

基于模糊 PID 的裤袜包装机热封切刀温度控制的研究

薛雷, 孙以泽, 李培兴, 孙志军

(东华大学, 上海 201620)

摘要: 针对裤袜包装制袋过程中热封切刀对恒温控制的需要, 分析了热封切刀温度的影响因素, 得出了简化模型。采用了以 PIC16F877 为核心的恒温控制系统, 控制器采用模糊控制和 PID 复合的控制算法。通过控制可控硅的闭合时间, 达到了温度控制的目的。MATLAB 仿真表明, 采用模糊控制和 PID 复合的控制方法能有效降低超调量, 减少调节时间, 该系统具有良好的动态特性。

关键词: 热封切; PIC 单片机; 恒温控制; 模糊 PID; MATLAB 仿真

中图分类号: TB486+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)03-0016-05

Research on Temperature Control of Heat-sealing Cutting Knife of Pantyhose Packaging Machine Based on Fuzzy-PID

XUE Lei, SUN Yi-ze, LI Pei-xing, SUN Zhi-jun

(Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: According to the requirement of stable temperature control of heat sealing cutting knife in pantyhose packaging bag-making process, the influencing factors of heat sealing cutting knife temperature were analyzed and its simplified model was established. The control system based on PIC16F877 was designed, and the algorithm of controller was fuzzy-PID. Temperature control was realized through control the closed time of SSR. The results of MATLAB simulation showed that fuzzy-PID controller can cut down the overshoot and reduce the setting time; this system has good dynamic characteristic.

Key words: heat sealing cutting knife; PIC micro control unit; fuzzy-PID; MATLAB simulation

目前有些企业裤袜包装机的制袋是由刀片完成热封和切袋的, 热封切刀片温度靠变压器改变电压来控制。一般是人为给定变压器电压值, 热封切刀自然预热并加热至工作温度, 热封切刀温度控制是开环的。由于受到工业现场人为调节因素、外界干扰因素以及制袋加热机构本身的影响, 使得热封切刀温度不够稳定, 抗干扰能力差, 导致成品袋切口不美观; 而且温度控制对象本身具有大惯性、非线性, 很难建立精确的数学模型^[1-2]。

为克服上述缺点, 笔者从实际情况出发, 在结合一般温度对象特性基础上, 分析热封切刀的模型, 建立合适的简化传递函数模型, 并研究模糊 PID 控制算法在温度控制中的应用, 开发基于 PIC 单片机的控制系统。考虑到纺织包装行业对温控系统的需求, 该研

究对轻工机械恒温控制方面的应用有着实际意义。

1 系统分析和硬件设计

1.1 系统组成原理

热封和切袋是由热封切刀的机械运动完成的, 刀片温度靠旋转变压器旋钮改变电压来控制, 热封切刀自然预热并加热至工作温度。据此将制袋部分实物简化, 见图 1。

热封切刀由铁铬铝合金材料做成, 安装在气缸执行机构上。可调式变压器作为电源。塑料膜后端有一交流异步电机, 由 PLC 控制电机转动, 异步电机带动塑料滚筒转动, 实现塑料薄膜的输送。热封切刀与变压器相连, 电流通过时, 刀片持续加热, 当温度达到

收稿日期: 2012-10-30

作者简介: 薛雷 (1989-), 男, 河南人, 东华大学硕士生, 主攻机械电子工程。

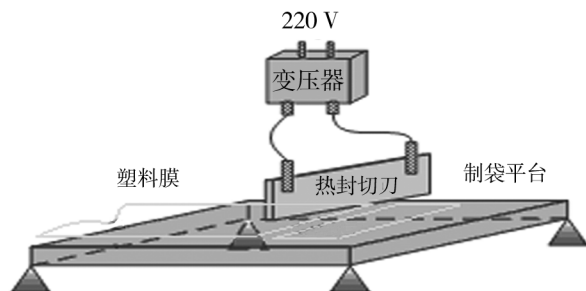


图1 制袋机实物示意图

Fig. 1 Sketch map of the bag-making machine

切袋温度的时候,信号返回给 PLC,由 PLC 控制热封切刀相连的气缸动作,完成切割塑料袋和热封的动作。当热封切刀温度超过工作温度时,则需要断开变压器的加热,以降低热封切刀温度;而机器停止工作时,则采用自然冷却。

