

文章编号: 1000-8152(2001)04-0559-05

化学反应器温度跟踪预测函数控制的研究及应用*

张泉灵 王树青

(浙江大学工业控制技术国家重点实验室; 浙江大学先进控制研究所·杭州, 310027)

摘要: 对以预测函数控制算法为核心并结合 PID 控制的先进控制算法进行了研究, 针对化学反应器的温度跟踪控制问题, 给出了透明控制算法及预测函数控制器的具体形式. 仿真结果表明, 该算法具有较好的跟踪特性、抗干扰能力及鲁棒性. 同时, 该算法已在 SUPCON-JX300 集散控制系统上实现, 工业现场运行取得了很好的结果.

关键词: 模型预测控制; 预测函数控制; 透明控制; 时变过程

文献标识码: A

Studies and Applications of Predictive Functional Control in Temperature Tracking of Chemical Reactors

ZHANG Quanling and WANG Shuqing

(National Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University;

Institute of Advanced Process Control, Zhejiang University·Hangzhou, 310027, P.R. China)

Abstract: An advanced control strategy as the combination of predictive functional control and PID control is studied. With an industrial application background of temperature control in chemical reactor, predictive functional controller and transparent control scheme are designed. Simulation results show that the transparent control system obtains good tracking control performance, enough disturbance rejection and good robustness. At the same time, the advanced control strategy has been implemented in the SUPCON JX-300 distributed control systems and has provided good results.

Key words: model based predictive control; predictive functional control; transparent control; time-varying process

1 引言(Introduction)

模型预测控制(MPC)最早由 Richalet 等人^[1]提出的基于有限脉冲响应模型的模型预测启发算法(MPHC), 并在 PVC 生产、蒸馏等过程中得到了较好的应用. 经过 20 多年的发展, MPC 已经成为在工业过程得到了许多成功应用的先进控制策略. 预测函数控制(predictive functional control 简称 PFC)最早由 Richalet 及 Kuntze 等人^[2]在 80 年代中后期提出并在工业机器人快速高精度跟踪控制中取得了较好效果的第三代模型预测控制算法. 它把控制输入的结构视为关键问题, 可以克服其他模型预测控制可能出现规律不明的控制输入问题, 同时具有较好的跟踪能力及较强的鲁棒性. 从此以后, PFC 在工业过程中得到了广泛的应用, 如在机器人、雷达的目标跟踪、

传热设备、反应炉等工业过程中取得了一定的成果.

本文提出了应用 PFC 为监督层, 常规 PID 控制为控制层的透明控制结构. 由于控制层采用频率较高的常规 PID 控制, 可以抑制系统的二次干扰. 这种控制系统综合了 PFC 及常规 PID 控制的优点, 其控制效果明显优于常规 PID 控制. 本文给出了基于以上控制结构的仿真研究结果及工业现场化学反应器温度跟踪控制效果. 结果充分说明了这种控制策略的优越性.

2 透明控制的设计及实现(Design and realization of transparent control)

以 PFC 为监督层, PID 控制为控制层的透明控制结构方块图如图 1 所示.

* 基金项目: 浙江省科委重点项目(991101131)资助课题.
收稿日期: 1999-09-22; 收修改稿日期: 2000-08-01.

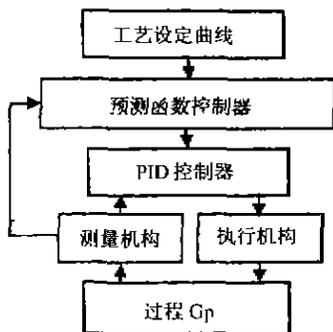


图1 透明控制方块图

Fig. 1 Scheme of transparent control

2.1 工艺设定曲线 (Optimal trajectory of techniques)

工艺设定曲线是由工艺工程师根据工艺要求而给定的一条工艺优化曲线,可任意修改,方便实用。

2.2 预测函数控制器 (Predictive functional controller)

PFC是第三代的模型预测控制算法,它仍具有MPC的三个基本特征,即:预测模型;滚动优化;误差校正。

2.2.1 预测模型 (Predictive model)

