

李保明, 王阳, 郑炜超, 等. 畜禽养殖智能装备与信息化技术研究进展 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 18-26.
LI Baoming, WANG Yang, ZHENG Weichao, et al. Research progress on intelligent equipment and information technology for livestock and poultry breeding[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 18-26.

特约综述

畜禽养殖智能装备与信息化技术研究进展

李保明^{1,2}, 王 阳¹, 郑炜超^{1,2}, 王朝元^{1,2}

(1 农业农村部设施农业工程重点实验室/中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;

2 北京市畜禽健康养殖环境工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 我国现代畜禽养殖正朝着规模化、设施化、标准化和信息化方向快速发展, 智能养殖技术装备与信息化技术的研发与应用是促进畜禽养殖行业健康可持续发展的关键, 对提升我国畜禽养殖产出效率、降低生产过程对劳动力的依赖、实现绿色高质量转型发展具有重要意义。本文从满足规模化畜禽生产对品质安全、健康管理、提质增效的需求出发, 重点介绍了模块化装配式畜禽舍建筑与热环境耦合调控技术、养殖环境参数精准监测与智能调控技术以及畜禽智能化饲喂、饮水、投药设备、畜禽舍清粪工艺与自动清粪装备、畜禽生产信息实时采集与智能管理技术等方面的最新研究与应用进展; 指出了畜牧装备产业的薄弱环节和卡脖子问题, 并对中国畜牧业机械化与智能装备发展的方向进行了展望, 为我国现代畜牧业绿色高质量转型升级与健康可持续发展提供参考。

关键词: 畜禽养殖; 智能装备; 环境调控; 饲喂; 清粪; 信息化

中图分类号: S24; S82; S83

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2021)06-0018-09

Research progress on intelligent equipment and information technology for livestock and poultry breeding

LI Baoming^{1,2}, WANG Yang¹, ZHENG Weichao^{1,2}, WANG Chaoyuan^{1,2}

(1 Key Laboratory of Agricultural Engineering in Structure and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2 Beijing Engineering Research Center for Animal Healthy Environment, Beijing 100083, China)

Abstract: The modern livestock and poultry breeding industry in China has been rapidly developing towards scalization, facility, standardization and informatization. The research, development and application of intelligent farming equipment and information technology have become the key to promote healthy and sustainable development of livestock and poultry breeding industry. It is of great significance for improving the output efficiency, reducing the dependence on labor in the production process, and achieving green and high-quality transformational development of livestock and poultry breeding industry in China. To meet the needs of quality and safety of products, healthy management, and quality-efficiency improvement of large-scale livestock and poultry production, this paper mainly summarized the latest research and application progress of intelligent equipments and information technologies, including modularized assembled animal buildings and building-thermal environment coupling regulation technology, precise monitoring and intelligent controlling technology

收稿日期: 2021-07-27 网络首发时间: 2021-08-24 09:59:14

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20210823.1540.002.html>

作者简介: 李保明 (1961—), 男, 教授, 博士, E-mail: libm@cau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0 500700); 博士后国际交流计划派出项目 (博管办 2020-34 号)

of farming environmental parameters, intelligent feeding, drinking and dosing equipment, automatic manure removal technology and equipment, real-time information collection and intelligent management technology etc. The weak links and bottlenecks for the development of intelligent equipment and information technology of livestock and poultry breeding industry were pointed out. The development direction of mechanization and intelligent equipment of livestock farm in China was prospected. This review provides a reference for the green and high-quality transformation and upgrading, healthy and sustainable development of livestock and poultry breeding industry in China.

Key words: livestock and poultry; intelligent equipment; environmental control; feeding; manure removal; informatization

我国现代畜禽养殖正朝规模化、设施化、标准化与信息化方向快速发展,未来 5~10 年将是智慧畜牧业的快速发展阶段,但在生产方式转型升级过程中尚需解决相应的技术瓶颈,主要表现在:1) 畜禽舍建筑与环境调控技术是畜禽品种发挥优良遗传潜力和生产效率的基础,传统畜禽舍建筑存在气密性差、多种通风模式并存且系统转换融合性差等问题,严重地影响了舍内热环境的均匀性与稳定性^[1-2];2) 现有环境调控系统普遍基于温度、湿度或气体浓度进行单一指标的负反馈控制,但舍内温度、湿度、风速及空气质量等环境因子耦合作用显著,单一指标控制难以满足畜禽舍复杂环境调控需求^[3-4];3) 畜禽自动饲喂与饮水装备的计量及信息采集不配套,难以实现智能化精准饲喂^[1,5];4) 规模畜禽生产清粪劳动强度大,现有机械清粪系统可靠性差、检修难^[6-9];5) 养殖过程管理粗放、信息化技术跟不上^[1,2,10],导致畜禽养殖面临的整体效率低下、环境污染严重、设施设备落后等突出问题^[1-11]。本文从畜禽装配式建筑、均匀环境调控、智能化饲喂与饮水、自动清粪、信息化智能管理等几个方面对近年来的研究进展进行了总结,重点分析了畜禽舍装配式建筑与热环境耦合调控技术,畜禽舍环境因子智能化监测与自动化调控技术,畜禽智能化饲喂、饮水装备,畜禽舍清粪工艺及自动化清粪装备,以及畜禽生产信息

