

# 基于自适应模糊 PID 的风速控制系统设计\*

伞红军<sup>1,2</sup>, 陈浩<sup>1</sup>, 陈明方<sup>1</sup>, 张道义<sup>1</sup>, 刘金鑫<sup>1</sup>, 臧家秀<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650000;

2. 云南省三七资源可持续利用重点实验室, 云南 昆明 650000)

**摘要:** 针对传统 PID 风速调控响应速度慢、调节效率低的问题, 设计了一种自适应模糊 PID 控制策略, 用于风机的恒风速调控。所设计的控制系统由数据采集、模糊推理、指令执行以及数据反馈四部分组成。通过搭建的试验平台, 对传统 PID 控制方法及自适应模糊 PID 控制方法进行了对比。实验结果表明: 自适应模糊 PID 控制系统的风速调节速度快、效率高, 调节效果优于传统 PID。

**关键词:** 模糊 PID; 模糊推理; 风机; 风速调控

**中图分类号:** TP202<sup>+</sup>.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2019) 04-0153-06

## Design and analysis of wind speed control system based on adaptive fuzzy PID

SAN Hongjun<sup>1,2</sup>, CHEN Hao<sup>1</sup>, CHEN Mingfang<sup>1</sup>, ZHANG Daoyi<sup>1</sup>, LIU Jinxin<sup>1</sup>, ZANG Jiaxiu<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China;

2. Key Laboratory of Panax Notoginseng in Yunnan Province, Kunming 650000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of slow response speed and low regulation efficiency of traditional PID wind speed regulation and control, an adaptive fuzzy PID control strategy is designed for wind speed regulation and control of wind turbines. The control system consists of four parts: data acquisition, fuzzy reasoning, instruction execution and data feedback. Through the experimental platform built, the traditional PID control method and adaptive fuzzy PID control method are compared. The experimental results show that the adaptive fuzzy PID adjustment response speed is fast and the efficiency is high, at the same time the adjustment effect is obviously better than the traditional PID adjustment.

**Key words:** PID; fuzzy reasoning; draught fan; wind speed regulation

PID 控制器 (proportion integration differentiation) 分为手动和自动控制两种方式。其中, 手动控制充分利用操作者的经验, 事先选定合理的  $K_i$ 、 $K_p$ 、 $K_d$  三个参数, 控制过程中不能根据受控对象状态的变化实时修改参数值。而自动控制方式调节过程漫长, 调节误差较大。工业现场的电机大都采

用变频控制技术, 通过传统 PID 方法实现电机的转速调节, 虽然可以对电机进行高效连续控制, 但忽略了电机转速易受外界信号干扰以及传统 PID 对于时变信号调节效率低的特性<sup>[1-5]</sup>。为了弥补传统 PID 控制的缺点, 近年来不断有新的控制算法的提出, 如模糊自适应整定的 PID 控制<sup>[6]</sup>、PD 鲁棒自

\* 收稿日期: 2018-07-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC1702503); 云南省重大科技专项 (2017RA010); 昆明理工大学引进人才科研启动基金 (KKZ3201601002)

作者简介: 伞红军 (1976 年生), 男; 研究方向: 机器人理论研究与应用; E-mail: sanhjun@163.com

通信作者: 陈明方 (1975 年生), 男; 研究方向: 机器人控制算法研究; E-mail: mfchen111@sina.com

适应控制<sup>[7-10]</sup>, 神经网络 PID 控制<sup>[11]</sup>、基于差分进化 PID 控制等。其中, 模糊自适应整定的 PID 控制是在传统 PID 控制的基础上加入模糊自适应整定环节, 运用模糊数学的基本理论, 把规则的条件和操作作用模糊集来表示, 并把控制规则存储在计算机的知识库中。模糊自适应整定的 PID 控制能够根据实时状态, 对 PID 参数进行在线优化, 弥补了传统 PID 以及模糊控制的不足。本文通过对传统 PID 以及模糊 PID 控制进行对比试验, 验证模糊 PID 在恒风速控制领域下的优越性。

