



# 催化裂化反应再生系统的预测控制研究

杨马英 王树青 王骥程

(浙江大学工业控制技术国家重点实验室 杭州 310027)

兰鸿森 陈清海 康 飏

(福建炼油厂 惠安 362100)

**摘 要** 针对大型炼油厂催化裂化装置反应再生系统的工艺和控制要求,设计了多变量二次动态矩阵控制器,取得良好的仿真和工业应用试验效果.

**关键词** 预测控制,二次动态矩阵控制,催化裂化,多变量系统.

## 1 引言

反应再生系统是催化裂化生产过程的核心和实现高级过程控制的关键,其装置主要由一个提升管反应器及两个串联再生器组成. 反应温度、催化剂循环量、蒸汽流率和主风量等因素的共同作用,决定了产品质量和产率分布<sup>[1]</sup>. 对于这一高度复杂的系统,通过机理分析得到的动力学模型均是高达几十维的偏微分方程形式,这给控制带来了很大困难. 本文针对大型炼油厂催化裂化装置的反应再生系统,应用预测控制中的二次动态矩阵控制(QDMC)方法进行了闭环控制仿真研究和工业应用试验,取得了良好效果,为实现催化裂化装置的在线闭环先进控制提供了依据.

## 2 反应再生系统的预测控制

反应再生系统控制的总体要求是,在安全平稳生产的前提下,以较大的处理量、较高的目的产品收率、较好的产品质量和较低的消耗,达到最好的生产效果和最高的经济效益. 在已有沉降器汽提蒸汽与催化剂循环量比值控制和提升管温度分布控制的基础上,选取一段再生器烟气  $CO_2$  含量、二段再生器烟气  $O_2$  含量、一段再生器密相温度和二段再生器密相温度作为被控量(分别以  $CV_1, CV_2, CV_3$  和  $CV_4$  表示),选择原料预热温度、回炼油、渣油、蜡油、总进料、一再主风量、二再主风量和反应器出口温度作为控制量(分别以  $MV_1 - MV_8$  表示),组成多变量预测控制系统.

对实际反应再生系统,在工作区域附近通过辨识得到对象的传递函数矩阵形式数学模型,

如表1所示. 其中各控制量和被控量的取值范围经归一化处理为0—1.

表1 反应再生系统的数学模型

	$CV_1$	$CV_2$	$CV_3$	$CV_4$
$MV_1$	$\frac{0.0576e^{-27s}}{30.9s^2+7.8s+1}$	$\frac{0.3491e^{-22s}}{13.7s^2+7.4s+1}$	$\frac{0.7286e^{-11s}}{15s^2+5s+1}$	$\frac{0.07(1+2s)e^{-13s}}{59.2s^2+8.3s+1}$
$MV_2$	$\frac{0.102(1+s)e^{-12s}}{59.2s^2+7.7s+1}$	$\frac{0.1457e^{-22s}}{8.16s^2+4s+1}$	$\frac{-0.1025(1-15s)e^{-20s}}{100s^2+9s+1}$	$\frac{-0.048e^{-24s}}{30.9s^2+7.8s+1}$
$MV_3$	0	$\frac{-0.3714(1+7s)e^{-24s}}{30.9s^2+4.4s+1}$	$\frac{0.1887e^{-23s}}{69.4s^2+8.3s+1}$	$\frac{0.2764(1-15s)e^{-20s}}{156.3s^2+11.3s+1}$
$MV_4$	$\frac{-0.1668(1+2s)e^{-35s}}{25s^2+7s+1}$	0	$\frac{-0.0851(1+3s)e^{-34s}}{25s^2+6s+1}$	$\frac{-0.0356e^{-26s}}{20.7s^2+4.5s+1}$
$MV_5$	0	$\frac{-1.0714e^{-4s}}{1+4s}$	$\frac{0.18(1-10s)e^{-4s}}{59.17s^2+8s+1}$	$\frac{0.714e^{-2s}}{1+9s}$
$MV_6$	0	$\frac{0.1114(1+6s)e^{-13s}}{20.7s^2+2.9s+1}$	0	$\frac{-0.0152(1+3s)e^{-13s}}{11.1s^2+3.7s+1}$
$MV_7$	0	$\frac{0.3e^{-6s}}{1+7s}$	$\frac{-0.0829(1+3s)}{11.1s^2+4s+1}$	0
$MV_8$	$\frac{0.07e^{-2s}}{15.8s^2+7.9s+1}$	$\frac{-0.2273e^{-s}}{18.9s^2+9.1s+1}$	$\frac{-0.3571e^{-3s}}{14.8s^2+8.8s+1}$	$\frac{0.06167e^{-2s}}{15.8s^2+7.8s+1}$

