

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209022

基于模糊粒子群 PID 算法的温控系统研究^{*}

张峰 王强

(南通大学信息科学技术学院 南通 226000)

摘要: 针对电容器热压机温度控制系统存在滞后大、非线性等问题,分析了电容器热压机温度控制系统的原理,建立了温度控制系统的数学模型。通过对传统 PID 控制算法、粒子群算法和模糊控制算法的研究,提出了一种将模糊粒子群 PID 算法应用于温度控制系统的方案。用 MATLAB 对温控系统进行仿真,得出采用传统 PID 控制算法的温控系统的调节时间和超调量分别为 66 s 和 58.173%,而采用模糊粒子群 PID 算法的温控系统的调节时间和超调量为分别是 34 s 和 6.295%。研究结果表明,基于模糊粒子群 PID 算法的电容器热压机温度控制系统在调节时间、超调量和抗干扰能力等方面均优于传统 PID 控制算法。

关键词: MATLAB;模糊粒子群 PID;PID;温度控制系统

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Research on temperature control system based on fuzzy particle swarm PID algorithm

Zhang Feng Wang Qiang

(School of Information Science and Technology, Nantong University, Nantong 226000, China)

Abstract: For the temperature control system of the capacitor hot press, there are problems such as large lag and nonlinearity. The principle of the temperature control system of the capacitor hot press is analyzed and the mathematical model of the temperature control system is established. Through the research of traditional PID control algorithm, particle swarm algorithm and fuzzy control algorithm, a scheme of applying fuzzy particle swarm PID algorithm to temperature control system is proposed. Use MATLAB to simulate the temperature control system. The adjustment time and overshoot of the temperature control system using the traditional PID control algorithm are 66 s and 58.173%, respectively. The temperature control system using the fuzzy particle swarm PID algorithm has an adjustment time and overshoot of 34 s and 6.295%, respectively. The research results show that the temperature control system of the capacitor hot press based on the fuzzy particle swarm PID algorithm is superior to the traditional PID control algorithm in terms of adjustment time, overshoot and anti-interference ability.

Keywords: MATLAB;fuzzy particle swarm PID;PID;temperature control system

0 引言

薄膜电容器^[1]作为电子电路中最基本的电子元器件之一被广泛应用在消费电子产品、电动汽车、新能源并网、油气勘探以及航空航天等领域中。在薄膜电容器的生产工艺中,热压工艺直接决定了薄膜电容器的质量和使用寿命。薄膜电容器如果被热压的不好就会发生分层现象,从而薄膜电容器出现空隙,导致它的频率特性变差,介质损失增加,造成信号失真。热压工艺有 3 个重要参数:温度、时间、压力。只有在受热和受力均匀的条件下,热压得到的薄膜

电容器的性能以及品质才会高。在热压时,科研人员通过在热压板之间设计具有弹性的连接装置,实现了薄膜电容器受到均匀的压力。因为电容器热压机的热压板面积较大,当进出原料时热平衡会被破坏,热压板的温度恢复时间长,所以需要在薄膜电容器热压时对温度进行合理的控制,以提高薄膜电容器的热压效率和热压质量,进一步提高电容器热压机的使用效率。

电容器热压机温度控制系统常使用的是 PID 控制器^[2]。根据系统给定值和测量值的差值,PID 控制器通过比例积分以及微分来实现对温度的控制。对于生产过程与

收稿日期:2022-02-16

^{*} 基金项目:江苏省高等学校自然科学研究重大项目(19KJ320004)资助

系统结构相对简单的工业过程而言,传统的 PID 控制算法具有较好的控制效果。然而,越来越多的非线性、滞后性大的系统出现在现代工业中,这对系统的控制精度要求越来越高。传统的 PID 控制算法很难满足其控制要求。本文将传统的 PID 控制算法结合模糊理论和粒子群算法形成了模糊粒子群 PID 算法来对温度系统进行控制。

本文以 MATLAB 为平台,对传统的 PID 控制算法和模糊粒子群 PID 算法进行了模拟仿真。模糊粒子群 PID 算法不需要对数学模型有着精确的掌握便可以对系统进行控制,它可以根据系统的实时变化自主的调整 PID 的参数以达到对温度的精确控制。模糊粒子群 PID 算法结合了粒子群技术^[3-7]和模糊控制技术^[8-14]的优点,可以精确控制复杂的工业生产过程。

