

基于双模糊 PID 的枕式包装机材料输送速度控制方法

熊新国¹, 郝军², 刘拥军¹

(1.河南职业技术学院, 郑州 450046; 2.驻马店技师学院, 河南 驻马店 463000)

摘要: **目的** 为提升材料输送速度控制的精准性和稳定性、缩短速度调整时间, 研究基于双模糊 PID 的枕式包装机材料输送速度控制方法。**方法** 首先利用模糊化处理控制器内的速度输入信号, 形成模糊语言集; 然后利用加权平均判决法反模糊化处理模糊语言集, 形成可识别数值; 在此基础上, 采用模糊控制自适应调整 PID 控制参数, 结合模糊控制过程的适应性和 PID 控制的精准性, 形成双模糊 PID 控制方法对可识别数值进行控制, 从而提升材料输送速度控制过程的精准性和稳定性。**结果** 实验发现, 该方法的平均速度控制偏差为 1.17 mm, 可有效实现对速度的精准控制, 且环境噪声干扰对速度控制精度的影响较小。**结论** 在包装速度不同的情况下, 控制调整时间较短且稳定性强。实验结果证明该方法具有较强的有效性。

关键词: PID; 枕式包装机; 材料输送; 速度控制; 模糊控制器

中图分类号: TB486; TP273.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)17-0255-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.17.035

Control Method of Material Supply Speed of Pillow Packing Machine Based on Double Fuzzy PID

XIONG Xin-guo¹, HAO Jun², LIU Yong-jun¹

(1.Henan Polytechnic, Zhengzhou 450046, China; 2.Zhumadian Technician College, Zhumadian 463000, China)

ABSTRACT: In order to improve the accuracy and stability of the material feeding speed control and shorten the adjustment time of the speed, this paper studies the material feeding speed control method of pillow packing machine based on the double fuzzy PID. Firstly, the speed input signal in the controller is used to form the fuzzy language set. Then the weighted average decision method is used to reverse the fuzzy processing of fuzzy language sets to form identifiable values. On this basis, the fuzzy control adaptive adjustment of PID control parameters, combined with the adaptability of the fuzzy control process and the accuracy of PID control, the formation of a double fuzzy PID control method to control the identifiable numerical values, so as to improve the accuracy and stability of the material feeding speed control process. The experimental results show that the average speed control deviation of this method is 1.17 mm, which can effectively realize the accurate control of speed, and the influence of environmental noise on the accuracy of speed control is small. In the case of different packing speed, the control adjustment time is shorter and the stability is stronger. Experimental results show that this method is effective.

KEY WORDS: PID; pillow packing machine; material supply; speed control; fuzzy controller

收稿日期: 2020-10-28

基金项目: 河南省科技厅科技攻关项目 (202102210170)

作者简介: 熊新国 (1974—), 男, 硕士, 河南职业技术学院副教授, 主要研究方向为机电控制。

枕式包装机指能够自动完成送料、供膜、制袋、封口与成品输送等程序的自动包装设备,可应用于物品以及食品包装,并实现不间断的包装材料供送^[1]。枕式包装机具有智能自动化和生产效率高等特点,应用范围比较广泛^[2],但是,对枕式包装机材料供送速度展开精准控制始终是一个难点问题。供送速度的不稳定性将直接影响包装质量和精度^[3-4]。

李艳等^[5]研究了基于神经网络PID自适应的枕式包装机包装材料供送速度控制方法,通过在线调整与优化系统参数实现对包装材料速度的在线调节。该方法能够提高包装材料的供送速度精度,但其缺点在于未能缩短速度控制调整时间,且稳定性不高、抗干扰能力弱。郭琳^[6]研究了基于PLC的包装机包装材料恒速供送控制方法,结合传统PID控制方法与神经网络控制实现包装材料速度控制。该方法能够提高响应速度与稳定性,增强抗干扰能力,但其缺点在于速度控制精准性低。

