

自适应控制在电阻炉上的应用

刘 禾

(无锡九一六信箱)

摘要 应用传热学原理和系统辨识的方法建立了电阻炉广义受控对象的数学模型。针对电阻炉模型参数具有随炉温变化而变化的时变特性,同时考虑到电阻炉温控系统受到干扰时,仍具有良好的动态特性和较高的控制精度,故本文提出用自适应控制与分区积分控制相结合的方法来设计电阻炉温控系统。计算机仿真和实际运行都证明了该温控系统具有较高的稳态精度和跟踪特性,且超调量小,抗干扰能力强。

关键词 电阻炉;数学模型;控制策略

0 前 言

电阻炉是工业生产的重要设备,其应用极为广泛。目前,电阻炉温控系统主要存在的问题是:恒定 PID 参数难以满足给定温度在大范围变化时的控制精度要求。这是因为电阻炉是一个结构已知、参数慢变、纯滞后系统。当工艺要求给定温度在大范围之间变化时,电阻炉的参数也会发生变化,这时为了达到一定的炉温控制要求,就需要使调节器的 PID 参数随被控对象参数变化而变化。否则,温度会在一定范围内振荡。另外,电阻炉温控系统由于采用 PID 控制,使得系统的动态品质差,即超调量大,一般可达 30℃,调节时间长。在电阻炉温控系统中,电源电压波动是一种主要的扰动,但用 PID 控制对电源电压的干扰响应速度慢。电阻炉这样的对象采用 PID 控制使得炉温输出对输入给定炉温的跟踪性差。

近年来,人们采用一些自适应技术来控制温度系统,主要有:最小方差控制;极点配置自校正器;模型参考自适应控制等。前二种控制方法由于选择控制参数的相互影响,不能保证随机调节和跟踪性能均优。第三种方法存在着动态性能差的缺点。

因此本文提出了用随机调节性能和跟踪性能均优的组合自校正与调节时间短、超调量小的分区积分控制相结合的方法来设计电阻炉的温控系统。

1 电阻炉广义对象数学模型

1.1 电阻炉数学模型

研究以自然对流方式工作的电阻炉。在分析时,把电阻炉的炉内空间看成由炉芯隔开的两个子空间 m 、 n 。炉丝所在的空间为 m 。

在子空间 m 内,根据能量平衡原理有:

$$C_s \frac{dT_s}{dt} - K' A \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{0.24}{r} u^2 \quad (1)$$

式中 T_s 为 m 空间温度, T 为 n 空间的温度, C_s 为 m 空间的热容, K' 为炉芯导热系数, r 为炉丝电阻, A 为炉膛横截面积, u 为加在炉丝上的电压, x 为炉芯开始沿炉膛方向距离。

在子空间 n 内,根据能量平衡关系有:

$$C \frac{dT}{dt} + \frac{T}{R} = -K' A \frac{\partial(T - \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (2)$$

式中 C 为子空间 n 的热容, R 为炉壁热阻, τ 为纯滞后时间。

相对温升时,炉内温度分布方程为:

$$T = T_s \left[1 - \frac{1-Z}{L} x \right]^2 \quad (3)$$

式中 $Z = \sqrt{T_i/T_s}$, L 为测量点位置。

考虑到炉丝电阻 r , 炉芯导热系数 K' , 热阻 R 与温度有关, 即

$$r = a_2 + b_2 T'_s \quad (4)$$

$$K' = a_1 + b_1 T'_s \quad (5)$$

$$R = [a_3 + b_3 T'_1]^{-1} \quad (6)$$

其中

$$T'_s = T_0 + T_s$$

$$T'_1 = T_0 + T$$

式中 T_0 为室温。

求解上述方程, 并离散化, 采样周期 $T' = \tau/d_1$, 于是有:

$$T(k+1) = A'_1(k)T(k) + A'_2(k)T(k-1) + B'(k)u^2(k-d_1-1) \quad (7)$$

其中

$$F(k) = 1 - \frac{T'}{C_s} [a_1 + b_1 T_0 + b_2 T_s(k)] \left[1 - \sqrt{\frac{T(k)}{T_s(k)}} \right] = 1 - \frac{T'}{C_s} f(k)$$

