

滴丸机石蜡油液位的模型参考模糊自适应 PID 控制

彭彦卿^{1,2}, 罗 键¹, 庄进发¹, 陈李清³

(1. 厦门大学自动化系, 厦门 361005; 2. 厦门理工学院电子与电气工程系, 厦门 361024;
3. 厦门星鲨制药有限公司, 厦门 361026)

摘要: 滴丸机定型杯石蜡油液位控制系统是一个存在非线性、参数时变性和耦合性的复杂系统。通过分析建立了该液位系统的数学模型, 并且将自适应控制、模糊控制和 PID 控制结合起来, 提出了一种模型参考模糊自适应 PID 控制方法。该方法无需辨识被控对象参数, 实时性好, 便于在线控制。仿真结果表明, 该方法具有较好的动态品质和调节精度, 以及很强的鲁棒性, 即使当被控对象参数摄动20%时, 依然可以获得理想的控制效果。现场运行实验结果也表明了该方法的有效性。

关键词: 石蜡油液位控制; 建模; 模型参考自适应控制; 模糊控制; PID 控制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0493-2137(2008)08-0931-06

Model Reference Fuzzy Adaptive PID Control of Paraffin

Oil Level in Capsule Forming Machine

PENG Yan-qing^{1,2}, LUO Jian¹, ZHUANG Jin-fa¹, CHEN Li-qing³

(1. Department of Automation, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Department of Electronic and Electrical Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

3. Xiamen Xingsha Pharmaceutical Corporation Limited, Xiamen 361026, China)

Abstract: The paraffin oil level control system in capsule forming machine is a nonlinear, time-variant and coupling system. The mathematical model of the level control system was established. And a new model reference fuzzy adaptive PID (MRFA-PID) control method was proposed by combining the adaptive control, fuzzy control and PID control techniques. Without need to identify the parameters of the controlled plant, the proposed method has a good real-time performance, and is easy to be implemented on line. Simulation results show that the proposed method is efficient to design a robust paraffin oil level control system for capsule forming machine with good dynamic character and high regulation precision. Even though the parameters perturbation reaches 20%, the closed-loop system still has satisfied dynamic performance. The effectiveness of the proposed method is also verified by physical experiment.

Keywords: paraffin oil level control; modeling; model reference adaptive control; fuzzy control; PID control

滴丸机是鱼肝油生产行业生产无缝胶丸的重要专用设备, 其基本原理是以脉动的形式将药液打入液体明胶, 然后进入石蜡油循环系统进行冷却, 同时在胶液表面张力的作用下, 形成球形胶丸。石蜡油循环系统中胶丸定型杯的石蜡油液位控制是一个非常关键的工艺条件, 直接影响着胶丸的定型, 液位太高或

太低会造成胶丸变形, 胶皮厚薄不均, 在后续的工序中易发生胶丸破损现象, 严重影响产品的质量和合格率。因为被控对象特性比较复杂, 具有非线性、强耦合性和参数时变不确定性等特征, 因此要求所设计的系统在具有很好的稳态精度和动态响应性能的同时, 还应具有很好的鲁棒性。

收稿日期: 2007-09-26; 修回日期: 2008-02-26.

基金项目: 厦门市科技计划资助项目(3502Z2006008).

作者简介: 彭彦卿(1966—), 女, 高级工程师, 博士研究生, pyqxm@163.com.

通讯作者: 罗 键(1954—), jianluo@xmu.edu.cn.

PID 控制器具有结构简单、稳定性好、可靠性高等优点,适用于被控对象参数固定,非线性不很严重的情况。但是在过程参数变化比较大的时候,PID 控制器就难以取得良好的性能。

自适应控制^[1]主要用于解决那些传统方法难以解决的控制对象参数在大范围变化的问题,它具备自适应能力,能够自动辨识被控过程参数、自动整定控制参数,能够适应被控过程参数的变化。其中模型参考自适应系统是一类很重要的自适应系统。

模糊控制器本质上是一种非线性控制器,是从收集整理启发式规则和人类经验(即模糊 IF-THEN 规则)开始的,通过分析这些规则来设计控制器,因此并不依赖于精确的数学模型,对被控对象参数变化有较好的鲁棒性^[2-9]。

