

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20151611

针对多变量耦合时滞系统的无模型控制改进算法

牛培峰, 李梦宁, 孙丽朋, 马云鹏, 刘魏岩, 李刚

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 工业生产是国家经济发展的命脉, 而在工业生产中过程控制起到非常重要的作用。实际的工业过程控制系统难以避免时滞, 再者大部分的工业化生产过程都不只有一个被控量且往往互相耦合, 种种原因使得整个控制过程难以建立准确的数学模型, 因此一般控制方法难以实现令人满意的控制。无模型自适应控制(model free adaptive control, MFAC)方法无须建立被控对象准确模型, 可直接进行控制器的设计, 考虑针对被控系统的大时滞特性, 将基本 MFAC 算法中的控制律进行变周期差值分析, 增大控制输入差值周期, 对原有控制算法进行改进, 并对 MIMO 系统实现直接解耦控制。以循环流化床锅炉燃烧过程模型为例, MATLAB 计算机模拟仿真实验表明该改进算法具有良好的控制效果。

关键词: 多变量耦合; 大时滞; 无模型自适应; 过程控制; 改进算法; 计算机模拟; 循环流化床

中图分类号: TK 323

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2016) 06—2488—07

Improved model-free control algorithm for multivariate coupling time-delay system

NIU Peifeng, LI Mengning, SUN Lipeng, MA Yunpeng, LIU Weiyan, LI Gang

(School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: The industrial production is the lifeline of the country's economic development, and the process control plays an important role in industrial production. Inevitably, the actual industrial process control systems are time-delay system. Besides, there are more than one controlled variable in most of the industrial production processes, and these controlled variables are coupled. All of these factors result in a huge difficulty to build an exact mathematical model for the control system, indicating that the tradition control methods cannot meet the control requirements nicely. With model-free adaptive control (MFAC) method, controller can be directly designed without exact model to reach the control objectives. Given the large time-delay of CFBB, the control law in MFAC is analyzed by changing the period of D-value, and control algorithm should be improved by increasing the period of D-value. Then, the decoupling control strategy of MIMO can be achieved. In the end, taking the circulating fluidized bed boiler combustion process as example, the MATLAB computer simulation results show that the algorithm has better control effect.

Key words: multivariate coupling; large time-delay; model-free adaptive; process control; improved algorithm; computer simulation; circulating fluidized bed

2015-10-26 收到初稿, 2016-02-21 收到修改稿。

联系人及第一作者: 牛培峰 (1958—), 男, 教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573306)。

Received date: 2015-10-26.

Corresponding author: Prof. NIU Peifeng, npf882000@163.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (61573306).

引言

随着科学技术的快速发展,许多工业过程都经历了巨大的变化,生产规模不断扩大,设备工艺愈加复杂,因而对于这些过程进行辨识和建模变得越来越困难。而对于传统的基于模型的控制方法,建立模型的准确程度直接影响了控制器的控制效果,在这种情况下,不需要依靠被控对象准确模型的控制方法的研究,就变得意义重大。

无模型控制也称为数据驱动控制,迄今为止,已经有十余种不同的无模型控制方法,比较典型的有迭代反馈整定(iterative feedback tuning, IFT)^[1]、虚拟参考反馈整定(virtual reference feedback tuning, VRFT)^[2]、无模型自适应控制(model free adaptive control, MFAC)^[3]等。文献[4-5]对基于紧格式线性化和偏格式线性化的无模型自适应控制算法的稳定性和收敛性进行了证明。文献[6]给出了无模型自适应系统设计方法,文献[7-8]进一步总结了无模型自适应控制的特点和性质。文献[9]给出了MIMO离散时间非线性系统的基本无模型自适应控制方案并分析了闭环系统稳定性。文献[10]证明对于多变量耦合系统, MFAC具有良好的控制效果。

实际系统变量的测量,设备的物理性质,以及信号的采集、传递和处理等多方面的因素均可导致输出信号响应相对于输入的时间滞后现象^[11],文献[12-13]给出对于时滞系统的控制要点。当系统滞后时间 τ 与惯性时间常数 T 的比值 $\tau/T \geq 0.5$ 时,就属于大滞后系统。目前已经有一些针对大时滞系统对无模型控制进行的改进^[14-16],文献[14]将非线性大时滞系统进行线性化得到一种新的无模型控制算法;文献[15]选用神经网络对控制器的函数进行逼近,寻找最优控制参数;文献[16]借鉴预测控制中的误差反馈校正思想,将泛模型进行改进,优化了算法中的未知参数。

