

一类工业运行过程多模型自适应控制方法

富月¹ 杜琼¹

摘要 针对一类动态未知的工业运行过程, 提出一种基于神经网络补偿和多模型切换的自适应控制方法. 为充分考虑底层跟踪误差对整个运行过程优化和控制的影响, 将底层极点配置控制系统和上层运行层动态模型相结合, 作为运行过程动态模型. 针对参数未知的运行过程动态模型, 设计由线性鲁棒自适应控制器、基于神经网络补偿的非线性自适应控制器以及切换机制组成的多模型自适应控制算法. 采用带死区的递推最小二乘算法在线辨识控制器参数, 克服了投影算法收敛速度慢、对参数初值灵敏的局限. 理论分析和仿真实验结果表明了所提方法的有效性.

关键词 工业运行过程, 参数未知, 多模型自适应控制, 递推最小二乘算法

引用格式 富月, 杜琼. 一类工业运行过程多模型自适应控制方法. 自动化学报, 2018, 44(7): 1250–1259

DOI 10.16383/j.aas.2017.c160763

Multi-model Adaptive Control Method for a Class of Industrial Operational Processes

FU Yue¹ DU Qiong¹

Abstract In this paper, for a class of industrial operational processes, an adaptive control method based on neural networks and multiple models is proposed. In order to fully consider the influence of tracking errors in bottom closed-loop system on the performance of the operational process, the bottom pole-assignment control system and the dynamic model in the upper layer are combined as generalized dynamic model of the whole operational process. For the dynamic model with unknown parameters, a multi-model adaptive control method, composed of a linear robust adaptive controller, a neural-network-based nonlinear adaptive controller and a switching mechanism, is designed. Since the recursive least square algorithm has a faster convergence rate and less sensitivity to the initial values of parameters than the projection algorithm, the recursive least square algorithm with deadzone is used to identify the unknown controller parameters. Results of theoretic analysis and simulation experiments demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words Industrial operational processes, unknown parameters, multi-model adaptive control, recursive least square algorithm

Citation Fu Yue, Du Qiong. Multi-model adaptive control method for a class of industrial operational processes. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(7): 1250–1259

工业过程运行反馈控制包括底层回路关键被控变量的反馈控制和上层运行指标的反馈控制, 也就是说, 工业过程运行反馈控制不仅包括保证过程控制系统关键被控变量的跟踪控制, 而且还要选择合适的关键被控变量设定值, 实现运行指标目标值的跟踪^[1]. 如图 1 所示, 传统的工业过程运行反馈控制过程中, 关键被控变量的设定值 $Y^* = y_j^*, j = 1, 2, \dots, n$ 由工序作业班的运行工程师根据运行指标目

标值 $R^* = R_j^*, j = 1, 2, \dots, m$ 和多年积累的人工操作经验, 并结合各种运行工况信息人为给出. 为实现工业运行过程的自动控制, 自上世纪 80 年代末以来, 很多学者开展了工业运行过程控制方法的研究. 文献 [2] 基于分层递阶控制的架构和多层优化理论, 提出了反馈优化控制的思想. 文献 [3] 通过离线选择与工业过程经济效益相关的被控变量的设定值, 提出了自优化控制的概念. 文献 [4] 将底层回路控制与过程运行优化相结合, 提出了具有两层结构的实时优化 (Real time optimization, RTO) 控制方法, 上层采用静态模型优化经济性指标, 产生底层控制回路的设定值, 通过底层控制器使被控变量跟踪设定值, 从而尽可能使过程运行在经济指标目标值附近. 文献 [5] 将 RTO 与模型预测控制相结合, 提出了具有三层结构的运行反馈控制方法. 此外, 还有一些基于神经网络、模糊推理、案例推理等智能技术的运行反馈控制方法, 例如文献 [6] 将案例推理、规

收稿日期 2016-11-10 录用日期 2017-03-30
Manuscript received November 10, 2016; accepted March 30, 2017

国家自然科学基金 (61573090, 61525302), 高校基本科研业务费项目 (N160801001) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61573090, 61525302) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (N160801001)

本文责任编辑 贺威

Recommended by Associate Editor HE Wei

1. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110819

1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819

反馈控制,为充分考虑底层跟踪设定值的动态误差对整个运行过程控制的影响,运行过程动态模型可看作是由底层基础反馈控制系统(3)和运行层动态模型(4)构成的广义模型.

$$x(k+1) = \tilde{A}x(k) + \tilde{B}y^*(k) \quad (5a)$$

$$r(k+1) = Mr(k) + \tilde{C}x(k) + \nu(k) \quad (5b)$$

其中, $\tilde{A} = \bar{A} - \bar{B}K$, $\tilde{B} = \bar{B}L$, $\tilde{C} = N\bar{C}$, 满足 $\tilde{C}^T\tilde{C}$ 可逆.

假设 1. 未建模动态 $\nu(k)$ 的差分项或变化率全局有界, 即对任意的 $k > 0$, $\|\nu(k) - \nu(k-2)\| \leq \Gamma$, 其中, Γ 为正常数.

本文的目标是将设定值 $y^*(k)$ 看作控制输入, 确定一个多模型自适应控制器, 当其应用于不确定的运行过程(5)时, 闭环运行过程的输入、输出信号有界, 即闭环系统 BIBO 稳定, 并且运行过程输出 $r(k)$ 尽可能跟踪事先指定的运行指标目标值 $r^*(k)$ 的变化. 由于未建模动态的存在, 单独使用线性控制器即使能保证闭环运行过程 BIBO 稳定, 也很难满足一定的跟踪性能. 本文将基于带死区的递推最小二乘算法的线性鲁棒自适应控制器和具有未建模动态补偿的非线性自适应控制器与切换机制相结合, 提出的多模型自适应控制器不仅能够保证闭环运行过程 BIBO 稳定, 而且可使其具有良好的跟踪性能.

