

大型炼油蒸馏塔的多输入预报自校正控制

赵宏 顾钟文 周春晖 黄炳辉等¹⁾

(浙江大学)

(上海高桥石化公司炼油厂)

摘 要

本文针对一个大型炼油蒸馏塔的控制,设计了一种适用于具有多个确定性扰动对象的多输入预报自校正控制器,其特点是综合了在线辨识、多输入前馈、最小方差和 PI 规律各自的优点,并采用变遗忘因子的最小二乘估计算法在线修正参数,使控制器的收敛性、稳定性与自适应能力较一般自校正控制器大为提高。实践表明,该控制器很好地克服了生产中的干扰和波动,平稳了操作,成功地实现了对蒸馏塔的产品质量控制。

一、引 言

在化工、炼油生产过程中,多扰动、时变、非线性等对象是普遍存在的。在某些场合用常规的单回路或串级控制往往难以获得令人满意的控制效果,大型炼油蒸馏塔的控制就是典型的一例。大型蒸馏塔是多种进料、多个组份的,并且温度、组份、压力各参数之间相互关联,还会有使过程呈现明显时变特性的干扰。这一切使得其产品质量控制较为困难。本文在设计适用于多种干扰、克服时变及非线性从而更符合工业生产需要的控制器方面进行了一定的探索。

二、蒸馏塔的工艺分析及控制策略

控制对象是炼油厂常压蒸馏装置中的初馏塔,如图 1 所示。塔内十三层塔盘,一路进料,三路出料,塔顶产品为轻汽油,侧线产品为后续常压塔的中部进料。两者均有质量要求,而后者对常压塔产品航空煤油的质量影响极大。为此,对该侧线产品的质量要求严格控制。

该塔为原油加工的前站,干扰多、波动大,进料、塔顶压力、原油成份尤其是含水量等都会严重影响产品的质量。此外,蒸馏塔本身具有明显的非线性,原油含水量变化时过程还呈现出严重的时变特性。对这样一个复杂对象,根据操作经验和现场测试,确定了以下主要变量:

被控变量: 取侧线产品的温度,以此可保证侧线及塔顶产品的质量。

控制变量: 塔顶回流量。

本文于 1986 年 12 月 4 日收到。

1) 参加该项工作的还有上海高桥石化公司炼油厂陈家中、王载棠、周伯敏、潘衍春、许永令等同志。

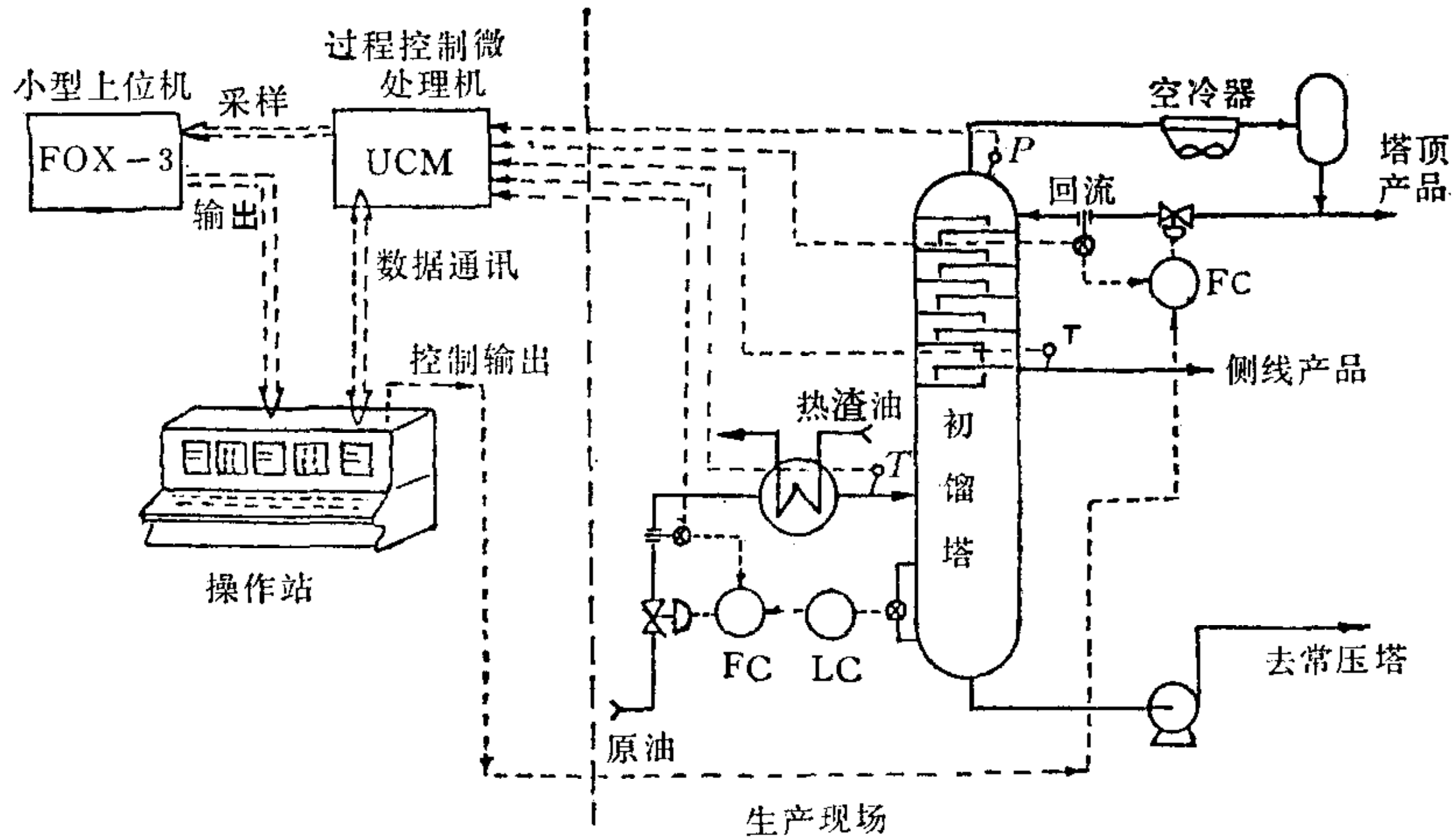


图1 蒸馏塔及计算机控制系统

干扰变量: 1) 进料热焓(用温度与流量的乘积表示); 2) 塔顶压力。

对于一些次要干扰,大多间接通过上述两种主要干扰反映,其余可作为随机扰动。这样,过程可用一个简化后的三输入单输出 MISO 系统描述,如图2所示。

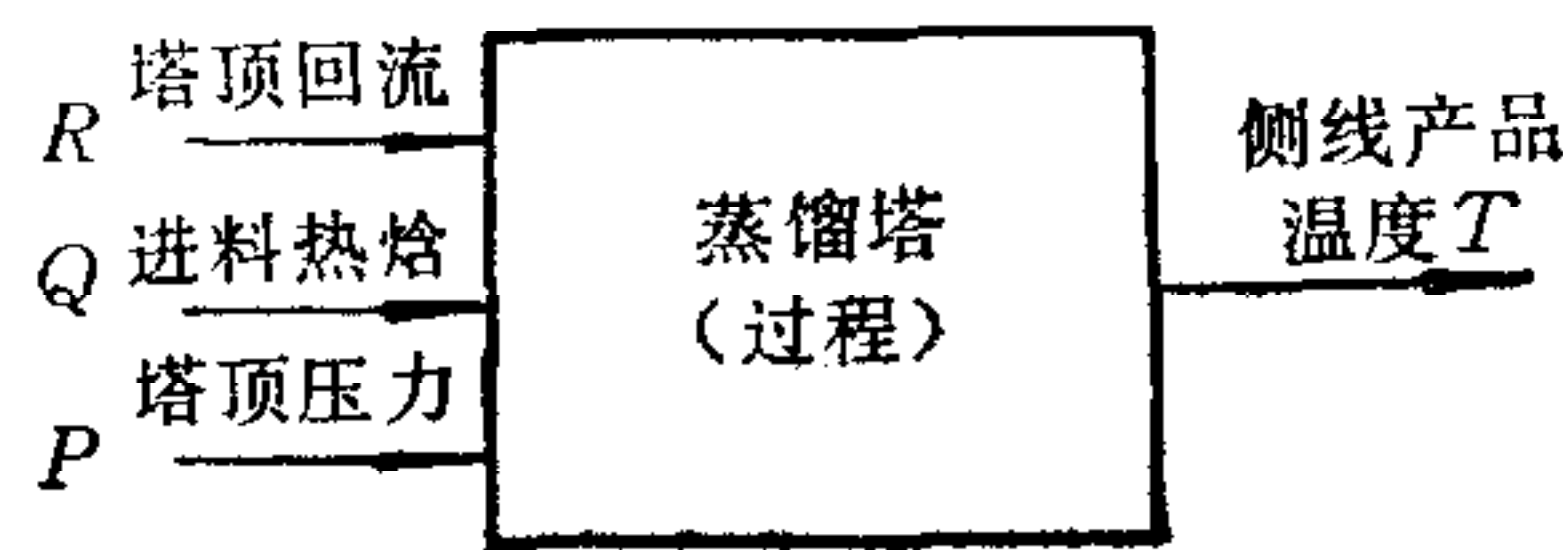


图2 过程简化示意图

对控制策略作以下考虑:

- 1) 用自校正控制原理,通过在线估计和修正参数,克服对象的非线性与时变。
- 2) 过程中有两个主要可测干扰,应设法补偿。
- 3) 出于实际生产的需要,必须使控制系统保持足够的稳定,不允许出现过于猛烈的校正作用,系统不许有余差。

为满足上述要求,给出如下新型自校正控制器。

三、控制器设计

1. 多输入预报

为对可测扰动进行有效补偿,预报模型采用多输入形式,设过程由以下 MISO 模型描述:

$$A(z^{-1})y(k) = z^{-l_0}B_0(z^{-1})u_0(k) + z^{-l_1}B_1(z^{-1})u_1(k) + \dots + z^{-l_m}B_m(z^{-1})u_m(k) + C(z^{-1})\xi(k). \quad (1)$$

式中

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n};$$

$$B_i(z^{-1}) = b_{i1}z^{-1} + b_{i2}z^{-2} + \cdots + b_{in}z^{-n}, \quad (i = 0, 1, 2, \cdots, m);$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + \cdots + c_nz^{-n};$$

l_i 为各通道纯迟后; $\{\xi(k)\}$ 为零均值白噪声序列; $C(z^{-1})$ 为稳定多项式.

根据自校正预报原理^[1], 设性能指标

$$J_p = E\{[y(k+l_0+1) - \hat{y}(k+l_0+1/k)]^2\}. \quad (2)$$

