

# 乙苯脱氢反应器系统的广义预测控制

吴 坚 刚    刘 仁 华

(上海高桥石化公司化工厂)

张 素 贞

(华东化工学院自动化研究所, 上海)

## 摘 要

本文详细介绍了在乙苯脱氢反应器计算机控制系统中引入多输入、单输出系统 (MISO) 的广义预测控制算法, 以及在扰动和负荷变化下在线控制情况。该算法简捷、直观, 具有良好的控制效果。文中还给出了算法的推导过程, 讨论了柔化参数  $\alpha$  和加权系数  $\lambda$  对控制质量的影响。

**关键词:** 预测控制, 化学反应器。

## 一、引 言

七十年代后期, 预测控制方面的理论文章开始有所发表, Richalet<sup>[1]</sup> 等把预测控制归结为三条基本原理, 即预测模型、参考轨迹、控制算法。基于预测模型和算法的不同类型, 有形形色色的预测控制算法<sup>[2-5]</sup>。近年来, 随着技术装备的改进和理论的进展, 国外石化、能源工业不乏有预测控制成功应用的范例。

本文以工业装置为背景, 从实用直观的角度推导了与文献 [5] 不同的 MISO 系统的广义预测控制算法, 结合该算法在实际系统上的应用, 讨论了如何选取柔化参数  $\alpha$  和加权系数  $\lambda$ , 并提出了以可变  $\alpha$  代替定常  $\alpha$ , 进一步提高控制质量的想法。

## 二、反应器系统介绍

乙苯脱氢反应器系统是一个由加热炉, 二个串联的绝热式径向反应器及若干个换热器所组成的系统, 是一个典型的化工生产过程。

图 1 为年产两万吨苯乙烯的乙苯脱氢反应系统工艺流程图。原料乙苯先与小股蒸汽混合, 经换热器及加热炉加热, 进入第一、第二反应器反应, 生成主产品苯乙烯及副产品甲苯等。