笔者将自适应控制、模糊控制和 PID 控制结合起来,设计出一种模型参考模糊自适应(model reference fuzzy adaptive, MRFA)PID 控制器,用于滴丸机定型杯液位控制系统,可以进一步提高控制系统的鲁棒性,在系统存在参数不确定的情况下,具有更佳的控制效果。与模糊 PID 控制器、模糊自适应控制器^[2-9]等相比,笔者所设计的控制器,既吸取了模型参考自适应系统的先进思想,又保留了传统 PID 控制器的优点,同时,因为采用模糊推理的控制策略,不需要在线辨识被控对象的模型参数,因此计算机在线计算工作量小,便于实时控制的实现。

1 系统数学模型描述

石蜡油循环系统的工艺流程如图 1 所示,它由 1 个高位槽、1 个低位槽、1 个循环泵、7 个液位传感器、1 个总入口阀门、6 个分入口调节阀门、相连接的管道以及控制器组成。高位槽中的石蜡油经入口总管流入总管,然后再经 6 个入口阀门分别流入 6 个定型杯,通过定型杯和定型桶的出口流入低位槽,经低位槽的液位传感器检测,达到设定值后启动循环泵,将低位槽中的石蜡油抽出,经进油管和进油阀门流入高位槽,如此循环往复,构成石蜡油循环系统。

考虑 1#滴头构成的子系统,石蜡油流入量通过调节 1#调节阀的开度进行控制,流出量是随机的,主要受定型杯液位的影响,控制的目的是通过设计合适的控制器,根据检测的液位信号与设定值之间的偏差发出调控信号,调节入口阀门的开度,使得定型杯液位维持在设定值。

设某时刻定型杯的进出石蜡油流量分别为 Q_i 和

Q_o ,定型杯的液位高度记为 H , A 表示定型杯的横截面积。容易看出,某时刻进水流量与出水流量之差等于水箱内液体体积的变化率^[10],即

$$A \frac{dH}{dt} = Q_i - Q_o \tag{1}$$

其中

$$Q_i = k_\mu \mu \tag{2}$$

$$Q_o = k\sqrt{H} \tag{3}$$

式中: k_μ 为决定于阀门特性的系数; μ 为阀门的开度; k 为与负载阀开度有关的系数。在固定不变的开度下, k 可视为常数。

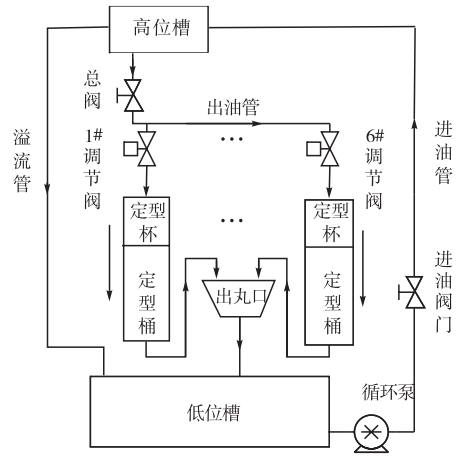


图 1 石蜡油循环系统工艺流程

Fig.1 Flow chart of paraffin oil circulatory system

将式(2)和式(3)代入式(1)得

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{A} (k_\mu \mu - k\sqrt{H}) \tag{4}$$

式(4)即为定型杯石蜡油液位控制系统的近似数学模型。

该模型是一个非线性微分方程,而且具有时变参数的特征,主要原因如下。

(1) 流量不仅与调节阀的开度有关,而且与阀两端的压差有关,而压差又受高位槽液位变化的影响,所以 k_μ 不是常数,调节阀的开度与其控制信号也不是严格的线性关系。

(2) 由于 6 个滴头共用同一个石蜡油循环系统,所以各个滴头子系统之间存在着一定的耦合现象。因此即使开度不变,调节阀的流量也会变化,从而进一步加强了参数 k_μ 的时变性。

(3) 本系统中没有设计负载阀,可以理解为负载阀全开,但因为滴丸过程中会产生胶丝,在石蜡油循环过程中会堆积在管道中,影响出口的流程,所以参数 k 受到一定的影响,也具有一定的时变性。

控制对象的非线性、强耦合性和参数的时变性，决定了采用常规的固定参数的 PID 控制器难以获得理想的效果。因为常规的 PID 控制是基于标定数学模型的，当控制对象参数发生超过一定范围时，系统性能会明显变差，甚至超过允许范围。因此笔者将自适应控制、模糊控制和 PID 控制相结合，吸取各自的长处，设计出一种模型参考模糊自适应的 PID 控制器。

