

烟气制酸气体净化系统建模与参数辨识

陈春华, 于 丰[†], 毛志忠

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 烟气压力作为工业烟气制酸工艺中的重要参数, 对制酸过程中硫的转化起到重要的作用. 在进行转化过程前, 烟气的净化系统会对烟气压力产生重大影响. 对于烟气制酸气体净化系统关于烟气压力的建模工作目前还不多见. 本文通过分析烟气净化系统工作原理后, 建立了工业烟气制酸气体净化系统中干燥塔、电除尘器和动力波子系统等关于烟气压力输入输出关系的机理模型. 针对模型中未知的参数, 将其视为恒定不变的状态, 进而将各个子模型合并为一个特殊的EKF模型. 结合EKF算法的推导思路, 提出一种递归参数辨识方法, 用于对模型中的未知参数进行在线辨识. 使用现场测量数据对模型参数的辨识以及对烟气压力估计的结果验证了模型以及算法的有效性.

关键词: 烟气制酸; 烟气净化系统; 机理建模; 参数辨识

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Modeling and parameter identification of the flue gas purification system of flue gas acid-making

CHEN Chun-hua, YU Feng[†], MAO Zhi-zhong

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110819, China)

Abstract: As an essential factor, the flue gas pressure plays an important role in the industrial gas sulphuric acid production. Before the transformation process, the flue gas purification system has a significant impact on the flue gas pressure. However, modeling of the flue gas pressure in the purification system has been rarely mentioned in the related literatures at present. In this paper, a mechanistic system model is proposed to describe the relationship between the input and output pressure of the subsystem drying tower, electric precipitation and dynamic wave in the flue gas purification system in flue gas acid-making plant. Taking the time-invariant parameters as a special kind of system states, we combine the three subsystem models into a special EKF model. Inspired by the EKF algorithm, we propose a recursive parameter identification method to identify the model parameters online. The results of parameter identification and estimation of flue gas pressure based on measurements show the validity of the proposed mechanistic model and the identification algorithm.

Key words: flue gas acid-making; flue gas purification system; mechanistic modeling; parameter identification

1 引言(Introduction)

工业烟气制酸利用含有 SO_2 的冶炼烟气在催化剂的作用下生成 SO_3 并与水发生反应进行硫酸生产^[1]. 由于烟气中含有各种杂质, 在进行制酸过程前首先要对烟气进行净化处理. 烟气净化系统通常由干燥塔、电除尘器和动力波子系统组成^[2]. 当烟气通过净化系统时, 制酸工艺中的重要变量烟气压力会发生明显变化. 因此, 为实现对烟气压力的控制, 建立准确的烟气净化系统压力计算模型是需要研究的问题. 目前对于建立烟气净化系统模型的研究往往限于空气动力学、流体力学等方面^[3-4], 这类模型多适用于烟气净化效果的估计和提高, 对于系统烟气压力的计算没有帮助, 而关于烟气压力的建模工作目前还不多见. 鉴于

此, 文献[5]对烟气净化系统压力计算模型进行了初步的研究, 建立了净化系统中各子系统的烟气压力计算模型, 并使用现场生产数据对模型中的参数进行了辨识. 然而该工作存在一些缺陷: 在建模过程中, 对于烟气压力与流量这两个重要模型变量的关系进行了简化处理; 更重要的是在进行模型参数辨识过程中使用了迭代算法, 因此并不能满足模型的在线应用. 本文的目的就是在分析烟气净化系统工作原理的基础上, 以某烟气制酸厂为背景, 分别建立干燥塔、电除尘器和动力波系统烟气压力输入输出关系的机理模型, 该模型没有对压力与流量关系进行简化, 可以更加准确的反映模型中各变量之间的关系; 此外本文提出一种参数辨识方法用于辨识模型中的未知参数. 该算法以

收稿日期: 2014-05-05; 录用日期: 2015-02-10.

[†]通信作者. E-mail: neu_yufeng@hotmail.com; Tel.: +86 24-23913343.

国家自然科学基金项目(61333006)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61333006).

扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)算法为基础并进行适当的改进,以适用于所建模型参数的辨识问题。递归辨识的优点在于不仅能够实现在线辨识参数,还可以结合控制算法实现自适应控制^[6]。使用现场数据对模型中的参数进行递归辨识,所得结果验证了模型以及算法的有效性。

2 烟气制酸气体净化系统建模(Modeling of the flue gas purification system in flue gas acid-making)

2.1 烟气制酸气体净化系统(Flue gas purification system in flue gas acid-making)

某厂烟气制酸气体净化系统结构如图1虚线框中所示,其中: O_1, O_2 分别为1#, 2#稀释风阀门开度; p_1, p_2, p_3 分别为干燥塔、电除尘、动力波系统输出烟气压力; p_4 为气体净化系统输入烟气压力。

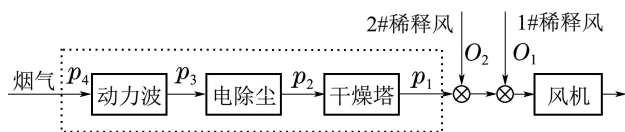


图1 气体净化系统

Fig. 1 Flue gas purification system

在掺入适量的稀释风后,含有 SO_2 的冶炼烟气由风机抽入气体净化系统。掺入的稀释风量由两台相同口径的阀门开度控制。烟气依次通过动力波、电除尘、干燥塔系统进行除杂、过滤、干燥,得到的清洁酸性气体被送入制酸转化器进行硫酸生产。本节的目标就是通过分析气体净化系统的工作原理,依次建立干燥塔、电除尘、动力波系统输入输出烟气压力关系的机理模型。

2.2 干燥塔系统建模(Modeling of drying tower system)

干燥塔系统由干燥塔与节流装置两部分组成,结构如图2所示,其中: V_1 和 V_2 分别为干燥塔输出输入烟气的体积; p'_1 是中间过程的烟气压力。

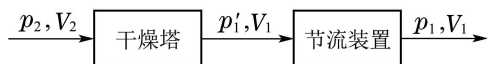


图2 干燥塔系统

Fig. 2 Drying tower system

干燥塔利用不断循环的浓硫酸吸收烟气中的水分,进行烟气干燥^[2]。由于水蒸气的吸收以及稀释风的加入,烟气压力发生变化。根据冶炼工艺以及制酸现场的经验,认为烟气中水蒸气的含量比例恒定,并假设稀释风量正比于稀释风阀门开度,因此得到下式:

$$V_1 = V_2(1 - k_1) + k_2(O_1 + O_2), \quad (1)$$

其中 k_1, k_2 为待定系数。式(1)右侧第1项表示由于水蒸气的吸收导致的烟气体积减少;第2项表示加入稀释风后,烟气体积的增加。

根据理想气体状态方程以及水蒸气的吸收并结合式(1),有

$$\frac{p'_1}{p_2} = k_3 \frac{V_2}{V_1} = \frac{k_3 V_1 - k_3 k_2 (O_1 + O_2)}{V_1 (1 - k_1)}, \quad (2)$$

其中 k_3 为待定系数,表示由于水蒸气的吸收造成的变化,考虑到水蒸气含量比例恒定,可以认为 k_3 为常数。

由于气体净化系统中烟气是由 SO_2 风机牵引,因此干燥塔单位时间内输出烟气体积与 SO_2 风机转速有关。在这里假设风机转速与单位时间内输出烟气体积成正比,即有

$$V_1 = k_4 n, \quad (3)$$

其中: n 为风机转速; k_4 为待定系数。将其代入式(2)得

$$\frac{p'_1}{p_2} = k_3 \frac{V_2}{V_1} = \frac{k_3 k_4 n - k_3 k_2 (O_1 + O_2)}{k_4 (1 - k_1) n}. \quad (4)$$

