

## 大时滞过程的预测控制\* ——催化裂化反应再生系统原料预热回路控制

杨马英

王树青

王骥程

TE 966

(浙江工业大学信息工程学院·杭州, 310032) (浙江大学工业控制技术国家重点实验室·杭州, 310027)

**摘要:** 实际的复杂工业过程, 往往具有大的时滞, 例如: 炼油厂催化裂化装置的反应再生系统, 其原料油预热通过油浆换热实现, 因此时滞特别大。本文针对这一类大的时滞过程, 设计了以动态矩阵控制为核心算法的预测控制系统, 运行实践表明: 这一控制方案比原 PID 控制在控制质量上有较大提高。

**关键词:** 传热; 时滞; 预测控制

**文献标识码:** A

炼油

催化裂化装置

反应再生系统

## Predictive Control for Large Time Delay Process ——FCCU Reactor-Regenerator Feed Preheating System Control

YANG Maying

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, 310032, P. R. China)

WANG Shuqing and WANG Jicheng

(State Key Lab of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, P. R. China)

**Abstract:** Large time delay exists in complicated practical processes. For example, in FCCU (Fluidized Catalytic Cracker Unit) reactor-regenerator, the feed is preheated through heat exchanging from fractional column slurry, thus results in large time delay. A predictive control system is designed for such processes, where the kernel algorithm is dynamic matrix control. Application results show that the control behavior is improved than original PID control.

**Key words:** heat transfer; time delay; predictive control

### 1 引言 (Introduction)

时滞过程的主要控制困难是不能及时得到控制作用的反馈信息。等到控制效果能通过输出测量体现时, 此时的控制作用强度往往已过头了。如此, 严重影响了控制系统的性能。要有效改进时滞过程的控制质量, 唯有通过把未来的输出测量值事先“预估”出来再实施下一步控制 (即死时补偿) 的办法。

Smith 预估器由于能通过模型把对象的滞后预估出来并实现补偿, 被认为是解决时滞系统控制问题的有效办法。然而, 当对象模型存在误差时, 时滞就难以得到补偿, 控制性能受到影响, 甚至出现不稳定。由此, 妨碍了其在工业过程中的应用。

本文通过预测控制的内模结构分析和对催化裂化反应再生系统原料预热回路的成功控制实例, 说明了预测控制用于时滞过程控制的可行性。

### 2 时滞过程的预测控制 (Time delay process predictive control)

Smith 预估器自 50 年代末问世以来, 在大时滞补偿上取得了良好效果, 但它仍有缺陷<sup>[1]</sup>:

1) 时滞补偿需要准确的过程数学模型, 控制性能对模型误差敏感。

2) 预估长度限于时滞长度。

为改进上述方法的不足, 我们引入具有内模控制结构的预测控制器。内模控制的结构如图 1 所示。

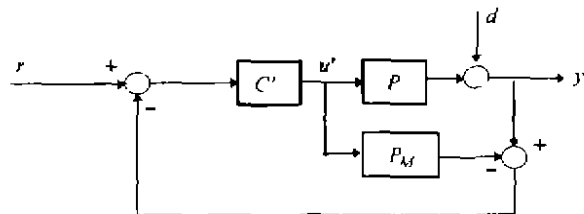


图 1 内模控制结构

Fig. 1 Internal model control architecture

\* 基金项目: 浙江省自然科学基金(697051)资助项目。

收稿日期: 1996-12-30; 收修稿日期: 1999-2-4。

控制器  $C'$  的设计有如下优点<sup>[1]</sup>:

1) 若无模型误差,则当过程  $P$  稳定时,控制器  $C'$  的稳定性决定闭环系统稳定性;

2) 若不计模型误差,灵敏度函数  $\varepsilon(s)$  是控制器  $C'$  的线性函数,即

$$\frac{y}{d} = \frac{1 - P_M \cdot C'}{1 + C'(P - P_M)} \triangleq \varepsilon(s), \quad (1)$$

当  $P_M = P$ ,  $\varepsilon(s) = 1 - P_M \cdot C'$ .

内模控制和 Smith 预估控制虽有很多相似之处,但有两点重要的不同之处:

1) 可对被控过程输出进行更长时域的预估,而不仅仅是时滞时间长度;

2) 可在反馈回路设计滤波器,对预估进行更好的反馈修正.

这两个特点不但使控制系统易于调整,以满足各种不同要求,更重要的是提高了系统的鲁棒性,因而不需在线辨识或参数估计,控制系统也能运行得很好.

