

新型悬浮包装中薄膜张力的模糊自适应 PID 控制

汤伟, 王古月, 王露露
(陕西科技大学, 西安 710021)

摘要: **目的** 解决新型悬浮包装缓冲衬垫生产中薄膜张力难以控制的问题。**方法** 建立非连续覆膜环节中张力系统的数学模型, 提出以 LabVIEW 为仿真软件, 模糊自适应 PID 为控制算法的仿真策略。分析在不同卷径、不同加速度和加减速方式下, 薄膜张力的变化情况和算法的控制效果。**结果** 仿真结果表明, 薄膜卷径越小张力波动越大, 运行加速度越大薄膜张力波动越大。在不同工况下, 模糊自适应 PID 较常规 PID 有更快的响应速度和更小的超调量。**结论** 模糊自适应 PID 参数调整简单, 适应性好, 能满足非连续覆膜过程中薄膜张力稳定的控制要求。

关键词: 张力控制; 模糊自适应 PID; 非连续覆膜; 新型悬浮包装

中图分类号: TB485.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)03-0141-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.03.027

Fuzzy Adaptive PID Control of Film Tension in New Suspension Package

TANG Wei, WANG Gu-yue, WANG Lu-lu
(Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an, 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem that the film tension is difficult to control in the process of producing the buffering cushion of new suspension package. The mathematical model for the tension system during the non-continuous film coating was established. A simulation strategy with LabVIEW as simulation software and fuzzy adaptive PID as control algorithm was proposed. The change of film tension and the control effect of the algorithm under different rolling diameters, accelerations and acceleration/deceleration modes were analyzed. The simulation results showed that, the smaller the film rolling diameter, the greater the tension fluctuation; the greater the running acceleration, the greater the film tension fluctuation. In different working conditions, compared with the conventional PID, the fuzzy adaptive PID had faster response speed and smaller overshoot. The fuzzy adaptive PID parameter adjustment is simple and adaptive, which can meet the control requirements of film tension stability in the non-continuous film coating process.

KEY WORDS: tension control; fuzzy adaptive PID control; non-continuous film coating; new suspension package

新型悬浮包装是包装运输行业一种新式的包装方法^[1-2], 该包装方法是用 2 个相同的缓冲衬垫将产品紧固于其中, 外加 1 个外包装纸盒形成的, 具有成本低廉、保护性能好、展示性强等优点。该包装方法的关键是保持 PE 薄膜的表面张力恒定, 薄膜张力过大容易引起薄膜断裂, 造成产品破坏, 张力过小容易造成生产的缓冲衬垫不能达到预期的缓冲效果。由此, 保证覆膜过程中 PE 薄膜张力的恒定, 对于新型悬浮包装具有重要意义。

现阶段, 针对薄膜张力控制的研究主要集中在薄膜的生产过程, 关于覆膜操作中薄膜张力的控制研究相对较少, 但覆膜过程与薄膜放卷过程类似, 因此有许多可以借鉴的地方。杨梅等^[3]建立了连续开卷张力模型, 采用常规 PID 进行仿真研究; 胥小勇^[4]等分析流涎薄膜收卷系统的张力与线速度、卷径及转速之间的动力学关系, 以神经网络 PID 进行仿真研究; 陈作杰^[5]等采用模糊 PI 张力控制代替常规 PI 张力控制, 具有响应更快、可抗扰动等优点; 王瑞超等^[6]建立锥

收稿日期: 2017-08-30

基金项目: 陕西省重点科技创新团队计划 (2014KCT-15)

作者简介: 汤伟 (1971—), 男, 陕西科技大学教授、博导, 主要研究方向为纸浆造纸全过程自动化、工业过程高级控制。

度张力收卷模型并采用模糊神经 PID 控制器实时调节收卷转速,对张力进行间接补偿。上述文献只讨论了薄膜连续运行的情况,并未考虑薄膜非连续运行的情况,而悬浮包装的覆膜过程是一种非连续运行的薄膜放卷过程。周春雷等^[7]建立了薄膜非连续运行的张力系统模型,采用自适应 PID 控制算法进行仿真,分析了非连续运行过程中卷径、加速度对张力波动的影响,并通过实验进行验证,但只讨论了在非连续正弦加减速信号下的张力控制,没有与其他的速度仿真信号进行对比^[8-10]。

