



过阻尼过程的预测控制及其 在工业热处理炉上的应用

李 平

(抚顺石油学院自动化系 抚顺 113001)

王树青 王骥程

(浙江大学工业控制技术研究所 杭州 310027)

摘 要 针对过阻尼过程,基于简化的脉冲响应模型,提出了一种新的预测控制算法,并且成功地将其应用于工业热处理炉的温度控制中。

关键词 预测控制,模型算法控制,脉冲响应模型,过阻尼过程,热处理炉。

1 引 言

基于脉冲响应模型的预测控制算法(Model Algorithm Control—MAC^[1])具有建模简单、鲁棒性好等优点,使其在工业过程控制中得到了非常成功的应用^[2]。但是,描述脉冲响应模型需要比最小化模型更多的参数,致使这种算法需要较大的计算量和内存量。特别是当被控制对象时间常数较大时或需要在线辨识脉冲响应系数时^[3],这一问题更加突出。为了减少计算量和存储量,可以通过增大控制周期来减少脉冲响应序列的长度,或人为地提前截断脉冲响应序列。前者不利于系统克服扰动和系统跟踪给定值,后者将增大脉冲响应模型的截断误差。可见,这种解决办法是以降低控制系统性能为代价的。针对这一问题,文[4,5]利用状态空间设计技术,分别提出了改进的 MAC 算法,有效地减少了计算量。但由于引入了不可测状态变量,不可避免地要采用状态重构器,因而这些改进算法是以增加控制器结构的复杂性为代价的。

大多数工业过程具有过阻尼特性,其阶跃响应是无过调的 S 型响应。对于这类过程,本文基于简化的脉冲响应模型,利用输入输出参数化模型预测控制的设计方法,提出一种新的预测控制算法,并将其应用于工业热处理炉的温度控制中。

2 算法的基本原理

2.1 过程模型

大多数工业被控对象的动特性是过阻尼的,其脉冲响应序列($h_i, i=1, 2, \dots$)从 n 个采样之后近似呈指数衰减^[5-6]. 因此,基于脉冲响应序列的过程模型可表示如下:

$$\begin{aligned} G(z) &= \frac{y(z)}{u(z)} = h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots + h_n z^{-n} + h_{n+1} z^{-(n+1)} + \dots \\ &\simeq h_1 z^{-1} + \dots + h_n z^{-n} + \alpha h_n z^{-(n+1)} + \alpha^2 h_n z^{-(n+2)} + \dots \\ &= h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + \dots + h_{n-1} z^{-(n-1)} + \frac{h_n z^{-n}}{1 - \alpha z^{-1}}, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $0 < \alpha < 1$. α 可由终值定理求得,即

$$\alpha = 1 - \frac{h_n}{(K_p - \sum_{i=1}^{n-1} h_i)}, \quad (2)$$

式中 K_p 为过程的稳态增益,等于 $\sum_{i=1}^{\infty} h_i$.

由(1)式知,这一过程模型由两部分组成:第一部分是前 $n-1$ 拍脉冲响应序列,用来描述过程纯滞后及过渡过程的快速部分;第二部分是用一个一阶传递函数来近似余下的脉冲响应无穷序列. 这种模型有效地减少了脉冲响应模型的截断误差,并且大大缩短了所需截取的脉冲响应序列长度.

从(1)式推得

$$\begin{aligned} (1 - \alpha z^{-1})y(k) &= (a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_i z^{-i} + \dots \\ &\quad + a_n z^{-n})u(k), \end{aligned} \quad (3)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= h_1, \\ a_i &= h_i - \alpha h_{i-1}, i = 2, 3, \dots, n. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

将式(3)两边同乘一阶向后差分算子 $\Delta (=1 - q^{-1})$, 可推得

$$\begin{aligned} y(\kappa) &= (1 + \alpha)y(\kappa - 1) - \alpha y(\kappa - 2) + a_1 \Delta u(\kappa - 1) + a_2 \Delta u(\kappa - 2) \\ &\quad + \dots + a_n \Delta u(\kappa - n). \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 输出预报与反馈校正

重复使用(5)式,得输出的多步预报

$$\hat{y}(\kappa + j) = F_j(q^{-1})y(\kappa) + E_j(q^{-1})\Delta u(\kappa + j - 1), j = 1, \dots, N. \quad (6)$$

这里 $y(\kappa)$ 为实测值, $\partial[F_j] = 1$, $\partial[E_j] = n + j - 2$, $\partial[\cdot]$ 表示多项式 $[\cdot]$ 的阶次. q^{-1} 代表单位时间后移算子. 将 $E_j(q^{-1})$ 分解成两部分, 有

$$E_j(q^{-1}) = G_j(q^{-1}) + q^{-j}H_j(q^{-j}), \quad (7)$$

式中 $\partial[H_j] = n - 2$, $\partial[G_j] = j - 1$.

