

基于改进PID算法的风力摆控制^{*}

周依涛 项思哲 郑炜炀 高金凤

(浙江理工大学 机械与自动控制学院 杭州 310018)

摘要: 针对风力摆装置存在的不确定性和非线性因素,考虑到传统PID控制方法很难对其进行精准有效的控制,为此将传统的PID控制和模糊控制思想相结合,提出了基于模糊切换的多模控制器设计方法来解决其稳定性问题。多模控制器是对风力摆装置反馈输入的角度误差和误差变化率进行处理,并采用模糊切换开关自动调整各控制器的控制强度,由此提高风力摆装置的自适应能力。最后,通过MATLAB仿真工具,将所提出的多模控制器分别与常规PID控制器和模糊控制器进行对比,验证了所提出方法的有效性和优越性,进一步证明了多模控制器具有较高的抗干扰性和精准性等优点。

关键词: 风力摆;传统控制器;多模控制器;MATLAB仿真

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8

Wind pendulum control based on improved PID algorithm

Zhou Yitao Xiang Sizhe Zheng Weiyang Gao Jinfeng

(Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In view of the uncertainty and nonlinearity existing in the wind pendulum device, combining the traditional PID control theory with fuzzy control thought, a multi-mode controller based on fuzzy switching to solve the stability problem is proposed, since the traditional PID method is difficult to control pendulum device accurately and effectively. The multi-mode controller is obtained to deal with the angle error and the error change rate of the feedback input of the wind pendulum device. The control intensity of each controller is adjusted automatically by using the fuzzy switch so as to improve the adaptive ability of the wind pendulum device. Finally, by using the MATLAB simulation tool, the multi-mode controller with the conventional PID controller and the fuzzy controller are simulated and compared respectively. The effectiveness and superiority of the proposed method are illustrated which further proves that the multi-mode controller has the advantages of high anti-interference and high precision.

Keywords: wind pendulum; traditional controller; multimode controller; MATLAB simulation

0 引言

近年来,随着科学技术的进步,以无人机为代表的科技革新等进入了大众的视野。无人机也向着小型、高速方向不断发展改进^[1]。无人机具有成本低、操作简单、安全性有保障等特点,因此在很多复杂、危险的领域都得到了广泛的应用^[2]。风力摆是由4个风机作为动力供应进行驱动,对于风力摆的研究可以进一步帮助人们把一些成果应用于四轴飞行器、无人机等风力应用领域中^[3]。风力摆装置是一种经典的研究对象,可以作为多种控制系统算法实践的学习平台,同时对后续进一步控制多旋翼飞行系统起到重要的作用^[4]。

风力摆是一种研究物体运动轨迹和运动稳定的装置,其存在一定的非线性和不确定等动力学因素,导致传统的控制方法可能无法有效解决该问题^[5]。在控制领域中,比较经典的是采用PID控制算法进行闭环控制。PID根据给定值和实际值的偏差,通过比例环节、积分环节、微分环节进行控制^[6]。传统PID控制器虽有较强的鲁棒性,但其有引入反馈,使得闭环变得迟钝存在局限性,容易产生振荡,其单一的算法较难满足风力摆控制系统^[7]。而模糊控制基于人的经验和直觉知识,可以应用于时常变化的被控对象^[8]。

贺娅莉等^[9]采用传统PID控制方法通过选取合适PID值来实现对风力摆的控制,得出PID算法虽简单但仍无法

收稿日期:2020-12-11

^{*} 基金项目:浙江省自然科学基金(LY20F030015)项目资助

避免一定的误差。徐雯琪等^[5]对PID算法进行改进,采用积分分离PID控制算法来优化稳定时间和最大偏差值。

为了设计风力摆装置,本文首先对模型进行了研究讨论,针对各种控制算法进行分析讨论,并通过实验仿真,提出了一种基于改进PID算法的风力摆控制策略^[10]。

1 风力摆模型

1.1 结构组成

风力摆的结构主要包括四脚固定支架、万向节、电机固定支架,摆杆和核心控制板,结构如图1所示。电机固定支架上装有4个空心杯电机及桨叶,在固定支架下面装有MPU6050和激光笔。核心控制板上设STM32单片机、电机驱动模块、稳压模块、LCD显示屏、按键及电源等。