考虑到透明控制中的PFC控制器是把PID控制回路看成其需要控制的广义对象,而PID控制回路经过调节PID的参数总可以使其成为一阶加纯滞后的广义对象,因此在本文中PFC控制器的预测模型均为一阶加纯滞后对象,即如式(1)所示:

$$G_m(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1} e^{-T_d s}. \quad (1)$$

2.2.2 滚动优化 (Receding horizon optimization)

PFC的参考轨迹可以采用各种形式,对于一个稳定的系统,通常采用一阶指数形式,如式(2)所示:

$$y_r(k+i) = c(k+i) - \beta^i (c(k) - y(k)). \quad (2)$$

式中 y_r 是参考轨迹; c 是设定值; $\beta = e^{-T_s/T_r}$, T_s 是采样周期, T_r 是95%的参考轨迹响应时间; $y(k)$ 为 k 时刻的过程输出。

PFC的优化算法中,未来控制作用是通过迭代,最优化,约束限制等一系列步骤来实现的,最常用的方法是在优化点上参考轨迹和过程预测输出的误差平方和最小化,其最小化的标准式如式(3)所示:

$$\min J_p = \sum_{i=H_1}^{H_2} (y_r(k+i) - \hat{y}(k+i))^2, \quad (3)$$

$$\hat{y}(k+i) = y_m(k+i) + e(k+i). \quad (4)$$

式中 H_1, H_2 为优化时域的上下限, $\hat{y}(k+i)$ 为过程预测输出; $y_m(k+i)$ 是 $k+i$ 时刻的模型输出; $e(k+i)$ 是未来误差。

2.2.3 误差校正 (Modeling error compensation)

实际情况下,由于模型失配、二次输入及噪声的影响,模型输出与过程输出之间常存在着误差,为此,需要对未来优化时域中的误差进行预测,预测的方法有多种,其中可以取未来的误差如式(5)所示:

$$e(k+i) = y(k) - y_m(k). \quad (5)$$

其中 $y_m(k)$ 为 k 时刻的模型输出。

2.2.4 控制变量的求解 (Algorithmic solver)

与其它模型预测控制不同,预测函数控制认为控制输入的结构是确保控制性能的关键,在预测函数控制中,控制作用认为是若干个已知基函数 u_{bn} 的线性组合,如式(6)所示:

$$u(k+i) = \sum_{n=1}^N \mu_n u_{bn}(i), i = 0, \dots, H-1. \quad (6)$$

其中 N 是基函数的个数, $u_{bn}(i)$ 为基函数在 $t=iT_s$ 时的值, μ_n 为线性组合系数,其中 H 为预测时域的长度,其中基函数的选择取决于设定值的性质,通常采用多项式基函数的形式,当设定值在被控区间里其变化率小于或等于某一阈值 θ 时,控制输入可以取一个基函数,即采用阶跃响应函数;当设定值在被控区间里其变化率大于某一阈值 θ 时,控制输入可以取两个基函数,即采用阶跃响应函数和斜坡响应函数。

当采用一个基函数时,即采用阶跃响应函数时有:

$$u(k+i) = u(k), i = 1, 2, \dots, H-1. \quad (7)$$

对于式(1)所示的模型,过程的预测输出 $y_m(k+H)$ 的计算可先考虑 $T_d = 0$,在加一个零阶保持器进行离散化后,可求得模型的差分方程为:

$$y_m(k+1) = a_m y_m(k) + K_m(1-a_m)u(k). \quad (8)$$

式中 $a_m = e^{-T_s/T_m}$ 。

则根据式(7),(8)经递推及数学归纳法可以得到:

$$y_m(k+H) = a_m^H y_m(k) + K_m(1-a_m^H)u(k). \quad (9)$$

对于优化目标函数式(3)可以取 $H_1 = H_2 = H$,并令

$$\frac{\partial J_p}{\partial u(k)} = 0. \quad (10)$$

结合式(2),(3),(4),(5),(9),(10)可以得到 k 时刻控制量:

$$u(k) = \frac{c(k+H) - \beta^H c(k) - y(k)(1-\beta^H)}{K_m(1-\alpha_m^H)} + \frac{y_m(k)}{K_m}. \quad (11)$$