图 1 中控制器  $C'$  可用动态矩阵控制算法<sup>[2]</sup>实现,即:

$$J_k = \min_{\Delta u} [A \cdot \Delta u - e(k+1)]^T Q [A \cdot \Delta u - e(k+1)] + \Delta u^T R \Delta u, \quad (2a)$$

受约于

$$C \cdot \Delta u \geq c(k+1), \quad (2b)$$

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u \leq \Delta u_{\max}. \quad (2c)$$

其中  $A$  是动态矩阵,  $e(k+1)$  是预测时域  $P$  上被控变量(controlled variable,以 CV 表示)期望轨迹与预测序列之差,  $\Delta u$  是在控制时域  $M$  上操作变量(manipulated variable,以 MV 表示)增量,  $C$  和  $c(k+1)$  是反映变量约束的常数矩阵,  $Q$  和  $R$  分别是 CV 和 MV 的加权矩阵.

当不考虑约束条件(2b)和(2c)时,称为无约束 DMC,可求得问题(2a)的解析解为:

$$\Delta u(k) = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q [e(k+1)]. \quad (3)$$

控制算法实施时,先离线计算出控制矩阵  $D$ :

$$D = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q, \quad (4)$$

然后根据输出反馈值,在线修正预测输出序列和  $e(k+1)$ ,得到实时控制增量  $\Delta u(k)$ .

### 3 原料预热回路工艺 (Feed preheating process)

重油催化裂化装置的反应原料包括减压塔馏分油和渣油及本装置主分馏塔的部分回炼油浆.原料油混合后,需经预热达到一定的预热温度(视操作工况不同,在  $150 \sim 200^\circ\text{C}$ ),再由提升管底部进入反应

器.原料油预热温度作为反应再生系统的一个操纵变量,对装置的热平衡和反应深度及产率分布有直接影响,预热温度的波动将带来装置操作工况的不稳定.

混合后的原料油经由三通阀,一部分通过管式换热器与主分馏塔底的油浆换热,之后再与三通旁路的冷原料油混合,作为反应器的进料.系统的控制目标是混合后的原料油温度(即原料预热温度),控制手段为三通阀两股出料流量比(通过改变三通阀开度实现)

原料预热回路示意图见图 2,图中 TC 为温度控制器, TI 为温度测量和变送器.

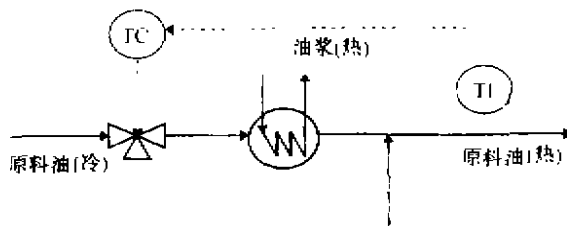


图 2 原料油预热示意图

Fig. 2 Feed oil preheating chart

从图 2 中可知,预热回路主要包括换热器、三通阀和管道传输三大部分.

管道传输是温度时滞的主要根源.假设温度均一的原料油在管道中流动呈活塞流,流速为  $v$ ,管线长度为  $L$ ,则温度的传递函数  $e^{-\frac{L}{v}}$  表现为时滞特性<sup>[3]</sup>.

经过与油浆换热的热原料油和三通旁路的冷原料油成分相同.两股原料油经过较长的工艺管道实现温度调和.由于温差的存在,原料油之间存在传热现象.管式换热器温度的动态特性将呈现有时滞的近似惯性或二阶特性<sup>[3,4]</sup>.图 2 中测温元件 TI 检测的正是温度调和后的原料油预热温度值.

提升管反应器的反应油气被送至主分馏塔进行组分分离.因此反应再生部分和主分馏部分的操作变化将直接导致主分馏塔底油浆的成分和温度的变化,使进入换热器的原料油温度特性也具有不确定性.

作为预热温度回路执行机构的流量调节阀采用气关三通阀.由于装置设计上的原因,使装置在某些工况下要求预热温度接近  $200^\circ\text{C}$ ,此时三通旁路一路几近全关,而其他时候阀则工作在正常行程范围.如此大范围的行程变化将不可避免地使三通阀的流量工作特性呈现非线性.