对于节流装置,根据文献[7],装置前后的压力差与单位时间通过的烟气体积呈幂的关系,即

$$V_1 = (p_1 - p'_1)^{k_5}, \quad (5)$$

其中 k_5 为待定系数。同时考虑式(3),有

$$p_1 - p'_1 = (k_4 n)^{1/k_5}. \quad (6)$$

将式(6)代入到式(4),并考虑到系统中的干扰和测量噪声,以及参数的一致性,得到干燥塔的机理模型:

$$y_1 = \frac{k_3 k_4 n - k_3 k_2 (O_1 + O_2)}{k_4 (1 - k_1) n} p_2 + (k_4 n)^{1/k_5} + \varepsilon_{1,t} = (\theta_1 - \theta_2 \frac{O_1 + O_2}{n}) p_2 + \theta_3 n^{\theta_4} + \varepsilon_{1,t}, \quad (7)$$

其中: $\theta_1 = k_3 / (1 - k_1)$; $\theta_2 = k_3 k_2 / [k_4 (1 - k_1)]$; $\theta_3 = k_4^{1/k_5}$; $\theta_4 = 1/k_5$; $y_1 = p_1$; $\varepsilon_{1,t}$ 为随机干扰。

2.3 电除尘系统建模(Modeling of electric precipitation system)

电除尘器的作用是通过静电吸附去除烟气中的颗粒、粉尘等杂质。电除尘器中的烟气流量等于 SO_2 风机入口烟气流量与干燥塔所加入的稀释风量之差。根据前面假设,稀释风量与稀释风阀门开度呈正比关系;烟气量与 SO_2 风机转速成正比关系,则有下式:

$$Q_1 = k_6 n - k_7 (O_1 + O_2), \quad (8)$$

其中: Q_1 为电除尘器中的烟气流量; k_6, k_7 为待定系数。

根据文献[8],电除尘器入口、出口烟气压力差与烟气流量呈幂的关系,因此有

$$p_3 - p_2 = [k_6 n - k_7(O_1 + O_2)]^{k_8}, \quad (9)$$

其中 k_8 为待定系数. 考虑到系统中的干扰和测量噪声, 得到电除尘器输入输出烟气压力模型:

$$y_2 = -\theta_5[n - \theta_6(O_1 + O_2)]^{\theta_7} + \varepsilon_{2,t}, \quad (10)$$

其中: $\theta_5 = k_6^{k_8}$; $\theta_6 = k_7/k_6$; $\theta_7 = k_8$; $y_2 = p_2 - p_3$; $\varepsilon_{2,t}$ 为随机干扰.

2.4 动力波系统建模 (Modeling of dynamic wave system)

动力波洗涤器系统主要用于去除烟气中与制酸工艺无关的废气. 动力波洗涤器内烟气流量的关系与电除尘器相似, 等于 SO_2 风机入口烟气流量与干燥塔所加入的稀释风量之差. 类似于电除尘器, 有下式:

$$Q_2 = k_9 n - k_{10}(O_1 + O_2), \quad (11)$$

其中: Q_2 为动力波洗涤器中的烟气流量; k_9, k_{10} 为待定系数.

根据文献[9], 动力波洗涤器入口、出口烟气压力差同样和烟气流量呈幂的关系, 因此有

$$p_4 - p_3 = [k_9 n - k_{10}(O_1 + O_2) - Q]^{k_{11}}, \quad (12)$$

其中 k_{11} 为待定系数. 考虑到系统中的干扰以及测量噪声, 得到动力波洗涤器输入输出烟气压力模型:

$$y_3 = -\theta_8[n - \theta_9(O_1 + O_2)]^{\theta_{10}} + \varepsilon_{3,t}, \quad (13)$$

其中: $\theta_8 = k_9^{k_{11}}$; $\theta_9 = k_{10}/k_9$; $\theta_{10} = k_{11}$; $y_3 = p_3 - p_4$; $\varepsilon_{3,t}$ 为随机干扰.

3 模型参数辨识方法 (Model parameter identification algorithm)

在制酸现场, 各系统输入输出烟气压力 p_1, p_2, p_3 和 p_4 , 稀释风阀门开度 O_1 和 O_2 以及风机转速 n 可测. 因此需要确定的是模型(7)(10)和(13)中的待定系数 θ_i , $i = 1, \dots, 10$. 本节的主要工作就是提出一种辨识 θ_i 的递归方法.