实时采集与智能管理技术等,并对中国畜牧业机械化与智能装备发展的方向进行了展望,为我国现代畜牧业生产模式的转型升级与提质增效提供参考,促进现代畜牧业的绿色高质量与健康可持续发展。

1 畜禽舍建筑与热环境耦合调控技术

1.1 鸡舍建筑与热环境耦合调控技术

良好的保温隔热性能和气密性是畜禽舍热舒适性环境及均匀性调控的前提和基础。Wang 等^[12-18]建立了鸡舍热湿空气耦合传递的微环境模拟模型;分析了鸡舍温度波动的主要环境因子^[12-15];建立了不同地区无供暖系统蛋鸡舍外围护结构热阻及保温材料经济性模型,明确了不同气候区鸡舍围护结构的保温性能要求与蛋鸡饲养方式(密度)的关系^[16-17];探索了装配式鸡舍建筑外围护结构缝隙对舍内外压差、渗透风量和能耗的影响,明确了围护结构搭接缝隙气密性参数指标^[18];系统分析了鸡舍进风口及进风参数影响舍内气流组织的稳定性^[19-22]。Wang 等^[19-20]基于非等温贴附射流理论设计舍内气流组织,明确了进风口位置、尺寸及进风参数对舍内贴附射流长度、温差衰减的影响规律,构建了回流区域内温度解析表达式,解析了基于鸡舍建筑与通风系统耦合作用的鸡舍稳温机理,并提出了降低温度波动及温差的纵墙湿帘风道布置与小窗均匀

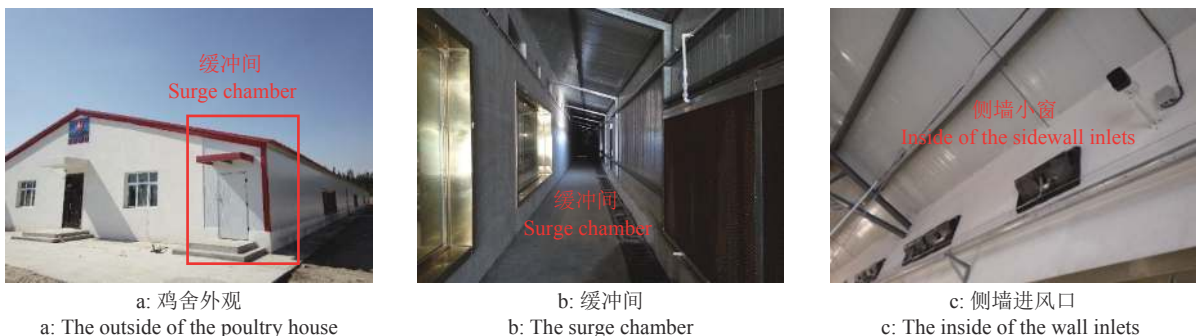


图 1 纵墙湿帘缓冲室山墙排风系统^[19]

Fig. 1 Sidewall inlets of the new ventilation system with surge chamber and bottom hinged flap

进风的通风模式(图 1)。基于灰色预测理论和鸡舍微环境模型,王阳^[22]提出了鸡舍热环境预测调控新方法,建立了密闭式鸡舍内不同环境参数指标的热环境灰色预测模型及调控规律,实现了单栋 10 万只以上规模鸡舍温差不超过 3℃ 的稳温调控效果。

1.2 猪舍通风及节能减排技术

规模化母猪场妊娠母猪通常采用自动料线定位栏饲养,集约化、自动化程度较高,饲养数量和密度大,生产过程中产生大量的热量和气体污染物需及时排出^[23-28]。国内规模化猪场采用的横向或纵向湿帘降温系统很难满足妊娠母猪对热环境和空气质量环境的需求,李修松等^[26-27]对妊娠母猪舍采用

湿帘与地道风相结合的湿帘降温系统进行夏季和冬季舍内环境连续监测,结果表明良好的通风系统能够为母猪提供适宜的生长环境,降低能源消耗,减少猪场运营成本。畜禽养殖用地紧张,规模化楼房猪场可通过提升土地利用效率在一定程度上降低成本(图 2)。Wang 等^[23]利用 CFD 技术模拟评估楼房猪舍内气流环境发现,风井内不同压力分布导致每层的通风量存在差异,楼房猪舍一楼的通风量最低,楼层数的增高会对风机通风性能产生负面影响;增加风井宽度对风机性能产生正效果,尤其是增加处于低层楼房猪舍的通风量;精准通风可提高楼房猪舍内温度以及气流的稳定性和均匀性,减少猪舍的必要通风量和节约环境控制能耗。



