

基于深度强化学习的猪舍环境控制策略优化与能耗分析

谢秋菊¹ 王圣超¹ MUSABIMANA J¹ 郭玉环¹ 刘洪贵^{2,3} 包 军^{2,4}

(1. 东北农业大学电气与信息学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学动物科学技术学院, 哈尔滨 150030; 3. 农业农村部生猪养殖设施重点实验室, 哈尔滨 150030; 4. 教育部北方寒区智能化繁育与养殖工程研究中心, 哈尔滨 150030)

摘要: 在规模化的生猪养殖生产中,环境质量对于猪群的健康及生长发育至关重要。为实现猪舍环境精准调控,以STM32单片机为核心,构建了基于物联网的猪舍环境智能控制系统;同时提出了基于双深度Q网络(Double deep Q-Network, Double DQN)的猪舍环境优化控制策略。通过在实际猪舍中运行结果表明,舍内平均温度和相对湿度可控制在 $(20.53 \pm 1.72)^\circ\text{C}$ 和 $(74.16 \pm 7.84)\%$ 。与传统基于温度阈值的控制策略相比,基于Double DQN控制策略的舍内温度、相对湿度、 NH_3 浓度和 CO_2 浓度更接近期望值(期望温度为 19°C ,相对湿度为75%, NH_3 浓度为 $10\text{ }\mu\text{L/L}$, CO_2 浓度为 $800\text{ }\mu\text{L/L}$),舍内温度和相对湿度最大相对误差分别低于温度阈值控制策略3.7%和2.5%。此外,该系统传感器监测数据上传和控制指令下发的平均延迟时间分别为226 ms和140.4 ms,监测与控制延迟较小,稳定性较强。在Double DQN控制策略下,一天内3台风机总运行时长为28.01 h,总耗电量为 $11.4\text{ kW}\cdot\text{h}$,相较于传统温度阈值法可节约7.39%。因此,本文构建的融合深度强化学习策略的控制系统有助于改善猪舍环境质量,提高养殖环境的自动化及智能化控制水平。

关键词: 猪舍环境; 物联网控制系统; 节能; 优化控制策略; 深度强化学习

中图分类号: S828; TP273 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)11-0376-09 OSID: 

Pig Building Environment Optimization Control and Energy Consumption Analysis Based on Deep Reinforcement Learning

XIE Qiuju¹ WANG Shengchao¹ MUSABIMANA J¹ GUO Yuhuan¹ LIU Honggui^{2,3} BAO Jun^{2,4}

(1. College of Electrical and Information, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. College of Animal Science and Technology, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. Key Laboratory of Pig Breeding Facilities Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Harbin 150030, China

4. Engineering Research Center of Pig Intelligent Breeding and Farming in Northeast Cold Region, Ministry of Education, Harbin 150030, China)

Abstract: In large-scale pig farms, environmental quality is critical for the health and growth of pigs. To achieve optimal and real-time regulation of the pig building environment, an IoT-based pig building environment control system was developed by using an STM32 microcontroller as the core controller. The system included a PC terminal and an APP remote monitoring platform as well as a touch screen on-site monitoring platform, that can realize real-time control of pig building environment. Meanwhile, an optimal control strategy for pig building environment based on double deep Q-Network (Double DQN) was proposed. It was shown that the average temperature and relative humidity could be controlled at $(20.53 \pm 1.72)^\circ\text{C}$ and $(74.16 \pm 7.84)\%$. Compared with the control strategy on a single parameter of temperature, the temperature, relative humidity, NH_3 concentration, and CO_2 concentration in the pig building under the control of Double DQN were closer to the expected value (temperature was 19°C , relative humidity was 75%, NH_3 concentration was $10\text{ }\mu\text{L/L}$, and CO_2 concentration was $800\text{ }\mu\text{L/L}$). The maximum relative error of indoor temperature and relative humidity under the Double DQN control

收稿日期: 2023-05-12 修回日期: 2023-06-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32072787、32372934)、东北农业大学东农学者计划项目(19YJXG02)和黑龙江省博士后项目(LBH-Q21070)

作者简介: 谢秋菊(1976—),女,教授,博士生导师,主要从事猪舍环境控制及智慧养殖关键技术研究,E-mail: xqj197610@163.com

通信作者: 包军(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事健康养殖与动物福利研究,E-mail: jbao@neau.edu.cn

strategy were 3.7% and 2.5% lower than that under the temperature threshold control strategy, respectively. Furthermore, the average delay of sensor data upload and control instruction delivery were 226 ms and 140.4 ms, respectively, which achieved the control ability of small monitoring and control delay and high stability. Under the Double DQN control strategy, the total operation time of three fans in one day was 28.01 h, and the total power consumption was 11.4 kW·h, which could save about 7.39% of the power consumption compared with that of the traditional temperature threshold method. Therefore, the proposed IoT-based control system integrated with deep reinforcement learning strategy was helpful to improve the environmental quality of pig building and improve the level of automation and intelligent control of breeding environment.

Key words: pig building environment; Internet of Things control system; energy saving; optimal control strategy; deep reinforcement learning

0 引言

我国的生猪养殖产业历史悠久,养殖规模已超万亿元。近年来,随着产业结构化调整,养猪行业规模化^[1]、集约化、标准化进程不断加速^[2-3],许多养殖企业选择高度集约化饲养模式来提高生产效率,获取最大的商业利益,由此带来的一系列生产问题,尤其是舍内环境质量及其控制已成为养猪行业日益关注的焦点^[4-5]。适宜的猪舍环境有助于促进猪群的健康生长、改善其生产性能和福利水平,进而增加养殖企业的生产效益^[6]。

通常猪舍环境包括空气温度、相对湿度、氨气(NH₃)与二氧化碳(CO₂)等气体浓度、粉尘等环境因子^[7-11],这些环境因子对猪的健康生产与繁殖极其重要。空气温度是对猪群增重影响最大的环境因子,猪通过热平衡维持体温恒定,从而进行日常的生命活动,过高的温度会令猪产生热应激等不良反应,降低生长性能^[12];相对湿度则会影响猪群的体热调节,相对湿度过高时会诱发猪群消化道、呼吸道等疾病;猪舍内的NH₃浓度超标时,会导致猪产生不同程度的呼吸系统疾病,严重时甚至死亡^[13-14];CO₂浓度过高会令猪群出现慢性缺氧、食欲不振等不良反应,此外,CO₂大量排放会加剧温室效应^[15-16];粉尘会导致猪群呼吸道免疫系统屏障受损,造成支原体肺炎、流行性感冒等呼吸系统疾病。

