) &= \\ [Q(z^{-1})\bar{B}^{-1}(z^{-1})\bar{B}(z^{-1}) - S(z^{-1})]u(t) + \\ R(z^{-1})w(t) + [Q(1)\bar{B}^{-1}(1)d - r], \end{aligned} \quad (18)$$

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 $P(z^{-1}) = I, Q(z^{-1}) = -I, R(z^{-1}) = I + \bar{B}^{-1}(1)A(1), S(z^{-1}) = \bar{B}^{-1}(1)\bar{B}(1), r = \bar{B}^{-1}(1)d$, 为一常数.

由式(18)可得最优控制律的另一种表达形式

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

式中 $H(z^{-1}) = \bar{H}(z^{-1}) + \bar{H}(z^{-1})$. 由式(14)和(19),得

$$\begin{aligned} [B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1) + A(z^{-1})]y(t+k) &= \\ [B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1) + B(z^{-1})B^{-1}(1)A(1)]w(t) + \\ [I - B(z^{-1})B^{-1}(1)]d. \end{aligned} \quad (20)$$

为了保证系统的稳定性,对系统作如下假设:

假设 4 对于系统,一定存在一个常数 满足

$$\det[B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1) + A(z^{-1})] \neq 0, \quad |z| = 1. \quad (21)$$

由式(20)知,稳态时,系统消除了稳态误差、零输入误差,实现了静态解耦.

5 全局收敛性分析

引理 1 在任意相邻跳变时间间隔内,对于任意模型,将控制律(20)应用到系统中,有

$$\begin{aligned} |y_i(t)| &\leq K_1 + K_2 \max_{1 \leq j \leq n} |e_j(t-k)|, \\ 0 &< K_1, K_2 < \infty, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} |u_i(t-k)| &\leq K_3 + K_4 \max_{1 \leq j \leq n} |e_j(t-k)|, \\ 0 &< K_3, K_4 < \infty, \end{aligned} \quad (23)$$

式中 $e(t) = y(t) - w(t-k)$ 为系统输出误差向量.

证明 定义广义输出误差向量 $\tilde{e}(t+k)$ 为

$$\begin{aligned} \tilde{e}(t+k) &= Py(t+k) - Rw(t) + \\ &Qu(t) + Su(t) + r. \end{aligned} \quad (24)$$

联立式(24)和(14),消去 $u(t)$,得

$$\begin{aligned} [B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1) + A(z^{-1})]y(t+k) &= \\ B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1)\tilde{e}(t+k) + \\ B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1)Rw(t). \end{aligned} \quad (25)$$

对于广义输出误差向量 $\tilde{e}(t+k)$,有

$$\tilde{e}(t+k) = [I + \bar{B}^{-1}(1)A(1)]e(t+k). \quad (26)$$

将式(26)代入(25),可得

$$\begin{aligned} [B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1) + A(z^{-1})]y(t+k) &= \\ B(z^{-1})B^{-1}(1)[\bar{B}(1) + A(1)]e(t+k) + \\ B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1)Bw(t). \end{aligned} \quad (27)$$

由假设 4 知 $[B(z^{-1})B^{-1}(1)\bar{B}(1) + A(z^{-1})]$ 稳定,考虑到 $w_i(t)$ 有界,由文献[13]可得式(22).同理,可得式(23).

因为选中的模型都采用相同控制方法,所以在任意时刻,对于任何选中的模型,系统输入 $u(t)$,输出 $y(t)$ 和误差 $e(t)$ 之间都满足式(22)和(23).

定理 1 在上述假设 1 ~ 假设 4 下,多模型自适应解耦控制算法用于系统(5)时, $\{y(t)\}, \{u(t)\}$ 有界且

$$\lim_i e(t) = \lim_i y(t) - w(t-k) = 0.$$

证明 (1) 在任意一个相邻跳变时间间隔内:

1) 当 $e_i(t) \neq 0$ 时,意味着采用参数已知的固定模型无法保证被控系统的收敛性.令 $\epsilon_i(t) = \min_j |e_j(t)|$,表示当采用固定模型时所导致的最小误差.

对于自适应模型,由式(11)和(12)构成的辨识算法具有性能收敛能力,有^[13]

$$\lim_i \frac{e_i(t)^2}{1 + X(t-1)^T X(t-1)} = 0, \quad (28)$$

则一定存在时间 t_s ,当 $t_s < t$ 时,满足

$$\frac{e_i(t)^2}{1 + X(t-1)^T X(t-1)} < \frac{\epsilon_i(t)^2}{1 + X(t-1)^T X(t-1)}. \quad (29)$$

此后,模型在两个自适应模型之间进行切换.由准则(13)可知,系统的输出误差满足

$$0 < \frac{e_i(t)^2}{1 + X(t-1)^T X(t-1)} < \frac{\epsilon_i(t)^2}{1 + X(t-1)^T X(t-1)}, \quad (30)$$

因此由式(30),根据夹逼准则可知

$$\lim_i \frac{e_i(t)^2}{1 + X(t-1)^T X(t-1)} = 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (31)$$

由引理 1 及文献[13]中引理 1 知 $\{y(t)\}, \{u(t)\}$ 有界且 $\lim_i e(t) = 0$.

