

积分加纯滞后系统的双预测 PI 控制及其应用

任正云¹, 张 红², 邵惠鹤³

(1. 东华大学 自动化系, 上海 200051; 2. 上海工程技术大学 化工学院, 上海 200065;

3. 上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

摘要: Smith 预估控制器控制积分加大纯滞后过程时, 鲁棒稳定性差, 输出存在静态余差, 无实际应用价值. 提出了一类基于该过程的双预测 PI 控制器: 具有内环和外环两种预测 PI 控制器. 内环将系统稳定, 外环消除输入干扰的影响和改善控制系统的动态性能. 这种控制器结构简单, 可调参数少, 参数的调节方便、直观. 仿真和实际应用表明: 在干扰和模型失配的情况下, 此类控制器仍然具有良好的控制性能和鲁棒稳定性能, 是一种值得在实际工程中推广应用的新型控制器.

关键词: 双预测 PI(DPPI); 积分加纯滞后; Smith 预估器

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Double predictive PI control for integrator plus time delay processes and its application

REN Zheng-yun¹, ZHANG Hong², SHAO Hui-he³

(1. Department of Automation, Donghua University, Shanghai 200051, China;

2. Institute of Chemical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 200065, China;

3. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Smith predictor results in poor robust stability and steady-state error when it controls the integrator plus time delay process, and cannot be used in practice. To address the problem, a kind of double predictive PI (DPPI) controller for this process is proposed. The DPPI controller is of two kinds of predictive PI controllers, inner loop and outer loop predictive PI controller. The inner one stabilizes process, while the outer one eliminates the steady-state error and improves the control performance. The advantages of this controller include simple structure, few tuning parameters and easy tuning. The simulations and practical application show the good performance and robust stability of DPPI controller under model-process mismatching and disturbances.

Key words: double predictive PI (DPPI); integrator plus time delay; Smith predictor

1 引言(Introduction)

对于积分加纯滞后系统, 运用 Smith 预估器来控制该过程时, 控制性能受模型失配的影响严重, 且在输入干扰存在时, 系统输出存在余差. 一些文献^[1~6]对这一类系统提出了各式各样的控制算法, 但这些算法或多或少存在如下问题: 1) 控制器设计比较复杂, 现场实施困难; 2) 控制器的整定比较烦琐, 参数无直观的物理意义; 3) 对模型失配非常敏感, 鲁棒性能差; 4) 控制器输出振荡比较严重.

Watanabe 和 Ito 提出了主控制器为 PI 或 PID 的预估补偿器方法^[1]. 仿真显示: 主控制器为 PI 时, 闭环响应缓慢和抗干扰能力弱; 主控制器为 PID 时, 闭环响应和抗干扰能力增强了, 但控制器输出出现了

明显的振荡. Astrom-Hang 方法^[2]具有快速的设定跟踪能力和良好的抗干扰特性, 其主要考虑了如何将设定响应和干扰响应进行解耦, 控制器的结构也比较简单. 然而这种控制器参数比较多, 参数没有直观的物理意义, 且没有合适的整定方法.

同样, Zhang 和 Sun^[3]给出了 Astrom-Hang 方法中的补偿器的最小阶形式, 仅有两个参数, 并提供了简单设置参数的方法, 系统的鲁棒稳定性和动态性能直接和此两个参数有关. 这种控制器的缺陷为, 补偿器的结构较为复杂, 阶次较高, 不易实施.

Mantausek 和 Micic^[4]对 Astrom-Hang 方法控制结构略加改进, 同时修改了补偿器的结构, 将其简化为一常数. 这种方法参数少, 结构简单, 参数整定方

便,可以直接根据过程参数进行设定,但抗干扰能力较差.为了提高抗干扰的响应速度,Mantausek 和 Micic 在文献[5]中对补偿器作了进一步的修改,将其改进为一微分环节.但这种控制器在模型失配的情况下,易造成振荡,甚至不稳定.

Chien 和 Peng 等^[6]提出了将设定值通过 PI 环节的一种新型 Smith 预估控制器,这种控制器在模型匹配时和模型失配时均有较好的动态性能和抗干扰能力,唯一的缺陷是在模型失配时,控制器输出发生振荡,不利于实际工程应用.

