

热处理电阻炉温度的自适应零极点配置控制

李 平 (抚顺石油学院自动化系 抚顺 113001)

摘要 本文介绍了能同时考虑系统的伺服性能和调节性能的自适应零极点配置控制的基本原理,并成功地将其应用于热处理电阻炉的温度控制中。

关键词 自适应控制 零极点配置 温度控制 热处理炉

Adaptive Pole-Zero Placement Temperature Control of a Heat Treatment Resistance Furnace

Li Ping (Fushun Petroleum Institute Fushun 113001)

Abstract The basic principle of an adaptive pole-zero placement controller with given servo and regulation performances is presented, and its successful practical application to the temperature control of a heat treatment resistance furnace is introduced.

Key words Adaptive control Pole-zero placement Temperature control Heat treatment furnace

1 引 言

热处理工艺对热处理温度实时控制的要求是所设计的控制器应具有较强的跟踪伺服信号的能力及良好的稳态性能,平稳的动态性能。即要求温度控制系统能够满意地跟踪设定的温度曲线。实践表明,对于电阻炉这样的对象,由于炉温动态特性具有容积滞后大,温度上升和下降呈严重不对称性以及对象的增益、容积滞后时间和纯滞后时间都是与工作温度有关的变参数,因此,目前普遍使用的 PID 控制器只能在工作点附近的小范围内改变给定值,否则,控制器难以适应,需重新整定 PID 参数。

现代工业技术的发展,对热处理温度控制提出了越来越高的要求。为了适应这种要求,已有不少学者研究了一些先进控制策略,实现了许多相对复杂的高级控制算法^[1,2]。本文基于自适应零极点配置控制技术^[3],设计了热处理电阻炉温度的计算机先进控制系统,得到满意的控制结果。

2 自适应零极点配置控制器

考虑由下式描述的过程:

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-d}B(q^{-1})u(k) + C(q^{-1})\omega(k) \quad (1)$$

这里 $y(k)$ 、 $u(k)$ 、 $\omega(k)$ 分别是被控变量、操作变量和扰动变量, d 为纯滞后。 $A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n}$, $B(q^{-1}) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_mq^{-m}$, $C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_rq^{-r}$ 。具有零极点配置的控制系统结构如图 1 所示。图中使用的积分器是为了消除稳态偏差。

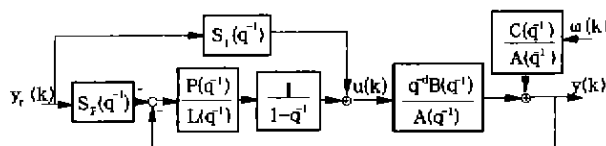


图 1 零极点配置控制系统结构图

由图 1, 可以导出系统的闭环方程:

$$y(k) = \frac{q^{-d}B(q^{-1})[S_f(q^{-1})L(q^{-1})(1-q^{-1}) + S_g(q^{-1})P(q^{-1})]}{(1-q^{-1})L(q^{-1})A(q^{-1}) + q^{-d}P(q^{-1})B(q^{-1})} y_r(k) + \frac{(1-q^{-1})C(q^{-1})L(q^{-1})}{(1-q^{-1})L(q^{-1})A(q^{-1}) + q^{-d}P(q^{-1})B(q^{-1})} \omega(k) \quad (2)$$

分析式(2)右侧两项,它们分别决定系统的伺服特性和调节特性。只要适当选择多项式 $S_r(q^{-1})$ 、 $S_p(q^{-1})$ 、 $P(q^{-1})$ 和 $L(q^{-1})$,就能使上述闭环系统的输出既跟踪伺服输入 $y_r(k)$,又能抑制干扰 $\omega(k)$ 的影响。

设系统的期望伺服特性和调节特性分别由传递函数 $F(q^{-1})$ 和 $\frac{(1-q^{-1})L(q^{-1})}{G(q^{-1})}$ 的零极点所确定,并令 $S_p(q^{-1})=F(q^{-1})$,可推得:

$$S_r(q^{-1}) = \frac{F(q^{-1})A(q^{-1})}{q^{-d}B(q^{-1})} \quad (3)$$

多项式 $P(q^{-1})$ 和 $L(q^{-1})$ 由下列 Diophantine 方程解得:

$$(1-q^{-1})L(q^{-1})A(q^{-1}) + q^{-d}P(q^{-1})B(q^{-1}) = G(q^{-1})C(q^{-1}) \quad (4)$$