将(7)式代入(6)式得

$$\hat{y}(\kappa + j) = F_j(q^{-1})y(\kappa) + H_j(q^{-1})\Delta u(\kappa - 1) + G_j(q^{-1})\Delta u(\kappa + j - 1). \quad (8)$$

定义 $f(\kappa + j) = F_j(q^{-1})y(\kappa) + H_j(q^{-1})\Delta u(\kappa - 1)$, (9)

则(8)式为

$$\hat{y}(\kappa + j) = G_j(q^{-1})\Delta u(\kappa + j - 1) + f(\kappa + j). \quad (10)$$

显然, $f(\kappa + j)$ 是在控制增量 $\Delta u(\kappa + i) = 0 (i \geq 0)$ 下 $y(\kappa + j)$ 的“零输入预报”; 而式(10)右

边第一项则表示 $y(\kappa+j)$ 的“零状态预报”。

为实现较准确的预报, 在每个采样时刻用实测输出 $y(\kappa)$ 对预报值 $\hat{y}(\kappa+j)$ 进行校正, 则得

$$\left. \begin{aligned} e(\kappa+j) &= y(\kappa) - \hat{y}(\kappa), \\ y^*(\kappa+j) &= \hat{y}(\kappa+j) + e(\kappa+j), j=1, 2, \dots, N. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中 $\hat{y}(\kappa)$ 是由模型估计的当前时刻的输出, $y^*(\kappa+j)$ 是经反馈校正后的预报值。

2.3 控制律

控制目标是使下列多步二次型性能指标取最小值

$$J = \sum_{j=1}^N \delta_j [y^*(\kappa+j) - w(\kappa+j)]^2 + \sum_{j=1}^M \lambda_j [\Delta u(\kappa+j-1)]^2. \quad (12)$$

未来控制受约束为

$$\Delta u(\kappa+j) = 0, j \geq M. \quad (13)$$

式中 $w(\kappa+j)$ 是未来设定值序列; δ_j, λ_j 分别是预报输出误差和控制增量的加权序列; N 为优化时域长度; M 为控制时域长度。

将(12)式写成向量形式并最小化 J , 得 M 个未来最优控制增量

$$U = [G^T Q G + R]^{-1} G^T Q (w - f - s). \quad (14)$$

式中 G 是被控过程的 $N \times M$ 维阶跃响应系数矩阵; w, f 和 s 分别是 $N \times 1$ 维未来设定值向量、零输入预报向量和反馈校正向量; $Q = \text{diag}\{\delta_1 \delta_2 \dots \delta_N\}$, $R = \text{diag}\{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_M\}$ 。

采用滚动优化方案, 只实施其中第一个控制增量 $\Delta u(\kappa)$, 下一控制周期再重新计算新的控制增量。因此, 控制律为

$$u(\kappa) = u(\kappa-1) + K^T (w - f - s), \dots \quad (15)$$

式中 K^T 是矩阵 $[G^T Q G + R]^{-1} G^T Q$ 的第一行。

3 在工业热处理炉上的应用

这里被控的是一电阻加热链条炉。其微机控制系统由一个工业 286 微机和相应的 A/D, D/A 接口组成。控制算法给出的控制量经 D/A 转换为 0—10mA 电流信号, 并通过可控硅电压调压器影响加热功率以达到控制炉内温度的目的。

图 1 中实线是在稳态下(室温)控制量作满量程 30% 的阶跃变化时温度的响应曲线。这是典型的过阻尼响应曲线。应当指出, 在不同工作点控制量按不同幅度阶跃, 测定的阶跃响应是有差异的, 但基本形状不变。其差异可视为模型误差。

由图 1 大致测得这一温度过程的主导时间常数为 85 分钟。如采用单纯的脉冲权序列模型表示这一过程, 控制周期取 1.5 分钟, 则模型时域长度将大于 170, 这实际上已不便使用。若用(1)式模型近似该过程, 则只需取其前 35 项脉冲响应系数。这样, 大大简化了脉

