

液压釜温度自适应预测控制¹⁾

袁 斌 吴宏鑫 白金英 肖今雄

(北京控制工程研究所 北京 100080)

摘 要 详细介绍了液压釜温度系统自适应控制方案、误差分析及实际应用调试情况. 应用全系数自适应控制理论及模型预测控制原理设计了一种新的自适应预测控制方案, 并给出了控制算法的稳定性证明及闭环系统稳态误差和动态特性分析. 实际应用表明, 该方法对建模误差、系统延时及测量噪声具有较好的鲁棒性.

关键词 模型预测控制, 自适应控制, 液压釜控制, 温度控制.

PREDICTIVE ADAPTIVE CONTROL FOR THE TEMPERATURE OF HYDRAULIC CAULDRON

YUAN Bin WU Hongxin BAI Jinying XIAO Jinxiong

(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100080)

Abstract This paper introduces the details of the adaptive control scheme, error analysis and field adjustment of a hydraulic cauldron control system. A kind of new adaptive predictive control scheme is designed based on the all-coefficient adaptive control theory and model predictive control theory. The stability of this control algorithm is proved, and the analysis of error in stable stage and analysis of dynamic performance in the closed loop system are given. The actual application shows that the method proposed in this paper has good robustness to model error, system delay and measure noise.

Key words Model predictive control, adaptive control, hydraulic cauldron control, temperature control.

1 引言

液压釜是大型复合材料生产中的关键设备, 它由充水、加温、压力、冷却、真空五个分

1) 国家自然科学基金资助课题.

系统组成. 其中加温分系统要完成液压釜内产品的升温 and 保温任务, 对产品质量的影响巨大, 要求具有较高的跟踪控制精度, 且不允许有控制超调.

由于系统具有二阶以上大惯性特性, 控制功率不对称, 特别是降温功率非常小, 只能通过自然散热进行降温, 使得控制容易产生超调. 而系统要求的升温速率变化范围大, 温度测量点在釜内产品模具上, 温度测量信号上有较强的干扰, 使得采用加微分控制量来抑制超调的方法难于应用. 并且系统惯性较大, 在输出特性(阶跃响应)上与具有大时延的系统相近似. 同时, 随着固化产品型号的改变以及产品温度测量传感器安装位置的不同, 系统动态特性变化较大, 难以先验地给出系统时延的有效估计. 根据这些特点, 本文采用了模型预测控制的原理设计了温度控制算法, 将控制输出预测点放在系统最大等效时延之后的适当位置上, 避开了系统等效时延的估计问题. 在此基础上, 通过系统参考输入的在线修正, 延长系统的响应时间, 达到增大系统阻尼的效果, 同时也间接地补偿系统的升降温控制不对称特性, 有效地抑制控制超调. 此外, 由于控制系统预测模型与实际系统之间存在的误差将使模型预测控制产生稳态误差. 对此, 我们一方面采用在线辨识的方法提高模型精度, 减小预测误差; 另一方面采用全系数自适应控制理论中的维持控制量处理技术, 通过小增益逻辑积分来进一步消除系统的稳态误差.

