

计算机控制电加热炉多变量 自校正调节器

舒迪前 刘宏才 刘立 杨卫东

(北京钢铁学院)

摘 要

本文讨论计算机对多台电加热炉用多变量自校正调节器群控的有关问题,包括电加热炉数学模型建立、多变量自校正调节器设计、系统仿真研究、实时控制结果及分析等部分。结果表明:当对象参数慢变时,STR具有较强的适应力,控温精度为 $(800 \pm 1)^{\circ}\text{C}$,高于数字PID和LQG调节器。

自适应控制是控制工程界近年来较为活跃的学科之一,由K.J.Astrom^[1]等人提出的自校正调节器和控制器近年来已有不少工程应用实例,而对多变量系统的自校正控制,则应用实例尚不多^[2]。作者于1982年应用国产JS-10A机(字长16位)对多台双输入双输出电加热炉进行群控获得成功,控温偏差为 $(800 \pm 1)^{\circ}\text{C}$,效果比PID和LQG控制器好。

一、电加热炉数学模型的建立

1. 电加热炉的结构和模型类型

电加热炉基本结构及控制框图见图1,它有两组电炉丝和两个测温点,分别由两组

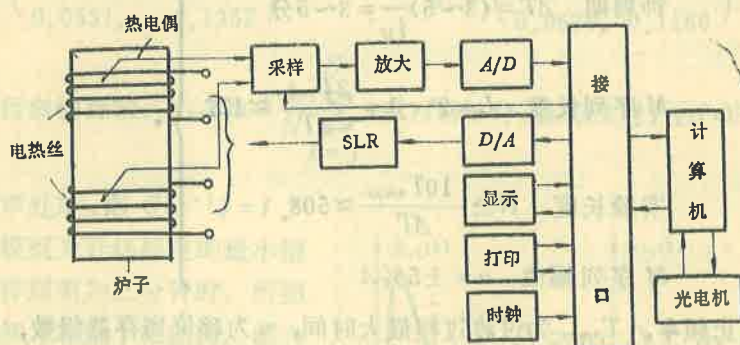


图 1

可控硅调功器供电,工艺要求对不同材料加热温度不同,常用加热温度为 $200^{\circ}\text{C}\sim 1000^{\circ}\text{C}$,要求被加热物料温度尽快从室温升至设定值,并要求上下部温差不得超过 $\pm 4^{\circ}\text{C}$ 。

电加热炉的数学模型是分布参数慢时变的,为简便计在工作点附近用一集中参数模型逼近它,经实测数据拟合后得输入输出静特性方程如下:

$$\begin{aligned} y_1 &= 0.25u_1^2 + 0.006u_2^2 + y_0, \\ y_2 &= 0.013u_1^2 + 0.17u_2^2 + y_0, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 y_1 、 y_2 为输出温度 $^{\circ}\text{C}$, u_1 、 u_2 为输入电压, y_0 为起始温度。可见其输入输出特性非线性,但在工作点附近可用一线性离散差分 CARMA 模型描述:

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-d}B(z^{-1})u(k) + C(z^{-1})e(k), \quad (2)$$

式中 $y(k) \in \mathbb{R}^p$, $u(k) \in \mathbb{R}^p$, $\{e(k)\} \in \mathbb{R}^p$ 分别为输出、输入及噪声序列向量, z^{-1} 为单位后移算子, $d-1$ 为系统纯滞后, $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 、 $C(z^{-1}) \in \mathbb{R}^{p \times p}[z^{-1}]$ 均为多项式矩阵,即

$$A(z^{-1}) = I + A_1 z^{-1} + \dots + A_{n_a} z^{-n_a}$$

$$B(z^{-1}) = B_0 + B_1 z^{-1} + \dots + B_{n_b} z^{-n_b}, \quad B_0 \text{ 为非异阵。}$$