但是这些算法改进研究都只限于简单的单输入单输出系统,实际上,工业控制中大部分遇到的都是多输入多输出系统,且多个变量之间往往存在着严重的耦合。针对多变量耦合的复杂时滞系统,本文在基本无模型自适应控制的基础上,将输入准则函数改为带滞后时间的输入准则函数,并将MIMO系统线性化数据模型代入新的准则函数中,提出一种改进的无模型自适应控制算法(improved model free adaptive control, IMFAC)。

1 SISO系统的基本无模型自适应控制

对于一般的SISO离散时间非线性系统

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-n_y), u(k), \dots, u(k-n_u)) \quad (1)$$

其中, $y(k) \in R$, $u(k) \in R$ 分别表示系统在 k 时刻的输出和输入; n_y 、 n_u 分别表示未知系统输入和输出的阶数; $f(\dots): R^{n_u+n_y+2} \mapsto R$ 为未知的非线性函数, R 表示全体数值空间。其紧格式线性化(CFDL)数据模型可表示为

$$y(k+1) = y(k) + \phi_c(k) \Delta u(k) \quad (2)$$

其中, $\phi_c(k) \in R$ 为式(1)所示函数 $f(\cdot)$ 的伪偏导数(pseudo partial derivative, PPD)。

控制输入准则函数如下

$$J(u(k)) = |y^*(k+1) - y(k+1)|^2 + \lambda |u(k) - u(k-1)|^2 \quad (3)$$

其中, $\lambda > 0$ 是权重因子,用来限制控制输入量的变化; $y^*(k+1)$ 为期望的输出信号。

将式(2)代入式(3)中,对 $u(k)$ 求导并使其为零,得到控制算法如下

$$u(k) = u(k-1) + \frac{\rho \phi_c(k)}{\lambda + |\phi_c(k)|^2} (y^*(k+1) - y(k)) \quad (4)$$

其中, $\rho \in (0, 1]$ 是步长因子,使算法具有一般性。

PPD是一个时变参数,因此需要利用系统的输入输出数据来进行估计,参数估计准则函数如下

$$J(\phi_c(k)) = |y(k) - y(k-1) - \phi_c(k) \Delta u(k-1)|^2 + \mu |\phi_c(k) - \hat{\phi}_c(k-1)|^2 \quad (5)$$

其中, $\mu > 0$ 是权重因子。

对式(5)求关于 $\phi_c(k)$ 的极值,得到PPD估计算法为

$$\hat{\phi}_c(k) = \hat{\phi}_c(k-1) + \frac{\eta \Delta u(k-1)}{\mu + \Delta u(k-1)^2} (\Delta y(k) - \hat{\phi}_c(k-1) \Delta u(k-1)) \quad (6)$$

其中, $\eta \in (0, 1]$ 为步长因子,使算法更具一般性, $\hat{\phi}_c(k)$ 为PPD $\phi_c(k)$ 的估计值。

为了使PPD估计算法[式(6)]对时变参数的跟踪能力更优秀,引入算法重置机制如下

$$\hat{\phi}_c(k) = \hat{\phi}_c(1), \text{ if } |\hat{\phi}_c(k)| \leq \varepsilon \text{ or } |\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon \text{ or } \text{sign}(\hat{\phi}_c(k)) \neq \text{sign}(\hat{\phi}_c(1)) \quad (7)$$

综上,得到的控制算法[式(4)]、PPD估计算法[式(6)]以及式(7)构成了CFDL-MFAC方案^[3],其稳定性和收敛性已经得到证明^[4-5]。

2 大滞后 MIMO 系统的改进无模型自适应控制算法

滞后环节的存在引起系统稳定性的降低,甚至变为不稳定系统^[12],针对被控对象的大时滞特性,考虑将滞后时间引入到控制器的算法当中,使得滞后量对于系统的影响直接在控制律和参数估计算法中体现,通过实时计算以达到更好的跟踪效果。具体做法是将基本无模型自适应控制算法中的控制输入准则函数进行调整,增大对被控对象控制输入作差的时间间隔,用 k 时刻的输入与滞后其 τ 时间长度的输入变化差值,代替原来相邻时刻的输入变化差值,这样把时间滞后对控制产生的影响直接引入到控制算法中,加强了算法对时滞影响的处理能力。同时针对多变量耦合特性,将算法扩展到 MIMO 系统^[10],增加控制算法中参数的维数,以满足控制要求。