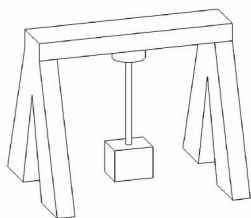


图1 风力摆的机械结构

系统通过控制4个空心杯电机带动桨叶旋转产生风力,使摆杆按照预定的方向进行摆动,系统结构如图2所示。当系统工作时稳压模块为系统提供稳压电源,按键向单片机输入目标要求,MPU6050实时采集角度消息至单片机处,单片机内置处理控制器,接受并处理输入信号后,输出控制信号通过电机驱动模块对电机进行控制,从而控制风力摆运动以达到目标效果。

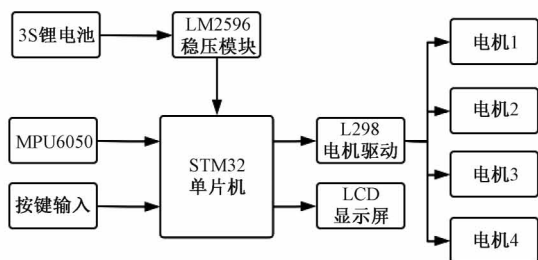


图2 风力摆控制系统结构

1.2 模型建立

设电机及固定支架的总质量为 $M_{\text{物}}$,摆杆的长度为 L ,摆杆与 Z 轴夹角为 θ_1 ,摆杆在 XOY 平面的投影与 X 轴的夹角为 θ_2 ,电机固定支架受到桨叶推力和阻力的合力为 F ,摆杆质量为 $M_{\text{杆}}$ 。风力摆运动状态多变,以牛顿力学方法进行受力分析需要建立不同运动状态下的模型,使得建模问题复杂化^[11]。由此本文采用拉格朗日力学方法,从系统的能量和做功情况进行分析,其可在不得出未知约束力的情况下,推出系统的广义表达式,得到摆杆的动能 $E_{\text{杆}}$ 和固定支架的动能 $E_{\text{物}}$ 分别为:

$$\begin{cases} E_{\text{杆}} = \frac{1}{6} M_{\text{杆}} L^2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 \sin^2 \theta_1) \\ E_{\text{物}} = \frac{1}{2} M_{\text{物}} L^2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 \sin^2 \theta_1) \end{cases} \quad (1)$$

系统的总动能 $E_{\text{总}} = E_{\text{杆}} + E_{\text{物}}$,取平面 XOY 为零势能面,则摆杆的势能 $P_{\text{杆}}$ 和固定支架的势能 $P_{\text{物}}$ 分别为:

$$\begin{cases} P_{\text{杆}} = \frac{M_{\text{杆}} g L}{2} (1 - \cos(\theta_1)) \\ P_{\text{物}} = M_{\text{物}} g L (1 - \cos(\theta_1)) \end{cases} \quad (2)$$

总势能 $P_{\text{总}} = P_{\text{杆}} + P_{\text{物}}$ 。相对应的广义坐标为 (θ_1, θ_2) ,即得到如下拉格朗日力学方程:

$$\begin{cases} M_{\theta_1} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = \left(\frac{1}{3} M_{\text{杆}} + M_{\text{物}} \right) L^2 \ddot{\theta}_1 - \frac{1}{2} \left(\frac{M_{\text{杆}}}{3} + M_{\text{物}} \right) L^2 \dot{\theta}_2^2 \sin 2\theta_1 + \left(\frac{M_{\text{杆}}}{2} + M_{\text{物}} \right) g L \sin \theta_1 \\ M_{\theta_2} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = \left(\frac{M_{\text{杆}}}{3} + M_{\text{物}} \right) L^2 (\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin 2\theta_1 + \ddot{\theta}_2 \sin^2 \theta_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中: M_{θ_1} 为 θ_1 的转矩; M_{θ_2} 为 θ_2 的转矩。

当摆杆在 XOY 平面的投影与 X 轴的夹角 $\theta_2 = 0$ 时,风力摆沿着 X 轴方向做直线运动,令系统的输出量为 θ_1 ,输入量为 F ,实际风力摆测得 $M_{\text{杆}} = 0.081 \text{ kg}$, $M_{\text{物}} = 0.224 \text{ kg}$, $L = 0.8 \text{ m}$,由此推得本系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{\theta_1(s)}{F(s)} = \frac{0.351}{0.218s^2 + s} \quad (4)$$