为此,文中基于双模糊PID研究一种新的枕式包装机材料供送速度控制方法,用于材料供送速度控制的精度与稳定性,并缩短控制调整时间,从而有效提高包装质量。

1 枕式包装机送膜系统

包装材料的稳定供送属于产品自动化包装的关键因素,在包装材料供送时一定要确保材料快速供送,且供送过程具有较强的稳定性与较高的可控性。设计送膜装置时需要满足的条件为:实现包装工艺与包装材料的连续平滑供送;依据包装效率调整送膜速度;符合包装材料供送的定长与定向等控制条件;所设计供膜装置要利于包装机整体布局,可以实现连续传动、色标检测与传感器安装等工作。

该枕式包装机将复合薄膜包装材料置于柔性滚筒中,枕式包装机送膜过程见图1。

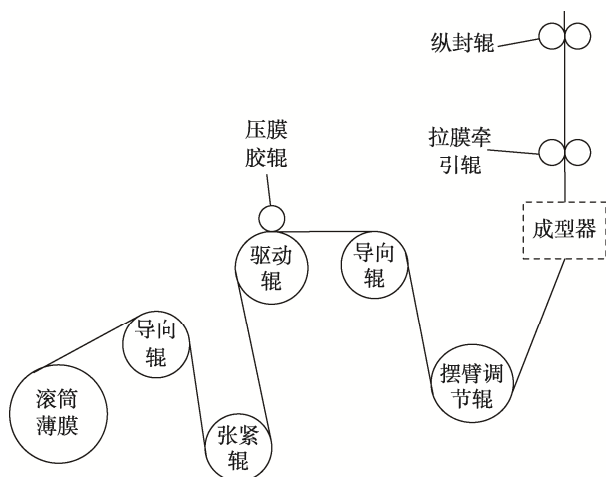


图1 枕式包装机送膜过程

Fig.1 Film feeding process of pillow packing machine

将滚筒薄膜安装在支撑轴上,绕到导向辊位置,然后利用张紧辊张紧,再采用牵引输出轴实施牵引,促使薄膜向前运动。在此基础上,利用摆臂调节辊调整薄膜运动时出现的偏移,利用色标传感器对材料上的色标实施位置检测,最后获取薄膜传送速度,利用双模糊PID控制方法确保送膜和送料速度的同步控制,最终通过成型器将薄膜做成需要的形状^[7]。

2 双模糊PID速度控制方法

枕式包装机是一种非线性和时变的复杂系统。目前包装材料供送系统控制过程大多利用传统PID控制。由于传统PID控制在实际应用中调试过程过于烦琐,主要依靠工作人员的经验,因此传统PID控制不适合快速高效的物料包装^[8]。针对非线性与时变性数学模型构建非常困难的系统,利用双模糊PID控制具有很好的控制效果^[9]。在此基础上,结合模糊控制的适应性和PID控制的精准性形成双模糊PID控制,可增强枕式包装机材料供送速度的控制精度,提升控制响应速度,降低速度控制超调量。

2.1 模糊控制器

模糊控制器中的偏差 e 和偏差变化率 $\dot{e}$ 属于2个输入信号,且均为精确量。模糊控制算法只能处理模糊量,若想最后输出的控制量为精确量,就需要利用模糊控制器模糊化处理输入信号,形成模糊语言集。

模糊控制器的核心为模糊算法器,模糊算法器共有2个部分,分别为模糊控制规则和模糊推理。模糊集为模糊控制器执行算法运算的核心部分,即输入的模糊集利用模糊决策就能计算得到输出的模糊集。输出的控制量不能为一个模糊语言,否则不能驱动执行机构,这就需要通过非模糊化运算再次精确计算模糊量,最终输出控制被控对象^[10]。模糊控制器流程见图2。

模糊控制器的具体操作过程:确定模糊控制器内的模糊概念;将图1内输入的精确量偏差 e 模糊化为模糊集 A ,即模糊化处理;确定模糊控制器的核心,即控制规则;模糊决策;将图1内通过模糊推理后获得的模糊集 C 非模糊化成精准的控制量。

