

自适应模糊 PID 算法仔猪床温度控制系统研究^{*}

李喜武¹, 徐博^{2,3}, 袁月明³

(1. 广东石油化工学院, 广东茂名, 525000; 2. 沈阳农业大学, 沈阳市, 110866; 3. 吉林农业大学, 长春市, 130018)

摘要:为解决北方冬季仔猪床温度低的弊端,采用低温热水辐射式采暖为供热方式,通过控制仔猪床内部循环水的流速,达到控制仔猪床温度的目的。针对系统迟滞性大、响应慢等特点,设计基于自适应模糊 PID 算法的控制器,实现对 PID 控制规则中的 k_p 、 k_i 和 k_d 参数实时修正,以达到改善控制系统性能的目的。通过在 MATLAB 中进行建模仿真和对比试验研究,表明该方法比传统的 PID 算法具有更好的稳态精度和自适应能力,实际温度与目标设定温度最大偏差为 0.5℃,超调量为 1.2%,能够满足系统性能指标的要求。

关键词:自适应;模糊 PID;仔猪床;温度控制

中图分类号:S24 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553 (2020) 10-0048-07

李喜武, 徐博, 袁月明. 自适应模糊 PID 算法的仔猪床温度控制系统研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(10): 48-53, 73
Li Xiwu, Xu Bo, Yuan Yueming. Research on temperature control system of piglet bed based on adaptive fuzzy PID algorithm [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(10): 48-53, 73

0 引言

随着中国经济的发展,人们对猪肉的消费一直维持较高的水平,因此生猪养殖市场面临巨大机遇和挑战。我国是世界上最大的猪肉生产国和消费国,猪肉产量近年一直稳居全球首位。中国生猪存栏量占全球的比率维持在 52%~60%之间,出栏量维持在 54%~56%之间^[1]。而在养猪生产中,哺乳仔猪死亡率占总死亡率的 75%以上,仔猪生产是养猪生产中极其重要的环节,如何提高仔猪成活率,是降低生产成本,提高养猪经济效益的关键^[2]。当环境温度在适宜范围时,作为恒温动物的仔猪能通过自身的调节来维持正常的体温。当舍内的环境温度较低时,仔猪自身需要消耗比适温时更多的能量来产热以维持正常的体温,进而导致在采食量增加的前提下反而平均日增重下降,使得饲料的转化效率降低。哺乳仔猪如果遭受持续的低温刺激后,使血液中的免疫球蛋白水平下降,降低了自身的抵抗力,极易致病而使死亡率提高^[3]。

中国北方规模化生猪养殖场中,冬季通常采用防冻和保温措施,以此来提高仔猪在哺乳期和断乳期的存活率^[4]。为了给仔猪营造适宜其生长的小环境,人们常常在仔猪舍内加装温床、保温灯、暖气或者电热板

等装置,以此提高仔猪的舒适度,通过这些方法提高仔猪的存活率。周青等^[5]冬季采用供暖设施以改善猪舍的整体环境,但是猪舍内需要进行通风,供暖和通风是一对矛盾的方式;王美芝等^[6]分别采用固定式、移动式保温床加木质保温箱的形式,改善仔猪的生长环境;吴建寨等^[7]采用复合塑料构成的保温箱,采用加热垫改善猪舍的温度;郭宗义等^[8]采用保温灯的形式仔猪厂长环境的温度。为了降低仔猪疾病的发生率,养殖场常常采用提高仔猪床的温度,即直接提高仔猪腹感温度的措施^[9-14],该方法对生猪产业的发展具有非常重要的意义^[15-16]。

本设计针对采用低温热水辐射供暖的仔猪繁育系统,以仔猪床的温度为控制目标,设计了基于自适应模糊 PID 算法的控制器,通过在线实时修改 PID 的参数,以得到更优的控制效果。

1 仔猪温床系统及模型

在实际生产中应用的仔猪床如图 1 所示,由上层到下层分别为地板层、相变材料层、加热层、隔热层和基底层。结构中的地板层也就是施工找平层,采用 C20 混凝土工艺,厚度为 20 mm;相变材料层厚度为 20 mm,填充的是月桂酸和癩酸混合比为 3:7 的相变

收稿日期:2020年4月27日 修回日期:2020年5月8日

^{*} 基金项目:广东省重点领域研发计划(2019B020215002-5);广东石油化工学院科研基金项目(2018rc30)