1.2 控制系统硬件设计

控制系统分两大部分:一是单片机基本系统及外围扩展;二是系统功能模块,主要包括信号采集、显示输出、通信模块等。系统采用 PIC16F877 单片机作为控制核心,温度传感器选用 Pt100 铂电阻传感器,测量范围在 $-200 \sim +850^{\circ}\text{C}$,采用三线桥式接法,将电阻信号转换成电压信号,放大电路采用 AD623 差分放大电路。控制系统原理见图 2。

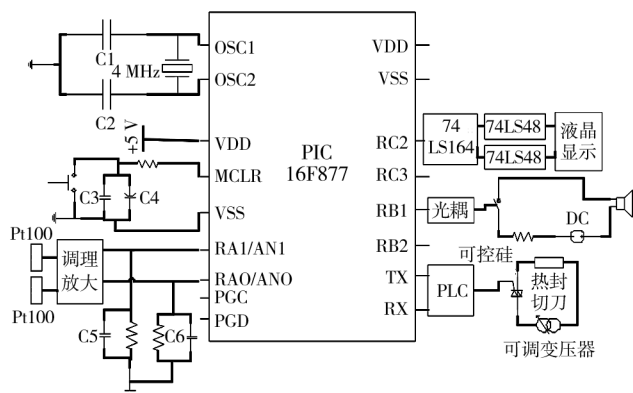


图2 系统硬件原理

Fig. 2 The schematic diagram of system hardware

Microchip 公司的 PIC16F877 单片机是一款采用 CMOS/哈佛总线结构,具有 FLASH/EEPROM 程序存储功能的 8 位单片机,内嵌看门狗和 10 位 A/D 转换器。单片机时钟电路和电源模块采用典型电路即可^[3]。键盘采用独立式按键接口,实现复位、暂停等功能。由于单片机有内嵌的 10 位 A/D 转换器,故只

需将温度采集信号经滤波、放大调理电路之后就可输入单片机。控制器配置 RS232/485 串行通讯接口,选用 MAX485 作为通讯芯片^[4],分别与 PLC 和 PC 连接,实现串行通讯,用于信号传输和控制动作执行。选用 CJ1M 中型 PLC,控制可控硅闭合和断开,从而达到控制温度的目的,报警电路则采用光电耦合器,温度达到上限时报警器报警。

2 系统的软件设计

系统软件主要功能模块和单片机寄存器的设置、温度信号采集、数据计算及存储功能,采用中断方式唤醒系统,完成 A/D 转换、温度显示、串行通讯的功能。其余时间处于等待模式,这样降低了系统功耗。根据 PLC 的 Hostlink 协议,波特率设置为 9600 B/s,设置无奇偶校验,8 位数据位^[5]。通讯检测时,由单片机发送指令,PLC 接受检测数据指令,PLC 读取完数据返回信息给单片机,若在单片机发送指令后一个采样周期内 PLC 没有响应,重复上一指令,等待 PLC 串行通讯串行正常。程序流程见图 3。

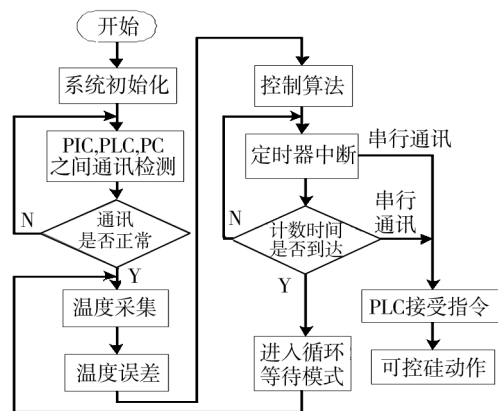


图3 系统软件流程

Fig. 3 System software flow chart

3 模糊 PID 控制器设计

选择传统 PID 控制和模糊控制相结合的方式,大误差范围内采用模糊控制,误差较小的时候切换至 PID 控制,其中开关采用软件实现,由程序给定误差设定范围,查询是否达到要求,实现控制器的切换^[6]。系统结构见图 4。