2 基于带死区的递推最小二乘算法的线性鲁棒自适应控制

2.1 一步超前控制器设计

为进行控制器设计, 首先需要将广义模型(5)转化成差分方程形式, 为此引入后移算子 z^{-1} , 于是式(5)可以重新整理为

$$A(z^{-1})r(k+2) = By^*(k) + C(z^{-1})\nu(k+1) \quad (6)$$

其中,

$$A(z^{-1}) = \tilde{C}[I_n - \tilde{A}z^{-1}](\tilde{C}^T\tilde{C})^{-1}\tilde{C}^T(I_m - Mz^{-1})$$

$$B = \tilde{C}\tilde{B}$$

$$C(z^{-1}) = \tilde{C}[I_n - \tilde{A}z^{-1}](\tilde{C}^T\tilde{C})^{-1}\tilde{C}^T$$

下面针对模型(6)设计一步超前控制器. 引入如下一步超前最优性能指标:

$$J(k) = \|T(z^{-1})r(k+2) - R(z^{-1})r^*(k+2)\|^2 \quad (7)$$

其中, $r^*(k) = [r_1^*(k), r_2^*(k), \dots, r_m^*(k)]^T \in \mathbf{R}^m$ 为已知有界的运行指标目标值, $T(z^{-1}) \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 为

稳定的对角加权多项式矩阵, 满足 $T(0)$ 非奇异; $R(z^{-1}) \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 为对角加权多项式矩阵. 引入方程

$$T(z^{-1}) = H(z^{-1})A(z^{-1}) + z^{-2}G(z^{-1}) \quad (8)$$

为使 $H(z^{-1})$ 和 $G(z^{-1})$ 为唯一解或最小阶解, 由文献[17]可知, $H(z^{-1})$ 和 $G(z^{-1})$ 都为 1 阶多项式矩阵, $T(z^{-1})$ 的阶次小于或等于 3. 易知, $H(0) = T(0)$. 将式(6)两边乘 $H(z^{-1})$ 并利用式(8), 得

$$T(z^{-1})r(k+2) = G(z^{-1})r(k) + H(z^{-1})By^*(k) + H(z^{-1})C(z^{-1})\nu(k+1) \quad (9)$$

定义时滞-差分算子 $\Delta = 1 - z^{-2}$, 则式(9)转化为

$$T(z^{-1})r(k+2) = G(z^{-1})\Delta r(k) + H(z^{-1})B\Delta y^*(k) + T(z^{-1})r(k) + \rho(k) \quad (10)$$

其中, $\rho(k) = H(z^{-1})C(z^{-1})[\nu(k+1) - \nu(k-1)]$. 于是, 使性能指标(7)最小的一步超前最优控制 $y^*(k)$ 通过下式计算.

$$G(z^{-1})\Delta r(k) + H(z^{-1})B\Delta y^*(k) + \rho(k) = R(z^{-1})r^*(k+2) - T(z^{-1})r(k) \quad (11)$$

将式(11)代入模型(6), 得到运行过程闭环方程

$$T(z^{-1})r(k+2) = R(z^{-1})r^*(k+2) \quad (12)$$

由式(12)可知, 若选择 $R(z^{-1}) = T(z^{-1})$, 则可消除运行过程的跟踪误差.

由于外部干扰或未建模动态往往是未知的, 当不考虑它对运行过程闭环系统的影响时, 可采用下面的线性控制器方程求取控制输入 $y^*(k)$.

$$G(z^{-1})\Delta r(k) + H(z^{-1})B\Delta y^*(k) = R(z^{-1})r^*(k+2) - T(z^{-1})r(k) \quad (13)$$

2.2 线性鲁棒自适应控制

运行过程的动态模型往往是未知的, 因此需要采用自适应方法在线获得控制器参数, 当组成 $A(z^{-1})$, B , $C(z^{-1})$ 的参数阵未知时, 式(10)可看作控制器参数辨识方程, 为此记 $\phi(k) = T(z^{-1})r(k)$, $G(z^{-1}) = G_0 + G_1(z^{-1})$, $Q(z^{-1}) = H(z^{-1})B = Q_0 + Q_1(z^{-1})$, 并定义数据向量和参数矩阵分别为 $\varphi(k) = [\Delta r^T(k), \Delta r^T(k-1), \Delta y^{*T}(k), \Delta y^{*T}(k-1)]^T$ 和 $\theta = [G_0, G_1, Q_0, Q_1]^T$, 则控制器参数辨识方程(10)可以写为

$$\phi(k+2) = \theta^T\varphi(k) + \phi(k) + \rho(k) \quad (14)$$

线性控制器方程 (13) 可重新写为

$$\theta^T \varphi(k) = R(z^{-1})r^*(k+2) - T(z^{-1})r(k) \quad (15)$$

对于未知的参数矩阵 θ , 采用带死区的递推最小二乘方法进行在线辨识.

$$\hat{\theta}(k) = \text{proj}\{\hat{\theta}^+(k)\} \quad (16a)$$

$$\hat{\theta}^+(k) = \hat{\theta}(k-2) + \frac{\lambda(k)P(k-2)\varphi(k-2)e^T(k)}{1 + \varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)} \quad (16b)$$

$$P(k) = P(k-2) - \frac{\lambda(k)P(k-2)\varphi(k-2)\varphi^T(k-2)P(k-2)}{1 + \varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)} \quad (16c)$$

$$e(k) = \phi(k) - \hat{\phi}(k) \quad (16d)$$

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\theta}^T(k-2)\varphi(k-2) + \phi(k-2) \quad (16e)$$

$$\lambda(k) = \begin{cases} \frac{1}{2}, & \text{如果 } \|e(k)\| > 2E \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (16f)$$

$$\text{proj}\{\hat{\theta}^+(k)\} = \begin{cases} \hat{\theta}^+(k), & \hat{Q}_0^+(k) \text{ 非奇异} \\ [\dots, Q_{\min}, \dots]^T, & \text{否则} \end{cases} \quad (16g)$$

其中, $[\varphi(0), \hat{\theta}(0), P(0)]$ 为初始条件, $P(0) > 0$ 为正定矩阵, E 为 $\rho(k)$ 的已知上界, $\hat{\theta}(k) = [\hat{G}_0(k), \hat{G}_1(k), \hat{Q}_0(k), \hat{Q}_1(k)]^T$ 为 k 时刻未知参数矩阵 θ 的估计, $\hat{\theta}^+(k) = [\hat{G}_0^+(k), \hat{G}_1^+(k), \hat{Q}_0^+(k), \hat{Q}_1^+(k)]^T$, $\text{proj}\{\cdot\}$ 为一投影算子, 满足式 (16g).