考虑如下一般 MIMO 非线性离散时间系统^[9]

$$\mathbf{y}(k+1) = f(\mathbf{y}(k), \dots, \mathbf{y}(k-n_y), \mathbf{u}(k), \dots, \mathbf{u}(k-n_u)) \quad (8)$$

式中, $\mathbf{u}(k) = [u_1(k) \ \dots \ u_m(k)]^T \in R^m$ 为 k 时刻系统的控制输入向量, $\mathbf{y}(k+1) = [y_1(k+1) \ \dots \ y_n(k+1)]^T \in R^n$ 为 $k+1$ 时刻系统的输出向量; n_y 、 n_u 分别表示系统输入和输出阶数; $f(\dots) = (f_1(\dots), \dots, f_m(\dots))^T \in \prod_{n_u+n_y+2} R^m \mapsto R^m$ 是未知的非线性函数, R^m 表示全体 m 维数值空间。

2.1 紧格式线性化

将紧格式动态线性化 (CFDL)^[3]的方法推广到 MIMO 离散时间系统中。

对于式 (8) 所示系统, 提出如下假设。

假设 1: $f_i(\dots)$, $i=1, \dots, m$, 关于第 (n_y+2) 个变量的每一个分量具有连续的偏导数。

假设 2: 式 (8) 所示满足广义 lipschitz 条件, 即对于任意 $k_1 \neq k_2$, $k_1, k_2 \geq 0$ 和 $u(k_1) \neq u(k_2)$ 有 $\|\mathbf{y}(k_1+1) - \mathbf{y}(k_2+1)\| \leq b \|\mathbf{u}(k_1) - \mathbf{u}(k_2)\|$, 其中 $\mathbf{y}(k_i+1) = f(\mathbf{y}(k_i), \dots, \mathbf{y}(k_i-n_y), \mathbf{u}(k_i), \dots, \mathbf{u}(k_i-n_u))$, $i=1, 2$; $b>0$ 是一个常数。

定理 1: 对于满足假设 1 和假设 2 的非线性系统[式 (8)], 当 $\|\Delta \mathbf{u}(k)\| \neq 0$ 时, 一定存在一个被称为伪雅克比矩阵 (pseudo Jacobian matrix, PJM) 的时变参数 $\Phi_c(k) \in R^{m \times m}$, 使得式 (8) 可转化为如下 CFDL 数据模型

$$\Delta \mathbf{y}(k+1) = \Phi_c(k) \Delta \mathbf{u}(k) \quad (9)$$

且对于任意时刻 k , $\Phi_c(k)$ 是有界的。

$$\text{其中 } \Phi_c(k) = \begin{bmatrix} \varphi_{11}(k) & \varphi_{12}(k) & \dots & \varphi_{1m}(k) \\ \varphi_{21}(k) & \varphi_{22}(k) & \dots & \varphi_{2m}(k) \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ \varphi_{m1}(k) & \varphi_{m2}(k) & \dots & \varphi_{mm}(k) \end{bmatrix} \in R^{m \times m}$$

为系统的 PLM。

2.2 控制算法

在输入准则函数中引入滞后量, 使得输入准则函数改变, 同时推广到 MIMO 离散时间非线性系统^[9-10]。考虑如下控制输入准则函数

$$J(\mathbf{u}(k)) = \|\mathbf{y}^*(k+1) - \mathbf{y}(k+1)\|^2 + \lambda \|\mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-\tau-1)\|^2 \quad (10)$$

其中 $\lambda>0$ 是权重因子, 用于惩罚控制输入量过大的变化; $\mathbf{y}^*(k+1)$ 为期望的输出信号向量。由式 (9) 可近似得

$$\mathbf{y}(k+1) = \mathbf{y}(k) + \frac{\Phi_c(k)}{T} (\mathbf{u}(k) - \mathbf{u}(k-\tau-1)) \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (10) 中, 对 $\mathbf{u}(k)$ 求导并使导数为零, 得

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k-\tau-1) + \left(\lambda \mathbf{I} + \frac{1}{T^2} \Phi_c(k) \right)^{-1} \frac{1}{T} \Phi_c^T(k) (\mathbf{y}^*(k+1) - \mathbf{y}(k)) \quad (12)$$