## 1 控制系统设计

中药材三七产地加工时, 三七的大根、须根、毛根中的皂苷成分差异明显, 需要进行较为精准的分选才能更好地满足市场的需求<sup>[12]</sup>。三七分选过程中对风速的要求较高, 风速是否能够快速精确调节将直接影响分选的效果。

现有的分选设备大都采用传统 PID 调节的变频控制技术, 但现有技术的随动响应过程长, 会影响三七根茎的分选效果。因此, 引入模糊自适应整定的 PID 控制, 以提高风速调节精度和动态响应特性, 从而改善三七根茎的分选效果。

### 1.1 控制方案

风速调控硬件由工业一体机、S7-1200PLC、变频器、风机及风速传感器构成。下位机 S7-1200 PLC 与上位机进行信息交互, 实时读取风速传感器的数据, 向变频器反馈相应的模拟电压, 控制电机的转动。其控制方案如图 1 所示。

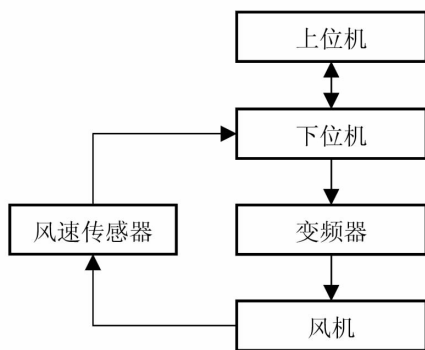


图 1 控制方案框图

Fig. 1 Control scheme block diagram

### 1.2 自适应整定模糊 PID 的流程设计

软件系统主要由 LABVIEW、TIA PORTAL、MATLAB 组成。为了减少下位机 CPU 的运算量,

提高系统的实时性和响应速度, 采用 MATLAB 软件建立模糊规则表, LABVIEW 调用 MATLAB 程序, 实时的对  $K_i$ 、 $K_p$ 、 $K_d$  三个参数进行调节。模糊自适应整定 PID 控制流程如图 2 所示。

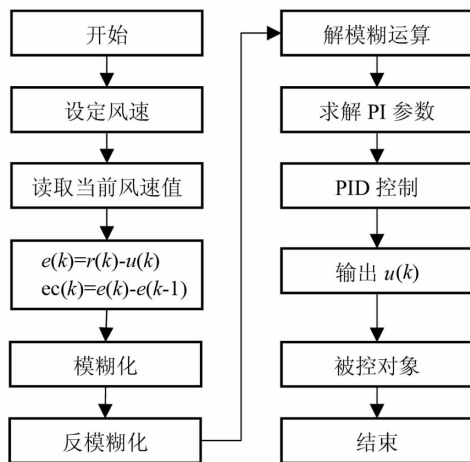


图 2 模糊自适应整定的 PID 控制流程

Fig. 2 Fuzzy adaptive tuning PID control process

## 2 模糊控制器的设计

### 2.1 模糊自适应整定的 PID 控制

模糊自适应整定的 PID 控制原理如图 3 所示。

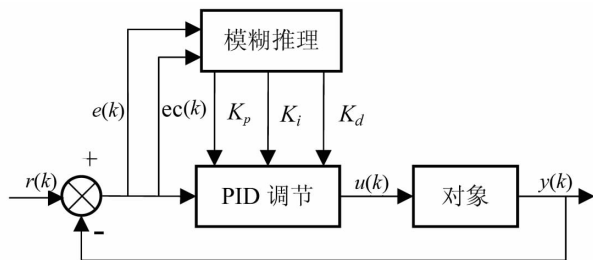


图 3 模糊自适应整定的 PID 控制原理

Fig. 3 Principle of fuzzy adaptive tuning PID control

参考值  $r(k)$  与实际输出值  $u(k)$  之间的偏差  $e(k)$  关系为:

$$e(k) = r(k) - u(k) \quad (1)$$

$e(k)$  和  $e(k-1)$  分别表示当前时刻误差与前一个时刻的误差, 其误差变化率  $ec(k)$  为:

$$ec(k) = e(k) - e(k-1) \quad (2)$$

通过如下公式 (3) 的控制规律进行调节, 使输出尽快达到预设值, 逐步消除控制过程中可能出现的稳态误差。

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \int_0^t e(k) dt + K_d \frac{de(k)}{dT} \quad (3)$$