2.2 模糊化处理

模糊化指将模糊控制器的输入量偏差 e 与偏差变化率 $\dot{e}$ 离散化。比如设置偏差 e 的论域为 $[-x_e, x_e]$,偏差 e 的模糊子集 E 的论域为 $\{-n, -n+1, \dots, n-1, n\}$;设置偏差变化率 $\dot{e}$ 的论域为 $[-x_{\dot{e}}, x_{\dot{e}}]$,偏差变化率 $\dot{e}$ 的模糊子集 E_c 的论域为 $\{-m, -m+1, \dots, m-1, m\}$;模糊控制器输出量 u 的基本论域为 $[-y_u, y_u]$,控制量选取的模糊子集 U 的论域为 $\{-l, -l+1, \dots, l-1, l\}$ 。

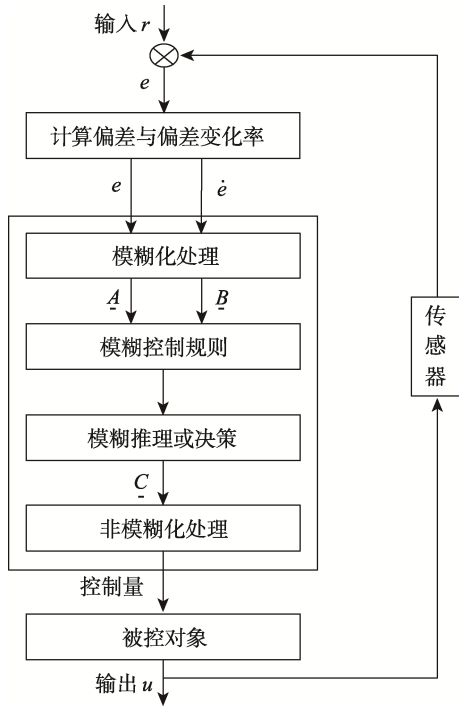


图 2 模糊控制器流程
Fig.2 Flow chart of fuzzy controller

将输入变量从基本论域变更成对应的模糊集论域，并实施模糊化处理。模糊化处理过程中要将输入变量乘上对应的系数，就是量化系数。偏差论域乘以的系数为偏差的量化系数 T_e ；偏差变化率乘以的系数为偏差变化率的量化系数 $T_{\dot{e}}$ 。基本论域和模糊论域的变更公式为：

$$T_e = \frac{n}{x_e} \quad (1)$$

$$T_{\dot{e}} = \frac{m}{x_{\dot{e}}} \quad (2)$$

将模糊控制算法得到的输出量从模糊论域变更成对应的基本论域，实施反模糊化处理，模糊化处理要乘以量化系数，同理非模糊化也需乘以一个系数，该系数是比例系数 T_u ，公式为：

$$T_u = \frac{y_u}{l} \quad (3)$$

2.3 反模糊处理

模糊控制器存在一个相似对称环节，分别为模糊化和反模糊化。模糊控制是将精准的输入量变更成能够接受控制的模糊语言集，经过模糊算法运算后还是模糊语言集。该模糊语言集属于不能直接控制对象^[11-12]，这就需要将模糊语言集反模糊化获取一个精准的控制量，一个能够被控制对象识别的数值，这就完成了控制任务。所选取的控制量反模糊化方法为加权平均判决法。

加权平均判决法是将曲线和坐标轴面积的分界点当作判决输出，加权平均判决法的动态性能很好，

反模糊化后的精准控制量公式为：

$$u^* = \frac{\sum_{j=1}^n t_j u_j}{\sum_{j=1}^n t_j} \quad (4)$$

式中： t_j 为加权系数； u_j 为控制量论域内对应元素的值。

2.4 双模糊 PID 控制

在枕式包装机系统运行过程中，需先计算出设置的包装材料速度与实际的包装材料速度偏差 e ，再将速度偏差 e 输入 PID 控制器内，离散 PID 控制模型为：

$$u(t) = T_p e(t) + T_i \sum_{i=0}^t e(i) + T_D [e(t) - e(t-1)] \quad (5)$$

式中： $u(t)$ 为 t 时刻控制器的输出量； T_p 为比例系数； $e(t)$ 为 t 时刻控制器的输出偏差量； T_i 为积分系数； T_D 为微分系数； $e(i)$ 为 i 时刻控制器的输出偏差量； $e(t-1)$ 为与上一次采样时对比的包装材料速度偏差。