低位槽液位控制的主要目的是保证低位槽石蜡油不溢出，且使得整个循环系统能维持相对的稳定，故采用位式闭环控制策略。由液位传感器将检测到的液位信号转换为 4~20 mA 标准信号，然后和设定值比较，当达到设定的高液位时，由 PLC 输出启动石蜡油循环泵的开关信号，而当液位降低到设定值时，则由 PLC 输出停止石蜡油循环泵的开关信号。

高位槽的液位控制采取溢流口自动调节的方案，当石蜡油液位高于溢流口高度时，则多余的石蜡油通过溢流口直接泄流到低位槽，从而保证高位槽液面的相对稳定。

2 模型参考模糊自适应 PID 控制器的设计与实现

2.1 控制器的设计

笔者设计的模型参考模糊自适应 PID 控制器结构如图 2 所示。其中被控子系统是一个由 $P(s)$ 和 $G(s)$ 构成的闭环子系统， $P(s)$ 为被控对象， $G(s)$ 为 PID 控制器。参考模型子系统由 $M(s)$ 构成，参考模型输出具有良好的动态性能和稳态精度，可以满足控制系统的各项性能指标的要求。模糊控制子系统 $C(s)$ 根据参考模型子系统与被控子系统输出之差 e 及其变化率 \dot{e} 产生一个模糊自适应信号 U_f ，控制被控子系统的输出趋于参考模型子系统的输出。

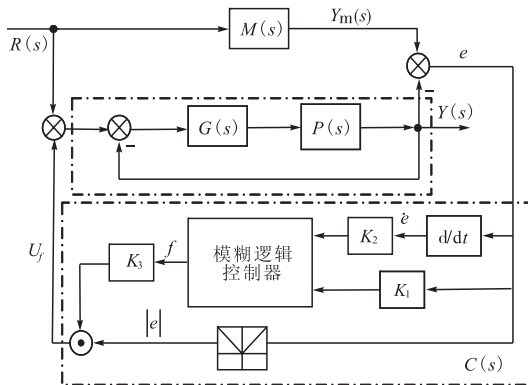


图 2 模型参考模糊自适应 PID 控制系统框图

Fig.2 Block diagram of MRFA-PID control system

本算法需 3 个步骤完成：参考模型子系统的选取；被控子系统 PID 控制器的优化设计；模糊控制子系统的设计。

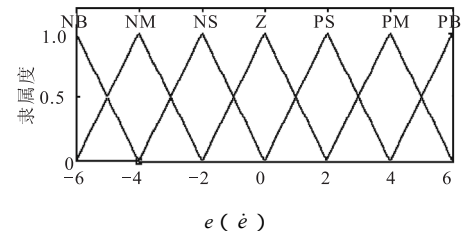
2.2 模糊控制子系统的设计

取误差 e 和误差变化率 \dot{e} 作为输入，取控制量 f 作为输出，实现思想是先找出 f 与 e 和 \dot{e} 之间的模糊关系，在运行中通过不断检测 e 和 \dot{e} ，再根据事先建立的模糊控制规则对 f 进行在线修改，以此满足不同时刻 e 和 \dot{e} 对控制量 f 的要求，从而使被控对象具有良好的动态性能，模糊控制子系统的输出

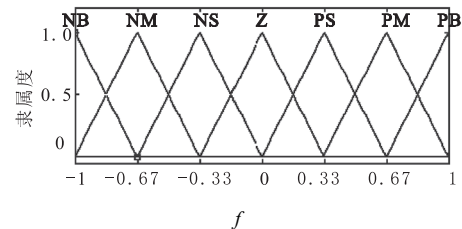
$$U_f = K_3 f |e| \tag{5}$$

设定输入变量 e 和 \dot{e} 以及输出变量 f 的模糊集为 {NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB}；模糊论域： $e \in [-6, 6]$ ， $\dot{e} \in [-6, 6]$ ， $f \in [-1, 1]$

K_1 、 K_2 和 K_3 为相应的量化因子，输入变量和输出变量的隶属度函数如图 3 所示。



(a) e 和 \dot{e} 的隶属函数



(b) f 的隶属度函数

图 3 e 、 \dot{e} 和 f 的隶属度函数

Fig.3 Membership degree of e , \dot{e} and f

2.3 模糊控制规则的形成与推理

应用常规模糊条件和模糊关系“ If A and B then C ”的形式来建立模糊控制规则。被控对象与参考模型输出瞬态响应之间的关系为如图 4 所示的 9 种情况。因此模糊规则设计的基本规则是：根据前一时刻和现在时刻系统实际输出 $y(t)$ 偏离参考模型输出 $y_m(t)$ 的大小及其变化趋势，确定一个模糊自适应信号，控制被控子系统，使 $y(t)$ 尽快趋于 $y_m(t)$ 。例如，当出现第 1 种情况时，迅速加大控制力度，以使输出不至于进一步朝偏离参考模型的方向发展，这样可有效地减小超调。当出现第 3 种情况时，减小控制力度，或改变误差极性，以免输出到达给定值后再度偏离给