当 $T_d \neq 0$ 时,参考史密斯预估器的思想,PFC 仍采用 $T_d = 0$ 的模型,但对系统对象输出进行修正.设 $D = T_d/T_s$,则具体的修正方法如式(12)所示.

$$y_{\text{pav}}(k) = y(k) + y_m(k) - y_m(k - D). \quad (12)$$

$y_{\text{pav}}(k)$ 为修正后的过程输出值,则式(5)可修正为:

$$e(k + H) = y_{\text{pav}}(k) - y_m(k). \quad (13)$$

综合式(11),(12),(13)可以得到,对象为一阶加纯滞后的 PFC 控制输出为:

$$u(k) = \frac{c(k + H) - \beta^H c(k) - y_{\text{pav}}(k)(1 - \beta^H)}{K_m(1 - \alpha_m^H)} + \frac{y_m(k)}{K_m}. \quad (14)$$

当采用两个基函数时,即采用阶跃响应函数和斜坡响应函数时有:

$$u(k + i) = A_1 + A_2 i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, H - 1. \quad (15)$$

其中 A_1, A_2 为待定参数,为了计算 A_1, A_2 ,式(3)的优化目标函数可以由式(16)代替:

$$J_p = \min((y_m(k + H_1) + e(k + H_1) - y_r(k + H_1))^2 + (y_m(k + H_2) + e(k + H_2) - y_r(k + H_2))^2). \quad (16)$$

其中, $H_j, y_m(k + H_j), e(k + H_j), y_r(k + H_j), j = 1, 2$ 分别为两个时刻及相应时刻的模型输出,误差及参考轨迹值.其计算如下:

当 $T_d = 0$ 时,

$$e(k + H_j) = y(k) - y_m(k); \quad (17)$$

$$u(k) = \begin{cases} u(k - 1) + V_{\min} \times T_s, & (u(k) - u(k - 1))/T_s < V_{\min}, \\ u(k), & V_{\min} \leq (u(k) - u(k - 1))/T_s \leq V_{\max}, \\ u(k - 1) + V_{\max} \times T_s, & (u(k) - u(k - 1))/T_s > V_{\max}. \end{cases} \quad (23)$$

2.3 透明控制的实现(Realization of transparent control)

透明控制的实现的具体算法如下:

① 算法初始化,包括工艺设定曲线的给定,PID 参数整定到整个 PID 控制回路为一阶加纯滞后的广义对象,同时测定 PFC 的对象模型(PID 控制回路)的参数 K_m, T_m, T_d ,选择基函数的设定值变化量的阈值 θ ,以及 PFC 控制的相关参数,如 T_r, T_s, H 等等,并计算 α_m, β .

② 读入 k 时刻的过程输出值 $y(k)$,及 k 时刻和 $k + H$ 时刻的工艺设定值 $c(k)$ 及 $c(k + H)$.

③ 如果 $|c(k + H) - c(k)| \leq \theta$ 那么转 ④ 否则转 ⑤.

当 $T_d \neq 0$ 时,

$$e(k + H_j) = y_{\text{pav}}(k) - y_m(k). \quad (18)$$

仿照取一个基函数时的推导方法可以得到:

$$y_m(k + H_j) = \alpha_m^H y_m(k) + K_m(1 - \alpha_m^H)A_1 + K_m(1 - \alpha_m) \left(\sum_{i=1}^{H-1} i \cdot \alpha_m^{H-1-i} \right) A_2. \quad (19)$$

令

$$G_1(H_j) = K_m(1 - \alpha_m^H),$$

$$G_2(H_j) = K_m(1 - \alpha_m) \left(\sum_{i=1}^{H-1} i \cdot \alpha_m^{H-1-i} \right),$$

$$X_1 = y_r(k + H_1) - \alpha_m^H y_m(k) - e(k + H_1),$$

$$X_2 = y_r(k + H_2) - \alpha_m^H y_m(k) - e(k + H_2).$$

为了求出 k 时刻的控制量,令

$$\partial J_p / \partial A_1 = 0, \quad \partial J_p / \partial A_2 = 0. \quad (20)$$