2 系统特性

液压釜加温分系统由液压釜本体、温度传感器、控制计算机、可控硅调功器和电加热

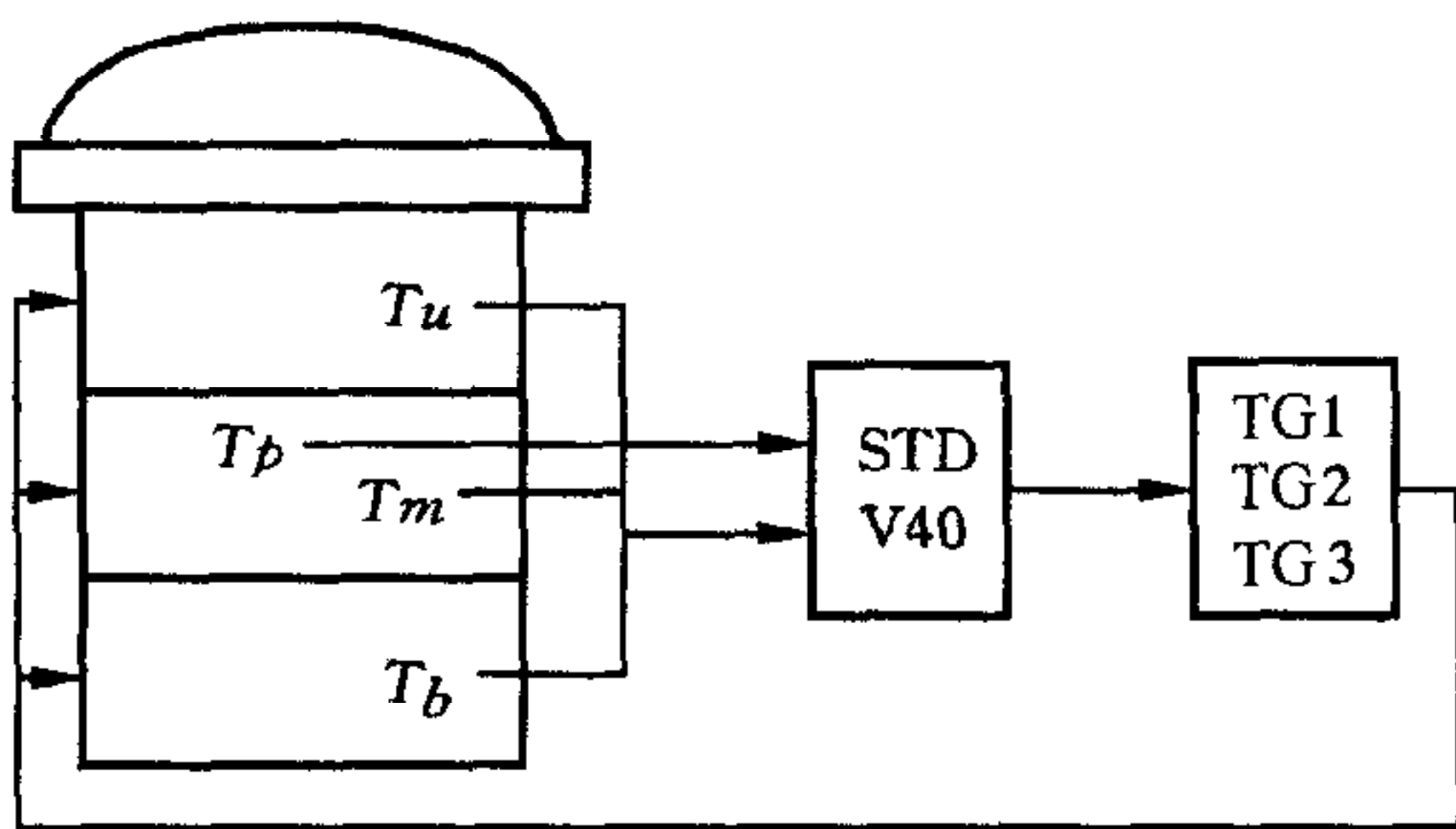


图1 液压釜温度控制系统结构示意图

管组成(如图1所示). 在釜壁的上、中、下三区分别安装一个固定的温度传感器 T_u, T_m, T_b . 在产品模具上安装一个活动的温度传感器 T_p , 该传感器可根据不同的产品和工艺要求安装在不同模具的不同位置上, T_p 是主控温度测量点. 温度测量信号经 A/D 转换后, 送入控制计算机. 控制计算机计算出上、中、下三区的加温功率, 控制可控硅调功器 TG1, TG2, TG3, 分别对上、中、下三区电加热管供

电, 进行温度控制.

要求控制产品温度 T_p 按照给定的工艺曲线变化, 工艺曲线由一系列不同升温速率(包括保温)的线段组成. 同时, 保持上、中、下三区水温 T_u, T_m, T_b 的相对平衡.

我们用下区调功器 TG3 作为 T_p 的主控调功器, 构成主控回路. 上区和中区调功器 TG1 和 TG2 的占空比在正常情况下与 TG3 保持一致. 在水区温差较大时以 TG3 的占空比为中心进行比例调整.

针对 T_p 而言, 从结构上看, 电加热管首先加热外层水温, 一部分热量通过釜壁传向釜外, 同时热量通过水的流动和传导传至模具和测温点 T_p . 所以, 釜壁和靠近釜壁的外层水体是系统中热量流入和流出的地方, 而 T_p 温度的上升或下降要经过内层水体和模具的吸能和放能过程, 可以用一个二阶微分方程进行描述

$$\ddot{T}_p + a_2 \dot{T}_p + a_1 T_p = b(u - u_0), \quad (1)$$

其中 u 为加温功率, T_p 为产品温度, u_0 为维持 $T_p=0$ 的维持控制量.

