

基于模糊内模-PID 的包装机热封切刀温度控制

覃羨烘

(广东理工学院, 肇庆 526100)

摘要：**目的** 包装机热封切刀温度控制系统存在非线性、大滞后性等特点，传统 PID 控制的效果也越来越无法满足工艺生产的要求，为了提高包装机热封切刀温度控制的速度和精度，进而提高封口的质量，以提高产品包装效率和品质。**方法** 在传统的 PID 控制的基础上，通过结合模糊控制和内模控制理论的先进控制算法，提出模糊内模-PID 控制算法的包装机热封切刀温度控制系统。内模控制能够使 PID 控制器参数进行简化，同时模糊控制的引入能够实现控制器参数的在线调整，将该新型控制算法应用到包装机热封切刀温度控制系统中，并与传统控制进行对比。**结果** 通过 Matlab 仿真软件搭建模糊内模-PID 控制的包装机热封切刀温度控制系统仿真平台，仿真结果表明，系统响应速度、精度、超调量、抗扰动能力等比传统控制系统性能更加优良。**结论** 通过仿真验证了模糊内模-PID 控制在热封切刀温度控制系统上的有效性和可行性，能够在温度控制系统中表现出优良的性能指标。

关键词：包装机；热封切；温度控制系统；滞后性；传统 PID 控制；模糊控制；内模控制；Matlab

中图分类号：TB486 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2019)11-0166-06

DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.11.025

Temperature Control of Hot Sealing Cutter of Packaging Machine Based on Fuzzy Internal Model -PID

QIN Xian-hong

(Guangdong Polytechnic College, Zhaoqing 526100, China)

ABSTRACT: In view of the non-linearity and large lag of the temperature control system for the thermal sealing cutter of the packaging machine, the effect of traditional PID control is increasingly unable to meet the requirements of process production. The paper aims to improve the temperature control speed and accuracy of the thermal sealing cutter for the packaging machine to increase the sealing quality as well as the packaging efficiency and the quality of products. Based on traditional PID control, a temperature control system of hot-sealing cutter of packaging machine based on fuzzy internal model -PID control algorithm was proposed by combining the advanced control algorithm of fuzzy control and internal model control theory. The internal model control can simplify parameters of the PID controller, and the introduction of fuzzy control can realize online adjustment of controller parameters. The new control algorithm was applied to the temperature control system for the heat sealing cutter of the packaging machine and compared with the traditional control. The simulation platform of temperature control system for hot-seal cutter of packaging machine controlled by internal model-PID was built with the Matlab simulation software. Compared with the traditional temperature control system, the simulation system had better performance in response speed, precision, overshoot, anti-disturbance ability, etc. The validity and feasibility of the fuzzy internal model-PID control in the temperature control system of the heat-sealing cutter are

收稿日期：2019-02-12

作者简介：覃羨烘（1983—），女，工程硕士，广东理工学院讲师、数控铣工高级技师，主要研究方向为先进制造技术、机器人。

verified by simulation. It can show a strong performance index in the temperature control system.

KEY WORDS: packaging machine; heat sealing and cutting; temperature control system; hysteresis; traditional PID control; fuzzy control; internal model control; Matlab