式中,  $t$  为采样时间,  $k$  为采样序列。计算机控制是一种采样控制, 难以实现连续采样。因此, 对公式 (3) 进行离散化, 得到相应的离散 PID 算法, 如式 (4) 所示。

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T \sum_{j=0}^k e(j) + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (4)$$

## 2.2 模糊控制器的设计

### 2.2.1 输入输出变量论域的确定

设备通过调节变频器的频率来控制风机的转速, 进而调节风速。变频器的输入电压为  $0 \sim 5 \text{ V}$ , 因此风速调节误差及误差变化率的变化范围均为  $[-5, 5]$ 。根据实际生产经验, 经多次测试,  $K_p$  的调节范围是  $[-6, 6]$ ,  $K_i$  的调节范围是  $[-0.15, 0.15]$ 。为了提高控制的精度, 该控制器的模糊子集采用如下方式进行划分:

- $e = \{\text{负大、负中、负小、零、正小、正中、正大}\} = \{\text{NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB}\};$
- $ec = \{\text{负大、负中、负小、零、正小、正中、正大}\} = \{\text{NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB}\};$
- $K_p = \{\text{负大、负中、负小、零、正小、正中、正大}\} = \{\text{NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB}\};$
- $K_i = \{\text{负大、负中、负小、零、正小、正中、正大}\} = \{\text{NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB}\}。$

### 2.2.2 定义输入、输出隶属度函数

为了简化计算, 提高下位机 S7-1200CPU 的计算效率, 使调节过程更平稳, 采用 Z 形隶属度函数  $zmf(x, [a, b])$ 、三角形隶属度函数  $trimf(x, [a, b, c])$  以及 S 形隶属度函数  $sigmf(x, [a, c])$  三者相结合的方式, 构建合理的隶属度函数。 $e(k)$ 、 $ec(k)$ 、 $K_p$ 、 $K_i$  的隶属度函数及其 MATLAB 仿真如图 4 ~ 7 所示。