第一作者:李喜武,男,1971年生,吉林长春人,博士,副教授,研究方向为装备智能监测与控制。E-mail: xwli@gdupt.edu

通讯作者:袁月明,女,1963年生,吉林长春人,博士,教授,研究方向为设施农业过程控制与环境工程。E-mail: yym_jlu@163.com

材料;加热层的厚度为 30 mm,由水管和 C15 混凝土填充构成;隔热层由铝箔和挤塑板组成,其中铝箔的厚度为 0.2 mm,挤塑板的容重为 30 kg/m²、厚度为 20 mm;实验室地面构成基层。加热层中的水管采用双路并管回型的铺管方式,可以使整个仔猪床温度分布均匀,仔猪床整体尺寸规格为 100 mm × 100 mm × 9 mm^[17]。

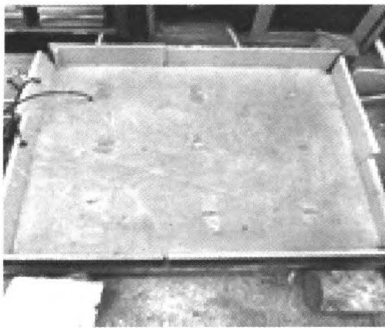


图 1 猪床实物图
Fig. 1 Pig bed photo

本系统热源为 50 ℃ 恒温的热水箱,采用电加热,加热功率为 4 kW,尺寸为 300 mm × 500 mm × 390 mm;动力源采用 EV1000-4T0022G 变频器拖动的,功率为 2.2 kW、型号为 TP65-60/4 的循环泵;系统中测量水温度的传感器均为热电阻 Pt100。系统中仔猪床的温度监测点布置如图 2 所示,图 2 中 A~L 为温度监测的位置点,利用热电阻 Pt100 进行测量,最终温度以这些点的平均值作为测量值并由控制器采集记录^[18]。

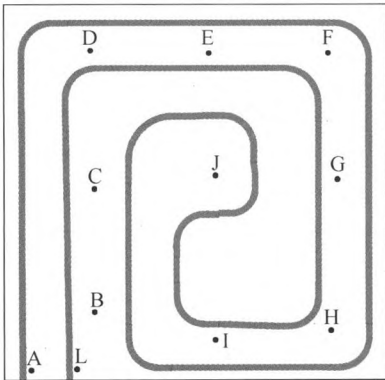


图 2 温度传感器布点图
Fig. 2 Distribution map of the temperature sensors

由于仔猪繁育场所处环境苛刻,导致仔猪床温度不易精确控制,而且为了实现温度控制的系统组成本身也复杂,因此为了从理论角度进行分析需要对温床控制系统进行化简。简化后的仔猪床温度控制系统如图 3 所示。在图 3 中, T 是仔猪床目标温度值,是系统的给定值; T_{out} 为仔猪床实际温度值,是系统的输出值,该温度经温度传感器测量变送后反馈回输入端,输入控制器;控制器对 T 和 T_{out} 进行比

较,求得偏差 e 和偏差变化率 ec ,控制器对 e 和 ec 进行模糊推理,得到 PID 控制器的三个参数,对这三个参数进行 PID 运算得到控制输出 U ,将 U 再输出给变频器,变频器根据 U 值的大小调节控制循环泵的转速 V ,从而达到对敷设在仔猪床内部循环管内热水流量 Q 的控制,通过热水的热量辐射,最终实现对仔猪床温度控制的目的^[18]。

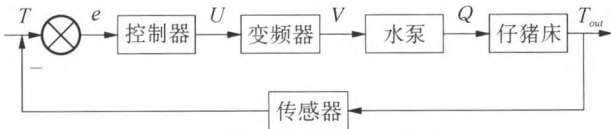


图 3 控制系统总体结构图
Fig. 3 Structure diagram of control system

2 自适应模糊 PID 控制规则

2.1 模糊 PID 控制器结构

在控制领域中,虽然各种控制理论和方法层出不穷,但 PID 控制以其鲁棒性好、算法成熟稳定、易于实现、结构简单等优点,使其在过程控制中仍然得以大规模使用^[19-20]。在传统的 PID 控制中,三个参数即比例系数 k_p 、积分时间常数 k_i 和微分时间常数 k_d 时固定不变的。由于猪床的温度易受复杂环境因素影响,固定参数的 PID 控制难以满足控制要求,因此 PID 控制中的三个参数需要能够根据实际情况时时调节才能满足系统需求。另一种在控制中广泛使用的模糊控制,能够适应非线性、滞后时间长的控制对象,具有鲁棒性强的特征,而且容错能力较强,适合受控对象动力学特征变化、环境特征变化的对象^[21-22]。如果将 PID 控制和模糊控制两种方式的结合起来,发挥各自在控制中的优点,就能够提高控制器的适用范围和控制精度^[23]。自适应模糊 PID 控制算法能够满足这种要求。