随着工业水平的不断发展,包装机在各个行业的运用也越来越多。包装机械能够完成物料包装的一系列过程,如制袋成形、物料的定量以及封合等,其中热合封口装置扮演着重要的角色^[1]。通过对烫刀温度的控制以及塑料薄膜本身的特性,实现塑料薄膜软化成粘流状态,通过一定的压力作用能够实现塑料薄膜粘连在一起,从而实现封合,最后经过冷却并进行裁剪,实现从塑料薄膜到包装袋的加工过程。温度的精确控制在整个塑料薄膜成形过程中起着举足轻重的作用,影响着包装的封口品质、外观和速度等,进而影响产品的质量^[2]。又由于在实际工业生产过程中,热合封口装置温度的升降变化范围较大、温度不够固定,热量传递惯性大以及外界扰动多等特性,很难准确建立热封温度控制系统的数学模型^[3]。目前,针对热封温度控制系统大都采用传统的 PID 控制算法,而被控对象又存在大惯性、纯滞后以及非线性等特点,传统 PID 控制很难达到令人满意的结果,且抗扰动能力差,同时控制器参数一经确定将无法根据系统的实际情况进行在线调整^[4]。为此,结合被控对象的特点以及智能控制算法,提出了模糊内模-PID 控制算法。内模控制算法能够实现系统的跟踪能力与抗干扰能力分开处理,同时内模-PID 控制能够将传统 PID 控制的比例、积分、微分 3 个参数简化;模糊控制的引入又能够实现参数的在线调整,能够实时根据系统运行状况来调整控制器参数,使其一直保持最优,避免传统 PID 控制参数调整的随机性和盲目性,进而实现对热封温度的精准控制,大大提高包装的速度与质量。

1 热封切刀温度控制系统

1.1 工作原理

自动包装机利用热封切刀的不断动作,来完成包装袋的热封和剪切过程。其中,温度对热封切刀的制袋具有重要的影响,是一个不可忽略的参数,直接影响着包装袋的封合质量和产品包装的质量。在实际应用中,将包装薄膜进行加热的方式有很多,如利用电加热将薄膜熔化成粘流的状态,或利用高频电压进行加热等^[5]。文中通过改变电压(利用变压器的原理进行改变)来对刀片温度进行控制,直到刀片的温度达到设定值,其简化图见图 1^[6]。

经过加热使薄膜变成粘流状态后,在外部施加一定的压力后,加速了薄膜分子的热运动和相互渗透,

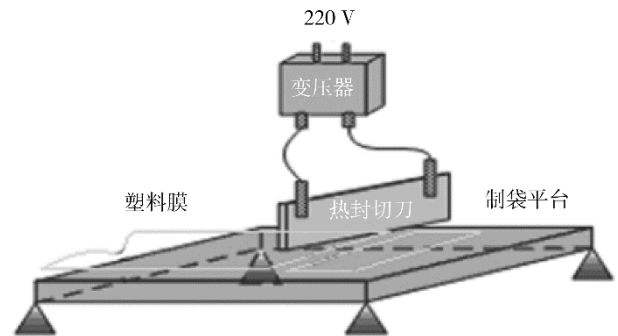


图 1 制袋机实物示意

Fig.1 Physical sketch of bag making machine

进而在分子之间的相互作用力作用下实现封合,最后经过一定时间的冷却后,进行剪切,完成制袋。另外,对于不同材质的热封薄膜,其刀片的温度也不同,结合包装速度等要求的不同,综合来说,温度一般在 100~250 ℃ 之间。此外,热封质量的影响因素还有很多,如热封压力,压力不足或过大将会造成密封的不紧,影响封装效果;但是主要关键因素还是对温度的控制,其控制的精度越高,包装质量和效率才能越好。

1.2 系统建模

为了能够描述出热封切刀温度控制系统的数学模型,进行以下假设: Φ 为热流,为热封切刀和环境中的热量; m 为热封切刀的质量; C 为比热容; h 为散热系数; T_0 为热封切刀所在环境温度; T 为切刀温度; A 为表面积; Q 为热流率。根据能量守恒原理可知^[7]:

$$mC \frac{dT}{dt} + hA(T - T_0) = Q \quad (1)$$

为了对式 (1) 进行简化,利用线性化处理方法,在平衡点 (Q_0, U_0) 附近线性化处理可得:

$$K_u = \Delta Q_i / \Delta U \quad (2)$$

对式 (1) 进行如下处理:

$$t_0 \frac{d\Delta T}{dt} + \Delta T = K \Delta U \quad (3)$$

其中:

$$t_0 = mC / hA$$

$$K = K_u / hA$$

式中: ΔT 为切刀温度变化; t_0 为切刀时间常数; K 为传热系数。

对式 (3) 进行拉普拉斯变化可得:

$$G(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta U(s)} = \frac{K}{1 + t_0 s} \quad (4)$$