表1中不少通道具有较大纯滞后,部分通道有非最小相位特性,各通道之间耦合严重.从过程控制要求来看,被控量有设定值控制和区域控制两种要求.而控制量在可调范围内根据装置优化操作的原则还存在着理想静态值(Ideal Resting Value,简称 IRV).这种控制目标和可控性程度之间的折衷构成了多目标多自由度的控制问题.本文采用 QDMC 策略来处理这一控制问题.

$$\min_{\Delta u_M(k)} J(k) = \|\mathbf{W}(k) - \tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k)\|_Q^2 + \|\Delta \mathbf{u}_M(k)\|_R^2 \quad (1)$$

受约于

$$\Delta \mathbf{u}_{\min} \leq \Delta \mathbf{u}_M(k) \leq \Delta \mathbf{u}_{\max}, \quad (2)$$

$$\mathbf{C} \cdot \Delta \mathbf{u}_M(k) \geq \mathbf{b}. \quad (3)$$

其中  $\mathbf{u}$  表示过程输入(即  $MV_1-MV_8$ );  $\mathbf{y}$  表示过程输出(即  $CV_1-CV_4$ );  $\mathbf{W}(k)$  为  $\mathbf{y}$  在预测时域  $P$  上的期望值;  $\Delta \mathbf{u}_M(k)$  为  $\mathbf{u}$  自  $k$  时刻起未来控制时域  $M$  上的控制增量值;  $\tilde{\mathbf{y}}_{PM}(k)$  为  $\mathbf{y}$  自  $k$  时刻起计及控制序列  $\Delta \mathbf{u}_M(k)$  下,在预测时域  $P$  上的输出预测值;  $Q$  和  $R$  分别为加权矩阵;  $C$  是常数矩阵;  $\mathbf{b}$  是常数向量.

根据控制要求,在每一采样时刻,当各被控量均位于允许的控制区域时,对各控制量作以一定的速率回归 IRV 的运算.否则,执行在线二次规划运算,寻找满足(1)–(3)式的最优  $\Delta \mathbf{u}_M(k)$ .

### 3 仿真及工业应用试验

将此预测控制方法进行闭环仿真研究.取采样周期  $T_s=5$ 分钟,响应时域  $N=40$ ,预测时

域  $P=10$ , 控制时域  $M=4$ ,  $CV$  设定值为 0.45, 允许控制区域 0.4—0.5,  $MV$  可调范围 0.1—0.9. 在第 5, 100, 200 和 300 分钟时分别将  $CV_1, CV_2, CV_3$  和  $CV_4$  的设定值改变至 0.55, 允许控制区域相应调节到 0.5—0.6. 在模型各阶跃响应系数均失配 0.025 的情况下, 得到系统阶跃响应曲线如图 1 所示.

仿真结果表明, 此二次动态矩阵控制算法具有良好的设定值跟踪性能, 且对模型误差也表现出一定的鲁棒性.

为进一步考察控制系统调节效果, 在实际的反再装置上进行了多变量预测控制的工业应用试验. 图 2 中虚线和实线分别是各  $CV$  在工业试验前和试验中的实测过程变量曲线. 可见, 多变量预测控制使过程曲线波动得到明显改善, 提高了操作平稳性, 有效地抑制了过程不可测扰动带来的影响.