根据第2节得到的各系统机理模型, 式(7)(10)和(13)中参数与测量量呈非线性关系. 因此通常使用的递归最小二乘法(recursive least squares, RLS)在这里不再适用. 考虑到EKF算法通常用于非线性系统的状态跟踪和参数辨识, 在这里使用这一方法. 而对于传统EKF算法, 在参数辨识方面多应用于对非线性系统时变参数的跟踪^[10-11], 而本文所建模型中, 参数为定常的, 因此有必要对传统EKF算法进行改进, 以适用于对非线性系统定常参数的辨识^[12-14].

对于各系统机理模型, 式(7)(10)和(13)可以统一表示为如下形式:

$$y_i = h_i(n, O_1, O_2, \Theta_i) + \varepsilon_{i,t} = h_i(\Theta_i) + \varepsilon_{i,t}, \quad (14)$$

其中: $i = 1, 2, 3$; $h_i(\Theta_i, u_i)$ 为 $h_i(n, O_1, O_2, \Theta_i)$ 的简化形式; Θ_i 为模型系数向量; $\Theta_1^T = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]$; $\Theta_2^T = [\theta_5 \ \theta_6 \ \theta_7]$; $\Theta_3^T = [\theta_8 \ \theta_9 \ \theta_{10}]$.

由于在制酸气体净化系统运行过程中并没有受到特殊性质干扰的作用, 因此对于干扰项可以假设表示为一个白噪声过程^[15-16], 并有以下性质:

$$E[\varepsilon_{i,t}|F_{t-1}] = 0, \quad (15)$$

$$E[\varepsilon_{i,t}^2|F_{t-1}] = \delta_i \leq \bar{\delta} < \infty, \quad (16)$$

其中: F_{t-1} 是由模型输入输出量在 $t-1$ 时刻产生的 σ 函数序列; δ_i 为噪声方差并有上限 $\bar{\delta}$;

对于以上非线性模型, 可以使用如下的EKF模型进行描述:

$$\Theta_{t+1} = \Theta_t, \quad (17)$$

$$Y_t = g(\Theta_t, U_t) + \varepsilon_t, \quad (18)$$

其中:

$$\Theta_t = [\Theta_{1,t}^T \ \Theta_{2,t}^T \ \Theta_{3,t}^T]^T = [\theta_{1,t} \ \dots \ \theta_{10,t}]^T,$$

$$g(\Theta_t, U_t) = [h_1(\Theta_{1,t}) \ h_2(\Theta_{2,t}) \ h_3(\Theta_{3,t})]^T,$$

$$Y_t^T = [y_{1,t} \ y_{2,t} \ y_{3,t}], \ U_t^T = [n_t \ O_{1,t} \ O_{2,t}],$$

$$\varepsilon_t^T = [\varepsilon_{1,t} \ \varepsilon_{2,t} \ \varepsilon_{3,t}].$$

式中加入下脚标 t 以表示模型参数在时间上的转移关系.

根据式(17)–(18)可以将模型中定常的参数视为EKF模型中恒定不变的状态, 将代数方程(14)视为EKF模型中系统的输出. 由此式(17)–(18)分别等价于EKF模型中的状态方程和输出方程.

根据EKF算法的推导过程, 使用一阶泰勒展开式对式(18)进行近似表示, 有

$$Y_t = H_t \Theta_t + \varepsilon_t, \quad (19)$$

$$\text{其中 } H_t = \frac{\partial(\Theta_t, U_t)}{\partial \Theta_t^T}.$$

式(17)和(19)组成一个线性状态方程组, 对于其中的未知参数可使用如下的Kalman滤波法进行辨识^[17]:

$$\hat{\Theta}_{t+1} = \hat{\Theta}_t + K_t[Y_t - H_t \hat{\Theta}_t], \quad (20)$$

$$K_t = -P_t H_t^T (H_t P_t H_t^T + R)^{-1}, \quad (21)$$

$$P_{t+1} = P_t - P_t H_t^T H_t P_t (H_t P_t H_t^T + R)^{-1}, \quad (22)$$

其中: $\hat{\Theta}_t$ 是 Θ_t 在 t 时刻的估计; K_t 为参数更新向量; 通常 R 和 P_t 分别取为正实数和正定矩阵.