2) 当 $e_i(t) = 0$ 时,此时切换指标 $J_1 = 0$ 最小,则 $\forall t, i$ 被选为最优固定模型.于是,多模型控制器就退化成一固定模型控制器.

因此有 $e(t) = e_i(t) = 0$,由引理 1 及

$e_i(t) = 0$, 可知 $\{y(t)\}, \{u(t)\}$ 有界.

综合 1), 2) 两种情况, 得证 $\lim_t e(t) = 0$.

(2) 在全部时间间隔内:

由 (1) 可知, 在每次跳变时间间隔内, 输出误差向量序列满足 $\lim_t e(t) = 0$. 又由假设 1 知, 系统参数跳变次数为有限次 (n_μ 次). 所以在参数最后一次跳变后, 即 $\mu = n_\mu, t > t_{n_\mu}$ 时, 有 $\lim_{t > t_{n_\mu}} e(t) = 0$.

所以在全部时间间隔内, 可证得输出误差向量 $\lim_t e(t) = 0$. 同理可得在全部时间间隔内, $\{y(t)\}, \{u(t)\}$ 有界.

6 仿真研究

多变量非最小相位系统如下所示:

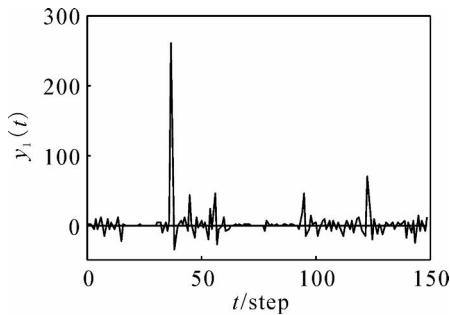
$$(I + A_1 z^{-1} + A_2 z^{-2}) y(t) = (B_0 + B_1 z^{-1}) u(t - 2) + d. \quad (32)$$

式中

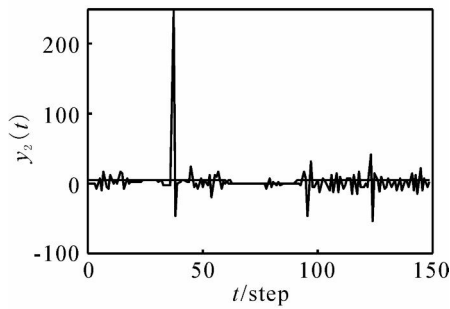
$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.6 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0.03 & 0 \\ 0 & 0.09 \end{bmatrix},$$
$$B_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1.5 \\ 0.2 & -0.66 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} -0.5 & 0.2 \\ 1.3 & 1.5 \end{bmatrix},$$
$$d = \begin{bmatrix} 0.7 \\ 1.5 \end{bmatrix}, w = \begin{bmatrix} 0 \\ 5 \end{bmatrix}.$$

当 $t = 30$ 步时, 参数 B_0 跳变至 $\begin{bmatrix} 3 & 5 \\ 2 & 5 \end{bmatrix}$, 仍为非

最小相位系统. 当 $t = 60$ 步时, 参数 B_0 和 w 同时发



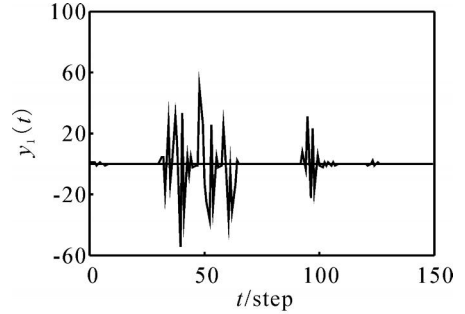
(a) 系统输出 $y_1(t)$



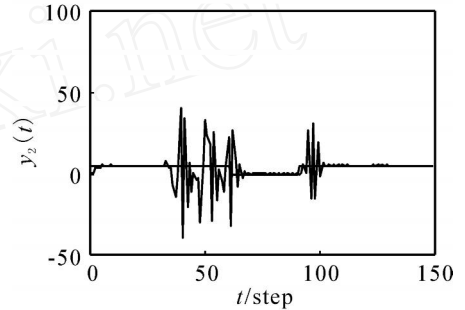
(b) 系统输出 $y_2(t)$

图 1 2401 个模型的常规多模型控制器仿真结果

生变化为 $\begin{bmatrix} -2 & -3 \\ -1 & -1.7 \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$. 当 $t = 90$ 步时, w 变为 $\begin{bmatrix} 0 \\ 5 \end{bmatrix}$, 用以检测系统的解耦效果. 当 $t = 120$ 步时, 扰动 d 变为 $\begin{bmatrix} -0.2 \\ -0.5 \end{bmatrix}$, 用以检测鲁棒性. 图 1 中每个