本文提出了一种针对积分加纯滞后系统的双预测 PI(DPPI)控制器,这种控制器由内环和外环两个预测 PI 控制器叠合而成,而每一个预测 PI 控制器均由二部分组成:PI 控制项和预测控制项.内环预测 PI 控制器将系统闭环为稳定的一阶加纯滞后过程,而外环预测 PI 控制器针对该一阶加纯滞后稳定过程设计而成.这种 DPPI 控制器具有可调参数少,参数有明确的实际意义.

仿真和实际应用结果表明,DPPI 控制器抑制干扰能力强;在模型失配时仍然能够保持良好的控制特性,鲁棒稳定性好;控制作用平滑,振荡小.

2 双预测 PI 控制系统结构(Structure of double predictive PI(DPPI))

考虑具有如下传递函数的积分加纯滞后对象:

$$G'(s) = \frac{K'}{s} e^{-L's}. \quad (1)$$

其中 K', L' 为不确定性参数.

在正常工作状态下,式(1)所对应的标称模型为

$$G(s) = \frac{K}{s} e^{-Ls}. \quad (2)$$

控制器的设计基于对象的标称模型,假设所期望的系统的闭环传递函数规定如下:

$$G_{q1}(s) = \frac{1}{\lambda_1 s + 1} e^{-Ls}. \quad (3)$$

λ_1 为可调参数,其越大所期望的闭环响应速度越慢,反之则越快.因此,控制器的传递函数可由下式来表示:

$$G_{c1}(s) = \frac{s}{K(\lambda_1 s + 1 - e^{-Ls})}. \quad (4)$$

控制器 $G_{c1}(s)$ 的输入输出关系为

$$u_1(s) = \frac{1}{K\lambda_1} e_1(s) - \frac{1 - e^{-Ls}}{\lambda_1 s} u_1(s). \quad (5)$$

$\frac{1}{K\lambda_1} e_1(s)$ 部分具有比例控制器的结构形式,而 $-\frac{1 - e^{-Ls}}{\lambda_1 s} u_1(s)$ 部分可以解释为:在 t 时刻系统的输出预测值是基于在时间区间 $(t - L, t)$ 的控制作用的,尽管这里没有积分作用,为了方便起见,这种控制器被称之为预测 PI 控制器(PPI).

这种控制器有着良好的闭环响应性能和鲁棒稳定性能,但在干扰存在时,设定值和过程输出存在静态余差,没有实际应用的价值.针对这种情况,将上叙整个预测 PI 控制系统视为一个对象,其传递函数同式(3),对该对象设计预测 PI 控制器.假如所期望的闭环传递函数为

$$G_{q2}(s) = \frac{1}{\lambda_2 s + 1} e^{-Ls}. \quad (6)$$

控制器的传递函数可由下式来表示:

$$G_{c2}(s) = \frac{\lambda_1 s + 1}{(\lambda_2 s + 1 - e^{-Ls})}. \quad (7)$$

控制器 $G_{c2}(s)$ 的输入输出关系为

$$u_2(s) = \frac{\lambda_1 s + 1}{\lambda_2 s} e_2(s) - \frac{1 - e^{-Ls}}{\lambda_2 s} u_2(s). \quad (8)$$

从式(8)可以看出, $G_{c2}(s)$ 为典型的预测 PI 控制器,将 $G_{c1}(s)$, $G_{c2}(s)$ 和对象 $G'_p(s)$ 所构成的新型控制系统,称之为双预测 PI 控制系统(DPPI), $G_{c2}(s)$ 为主控制器, $G_{c1}(s)$ 为副控制器,其结构见图 1.

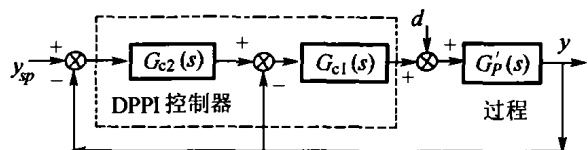


图 1 积分加纯滞后对象双预测 PI 控制系统的结构

Fig. 1 Structure of DPPI control for integrating processes with time delay

系统对设定点 y_{sp} 响应的传递函数为

$$H_r(s) = \frac{G_{c2}(s) G_{c1}(s) G'_p(s)}{1 + G_{c1}(s) G'_p(s) + G_{c2}(s) G_{c1}(s) G'_p(s)}. \quad (9)$$

