

基于模糊控制算法的PLC直流电动机调速系统研究

PLC控制系统由工业以太网、Profibus-DP总线网络构成三层网络结构。上位机设计制作WinCC监控界面，STEP7组态PLC主从站，通过工业以太网与下位机通信，并实时监控电动机的转速、转矩、电压和电流等状态参数；下位机S7-400H、S7-300 PLC通过Profibus-DP总线网络实现对电动机的控制。研究了模糊控制对直流电动机的调速方法，提出一种自适应模糊PID算法，设计了自适应模糊PID控制器，实现了Matlab Simulink的仿真，同时编写自适应模糊PID算法程序，控制直流电动机的转动，将实验结果与仿真结果进行比较，结果表明系统控制准确度高，超调量小，满足系统动态性能和稳定性要求。

崔 鹏/西南科技大学工程技术中心



崔 鹏/讲师

关键词/Keywords

PLC ·
工业以太网 ·
Profibus-DP网络 ·
自适应模糊PID算法 ·
Matlab仿真 ·

近年来，随着自动控制技术的发展，对异步电动机的控制已经成为电动机控制的重点。直流调速系统作为现代工业主要的调速方法和手段，应采用PI控制器实现对异步电动机的速度控制。传统PI控制器具有结构简单、稳定性较好及可靠性较高等特点，但传统PI控制器的设计过分依赖于控制对象模型，参数鲁棒性较差，且抗负载扰动能力不强，同时传统的PID算法由于PID都是常数，因此只适用于线性系统，而异步电动机控制中往往是非线性系统，难以确定准确的数学模型，因而在一些高性能、高准确度的场合难以满足使用要求。因此本文提出了改进的PID算法，将PID算法和模糊控制算法相结合，形成了一种自适应PID模糊控制算法，通过Matlab仿真编写自适应模糊PID算法程序实现电动机的准确控制。

PLC实验系统分为上位系统、PLC

系统和驱动系统三部分，通过环形光纤以太网、Profibus总线构成三层网络拓扑结构。采取PLC主从站设计，S7-400H PLC为容错系统，两套相互独立的S7-400H PLC之间可以自动无扰地进行切换，S7-400H PLC通过环形光纤以太网与S7-300 PLC通信，S7-300 PLC CPU315-2DP/PN通过Profibus-DP网络对6RA70直流调速装置进行控制，实现异步直流电动机的调速。PLC实验系统如图1所示。

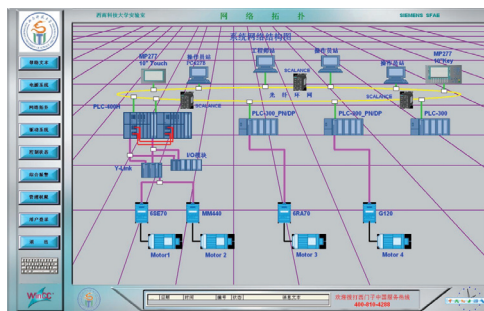


图1 PLC实验系统

自适应模糊PID控制器设计

1. 自适应模糊PID控制器结构框图

自适应模糊PID控制器依据模糊控制原理，以典型PID控制为基础，将被控量的偏差 e 与偏差变化率 ec 作为输入变量输入模糊控制器，模糊控制器根据输入变量 e 和 ec 进行模糊推理，利用模糊规则整定PID参数，输出准确的PID控制参数 K_p 、 K_i 和 K_d ，将 K_p 、 K_i 和 K_d 输入至PID控制器，与PID控制器结合实现对象控制。模糊控制器的设计作为控制系统的核心，根据模糊控制器域值选取范围，模

