

一种改进的广义预测控制方法及其应用

郭 巧 曹海璐

(北京理工大学机器人研究中心·北京, 100081)

摘要: 给出一个快速高精度温度控制系统的结构、特点及其实现方法. 采用 CARI 模型和改进的广义预测控制方法来提高系统的控制精度, 并缩短其响应时间. 给出了这种快速高精度温度控制系统的结构及其实现方法, 并根据任务的需要, 对已有的预测控制算法进行了改进. 通过实验, 验证了其温度预测控制系统的设计方案和实现方法是合理的、可行的. 它能够满足预期的温度控制要求.

关键词: 预测控制; 过程控制; 计算机控制

文献标识码: A

An Improved GPC Scheme and Its Application

GUO Qiao and Cao Hailu

(Robotics Research Center, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, P. R. China)

Abstract: This paper proposes a practical fast and accurate temperature control system including its structure, characteristics and design method. It uses CARI model and generalized predictive control to improve the performance of the system, i. e. to increase the control accuracy of the system and to decrease the response time of the system. It gives the design method and experiment results for a fast and accurate temperature control system, and improves the GPC algorithm which was proposed by Clarke etc. according to the demands of our task. This scheme of the fast and accurate temperature control system can work and meet all requirements of the task.

Key words: predictive control; process control; computer control

1 引言(Introduction)

温度是工业过程控制中最常见也是最重要的受控变量,但它具有明显的滞后特性.对于需要快速准确地获取和控制实时温度值的场合(如制药、化工、石油、食品加工等)采用一般的控制方法很难获得满意的控制效果.为此,我们研究开发了一个能够对温度变量进行快速准确控制的系统.其性能指标为:测温精度达到 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (这一精度包括了传感器的精度、信号调节电路的精度和 A/D 转换精度);温度控制精度达到 $\pm 1^\circ\text{C}$ (温控范围为: $50^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$);控制响应时间以接近受控对象在非受控状态下达到相同预定状态点的最快动态响应时间为准.这里,通过对所建立的系统进行纯升温实验可知,当设定温度为 60°C 时,受控对象从室温到达 60°C 的最快响应时间约为 12.5min;当设定温度为 100°C 时,受控对象的最快响应时间约为 19.5min.也就是说,用任何方法对该受控对象进行控制,其温度的响应时间要受到系统这一固有特性的限制.通过比较控制响应时间

的长短和稳态误差的大小,我们可以判定所用控制方法的优劣.

在系统硬件的设计过程中,我们改进了常规的控制脉冲发生方法,从而方便了不同用户的选择和使用.考虑到通常过程控制系统都很复杂,其系统的数学模型很难精确建立,有时即使建立了模型,又因为对象的结构、参数和环境的不确定性,使得按照所建模型得到的控制值在实际中往往不能达到预期的目标,有时甚至会引起控制品质的严重下降.所以,为了使控制系统在不确定性影响下仍能保持快速精确的响应性能,我们在本实验系统中采用了广义预测控制 (generalized predictive control, 简称 GPC) 算法.通过实验得知,由于受控变量本身具有大的时滞特性,如果完全按照已有的 GPC 算法不能很好地完成控制任务.为此,我们修改和完善了已有的 GPC 控制算法,包括在控制律的计算过程中,充分调用多步预测中的有用信息,采用有平滑滤波作用的输入加权控制律来改进已有 GPC 的控制效果;另外,我

们还对已有 GPC 算法中的可调参数做了多种尝试,初步给出了这些参数的设定规律.通过建立 CARI 系统模型,采用修正的 GPC 控制律,所得实验结果表明,与已有控制方法相比,修改后的控制方法能够有效地缩短受控量的响应时间,减小受控量的稳态误差,达到了预期的控制目的.

本文共有三部分内容.第二部分介绍控制系统的结构、控制算法及其改进以及实验结果分析,第三部分给出结论.

2 控制系统结构、控制算法及其改进 (Control system structure, improved control algorithm)

2.1 控制系统的结构 (Control system structure)

整个控制系统包括五个部分:即温度变送器、检测接口电路板、控制接口电路板、固态继电器、控制计算机以及受控干燥箱.温度控制电路板包括地址译码、8253 计数脉冲生成以及固态继电器控制等电路.在以下实验中,我们选用的采样时间为 17s.

