

基于模糊分数阶 PID 的啤酒灌装机贮液缸内液位控制

易东蔚, 陈劲杰

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: **目的** 贮液缸内液位的变化对啤酒灌装机的正常工作以及产品质量和生产效率等有重要影响, 传统的 PID 控制很难准确控制贮液缸内的液位, 为提高啤酒灌装机的工作效率和啤酒的质量等, 需对贮液缸内液位进行精准控制。**方法** 根据分数阶微积分理论的知识, 提出分数阶 PID 控制, 该控制方法将传统的 PID 控制推广到分数阶领域中, 利用 Oustaloup 算法实现传统 PID 控制由点到面的转变, 使控制精度更高。针对分数阶 PID 控制器参数的调整问题, 结合智能控制理论, 引入模糊控制算法, 提出模糊分数阶 PID 控制, 以实现参数的在线调整, 并与传统控制方法进行对比。**结果** 利用 Simulink 工具箱搭建模糊分数阶 PID 控制的啤酒灌装机贮液缸内液位控制系统的仿真平台, 与传统控制相比较, 模糊分数阶 PID 控制器能够获得良好的控制性能指标, 无论动态指标还是静态指标以及抗干扰能力, 都有较大的改善。**结论** 采用文中提出的方法能够明显提高液缸内液位的精准控制精度, 提高啤酒灌装机的工作效率以及啤酒的质量, 满足了工业生产的要求。

关键词: 啤酒灌装机; 贮液缸; 液位控制; 传统 PID 控制; 分数阶理论; Oustaloup 算法; 模糊控制; Simulink

中图分类号: TB486 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)11-0161-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.11.024

Liquid Level Control in Storage Cylinder of Beer Filling Machine Based on Fuzzy Fractional PID

YI Dong-wei, CHEN Jing-jie

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: In view of the close relationship between the change of liquid level in the tank and the normal operation of beer filling machine, the quality and efficiency of beer production, traditional PID control will be difficult to accurately control the liquid level in the tank. In order to improve the working efficiency of beer filling machine and the quality of beer, precise control of liquid level in the tank is needed. According to the knowledge of fractional calculus theory, a fractional order PID control was proposed. This control extended the traditional PID control to the fractional order domain. The Oustaloup algorithm was used to realize the transformation of the traditional PID control from point to surface to obtain higher control accuracy. To adjust parameters of the fractional order PID controller, a fuzzy fractional order PID controller was proposed by introducing the fuzzy control algorithm in combination with the intelligent control theory, to realize online adjustment of parameters and compare with the traditional control. Simulink toolbox was used to build the simulation platform of the level control system in the tank of beer filling machine controlled by fuzzy fractional PID.

收稿日期: 2019-01-29

基金项目: 上海理工大学校级课题 (3A18304037)

作者简介: 易东蔚 (1994—), 男, 上海理工大学硕士生, 主攻智能制造。

通信作者: 陈劲杰 (1969—), 男, 硕士, 上海理工大学副教授, 主要研究方向为智能机器人、智能控制系统。

Compared with the traditional control, the fuzzy fractional PID controller can obtain good control performance indicators. Both dynamic and static indicators as well as anti-jamming ability were greatly improved. The method presented in this paper can obviously improve the control precision of liquid level in the cylinder, improve the efficiency of beer filling machine and quality of beer, and meet the requirements of industrial production.

KEY WORDS: beer filling machine; liquid tank; liquid level control; traditional PID control; fractional order theory; oustaloup algorithm; fuzzy control; Simulink