4 参数辨识 (Parameter identification)

在本节, 使用制酸现场测量的数据对模型参数进行辨识. 辨识算法初始化为: $\Theta_{1,0}^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0]$; $\Theta_{2,0}^T = [2 \ 2 \ 2]$; $\Theta_{3,0}^T = [2 \ 2 \ 2]$; $P_0 = 10^4$; 为了增加算法的收敛性, 取 $R = 10H_t^T P_{t-1} H_t + 1$ ^[18]. 辨识过程经历500采样点. 对于干燥塔系统, 辨识结果如图3所示.

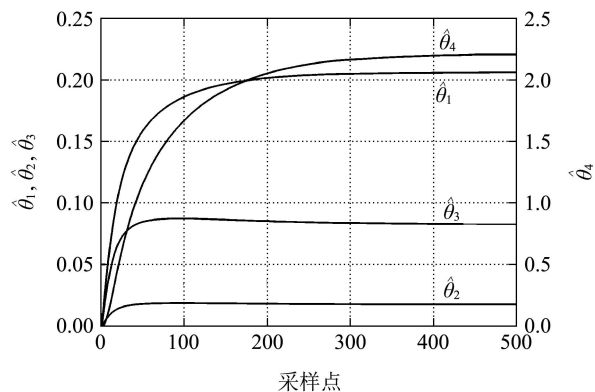


图3 干燥塔系统参数辨识结果

Fig. 3 Identification results of drying tower system

对于电除尘系统, 辨识结果如图4所示。

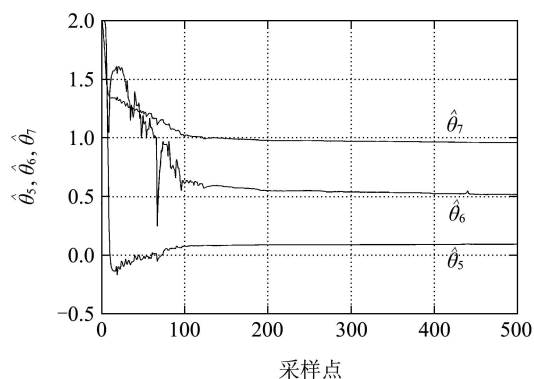


图4 电除尘系统参数辨识结果

Fig. 4 Identification results of electric precipitation system

对于动力波系统, 辨识结果如图5所示。

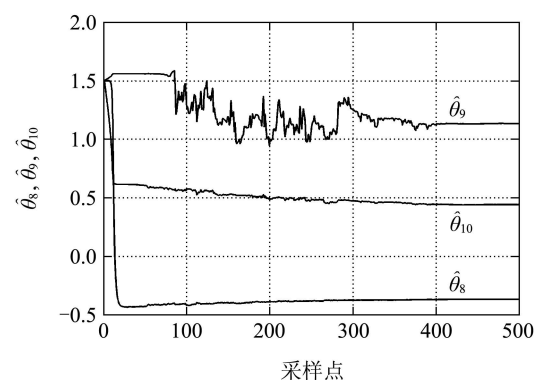


图5 动力波系统参数辨识结果

Fig. 5 Identification results of dynamic wave system

由辨识结果可以看出, 所有的参数都实现了收敛, 并且都收敛于某一恒值。这验证了本文所建模型以及提出算法的有效性。

使用所建机理模型以及辨识得到的参数对系统输出压力进行估计, 估计值与测量值对比如图6—8所示。

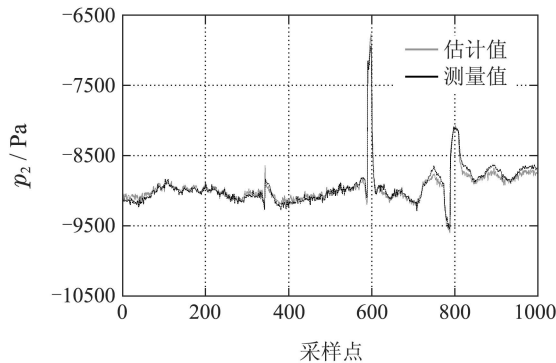


图6 干燥塔系统输出烟气压力对比