因该运算中涉及到矩阵的逆运算, 在输入输出维数达到一定大数量的情况下, 这种运算需要花费相当大的时间, 在实际应用中有困难。所以, 可以从基本 SISO 情况下做推广, 得到如下简化后的控制算法

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k-\tau-1) + \frac{\rho' \Phi_c^T(k) (\mathbf{y}^*(k+1) - \mathbf{y}(k))}{\lambda + \frac{1}{T^2} \|\Phi_c(k)\|^2} \quad (13)$$

其中步长因子 $\rho' \in (0, 1]$ 的加入使控制算法具有一般性。

2.3 PJM 估计算法

类似于 SISO 离散时间非线性系统的 CFDL-MFAC 方案的参数估计算法, 结合 MIMO 离散时间 CFDL 模型, 根据对称性原理^[14], 给出如下参数估计准则函数

$$J(\Phi_c(k)) = \|\Delta \mathbf{y}(k) - \Phi_c(k) (\mathbf{u}(k-1) - \mathbf{u}(k-2-\tau))\|^2 + \mu \|\Phi_c(k) - \hat{\Phi}_c(k-1)\|^2 \quad (14)$$

其中, $\mu>0$ 是权重因子, 限制 PJM 估计值的过大变化。

同理于控制算法的推导过程, 为避免在计算中的矩阵求逆问题, 可将基本 MIMO 情况下的 PJM 估计算法做推广, 得到估计算法如下

$$\hat{\Phi}_c(k) = \hat{\Phi}_c(k-1) + \frac{\eta(\Delta y(k) - \hat{\Phi}_c(k-1))(u(k-1) - u(k-2-\tau))(u(k-1) - u(k-2-\tau))^T}{\mu + \|u(k-1) - u(k-2-\tau)\|^2} \quad (15)$$

令 $\Delta u(k-1) = u(k-1) - u(k-2-\tau)$, 将式 (15) 化简得

$$\hat{\Phi}_c(k) = \hat{\Phi}_c(k-1) + \frac{\eta(\Delta y(k) - \hat{\Phi}_c(k-1))\Delta \bar{u}(k-1)\Delta \bar{u}^T(k-1)}{\mu + \|\Delta \bar{u}(k-1)\|^2} \quad (16)$$

其中, $\eta \in (0, 2]$ 是步长因子, 使算法更具一般

$$\text{性; } \hat{\Phi}_c(k) = \begin{bmatrix} \hat{\phi}_{11}(k) & \hat{\phi}_{12}(k) & \cdots & \hat{\phi}_{1m}(k) \\ \hat{\phi}_{21}(k) & \hat{\phi}_{22}(k) & \cdots & \hat{\phi}_{2m}(k) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \hat{\phi}_{m1}(k) & \hat{\phi}_{m2}(k) & \cdots & \hat{\phi}_{mm}(k) \end{bmatrix} \in R^{m \times m} \text{ 为}$$

PJM $\Phi_c(k)$ 的估计值。

同理易知当 $\tau = 0$ 时有 $\Delta \bar{u}(k-1) = \Delta u(k)$, 只需对 η 和 μ 适当调整就回到基本 MIMO 系统的估计算法。

2.4 系统控制方案

综上, 参数估计算法[式 (16)]和控制算法[式 (13)], 可得到针对 MIMO 大时滞离散时间非线性系统的 IMFAC 方案如下

$$\hat{\Phi}_c(k) = \hat{\Phi}_c(k-1) + \frac{\eta(\Delta y(k) - \hat{\Phi}_c(k-1))\Delta \bar{u}(k-1)\Delta \bar{u}^T(k-1)}{\mu + \|\Delta \bar{u}(k-1)\|^2} \quad (17)$$

$$\hat{\phi}_{ii}(k) = \hat{\phi}_{ii}(1), \text{ if } |\phi_{ii}(k)| < b_2 \text{ or } |\phi_{ii}(k)| > \alpha b_2$$

$$\text{or sign}(\phi_{ii}(k)) \neq \text{sign}(\phi_{ii}(1)), \quad i = 1, \dots, m \quad (18)$$

$$\hat{\phi}_{ij}(k) = \hat{\phi}_{ij}(1), \text{ if } |\phi_{ij}(k)| > b_1 \text{ or}$$

$$\text{sign}(\phi_{ij}(k)) \neq \text{sign}(\phi_{ij}(1)), \quad i, j = 1, \dots, m, i \neq j \quad (19)$$

$$u(k) = u(k-\tau-1) + \frac{\rho' \hat{\Phi}_c^T(k)(y^*(k+1) - y(k))}{\lambda + \frac{1}{T^2} \|\hat{\Phi}_c(k)\|^2} \quad (20)$$