本系统设计的自适应模糊 PID 控制器如图 4 所示,由模糊控制器和 PID 控制器组成^[24-25]。

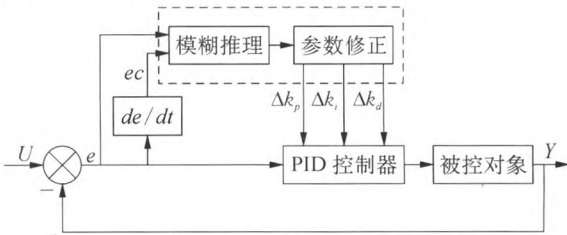


图 4 模糊 PID 控制器工作原理图
Fig. 4 Work principle diagram of fuzzy-PID controller

自适应模糊控制的工作过程是按照一定的工作周期,不断读取给定温度值和实际温度值,然后计算偏差以及偏差的变化率,再根据事先制定的模糊控制规则表确定的模糊控制规则,进行反模糊化计算,

实现为 PID 控制器修正 k_p 、 k_i 和 k_d 三个参数。因此控制器集成了 PID 控制稳定快速和模糊控制器在线参数整定的特长^[26-27]。在实际的仔猪床温度控制系统中,以温度设定值和实际值的差值 e 及其变化率 ec 作为模糊控制器的两个输入,以得到的 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 三个修正量作为模糊控制器的输出,送给 PID 控制器使用。

2.2 模糊 PID 控制规则建立

2.2.1 PID 控制器

控制中常用的 PID 控制器基本算法如式(1)所示。

$$u(k) = k_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\}$$
 (1)

式中: $u(k)$ ——输出;
 $e(k)$ ——输入,是给定温度值与实测温度值的偏差;
 T ——采样周期;
 T_i ——积分时间常数;
 T_d ——微分时间常数。

2.2.2 模糊控制器

本系统根据任务设计的模糊控制器结构如图 5 所示,由模糊化、模糊推理以及反模糊化 3 个部分组成。控制器首先对输入系统中的实际温度值进行模糊化,然后根据按照经验预先制定的模糊规则进行运算,最后进行反模糊化而得到实际的控制输出值^[28-29]。

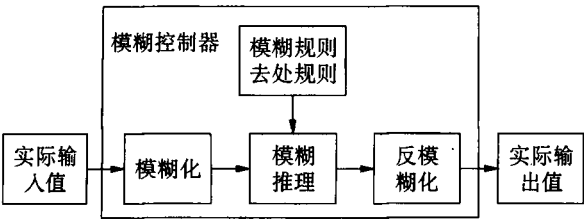


图 5 模糊控制器工作原理图

Fig. 5 Working principle diagram of fuzzy controller

1) 模糊控制器的变量模糊化。模糊控制器的输入变量和输出变量,可能位于不同的论域,为了易于处理数据需将变量进行统一量化,即模糊化,建立模糊集论域。所谓的基本论域,就是输入输出变量在实际工作情况下的变化范围,在各自的基本论域乘以一个量化因子进行量化后,将输入输出的变量都转换到同一个论域,再定义每个需要模糊化的模糊子集的隶属度函数,最终实现控制器的变量模糊化^[13, 24]。

2) 模糊逻辑推理过程。系统在不同状态下工作时,根据测量的实际值计算得到的输入量偏差 e 以及

偏差变化率 ec ,二者均会在一定的区间变化,把这个区间分成 7 部分,用“PB、PM、PS、ZO、NS、NM、NB”分别代表数值的“正大、正中、正小、零、负小、负中、负大”。计算控制器的输出时需要增量 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 三个参数,对这三个参数也进行量化,采用的策略同输入一样,也采用 7 个模糊值,即也用“PB、PM、PS、ZO、NS、NM、NB”分别代表数值的“正大、正中、正小、零、负小、负中、负大”。根据以往的大量实际控制经验,在对输入输出进行量化基础上,确定系统的状态和趋势,即根据变量 e 和 ec 不同组合,建立 PID 控制中所需的 k_p 、 k_i 和 k_d 三个参数的自适应规则。参考相关文献^[30]制定的具体规则概略如下^[18]。