$$G(k) = \frac{0.24}{C_s} T' [a_2 + b_2 T_0 + b_2 T_s(k)] - 1 = \frac{T'}{C_s} g(k)$$

$$H(k) = 1 - \frac{T'}{C} [a_3 + b_3 T_0 + b_3 T(k)] = 1 - \frac{T'}{C} h(k)$$

$$E(k) = \frac{C_s}{C} [1 - F(k)] = \frac{T'}{C} f(k)$$

$$A'_1(k) = H(k) + \frac{E(k-d_1)}{E(k-d_1-1)} F(k-d_1-1)$$

$$A_2'(k) = -\frac{E(k-d_1)}{E(k-d_1-1)}H(k-1)F(k-d_1-1)$$

$$B'(k) = E(k-d_1)G(k-d_1-1)$$

(7)式描述了炉温 T 与电流电压之间的关系,同时可知,系数 $A_1'(k)$ 、 $A_2'(k)$ 、 $B'(k)$ 不仅与电阻炉结构、采样周期有关,还与炉温 T 有关。

1.2 电阻炉广义对象数学模型

在实际电阻炉温控系统中,温度控制器的外部电路常包括触发电路、可控硅电路、检测电路等。如图1示。

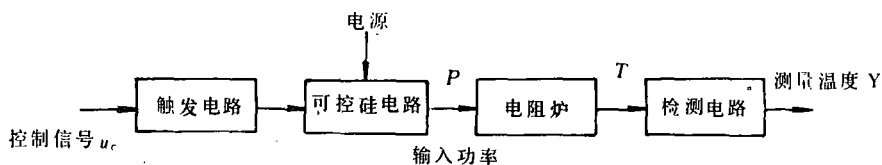


图1 电阻炉控制框图

将触发电路、可控硅电路、电阻炉、检测电路统称为电阻炉广义对象。在分析时,考虑可控硅过零触发,这样输入到电阻炉的功率 P 与控制信号 u_c 之间关系为:

$$P = \frac{0.24u^2}{r} k_q u_c \quad (8)$$

式中 k_q 为比例系数。

考虑电压波动,有:

$$u = u_{\text{标}} + \Delta u \quad (9)$$

式中 Δu 为波动值, $u_{\text{标}}$ 为恒定值,单相供电时为 220V。

检测电路中含有热电偶,它可看成一阶惯性环节,于是:

$$\frac{y(s)}{T(s)} = \frac{k_3}{T_1 s + 1} \quad (10)$$

式中 T_1 为热电偶时间常数, k_3 为转换系数, y 为测量温度。

根据 1.1 节中的有关式子,以及(8)、(9)、(10)式,整理,离散化得:

$$y(k+1) = A_1(k)y(k) + A_2(k)y(k-1) + A_3(k)y(k-2) + \left[B_1(k) + \frac{2B_1(k)}{u_{\text{标}}} \Delta u(k-d_1-1) \right] u_c(k-d_1-1) \quad (11)$$

其中

$$A_1(k) = A_1'(k) + \frac{T_1}{T_1 + T'}$$

$$A_2(k) = A_2'(k) - \frac{A_1'(k)T_1}{T_1 + T'}$$

$$A_3(k) = -\frac{A_2'(k)}{T_1 + T'}$$

$$A_3(k) = \frac{k_3 T'}{T_1 + T'} B_0(k)$$

(11)式表明了测量温度 y 与控制信号 u_c 和电压波动值 Δu 之间的动态关系。式中系数 $A_1(k)$ 、 $A_2(k)$ 、 $A_3(k)$ 、 $B_1(k)$ 不仅与电阻炉结构有关,还与采样时间、炉温有关。当电阻炉、热电偶、采样时间已定时,这时系数可看作仅仅是炉温的函数。

$$\text{令} \quad B(k) = B_1(k) + \frac{2B_1(k)}{u_{\text{标}}} \Delta u(k - d_1 - 1)$$

于是(11)式为:

$$y(k+1) = A_1(k)y(k) + A_2(k)y(k-1) + A_3(k)y(k-2) + B(k)u_c(k-d_1-1) \quad (12)$$