2 控制器设计

2.1 PID控制器设计

PID控制的性能主要取决于 K_p 、 K_i 、 K_d 的取值。PID控制器能否取得良好的控制性能取决于PID控制器3个参数的整定,即比例、微分、积分系数。为了达到最佳效果,需使控制器的参数整定适合,否则即使使用再好的控制器构成的控制系统,其性能也会很差^[12]。

K_p 决定比例环节强度,影响系统的动态性能。 K_p 增大,可提高系统响应速率,减小静态误差。但 K_p 过大则会产生静态误差,加剧振荡,影响系统稳定性能^[13]。 K_i 决定积分环节强度,影响系统的稳态误差。积分调节可消除仅由比例调节存在的稳态误差。 K_i 越大,积分调节越快,但过大会使系统调节时间增加,甚至积分饱和,出现超调现象,严重影响系统稳定性。 K_d 决定微分环节强度,起提前校正作用,在误差值过大之前提前进行控制,减小系统的调节时间。 K_d 增大,有助于系统减小超调量,减少振荡,加快反应速度,若过大,则会使系统的抗干扰性能变差^[14]。

在PID算法中,输出 $u(t)$ 与误差值 $e(t)$ 的关系如下:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

式中: $u(t)$ 为本输出值; $e(t)$ 为误差值; T_i 为积分时间; T_d 为微分时间; K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例系数、积分系数、微分系数。

风力摆是通过 MPU6050 不断采集姿态数据并通过单片机进行处理, 得到的误差值不是连续的而是离散的, 所以需要式(5)进行离散化处理, 结果如式(6)所示。

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{i=1}^k e(i) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (6)$$

由于风力摆对系统反应的实时要求性比较高, 需要对摆的运动快速做出响应, 积分调节会增加反应时间, 因此 K_i 取值应较小。

2.2 模糊控制器设计

模糊控制器通过其过程函数的逻辑模型来调整参数和输出量。采用二维模糊控制器, 输入变量为偏差 E 和偏差变化 Ec , 经过模糊转化后得到模糊量 e 和 de , 经过模糊规则判断和推理决策后得到模糊的输出量 u , 最终经清晰去模糊化后得到结果 $U^{[15]}$ 。

设定二维模糊控制器的输入变量为 e 和 de , 模糊输出量 u 的基本论域分别为 $[-1, 1]$ 、 $[-1, 1]$ 和 $[-60, 60]$ 。并在 e 、 u 、 de 的基本论域上定义 5 种模糊语言值, 分别为 NB“负大”、NS“负小”、ZE“零”、PS“正小”和 PB“正大”。设计模糊 PID 的重要步骤是建立模糊控制规则。为了使控制性能达到最优, 需要适当调整模糊控制规则, 隶属度函数和比例因子^[16]。为了控制风力摆稳定, 设定了简单而高效的若干条模糊控制规则, 具体如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

de	e				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NS	ZE	PS
NS	NB	NS	ZE	PS	PB
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NB	NS	ZE	PS	PB
PB	NS	ZE	PS	PB	PB

2.3 多模控制器设计

当系统是一个非线性、不确定的系统, 传统 PID 控制算法很难快速达到预期效果, 其有时间较长、超调量大、参数无法自整定等诸多不足^[17]。而模糊控制算法虽是将人的经验和直觉知识嵌入其中, 适用于复杂不容易得出精确数学模型的被控对象, 但其简单的信息模糊处理会导致系统的控制精度降低。

由此提出多模控制器的设计, 多模控制器根据输入值

的变化, 采用多种不同的模式进行控制^[18]。在风力摆控制系统中, 在误差较大系统处于不稳定状态时, 采用纯比例控制, 当误差处于某一中间阈值范围时, 采用模糊控制。当误差较小, 系统趋向于稳定状态时采用 PID 控制, 图 3 所示为常规的多模控制器结构。

