文章编号: 1000−8152(2010)12−1766−05

基于子空间辨识的煤气混合加压过程建模方法

李 飞, 马 休, 吴 敏, 袁 艳

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 本文针对高炉煤气与焦炉煤气混合加压过程, 提出一种基于子空间辨识的过程状态与输出关系建模方法. 通过分析过程的强耦合特性, 以蝶阀前的高炉煤气压力和流量、焦炉煤气压力和流量为过程状态, 混合煤气热值和压力为输出, 采用子空间辨识方法建立了一个4输入2输出的关系模型. 仿真实验表明, 建立的模型有效地反映了过程特性, 具有较高的辨识精度.

关键词: 煤气混合加压过程; 耦合特性; 子空间辨识

中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Modeling method based on subspace identification for gas mixing-and-pressurization

LI Fei, MA Xiu, WU Min, YUAN Yan

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: To deal with the mixing-and-pressurization process of the blast furnace gas and the coke oven gas, we propose a model describing the relationship between process states and outputs. By analyzing the strongly coupled features in the process, we construct a relationship model using subspace identification method which takes four inputs including the pressure and flow-rate preceding the valves in both the blast furnace and the coke oven, and two outputs including the calorific value and pressure of the mixed gas. The simulation shows that this model is of high accuracy for describing the characteristics of gas mixing-and-pressuring process.

Key words: gas mixing-and-pressurization process; coupling; subspace identification

1 引言(Introduction)

煤气混合加压过程是钢铁企业公用工程系统的一个重要环节. 来自高炉和焦炉的煤气分别通过煤气管道的两个蝶阀后直接进行混合, 经过加压机加压后获得符合生产要求的混合煤气. 热值和压力稳定的混合煤气是各个煤气用户稳定生产的前提, 直接影响钢铁生产的质量和产量. 因此, 需要对混合煤气的热值和压力进行有效控制.

混合煤气的热值和压力是通过调节蝶阀的开度来进行控制的. 当任何一个煤气管道的蝶阀开度发生变化时, 不仅会影响流过该管道的煤气流量, 致使混合煤气的热值和压力发生变化, 而且也会通过混合煤气压力的变化影响流过另一个煤气管道的煤气流量, 它们之间存在着很强的耦合关系. 可见, 煤气混合加压过程是一个具有强耦合特性的多变量系统. 如何实现煤气混合加压过程的解耦控制, 从而稳定混合煤气的热值和压力, 这是钢铁企业公用工程系统控制亟待解决的问题.

煤气混合加压过程的复杂性使得传统的解耦控制方法难以取得好的控制效果. 目前, 煤气混合加压过程的解耦控制主要采用智能解耦控制方法, 例如前馈补偿解耦、模糊智能解耦、专家解耦控制等. 前馈补偿解耦控制是将某通道的输出对另外通道的影响作为扰动作用, 应用前馈控制的思想, 实现各个控制回路之间的解耦[1]; 模糊智能解耦控制是通过模糊算法和智能控制规则, 确定解耦模糊控制器的参数, 降低各个控制通道之间的耦合[2,3]; 文献[4]提出一种融合模糊控制和专家控制的智能解耦控制方法, 通过建立模糊规则模型和专家控制规则, 将控制器输出的控制量转化为蝶阀开度的变化, 实现热值和压力的解耦控制. 采用人工智能控制算法和增量式PID算法分别在异常情况和正常情况下进行控制,

收稿日期: 2010−05−07; 收修改稿日期: 2010−07−05.
基金项目: 国家“863”计划重点课题资助项目(2008AA042902); 国家杰出青年科学基金资助项目(60425310).

能有效保证煤气混合加压过程的稳定运行, 得到较好的控制效果[5]. 但是, 这些方法都回避了对煤气混合加压过程模型的求解, 属于基于无模型的智能控制方法, 难以从机理上解释所取得的控制效果. 如果能够建立一个准确反映过程实际特性的模型, 将为煤气混合加压过程的解耦控制提供有效的模型支撑.

子空间辨识方法是近年来获得广泛关注的系统辨识建模方法之一. 相比传统辨识方法, 它不需要对系统有太多的了解, 只需给定模型的阶次, 而且待辨识模型阶次也可以在辨识过程中估计出来, 不需要参数化和迭代优化, 算法简单可靠[6]. 子空间辨识方法是由给定的输入输出数据直接辨识得到对象的状态空间模型, 更加适用于参数估计、动态性能分析和模型预测控制, 尤其适合多输入多输出对象的辨识[7~9].