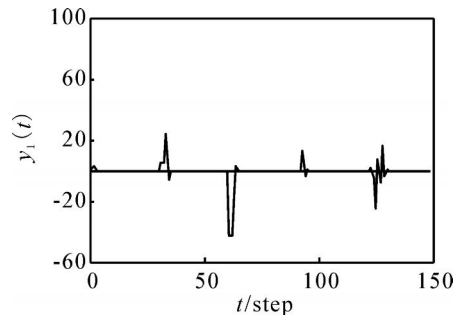


(a) 系统输出 $y_1(t)$

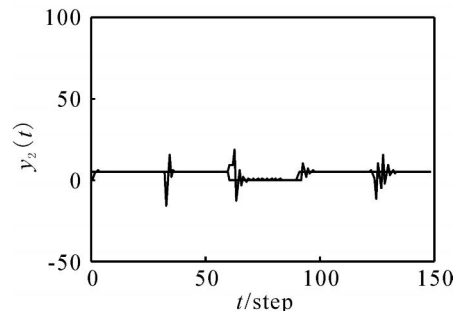


(b) 系统输出 $y_2(t)$

图 2 28 个模型的逐维定位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 2400 个模型的逐维定位多模型控制器仿真结果

参数采用 7 个固定模型,一共采用 $7^4 = 2401$ 个固定模型的常规多模型自适应控制器.图 2 中虽然每个参数也采用 7 个固定模型,但由于采用逐维定位方法,一共仅需 $7 \times 4 = 28$ 个模型.图 3 中也采用逐维定位方法,每个参数采用 600 个固定模型,一共采用 2400 个固定模型.从仿真图形中可以看出,由于采用逐维定位方法,图 2 的模型数目远远小于图 1.同时,当模型总数相同时,图 3 明显优于图 1.

7 结 论

本文针对一类非最小相位参数跳变系统,提出多模型逐维定位自适应解耦控制器.该方法将多维空间并行寻优问题转化为一维空间的串行寻优问题,再根据选出的最优模型,将系统间的耦合视为可测干扰,采用前馈方法予以消除.最后通过全局收敛性分析,表明了该控制器的有效性.

参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] Narendra K S, Balakrishnan J. Improving transient response of adaptive control systems using multiple models and dwitching [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] Wang X, Li S Y, Cai W J, et al. Multi-model direct adaptive decoupling control with application to the wind tunnel system [J]. ISA Transactions, 2005, 44(1): 131-143.
- [7] 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):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.)
- [8] 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.
- [9] Vasquez J R, Maybeck P S. Enhanced motion and sizing of bank in moving-bank MMAE [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(3): 770-779.
- [10] 王昕,李少远.多模型分层递阶自适应前馈解耦控制器[J].控制与决策,2005,20(1):17-22.
(Wang X, Li S Y. Hierarchical multiple models adaptive feedforward decoupling controller [J]. Control and Decision, 2005, 20(1):17-22.)
- [11] 王昕,王中杰,杨辉,等.采用逐维定位的多模型自适应解耦控制器[J].控制理论与应用,2006,23(5):367-372.
(Wang X, Wang Z J, Yang H, et al. Multiple-model adaptive decoupling controller employing dimension-by-dimension approach [J]. Control Theory and Application, 2006, 23(5): 367-372.)
- [12] Clark D W. Self-tuning control of nonminimum-phase systems[J]. Automatica, 1984, 20(3): 501-517.
- [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.
- [11] Lefevre E, Colot O. Belief function combination and conflict management[J]. Information Fusion, 2002, 3(2): 149-162.
- [12] 陈伟,胡昌华.基于最小二乘支撑向量机的陀螺仪漂移预测[J].宇航学报,2006,27(1):135-137.
(Chen W, Hu C H. Gyroscopic drift forecasting on least square support vector machine [J]. J of Astronautics, 2006, 27(1): 135-137.)
- [13] Wu C H, Ho J M, Lee D T. Travel-time prediction with support vector regression [J]. IEEE Trans on Intelligent Transportation System, 2004, 5(4): 276-281.

(上接第 205 页)