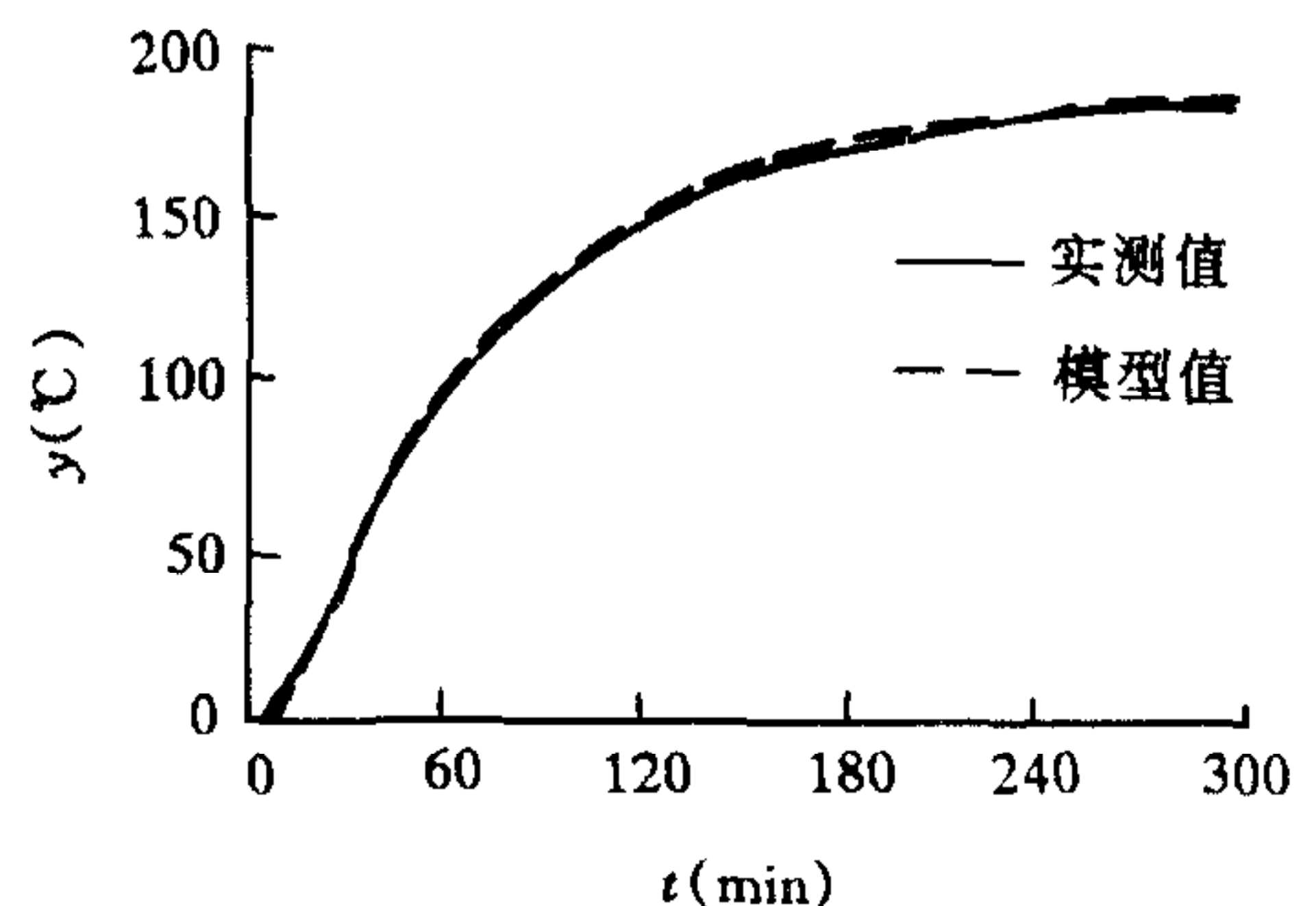


图 1 炉温阶跃响应曲线

冲响应模型,同时保留了其独特的优点.该模型的阶跃响应曲线如图1中虚线所示.

使用简化的模型,按2.3节设计控制器,实时控制结果见图2.温度的稳态控制偏差小于 1°C .从图2可以看到,控制系统的跟踪性能及抗扰动性能都令人满意.另外,在不同工作点的控制结果还表明了这一控制器具有良好的鲁棒性.