缓冲垫覆膜生产过程具有非连续运行、频繁加减速的特点,导致薄膜张力经常波动,难以控制。这里首先建立非连续覆膜过程中薄膜张力的数学模型,并在 LabVIEW 软件平台上运用模糊自适应 PID 算法进行仿真研究,以验证算法在不同卷径、加速度、加减速情况下张力控制的有效性。

1 张力控制系统建模

新型悬浮包装盒型衬垫的生产过程见图 1,中空盒型被安装在旋扩支架上,以一定的速度旋转将 PE 薄膜缠绕在表面。系统的工作原理为:张力传感器检测到薄膜张力并输入张力控制器中,与张力的设定值进行比较,生成张力偏差值,偏差经过一系列运算产生控制作用,并以励磁电流形式输出。通过调节励磁电流,可实现磁粉制动器^[11]输出转矩的准确调整参数,达到控制张力的目的。

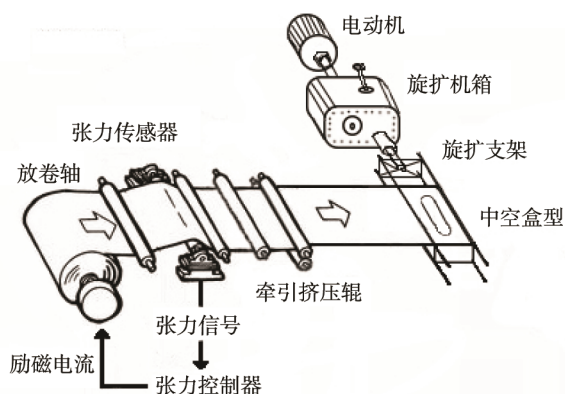


图1 薄膜张力控制系统

Fig.1 Film tension control system

张力控制系统见图 2。其中 F_T 为薄膜的张力; ω 为薄膜卷的角速度; r 为卷轴的半径; R 为薄膜卷的半径; v_1 为薄膜的放卷线速度; v_2 为薄膜的缠绕线速度。薄膜受到旋扩支架的牵引力、系统的摩擦力和磁粉制动器的制动力,以薄膜为研究对象,建立动态力矩平衡方程:

$$\frac{d(J\omega)}{dt} = F_T R - M_R - B_f \omega \quad (1)$$

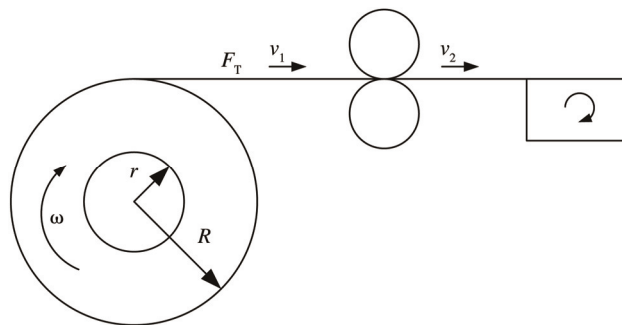


图2 张力控制系统

Fig.2 The tension control system

式中: B_f 为阻尼系数; J 为薄膜卷的转动惯量; M_R 为制动力矩。薄膜卷的转动惯量等于薄膜的转动惯量与转轴的转动惯量之和:

$$\begin{aligned} J &= J_R + J_f = \\ &= \frac{1}{2} \rho \pi b (R^4 - r^4) + \frac{1}{2} \pi b \rho_0 r^4 = \\ &= \frac{1}{2} \rho \pi b R^4 + \frac{1}{2} \pi b (\rho - \rho_0) r^4 = \\ &= \frac{1}{2} \rho \pi b R^4 + J_0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: J_R 为薄膜的转动惯量; J_f 为转轴的转动惯量; ρ 为薄膜密度; b 为薄膜的宽度; ρ_0 为卷轴的密度; J_0 为常数。在 1 个覆膜周期内,加减速阶段卷径变化很小,可忽略,即 $dR/dt=0$,则式(2)对 t 求导可得:

$$\frac{dJ}{dt} = 0 \quad (3)$$

放卷角速度对 t 求导可得:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{R} \frac{dv_1}{dt} - \frac{v_1}{R^2} \frac{dR}{dt} = \frac{a}{R} \quad (4)$$

式中: a 为覆膜过程中薄膜的加速度。将式(2—4)代入式(1),可得薄膜张力的表达式:

$$F_T = \left(\frac{1}{2} \rho \pi b R^4 + J_0 \right) \frac{a}{R^2} + \frac{M_R}{R} + B_f \frac{v_1}{R^2} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,在薄膜缓冲垫生产过程中,薄膜的张力与卷径、放卷线速度、加速度、制动力矩有关,通过改变磁粉制动器的制动力矩,就可以保证在不同速度和卷径的条件下张力仍能保持恒定。