3.1 模糊量化及隶属函数选取

模糊控制器是以误差和误差的变化为输入的二

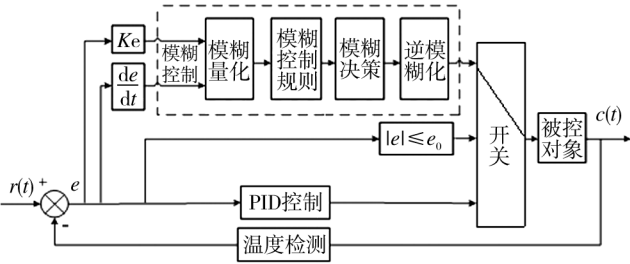


图4 控制器结构
Fig. 4 Controller structure chart

输入单输出的二维控制器。将热封切刀实际温度和参考温度值进行比较,得到偏差 e 和偏差变化 ec ,输出变量 u 为可控硅闭合时间。

设偏差 e 和偏差变化 ec 的语言变量分别为 E 和 EC ,输出变量 u 的语言变量为 U 。 U 和 EC 的模糊集均为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$; E 的模糊集为 $\{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB\}$ 。语言变量的含义分别为 $\{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大\}$,其中 E 的模糊集中, NO, PO 分别为负零、正零。误差 E 划分为14个等级,论域为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, +0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$;误差变化 EC 的论域为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$; U 的论域为 $\{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ 。温度偏差、偏差变化及输出量实际范围为 $[a, b]$,转换到各自

论域 $[-n, n]$,不足整数的四舍五入取整。选择 E, EC, U 的隶属函数均为三角函数。

表1 模糊变量 E 的赋值
Tab.1 Parameters of fuzzy variable E

E	e													
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	0	1	2	3	4	5	6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.8	1.0	0.8	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.8	1.0	0.6	0.2	0	0
PO	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0.6	0.1	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0.1	0.6	1.0	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.2	0.6	1.0	0.8	0.3	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.8	1.0	0.8	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表2 模糊变量 EC 的赋值
Tab.2 Parameters of fuzzy variable EC

E	e													
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0	
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.8	1.0	0.8	0.2	
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.0	0.5	0.1	0	0	
ZO	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	
NS	0	0	0.1	0.5	1.0	0.9	0	0	0	0	0	0	0	
NM	0.2	0.8	1.0	0.5	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

表3 模糊变量 U 的赋值
Tab.3 Parameters of fuzzy variable U

E	e														
	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.8	1.0	0.8	0.2	0
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.4	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0
ZO	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0	0.4	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	0.2	0.8	1.0	0.8	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.2 模糊控制规则与解模糊

模糊控制器的输入为误差 e 和误差变化 ec ,模糊控制规则是根据调节过程中温度的偏差和偏差变化率来确定输出控制量 u 的值。通常采用 If...then...句型。

R_i : If E is A_i and EC is B_i , then u is $C_i (i=1, 2 \cdots n;$
 A_i, B_i, C_i 分别为 E, EC, U 论域的模糊集)。

模糊规则选择原则是:控制初期,误差比较大,选择较大的控制作用,以减小上升时间,调高控制精度;控制中期,误差变小,考虑中等的控制作用,以减小超调,使系统较快地过渡;控制后期,误差接近设定阈值,选择较小的控制作用甚至关断输出,以减小超调,防止系统出现震荡。模糊控制规则见表4。

表 4 模糊控制规则
Tab.4 Table of fuzzy control rules

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	ZO	ZO
NM	PB	PB	PB	PB	PM	ZO	ZO
NS	PM	PM	PM	ZO	NS	NS	NS
NO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NM	NB	NB	NB
PM	ZO	ZO	NM	NB	NB	NB	NB
PB	ZO	ZO	NM	NB	NB	NB	NB

由于模糊规则输出的变量仍是模糊量,不能用来控制机构输出,因此需要对模糊量进行解模糊处理。采用重心法,即 Mamdani 推理法。

由各模糊规则推导 C' 的隶属度:

$$\mu_{C'_i}(z) = \mu_{A_i}(x_0) \wedge \mu_{B_i}(y_0) \wedge \mu_{C_i}(z) \quad (1)$$

由式(1)得出 C' 综合隶属度:

$$\mu_{C'}(z) = \mu_{C'_1}(z) \vee \mu_{C'_2}(z) \vee \cdots \vee \mu_{C'_n}(z) \quad (2)$$