### 4 预热温度的预测控制 (Preheating temperature predictive control)

从上面的分析可以看出,原料油预热回路的温

度对象具有大时滞、非线性和不确定性的过程特点,采用常规控制方法难以达到理想的调节效果,大时滞的存在更易使控制系统出现不稳定,为实现催化裂化装置的先进控制,必须采用新的预热温度控制方法。

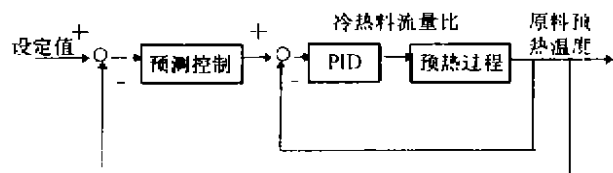


图3 改进的预热温度控制系统

Fig. 3 Improved preheating temperature control system

通过工业试验,测得工作点附近对象传递函数

为  $\frac{0.9}{4s+1}e^{-2.5s}$ ,证实了对象大时滞特征(大时滞系

统的判断标准是时滞  $\tau$ /时间常数  $T > 0.3^{[5]}$ ),为解决这一换热控制系统的响应滞后时间长和稳定性差的矛盾,我们采用图1形式的控制方案。

改进的预热温度控制系统流程图见图3。

图中,内环对应于图1中的对象  $P$ ,预测控制模块对应于图1中的控制器  $C'$  和  $P_M$ 。

图4(a)是预热回路的原有PID控制方案的调节效果,可见,控制系统的响应滞后时间长,稳定性差,图4(b)是采用预测控制后的调节效果,此时,调节效果较之PID控制已有明显改善。

此外,针对过程非线性和不确定性特点,在控制软件中增加了变控制增益、设定值附近区间控制和约束保护等措施,以求在暂态响应和稳态性能之间取得折衷。

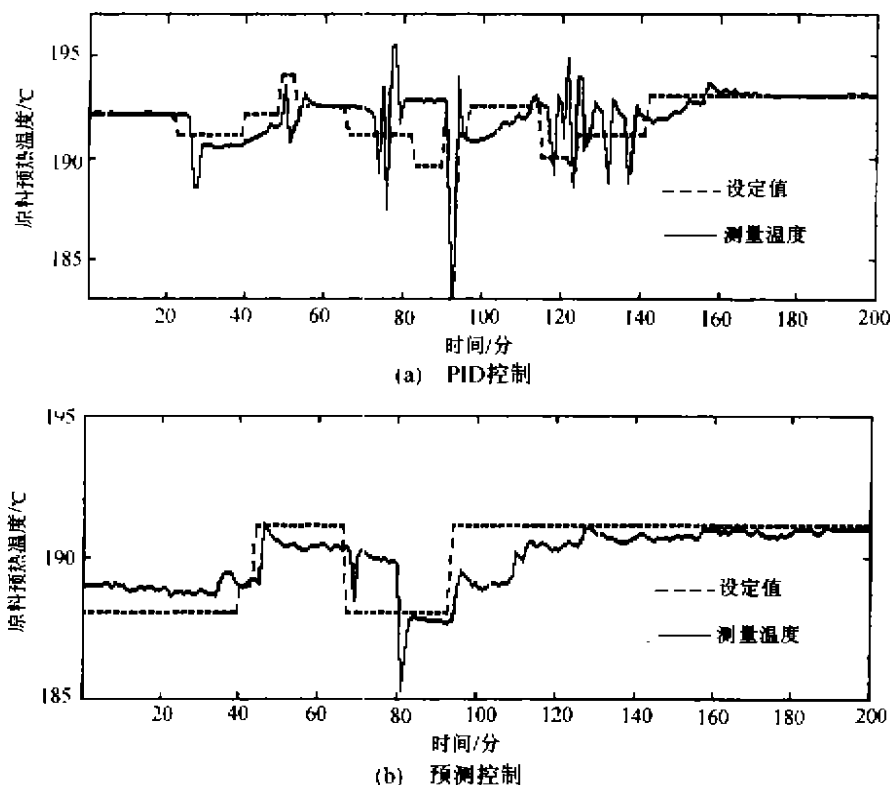


图4 原料油预热温度

Fig 4 Preheating temperature of feed oil

图5给出了预测控制投用前后的预热温度曲线对比,可见,预测控制投用后,预热温度的稳态调节不再因干扰存在而出现漂移现象。

原料油预热温度这一回路的调节质量的提高,表明预测控制应用于大时滞过程的控制是可行的,而这一回路预测控制的实现也为作为其调节手段之一的反再系统多变量协调预测控制系统的实施创造了条件。