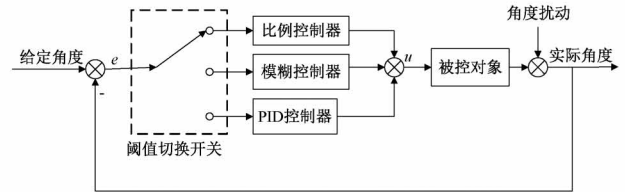


图 3 基于阈值切换的常规 P-Fuzzy-PID 多模控制器

由图 3 可以看出, 多模控制器内置比例控制器、模糊控制器、PID 控制器 3 种不同控制模式的控制器, 具体控制模式由阈值开关选择。阈值开关动作由误差 e 决定。如下为控制输出 u 的表达式。

$$u(t) = \begin{cases} K_{p1} e(t), & |e| > e_0 \\ u_F(t), & e_1 < |e| \leq e_0 \\ K_{p2} e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, & |e| \leq e_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: e_0 、 e_1 为偏差阈值; $u_F(t)$ 为模糊控制输出; $K_{p1} e(t)$ 为纯比例控制输出; K_{p2} 、 K_i 、 K_d 分别为 PID 控制的比例系数、积分系数和微分系数。

由于传统多模控制采用阈值切换, 阈值提前设定, 在系统运行时阈值始终为恒定值, 这导致了实际运行时很难实现无扰动切换, 从而使响应速率变慢。为此, 提出基于模糊规则切换的多模控制器, 采用模糊规则切换代替阈值切换, 如图 4 所示为基于模糊规则切换的多模控制器结构。

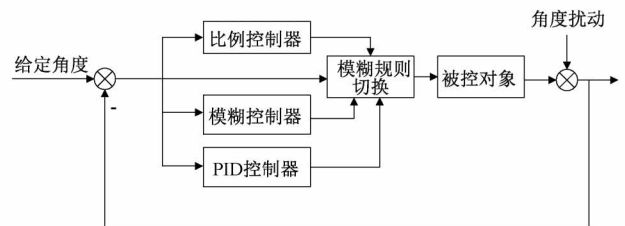


图 4 基于模糊规则切换的 P-Fuzzy-PID 多模控制器

切换器的模糊规则如下:

If $|e|$ is P then U is U_p

If $|e|$ is Z and $|de|$ is S then U is U_{pid}

Else U is U_{fuzzy}

其中, U_p 为纯比例控制器的输出; U_{pid} 为 PID 控制器的输出; U_{fuzzy} 为模糊控制器的输出。如图 5 所示为模糊规则的隶属度函数。

模糊切换隶属度函数可通过改变 a_1 、 a_2 、 a_3 的值来调整隶属度函数的值, 以此改变控制强度。设 W_p 、 W_{pid} 、 W_{fuzzy} 分别为纯比例控制、PID 控制和模糊控制的强度系

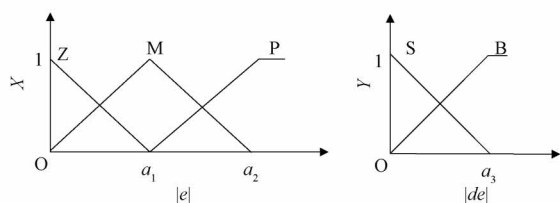


图5 模糊切换隶属度函数

数,则其表达式如下:

$$\begin{aligned} W_p &= X_p(|e(t)|) \\ W_{pid} &= \min\{X_z(|e(t)|), Y_s(|de(t)|)\} \\ W_{fuzzy} &= 1 - W_p - W_{pid} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: X_p 、 X_z 、 Y_s 分别对应图5中P、Z、S的隶属度函数; $e(t)$ 、 $de(t)$ 表示任意时刻的误差值和误差变化率。将3个控制器的输出值通过加权平均法运算后得到最终的混合控制输出结果如式(9)所示。

$$U = \frac{W_p \times U_p + W_{fuzzy} \times U_{fuzzy} + W_{pid} \times U_{pid}}{W_p + W_{fuzzy} + W_{pid}} = \frac{W_p \times U_p + W_{fuzzy} \times U_{fuzzy} + W_{pid} \times U_{pid}}{W_p + W_{fuzzy} + W_{pid}} \quad (9)$$