在工业生产过程中,啤酒灌装机扮演着重要的角色,直接关系到啤酒生产的质量与效率。啤酒灌装机的核心部位是贮液缸,贮液缸内液位的精确控制,能够有效避免灌装过程中可能出现的啤酒量的过多或过少、满溢、不足等严重影响啤酒生产成本的问题。这些问题不仅造成材料的浪费和设备的损坏,还会增加企业的生产成本和维修成本等^[1]。此外,贮液缸内部存在着液态和气态两种状态,且都具有相等的压力,在贮液缸内液位的轻微变化都会对整个啤酒灌装过程造成重大影响^[2]。灌装机内的贮液缸内的液位控制存在着较大的非线性、多干扰等特点,随着人们对啤酒要求的不断提高,传统 PID 控制很难将贮液缸内液位的控制达到令人满意的结果,同时传统的 PID 控制器参数(比例、积分和微分系数)一经确定将无法根据系统的实际情况进行在线调整^[3]。根据智能控制理论的发展,也为实现啤酒的良好灌装提供了新的途径和方法。传统的 PID 控制由于结构简单,实现容易,适应各种环境的能力也较强,因而被广泛应用。文中在分数阶微积分理论的基础上,对传统的 PID 控制引入积分阶次和微分阶次,实现控制的灵活度,同时也保留传统 PID 控制的优点。同时引入模糊数学理论,实现参数的在线调整,避免传统 PID 控制参数调整的随机性和盲目性,以提高啤酒灌装的品质和效率。

1 数学模型

1.1 啤酒灌装过程

目前,啤酒灌装技术已经相当成熟,其整个过程见图 1^[4]。

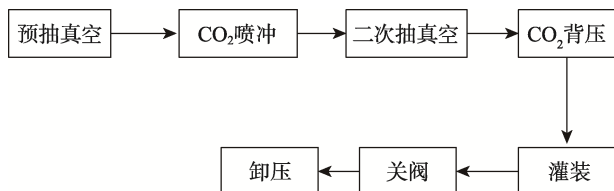


图 1 啤酒灌装工艺流程
Fig.1 Flow chart of beer filling process

由图 1 可知,啤酒在灌装过程中需要经历 7 个部分:预抽真空、CO₂ 喷冲、二次抽真空、CO₂ 背压、灌装、关阀、卸压。具体的啤酒灌装过程为:经过洗瓶机清洗之后,啤酒瓶被送到灌装机中,最后被送到

托瓶气缸上,经过托瓶气缸的上升将啤酒瓶紧紧地与灌装机的下料口相连接,形成一个不透气的封闭环境。与此同时,对瓶子进行抽空处理,抽真空完毕后贮液缸内的背压 CO₂ 被冲入瓶中。随着气体的冲入,啤酒瓶内的压力将不断升高,当气压达到液缸内的气体压力时,液阀将会被打开,进行啤酒的灌装。随着瓶内液体的增多,瓶中的气体 CO₂ 将被送到贮液缸内,当瓶内液位到达一定高度的时候,会停止下料,最后将液阀和气阀关闭,并排除瓶颈多余的气体完成啤酒的灌装^[5]。

1.2 系统模型建立

由于啤酒灌装机贮液缸内液体在短暂时间内的流动很难确定,这也造成了贮液缸内液面被控对象的数学模型很难确定。为此,采用图 2 所示的简化结构。其中, Q_1 和 Q_2 分别是啤酒的流入和流出的液量; V_1 和 V_2 分别是控制流入液量和流出液量的电动阀; H 为液体的高度^[6]。随着液面的升高,压力将变大,进而造成流出液体的速度和流量变大,即 Q_2 变大。

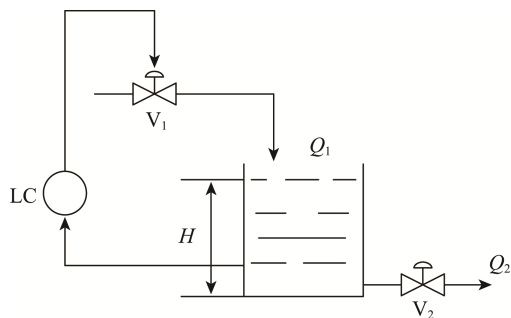


图 2 啤酒灌装机贮液缸系统结构
Fig.2 Structure of cylinder system for beer filling machine

根据质量守恒和物料平衡的相关理论知识可知:

$$A \frac{dH}{dt} = Q_1 - Q_2 \quad (1)$$

式中: A 为贮液缸的底面积。式(1)的增量为:

$$A \frac{dH}{dt} = \Delta Q_1 - \Delta Q_2 \quad (2)$$

实际上,贮液缸的液位 H 与流量之间并不是线性的关系,为了处理方便对其进行线性化的处理,可近似看成 ΔQ_2 与 ΔH 成正比,与电液阀 V_2 的阻力成反比,即^[7]:

$$\Delta Q_2 = \frac{\Delta H}{R_2} \quad (3)$$

综合以上公式可得：

$$R_2 A \frac{d\Delta H}{dt} + \Delta H = R_2 \Delta Q_1 \quad (4)$$

对式 (4) 的两边分别进行拉普拉斯变换可得：

$$G(s) = \frac{H(s)}{Q_1(s)} = \frac{R_2}{R_2 As + 1} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (5)$$