$$C(z^{-1}) = I + C_1 z^{-1} + \dots + C_{n_c} z^{-n_c}$$

系统的结构和参数可通过采集输入输出数据,应用结构辨识和参数估计方法求得。

2. 模型的结构和参数的确定

为确定模型的纯滞后及过渡过程时间,需先做阶跃响应实验,经实测其纯滞后时间为三分钟,过渡过程时间 T_s 约为2.5小时。

用 M 序列伪随机二位式信号作输入信号,用联合输入相位分离法作开环实验,测取输入输出数据,伪随机信号参数经计算选择如下^[3]:

$$\left. \begin{aligned} \text{钟周期} \quad \Delta T &= (3 \sim 5) \frac{1}{f_M} = 3 \sim 5 \text{分} \\ M \text{ 序列长度} \quad L &= 2^n - 1 = \frac{2T_{s\max}}{\Delta T} \approx 127 \\ \text{实验长度} \quad N &\geq \frac{10T_{s\max}}{\Delta T} \approx 508 \\ M \text{ 序列幅值} \quad a &= \pm 5\% A \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

式中 f_M 为截止频率, $T_{s\max}$ 为过渡过程最大时间, n 为移位寄存器级数, A 为输入信号最大值,实验炉温是 800°C ,此时上端输入 $20\%A$,下端输入 $25\%A$,实验长度选用4个 M 序列,其中第一序列用于结束过渡过程,后三个序列用于建模。为考察采样周期(ΔT)改变时对模型的影响,采集了二、三、四、五分钟等几种不同 ΔT 的数据用于建

模和分析。

由于实验时间较长, 有各种干扰和漂移影响, 所采数据需先经滤波、去除直流分量和趋势项的处理, 去除趋势项和直流分量是一并进行的, 趋势项为

$$\bar{Y}(k) = b_0 + b_1 k, \quad (4)$$

$$\text{式中 } b_0 = \frac{2(2N+1) \sum_{k=1}^N Y(k) - b \sum_{k=1}^N k \cdot Y(k)}{N(N-1)},$$

$$b_1 = \frac{12 \sum_{k=1}^N k \cdot Y(k) - 6(N+1) \sum_{k=1}^N Y(k)}{N(N-1)(N+1)}.$$

因此用于参数估计的输出 $y(k)$ 为

$$y(k) = Y(k) - \bar{Y}(k) = Y(k) - b_0 - b_1 k. \quad (5)$$

电加热炉模型结构可用多变量系统结构辨识算法得到^[4], 经计算得结构指标 $v_1 = 2$, $v_2 = 2$, 即 (2) 式的阶次 $n_a = 2$, 系统时延 $d = 2$.

应用相关分析—最小二乘两步法对模型参数进行估计, 当 $\Delta T = 3$ 分钟时的脉冲响应曲线见图 2. 以 $R_{11}(k)$ 、 $R_{12}(k)$ 作系统输出 $y_1(k)$ 、 $y_2(k)$, 输入 $u_1(0) = u_2(64) = 1$, 其余皆为零, 用最小二乘法拟合模型参数得

$$y(k) + A_1 y(k-1) + A_2 y(k-2) = B_0 u(k-2) + B_1 u(k-3) + e(k), \quad (6)$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} -0.2424, & -0.0997 \\ -0.1322, & -0.4265 \end{pmatrix}, \quad A_2 = \begin{pmatrix} -0.3426, & -0.2105 \\ -0.1070, & -0.2404 \end{pmatrix},$$

$$B_0 = \begin{pmatrix} 0.1037, & 0.0763 \\ 0.0531, & 0.1352 \end{pmatrix}, \quad B_1 = \begin{pmatrix} 0.0916, & 0.0575 \\ 0.0670, & 0.1180 \end{pmatrix}.$$

对残差进行白性检验: $r_{ee}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \varepsilon(k) \varepsilon(k+\tau)$, 当 $\tau \geq 1$ 时, $r_{ee}(\tau)$ 很小, 故残差

可近似按白噪声处理, 即 $C(z^{-1}) = I$.

