

杨亮, 王辉, 陈睿鹏, 等. 智能养猪工厂的研究进展与展望 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(1): 13-23.
YANG Liang, WANG Hui, CHEN Ruipeng, et al. Research progress and prospect of intelligent pig factory[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(1): 13-23.



智能养猪工厂的研究进展与展望

杨 亮¹, 王 辉¹, 陈睿鹏¹, 肖德琴², 熊本海¹

(1 中国农业科学院 北京畜牧兽医研究所/动物营养学国家重点实验室, 北京 100193; 2 农业农村部
华南热带智慧农业技术重点实验室/华南农业大学 数学与信息学院, 广东 广州 510642)

摘要: 工厂化养猪是畜牧业现代化的重要组成部分, 是中国养猪业发展的必然趋势。中国养猪业面临着能繁母猪生产力水平低、健康管理水平低、智能设备利用率低、养殖成本高等产业突出问题。本文从猪群福利化健康养殖工艺、猪舍空气净化技术、猪只生长与健康状态感知技术、以及猪只精准饲喂和养殖机器人等智能作业装备 4 个方面, 分析了智能养猪工厂建设中工艺、技术、装备的研究和发展现状, 并对今后智能养猪工厂建设的重点方向进行了展望, 以期为中国智能养猪工厂的创制提供参考。

关键词: 智慧农业; 生猪养殖; 养殖工艺; 空气净化; 健康感知; 智能装备

中图分类号: S828; S818.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)01-0013-11

Research progress and prospect of intelligent pig factory

YANG Liang¹, WANG Hui¹, CHEN Ruipeng¹, XIAO Deqin², XIONG Benhai¹

(1 Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory of Animal Nutrition, Beijing 100193, China; 2 Key Laboratory of Smart Agricultural Technology in Tropical South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/College of Mathematics and Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Factory pig farming is an important part of the modernization of animal husbandry and the inevitable trend of the development of pig industry in China. The pig industry in China is facing the outstanding problems of low productivity level, low health management level, low utilization rate of intelligent equipment and high breeding cost. In this paper, we analyzed the research and development status of technology and equipment in the construction of intelligent pig factory from four aspects: Pig welfare and healthy breeding technology, pig house air purification technology, pig growth and health perception technology, pig precision feeding and breeding robot, and looked forward to the key direction of intelligent pig factory construction, so as to provide a reference for the creation of intelligent pig factory in China.

Key words: Smart agriculture; Pig breeding; Breeding technology; Air purification; Health perception; Intelligent equipment

受益于工业和科学技术的发展, 20 世纪 50 年代工厂化养猪模式出现并在世界各国发展, 中国工厂化养猪起步晚了近 20 年^[1]。工厂化养猪, 顾名思义就是用工业生产方式养猪, 它是畜牧业现代化的

收稿日期: 2022-10-08 网络首发时间: 2022-10-18 11:05:40
首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20221017.1816.004.html>

作者简介: 杨 亮, 研究员, 博士, 主要从事智慧畜牧业研究, E-mail: yangliang@caas.cn; 通信作者: 肖德琴, 教授, 博士, 主要从事农业物联网研究, E-mail: deqinx@163.com; 熊本海, 研究员, 博士, 主要从事畜牧信息与装备研究, E-mail: xiongbenhai@caas.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFD2000804, 2021YFD2000802); 北京市数字农业创新团队项目 (BAIC10-2022)

重要组成部分，也是中国养猪业发展的必然趋势。近年来，在饲料资源趋紧^[2]、养殖环境监管严格^[3]以及非洲猪瘟常态化^[4]背景下，中国养猪业产业结构不断优化，散养户逐渐退出，工厂化养猪模式占比逐年提高，规模化、智能化、福利化饲养成为发展趋势^[5]。随着养殖规模的扩大，企业的饲料成本、兽药疫苗支出及人工费用降低，养殖成本出现明显下降的趋势，出栏猪成本与规模呈现负相关^[6]；管理难度加大，迫切需要实行精细化管理，达到最大限度的规模效益。与丹麦等养猪业发达国家相比，中国养猪业仍存在着能繁母猪生产力低^[7]、健康问题突出、死淘率高、智能设备利用率低^[8]、饲喂相对粗放等问题，导致养殖综合成本高、养猪业的“猪周期”问题日益凸显^[9]。为有效解决上述问题，优化传统养殖工艺和养殖环境，实现猪只生长及健康状态及时感知，研发精准饲喂、养殖机器人等关键技术与智能装备，构建绿色、高效、智能的养猪工厂，助力中国现代生猪养殖技术体系的构建具有重要的意义。本文从猪群福利化健康养殖工艺、猪舍空气净化技术、猪只生长及健康状态感知技术、猪只精准饲喂和养殖机器人等智能作业装备 4 个方面综述智能养猪工厂建设中涉及的工艺、技术、装备研究和发展现状，以期为中国智能养猪工厂的创制提供参考。