由式 (15) 及确定性等价原则可知, 线性鲁棒自适应控制器为

$$\hat{\theta}^T(k)\varphi(k) = R(z^{-1})r^*(k+2) - T(z^{-1})r(k) \quad (17)$$

2.3 线性鲁棒自适应控制系统稳定性和性能

引理 1. 定义函数

$$V(k) = \text{tr} \left[\hat{\theta}^T(k)P^{-1}(K)\tilde{\theta}(k) \right]$$

则带死区的递推最小二乘辨识算法 (16) 具有如下性质:

1)

$$V(k) - V(k-2) \leq \frac{3\lambda(k)\|e(k)\|^2}{8[1 + \varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)]} - \frac{\lambda(k)[\|e(k)\|^2 - 4E^2]}{4\{1 + [1 - \lambda(k)]\varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)\}}$$

2)

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|\hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k-2)\| = 0$$

证明. 见附录 A. \square

定理 1. 运行过程动态模型 (5) 或 (6) 满足假设 1, 则当线性鲁棒自适应控制算法 (16) 应用于式 (6) 时, 闭环运行过程全局李雅普诺夫稳定, 并且广义跟踪误差满足 $\lim_{k \rightarrow \infty} \lambda(k)[\|\bar{e}(k)\|^2 - 4E^2] = 0$, 其中, $\bar{e}(k) := T(z^{-1})r(k) - R(z^{-1})r^*(k)$.

证明. 由引理 1 的 1) 可知,

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\lambda(k)[\|e(k)\|^2 - 4E^2]}{4\{1 + [1 - \lambda(k)]\varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)\}} = 0 \quad (18)$$

由于 $\bar{e}(k) := T(z^{-1})r(k) - R(z^{-1})r^*(k)$ 及 $T(z^{-1})$ 的稳定性, 存在正常数 c_1, c_2, c_3, c_4 满足

$$|r_i(k)| \leq c_1 + c_2 \max_{\substack{0 \leq \tau \leq t \\ 1 \leq i \leq m}} |\bar{e}_i(\tau)|, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

$$|y_i^*(k-2)| \leq c_3 + c_4 \max_{\substack{0 \leq \tau \leq t \\ 1 \leq i \leq m}} |r_i(\tau)|, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (20)$$

令

$$X(k-2) =$$

$$[r^T(k-2), r^T(k-3), y^{*T}(k-2), y^{*T}(k-3)]^T$$

则存在正常数 c_5, c_6 满足

$$\|X(k-2)\| \leq c_5 + c_6 \max_{0 \leq \tau \leq t} \|\bar{e}(\tau)\| \quad (21)$$

由式 (16d) 可知,

$$e(k) = T(z^{-1})r(k) - R(z^{-1})r^*(k) = \bar{e}(k) \quad (22)$$

因此, 由式 (21) 和式 (22) 可知

$$\|X(k-2)\| \leq c_5 + c_6 \max_{0 \leq \tau \leq t} \|e(\tau)\| \quad (23)$$

由式 (23) 可知, 单独采用线性鲁棒自适应控制算法时, 系统输入和输出信号的有界性由 $e(k)$ 的有界性决定. 下面假设 $e(k)$ 无界. 由式 (16f) 可知, 存在时刻 $K_0 > 0$, 当 $k > K_0$ 时, $\|e(k)\| > 2E$ 并且 $\lambda(k) = 1/2$, 即式 (18) 的分子是一个正实序列. 于是存在一单调递增序列 $\|e(k_n)\|$, 使得

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|e(k_n)\| = \infty$$

由式 (23) 可知

$$\frac{\lambda(k_n)[\|e(k_n)\|^2 - 4E^2]}{4\{1 + [1 - \lambda(k_n)]\varphi^T(k_n-2)P(k_n-2)\varphi(k_n-2)\}} \geq$$

$$\frac{\lambda(k_n)[\|e(k_n)\|^2 - 4E^2]}{81 + [1 - \lambda(k_n)][(c_5 + c_6\|e(k_n)\|)^2]\|P(k_n - 2)\|}$$

由于 $\|P(k_n - 2)\|$ 为递减序列, 因此,

$$\|P(k_n - 2)\| \leq \|P(0)\|$$

因此

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\lambda(k_n)[\|e(k_n)\|^2 - 4E^2]}{41 + [1 - \lambda(k_n)]\varphi^T(k_n - 2)P(k_n - 2)\varphi(k_n - 2)} \geq \frac{1}{8c_6\|P(0)\|} > 0$$

这与式 (18) 矛盾. 故假设不成立, $e(k)$ 有界, 从而采用线性鲁棒自适应控制算法时, 闭环系统 BIBO 稳定. \square

注释 1. 单独使用线性鲁棒自适应控制器能够保证闭环运行过程全局李亚普洛夫稳定, 但是无法使运行过程具有良好的跟踪性能. 为了改善运行过程的跟踪性能, 同时不影响其稳定性, 我们将线性鲁棒自适应控制器、基于神经网络的非线性控制器以及切换机制相结合, 提出一种新的多模型自适应控制方法.

3 多模型自适应控制

3.1 多模型自适应控制算法

下面考虑多模型自适应控制问题, 为将问题简化, 采用两个模型, 多模型切换系统如图 2 所示.

图 2 中, 线性估计模型定义为

$$\hat{\phi}_1(k) = \hat{\theta}_1^T(k-2)\varphi(k-2) + \phi(k-2) \quad (24)$$

其中, $\hat{\theta}_1(k) = [\hat{G}_{1,0}(k), \hat{G}_{1,1}(k), \hat{Q}_{1,0}(k), \hat{Q}_{1,1}(k)]^T$ 为 k 时刻的基于线性模型 (24) 的估计, 采用式 (16) 在线辨识, 线性辨识误差为

$$e_1(k) = \phi(k) - \hat{\phi}_1(k) \quad (25)$$

通过下式计算控制输入 $y^*(k)$, 作为基于线性模型的控制器 $y_1^*(k)$.

$$\hat{\theta}_1^T(k)\varphi(k) = R(z^{-1})r^*(k+2) - T(z^{-1})r(k) \quad (26)$$

非线性估计模型定义为

$$\hat{\phi}_2(k) = \hat{\theta}_2^T(k-2)\varphi(k-2) + \phi(k-2) + \hat{\rho}(k-2) \quad (27)$$