2.2 控制算法 (Control algorithm)

预测控制是一种基于模型的控制方法,这个模型称为预测模型.预测模型的功能是根据对象的历史信息和未来输入预测其未来输出.预测控制是一种滚动优化算法,它通过某一性能指标的最优来确定未来的控制作用.一般根据预测模型和控制策略进行优化时,是在从当前时刻起的未来一个有限长度的时段上进行的.根据预测模型,在每个采样时刻优化性能指标只涉及到从该时刻起未来有限的时间,而到下一时刻,这一优化时段同时向前推移.因此,预测控制不是一个对全局相同的优化性能指标,而是在每一时刻有一个相对于该时刻的优化性能指标.不同时刻的优化性能指标的相对形式是相同的,但其绝对形式,即所包含的时间区域有所不同.因此,在预测控制中,优化不是一次离线进行的,而是反复在线进行的.这也是预测控制区别于传统最优控制的根本点.在本系统中,考虑到通常过程控制系统都具有随机不确定性,且要求在线实时控制,故选用了 GPC 算法.

广义预测控制对被控对象的数学模型采用下列具有随机阶跃扰动非平稳噪声的离散差分方程描述:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t-1) + \frac{C(q^{-1})\xi(t)}{\Delta}, \quad (1)$$

其中

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \cdots + a_nq^{-n},$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \cdots + b_{n_b}q^{-n_b},$$

$$C(q^{-1}) = c_0 + c_1q^{-1} + \cdots + c_{n_c}q^{-n_c},$$

式中, $y(t)$ 为系统输出; $u(t-1)$ 为控制量; q^{-1} 是后移算子,表示后退一个采样周期的相应的量; $\Delta = 1 - q^{-1}$ 为差分算子; $\xi(t)$ 是一个不相关的随机序列,表示一类随机噪声的影响. A, B, C 都是 q^{-1} 的多项式,其中多项式 $B(q^{-1})$ 的若干首项元素 $b_0, b_1, \cdots$ 可以是零,以表示对象相应的时滞数.

在 GPC 中, t 时刻的优化性能指标具有以下形式:

$$\min J(t) = E \left[\sum_{j=N_1}^{N_2} [y(t+j) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{NU} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \right], \quad (2)$$

其中, E 为数学期望; w 为对象输出的期望值; N_1 和 N_2 分别为优化时域的始值与终值; NU 为控制时域,即在 NU 步后控制量不再变化:

$$u(t+j-1) = u(t+NU-1), \quad j > NU,$$

$\lambda(j)$ 为控制加权系数,为简化计算,一般可假设其为常数.

性能指标(2)采用了长时段预测的概念,把所要优化的方差从一个时间点扩展到一段时域,其中 N_1 应大于对象的时滞数,而 N_2 应大到对象动态特性充分表现出来.由于以多步预测优化代替了一步预测优化,即使对时滞估计不当或时滞发生变化,仍能从整体优化中得到合理的控制,这是 GPC 对模型不精确性具有鲁棒性的重要原因.为简化记号,下面将假设 $N_1 = 1$,并记 N_2 为 N .

在式(2)中,对象输出的期望值 w 可采用如下参考轨迹形式:

$$\begin{aligned} w(t) &= y(t), \\ w(t+j) &= aw(t+j-1) + (1-a)c, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $0 < a < 1, j = 1, 2, \cdots, N, c$ 为设定值.

这样,最优控制量可由下式给出:

$$u(t) = u(t-1) + g^T(w - f), \quad (4)$$

其中, g^T 是矩阵 $(G^T G + \lambda I)^{-1} G^T$ 的第 1 行.

2.3 控制算法的改进 (Improved control algorithm)

在实验过程中我们发现,如果只执行当前一步 $\Delta u(t)$,对于 $t+1$ 及其以后时刻的控制增量重新计算闭环控制策略虽比 PID 控制效果好些(可以缩短响应时间),但稳态误差不能达到要求.经过分析发现,由于多步预测中包含在 $\Delta u(t+1), \Delta u(t+2), \cdots, \Delta u(t+NU-1)$ 中的有用信息未被充分利用,计

算出的控制量受测量误差、干扰和饱和等因素的影响,产生虚假波动,从而影响控制效果.为了充分利用多步预测中的有用信息,我们采用有平滑滤波作用的输入加权控制律来改善 GPC 的控制效果,即当前的控制量是现时和过去对现时预测控制量的加权平均和

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^{NU} \lambda(i) u(t/t - i + 1)}{\sum_{i=1}^{NU} \lambda(i)}, \quad (5)$$

其中 $\lambda(i)$ 为控制量加权系数, NU 为控制时域长度.