将式(1), (4), (7)代入式(9)得到

$$H_r(s) = \frac{K'(\lambda_1 s + 1)e^{-L's}}{K[\lambda_1 \lambda_2 s^2 + (\lambda_1 + \lambda_2)s + 1 - \{(\lambda_1 + \lambda_2)s + 2\}e^{-Ls} + e^{-2Ls}] + K'e^{-L's}(\lambda_1 s + \lambda_2 s + 2 - e^{-Ls})}. \quad (10)$$

系统对干扰 d 响应的传递函数为

$$H_d(s) = \frac{G'_p(s)}{1 + G_{cl}(s)G'_p(s) + G_{c2}(s)G_{cl}(s)G'_p(s)} \quad (11)$$

将式(1),(4),(7)代入式(11)得到

$$H_d(s) = \frac{K'K(\lambda_1 s + 1 - e^{-Ls})(\lambda_2 s + 1 - e^{-Ls})e^{-L's}}{s\{K[\lambda_1\lambda_2 s^2 + (\lambda_1 + \lambda_2)s + 1 - \{(\lambda_1 + \lambda_2)s + 2\}e^{-Ls} + e^{-2Ls}] + K'e^{-L's}(\lambda_1 s + \lambda_2 s + 2 - e^{-Ls})\}} \quad (12)$$

且 $\lim_{s \rightarrow 0} H_r(s) = 1, \lim_{s \rightarrow 0} H_d(s) = 0$, 所以系统输出在稳态时不存在余差。

在无模型失配时,即 $K' = K, L' = L$, 系统对设定点和干扰的响应分别为

$$\begin{cases} H_{r0}(s) = \frac{e^{-Ls}}{\lambda_2 s + 1}, \\ H_{d0} = \frac{K(\lambda_1 s + 1 - e^{-Ls})(\lambda_2 s + 1 - e^{-Ls})e^{-Ls}}{s(\lambda_1 s + 1)(\lambda_2 s + 1)}. \end{cases} \quad (13)$$

$G_{cl}(s)$ 的参数 λ_1 和抗干扰强弱有关, λ_1 越小, 系统的抗干扰能力越强, 但系统的鲁棒稳定性变差; λ_1 越大, 系统的抗干扰能力越弱, 而系统的鲁棒稳定性增强。

3 仿真比较(Comparison by simulation)

在这一节, 将双预测PI控制器的控制性能和其他控制器的性能进行仿真比较。图2至图4中, MV 表示控制器输出, PV 表示被控变量。在 $t = 0$ 时, 设定值进行单位阶跃; 在 $t = 70$ 时, 引入 $d(s) = -1/s$ 干扰, 考虑具有如下传递函数的过程对象

$$G'(s) = \frac{0.2}{s} e^{-7.4s}.$$

控制器的参数设置均使在标称对象模型下期望的闭环控制系统的时间响应常数为6。Mantausek方法的Smith预估器的参数为 $K = 1/1.2, M(s) = 1/2.96$ 。改进的Mantausek Smith预估器的参数设置为 $K = 1/1.2, M(s) = 1.1495(2.96s + 1)/(0.296s + 1)$ 。Chien方法的参数设置为 $G_0(s) = (-7.4s + 1)/5s, K_c = 1/1.96, \tau_i = 13.4/0.6, \beta = 0.4$ 。DPPI方法的参数设置为 $\lambda_1 = 12, \lambda_2 = 6$ 。

在无模型失配时, 这几种控制系统对设定点的响应和对干扰的响应见图2。从图中可以知道, 这些控制系统对设定点的响应是完全一致的, 但对干扰的响应各不相同, Mantausek方法抗干扰能力差, 改进的Mantausek方法抗干扰能力好, 但有一些超调, Chien方法在抗干扰能力方面稍比DPPI方法差一些。

在有模型失配时, 即增益从0.2增加到0.24, 滞后时间从7.4增加到8.88, 系统响应见图3。改进的Mantausek方法鲁棒性能很差, 控制系统已经不稳定; Mantausek方法虽然稳定但抗干扰性还是很差;