其中, $\hat{\phi}_{ij}(1)$ 是 $\hat{\phi}_{ij}(k)$ 的初值, $i, j = 1, \dots, m$; $\lambda > 0$, $\mu > 0$; $\eta \in (0, 2]$, $\rho' \in (0, 1]$ 。 λ 和 ρ' 为实际需要调节的参数。

3 仿真研究

典型的复杂自动化工业过程以循环流化床锅炉 (circulating fluidized bed boiler, CFBB) 的燃烧为例, 该燃烧系统是一个多输入多输出 (multiple input multiple output, MIMO)、大滞后、强耦合的复杂非线性系统^[17], 其控制系统中主要关注的是床温和主蒸气压力这两个变量, 一般通过调节给煤量

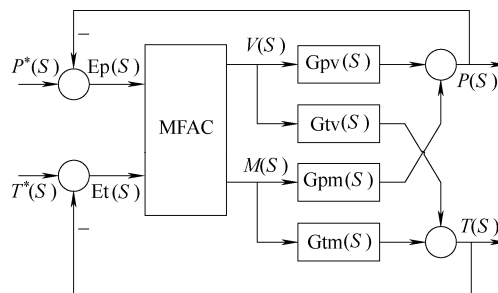


图1 MFAC 应用于 CFBB 燃烧过程控制系统原理

Fig.1 Schematic diagram of MFAC applied CFBB combustion process control system

和一次风来进行控制^[18]。控制系统见图 1, 其中 $P(S)$ 为主蒸气压力, $T(S)$ 为床料温度, $V(S)$ 为一次风量, $M(S)$ 为燃料量。

仿真所使用的 CFBB 燃烧过程模型参考了文献 [19-20] 对循环流化床锅炉燃烧系统的动态模型描述, 其燃烧控制系统的传递函数矩阵为

$$\begin{bmatrix} P(S) \\ T(S) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Gpv(S) & Gpm(S) \\ Gtv(S) & Gtm(S) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(S) \\ M(S) \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中

$$Gpv(S) = \frac{Kp_1}{(1+Tp_1S)^2(bS+1)}(aS-1) \quad (22)$$

$$Gtv(S) = \frac{K_{\theta 1}}{(1+T_{\theta 1}S)^2} \quad (23)$$

$$Gpm(S) = \frac{Kp_2}{(1+Tp_2S)^2}e^{-\tau_{p2}S} \quad (24)$$

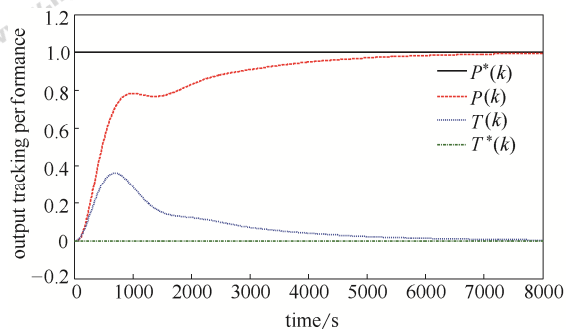
$$Gtm(S) = \frac{K_{\theta 2}}{(1+T_{\theta 2}S)^2}e^{-\tau_{\theta 2}S} \quad (25)$$

式中各参数都随不同工况在一定范围内进行变化^[19]。

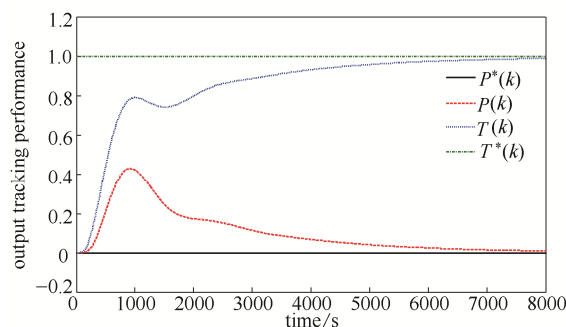
图 2(a)、(b) 分别给出 IMFAC 作用下的控制效果, 被控对象按表 1 中 F1 工况下参数设置, 控制方案参数设置为 $\rho' = 0.09$, $\lambda = 20$; 其中图 2(a) 系统输入为 $P^*(k) = 1$, $T^*(k) = 0$, 图 2(b) 中 $P^*(k) = 0$, $T^*(k) = 1$ 。