本文针对某钢铁企业煤气混合加压过程, 利用子空间辨识方法, 以蝶阀前的高炉煤气压力和流量值以及焦炉煤气压力和流量值为输入, 混合煤气的热值和压力值为输出, 建立多变量辨识模型.

2　过程机理分析(Analysis on the mechanism of process)

煤气混合加压过程是将高炉煤气总管输送过来的高炉煤气(气源较大、热值较低)和焦炉煤气总管输送过来的焦炉煤气(气源较小、热值较高)直接进行混合, 通过加压机加压之后送往各用户单位, 如图1所示.

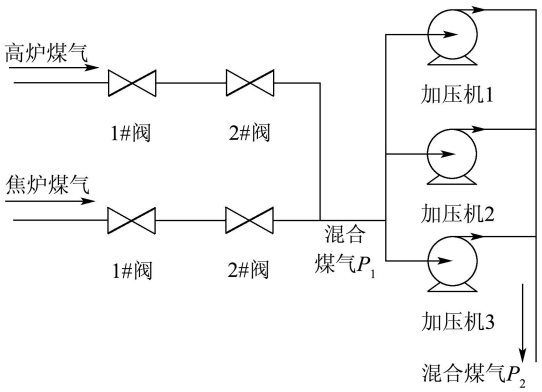

图 1　煤气混合加压过程示意图

Fig. 1　Gas mixing-and-pressurization process.

在煤气混合过程中, 混合煤气热值与压力的波动主要与高炉煤气、焦炉煤气的气源压力有关. 某一煤气气源的压力波动将导致压力差的改变, 从而使煤气流量发生变化, 混合比随之改变, 引起混合煤气热值和压力的波动. 同时, 还与煤气用户单位的生产状况和钢铁企业的生产调度有关. 混合煤气热值和压力的剧烈波动, 势必会影响整个钢铁企业的生产.

由图1可知, 煤气混合加压过程的控制手段为4个蝶阀和加压机组. 因此, 一般将煤气混合加压过程的控制划分为两个部分: 热值压力解耦控制和加压机加压控制[4]. 前一部分是以热值的稳定和跟踪给定值为第一控制目标, 加压机前的混合煤气压力P_1的稳定为第二控制目标. 后一部分通过调节加压机转速使加压后的混合煤气压力P_2稳定并跟踪给定值.

将加压机前的混合煤气压力P_1作为前一部分的控制目标主要考虑下述几个方面:

1) 若该部分只考虑热值的控制, 那么控制过程中可能会由于蝶阀的开度调节得过小而导致混合煤气压过低, 出现加压机前负压的情况, 影响混合过程的顺利进行;

2) 加压机前的混合煤气压力对加压机后的压力影响较大, 如果加压机前的压力波动较大, 则加压机后的压力调节就非常困难;

3) 该控制部分可以在保证热值的基础上尽可能提高混合煤气压力, 使加压机在相对较低的频率下运行, 达到节约能源的目的.

加压过程一般都使用变频器, 通过调节变频器频率改变加压机转速可以达到调节混合煤气压力的目的, 因而这一部分的控制目标比较单一.

由于将加压机前的混合煤气压力P_1作为前一部分的控制目标, 所以必须考虑混合煤气热值和P_1的解耦控制, 这是混合煤气加压过程控制的难点所在. 因此, 本文将针对混合煤气的热值和压力解耦控制进行建模.

在煤气混合加压过程中, 高炉煤气和焦炉煤气直接进行混合, 混合煤气的流量大致等于高炉煤气流量和焦炉煤气流量之和. 同时, 根据能量守恒定律, 可以得到:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2, \tag{1}$$

$$R_3Q_3 = R_1Q_1 + R_2Q_2. \tag{2}$$

其中: R为煤气热值($\mathrm{kJ/m^3}$), Q为煤气流量($\mathrm{m^3/s}$), 符号下标1, 2, 3分别表示焦炉煤气、高炉煤气、混合煤气.

由上述式(1)(2)很显然可以看出, 混合煤气的热值R_3与煤气流量Q_1和Q_2的大小有关. 同时, 由前面分析可知, 混合煤气的压力P_1与两种煤气的气源压力也有直接的关系. 可见, 蝶阀前的高炉煤气压力和流量以及焦炉煤气压力和流量这4个过程状态参数对混合煤气的热值和压力影响很大. 因此, 本文主要建立这些过程状态参数与混合煤气的热值和压力之间的关系模型, 这样不仅容易实现模型辨识, 而且能

够有效反映煤气混合加压过程的特性, 对实现煤气混合加压过程的解耦控制具有重要意义.