偏差量 $|e|$ 的值较大时,此时由于目标值偏离给定值较远,为尽快使目标值趋近给定值,使误差快速减小,系统应该选取较大的 k_p 值,以此提高系统的响应速度。同时为了避免系统出现较大的超调量,其它两个参数 k_d 和 k_i 应取较小值^[18, 31]。

偏差量 $|e|$ 的值位于中间时,此时目标值距离给定值不远,即要使系统避免超调,同时又要保证系统具有一定的响应速度,系统应该选取比较小的 k_p 值以及适中的 k_d 值和比较大的 k_i 值^[18, 32]。

偏差量 $|e|$ 的值比较小时,此时目标值已经很接近给定值,在首先保证系统稳定性的前提下,系统应避免在给定值附近有较大的波动,因此在偏差变化率的值同时也比较大时,系统的 k_p 和 k_i 应取较大的值,而 k_d 选取适中的值即可^[18, 33]。

根据上述经验,同时必须考虑偏差变化率 ec 的大小及正负情况,经过试验和总结建立了 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 三个参数的 49 条模糊规则,如表 1、表 2 和表 3 所示,3 个对应的控制规则曲面分别为图 6~图 8 所示。

3) 反模糊化。利用面积重心法对控制器的模糊输出进行反模糊化,得到各个系数的增量,然后将得到的反模糊化的值乘以比例因子,使反模糊值转化为该变量实际基本论域内的变化量。

表 1 Δk_p 的模糊规则表

Tab. 1 Fuzzy table of Δk_p

Δk_p	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
e	NB	PB	PB	PM	PS	Z	Z
	NM	PB	PB	PM	PS	Z	Z
	NS	PM	PM	PM	PS	Z	NS
	Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM
	PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM
	PM	PS	Z	NS	NM	NM	NB
	PB	Z	Z	NS	NM	NM	NB

表 2 Δk_i 的模糊规则表
Tab. 2 Fuzzy table of Δk_i

Δk_i	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
e	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
	NM	NB	NM	NS	NS	Z	Z
	NS	NB	NM	NS	Z	PS	PS
	Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM
	PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB
	PM	Z	Z	PS	PM	PB	PB
	PB	Z	Z	PS	PM	PB	PB

表 3 Δk_d 的模糊规则表
Tab. 3 Fuzzy table of Δk_d

Δk_d	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
e	NB	PS	NS	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	Z
	NS	Z	NS	NM	NM	NS	Z
	Z	Z	NS	NS	NS	NS	Z
	PS	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PB

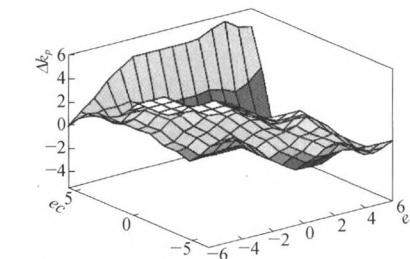


图 6 比例系数调校参数的控制曲面
Fig. 6 Control surface of the adjustment parameter of the proportional coefficient

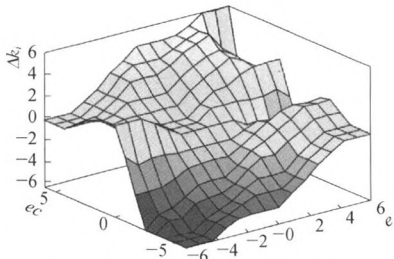


图 7 积分系数调校参数的控制曲面
Fig. 7 Control surface of the adjustment parameter of the integral coefficient

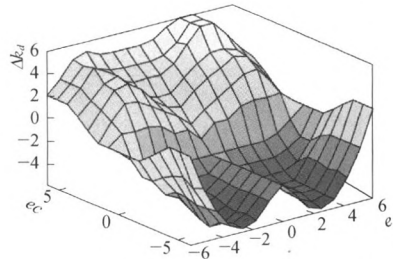


图 8 微分系数调校参数的控制曲面
Fig. 8 Control surface of the adjustment parameter of the differential coefficient

3 仔猪温床系统模型与仿真

为了实现正确控制,首先需要对系统进行仿真试验,为此需要建立被控系统的数学模型。采用的办法是利用阶跃响应法来辨识系统模型。当仔猪温床的温度达到某一较低稳定值之后,控制 TP65-60/4 循环泵全速工作,往仔猪温床中以一恒定流量输入 50℃ 温水,记录仔猪床的温度响应曲线,直到仔猪床温度达到某一稳定值。然后提取温度响应曲线的数据并保存,将数据导入 Matlab 中,在 Matlab 的系统辨识工具箱