令 $x = (x_1, x_2)^T$, $y = x_1 = T_p$, $x_2 = \dot{T}_p$, 方程(1)可用如下状态方程表示

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (2a)$$

$$\dot{x}_2 = -a_1 x_1 - a_2 x_2 + b(u - u_0), \quad (2b)$$

$$y = x_1. \quad (2c)$$

开环系统具有如下特性:

- 1) 开环系统是一过阻尼的稳定系统, 故 $a_1 > 0$ 且 $a_2 > 0$;
- 2) 系统的稳态增益很大, 大约在 700°C / 全功率以上 (u 的取值为 0—100% 全功率);
- 3) 系统的控制能量相对较小, 即在全功率加温的情况下, 温度变化的加速度仍然很小;
- 4) 系统惯性较大, 即系数 a_1 较小, 系统特性接近于具有一阶积分环节的系统;
- 5) 随着产品温度传感器安装位置的改变, 系统特性将发生变化;
- 6) 由于在升温 and 保温阶段不允许使用冷却系统, 只能靠自然冷却降温, 使得升温 and 降温的特性不对称, 升温较快, 降温缓慢.

3 液压釜温度模型预测控制方法

由于液压釜温度系统惯性大、频带窄, 在计算机控制时采样控制周期相对十分密集, 因而在控制算法设计和分析时我们采用了连续系统的方法.

3.1 模型预测控制

采用模型预测控制的设计思想, 利用一个选定的系统模型预测系统输出的变化, 在此预测的基础上选择控制输入, 使 δ 时刻后系统的预测输出与参考输入一致.

由于开环系统具有近似于积分环节的特性, 我们选择了一个具有积分环节的二阶系统预测模型

$$\dot{x}_{m1} = x_{m2}, \quad (3a)$$

$$\dot{x}_{m2} = -a_{m2} x_{m2} + b_m u, \quad (3b)$$

$$y_m = x_{m1}. \quad (3c)$$

在此预测模型中, 将对应于系统状态方程(2)中的 a_1 项取为 0, 使预测模型包含积分环节; 将对应的 u_0 项取为 0 以简化控制器运算. 而由(2)式中 u_0 项引起的控制误差将由控制器中的逻辑积分环节来消除.

在控制决策时(设当前时刻为 t), 令 $x_{m1}(t) = x_1(t)$, $x_{m2}(t) = x_2(t)$, $u(\tau) \equiv u(t)$, $\tau \geq t$, 预测系统 δ 时间后的输出 $y_m(t + \delta) = y_m(x_1(t), x_2(t), \delta, u(t))$, 选择模型预测控制输入 $u(t) = u_m(t)$, 使得

$$y_m(t + \delta) = y_r(t + \delta), \quad (4)$$

其中 $y_r(t + \delta)$ 为系统的参考输入(期望输出值).

从直观上看, 预测模型越精确则控制越精确; δ 越小则控制越强, 闭环响应时间越短.

为了分析模型预测控制的性能, 首先推导 $u_m(t)$ 与 $x(t)$ 之间的关系. 根据模型(3), 可计算出

$$y_m(t + \delta) = x_1(t) + N(\delta)x_2(t) + M(\delta)u_m(t), \quad (5)$$

其中 $N(\delta) = (1 - e^{-a_{m2}\delta})/a_{m1}$, $M(\delta) = b_m(\delta - N(\delta))/a_{m2}$.

所以
$$u_m(t) = (y_r(t + \delta) - x_1(t) - N(\delta)x_2(t))/M(\delta). \quad (6)$$

可以看出,模型预测控制实际上是一个 PD 调节器.将(6)式作为控制输入代入(2)式,得到模型预测控制的闭环系统的状态方程为

$$\dot{x} = x_2, \quad (7a)$$

$$\dot{x}_2 = -c_1x_1 - c_2x_2 + dy_r(t + \delta) - bu_0, \quad (7b)$$

$$y = x_1, \quad (7c)$$

其中 $c_1 = a_1 + b/M(\delta)$, $c_2 = a_2 + bN(\delta)/M(\delta)$, $d = b/M(\delta)$.

