

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210986

基于模糊灰狼 PID 的发酵仓解耦控制系统研究*

张坤鳌 常云磊

(西安科技大学计算机科学与技术学院 西安 710600)

摘要: 为解决发酵仓微生物降解过程中的非线性、强耦合、大滞后问题,提出了一种基于模糊灰狼 PID 算法的发酵仓解耦控制方法。首先,辨识得到发酵仓控制系统模型,通过动态解耦补偿方式消除在控制过程中产生的温、湿度耦合效应。然后结合 PID 和模糊控制的优点,建立模糊 PID 控制系统模型;最后,利用灰狼优化算法的迭代寻优能力,对模糊 PID 初始化参数进行优化。仿真结果表明,与传统控制方法相比,所提出的控制策略的温度回路调节时间由原来的 1 623 s 降低到 596 s,相对湿度调节时间减少了 910 s,并具有较理想的解耦效果,可以有效实现降解环境的精确控制。

关键词: 微生物降解系统;模糊 PID;动态解耦补偿;灰狼优化算法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Research on decoupling control system of fermentation bin based on fuzzy gray wolf PID algorithm

Zhang Kun'ao Chang Yunlei

(School of Computer Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710600, China)

Abstract: To solve the problems of nonlinearity, strong coupling and large lag in the microbial degradation process of fermentation tank, a decoupling control method of fermentation tank based on fuzzy gray wolf PID algorithm was proposed. First, the control system model of the fermentation bin is identified, and the coupling effect of temperature and humidity generated in the control process is eliminated through dynamic decoupling compensation. Then, combining the advantages of PID and fuzzy control, the fuzzy PID control system model is established. Finally, the fuzzy PID initialization parameters are optimized by using the iterative optimization ability of the gray wolf optimization algorithm. The simulation results show that, compared with the traditional control method, the proposed control strategy reduces the temperature loop regulation time from 1 623 s to 596 s, the relative humidity regulation time is reduced by 910 s, and has a better decoupling effect, which can effectively realize the accurate control of degradation environment.

Keywords: microbial degradation system; fuzzy PID; dynamic decoupling compensation; grey wolf optimization algorithm

0 引言

“厕所革命”要解决两个层面的问题,首先要解决厕所清洁和使用方便的问题,进而实现物质资源、节水节能和环境保护^[1]。目前,大部分地区已经采用了旱厕、水冲式厕所和打包式厕所等解决上述卫生问题^[2-3],但没有对粪便进行现场无害化、减量化和资源化处理,给环境和生态带来很大隐患。然而,市场上代表新技术发展方向的微生物降解型生态厕所的核心设备并不完善^[4-5],从而出现了技术不够稳定、微生物分解效率低且使用成本高昂等诸多问题。

针对上述存在的问题,为了提高微生物降解系统的工作性能和环境的适应能力,提出了一种基于模糊灰狼 PID 的发酵仓解耦控制方法。首先利用阶跃响应法,建立微生物降解系统温湿度被控对象的数学模型。并根据传递函数设计出解耦系统,再将模糊 PID 控制算法融入到设计好的解耦系统当中,以达到动态解耦目的。其次,在传统的模糊 PID 控制系统中,设计的模糊 PID 参数的优化通常是通过试错来完成的^[6-7]。这种类型的模糊控制参数优化方法可能不会给出最佳解决方案。因此,本文提出用灰狼优化算法(grey wolf optimizer algorithm, GWO)来对模糊 PID 控

收稿日期:2022-08-07

* 基金项目:陕西省自然科学基金项目(2019JLM-11)、陕西省自然科学基金(2017JM6105)项目资助

制器的初始化参数优化。并通过仿真实验验证了该方法的有效性。

1 发酵仓温湿度解耦系统建模

1.1 系统控制原理

微生物降解系统由发酵仓、搅笼、控制终端、抽粪泵、加热器(风机和陶瓷加热片)等设备构成,温湿度控制系统如图 1 所示。发酵仓内系统对温度进行调节时,发酵仓内温度低于设定值时,电子调压模块升高风机和陶瓷发热片的输入电压,则电机提速、发热片提升发热温度;反之,发酵仓内温度大于设定值时,电子调压模块降低风机和陶瓷发热片的输入电压,则电机减速、降低发热片发热温度。