2 模糊自适应 PID 控制

2.1 原理

模糊自适应 PID^[12]就是将模糊控制算法^[13]的适应性和鲁棒性与常规 PID^[14]的稳定性和可靠性相结合,是将工程人员总结出来的用自然语言表述的 PID 参数调整经验,转化为计算机所能处理的控制算法,计算机根据这些模糊规则自动调整 PID 参数,其结构见图 3, x , y 为系统的输入输出变量。 e 和 e_c 分别为

实际论域内的偏差和偏差变化率, E 和 E_c 分别为模糊论域内的偏差和偏差变化率。系统的偏差 e 和偏差变化率 e_c 经过量化因子 K_e 和 K_{ec} 完成从实际论域到模糊论域的转换, 并输入模糊控制器内, 依次通过模糊化、模糊推理和解模糊后得到修正量 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d , 并输入 PID 控制器中, 对 PID 控制器的 3 个参数进行在线调整。

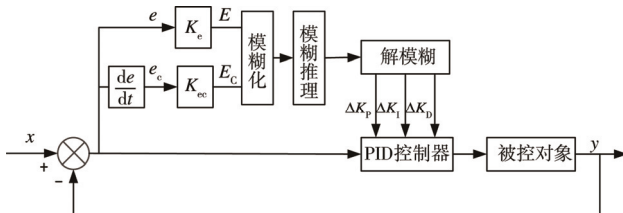


图 3 模糊自适应 PID 结构

Fig.3 Structure of fuzzy adaptive PID

2.2 设计

选择模糊自适应 PID 控制的结构为 2 输入、3 输出。输入变量为 e , e_c , 输出变量为 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d 。为方便控制器的设计, 将 e 与 e_c 和 ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d 模糊论域 U 定义为 $[-3, 3]$ 。将模糊论域划分为 7 个模糊子集, 即 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。张力偏差 e 的实际论域为 $[-3, 3]$, 因此 e 的量化因子 K_e 为 1; 张力偏差变化率 e_c 的实际论域为 $[-1, 1]$, 因此 e_c 的量化因子 K_{ec} 为 3。选择常见的三角形隶属度函数。根据工程人员调整 PID 参数的经验建立相应的模糊规则表^[15]。

3 仿真分析

选用 NI-LabVIEW 为仿真平台, 进行仿真实验。创建子 VI 可极大便于程序的编写, 子 VI 类似于 Matlab 中的子函数。首先, 根据式 (5) 搭建张力控制对象的子 VI, 见图 4, 制动力矩 M_R 、速度 v_1 、卷径 D 为输入, 张力 F_T 为输出, J_0 , B_f , b , ρ 为固定值。然后, 搭建模糊自适应 PID 的子 VI, 其结构见图 5, K_p , K_i , K_d 为 PID 参数的初始值, $1/s$ 和 S 分别代表积分运算和微分运算。将建立的模糊推理文件导入模糊控制器中, 建立一个 2 输入、3 输出的模糊控制器。最后, 利用创建好的子 VI 搭建非连续覆膜过程中薄膜张力的仿真系统, 仿真结构见图 6, 其中增益为 0.4 的环节为文献[16]磁粉制动器数学模型的一部分。通过改变速度函数和薄膜卷径, 就能模拟不同工况下张力的变化情况。

选取常用的非连续正弦速度信号和梯形速度信号, 见图 7。为方便表述, 将最大速度为 0.1 m/s 的正弦速度信号定义为正弦信号 1, 最大速度为 0.2 m/s