(12)式仅描述了炉温与控制信号之间的动态关系。

选(12)式作为电阻炉广义对象的参数模型结构,对图(1)所示的电阻炉广义对象进行了模型辨识试验。选用逆 M 序列伪随机信号作为控制信号 u_c 。电阻炉为 4kVA 箱式电阻炉。通过在炉温 320℃, 720℃ 附近的模型辨识,选取

$$(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3})y(k) = b_0 u_c(k-3) + e(k) \quad (13)$$

作为电阻炉广义对象的动态来描述其结构是可靠的,置信度为 95%。(13)式中 z^{-1} 为后向平移算子, $e(k)$ 为随机噪声。

2 控制策略

2.1 温控系统的组合自校正控制

近年来,在自校正的设计方法中,极点配置方法愈来愈受到重视,这是因为这种方法具有许多优点,如工程意义直观明显、鲁棒性良好等。但是一般极点配置自校正控制器有一个严重缺点,是伺服跟踪和随机调节性能不能均优。组合自校正器可按照伺服跟踪随机调节性能要求,分别设计控制器参数,而不相互影响,从而使这两种性能都达到最好结果,并能保存现有极点配置自校正控制的优点。

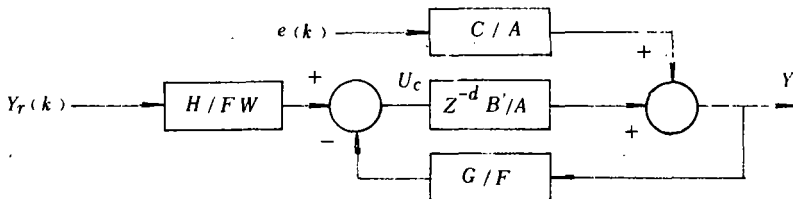


图2 组合自校正控制方案

设差分方程:

$$Ay(k) = z^{-d} B' u_c(k) + Ce(k) \quad (14)$$

来描述单输入单输出受控对象,式中

$$A = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$$

$$B' = b'_0 + b'_1 z^{-1} + \dots + b'_{n'} z^{-n'}$$

$$C = 1 + c_1 z^{-1} + \dots + c_{n_c} z^{-n_c}$$

$$b'_0 \neq 0, \quad d \geq 1, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

z^{-1} 为后向平移算子, d 为对象延迟时间, $y(k)$ 和 $u(k)$ 分别为对象输出和控制输入, $e(t)$ 是均值为零方差为 σ^2 的不相关随机序列。

组合自校正控制方案如图 2 所示。由图 2 可知, 组合自校正控制策略为:

$$u_c(k) = \frac{M}{FW} y_r(k) - \frac{G}{F} y(k) \quad (15)$$

闭环系统方程为:

$$y(k) = \frac{BH}{(AF + BG)W} y_r(k) + \frac{CF}{AF + BG} e(k) \quad (16)$$

式中 $y_r(k)$ 为伺服输入。由 (16) 式可知, 与随机调节性能有关的控制多项式是 F 和 G 。与伺服跟踪性能有关的控制多项式除 F 和 G 外, 尚有 H 和 W 。这就能使得随机调节性能和伺服跟踪性能同时均优。

当受控系统是最小相位时, B' 为稳定多项式, 这时组合控制策略和闭环系统方程为:

$$u_c(k) = \frac{T_m(1)C}{FT_m} y_r(k) - \frac{G}{F} y(k) \quad (17)$$

$$y(k) = \frac{T_m(1)z^{-d}}{m} y_r(k) + F'e(k) \quad (18)$$

其中, T_m 为希望闭环极点多项式。 F 、 G 满足如下关系:

$$AF' + z^{-d}G = C \quad (19)$$

$$F = B'F' \quad (20)$$

式中 F' 为首一多项式, 各多项式的阶次为:

$$\deg F = n_b + d - 1, \deg F' = d - 1, \deg G = n_a - 1.$$

对于 (13) 式描述的电炉炉广义对象, 考虑到电压波动的影响, 于是有:

$$(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3}) y(k) = b_1 z^{-3} u_c(k) + \frac{2b_1}{u_{\text{标}}} u_c(k-3) \Delta u(k-3) + \varepsilon(k) \quad (21)$$