经检验所拟合模型为开环稳定的最小相位系统。当采样周期为二分钟时, 所拟合模型经检验知为非最小相位的, 即当采样间隔变稠时, 原为最小相位的连续系统, 离散后可变为非最小相位系统。

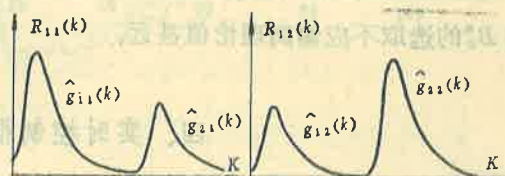


图 2

二、多变量自校正调节器设计

多变量自校正调节器由最小方差控制器和参数估计器组成。当模型(2)式的参数已知时,其最小方差控制律可求得^[5]为(当令参考输入讯号 $y_r = 0$ 时)

$$\tilde{C}(z^{-1})^{-1} [\tilde{G}(z^{-1})y(k) + \tilde{F}(z^{-1})B(z^{-1})u(k)] = 0. \quad (7)$$

当过程参数未知或缓变时,则需用递推最小二乘法在线辨识控制器参数,再计算自校正控制律^[5]。应用递推最小二乘法对控制器进行参数估计时,根据闭环可辨识性要求,令 B_0^* 不参加估计,按理论或实验值选取,算法如下:

$$\hat{\theta}_i(k) = \hat{\theta}_i(k-1) + K(k) [y_i(k) - \hat{\theta}_i^T(k-1)\varphi(k-d) - B_0^{*(i)}u(k-d)], \quad (8)$$

$$K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k-d)}{\alpha + \varphi^T(k-d)P(k-1)\varphi(k-d)}, \quad (9)$$

$$P(k) = \frac{1}{\alpha} \left[P(k-1) - \frac{P(k-1)\varphi(k-d)\varphi^T(k-d)P(k-1)}{\alpha + \varphi^T(k-d)P(k-1)\varphi(k-d)} \right], \quad (10)$$

式中 $\hat{\theta} = (\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_p) = (\hat{A}_1^*, \dots, \hat{A}_n^*, \hat{B}_1^*, \dots, \hat{B}_{m+d-1}^*)^T$,

$$\varphi^T(k-d) = [-y^T(k-d), \dots, -y^T(k-n-d+1), u^T(k-d-2), \dots, u^T(k-m-2d+1)],$$

$B_0^{*(i)}$ 为 B_0^* 相应第 i 个行向量,

α 为渐消记忆因子 $0.9 < \alpha \leq 1$ 。

三、系统的仿真研究

仿真研究系统参数是否收敛于理论值及 B_0^* 选择对系统的影响表明:当 B_0^* 取理论值、渐消记忆因子 $\alpha = 0.985$ 时,参数收敛于理论值,图略。

B_0^* 的选择对系统输出的影响很大,当 B_0^* 小时,超调量大, $u(k)$ 波动也大,过程上升快,系统输出方差小。增加 B_0^* 过程变慢,方差增大, B_0^* 取理论值时方差为最小。因此 B_0^* 的选取不应偏离理论值甚远。

四、实时控制框图及控制结果

1. 实时控制框图

用 JS-10A 群控电加热炉自校正调节器实时控制框图见图 3,用机器语言编程,四

字长与双字长加减乘除子程序混合使用, 并加入比例因子, 此时, 机器运算精度为 2×10^{-10} , 单台自校正算法约需 15 秒, 自校正算法、输入输出及打印子程序占内存 2.1K, 故该机可同时群控五台炉子。

电加热炉的升温过程用最小方差控制, 接近设定值时 (N_1 为升温步数) 自校正调节器投入工作, 初值 $P(0) = 10^3 I$, $\theta_1(0) = \theta_2(0) = 0$,

给定 $B_0^* = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.25 \\ 0.25 & 0.5 \end{pmatrix}$, 图中 J^* 为实时估计参数炉号, W 为控炉台数, N 为规定控温步数。