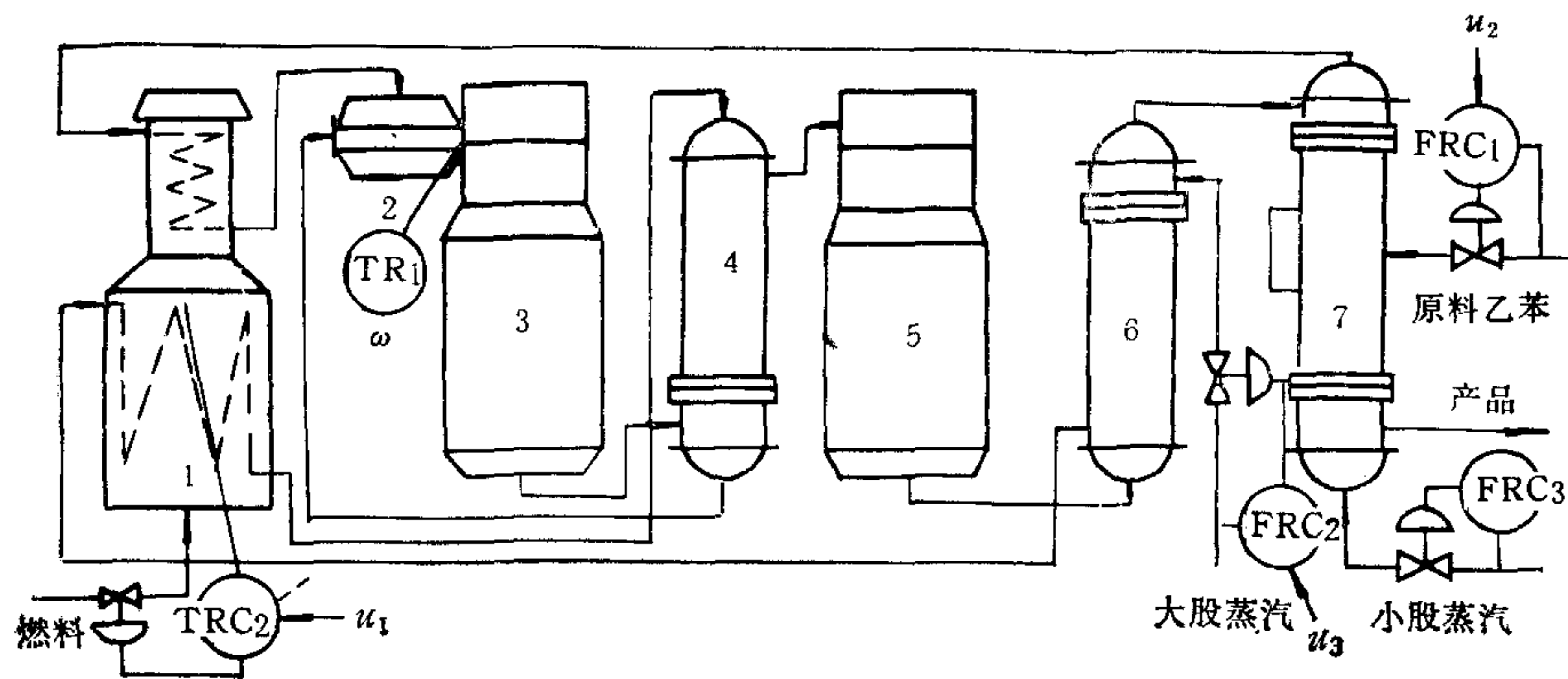


图1 反应器系统流程图

1——加热炉; 2——混合器; 3——第一反应器; 4——中间换热器;  
5——第二反应器; 6——换热器; 7——换热器。

为了充分利用能源,反应系统中热交换很多,物料流在 1 反应器前为被加热对象,而在反应后又作为热源对原料及蒸汽进行加热。物料流的加热情况直接影响反应的结果,而反应的结果又反过来影响整个系统的热平衡,而且蒸汽分成两股与原料混合,形成了不同的换热通道。所有这一切加剧了系统的关联和耦合。对反应系统进行实测,从改变燃料流量到反应系统复趋平稳,过渡过程长达 65 分钟。乙苯流量和蒸汽流量的改变也有时间长短不同的过渡过程。

系统的外界扰动包括燃料(废气)的成份、压力的波动、蒸汽流量、压力和负荷的经常变化等。对绝热式反应器而言,入口温度表征了物料带入反应器的热量,决定了反应能够进行的程度。而外界的扰动常常使入口温度偏离设定值,引起产量和质量的下降。

为了使反应系统既能较快响应负荷的变化,又能克服扰动,平稳操作,建立以乙苯流量、蒸汽流量和炉膛温度为控制变量,以反应器入口温度为被控变量这样的多输入、单输出系统是必要的。

### 三、广义预测控制算法的推导

Clarke<sup>[5]</sup> 等推导了 CARIMA 模型的广义预测控制算法,认为这一算法对于一类系统(非最小相位系统、开环不稳定系统或极点难以配置的系统、时变或未知时滞的系统以及未知阶数的系统)具有良好的控制特性。在此算法中,使用递推的丢番图(Diophantine)方程,将系统的输出分成  $t$  时刻以前和  $t$  时刻以后的两部分之和,然后通过求解,得到了控制变量  $u^*$  在  $t$  时刻以后的表达式。从实际使用的角度, $u^*$  的表达式并不具有任何意义。而且, CARIMA 模型的建立和在线辨识又有较大的难度。本文从简化模型形式入手,进行如下的 CAR 模型的广义预测控制算法的推导。

#### 1. 定义

1) 系统模型。文献[7]认为,当模型阶次足够时, CAR 模型能够充分逼近 CARIMA 模型。因此,本文以 CAR 模型作为系统辨识模型。不失一般性, MISO 模型可写成







令式(11)为零,经整理得

$$u^* = -(H^T H + \lambda)^{-1}(H^T(K - W + b_0)). \quad (12)$$

式中  $H^T H + \lambda$  为对称阵,  $u^*$  可通过递推算得。

### 四、广义预测控制算法的应用

用以上算法,用 IBM-PC/XT 对反应系统进行了控制,取预测步长和控制步长  $L$  为 5,控制变量  $u_1, u_2, u_3$  的意义如图 1 所示。算法所用参数如表 1 所示。当计算得到的控制变量  $u^*$  超出工艺允许的范围时,取如表 1 所示的上、下限(表中所示数据为相对量)。