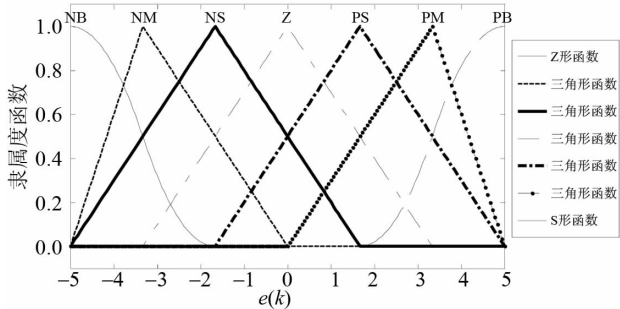


图 4 误差  $e(k)$  的隶属度函数

Fig. 4 Membership function of error  $e(k)$

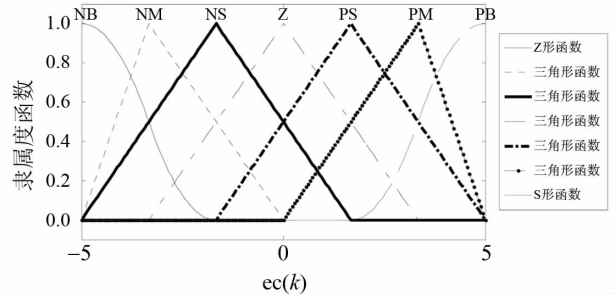


图 5 误差变化率  $ec(k)$  的隶属度函数

Fig. 5 Membership degree of error rate  $ec(k)$

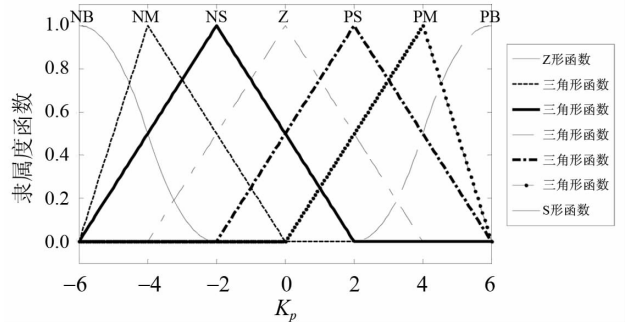


图 6 比例系数  $K_p$  的隶属度函数

Fig. 6 Membership function of proportional coefficient  $K_p$

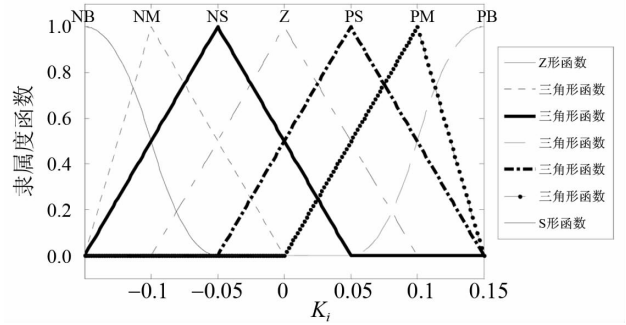


图 7 比例系数  $K_i$  的隶属度函数

Fig. 7 Membership function of proportional coefficient  $K_i$

### 2.2.3 模糊推理规则库的确定

本系统采用 PI 的方式进行模糊控制,  $K_d$  根据调节经验设为零。模糊控制器根据误差  $e(k)$  和误差变化率  $ec(k)$ , 对  $K_p$ 、 $K_i$  两个参数进行自整定调节。其自整定调节规则如下:

- (1) 当输入与输出的风速偏差  $e(k)$  过大时, 为了提高系统的响应速度, 取较大的  $K_p$ ;
- (2) 当输入与输出的风速偏差  $e(k)$  中等时, 取较小的  $K_p$ ; 同时为了保证系统的响应速度, 取适当的  $K_i$ ;
- (3) 当输入与输出的风速偏差  $e(k)$  较小时,

为了保证系统的稳定性, 取较大的  $K_i$  和  $K_p$ 。

根据上述模糊规则库的基本控制原理, 设计模糊自适应整定 PID 恒风速变频控制的规则库如表 1 ~ 2 所示。

表 1 比例  $K_p$  的模糊推理规则表

Table 1 Fuzzy inference rule table for proportion  $K_p$

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z	NS
NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NS
Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	PS	Z	NS	NM	NM	NM	NB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB

表 2 比例  $K_i$  的模糊推理规则表

Table 2 Fuzzy inference rule table for proportion  $K_i$

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	N	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NS	N	Z	Z
NS	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PS
Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB

### 2.2.4 模糊自适应整定的 PID 控制的反模糊化

常见的反模糊化求解方法有最大隶属度法、重心法以及加权平均法<sup>[13-14]</sup>。风速调控系统调节过程易受外界信号的干扰, 为了得到比较平滑的输出, 本系统采用重心法作为反模糊化的求解方法, 其 MATLAB 程序如下:

```
a = setfis (a, 'DefuzzMethod', 'centroid');
```

其中, a 为模糊规则库。

## 3 实验与分析

### 3.1 实验设计

本实验采用最大转速为 1 230 r/min、额定功率为 150 W, 最大风量为 2 400 m<sup>3</sup>/h, 风压为 65 Pa、风口通风面积为 0.09 m<sup>2</sup>, 出风口最大风速为 7.34 m/s 的风机进行实验。下位机选用 CPU1214 主控制器以及 AQ4 × 14 BIT 模拟量输出模块。风速传感器采用量程为 0 ~ 30 m/s, 电压输出为 0 ~ 10 V 的风速传感器。变频器单相 220 V 供电,

额定功率为 0.45 kW。上位机采用 12 寸的工业一体机, 具体实验平台如图 8 所示。在该实验平台上用传统 PID 控制、模糊 PID 控制进行风速调控实验。