引入
$$z^{l_0+1} \frac{C(z^{-1})}{A(z^{-1})} \xi(k) = z^{l_0+1} F(z^{-1}) \xi(k) + \frac{G(z^{-1})}{A(z^{-1})} \xi(k). \quad (3)$$

其中 $F(z^{-1}) = 1 + f_1z^{-1} + \cdots + f_{l_0}z^{-l_0}$; $G(z^{-1}) = g_0 + g_1z^{-1} + \cdots + g_{n-1}z^{-n+1}$.

由(1),(2),(3)式可导出最优预报方程

$$C(z^{-1})\hat{y}(k+l_0+1/k) = G(z^{-1})y(k) + B_0(z^{-1})F(z^{-1})zu_0(k) + \sum_{i=1}^m B_i(z^{-1})F(z^{-1})zu_i(k+l_0-l_i). \quad (4)$$

并有
$$y(k+l_0+1) = \hat{y}(k+l_0+1/k) + \varepsilon(k+l_0+1/k). \quad (5)$$

式中
$$\varepsilon(k+l_0+1/k) = F(z^{-1})\xi(k+l_0+1).$$

2. 控制算法

为避免控制器产生过于猛烈的校正作用, 取广义最小方差^[2]为性能指标

$$J_c = E\{[y(k+l_0+1) - w(k+l_0+1)]^2 + [\lambda'u_0(k)]^2\}. \quad (6)$$

式中 $\{w(k)\}$ 为设定值序列; λ' 为控制权因子.

由(4),(5),(6)式可得到广义最小方差控制律

$$\hat{y}(k+l_0+1/k) + \lambda u_0(k) - w(k+l_0+1) = 0. \quad (7)$$

为消除余差, 再串联一 PI 环节

$$G_{PI}(z^{-1}) = \frac{u'_0(k)}{u_0(k)} = 1 + \frac{\alpha}{z-1} = \frac{1 - (1-\alpha)z^{-1}}{1 - z^{-1}}. \quad (8)$$

则有
$$u'_0(k) = u'_0(k-1) + [u_0(k) - (1-\alpha)u_0(k-1)], \quad (0 \leq \alpha \leq 1). \quad (9)$$

式中 α 为可调积分因子; u'_0 为控制器输出.