1 猪群福利化健康养殖工艺

福利化健康养殖工艺对提高猪只适应性和发挥其最佳生产潜能发挥着重要作用。世界上典型的养猪工艺模式包括定位饲养、舍饲散养、圈栏饲养、厚垫料饲养和户外饲养等。为提高猪场建设土地利用效率，集约化规模养猪场多采用定位饲养模式，长期处于较小的圈舍环境中，影响猪只体内器官的正常生理活动，极易造成身体发育的不整齐、生殖能力下降以及病原的繁殖和传播，为猪场生产管理和防疫工作带来更大的困难^[10]。20 世纪 70 年代，国际上出现了动物福利养殖的概念，通过养殖工艺来实现动物的福利健康养殖。从早期的欧洲母猪厚垫草舍饲散养系统、舍内妊娠母猪电子饲喂站散养系统，到近期的丹麦等国家的户外有机养猪系统、德国的诺廷根舍饲散养模式、日本的自然养猪法等，目的是使猪只、大自然环境及养殖设备融为一体，充分发挥猪只的繁殖和生产性能。上述养殖模式虽然满足了猪只的福利要求，但只适合在地广人稀、养殖规模较小的国家推广应用，不符合中国国情。中国的土地资源日趋紧张、饲料资源紧缺程度

不断加剧，加之南北方气候条件迥异，社会经济条件差异较大，导致生猪的健康养殖工艺模式多样化。特别是随着养殖规模化、标准化程度的不断提升以及大数据、物联网技术的快速发展，工厂化福利健康养殖模式发生着深刻的变化：从种猪的限位栏饲喂到圈舍内智能散养饲喂，从按猪只的生理生长阶段划分猪群类别的工厂化流程养殖到立体楼房智能养猪、发酵床养猪等。只有不断探索适合中国国情、满足动物健康养殖需求与投资者愿意、符合行业政策与国家需求的绿色健康与智能高效的养殖模式^[11]，才能有利于世界养猪模式的新发展。

目前，中国猪健康养殖工艺模式主要采用的是舍饲散养工艺模式。舍饲散养工艺模式采用舍饲散养方式，并配置合理的功能区域。在猪舍内配置躺卧区、采食区、饮水区、排泄区及活动区等功能区域；同时从动物福利角度配置满足猪只行为需求的福利性设施，改善舍内的饲养环境，保证猪只在圈栏内的活动需求，目的是实现猪群的高效管理，减少猪只异常行为的发生。基于不同阶段猪的营养与饲养环境的不同需求，后备母猪、初产哺乳母猪与经产哺乳母猪分别有对应的适宜的营养供给模式；根据母猪的胎次，提供猪群饲养管理技术与饲料供给技术；在仔猪饲养工艺方面，采用缓解仔猪断奶综合征，提高断奶仔猪成活率的饲养工艺技术和补水补液技术。受非洲猪瘟爆发的影响，猪肉价格持续上涨，国家采取多种及时、有效的措施来稳定生猪生产和猪肉保供稳价，允许使用楼房养殖工艺实现规模养殖。2020 年，生猪集约化养殖龙头企业牧原公司应用楼房式养猪工艺，在饲料供给、生猪饲养、疫病防控和粪污处理等方面进行改进，目标是实现基于机械化、自动化的人工智能养猪^[12]。随着非洲猪瘟进入常态化控制阶段，楼房养猪用地面积更少、生物安全性更高，养猪工艺更精细、更科学，集约化程度更高^[13]。猪只规模化养殖中，养殖工艺不合理可能违背猪只的自然生长习性，扰乱机体的代谢稳态，导致猪只的生产和繁殖性能下降。限位栏饲养可以有效减少母猪的争斗行为、降低流产风险，也便于饲养管理、发情鉴定等操作，但是由于运动空间不足，容易引起母猪的约束应激，导致仔猪初生质量降低、发病率和死亡率升高^[14]。母猪散养电子饲喂站可以改善猪只体况，提高母猪生产寿命^[15]，但是存在着弱势猪采食能力低而被迫夜间采食的现象^[16]，破坏了猪只正常的生物节律，从而影响其健康和生产性能。图 1 为浙江大学研发的 7 种福利化健康养殖工艺。在整体福利健康保障措施方



图 1 猪群福利化健康养殖工艺

Fig. 1 Pig welfare and healthy breeding technology

面,加载的智能化技术包括智能水线、智能料线、智能消杀和智能清粪,根据猪舍建筑结构,养猪工艺分为平房工厂化和楼房工厂化;在局部福利健康保障措施方面,加载的智能化技术包括智能环控、智能玩具、智能分群和智能饲喂,根据不同养殖阶段,分为妊娠母猪小群散养/限位栏饲养、哺乳母猪产床一体化饲养、保育猪小群散养和生长育肥猪大群散养。