a: 浙江华统集团楼房育肥场

a: Multi-floor building fattening farm of Zhejiang Huatong Group



b: 湖南龙华集团母猪楼房猪场

b: Multi-floor building for sow of Hunan Longhua Group

图 2 楼房猪舍

Fig. 2 Multi-floor pig building

1.3 奶牛热舒适评价方法

热应激严重影响奶牛的生产力、繁殖力和福利。为降低奶牛热应激的风险,国内外学者一直在寻求预测和评估热应激的方法,在诸多方法中综合多个环境因子的热应激指数模型最为常用^[29-30]。为避免在指数选择上的盲目性,一些学者系统梳理了已有奶牛热应激指数评价方法并进行了分类,对比分析了不同评价指数在奶牛热应激时表征指标的差异,认为已有的指数普遍不能很好地反映奶牛与环境的换热机理,导致不同环境条件下评价结果差异较大^[29-31]。为更好地开展奶牛热舒适环境评价方法的研究,严格齐等^[31]在总结前人研究的基础上提出了一种结合体表温度的奶牛换热模型并进行了 MatLab 源代码编制。

2 畜禽舍环境监测与调控装备

2.1 基于光谱技术的 NH₃ 和 H₂S 检测装置

畜禽舍 NH₃ 浓度检测多采用电化学传感器,使用中普遍存在对畜禽舍复杂环境抗性低、易钝化、精度低、使用寿命短等问题,以致目前实际使用的畜禽舍环境调控系统在决策时无法采用 NH₃ 浓度作为调控指标。谭鹤群等^[32]基于可调谐吸收光谱

技术搭建了一套畜禽舍 NH₃ 浓度检测系统,该系统主要由激光发射单元、光路与气路单元、光电信号接收单元以及谐波信号处理单元 4 个部分组成,并研究了调制频率、调制幅值、谐波分析相位差、扫描频率等系统参数对检测系统精准确度的影响,结果表明光谱检测系统的线性误差和重复误差均显著小于电化学检测仪,且与 INNOVA 检测仪相当,研究结果为畜禽舍 NH₃ 浓度实时在线监测设备的研发提供理论依据。基于光谱技术的 NH₃、H₂S 检测装置如图 3 所示。

2.2 基于 LORA 的畜禽舍环境参数实时采集系统

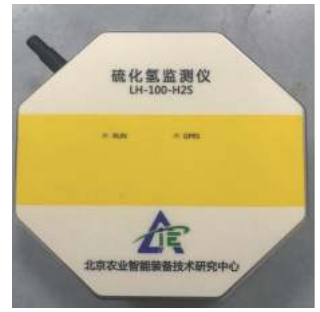
畜禽养殖环境下,现场监测布线复杂,传统的传输成本高、功耗大、距离短,采用无线传感器监测畜禽舍内环境参数,便于传感器组网,不需要布线,布点灵活,结合广域网通讯和云平台,可实现环境信息的远程实时监控^[33-34]。华中农业大学和河北农业大学研究团队根据不同畜禽舍、不同用户对环境监测的需求,集成不同类型传感器,考虑到畜禽场地理位置的多样性,采用 WIFI 和 LORA 2 种舍内组网通讯方式,广域网通讯方式为有线网络和 NB-IoT,研制了多种不同组合的监测设备(图 4),测试结果表明设备抗干扰能力和可靠性较



a: NH₃ 检测仪
a: NH₃ detector



b: 手持式 H₂S 检测仪
b: Handheld H₂S detector



c: 在线式 H₂S 检测仪
c: Online H₂S detector

图 3 NH₃ 和 H₂S 浓度检测仪

Fig. 3 The detectors of NH₃ and H₂S concentrations



图 4 畜禽舍多参数环境检测仪

Fig. 4 Multi-parameter environment detector for livestock building

高, 能胜任养殖环境复杂条件下远距离无线信息传输工作。

2.3 基于多参数的牛舍环境精准调控系统

牛舍内环境因子耦合作用显著, 现有的调控系统普遍基于单一指标的负反馈控制, 难以满足复杂环境调控及动物环境舒适性需求。基于多元参数的环境综合评价指标与调控模型, 已研发了用于牛舍的多参数环境精准调控系统(图 5)^[35-37]。该系统主要包括牛舍卷帘冬季调控策略、夏季感应喷淋装置、控制器及控制系统应用集成 3 个部分; 考虑舍内的热舒适性、空气质量、气流模式和温度分布等

因素, 给出了母牛舍卷帘开度与开口方式相互作用的调控策略; 考虑大多数条件下奶牛散栏饲养, 为防止出现无牛喷淋, 研发了感应喷淋装置, 控制区域内喷头运行, 实现了节水、节电; 根据环境需要控制多组牛舍卷帘的开度和多组风机、喷淋的开关, 实现了分区域的喷淋和风机控制。