3. 变遗忘因子的最小二乘参数估计算法

为在线辨识多输入预报模型各参数, 将(4)式改写为以下形式:

$$\hat{y}(k+l_0+1/k) = G(z^{-1})y(k) + H(z^{-1})u'_0(k) + \sum_{i=1}^m D_i(z^{-1})u_i(k+l_0-l_i) + L(z^{-1})\hat{y}(k+l_0/k-1). \quad (10)$$

式中 $H(z^{-1}) = zB_0(z^{-1})F(z^{-1}) = h_0 + h_1z^{-1} + \cdots + h_\mu z^{-\mu}$, ($\mu = n + l_0 - 1$);

$D_i(z^{-1}) = zB_i(z^{-1})F(z^{-1}) = d_{i0} + d_{i1}z^{-1} + \cdots + d_{i\nu}z^{-\nu}$; ($i = 1, \cdots, m$; $\nu = n + l_0 - 1$);

$$L(z^{-1}) = z - zC(z^{-1}).$$

定义参数向量

$$\theta^T(k) = [g_0, g_1, \cdots, g_{n-1}; h_0, h_1, \cdots, h_\mu; d_{10}, d_{11}, \cdots, d_{1\nu}; \cdots; d_{i0}, d_{i1}, \cdots, d_{i\nu}; \cdots; d_{m0}, d_{m1}, \cdots, d_{m\nu}]. \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \phi^T(k) = & [y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1); u'_0(k), u'_0(k-1), \dots, \\ & u'_0(k-\mu); u_1(k+l_0-l_1), u_1(k+l_0-l_1-1), \dots, \\ & u_1(k+l_0-l_1-\nu); \dots; u_i(k+l_0-l_i), u_i(k+l_0-l_i-1), \dots, \\ & u_i(k+l_0-l_i-\nu); \dots; u_m(k+l_0-l_m), u_m(k+l_0-l_m-1), \dots, \\ & u_m(k+l_0-l_m-\nu)]. \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{则有} \quad \hat{y}(k+l_0+1/k) = \phi^T(k)\theta(k) + L(z^{-1})\hat{y}(k+l_0/k-1). \quad (13)$$

为简化起见, 经验证明在实际对象上可以设 $C(z^{-1}) = 1$. 于是

$$\hat{y}(k+l_0+1/k) = \phi^T(k)\theta(k). \quad (14)$$

应用最小二乘递推估计, 一般算式如下:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{P(k-1)\phi(k-l_0-1)[y(k) - \phi^T(k-l_0-1)\hat{\theta}(k-1)]}{\beta + \phi^T(k-l_0-1)P(k-1)\phi(k-l_0-1)} \quad (15)$$

$$P(k) = \frac{1}{\beta} \left\{ P(k-1) - \frac{P(k-1)\phi(k-l_0-1)\phi^T(k-l_0-1)P(k-1)}{\beta + \phi^T(k-l_0-1)P(k-1)\phi(k-l_0-1)} \right\}. \quad (16)$$

式中 $\beta \leq 1$ 为遗忘因子.

该算法在应用中存在以下问题: 1) 系统为多输入情况时, 参数向量及方差阵的维数的增加, 使其在工况平稳情况下易出现数据病态, 导致递推发散. 2) β 的选择存在矛盾: β 取值大, 可提高收敛性, 但自适应能力下降; 取值小, 增加了参数的时变跟踪能力, 但易导致系统发散和不稳定. 由(15), (16)式可知, 当系统在平稳工况下不被激励时, 假定参数已收敛到了真值, 有

$$y(k) - \phi^T(k-l-1)\hat{\theta}(k-1) = 0. \quad (17)$$

$$P(k-1)\phi(k-l_0-1) = 0. \quad (18)$$

$$\text{从而得} \quad P(k) = P(k-1)/\beta. \quad (19)$$

$$\text{或} \quad P(N) = P(0)/\beta^N. \quad (20)$$

若 $\beta < 1$, 则 $P(N)$ 随时间指数增大, 达到一定程度后若再出现干扰, 便导致系统不稳定.