3 子空间辨识模型(Model of subspace identification)

由子空间辨识方法得到的模型以状态空间的形式描述, 它由未知多变量系统的输入测量值和输出测量值直接估计过程的参数. 本文是以蝶阀前的高炉煤气压力和流量值以及焦炉煤气压力和流量值为输入u, 混合煤气的热值和压力值为输出y, 建立一个4输入2输出的关系模型. 对此离散线性时不变模型, 假定模型的阶次为n, 采用如下的状态空间实现形式:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k, \tag{3}$$

$$y_k = Cx_k + Du_k + v_k. \tag{4}$$

并满足

$$\mathrm{E}\left(\begin{bmatrix} w_{\mathrm{p}} \\ v_{\mathrm{p}} \end{bmatrix} [w_{\mathrm{q}}^{\mathrm{T}} \ \ v_{\mathrm{q}}^{\mathrm{T}}]\right) = \begin{bmatrix} Q & S \\ S^{\mathrm{T}} & R \end{bmatrix} \delta_{\mathrm{pq}} \geqslant 0. \tag{5}$$

其中: $u_k \in \mathbb{R}^4$和$y_k \in \mathbb{R}^2$分别为k时刻的输入和输出测量值, $x_k \in \mathbb{R}^n$为k时刻的模型状态变量, $v_k \in \mathbb{R}^2$和$w_k \in \mathbb{R}^n$是不可观测的噪声向量, 与输入不相关. E表示期望算子, δ_{pq}是Kronecker函数. $A, Q \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n\times 4}$, $C \in \mathbb{R}^{2\times n}$, $D \in \mathbb{R}^{2\times 4}$, $S \in \mathbb{R}^{n\times 2}$, $R \in \mathbb{R}^{2\times 2}$. A, B, C, D为待辨识的模型参数, Q, S, R为噪声协方差矩阵.

利用子空间辨识方法辨识煤气混合加压过程模型的具体步骤如下:

Step 1 采集现场数据. 为保证输入u是具有持续激励的信号, 应尽量选取不断变化的数据. 需要测量的量有蝶阀前的高炉煤气压力和流量值以及焦炉煤气压力和流量值, 加压机前的混合煤气的热值和压力值, 采样周期为1 s, 连续采集M次.

Step 2 由采集的M组数据, 对模型的每一个输入量, 分别构建如下形式的输入Hankel矩阵:

$$U_{\mathrm{p}} \overset{\mathrm{def}}{=} U_{0|i-1} = \begin{pmatrix} u_0 & u_1 \cdots & u_{j-1} \\ u_1 & u_2 \cdots & u_j \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{i-1} & u_i \cdots & u_{i+j-2} \end{pmatrix}, \tag{6}$$

$$U_{\mathrm{f}} \overset{\mathrm{def}}{=} U_{i|2i-1} = \begin{pmatrix} u_i & u_{i+1} \cdots & u_{i+j-1} \\ u_{i+1} & u_{i+2} \cdots & u_{i+j} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{2i-1} & u_{2i} \ \cdots & u_{2i+j-2} \end{pmatrix}. \tag{7}$$

其中i表示当前时刻, 下标$0|i-1$表示矩阵的第1行到第i行, 下标p和f分别表示过去和将来的相对时间概念. 类似定义输出Hankel矩阵、过去输入输出矩阵:

$$Y_{\mathrm{p}} \overset{\mathrm{def}}{=} Y_{0|i-1}, Y_{\mathrm{f}} \overset{\mathrm{def}}{=} Y_{i|2i-1}, \tag{8}$$

$$W_{\mathrm{p}} \overset{\mathrm{def}}{=} \begin{bmatrix} Y_{\mathrm{p}} \\ U_{\mathrm{p}} \end{bmatrix}. \tag{9}$$

结合实际采样数据, Hankel矩阵的行索引i至少应大于待辨识模型的最大阶数, $i = 2\times$最大阶数/系统输入数目, 这里取$i = 10$; 列索引j至少应大于$2i-1$, 当M组的采样数据全部被利用时, 其值为$M-2i+1$. 例如, 某次采样数据长度为50, 则取Hankel矩阵的列索引$j = 31$. 为了尽可能保留数据的原貌, 可以不进行数据预处理. 在建模过程中, 只是为适应Hankel矩阵要求, 仅仅是对输入输出数据的行和列做了调整. 这就使得测量得到的蝶阀前高炉煤气压力和流量值以及焦炉煤气压力和流量值、混合煤气热值和压力值应用到辨识实验中来.