3 畜禽智能化饲喂和饮水装备

3.1 智能饲喂设备

针对畜禽不同生理生长阶段对养分的动态需求存在差异, 综合考虑产品性质、用途、价格和销量, 国内已设计开发了犊牛精准牛奶饲喂机、奶牛分群管理精准饲喂系统、自走式精准撒料机、母猪小群养智能饲喂站、智能化奶羊饲喂站等全新产品(图 6)^[38-40]。犊牛自动饲喂机对带有识别信号的犊牛进行自动饲喂, 对加速牛群增殖、降低牧场成本和提高经济效益起到了重要作用。奶牛分群管理精准饲喂系统, 根据牛只的生长情况为牛只的出入场、分群、转群、分栏提供数据支撑, 也为日粮配方的改进提供了基础数据信息。自走式精准撒料机设备整体结构紧凑, 撒料均匀, 可随时调整出料量, 方便使用。母猪小群养智能饲喂站, 将妊娠母猪从定位栏



图 5 牛舍环境控制系统

Fig. 5 Environmental control system for cow house



a: 精准牛奶饲喂机
a: Precision milk feeder



b: 保育猪精准饲喂机
b: Precision feeder for nursery pig



c: 母猪小群养饲喂站
c: Small group feeding system for sow

图 6 智能饲喂系统

Fig. 6 Intelligent feeding systems

中解放出来, 适用于我国福利化舍饲散养工艺, 增强了母猪自身体质和免疫力, 可以实现猪场日常饲喂无人化。传统的定时定量投料饲喂会发生采食拱料及争食浪费现象, 保育猪粥料智能饲喂器具有料位监测功能, 低料位补料、高料位停料, 可节约大量饲料, 且用水拌料饲喂保育猪可以减少断奶应激, 提高了保育猪成活率和生长速度, 减少了呼吸道疾病的发病率。畜禽智能化精准饲喂装备的设计研发与应用已初步突破了家畜个体精准饲喂控制的难点, 实现了畜禽智能化饲喂装备关键核心技术突破。

3.2 数字化饮水、加药和消毒设备

畜禽通过饮水投药易造成药物浪费和饮用药物不均等问题, 自动加药装置改变了将兽药加入饮水的传统做法, 通过控制搅拌速率、搅拌时间将固体兽药直接与饲料混合, 加药装置通过电机控制绞

龙叶, 根据实际情况调整药物的流量, 可避免兽药的浪费。养殖场定期防疫或疫病爆发期, 定时按需投药存在投药不均、劳动强度大的问题, 畜禽饲料加药装置通过控制搅拌的速率及时间, 实现了自动加药, 有效地解决了兽药混合不均等问题。

畜禽养殖过程存在消毒防疫频繁、细菌耐药性强和用药量大等问题, 微酸性电解水可在畜禽养殖的环境净化、饮水系统及物品等消毒环节中替代化学消毒剂, 微酸性电解水消毒及环境净化技术已应用在畜禽养殖场环境净化、通道、设备、鸡蛋及饮水管线消毒等各个方面^[41-43]。微酸性电解水属于绿色、环保、安全、高效的杀菌消毒剂, 稳定性好, 杀菌能力强, 其杀菌能力是次氯酸钠的 80 倍, 且微酸性电解水机(图 7)以氯化钠溶液和稀盐酸为原料, 价格相对较低。



图 7 微酸性电解水机

Fig. 7 Slightly acidic electrolyzed water machine

4 畜禽舍自动清粪系统

4.1 猪场自动清粪系统

粪污清理是生猪养殖过程中的重要环节, 传统的定时清粪易导致舍内粪污堆积, 从而使有害气体大量排放, 严重影响猪只的健康和周边环境。利用 BP 神经网络构建粪污量预测模型, 实时预测当前时刻猪舍内粪污量并及时进行清理, 可有效降低粪污在猪舍内的累积和有害气体的长时排放^[44-45]。猪

场虹吸式清粪及转运系统可提高规模化猪场的清粪效率、节约养殖场的劳动力成本; 通过结合不同地域气候条件, 优化了虹吸式管道排污系统的设计及安装工艺^[44-49]。利用台达 DOPSoft 2.00.07 和 WPLSoft2.48 软件研发的猪场自动清粪系统信息平台(图 8), 不仅提高了清粪效率, 也提高了设备的稳定性和维修、维护效率, 为降低猪场疫病防控风险提供了数据支撑, 可以解决猪场清粪过程中因信息化程度不足而导致的数据获取少、预警不及时和检

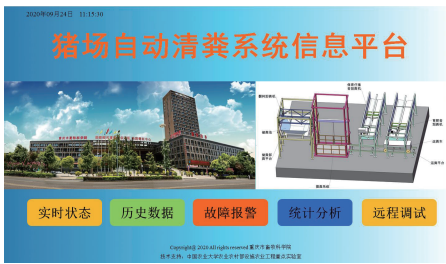


图8 猪场自动清粪系统信息平台

Fig. 8 The information platform of automatic manure cleaning system in swine farm