中输入数据变量,进行模型辨识。因为该实际控制对象可以简化为惯性二阶纯滞后系统,所以选用惯性二阶纯滞后模型进行系统辨识,最终得到仔猪温床的数学模型如式(2)所示。

$$G(s) = \frac{k \times \exp(-T_d s)}{(1 + T_{p1} s)(1 + T_{p2} s)}$$
$$= \frac{19.579e^{-2.9s}}{(1 + 135.25s)(1 + 7.0021s)} \tag{2}$$

依据以上的模糊 PID 控制和数学模型,建立系统的 Matlab 控制模型如图 9 所示。

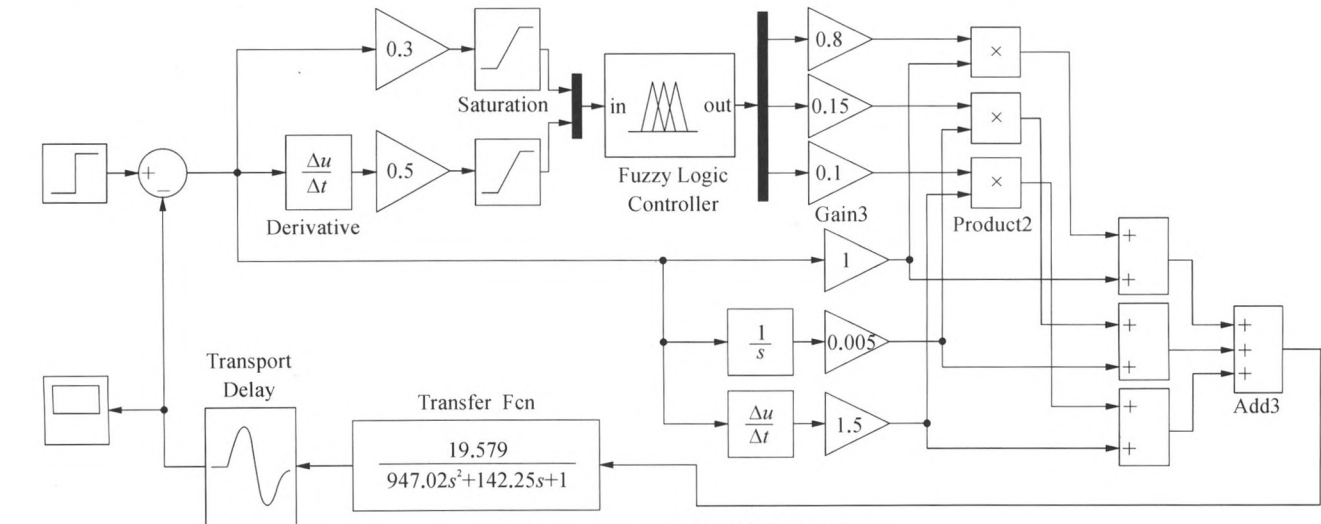


图 9 Fuzzy-PID 控制系统仿真结构图
Fig. 9 Simulation structure diagram of Fuzzy-PID control system

针对该被控对象,分别采用模糊 PID 控制和只有 PID 控制时,系统的单位阶跃输入响应曲线如图 10 所示。可以发现,该低温热水辐射式采暖系统,基于模糊 PID 控制的控制效果,相比于传统的 PID 控制,在控制的稳定性和超调量、调节时间等动态特性方面都具有一定的优势。

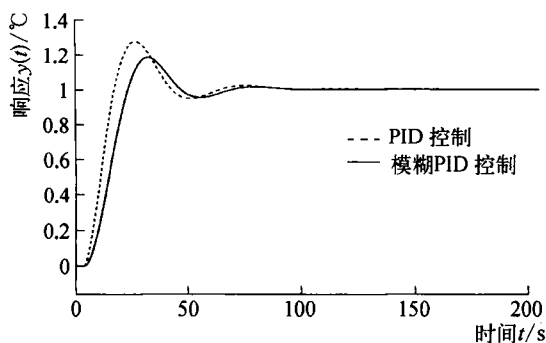


图 10 Fuzzy-PID 模拟仿真

Fig. 10 Fuzzy-PID simulation diagram

4 试验结果分析

为了验证设计的控制系统的可应用性和优越性,对该系统进行对比试验。对比试验时采用 2 块材料和构成完全相同 1# 和 2# 两块仔猪床,而且 2 块猪床处于同一环境条件下,区别是 1# 仔猪床采用模糊 PID 控制器,2# 仔猪温床采用传统 PID 控制器。进行温控试验开始时间为 8:00,通过本地监控中心设置猪床预设温度为 25℃,两块猪床初始温度均为 19℃,每隔 10 min 记录一次数据。系统运行稳定后,在 14:00 时进行扰动试验,开启实验室门窗 20 min 后再关闭门窗^[13],选取试验部分数据如表 4 所示,数据的间隔是 100 min,全部试验数据的图形如图 11 所示。