糊规则的确定将直接影响到 K_p 、 K_i 和 K_d 的取值,从而影响系统的控制准确度。自适应模糊PID控制器的结构框图如图2所示。

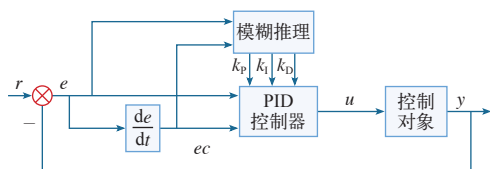


图2 自适应模糊PID控制器的结构框图

2. 输入输出变量模糊表达式

自适应模糊PID控制器设计的主要任务是确定输入变量与输出变量的模糊关系,即 e 、 ec 与 K_p 、 K_i 和 K_d 之间的关系, PID三个参数如何自适应整定,是自适应模糊PID控制器研究的关键和重点。在模糊控制器中, PID控制器的输入参数 K_p 、 K_i 和 K_d 设有初始值,记为 K_p^* 、 K_i^* 和 K_d^* ;模糊控制器中输出的参数为校正参数,记为 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 。模糊控制系统根据反馈信息调整 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d ,从而确定 K_p 、 K_i 和 K_d 。三者之间关系式表达式为

$$\begin{aligned} K_p &= K_p^* + \Delta K_p \\ K_i &= K_i^* + \Delta K_i \\ K_d &= K_d^* + \Delta K_d \end{aligned} \quad (1)$$

3. 输入输出变量模糊规则

综合系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态准确度等多种因素,在确定模糊关系的基础上,确定模糊控制规则。本系统的模糊PID控制器是一个双输入三输出的系统结构, e 和 ec 为输入量, K_p 、 K_i 和 K_d 为输出量,根据前面所述的 K_p 、 K_i 和 K_d 满足的关系式,归纳总结出三个输出量模糊控制规则:输入变量 e 和 ec 的模糊子集设定为{负大,负中,负小,零,正小,正中,正大},简记为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB};同理,输出量 K_p 、 K_i 和 K_d 的模糊子集设定为{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB},论域设定为 $[-6, 6]$ 。而隶属函数均选用了三角函数,输入输出变量论域表达式为

$$\begin{aligned} \{e\} &= \{ec\} = \{K_p\} = \{K_i\} = \{K_d\} \\ &= \{-1, -2, -3, 0, 1, 2, 3\} \end{aligned} \quad (2)$$

根据专家知识及操作实际经验,确定 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的模糊控制规则如表1~表3所示。

表1 ΔK_p 模糊控制规则

ΔK_p	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ec	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO
	NS	PM	PM	PS	PS	ZO	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
	PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB

表2 ΔK_i 模糊控制规则

ΔK_i	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ec	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO
	NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
	NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PS
	PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB

表3 ΔK_d 模糊控制规则

ΔK_d	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ec	NB	PS	NS	NS	NB	NB	NS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS
	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS
	ZO	ZO	NM	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PB

自适应模糊PID控制器Matlab仿真

1. 自适应模糊PID控制器Simulink仿真模型

PLC实验系统是基于典型直流电动机调速的PID控制模型,设计自适应模糊PID控制器,并用它代替ASR调速器,ACR电流调节器保持不变,利用Matlab图形工具Simulink建立Matlab仿真模型并进行仿真,如图3所示。Matlab仿真分为两步:①建立自适应模糊PID的仿真模型,

自适应模糊PID控制器参数 K_P 、 K_I 和 K_D 的初始值分别设定为30、6和0.3，系统给定的转速 n 设定为1 400 r/min，转速 n 的偏差范围 X_1 为 $[-1\ 400, 1\ 400]$ ，输入变量偏差 e 的模糊子集范围 N_1 为 $[-6, 6]$ ，根据模糊控制规则，自适应整定PID的各个参数可得量化因子为 $k_e = N_1/X_1 = 0.005$ ；输入量 ec 的模糊子集 N_2 的范围为 $[-6, 6]$ ，根据实际测试电动机的转速变化率，量化因子为 $k_c = N_2/X_2 = 0.000\ 1$ ；基于6RA70直流调速电动机动态变

化特性，确定输出量 ΔK_P 的范围 X_3 为 $[-4.8, 4.8]$ ， ΔK_I 的范围 X_4 为 $[-0.12, 0.12]$ ， ΔK_D 的范围 X_5 为 $[-0.18, 0.18]$ ，输出量 K_P 、 K_I 和 K_D 的范围 N_2 为 $[-6, 6]$ ，经过计算得出比例因子为 $k_{e1} = X_3/N_2 = 0.8$ ， $k_{e2} = X_4/N_2 = 0.02$ ， $k_{e3} = X_5/N_2 = 0.03$ ；②设计模糊控制器，首先建立Mamdani型模糊逻辑推理系统PLC6RA70.fis，然后建立双输入 e 、 ec 以及 K_P 、 K_I 和 K_D 三个输出的隶属函数，最后建立49条模糊规则。