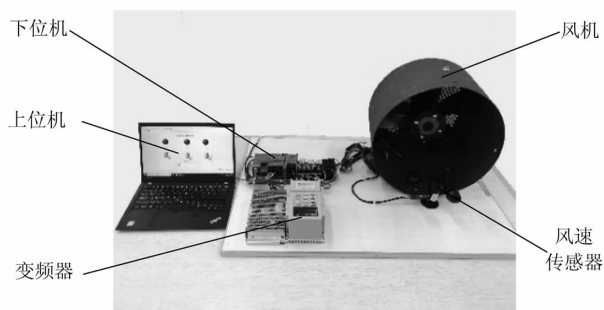


图 8 实验平台

Fig. 8 Experimental platform

采用图 9 所示的人机交互界面, 可以直接设定所需的风速, 控制风机的启停, 方便实现风速的调节。

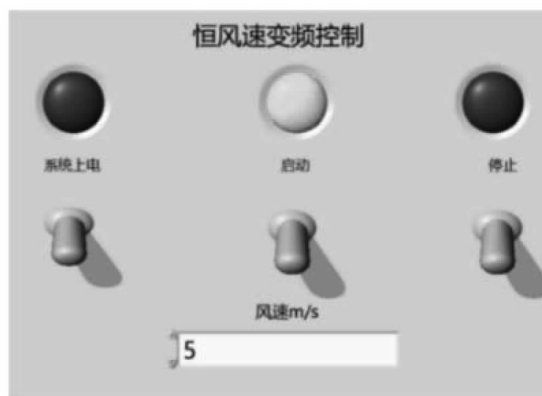


图 9 人机交互界面

Fig. 9 Interactive interface

### 3.2 实验数据

设定风速为 5.872 m/s, 对于传统 PI 控制, 依靠 S7-1200PLC 自带的控制算法, 根据输入输出状态变化实现自动调节。由于 PLC 控制算法的集成, 难以实现调节过程中参数变化的在线监测。相同风速条件下, 对于模糊自适应整定 PI 控制, 比例系数  $K_p$  的变化范围为  $[-6, 6]$ , 积分系数  $K_i$  的变化范围  $[-0.15, 0.15]$ , 算法采样时间为 10 ms, 分别绘制风速以及参数  $K_p$ 、 $K_i$  变化曲线, 如图 10 ~ 11 所示。

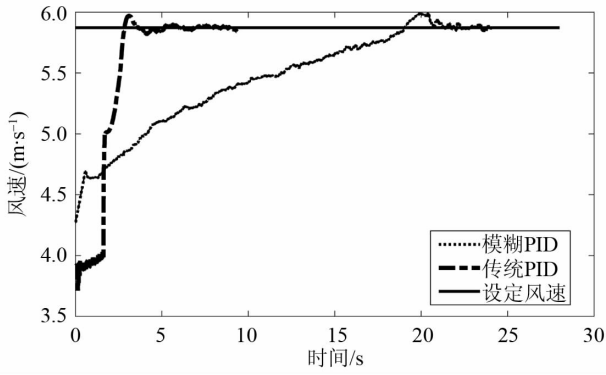


图 10 风速变化曲线  
Fig. 10 Wind speed curve

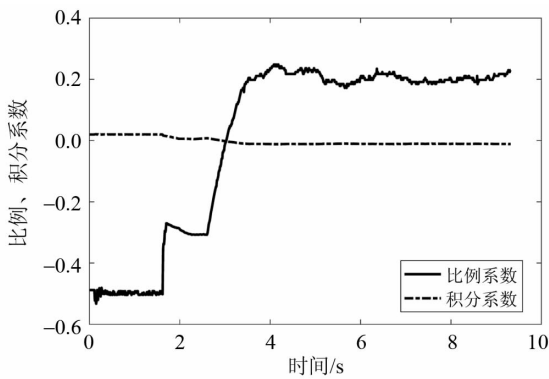


图 11 模糊自适应整定的  $K_p$ 、 $K_i$  变化曲线  
Fig. 11 Fuzzy adaptive tuning of  $K_p$ 、 $K_i$  variable curve

在相同的风速条件, 传统 PI 控制以及自适应模糊 PI 控制系统, 从初始状态调节至稳定状态所需的时间, 如表 3 所示。

表 3 传统 PI 和自适应模糊 PI 控制的调节时间  
Table 3 Regulating time of traditional PI and adaptive fuzzy PI control s