现场电网电压波动较大, 曾按一昼夜电网电压波动实际情况进行仿真研究表明: 当炉温为 800°C 时, 炉温波动大于 $\pm 10^\circ\text{C}$, 为提高适应能力, 加入渐消因子 α , 其取值根据现场实际控制效果确定。

2. 实时控制结果

实控结果表明: 适当选取 B_0^* 和 α 值, STR 的控温效果优于 PID 和 LQG 控制器。下面给出参数在线辨识, B_0^* 与 α 的选取对输出影响及 PID、LQG、STR 三种控制方案输出波动比较等几方面的实验结果。

(1) 系统参数在线辨识的情况

图 4 给出 2 号炉部分参数在线辨识结果,

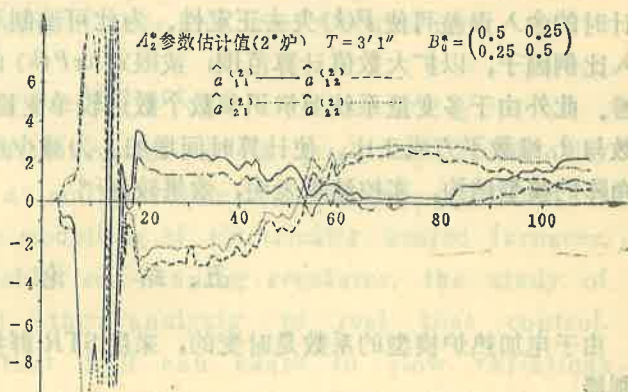


图 4

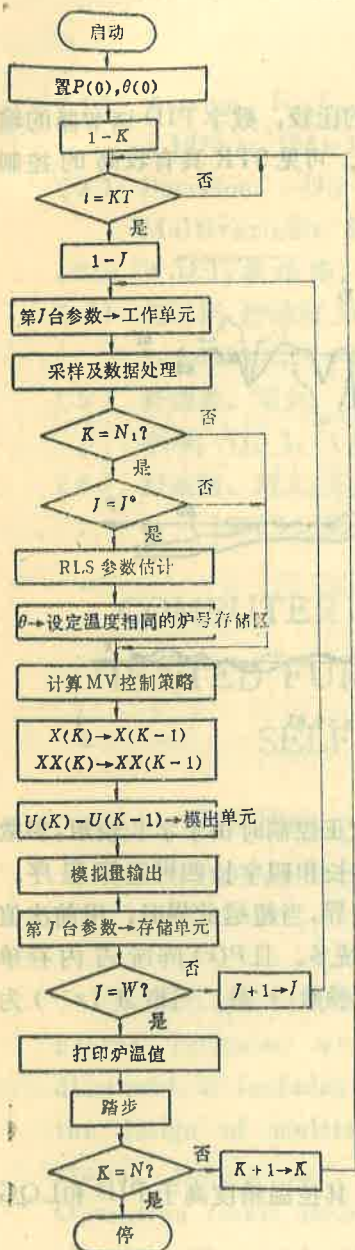


图 3

取 $B_0^* = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.25 \\ 0.25 & 0.5 \end{pmatrix}$ ，图 5 示模型参数变动较大。

(2) B_0^* 和 α 选择对输出偏差的影响

实控结果表明： B_0^* 接近理论值时输出偏差比偏离大时小。对 α 的取值是： α 取小些，系统跟踪能力较快，输出偏差较小（图从略）。

(3) 三种控制方案的比较

图 5 示出 PID、LQG、STR 三种控制方案输出波动的比较，数字 PID 调节器的输出波动大于 $\pm 4^\circ\text{C}$ ，LQG 控制器为 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，STR 为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。可见 STR 具有较高的控制精度。