1 温度控制系统概述

1.1 电容器热压机温度控制系统

本文以电容器热压机作为研究对象,其温度控制系统主要包括电加热器、热压板、温度传感器。电容器热压机温度控制示意图如图 1 所示。控制器根据给定温度将指令发送给电加热器,电加热器开始加热,同时,温度传感器将实时温度值与设定值的差值反馈给控制器。

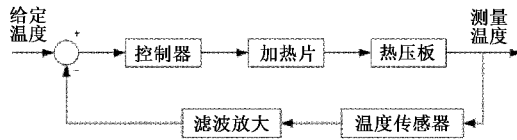


图 1 电容器热压机温度控制示意图

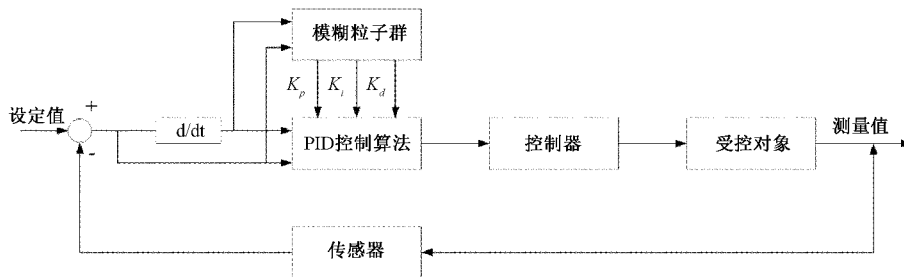


图 3 模糊粒子群 PID 控制系统原理

2.1 PID 算法

PID 控制算法通常是由 3 个单元组成,即比例(proportional,P)控制单元、积分(integral,I)控制单元以及微分(differential,D)控制单元。PID 控制算法的基本表达式如式(3)所示。

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3)$$

在式(3)中, K_p 是比例增益, T_i 是微分时间常数, T_d 是积分时间常数。PID 控制参数的好坏直接关系到电容器热压机温度控制系统的控制品质。当 K_p 增大,调节作用增强,进而缩短调节时间。但 K_p 太大,会造成系统温度性

1.2 数学模型建立

电容器热压机温度控制系统结构如图 2 所示。加热片的传递函数为:

$$G_R(s) = \frac{K_R}{1 + T_R s} \quad (1)$$

热压板的传递函数为:

$$G_H(s) = \frac{K_H}{1 + T_H s} e^{-\tau s} \quad (2)$$

其中, K_H, K_R 为传递函数的增益系数; T_H, T_R 为惯性时间常数; τ 为系统的纯滞后时间。

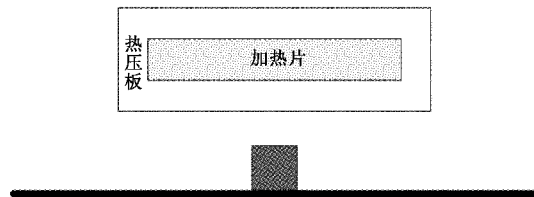


图 2 电容器热压机温度控制系统结构

2 基于模糊粒子群 PID 控制器设计

模糊粒子群将粒子群算法与模糊控制相结合,通过模糊逻辑推理和粒子迭代寻优,解决了温度控制系统非线性、滞后性大的问题。模糊粒子群 PID 控制器由模糊粒子群和传统 PID 控制算法构成。先通过传统的 PID 控制算法对受控对象进行闭环控制,然后由模糊粒子群对 PID 的参数进行调整,从而实现 PID 参数的自调整。模糊粒子群 PID 控制系统原理如图 3 所示。

变坏。适当的增大 T_i ,系统的超调量会降低并且稳定性提升。但是若 T_i 太小就会降低系统的稳定性,导致系统振荡更加剧烈。适当的调节 T_d ,能够有效克服系统的振荡,起到改善系统的动态特性作用。通过调节 K_p, T_i, T_d 能够获得较好的控制效果,但是随着薄膜电容器加工技术的发展,采用 PID 控制的电容热压机温度控制系统常常难以满足要求,性能比较差。

