

基于模糊推理的多因素兔舍环境调控方法研究

冀荣华¹ 李 豹¹ 陈振海¹ 吴中红²

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学动物科学技术学院, 北京 100193)

摘要: 针对非线性、大滞后的兔舍环境控制需求,融合多种兔舍环境参数,建立了基于模糊推理的兔舍环境调控方法。该方法以兔舍环境参数(空气温度、相对湿度、CO₂浓度、NH₃浓度)误差、兔生长阶段和季节作为推理机输入,利用高斯型隶属函数进行环境参数模糊化;分春秋、夏季和冬季3种情况设置12种模糊控制规则,控制湿帘-风机控制系统和热回收系统执行机构动作,实现对兔舍环境的精准调控。为验证所建立的兔舍环境调控模型的有效性,于2018年5—9月、2018年12月—2019年3月在山东某兔舍进行了试验验证。试验结果表明,利用基于模糊推理的兔舍环境调控方法,可以将兔舍环境参数控制在适宜兔生长发育的范围内,保证了兔的生长发育。

关键词: 兔舍; 环境; 调控; 模糊推理

中图分类号: TP273+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)S0-0361-05

Regulation Model of Rabbit House Environment Based on Fuzzy Reasoning

Ji Ronghua¹ Li Bao¹ CHEN Zhenhai¹ WU Zhonghong²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: According to the requirement of environment control of rabbit house with non-linear and large lag, a regulation model of rabbit house environment was presented based on fuzzy reasoning, which integrated various environmental parameters of rabbit house. The error of environmental parameters, which included the temperature, humidity, carbon dioxide concentration and ammonia concentration, rabbit growth stage and season were taken as input of inference engine, and the Gauss type membership function was used to fuzzify the environmental parameters; totally 12 kinds of fuzzy control rules were set according to spring, autumn, summer and winter separately. The wet curtain-fan control system and heat recovery system would be controlled by the fuzzy control rules to achieve the precise control of rabbit house environment. In order to verify the validity of the environmental regulation model of rabbit house, experiments were conducted in a rabbit house in Shandong Province from May to September 2018, and December 2018 to March 2019. The experimental results showed that the environment parameters of rabbit house can be controlled within the suitable range of rabbit growth and development by using the regulation model of rabbit house environment based on fuzzy reasoning, so as to ensure the growth and development of rabbits.

Key words: rabbit house; environment; regulation; fuzzy reasoning

0 引言

兔舍环境调控是实现兔养殖集约化的重要基础^[1-4]。现有的兔舍环境调控方法,主要从环境监测、环境调节装置和环境自动控制等方面开展研究。

环境监测,主要利用无线传感器对畜舍环境,包括温湿度、气体浓度等环境参数进行监测^[5-8],并与物联网相结合,实现畜舍环境自动监测^[9-14]。环境调节装置则是针对不同地区、不同畜舍,在不同季节研究相宜的环境调节装置,以保证环境适宜畜禽的生长

收稿日期: 2019-04-26 修回日期: 2019-05-29
基金项目: 现代农业产业技术体系建设项目(CARS-43-D-1)
作者简介: 冀荣华(1973—),女,副教授,博士,主要从事农业信息化研究,E-mail: jessic1212@cau.edu.cn
通信作者: 吴中红(1972—),女,教授,博士,主要从事畜舍环境控制研究,E-mail: wuzhh@cau.edu.cn

发育,同时实现节能减排^[15-18]。环境自动控制是在减轻人工工作强度的同时,提高畜舍环境调控精准度^[19-22],目前研究主要集中在单环境参数调控。集约化养殖的畜舍环境为各种参数耦合、非线性、大滞后的时变系统,仅采用单环境变量的控制策略无法实现畜舍环境的精准调控。

本文融合多种兔舍环境参数,建立基于模糊推理的兔舍环境调控模型。以兔舍环境参数作为推理机输入,根据设定调控规则给出环境调控信号,对兔舍环境进行控制,以实现兔舍环境精准调节。