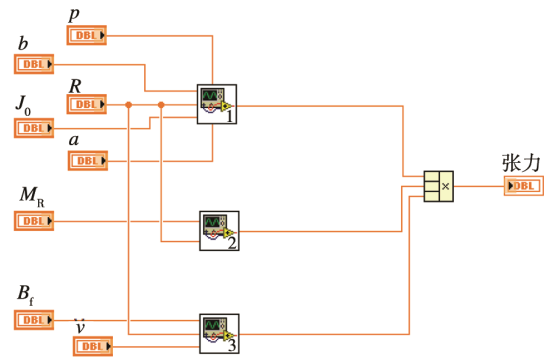


图 4 张力对象子 VI

Fig.4 The subVI of tension object

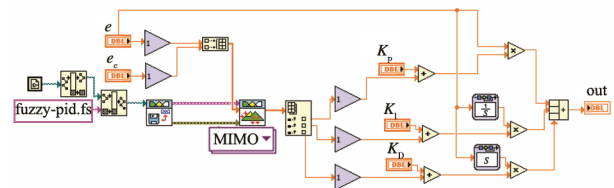


图 5 模糊自适应 PID 子 VI

Fig.5 The subVI of fuzzy adaptive PID

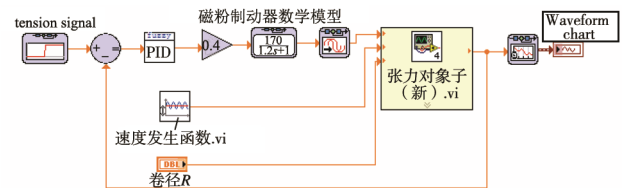


图 6 张力控制仿真结构

Fig.6 The structure of tension control simulation

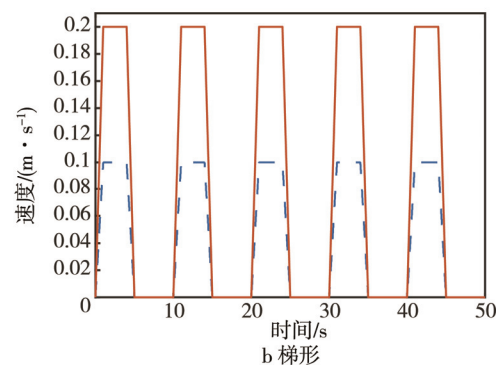
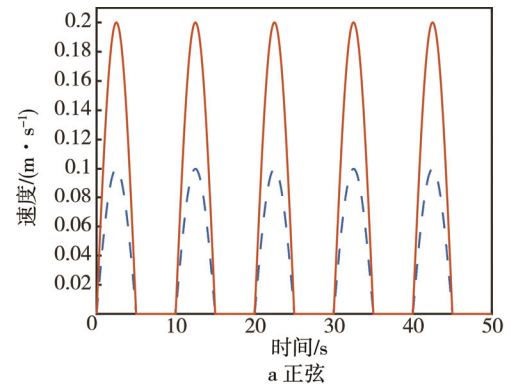


图 7 非连续速度信号

Fig.7 Non-continuous velocity signal

的正弦信号定义为正弦信号 2；将最大速度为 0.1 m/s 的梯形速度信号定义为梯形信号 1，最大速度为 0.2 m/s 的梯形速度信号定义为梯形信号 2。很显然，在相同周期下，速度信号 2 比速度信号 1 的加速度大。在一个缓冲垫生产周期内薄膜卷径变化不大，为了方便研究认为这段时间内薄膜的卷径保持恒定。

使用的 PE 薄膜的初始卷径为 200 mm，宽度为 500 mm，转轴卷径为 35 mm，假设某悬浮包装产品需要的薄膜张力为 15 N，在该条件下进行仿真。卷径固定不变，为 200 mm，采用正弦信号 1 为速度函数，采用模糊 PID 和常规 PID 这 2 种控制方式，仿真结果见图 8a，可以看出，模糊 PID 比常规 PID 的响应速度快，张力波动小，薄膜张力波动周期与速度信号的加减速周期基本一致。保持控制器参数不变，保持卷径不变，采用正弦信号 2 进行仿真，结果见图 8b，与图 8a 相比，薄膜张力变化大。由此，薄膜张

力与系统加速度有关，且加速度越大，张力波动越大。

保持卷径不变，将正弦速度信号替换为梯形速度信号，张力变化曲线见图 8c—d，可以看出，梯形信号下张力波动大。由此，可以推断张力波动不仅与加速度大小有关，且与加减速的方式有关。将卷径减小为 100 mm，在正弦信号 1 和梯形信号 1 下的仿真结果见图 8e—f，可以看出，卷径越小，张力波动越大，且梯形加减速方式比正弦加减速方式的张力波动更大。

不同工况下张力控制系统的性能对比见表 1。虽然在不同的卷径和加速度条件下，张力会发生不同情况的波动，但是模糊自适应 PID 都具有较好的调节性能和自适应能力，可快速维持张力恒定。通过上述分析可以得出，在薄膜非连续覆膜过程中，薄膜卷径一定的情况下，可适当减小运行过程中加速度和选择平稳的加减速方式以提高张力控制系统的稳定性。