如何评价养殖工艺是否符合猪只生理健康和福利养殖要求,已成为国内外学者关注的热点。目前,国内生猪养殖工艺评估体系研究较少,指标体系覆盖不够全面。多属性决策是评估体系的核心,层次分析法模型能够实现有效便捷地处理复杂决策问题。杨泓禹^[17]针对传统层次分析法模型存在的难以处理决策过程中的不确定性的问题,融合主观感觉判断矩阵与区间数层次分析法、构建区间数主观感觉互补矩阵;针对判断矩阵一致性不通过的问题,构建了新的层次分析法区间数一致性修正模型;建立了 7 个准则层指标及 30 个指标层指标,构建了具有层次结构的生猪养殖标准化评估体系,在猪场验证了模型的有效性,对养殖工艺的判定具有一定的指导意义。王金龙等^[18]基于专家经验和贝叶斯网络理论,构建了生猪养殖标准化工艺模型,通过对比分析贝叶斯网络拓扑结构与基于专家经验建立的贝叶斯网络模型,发现经过参数学习的贝叶斯网络模型具备有效性,可以在一定程度上代替专家经验,指导生猪养殖管理、节省劳动力、提高生猪养殖管理的水平。由于猪只行为和生理活动存在节律性,因此根据猪只单一时刻的行为表现和生理指标不能客观准确地评价养殖工艺的好坏。为此,祝梦琦等^[19]通过分析生物节律对畜禽代谢、健康、

生产和繁殖性能的影响,养殖工艺及饲养管理方式与生物节律的关系,提出了畜牧业生产中可以利用生物节律评价不同养殖工艺和饲养管理方式的优劣或适宜性,为优化或开发新型养殖工艺和精准化饲养管理技术提供了理论依据。

2 猪舍空气净化技术

猪舍空气净化技术主要分为物理法、化学法和组合法。物理法主要包括滤网过滤、通风、紫外线辐射消毒、等离子体消毒等,化学法主要包括光催化消毒、过氧乙酸、二氧化氯、甲醛、臭氧等,组合法指的是物理与化学方法的结合。宁芳芳等^[20]试验发现,使用光触媒空气净化器能够有效降低空气中氨气含量、颗粒物含量和微生物数量,从而改善猪舍空气质量,提高猪只生长性能。李玉冰等^[21]对猪场消毒通道使用臭氧净化技术、超声波雾化、紫外杀菌灯这 3 种消毒方式,发现臭氧净化技术对消毒通道内细菌的消杀效率超过 90%,且使用 30 min 后有较好的持续效率。于观留等^[22]对猪舍使用固体甲醛熏蒸进行消毒处理,发现固体甲醛熏蒸方法可有效减少猪舍内气载需氧菌及大肠埃希菌含量,对粒径较小的气溶胶病毒消杀效果更好。吴媛媛^[23]采用光等离子体净化装备,分别对夏、冬季妊娠后期母猪及哺乳母猪猪舍内环境参数及母猪血液、仔猪脐带血免疫指标进行测定,获取猪舍空气质量实时动态数据,发现在畜舍安装净化器可提高母猪的免疫能力并维护仔猪的健康生长,而通风对仔猪生长不利。图 2 为浙江大学研发的猪舍空气净化技术。在舍内环境净化方面,主要采用的处理技术包括低温等离子技术、吸附催化技术及电解