根据式(2)和模糊集合重心式(3)即可推出输出精确量:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{C'}(z_i) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{C'}(z_i)} \quad (3)$$

3.3 PID 控制器设计

PID 控制器由比例环节 P、积分环节 I、微分环节 D 组成,其输出与输入关系:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

式中: K_p, T_i, T_d 分别为比例增益、积分时间常数、微分时间常数; $u(t), e(t)$ 分别为输出和输入随时间的变量。离散后的 PID 校正函数:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (5)$$

式中: K_p, K_i, K_d 分别为比例、积分、微分系数; $e(k)$ 和 $e(k-1)$ 分别为第 $k, k-1$ 采样时刻的误差信号; $K_i = \frac{K_p T}{T_i}$; $K_d = \frac{K_p T_d}{T}$, T 为采样周期。采用增量式 PID 控制器,表达式为^[7]:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (6)$$

4 系统建模和仿真

4.1 系统数学模型

设热封切刀和环境都获得热流 Φ 。设热封切刀质量为 m , 比热为 C , 环境温度为 t_0 , 热封切刀温度为 T , 散热系数为 h , 表面积为 A , 热流率为 Q 。热封切刀吸收的热量等于周围散热以及制袋吸收的热量之和, 即:

$$mC \frac{dT}{dt} + hA(T - t_0) = Q \quad (6)$$

在平衡点 (Q_0, u_0) 附近线性化, 得:

$$K_u = \Delta Q_i / \Delta u$$

式(6)转化微分方程为:

$$T_0 \frac{d\Delta T}{dt} + \Delta T = K \Delta u \quad (7)$$

式中: ΔT 为切刀温度变化; $T_0 = mC/hA$, 为切刀时间常数; $K = K_u/hA$, 为传热系数。对式(7)取拉普拉斯变换, 在零初始条件下, 传递函数为:

$$G(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta U(s)} = \frac{K}{1 + T_0 s} \quad (8)$$

事实上, 传热过程是有点滞的, 修正后的传递函数为:

$$G(s) = \frac{K}{1 + T_0 s} e^{-\tau s} \quad (9)$$

式中: τ 为切刀的滞后时间, 表明切刀温度变化落后于电压的变化。

4.2 系统仿真

根据面积法测得热封切刀模型参数, 见表 5。

表 5 模型参数

Tab.5 Parameters of system model						
	K	T_0	τ	K_p	K_i	K_d
面积法	5.7	710	20	—	—	—
Z-N 整定	—	—	—	7.5	133.1	0.106

在 MATLAB/SIMULINK 软件工具箱下完成系统的建模和仿真, PID 控制器参数是在 Z-N 整定参数的基础上进行修正。仿真结果见图 5。

比较图 6 中 3 种控制方法效果, 模糊 PID 控制上升时间约为 30 s, 明显小于常规 PID 控制; 模糊 PID 控制有效减小了超调量, 并且能快速进入稳态阶段, 而单纯用模糊控制, 虽然响应速度快于常规 PID 控制, 但模糊控制存在明显的稳态误差。模糊 PID 控制兼具了模糊控制和常规 PID 控制的优点, 控制效果良好。