2.2 模糊逻辑设计

将模糊粒子群 PID 温度控制系统的给定温度与测量温度的偏差^{15 16}设为 e ,偏差变化率设为 ec 。将 e 和 ec 设为模糊粒子群 PID 控制系统的输入变量,PID 参数 K_p 、

K_i, K_d 的修正量即 $\varphi K_p, \varphi K_i, \varphi K_d$ 设为输出变量。设定 e 和 ec 的基本论域分别是 $[-5, +5]$ 和 $[-10, +10]$, $\varphi K_p, \varphi K_i, \varphi K_d$ 的基本论域分别是 $[-1, +1], [-0.6, +0.6], [-0.8, +0.8]$ 。设定 e 和 ec 的模糊论域为 $[-6, 6]$, $\varphi K_p, \varphi K_i, \varphi K_d$ 的模糊论域为 $[-3, 3]$ 。采用 7 段式模糊的方法将输入变量以及输出变量分成 7 种语言值:正大 (PB)、正中 (PM)、正小 (PS)、零 (ZO)、负小 (NS)、负中 (NM)、负大 (NB)。输入变量 e 和 ec 从基本论域变换到对应的模糊论域的量化因子为 $k_e = 6/5 = 1.2, k_{ec} = 6/10 = 0.6$, 输出变量 $\varphi K_p, \varphi K_i, \varphi K_d$ 从模糊论域变换到对应的基本论域的比例因子为 $k_p = 1/3 = 0.33, k_i = 0.6/3 = 0.2$, and $k_d = 0.8/3 = 0.267$ 。

模糊 PID 控制系统的输入变量 e 和 ec 选用的是高斯隶属度函数, 输出变量 $\varphi K_p, \varphi K_i, \varphi K_d$ 选用的是三角形隶属度函数。输入变量的隶属度如图 4、5 所示。经过对 e, ec 和 $\varphi K_p, \varphi K_i, \varphi K_d$ 之间的关系进行分析并且结合经验丰富的老员工的知识和实际操作经验得到模糊规则表, $\varphi K_p, \varphi K_i, \varphi K_d$ 的模糊规则表如表 1~3 所示。

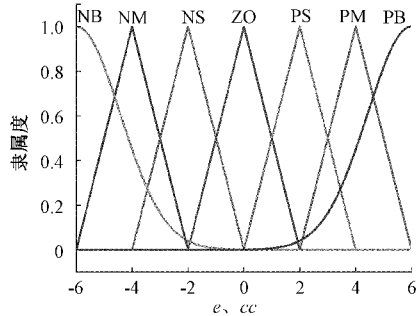


图4 输入变量隶属度

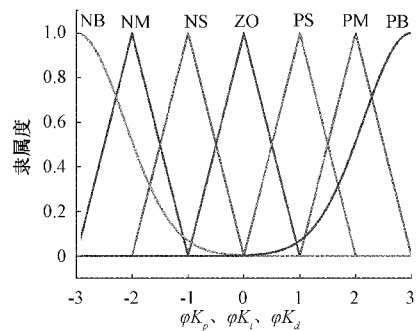


图5 输出变量隶属度

2.3 粒子群优化 PID 参数

模糊控制算法能够根据系统的差值变化对 PID 的参数进行调整, 但是初始的 PID 参数需要收到去调整, 这很难能够让系统的性能达到最佳, 因此, 选择用粒子群算法来优化 PID 的参数, 找到最优的参数, 使得系统达到平衡并且响应速度更快。

粒子群 (particle swarm optimization, PSO) 算法^[17] 是以群体协作为核心的一种随机搜索算法, 在 1995 年由

表 1 φK_p 的模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PB	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 φK_i 的模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	NS	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	ZO	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PS	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 φK_d 的模糊规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	NS	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

Eberhart 以及 Kennedy 两位学者源于对鸟群捕食行为的研究而提出的。在这个算法中, 搜索空间中的粒子代表问题的解, 这些粒子形成了一个总体。粒子飞行的方向和距离由它的速度决定。粒子沿着最佳解在解空间中飞行, 当达到一定的迭代次数时, 粒子的最优位置向量就是问题的最优近似解。粒子群算法具有迭代简单、收敛速度快等优点, 适合温度控制系统的参数寻优。