近年来,随着物联网和智能控制技术的发展,猪舍环境控制技术正逐步成熟并且走向应用。目前,这些控制系统大多以 PLC、STC12^[17] 和 STM32 单片机^[18] 为主控单元,实现猪舍环境监测及调控^[19],但是大多数系统布线复杂且功能单一,仅具有基础的监测控制功能。为了实现更加精准的猪舍环境控制,有学者建立了融合模型控制技术的物联网系统,通过对猪舍内多种环境参数进行模糊化及逻辑推理,生成不同季节的环境调控规则及方法,从而优化猪舍环境调控系统^[20]。除此之外,文献[21-22]基

于能质平衡方程对猪舍内热湿环境动态变化进行预测,同时对通风系统进行了优化,为实现精准通风控制及降低能耗奠定了基础。与此同时,为了达到更好的舍内环境控制效果,有学者通过模拟退火粒子群算法、套索算法、反向传播神经网络、经验模态分解和长短时记忆神经网络^[23]等智能算法对猪舍的热湿及有害气体环境进行预测,以期达到改善猪舍环境的目的。然而,上述这些预测及控制方法对硬件系统的要求较高,受到实际应用场景的限制,难以达到多种环境因子联合调控的效果,很难满足规模化养殖的环境调控需求。

因此,本文基于物联网技术与深度强化学习构建猪舍智能环境控制系统,以期实现更加精准、低能耗的猪舍环境优化控制,从而改善猪舍环境质量,提升养猪企业环境管理智能化水平,降低舍内环境控制运行能耗,提高企业经济效益。

1 猪舍环境控制系统设计

1.1 总体设计

在规模化养猪场中,物联网控制系统对改善猪舍环境质量、提升猪群的生长发育水平至关重要。本文通过 WiFi 无线传输、RS-485 和 RS-232 串口通信技术研发了基于 STM32 单片机的猪舍环境控制系统,主要包括感知层、传输层以及应用层 3 层架构,总体结构如图 1 所示。系统通过接入环境传感器和摄像头来实现对猪舍环境数据以及猪群活动状

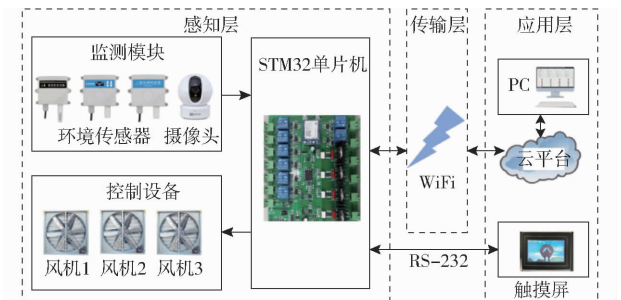


图 1 系统总体结构

Fig. 1 Overall structure of system

态的综合感知,通过 PC 端以及触摸屏监控平台发送控制指令来控制风机等设备,从而实现对猪舍环境的远程精准调控。

1.2 感知层

感知层主要由监测模块、STM32 单片机和控制设备组成。本文以 STM32F103VET6 单片机^[24]为核心,利用温湿度、NH₃和 CO₂浓度(体积比)传感器采集猪舍内外多种环境因子参数,通过 WiFi 无线传输技术与物联网云平台实现通信,完成数据上传,同时接收远程控制指令完成对设备的操控;猪舍现场安装有支持 360°旋转的 C6C 型萤石摄像头,用于监测

舍内猪群的活动状态。

系统选用低功耗的 RS-485 型威盟士品牌传感器,采用标准 Modbus 通信协议。通过传感器串口调试软件对传感器进行地址和波特率设置,3 种环境传感器具体参数如表 1 所示。由于猪舍空间较大,舍内不同区域气体浓度等环境参数存在一定差异,因此在猪舍水平方向上距地面 1.6 m 高的位置处布设了 3 个环境数据监测点,每个监测点由温湿度、NH₃浓度和 CO₂浓度 3 种传感器组成。在猪舍外避免阳光直射、防雨防风的位置处安装 1 个温湿度传感器,用于监测猪舍外温湿度环境状况。

表 1 环境传感器相关参数
Tab.1 Relevant parameters of environmental sensors

传感器检测指标	传感器型号	响应时间/s	量程	精度
温度	VMS-3002-WS-N01	≤25	-40~60℃	±0.5℃
相对湿度		≤8	0~100%	±3%
NH ₃ 浓度	VMS-3002-NH ₃ -N01-50P-2	≤90	0~100 μL/L	±5 μL/L
CO ₂ 浓度	VMS-3002-CO ₂ -N01	≤90	0~10 000 μL/L	±340 μL/L

1.3 传输层

传输层主要使用传输速率高、功耗低的 WiFi 无线传输方式,分别连接感知层和应用层。本系统采用集成了 ESP8266 芯片的 ESP-12F 模组来实现 STM32 单片机和云平台的通信,通过 WiFi 将 STM32 单片机采集的传感器数据准确上传到云平台,同时将应用层的控制指令及时下发到 STM32 单片机,实现双向通信。

1.4 应用层

应用层包括 PC 端远程监控平台和触摸屏现场监控平台。利用 Arduino 平台对 Esp-12f 烧录 MQTT 通讯固件,实现 STM32 单片机与云平台构建连接。本文基于 SpringBoot 和 Vue 前后端技术开发了 PC 端远程监控平台,PC 端通过云平台与 STM32 单片机进行通信,STM32 单片机上传的数据存储在 MySQL 数据库中。PC 端平台包括监控、日志、配置和下载 4 个功能模块。监控模块可以查看猪舍环境数据、对设备进行远程控制等;日志模块记录系统历史操作记录;配置模块可以对控件进行增添删减或者参数调节;下载模块具有历史数据查询与下载的功能。猪舍 PC 端远程监控界面如图 2 所示。

本文通过 Visual TFT 开发调试软件对触摸屏的界面及功能进行开发,利用 RS-232 总线技术实现触摸屏与 STM32 单片机的通信。传感器采集到的猪舍环境数据经过单片机传输至触摸屏,从而实现猪舍数据可视化。触摸屏主要包括欢迎界面、菜单界面、监测界面及控制界面,能实现查看舍内外环境

