

## 研究论文

## 催化裂化提升管反应器不可测输入的在线观测

江青茵 曹志凯

(厦门大学化工系, 福建 厦门 361005)

陈紫鸾 陈喜亮 邓铭波 王成林

(中国石油化工集团公司广州分公司, 广东 广州 510726)

**摘 要** 在非线形系统观测理论上给出满足一定条件的不可测输入可观性的简化充分性条件, 在此基础上分析催化裂化提升管反应器(FCCU)不可测输入的可观测条件, 提出一更为有效的观测方案, 给出仿真结果和工业运行结果.

**关键词** 催化裂化装置 非线性系统 观测器 不可测输入

**中图分类号** TEY 624.41

**文献标识码** A

**文章编号** 0438 - 1157(2003)02 - 0204 - 05

## ONLINE OBSERVATION FOR UNMEASURABLE INPUTS IN FCCU RISER

JIANG Qingyin and CAO Zhikai

(Department of Chemical Engineering,  
Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

CHEN Ziluan, CHEN Xiliang,

DENG Mingbo and WANG Chenglin

(China Petroleum & Chemical Corporation  
Guangzhou Branch, Guangzhou 510726, Guangdong, China)

**Abstract** On-line optimizing control of FCCU has been considered as a very important work. Although there have been so many studies on this topic but the practical application results are not so ideal. This is due to essentially that the process is very complicated so there exist some key input variables which affect the reaction and cannot be measured on-line. This is the bottleneck of optimization.

This paper discusses the problem of on-line observation of unmeasurable variables in nonlinear systems such as FCCU. Based on the theory of nonlinear observers, a simplified sufficient condition under certain conditions is presented to confirm the observability of the unmeasurable inputs in these systems. Based on it, the observable condition for the unmeasurable inputs in the riser of FCCU is discussed and a more available on-line observation method for these variables is put forward. Simulation results and industrial running results are also given.

**Keywords** FCCU, nonlinear system, observers, unmeasurable inputs

### 引 言

催化裂化的计算机在线优化控制历来为人们所重视. 虽然已有许多研究, 但实际应用结果多不理想. 一个重要原因是该过程为复杂的反应过程, 不少对全装置操作和优化起关键作用的变量不能在线连续测量, 形成在线优化的瓶颈.

像催化裂化这样的多变量非线性系统, 一般可用下述非线性状态方程描述

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= F[x(t), u(t), v(t)] \\ y(t) &= H[x(t)] \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $x(t) \in R^n$  为状态变量,  $y(t) \in R^m$  为系统可测输出,  $u(t) \in R^d$  为系统可测输入,  $v(t) \in R^q$  为系统的不可测输入. 注意到不少化工过程同催化裂

2001 - 08 - 02 收到初稿, 2002 - 03 - 25 收到修改稿.

联系人及第一作者: 江青茵, 女, 46 岁, 硕士, 副教授.

Received date: 2001 - 08 - 02.

Corresponding author: JIANG Qingyin.

化一样, 由于缺乏在线分析等手段, 对过程有很大影响的原料成分等输入量往往不能实测, 因此, 描述系统的式 (1) 具有普遍意义。

不可测输入的存在, 使在线的控制与优化变得困难, 因此人们一直试图用状态观测器等软仪表方法来观测不可测输入; 如文献 [1] 讨论了基于线性模型的催化剂循环量的观测, 文献 [2, 3] 讨论催化裂化分馏部分的观测问题。虽然将非线性模型在工作点线性化是一种较传统的方法, 但对催化裂化这样的复杂过程, 因原料不统一, 工作点也经常变化, 线性化方法误差较大, 因此直接采用非线性模型构造观测器是较适用的。

有关非线性观测器的构造方法已有了大量的讨论, 但本文首先关心的是此类系统的不可测输入是否可观测, 即式 (1) 系统关于  $v(t)$  的逆系统是否存在, 由于非线性系统的复杂性, 在某个特定工作点方程有解并不意味着在所有条件下均有解; 因此对优化系统的工程化实现来说, 事先了解不可测输入的可观测条件十分重要。有关线性系统不可测输入的可观测条件, 已有了较为成熟的理论与方法<sup>[1]</sup>, 但对于式 (1) 给出的非线性系统, 尚未见到详细的论证, 如文献 [2] 给出一种结构判别方法, 将线性系统的可观条件直接推广到非线性系统, 但未给出严格的证明。