假设在 D 维解空间里初始化 K 个粒子, 每一个粒子都拥有自己的空间位置 $X_m = (X_{m1}, X_{m2}, \dots, X_{mD})$ 以及自己的飞行速度 $V_m = (V_{m1}, V_{m2}, \dots, V_{mD})$, 其中, $m = 1, 2, 3, \dots, K$ 。粒子在解空间里每次迭代时, 通过粒子个体的最优解 $Pbest_m = (P_{m1}, P_{m2}, \dots, P_{mD})$ 和粒子种群的最优解 $Gbest_m = (G_1, G_2, \dots, G_D)$ 来优化自己的速度和位置。

第 N 次迭代时粒子速度和位置的更新公式如式(4)、(5)所示。

$$V_{mD}^N = V_{mD}^{N-1} + c_1 r_1 (P_{mD} - X_{mD}^{N-1}) + c_2 r_2 (G_{mD} - X_{mD}^{N-1}) \quad (4)$$

$$X_{mD}^N = X_{mD}^{N-1} + V_{mD}^N \quad (5)$$

式中: V_{mD}^N 表示第 m 个粒子的速度, X_{mD}^N 表示第 m 个粒子的位置, c_1 和 c_2 表示为学习因子, r_1 和 r_2 表示取值范围在 $[0, 1]$ 内的学习因子随机数函数, N 表示为迭代次数。

PSO 算法优化模糊 PID 控制器流程如图 6 所示。

3 控制系统仿真与结果分析

为了能够验证模糊粒子群 PID 算法的优势, 本文根据建立的电容器热压机模型, 在 MATLAB/Simulink 中搭建了系统的仿真模型并且在 m 文件中编写粒子群算法的程序, 通过 m 文件和 Simulink 来进行仿真实验。PID 仿真模型和模糊粒子群 PID 仿真模型如图 7~8 所示。

首先对粒子群算法进行初始化, 选择粒子群规模大小为 5, 迭代次数为 100, 学习因子 c_1, c_2 都为 2, 惯性权值为 0.6, 接着选取 ITAE^[18] 作为控制器性能的评价指标, ITAE 的表达式如式(6)所示。