根据式(15)-(20)可以得到:

$$u(k) = A_1 = \frac{G_2(H_2)X_1 - G_2(H_1)X_2}{G_1(H_1)G_2(H_2) - G_1(H_2)G_2(H_1)}. \quad (21)$$

在实际工业生产过程中,往往由于执行机构、产品性能、安全性等情况而存在着各种的约束条件,因此需要对控制输出进行限幅措施,一般需要进行幅值和速度限幅.具体方法如下:

$$u(k) = \begin{cases} u_{\min}, & u(k) < u_{\min}, \\ u(k), & u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max}, \\ u_{\max}, & u(k) > u_{\max}. \end{cases} \quad (22)$$

④ 按式(14)计算 k 时刻的控制量 $u(k)$,转 ⑥.

⑤ 按式(21)计算 k 时刻的控制量 $u(k)$,转 ⑥.

⑥ 计算 $y_m(k + 1)$ 并执行 $u(k)$.

⑦ 令 $k = k + 1$ 转 ②.

3 仿真研究(Simulation study)

为了验证以上算法的有效性,现进行计算机仿真研究.仿真分3部分,第一部分进行抗干扰研究,第二部分进行过程时变时的控制效果研究,第三部分进行过程时变时的抗干扰效果研究.仿真时,PID 控制器的采样时间为 1 秒,预测函数控制器采样时间为 4 秒,工艺设定曲线如图 2 所示,以下的所有仿真控制目标是跟踪图 2 所示的工艺设定曲线.具体仿真如下.

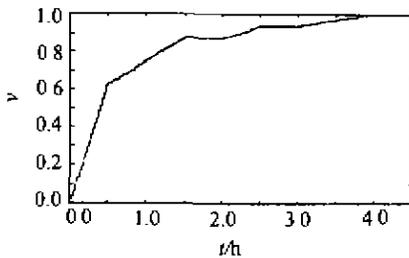


图2 工艺设定曲线

Fig. 2 Optimal trajectory of technics

3.1 控制系统的抗干扰能力 (Disturbance rejection of control system)

在仿真中,过程取二阶加纯滞后对象,其中放大倍数 $K_p = 4$,时间常数为 $T_1 = 120$ 秒, $T_2 = 180$ 秒,纯滞后时间 $T_d = 40$ 秒,在 7000 秒时加 10% 的输出阶跃扰动.其仿真结果的误差曲线如图 3 所示,从图 3 中可以看出,在过程中加了 10% 的阶跃后,控制系统能较好地克服扰动,这说明控制系统有较强的抗干扰能力.

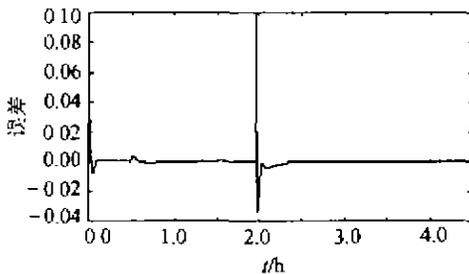


图3 在 7000 秒时加工 10% 输出扰动的跟踪误差

Fig. 3 Tracking error for 10% step output disturbance at time $t=7000$ s

3.2 控制系统的鲁棒性 (Robust of control system)

在仿真中,过程的参数在 4.5 小时中均匀变化,变化幅度如下:时间常数 T_1 从 120 秒变到 70 秒, T_2 从 180 秒变到 110 秒, K_p 从 4 变到 1,虽然过程时间常数减小了 40%,放大倍数缩小到原来的 1/4,但是,由于时变造成的跟踪控制误差仍在 0.5% 之内,由此可见,控制系统有较强的鲁棒性.