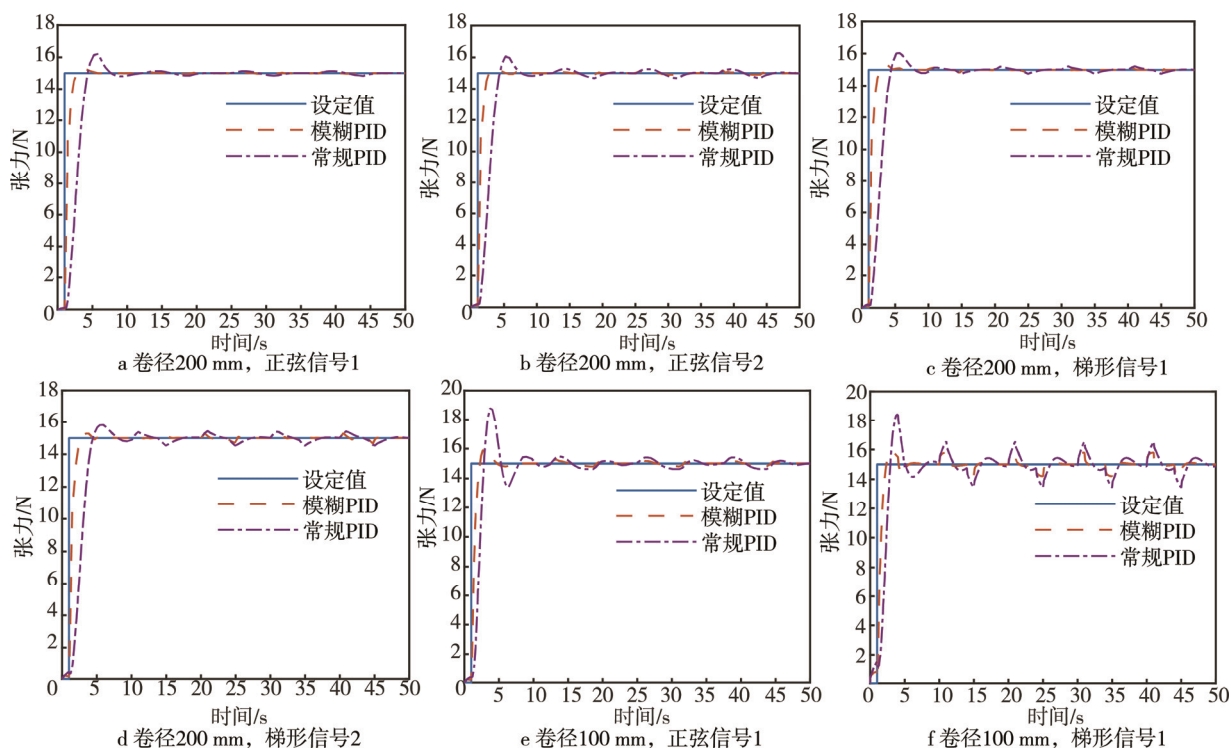


图 8 不同卷径和信号下的仿真结果

Fig.8 The simulation results of different rolling diameters and signals

表 1 控制系统性能对比

Tab.1 Performance comparison of control system

工况	常规 PID			模糊 PID		
	张力上限/N	张力下限/N	调整时间/s	张力上限/N	张力下限/N	调整时间/s
1	16.1	14.8	11	15.2	14.9	6
2	16.2	14.65	12	15.3	14.9	7
3	16.5	14.7	13	15.2	14.9	6
4	16.8	14.6	13	15.5	14.8	8
5	18.5	13.5	15	16.0	14.6	8
6	18.8	13.3	19	16.8	14.2	10

4 结语

建立了悬浮包装缓冲垫生产过程中薄膜非连续运行的张力数学模型。在 LabVIEW 平台上搭建了张力控制对象和模糊自适应 PID 子 VI, 并选用正弦和梯形这 2 种速度发生函数进行仿真。结果表明, 在不同卷径、加减速方式下, 模糊自适应 PID 控制方法都具有较好的适应能力。采用 LabVIEW 软件便于算法的实现, 但该方法目前仅停留在仿真阶段, 具体的效果还需工程实践的进一步验证。

参考文献:

- [1] 希悦尔包装(上海)有限公司. Korrvu 悬空紧固包装[EB/OL]. (2010-02-17)[2017-04-11]. <http://china.makepolo.com/product-detail/100038815647.html>.
XiYueEr (Shanghai) Packaging Company. Korrvu Suspended Fastening Package[EB/OL]. (2010-02-17)[2017-04-11]. <http://china.makepolo.com/product-detail/100038815647.html>.
- [2] STACK S M, GOODRICH D. Suspension Packaging: US, 8127928[P]. 2012-03-06.
- [3] 杨梅, 续明进. 基于 Matlab 的卷筒纸印刷机张力控制系统的建模与仿真[J]. 包装工程, 2011, 32(7): 22—25.
YANG Mei, XU Ming-jin. Modeling and Simulation of Tension Control System in Web Press Based on Matlab[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(7): 22—25.
- [4] 胥小勇, 孙宇, 蒋清海. 薄膜张力控制系统的建模与设计[J]. 中国机械工程, 2013, 24(18): 2452—2457.
XU Xiao-yong, SUN Yu, JIANG Hai-qing. Modeling and Design of a Film Tension Control System[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(18): 2452—2457.
- [5] 陈作杰, 吴培德, 张义红. 模糊 PI 控制器在薄膜张力控制系统的应用研究[J]. 智能计算机与应用, 2014, 4(3): 42—44.
CHEN Zuo-jie, WU Pei-de, ZHANG Yi-hong. Application Research on Fuzzy PI Controller in Web Tension System[J]. Intelligent Computer and Applications, 2014, 4(3): 42—44.
- [6] 王瑞超, 孙宇, 胥小勇. 基于模糊神经网络的薄膜收卷锥度张力控制系统[J]. 化工自动化及仪表, 2013, 40(3): 316—320.
WANG Rui-chao, SUN Yu, XU Xiao-yong. Research of Cone Tension Control System in Film Winding Based on Fuzzy-neural Network[J]. Chemical Automation Instruments, 2013, 40(3): 316—320.
- [7] 周春雷, 陈建魁, 尹周平. 薄膜非连续开卷张力控制建模、仿真与实验[J]. 电气自动化, 2013, 35(3): 9—11.
ZHOU Chun-lei, CHEN Jian-kui, YIN Zhou-ping. Modeling, Simulation and Experiment of Tension Control in Film Non-continuous Unwinding System[J]. Electrical Automation, 2013, 35(3): 9—11.
- [8] MALKI H, MISIR D, FEIGENSPAN D, et al. Fuzzy PID Control of a Flexible-joint Robot Arm with Uncertainties from Time-varying Loads[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1997, 5(3): 371—378.
- [9] CHUNG B M, LEE S G, CHO C S. Active Tension Control of High Speed Splitting Machines Using Fuzzy PID[C]// IEEE International Conference on Mechatronics, 2005.
- [10] 庄利锋, 杨慧中. 模糊自适应 PID 控制器的设计及应用[J]. 自动化与仪表, 2005(1): 37—39.
ZHUANG Li-feng, YANG Hui-zhong. Design and Application of Fuzzy Adaptive PID Controller[J]. Automatic Instrument, 2005(1): 37—39.
- [11] 王力, 钱林方, 高强, 等. 磁粉制动器的建模与辨识研究[J]. 电气自动化, 2010, 32(5): 55—58.
WANG Li, QIAN Lin-fang, GAO Qiang, et al. Research on Modeling and Identification of Magnetic Particle Brake[J]. Electrical Automation, 2010, 32(5): 55—58.
- [12] 崔雅静, 杜艳丽, 王晓雷. 自适应模糊 PID 控制器的设计[J]. 控制工程, 2008(S): 132—133.
CUI Ya-jing, DU Yan-lin, WANG Xiao-lei. Adaptive Fuzzy PID Controller Design[J]. Control Engineering, 2008(S): 132—133.
- [13] 刘向杰, 柴天佑. 模糊控制研究的现状与新发展[J]. 信息与控制, 1999, 28(4): 283—292.
LIU Xiang-jie, CHAI Tian-you. Status and Development of Fuzzy Control[J]. Information and Control, 1999, 28(4): 283—292.
- [14] 王蕾, 宋文忠. PID 控制[J]. 自动化仪表, 2004, 25(4): 1—6.
WANG Lei, SONG Wen-zhong. PID Control[J]. Automatic Instrument, 2004, 25(4): 1—6.
- [15] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
LIU Jin-kun. Advanced PID Control and MATLAB Simulation[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003.
- [16] 陈朝元. 多段式张力控制系统的建模与仿真[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
CHAO Chao-yuan. Modeling and Simulation of Multi-stage Tension Control System[D]. Changsha: Central South University, 2007.