修频繁进场等问题^[44-49]。

4.2 家禽传送带自动清粪系统

近年来,家禽的多层立体叠层饲养在我国得到快速发展,采用各层网下传送带清粪不仅解决了禽与粪的及时分离难题,还实现了粪不落地、日产日清,显著提升了舍内空气质量。由于水禽粪便的含水量高,如何解决传送带清粪的漏水问题是养殖业关注的焦点,水禽场高效清粪系统创新了对辊驱动,增加了敷胶工艺及自动纠偏机构,实现了联动和可拆卸功能,大大改善了粪带性能,延长了粪带的使用寿命,清粪速度提高了30%~40%,解决了由于禽粪湿度差异所造成的清粪难题,有效地提高了清粪带的清洁度,减少了舍内禽粪滞留时间。家禽场传送带自动清粪系统设计了清粪端刮粪板整体调节装置和可拆卸刮粪板装置,将多层刮粪板连接形成联动装置,确保多层刮粪板整体胀紧,方便清理刮板与粪带之间的积粪^[50-52]。

5 畜禽生产信息实时采集与智能管理技术

5.1 家禽安全高效养殖智能信息管理系统

家禽安全高效养殖智能信息管理系统包括家禽养殖信息实时监测、疾病预警系统、养殖智能信息管理系统。Cuan等^[53]建立了基于机器视觉的笼养和散养家禽异常行为检测方法。对笼养家禽的站立或卧倒姿态(行为)进行识别,判断其是否属于疑似病禽,实现家禽的异常行为检测;对散养家禽进行非接触式检测,通过判断家禽行为(啄食行为、正常行为和异常行为)实现健康鸡和疑似病鸡的检测;设计了去噪方法,对选出的声音事件进行噪声分数检测,去除在家禽叫声频域范围之外有较高能量的噪声事件,对获取的家禽叫声进行变换^[53-54]。

5.2 牛安全高效养殖智能信息管理系统

Kang等^[55]分析跛行奶牛行走运动模型,提出了基于支撑时相的奶牛跛行检测方法和算法,为奶

牛跛行检测提供了新的技术。康熙等^[56]提出的基于热红外相机的奶牛跛行检测系统,减少了跛行对奶牛健康及产奶量影响,提高了奶牛跛行运动特征获取的准确性。张旭东等^[57-58]提出了基于深度学习网络EFMYOLOv3(Enhanced Fusion MobileNetV3 You Only Look Once v3)的多目标检测方法,搭建了基于热红外相机的奶牛乳腺炎检测系统,并融合于奶牛疾病检测系统,为奶牛乳腺炎检测提供了新的技术。基于SVM(Support vector machines)和经验小波的奶牛动态称质量方法以及三维重建的奶牛体质量预估方法,为养殖场奶牛称质量提供了新的思路,提高了称质量效率,减少了称质量过程中奶牛的应激反应,提高了奶牛福利^[59-62]。任晓惠等^[63]提出了一种基于机器学习算法的SVM和贝叶斯分类算法的奶牛行为自动识别方法,对奶牛的发情行为、反刍行为、进食行为和饮水行为进行分类和识别,为进一步开展奶牛异常行为检测、疾病的智能化预警研究提供了技术支持。

5.3 畜禽规模化安全高效养殖大数据平台

我国畜禽养殖行业转型阶段,畜禽安全高效养殖大数据平台的开发及示范应用为畜禽养殖企业提供了有效的智能养殖管理,可以减少企业养殖人员投入,降低人与畜禽的接触频率,保障养殖场的生物安全,实现畜禽养殖的少人化、远程化、数据化管理^[1-3,11]。猪安全高效养殖管理平台通过连接猪场的物联网设备,构建养殖企业猪舍实时监测系统、疾病预警及智能信息管理系统等,实现猪场管理数字化、在线化,通过大数据技术分析,为猪场提供生产、经营的最佳解决方案,使得猪场管理更加标准和规范,实现了生猪全过程生产信息化管理。蛋鸡安全高效养殖管理平台系统实现了不同来源数据的互联互通,同步实时预警多单位多鸡场管理、养殖异常现象、推送饲养方案及汇总分析生产数据。通过PC端和手机端应用,用户可随时查看批次日、周、月成绩数据,做到蛋品可全程追溯,提升生产效率。

6 结论与展望

6.1 结论

现代畜禽舍建筑与环境调控技术设备是现代畜禽设施化养殖的前提条件,也是保障高产畜禽品种发挥遗传潜力和生产效率的基础,越来越受到重视与关注。适宜的畜禽养殖用地逐渐减少,提升土地利用效率可一定程度上降低成本,规模化楼房猪场为现代集约化猪场开辟出了新道路,为设计适合

中国国情的规模化猪场提供了参考依据。规模养殖场中使用劳动力最多、劳动强度最大且作业环境差的 2 个环节为饲喂和清粪,从饲喂和清粪角度创制关键装备,可有效解决畜禽场对人工的依赖、提高劳动效率、降低末端粪污处理难度,并通过精准饲喂控制,提升生产效率、实现节本增效,促进现代畜禽生产向信息化与智能化方向发展。畜禽养殖信息采集、挖掘与集成优化是促进产业由数字化向网络化、智能化方向升级的关键环节,基于物联网和大数据挖掘技术,建立集饲养规划、生产管理、可追溯于一体的畜禽高效安全养殖信息管理系统,可实现规模畜禽健康养殖过程的智能化管理。本文以畜禽健康养殖的空间环境需求为切入点,从装配式畜禽舍与热环境调控、环境自动化控制系统、智能饲喂与饮水装备、自动清粪系统、智能管理系统 5 个方面对畜禽养殖智能装备与信息化技术研究与应用进行了分析,为构建我国畜禽健康高效养殖智能装备与信息化技术体系提供关键支撑,为中国现代畜牧业生产模式的转型升级与提质增效提供了参考依据,有利于促进现代畜牧业的健康可持续发展。