因为 PID 控制对于参数修改具有很强的依赖性，不具有自适应调整参数的功能，这就需要通过模糊控制器自适应调整 PID 参数。利用计算包装材料供送系统偏差 e 和偏差变化率 $\dot{e}$ ，通过模糊控制规则实施模糊推理，再依据查询模糊控制规则表实施 PID 参数自适应调整^[13-14]， ΔT_p 、 ΔT_i 和 ΔT_D 属于控制器输出量。双模糊 PID 控制器结构见图 3。

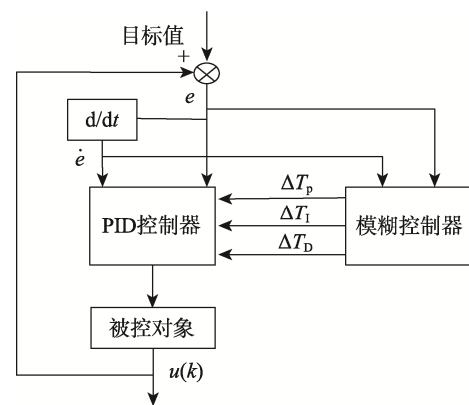


图 3 双模糊 PID 控制结构
Fig.3 Structure of dual fuzzy PID control

若 $\{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ 为 e 、 $\dot{e}$ 、 ΔT_p 、 ΔT_i 、 ΔT_D 的模糊集合论域， $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 为模糊集合。 e 、 $\dot{e}$ 、 ΔT_p 、 ΔT_i 、 ΔT_D 的隶属度函数利用三角形呈现，见图 4。

在此基础上,找出 PID 控制器内参数 T_P , T_I , T_D 与 e , $\dot{e}$ 间的模糊逻辑关系,通过模糊控制对 PID 参数实施自适应调整,确保枕式包装机材料供送速度具有较好的动静态性能^[15]。依据工作者的经验,构建适合的模糊控制规则。 ΔT_P 模糊控制规则见表 1。

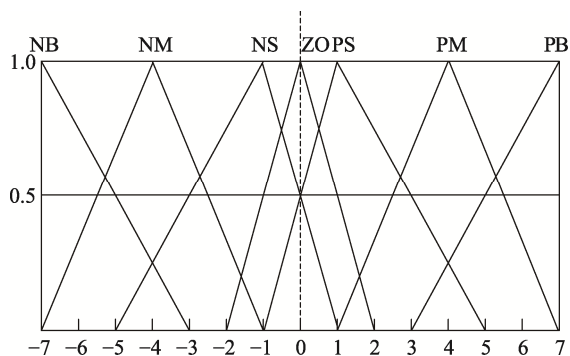


图 4 隶属度函数
Fig.4 Membership function

表 1 ΔT_P 模糊控制规则
Tab.1 ΔT_P Fuzzy control rules

e	$\dot{e}$					
	NB	NS	NZ	PZ	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	NS	ZO
NS	NB	NS	NS	NS	ZO	PS
ZO	NB	NS	ZO	ZO	PS	PB
PS	NS	ZO	PS	PS	PB	PB
PB	ZO	PS	PS	PS	PB	PB

3 实验与结果分析

为验证基于双模糊 PID 的枕式包装机材料供送速度控制方法的实际应用性能,在 Matlab 平台上设计如下仿真实验加以证明。

以某包装公司的枕式包装机为实验对象,其包装长度介于 150~350 mm,包装速度约为 10~100 袋/min。为避免实验结果的单一性,将传统基于神经网络 PID 自适应的枕式包装机包装材料供送速度控制方法与基于 PLC 的包装机包装材料恒速供送控制方法作对比,与文中方法共同完成性能验证。