参数、控制设备运作等功能。若长时间无操作,触摸屏可自动返回欢迎界面并降低亮度,节约电能。触摸屏界面如图 3 所示。

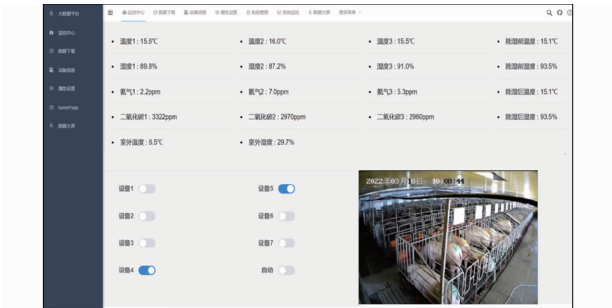


图 2 PC 端远程监控界面
Fig.2 PC remote monitoring interface



图 3 触摸屏界面
Fig.3 Touch screen interface

2 基于深度强化学习的猪舍环境控制策略

2.1 状态及动作设计

根据妊娠母猪实际生长需求以及试验初期的数

据情况,结合国家的规模猪场环境参数及环境管理标准^[25],分别设计了温度、相对湿度、NH₃ 浓度和 CO₂ 浓度 4 种环境因子的四维状态空间及其对应的状态区间,如表 2 所示,用 s_t 表示当前的环境状态。

表 2 猪舍环境状态

Tab. 2 Status of pig building environment

环境因子	数值
温度/℃	10 ~ 35
相对湿度/%	40 ~ 100
NH ₃ 浓度/(μL·L ⁻¹)	0 ~ 20
CO ₂ 浓度/(μL·L ⁻¹)	0 ~ 2 500

试验猪舍的环境调控设备为风机 1、风机 2、风机 3 共 3 台墙上风机,为了简化动作空间,降低 Q 值(动作状态价值函数)计算复杂度,通过实际测试,分别选取全关、开启 1 台风机、开启 2 台风机、全开这 4 种动作。测试分为 8 组,以 20 min 为每组测试的控制时长,将风机开启时刻的环境数值作为控制前初始值,记为 E_{before} ,20 min 后的环境参数值作为控制后终值,记为 E_{after} ,以此计算控制效率 η ,公式为

$$\eta = \frac{E_{after} - E_{before}}{E_{before}} \tag{1}$$

结合 3 台风机的组合优化控制效果,将其开/关组合方式作为动作,由此得到 4 种风机动作组合 a_t , $t = 1, 2, 3, 4$,如表 3 所示。

表 3 猪舍风机动作

Tab. 3 Fans action of pig building

动作	控制设备状态
a_1	风机 1 关、风机 2 关、风机 3 关
a_2	风机 1 关、风机 2 开、风机 3 关
a_3	风机 1 开、风机 2 开、风机 3 关
a_4	风机 1 开、风机 2 开、风机 3 开

为保证既能够选择到奖励较大的动作,又能加大对最优动作空间的探索,采用 ϵ -greedy 策略进行动作选择,随机选择动作概率为 ϵ ,而选择奖励最高的动作概率为 $1 - \epsilon$ 。通过这种方式,智能体可以在一定程度上随机探索未知的状态和动作,可避免陷入局部最优解的情况,从而获得更全面的控制效果,将参数 ϵ 设置为 0.1。

2.2 奖励函数构建

由于舍内温度、相对湿度、CO₂ 浓度和 NH₃ 浓度 4 种环境控制指标对猪群生长发育有极大影响,因此在构建奖励函数时引入这 4 个环境因子。假设 t 时刻温度为 T_t ,相对湿度为 H_t ,CO₂ 浓度为 C_t ,NH₃ 浓度为 N_t ,3 个风机的状态分别为 $f_1 f_2 f_3$,将奖励

函数定义为

$$r_t = \frac{\lambda_1}{\sqrt{\left(\frac{T_t - T_{target}}{T}\right)^2 + 1}} + \frac{\lambda_2}{\sqrt{\left(\frac{H_t - H_{target}}{H}\right)^2 + 1}} + \frac{\lambda_3}{\sqrt{\left(\frac{C_t - C_{target}}{C}\right)^2 + 1}} + \frac{\lambda_4}{\sqrt{\left(\frac{N_t - N_{target}}{N}\right)^2 + 1}} - \lambda_5 \sum_{i=1}^3 |f_i - f_{i,t-1}| - \lambda_6 \sum_{i=1}^3 f_{i,t} \tag{2}$$

式中 T_{target} 、 H_{target} 、 C_{target} 、 N_{target} ——猪舍内温度、相对湿度、CO₂ 浓度、NH₃ 浓度的目标值

T 、 H 、 C 、 N ——猪舍内温度、相对湿度、CO₂ 浓度、NH₃ 浓度的状态取值区间长度

λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 ——权重

λ_5 ——风机状态变化的惩罚系数,用于惩罚风机过于频繁的状态变化

λ_6 ——风机能耗惩罚系数,用于惩罚因风机开启数量多导致的能耗较大的情况

将猪舍环境控制的目标设置为将舍内温度和相对湿度控制在合理范围内,同时维持适宜的 NH₃ 浓度和 CO₂ 浓度。4 种环境参数期望值(目标值)设定如下:舍内温度为 19℃、相对湿度为 75%、NH₃ 浓度为 10 μL/L、CO₂ 浓度为 800 μL/L。其中,当 NH₃ 浓度和 CO₂ 浓度小于期望值时也将获得最大奖励。

2.3 优化目标确立

为实现对猪舍环境的精细调控,确定以下优化目标:提高猪舍环境控制模型的精度;减少风机启停频次,降低电能损耗。

在基于 Double DQN 的猪舍环境优化控制模型中,优化目标表示为

$$L(\theta) = E_{s_t, a_t, r_t, s_{t+1} \sim D}((y_t - Q_{\theta}(s_t, a_t))^2) \tag{3}$$

$$\text{其中 } y_t = r_t + \gamma Q_{\theta'}(s_{t+1}, \arg\max_{a'} Q_{\theta}(s_{t+1}, a')) \tag{4}$$

式中 γ ——折扣因子

θ' ——目标 Q 网络参数

a' ——在状态 s_{t+1} 中选取 Q 值最大的动作参数

θ —— Q 网络参数

r_t ——当前的奖励

$Q_{\theta}(s_t, a_t)$ ——状态 s_t 中采取动作 a_t 的 Q 值

y_t ——Double DQN 中的目标值

下角标 D 表示经验回放池。

确定优化目标可以最小化当前 Q 值和目标 Q 值之间的差距,使得当前策略能够更好地逼近最优

策略。通过使用自适应运动估计算法 (Adam) 等优化算法来最小化损失函数,更新参数 θ' 和 θ 以提高猪舍环境优化控制模型的性能。

2.4 双重 Q 网络架构建立

通过双重 Q 网络构建一个能够根据猪舍内温度、相对湿度、CO₂ 浓度和 NH₃ 浓度来控制 3 个风机启停动作的智能控制器,Double Q - Network 架构如图 4 所示。定义一个 Q 网络和一个目标 Q 网络,每次使用其中的 Q 网络进行动作评估和选择,使用目标 Q 网络来计算动作的 Q 值,以免过度估计。