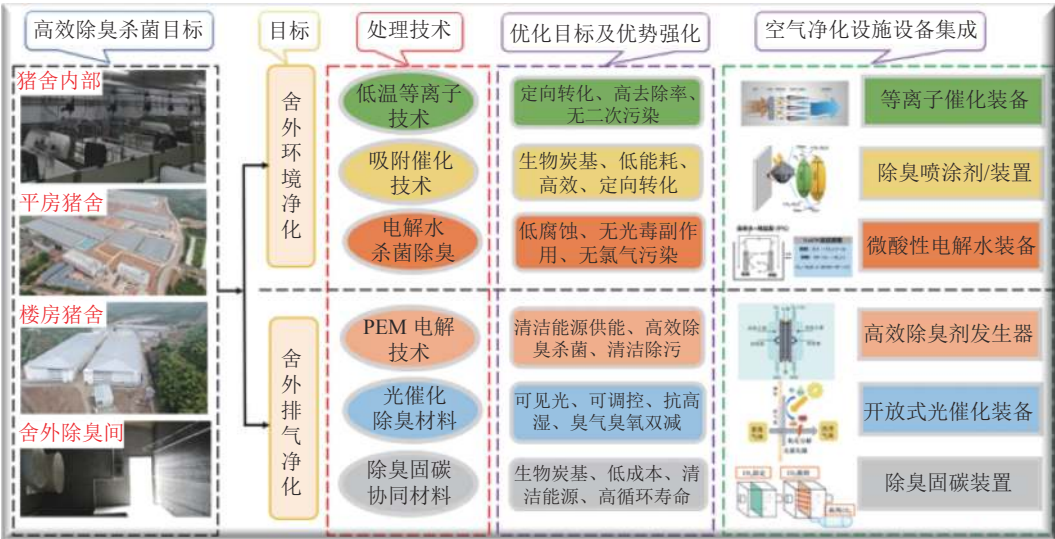


图 2 猪场空气净化技术

Fig. 2 Pig house air purification technology

水杀菌除臭技术；在舍外排气净化方面，主要采用的处理技术包括 PEM 电解技术、光催化除臭技术及除臭固碳协同技术。在上述技术的基础上，经优化后集成为配套的空气净化设施设备，图 3 为开发的猪舍环境空气质量智能化管控平台。

为提高规模化猪舍废气净化的效率，刘喜佳等^[24]对采用酸洗喷淋法的卧式废气净化系统开展试验研究，探究系统中通风速度、酸洗泵频率、喷淋方向等关键工艺参数对除氨效率的影响，发现喷淋方向对除氨效率有显著影响，错流喷淋方向的除氨效率分别比顺流和逆流方向高 6.87% 和 18.88%；通风风速的降低能提高除氨效率，当通风风速为 1 m/s、酸洗泵频率为 30 Hz 时，除氨效果最好，结果为环境净化系统的产品化设计提供了参考。

为探究主要成分为三氧化钨的杀菌除味剂和空气净化器共同作用的效果以及对断奶仔猪健康的影响，蔡剑锋等^[25]选择在试验组猪舍的栏杆、墙壁和地面喷涂新型杀菌除味剂并使用空气净化器，对照组猪舍不进行任何处理，结果发现试验组猪舍环境中气载需氧菌、NH₃、CO₂、粉尘含量均无下降趋势，而断奶仔猪生长性能指标和血清抗氧化指标均无显著差异，表明新型杀菌除味剂和空气净化器净化猪舍效果不明显，对断奶仔猪生长无负面影响。

针对楼房式养殖饲养密度大的特点，余德勇等^[26]设计了一种通风与臭气净化相结合的新型通风工艺。采用湿帘-定速风机模式实现夏季高效通风降温，采用檐下通风小窗-吊顶通风窗-变频风机模式保证冬季通风效果并最大程度减少舍内热量损失，



图 3 猪舍环境空气质量智能化管控平台

Fig. 3 Intelligent management and control platform for pig house ambient air quality

采用添加生物菌剂的水循环过滤猪舍臭气, 改善养殖场区空气环境。智能化控制工艺实现了系统的精准控制, 有效提高了养殖场的经济效益。

为解决规模化猪舍废气排放造成的环境污染问题, 王昱等^[27]设计了一种猪舍废气复合净化系统, 该系统采用化学法与水洗法相结合, 通过 PLC 控制系统实时采集净化系统内的 pH、电导率、液位和压差等动态环境数据, 智能控制洗涤泵启停和电磁阀通断, 自动完成供水、加酸、喷淋和排废, 对主要污染成分氨气的平均去除率达 85%。针对猪舍废气净化系统的填料结构, 王昱等^[28]提出一种兼顾机械性能与净化空间需求的结构设计, 将填料结构视为一种周期性结构, 以填料结构的最大等效体积模量和最大等效渗透率为优化目标, 以等效孔隙率为约束条件, 通过 Hashin-Shtrikman 属性边界得到等效体积模量及等效渗透率的极值, 运用帕累托优化法求得最优解, 可为猪场废气净化系统填料结构设计提供参考。

3 猪只生长及健康状态感知技术

猪只生长及健康状态信息智能感知技术是智能化养殖过程的核心技术。与传统人工观察方式获取猪只信息相比, 智能感知技术具有非侵入性、抗污染性、可拓展性等优点^[29], 能有效提高动物福利, 更符合绿色高效智能养猪工厂的发展需要。图 4 为华南农业大学研发的猪只生长及健康状态感知技

术, 通过搭载温湿度、光照、二氧化碳含量、氨气含量等传感器实时监测猪场环境参数, 通过搭载热红外成像传感器实时监测猪只体温, 通过搭载 2D/3D 摄像头及声音采集器实时监测猪只行为, 实现猪只点数、猪只体征信息采集等。图 5 为华大智能养殖公司研发的生猪健康养殖智能化监测预警平台, 实时显示养殖基地内生猪养殖信息, 具体信息包括猪只存栏、猪只采食饮水情况、猪只健康体况评分等, 用户可以查看今日预警猪只和今日预警事件, 对异常状态进行及时处理。