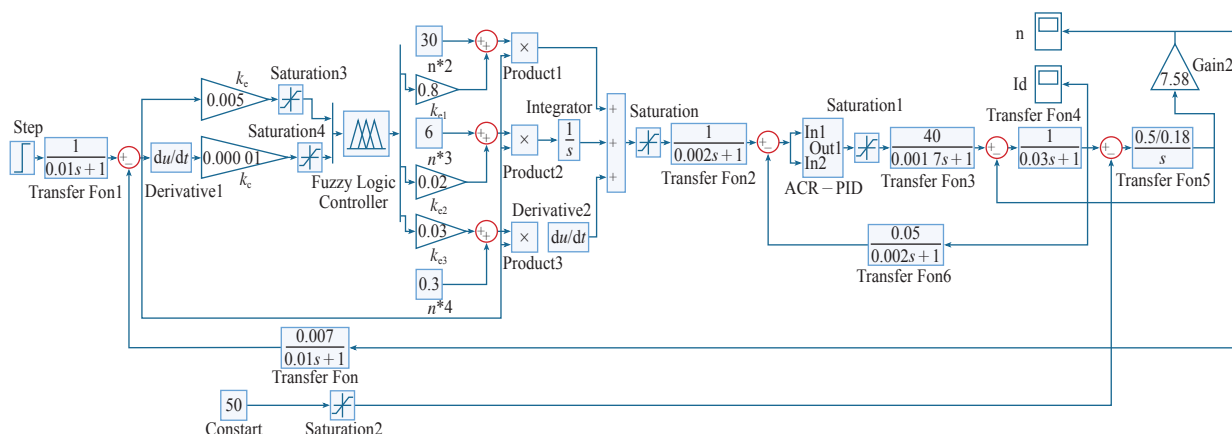


图3 模糊自适应PID直流调速系统Simulink的仿真模型

2. 仿真实验结果及分析

打开自适应模糊PID控制器Simulink仿真模型dcmotor_fuzzy.mdl，加载模糊逻辑推理系统PLC6RA70.fis，经过Matlab 7.0软件Compile编译，最后进行Simulation仿真，完成异步直流电动机调速系统空载无扰动仿真实验，并与典型的PID控制模型进行分析比较。通过示波器Scope模块观察典型PID控制和自适应模糊PID控制器仿真模型转速 n 和电流 i_d 的变化曲线，经过比较得出自适应模糊PID控制器模型转速超调更小，稳定性更好。转速 n 和电流 i_d 的变化曲线如图4~图7所示。

PLC硬件设计

1. PLC硬件组态

打开SIMATIC MANAGER并新建一个项目，给项目命名为wx090904，选择Project并确定项目的存储路径，在新建立的项目wx090904上右键单击，插入两个SIMATIC 300站和一个SIMATIC