系统特征多项式为 $P(s) = s^2 + c_2s + c_1$.由于 $N(\delta) > 0$, $M(\delta) > 0$,从而有 $c_1 > a_1 > 0$, $c_2 > a_2 > 0$,所以 $s^2 + c_2s + c_1$ 是稳定的,且系统的动态响应将加快,即模型预测控制产生的闭环系统是渐近稳定的,且系统的动态响应时间将缩短.

由(5)和(7)式可以得出参数 δ 将同时影响比例和微分控制项,且 δ 越大则比例和微分控制项都越小.

3.2 参考输入在线修正

因为系统升温和降温控制功率不对称,以及系统的二阶大惯性特性,温度控制容易超调.由于系统测量噪声较大,使得采用大微分控制分量的方法难于实现.而模型预测控制中的预测模型与实际系统之间一般总存在着差异,虽然预测时间的选取为闭环系统动态性能的调整提供了一个通道,但还不能完全解决上述问题.为此,我们在温度参考输入送控制系统之前,进行了在线修正,以延长系统的动态响应时间,使得在不增加微分控制分量的情况下,达到加大系统阻尼的效果.具体方法如下.

设 $y_r^*(t)$ 为给定的温度参考输入,则在当前时刻 t_1 送往控制系统的温度参考输入序列 $y_r(t)$ 和温度参考速率 $\dot{y}_r(t)$ 为

$$y_r(t) = \alpha y(t_1) + (1 - \alpha)y_r^*(t) + (t - t_1)\dot{y}_r(t), \quad (8a)$$

$$\dot{y}_r(t) = [y_r^*(t_1 + T) - y_r^*(t_1)]/T, \quad (8b)$$

其中 $t \geq t_1$, $\alpha \in [0, 1]$ 为系统阻尼调节系数, $T > \delta$ 为温度设定值预测区间.

将上式代入(7)式,有

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (9a)$$

$$\dot{x}_2 = -c'_1x_1 - c_2x_2 + d(1 - \alpha)y_r^* + d\delta\dot{y}_r - bu_0, \quad (9b)$$

$$y = x_1, \quad (9c)$$

其中 $c'_1 = c_1 - \alpha d$.

由上式可以看出,参考输入在线修正减小了系统的比较控制量,从而增大了系统的阻尼.由于 $c_1 > d$, $\alpha < 1$,所以 $c_1 > (c_1 - \alpha d) > 0$.因此,在模型预测控制的基础上增加参考输入预处理产生的闭环系统仍然是渐近稳定的.随着 α 的增大,比例控制量减小,闭环系统阻尼增大,系统响应变慢.

模型预测加上参考输入在线修正构成了液压釜温度控制系统的快速调节环路.设参考输入为斜波函数 $y_r^*(t) = y_{r0} + y_{r1}t$,由于 $a_1 \ll b/M(\delta) = d$,该调节环路的稳态误差为

$$e_{pd}(t) \approx \left(\frac{(1-\alpha)c_2}{c'_1} - \delta \right) \frac{1}{(1-\alpha)} y_{r1} + \frac{b}{c'_1} u_0. \quad (10)$$

当预测模型参数与实际系统一致时, 即 $a_{m2} = a_2, b_m = b$ 时, 上式中前项约为 0, 稳态误差主要来自于维持功率的偏差.

3.3 逻辑积分

由于模型(3)与系统(2)之间的误差可能导致闭环系统的稳态误差. 对此, 我们选择了一个小增益逻辑积分环节来消除这一稳态误差^[1]. 即取

$$u(t) = u_m(t) + u_I(t), \quad (11)$$

$$\dot{u}_I(t) = \begin{cases} k_I(y_r(t) - y(t)), & (y_r(t) - y(t)) * (\dot{y}_r(t) - \dot{y}(t)) \geq -\xi, \\ 0, & \text{else,} \end{cases} \quad (12)$$

其中 ξ 为一小正实数, k_I 为积分增益.

加入小增益逻辑积环节后将不影响闭环系统的稳定性.

定理. 对线性定常渐近稳定系统 $\{A_{n \times n}, g_{n \times 1}, h_{1 \times n}\}$, 设开环增益为正, 即 $-hA^{-1}g > 0$.