本文采用变遗忘因子的最小二乘参数估计算法^[3]较好地解决了上述问题. 具体如下:

$$1) \text{ 计算预报值: } \hat{y}(k) = \phi^T(k-l_0-1)\hat{\theta}(k-1). \quad (21)$$

$$2) \text{ 计算模型后验误差: } e(k) = y(k) - \hat{y}(k). \quad (22)$$

3) 计算遗忘因子:

$$\beta(k) = 1 - \left[1 - \frac{\phi^T(k-l_0-1)P(k-1)\phi(k-l_0-1)}{1 + \phi^T(k-l_0-1)P(k-1)\phi(k-l_0-1)} \right] \cdot \frac{e^2(k)}{\gamma}. \quad (23)$$

并判断: 若有 $\beta(k) < \beta_{\min}$, 令 $\beta(k) = \beta_{\min}$.

4) 参数估计及矩阵递推: 仍由(15), (16)式进行.

上述式中 β_{\min} 是防止 $\beta(k)$ 过小而设置的下限值, 其大小可视具体对象和要求确定; γ 是需在实际应用中调整的一个因子, 也由具体对象确定.

由该算法可知, β 随模型后验误差变化: 当 $e(k) \uparrow \rightarrow \beta(k) \downarrow \rightarrow$ 参数修正速度加

快;当 $e(k) \downarrow \rightarrow \beta(k) \uparrow \rightarrow$ 参数修正速度减慢;当 $e(k) \rightarrow 0$ 时, $\beta(k) \rightarrow 1$, 参数修正量为零并使: $P(k) = P(k-1)$, 限制了 $P(k)$ 增大, 保证了系统稳定.

以上分析表明, 该算法能同时满足适应性与稳定性要求, 进一步改善了整个控制器的自适应能力.

四、蒸馏塔控制的实现及结果

1. 系统实现

用 PRBS 输入辨识得到蒸馏塔有关参数如下: 采样周期 $t_s = 0.5$ 分条件下的离散模型参数为 $n = 2, l_R = 2, l_Q = 3, l_P = 2$. 应用前述各结果, 有以下预报模型:

$$\begin{aligned} \hat{T}(k+3) = & g_0 T(k) + g_1 T(k-1) + h_0 R(k) + h_1 R(k-1) + h_2 R(k-2) \\ & + h_3 R(k-3) + d_{10} Q(k-1) + d_{11} Q(k-2) + d_{12} Q(k-3) \\ & + d_{13} Q(k-4) + d_{20} P(k) + d_{21} P(k-1) + d_{22} P(k-2) \\ & + d_{23} P(k-3). \end{aligned} \quad (24)$$

式中 $\{T(k)\}, \{R(k)\}, \{Q(k)\}, \{P(k)\}$ 分别为产品温度、回流流量、进料热焓、塔顶压力的观测序列.

$$\text{控制律:} \quad \hat{T}(k+3) + \lambda R(k) - T_s(k+3) = 0 \quad (25)$$

$$\text{及} \quad R'(k) = G_{PI}(z^{-1})R(k). \quad (26)$$

其中 $T_s(k+3)$ 是设定值; λ 是控制权因子.

参数估计由前述变遗忘因子的最小二乘算法完成, 整个控制系统通过过程计算机 FOX-3 在实际生产中实现(如图 1 所示), 共使用过程 BASIC 语言程序 180 条, 占用内存约 2.5K, 每个循环所需执行时间为 2 秒.

2. 试验考核及结果

该控制系统投入使用后, 进行了不同的扰动试验, 结果如下:

1) 一般工况下的控制效果. 如图 3 所示, 当过程中出现一些中小程度的干扰时(例如进料温度变化 4—5°C), 该系统能很好地将侧线产品温度控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 范围内, 并且系统不存在余差, 有效地保证了产品质量.

2) 人为扰动下的控制效果. 图 4(a), (b) 分别记录了塔压和进料人为施加扰动时的控制效果. 塔压波动 0.1 kg/cm^2 (20%) 时, 被控温度最大超调量为 3.5°C ; 进料扰动 5%