其中, $\hat{\theta}_2(k) = [\hat{G}_{2,0}(k), \hat{G}_{2,1}(k), \hat{Q}_{2,0}(k), \hat{Q}_{2,1}(k)]^T$ 为 k 时刻 θ 的基于非线性模型 (27) 的估计; $\hat{\rho}(k)$ 为 $\rho^*(k)$ 的神经网络估计, 其中, $\rho^*(k) := \Delta\phi(k+2) - \hat{\theta}_2(k)^T\varphi(k)$, 即

$$\hat{\rho}(k) = NN[\widehat{W}(k), \varphi(k)] \quad (28)$$

其中, $NN[\cdot]$ 表示神经网络结构; $\varphi(k)$ 为神经网络的输入向量; $\widehat{W}(k)$ 为 k 时刻理想权阵 W^* 的估计. 与文献 [12] 类似, 除了要求参数阵的估计 $\hat{\theta}_2(k)$ 和权阵的估计 $\widehat{W}(k)$ 有界, $\hat{Q}_{2,0}(k)$ 非奇异, 并未对 $\hat{\theta}_2(k)$ 的辨识算法和神经网络的结构以及权阵校正算法进行任何限制, 即

$$\hat{\theta}_2(k), \widehat{W}(k); \hat{Q}_{2,0}(k) \text{ 非奇异, } \forall k \quad (29)$$

非线性辨识误差为

$$e_2(k) = \phi(k) - \hat{\phi}_2(k) \quad (30)$$

因此, 根据式 (10) 和确定性等价原则, 通过下式计算控制输入 $y^*(k)$, 作为基于非线性模型的控制器 $y_2^*(k)$.

$$\hat{\theta}_2(k)\varphi(k) + \hat{\rho}(k) = R(z^{-1})r^*(k+2) - T(z^{-1})r(k) \quad (31)$$

切换准则为

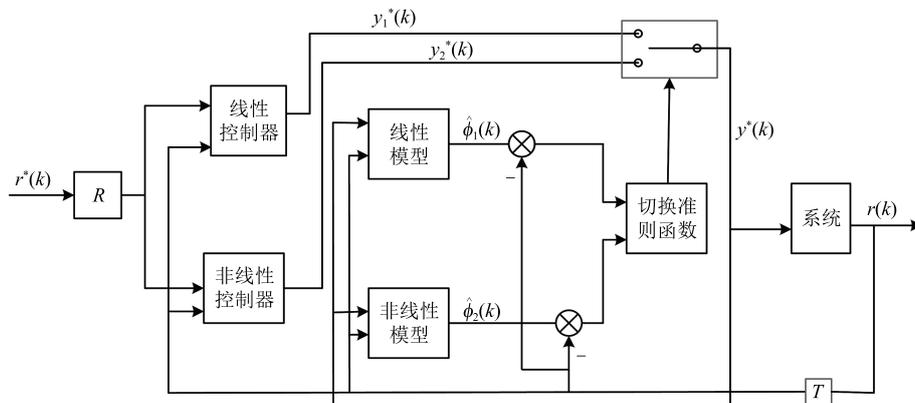


图 2 多模型自适应控制系统结构

Fig. 2 The structure of multi-model adaptive control system

$$J_j(k) = \sum_{i=2}^k \frac{\lambda_j(k) [\|e_j(k)\|^2 - 4E^2]}{4\{1 + [1 - \lambda_j(k)]\varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)\}} + c_0 \sum_{l=k-N-1}^k \left(\frac{1}{2} - \lambda_j(l) \|e_j(l)\|^2 \right) \quad (32)$$

$$\lambda_j(k) = \begin{cases} \frac{1}{2}, & \text{若 } \|e_j(k)\| > 2E \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (33)$$

其中, N 是一个正整数, c_0 是一个大于等于 0 的预先确定的常数.

每一时刻 k , 比较 $J_1(k)$ 和 $J_2(k)$, 求出最小的 $J^*(k)$, 选择与 $J^*(k)$ 对应的自适应控制器 $y_i^*(k)$, 并将其应用于运行过程.

3.2 多模型自适应控制系统稳定性和性能

定理 2. 运行过程动态模型 (6) 满足假设 1, 则当基于多模型自适应控制算法 (24) ~ (33) 用于运行过程 (6) 时, 闭环切换系统 BIBO 稳定. 此外, 对于任意给定的正数 ε , 存在时刻 K , 当 $k > K$ 时, 系统的广义跟踪误差满足 $\|\bar{e}(k)\| \leq 2E + \varepsilon$.

证明. 由引理 1 可知,

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\lambda_1(k) [\|e_1(k)\|^2 - 4E^2]}{4\{1 + [1 - \lambda_1(k)]\varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)\}} = 0 \quad (34)$$

由式 (24) 和式 (25) 可知,

$$\begin{aligned} e_1(k) &= \phi(k) - \hat{\phi}_1(k) = \\ &\Delta\phi(k) - \hat{\theta}_1^T(k-2)\varphi(k-2) = \\ &T(z^{-1})r(k) - T(z^{-1})r(k-2) - \\ &\hat{\theta}_1^T(k-2)\varphi(k-2) \end{aligned} \quad (35)$$

由式 (27) 和式 (30) 可知

$$\begin{aligned} e_2(k) &= \phi(k) - \hat{\phi}_2(k) = \\ &\Delta\phi(k) - \hat{\theta}_2^T(k-2)\varphi(k-2) - \hat{\rho}(k-2) = \\ &T(z^{-1})r(k) - T(z^{-1})r(k-2) - \\ &\hat{\theta}_2^T(k-2)\varphi(k-2) - \hat{\rho}(k-2) \end{aligned} \quad (36)$$

于是, 根据确定性等价原则, 每一时刻

$$\bar{e}(k) = e_1(k) \text{ 或 } e_2(k) \quad (37)$$

由于每一时刻, 系统辨识误差 $e(k) = e_1(k)$ 或 $e_2(k)$, 故由式 (21) 可知, 存在正常数 c_7, c_8 满足

$$\|X(k-2)\| \leq c_7 + c_8 \max_{0 \leq \tau \leq k} \|e(\tau)\| \quad (38)$$

由式 (33) 可知, 切换函数 $J_j(k)$ ($j = 1, 2$) 的第 2 项是有界的. 因此由引理 1 可知, $J_1(k)$ 有界. 对于 $J_2(k)$ 有两种情况.