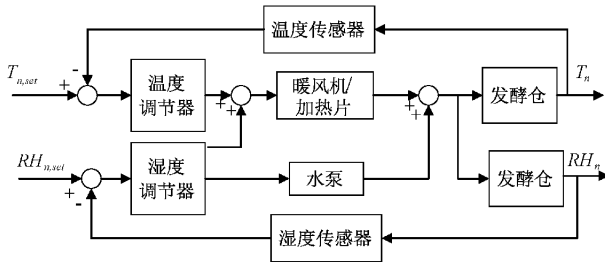


图 1 发酵仓温湿度控制系统

当对湿度进行调节时,发酵仓内湿度大于设定值时,电子调压模块升高风机和陶瓷发热片的输入电压,则电机提速、发热片提升发热温度,与此同时,发出减少泵送大小便的时长指令;反之,发酵仓内湿度小于设定值时,电子调压模块降低风机和陶瓷发热片的输入电压,则电机减速、降低发热片发热温度,与此同时发出加大泵送大小便时长的指令。

1.2 温湿度耦合控制对象模型建立

本文研究的温湿度控制系统是一个双输入、双输出的系统,具有非线性、时变、强耦合和大时延的特点,且系统内部复杂,难以用力学模型法建模。因此,采用阶跃响应曲线法^[8]建立温湿度控制系统模型。阶跃响应法的系统辨识简单易控制,具体方法是在开环条件下,给出系统阶跃响应,得到温湿度响应曲线。然后根据响应曲线,通过图解法得到识别被控对象的传递函数。

加热器-温度的数学模型的确定,首先检测到发酵仓内初始温度为 36℃,并在较长时间内保持不变。然后关闭湿度控制器的同时对加热器进行信号的输入,将加热器的输出功率提升 80%,记录温度变化曲线直至稳定,温度响应曲线如图 2 所示。在实际的工业生产过程中,一般情况下,控制系统的加热过程可以用延迟环节和惯性环节串联描述^[9-10]。因此,本文采用阶跃响应实验方法建立了发酵仓加热系统的数学模型,其传递函数模型可以表示为:

$$F_{11}(s) = \frac{B_1}{T_1s + 1}e^{-\tau s} \quad (1)$$

$$B_1 = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta u} \quad (2)$$

式中: τ 为温度控制系统的滞后时间; T_1 为时间常数; B_1 是静态增益。式(2)中, $y(0)$ 为系统初始温度, Δu 为加热比例增值; $y(\infty)$ 为系统稳定后的温度。

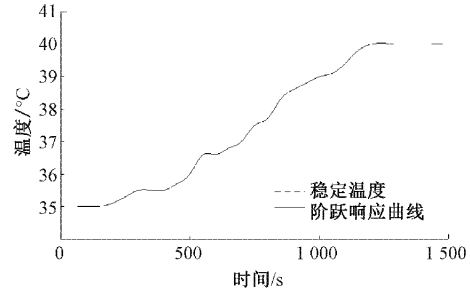


图 2 加热器-温度阶跃响应

经过多次实验,从实验数据处理中选出最优数据,并对过程进行建模,模型参数由阶跃响应曲线上的两个特定点计算。如图 2 所示,温度 35℃ 开始,至 45℃ 趋于稳定。当 $t_1=500$ 时, $y(t_1) = 36$; 当 $t_2=1\ 076$ 时, $y(t_2) = 39.23$ 。代入响应公式计算出 $B_1=6.25$ 、 $T_1=392$ 、 $\tau=115$,发酵仓加热器 $F_{11}(s)$ 的传递函数模型为:

$$F_{11}(s) = \frac{6.25}{392s + 1}e^{-115s} \quad (3)$$

使用以上阶跃响应两点法求得 F_{12} 、 F_{21} 、 F_{22} 的数学模型为:

$$F(s) = \begin{bmatrix} F_{11}(s) & F_{12}(s) \\ F_{21}(s) & F_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{6.25}{392s + 1}e^{-115s} & \frac{-1.11}{338s + 1}e^{-304s} \\ \frac{-14.3}{552s + 1}e^{-294s} & \frac{80}{522s + 1}e^{-89s} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: F_{11} 、 F_{22} 分别为加热器对温度的传递函数、加湿器(水泵)对湿度的传递函数; F_{21} 、 F_{12} 分别为加湿器对温度的传递函数、加热器对湿度的传递函数。