首先对 3 种方法的包装偏差展开测试,初步证明文中方法的有效性,结果见表 2。

根据表 2 所示结果可知,在不同包装长度的情况下,文中方法的平均包装偏差为 1.17 mm,基于神经网络 PID 自适应的方法和基于 PLC 的方法的平均包装偏差分别为 3.05 mm 和 2.07 mm。由上述结果可知,

表 2 3 种方法包装偏差的测试结果
Tab.2 Test results of packaging deviations of the three methods

包装长度/mm	偏差值/mm		
	文中方法	基于神经网络 PID 自适应的方法	基于 PLC 的方法
150	1.1	2.6	2.1
160	1.2	2.8	1.9
170	1.1	-3.6	-1.7
180	-1.1	-2.5	1.8
190	1.1	3.0	2.3
200	1.0	3.4	-2.6
210	-1.1	-2.9	1.6
220	1.2	-3.8	2.2
230	1.1	3.3	-2.3
240	-1.5	3.5	-2.5
250	1.1	-2.7	1.7
260	1.2	2.9	2.3
270	1.3	-3.5	-2.7
280	-1.1	-3.2	2.2
290	1.2	-2.8	2.1
300	1.1	3.8	1.9
310	1.1	2.9	-2.6
320	1.2	3.1	-1.8
330	-1.2	2.6	1.6
340	1.3	2.5	1.5
350	1.1	2.7	2.1
平均值	1.17	3.05	2.07

文中方法的平均包装偏差明显低于 2 种对比方法。由此可初步证明文中方法可以有效控制枕式包装机的材料供送速度,且能够提高包装袋的袋长精度,从而提升包装体外观质量。

在此基础上,因枕式包装机的托盘规格中多为 1200 mm×1000 mm×150 mm,因此选取包装长度 150 mm,衡量 3 种方法下包装控制调整时间与速度控制稳定性间的关系,其结果见图 5。

根据图 5 所示结果可知,文中方法的速度控制调整时间小于 2 s,2 s 后枕式包装机材料供送速度趋于稳定。基于神经网络 PID 自适应的方法的速度控制调整时间约为 5 s,基于 PLC 的方法的速度控制调整时间约为 5 s。上述实验结果表明,文中方法对枕式包装机材料供送速度的控制调整时间少于 2 种对比方

法，速度稳定过程较快。3 种方法在不同包装速度下的控制延时测试结果见图 6。

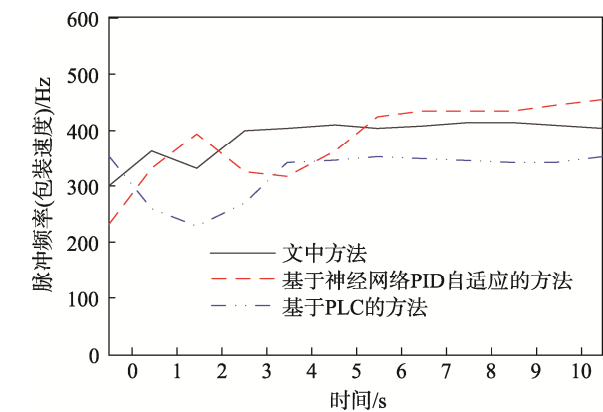


图 5 不同方法下包装控制调整时间与速度控制稳定性关系

Fig.5 Diagram of the relationship between the adjustment time of packaging control and the stability of speed control under different methods