Chien方法的控制性能最好, 但从图4可以看到, 控制器的输出发生了振荡现象, 难于实际应用。

综合考虑, DPPI控制方法对积分加纯滞后系统是一种行之有效的方法, 跟踪设定值快, 抗干扰能力强, 控制作用平缓, 鲁棒性能好。

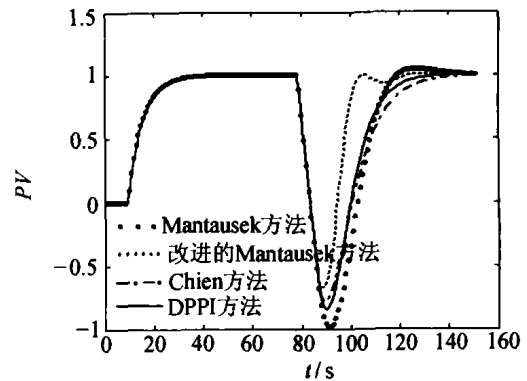


图2 标称模型下的PV响应曲线
Fig. 2 Response of nominal system (PV)

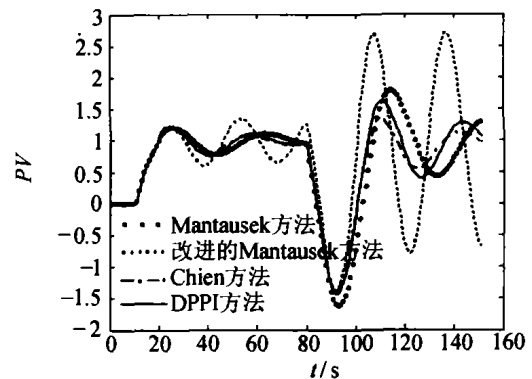


图3 在模型失配时的PV响应曲线
Fig. 3 Response under model mismatch (PV)

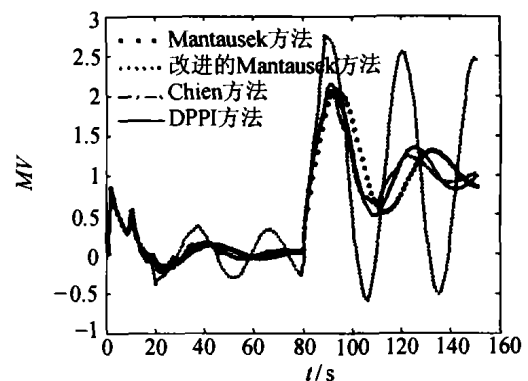


图4 在模型失配时控制器的输出MV
Fig. 4 Output of controller (MV)

4 实际应用 (Practical application)

上海交通大学自动化研究所过程控制实验室在2003年7月成功开发了一套生物发酵罐系统. 其温度控制系统的主要结构见图5. 该温度采用分程控制, 当控制阀位在50%时, 冷却水和电加热器均处于关闭状态; 当控制阀位在100%时, 冷却水处于关闭状态, 而电加热器均处于全开状态; 当控制阀位在0%时, 冷却水处于全开状态, 电加热器关闭. 电加热器采用晶闸管控制其占空比, 达到控制加热的强弱.

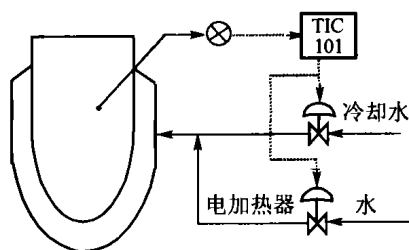


图5 温度控制系统的主要结构图

Fig. 5 Main structure of temperature control system

由于发酵罐利用夹套进行加热和冷却, 滞后时间比较长, 且加热过程具有积分特性, 因此常规的控制算法达不到所要求的控制品质.

在熟悉发酵过程的基础上, 采用阶跃测试方法, 对温度系统进行了建模. 首先, 将电加热器的阀位手动控制在10%上, 温度 T 的响应曲线见图6. 从图中可以看出, 该过程具有较大的纯滞后时间, 大约在240s左右, 经过纯滞后以后, 系统具有十分清晰的积分特性. 然后, 根据阶跃响应数据, 将过程模型确定为一阶积分加纯滞后对象. 把测试数据和该模型进行拟合, 在拟合误差最小的情况下, 求得的模型为 $\frac{0.000525e^{-240s}}{s}$ (整个过程在MATLAB中完成).