1.3 温、湿度前馈解耦算法设计

由于发酵仓在温湿度控制过程中具有强耦合特性,如果系统不进行解耦,系统中的各个环路在运行过程中会相互干扰,难以获得理想的控制效果。针对温、湿度系统之间耦合效果控制不理想的问题,采取前馈解耦的方法解耦。前馈解耦是根据控制不变性原理来设计解耦控制器的,以矫正方式使温度和湿度在调整过程中稳定在设定值,达到解耦目的^[11]。

温湿度前馈补偿解耦控制系统原理如图 3 所示, T_{set} 、 RH_{set} 分别为设定的温度和湿度值; U_1 、 U_2 分别为温、湿度控制器输出; $D_{21}(s)$ 为温度-湿度解耦传递函数; $D_{12}(s)$ 为湿度-温度解耦传递函数。

在传递矩阵之前加入两个解耦补偿矩阵,可以消除图 3 所示的温湿度控制系统的产生的耦合效应。将耦合系统转化为两个相互独立的单回路系统。解耦传递函数 $D(s)$ 、 $D_{21}(s)$ 和等效传递函数中的 $W_{11}(s)$ 、 $W_{22}(s)$ 的传递函数如下:

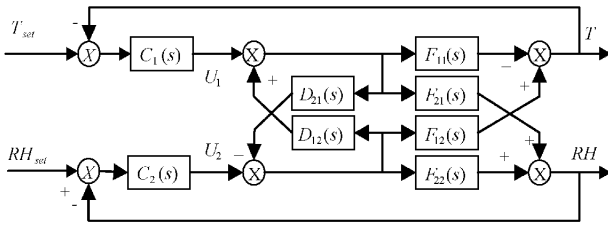


图3 温湿度前馈补偿解耦控制系统原理

$$W_{11}(s) = F_{11}(s) + D_{21}(s)F_{12}(s) \quad (5)$$

$$W_{22}(s) = F_{22}(s) + D_{12}(s)F_{21}(s) \quad (6)$$

$$D_{12}(s) = -\frac{F_{12}(s)}{F_{11}(s)}, D_{21}(s) = -\frac{F_{21}(s)}{F_{22}(s)} \quad (7)$$

2 模糊PID控制器设计

在前馈解耦算法设计中,解耦矩阵 $D(s)$ 是前馈解耦控制系统实现的关键,这取决于被控对象数学模型的准确性^[12]。然而,在实际工业控制过程中,被控对象往往是非线性的、时变的。传统的解耦控制不具有自适应性,导致静

态解耦性能的影响变差甚至失效。

针对传统解耦系统回路自适应能力不足的问题,加入模糊控制模块,在线的调整PID参数。模糊PID控制是利用模糊逻辑,根据一定的模糊规则实时优化PID参数,克服传统PID参数不能实时调整的缺点。为了使一般模糊PID控制具有自动调节功能,引入定量因子 k_e 、 k_{ec} 和比例因子 k_v ,并通过定量因子和比例因子在线自调整策略找到控制器的最优参数,以达到较好的控制效果。

本文的模糊子集为 $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$,分别对应NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB。温度从 $35\text{ }^\circ\text{C}$ 上升到 $55\text{ }^\circ\text{C}$ 的理想温度环境,温度误差的物理域为 $[-20, 20]$,最大误差率为 $0.06\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。温度回路的输入 e 、 ec 与输出 K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊规则如表1所示。采用三角隶属函数,通过对控制器的输入 e 和 ec 进行模糊化处理,设计了49条模糊规则。根据模糊控制器系统运行的实时控制效果,实现PID 3个参数的动态调节,并使用加权平均法对模糊进行求解。成员函数的输入输出特征面如图4所示,可以直接看出输入信号 e 、 ec 与输出 K_p 、 K_i 、 K_d 之间的关系。