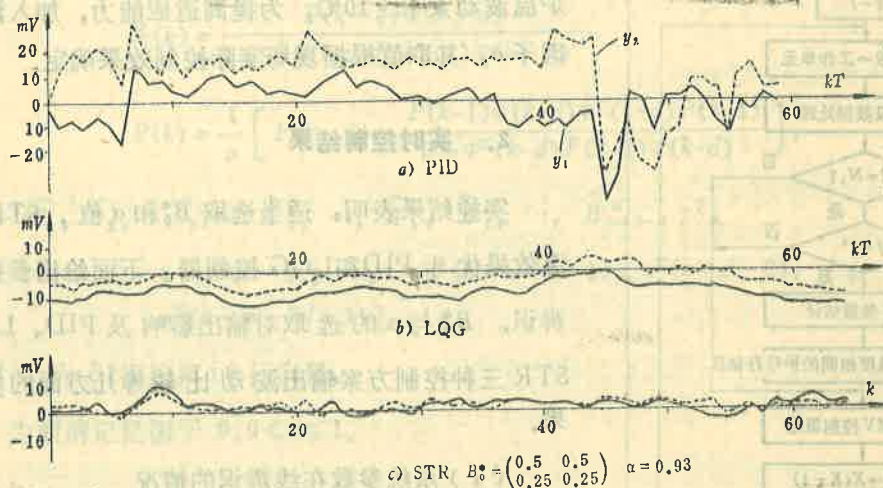


图 5

必须指出，应用微型机或小型机对多变量系统进行自校正控制时由于字长较短，参数估计时的舍入误差可使 $P(k)$ 失去正定性，为此可编制双字长和四字长四则运算程序，加入比例因子，以扩大数值计算范围；或限定 $\text{tr}P(k)$ 的上界，当超越此界时，用前次值代替。此外由于多变量系统要辨识参数个数远较单变量系统多，且 $P(k)$ 阵所占内存单元数与 θ_i 维数平方成正比，使计算时间增加。为减少辨识参数个数，可取 $A^*(z^{-1})$ 为对角阵的模型结构，实控结果表明，效果较好^[6]。

五、结 论

由于电加热炉模型的系数是时变的，采用 STR 群控，其控温精度高于 PID 和 LQG 控制器。

采用多变量 STR 时，由于要事先给定 B_0^* 的参数，故需先离线拟合过程模型，计算

最小方差控制律初步确定 B^* 的理论参数值。此外还须注意渐消记忆因子 α 的选取。

应用微型机或小型机对多变量系统进行控制时,须注意舍入误差对参数估计的不良影响,为此应编制多字节定点或浮点运算子程序,解决数值计算中的发散问题。随着微型机的广泛应用,自校正控制技术必将引起工程界的广泛兴趣。

参 考 文 献

- [1] Astrom, K. J., On Self-tuning Regulators, Automatica, **9**, (1973), 185-199.
- [2] Borisson, U., Self-tuning Regulators for a Class of Multivariable Systems, Automatica, **15**, (1979), 209-215.
- [3] W.D.T. 戴 维 斯, 适应系统的识别, 科学出版社, (1977)。
- [4] 杨卫东、舒迪前、刘宏才, 多变量系统结构辨识及其应用, 信息与控制, **3**, (1983), 1-9.
- [5] 舒迪前、刘立, 多变量自校正调节器及其在电加热炉上的应用, 自动化学报, **11**, **1**, (1985), 21-29.
- [6] 舒迪前、刘立, 实现多变量自校正调节的一种方法, 北京钢铁学院学报, **4**, (1982), 36-46.

COMPUTER CONTROL OF ELECTRICALLY HEATED FURNACES WITH MULTIVARIABLE SELF-TUNING REGULATOR

Shu Digian, Liu Hongcai, Liu Li, Yan Weidong

(Beijing University of Iron and steel Technology)

Abstract

In this paper, Computer control of a group of electrically heated furnaces with a multivariable Self-tuning regulator is discussed. It includes the modelling of electrically heated furnaces, the design of multivariable self-tuning regulator, the study of system simulation and the analysis of real time control. Operation result shows that STR can adapt to slow variations of parameters and the control accuracy is about $(800 \pm 1)^\circ\text{C}$, which is better than that of PID and LQG regulators.