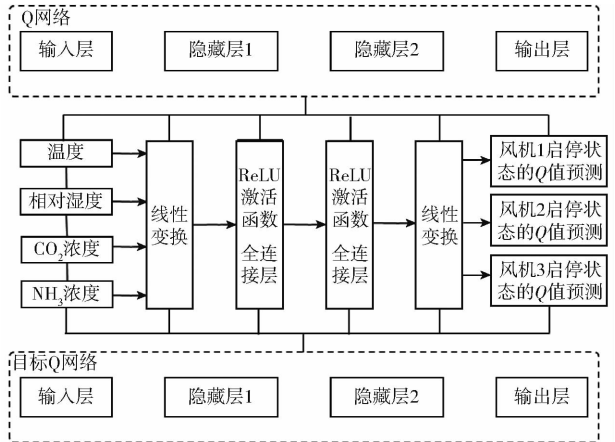


图 4 Double Q - Network 架构
Fig. 4 Structure of Double Q - Network

将 4 种环境参数作为环境状态信息输入到网络中,并将 3 个风机启停作为每个动作对应的输出 Q 值,输入层接收四维环境状态输入,输出层输出三维动作 Q 值。利用多层感知机构建中间层,设计 2 个隐藏层,每层包含 64 个神经元,使用 ReLU 函数作为激活函数。采用均方误差 (Mean square error, MSE) 作为损失函数,用于衡量预测输出与真实输出之间的误差。使用 Adam 优化器来最小化损失函数,将学习率设置为 0.001。通过随机数生成器从均值为 0、方差为 1 的正态分布中抽取初始化网络参数,然后利用 Double DQN 算法计算每个动作的 Q 值,并更新网络参数。在每次更新之前,从经验回放池中随机采样一些之前的观察和动作数据,以减小训练数据的相关性。

2.5 基于 Double DQN 的猪舍环境控制算法设计

Double DQN 算法整体框架如图 5 所示。猪舍环境给出初始状态, Q 网络输入状态和动作,输出对应的 Q 值估计,并通过 ϵ -greedy 贪婪策略选择风机动作,通过动作调控猪舍环境,猪舍环境再给出下一时刻的状态和奖励,而所有的状态、动作和奖励都被保存到经验回放缓存中,在与环境交互的同时, Q 网络和目标 Q 网络利用经验回放池中的数据进行网络训练,具体为 Q 网络接受当前状态 s 和动作 a 输

入,输出估计 Q 值,目标 Q 网络输入下一时刻的状态,并取输出的最大的 Q 值作为目标 Q 值,二者通过 Double DQN 的 Loss 函数梯度回传来训练 Q 网络,每隔一段时间将 Q 网络参数复制给目标 Q 网络 (防止 Q 值估计偏离目标)。不断与环境交互迭代训练,优化策略,从而提升控制模型的精度,更快的寻找到最优策略,实现猪舍环境的精准节能调控。

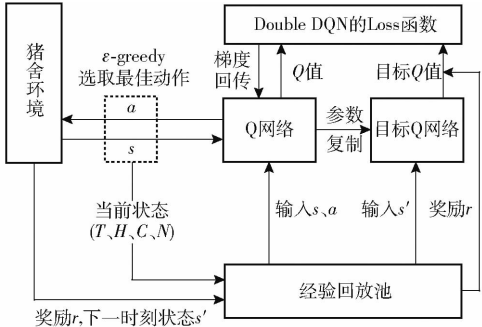


图 5 Double DQN 算法框架
Fig. 5 The Double DQN algorithm framework

2.6 优化控制算法训练

通过在相同试验数据环境下的训练以及对比评估,与基于 Deep Q - Network (DQN) 的猪舍环境控制模型相比,基于 Double DQN 的猪舍环境控制模型表现出更加稳定和高效的控制性能。两个控制模型的收敛时平均回报值、最大回报值、收敛时间步数以及稳定性指数 4 项指标的对比情况如表 4 所示。

表 4 指标对比情况
Tab. 4 Comparison of indicators

模型	收敛时平均 回报值	最大 回报值	收敛时间 步数	稳定性 指数
DQN	20.56	23.69	2 812	1.02
Double DQN	27.16	28.19	3 920	1.09

根据表 4 的对比结果可知, Double DQN 模型有 3 项指标表现更优,其收敛时平均回报值和最大回报值分别为 27.16 和 28.19, DQN 模型分别为 20.56 和 23.69, 其中, Double DQN 模型的收敛时平均回报值优于 DQN 模型 32.1%, 最大回报值优于 DQN 模型 19%, 这表明在相同环境中, Double DQN 模型能够更好地地执行动作并获得更高的回报; Double DQN 模型的收敛时间步数多于 DQN 模型, 这是因为 Double DQN 算法相较 DQN 更复杂, 训练难度稍高, 但是前者最终收敛时的平均回报值更高; 在模型稳定性方面, Double DQN 模型的稳定性略高于 DQN, 这表明 Double DQN 模型具有更强的鲁棒性和稳定性。

两个模型训练结果如图 6 所示。由图可以看出,训练初期 DQN 和 Double DQN 模型随着训练步数增加,平均回报值都在增加,但是 DQN 收敛速度更快,这是由于 DQN 模型相对简单,收敛难度比 Double DQN 模型低,但是其收敛后的平均回报值却低于 Double DQN 模型,这是因为 DQN 模型存在高估 Q 值的问题,导致相应的性能受到影响。而 Double DQN 通过双 Q 网络对此进行了改进,所以性能更好。两个模型达到收敛后都存在一定程度的振荡波动,这是由于当训练继续,各项环境参数变化引起的奖励波动,但是可以看出 Double DQN 的波动更平稳,其稳定性更高。