$\Delta u(k-3)$ 是电压波动, 是一随机变量。 $\varepsilon(k)$ 也是一种随机干扰, 它包括许多难以估计的因素。把 $\varepsilon(k)$ 的取值近似为 $\Delta u(k)$ 。这样就可以近似地确定电压波动影响通道。故有

$$(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3}) y(k) = z^{-3} b_1 u_c(k) + [1 + c_3 z^{-3}] \Delta u(k) \quad (22)$$

其中

$$c_3 = \frac{2b_1}{u_{\text{标}}} u_c(k-3).$$

用 (22) 式作为电阻炉广义对象含有干扰通道的描述, 同时考虑到一般工艺要求的升温、降温率不是很大, 故取系统闭环极点多项式为 1。这样, 本温控系统组合自校正控制策略为:

$$u_c(k) = -F'_1 u_c(k-1) - F'_2 u_c(k-2) + \frac{1}{b_1} y_r(k) + \frac{c_3}{b_1} y_r(k-3) - \frac{G_0}{b_1} y(k) - \frac{G_1}{b_1} y(k-1) - \frac{G_2}{b_1} y(k-2) \quad (23)$$

其中

$$\begin{cases} F'_1 = -a_1 \\ F'_2 = a_1^2 - a_2 \\ G_0 = c_3 - a_3 - a_1^2 + 2a_1a_2 \\ G_1 = a_2^2 - a_1^2a_2 + a_1a_2 \\ G_2 = a_2a_3 - a_3a_1^2 \end{cases} \quad (24)$$

这时, 闭环系统的方程为:

$$y(k) = z^{-3}y_r(k) + F'e'(k) \quad (25)$$

其中 $F' = 1 + F'_1z^{-1} + F'_2z^{-2}$, $e'(k)$ 相应于电压波动干扰和其它作用于对象的随机干扰。

由于参数 a_1, a_2, a_3, b_1, c_3 是未知时变, 故要在闭环条件下进行辨识。选择最小二乘遗忘因子递推算法进行参数辨识。为了避免出现病态, 采取两种措施。第一, 当控制偏差不大时, 不进行辨识。只有当控制偏差较大时, 才进行辨识。第二, 采用了比较简单的增量变换法以突出变量间的差别, 其算法如下:

$$\theta(k) = [\hat{a}'_1(k), \hat{a}'_2(k), \hat{a}'_3(k), \hat{b}'_0(k)]^T \quad (26)$$

$$h(k) = [-\Delta y(k-1), -\Delta y(k-2), y(k-3), u_c(k-3)]^T \quad (27)$$

$$\begin{cases} \theta(k) = \theta(k-1) + K(k)[y(k) - h^T(k)\theta(k-1)] \\ K(k) = P(k-1)h(k)[h^TP(k)h(k) + \mu]^{-1} \\ P(k) = \frac{1}{\mu}[I - K(k)h^T(k)]P(k-1) \\ \mu = 0.995 \end{cases} \quad (28)$$

$$\begin{cases} \hat{a}'_1 = \hat{a}'_1 - 1 \\ \hat{a}'_2 = \hat{a}'_2 - \hat{a}'_1 \\ \hat{a}'_3 = \hat{a}'_3 - \hat{a}'_2 \\ \hat{b}'_1 = \hat{b}_0 \\ \hat{c}'_3 = \frac{2\hat{b}_0}{u_{\text{标}}}u_c(k-3) \end{cases} \quad (29)$$

式中 $\hat{a}_i$ 表示参数 a_i 的估计值, 以此类推。

通过上面参数辨识, 求出各参数估计。然后用估计值代入 (23)、(24) 式即可求出本温控系统的组合自校正控制策略。

2.2 分区积分控制

组合自校正虽然能使随机干扰对输出的影响减小到最小值, 即最小方差最小。但是当随机干扰较大时, 输入给定与输出之间的偏差依然很大。为了及时消除这个大偏差, 并且在消除大偏差时尽可能地减小超调量, 缩短调节时间, 因而在大偏差时, 温控系统进行了分区积分控制。