在实际工业生产的过程中,热量的传递是具有一定的延迟的,对式(4)进行修正可得:

$$G(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta U(s)} = \frac{K}{1+t_0 s} e^{-\tau s} \quad (5)$$

2 内模-PID 控制器的设计

2.1 传统 PID 控制算法

传统的 PID 控制器是应用最广的一种控制器,由比例系数、积分系数和微分系数进行线性叠加而构成,具体结构见图 2。

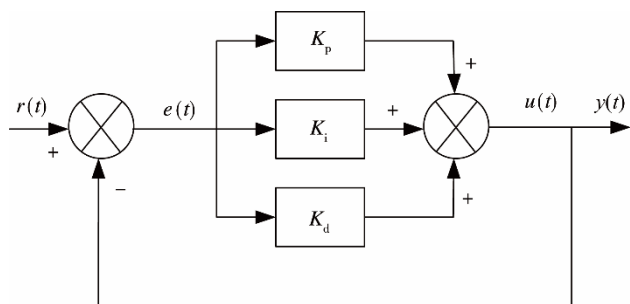


图 2 PID 控制原理

Fig.2 Principle of PID control

由图 2 可知,传统 PID 控制是一种线性的控制器,其最大的优点是结构简单,实现容易,同时具备较强的鲁棒性等^[8],通过调整比例、积分、微分系数就能基本满足工业生产的要求。传统 PID 控制方法的控制规律可以描述为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{K_i} \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (6)$$

也可以将式(6)写成传递函数的数学形式:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{K_i s} + K_d s \right) \quad (7)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数; $e(t)$ 为系统误差,即 $e(t) = y(t) - r(t)$ 。

2.2 内模-PID 控制算法 (IMC-PID)

内模控制 (IMC) 这种先进控制方法是 20 世纪 70 年代才提出的,主要为复杂的过程控制问题提供了方向。IMC 一般可以分成 2 个部分:被控过程的数学模型;内模控制器。该控制能够将系统进行拆分,分别进行控制。即可以把系统的跟踪性和鲁棒性相互分开,单独控制。这样做便于系统的设计与分析,其典型的控制结构见图 3^[9]。

其中: $r(s)$ 是控制给定值; $u(s)$ 为控制输出量; $y(s)$ 为被控对象的输出量; $d(s)$ 为系统外部的扰动。 $G_p(s)$ 和 $G_w(s)$ 分别为被控对象模型和内部模型。根据图 3,输入与输出的传递函数可以写为:

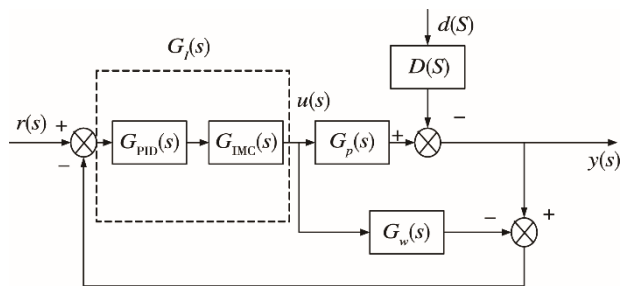


图 3 内模控制结构

Fig.3 Diagram of internal model control structure

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_I(s)G_p(s)}{1 + G_I(s)[G_p(s) - G_w(s)]} \quad (8)$$

$$\frac{y(s)}{d(s)} = \frac{1 - G_I(s)G_w(s)}{1 + G_I(s)[G_p(s) - G_w(s)]} \quad (9)$$