6.2 展望

《国务院关于加快推进农业机械化和农机装备产业转型升级的指导意见》(国发〔2018〕42号)中明确提出,到 2025 年畜牧业机械化率总体达 50% 以上,且要以畜牧业机械化向全程全面高质高效转型升级为主线,以推进机械装备与养殖工艺相融合、畜禽养殖机械化与信息化相融合、设施装备配置与养殖场建设相适应、机械化生产与适度规模养殖相适应,为畜牧业高质量发展、加快现代化步伐提供有力支撑。畜牧业加快向标准化规模养殖转型升级,装备总量持续增长,机械化水平不断提升,但不同地区、畜种、养殖规模和生产环节机械化发展不平衡不充分,畜牧业机械化总体水平还不高,科技创新能力不强、部分技术装备有效供给不足、养殖工程与设施装备集成配套不够等问题突出。机械化是畜牧业现代化的重要基础和重要标志,养殖智能装备与信息化技术是加快机械化发展的有力支撑。畜禽养殖将向绿色高质量模式转型发展,以标准化、规模化、超大规模化、生态化、福利化、养殖无抗化以及数字化、信息化和管理智能化为方向,未来中国畜牧业机械化与智能装备发展主要集中解决畜牧装备产业的薄弱环节和卡脖子问题,具体包括提高中小规模养殖场(户)的机械化水平、畜牧业机械化与环境保护、疫病防控与机械化水平以及人才培养和人才队伍建设等方面;畜牧业信息化将以

数字化、网络化、智慧化、智能化、信息化阶段升级发展为主要趋势,数字化阶段以畜禽生产过程及设施设备信息资源的实时准确可靠采集为主,网络化集中于信息资源的融合,数据挖掘和智慧管理是智慧化的必经之路,畜禽养殖数字化是智能化的基础,在机器深度学习人工智能的基础上实现智能化发展。

参考文献:

- [1] 李保明,王阳,郑炜超,等.中国规模化养鸡环境控制关键技术与设施设备研究进展[J].*农业工程学报*,2020,36(16):212-221.
- [2] 朱能武,李保明,邓昌彦,等.规模化畜禽养殖环境工程技术研究进展[J].*农业工程学报*,2001,17(7):17-20.
- [3] 汪开英,吴捷刚,赵晓洋.畜禽场空气污染物检测技术综述[J].*中国农业科学*,2019,52(8):1458-1474.
- [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.
- [5] 姚向君,郝先荣,郭宪章.畜禽养殖场能源环保工程的发展及其商业化运作模式的探讨[J].*农业工程学报*,2002,18(1):181-184.
- [6] 韩成吉,王国刚,朱立志.畜禽粪污土地承载力系统动力学模型及情景仿真[J].*农业工程学报*,2019,35(22):170-180.
- [7] 张庆东,耿如林,戴晔.规模化猪场清粪工艺比选分析[J].*中国畜牧兽医*,2013,40(2):232-235.
- [8] 介邓飞,泮进明,应义斌.规模化畜禽养殖污染气体现场检测方法 with 仪器研究进展[J].*农业工程学报*,2015,31(1):236-246.
- [9] 罗娟,赵立欣,姚宗路,等.规模化养殖场畜禽粪污处理综合评价指标体系构建与应用[J].*农业工程学报*,2020,36(17):182-189.
- [10] 付为森,滕光辉,杨艳.种猪体重三维预估模型的研究[J].*农业工程学报*,2006,22(S2):84-87.
- [11] 李保明,王阳,郑炜超.我国规模化养鸡环境控制技术的最新进展[J].*中国家禽*,2019,41(9):1-7.
- [12] WANG Y, ZHENG W C, SHI H P, et al. Optimising the design of confined laying hen house insulation requirements in cold climates without using supplementary heat[J].*Biosystem Engineering*,2018,174:282-294.
- [13] 王阳,李保明.密闭式蛋鸡舍外围护结构冬季保温性能分析与试验[J].*农业工程学报*,2017,33(7):190-196.
- [14] 王阳,王朝元,李保明.蛋鸡舍冬季 CO₂ 浓度控制标准与最小通风量确定[J].*农业工程学报*,2017,33(2):240-244.
- [15] 王阳,郑炜超,石海鹏,等.夏季鸡舍屋顶隔热改善舍内热环境及蛋鸡生产性能[J].*农业工程学报*,2018,34(17):207-213.
- [16] WANG Y, LI B M. An optimized solar-air degree-day method to evaluate energy demand for poultry buildings in different climate zones[J].*Frontiers of Agricultural*