本文将参照文献 [4] 给出的非线性观测条件, 论证式 (1) 系统的不可测输入的可观测条件, 在此基础上讨论催化裂化提升管反应器不可测量的在线观测问题; 给出观测方案、实现条件和结果。

### 1 不可测输入可观测条件

参照文献 [1], 为构造不可测输入  $v(t)$  的观测器, 首先需将  $v(t)$  扩充为系统的状态变量。设  $v(t)$  为非线性函数, 可用时间多项式来逼近, 即有

$$v(t) = v_0 + v_1 t + v_2 t^2 + \dots + v_{p-1} t^{p-1} \quad (2)$$

令扩展状态

$$\begin{aligned} x_{v,0} &= v(t) = v_0 + v_1 t + v_2 t^2 + \dots + v_{p-1} t^{p-1} \\ x_{v,1} &= \dot{x}_{v,0} = v_1 + 2v_2 t + \dots + (p-1)v_{p-1} t^{p-2} \\ &\dots \\ x_{v,p-1} &= \dot{x}_{v,p-2} = (p-1)! v_{p-1} \\ \dot{x}_{v,p-1} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

则  $v(t)$  扩展状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_v(t) = E x_v \\ v(t) = L x_v \end{cases} \quad (4)$$

式中

$$x_v = \begin{bmatrix} x_{v,0} \\ x_{v,1} \\ \dots \\ x_{v,p-1} \end{bmatrix} \quad R^{pq}, \text{ 其初值 } x_v(t_0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ (p-1)! \end{bmatrix}_{p-1}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & I_{(p-1)q} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad L = [I_q \quad 0]$$

该子系统可与原系统状态模型组成下述增广系统

$$\dot{x}^* = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(x, u, Lx_v) \\ E x_v \end{bmatrix} = F^*(x^*, u) \quad (5)$$

$$y = [H(x) \quad 0] = H^*(x^*)$$

式中  $x^* \in R^{n+pq}$ ,  $y \in R^m$ ,  $x_v \in R^{pq}$ ,  $u \in R^d$ 。

注意到扩展状态初值  $x_v(t_0)$  由  $v(t)$  的逼近式 (2) 中的系数向量组成, 由文献 [4], 系统局部可观指存在  $t_1$ , 在时间  $t \in [t_0, t_1]$  内可通过可测输入  $u(t)$  和可测输出  $y(t)$  在增广系统的初始状态  $x_0^* = \begin{bmatrix} x(t_0) \\ x_v(t_0) \end{bmatrix}$  的邻域  $X_0^*$  内确定该初始状态, 故为准确估计  $v(t)$ , 系统 (5) 应满足局部可观条件。

非线性系统可观性判别问题颇为复杂, 很难给出像线性系统那样的全局条件, 文献 [4] 给出了一充分判据, 根据文献 [4], 系统 (5) 局部可观的充分条件是

$$\text{rank} \left\{ Q = \frac{\partial}{\partial x^*} \begin{bmatrix} y \\ \frac{dy}{dt} \\ \dots \\ \frac{d^{n+pq-1}y}{dt^{n+pq-1}} \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} N^0 \\ N^1 \\ \dots \\ N^{n+pq-1} \end{bmatrix} = n + pq \quad \forall x^* \in X_0^* \quad (6)$$

式中  $N^k = \frac{\partial}{\partial x^*} \left( \frac{d^k y}{dt^k} \right)$ ,  $(\cdot)$  表示向量 (矩阵)

的转置。不难验证  $N^k = \frac{dN^{k-1}}{dt} + N^{k-1} \frac{\partial F^*}{\partial x^*}$ ,  $N^0 = \frac{\partial H^*}{\partial x^*}$ 。若  $X_0^*$  的范围足够大, 也可保证系统在相应范围内可观, 但这样由式 (6) 不容易判断; 下面给出满足一定条件的简化判据。

定理 1 (不可测输入可观充分条件): 若系

统 (1) 的输出方程为  $y = x$ , 并对  $\forall x^* \quad X_0^*$  有  $\text{rank} \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial v} \end{bmatrix} = q$  成立, 则增广系统 (5) 在  $X_0^*$  范围内可观测.