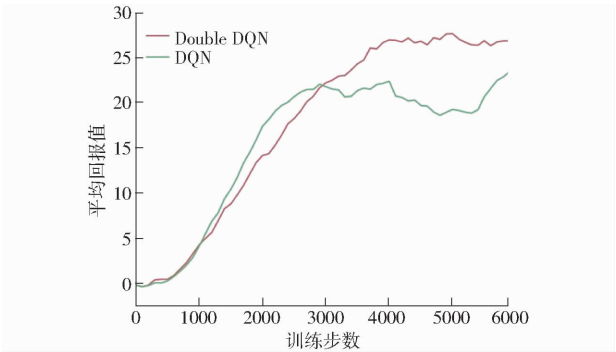


图 6 模型训练结果
Fig. 6 Results of model training

综合以上分析,基于 Double DQN 的猪舍环境优化控制模型性能效果更优,它能够在短时间内找到更高的回报,将猪舍内环境参数调控在适宜的范围,适用于猪舍环境智能精准调控。

3 试验验证与分析

3.1 试验猪舍

试验研究在黑龙江省尚志市亚布力镇惊哲养殖基地一栋妊娠母猪舍中开展,猪舍为坡屋顶结构,四周置有保温板,地面由水泥地板和漏粪地板组成,圈舍封闭良好。该猪舍尺寸(长×宽×高)为 19.5 m×10.5 m×2.4 m,舍内排布 5 列限位栏。猪舍采取纵向通风方式,一侧墙上装有 2 个尺寸为 0.8 m×0.8 m 和 1 个 1 m×1 m 的风机,分别为风机 1、风机 2、风机 3,额定功率分别为 0.37、0.37、0.55 kW,该猪舍平面结构如图 7 所示。试验期间,舍内饲养 37 头妊娠母猪,猪的平均体质量约为 165 kg。饲喂时间为每日 08:00—08:30、14:00—14:30,清粪时间为每日 08:30—09:00、14:30—15:00。

3.2 猪舍环境数据

系统 STM32 单片机每隔 1 min 向云平台上传一组数据,且每个数据均为该传感器 1 min 内采集到

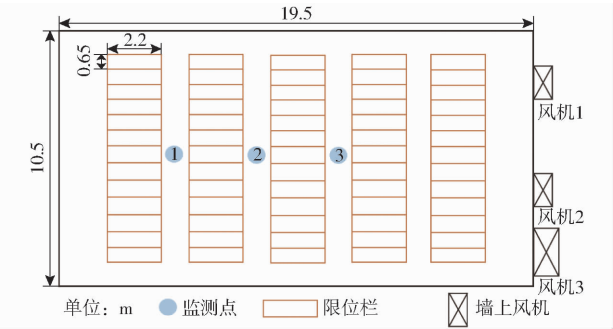


图 7 猪舍平面结构示意图
Fig. 7 Plane structure of pig building

的全部数据的平均值。将 2022 年 7 月 15 日至 8 月 31 日试验期间传感器采集到的 1 min 时间间隔的舍内温度、舍内相对湿度、舍外温度、舍外相对湿度、 NH_3 浓度和 CO_2 浓度数据平均化处理成时间间隔为 1 h 的数据,试验期间猪舍内外环境因子的变化情况如图 8 所示,数据统计(均值±标准差)如表 5 所示。由图可以看出,6 种舍内外环境因子呈周期性变化,温度和相对湿度呈正弦或余弦曲线周期性变化趋势。北方地区温差较大,舍外温度变化范围为 6.57~38.2℃,最大温度差为 31.63℃;舍外相对湿度变化范围为 29.92%~91.68%,最大相对湿度差为 61.76%。舍内温度受舍外温度影响且与舍外温度变化高度一致;舍内相对湿度整体处于较高水平,多次达到 90% 以上;通风系统调控以及每日两次定时人工清粪,所以导致猪舍 NH_3 浓度较低; CO_2 浓度受风机调控作用,波动幅度较大。

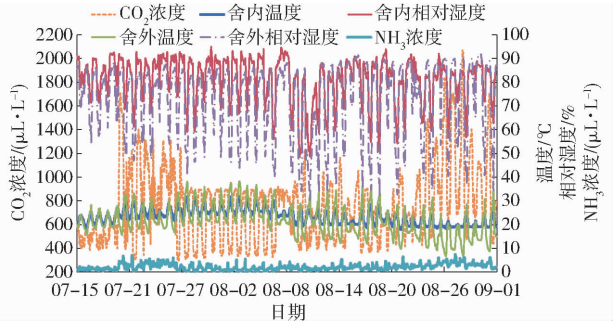


图 8 猪舍内外环境因子变化曲线
Fig. 8 Changes of environmental factors inside and outside pig building

表 5 猪舍环境因子数据统计

Tab. 5 Statistics of environmental factors in pig building

环境因子	最小值	最大值	最大差值	均值和标准差
舍内温度/℃	17.90	31.94	14.04	23.25 ± 3.23
舍内相对湿度/%	48.40	94.79	46.39	80.96 ± 9.73
舍外温度/℃	6.57	38.20	31.63	21.67 ± 6.29
舍外相对湿度/%	29.92	91.68	61.76	72.41 ± 15.56
NH_3 浓度/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.10	7.32	7.22	2.10 ± 1.29
CO_2 浓度/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	296.62	2 067.85	1 771.23	741.35 ± 320.63

3.3 硬件系统性能测试与分析

为测试猪舍环境控制系统的稳定性和精准性,取2022年7月15日—8月31日的试验数据进行分析,STM32单片机的数据上传时间间隔为1 min,48 d内应采集猪舍环境数据69 120组,由于受到断电及网络传输信号中断的影响,实际采集数据68 784组,数据采集率达到99.51%。于2022年8

月25日对猪舍环境控制系统的传感器数据上传以及控制指令下发的延迟时间分别做5组测试,取平均值处理,如表6、7所示。传感器数据上传的平均延迟为226 ms,控制指令下发的平均延迟为140.4 ms。可见控制系统的稳定性较强,监测与控制延迟较小,完全能够满足对猪舍环境实时监控的需求。

表 6 传感器数据上传延迟
Tab.6 Time delay of sensor data upload

参数	测试 1	测试 2	测试 3	测试 4	测试 5	平均值
数据上传时刻	23:34:54.450	23:37:20.052	23:38:57.755	23:40:20.644	23:40:47.929	
数据接收时刻	23:34:54.677	23:37:20.295	23:38:57.998	23:40:20.811	23:40:48.179	
延迟(时间差)/ms	227	243	243	167	250	226

表 7 控制指令下发延迟
Tab.7 Time delay of control instruction delivery

参数	测试 1	测试 2	测试 3	测试 4	测试 5	平均值
指令下发时刻	23:42:12.634	23:42:52.829	23:43:24.456	23:43:59.764	23:44:26.968	
指令接收时刻	23:42:12.769	23:42:52.973	23:43:24.589	23:43:59.917	23:44:27.105	
延迟(时间差)/ms	135	144	133	153	137	140.4