1 环境调控模型构建

兔舍环境主要参数为空气温度、相对湿度、CO₂浓度和 NH₃浓度。依据兔养殖经验,兔舍环境适宜环境参数如表 1 所示。由表 1 可知,兔适宜生长环境参数均为一个范围,即兔舍环境控制属于模糊控制。

表 1 兔生长发育适宜环境参数

Tab.1 Appropriate environmental parameters for rabbit growth and development

参数	成兔	仔兔	育肥兔
温度/℃	12~15	15~22	12~15
相对湿度/%	65~75	65~75	65~75
CO ₂ 浓度/(μmol·mol ⁻¹)	<2×10 ⁻³	<2×10 ⁻³	<2×10 ⁻³
NH ₃ 浓度/(μmol·mol ⁻¹)	<2.28×10 ⁻⁵	<2.28×10 ⁻⁵	<2.28×10 ⁻⁵

模糊推理是利用模糊逻辑建立给定的输入到输出的映射,从而解决已知的条件到未知结论的推理过程。基于模糊推理的兔舍环境智能调控模糊推理过程如图 1 所示。

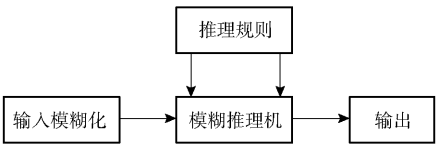


图 1 模糊推理流程
Fig.1 Fuzzy inference process

1.1 输入模糊化

前期研究表明,兔舍在不同季节环境参数调控的重点不同,其中春、夏、秋 3 季主要以空气温度和相对湿度调控为主,而冬季则需兼顾有害气体浓度的调控^[23-26]。为此设置兔舍环境模糊控制模型输入为温度误差、湿度误差、CO₂浓度误差、NH₃浓度误差、兔生长阶段和季节,输出为规则序号。其中误差是指当前实际环境参数值与兔舍内兔子适宜生长的标准环境参数间差的绝对值,见表 2。

输入模糊化是利用模糊隶属函数变换兔舍环境参数,使其作为推理机的输入(表3)。模糊隶属函

表 2 推理机输入参数

Tab.2 Input parameters of inference engine

参数	误差	模糊级别
温度	$E_1 = S_1 - A_1 $	7
相对湿度	$E_2 = S_2 - A_2 $	5
CO ₂ 浓度	$E_3 = S_3 - A_3 $	5
NH ₃ 浓度	$E_4 = S_4 - A_4 $	5
生长阶段		3
季节		3

注:S_i为参数标准值,取适宜范围的中位值;A_i为参数实际测量值;E_i为参数误差。

数是模糊集合的特征函数,采用高斯型隶属函数进行环境参数模糊化,计算式为

$$f(x) = e^{-\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2}$$
 (1)

式中 m ——隶属函数中心值
 σ ——隶属函数宽度

表 3 输入模糊化

Tab.3 Input fuzzification

参数	中心值 m	模糊语言	含义	宽度 σ
温度	-6	NB	负大	1.2
	-4	NM	负中	
	-2	NS	负小	
	0	ZO	零	
	2	PS	正小	
	4	PM	正中	
湿度	6	PB	正大	1.2
	-4	NB	负大	
	-2	NS	负小	
	0	ZO	零	
	2	PS	正小	
	4	PB	正大	
CO ₂ 浓度	-4	NB	负大	1.2
	-2	NS	负小	
	0	ZO	零	
	2	PS	正小	
	4	PB	正大	
NH ₃ 浓度	-4	NB	负大	1.2
	-2	NS	负小	
	0	ZO	零	
	2	PS	正小	
	4	PB	正大	
生长阶段	0	C	仔兔	1
	2	A	成兔	
	4	P	育肥兔	
季节	-2	W	冬	1
	0	A	春秋	
	2	S	夏	

1.2 推理规则

模糊推理规则是实现模糊控制的关键,由模糊控制规则组合而成。由于兔舍环境控制设备在不同

季节采用不同调控设备,其中春、夏、秋 3 季利用湿帘-风机系统进行环境调控,而冬季则主要利用热回收系统进行环境调控,为此不同季节采用不同的推理规则。

夏季兔舍利用湿帘-风机控制系统。该系统有 1 台风机和 1 台水泵,通过控制风机和水泵的开启情况,使得环境控制分为 5 种控制策略,如表 4 所示。初始情况下,风机和水泵全关。