$$J_{ITAE} = \int_0^{t_s} t |e(t)| dt \quad (6)$$

根据建立的模型的传递函数, 选取增益系数 K_H, K_R 为 1, 惯性时间常数 T_H, T_R 为 20 和 0.3。选取常规的阶

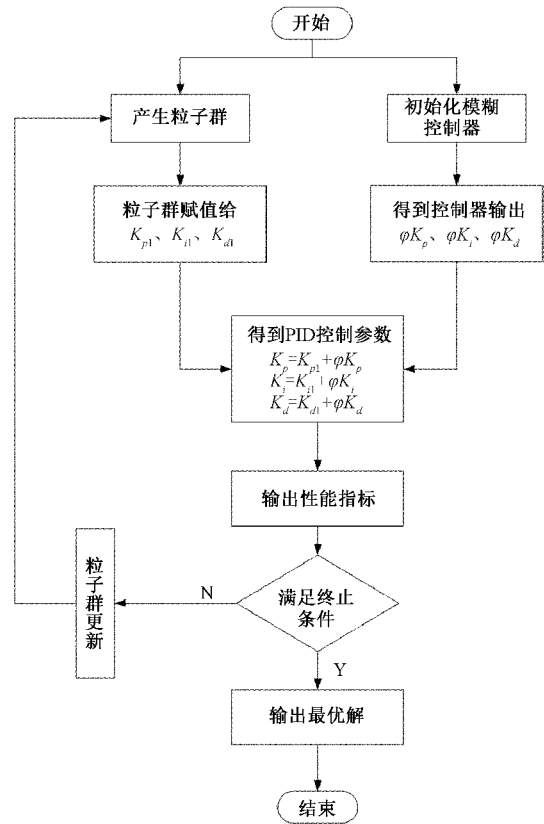


图 6 PSO 算法优化模糊 PID 控制器流程

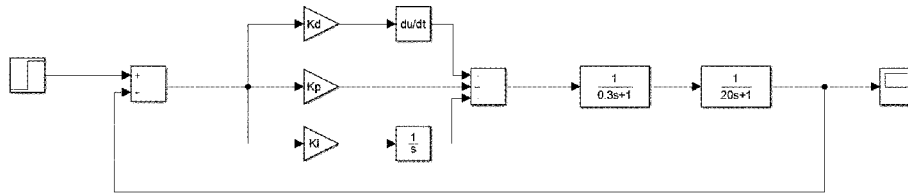


图 7 PID 仿真模型

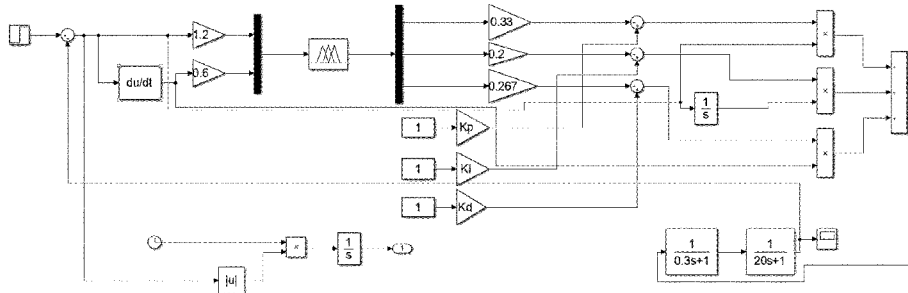


图 8 模糊粒子群 PID 仿真模型

跃信号作为输入信号, 在 125 s 时加入 20% 幅值的阶跃干扰信号, 通过系统对阶跃信号表现出的调节能力以及调节速度来比较模糊粒子群 PID 算法和传统的 PID 控制算法的性能。模糊粒子群 PID 控制和传统的 PID 控制仿真如图 9~10 所示。

图 9 为传统 PID 控制和模糊粒子群 PID 控制所对应

的阶跃响应信号。从仿真曲线中可以看出, 传统的 PID 控制以及模糊粒子群 PID 控制都在一定的时间内回到了稳定状态, 这表明它们自身都有着抗干扰能力, 相比较之下, 模糊粒子群 PID 的反应更加迅速, 能够更快的达到稳定。此时在系统内加入干扰信号, 仿真结果如图 10 所示。从图 10 的仿真曲线中可以看出, 这两种控制方法都表现出

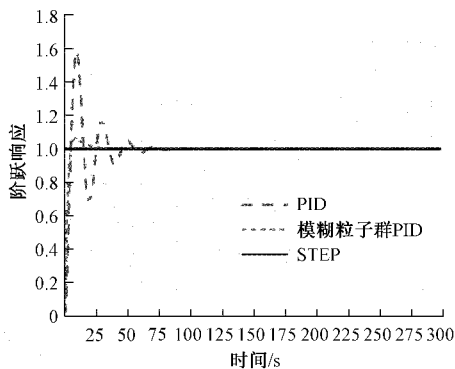


图9 传统PID和模糊粒子群PID仿真对比

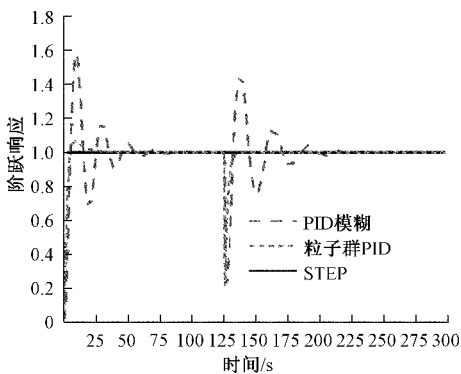


图10 加入干扰后的仿真对比

了不同的调平能力。传统的PID控制能够抑制系统干扰,但由于参数的固定化,容易陷入经验最优,模糊粒子群PID通过粒子群算法来优化参数,使得系统反应速度变快,提升了抗干扰能力。

传统的PID控制和模糊粒子群PID控制系统的性能指标如表4和5所示。由表4和5可知,在传统PID控制下,系统的超调量为58.173%,系统在66s到达平稳;在模糊粒子群PID控制下,系统的超调量为6.295%,系统在34s到达平稳。加入干扰后,系统的超调量为75.7%,在模糊粒子群PID控制下,系统在14s到达平稳而传统的PID控制在103s到达平稳。因此利用模糊粒子群PID算法的温度控制系统能更好的抑制干扰。