Step 3 状态序列定义为

$$X_i = (x_i, x_{i+1}, \cdots, x_{i+j-1}), \tag{10}$$

根据上述矩阵的定义, 对式(3)(4)迭代得到如下矩阵等式:

$$Y_{\mathrm{f}} = \varGamma_i X_{\mathrm{f}} + H_i U_{\mathrm{f}} + V, \tag{11}$$

其中: V 为噪声项, 广义可观测矩阵 $\varGamma_i$ 和下三角Toeplitz矩阵H_i如下:

$$\varGamma_i = (C \ \ CA \ \ \cdots \ \ CA^{i-1})^{\mathrm{T}}, \tag{12}$$

$$H_i = \begin{pmatrix} D & 0 & \cdots & 0 \\ CB & D & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ CA^{i-2}B & CA^{i-3}B & \cdots & D \end{pmatrix}. \tag{13}$$

定义斜向投影O_i为:

$$O_i \overset{\mathrm{def}}{=} Y_{\mathrm{f}} / \begin{bmatrix} W_{\mathrm{p}} \\ U_{\mathrm{f}} \end{bmatrix}, \tag{14}$$

根据斜投影[10]的定义和输入与噪声不相关的假设, 可以消除式(11)的第2项和第3项, 得到

$$O_i = \varGamma_i X_{\mathrm{f}} / \begin{bmatrix} W_{\mathrm{p}} \\ U_{\mathrm{f}} \end{bmatrix}. \tag{15}$$

Step 4 对上述得到的投影O_i进行奇异值分解(SVD): $O_i = USV^{\mathrm{T}}$, 可以得到过程的广义可观测矩阵$\varGamma_i$和状态序列X_i 的卡尔曼滤波估计$\hat{X}_i$. 同时, 在SVD计算中, 由S的奇异值来自动确定出过程的阶次, 即煤气混合加压过程模型的阶次.

Step 5 利用文献[11]中的回归法, 由估计的状态序列确定出系统矩阵A, B, C, D以及噪声协方差

矩阵Q, S, R, 从而辨识得到煤气混合加压过程的状态空间模型.

4 仿真结果与分析(Simulation results and analysis)

本文辨识煤气混合加压过程的动态模型, 辨识数据是在正常工况下从长期记录的现场数据中选取的一段, 采样周期为1 s, 共采集1000组数据, 过程的输入量如图2和图3所示. 选取其中600组作为训练集来辨识模型, 400组作为测试集来验证模型. 同时, 为说明子空间辨识算法的有效性, 采用最小二乘法辨识该煤气混合加压过程, 并将两种算法得到的结果进行比较.