3.3 时变过程的抗干扰能力 (Disturbance rejection of time-varying system)

在仿真 3.2 的基础上,在 7000 秒时过程加 10% 的输出阶跃扰动.其控制结果的误差曲线如图 4 所示.比较图 3 与图 4,可以看出在时变加扰动时绝对误差有所增大,但是控制效果仍然令人满意的.

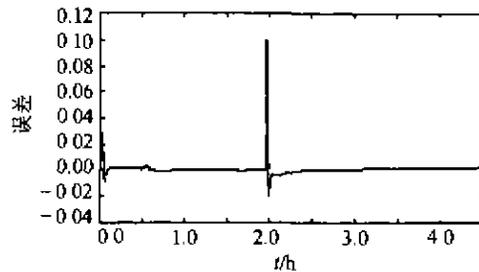


图4 过程时变同时加工 10% 输出扰动的跟踪误差

Fig. 4 Tracking error for 10% step output disturbance in case of time-varying

4 工业应用 (Application in industry)

间歇反应器已在化工、医药、染料等工业中得到了广泛的应用,其控制系统的设计一直是控制界的一个热点,因为间歇反应器的温度一般需严格按照一定的温度轨迹运行,常规 PID 控制满足不了要求.本文的透明控制结构却能较好地满足间歇反应过程的控制要求.以 PFC 与常规 PID 控制相结合的透明控制系统已在浙大中控自动化有限公司开发研制的 JX-300 集散型控制系统上实现,并用在间歇化学反应釜的温度跟踪控制中,取得了良好的效果.其工业背景如图 5 所示的一典型的化学反应过程.其中 F101 是间歇反应釜,是控制的重点,要求温度控制在工艺要求的曲线上.其控制方法如下:在升温时关闭冷却水阀 HV106 及疏水阀 HV105,打开疏水阀 HV107,调节蒸汽调节阀 TV102 的开度来控制升温控制.降温过程中,关闭 TV102 和 HV107,同时打开 HV105, HV106.在整个反应过程中, F101 中的反应副产物从 T101 源源不断地蒸出,反应釜 F101 的物料在反应结束时的数量是反应开始时的 2/3 左右,从而造成被控对象是一个时变过程.应用控制结果比较如图 6 所示.图 6 是基于 PFC + PID 透明控制系统的温度跟踪控制效果图,在升温段其最大偏差为 0.70%,而在保温段其最大偏差为 0.35%.图 7 所示的是 PID 常规控制温度跟踪控制效果图.但在升温段到保温段的转折点之前根据工艺工程师的经验值,人为地把蒸汽调节阀的输出阀位降低,目的是减小保温段的超调.其效果比常规的 PID 有所改善.但其升温段的最大偏差达到 0.9%,在保温段的最大偏差为 1.2%,而有的批次在某些保温段的最大偏差达到 2.2%,明显达不到保温段 0.5% 的最大偏差要求.由此可见,以 PFC + PID 的透明控制比常规的 PID 控制具有较好的控制结果.