1) $J_2(k)$ 无界. 由于 $J_1(k)$ 有界, 因此存在时刻 K_1 使得当 $k \geq K_1$ 时有 $J_1(k) \leq J_2(k)$. 故根据切换机制, 当 $k \geq K_1 + 1$ 时, 系统辨识误差 $e(k) = e_1(k)$ 满足

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\lambda_1(k) [\|e(k)\|^2 - 4E^2]}{4\{1 + [1 - \lambda_1(k)]\varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)\}} = 0 \quad (39)$$

其中,

$$\lambda(k) = \begin{cases} \frac{1}{2}, & \text{若 } \|e(k)\| > 2E \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

2) $J_2(k)$ 有界. 由切换准则式 (32) 可知, $e_2(k)$ 满足

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\lambda_2(k) [\|e_2(k)\|^2 - 4E^2]}{4\{1 + [1 - \lambda_2(k)]\varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)\}} \rightarrow 0$$

故系统辨识误差 $e(k) = e_1(k)$ 或 $e_2(k)$ 满足式 (39).

其余部分的证明类似于定理 1.

由式 (39) 和 $X(k-2)$ 的有界性可知,

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \lambda(k) [\|e(k)\|^2 - 4E^2]$$

即, 对任意小的正数 ε , 存在时刻 K , 当 $k > K$ 时,

$$\|e(k)\| \leq 2E + \varepsilon \quad (40)$$

□

注释 2. 由式 (39) 可知, 非线性辨识误差

$$e_2(k) = \rho^*(k-2) - \hat{\rho}(k-2) \quad (41)$$

适当选择神经网络结构和参数, 可以保证 $\|\rho^*(k-2) - \hat{\rho}(k-2)\| < \varepsilon$. 因此若运行过程选择非线性自适应控制器 $y_2^*(k)$ 作为输入信号, 则由式 (35) 和式 (36) 可知, 广义跟踪误差 $\|\bar{e}(k)\| < \varepsilon$ 满足.

4 仿真实验

为验证本文所提方法的有效性, 首先考虑如下底层被控对象模型

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \begin{pmatrix} 1.5 & 6 \\ 6 & 4 \end{pmatrix} x(k) + \\ &\begin{pmatrix} -4.2623 & -3.8254 \\ 8.3534 & 6.1711 \end{pmatrix} u(k) \\ y(k) &= \begin{pmatrix} 0.1546 & -0.012 \\ -0.0099 & 0.2281 \end{pmatrix} x(k) \end{aligned} \quad (42)$$

其中, $x = [x_1, x_2]^T$, $y = [y_1, y_2]^T$, $u = [u_1, u_2]^T$. 为使底层闭环系统稳定, 并实现稳态跟踪, 选择如下极点配置控制器

$$u(t) = -Kx(t) + Ly^*(t) \quad (43)$$

其中, $y^*(t) = [y_1^*, y_2^*]^T$ 为底层回路设定值, 由后面的运行控制给出.

$$K = \begin{pmatrix} 7.1487 & 15.3085 \\ -8.8017 & -19.0044 \end{pmatrix}$$

$$L = \begin{pmatrix} -14.5 & 30.25 \\ -20.6 & -35.6 \end{pmatrix} \quad (44)$$

假设运行层动态模型为

$$r(k+1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} r(k) + \begin{pmatrix} -1.2893 & -0.0678 \\ 0.2798 & -4.3693 \end{pmatrix} y(k) + \nu(k) \quad (45)$$

其中,

$$r(k) = [r_1, r_2]^T$$

$$\nu(k) = \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = 0.01 \times$$

$$\begin{pmatrix} \sin\left(1 + y_1^{*2}(k-1) + r_1^2(k-1) + r_2^2(k) - \frac{r_1(k-1)+r_2(k)}{1+y_1^{*2}(k-1)+r_1^2(k-1)+r_2^2(k)}\right) \\ \sin\left(1 + y_2^{*2}(k-1) + r_1^2(k-1) + r_2^2(k) - \frac{r_1(k)+r_2(k-1)}{1+y_2^{*2}(k-1)+r_1^2(k)+r_2^2(k-1)}\right) \end{pmatrix}$$

则由式 (5) 可知, 运行过程广义对象模型为

$$x(k+1) = \begin{pmatrix} -1.7 & -1.45 \\ 0.6 & -6.6 \end{pmatrix} x(k) + \begin{pmatrix} 17 & 7.25 \\ -6 & 33 \end{pmatrix} y^*(k)$$

$$r(k+1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} r(k) + \begin{pmatrix} -0.2 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} x(k) + \nu(k) \quad (46)$$

选择加权多项式矩阵

$$T(z^{-1}) = R(z^{-1}) = \begin{pmatrix} -5 - 0.1z^{-1} & 0 \\ 0 & -1 - 0.1z^{-1} \end{pmatrix}$$

运行指标目标值为

$$r^*(k) = \begin{pmatrix} 0.5 \\ 0.5 \operatorname{sign}\left(\cos\left(k \times \frac{\pi}{50}\right)\right) \end{pmatrix}$$

易知, 控制器真实参数阵为

$$\theta = (\theta_0 \quad \theta_1)$$

其中,

$$\theta_0 = (-6.53, -10.556, 1.43, 10.556, 17, 7.25, -2.86, -52.78)^T$$

$$\theta_1 = (21.6, -36.53, -21.6, 35.43, -6, 33, 43.2, -177.15)^T$$

本仿真实验中, 我们假设它是未知的, 并根据先验知识选择待辨识控制器初始参数阵为

$$\hat{\theta}(0) = \begin{pmatrix} -4 & -7 & 0 & 4 & 19 & 3 & -1 & -35 \\ 16 & -31 & -15 & 30 & -2 & 29 & 35 & -160 \end{pmatrix}^T$$

选择单隐层线性输出的静态 BP 网对 $\rho^*(k)$ 进行估计, 其隐元数为 20, 学习率为 0.1; 选择 $c = 1$, $N = 2$.