表 4 夏季模糊推理规则
Tab.4 Summer fuzzy inference rules

规则 序号	规则条件	执行策略			
		风机 1	风机 2	风机 3	水泵
1	湿度小于下限且 温度大于上限	开	开	开	开
2	湿度大于下限且 温度大于上限	开	开	开	关
3	温度小于下限	开	关	关	关
4	湿度大于下限且 温度在上下限之间	开	开	关	关
5	湿度小于下限且 温度在上下限之间	关	开	关	开

春秋季综合考虑气体浓度和温度的环境因素,利用湿帘-风机控制系统中风机部分环境调控。环境控制分 3 种控制策略,如表 5 所示。初始情况下,风机 1 开启,其余风机和水泵关闭。

表 5 春秋季模糊推理规则
Tab.5 Spring and autumn fuzzy inference rules

规则 序号	规则条件	执行策略	
		风机 1	风机 2
6	温度大于下限且气体浓度大于上限	开	开
7	温度大于下限且气体浓度小于上限	开	关
8	温度小于下限	关	关

冬季兔舍主要采用热回收系统进行环境调控。热回收系统主要通过控制进风风机和排风风机的开启情况,共 4 种推理规则,如表 6 所示。

表 6 冬季模糊推理规则
Tab.6 Winter fuzzy inference rules

规则 序号	规则条件	执行策略	
		进风风机	排风风机
9	室内外温差大于上限且气体浓度大于上限	开	开
10	室内外温差低于下限且气体浓度大于上限	关	开
11	室内外温差在上下限间或气体浓度在上下限间	不变	不变
12	气体浓度低于下限	关	关

其中气体浓度分别采集舍内 CO₂浓度和 NH₃浓

度,并将其进行归一化处理后取均值,以该均值作为判断依据。

1.3 推理过程

依据兔舍环境参数和兔生长发育所需环境条件,以及环境控制规则库,推理并决策适合兔生长的兔舍环境条件。采用正向推理的机制,首先将与推理有关的信息进行模糊化处理;然后将依据输入搜索并匹配合适的规则。当该规则的所有前提全部匹配成功时,系统判定该规则成立。正向推理的过程为一个回溯、循环的过程,推理过程如图 2 所示。

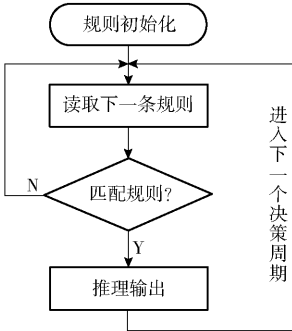


图 2 推理过程
Fig.2 Reasoning process

2 模型验证试验

为验证所建立的兔舍环境调控模型的有效性,在 2018 年 5—9 月,2018 年 12 月—2019 年 3 月在山东某兔舍进行试验验证。

2.1 试验布置

试验兔舍的宽度为 12.7 m,长度为 46.5 m,檐高为 2.5 m,陶瓦屋顶,南北两侧各有 6 扇 2.4 m × 1.2 m 的平推窗,舍内塑料薄膜吊顶,距地面高度为 2.5 m,如图 3 所示。兔舍内 6 列兔笼。兔笼为 2 层阶梯式兔笼,下层为母兔笼,上层为育肥兔笼,共有 2 400 只兔。每两列兔笼共用 1 条粪坑,采用刮粪板机械清粪。