表 4 部分试验数据
Tab. 4 Some centrifuge data

序号	时间/min	PID 控制/℃	Fuzzy-PID 控制/℃
1	0	19.0	19.0
2	100	23.7	25.2
3	200	24.8	25.3
4	300	25.0	25.0
5	400	23.0	23.9
6	500	25.0	25.2
7	600	24.8	25.0
8	700	25.1	24.9
9	800	25.0	25.0
10	900	25.1	25.1

从图 11 中可以看出,针对此被控对象,采用模糊 PID 控制器的 1# 温度相比传统 PID 控制器的 2# 猪床提前约 20 min 达到预设温度,模糊 PID 控制系统的

上升时间为 90 min,超调量为 1.2%,调节时间为 240 min,而传统 PID 控制系统的上升时间为 120 min,超调量为 4%,调节时间为 310 min。在系统加入扰动后,1# 猪床温度回升时间比 2# 猪床少了 15 min。从整个猪床温度调控效果来看,1# 猪床的温度更加平稳,温度调节更迅速,温差变化更小,性能指标实际温度与目标温度偏差 $e_{ss} \leq \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

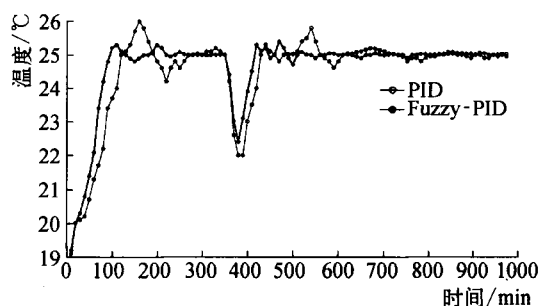


图 11 对比试验

Fig. 11 Contrast experiment

5 结论

通过分析仔猪养殖过程中对温度条件的要求,以北方寒冷地区仔猪舍为研究对象,建立了基于模糊 PID 理论的仔猪温床环境调控模型,旨在提出仔猪温床温度合理的调控方法,降低能源消耗、提高经济效益。根据研究结果得出如下结论。

1) 利用试验数据推导出仔猪床系统数学模型,根据系统大延时和非线性的特点,采用模糊 PID 的控制策略,通过 Simulink 进行系统控制的仿真模拟,可以较准确地控制仔猪温床温度。

2) 设计的系统经过模拟试验,对实测数据进行处理发现:实际温度与目标设定温度最大偏差为 0.5℃,超调量为 1.2%,仔猪床温度较稳定,外界环境变化对温度的影响较小,非常好地实现了系统的控制目标。

参 考 文 献

- [1] 中国产业研究院. 2020—2025 年生鲜猪肉市场发展现状调查及供需格局分析预测报告[R]. 北京: 中研普华, 2019.
- [2] 方谷明, 魏斌. 浅谈提高仔猪成活率的方法措施[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2012(9): 71—72.
- [3] 彭红芳. 不同季节不同类型猪舍环境参数监测及对仔猪生产性能影响的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2015.
Peng Hongfang. Monitoring of the environmental parameter of different seasons and different types pig house and the effect on the production performance of piglets [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2015.
- [4] 曾新福, 陈安国. 环境温度对母猪繁殖性能及仔猪生长的影响[J]. 家畜生态, 2001, 22(1): 40—43.