定,这样可有效地缩短调节时间.基于上述思想设计模糊控制规则见表 1. 模糊控制规则曲面如图 5 所示.解模糊化方法采用重心法.

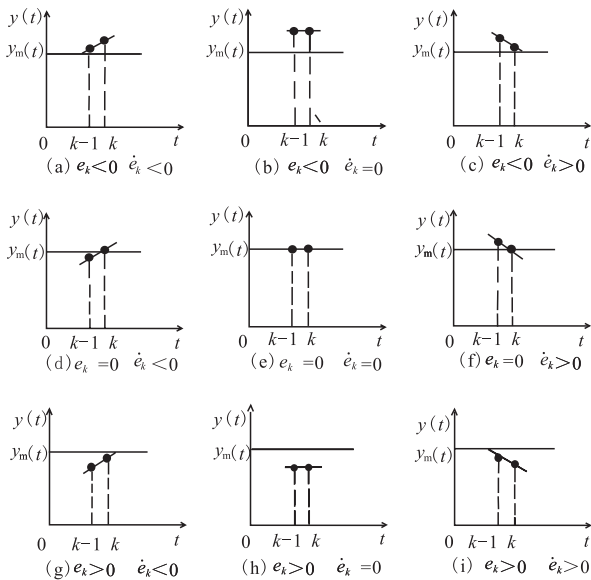


图 4 对象瞬态响应与参考模型间的 9 种关系

Fig. 4 Nine kinds of relations between object transient response and reference model output

表 1 模糊控制规则

Tab. 1 Fuzzy control rules

\dot{e}	e						
	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PM	PS	Z	Z	Z
PM	PB	PB	PM	PS	Z	Z	NS
PS	PB	PM	PS	Z	Z	NS	NM
Z	PB	PS	Z	Z	Z	NS	NB
NS	PM	PS	Z	Z	NS	NM	NB
NM	PS	Z	Z	NS	NM	NB	NB
NB	Z	Z	Z	NS	NM	NB	NB

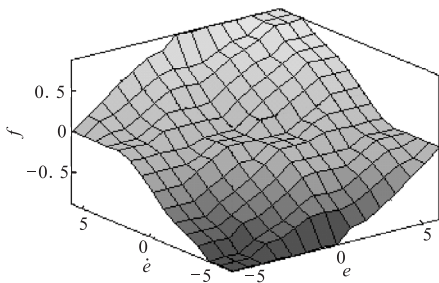


图 5 模糊控制器规则曲面

Fig.5 Rule surface viewer of the fuzzy controller

2.4 实例仿真研究

根据前面建立的石蜡油定型杯液位控制系统的

模型,将数据 $k_{\mu} = 5 \text{ cm}^3/(\text{s}\cdot\text{v})$, $A = 20 \text{ cm}^2$, $k = 2 \text{ cm}^{2.5}/\text{s}$ 代入式(4),同时考虑系统存在纯滞后,滞后时间常数 $\tau = 0.5 \text{ s}$,并对系统进行适当的线性化,可得石蜡油定型杯液位控制系统的近似数学模型为

$$P(s) = \frac{5e^{-0.5s}}{78.5s + 1} \tag{6}$$

借助 MATLAB 中 Simulink 仿真软件和模糊逻辑工具箱“Fuzzy Logic Toolbox”建立的仿真模型如图 6 所示,初始给定系统 1 个单位阶跃信号,以检测系统的动态响应性能,采样时间为 1 ms. 根据 2.1 节提出的控制器设计的 3 个步骤进行设计.

(1)对于所设计的模型参考模糊自适应 PID 控制器,参考模型的选取直接影响到系统的性能,经过分析和实验,本文设计的参考模型为

$$M(s) = \frac{1}{0.05s + 1} \tag{7}$$

其单位阶跃响应输出

$$y(t) = 1 - e^{-\frac{t}{0.05}} \tag{8}$$

参考模型子系统动态响应快,无超调.