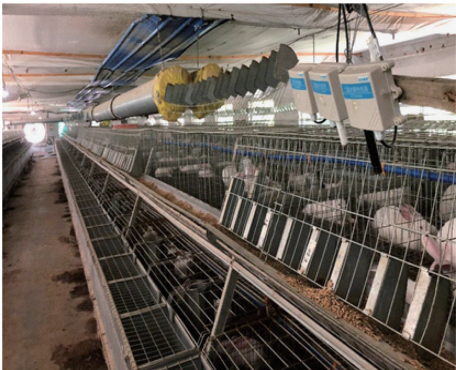


图 3 试验兔舍
Fig.3 Rabbit house

兔舍内有湿帘-风机系统和热回收系统,利用定

制的兔舍环境控制器,如图 4 所示,对兔舍环境进行综合调控。

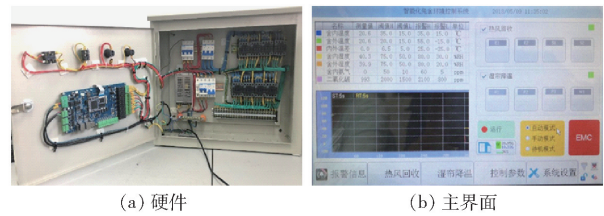


图 4 兔舍环境控制器

Fig. 4 Rabbit house environment controller

在兔舍内布置兔舍环境控制器、环境参数传感器,具体布置如图 5 所示,图中 × 表示环境参数测量点。

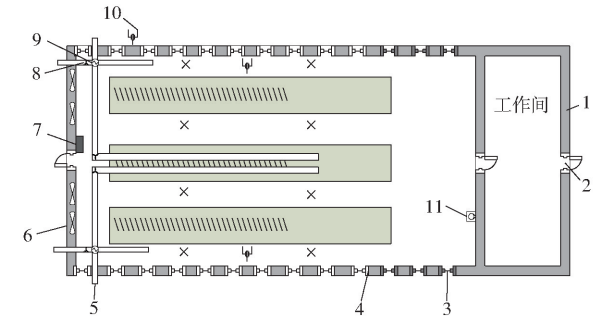


图 5 试验布置

Fig. 5 Test arrangement

1. 墙壁 2. 门 3. 湿帘 4. 窗户 5. 热回收系统管道 6. 轴流风机 7. 兔舍环境调控器 8. 热回收系统风机 9. 热交换器
10. 传感器安放箱 11. 水泵

2.2 试验方法

首先进行传感器校准,利用软件校准和标准传感器校准两种方式,以保证传感器可以准确采集数据。其次进行设备检查,主要是兔舍环境控制器、湿帘-风机系统和热回收系统的设备能够正确运行。设置传感器采集频率为 0.5 h/次,试验期内 24 h 连续采集,共采集 100 d。

鉴于环境参数上下限阈值设置对兔舍环境调控有很大影响,试验设置多组阈值进行对比。以夏季为例,设置了 4 组阈值,如表 7 所示。

2.3 试验分析

整个试验覆盖了春秋季、夏季和冬季,对 3 种季节下基于模糊推理的兔舍环境调控模型的有效性进行验证,如表 8 所示。

由表 8 可知,利用基于模糊推理的兔舍环境调

表 7 夏季阈值设置

Tab. 7 Summer threshold setting

序号	温度/℃		相对湿度/%	
	上限	下限	上限	下限
1	30	26	80	70
2	30	26	80	60
3	33	30	80	70
4	33	30	80	60

表 8 三季节兔舍环境参数调控结果

Tab. 8 Average value of environmental parameters of three-season rabbit house

参数	春秋季	夏季	冬季
温度/℃	10 ~ 18	17 ~ 25	8 ~ 14
相对湿度/%	60 ~ 80	43 ~ 72	65 ~ 85
CO ₂ 浓度/(μmol·mol ⁻¹)	4.50 × 10 ⁻⁴ ~ 1.50 × 10 ⁻³	4.80 × 10 ⁻⁴ ~ 1.40 × 10 ⁻³	8.32 × 10 ⁻⁴ ~ 1.85 × 10 ⁻³
NH ₃ 浓度/(μmol·mol ⁻¹)	8.0 × 10 ⁻⁶ ~ 2.2 × 10 ⁻⁵	8.0 × 10 ⁻⁶ ~ 2.0 × 10 ⁻⁵	1.1 × 10 ⁻⁵ ~ 2.5 × 10 ⁻⁵