式中：\$K = R_2\$，\$T = R_2 A\$。

2 模糊分数阶 PID 控制器 (Fuzzy-FOPID)

2.1 传统 PID 控制

传统的 PID 控制器主要依靠误差来消除误差的策略，在实际的应用中，人们根据经验选择合适的比例、积分、微分系数，就能够很好地控制被控对象^[8]，因此，在啤酒灌装机贮液缸液位控制中也被广泛采用，其结构见图 3。

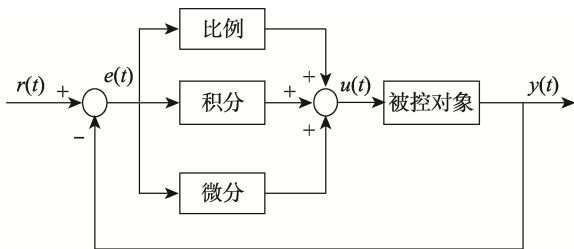


图 3 PID 控制原理

Fig.3 Principle of PID control

其中，PID 控制方法的控制规律可以描述为：

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

也可以将上式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。

2.2 分数阶 PID 控制 (FOPID)

分数阶 PID 控制是整数阶 PID 控制器的推广，也就是说传统的 PID 控制器只是分数阶 PID 控制器的特殊情况。其中，分数阶微积分的理论为分数阶 PID 控制器的实现提供了理论基础。其中微积分算子的定义为^[9]：

$${}_a D_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & Re(a) > 0 \\ 1 & Re(a) = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^{-\alpha} & Re(a) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中，\${}_a D_t^\alpha\$ 为函数 \$f(t)\$ 的 \$\alpha\$ 次积分或微分；\$\alpha\$ 为分数阶的微分 (\$\alpha > 0\$) 或者为分数阶的积分 (\$\alpha < 0\$)；\$\alpha\$ 为下限值；\$t\$ 为上限值。

通过上面的定义之后，函数的分数阶微分方程为：

$$b_m D^{\beta_m} y(t) + \dots + b_1 D^{\beta_1} y(t) + b_0 D^{\beta_0} y(t) = a_n D^{\alpha_n} u(t) + \dots + a_1 D^{\alpha_1} u(t) + a_0 D^{\alpha_0} u(t) \quad (9)$$

式 (9) 经过拉普拉斯变换后可得到其传递函数：

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\alpha_n s^{\alpha_n} + \alpha_{n-1} s^{\alpha_{n-1}} + \dots + \alpha_0 s^{\alpha_0}}{b_m s^{\beta_m} + b_{m-1} s^{\beta_{m-1}} + \dots + b_0 s^{\beta_0}} \quad (10)$$

与整数阶函数的传递函数相似：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D^{-\lambda} e(t) + K_d D^\mu e(t) \quad (11)$$

式中：\$\lambda\$ 为积分阶次；\$\mu\$ 为微分阶次；\$e(t) = r(t) - y(t)\$ 为控制器输入；\$u(t)\$ 为控制器输出。

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (12)$$

通过式 (7) 和 (12) 对比可知，分数阶 PID 控制器是传统 PID 控制器的推广形式。当 \$\lambda=1, \mu=1\$ 时，整数阶 PID 与分数阶 PID 一样，但是 \$\lambda, \mu\$ 能够取不同的值，因此分数阶 PID 控制要比传统的整数阶 PID 控制器控制得更加精确，算法能力也更强，见图 4^[10]。