从图 2 可以看出, 在床温与主蒸气压力之间存在耦合的情况下, 主蒸气压力和床温的输出分别都完成了对参考输入的跟踪, 表明该改进算法对于多变量耦合系统可以实现直接解耦控制。

图 3 为 IMFAC、MFAC 和 PID 控制器分别作用时, 被控对象主蒸气压力和床温的跟踪效果。图中 $P_1(k)$ 、 $P_2(k)$ 、 $P_3(k)$ 、 $T_1(k)$ 、 $T_2(k)$ 、 $T_3(k)$ 分别表示 IMFAC、MFAC 以及 PID 控制下的输出。其中, IMFAC 参数为 $\rho' = 0.05$, $\lambda = 20$; MFAC 参数为 $\rho = 0.07$, $\lambda = 25$; PID 参数为 $K_p = 0.7$, $T_i = 0.005$,



(a) control effect to main steam pressure



(b) control effect to bed temperature

图 2 改进后 MFAC 算法的控制效果

Fig.2 Control effect of improved MFAC algorithm

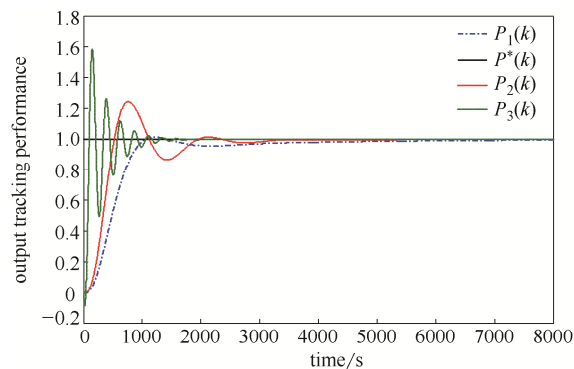
$T_d = 0.0004$ 。系统参考输入为 $P^*(k) = 1$, $T^*(k) = 1$ 。

由图 3 可以看出, 当同时对两个被控量进行控制时, IMFAC 控制效果得到明显提升, 相比于 PID 控制算法和 MFAC 算法, 缩短了过渡时间, 减小了系统超调, 同时过渡过程更加平缓, 另外还消除了 PID 算法下调整过程中的反向振荡。可以有效地降低因超调和波动对设备造成的影响和损耗。

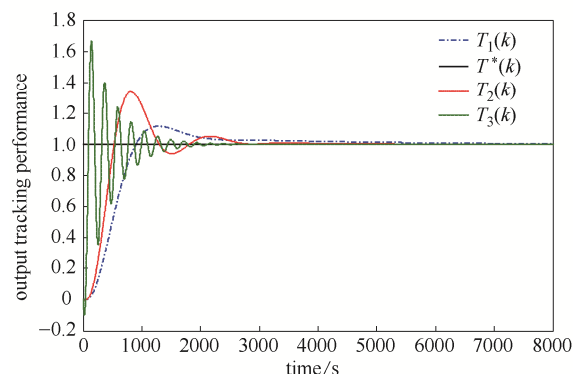
在参数变化范围内选取 3 组 CFBB 典型工况^[18]。其中各工况下被控对象的参数设置见表 1。

图 4 为不同工况下系统的跟踪输出, 控制器参数为 $\rho' = 0.05$, $\lambda = 20$, 系统参考输入为 $P^*(k) = 1$, $T^*(k) = 1$ 。

由图 4 可以看出, 取不同被控对象参数时, 在不改变控制器参数的条件下, 系统的输出依然能够较为准确地跟踪参考输入, 达到既定的控制目标, 表明该控制方法不依赖于被控对象精确模型的优点, 且对于不同参数下的被控对象都具有比较好的适应性。