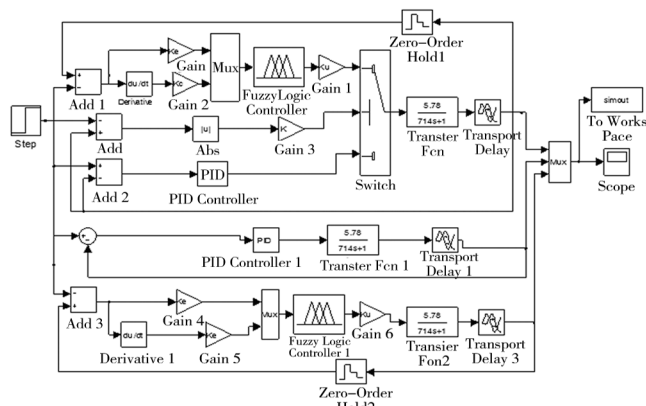


图5 系统仿真模型

Fig. 5 Model of system simulation

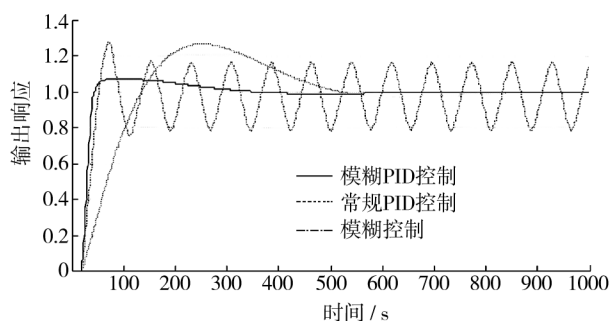


图6 阶跃响应曲线

Fig. 6 Step response curve

在 $t=800\text{ s}$ 时加入扰动,其响应过程见图7,从图

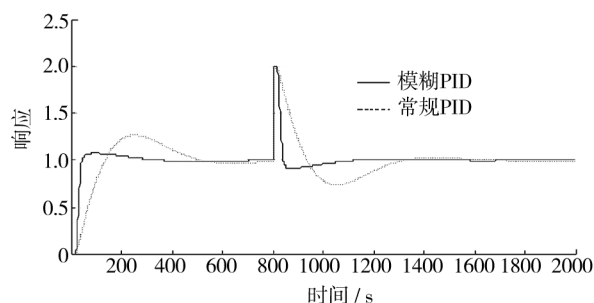


图7 控制器对干扰的响应

Fig. 7 System response curve for interference

7 可以看出,对于外部干扰的响应,模糊PID明显要优于常规PID,模糊PID反向超调更小,对干扰响应速度更快,更迅速地进入稳态,以保证系统的稳定。说明模糊PID抗干扰能力优于常规PID控制。

5 实验结果

以浪莎集团第一代裤袜包装机为测试对象,热封切刀尺寸为 $8\text{ mm}\times 0.3\text{ mm}$,工作温度为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。选

择Pt100温度传感器,分辨率为0.01,设定温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在系统达到 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,每隔5 s读取一个数据,温度数据见图8。由于制袋周期约为5 s,当热封切刀动

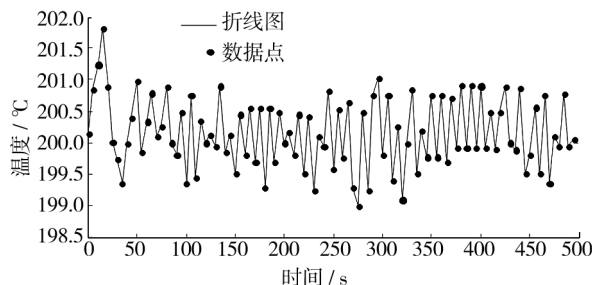


图8 温度控制实验结果

Fig. 8 Results of the experiments

作时,受空气对流以及封切耗散的影响,稳态时温度呈现振荡现象,误差为 $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,符合设计要求。

6 结语

目前裤袜包装机正在生产调试阶段,制袋温度控制部分实验效果良好,符合工艺要求。

1) 设计了制袋过程的温度控制系统,采用单片机与PLC结合的方法,单片机采集和处理温度数据,PLC控制电机和刀片以及可控硅动作,保证了系统可靠性。

2) 模糊PID能有效减小系统的超调,减小上升时间,并且在保证稳态精度的基础上,有良好的抗干扰能力,综合控制效果优于常规PID控制。

3) 模糊PID控制参数的调试比较困难,在实际应用中,根据单片机设计模糊PID控制器时,如何快速调整各参数将是工作重点。

参考文献:

- [1] 李霞. 制袋机温度控制系统的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
LI Xia. The Research of Temperature Control System for Bag-making Machine[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [2] 黄友锐. PID控制器参数整定与实现[M]. 北京:科学出版社,2010.
HUANG You-rui. PID Controller Parameters Setting and Implementation[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [3] 李荣正,王诚杰. PIC单片机原理及应用[M]. 北京:北

(下转第35页)

体系在不同温度下的酶活变化情况,研究表明该体系在 0 ℃ 贮藏 180 d 仍可以较好地保持其扩散特性,即该 TTI 从生产以后到使用之前可以在 0 ℃ 贮藏 180 d 并保持良好的品质。通过此种方法,以酶活力变化为指标,评价了 TTI 本身在贮藏过程中的品质变化,进一步增加了其在现实应用中的可靠性。

参考文献:

- [1] TAOUKIS P S, KOUTSOUMANIS K, NYCHAS G J E, et al. Use of Time-temperature Integrators and Predictive Modeling for Shelf Life Control of Chilled Fish under Dynamic Storage Conditions[J]. International Journal of Food Microbiology, 1999, 53(1): 21-31.
- [2] NUIN M, ALFARO B, CRUZ Z. Modelling Spoilage of Fresh Turbot and Evaluation of a Time-temperature Integrator (TTI) Label under Fluctuating Temperature[J]. International Journal of Food Microbiology, 2008, 127: 193-199.
- [3] YAN S, HUAWEI C, LIMIN Z, et al. Development and Characterization of a New Amylase Type Time-temperature Indicator[J]. Food Control, 2008, 19(3): 315-319.
- [4] WON K, EUNA P, KWANG W H. Development of a Time-temperature Integrator System Using Burkholderia Cepacia

Lipase[J]. Food Science and Biotechnology, 2012, 21(2): 497-502.

- [5] ELLOUZE M, AUGUSTIN J C. Applicability of Biological Time Temperature Integrators as Quality and Safety Indicators for Meat Products[J]. International Journal of Food Microbiology, 2010, 138(1-2): 119-129.
- [6] 江南大学. 基于脂肪酶反应扩散的时间温度指示器的制备方法和应用[P]. ZL201110023063, 2012.
- [7] ORELLANA L E. Immobilized Enzymes: Time Temperature Indicators For Dielectric Pasteurization Processes[D]. Washington, MD: Washington State University, 2004.
- [8] 江慧芳, 王雅琴, 刘春国. 三种脂肪酶活力测定方法的比较及改进[J]. 化学与生物工程, 2007, 24(8): 72-75.
JIANG Hui-fang, WANG Ya-qin, LIU Chun-guo. Comparison and Improvement of Three Determination Methods for Lipase Activity[J]. Chemistry & Bioengineering, 2007, 24(8): 72-75.
- [9] REYES-DE-CORCUERA J I, CAVALIERI R P, POWERS J R, et al. Enzyme-electropolymer-based Amperometric Biosensors: an Innovative Platform for Time-Temperature Integrators[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(23): 8866-8873.

(上接第 20 页)

- 京航空航天大学出版社, 2010.
- LI Rong-zheng, WANG Cheng-jie. PIC Microcontroller Principles and Applications[M]. Beijing: Beijing University Press, 2010.
- [4] 许茂林. 电液调节阀压力控制系统的研究[J]. 山东大学学报, 2011(5): 127-131.
XU Mao-lin. Research on a Pressure Control System in an Electro-hydraulic Control Valve[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2011(5): 127-131.
- [5] 原佳宁, 孟焯. 棉麻改性中微波去除残余介质的模糊控制系统研究[J]. 制造业自动化, 2012(10): 79-83.
YUAN Jia-ning, MENG Chuo. Research on Fuzzy Control System for Removing Residual Medium by Microwave in Modified Cotton and Flax Yarn[J]. Manufacturing Automation, 2012(10): 79-83.
- [6] 李士勇. 模糊控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2011: 73-97.
LI Shi-yong. Fuzzy Control[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2011: 73-97.
- [7] 吕剑虹, 陈来九. 模糊 PID 控制器及在汽温控制系统中

的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 1999(1): 1-7.

- LYU Jian-hong, CHEN Lai-jiu. Fuzzy PID Controller and Its Application Study in Temperature Control System[J]. Proceedings of the CSEE, 1999(1): 1-7.
- [8] 张秀峰. MATLAB 机电控制系统技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 96-128.
ZHANG Xiu-feng. MATLAB Mechanical and Electrical Control System Technology and Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 96-128.
- [9] QU Xiu-yun. Adaptive PID Temperature Controller Based on Fuzzy Logic[J]. International Conference on Circuit and Signal Processing, 2011, 57-55: 1455-1458.
- [10] LIN Chin-Teng, JUANG Chia-Feng, LI Chung-Ping. Temperature Control with a Neural Fuzzy Inference Network[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics part C: Applications and Reviews, 1999, 29(3): 440-451.
- [11] 张国良. 模糊控制及其 MATLAB 应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
ZHANG Guo-liang. Fuzzy Control and Application in MATLAB[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.