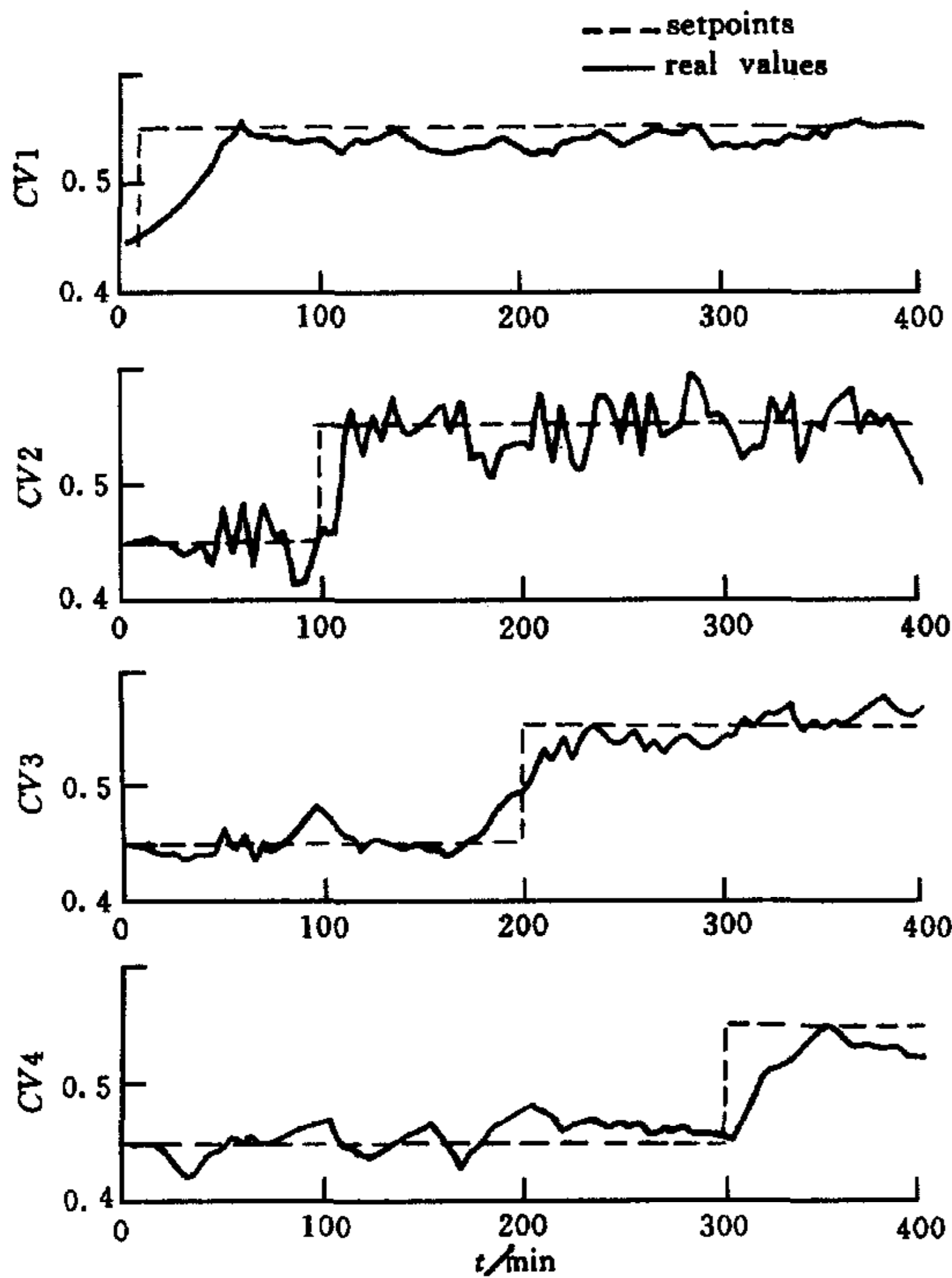


图1 反再系统仿真控制曲线

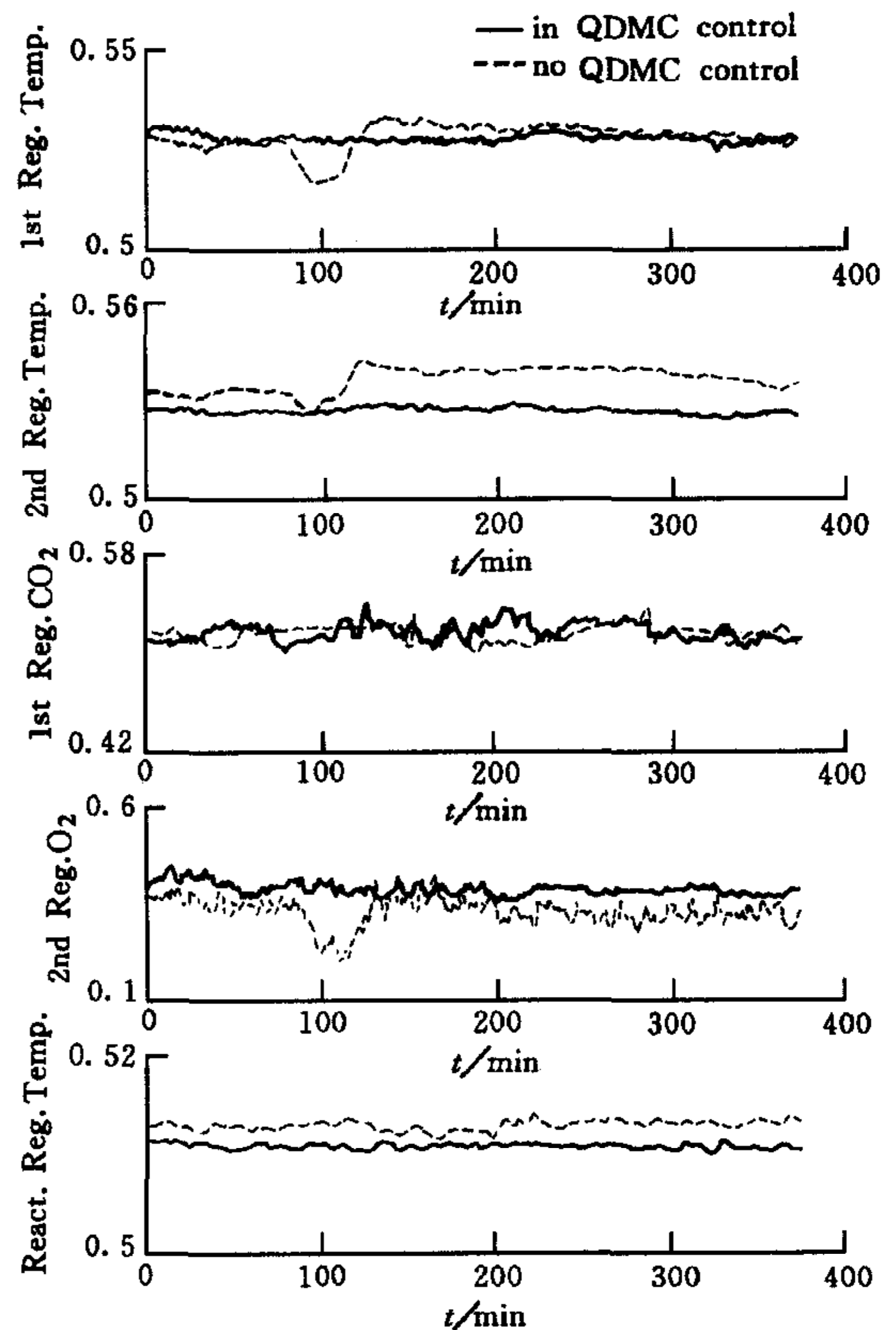


图2 反再系统工业应用试验对比曲线

## 4 结论

闭环仿真和工业应用试验的结果表明, 将预测控制方法应用于反应再生系统的控制是合适的. 为确保控制系统长期可靠有效运行, 需进一步考虑两个问题: (1) 如何简化在线优化计

算以提高控制实时性,节约计算内存;(2)为保证控制精度,每隔一段时间以后需对系统进行辨识,获取新的控制模型,以消除装置特性和参数的漂移可能对控制系统带来的影响.

### 参 考 文 献

- 1 陆庆云主编. 流化催化裂化(第二版),北京:烃加工出版社,1989
- 2 席裕庚. 预测控制,北京:国防工业出版社,1993
- 3 Garcia C E *et al.* Quadratic programming solution of dynamic matrix control. *Chem. Eng. Commun.*, 1986, **46**:73—87
- 4 Grosdidier P *et al.* FCC unit reactor regenerator control, *Computers Chem. Engng.*, 1993, **17**(2):165—179.

## FCCU REACTOR-REGENERATOR PREDICTIVE CONTROL

YANG MAYING    WANG SHUQING    WANG JICHENG

(State Key Lab of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

LAN HONGSEN    CHEN QINGHAI    KANG BIAO

(Fujiang Refinery, Huian 362100)

**Abstract** A multivariable quadratic dynamic matrix controller (QDMC) is designed for a reactor-regenerator system of the fluid catalytic cracking unit (FCCU) in an oil refinery. The results of computer simulation and on-line application show that the method is efficient for real-time control of an industrial complex process.

**Key words** Predictive control, quadratic dynamic matrix control, FCCU, multivariable system.