Fig. 6 Estimates of output flue gas pressure of drying tower

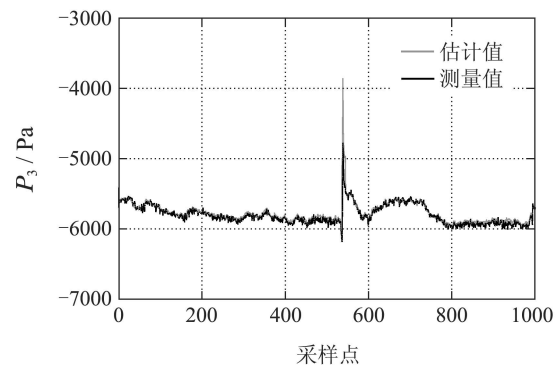


图7 电除尘系统输出烟气压力对比

Fig. 7 Estimates of output flue gas pressure of electric precipitation

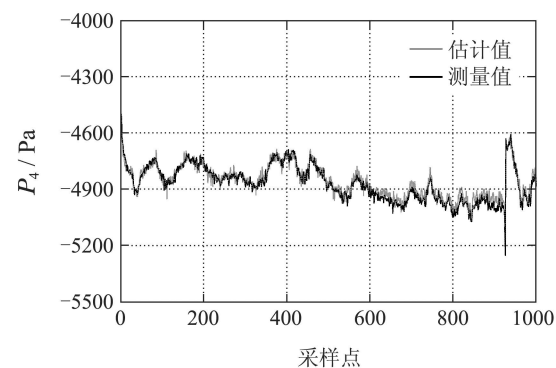


图8 动力波系统输出烟气压力对比

Fig. 8 Estimates of output flue gas pressure of dynamic wave

由估计结果可见, 估计值与测量值基本一致, 表明了所建机理模型的正确性以及参数辨识的准确性。

为了进一步说明本文方法的有效性, 使用文献[5]所使用的MATLAB自带的曲线拟合函数lsqcurvefit对各系统烟气压力曲线进行拟合, 并与本文得到的结果进行对比。lsqcurvefit函数以最小二乘为准则, 对模型中的参数进行迭代计算以得到模型输出的估计曲线^[19]。两种方法对各系统烟气压力估计的均方误差如表1所示。

表1 压力估计均方误差
Table 1 RMS of pressure estimation errors

RMS	本文方法	文献方法
干燥塔	60.48	56.03
电除尘	74.47	67.80
动力波	34.95	40.39

可见, 本文给出的递归算法与文献使用的迭代方法得到的结果并没有明显的差异, 而迭代算法需要大量的测量数据, 无法在线应用, 由此进一步验证了本文工作的有效性。

5 结论(Conclusions)

本文在分析烟气净化系统工作原理的基础上, 分别建立了干燥塔、电除尘器、动力波系统烟气压力输入输出关系的机理模型; 并基于EKF算法提出一种参数辨识方法, 使用现场测量数据对模型中的未知参数进行递归辨识。参数辨识以及烟气压力估计结果验证了模型的正确性以及算法的有效性。

参考文献(References):