2.4 控制参数的调整方法(Method of regulating control parameters)

在用广义预测控制算法设计的控制器中,有多个参数可以调整,如优化时域长度 N , 控制时域长度 NU , 优化性能指标中控制量加权系数 λ 等.但由于这些可调参数隐含在控制矩阵中,不易找出系统工作性能(如稳定性等)与可调参数之间的显式关系.为了方便不同用户对应不同系统时能够很快地设计出稳定的闭环控制系统,我们通过多次实验,总

结了一些参数选择的原则和计算方法,并给出了实验结果.

控制量加权系数 λ .

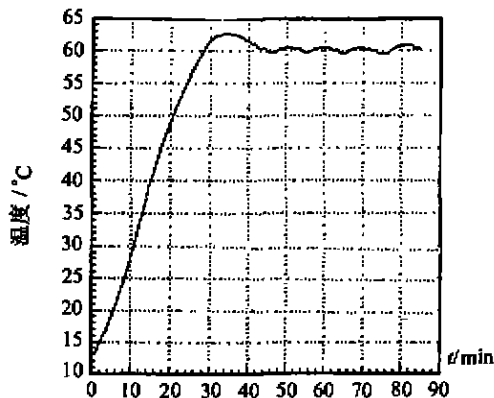
在优化性能指标中,控制量的加权系数 λ 的取值范围一般为 $0 \sim 1$, 但具体取何值还需实验确定.我们对 λ 的选择做了较多的实验,经比较知,将 λ 取为一时变值要比取常值为好.图 3 中 $\lambda = \exp(\cdot)$ 是指 λ 取下述分段时变函数

$$\lambda(t) = e^{-\frac{t}{a}} + b, \quad t > a \cdot \ln \frac{1}{1-b}, \quad (6)$$

$$\lambda(t) = 1, \quad 0 \leq t \leq a \cdot \ln \frac{1}{1-b},$$

式中 a 为用户设定的升温时间, b 为 λ 值的下限.若取 $a = 120s$, $b = 0.95$, 那么在 0 到 $360s$ 的时候, $\lambda = 1$; 当 $\lambda > 360s$ 时, 它的取值范围为 $0.95 \sim 1$. 如果不设定 λ 值的下限, 会使系统不稳定(如图 4 所示).

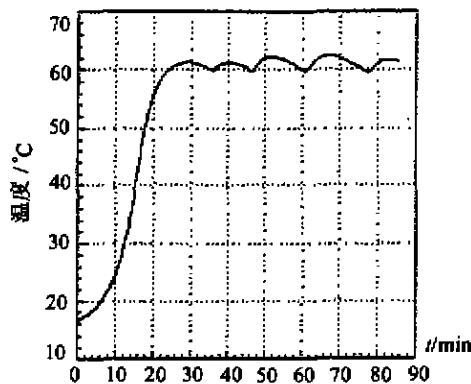
为便于比较,给出了 PID 控制的实验曲线(如图 1 所示)和改进前 GPC 的一个最佳实验曲线(如图 2 所示).图 3 为改进控制策略后得到的实验曲线.实验结果表明其确实改善了控制效果.



响应时间: 41.93min; 稳态误差: $-0.48 \sim -0.99^{\circ}\text{C}$

图 1 PID控制的实验曲线

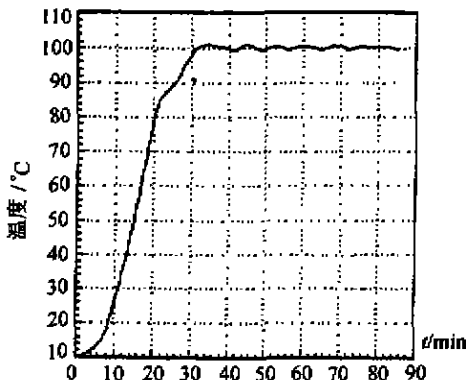
Fig. 1 The experiment results of PID control



响应时间: 23.6 min; 稳态误差: $-0.19 \sim 3.78^{\circ}\text{C}$

图 2 改进前 GPC 的实验曲线

Fig. 2 The experiment results of GPC



响应时间: 29.6min; 稳态误差: $-0.89 \sim 1.13^{\circ}\text{C}$

图 3 改进后 GPC 的实验曲线

Fig. 3 The experiment results of the improved GPC

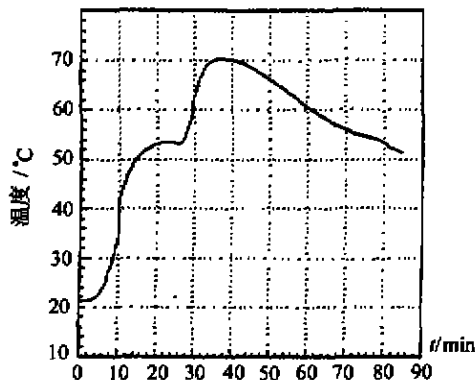


图 4 不稳定的温度实验曲线

Fig. 4 The unstable experiment results of temperature

参考轨迹的选取.