将图 3 的 IMC 结构进行转换,可以得到等价结构,见图 4。

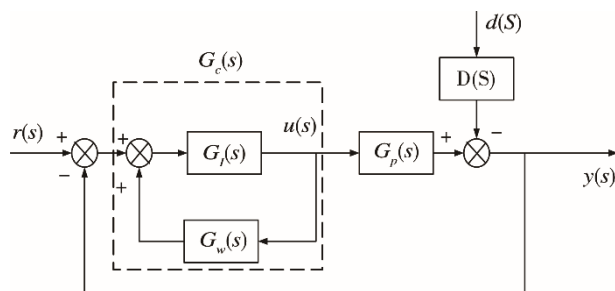


图 4 内模控制结构

Fig.4 Diagram of internal model control structure

由图 4 可分析得出:

$$G_c(s) = \frac{G_I(s)}{1 - G_I(s)G_w(s)} \quad (10)$$

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (11)$$

$$\frac{y(s)}{d(s)} = \frac{D(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (12)$$

可以得到内模系统的传递函数:

$$y(s) = \frac{G_I(s)G_p(s)}{1 + G_I(s)[G_p(s) - G_w(s)]} r(s) + \frac{[1 - G_I(s)G_w(s)]}{1 + G_I(s)[G_p(s) - G_w(s)]} D(s) \quad (13)$$

IMC 控制器的设计通常可如下进行。

第 1 步:将过程模型 $G_w(s) = G'(s)$ 分解为两部分,写成 $G'(s) = G'_+(s)G'_-(s)$ 的形式,并且注意 $G'_+(s) = 1$; 其中 $G'_+(s)$ 是全通部分,有零或极点位于 s 右半平面 (RHP) 的部分,并且根据零稳态特性, $G'_+(s) = 1$; $G'_-(s)$ 是最小相位部分,即所有开环零、极点都位于 s 面左半部分^[10]。

第 2 步:设计内模控制器 $G_{IMC}(s)$, 引入滤波器

$\frac{1}{(\lambda s+1)^r}$ ，所以内模控制器见式 (14)：

$$G_{\text{IMC}}(s)=\frac{G_{-}^{\prime-1}(s)}{(\lambda s+1)^r}$$

(14)

式中： λ 为滤波器的可调参数； r 为 $G_{-}^{\prime-1}(s)$ 的相对阶次。

由图 4 可以看出，框出的部分为等效的控制器。综合上述可得：

$$C(s)=\frac{G_{-}^{\prime-1}(s)}{(\lambda s+1)^r-G_{+}^{\prime}(s)}$$

(15)

一般 PID 控制器，可表示为：

$$C(s)=K(1+\frac{1}{T_i s}+T_d s)$$

(16)

把 $C(s)$ 写成 $C(s)=\frac{1}{s}f(s)$ 的形式，则有：

$$f(s)=\frac{sG_{-}^{\prime-1}(s)}{(\lambda s+1)^r-G_{+}^{\prime}(s)}$$

(17)

将 $f(s)$ 用泰勒级数展开，则：

$$C(s)=\frac{1}{s}\left(f(0)+f'(0)s+\frac{f''(0)}{2}s^2+\cdots\right)=$$

$$K(1+\frac{1}{T_i s}+T_d s+\cdots)$$

(18)

通过等价关系则可以算出： $K=f'(0)$ ，

$$T_i=\frac{f'(0)}{f(0)},\quad T_d=\frac{f''(0)}{2f'(0)}。$$

如果把 $C(s)$ 写成如下形式：

$$C(s)=k_p+k_i\frac{1}{s}+k_d s$$

(19)

则： $k_p=f'(0)$ ， $k_i=f(0)$ ， $k_d=f''(0)/2$ 。这样，PID 控制器的各个系数就很明了地表示了出来^[11]。

3 模糊内模-PID 控制系统

3.1 控制系统结构

通过以上分析和内模-PID 控制器的设计可知，IMC-PID 控制器的参数只有一个滤波器参数 λ ，大大简化了传统 PID 控制器的参数，但是改参数对整个温度控制系统的影响较大，人工调整存在大量的盲目性和随机性。为此，在内模-PID 控制的基础上引入了模糊控制，可以实现参数的在线调整，实现温度控制系统的精准控制，其结构见图 5。模糊控制主要根据系统偏差和偏差的变化率，在模糊规则的作用下，实现对控制器参数的调整^[12]。