3.1 母猪体况评分

母猪体况评分是母猪繁殖性能的一项重要指标, 也是国际公认的反映母猪个体繁殖能力的最优评价方式, 传统评分方法主要通过人工观察母猪臀部形态, 或手动测量母猪背膘厚进行评分, 存在误差大、效率低等缺点, 无法满足现代生产需求, 逐渐被无接触式的母猪体况评分方法所取代。滕光辉等^[30]使用 Kinect 传感器获取母猪臀股的三维图像进行分析处理, 以曲率半径作为主要参数建立母猪体况估测模型, 准确率达 91.7%, 表明基于三维重构技术的 Kinect 传感器能够实现在饲养管理过程中对母猪体况的无接触式检测。

袁红^[31]采用 U-Net 网络模型对母猪图像进行语义分割, 运用 Open CV 中的多种轮廓特征提取算法和自设计算法对母猪臀部轮廓进行特征提取, 对配种阶段不同体况的母猪繁殖性能情况进行单

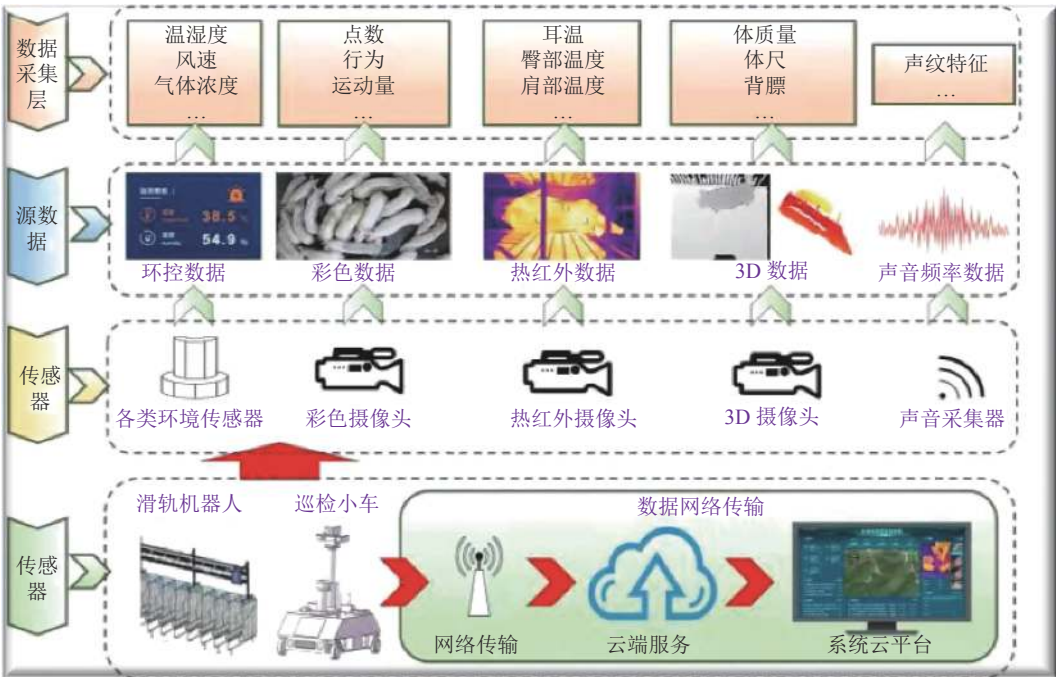


图 4 猪只生长及健康状态感知技术

Fig. 4 Pig growth and health perception technology

法, 构建基于径向基函数 (Radial basis function, RBF) 神经网络的种猪体质量预测模型, 消除了线性回归分析中自变量的共线性问题, 预测效果优于线性回归模型。李卓^[41]开展了基于立体视觉技术的生猪体质量估测研究, 优选适合机器视觉检测和人工验证的 5 个体尺, 建立基于体尺主成分的幂回归模型^[42], 通过验证发现平均相对误差为 2.02%。

为快速准确、无应激地获取育肥猪体质量数据, 张建龙等^[43]采用深度卷积网络技术, 发现改造后的 DenseNet201 模型体质量估测效果最好, 平均相对误差为 1.57%; 模型的平均估测时间为 0.16 s, 适用于对猪只体质量获取速度要求较高的场景, 如育肥猪分群系统、母猪饲喂站等。为控制育肥猪出栏时的体质量差异, 张建龙等^[44]开发了育肥猪分群系统, 利用机器视觉技术和卷积神经网络模型对猪只体质量进行估测, 可以替代传统的人工调栏, 节省了人力成本, 为母猪饲喂站、种猪测定站等智能化养猪设备的研发提供了参考。