表1 温度回路输入输出的模糊规则表

$\Delta K_p / \Delta K_i / \Delta K_d$	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/PM	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
E	ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

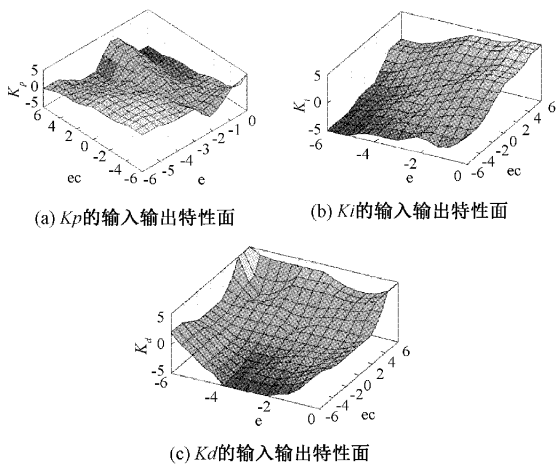


图4 模糊控制的输入输出特性曲面

3 灰狼算法优化过程

发酵仓适宜环境的调节过程是一个非线性的动态过程,模糊控制能较好地针对环境变化实时调整PID参数。

但初始的PID参数需要手动修正^[13],这很难使系统达到最优性能。因此,选用灰狼算法来对PID参数进行迭代优化,找到最优参数。

灰狼优化算法是一种模拟灰狼群体捕食行为的新颖智能优化算法^[14-15]。灰狼优化的过程分别为环绕、狩猎和攻击猎物,灰狼包围猎物移动的公式如下:

$$D = |CX_p(t) - X(t)| \quad (8)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - AD \quad (9)$$

式中: X_p 和 A 分别是猎物的位置向量和灰狼的位置向量; t 是目前的迭代次数。式(8)表示个体与猎物间的距离,式(9)是灰狼的位置更新公式。

灰狼狩猎时,狼群其余个体跟随前面3种狼向猎物位置(全局最优解)逼近^[16]。该过程描述如下:

$$D_\alpha = C_1 X_\alpha - X \quad (10)$$

$$D_\beta = C_2 X_\beta - X \quad (11)$$

$$D_\delta = C_3 X_\delta - X \quad (12)$$

$$X_1 = X_\alpha - A_1 D_\alpha \quad (13)$$

$$X_2 = X_\beta - A_2 D_\beta \quad (14)$$

$$X_3 = X_\delta - A_3 D_\delta \quad (15)$$

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (16)$$

式中： X_α 、 X_β 、 X_δ 分别表示 α 、 β 、 δ 的位置向量； D_α 、 D_β 、 D_δ 分别表示当前候选灰狼与最优三条狼之间的距离。利用式(16)更新整个狼群的位置。

4 控制系统的仿真和分析

为了验证基于模糊灰狼 PID 算法的发酵仓解耦控制系统的有效性,利用 MATLAB 软件完成传统 PID、模糊 PID 的 Simulink 程序设计,观察解耦系统与非解耦系统的实际效果,对仿真结果进行对比和分析。

在验证加入解耦的控制效果的实验中,由于模糊 PID 控制器参数调整对控制的质量有很大影响,通过灰狼算法对模糊 PID 控制器的量化因子进行迭代优化,寻找最优选项。由图 5 可知,灰狼迭代 14 次时取得最优解,此时的适应度值为 5.314。经 GWO 优化所得到温、湿度控制器的 PID 初始化参数 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 分别为 0.300 8、0.006 8、13.898 0 和 0.062 5、0.001 1、2.154 2。