3.2 模糊内模-PID 控制算法

模糊控制属于一种新的智能控制，是一种非线性控制。1965 年 L. A. Zadeh 教授首先提出了隶属度函

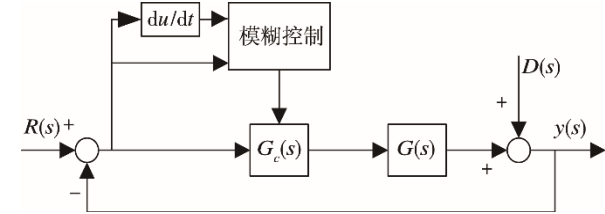


图 5 模糊内模-PID 控制系统
Fig.5 Fuzzy internal model-PID control system

数的概念，用于表达事物的模糊性概念，主要由模糊集合、模糊逻辑、模糊推理和模糊控制等几部分组成。与传统控制方法如 PID 控制相比，模糊控制用语言式的模糊变量来描述系统，而不是用数值来描述系统，因此不需要被控对象的精确数学模型，可以简化系统的设计，所以特别适用于非线性、模型不完全的系统，这也是模糊控制最大的优点^[13]。

其中，模糊内模-PID 控制算法首先通过模糊规则对计算系统当前的偏差 e 和偏差的变化率 e_c 进行模糊推理；然后，根据模糊规则表对参数进行在线修改；最后，建立了模糊规则控制表，见表 1^[14]。设定输入变量为 e 和 e_c 语言值的模糊子集为{负大、负小、零、正小、正大}，并记作{NB、NS、Z、PS、PB}，将 e 和 e_c 量化到合适的区域内，同样设定输出量的模糊子集和量化区域。根据实际情况和经验，将 e 和 e_c 以及输出的变化范围定义为模糊集上的论域，即论域为{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3}。同时对 e 和 e_c 分别采用高斯型，输出采用三角形。

表 1 滤波器参数模糊规则
Tab.1 Fuzzy rules for filter parameters

e_c	e				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB	PB	PS	PS	ZO
NS	PB	PS	PS	ZO	PS
ZO	PS	PS	ZO	PS	PS
PS	PS	ZO	PS	PS	PB
PB	ZO	PS	PS	PB	PB

4 仿真结果分析

根据以上分析，热封切刀温度控制系统存在着大惯性、纯滞后以及非线性等等点，其数学模型可近似看作一阶惯性加纯滞后的模型。为了验证模糊内模-PID 控制算法 (Fuzzy-IMC-PID) 在包装机热封切刀温度控制系统中的有效性和合理性，在仿真软件 (MATLAB/Simulink) 中搭建模糊内模-PID 控制器的控制系统仿真模型，对于包装机热封切刀温度控制系统的数学模型，结合以上分析和参考文献^[15]：

$$G(s)=\frac{0.5}{1+50s}e^{-5s}$$

(20)

针对包装机热封切刀温度控制系统的特性,分别采用模糊内模-PID 控制器(Fuzzy-IMC-PID)、内模-PID 控制器(IMC-PID)和传统的 PID 控制器分别对包装机热封切刀温度控制系统进行仿真对比,其单位阶跃响应仿真曲线结果见图 6。从图 6 可以明显看出,模糊内模-PID 控制器较内模-PID 控制器和传统 PID 控制器具有更加优良的性能指标,如超调量更小,上升时间和调节时间更短,稳态误差更小等。