3.4 猪只健康识别

生猪的健康识别及重大疾病预警技术成为近年研究的热点, 涌现出诸多生猪健康感知技术及设备^[45-47]。从设备是否与猪体接触角度出发, 现有生猪健康识别技术可分为接触式与非接触式 2 类。接触式感知主要通过穿戴心率、温度及加速度传感器等感知设备采集生猪心率、运动量及体温等数据。非接触式感知则主要通过红外热像仪、声音采集仪、高清摄像头等仪器, 采集养殖现场的热红外图像、声音数据、排泄物图像及动物行为视频, 并通过视频分析、深度学习等技术对猪只个体进行定位, 设计相关算法从中获取猪只体温、体尺、体质量、活动轨迹、运动量、声音、异常排泄物和异常行为等健康相关数据。通过连续感知猪只的生理体征, 尤其体温的变化规律, 可对猪瘟、蓝耳病等主要传染性疾病作出辅助预警。

从设备是否固定角度出发, 现有生猪健康感知的装备主要有固定型及巡检型 2 种。固定型生猪健康感知装备利用部署在猪栏合适位置的数据采集仪器, 采集对应栏舍及猪只个体的信息。巡检型生猪健康感知装备的主要形式为空中轨道式及地面巡检机器人, 这些机器人移动采集多栏舍内猪只的健康数据, 特别是从群体中寻找生理特征异常的个体, 一旦确认后就可以做到“定位移除”, 确保生物安全。

体温是猪只健康状态的重要生理指标, 及时获取异常猪只体温显得尤为重要, 以红外热成像技术

为代表的测温技术得到了广泛的应用。Ricci 等^[48]应用热成像技术, 研究母猪和仔猪的体表温度, 对母猪每隔 7 d 收集 1 次热成像图像, 并随机收集每窝 5 头仔猪的热成像图像, 发现使用红外热成像可以识别猪最热和最冷的表面体区域, 成为评估猪只福利的工具。Da Fonseca 等^[49]使用机器学习和旁一致性逻辑开发了 1 种模型, 基于红外皮肤温度预测仔猪的压力, 可高精度地检测口渴和冷应激条件。Martínez-anilés 等^[50]开发了 1 种新型智能系统, 嵌入耳标的生物传感器和加速度计可在感染非洲猪瘟的减毒菌株前后捕获数据, 并使用摄像机 24 h 监测猪只的体温和运动情况, 检测到发热前或同时出现体温升高和运动量减少, 该系统可用于实时监测猪群, 大大降低了定期取样的财力和后勤成本, 并增加了早期发现感染的机会。

4 智能作业装备

4.1 精准饲喂

在全球粮食价格^[51]及劳动力价格^[52]持续攀升的背景下, 智能养猪工厂如何满足猪只营养的精准供给^[53], 实现猪只的精准饲喂迫在眉睫。精准饲喂是现代规模化猪场的一项系统工程, 涉及饲料原料的选用、饲料养分的测定、饲料的加工存储、饲料的投喂等环节, 是饲料、饲喂和饲养三者的有机结合^[54]。

在妊娠母猪精准饲喂装备方面, 妊娠期是母猪生长发育的特殊生理阶段, 养殖管理水平直接影响着妊娠母猪的繁殖机能以及仔猪的健康生长^[55]。通过科学化管理, 实现妊娠母猪的精准饲喂, 可以有效提高仔猪的成活率, 提高养殖场的经济效益^[56]。图 6 为成都肇元公司研制的智能型妊娠母猪小群



图 6 妊娠母猪小群体精准饲喂站
Fig. 6 Precision feeding station for small group of pregnant sows

体精准饲喂站,具有自由运动饲喂、精确控制喂量、无需训练母猪、手机实时查看等特点,适用于 45 m² 的圈栏内,料斗可装 50~60 kg 饲料,满足 16~20 头妊娠母猪饲喂需求。王玉攀等^[57] 根据自由进出式妊娠母猪的限量饲喂、适量运动的生理特性,实现了对母猪个体的精准识别与精准投料,实现了针对妊娠母猪个体的精准饲喂,此外,有效增加了妊娠母猪的运动量,有利于提高母猪窝产健仔数,在我国规模化猪场具有广阔的应用前景。

在哺乳母猪精准饲喂装备方面,为满足母猪哺乳阶段的动态营养需求,甘玲等^[58] 开发了哺乳母猪精准饲喂装置及控制系统,可以根据母猪个体的体况实现个性化定时定量的精准饲喂。系统的供料机构采用雨刷电机驱动螺旋输送的方式,通过调节电机转速和转动圈数实现系统的精准下料;下料系统采用电阻式传感器及触碰开关分别监测料仓的液位及母猪的采食量,采用多次少量投料的方式减少饲料的浪费,与人工饲喂相比,可以有效提高哺乳母猪的采食量。