用下式逻辑积分进行控制

$$\dot{u}(t) = \begin{cases} -k_1(t)y(t), & y(t)\dot{y}(t) > -\xi, \\ -k_2(t)y(t), & \text{else,} \end{cases}$$

其中 $u(t)$ 为系统输入, $y(t)$ 为系统输出, ξ 为任一正实数. 则存在 $\bar{k} > 0$, 当满足 $\bar{k} > k_i(t) > \gamma > 0, \bar{k} > k_2(t) \geq 0, t \in [0, \infty]$ 时, 闭环系统渐近稳定.

证明. 由于 A 渐近稳定, 故存在对称正定矩阵 $M_{n \times n}$, 使 $MA + A^T M = -I$.

令 $s = x + A^{-1}gu$, 其中 x 为系统状态变量, 取 Lyapunov 函数 $V = s^T Ms + u^2$, 则有

$$\dot{V} = \begin{bmatrix} s \\ u \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} -I - kh^T g^T A^{-T} M - kMA^{-1}gh & khA^{-1}gMA^{-1}g - kh^T \\ khA^{-1}gg^T A^{-T} M - kh & 2khA^{-1}g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s \\ w \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & 2kK \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ w \end{bmatrix},$$

其中 $w = u + \frac{1}{2k}(Kg^T A^{-T} M - h)s$, $K = hA^{-1}g$, $k = \begin{cases} k_1, & y\dot{y} > -\xi, \\ k_2, & \text{else,} \end{cases}$

$$M_1 = -I - kc^T g^T A^{-T} M - kMA^{-1}gh - \frac{k}{2K}(KMA^{-1}g - h^T)(Kg^T A^{-T} M - h).$$

取 $\bar{k} = (1-\epsilon)\|I + M_1\|^{-1}$, ϵ 为任意小正实数, 则有 $M_1 < -\epsilon I$. 而 $2kK \leq 0$, 故有

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq 0 &\Rightarrow V(t) \rightarrow V^*, \dot{V}(t) \rightarrow 0 \quad (t \rightarrow \infty) \Rightarrow \\ s(t) \rightarrow 0, x(t) \rightarrow x^*, u(t) \rightarrow u^* &\quad (t \rightarrow \infty) \Rightarrow \\ \dot{x}(t) = As(t) \rightarrow 0 \quad (t \rightarrow \infty) &\Rightarrow \dot{y}(t) = hx(t) \rightarrow 0 \quad (t \rightarrow \infty). \end{aligned}$$

所以存在 $T > 0$, 当 $t > T$ 时, 有 $y(t)\dot{y}(t) < -\xi$, 此时 $k = k_1, 2kK < 2\gamma K < 0$. 所以 $w \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$, 因而 $u^* = 0, x^* = 0$, 即闭环系统渐近稳定. 证毕.

设参考输入为斜波函数 $y_r(t) = y_{r0} + y_{r1}t$, 考虑到 $d - c_1/b$ 为系统开环增益的倒数约为 0, 可推导出全闭环系统的稳态误差为

$$e(t) = y_r(t) - y(t) = -\frac{d - c_1}{k_I b} y_{r1} = \frac{a_1}{k_I b} y_{r1}. \quad (13)$$

由于系统开环增益很大, 约为 700°C , 上式的稳态误差是可以接受的. 例如, 当 $k_I =$

0.005/°C分,以0.5°C/分升温时, $e(t)=0.14^{\circ}\text{C}$.

4 液压釜温度自适应预测控制算法

设采样周期为 Δ ,取系统模型为具有一阶积分环节的二阶线性系统

$$y(k) - y(k-1) = a(y(k-1) - y(k-2)) + b_{s1}u(k-1) + b_{s2}u(k-2), \quad (14)$$

其中 $y(k)$ 为产品温度输出, $u(k)$ 为加温功率输入, $a > 0$.

参数辨识算法采用文[2]中提出的递推寻优最小二乘算法.在控制实现中,对参数估值进行如下可用性检验^[1]

$$a > \underline{a} > 0.75, \quad a < \bar{a} < 0.95, \quad b_{s1} > 0, b_{s2} > 0, \quad b_{s1} + b_{s2} \in [\underline{b}, \bar{b}].$$

只有当上述条件全部满足时,模型预测控制中模型参数才进行修改.