控模型可以将兔舍环境参数控制在适宜兔生长发育范围内,保证了兔的生长发育。

为评价阈值对控制效果的影响,以夏季为例,利用兔舍温湿指数(Temperature humidity index, THI)加以评价,计算方法为

$$T_{mi} = T - (0.31 - 0.31H)(T - 14.4) \tag{2}$$

式中 T——温度,℃

H——相对湿度, %

夏季不同阈值下舍内环境控制效果,在 1 号阈值范围内, T_{mi} 均值为 26.2,此时兔无热应激反应。其余几组均大于 28,兔会有热应激反应。因此对于夏季,采用 1 号阈值范围进行环境调控为宜。

3 结束语

针对不同季节,综合兔舍内温度、湿度、CO₂ 浓度和 NH₃ 浓度,制定了模糊推理规则,可将兔舍内温度、相对湿度和空气质量自动调节至适宜范围内,精准地调控兔舍的饲养环境,满足了兔生长发育的需求。春、夏和冬 3 季在兔舍进行了控制算法的实际验证试验,结果表明,兔舍环境参数阈值选取非常重要,采用该调控方法可以保证兔舍环境达到预先设置的环境范围。

参 考 文 献

[1] 陈计远,郑猛虎,王红英,等. 国外肉兔养殖设施与设备研究进展[J]. 中国养兔, 2018(2): 19-20.
CHEN Jiyuan, ZHENG Menghu, WANG Hongying, et al. Research progress on foreign rabbit breeding facilities and equipment [J]. Chinese Journal of Rabbit Farming, 2018(2): 19-20. (in Chinese)
[2] 郑桂萍,孙海涛. 浅谈兔自动化设备及其发展前景[J]. 中国养兔,2016(5): 25.
ZHENG Guiping, SUN Haitao. Discussion on rabbit automation equipment and its development prospects[J]. Chinese Journal of Rabbit Farming, 2016(5): 25. (in Chinese)