- [5] 周青, 罗松, 肖英平, 等. 数控保温床对保育猪生产性能和舍内环境指标的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2012, 48(19): 71-75.
- [6] 王美芝, 吴中红, 刘继军. 标准化规模化猪场中猪舍的环境控制[J]. 猪业科学, 2011, 28(3): 24-27.
- [7] 吴建寨, 杨八一. 仔猪智能保育箱的设计与研制[J]. 中国猪业, 2020, 15(1): 90-94.
- [8] 郭宗义, 柴捷, 谢佳娣, 等. 哺乳仔猪不同保温方式保温效果研究[J]. 猪业科学, 2017, 34(4): 94-95.
- [9] 袁奎, 张富贵, 熊小龙, 等. 沼气能源对仔猪舍的增温效果分析[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 213-216.
Yuan Kui, Zhang Fugui, Xiong Xiaolong, et al. Analysis on biogas energy for the effect of piglets homes warming [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(7): 213-216.
- [10] 苏飞. 仔猪死亡原因的分析及防制措施的探讨[J]. 养殖与饲料, 2007, 12(6): 8-16.
- [11] Anderson N, Strader R, Davidson C. Airborne reduced nitrogen: ammonia emissions from agriculture and other sources [J]. EnvironInt, 2003, 29(2-3): 277-286.
- [12] Barnett K L, Kornegay E T, Risley C R, et al. Characterization of creep feed consumption and its subsequent effects on immune response, scouring index and performance of weanling pigs [J]. Journal of Animal Ence, 1989, 67(10): 2698-2708.
- [13] Walker J T, Aneja V P, Dickey D A. Atmospheric transport and wet deposition of ammonium in North Carolina [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(20): 3407-3418.
- [14] 李陆钦. 猪舍加温地板研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
Li Luqin. Study on heating floors of swine houses [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.
- [15] 王美芝, 田见晖, 刘继军, 等. 北京市繁殖猪舍高温环境控制状况[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 222-227.
Wang Meizhi, Tian Jianhui, Liu Jijun, et al. Environment control status of high temperature in reproductive piggery in Beijing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(10): 222-227.
- [16] 郭宗义. 环境调控保育猪舍的设计与实践[J]. 畜禽业, 2014(5): 20-21.
- [17] 刘海枝, 王春野, 袁月明, 等. 相变材料在北方猪舍低温热水地板中的应用[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(1): 235-240.
Liu Haizhi, Wang Chunye, Yuan Yueming, et al. Applied of phase change materials in low temperature hot water floor of north swine building [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(1): 235-240.
- [18] 徐博. 基于 ZigBee 和 GPRS 技术的仔猪温床监控系统的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2016.
Xu Bo. Research of monitoring system on piglet bed temperature based on ZigBee and GPRS technology [D]. Changchun: Jinlin Agricultural University, 2016.
- [19] Åström K J, Hänggglund T, Hang C C, et al. Automatic tuning and adaptation for PID controllers: A survey [J]. Control Engineering Practice, 1993, 1(4): 699-714.
- [20] 张雨新, 孙达明. 基于 PID 模糊控制器的闭式泵控系统特性研究与分析[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(11): 150-154.
Zhang Yuxin, Sun Daming. Research and analysis on the characteristics of closed pump control system based on PID fuzzy controller [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(11): 150-154.
- [21] 陆万荣, 许江淳, 曾德斌, 等. 基于增量式 PID 算法的温室温湿度控制系统设计[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(4): 72-76.
Lu Wanrong, Xu Jiangchun, Zeng Debin, et al. Greenhouse temperature and humidity control system based on incremental PID algorithm [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(4): 72-76.
- [22] 李洪兴. Fuzzy 控制的本质与一类高精度 Fuzzy 控制器的设计[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(6): 868-872.
- [23] Santos M, Dexter A L. Control of a cryogenic process using a fuzzy PID scheduler [J]. Control Engineering Practice, 2002, 10(10): 1147-1152.
- [24] 赵阳, 曲兴华, 李睿. 基于模糊算法的自调整温度控制系统[J]. 天津大学学报, 2011, 44(1): 77-82.
Zhao Yang, Qu Xinghua, Li Rui. Self-adjusting control system of temperature based on Fuzzy algorithm [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(1): 77-82.
- [25] 狄全熙, 武新伟, 吕岩, 等. 模糊自适应 PID 控制器在液压伺服系统的应用[J]. 机械制造与自动化, 2007, 36(4): 107-108, 112.
- [26] 李永刚, 秦付军. 模糊自适应 PID 控制在谷物冷却机中的应用[J]. 中国农机化, 2012, 33(2): 162-163, 171.
Li Yonggang, Qin Fujun. Fuzzy adaptive PID control in the grain chiller application [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012, 33(2): 162-163, 171.
- [27] Abilov A G, Zeybek Z, Tuzunalp O, et al. Fuzzy temperature control of industrial refineries furnaces through combined feedforward/feedback multivariable cascade systems [J]. Chemical Engineering & Processing, 2002, 41(3): 87-98.
- [28] 刘大军, 胡舜迪, 史振志, 等. 基于模糊 PID 参数自整定的细胞培养箱温度控制算法[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(6): 45-48.
Liu Dajun, Hu Shundi, Shi Zhenzhi, et al. Research on temperature control cell incubator based on self-tuning fuzzy PID algorithm [J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(6): 45-48.
- [29] 马天兵, 刘健, 杜菲, 等. 基于改进模糊自适应方法的机械手控制[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2018, 38(5): 1-5.

