



连续加热炉炉温自校正控制的实现

吴 晔

(合肥工业大学微机所, 230009)

潘 德 惠

(东北工学院管理系, 沈阳 110006)

摘 要

本文基于煤气流量与检测点处炉温间的多变量动态系统模型的在线辨识, 对具有跟踪调节炉温作用的煤气流量设计了最小方差自校正控制器, 随时确定相应的最佳煤气流量, 实现了炉温的最优控制。仿真研究表明, 本文方法能够满足控制要求。

关键词: 多变量动态系统, 在线辨识, 自校正控制器。

一、引 言

作者曾解决了钢坯加热过程中二维分布参数系统边界炉温的控制问题^[1]。为了对炉温进行预测和控制, 必须了解煤气流量(燃料)的变化规律, 因为炉温是由各炉段上喷嘴的煤气流量与空气流量混合燃烧决定的。在实际生产过程中, 煤气流量与空气流量间存在确定的比例关系, 调节煤气流量就能够实现对炉温的控制。

二、多变量动态系统模型的在线辨识

某钢厂初轧车间三段式连续加热炉各炉段上炉温检测点(共6个)距入炉口处的距离依次为 12.30m, 13.46m, 19.46m, 20.04m, 26.96m, 29.04m。

根据生产过程中板型钢坯的加热情况, 只须研究沿厚度方向的燃烧传热。煤气流量 $u_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 是系统输入, 检测点处的炉温 $y_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 是系统输出。由于加热炉中复杂的物理化学变化, 随机干扰作用于系统的不同部位, 系统本身还存在热滞后性, 现作如下假设:

- 1) 系统是线性的, 各传输通道的热滞后时间相同;
- 2) 在热滞后时间内, 各检测点处的炉温相互影响很小, 即输出炉温间可解耦。

运用线性系统迭加原理, 建立了线性多变量系统的二阶差分模型:

$$A(z^{-1})\mathbf{y}(k) = B(z^{-1})\mathbf{u}(k-s) + \xi(k), \quad (1)$$

其中 z^{-1} 是单位滞后算子,

$\mathbf{u}(k) = [u_1(k), u_2(k), \dots, u_6(k)]^T$ 为系统输入向量,
 $\mathbf{y}(k) = [y_1(k), y_2(k), \dots, y_6(k)]^T$ 为系统输出向量,
 $\boldsymbol{\xi}(k) = [\xi_1(k), \xi_2(k), \dots, \xi_6(k)]^T$ 为系统有色噪声向量.
 取热滞后时间 $s = 1$, 则多项式

$$A(z^{-1}) = I_{6 \times 6} + A_1 z^{-1} + A_2 z^{-2}, \quad B(z^{-1}) = B_0 + B_1 z^{-1},$$

式中 A_1, A_2 为 6×6 对角阵, B_0, B_1 为 6×6 方阵.

只要系统噪声序列是有理谱密度的平稳随机过程, 近似地可得有色噪声 $\boldsymbol{\xi}(k)$ 的自回归模型^[2]:

$$\mathbf{e}(k) = D(z^{-1})\boldsymbol{\xi}(k), \quad (2)$$

其中 $\mathbf{e}(k) = [e_1(k), e_2(k), \dots, e_6(k)]^T$ 为白噪声向量.

自回归模型的有限阶数取 2 或 3, 一般都能够获得满意的描述 $\boldsymbol{\xi}(k)$ 的模型, 本文取阶数值为 2, 则多项式

$$D(z^{-1}) = I_{6 \times 6} + D_1 z^{-1} + D_2 z^{-2},$$

式中 D_1, D_2 为 6×6 对角阵.

运用广义最小二乘递推算法^[3], 取性能指标

$$\begin{aligned} J &= \sum_{k=1}^n \mathbf{e}^T(k) \mathbf{e}(k) \rho^{n-k} \\ &= \sum_{k=1}^n \|D(z^{-1})A(z^{-1})\mathbf{y}(k) - D(z^{-1})B(z^{-1})\mathbf{u}(k-1)\|^2 \rho^{n-k}, \quad 0 < \rho < 1, \quad (3) \end{aligned}$$

当 J 取极小时, 可获得参数的估计值, 它往往能够得到参数接近一致性的结果. 由于手头生产实验数据较少 (仅 31 组), 需要辨识的参数较多 (96 个), 为此对数据进行了预处理和必要的插值运算, 得到 262 组数据, 选定遗忘因子 $\rho = 0.998$, 检验辨识结果可知, 模型的精度较高, 限于篇幅结果从略.

三、多变量系统最小方差自校正控制

为使各检测点处的炉温稳定在该点处的最优炉温附近, 必须确定出最佳煤气流量. 本文选用自校正控制, 从工业过程控制使用的实例知道^[4], 它具有适时在线修正控制器参数的能力, 其抗干扰性、适应性及控制精度等都比 PID 调节器优越.