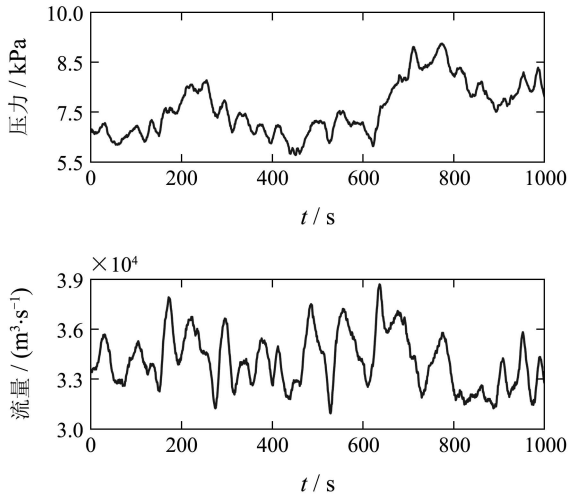

图 2 蝶阀前的高炉煤气压力和流量

Fig. 2 Pressure and flow rate of the blast furnace gas preceding the valve

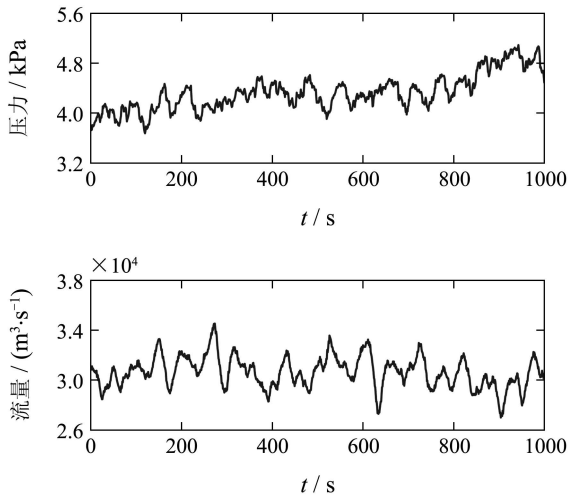

图 3 蝶阀前的焦炉煤气压力和流量

Fig. 3 Pressure and flow rate of the coke oven gas preceding the valve

通过子空间辨识算法可以得到煤气混合加压过程的离散化的状态空间模型, 矩阵参数如下:

$$A=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.1833 & 1.0867 & -0.0015 & 0.0015 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -66.343 & -86.497 & -1.1864 & 2.1868 \end{bmatrix},$$

$$B=\begin{bmatrix} -0.0598 & 0 & 0.1719 & 0 \\ -0.0201 & 0 & 0.0564 & 0 \\ -4.2823 & -0.0009 & 11.018 & 0.0003 \\ -1.6509 & -0.0003 & 3.3367 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D=\begin{bmatrix} 0.0847 & 0 & 0.7391 & 0 \\ 0.7705 & -0.1010 & -5.4373 & 0.1167 \end{bmatrix}.$$

过程的阶次主要由编写的MATLAB程序中SVD分解的结果得到, 由图4奇异值谱可知煤气混合加压过程模型的阶次为4.

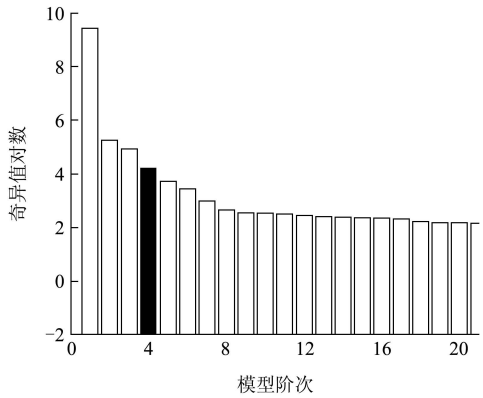

图 4 奇异值分解得到的模型阶次

Fig. 4 Model order of SVD

将测试集的400组输入数据代入以上得到的子空间辨识模型和最小二乘法辨识得到的ARX模型, 分别计算各自的输出, 比较两者与实际输出的差值, 如图5所示.

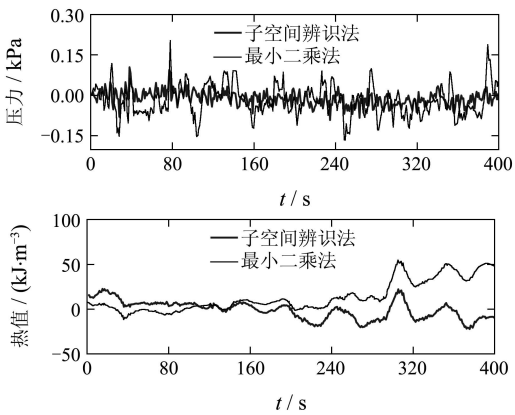

图 5 两种算法辨识输出与实际输出的误差比较

Fig. 5 Comparison of the error between the real output and the two algorithms

为进一步对两种辨识方法作出比较, 本文还引入以下几个评价准则进行分析, 相应的辨识结果如表1.

表 1 两种辨识方法性能比较

Table 1 Performance comparison of two methods

方法	预测误差/%	损失函数	拟合度/%
子空间方法	1.023	0.0008	85.88
	—	—	96.34
最小二乘法	1.703	0.0015	78.09
	—	—	92.5

1) 采用模型预测误差来表示模型辨识精度的高低, 预测误差的定义如式(16)所示:

$$\varepsilon = 100\frac{1}{l}\sum_{j=1}^{l}\left[\sqrt{\frac{\sum\limits_{i=1}^{N}\left(y_{ij}-y_{ij}^{m}\right)^{2}}{\sum\limits_{i=1}^{N}\left(y_{ij}\right)^{2}}}\right]\%, \tag{16}$$

其中: l为系统的输出个数, N为输入输出的数据长度, y_{ij}和y_{ij}^{m} 分别表示系统和模型在第i时刻第j个输出变量的值.