在本实验系统中,目的是要尽快到达系统的设定温度,因而参考轨迹直接选为设定温度值,即参考轨迹公式中的 $a = 0$. a 不等于零的情况一般用于随动系统控制.

3 结论(Conclusion)

温度是各种过程控制中一个最常见和最重要的受控变量.本文给出了一个快速高精度温度控制系统的结构、特点及其实现方法.通过改进已有的 GPC 控制方法,与已有 GPC 算法以及传统的 PID 控制相比,改进后的预测控制方法提高了系统的控制精度,缩短了其响应时间.此外,通过基于 Windows 环境下的用户界面的实时显示,可以在线监测整个实验过程中受控量的变化情况.实验结果表明,所采用的系统结构与控制方法可以满足设计任务的要求,并具有一定的普遍意义.

参考文献(References)

- [1] Xi Yugang. Predictive Control [M]. Beijing: National Defense Press, 1993 (in Chinese)
- [2] Zhang Youwei. Mathematic Methods of Prediction [M]. Beijing: National Defense Press, 1991 (in Chinese)
- [3] Deng Zixin and Guo Yixin. Modern Analysis and Applications of Time Series [M]. Beijing: Zhishi Press, 1989 (in Chinese)
- [4] He Limin. Applications of Single Chip Processor [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1991 (in Chinese)

本文作者简介

郭巧 1957 年生.博士,教授,博士生导师.主要研究领域为控制理论与控制工程,生物动力学,数字信号处理,计算机网络及其应用等.

曹海鹏 1970 年生.硕士.主要研究领域为过程控制等.

(上接第 306 页)

- [6] Xia Youshen and Wang Jun. A general methodology for designing globally convergent optimization neural networks [J]. IEEE Trans. Neural Networks, 1998, 9(6): 1331 - 1343
- [7] Xia Youshen and Wang Jun. A dual neural network for solving a class of quadratic programming problems [A]. Proceedings of 1999 Conf. Decision and Control [C], Shenyang: Dongbei University Press, 1999, 609 - 611
- [8] Wood R K and Berry M W. Terminal composition control of a binary distillation column [J]. Chem. Engng. Sci., 1973, 28(9): 1707 - 1717
- [9] Cai Xuansan. Optimization and Optimal Control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1982, 165 - 167

- [10] Mangasarian O L. Solution of symmetric linear complementarity problems by iterative methods [J]. J. Optimization Theory Appl., 1979, 22(2): 465 - 485

本文作者简介

李树荣 1966 年生.教授.1987 年毕业于山东大学,1990 年与 1993 年毕业于中国科学院系统科学研究所,分别获硕士和博士学位,1993 年 9 月于清华大学电机工程与应用电子技术系从事博士后研究工作.主要研究方向为非线性控制理论与应用,数学机械化等.

李峰 1975 年生.助教.1997 年与 2000 年毕业于石油大学(华东)自动化系,分别获学士和硕士学位.主要研究方向为非线性控制理论与应用,神经控制及其应用等.

(上接第 309 页)

- lized coprime factor plant description [A]. Lecture Notes in Control and Information Sciences [M], Berlin Germany: Springer Verlag, 1990
- [2] Yang C D, Tai H C and Lee C C. Experimental approach to selecting H_∞ weighting functions for DC servos [J]. J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1997, 119(1): 101 - 105
- [3] Skogestad S. Robust control of ill-conditioned plants: high-purity distillation [J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 1998, 33(12): 1092 - 1105

- [4] Skogestad S and Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control [M]. England: John Wiley & Sons, 1996

本文作者简介

张显群 1968 年生.博士,副教授,硕士生导师.在国际会议及 17 种国内重要学术刊物共发表论文 40 多篇,计算机应用专著 2 部,获交通部科技进步三等奖 1 项、大连市技术开发一等奖 1 项.目前研究方向:鲁棒控制,计算机软件开发,轮机工程.

贾欣乐 见本刊 2001 年第 2 期第 292 页.