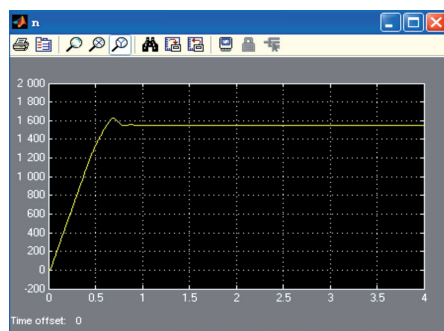


图4 传统PID控制器转速响应曲线

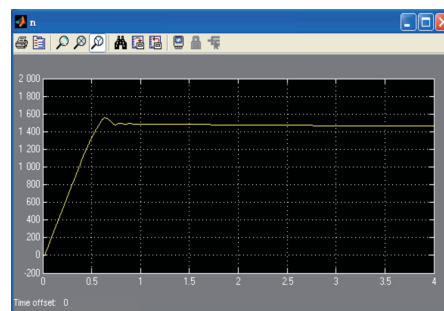


图5 自适应模糊PID控制器转速响应曲线

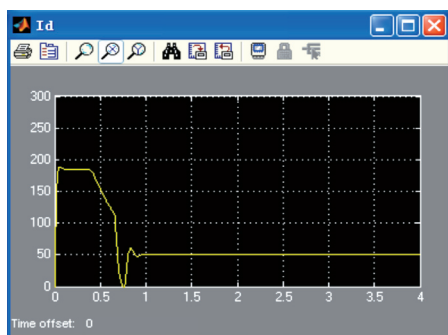


图6 传统PID控制器电流响应曲线

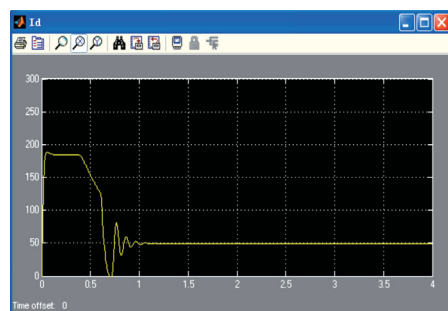


图7 自适应模糊PID控制器电流响应曲线

400H站, 打开SIMATIC 300 (1) 站硬件组态工具, 按照实际硬件组态添加PS、CPU315-2PN/DP以及输入输出模块, PN-IO设置CPU的IP地址为192.168.0.5; SIMATIC 300 (2) 站按照SIMATIC 300 (1) 站类似方法组态, 插入CPU315-2DP、CP343-1和输入输出模块, 设置CP的IP地址为192.168.0.4; 打开SIMATIC H STATION站硬件组态工具, 按照实际硬件组态插入CPU417-4H、CP443-1, 分别为CPU₁和CPU₂的CP设置, IP地址(同一网段, 不同地址)分别为192.168.0.1和12.168.0.2。PLC实验系统硬件组态如图8所示。

2. S7-400H PLC和S7-300 PLC主从站通信

由于本系统采取S7-400H PLC和S7-300 PLC主从站, 所有数据参数和程序都由主站S7-400H PLC控制, 所以必须实现CPU412-3H与CPU315-2DP/PN之间的通信。首先STEP7软件硬

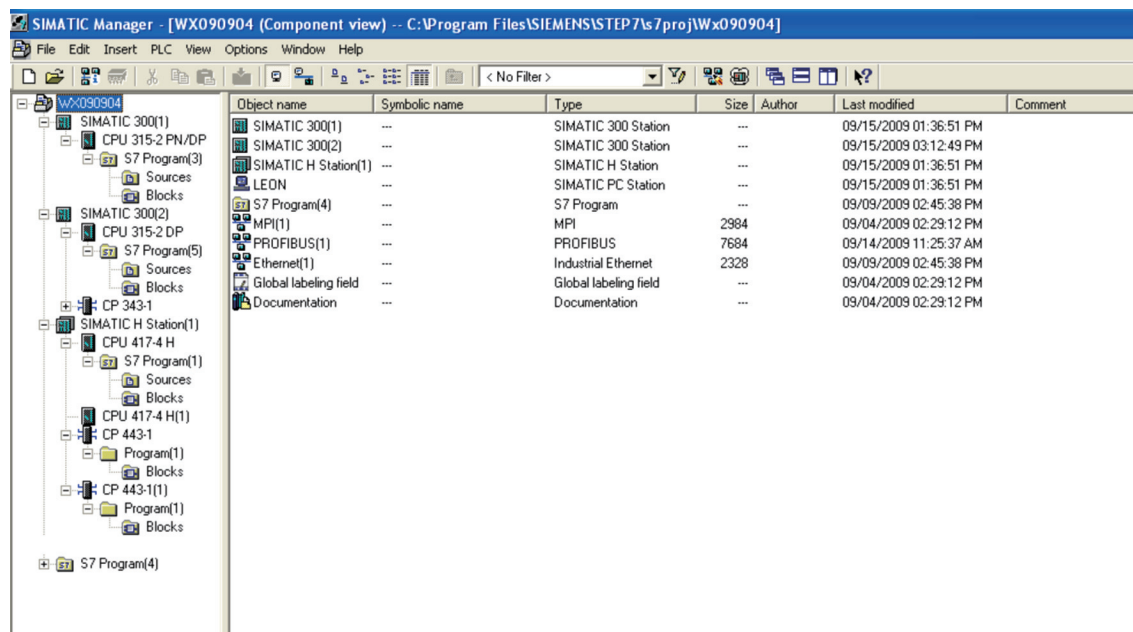


图8 PLC实验系统硬件组态

件组态, 打开网络组态工具; 然后建立S7-400H PLC和S7-300 PLC之间的网络连接; 最后进行软件编译及调试, 发送和接收数据。打开数据传送的DB块, 这里400H用的是DB1, CPU315-2PN/DP用的是DB2, 分别打开两个数据块, 同时运行