2) 损失函数的定义为过程输出与模型输出偏差的平方和, 损失函数越小, 模型准确性越高.

3) 利用MATLAB系统辨识工具箱的compare函数, 可以得到辨识模型与实际过程模型的拟合度. 针对过程的两个输出, 分别得到输出压力值和输出热值的两个拟合度数据.

由上表可以看出, 运用子空间辨识方法所得到的模型拥有较高的辨识精度, 能较为准确的得到煤气混合加压过程的状态空间模型.

5 结论(Conclusion)

本文利用子空间辨识方法对煤气混合加压过程进行了模型辨识, 得到一个以蝶阀前的高炉煤气压力和流量值以及焦炉煤气压力和流量值为输入、混合煤气热值和压力值为输出的关系模型. 结果表明, 过程模型得到的输出与过程实际输出基本一致, 子空间辨识方法能有效的辨识煤气混合加压过程的动态模型, 为下一步采用先进控制方法控制煤气混合加压过程的热值和压力的稳定提供了可靠的模型.

参考文献(References):

[1] 秦璐. 带解耦和Smith补偿器的混合煤气热值控制[J]. 控制工程, 2002, 9(4): 73 – 75.
(QIN Lu. Control for mixed-gas'caloric value with decoupling and smith compensator[J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(4): 73 – 75.)

[2] 任海龙, 李胜玉. 混合煤气压力和热值的模糊解耦控制[J]. 自动化仪表, 2004, 25(3): 65 – 67.
(REN Hailong, LI Shengyu. Fuzzy decoupling control of pressure and heating power for mixed gas[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2004, 25(3): 65 – 67.)

[3] 唐梦清, 阳春华. 涟钢1#煤气混合加压站自动控制系统[J]. 微计算机信息, 2005, 21(2): 7 – 8.
(TANG Mengqing, YANG Chunhua. The autocontrol system of the No.1gas mixture pressure station in LianSteel Corporation[J]. *Microcomputer Information*, 2005, 21(2): 7 – 8.)

[4] 曹卫华, 吴敏, 侯少云. 煤气混合加压过程的智能解耦控制方法与应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(4): 780 – 785.
(CAO Weihua, WU Min, HOU Shaoyun. Implementation of intelligent decoupling control method for gas mixing and pressurization[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2006, 37(4): 780 – 785.)

[5] 朱芬梅, 陈友文. 混合煤气自动控制研究与应用[J]. 自动化技术与应用, 2007, 26(9): 48 – 51.
(ZHU Fenmei, CHEN Youwen. Control of the gas mixing process[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2007, 26(9): 48 – 51.)

[6] OVERSCHEE P V, MOOR B D. N4SID: subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems[J]. *Automatica*, 1994, 30(1): 75 – 93.

[7] 李幼凤, 苏宏业, 褚健. 工业过程的子空间模型辨识[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(5): 803 – 806.
(LI Youfeng, SU Hongye, CHU Jian. Subspace model identification for industrial processes[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(5): 803 – 806.)

[8] 孙磊, 金晓明. 基于子空间辨识的模型预测控制策略及其应用[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(3): 313 – 315.
(SUN Lei, JIN Xiaoming. Model-predictive-control based on subspace identification and its application[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(3): 313 – 315.)

[9] TREASURE R J, KRUGER U, COOPER J E. Dynamic multivariate statistical process control using subspace identification[J]. *Journal of Process Control*, 2004, 14(3): 279 – 292.

[10] OVERSCHEE P V, MOOR B D. *Subspace Identification for Linear Systems: Theory–Implementation–Applications*[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

[11] KATAYAMA T, PICCI G. Realization of stochastic systems with exogenous inputs and subspace identification methods[J]. *Automatica*, 1999, 35(10): 1635 – 1652.

作者简介:

李 飞 (1973—), 男, 讲师, 目前研究方向为智能控制与信号处理, E-mail: lllfcsu@mail.csu.edu.cn;

马 休 (1987—), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为过程控制与系统辨识, E-mail: maxiu@wuhua.csu.edu.cn;

吴 敏 (1963—), 男, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 目前研究方向为过程控制、鲁棒控制与智能系统, E-mail: min@csu.edu.cn, 本文通信作者;

袁 艳 (1972—), 女, 副教授, 目前研究方向为模糊控制、神经网络与混沌优化, E-mail: yuanyan@mail.csu.edu.cn.