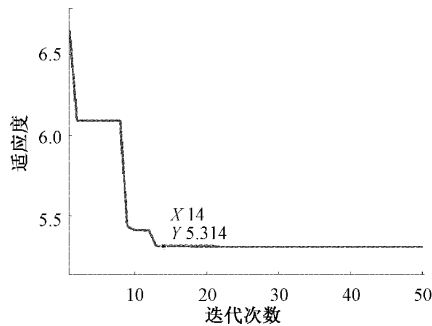


图 5 GWO 优化 PID 参数迭代过程

4.1 温、湿度系统控制效果对比

设置发酵仓温度初值为 35℃,相对空气湿度为 40%,发酵仓稳态下工作温度为 55℃,两参数均为 20 s 采样一次,总仿真时间为 3 000 s,本文采用工作时相对湿度为 70%。仿真结果如图 6 所示。

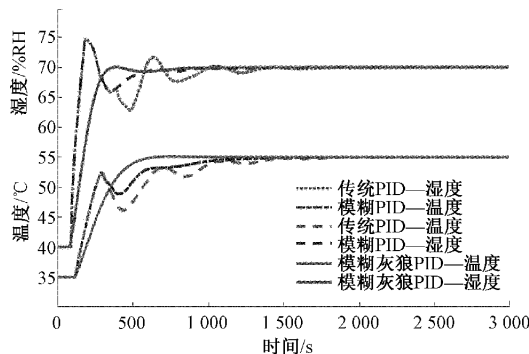


图 6 仿真结果响应曲线对比

由图 6 曲线可知,在使用模糊灰狼 PID 算法控制时,温、湿度系统的调节时间明显下降,且震荡平缓。湿度控制系统的调节时间 840 s,且超调量为 1%;温度控制系统的调节时间为 596 s。模糊灰狼优化系统的调节时间有很大的缩短、超调量小,具有较好的动态响应特性,满足系统的控制要求。仿真结果分析如表 2 所示。

表 2 仿真结果分析

性能指标	方法			
	模糊灰狼	模糊 PID	传统 PID	
湿度	超调量/%	1	16.67	6.67
	调节时间/s	840	916	1 750
温度	调节时间/s	596	1 310	1 623

4.2 温、湿度系统加入干扰解耦效果对比

对系统解耦效果进行验证,在 1 500 s 时分别调整解耦系统和无解耦的工作温度,将工作湿度由 70% 调整至 75%,观测湿度的变化和温度是否存在耦合效应;分别在 3 000 s 和 5 000 s 时对工作温度进行调整,温度由 55℃ 调节至 61℃ 和 69℃,观测温度的变化和湿度是否存在耦合效应。仿真结果如图 7、8 所示。

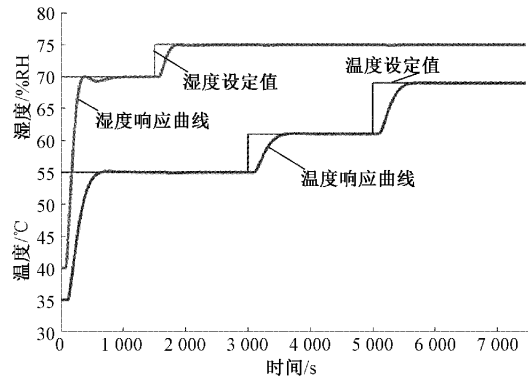


图 7 解耦系统加入干扰的温湿度之间响应曲线

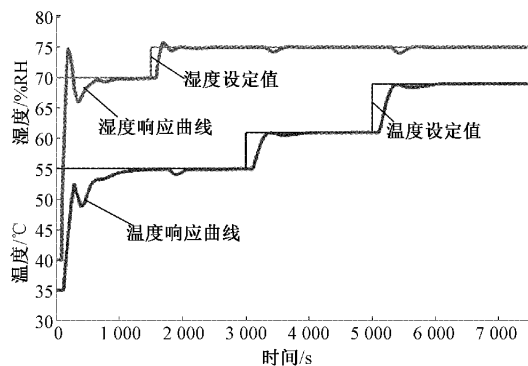


图 8 耦合系统加入干扰的温湿度响应曲线

由图 7、8 所示,在 1 500 s 时湿度控制器得到控制信号,将系统工作湿度由 70% 调整至 75%。使用模糊灰狼解耦控制的温度能够迅速到达稳态,并且在解耦后湿度无明