3.4 调控策略结果与分析

为验证 Double DQN 模型的实际控制效果,于2022年8月23、24日分别在同一个猪舍开展对比试验,其中,8月23日采用基于 Double DQN 的环境控制策略,8月24日采用基于温度阈值的环境控制策略,每组控制策略测试24 h。根据舍外温湿度传感器监测到的数据显示,8月23日舍外温度变化范围为9.9~31.7℃,相对湿度变化范围为33.3%~88.1%,气压为98.4 kPa,风速为10 km/h;8月24日舍外温度变化范围为9.7~32.1℃,相对湿度变化范围为28.8%~89.9%,气压为97.7 kPa,风速为9 km/h。两天的舍外温湿度等外界气候情况近似。基于 Double DQN 和基于温度阈值的两种猪舍环境控制策略下得到猪舍环境参数均值和标准差如表8所示。

期望值为19℃,Double DQN 控制策略下的最高温度为23.5℃,最低温度为18.4℃,温度偏离期望值的最大值为4.5℃,最大相对误差为23.7%;温度阈值控制策略下的最高温度为24.2℃,最低温度为18.2℃,温度偏离期望值的最大值为5.2℃,最大相对误差为27.4%。且 Double DQN 控制策略的均值和标准差(20.53±1.72)℃优于温度阈值控制法(20.79±2.06)℃。8月23、24日猪舍相对湿度都相对较高,夜间相对湿度保持在80%~85%,超过了妊娠母猪适宜的相对湿度区间。系统相对湿度期望值为75%,Double DQN 控制策略下的最高相对湿度为84.9%,最低相对湿度为60.1%,相对湿度偏离期望值的最大值为9.9%,最大相对误差为13.2%;温度阈值控制策略下的最高相对湿度为86.8%,最低相对湿度为57.1%,相对湿度偏离期望值的最大值为11.8%,最大相对误差为15.7%。综上,在 Double DQN 控制策略下,舍内温湿度峰值分别低于温度阈值控制策略0.7℃和1.9个百分点,最大相对误差分别低于温度阈值控制策略3.7%和2.5%,其温湿度波动变化更平稳。

Double DQN 控制策略下 NH₃ 浓度最高为6.9 μL/L,最低为0.7 μL/L;温度阈值控制策略下 NH₃ 浓度最高为6 μL/L,最低为1 μL/L,NH₃ 主要由猪饲料中的蛋白代谢和粪便等排泄物中的含氮有机物分解而来,猪舍 NH₃ 浓度低主要是通风系统调控以及饲养员每日两次定时清粪所致。CO₂ 浓度在两

表 8 猪舍环境因子均值和标准差
Tab.8 Mean value and variance of environmental factors in pig building

环境因子	Double DQN 控制策略	温度阈值控制策略
舍内温度/℃	20.53±1.72	20.79±2.06
舍内相对湿度/%	74.16±7.84	75.81±9.53
NH ₃ 浓度/(μL·L ⁻¹)	2.54±1.01	2.64±1.02
CO ₂ 浓度/(μL·L ⁻¹)	772.96±247.27	898.2±373.89

两种控制策略下的猪舍环境因子变化情况如图9所示。两天舍内温度都处于18~25℃范围内,均没有超过妊娠母猪舍温度上限27℃。系统温度的

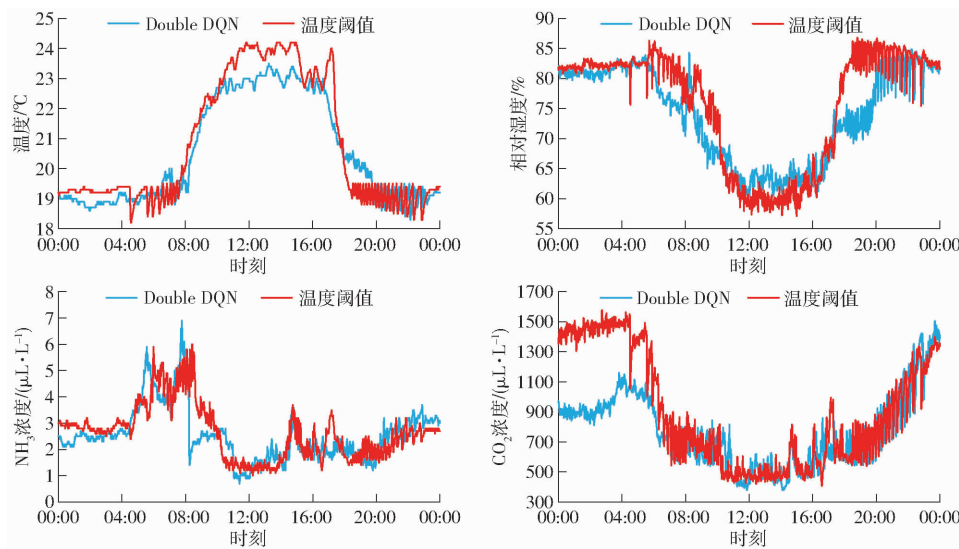


图 9 两种控制策略下猪舍环境因子变化曲线

Fig. 9 Changes of environmental factors in pig building under two control strategies

种控制策略的调控下,一直处于 1 600 $\mu\text{L/L}$ 以下的水平,夜间猪只睡觉以及通风次数减少往往会造成舍内 CO_2 浓度较高,而白天浓度相对较低,Double DQN 和温度阈值控制策略下的猪舍 CO_2 浓度均值和标准差分别为 $(772.96 \pm 247.27) \mu\text{L/L}$ 和 $(898.2 \pm 373.89) \mu\text{L/L}$,这是由于 Double DQN 能够通过温湿度以及有害气体浓度联合调控猪舍环境,使猪舍环境参数整体维持在一个适宜的范围内,而传统的温度阈值法只重点关注舍内温度状况,忽略了其他环境因子的重要性。

3.5 能耗对比

以 2022 年 8 月 23、24 日为例,对基于 Double DQN 和基于温度阈值控制策略的猪舍通风系统能耗进行分析。在猪舍结构、猪只数量、舍外环境因素(两天舍外天气情况近似)相同的条件下,舍内通风系统耗能是夏季猪舍环境中最主要的能量消耗,通过安装在猪舍的智能电子式三相四线有功电表监测风机电量消耗情况。