证明 在给定条件下, 有

$$N^0 = [I_n \quad 0_{n \times pq}] \frac{\partial F^*}{\partial x^*} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial x} & \frac{\partial F}{\partial v} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & I_q & & \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \\ \dots & \dots & \ddots & \ddots & I_q \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}_{(n+pq) \times (n+pq)} \quad (7)$$

这样有

$$N^1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial x} & \frac{\partial F}{\partial v} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$N^2 = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial x} & \frac{\partial F}{\partial v} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial x} & \frac{\partial F}{\partial v} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \frac{\partial F^*}{\partial x^*}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^2 \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial F}{\partial v} \right) + \frac{\partial F}{\partial x} \frac{\partial F}{\partial v} \frac{\partial F}{\partial v} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} I_n & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \frac{\partial F}{\partial x} & \frac{\partial F}{\partial v} & \dots & \dots & 0 \\ T_{2,1} + \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^2 & T_{2,2} + \frac{\partial F}{\partial x} \frac{\partial F}{\partial v} & \frac{\partial F}{\partial v} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{p,1} + \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^p & T_{p,2} + \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^{p-1} \frac{\partial F}{\partial v} & \dots & T_{p,p} + \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right) \frac{\partial F}{\partial v} & \frac{\partial F}{\partial v} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{(n+pq-1),1} + \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^{n+pq-1} & T_{(n+pq-1),2} + \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^{n+pq-2} \frac{\partial F}{\partial v} & \dots & T_{(n+pq-1),p} + \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^{n+pq-p} \frac{\partial F}{\partial v} & T_{(n+pq-1),(p+1)} + \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^{n+pq-p-1} \frac{\partial F}{\partial v} \end{bmatrix}$$

可见, 增广系统可观测条件是由上式给出的矩阵秩  $\text{rank}(Q) = n + pq$ .

在定理 1 的条件中已蕴含条件  $n \quad q$ , 因此 Q

$$M_1 = \begin{bmatrix} I_n & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\partial F}{\partial x} & \frac{\partial F}{\partial v} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ T_{p,1} + \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^p & T_{p,2} + \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^{p-1} \frac{\partial F}{\partial v} & \dots & \frac{\partial F}{\partial v} \end{bmatrix}_{(n+np) \times (n+pq)} \quad (10)$$

$M_1$  为分块下三角阵, 由文献 [5] 有  $\text{rank} M_1 = n + p \times \text{rank} \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial v} \end{bmatrix}$ , 并且  $\text{rank} Q = \max\{\text{rank} M_1, \text{rank} M_2\}$ , 可见由  $\text{rank} \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial v} \end{bmatrix} = q$  必有  $\text{rank} Q = n + pq$ , 增广系统 (5) 可观.

根据定理 1, 在系统 (1)  $y = x$  的条件下, 系统

$$= \begin{bmatrix} T_{2,1} + \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^2 & T_{2,2} + \frac{\partial F}{\partial x} \frac{\partial F}{\partial v} & \frac{\partial F}{\partial v} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ N^i & T_{i,1} + \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^i & T_{i,2} + \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^{i-1} \frac{\partial F}{\partial v} & T_{i,3} + \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^{i-2} \frac{\partial F}{\partial v} & \dots & \dots \end{bmatrix} =$$

式中

$$\begin{cases} T_{i,1} = \frac{d}{dt} T_{(i-1),1} + T_{(i-1),1} \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^{i-1} \right], i \geq 2 \\ T_{i,2} = \frac{d}{dt} T_{(i-1),2} + T_{(i-1),2} \frac{\partial F}{\partial v} + \frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^{i-2} \frac{\partial F}{\partial v} \right], i \geq 2 \\ T_{i,j} = \frac{d}{dt} T_{(i-1),j} + T_{(i-1),j} \frac{\partial F}{\partial v} + \frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)^{i-j} \frac{\partial F}{\partial v} \right], i > 2, 2 < j < i \\ T_{i,j} = 0, i = 1 \text{ or } j > i \end{cases} \quad (9)$$

式 (6) 中的观测矩阵 Q 可写为

阵可分为两个行块, 即  $Q = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix}$

式中

(5) 的可观测性判别简化为有关不可测输入的雅可比矩阵  $\frac{\partial F}{\partial v}$  在给定范围内是否为满列秩阵的判别. 注意到对非线性系统, 式 (6) 仅是充分条件, 定理 1 也仅是充分的. 但若是线性系统的, 则该条件同时是必要的, 且是全局的<sup>[1]</sup>. 这也说明直接将线性系统结论扩展用在非线性系统是有风险的.