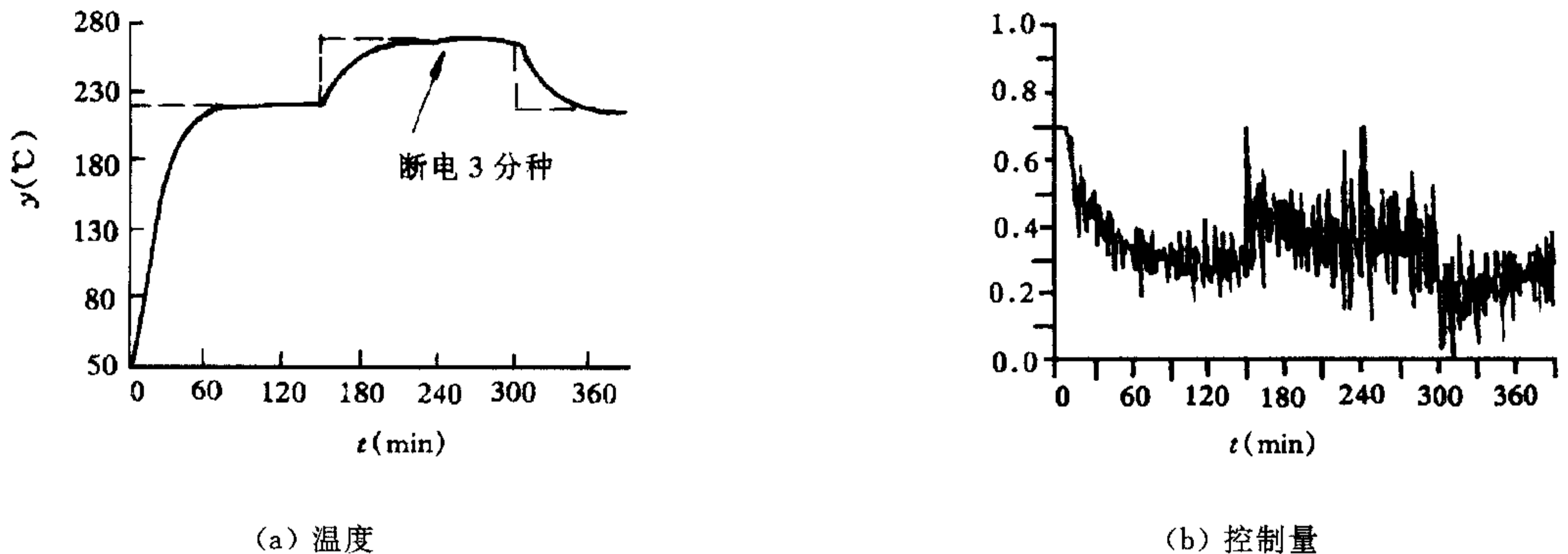


图2 电加热炉温度控制结果

4 结束语

本文介绍的算法,在建模上综合利用了非参数模型和参数模型的优点,而在控制律推导中则使用了输入输出参数化模型预测控制的方法,因而避免了引言中提出的问题.它尤其适用于具有大时间常数的过阻尼过程的控制.实际应用表明这种算法是可行的.有效的.

致谢 本文应用工作得到了赵鹏程副教授的协助,作者在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] Richalet J, Rault A, Testud J L, Panpon J. Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes. *Automatica*, 1978, **14**(4):413-428.
- [2] Richalet J. Industrial applications of model based predictive control. *Automatica*, 1993, **29**(5):1251-1274.
- [3] 金元郁,顾兴源.一种脉冲响应模型的辨识方法及其在DMC中的应用.化工自动化及仪表,1990, **17**(5):21-25.
- [4] 李嗣福.一种改进的模型算法控制.信息与控制,1988, **17**(1):15-20.
- [5] 李嗣福.MAC和DMC的改进算法.自动化学报,1993, **19**(4):413-419.
- [6] Takahshi Y, Tomizuka M, Auslander D M. Simple discrete control of industrial processes. *Trans. ASME*, 1975, **97**(4):354-361.

A PREDICTIVE CONTROL ALGORITHM FOR OVERDAMPED PROCESSES AND ITS APPLICATION TO A HEAT TREATMENT FURNACE

LI PING

(Dept. of Automation, Fushun Petroleum Institute, Fushun 113001)

WANG SHUQING WANG JICHENG

(Institute of Industrial process Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract In this paper, a new algorithm of predictive control based on a simplified impulse response model is presented for the processes with overdamped characteristics, and its successful practical application to the temperature control of an industrial scale heat treatment furnace is also reported.

Key words Predictive control, MAC, impulse response model, overdamped process, heat treatment furnace.

14th World Congress

International Federation of Automatic Control

July 5—9, 1999

Beijing, People's Republic of China

Hosted by the Chinese Association of Automation

Submission of draft paper: June 1998

WWW Home Pages: <http://WWW.ia.ac.cn/ifac99/ifac99.html>

For further information related to
Technical Program, write to:

IFAC '99 IPC Secretariat
Institute of Systems Science
Chinese Academy of Sciences
Beijing 100080
P. R. China

phone: (86-10)6253-2161
fax: (86-10)6258-7343
e-mail: ifac99@iss03.iss.ac.cn

For other queries related to the organization
of the Congress, write to:

IFAC '99 NOC Secretariat
Institute of Automation
Chinese Academy of Sciences
Beijing 100080
P. R. China

phone: (86-10)6254-4415
fax: (86-10)62620908
e-mail: ifac99@sunserver.ia.ac.cn