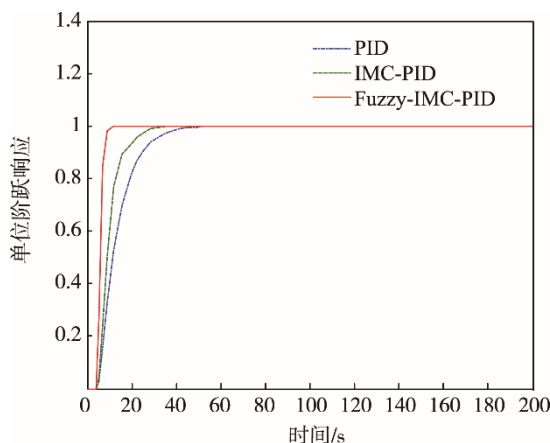


图 6 单位阶跃响应仿真曲线
Fig.6 Unit step response simulation curve

在实际包装机热封剪切过程中,存在许多干扰。为了验证系统的抗干扰能力,在时间 $t=100$ s 时加入幅值为 0.1 的阶跃负载扰动,其仿真结果见图 7。从图 7 可以看出,模糊内模-PID 控制在干扰出现时能够最快反应,迅速恢复到设定值,其次就是内模-PID 控制,因此,提出的算法在抗干扰能力方面要比传统控制强。

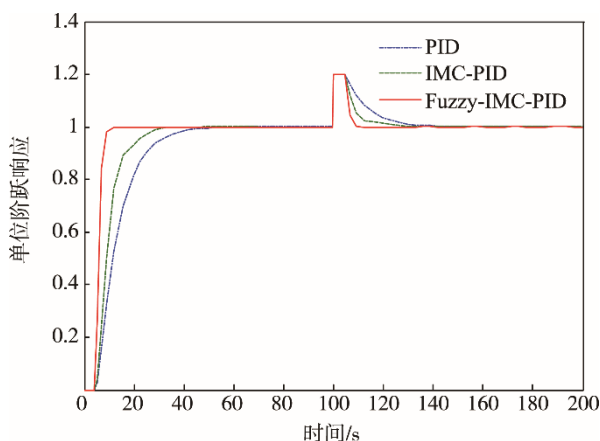


图 7 不同算法下抗扰动仿真曲线
Fig.7 Anti-disturbance simulation curves with different algorithms

5 结语

包装机热封切刀温度控制系统是一个复杂的非

线性、大惯性、大滞后的系统,针对传统 PID 控制的缺点和不足,提出了模糊内模-PID 控制算法,大大改善了热封切刀温度控制系统的性能。内模-PID 控制能够实现控制器参数的简化,模糊控制能够实现参数的在线调整。借助 Matlab 软件,利用 Simulink 的仿真表明:模糊内模-PID 控制算法要比传统的控制算法具有更加优良的性能指标,鲁棒性和控制精度也大大提高,能够实现热封切刀温度的有效控制。

参考文献:

- [1] 丰会萍, 胡亚南, 李明辉, 等. 基于 RBF-PID 的多功能包装机热封温度控制[J]. 制造业自动化, 2018(1): 16—20.
FENG Hui-ping, HU Ya-nan, LI Ming-hui, et al. Temperature Control of Heat-sealing of Multi-function Packaging Machine Based on RBF-PID[J]. Manufacturing Automation, 2018(1): 16—20.
- [2] 马晓宇. 自动包装机热封温度自适应控制系统设计[J]. 包装工程, 2016, 37(21): 173—178.
MA Xiao-yu. Design of Temperature Adaptive Control System for Heating Sealing Mechanism of Automatic Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(21): 173—178.
- [3] 翟阳, 曹亦轩, 肖永松. 热封制袋机中多通道温控系统的设计[J]. 包装工程, 2013, 34(17): 68—71.
ZHAI Yang, CAO Yi-xuan, XIAO Yong-song. Design of Multi-channel Temperature Control System for Heat Sealing and Cutting Bag Machine[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(17): 68—71.
- [4] 杨世勇, 徐国林. 模糊控制与 PID 控制的对比及其复合控制[J]. 自动化技术与应用, 2011, 30(11): 21—25.
YANG Shi-yong, XU Guo-lin. Comparison Between Fuzzy Control and PID Control and Its Composite Control[J]. Industrial Control and Application, 2011, 30(11): 21—25.
- [5] 薛雷, 孙以泽, 李培兴, 等. 基于模糊 PID 的裤袜包装机热封切刀温度控制的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(3): 16—20.
XUE Lei, SUN Yi-ze, LI Pei-xing, et al. Research on Temperature Control of Heat-sealing Cutting Knife of Panty-hose Packaging Machine Based on Fuzzy-PID[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3): 16—20.
- [6] 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. Research on Temperature Control System of Bagging Machine[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [7] 陈明霞, 张寒, 郑谊峰. 基于 RBF 神经网络的自动包装机温度控制算法研究[J]. 包装工程, 2018, 39(19): 150—156.