(2)被控对象 $P(s)$ 的标定模型为

$$P^*(s) = \frac{5e^{-0.5s}}{78.5s + 1} \tag{9}$$

其控制器 $G(s)$ 采用 PID 控制器,经过 ITSE 原则优化后的 PID 调节器的参数为 $K_p = 29.7042$, $K_i = 0.29044$, $K_d = 6.5222$.

仿真中不断调整量化因子和比例因子的取值,最终得到一组较为理想的参数组合: $K_1 = 60$, $K_2 = 0.001$, $K_3 = -1$.在这一组参数的作用下,系统的动态响应曲线和常规 PID 控制器的单位阶跃响应曲线如图 7 所示.

当被控对象参数摄动 20%,即

$$P(s) = \frac{6e^{-0.6s}}{94.2s + 1} \tag{10}$$

的情况下,采用不同控制策略时,系统阶跃响应过程曲线如图 8 所示.

图 7 中,按 ITSE 原则进行参数优化后的传统 PID 控制器超调量为 12.5%,调节时间为 4 s,而 MRFA-PID 控制器没有超调,调节时间为 3 s;在图 8 中,传统 PID 控制的超调量高达 31%,调节时间为 5.5 s,而 MRFA-PID 控制器的超调量仅为 2%,调节时间为 1.7 s;通过对比可以发现本文所设计的控制器控制效果明显优于传统 PID 控制器,超调量变小,响应速度变快,获得更佳的动态响应,同时显著提高了控制系统的鲁棒性.

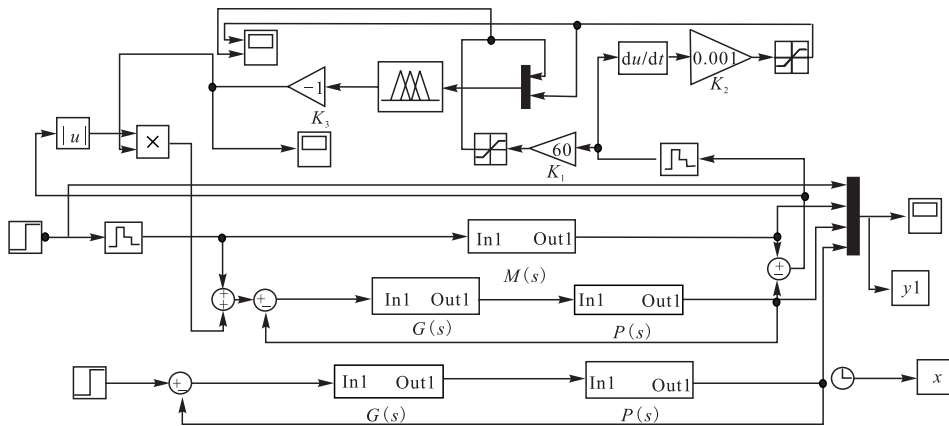


图 6 系统仿真模型

Fig.6 System simulation model

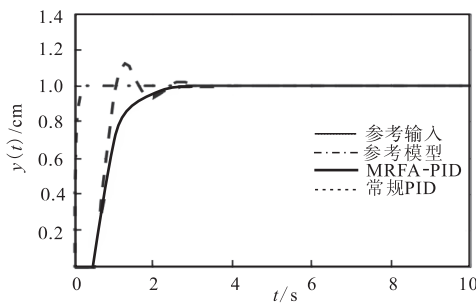


图 7 被控对象为标称模型时常规 PID 和 MRFA-PID 控制的阶跃响应过渡过程曲线

Fig.7 Step responses for MRFA-PID controller and conventional PID controller at nominal case

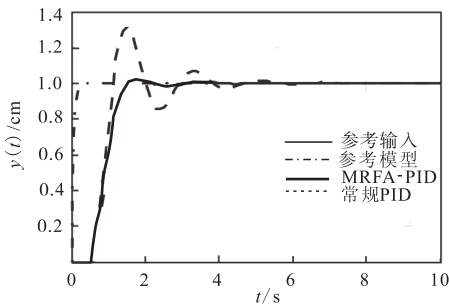


图 8 被控对象 3 个参数均摄动 20% 时常规 PID 和 MRFA-PID 控制的阶跃响应过渡过程曲线

Fig.8 Step responses for MRFA-PID controller and conventional PID controller when the 3 parameters perturbation reaches 20%