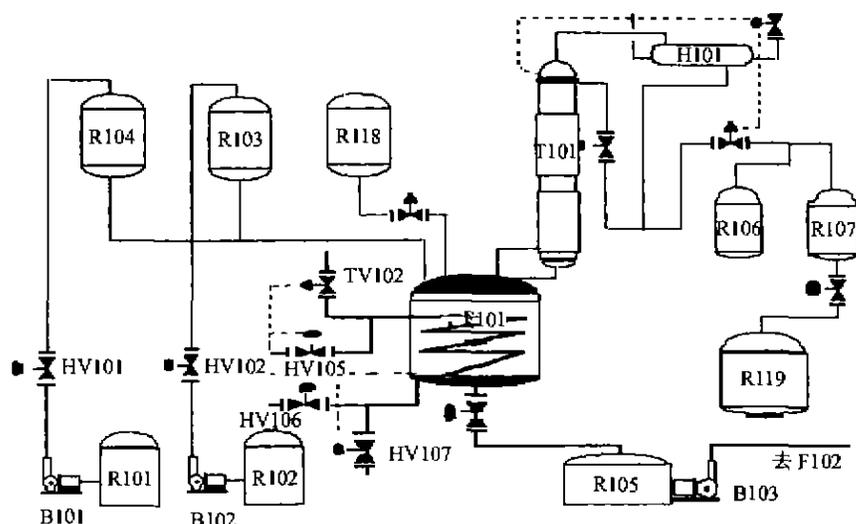


图 5 典型工段的工艺流程图

Fig. 5 Physical description of chemical reactor

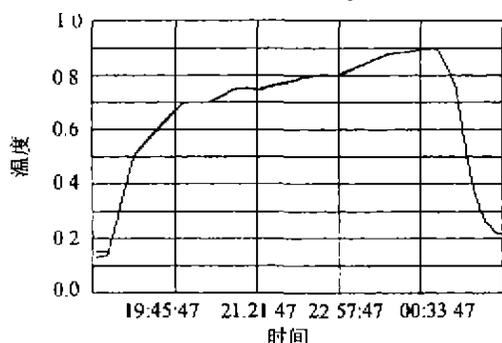


图 6 透明控制结构的温度跟踪控制效果

Fig. 6 Temperature tracking result of transparent control

5 结论 (Conclusion)

本文详细介绍了以预测函数控制为核心的先进控制策略,并给出了具体实施方法.该算法的特点是:在线计算量少,计算速度快,占用计算机内存少.仿真结果表明,该算法具有较好的跟踪效果,较强的鲁棒性和抗干扰能力.同时该算法已在浙大中控自动化有限公司开发研制的 JX-300 集散型控制系统上实现,并在现场化学反应器温度跟踪控制中取得了良好的效果.

参考文献 (References)

- [1] Richalet J, Rault A, Testud J L and Papon J. Model predictive heuristic control: applications to industrial processes[J]. Automatica, 1978, 14(5):413-428
- [2] Richalet J, Doss S A A, Arber C, et al. Predictive functional control: applications to fast and accurate robots[A]. In: Isermann R ed. Automatic Control 10th Triennial World Congress of IFAC [C], Oxford: Pergamon Press, 1988, 251-258
- [3] Richalet J. Observations on model-based predictive control[J]. Control Engineering, 1992, 39(10):39-41

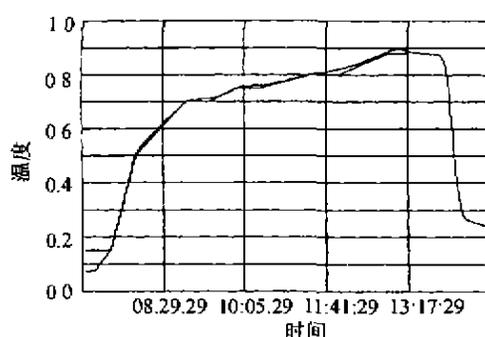


图 7 PID 温度跟踪控制效果

Fig. 7 Temperature tracking result of PID control

- [4] Kwon W H. Advances in predictive control: theory and application [A]. 94 Asian Control Conference[C], Tokyo, Japan, 1994
- [5] Li Ping. Studies and applications of predictive control and pole-placement internal model control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1994
- [6] Xi Yugeng. Predictive Control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993
- [7] Zhang Quanling, Luo Shujin, Liu Zhifei and Wang Shuqing. Studies and applications of predictive functional control[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 1998, 25(Suppl.):40-43
- [8] Jin Xiaoming. Fuzzy control, predictive functional control and advanced process control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1998
- [9] Zhang Quanling. Research on predictive functional control and its applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1999

本文作者简介

张泉灵 1973 年生, 2000 年获浙江大学控制科学与工程博士学位, 现为浙江大学先进控制研究所讲师. 主要研究方向: 预测控制, 工业过程的建模, 先进控制与优化.

王树青 1939 年生, 浙江大学先进控制研究所教授, 博士生导师. 主要研究方向: 工业过程的建模, 先进控制与优化, 预测控制, 非线性控制, 智能控制, 统计过程控制, CIMS 等.