- CHEN Ming-xia, ZHANG Han, ZHENG Yi-feng. Temperature Control of Automatic Packaging Machine Based on RBF Neural Network[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(19): 150—156.
- [8] 刘志成, 孙大刚, 梁建宗. 气动人工肌肉仿生行走机构模糊PID控制[J]. 工业机械, 2012, 43: 29—33.
- LIU Zhi-cheng, SUN Da-gang, LIANG Jian-zong. Fuzzy PID Control for Bionic Walking Mechanism of Pneumatic Artificial Muscle[J]. Industrial Machinery, 2012, 43: 29—33.
- [9] 翟奕博, 刘锁清, 李军红. 模糊内模PID控制在湿法脱硫系统中的应用[J]. 自动化与仪表, 2017, 32(11): 45—49.
- ZHAI Yi-bo, LIU Suo-qing, LI Jun-hong. Application of Fuzzy Internal Model PID Control in Wet Desulfurization System[J]. Automation and Instrument, 2017, 32(11): 45—49.
- [10] 赵伟, 孙建平. 基于内模控制的PID控制器的设计与仿真[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(9): 55—56.
- ZHAO Wei, SUN Jian-ping. Design and Simulation of PID Controller Based on Internal Model Control[J]. Industrial Control Computer, 2016, 29(9): 55—56.
- [11] 李若茜, 凌智, 李东海, 等. IMC-PID控制器在轧机液压自动位置控制系统中的应用[J]. 机床与液压, 2017, 45(7): 106—109.
- LI Ruo-xi, LING Zhi, LI Dong-hai, et al. Application of IMC-PID Controller in Hydraulic Automatic Position Control System of Rolling Mill[J]. Machine Tool and Hydraulic, 2017, 45(7): 106—109.
- [12] 王小龙. 模糊内模PID在锅炉主蒸汽温度系统中应用[J]. 锅炉技术, 2014, 45(6): 32—34.
- WANG Xiao-long. Application of Fuzzy Internal Model PID in Boiler Main Steam Temperature System[J]. Boiler Technology, 2014, 45(6): 32—34.
- [13] 李国勇, 杨丽娟. 神经模糊预测控制及其MATLAB实现[M]. 第3版. 北京: 电子工业出版社, 2013: 187—222.
- LI Guo-yong, YANG Li-juan. Neuro-Fuzzy Predictive Control and Its Realization in MATLAB[M]. 3rd Edition. Beijing: Electronic Industry Press, 2013: 187—222.
- [14] 邓顺, 周康渠. 基于DSP的焊接机器人控制算法研究与仿真设计[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2017, 34(1): 87—93.
- DENG Shun, ZHOU Kang-qu. Research and Simulation of Control Algorithm Design of Welding Robot Based on DSP[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2017, 34(1): 87—93.
- [15] 温玉春, 刘祺君. 基于模糊PID的包装机热封切刀温度控制[J]. 包装工程, 2017, 38(3): 109—113.
- WEN Yu-chun, LIU Qi-jun. Temperature Control of Heat-sealing Cutter of Packaging Machines Based on Fuzzy PID[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(3): 109—113.