	上升时间	下降时间	调节时间
传统 PID	20.02	2.04	22.06
模糊 PID	3.17	0.46	3.63

相同的风速条件下, 传统 PI 控制采用自动调节, 而模糊自适应整定的 PI 控制根据被控系统状态的改变, 利用模糊推理实时在线的调整参数。通过对比发现, 模糊自适应整定的 PI 控制响应速度快、调节精度高, 调节效果优于传统的 PI 控制。受变频器调节范围以及风速传感器精度影响, 此测试平台有效测试量程为  $4 \sim 7.34$  m/s。而, 当风速小于 4 m/s 时, 转速变化比较平缓, 不具代表性。

## 4 结 论

通过对模糊自适应整定 PID 风速调节系统的分析, 可以发现: 模糊 PI 控制器处理时变信号优于传统的 PI 控制器。该控制器调节过程中, 通过误差  $e(k)$  和误差变化率  $ec(k)$  的变化, 反复对 PI 控制器的两个参数进行调整。当系统受到外界信号干扰时, 自适应 PI 控制能够及时调整 PI 参数, 使系统迅速达到预设值。综上所述, 基于模糊自适应整定的 PID 控制器调节效果好, 具有较好的工程可行性和实用性。

## 参考文献:

[1] 赵永祥, 夏长亮, 宋战锋, 等. 变速恒频风力发电系统风机转速非线性 PID 控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(11): 122 - 138.  
ZHAO Y X, XIA C L, SONG Z F, et al. Nonlinear PID rotating speed control of variable speed constant frequency wind turbine system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(11): 122 - 138.

[2] 李国文, 赵永建. 基于 LabVIEW 的低速风洞风速量化 PID 控制系统设计[J]. 自动化仪表, 2006, 27(8): 21 - 23.  
LI G W, ZHAO Y J. Design of the LabVIEW based wind speed quantization PID control system for low speed wind tunnel[J]. Process Automation Instrumentation, 2006, 27(8): 21 - 23.

[3] 李木国, 褚晓安, 刘于之, 等. 开放式风速控制系统的研制[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(9): 3026 - 3028.  
LI M G, CHU X A, LIU Y Z, et al. Development of open wind velocity control system[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(9): 3026 - 3028.

[4] 郑春来, 黄文登. 基于改进型 PID 算法在风速控制系统的应用[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(12): 57 - 58.  
ZHENG C L, HUANG W D. Applied in wind - speed control system based on improved PID algorithm[J]. Industrial Control Computer, 2017, 30(12): 57 - 58.

- [5] 张光磊, 齐红, 贾鹤鸣. 基于极点配置的智能体 PID 运动控制器参数优化[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2015, 54(4): 23 - 28.  
ZHANG G L, QI H, JIA H M. Parameter optimization of agent PID motion controller based on pole assignment[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2015, 54(4): 23 - 28.
- [6] 梁文亮. 基于模糊 PID 控制的棉流恒风速控制关键技术研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2013.
- [7] 张先勇, 吴捷, 杨金明, 等. 额定风速以上风力发电机组的恒功率  $H_\infty$  鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 321 - 324.  
ZHANG X Y, WU J, YANG J M, et al. H - infinity robust control of constant power output for the wind energy conversion system above rated wind[J]. Control Theory & Application, 2008, 25(2): 321 - 324.
- [8] WANG X L, XIANG C L, NAJJARAN H, et al. Robust adaptive fault - tolerant control of a tandem coaxial ducted fan aircraft with actuator saturation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(6): 1298 - 1310.
- [9] 翁轩, 杨龙刚, 刘屿, 等. 具有边界扰动柔性机械臂的鲁棒自适应边界控制[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2015, 54(3): 44 - 50.  
WENG X, YANG L G, LIU Y, et al. Robust adaptive boundary control of a flexible manipulator with unknown boundary disturbance[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2015, 54(3): 44 - 50.
- [10] DENG W X, YAO J X. Adaptive integral robust control and application to electromechanical servo systems[J]. ISA Transactions, 2017(67): 256 - 265.
- [11] KANG J, MENG W, ABRAHAM A, et al. An adaptive PID neural network for complex nonlinear system control [J]. Neurocomputing, 2014(135): 79 - 85.
- [12] 杨海峰. 改进三七加工技术的研究[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2011.
- [13] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [14] 刘金琨. 智能控制[M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2017.

(责任编辑 王海蓉)