液压釜温度自适应预测控制算法的计算步骤如下:

- 1) 在线修正参考输入,计算 $y_r(k)$ 和 $y_r(k+K)$;
- 2) 计算模型预测控制量 $u_m(k)$;
- 3) 计算逻辑积分 $u_I(k)$ 和总控制量 $u(k)$,并输出;
- 4) 辨识系统模型参数;
- 5) 等待采样;命 $k:=k+1$,返回1).

5 实际应用情况

上述控制算法已成功地应用于某研究所液压釜加温自动控制系统中.该控制算法和其他四个分系统的控制算法在一台STD工业控制机V40系统上实现,全部软件用C语言编写,通过汉字菜单进行操作.

在调试过程中,该模型预测控制方案显示了很好的实用性.加温控制系统采样周期为

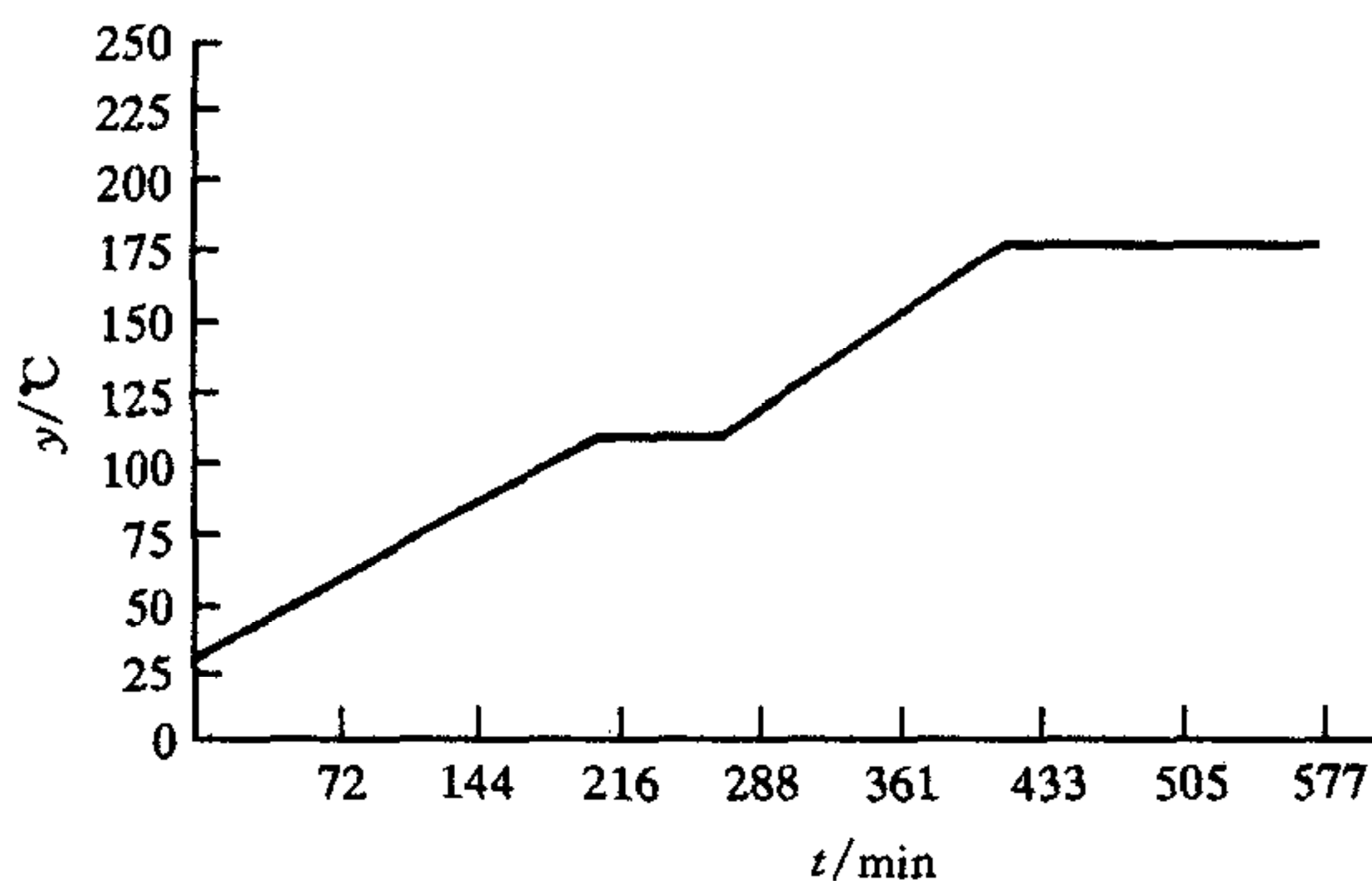


图2 液压釜温度控制实测曲线

1分钟,预测步数 $K=5$.在初步选出的一组模型参数情况下,未经调整,第一次实验就达到了较好的控制品质.在对 α 和 k_I 经过两次实验调整后,即达到了满意的控制效果.实际测试温度控制曲线如图2所示,设定值与实测值相距很近,平均温度偏差为 0.389°C ,最大温度偏差为 1.6°C .

该液压釜温度自适应控制方案在某研究所正式投入使用,并通过部级鉴定.测试和长期实际使用表明,该控制方案较好地

解决了对象控制特性不确定、大惯性、强干扰、控制功率不对称等实际问题,有效地提高了温度控制精度,消除了超调.此外,该控制系统正式使用后,有效地提高了产品的质量 and 成品率,使固化产品成品率由原来的85%上升到95%以上.

参 考 文 献

- 1 吴宏鑫著. 全系数自适应控制理论及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1990
- 2 袁斌, 彭立信. 递推寻优最小二乘法及多变量最小方差自校正调节器. 见: 控制理论及其应用年会论文集, 1986, 194—201
- 3 Garcia Carlos E *et al.* Model predictive control; theory and practice—a survey. *Automatica*, 1989, **25**(3): 335—348
- 4 Clark D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized predictive control—part I and II. *Automatica*, 1987, **23**(2): 137—160