(a) comparison of control effects to main steam pressure



(b) comparison of control effects to bed temperature

图 3 不同算法控制效果对比

Fig.3 Control effects of different algorithms

4 结 论

本文简单介绍了对于基本的 SISO 离散时间非线性系统的无模型自适应控制方法, 在此基础上, 针对复杂工业过程控制系统的主要特点, 即多变量耦合和大时滞的问题, 通过变周期差值分析, 增大了控制输入差值周期, 将被控系统的滞后量引入到输入准则函数中, 提出了一种改进的离散时间系统 CFDL-MFAC 控制方案, 对控制律进行数学理论推导。同时通过伪雅克比矩阵的引入, 将算法推广到 MIMO 离散时间非线性系统中, 避免了烦琐的解耦工作, 使之可以直接应用于复杂的多变量耦合系统中。最后, 以典型的工业过程即循环流化床锅炉燃烧过程作为被控对象, 进行了计算机仿真, 仿真实验表明, 对于多变量耦合的时滞系统, 该控制方法的控制功能可以实现, 并具有比较好的控制效果。

表 1 不同工况下的被控对象参数

Table 1 Parameters of controlled object in different conditions

Condition	K_{p1}	T_{p1}	K_{p2}	T_{p2}	τ_{p2}	$K_{\theta 1}$	$T_{\theta 1}$	$K_{\theta 2}$	$T_{\theta 1}$	$\tau_{\theta 1}$
F ₁	5	80	4	150	100	3	80	5	100	60
F ₂	6	115	4	150	100	4	130	5	100	60
F ₃	5	80	6	300	150	3	80	10	200	120