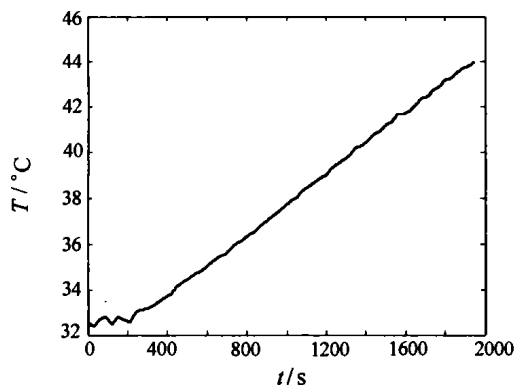


图6 温度的阶跃响应曲线

Fig. 6 Step response of temperature

由于被控过程的滞后时间为240s, 属于大滞后对象, 因此在选择内环、外环系统的闭环响应时间常数 λ_1, λ_2 时要稍微大一些, 均为360s. 这样选择的目

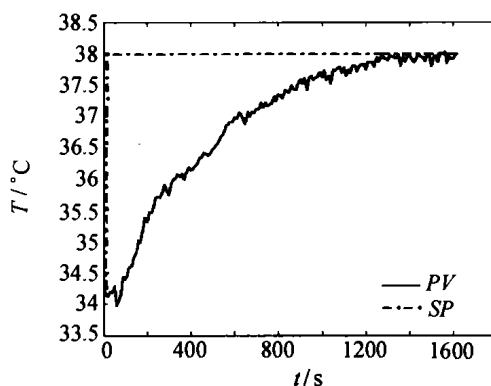
的是保证控制系统有一定的鲁棒性. 这样便得到内、外环控制器的传递函数分别为

$$G_{c1}(s) = \frac{s}{0.000525(360s + 1 - e^{-240s})},$$

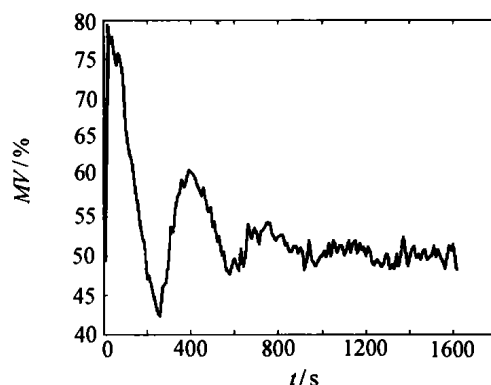
$$G_{c2}(s) = \frac{360s + 1}{(360s + 1 - e^{-240s})}.$$

在离散化并考虑一些安全问题(如抗积分饱和)后, 将控制系统进行投运. 将温度的设定值从34.13℃变化到38℃, 温度 T 的响应曲线和控制阀位MV的变化曲线见图7. 图(a), (b)分别表示 T 和MV曲线.

从图中可以看到: 被控温度跟踪设定点的速度比较快, 在25min之内就已经达到了设定值, 而且无超调, 尽管控制器的输出调节的幅度较大, 但调节平滑, 符合现场控制要求. 另外从图中可以发现, 被控温度中混有较大的白噪声, 变化范围 $[-0.6, 0.6]$ ℃, 尽管如此, 控制器的输出仍然比较稳定.



(a) 温度实际测量值 T



(b) 控制器输出MV

图7 双预测PI控制器的实际控制效果

Fig. 7 Real control performance of double predictive PI controller

总而言之, 利用双预测PI控制器控制发酵罐的温度, 能够达到令人满意的控制效果: 快速的跟踪性能、控制作用平滑、抗干扰速度快.

5 结论 (Conclusion)

对于积分加纯滞后系统, 提出了一种新的双预

(下转第320页)

5 Conclusion

In order to improve the performance of ship autopilot, this paper firstly establishes nonlinear mathematic models of ship movement with uncertain parameters. Based on that, a new nonlinear adaptive control design scheme is put forward, which combines backstepping algorithm with Nussbaum-type function without a priori knowledge about the sign of control gain. As to the ship motion models with unknown parameters, the proposed method simultaneously designs adaptive nonlinear ship course-tracking controller and parameter estimator, and deals with the problems that the sign of control gain is unknown, and finally, accomplishes global adaptive tracking control of ship course. The control law of the adaptive algorithm is smooth. The simulation results show that the proposed control approach has the desired adaptability and robustness to uncertain parameters, and is practically effective.