由此,得到模糊切换规则下的P-Fuzzy-PID多模控制器。系统运行时,模糊规则切换器会根据当前输入的误差值和误差变化率自适应调节3种控制器的控制强度。当系统为误差较大时纯比例控制的强度最高,随着系统误差减小,模糊控制器逐渐开始起主导作用,最终系统趋于稳定状态,PID控制器作用强度逐渐上升,使系统维持稳定。当 a_1 选取适当值时,若在稳态,有大脉冲干扰来临时,由于模糊规则切换器的存在,系统不会跳入纯比例控制,同时模糊控制器对干扰进行抑制,由此提高了系统的抗干扰能力。同时注意协调 a_1 、 a_2 、 a_3 取值使控制模式得以平稳切换。

3 仿真与分析

3.1 控制器设计仿真

在MATLAB软件中,利用SIMULINK工具对系统(4)分别使用PID控制器、模糊控制器和基于模糊规则切换的多模控制器进行模拟仿真。目标值输入信号target采用幅值为 15° ,周期为 2π 的正弦信号,扰动信号采用幅值为 6° ,脉冲宽度为0.01s的脉冲信号。

建立SIMULINK仿真模型,并在2s时加入扰动信号同时于4s时增大目标值信号幅值 5° 。

采用PID控制器,经过简单的参数整定后,初步将PID参数确定为 $P=200$, $I=0.1$, $D=400$ 。得到仿真结果如图6所示。

采用模糊控制器,得到仿真结果,如图7所示。

采用基于模糊规则切换的多模控制器,得到仿真结果,如图8所示。

3.2 结果分析

从上述3幅仿真结果图可以得到,传统PID控制器的仿真曲线中目标值曲线和结果值曲线具有较高的重合性,

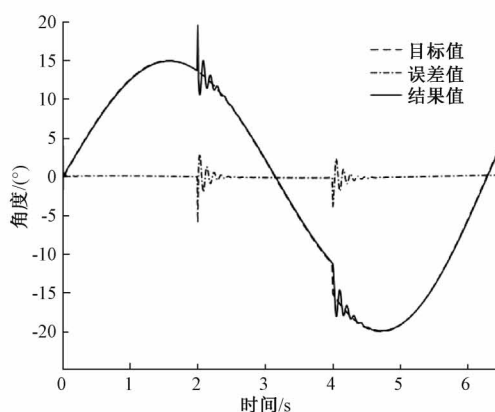


图6 PID控制器仿真结果

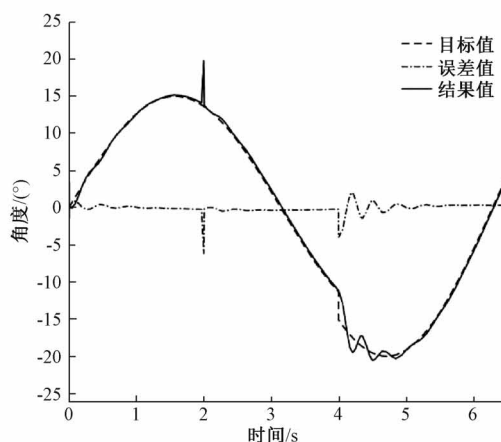


图7 模糊控制器仿真结果

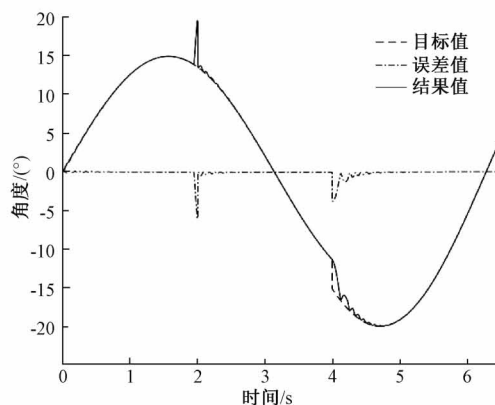


图8 基于模糊规则切换的多模控制器仿真结果

稳态误差控制在极小范围内,但脉冲扰动来临时,调整时间较长;模糊控制器的仿真曲线中,当外界影响时,其可快速恢复至稳定状态,但目标值曲线和结果值曲线在稳定后重合性较差,稳态误差较大。基于模糊规则切换的多模控制器的结果曲线和目标曲线具有较高的重合性,跟踪性较好。同时当在扰动信号输入后,其可快速恢复至稳定状态,调整时间最短,响应速率最快。相较于传统PID控制器和模糊控制器,多模控制器统筹兼顾了传统PID控制器和模糊控