显变化。在无解耦控制时,由于湿度的调节,温度发生了明显的波动,在1 883 s时温度的数值降低至54.03℃,然后在2 106 s后重新到达工作温度55℃。

分别在3 000 s和5 000 s时温度控制器接收调节信号,温度由55℃调节至61℃和69℃,观测温度和湿度的变化。在使用模糊灰狼解耦控制时,温度改变后湿度几乎无变化;在无解耦控制时,由于湿度的调节,相对湿度在3 414 s时降低至74.3%,并且在3 622 s时重新到达稳态;在5 439 s时降低至74.01%,并且在5 625 s时重新到达稳态。

5 结 论

本文提出了一种将灰狼算法和模糊控制理论结合运用到微生物降解系统的PID控制中的解决方案。仿真实验结果可以看出,所提出的模糊灰狼PID控制器在双回路解耦系统中的动态响应、稳定性及控制精度均优于传统PID控制器,并且该系统具有良好的自适应能力。在温、湿度耦合效应方面,分别对温度、湿度进行解耦控制调节后,几乎对系统没有耦合影响。因此,本文研究的基于模糊灰狼PID算法的发酵仓解耦控制系统具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 张宇航,沈玉君,王惠惠,等.农村厕所粪污无害化处理技术研究进展[J].农业资源与环境学报,2022,39(2):230-238.
- [2] 周巍,黄振克.船舶生物降解型生态厕所应用研究[J].交通建设与管理,2021(4):117-119.
- [3] XIAO C, LI J, FANG C Q, et al. Research on the intelligent control system of environment-friendly vertical fermenter[C]. 2018 International Computers, Signals and Systems Conference (ICOMSSC), IEEE, 2018: 872-875.
- [4] 李德茂,陈吴西,郭蔚,等.工业生物发酵过程模拟:进展与发展趋势[J].生物工程学报,2019,35(10):1974-1985.
- [5] 刘冠雄,李爱传,李吉进,等.好氧发酵无线温湿度控制平台研究[J].中国农业信息,2018,30(5):118-126.
- [6] TRIPATHI S, SHRIVASTAVA A, JANA K C. Self-Tuning fuzzy controller for sun-tracker system using Gray Wolf Optimization(GWO) technique[J]. ISA Transactions, 2020, 101: 50-59.
- [7] 李新,陈春俊.基于模糊PID的高速列车车内压力主被动控制[J].中国测试,2020,46(1):105-109.
- [8] HU M Y, FANG K L. The temperature and humidity control of artificial climate chamber based on feed-forward compensation decoupling [C]. Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd, 2013, 816: 343-347.
- [9] 黄超,薄翠梅,郭伟,等.工业污水处理溶解氧的双模糊控制系统研究[J].控制工程,2019,26(2):185-190.
- [10] BU Q, CAI J, IU Y, et al. The effect of fuzzy PID temperature control on thermal behavior analysis and kinetics study of biomass microwave pyrolysis [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2021, 158: 105176.
- [11] WANG L, ZHU Z. Research on temperature and humidity decoupling control of constant temperature and humidity test chamber [C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2020, 711(1): 012104.
- [12] 朱启然,李绍勇,李鹏波.空调房间温湿度PID解耦控制系统的仿真研究[J].控制工程,2019,26(5):851-858.
- [13] 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.
- [14] 许乐,赵文龙.基于新型灰狼优化算法的无人机航迹规划[J].电子测量技术,2022,45(5):55-61.
- [15] 郑晓亮,谢晓贤,王强.基于灰狼优化的埋地管道泄漏双波谱定位方法[J].仪器仪表学报,2022,43(8):11.
- [16] 李伟中,孔令成,王美玲.结合模糊逻辑的自适应灰狼优化算法[J].小型微型计算机系统,2021,42(10):2023-2030.

作者简介

张坤鳌,副教授,主要研究方向为智能仪表与传感器及嵌入式系统。

E-mail: 1974553809@qq.com

常云磊(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为智能仪表与传感器及嵌入式系统。

E-mail: 1187293777@qq.com