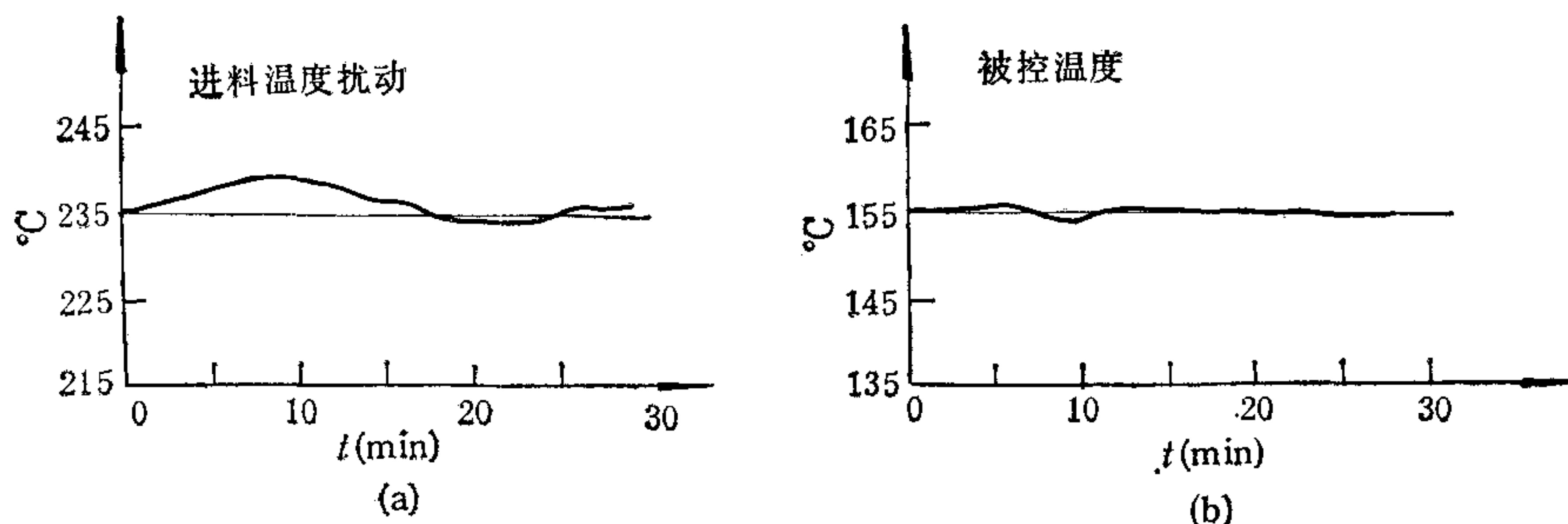


图 3 一般工况下的控制效果

时,被控温度最大超调量为 4℃. 对于处理量 8000 吨/日原油的大型蒸馏塔,该结果已较为理想.