制器的优点,使系统在保证快速响应的同时具有较好的准确性和抗干扰性。

4 结 论

本文针对风力摆难以精准控制的问题,设计了一种基于模糊规则的切换多模控制器,以此来控制风力摆,并对基于常规 PID 控制法、常规模糊控制法以及模糊规则切换的多模控制法的风力摆控制进行了仿真分析。结果表明,较之常规的 PID 控制和模糊控制,基于模糊规则的切换多模控制具有更好的跟踪性和抗干扰能力,同时在保留前者较好鲁棒性等优点的同时兼具更快的响应速度、更高的准确性和更强的自适应能力。

参考文献

- [1] 刘关心,陶德桂.小型无人机高速飞行横向振荡问题研究[J].电光与控制,2020:1-5.
- [2] 李中望,徐婉婷.一种风力摆自动控制装置的研究与设计[J].吉林化工学院学报,2019,36(3):25-29.
- [3] 刘翹楚,郭鹏伟,刘学明.基于 IAP15W4K58S4 的风力摆控制系统设计[J].自动化技术与应用,2019,38(2):1-4.
- [4] 周玉,谢景卫.高精度控制板设计与应用[J].电子技术,2017,46(7):94-96.
- [5] 徐雯琪,陈佳颖,袁菊明.基于改进 PID 算法的风力摆控制系统研究[J].电脑知识与技术,2016,12(11):256-257.
- [6] 陈德海,朱正坤,王超.基于模糊神经网络 PID 的水轮机组频率控制[J].现代电子技术,2020,43(23):99-102.
- [7] 刘洋,行鸿彦,侯天浩.四旋翼无人机串级变论域模糊 PID 姿态控制研究[J].电子测量与仪器学报,2019,33(10):46-52.
- [8] 王立红,谢忠刚,王玉莹.基于 MATLAB 的倒立摆模糊自适应 PID 控制研究[J].机械工程与自动化,2020(4):57-58.
- [9] 贺娅莉,郭艳花,高荣登.基于 STM32F103 的风力摆控制系统设计[J].智能计算机与应用,2017,7(4):76-78.
- [10] 曾柄杰,许涛,闫轩.基于模糊 PID 的葡萄酒窖温度控制方法研究[J].电子测量技术,2020,43(18):59-63.
- [11] 孙蓉,李冰,权申明,等.基于风力摆的综合实训平台[J].实验技术与管理,2016,33(9):75-78.
- [12] 刘霞,冯元,王亚云.基于衰减曲线法整定 PID 调节器参数仿真技术研究[J].国外电子测量技术,2019,38(8):101-104.
- [13] 骆晓玲,王子含.基于模糊 PID 的水下航行器运动控制研究[J].电子测量技术,2020,43(19):53-56.
- [14] 高子龙,刁吉阳,隋大鹏,等.某随动控制系统 RBF 神经网络 PID 复合控制[J].自动化与仪器仪表,2020(11):56-60.
- [15] 张越杰,张鹏,冉承平,等.光电稳定平台变论域模糊自抗扰控制器设计[J].电光与控制,2020:1-6.
- [16] 蔡聪仁,向凤红.基于遗传算法优化 PID 的板球系统位置控制[J].电子测量技术,2019,42(23):97-101.
- [17] 张皓,高瑜翔.前馈反馈 Smith 预估模糊 PID 组合温度控制算法[J].中国测试,2020,46(11):132-138.
- [18] 王树东,李子广,王焕宇,等.多模模糊控制在碱回收系统中的应用[J].测控技术,2017,36(9):76-79.

作者简介

周依涛,在读本科,主要研究方向为自动控制技术。

E-mail:zhou.y.t@foxmail.com

项思哲,在读本科,主要研究方向为自动控制技术、图像处理与识别。

E-mail:2018330301166@mails.zstu.edu.cn

郑炜炀,在读本科,主要研究方向为图像处理与识别。

E-mail:2018330301105@mails.zstu.edu.cn

高金凤(通信作者),工学博士,教授,主要研究方向为先进控制理论与故障诊断技术。

E-mail:jfgao@zstu.edu.cn