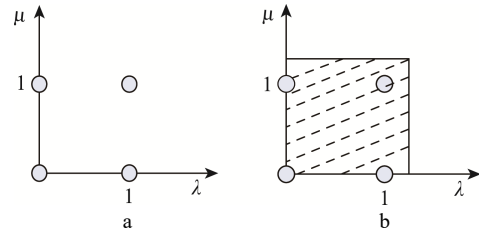


图 4 PID 阶次取值变化

Fig.4 Change chart of PID order value

分数阶 PID 控制器是在分数阶微积分理论的基础上提出来的，而分数阶微积分的实际应用中，为了能够得到比较好的模拟效果，常采用 Oustaloup 滤波算法，其具体算法可以参照文献[11]所讲述的方法来逼近分数阶微分算子：

$$s^q = \left(\frac{d\omega_h}{b} \right)^q \left(\frac{ds^2 + b\omega_h s}{d(1-q)s^2 + b\omega_h s + dq} \right) \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k} \quad (21)$$

其中：

$$\omega'_k = \left(\frac{d\omega_h}{b} \right)^{\frac{q-2k}{2N+1}}$$

$$\omega_k = \left(\frac{b\omega_h}{d} \right)^{\frac{q+2k}{2N+1}}$$

式中：\$(\omega_b, \omega_h)\$ 为感兴趣的频段；\$q\$ 为微分阶次；\$2N+1\$ 为滤波器阶次，参考文献[11]取 \$b=10, d=9\$。

2.3 模糊控制 (Fuzzy)

随着智能控制领域的发展,各种各样的智能控制算法不断被提出和应用。其中模糊控制理论是应用最广的一种智能控制,也是一种非线性控制。关于模糊控制的理论最早是由 L. A. Zadeh 教授提出的,他为了能够表达对模糊对象的描述,提出了隶属度函数的概念,其主要是由模糊集合、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,可以简化系统设计的复杂性,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^[12]。

模糊控制与分数阶 PID 控制相结合,能够实现分数阶 PID 控制器参数的在线调整,能够根据实时工况来改变参数,进而更精准地实现对啤酒灌装机贮液缸内的液位控制。

模糊分数阶 PID 控制器的实现,首先利用 MATLAB 中的模糊工具箱来搭建模糊控制。模糊分数阶 PID 控制器以误差 e 和误差的变化 e_c 作为输入,可以满足不同时刻的 e 和 e_c 对分数阶 PID 参数自整定的要求。利用模糊规则在线对分数阶 PID 参数进行修改,从而实现被控系统的输出响应有良好的动态和静态性能。最后,建立了模糊规则控制表。针对 K_p , K_i , K_d 这 3 个参数分别整定的模糊控制表可以参考文献^[13]。

根据控制器中的规则,选用三角形的隶属度函数,在 MATLAB 的 Fuzzy Logic 工具箱中搭建控制器,在规则窗口中输入上述三表中的模糊控制规则,设定输入变量 e 和 e_c 语言值的模糊子集为{负大、负中、负小、零、正小、正中、正大},并记作{NB、NM、NS、Z、PS、PM、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^[14]。根据实际情况和经验,将系统误差 e 和误差变化率 e_c 变化范围定义为模糊集上的论域,即: $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$,输出变量 K_p , K_i , K_d 论域为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。其具体实现见图 5 和 6。

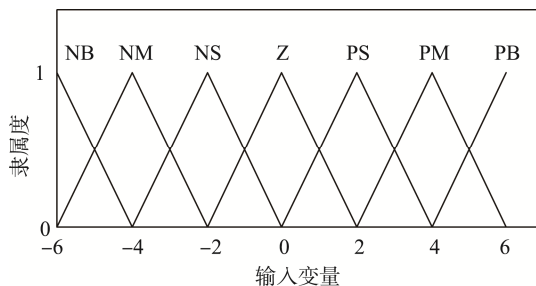


图 5 输入变量 e 和 e_c 的隶属度函数
Fig.5 Membership functions of input variables e and e_c

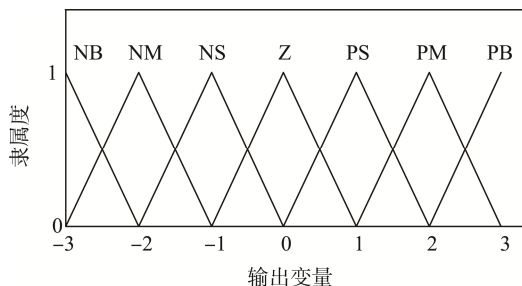


图 6 输出变量 K_p , K_i , K_d 的隶属度函数
Fig.6 Membership functions of output variables K_p , K_i and K_d