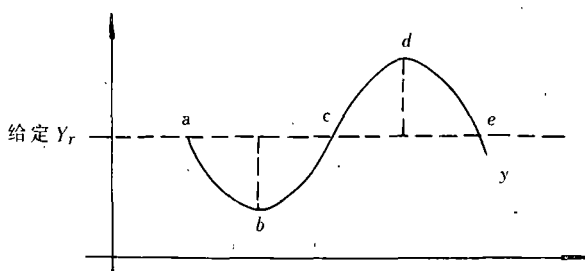


图 3 炉温 y 所在的四个区段

分区积分控制的实质就是根据输出所在的区域,选取不同的积分控制。即在有的区域进行“强积分”控制,有的区域进行“弱积分”控制。改变积分系数,即可较好的控制目的。

本温控系统根据炉温 y 输出情况,先分出四个区域,如图3示。

当炉温 y 在 ab 段或 cd 段时,进行强积分控制,加快电阻炉的升温或降温。控制策略如下:

$$u_c(k) = K_I \sum_{i=1}^k E(i) + u_c(0) \quad (30)$$

其中 K_I 为积分系数, E 为偏差, $u_c(0)$ 为在平衡稳定时 ($E = 0$) 的 u_c 值。

当炉温 y 在 bc 段或 de 段时,还要进一步分区段。

当 $5\%y_r \leq |E(k)|$ 时,为加快调节过程,控制策略为:

$$u_c(k) = K_I \sum_{i=1}^k E(i) + u_{c_1}(0) \quad (31)$$

其中 K_I 为弱积分系数, u_{c_1} 为 u_c 在 b 点(或 d 点)的值。

当 $1\%y_r < |E(k)| < 5\%y_r$ 时,控制策略为:

$$u_c(k) = u_{c_2}(0) \quad (32)$$

$u_{c_2}(0)$ 为在本次大偏差调节过程中,出现 $|E(k)|$ 曾大于 $5\%y_r$ 时,取 $|E(k)| = 5\%y_r$ 时 u_c 的值;未出现 $|E(k)| > 5\%y_r$ 时,取 u_c 在 b 点(或 d 点)的值。

当 $|E(k)| \leq 1\%y_r$ 时,为防止系统的纯滞后和响应迟缓而造成过补偿,从而形成较大超调,控制策略为:

$$u_c(k) = u_{c_3}(0) - K_I \sum_{i=1}^k E(i) \quad (33)$$

其中 $u_{c_3}(0)$ 为当 $|E(k)| = 1\%y_r$ 时, u_c 的值;或 $|E(k)|$ 从未大于 $1\%y_r$ 时,取值为 u_c 在 b 点(或 d 点)的值。

由于本温控系统采用自适应与分区积分的组合控制,而且分区积分是快速消除偏差,故 K_I, K_I 选值要求并不严格。一般 K_I/K_I 为 4—10, K_I 为最大限幅值的 1/20—1/10 即可。

2.3 本温控系统的控制策略

由于采用组合自校正控制系统,闭环系统特性可由(25)式描述,故本系统的误差

$E(k)$ 定义为:

$$E(k) = y_r(k-3) - y(k) \quad (34)$$

它与常规误差定义不同,不同之处由图4示。

电阻炉温控系统的控制策略是根据误差 $E(k)$ 来选择前述的两种控制方法。

当误差较小时,用组合自校正控制。当误差 $E(k)$ 大于一定值时,选用分区积分控制及时消除或减小误差,并在这时进行参数辨识。

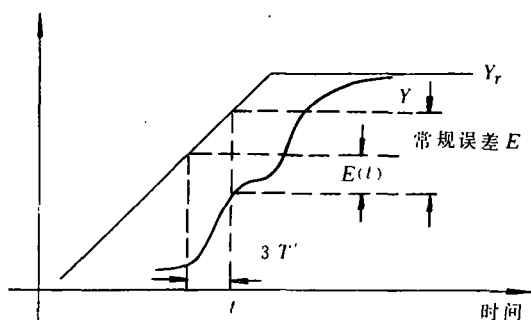


图4 误差 $E(k)$ 与常规误差 E 的差异

3 仿真与试验结果

图5所示的曲线是温控系统的计算机仿真结果。虚线为输入给定曲线,实线为仿真输出曲线。在电压波动10%的情况下仿真,对象模型采用系统辨识得出的数学模型作仿真数学模型。仿真结果为:升温段时,最大误差为 4.5°C ,基本误差不大于 3°C 。在恒温段最大误差为 6°C ,稳定后最大误差为 1.2°C 。故温控系统的控制策略是可行的。