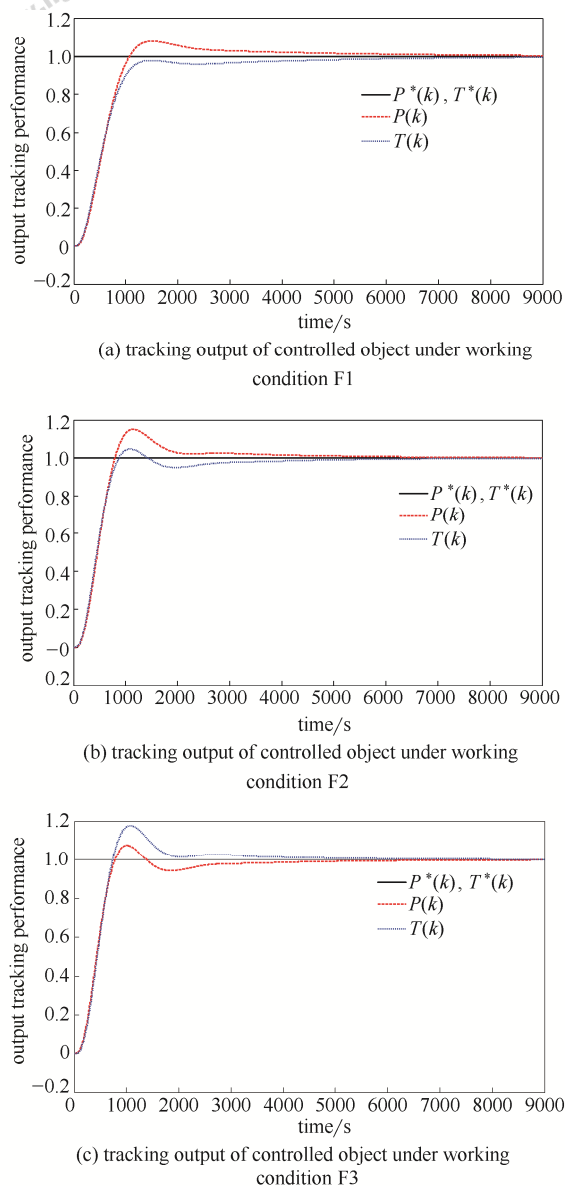


图4 不同工况下被控对象的跟踪输出

Fig.4 Tracking output of controlled object under different working conditions

References

- [1] HJALMARSSON H, GUNNARSSON S, GEVERS M. A convergent iterative restricted complexity control design scheme [C]//IEEE Conference on Decision & Control, 1994, 2: 1735-1740.
- [2] CAMPI M C, LECCHINI A, SAVARESI S M. Virtual reference feedback tuning: a direct method for the design of feedback controllers [J]. Automatica, 2002, 38 (8): 1337-1346.
- [3] 侯忠生. 非线性系统参数辨识, 自适应控制及无模型学习自适应控制 [D]. 沈阳: 东北大学, 1994.
HOU Z S. Parameter identification of nonlinear systems, adaptive control and model-free learning adaptive control [D]. Shenyang: Northeastern University, 1994.
- [4] 侯忠生. 再论无模型自适应控制 [J]. 系统科学与数学, 2014, 34 (10): 1182-1191.
- HOU Z S. Highlight and perspective on model free adaptive control [J]. Journal of Systems Science & Mathematical Sciences, 2014, 34 (10): 1182-1191.
- [5] 侯忠生. 无模型自适应控制的现状与展望 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23 (4): 586-592.
HOU Z S. On model-free adaptive control: the state of the art and perspective [J]. Control Theory & Applications, 2006, 23 (4): 586-592.
- [6] HOU Z, BU X. Model free adaptive control with data dropouts [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38 (8): 10709-10717.
- [7] 侯忠生. 再论无模型自适应控制 [J]. 系统科学与数学, 2014, (10): 1182-1191.
HOU Z S. Again on model-free adaptive control [J]. Systems Science and Mathematics, 2014, (10): 1182-1191.
- [8] TAN K K, HUANG S N, LEE T H, *et al.* Adaptive-predictive PI control of a class of SISO systems [C]//American Control Conference, 1999. Proceedings of the 1999. IEEE, 1999, 6: 3848-3852.
- [9] HOU Z, JIN S. Model Free Adaptive Control: Theory and Applications [M]. CRC Press, 2013.
- [10] 韩志刚, 蒋爱平, 汪国强. 无模型控制方法对多变量耦合系统控制的应用研究 [J]. 控制与决策, 2004, 19 (10): 1155-1158, 1162.
HAN Z G, JIANG A P, WANG G Q. Study on control of multivariable coupling systems with model free control method [J]. Control and Decision, 2004, 19 (10): 1155-1158, 1162.
- [11] MARSHALL J E. Control of Time-delay Systems [M]. London: Institution of Electrical Engineers, 1979.
- [12] ZHENG Q, GAO Z. Predictive active disturbance rejection control for processes with time delay [J]. ISA Transactions, 2014, 53 (4): 873-881.
- [13] ZHANG J, ZHANG H, LUO Y, *et al.* Model-free optimal control design for a class of linear discrete-time systems with multiple delays using adaptive dynamic programming [J]. Neurocomputing, 2014, 135: 163-170.
- [14] 金尚泰, 侯忠生. 一类非线性大滞后系统的改进无模型自适应控制 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25 (4): 623-626.
JIN S T, HOU Z S. An improved model-free adaptive control for a class of nonlinear large delay systems [J]. Control Theory & Applications, 2008, 25 (4): 623-626.
- [15] 王东, 周东华, 金以慧. 自适应广义一般模型控制 [J]. 化工学报, 2003, 54 (3): 344-349.
WANG D, ZHOU D H, JIN Y H. Adaptive generalized generic model control [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2003, 54 (3): 344-349.
- [16] 李秀英, 李桂英, 毛琳, 等. 采用改进粒子群算法的非线性大时滞系统无模型控制 [J]. 智能系统学报, 2013, 8 (3): 254-260.
LI X Y, LI G Y, MAO L, *et al.* Model-free control method for a nonlinear system with large time-delay based on IPSO [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2013, 8 (3): 254-260.
- [17] 牛培峰, 柴天佑. 采用国产 75t/h 循环流化床锅炉的单元机组汽压自适应控制系统 [J]. 控制理论与应用, 1998, 15 (1): 82-86.
NIU P F, CHAI T Y. The Steam pressure self-adaptive control system of a monoblock with home-made 75t/h CFBB [J]. Control Theory &

- Applications, 1998, **15** (1): 82-86.
- [18] 牛培峰. 大型国产循环流化床锅炉燃烧过程智能控制系统应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, **20** (12): 62-66.
- NIU P F. An introduce combustion process control system application and research for circulation fluidized bad boilers of giant domestic manufacture [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, **20** (12): 62-66
- [19] 杨晨, 何祖威, 唐胜利, 等. 大型循环流化床锅炉整体动态模型的构成及其求解方法 [J]. 化工学报, 2001, **52** (12): 1083-1089.
- YANG C, HE Z W, TANG S L, *et al.* Integrated dynamic modeling of large scale circulating fluidized bed boiler and its solution [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2001, **52** (12): 1083-1089.
- [20] 童一飞, 金晓明. 基于广义预测控制的循环流化床锅炉燃烧过程多目标优化控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2010, **30** (11): 38-43.
- TONG Y F, JIN X M. Optimal control of multi-objective in circulating fluidized bed boiler combustion process based on generalized predictive control method [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, **30** (11): 38-43.