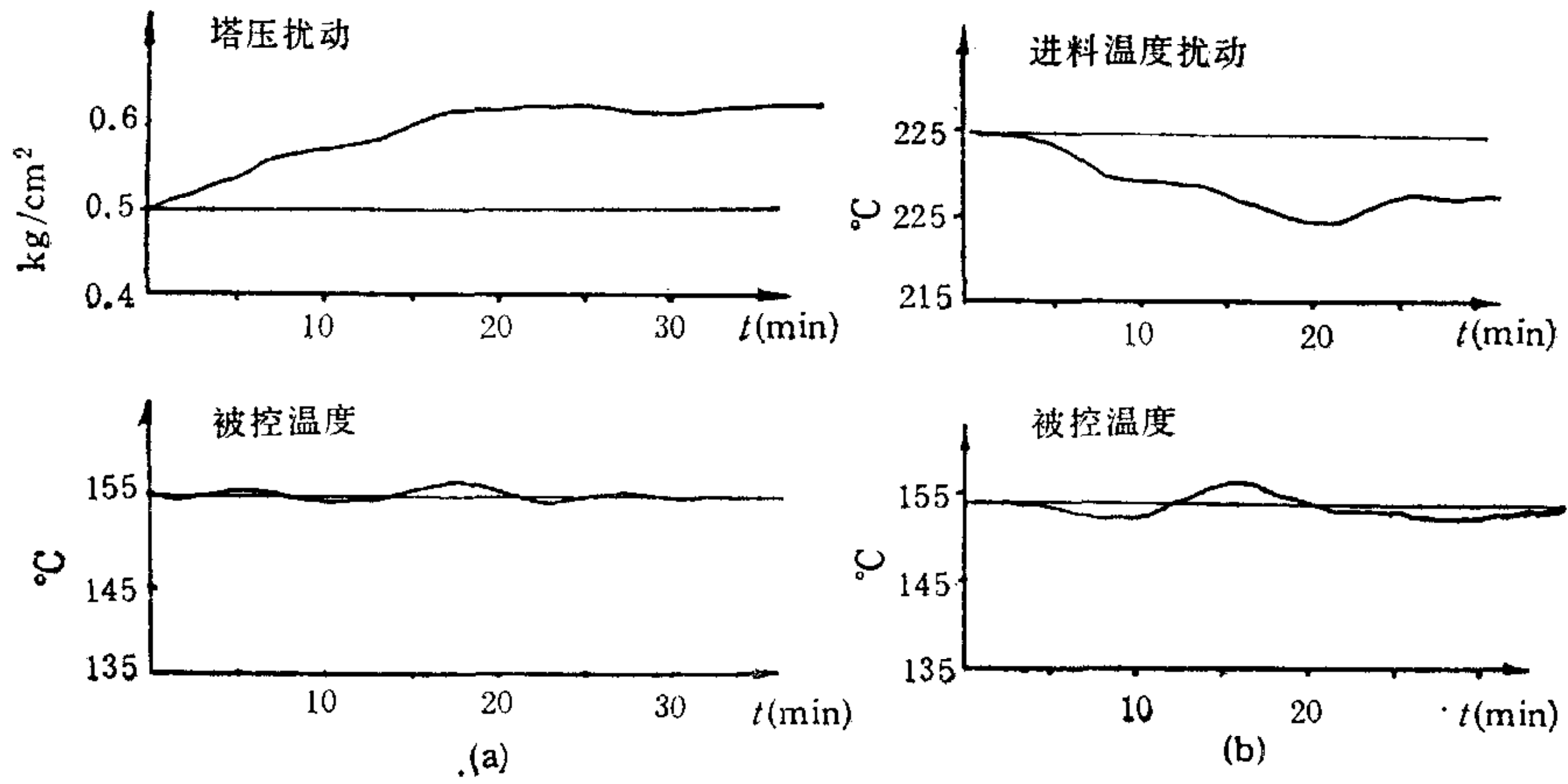


图 4 人为扰动下的控制效果

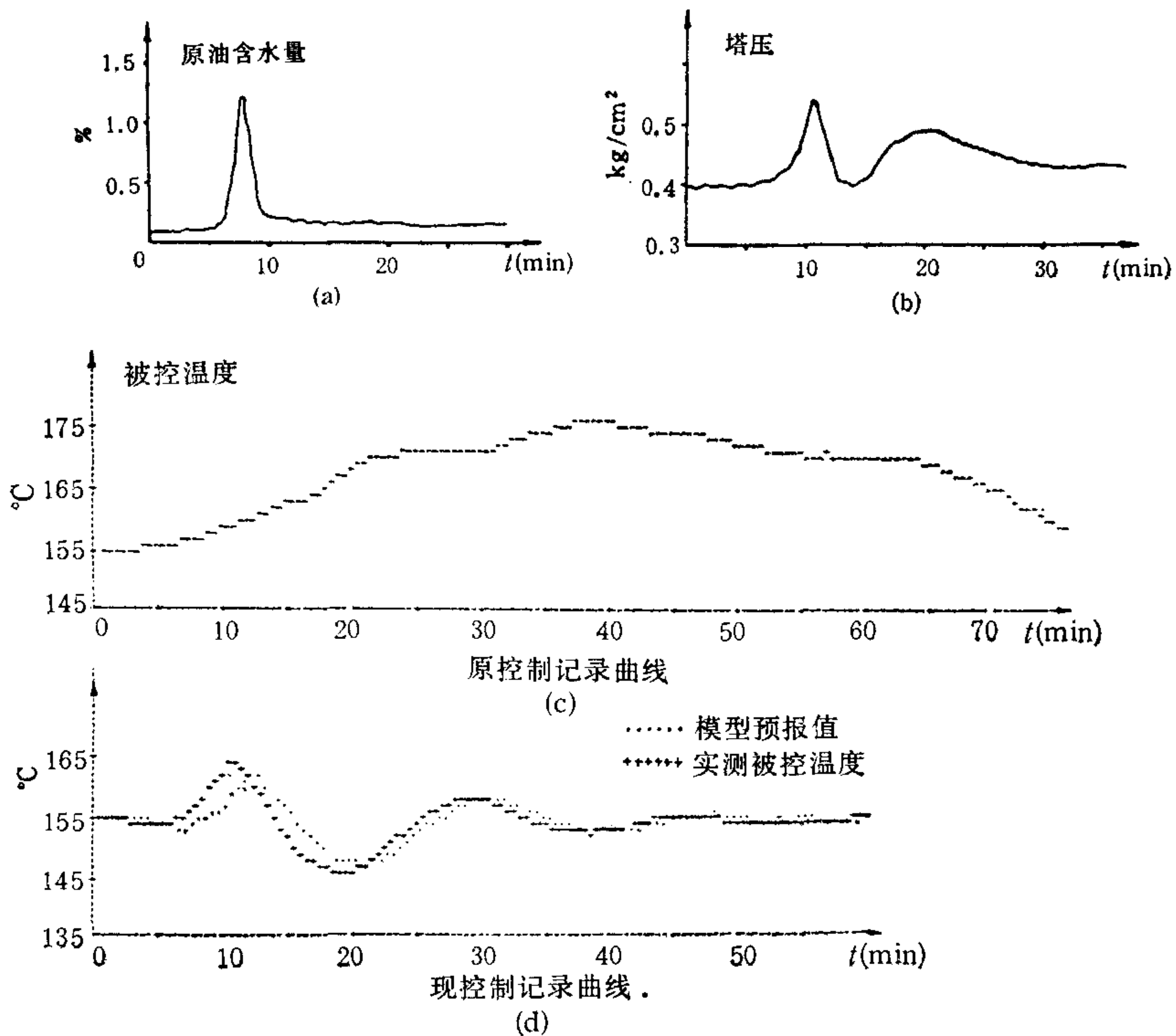


图 5 原油贮罐切换过程中的控制效果

3) 原油贮罐切换过程的控制效果. 原油贮罐切换时,由于原油含水量的明显扰动,引起塔压急剧变化(如图 5(a),(b)记录曲线所示). 由此往往会造成产品的不合格,并给后续常压塔带来巨大扰动. 从图 5(c),(d)所示自校正控制实现前后两种不同控制方案下的记录曲线,清楚地看到被控温度的最大波动幅度从原来的 16℃降为 8℃,恢复时

间从原来的 82 分钟缩短至 26 分钟,明显改善了控制品质,减小了因原油换罐对产品质量的影响。据操作人员反映,使用该控制系统后,原油换罐过程一般不再需人工干预便可保证产品质量合格。

从图 5(d) 中还可以发现模型的自适应跟踪情况。在含水量突变之后,预报模型出现了较明显的预报误差,但十几步递推之后,预报值重新与实测值相重合,表现出了较强的自适应能力。此外,原油处理量在 5000—8500 吨/日之间大幅度升降量过程中,系统也表现出了良好的控制特性,确保了产品质量。

结 束 语

通过一系列人为扰动试验和较长时间的实际应用考核,表明本文设计的多输入预报自校正控制器具有较强的抗干扰能力和自适应能力,较一般自校正控制器更符合工业生产的实际需要,该控制器在大型蒸馏塔上的应用,取得了良好的实际效果和经济效益。

参 考 文 献

- [1] 卢桂章,现代控制理论基础(下册)——滤波及适应控制系统,化学工业出版社(1982年),296—309.
- [2] Clarke, D. W. and Gawthrop, P. J., Self-tuning Controller. PROC. IEE., **122**(1975), 929—934.
- [3] Fortescue, T. R., Kershenbaum, L. S. and Ydstie, B. E., Implementation of Self-tuning Regulators with Variable Forgetting Factors, *Automatica*, **17**(1981), 831—835.

MULTI-INPUT PREDICTION SELF-TUNING CONTROL OF A LARGE CRUDE DISTILLATION COLUMN

ZHAO HONG GU ZHONGWEN ZHOU CHUNHUI
(Zhejiang University)

HUANG BINGHUI ET AL.
(Shanghai Oil Refinery)

ABSTRACT

In solving the control problem of a large crude distillation column, a multi-input prediction self-tuning controller which can be used to a process with multi-disturbance, has been designed. The advantages of on-line identification, multi-input feedforward, minimum variance and PI control law are considered in the design of the controller. A least-square estimator with variable forgetting factor is used for the revision of its parameters. Hence, the controller is better than an ordinary self-tuning one in convergency, stability and adaptivity. The quality control of the distillation column is successfully realized. Results show that the controller has effectively overcome the disturbances in production, smoothed the operation and brought in a notable economic profit.