- [Science and Engineering](#), 2020, 7(4): 478-489.
- [17] WANG Y, LI B M, ZHENG W C. Optimum insulation thickness for the sandwich structure livestock building external envelopes in different climate regions of China[J]. [International Journal of Agricultural and Biological Engineering](#), 2020, 13(1): 29-41.
- [18] WANG Y, LI B M, LIANG C, et al. Dynamic simulation of thermal load and energy efficiency in poultry buildings in the cold zone of China[J]. [Computers and Electronics in Agriculture](#), 2020, 168: 105127.
- [19] WANG Y, ZHENG W C, TONG Q, et al. Reducing dust deposition and temperature fluctuations in the laying hen houses of Northwest China using a surge chamber[J]. [Biosystem Engineering](#), 2018, 175: 206-218.
- [20] 王阳, 郑炜超, 李绚阳, 等. 西北地区纵墙湿帘山墙排风系统改善夏季蛋鸡舍内热环境[J]. [农业工程学报](#), 2018, 34(21): 202-207.
- [21] WANG Y, ZHENG W C, LI B M, et al. A new ventilation system to reduce temperature fluctuations in laying hen housing in continental climate[J]. [Biosystem Engineering](#), 2019, 181: 52-62.
- [22] 王阳. 健康高效养鸡稳温机理及热环境调控规律研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.
- [23] WANG X S, WU J G, YI Q Y, et al. Numerical evaluation on ventilation rates of a novel multi-floor pig building using computational fluid dynamics[J]. [Computers and Electronics in Agriculture](#), 2021, 182: 106050.
- [24] 沈盼, 高岩, 张杰, 等. 现代化猪舍降低废气排放措施的应用与研究[J]. [中国猪业](#), 2020, 15(1): 84-86.
- [25] QIN C, WANG X S, ZHANG G Q, et al. Effects of the slatted floor layout on flow pattern in a manure pit and ammonia emission from pit: A CFD study[J]. [Computers and Electronics in Agriculture](#), 2020, 177: 105677.
- [26] 李修松, 叶章颖, 李保明, 等. 不同通风模式对保育猪舍冬季环境的影响[J]. [农业机械学报](#), 2020, 51(3): 317-325.
- [27] 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.
- [28] ZHAO W Y, WANG M Z, LI H, et al. Field test and economic analysis of energy-saving renovation for an old nursery pig building in Beijing, China[J]. [Applied Engineering in Agriculture](#), 2020, 36(5): 619-628.
- [29] 曹哲, 施正香, 安欣, 等. 基于热成像技术的牛舍围护结构传热阻测试方法[J]. [农业工程学报](#), 2017, 33(24): 235-241.
- [30] 鲁煜建, 王朝元, 赵浩翔, 等. 东北地区奶牛夏季热应激对其行为和产奶量的影响[J]. [农业工程学报](#), 2018, 34(16): 225-231.
- [31] 严格齐, 李浩, 施正香, 等. 奶牛热应激指数的研究现状及问题分析[J]. [农业工程学报](#), 2019, 35(23): 226-233.
- [32] 谭鹤群, 李鑫安, 艾正茂. 基于可调谐吸收光谱的畜禽舍氨气浓度检测[J]. [农业工程学报](#), 2020, 36(13): 186-194.
- [33] 李帅, 李丽华, 邢雅周, 等. 基于 LoRa 的养鸡场有害气体监测系统设计[J]. [中国家禽](#), 2020, 42(9): 68-73.
- [34] 董丽媛, 李丽华, 白雪洁, 等. 基于 AGA-ELM 的鸡舍环境因子对蛋鸡生产影响预测研究[J]. [中国家禽](#), 2020, 42(10): 58-64.
- [35] 丁露雨, 鄂雷, 李奇峰, 等. 畜舍自然通风理论分析与通风量估算[J]. [农业工程学报](#), 2020, 36(15): 189-201.
- [36] DING L Y, LI Q F, WANG C Y, et al. Determination of the mass transfer coefficient of ammonia emissions from dairy open lots using a scale model[J]. [Biosystem Engineering](#), 2020, 190: 145-156.
- [37] LI Q F, YAO C X, DING L Y, et al. Numerical investigation on effects of side curtain opening behavior on indoor climate of naturally ventilated dairy buildings[J]. [International Journal of Agricultural and Biological Engineering](#), 2020, 13(5): 63-72.
- [38] 关金森. 一种自走式撒料机: CN202652977U [P]. 2013.
- [39] 孙鹏. 围产期奶牛饲养管理关键技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020.
- [40] 郑姗姗, 罗清尧, 杨亮, 等. 一种自调节奶水配比的猪仔补奶机: CN211268105U [P]. 2020.
- [41] ZHENG W, NI L, HUI X, et al. Optimization of slightly acidic electrolyzed water spray for airborne culturable bacteria reduction in animal housing[J]. [International Journal of Agricultural and Biological Engineering](#), 2016, 9(4): 185-191.
- [42] NI L, CAO W, ZHENG W, et al. Reduction of microbial contamination on the surfaces of layer houses using slightly acidic electrolyzed water[J]. [Poultry Science](#), 2015, 94(11): 2838-2848.
- [43] ZHENG W, LI Z, SHAH S B, et al. Removal of ammonia and airborne culturable bacteria by proof-of-concept wind break wall with slightly acidic electrolyzed water spray for a layer breeding house[J]. [Applied Engineering in Agriculture](#), 2016, 32(3): 393-399.
- [44] XIE Q J, NI J Q, BAO J, et al. A thermal environmental model for indoor air temperature prediction and energy consumption in pig building[J]. [Build Environment](#), 2019, 161: 106238.
- [45] WANG H, ZENG Y Q, PU S H, et al. Impact of slatted floor configuration on manure drainage and growth performance of finishing pigs[J]. [Applied Engineering in Agriculture](#), 2020, 36(1): 89-94.
- [46] 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.
- [47] 刘安芳, 阮蓉丹, 李厅厅, 等. 猪舍内粪污废弃物和有害气体减量化工程技术研究[J]. [农业工程学报](#), 2019, 35(15): 200-210.
- [48] 阮蓉丹, 曾雅琼, 蒲施桦, 等. 不同机械干清粪频次对生长猪舍内环境和粪污排放的影响[J]. [中国畜牧杂志](#), 2019, 55(8): 126-131.
- [49] 胡振楠, 孙红敏, 李晓明, 等. 基于加速度传感器的猪舍