### 2 提升管反应器在线观测方案和可观测条件

首先建立提升管反应器机理模型. 因在线软仪表计算要求模型形式尽可能简单, 故采用文献 [6] 中的简化五集总模型; 假设提升管反应器中的油气以活塞流方式推进, 油气组分和催化剂活性沿高度  $z$  变化. 为方便计算, 将提升管分为  $n$  段集中, 设  $S_{t,i} = L_i \rho_{i,i} / \sum_{k=1}^i G_{o,k}$  为每段空时, 每个分段内温度、油气密度一致; 令  $z_i$  为每段的量纲 1 长度. 设  $r_i = G_c / G_{o,i}$  为第  $i$  段的剂油比; 式中  $G_{o,i}$  为第  $i$  段油气质量流量,  $G_c$  为提升管催化剂流量,  $A_i$ 、 $L_i$  分别为提升管第  $i$  段截面积、长度,  $\rho_{i,i}$  为第  $i$  段油气密度.

由物料衡算, 可得每段的未转化率  $Y_i$ 、催化剂碳质量分率  $C_i$  和催化剂活性  $\phi_i$  的方程

$$\frac{dY_i}{dz_i} = -S_{t,i} k_{cr0} e^{-E_{cr}/RT_{r,i}} p_r Y_i \phi_i \quad (11)$$

$$\frac{dC_i}{dz_i} = S_{t,i} k_{C0} e^{-E_c/RT_{r,i}} p_r Y_i \phi_i \quad (12)$$

$$\frac{d\phi_i}{dz_i} = -S_{t,i} k_{d0} e^{-E_c/RT_{r,i}} p_r Y_i \phi_i \quad (13)$$

式中  $T_{r,i}$  为该段温度,  $p_r$  为反应压力 (提升管内压降很小可忽略, 可设压力一致),  $E_{cr}$ 、 $E_c$  分别为裂化反应活化能和碳生成活化能,  $k_{cr0}$ 、 $k_{C0}$ 、 $k_{d0}$  分别为裂化反应、生碳反应、失活反应频率因子, 可用离线估计的方法确定.

对上述方程积分可解得  $C_i$ 、 $Y_i$ 、 $\phi_i$ , 其中  $C_i = f_{C,i}(G_c, T_{r,i}, G_{o,i}, p_r)$ ,  $Y_i = f_{Y,i}(C_i, T_{r,i})$  和  $\phi_i = f_{\phi,i}(C_i)$ ,  $f_{C,i}$ 、 $f_{Y,i}$ 、 $f_{\phi,i}$  均为复杂非线性函数. 函数输入变量中温度、压力和流量可在线实测, 但催化剂循环量  $G_c$  不能实测, 故需解决  $G_c$  的在线观测问题.

$$\frac{\partial F}{\partial v} = \left[ \begin{array}{c} \frac{\partial T_{r,1,0}}{\partial G_c} - \frac{\partial T_{r,1}}{\partial G_c} - \frac{\partial}{\partial G_c} H_{cr} (C_1 - C_0) - {}_1 H_{cr} \left( \frac{\partial C_1}{\partial G_c} - \frac{\partial C_0}{\partial G_c} \right) \\ \frac{\partial T_{r,2,0}}{\partial G_c} - \frac{\partial T_{r,2}}{\partial G_c} - \frac{\partial}{\partial G_c} H_{cr} (C_2 - C_1) - {}_2 H_{cr} \left( \frac{\partial C_2}{\partial G_c} - \frac{\partial C_1}{\partial G_c} \right) \end{array} \right] = \frac{i}{S_c \frac{\partial T_{r,i}}{\partial H_{cr}} S_o} (C_i - C_{i-1})$$

若提升管两段皆有进料, 则  $r_1 > 0$ ,  $r_2 > 0$ , 在  $v(t) > 0$  范围内均有  $\text{rank} \left( \frac{\partial F}{\partial v} \right) = 2 = q$  满足可观测条件. 但若提升管只有一段进料, 则  $r_1 = 0$ ,  $r_2 > 0$ ,  $T_{r,2,0} = T_{r,1}$ , 由于裂化反应往往在进料油气与催化剂接触的瞬间完成, 故有  $C_1 = C_2$ ,  $\frac{\partial T_{r,1}}{\partial G_c} = \frac{\partial T_{r,2}}{\partial G_c}$ 、 $\frac{\partial C_1}{\partial G_c} = \frac{\partial C_2}{\partial G_c}$ .