当系统参数向量 \mathbf{a} 已知时, 能够得到系统式(1)和式(2)最小方差意义下的最优预报模型^[5]:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{y}}(k+1|k) &= E\{\hat{\mathbf{y}}(k+1) | \hat{\mathbf{a}}, \hat{\mathbf{p}}(k), \hat{\mathbf{u}}(k)\} \\ &= D(z^{-1})[F(z^{-1})\hat{\mathbf{y}}(k) + B(z^{-1})\hat{\mathbf{u}}(k)], \quad (4) \end{aligned}$$

其中 $\mathbf{P}(k)$ 是 k 时刻采样的实时信息, $\mathbf{P}(k) = \{\mathbf{y}^k, \mathbf{u}^{k-1}\}$,

$\hat{\mathbf{y}}^k = \{\hat{y}(k), \hat{y}(k-1), \dots\}$, $\hat{\mathbf{u}}^{k-1} = \{\hat{u}(k-1), \hat{u}(k-2), \dots\}$, $F(z^{-1})$ 满足于等式

$$C(z^{-1}) = D^{-1}(z^{-1}) = A(z^{-1}) + z^{-1}F(z^{-1}). \quad (5)$$

由模型(4), 建立如下性能指标:

$$J = E\{\|\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{y}^*\|^2 | \hat{\mathbf{a}}, \hat{\mathbf{p}}(k), \hat{\mathbf{u}}(k)\}, \quad (6)$$

其中 $\mathbf{y}^* = [y_1^*, y_2^*, \dots, y_6^*]^T$ 为检测点处最优炉温设定值向量。

由此,能够设计出一种跟踪输出 \mathbf{y}^* 的最小方差控制律 $\mathbf{u}^*(k)$,

$$\mathbf{u}^*(k) = B^{-1}(z^{-1})[C(z^{-1})\mathbf{y}^* - F(z^{-1})\mathbf{y}(k)], \quad (7)$$

其中 B_0 可逆, $B(z^{-1})$ 稳定, 否则 $\mathbf{u}^*(k)$ 发散。式(7)就是所要确定的最佳煤气流量, 它具有简单易实现的特点。

四、仿真研究

现仅研究一种稳态最优炉温分布^[1]:

$$\theta^*(L) = \begin{cases} -1.47L^2 + 62.2L + 703.2, & L \leq 28.4\text{m}, \\ 1280, & 28.4\text{m} < L \leq 30.275\text{m}, \end{cases}$$

单位 $^{\circ}\text{C}$, L 为距入炉口处的炉长方向坐标。

由仿真计算可知,由于最小方差控制的鲁棒性较差,系统参数的波动往往导致系统的非逆稳定。为此,对控制信号煤气流量 $\mathbf{u}(k)$ 采取了限幅措施,但由此确定的控制策略一般是次最优的。

程序迭代至 23 步,煤气流量控制下的炉温分布趋于稳定,各检测点处的炉温值均在相应的最优炉温设定值附近波动,最大误差约为(均取绝对值):

$$\begin{aligned} \Delta y_1 &= 21.4^{\circ}\text{C}, \quad \Delta y_2 = 18.7^{\circ}\text{C}, \quad \Delta y_3 = 43.1^{\circ}\text{C}, \\ \Delta y_4 &= 23.8^{\circ}\text{C}, \quad \Delta y_5 = 19.9^{\circ}\text{C}, \quad \Delta y_6 = 18.1^{\circ}\text{C}, \end{aligned}$$

故得到的有限拍控制效果较好,能够满足控制要求。

通过系统参数的在线辨识,确定出控制器的参数,进而完成了煤气流量自校正控制器的设计。但由于现场数据太少,辨识出的模型真实性往往难以确定,随着实验数据的积累,模型的准确性和控制效果将会得到改善。

参 考 文 献

- [1] 吴晔、潘德惠,二维传热分布参数系统的最优边界控制,控制理论与应用,8(1991),316—321.
- [2] 徐南荣,系统辨识导论,电子工业出版社,1986.
- [3] 韩崇昭、王月娟、万百五,随机系统理论,西安交通大学出版社,1987.
- [4] Yoshitani, N., Optimal and Adaptive Control of Strip Temperature for a Heating Furnace in CAPL., Preprints of the IFAC Symposium, Tokyo, (1984), 380—385.

THE REALIZATION OF SELF-TUNING TEMPERATURE CONTROL FOR REHEATING FURNACE

WU YE

(Institute of Computer Science, Hefei University of Technology, 230009)

PAN DEHUI

(Dept. of Management Engineering, Northeast University of Technology, Shenyang)

ABSTRACT

Based on the on-line identification of the multivariable dynamic system between gas flow and furnace temperature at measuring points, we design a minimum variance self-tuning controller for gas flow which traces and regulates furnace temperature, so as to determine the corresponding optimal gas flow at all times, thus realizing the optimal control of furnace temperature. The simulation results completely satisfy the control requirements.

Key words: Multivariable dynamic system; on-line identification; self-tuning controller.