- 刮粪板运行状态监测装置设计与仿真[J]. 农业与技术, 2019, 39(17): 18-22.
- [50] 郭小龙, 王锐, 王先伟. 畜禽舍的养殖环境控制自动化系统研究与实现[J]. 畜禽业, 2019, 30(12): 30.
- [51] 王先伟, 李蕊蕊. 规模化养殖场畜禽粪污处理途径探究[J]. 农业科学, 2020(5): 179-180.
- [52] 陈洪伟, 孙国安, 薛龙, 等. 一种刮粪板整体涨紧装置: CN209299969U [P]. 2019.
- [53] CUAN K X, ZHANG T M, HUANG J D, et al. Detection of avian influenza-infected chickens based on a chicken sound convolutional neural network[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 178: 105688.
- [54] FANG C, HUANG J D, CUAN K X, et al. Comparative study on poultry target tracking algorithms based on a deep regression network[J]. *Biosystem Engineering*, 2020, 190: 176-183.
- [55] KANG X, ZHANG X D, LIU G. Accurate detection of lameness in dairy cattle with computer vision: A new and individualized detection strategy based on the analysis of the supporting phase[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(11): 10628-10638.
- [56] 康熙, 张旭东, 刘刚, 等. 基于机器视觉的跛行奶牛牛蹄定位方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(S1): 276-282.
- [57] 张旭东, 康熙, 马丽, 等. 基于热红外图像的奶牛乳房炎自动检测方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(S1): 248-255.
- [58] ZHANG X D, KANG X, FENG N N, et al. Automatic recognition of dairy cow mastitis from thermal images by a deep learning detector[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 178: 105754.
- [59] ZHANG Y Q, CAI J H, XIAO D Q, et al. Real-time sow behavior detection based on deep learning[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 163: 104884.
- [60] 初梦苑, 刘刚, 司永胜, 等. 基于三维重建的奶牛体重预估方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 378-384.
- [61] 张馨月, 刘刚, 经玲, 等. 基于点云精简的奶牛背部体尺测点自动提取方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(S1):

267-275.

- [62] 冯宁宁, 刘刚, 张彦娥, 等. 基于 EMD 的奶牛动态称量算法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(S1): 305-312.
- [63] 任晓惠, 刘刚, 张淼, 等. 基于支持向量机分类模型的奶牛行为识别方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(S1): 290-296.



李保明, 博士, 中国农业大学二级教授, 博士生导师。现任农业农村部设施农业工程重点实验室学科群主任, 北京市畜禽健康养殖环境工程技术研究中心主任, 中国农业工程学会畜牧工程分会理事长, 中国畜牧业协会畜牧工程分会执行会长, 国际动物环境与福利研究中心 (International Research Center on Animal Environment and Welfare) 主任。国家蛋鸡产业技术体系生产与环境控制研究室主任、岗位科学家, 国家“十三五”重点研发计划“畜禽养殖智能设备与信息化技术研发”项目首席。主要研究方向: 设施农业工程工艺与环境控制、畜禽健康环境与福利养殖工程、畜禽智能化养殖技术与装备。发表学术论文 340 余篇, 出版专著和教材 10 部, 获授权发明专利 30 余件。获全国农业科研杰出人才, 全国优秀科技工作者荣誉称号; 获国家科技进步二等奖 1 项、省部级科技进步奖 9 项; 国家级教学成果奖 1 项、省部级教学成果奖 3 项。2019 年获美国农业与生物工程师学会亨利吉斯建筑与环境奖-ASABE Henry. Giese Structures and Environment Award, 成为该奖项设立 60 年来的首位亚洲获奖学者 (该奖项由专家提名并经评委会评审, 每年在全球范围内遴选 1 名获奖者)。

【责任编辑 周志红】