在育肥猪精准饲喂装备方面,我国现有规模化猪场存在饲料浪费导致养殖成本增加的问题^[59],如何开发育肥猪精准饲喂系统,实时监测生长育肥猪的生长状况,动态预测育肥猪的采食量和营养需要量,制定个性化饲喂方案,对缓解中国粮食进口压力,保障国家粮食安全具有重要的意义^[60]。图 7 为成都肇元公司研制的智能型保育猪/育肥猪小群体粥料饲喂机,采用不锈钢谐波双面投料式设计,可同时饲喂 40~60 头保育猪/育肥猪,能够实现猪只的自由采食。为满足育肥猪获得正常生长所需采食量并达到精准饲喂控制,杨亮等^[61] 设计了一种育肥猪

精准下料控制系统,系统使用双侧下料器,提高了猪群的采食效率;增设触碰开关和料位感应探针,既保证猪只正常采食,又避免饲料浪费;与进口设备比较,成本优势明显,比较适合在我国育肥猪场推广应用。

4.2 养殖机器人

随着科学技术的快速发展,机器人在工业等领域得到了广泛的应用^[62],在农业领域的应用还处于初级阶段^[63]。在机器人的研制过程中,底盘设计、定位技术及路径规划是研究的核心技术。在底盘设计方面,为适应规模化猪场中过道狭窄、道路纵横的状况,曾志雄等^[64] 设计了一款实现自主机器巡检作业的底盘结构,底盘的开发基于麦克纳姆轮,支撑框架采用铝型材的独立减震悬架系统,通过运动学分析及有限元仿真技术对底盘支撑框架进行计算发现,在满载状态下底盘框架最大等效弹性应变为 3.86×10^{-5} ,该底盘结构方案为行走式猪场巡检机器人的设计提供了技术参考。在定位技术方面,基于电机编码器的航位推算法可以实现短时间内的高精度定位,然而长时间、长距离的定位效果不好。如何基于猪场的养殖环境,研发误差小的高精度定位方法具有重要的意义和应用价值。为此,张杰^[65] 搭建了包括硬件及软件系统的巡检机器人平台,首先对轮子转向角、电机编码器和二维激光雷达进行误差分析和标定试验,其次对采集的激光数据进行滤波处理、特征分割和直线提取,有效提高了激光雷达扫描环境中点云的精准度;提出了基于二维激光雷达与人工路标匹配的定位方法,采用基于编码器和激光雷达的 EKF 数据融合算法进行巡检机器人的定位;验证试验表明该算法的定位精度高、稳定性强,适用于猪场环境。在路径规划方面,当北斗卫星信号消失时,猪场巡检机器人无法解析其坐标并进行实时定位。刘奎等^[66] 利用惯性测量单元 (Inertial measurement unit, IMU) 解决了北斗卫星信号消失时机器人的实时定位问题,通过 A* 算法来实现巡检机器人的路径规划。

在养殖机器人的场景应用方面,为实现生猪养殖环境的无人化检测,李嘉豪^[67] 开发了智能监控机器人系统,系统可同时检测养殖环境及生猪生长状态多维度信息,包括生猪姿态和声音数据的采集。为提高猪舍空气质量、降低工作人员的劳动强度,刘艳昌等^[68] 设计了 1 种基于机器人的猪舍空气质量智能监控系统,机器人利用空气采样装置和样本收集转盘,采集温湿度、NH₃ 含量、H₂S 含量、粉尘含量等环境参数和图像信息,为疫病预防和健康预



图 7 保育猪/育肥猪小群体粥料饲喂机
Fig. 7 Feeding machine for small group of piglets/ growing-finishing pigs

警提供数据支撑,系统性能稳定,具有较高的应用价值。针对中小型猪场存在的疫病防控难、环境检测成本高等问题,李嘉豪等^[69]设计了 1 套基于猪舍环境监控的环境感知机器人系统。系统采用卡尔曼滤波融合算法采集猪舍环境参数,实现多区域环境参数的准确检测;机器人系统基于熵值法的模糊综合算法模型评定猪舍环境优劣,解决猪舍环境突变造成的评定偏差问题,测试发现在 25.6℃ 环境下的检测误差为 0.19%,可以满足猪舍多区域环境参数准确检测的实际需求,基本实现了节省人力成本、减少环境污染的目的。针对规模化猪舍人工劳动强度大、重复作业多、疫病传播与防控等问题,赵文文等^[70]设计了猪舍消杀巡检机器人系统,融合基于 2D 激光雷达的即时定位与建图和超宽带技术,实现地图构建和实时定位;运用 Jetson Xavier NX 边缘计算单元进行视觉处理与识别算法的部署,实现猪只体温巡检;边缘计算单元依据终端指令进行决策控制,实现猪舍环境消杀,经测试发现在目标点开启消杀功能的准确率为 100%,猪舍内 CO₂ 含量、温度、湿度的相对误差分别为 0.04%、3.00% 和 2.10%,为猪舍巡检消杀少人化甚至无人化作业提供了技术与装备支撑。为了解决规模化猪舍内粪污堆积难于清理的问题,罗土玉等^[71]设计了一款智能清粪机器人,机器人融合了多传感器信息,利用即时定位与地图构建算法实现建图,利用运动控制和自适应蒙特卡罗定位功能实现机器人的导航和定位;为适应猪舍环境,机身选用不锈钢、刮粪板选用橡胶材质,材质耐腐蚀、耐碰撞、耐高温(低)温。