References:

- [1] HUANG J Q. *Adaptive Control Theories and Their Applications in the Ship System* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1992.
- [2] AMERONGEN J V. Adaptive steering of ships - A model reference approach [J]. *Automatica*, 1984, 20(1): 3 - 14.
- [3] YANG Y S. Neural network adaptive control for ship automatic steering [C] // *Proc of Int Symposium of Young Investigators on Information & Computer & Control*. [s. l.]: [s. n.], 1994: 231 - 236.

- [4] UNAR M A, MURRAY-SMITH D J. Automatic steering of ships using neural networks [J]. *Int J of Adaptive Control Signal Processing*, 1999, 13(6): 203 - 218.
- [5] FOSSEN T I. High performance ship autopilot with wave filter [C] // *Proc of the 10th Int Ship Control Systems Symposium (SCSS'93)*. [s. l.]: [s. n.], 1993: 2271 - 2285.
- [6] TZENG C Y, GOODWUB G C, CRISAFULLI S. Feedback linearization of a ship steering autopilot with saturating and slew rate limiting actuator [J]. *Int J of Adaptive. Control Signal Processing*, 1999, 13(1): 23 - 30.
- [7] YANG Y S. Robust adaptive control algorithm applied to ship steering autopilot with uncertain nonlinear system [J]. *Shipbuilding of China*, 2000, 41(1): 21 - 25.
- [8] KRSTIC M, KANELAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P V. *Nonlinear and Adaptive Control Design* [M]. New York: Wiley, 1995.
- [9] NUSSBAUM R D. Some remarks on the conjecture in parameter adaptive control [J]. *Systems & Control Letters*, 1983, 3(3): 243 - 246.
- [10] JIA X L, YANG Y S. *Ship Motion Mathematic Model* [M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 1998.
- [11] FOSSEN T I. *Guidance and Control of Ocean Vehicles* [M]. New York: Wiley, 1994.
- [12] YE X D, JIANG J P. Adaptive nonlinear design without a priori knowledge of control directions [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(11): 1617 - 1621.

作者简介:

杜佳璐 (1966—), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究兴趣是智能控制、非线性控制理论及其应用、船舶运动控制, E-mail: dujl@new-mail.dlmu.edu.cn;

郭晨 (1956—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能控制理论与应用、船舶系统仿真、虚拟现实技术, E-mail: guoc@dlmu.edu.cn.

(上接第 314 页)

测 PI 控制算法, 给出了它的结构形式和性能分析. 这种方法控制结构简单, 可调参数少, 而且参数有明显的物理意义, 便于参数的整定. 仿真和实际应用, 显示它有良好的跟踪性能和抗干扰性能, 鲁棒稳定性好.

参考文献(References):

- [1] WATANABE K, ITO M. A process-model control for linear system with delay [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1981, 26(6): 1261 - 1266.
- [2] ASTROM K J, HANG C C, LIM B C. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead time [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(2): 343 - 345.
- [3] ZHANG W D, SUN Y X. Modified Smith predictor for controlling integrator/time delay process [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1996, 35(8): 2769 - 2772.
- [4] MANTAUSEK M R, MICIC A D. A modified Smith predictor for

controlling process with an integrator and long dead-time [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(8): 1199 - 1203.

- [5] MANTAUSEK M R, MICIC A D. On the modified Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(8): 1603 - 1606.
- [6] CHIEN I L, PENG S C, LIU J. H. Simple control method for integrating processes with long deadtime [J]. *J of Process Control*, 2002, 12(3): 391 - 404.

作者简介:

任正云 (1969—), 男, 博士, 研究方向为先进过程控制、模型预测控制等, E-mail: renzhengyun@163.com;

张红 (1971—), 女, 讲师, 研究方向为化工过程建模与优化、炼油工艺优化等, E-mail: zhanghonglindi@163.com;

邵惠鹤 (1936—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂工业过程建模、优化与控制等, E-mail: hhshao@sjtu.edu.cn.