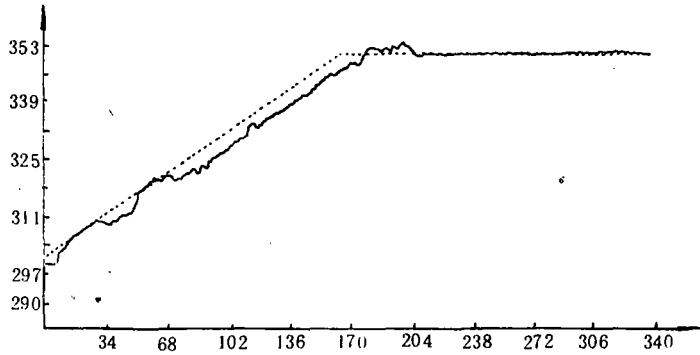


图5 计算机仿真曲线

以上述控制策略为基础设计了以MCS-51单片微机为核心的温度控制器。图6是该温度控制器控制4KVA箱式电阻炉现场温度记录曲线。

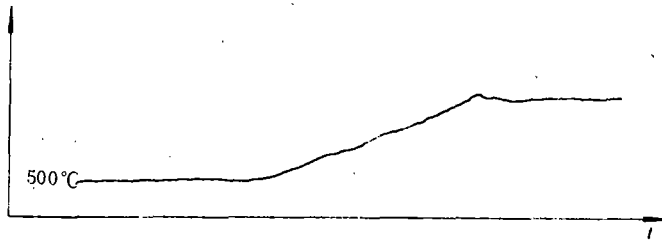


图6 现场记录曲线

给定输入为在 500°C 处恒温2h后,以 $40^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率升温,升至 580°C 处,恒温2h。控制情况为:在 500°C 恒温时,最大偏差 $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$,基本偏差 $\pm 1.8^{\circ}\text{C}$;升温时,最大偏差 6°C ,基本偏差 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$; 580°C 恒温时,最大偏差超调量 8°C ,基本偏差 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

仿真和现场实际试验表明:用

自适应控制和分区积分控制作为控制策略的电阻炉温控系统具有较高的控制精度和良好的跟踪性能,超调量小,抗干扰性能强,自动化程度高。

致 谢

本文工作是在北京农业工程大学汪懋华教授指导下进行的,在此深表感谢。

参 考 文 献

1. 张忠怀等. 电阻炉的数学模型. 信息与控制, 1986;6
2. 方崇智, 肖德云. 过程辨识. 清华大学出版社, 1988;8
3. 冯纯伯, 史 维. 自适应控制. 电子工业出版社, 1986;6
4. 李清泉. 组合自校正. 自动化学报, 1986;4, 12(2)

- 5 Astrom K J and Willenmark B. Self-tuning Controller based on Pole-Zero placement. IEE PROC. 1980, 127, PtD (3)
- 6 熊光楞. 控制系统数字仿真. 清华大学出版社, 1982

The Application of Adaptive Control on Resistance-heated Furnance

Liu He

(Wuxi No. 916)

Abstract Based on heat transfer theory and identification method, the mathematical model of the extensive controlled object of the resistance-heated furnace is developed. As time-varying characteristics of the model parameters relates to the furnace temperature, and the temperature control system being disturbed, good dynamic performance and high control accuracy is still maintained and a method of designing the temperature control system of the resistance-heated furnace using the combination of adaptive control and zone integral control is presented. Computer simulation and practical test have shown that this type of temperature control system of the resistance-heated furnace has satisfied stable accuracy, tracking performance, and strong anti-interference.

key words Resistance-heated furnace; Mathematical model; Control tactics