表4 传统PID和模糊粒子群PID性能指标对比

控制器	超调量/%	调节时间/s
传统PID	58.173	66
模糊粒子群PID	6.295	34

表5 加入干扰后的性能指标对比

控制器	超调量/%	调节时间/s
传统PID	75.7	103
模糊粒子群PID	75.7	14

4 结 论

本文提出了一种将粒子群算法和模糊控制理论结合运用到温度控制系统的PID控制中的解决方案,采用基于模糊粒子群PID算法的温度控制系统能够使PID的参数进行自我调整,实现了对电容器热压机所需温度的精确控制。从仿真实验结果可以看出,与传统的PID控制算法相比较,模糊粒子群PID算法在超调量和调节时间上有着非常大的优势,并且该系统具有良好的自适应能力,当面对干扰时有着非常强的鲁棒性以及抗干扰能力。模糊粒子群PID算法在电容器热压机温度控制系统中的应用研究对于解决在电容器热压时温度控制效果不佳的问题提供了一种解决方案,对于工业控制系统向着智能化方向发展有着非常重大的意义。

参考文献

- [1] 李琦,李曼茜. 高温聚合物薄膜电容器介电材料评述与展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3105-3123.
- [2] 郑英杰,牛兴华,高卫国,等. 温度控制系统时滞对象的先进PID控制方法研究[J]. 天津理工大学学报, 2018, 34(4): 20-25.
- [3] 徐海峰,孔建. 热处理炉加热温度控制系统的PID控制的粒子群优化[J]. 热加工, 2013, 42(14): 212-214.
- [4] 齐艺超,陈伟,穆春元,等. 基于粒子群自整定PID算法的激光器温度控制系统[J]. 激光技术, 2019, 43(5): 60-64.
- [5] 赵超,陈肇泉,陈晓彦. 基于云自适应量子粒子群优化算法的PID控制器在VAV空调系统温度控制中的应用[J]. 计算机与应用化学, 2018, 35(11): 920-930.
- [6] 姜吉光,盛宇博,常川,等. 基于粒子群优化算法-支持向量回归算法的氨氮传感器温度补偿[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(21): 8983-8988.
- [7] 李翔宇,肖峻,潘运平,等. 基于PSO的模糊PID车载平台调平控制系统研究[J]. 现代制造工程, 2021(2): 58-65.
- [8] 付丽辉,尹文庆. 基于新型神经网络PID控制器的温室温度控制技术[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(9): 2423-2425, 2428.
- [9] 陈邦泽,杨晓波. 智能家居室内温度远程优化控制仿真研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(12): 286-290.
- [10] 马可心,刘剑,刘伟,等. 模糊理论结合PID控制方法在集中供热系统中的应用[J]. 热科学与技术, 2021, 20(6): 601-606.
- [11] 余发山,孟宪伦,崔立志. 基于模糊PID迭代学习的隧道通风控制算法研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(4): 5-8.
- [12] 季辉,李志坚,陈小刚. 基于Fuzzy-PID控制的雷达伺

- 服系统研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(12): 29-32.
- [13] 颜玉玲, 李一鹏. 基于温度模糊 PID 控制的镁合金挤压性能研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(23): 116-118.
- [14] 雷翔霄, 唐春霞. 基于自适应模糊 PID 算法的镀液温度控制[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(8): 35-38.
- [15] 韩璞, 王学厚, 李剑波, 等. 粒子群优化的模糊控制器设计[J]. 动力工程, 2005(5): 663-667.
- [16] 韦宏利, 周建波, 王晴悦, 等. 基于模糊 PID 的温度控制系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(9): 111-116.
- [17] 吴玫. 粒子群优化算法进展研究[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2018(12): 167-168.
- [18] 徐峰, 李东海, 薛亚丽. 基于 ITAE 指标的 PID 参数整定方法比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2003(8): 207-211.

作者简介

张峰, 硕士研究生, 主要研究方向为模糊控制。

E-mail: 2472068669@qq.com

王强(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为控制系统。

E-mail: wang_q@ntu.cdu.cn