袁斌 1965年生, 1983年毕业于中国科学技术大学系统科学与管理科学系, 1986年于中国科学技术大学获硕士学位, 1992年于北京控制工程研究所获博士学位. 主要研究方向为自适应控制、智能控制和机器人控制.

吴宏鑫 简介见本刊第18卷第2期.

中国自动化学会1999年一般专题部分学术活动计划

项目名称	主要内容	时间	地点	联系人
全国第5届自动化应用技术学术交流会	各种自动化应用技术、理论、方法与装备及其在国民经济各产业部门控制和管理中的应用, 各种检测、驱动装置、PLC、DCS、微机、现场总线、工作站及其网络系统, 能取得显著经济效益的各种控制和管理系统, 国内外自动化技术发展综述等	3月	海口	张振华 北京919信箱 邮编 100071
首届全国“技术过程的故障诊断与安全性”学术会议	石油化工、电力、冶金、航空航天、电子机械等行业中涉及故障检测, 诊断、可靠性、安全控制、监测控制、容错控制等方面的新理论、新方法、新技术和新的应用成果	5月	北京	周东华 北京清华大学自动化系 邮编 100084
工业自动化中仿真技术及其应用学术会议	21世纪系统仿真技术和应用的动向、研究、开发和生产成果的学术总结, 连续过程建模与仿真, 建模和仿真方法、DEDS仿真技术、定性仿真技术等	8月	安徽	戴耀华 合肥市中国科技大学自动化系 邮编 230027
第6届全国敏感元件与传感器学术会议	敏感技术的新机理, 传感器的新材料, 工业测量和过程控制, 微传感器与微机械系统, 智能化传感技术, 导航、惯导与遥测传感技术, 模糊传感和神经网络技术等.	9月	北京	同上
中国自动化学会北京地区学术交流会	智能仪表及现场总线, 楼宇自动化, 自控新技术、新设备, 计算机网络技术, 信息技术及其应用, 测控技术在各领域的应用等	9月	北京	李凌 北京西直门外高梁桥斜街44号北京市自动化学会办公室 邮编 100044
中国智能自动化会议(CIAC'99)	人工神经网络, 模糊系统, 进化计算, 计算智能及软计算, 基于知识的控制、自适应、自组织、自学习及变结构等先进控制方法和技术、智能过程控制、机器人、人工智能及应用等	10月 13日 至 16日	重庆	钱宗华 北京清华大学计算机系 邮编 100084

(下转第364页)