图 2 为控制结构框图,虚线包围的部分为广义预测控制算法。每一步计算(包括模型

表 1 控制用参数

初始模型参数	$a_1$	$a_2$	$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{13}$	
	1.038506	-0.1923703	0.2612876	0.1747862	-0.1650702	
	$b_{21}$	$b_{22}$	$b_{23}$	$b_{31}$	$b_{32}$	$b_{33}$
	-0.0351332	0.1277966	0.0844179	0.0454845	0.00322728	-0.0387812
加权系数	$\lambda_{11}$	$\lambda_{21}$	$\lambda_{31}$	$\lambda_{12}$	$\lambda_{22}$	$\lambda_{32}$
	0.04	0.81	0.05	0.06	0.81	0.11
	$\lambda_{13}$	$\lambda_{23}$	$\lambda_{33}$	$\lambda_{14}$	$\lambda_{24}$	$\lambda_{34}$
	0.08	0.81	0.13	0.1	0.81	0.15
	$\lambda_{15}$	$\lambda_{25}$	$\lambda_{35}$	$\alpha$		
	0.12	0.81	0.18	0.36		
变量约束	$U_{1max}$	$U_{1min}$	$U_{2max}$	$U_{2min}$	$U_{3max}$	$U_{3min}$
	2.4	0.0	1.2	0.3	1.33	0.0