工艺上常用再生器的热平衡计算  $G_c$ , 但对于实时控制来说, 这种计算存在时间上的滞后, 此外, 由再生器模型计算的实际上是进再生器的催化剂流量, 其结果是否等同提升管中的催化剂流量取决于沉降器的料位控制. 也可根据再阀特性计算  $G_c$ , 但这种计算有一定风险, 因为催化剂流动状况常不稳定, 计算结果也不够稳定. 考虑到  $G_c$  对提升管热平衡影响很大,  $G_c$  的变化迅速反应为提升管温度的变化, 且温度可测, 因此考虑用提升管的热平衡方程来观测  $G_c$ . 对提升管按两段进行热量衡算, 参照文献 [6] 有

$$(1 + r_{1,1}) S_{t,1} \frac{dT_{r,1}}{dt} = T_{r,1,0} - T_{r,1} - \frac{{}_1 H_{cr}}{(S_{c,1} + S_o)} (C_1 - C_0)$$

$$(1 + r_{1,2}) S_{t,2} \frac{dT_{r,2}}{dt} = T_{r,2,0} - T_{r,2} - \frac{{}_2 H_{cr}}{(S_{c,2} + S_o)} (C_2 - C_1) \quad (14)$$

式中  $T_{r,i,0} = f_{T,i}(G_c, T_{r,i-1}, G_{o,i}, T_{f,i})$  为第  $i$  段初始温度 ( $i=1, 2$ ).  $i=1$  时,  $T_{r,0}$  为催化剂温度.  $r_{i,i}$  为第  $i$  段热容校正系数,  $T_{f,i}$  为第  $i$  段进料温度,  $H_{cr}$  为裂化反应热,  $S_o$  为进料比热,  $S_c$  为催化剂比热.

在式 (14) 中, 各温度、压力、进料量等可在线实测, 催化剂含碳量  $C_i$  等反应产物由前述非线性函数  $f_{C,i}$ 、 $f_{Y,i}$ 、 $f_{\phi,i}$  代入, 各段初始温度也是  $G_c$  的复杂函数, 提升管催化剂碳质量分率的初值  $C_0$  即再生后的催化剂碳质量分率, 可由再生器的动态模型在线观测, 因此可视为已知; 但式中裂化热  $H_{cr}$  受原料性质影响很大, 对大多数原料变化频繁的装置不能视为常量, 因而  $v(t) = [G_c \ H_{cr}]$  为该动态系统的不可测输入变量. 下面根据定理 1 分析是否能利用动态方程 (14) 观测该不可测输入.

令  $\left( \frac{\partial C_i}{\partial G_c} - \frac{\partial C_{i-1}}{\partial G_c} \right) = \frac{i}{S_c \frac{\partial T_{r,i}}{\partial H_{cr}} S_o} (C_i - C_{i-1})$ , 则有

$$\frac{\partial C_2}{\partial G_c} \text{和} \frac{\partial T_{r,1}}{\partial H_{cr}} \frac{\partial T_{r,2}}{\partial H_{cr}}, \text{rank} \left( \frac{\partial F}{\partial v} \right) = 1 < q$$

不能保证  $v(t)$  可观测. 注意到将提升管再多分几段, 所得结果也是一样的.

可见, 只有在提升管两段皆有进料条件下才能保证在  $v(t) > 0$  的大范围内均能通过提升管温度

观测  $v(t)$ 。了解这一点很重要，因为国内有相当部分催化裂化装置只有一段进料，在这种情况下，不能确保上述观测方案可行，实施时应增加观测方案，如再生器的热平衡估算等。

### 3 仿真研究

在系统满足可观条件下，可采用滚动优化的方法得到上述不可测输入软仪表的数值解<sup>[7]</sup>。

由于实际变量不可测，故采用计算机仿真验证。令 
$$\begin{cases} G_c(t) = 10^6 \sin 5t + 1500000 \\ H_{cr}(t) = 10^3 \sin 2t + 1500 \end{cases}$$
，软仪表输出  $\bar{v}(t) = [\bar{G}_c \quad \bar{H}_{cr}]$ ，结果如图1所示。仿真结果表明了在系统可观时确能由提升管温度方程(14)较准确地观测该不可测输入。