3 仿真结果与分析

利用 Matlab/Simulink 仿真软件,综合上述模糊分数阶 PID 控制器的实现,搭建模糊分数阶 PID 的啤酒灌装机贮液缸内液位控制系统。针对啤酒灌装机贮液缸的数学模型,参考文献^[15]提出的具体传递函数:

$$G(s) = \frac{4.756}{160.436s + 1} \quad (13)$$

为了验证模糊分数阶 PID 控制的有效性,针对啤酒灌装机贮液缸内液位的控制,分别采用了传统的 PID 控制、模糊 PID 控制 (Fuzzy-PID) 和模糊分数阶 PID 控制 (Fuzzy-FOPID) 进行仿真实验对比,其单位阶跃的仿真曲线见图 7。从图 7 的仿真结果可以看出,提出的模糊分数阶 PID 控制器较前两种算法具有更加优良的动静态性能指标 (如上升时间、调节时间、超调量以及稳态误差等)。

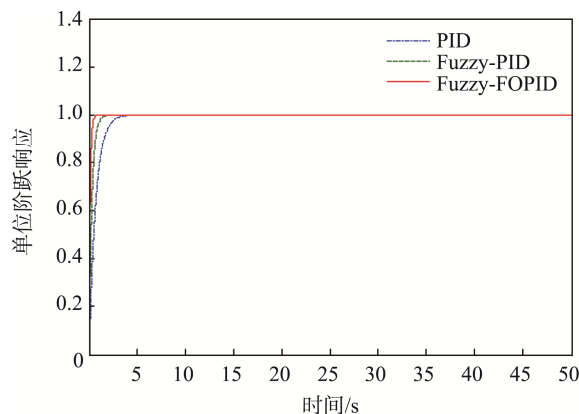


图 7 单位阶跃仿真曲线
Fig.7 Simulation curve of unit step

啤酒灌装机贮液缸内液位控制系统在灌装的时候存在许多干扰,为了验证模糊分数阶 PID 算法的抗干扰能力,在仿真过程中时间 $t=30$ s 时加入幅值为 0.1 的阶跃干扰,仿真结果见图 8。由图 8 可以看出,模糊分数阶 PID 控制器在扰动出现后,能够以最快速度恢复到设定值上,其抗干扰能力最强。

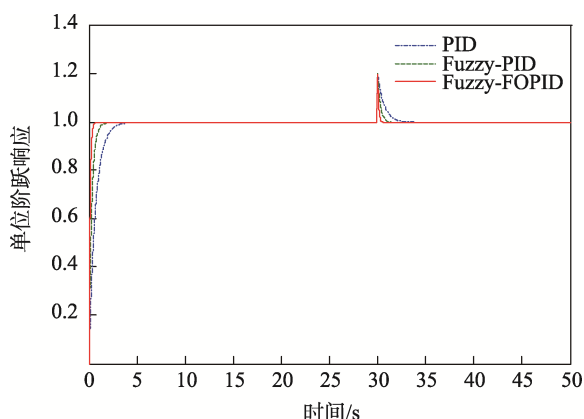


图8 不同算法的抗干扰能力

Fig.8 Anti-jamming ability under different algorithms

4 结语

啤酒灌装机贮液缸内液位控制是一个非线性、时变、干扰多的系统,对其液位的控制精度直接关系到啤酒生产的质量与效率。为了克服传统PID控制的不足,结合分数级控制理论与智能控制算法,提出了模糊分数阶PID控制算法的灌装机贮液缸内的液位控制,该控制器具有精确的控制精度。通过实验仿真表明,模糊分数阶PID控制比模糊PID控制和传统的PID控制具有更加优良的性能指标(如超调量小、精度高、响应速度快、抗干扰能力强等),能够使灌装机贮液缸内液位控制系统获得最佳的控制效果。

参考文献:

- [1] 申志勇. 影响啤酒灌装机灌装效果的因素分析[J]. 包装与食品机械, 2005, 23(5): 18—19.
SHEN Zhi-yong. The Analysis of Influencing Factors About Beer Filler[J]. Packaging and Food Machinery, 2005, 23(5): 18—19.
- [2] 史革盟, 李斌, 杨春雷. 啤酒灌装机贮液缸液位控制及仿真设计[J]. 机电工程技术, 2007, 36(3): 79—80.
SHI Ge-meng, LI Bin, YANG Chun-lei. Liquid Level Control and Simulation Design of Storage Tank of Beer Filling Machine[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2007, 36(3): 79—80.
- [3] 王冬梅, 李玉成. 啤酒灌装机贮液缸内液位控制[J]. 食品与机械, 2000, 18(3): 29—30.
WANG Dong-mei, LI Yu-cheng. Liquid Level Control in the Tank of Beer Filling Machine[J]. Food and Machinery, 2000, 18 (3): 29—30.
- [4] 李倩, 李东, 王嫻. 分数阶BAM神经网络的全局渐进稳定性[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2017, 34(1): 21—26.
LI Qian, LI Dong, WANG Xian. Global Asymptotic Stability of Fractional Arder BAM Neural Networks[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2017, 34(1): 14—20.
- [5] 宣云静. 浅谈玻璃瓶啤酒灌装机[J]. 中国新技术新产品, 2014(2): 88.

- XUAN Yun-jing. Brief Discussion on Glass Bottle Beer Filling Machine[J]. China New Technologies and Products, 2014 (2): 88.
- [6] 王靓, 宁奎伟, 李明辉. 基于遗传算法的贮液缸液位PID控制参数整定[J]. 包装工程, 2014, 35(23): 89—93.
WANG Liang, NING Kui-wei, LI Ming-hui. Tuning of PID Control Parameter for Liquid Level of Liquid Storage Cylinder Based on Genetic Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(23): 89—93.
- [7] 何非, 黄川, 张敏, 等. 基于单片机的啤酒灌装机控制系统设计[J]. 机械设计与制造工程, 2014(11): 58—62.
HE Fei, HUANG Chuan, ZHANG Min, et al. Micro-controller - Based Control System Design for Beer Filling Machine[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014(11): 58—62.
- [8] 杨世勇, 徐国林. 模糊控制与PID控制的对比及其复合控制[J]. 工业控制与应用, 2011, 30(11): 21—25.
YANG Shi-yong, XU Guo-lin. Comparison Between Fuzzy Control and PID Control and Its Compsite Control[J]. Industrial Control and Application, 2011, 30(11): 21—25.
- [9] 付华, 李亚飞, 徐耀松. 模糊分数阶PID控制的风机风量调节方法研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32 (8): 374—377.
FU Hua, LI Ya-fei, XU Yao-song. Research on The Method of Fan Air Volume Regulation Based on Fuzzy Fractional Order PID Control[J]. Computer Simulation, 2015, 32 (8): 374—377.
- [10] 梁涛年, 陈建军, 王媛, 等. 分数阶系统模糊自适应分数阶PID控制器[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39 (7): 1040—1045.
LIANG Tao-nian, CHEN Jian-jun, WANG Yuan, et al. Fuzzy Adaptive Fractional-Order PID Controller for Fractional-Order Systems[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39 (7): 1040—1045.
- [11] 薛定宇, 陈阳泉. 控制数学问题的Matlab求解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
XUE Ding-yu, CHEN Yang-quan. Matlab Solution of Control Mathematics Problems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 陆烨, 袁梦, 余勃. 基于模糊PID控制在混合自动定量给料器中应用的研究[J]. 包装工程, 2008, 29(6): 14—16.
LU Ye, YUAN Meng, SHE Bo. Application Research of Fuzzy-PID Control in a Mix Automatic Ration System[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6): 14—16.
- [15] 申超群, 宰守香. 基于RBF-PID的啤酒灌装机贮液缸内液位控制[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 55—58.
SHEN Chao-qun, ZAI Shou-xiang. Liquid Storage Tank Liquid Level Control of Beer Filling Machine Based on RBF-PID[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(5): 55—58.