2.5 现场运行实验

在仿真的基础上,进行现场实验.滴丸机 PLC 采用 OMRON 公司的 C200α 系列中型机,和 NT631C-ST141B-E 可编程触摸终端结合作为控制系统的实现平台.液位检测采用 SMC 公司的 PSE555-28 型液位传感器,通过 PLC 模拟量的 AD 模组采集数据,输出 4~20 mA 信号,并经逻辑运算后输出至执行机构,从

而对液位进行控制.石蜡油液位调节执行机构采用德国宝德公司的 702529C-DN20 型电磁调节阀.在编程之前已经将模糊规则表制成 2 维数据查询表,减小了在线计算工作量.根据现场实验结果数据绘制的起动过程液位曲线见图 9.

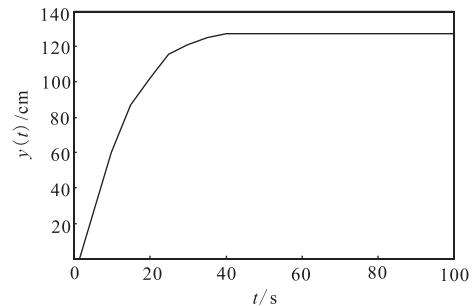


图 9 MRFA-PID 控制时的液位曲线

Fig.9 Level curve of MRFA-PID control

实验结果表明,采用笔者所设计的控制方案动态响应速度快,超调量小,稳态精度高,工作稳定可靠,取得了令人满意的控制效果.

3 结 语

将自适应控制、模糊控制和 PID 控制结合起来,设计出一种模型参考模糊自适应 PID 控制器,并用于滴丸机定型杯石蜡油液位控制系统, MATLAB 仿真和现场实验结果均表明,本文所设计的控制器,几乎没有超调,调节时间短,动态性能好,稳态无静差,对于被控对象参数摄动具有很强的鲁棒性,明显优于传统的 PID 控制;而且本文所设计的控制器不需要辨识被控对象的参数,实时性好,便于在线控制,具有理想的控制效果.

参考文献：

- [1] Åström K J. *Adaptive Control* [M]. 2nd ed. Beijing : Science Press ,2003.
- [2] Skoczowski S, Domek S, Pietruszewicz K, et al. A method for improving the robustness of PID control [J] . *IEEE Transactions on Industrial Electronics* ,2005 ,52 (6) : 1669-1676.
- [3] Hayashi K ,Otsubo A ,Murakami S ,et al. Realization of nonlinear and linear PID controls using simplified indirect fuzzy inference method [J] . *Fuzzy Sets and Systems* ,1999 ,105 (3) :409-414.
- [4] Haj-Ali Amin ,Hao Ping. Structural analysis of fuzzy controllers with nonlinear input fuzzy sets in relation to nonlinear PID control with variable gains [J] . *Automatica* ,2004 ,40 (9) :1551-1559.
- [5] Santos M ,Dexter A L. Control of a cryogenic process using a fuzzy PID scheduler [J] . *Control Engineering Practice* ,2002 ,10 (10) :1147-1152.
- [6] Visioli A. Fuzzy logic based set-point weight tuning of PID controllers [J] . *IEEE Transactions on Systems , Man ,and Cybernetic(Part A) :Systems and Humans* , 1999 ,29 (6) :587-592.
- [7] 万百五. 工业大系统优化与产品质量控制 [M] . 北京 :科学出版社 ,2003.
Wan Baiwu. *Optimization and Product Quality Control of Large-Scale Industrial Processes* [M] . Beijing :Science Press ,2003 (in Chinese) .
- [8] 张 钊 ,吴爱国 ,裴燕玲. 模糊控制的模糊推理分析 [J] . *控制与决策* ,2005 ,20 (8) :905-908.
Zhang Zhao , Wu Aiguo , Pei Yanling. The fuzzy reasoning analysis of fuzzy control [J] . *Control and Decision* ,2005 ,20 (8) :905-908 (in Chinese) .
- [9] 刘国荣 ,阳宪惠. 模糊自适应 PID 控制 [J] . *控制与决策* ,1995 ,10 (6) :558-562.
Liu Guorong , Yang Xianhui. Fuzzy adaptive PID controller [J] . *Control and Decision* ,1995 ,10 (6) : 558-562 (in Chinese) .
- [10] 金以慧. 过程控制 [M] . 北京 :清华大学出版社 ,1993.
Jin Yihui. *Process Control* [M] . Beijing :Tsinghua University Press ,1993 (in Chinese) .