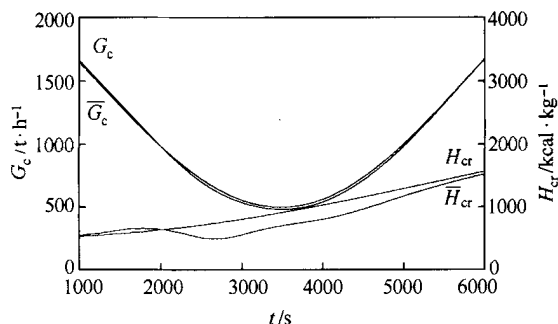


Fig. 1 Simulation results

### 4 工业应用

上述观测方案已在广州炼油厂催化裂化装置上实现，为该装置闭环优化控制系统的重要组成部分。图2为  $G_c$  在线计算结果，其中  $p$ 、 $u_1$  分别为阀压降和开度， $G_c$  为根据方程(14)观测的催化剂循环量， $G_{c,2}$  为再生器热平衡计算的循环量，

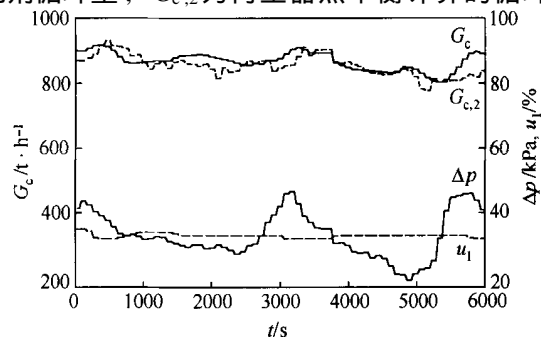


Fig. 2 Online observation results of circulation rate of catalyst  
—  $G_c$ ,  $p$ ; - - -  $G_{c,2}$ ,  $u_1$

可以看到两者趋势基本一致，且同  $p$ 、 $u_1$  的趋势相符，但  $G_{c,2}$  时间滞后较大，不如  $G_c$  反应迅速准确。可见用提升管温度模型观测具有优势。图3为在上述不可测输入观测基础上的反应深度(转化率)在线观测结果， $\bar{Y}_c$  为观测的转化率， $Y_c$  为根据分馏塔实测流量计算的转化率，可以看到： $\bar{Y}_c$  可以相当准确地预报转化率的变化，为在线控制提供了可靠基础。

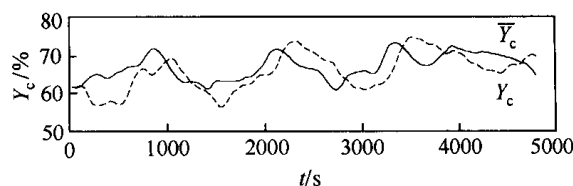


Fig. 3 Online observation results of rate of conversion  
—  $\bar{Y}_c$ ; - - -  $Y_c$

### 5 结论

在非线性系统可观条件基础上给出非线性系统不可测输入的可观测条件。在此基础上讨论催化裂化提升管反应器的在线观测条件和方案。仿真结果和实时运行结果证明了所提方案的可行性。

### References

- Jiang Qingyin (江青茵), Wu Feng (吴峰), Zhou Wei (周蔚). An Approach to Estimate Unmeasurable Input. *Journal of East China Petroleum Institute* (华东石油学院学报), 1986, 10 (4): 1-9
- Cong Songbo (丛松波), Yuan Pu (袁璞), Shen Fu (沈复). Structural Observability and On-Line Performance Calculation of Petroleum Fractionator. *Acta Petroleisinaica (Petroleum Processing Section)* (石油学报 石油加工), 1998, 14 (1): 66-72
- Chen Lingcong (陈玲聪), Yuan Pu (袁璞). Nonlinear Observer and Its Application ( ): Observer for a class of High-dimensional Nonlinear system. *Control and Instruments in Chemical Industry* (化工自动化及仪表), 2001, 28 (1): 9-13
- Zeitz M. The Extended Luenberger Observer for Nonlinear System. *System Control Lett.*, 1987, 9: 149
- Sudano Buhide Matrix Theory in Automatic Control (自动控制中的矩阵理论). Cao Changxiu (曹长修), trans. Beijing: Science Press (科学出版社), 1979
- Zheng Yuanyang (郑远杨), Gao Saoli (高少立), Yuan Pu (袁璞). Dynamic Model of Catalytic Cracking Units ( ): Dynamic Model of the Riser Reactor and Dynamics Parameter Estimation. *Petroleum Processing* (石油炼制), 1986, 17 (2): 23
- Cao Zhikai (曹志凯), Jiang Qingyin (江青茵). Online Continuous Solving of Nonlinear Equation and Its Industrial Applications. *Journal of Xiamen University (Nature Science)* (厦门大学学报自然科学版), 2000, 39 (6): 741-747