## 5 结论(Conclusion)

大时滞过程在工程上是普遍存在的,然而常规控制方法对此却难以获得好的控制效果,预测控制由于其优于Smith预估器的结构和算法特点,被认为是适合于时滞过程的控制,本文通过预测算法对催化裂化反应再生系统原料预热回路的成功控制实例,证明了预测控制用于时滞过程控制的可行性。

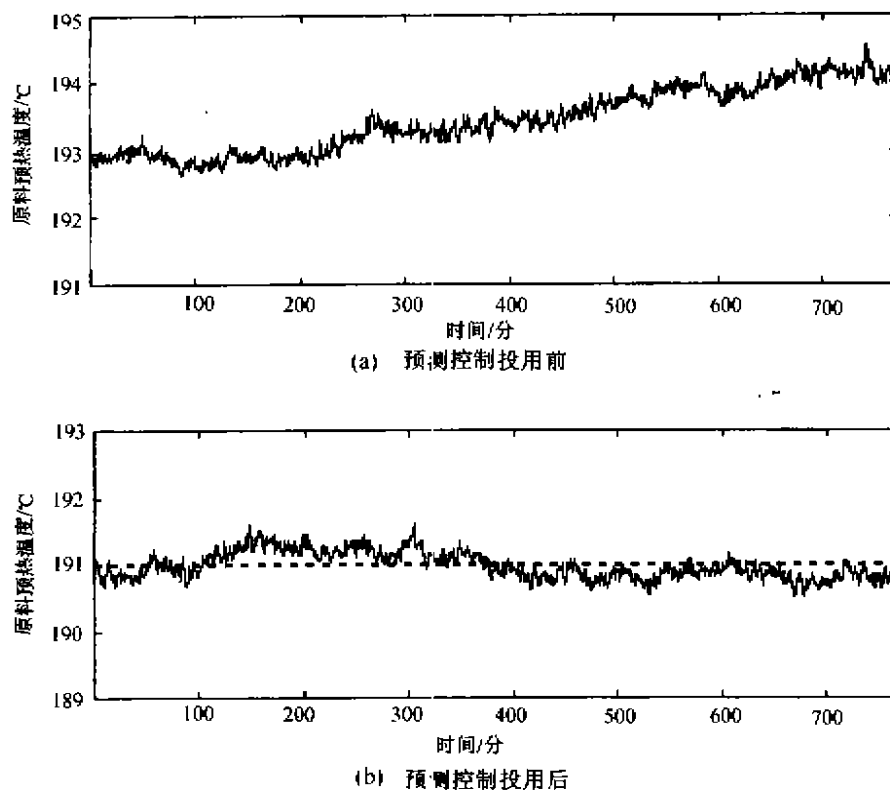


图5 预测控制投用前后预热温度曲线

Fig. 5 Preheating temperature without and with predictive control

## 参考文献 (References)

- [1] Moran M and Zafiriou E. Robust Process Control [M]. Englewood Cliffs, NJ; Prentice-Hall, 1989
- [2] Cutler C R and Ramaker B L. Dynamic matrix control—a computer control algorithm [A]. In: Proc. Joint Automatic Control Conf. [C], San Francisco, California, 1980, WP5-B
- [3] 榎田荣一, 中西英二, 陶林, 陶兴文译. 化工过程控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 1990
- [4] 王骥程. 化工动态学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1990
- [5] 沈平. 时间滞后调节系统[M]. 北京: 化学工业出版社, 1985
- [6] Stephanopoulos G. Chemical process control, an introduction to theory and practice [M]. Englewood Cliffs, NJ; Prentice-Hall, 1984

## 本文作者简介

杨马英 女, 1966年生, 副教授, 1986年, 1989年和1997年先后在浙江大学获得工业自动化学士学位, 硕士学位和博士学位. 目前主要从事过程控制, 预测控制和鲁棒控制等方面的研究工作

王树青 1939年生, 教授, 博士生导师. 1964年毕业于浙江大学化工系, 现为工业控制技术国家重点实验室主任, 研究领域为智能控制, 非线性控制, 预测控制, 计算机集成过程系统及其在工业生产过程中的应用.

王骥程 1928年生, 教授, 博士生导师. 1951年和1953年先后在浙江大学获得学士学位和硕士学位, 长期从事过程动态学, 工业生产过程的建模与计算机优化控制等方面的研究工作