图 3 为单独采用线性鲁棒自适应控制方法时运行过程的运行指标目标值 $r^*(k)$ 和运行过程输出 $r(k)$. 从图 3 可以看出, 虽然该控制器可以使运行过

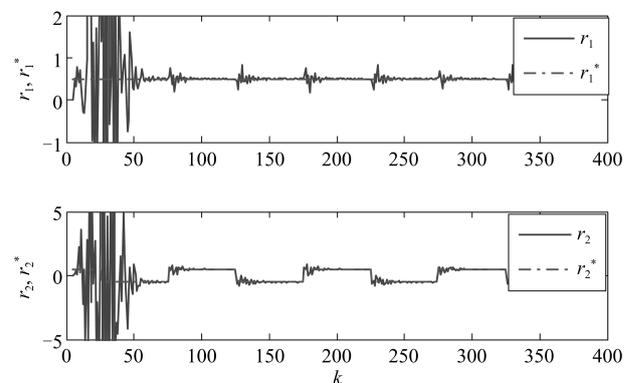


图 3 采用基于递推最小二乘算法的线性鲁棒自适应控制方法时, 运行过程的输出及运行指标目标值

Fig. 3 Outputs of the operation process and their operation targets when the linear robust adaptive control method based on recursive least square algorithm is used

程稳定, 但跟踪效果很差. 图4为采用本文所提的多模型自适应控制方法时运行过程的运行指标目标值 $r^*(k)$ 、运行过程输出 $r(k)$ 和运行过程控制输入, 即底层设定值 $y^*(k)$. 与图3相比, 图4中的跟踪效果明显改善. 图5为 $\hat{\theta}_1(k)$ 中16个参数的在线变化曲线. 图6为底层极点配置控制系统的跟踪曲线. 为进行比较, 仍以上述矩阵为控制器初始参数阵, 采用文

献[12]提出的基于投影算法的多模型自适应控制方法对运行过程进行仿真, 运行过程跟踪结果如图7所示. 相应的 $\hat{\theta}_1(k)$ 中各参数的在线变化曲线如图8所示. 由图4和图7可知, 采用本文提出的基于最小二乘算法的多模型自适应控制方法时, 即使控制器初始参数阵离控制器真实参数阵较远, 仍具有良好的跟踪效果. 两相比较, 基于投影算法的多模型

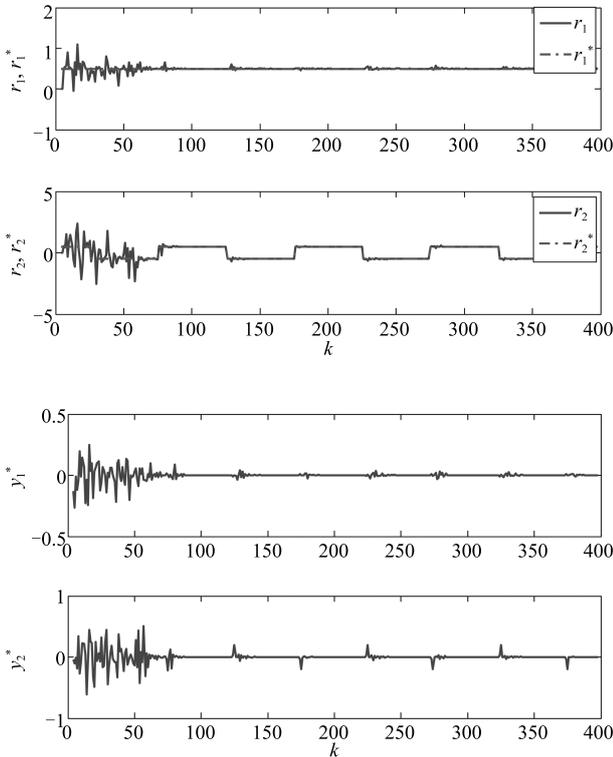


图4 采用基于递推最小二乘算法的多模型自适应控制方法时, 运行过程的输出、运行指标目标值及控制输入
Fig.4 Outputs of the operation process, their operation targets and control inputs when the proposed multi-model adaptive control method based on recursive least square algorithm is used

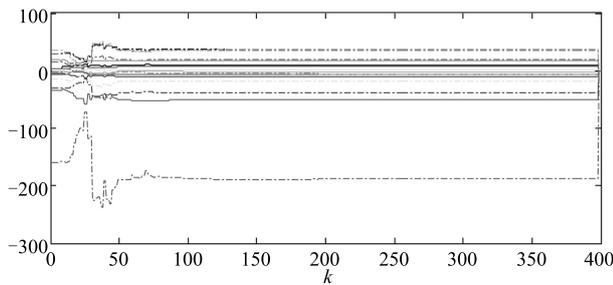


图5 采用基于递推最小二乘算法的多模型自适应控制方法时, $\hat{\theta}_1(k)$ 中16个参数的在线变化曲线
Fig.5 Online curves of 16 parameters in $\hat{\theta}_1(k)$ when the proposed multi-model adaptive control method based on recursive least square algorithm is used

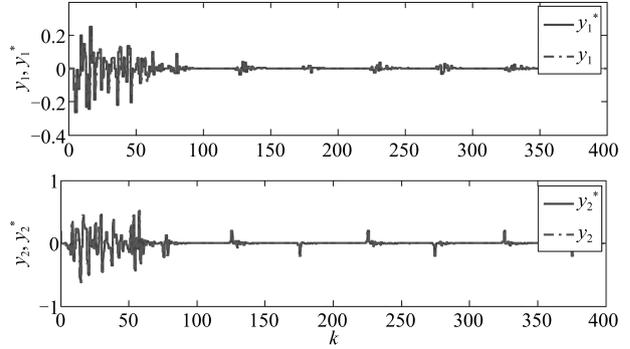


图6 底层极点配置控制系统的跟踪曲线
Fig.6 Tracking curves of the underlying pole assignment control system

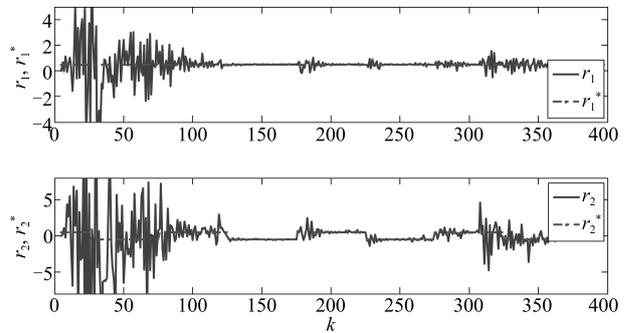


图7 采用基于投影算法的多模型自适应控制方法时, 运行过程的输出和运行指标目标值
Fig.7 Outputs of the operation process and their operation targets when the multi-model adaptive control method based on projection algorithm is used