- [3] ILEA R. Intensive livestock farming: global trends, increased environmental concerns, and ethical solutions[J]. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 2009, 22(2): 153–167.
- [4] 高云,陈震撼,王瑜,等. 多环境参数控制的猪养殖箱设计及箱内气流场分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2): 203–212.
GAO Yun, CHEN Zhenhan, WANG Yu, et al. Design of pig breeding box controlled by multiple environmental parameters and analysis of airflow field in box[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(2): 203–212. (in Chinese)
- [5] 李瑞. 冬季密闭猪舍的环境自动控制[D]. 北京: 中国农业大学, 2015: 1–23.
LI Rui. Environmental automatic control of closed pig houses in winter[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015: 1–23. (in Chinese)
- [6] LIN T, SHAH S B, WANG L L, et al. Development of MOS sensor-based NH_3 monitor for use in poultry houses[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 127: 708–715.
- [7] 马吉庆,崔勇,张路,等. 畜禽养殖环境自动监控系统设计[J]. *装备制造技术*, 2016(1): 71–73.
MA Jiqing, CUI Yong, ZHANG Lu, et al. Design of automatic monitoring system for livestock and poultry breeding environment[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2016(1): 71–73. (in Chinese)
- [8] KUMAR A, HANCKE G P. A Zigbee-based animal health monitoring system[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(1): 610–617.
- [9] BERCKMANS D. Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems[J]. *Revue Scientifique et Technique*, 2014, 33(1): 189–196.
- [10] GUO B, YANG J, WANG Z. Research on the rabbit house temperature regulation system based on the Internet of things and fuzzy PID[J]. *International Journal of Smart Home*, 2016, 10(7): 81–90.
- [11] LASHARI M H, MEMON A A, SHAH S A, et al. IoT based poultry environment monitoring system[C]//*The Internet of Things*, 2018: 1–5.
- [12] LI H, WANG H, YIN W, et al. Development of a remote monitoring system for henhouse environment based on IoT technology[J]. *Future Internet*, 2015, 7(3): 329–341.
- [13] SÉBASTIEN F, ALAIN N R. Research opportunities in environment control of confined animal housing systems through precision livestock farming [C]//*CSBE/SCGAB 2016 Annual Conference*, 2016.
- [14] MAHAL E, RUPALI B, SONAVANE S S. Smart poultry farm monitoring using IoT and wireless sensor networks [J]. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 2016, 7(3): 187–190.
- [15] 李琴,刘鹏,刘中英,等. 民用一体式热回收通风设备在空调降温兔舍内的环境调控和节能效果研究[J]. *家畜生态学报*, 2017, 38(9): 44–50.
LI Qin, LIU Peng, LIU Zhongying, et al. Study on environmental regulation and energy saving effect of civil integrated heat recovery ventilation equipment in air conditioning cooling rabbit house[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2017, 38(9): 44–50. (in Chinese)
- [16] 龚建军,雷云峰,何志平,等. 高温季节“湿帘-风机”系统降温效果研究[J]. *家畜生态学报*, 2016, 37(1): 47–52.
GONG Jianjun, LEI Yunfeng, HE Zhiping, et al. Study on cooling effect of “wet curtain-fan” system in high temperature season [J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2016, 37(1): 47–52. (in Chinese)
- [17] 唐于寒,齐鑫,刘中英,等. 有缓冲间湿帘-风机系统对兔舍环境调控效果研究[J]. *家畜生态学报*, 2016, 37(7): 49–55.
TANG Yuhan, QI Xin, LIU Zhongying, et al. Study on the effect of buffer-wet curtain-fan system on rabbit house environment [J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2016, 37(7): 49–55. (in Chinese)
- [18] 李琴,刘鹏,刘中英,等. 畜舍热交换芯体-风机热回收通风系统的热回收效果[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 176–182.
LI Qin, LIU Peng, LIU Zhongying, et al. Heat recovery effect of heat exchange core-fan heat recovery ventilation system in livestock house[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(8): 176–182. (in Chinese)
- [19] 于明珠,武佩,韩丁,等. 基于 PLC 的仔猪舍温度自动控制系统的设计与试验研究[J]. *农机化研究*, 2012, 34(11): 102–105.
YU Mingzhu, WU Pei, HAN Ding, et al. Design and experimental study of automatic temperature control system for piglet house based on PLC[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012, 34(11): 102–105. (in Chinese)
- [20] BANHAZI T, LEHR H, BLACK J L, et al. Precision livestock farming: an international review of scientific and commercial aspects[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2012, 5(3): 1–9.
- [21] KANJILAL D, SINGH D, REDDY R, et al. Smart farm: extending automation to the farm level[J]. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2014, 3(7): 109–113.
- [22] JINDARAT S, WUTTIDITTACHOTI P. Smart farm monitoring using Raspberry Pi and Arduino [C]//*International Conference on Computer Communications*, 2015: 284–288.
- [23] 刘鹏. 兔舍中热回收通风系统的开发和应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017: 1–110.
LIU Peng. Development and application of heat recovery ventilation system in rabbit house [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017: 1–110. (in Chinese)
- [24] 刘鹏,王美芝,刘中英,等. 湿帘降温在湿热地区兔舍中使用效果的研究及影响因素的分析[J]. *中国畜牧杂志*, 2015, 51(21): 76–81.
LIU Peng, WANG Meizhi, LIU Zhongying, et al. Study on the effect of wet curtain cooling in rabbit house in hot and humid areas and analysis of influencing factors [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2015, 51(21): 76–81. (in Chinese)
- [25] 刘鹏,吴中红. 兔舍湿帘降温和负压纵向通风设计使用要点及常见误区[J]. *中国养兔*, 2012(8): 17–20.
LIU Peng, WU Zhonghong. Design points and common misunderstandings of rabbit house wet curtain cooling and negative pressure longitudinal ventilation [J]. *Chinese Journal of Rabbit Farming*, 2012(8): 17–20. (in Chinese)
- [26] LIU P. A modified heat recovery ventilation system for rabbit houses in cold climates in northeast China[J]. *Transactions of the ASABE*, 2016, 59(6): 1823–1830.