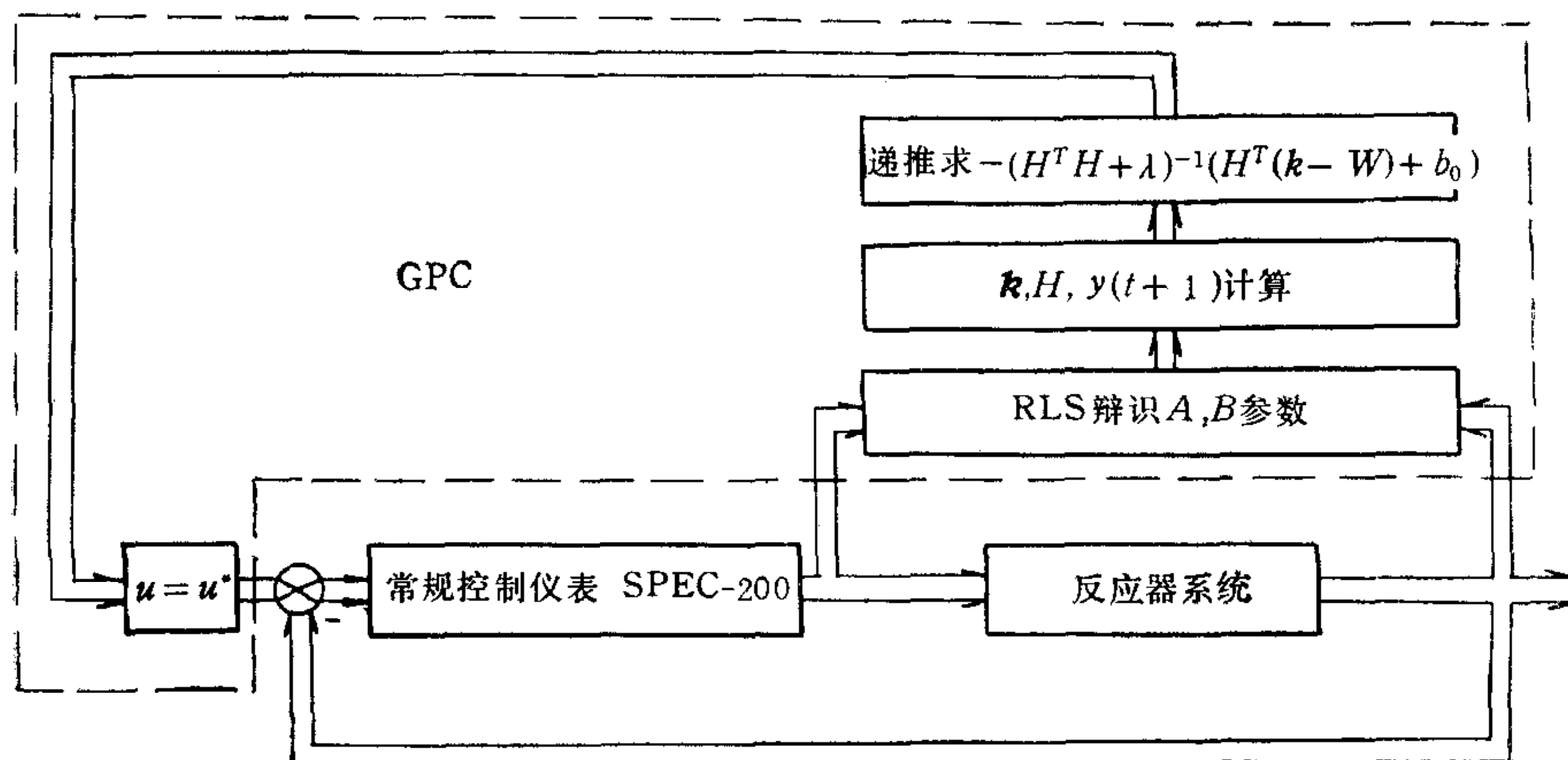


图 2 控制结构图

参数辨识,递推计算)约 2.5 分钟。

图 3 为使用预测控制前后的比较。图 3(1)为设定值  $\omega$  增加  $10^{\circ}\text{C}$  后,反应器入口温度的过渡过程。显见,使用预测控制后,超调量、余差、过渡过程时间等较以前减小很多,控制质量明显提高。从图 3(2)也可看出,反应器入口温度基本保持在设定值的  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$  范围内。

### 五、讨 论

(1) 柔化参数的选取。  $\alpha$  的大小对系统输出的跟随速度影响较大。图 4 分别是  $\alpha$  取 0.15, 0.6, 0.9 时系统的仿真结果。可见,  $\alpha$  取得小,输出跟随快,但太小,会引起波动;  $\alpha$  取得大,输出波动小,跟随慢。在多变量系统中,会出现长时间偏离设定值的现象(如图 4(下)的情况)。

(2) 加权系数  $\lambda$  的选取。在多输入系统中,参数  $\lambda$  对控制效果有显著影响,这可从对式 (3) 的分析得到。目标函数  $J$  归结为两部分,即实际系统输出与参考轨迹之差的一部分和控制输出  $\Delta u$  的另一部分。当  $\lambda$  取值较大,优化的对策必然是使  $\Delta u$  减小,从而使得  $J$  减小。在变量较多的情况下,  $\Delta u$  的作用更加明显。为了使  $y$  较好地跟随参考轨迹又使输出较平稳,  $\alpha$  与  $\lambda$  的选取应综合地加以考虑,输出跟随慢,  $\alpha$  应取得小;某些控制变量不希望变化大,对应的  $\lambda$  参数可取大一些。

(3) 可变柔化参数  $\alpha$  代替定常  $\alpha$ 。如前所述,  $\alpha$  对控制性能有较大影响,希望在输出  $y$  与设定值  $\omega$  之间偏差大时跟随快,在偏差小时要求控制系统迟钝,使波动小,而固定  $\alpha$  难以满足这种要求。在实际使用时,构造如下的函数:

$$\alpha = 1 - 2|\omega - y(t)| / (1.2\exp(|\omega - y(t)| / 0.03 + 1)) \quad (13)$$