(下转第 73 页)

DEM—PMBK coupling simulation analysis and test of swing screen screening process

Feng Nana¹, Wei Baoli¹, Jiang Delong², Xiao Shijie²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Zhengzhou Railway Vocational and Technical College, Zhengzhou, 451460, China; 2. College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou, 450002, China)

Abstract: Swing screen is widely used in agricultural production activities such as grain classification, cleaning and seed processing. There is a complex plane motion of screen surface in the screening process. In order to find out the screening mechanism, this paper takes swing sieve and soybean seed as the research object, establishes the screen boundary model by using the virtual real junction method, and proposes a coupling model of swing sieve based on discrete element method (DEM) and planar multi-body kinematics (PMBK). The numerical simulation results show that when the particle diameter reaches to at 6.91 mm, the particles can only pass through the triangular mesh model, and only when the particle diameter reaches 6.96 mm, the particles can pass through the circular mesh model. By comparing the distribution results of different particle size ranges (5.60~7.00 mm) under the screen in the simulation test and the actual test, the feasibility and accuracy of the screen boundary model and the DEM—PMBK coupling model based on the virtual solid junction method proposed in this paper are verified, which provides a reference for the optimal design and related research of swing screen.

Keywords: swing screen; discrete element method; planar multibody kinematics; boundary model

(上接第 53 页)

- Ma Tianbing, Liu Jian, Du Fei, et al. On manipulator control based on improved fuzzy adaptive method [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 38(5): 1—5.
- [30] 丁求启, 陶敏. 模糊+PID 控制在伺服压力机位置控制系统中的应用[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(5): 1320—1324.
- Ding Qiuqi, Tao Min. The application of fuzzy and PID control in servo press position control system [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(5): 1320—1324.
- [31] 解俊娣. 基于 DFCL 的光伏发电 MPPT 控制策略的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2012.
- Xie Jundi. The research of MPPT control strategy of PV power generation based on DFCL [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2012.
- [32] 杜京义, 田伟, 寇水潮. 基于参数自整定模糊 PID 的挤压式供水系统[J]. 计算机仿真, 2014, 31(12): 355—358, 363.
- Du Jingyi, Tian Wei, Kou Shuichao. Based on the parameter self-tuning fuzzy PID extrusion type water supply system [J]. Computer Simulation, 2014, 31(12): 355—358, 363.
- [33] 曾德斌, 许江淳, 张矿伟, 等. 模糊自适应整定 PID 控制在纸浆浓度中的应用[J]. 自动化仪表, 2019, 40(11): 63—66, 70.
- Zeng Debin, Xu Jiangchun, Zhang Kuangwei, et al. Application of fuzzy adaptive tuning PID control for pulp concentration [J]. Process Automation Instrumentation, 2019, 40(11): 63—70.

Research on temperature control system of piglet bed based on adaptive fuzzy PID algorithm

Li Xiwu¹, Xu Bo^{2,3}, Yuan Yueming³

(1. Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming, 525000, China; 2. Shenyang Agricultural University, Shenyang, 110866, China; 3. Jilin Agricultural University, Changchun, 130018, China)

Abstract: In order to solve the problem of low temperature of piglet bed in northern winter, the method of low-temperature hot water radiant heating was adopted to control the piglet bed temperature by controlling the flow rate of circulating water inside. For the characteristics of high hysteresis and slow response, a controller based on adaptive fuzzy PID algorithm was designed to modify k_p , k_i and k_d parameters of PID control rules in real time to improve the performance of the control system. Through modeling and simulation in MATLAB and comparative experimental research, it showed that this method has better steady-state accuracy and adaptive capacity than the traditional PID algorithm. The maximum deviation between the actual temperature and the target set temperature is 0.5 °C, and the overshooting quantity is 1.2%, which can meet the requirements of the system performance index.

Keywords: self-adaptive; fuzzy PID; piglet bed; temperature control