监控, 在400H中的DB1里写上数据, 可以看见数据已经从S7-400CPU传到了S7-300CPU, 实现了S7-400H PLC和S7-300 PLC之间的通信。S7-400H PLC和S7-300 PLC之间的通信如图9所示。

Address	Name	Type	Initial value	Actual value	Comment
0.0	DB_VAR	BOOL	FALSE	FALSE	Temporary p
2.0	KKK1[0]	INT	0	1	
4.0	KKK1[1]	INT	0	1	
6.0	KKK1[2]	INT	0	1	
8.0	KKK1[3]	INT	0	0	
10.0	KKK1[4]	INT	0	0	
12.0	KKK1[5]	INT	0	0	
14.0	KKK1[6]	INT	0	0	
16.0	KKK1[7]	INT	0	0	
18.0	KKK1[8]	INT	0	0	
20.0	KKK1[9]	INT	0	0	
22.0	KKK1[10]	INT	0	0	
24.0	AD	BOOL	FALSE	FALSE	

Address	Name	Type	Initial value	Actual value	Comment
0.0	DB_VAR	BOOL	TRUE	FALSE	
2.0	AA[0]	INT	0	1	
4.0	AA[1]	INT	0	1	
6.0	AA[2]	INT	0	1	
8.0	AA[3]	INT	0	0	
10.0	AA[4]	INT	0	0	
12.0	AA[5]	INT	0	0	
14.0	AA[6]	INT	0	0	
16.0	AA[7]	INT	0	0	
18.0	AA[8]	INT	0	0	
20.0	AA[9]	INT	0	0	
22.0	AA[10]	INT	0	0	
24.0	DBX220	BOOL	FALSE	TRUE	

图9 S7-400H PLC和S7-300 PLC之间的通信

PLC软件设计

1. 自适应模糊PID算法流程框图

PLC硬件组态完成后,用模糊控制算法编写STEP7程序。自适应模糊PID控制器软件流程的步骤如下:①设定输入输出变量论域及初值;②采集直流电动机的实际反馈转速;③计算转速偏差 e 和偏差变化率 ec ;④对偏差 e 和偏差变化率 ec 模糊化;⑤依据模糊控制规则整定 ΔK_P 、 ΔK_I 和 ΔK_D ;⑥PID运算。具体算法流程框图如图10所示。

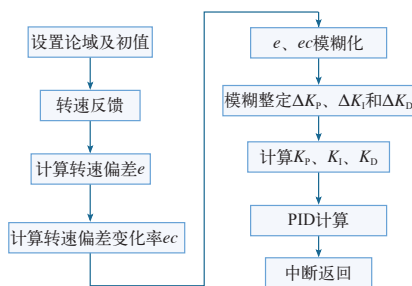


图10 自适应模糊PID控制算法流程

2. 自适应模糊PID算法程序

PLC模糊控制程序采用自适应模糊PID控制算法,用西门子PLC结构化编程语言SCL编程,实

现直流电动机转速的自适应模糊PID控制。SCL程序起始段DATA_BLOCK DB12 STRUCT...END_STRUCT BEGIN END_DATA_BLOCK,定义 K_P 、 K_I 和 K_D 的模糊规则表;Fuzzy_Kp: ARRAY[1..7, 1..7] OF INT,定义输出变量 K_P 、 K_I 和 K_D 为二维数组ARRAY[1..7, 1..7],放到背景数据模块DB12、DB13和DB14中,以便FB程序模块调用。根据算法流程,FUNCTION FC1调用主程序模块FC1,VAR_TEMP定义变量,并给变量赋初值,计算偏差和偏差的变化率,同时计算量化因子和比例因子,使变量离散化,经过隶属函数模糊化处理,查询模糊规则表,经过模糊推理计算修正参数 ΔK_P 、 ΔK_I 和 ΔK_D ,与设定的初始PID控制参数 K_P^* 、 K_I^* 和 K_D^* 相加,得到最终的 K_P 、 K_I 和 K_D ;模糊控制算法清晰化后,计算PID值。SCL编写的自适应模糊PID程序用FB36模块调用,背景数据块定义为DB36,程序运行时需调用定时中断模块OB35,由于自适应模糊PID控制程序控制直流电动机调速,响应速度较慢,因此OB35的定时中断时间为100 ms,以便更好地计算偏差的变化率。自适应模糊PID算法程序如下:

//主函数

FUNCTION FC1;

//计算偏差 e 和偏差变化率 ec

Pd:=DWORD_TO_REAL(db36.dbd10);

tp:=DWORD_TO_REAL(db36.dbd6);

ek:=tp-pd;

//隶属函数模糊化,模糊规则表模糊推理

Utp:=db12.Fuzzy_p[db15.Fuzzy_membership[1,e],

db15.Fuzzy_membership[2,ec]];

Uti:=db13.Fuzzy_i[db15.Fuzzy_membership[3,e],

db15.Fuzzy_membership[4,ec]];

```

ec: =(ek-ek1)/0.1;
ek1: =ek;
//计算量化因子和比例因子
Ke: =12/(12.0); //ke=2m/(eH-eL)
kc: =12/(2.0); //kc=2n/(ecH-ecL)
kPI: =200.0; //(uH-uL)/21
kII: =3.0;
kDI: =1000.0;
//e、ec变量离散化
e: =REAL_TO_INT(ke*ek);
ec: =REAL_TO_INT(kc*ec);

Utd: =db14.Fuzzy_d[db15.Fuzzy_membership[5, e],
db15.Fuzzy_membership[6, ec]];
//模糊算法清晰化计算出比例因子值
tp: =kp*(Utp-4)×2;
ti: =ki*(Uti-4)×2;
td: =kD*(Utd-4)×2;
//计算PID参数Kp、Ki和KD
Kp: =delt+DWORD_TO_REAL(DB36.DBD20);
Ki: =delti+DWORD_TO_REAL(DB36.DBD24);
KD: =deltd+DWORD_TO_REAL(DB36.DBD28);
END_FUNCTION

```

结束语

PLC实验系统搭建三层网络结构，上位机Step7硬件组态，SCL程序编辑器编写自适应模糊PID程序，将硬件组态和程序下载到下位机S7-300 PLC CPU315-2DP/PN中，实现S7-400H PLC和S7-300 PLC的通信，WinCC 软件制作监控画面，直流电动机的转速设定值为1 400 r/min，直流电动机为小电动机，转矩较小，转矩设定为0.5 N·m，经过系统调试，直流电动机空载起动一段时间，转速为1 336 r/min，转矩为0.3 N·m。结果表明：采用自适应模糊PID控制算法，在直流电动机起动过程中，PLC实验系统比Matlab仿真模型具有更短的调节时间，并且系统超调量更小，实际系统运行的效果较好。

参考文献

- [1] 张德江. 智能控制技术现状与展望 [J]. 长春工业大学学报, 2002 (23): 58-61.
- [2] 汤兵勇. 模糊控制理论与应用技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [3] 孙增圻. 智能控制理论与技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] 李国勇. 智能控制及其MATLAB实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [5] Wu Yong, He Yuanjun, Cai Hongming. Optimal threshold selection algorithm in edge detection based on wavelet transform [J]. Image Vision Computing, 2005 (23): 1159-1169.
- [6] Xu Yuanxiang. Adaptive control theory and application [M]. Publishing House of Electronics Industry, 2007: 27-31.
- [7] Lee S J, Hong C G, Han T S, et al. Application of fuzzy control to start-up of twin screw extruder [J]. Food Control, 2002, 13 (4-5): 301-306.
- [8] Fodil-Pacha Farid, Arhaliass Abdellah, Ait-Ahmed Nadia. Fuzzy control of the start-up phase of the food extrusion process [J]. Food Control, 2007 (18): 1143-1148.
- [9] Kalogirou SA. Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review [J]. Renewable Sustainable Energy Rev., 2001 (5): 373-401.
- [10] Ang K H, Chong G, li Y. PID control system analysis design and technology [J]. IEEE Transactions on Syst. Tech., 2005, 13 (4): 559-576.

(收稿日期: 2015-02-14) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告