图 5 是实际控制结果。从跟随速度和余差两个方面都可看出控制性能有了进一步的改

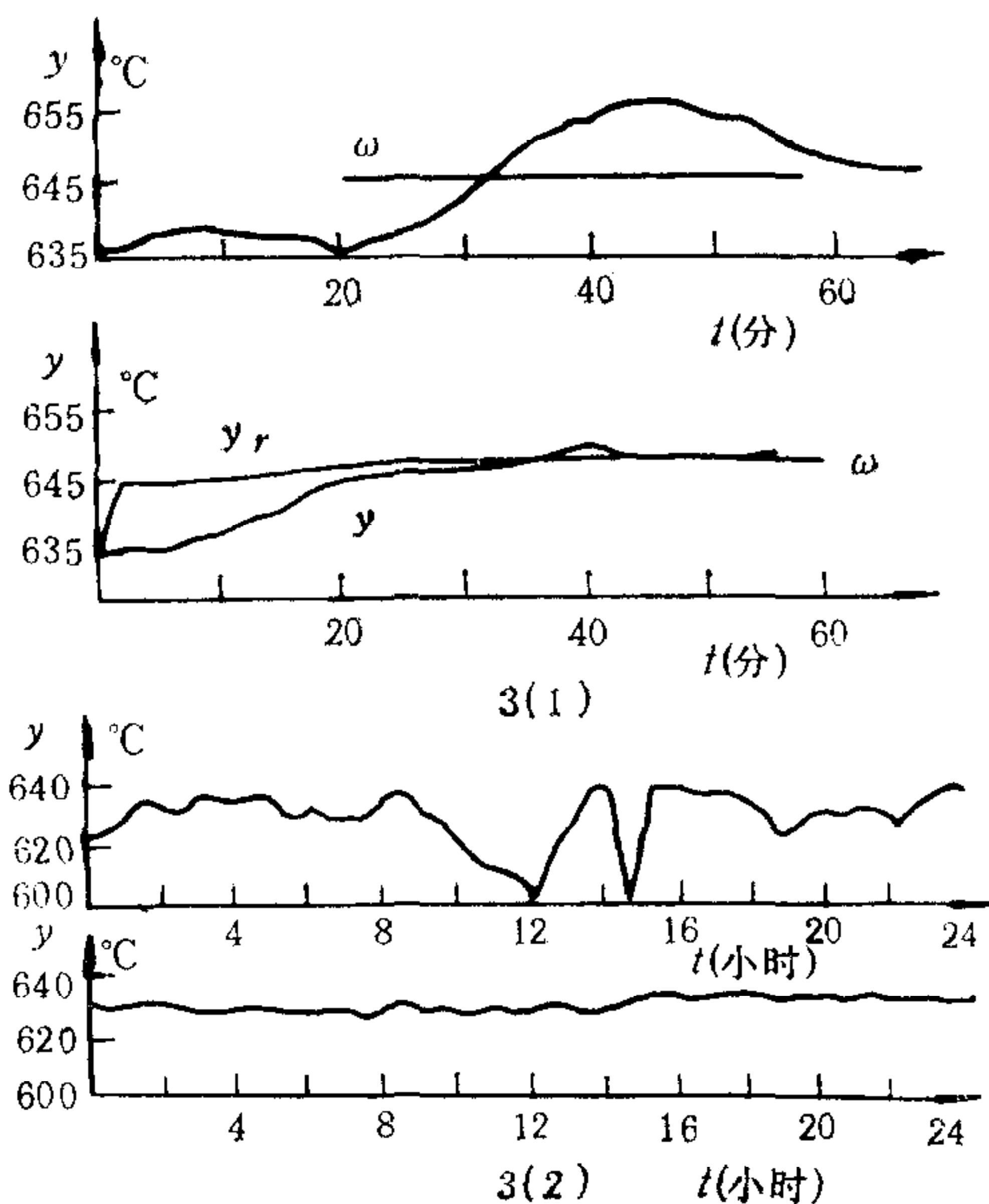


图 3 前后对比

- 1——过渡过程对比(上前,下后)
- 2——入口温度对比(上前,下后)