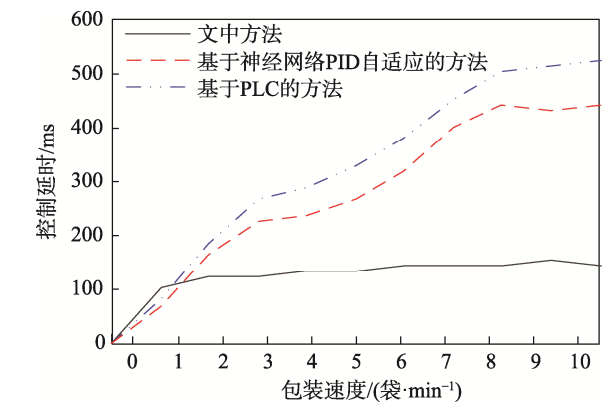


图 6 不同方法控制延时测试结果

Fig.6 Different methods control the delay test results

根据图 6 可知，不同包装速度下，文中方法平均控制延时为 2.2 ms，其他 2 种方法平均控制延时分别为 19.9 ms 和 22.2 ms。文中方法控制延时明显低于其他 2 种方法，原因是文中方法结合模糊控制与 PID 控制，能够相互配合，完成材料供送速度控制。实验证明，文中方法控制延时较短，提升了材料供送速度控制的准确性。

在此基础上，设置包装速度为 50 袋/min，通过加入不同大小的高斯噪声和椒盐噪声干扰，统计 3 种方法速度控制精度，结果见表 3。

根据表 3 所示结果可知，文中方法在 2 种噪声类型下的最大速度控制精度分别为 98.0%和 99.7%，最大速度控制精度分别为 95.5%和 95.1%。在同一类型噪声情况下，随着噪声干扰的不断增加，3 种方法速度控制精度均有所下降，但文中方法速度控制精度下降幅度低于 2 种对比方法。上述实验结果表明，噪声干扰对文中方法下的供送速度控制精度影响较小，表明文中方法可有效提升包装质量。

表 3 3 种方法速度控制精度对比
Tab.3 Comparison of speed control accuracy of three methods

噪声类型	噪声/dB	控制精度/%		
		文中方法	基于神经网络PID自适应的方法	基于PLC的方法
高斯噪声	10	98.0	96.0	96.3
	20	97.8	95.0	95.6
	30	97.5	94.6	95.0
	40	97.0	94.0	94.8
	50	96.9	93.8	94.3
	60	96.5	92.0	92.0
	70	96.0	91.0	91.9
	80	96.0	88.5	91.0
	90	95.7	88.0	90.3
	100	95.5	87.6	89.2
椒盐噪声	10	97.9	86.8	88.9
	20	97.5	85.9	88.4
	30	97.0	85.8	87.6
	40	96.6	85.3	87.1
	50	96.0	85.0	86.5
	60	96.0	84.7	86.0
	70	95.9	84.6	85.6
	80	95.6	84.3	84.3
	90	95.2	84.0	84.0
	100	95.1	83.6	83.2

4 结语

枕式包装机传送速度稳定控制是确保包装精度的基础。为此，文中研究了基于双模糊 PID 的枕式包装机材料供送速度控制方法，通过模糊化处理控制器内的速度输入信号，形成便于识别的数值，缩短了控制耗时；在降低包装材料供送速度控制偏差的基础上，利用模糊控制过程的适应性和 PID 控制的精准性建立了双模糊 PID 控制过程，从而提升了包装材料供送速度控制的稳定性和控制精度，提高了包装质量。

参考文献：

[1] 高元华, 徐燕, 陈惠. 立式食品包装机械袋材恒速控制系统设计[J]. 食品工业, 2019, 40(11): 232—235.
GAO Yuan-hua, XU Yan, CHEN Hui. Design of Con-