- [1] CHEN C, YU F, CUI B. Modeling of SO₂ conversion in the process of acid-making [C] //The 23rd Chinese Control and Decision Conference. Mianyang: IEEE, 2011, 5: 4017 – 4022.
- [2] 丁双玉. 冶炼烟气制酸转化工艺流程探讨 [J]. 中国有色冶金, 2010, 5(10): 50 – 51.
(DING Shuangyu. Discussion on conversion process of acid-making with smelting gas [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2010, 5(10): 50 – 51.)
- [3] ALI M, MAHMUD T, HEGGS P J, et al. A one-dimensional plug-flow model of a counter-current spray drying tower [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2014, 92(5): 826 – 841.
- [4] WAWRZYNIAK P, PODYMA M, ZBICINSKI I, et al. Modeling of air flow in an industrial countercurrent spray-drying tower [J]. *Drying Technology*, 2012, 30(2): 217 – 224.
- [5] 陈春华, 张俊, 于丰, 等. 带烟气制酸一级动力波入口压力控制系统建模 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2011, 11(11): 1 – 5, 20.
(CHEN Chunhua, ZHANG Jun, YU Feng, et al. Modeling for inlet pressure of primary dynamic wave in sulfuric acid production from waste gas [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2011, 11(11): 1 – 5, 20.)
- [6] VOROS J. Parameter identification of Wiener systems with multisegment piecewise-linear nonlinearities [J]. *Systems & Control Letters*, 2007, 56(2): 99 – 105.
- [7] 张理, 竹朝霞, 肖春生. 带几种节流装置流体动力特性的实验研究 [J]. 实验技术与管理, 2007, 24(7): 44 – 47.
(ZHANG Li, ZHU Zhaoxia, XIAO Chunsheng. Research on fluid dynamical character of several differential throttling equipment [J]. *Experimental Technology and Management*, 2007, 24(7): 44 – 47.)
- [8] 党小庆, 李倩婧, 潘民兴, 等. 电除尘器气流分布数值计算方法研究 [J]. 环境工程, 2009, 27(3): 103 – 107.
(DANG Xiaoqing, LI Qianqian, PAN Minxing, et al. Study on numerical calculation method for gas flow distribution of electrostatic precipitation [J]. *Environmental Engineering*, 2009, 27(3): 103 – 107.)
- [9] 李群生, 李秀梅. 动力波吸收机的工作机理研究及其应用 [J]. 小氮肥设计技术, 2004, 25(1): 11 – 14.
(LI Qunsheng, LI Xiumei. Mechanism research and application of power wave absorption machine [J]. *Nitrogenous Fertilizer Technology*, 2004, 25(1): 11 – 14.)
- [10] GUO L, LJUNG L. Exponential stability of general tracking algorithms [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, 40(8): 1376 – 1387.
- [11] GUO L, LJUNG L. Performance analysis of general tracking algorithms [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, 40(8): 1388 – 1402.
- [12] 刘艳君, 丁锋. 非均匀周期采样系统的递阶最小二乘辨识方法 [J]. 控制与决策, 2011, 26(3): 453 – 456.
(LIU Yanjun, DING Feng. Hierarchical least squares identification method for periodically non-uniformly sampled systems [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(3): 453 – 456.)
- [13] 丁洁, 谢莉, 丁锋. 非均匀采样系统多新息随机梯度辨识性能分析 [J]. 控制与决策, 2011, 26(9): 1338 – 1342.
(DING Jie, XIE Li, DING Feng. Performance analysis of multi-innovation stochastic gradient identification for non-uniformly sampled systems [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(9): 1338 – 1342.)
- [14] 丁锋, 马兴云. 规范状态空间系统辨识方法 [J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2014, 6(6): 481 – 504.
(DING Feng, MA Xingyun. Identification methods for canonical state space systems [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition*, 2014, 6(4): 289 – 305.)
- [15] 齐国元, 陈增强, 袁著祉. 非线性系统智能状态估计研究进展与展望 [J]. 控制理论与应用, 2003, 20(6): 813 – 818.
(QI Guoyuan, CHEN Zengqiang, YUAN Zhuzhi. Evolution and prospect of intelligent state estimation for nonlinear system [J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(6): 813 – 818.)
- [16] 王冬青. 基于辅助模型的递推增广最小二乘辨识方法 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26(1): 51 – 56.
(WANG Dongqing. Recursive extended least squares identification method based on auxiliary models [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(1): 51 – 56.)
- [17] 丁锋. 系统辨识新论 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [18] YU F, MAO Z, JIA M. Recursive identification for Hammerstein-Wiener systems with dead-zone input nonlinearity [J]. *Journal of Process Control*, 2013, 23(8): 1108 – 1115.
- [19] 薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的MATLAB求解 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

作者简介:

陈春华 (1967–), 男, 讲师, 主要研究方向为复杂工业过程的建模优化与控制, E-mail: chenchunhua@ise.neu.edu.cn;

于丰 (1984–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为非线性系统建模优化与控制, E-mail: neu.yufeng@hotmail.com;

毛志忠 (1961–), 男, 博士生导师, 东北大学信息学院自动化所所长, 主要研究方向为复杂工业过程的建模优化与控制, E-mail: maozhizhong@ise.neu.edu.cn.