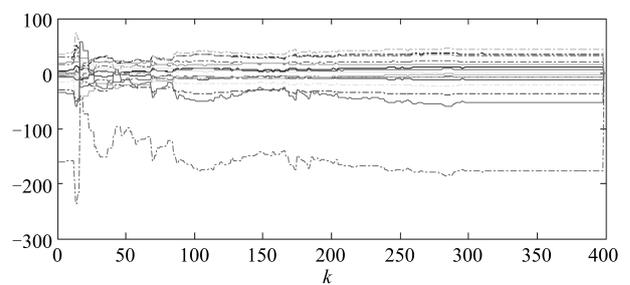


图8 采用基于投影算法的多模型自适应控制方法时, $\hat{\theta}_1(k)$ 中16个参数的在线变化曲线
Fig.8 Online curves of 16 parameters in $\hat{\theta}_1(k)$ when the multi-model adaptive control method based on projection algorithm is used

自适应控制方法对初始参数阵非常灵敏, 当初始参数阵远离控制器真实参数阵时, 控制效果较差. 比较图 5 和图 8 可以看出, 最小二乘算法与投影算法相比具有更快的收敛速度.

5 结论

工业运行过程应考虑底层跟踪设定值的动态误差对整个运行过程优化和控制的影响. 现有的工业运行控制方法假设运行层为已知的线性静态模型. 本文针对一类运行层为未知线性动态模型的工业运行过程, 提出了一种基于递推最小二乘算法的多模型自适应控制方法. 通过理论分析和仿真比较, 验证了与现有的多模型自适应控制方法相比, 本文提出方法可以应用于工业运行过程, 并具有良好的跟踪效果.

工业过程运行控制是近年来控制领域比较热门的研究方向之一, 现有的方法针对的被控对象主要是线性的, 并且主要集中在理论研究上. 在实际的工业过程控制中, 非线性动态无可避免, 当两层结构中的被控对象都是非线性时, 如何设计控制器, 如何将理论的研究成果进行实际应用具有一定的挑战.

附录 A. 引理 1 的证明

证明. 当 $\hat{Q}_0^+(k)$ 非奇异时, $\hat{\theta}(k)$ 与 $\hat{\theta}^+(k)$ 相等. 由式 (16d) 和式 (16e) 可知,

$$e(k) = [\theta^T - \hat{\theta}^T(k-1)]\varphi(k-2) + \rho(k-2) \quad (A1)$$

令

$$L(k) = \frac{P(k-2)\varphi(k-2)}{1 + \varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)} \quad (A2)$$

由式 (16b)、式 (16c) 以及式 (A1) 和式 (A2) 可知,

$$\begin{aligned} P(k) &= P(k-2) - \lambda(k)L(k)\varphi^T(k-2)P(k-2) \Rightarrow \\ P(k) &= [I - \lambda(k)L(k)\varphi^T(k-2)]P(k-2) \Rightarrow \\ P(k)P^{-1}(k-2) &= I - \lambda(k)L(k)\varphi^T(k-2) \end{aligned} \quad (A3)$$

和

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}(k) &= \tilde{\theta}(k-2) + \lambda(k)L(k)e^T(k) = \\ &= [I - \lambda(k)L(k)\varphi^T(k-2)]\tilde{\theta}(k-2) + \\ &= \lambda(k)L(k)\rho^T(k-2) = \\ &= P(k)P^{-1}(k-2)\tilde{\theta}(k-2) + \\ &= \lambda(k)L(k)\rho^T(k-2) \end{aligned} \quad (A4)$$

由式 (A4) 可知,

$$P^{-1}(k)\tilde{\theta}(k) - P^{-1}(k-2)\tilde{\theta}(k-2) = \lambda(k)P^{-1}(k)L(k)\rho^T(k-2) \quad (A5)$$

由于 $\varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2) \times I = \varphi(k-2)\varphi^T(k-2)P(k-2)$, 因此由式 (16c) 可知

$$\frac{P^{-1}(k)P(k-2)\varphi(k-2)}{1 + \varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)} = \frac{\varphi(k-2)}{1 + [1 - \lambda(k)]\varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)} \quad (A6)$$

令 $Q(k) := \varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)$, 则

$$\begin{aligned} V(k) - V(k-2) &= \\ \text{tr} \left\{ - \frac{\lambda(k)[e(k)e^T(k) - 4\rho(k-2)\rho^T(k-2)]}{4[1 + [1 - \lambda(k)]Q(k)]} - \right. \\ &\quad \left. \frac{3\lambda(k)e(k)e^T(k)[1 + Q(k)[1 - \frac{4\lambda(k)}{3}]]}{4[1 + [1 - \lambda(k)]Q(k)][1 + Q(k)]} \right\} \end{aligned} \quad (A7)$$

由于

$$\frac{1 + Q(k) \left[1 - \frac{4\lambda(k)}{3} \right]}{1 + [1 - \lambda(k)]Q(k)} \geq \frac{1}{2} \quad (A8)$$

因此

$$\begin{aligned} V(k) - V(k-2) &\leq \\ \text{tr} \left\{ - \frac{\lambda(k)[e(k)e^T(k) - 4\rho(k-2)\rho^T(k-2)]}{4[1 + [1 - \lambda(k)]Q(k)]} - \right. \\ &\quad \left. \frac{3\lambda(k)e(k)e^T(k)}{8[1 + Q(k)]} \right\} \leq \\ &= - \frac{\lambda(k)[\|e(k)\|^2 - 4E^2]}{4[1 + [1 - \lambda(k)]Q(k)]} - \frac{3\lambda(k)\|e(k)\|^2}{8[1 + Q(k)]} \end{aligned} \quad (A9)$$

因此, 引理 1 中 1) 得证. 由式 (16b) 可知,

$$\begin{aligned} \varphi^T(k-2)[\hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k-2)] &= \\ \frac{\lambda(k)\varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)e^T(k)}{1 + \varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)} \end{aligned} \quad (A10)$$