两组控制策略能耗对比情况如表 9 所示。2022 年 8 月 23 日采用的是基于 Double DQN 的猪舍环境控制策略,一天内 3 台风机共运行 28.01 h,总耗电量为 11.4 $\text{kW}\cdot\text{h}$;8 月 24 日采用的是基于温度阈值的猪舍环境控制策略,一天内 3 台风机共运行 29.73 h,总耗电量为 12.31 $\text{kW}\cdot\text{h}$,与温度阈值控制策略相比,Double DQN 控制策略下风机总运行时间缩短 1.72 h,一天内共节省约 7.39% 的电量消耗。

因受舍外温度影响,8 月 23、24 日 08:00—18:30 时段舍内温度均较高,此时间段通风系统持续工作,耗电量较夜间更高。以 8 月 23、24 日 15:23—16:34 同一时段为例,对比分析两种控制

表 9 两组控制策略能耗对比

Tab. 9 Comparison of energy consumption between two control strategies

控制策略	指标	风机 1	风机 2	风机 3	共计
Double DQN	运行时间/h	9.70	12.59	5.72	28.01
	耗电量/($\text{kW}\cdot\text{h}$)	3.59	4.66	3.15	11.40
温度阈值	运行时间/h	10.53	11.95	7.25	29.73
	耗电量/($\text{kW}\cdot\text{h}$)	3.90	4.42	3.99	12.31

策略下风机系统的实时能耗情况,此时段内,两日的初始温度均为 22.9 $^{\circ}\text{C}$,最终温度均为 22.7 $^{\circ}\text{C}$,Double DQN 控制策略下 3 台风机总运行时长为 2.55 h,总耗电量为 1.1 $\text{kW}\cdot\text{h}$;温度阈值控制策略下 3 台风机总运行时长为 3.27 h,总耗电量为 1.41 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。两日此时段的平均温度和标准差分别为 $(22.73 \pm 0.14) ^{\circ}\text{C}$ 和 $(23.03 \pm 0.21) ^{\circ}\text{C}$,可见,在同一时段内,与温度阈值控制策略相比,Double DQN 控制策略下的猪舍内平均温度更趋近于期望值,温度波动更小。同时,该时段内 Double DQN 控制策略下风机总运行时间能够缩短 0.72 h,耗电量减少 0.31 $\text{kW}\cdot\text{h}$,节省约 22%。

综上,Double DQN 控制策略不但能利用多环境因子联合调控猪舍环境,而且优化了 3 台风机的启停组合,通风系统耗电量小于基于温度阈值控制策略的耗电量,能耗相对损失较少,可以兼顾通风与节能的平衡。同时,基于 Double DQN 的控制策略的风机启停频次较缓,有助于减小对风机使用寿命的影响。

4 结论

(1)研发的基于 STM32 的猪舍环境控制系统可扩展性强,同时具有 PC 端远程监控平台和触摸屏

现场监控平台。该系统运行效果良好,传感器数据上传的平均延迟为 226 ms,控制指令下发的平均延迟为 140.4 ms,监测与控制延迟较小,稳定性较强,完全能够满足猪舍环境的实时控制需求。

(2)构建的基于 Double DQN 的猪舍环境优化控制模型有助于解决猪舍环境质量差、多环境因子联合调控难等问题。其平均回报、最大回报和稳定性指标均优于 DQN 模型,其中,收敛时平均回报值和最大回报值分别优于 DQN 模型 32.1% 和 19%。

(3)与温度阈值控制策略相比,Double DQN 控

制策略下的舍内温度、相对湿度、NH₃ 浓度和 CO₂ 浓度更接近设定的期望值,当日舍内温度和相对湿度平均值分别为 (20.53 ± 1.72)℃ 和 (74.16 ± 7.84)% ;该策略下舍内温湿度峰值分别低于温度阈值控制策略 0.7℃ 和 1.9 个百分点,最大相对误差分别低于温度阈值控制策略 3.7% 和 2.5% 。

(4)Double DQN 控制策略下的系统能耗更低,一天内 3 台风机共运行 28.01 h,总耗电量为 11.4 kW·h;该策略下风机总运行时间比温度阈值控制策略缩短 1.72 h,耗电量可节省约 7.39% 。

参 考 文 献

[1] 赵文文,王海峰,朱君,等. 猪舍消杀巡检机器人系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(增刊2):270-277.
ZHAO Wenwen, WANG Haifeng, ZHU Jun, et al. Research and design of pig house disinfecting inspection robot system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(Supp.2):270-277. (in Chinese)

[2] 曾志雄,董冰,吕恩利,等. 猪舍环境无线多点多源远程监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(2):332-340, 349.
ZENG Zhixiong, DONG Bing, LÜ Enli, et al. Design and experiment of wireless multi-point and multi-source remote monitoring system for pig house[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(2):332-340, 349. (in Chinese)

[3] 胡振楠,孙红敏,李晓明,等. 猪舍自动清粪控制系统设计与实现[J]. 南方农机, 2021,52(1):8-11.

[4] 杨飞云,曾雅琼,冯泽猛,等. 畜禽养殖环境调控与智能养殖装备技术研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2019,34(2):163-173.
YANG Feiyun, ZENG Yaqiong, FENG Zemeng, et al. Research status on environmental control technologies and intelligent equipment for livestock and poultry production[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019,34(2):163-173. (in Chinese)

[5] 袁兴茂,李霄鹤,吴海岩,等. 规模化猪场固粪好氧快速发酵工艺与设备研究[J]. 农业机械学报, 2021,52(9):355-360.
YUAN Xingmao, LI Xiaohu, WU Haiyan, et al. Design and experiment of rapid compost process and equipment by using solid manure on scale pig farm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(9):355-360. (in Chinese)

[6] 曾志雄,余乔东,易子骐,等. 基于 WSN 的集中通风式分娩猪舍环境参数时空分布特性[J]. 农业工程学报, 2020,36(12):204-211.
ZENG Zhixiong, YU Qiaodong, YI Ziqi, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of environmental parameters of centralized ventilation delivery sows based on WSN[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(12):204-211. (in Chinese)

[7] 李修松,叶章颖,李国铭,等. 规模化猪场妊娠母猪舍改进湿帘降温系统的环境特性[J]. 农业工程学报, 2020,36(20):238-245.
LI Xiusong, YE Zhangying, LI Guoming, et al. Environmental characteristics of a swine gestation barn with an innovative cooling pad system[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(20):238-245. (in Chinese)