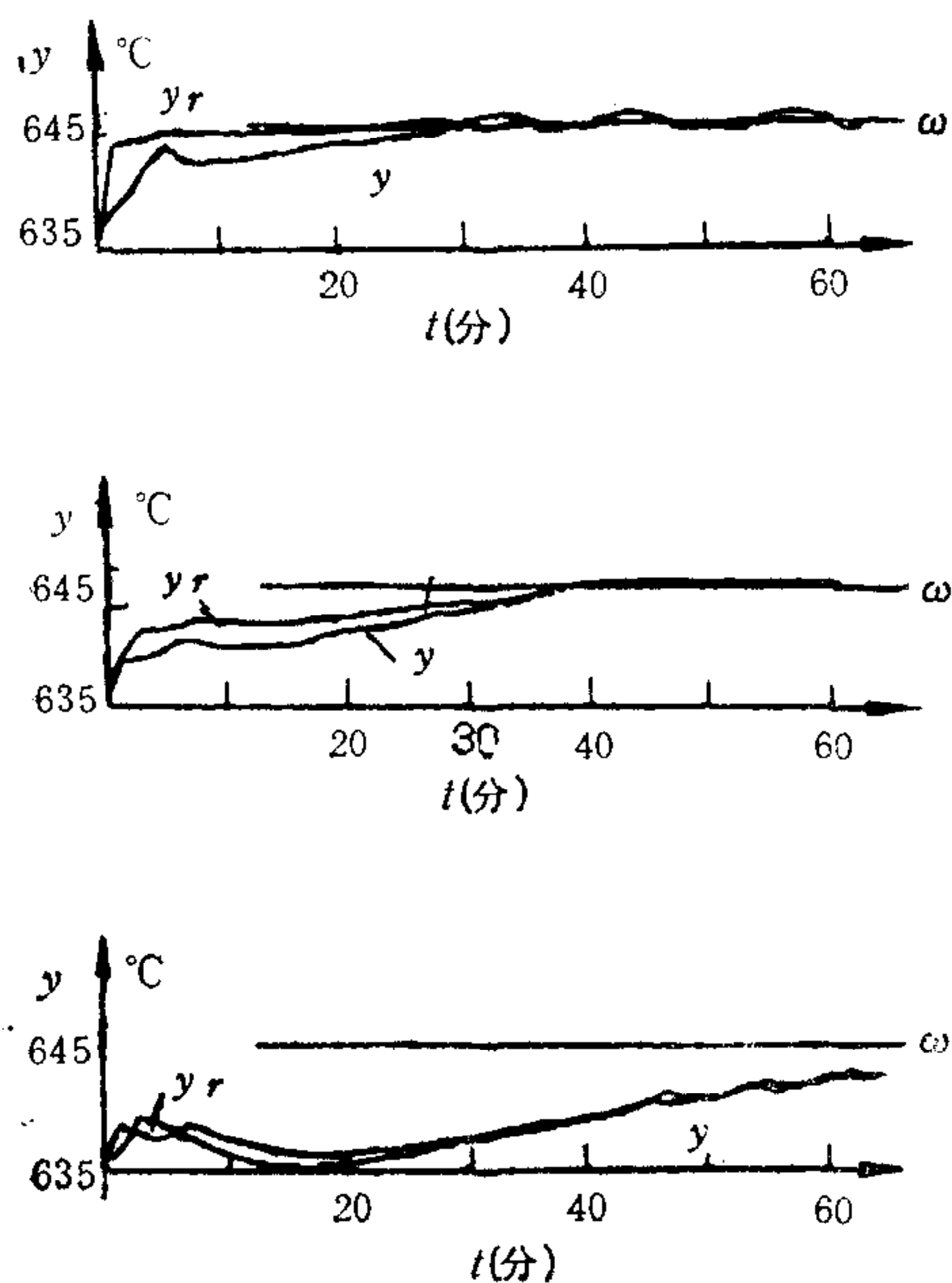
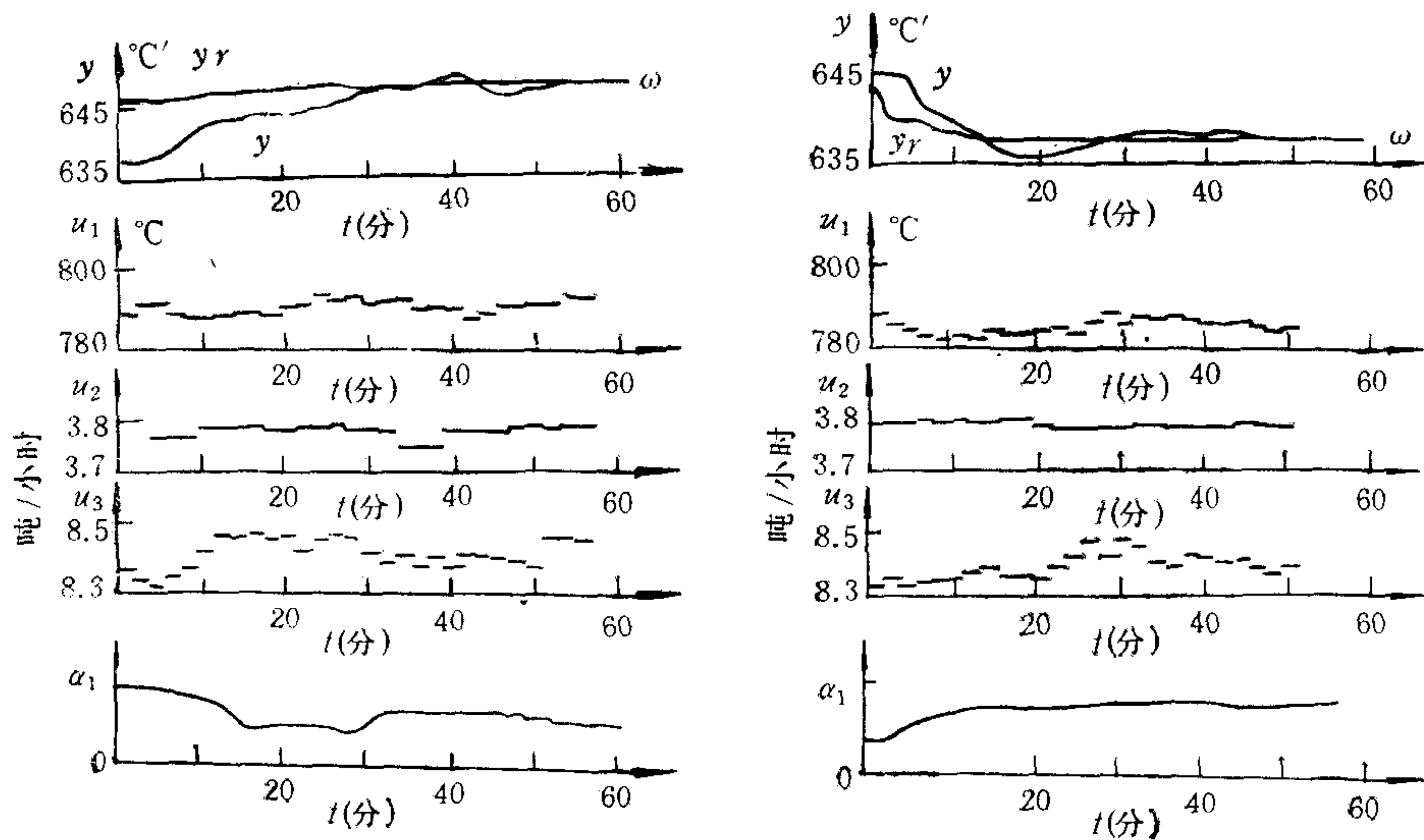