因此

$$\begin{aligned} \varphi^T(k-2)[\hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k-2)][\hat{\theta}(k) - \\ \hat{\theta}(k-2)]^T \varphi(k-2) &\leq \\ \frac{\lambda(k)\varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)e^T(k)e(k)}{1 + \varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)} \end{aligned} \quad (A11)$$

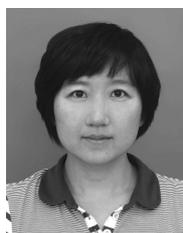
故

$$\|\hat{\theta}(k) - \hat{\theta}(k-2)\|^2 \leq \frac{\lambda(k)\|P(k-2)\|e^T(k)e(k)}{1 + \varphi^T(k-2)P(k-2)\varphi(k-2)} \quad (A12)$$

由引理 1 中的 1) 及 $\|P(k-2)\|$ 的有界性, 可知 2) 成立. 当 $\hat{Q}_0^+(k)$ 非奇异时, 记 $V^+(k) = \text{tr}[\hat{\theta}^{+T}(k)P^{-1}(k)\hat{\theta}^+(k)]$. 由式 (16g) 可知 $\|\theta^+(k) - \theta\|^2$, 因此 $V^+(k) \leq V(k)$, 故引理 1 仍旧成立. \square

References

- 1 Chai Tian-You. Operational optimization and feedback control for complex industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1744–1757
(柴天佑. 复杂工业过程运行优化与反馈控制. 自动化学报, 2013, **39**(11): 1744–1757)
- 2 Morari M, Arkun Y, Stephanopoulos G. Studies in the synthesis of control structures for chemical process, Part I: formulation of the problem. Process decomposition and the classification of the control task. Analysis of the optimizing control structures. *AIChE Journal*, 1980, **26**(2): 220–232
- 3 Skogestad S. Plantwide control: the search for the self-optimizing control structure. *Journal of Process Control*, 2000, **10**(5): 487–507
- 4 Findeisen W, Balley F N, Brdys M, Malinowski K, Tatjewski P, Wozniak A. *Control and Coordination in Hierarchical Systems*. New York: John Wiley, 1980.
- 5 Adetola V, Guay M. Integration of real-time optimization and model predictive control. *Journal of Process Control*, 2000, **20**(2): 125–133
- 6 Chai Tian-You, Ding Jin-Liang, Wang Hong, Su Chun-Yi. Hybrid intelligent optimal control method for operation of complex industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(5): 505–515
(柴天佑, 丁进良, 王宏, 苏春翌. 复杂工业过程运行的混合智能优化控制方法. 自动化学报, 2008, **34**(5): 505–515)
- 7 Li H X, Guan S P. Hybrid intelligent control strategy. Supervising a DCS-controlled batch process. *IEEE Control Systems*, 2001, **21**(3): 36–48
- 8 Fan Jia-Lu, Zhang Ye-Wei, Chai Tian-You. Optimal operational feedback control for a class of industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(9): 1754–1761
(范家璐, 张也维, 柴天佑. 一类工业过程运行反馈优化控制方法. 自动化学报, 2015, **41**(9): 1754–1761)
- 9 Chai T Y, Zhao L, Qiu J B, Liu F Z, Fan J L. Integrated network-based model predictive control for setpoints compensation in industrial processes. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, **9**(1): 417–426
- 10 Zhou Ping, Chai Tian-You, Chen Tong-Wen. Decoupling internal model control method for operation of industrial process. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(10): 1362–1368
(周平, 柴天佑, 陈通文. 工业过程运行的解耦内模控制方法. 自动化学报, 2009, **35**(10): 1362–1368)
- 11 Chen L J, Narendra K S. Nonlinear adaptive control using neural networks and multiple models. *Automatica*, 2001, **37**(8): 1245–1255
- 12 Fu Y, Chai T Y. Nonlinear multivariable adaptive control using multiple models and neural networks. *Automatica*, 2007, **43**(6): 1101–1110
- 13 Shi Yu-Jing, Chai Tian-You. Neural networks and multiple models based nonlinear adaptive generalized predictive control. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(5): 540–545
(石宇静, 柴天佑. 基于神经网络与多模型的非线性自适应广义预测控制. 自动化学报, 2007, **33**(5): 540–545)
- 14 Chai T Y, Zhai L F, Yue H. Multiple models and neural networks based decoupling control of ball mill coal-pulverizing systems. *Journal of Process Control*, 2011, **21**(3): 351–366
- 15 Cao Xu-Feng, Wang Xin, Wang Zhen-Lei. Multiple-models adaptive control with mixing and switching. *Control Engineering of China*, 2014, **21**(6): 878–881
(曹叙风, 王昕, 王振雷. 基于切换和混合策略的多模型自适应控制. 控制工程, 2014, **21**(6): 878–881)
- 16 Chen C, Liu Z, Zhang Y, Chen C L P, Xie S L. Adaptive control of MIMO mechanical systems with unknown actuator nonlinearities based on the nussbaum gain approach. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, **3**(1), 26–34
- 17 Chai Tian-You. *Multivariable Adaptive Decoupling Control and Its Applications*. Beijing: Science Press, 2001.
(柴天佑. 多变量自适应解耦控制及应用. 北京: 科学出版社, 2001.)



富月 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室副教授. 2009年获得东北大学控制理论与控制工程专业博士学位. 主要研究方向为复杂工业过程自适应控制, 智能解耦控制, 近似动态规划以及工业过程运行控制. 本文通信作者.

E-mail: fuyue@mail.neu.edu.cn

(FU Yue Associate professor at the State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University. She received her Ph.D. degree from Northeastern University in 2009. Her research interest covers adaptive control, intelligent decoupling control, approximate dynamic programming, and industrial operational control. Corresponding author of this paper.)



杜琼 东北大学信息科学与工程学院硕士研究生. 2015年获得武汉科技大学信息科学与工程学院学士学位. 主要研究方向为自适应控制, 解耦控制.

E-mail: 44668@wisdri.com

(DU Qiong Master student at the College of Information Science and Engineering, Northeastern University. She received her bachelor degree from Wuhan University of Science and Technology in 2015. Her research interest covers adaptive control and decoupling control.)