由以上关系,闭环方程可写成:

$$y(k) = F(q^{-1})y_r(k) + \frac{(1-q^{-1})L(q^{-1})}{G(q^{-1})}\omega(k) \quad (5)$$

控制律为:

$$u(k) = \frac{-P(q^{-1})}{(1-q^{-1})L(q^{-1})}y(k) + \frac{F(q^{-1})G(q^{-1})C(q^{-1})}{q^{-d}(1-q^{-1})L(q^{-1})B(q^{-1})}y_r(k) \quad (6)$$

将上述控制器的设计与参数估计方法结合起来,就组成了自适应零极点配置控制器。

3 热处理电阻炉温度的自适应零极点配置控制器

3.1 零极点配置控制

热处理电阻炉的温度是一个典型的过阻尼过程,可近似用如下—阶模型来描述:

$$G_p(s) = \frac{K_0 e^{-\tau s}}{T_0 s + 1} \quad (7)$$

采用零阶保持器,将其离散化为差分方程:

$$y(k) = Ty(k-1) + Ku(k-d-1) \quad (8)$$

其中 $T=e^{-T_s/T_0}$, $K=K_0(1-T)$, $\tau/T_0=d$, T_s 为采样周期。从而得 $A(q^{-1})=1-Tq^{-1}$, $B(q^{-1})=Kq^{-1}$, $C(q^{-1})$ 设为 1。取

$$G(q^{-1}) = (1-\epsilon q^{-1})(1-\alpha q^{-1}) \quad \epsilon < 1, \alpha < 1$$

$$F(q^{-1}) = \frac{(1-\epsilon)q^{-(d+1)}}{1-\epsilon q^{-1}} \quad (9)$$

则 $L(q^{-1})$ 、 $P(q^{-1})$ 可由式(4)求得:

$$L(q^{-1}) = 1 + l_1 q^{-1} + \dots + l_d q^{-d}$$

$$P(q^{-1}) = p_0 + p_1 q^{-1} \quad (10)$$

由式(6)得控制律为:

$$u(k) = - \sum_{i=1}^d (l_i - l_{i-1})u(k-i) + l_d u(k-d-1) +$$

$$\frac{1-\epsilon}{K} [e(k) - \alpha e(k-1)] +$$

$$(\frac{1-\epsilon}{K} - p_0)y(k) - [\frac{(1-\epsilon)\alpha}{K} + p_1]y(k-1) \quad (11)$$

式中 $e(k) = y_r(k) - y(k)$ 。

对于设定值斜坡变化情况,上述控制将产生静态误差,根据终值定理^[4]可求得该静态误差等于 $(d + \frac{1}{1-\epsilon}) \times$ 一个控制周期升温值。为消除跟踪静差,只需将原设定值加上静差值作为新设定值即可。

3.2 参数估计算法

将差分方程(8)写成最小二乘结构

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta(k-1) \quad (12)$$

$$\text{式中 } \varphi(k) = \begin{bmatrix} y(k-1) \\ u(k-d-1) \end{bmatrix} \quad \theta(k-1) = \begin{bmatrix} T(k-1) \\ K(k-1) \end{bmatrix}$$

参数 θ 用递推最小二乘法进行估计^[3]。

在自动估计参数情况下,十分重要的是保证估计模型绝不被破坏。最小二乘法的一个缺点是一个单一的大误差对估计结果的影响非常大。所以,应使估计器始终采用已知的控制和实测信号的真值,并保证估计过程中系统无明显外扰。如果由于某种原因,例如停电,致使控制信号不能完成它的任务,或传感元件故障,或由于扰动使当前被控变量不反映实际值,就必须关断估计器。这就是说要为估计器设置“安全网”,以确保参数估计不偏离轨道。

3.3 控制结构

热处理炉自适应零极点配置控制的结构如图2所示。该控制系统有如下二种工作方式:

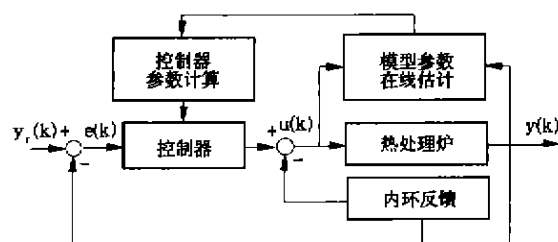


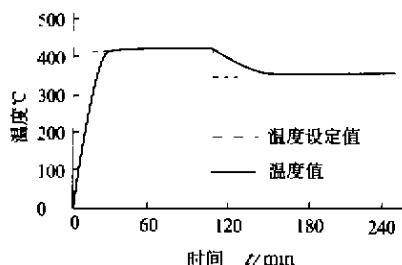
图2 热处理炉温度自适应零极点配置控制结构

方式一:按给定模型参数进行控制。已知模型参数可采取这种方式。

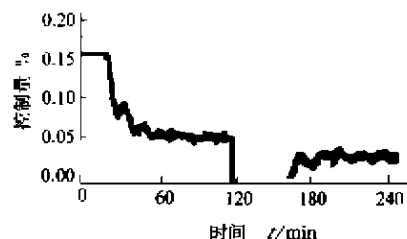
方式二:自适应控制方式。在线估计模型参数,并同步更新控制器参数。

4 实际应用

被控的热处理炉是一台箱式电阻炉。图 3 是炉温



(a) 温度

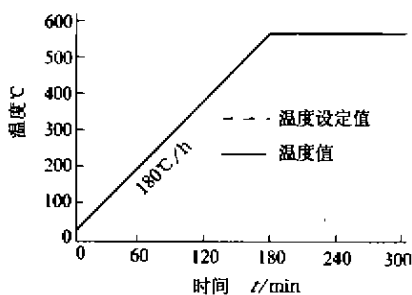


(b) 控制量

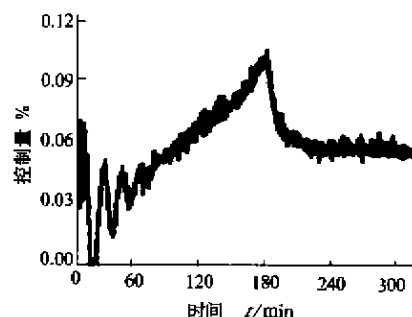
图 3 热处理电阻炉温度自适应阶跃响应控制($T_s=20$ 秒)

参数估计器的运行,常常给热处理操作带来不便。例如,在估计器运行时,不能随意打开炉门,否则估计模型将受破坏(参见 3.2 节)。所以,通常的做法是通过 3.3 节所述方式二来估计模型参数,然后按方式一运行。由于零极点配置控制器具有较好的鲁棒性,所以一般地在大跨度温度范围内按固定参数控制也同样会有

好的结果。但如果对象特性变化较大,则应重新启动参数估计器,待参数收敛后,再停止估计。图 4 是采用图 3 的估计参数按方式一进行程序升温与恒温控制的响应曲线,升温速率为 $180^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。达到的调节品质指标为斜坡跟踪误差小于 1°C (起始段小于 10°C),恒温控制精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,结果非常理想。



(a) 温度



(b) 控制量

图 4 热处理电阻炉程序升温与恒温控制

5 结束语

实际应用表明,本文设计的自适应零极点配置控制器能以快速、平稳、高精度的优越性能对热处理电阻炉温度进行控制。它具有结构简单,设计方便,鲁棒性好等优点,易于工程应用。这无疑是为热处理电阻炉提供了一种强有力的控制方法。它在电加热工业炉窑的计算机控制中有着广阔的应用前景。

参考文献

1 苏宏业,褚健,王驷程.工业电加热炉的非线性控制算法

及应用.信息与控制,1994,23(4):206~211.

2 张忠怀.电阻炉温度的最优控制.信息与控制,1984,13(5):35~41.

3 贺国光.自适应控制系统.天津:天津大学出版社,1988. 147~149.

4 顾兴源.计算机控制系统.北京:冶金工业出版社,1981. 117~118.