图 4  $\omega$  增加  $10^{\circ}\text{C}$  仿真结果 ( $\alpha = 0.15$ (上),  $\alpha = 0.6$ (中),  $\alpha = 0.9$ (下))

图 5 变  $\alpha$  控制性能

善。

本文介绍的控制系統,经过一段时间的运行,取得了明显的经济效益。已通过了中国石化总公司组织的专家鉴定。

### 参 考 文 献

- [1] Richalet, J., et al., Model Predictive Heuristic Control, Application to Industrial Process, *Automatic*, **14** (1978), 413—428.
- [2] Rouhani, R., Mehra, P. K., Model Algorithm Control(MAC), Basic Theoretical Properties, *Automatic*, **18** (1982), 404—414.
- [3] Cutler, C. R., Remaker, B. L., Dynamic Matrix Control, A computer control Algorithm, Proc. JACC, San Francisco, Wp5-b, 1980.
- [4] Clarke, D. W., et al., Generalized Predictive Control—Part I: the Basic Algorithm, *Automatic*, **23** (1987), 137—148.
- [5] Clarke, D. W., et al., Generalized Predictive Control—Part II: Extension and Interpretation, *Automatic*, **23**(1987), 149—160.
- [6] 吴坚刚、张素贞、蒋慰孙,乙苯脱氢反应器系统的优化控制,华东化工学院学报,**12**(1986).
- [7] 邓自立、郭一新,动态系统分析及应用—建模,滤波,预报,控制的新方法和程序库,辽宁科学技术出版社,沈阳,1985.

# GENERALIZED PREDICTIVE CONTROL OF ETHYLBENZENE DEHYDROGENATION REACTOR SYSTEM

Wu Jiangan    Liu Renhua

*(Shanghai Gao-Qiao Chemical Works)*

Zhang Suzhen

*(Research Center of Automatic Control of East China University of Chemical Technology)*

## ABSTRACT

This paper presents the development of a generalized MISO (multiple input and single output) predictive control algorithm for an ethylbenzene dehydrogenation reactor control. Derivation of the algorithm will be given and the effect of parameter changes to the control performance will be discussed. Meantime, the system behavior under disturbances will also be presented. It has been shown that this algorithm is simple, straightforward and effective.

**Key words:** Predictive control; chemical reactor.