[8] 曾志雄,魏鑫钰,吕恩利,等. 集中通风式分娩母猪舍温湿度数值模拟与试验验证[J]. 农业工程学报, 2020,36(3):210-217.
ZENG Zhixiong, WEI Xinyu, LÜ Enli, et al. Numerical simulation and experimental verification of temperature and humidity in centralized ventilated delivery pigsty[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(3):210-217. (in Chinese)

[9] 谢秋菊,郑萍,包军,等. 基于深度学习的密闭式猪舍内温湿度预测模型[J]. 农业机械学报, 2020,51(10):353-361.
XIE Qiuju, ZHENG Ping, BAO Jun, et al. Thermal environment prediction and validation based on deep learning algorithm in closed pig house[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(10):353-361. (in Chinese)

[10] 王美芝,任方杰,臧建军,等. 保温灯变功率供暖对哺乳仔猪环境调控及节能效果[J]. 农业工程学报, 2019,35(15):182-191.
WANG Meizhi, REN Fangjie, ZANG Jianjun, et al. Environmental control and energy saving effect of heat lamp with variable power heating for piglets[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(15):182-191. (in Chinese)

[11] 陈冲,刘星桥,刘超吉,等. 哺乳母猪舍环境舒适度评价预测模型优化[J]. 农业机械学报, 2020,51(8):311-319.
CHEN Chong, LIU Xingqiao, LIU Chaoji, et al. Optimization of evaluation and prediction model of environmental comfort in lactating sow house[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(8):311-319. (in Chinese)

- [11] GAO Feiyang, WANG Zhuo, BAI Xiaoping, et al. Design of row guidance control system for combine corn harvester[C]//2019 2nd International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE), 2019.
- [12] LI Aiqin, XU Jiyang, MA Fei, et al. Design of quality control system for fighting machine operation based on Beidou navigation[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 440(3):032046.
- [13] FANG Hao, FAN Ruixia, THUÏLOT B, et al. Trajectory tracking control of farm vehicles in presence of sliding[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2006, 54(10):828–839.
- [14] CARIOU C, LENAIN R, THUÏLOT B, et al. Automatic guidance of a four-wheel-steering mobile robot for accurate field operations[J]. Field Robot, 2009, 26(6–7):504–518.
- [15] XUE Peilin, WU Yuan, YIN Guodong, et al. Path tracking of orchard tractor based on linear time-varying model predictive control[C]//2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2019.
- [16] HILL A, LANEURIT J, LENAIN R, et al. Online gain setting method for path tracking using CMA-ES: application to off-road mobile robot control[C]//IROS 2020, 2020.
- [17] YAO Zhen, LIU Guohai, ZHANG Duo, et al. Path tracking control for four-wheel-independent-driven agricultural high clearance sprayer with new front-rear-dual-steering-axle[C]//2020 Chinese Automation Congress (CAC), 2020.
- [18] LIU Zhengduo, ZHENG Wenxiu, WANG Neng, et al. Trajectory tracking control of agricultural vehicles based on disturbance test[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(2):138–145.
- [19] LIU Zhengduo, LÜ Zhaoqin, ZHENG Wenxiu, et al. Design of obstacle avoidance controller for agricultural tractor based on ROS[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(6):58–65.
- [20] LUKASSEK M, VOLZ A, SZABO T, et al. Model predictive control for agricultural machines with implements[C]//2020 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2020.

(上接第 384 页)

- [12] 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 for pig breeding chamber under multiple environment variable control and analysis of internal flow field[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2):203–212. (in Chinese)
- [13] XIE Q J, JI-QIN N, SU Z B. A prediction model of ammonia emission from a fattening pig room based on the indoor concentration using adaptive neuro fuzzy inference system[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 325:301–309.
- [14] WANG Y, DONG H M, ZHU Z P, et al. CH₄, NH₃, N₂O and NO emissions from stored biogas digester effluent of pig manure at different temperatures[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 217:1–12.
- [15] XIE Q J, JI-QIN N, LI E L, et al. Sequential air pollution emission estimation using a hybrid deep learning model and health-related ventilation control in a pig building[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 371:133714.
- [16] XIE Q J, JI-QIN N, BAO J. Correlations, variations, and modelling of indoor environment in a mechanically-ventilated pig building[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 282:124441.
- [17] ZHANG J, KONG F, ZHAI Z, et al. Development of wireless remote control electric devices for livestock farming environment [C]//2017 International Conference on Electronic Industry and Automation (EIA 2017), 2017.
- [18] 秦莉. 基于 STM32 猪舍环境监测系统的设计与实现[D]. 贵阳:贵州大学, 2018.
- QIN Li. Design and implementation of fixed intelligent monitoring system for agricultural microclimate[D]. Guiyang:Guizhou University, 2018. (in Chinese)
- [19] 王斌,刘雪梅,张国强,等. 猪舍生态环境监测和清洁控制系统的设计[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3):55–62.
- WANG Bin, LIU Xuemei, ZHANG Guoqiang, et al. Design of control system for pig farm cleaning and ecological environment monitoring[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(3):55–62. (in Chinese)
- [20] 谢秋菊,苏中滨,JI-QIN Ni,等. 密闭式猪舍多环境因子调控系统设计与调控策略[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6):163–170.
- XIE Qiuju, SU Zhongbin, JI-QIN Ni, et al. Control system design and control strategy of multiple environmental factors in confined swine building[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6):163–170. (in Chinese)
- [21] XIE Q, JI-QIN N, BAO J, et al. A thermal environmental model for indoor air temperature prediction and energy consumption in pig building[J]. Building and Environment, 2019, 161:106238.
- [22] 谢秋菊,JI-QIN Ni,包军,等. 基于能质平衡的密闭猪舍内小气候环境模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10):148–156.
- XIE Qiuju, JI-QIN Ni, BAO Jun, et al. Simulation and verification of microclimate environment in closed swine house based on energy and mass balance[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(10):148–156. (in Chinese)
- [23] 杨亮,刘春红,郭昱辰,等. 基于 EMD–LSTM 的猪舍氨气浓度预测研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊):353–360.
- YANG Liang, LIU Chunhong, GUO Yuchen, et al. Prediction of ammonia concentration in fattening piggery based on EMD–LSTM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.):353–360. (in Chinese)
- [24] 吴繁森. 基于 ARM + OneNET 云平台的工厂车间环境监控系统设计[J]. 物联网技术, 2022, 12(11):15–17.
- [25] 中华人民共和国农业部. 规模猪场环境参数及环境管理:GB/T 17824.3—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.