- stant Speed Control System for Vertical Food Packaging Machinery Bag Material[J]. The Food Industry, 2019, 40(11): 232—235.
- [2] 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.
- [3] 邹晓敏, 肖曦, 何琪, 等. 基于在线附加 Q 学习的伺服电机速度最优跟踪控制方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 917—923.
ZOU Xiao-min, XIAO Xi, HE Qi, et al. Optimal Tracking Control of Servo Motor Speed Based on On-line Supplementary Q-Learning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 917—923.
- [4] 汤伟, 马强, 税宇阳, 等. 基于改进蚁群优化算法的中高速长网纸机速度链的控制[J]. 中国造纸, 2019, 38(11): 42—50.
TANG Wei, MA Qiang, SHUI Yu-yang, et al. Speed Chain Control of Medium and High Speed Fourdrinier Paper Machine Based on Improved ACO Algorithm[J]. China Pulp & Paper, 2019, 38(11): 42—50.
- [5] 李艳, 轩建举. 枕式包装机包装材料运送速度控制[J]. 包装工程, 2019, 40(11): 183—187.
LI Yan, XUAN Jian-ju. Feeding Speed Control of Packing Material for Pillow Type Packing Machine[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(11): 183—187.
- [6] 郭琳. 立式包装机包装材料恒速供送控制[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 141—145.
GUO Lin. Constant Speed Feeding Control of Vertical Packaging Machine Packaging Material[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(1): 141—145.
- [7] 孙海峰, 胡海峰, 宋征宇. 基于指数曲线的运载火箭推力调节电机速度控制方法[J]. 航天控制, 2018, 36(1): 55—59.
SUN Hai-feng, HU Hai-feng, SONG Zheng-yu. Speed Control Method for Thrust Regulation Motor of Launch Vehicle Base on Exponential Curve[J]. Aerospace Control, 2018, 36(1): 55—59.
- [8] 张雅俊, 乔铁柱. 基于速度控制的多级带式输送机顺序启动方法[J]. 工矿自动化, 2017, 43(1): 52—55.
ZHANG Ya-jun, QIAO Tie-zhu. Method of Sequence Start of Multi-Level Belt Conveyors Based on Speed Control[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(1): 52—55.
- [9] 黄云奇. 双模糊自适应 PID 控制的离合器控制系统的设计[J]. 机械设计与制造, 2019(8): 157—160.
HUANG Yun-qi. Design of Clutch Control System Based on Dual Fuzzy Adaptive PID Control[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(8): 157—160.
- [10] 张丹凤, 李斌, 王立岩. 基于连续体模型的蛇形机器人质心速度跟踪控制方法[J]. 机器人, 2017, 39(6): 829—837.
ZHANG Dan-feng, LI Bin, WANG Li-yan. Tracking Control Method of the Centre-of-Mass Velocity for a Snake-Like Robot Based on the Continuum Model[J]. Robot, 2017, 39(6): 829—837.
- [11] WRAT G, BHOLA M, RANJAN P, et al. Energy Saving and Fuzzy-PID Position Control of Electro-Hydraulic System by Leakage Compensation Through Proportional Flow Control Valve[J]. ISA Transactions, 2020, 101: 269—280.
- [12] 赵喆, 贾玉红, 田剑波. 基于模糊控制的前轮转弯控制律设计[J]. 振动与冲击, 2018, 37(4): 128—135.
ZHAO Zhe, JIA Yu-hong, TIAN Jian-bo. A Design of a Nose Wheel Steering Control Law Based on Fuzzy Control[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(4): 128—135.
- [13] 梁美丽, 程静涛. 基于 DSP 的带式输送机多电机驱动功率平衡控制系统研究[J]. 煤矿机械, 2019, 40(5): 183—185.
LIANG Mei-li, CHENG Jing-tao. Research on Power Balance Control System of Belt Conveyor Driven by Multiple Motors Based on DSP[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(5): 183—185.
- [14] KUMAR V, RANA K P S. Nonlinear Adaptive Fractional Order Fuzzy PID Control of a 2-Link Planar Rigid Manipulator with Payload[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(2): 993—1022.
- [15] 齐文超, 李彦明, 张锦辉, 等. 丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊 PID 控制方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 17—23.
QI Wen-chao, LI Yan-ming, ZHANG Jin-hui, et al. Double Closed Loop Fuzzy PID Control Method of Tractor Body Leveling on Hilly and Mountainous Areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 17—23.