5 展望

本文分析了智能养猪工厂相关的工艺、技术、装备的研究现状。与传统养猪模式相比,工厂化养猪模式的发展促进了生猪养殖智能化水平的提升,提高了养殖的效率和效益。然而,中国工厂化养猪整体上还处于发展起步阶段,要实现生猪养殖绿色高效的智能化发展,今后需要从以下 3 个方面开展工作:

首先,建立智能养猪工厂建设的标准。2008 年,中国发布并实施了《规模猪场建设》的国家标准,规定了规模猪场的饲养工艺、建设面积、场址选择、猪场布局、建设要求、水电供应以及设施设备等技术要求,为规模猪场的新建、改建和扩建提供了依据。随着科学技术的快速发展,养殖工艺的不断改进以及楼房式养猪的兴起,原有标准已不能适应

现有要求,亟需结合福利化与健康养殖的要求修订原有标准内容,数字化表征建筑结构与区间布局、不同生长生理阶段猪只活动空间、饲养空间、饲喂标准等指标,制定符合我国不同区域、不同养猪设施结构、不同生猪生理阶段的福利化健康养殖工艺等规范,指导工厂化养猪模式的建设和推广,促进生猪养殖业的现代化发展。

其次,引进前沿的人工智能等技术。快速发展的人工智能应用于各行各业,取得了显著效果。猪脸识别技术、健康感知技术等规模化猪场得到了部分应用,取得了较好的效果,但是普及率很低,还需要大范围的推广应用,实现生猪生理生长及健康行为的无应激感知,实现对猪群个体或群体主要体征指标的无应激估测,基于机器视觉及深度学习技术实现对非洲猪瘟、蓝耳病等生猪主要传染病的监测预警。

最后,研发具有完全自主知识产权的智能装备。目前国内应用的智能装备主要依赖进口,国产设备比例偏低,为促进中国养猪业智能装备化的快速发展,亟需养殖设备制造企业的加入。要突破一般工业机器人对工作环境要求较高而无法应用于猪场环境的技术瓶颈,创制能够适用于猪舍作业环境、适应不规则空间的养殖机器人。饲喂机器人取代传统的人工饲喂,实现精准的营养供给;清粪、消毒机器人取代传统的人工作业,保障猪舍环境质量与生物安全;巡检机器人取代兽医日常观察,实现健康智能感知与预警,助推中国生猪养殖业从现有的依赖人工转向“机器换人”及“无人值守”的重大跨越。

参考文献:

[1] 朱尚雄,李锦钰.中国工厂化养猪创业回顾[J]. 猪业科学, 2007, 24(1): 92-94.

[2] 王超普,陈志永,张辉华.非常规饲料资源发酵饲料及在养猪生产中的应用[J]. 广东饲料, 2021, 30(10): 11-15.

[3] 王雁林.环保新形势下的畜牧业发展路径分析[J]. 中国畜禽种业, 2021, 17(8): 11-12.

[4] 丰崇林,赵正侶,周国泰,等.非洲猪瘟防控常态化下生猪疫病防控工作的思考[J]. 今日畜牧兽医, 2022, 38(9): 27-28.

[5] 唐欢.浅谈我国生猪福利养殖存在的问题及改善措施[J]. 猪业科学, 2022, 39(9): 80-82.

[6] 吕军,刘怡冰,翟丽维,等.不同规模工厂化养猪的成本及效率分析[J]. 中国畜牧杂志, 2020, 56(2): 169-173.

[7] 贾丽敏.猪场能繁母猪生产力低下原因分析[J]. 北方牧业, 2022(2): 30.

[8] 王怀禹.我国养猪智能化发展研究与应用进展[J]. 猪业

- 科学, 2021, 38(9): 38-41.
- [9] 王军, 朱曦, 陈浩东, 等. “猪周期”对生猪养殖的影响与应对[J]. 养殖与饲料, 2022, 21(9): 1-5.
- [10] 张向东. 规模猪场疫病防疫存在的问题与应对措施[J]. 畜牧兽医科技信息, 2022(7): 198-199.
- [11] 张振玲, 薛忠, 汪鹏旭. 农场动物福利与我国生猪健康养殖概述[J]. 家畜生态学报, 2018, 39(11): 6-10.
- [12] 刘书平, 张定安, 齐宝琪. 内乡县生猪产业及牧原公司发展情况调研报告[J]. 河南畜牧兽医(市场版), 2020, 41(6): 24-27.
- [13] 刘平云. 规模化楼房养猪模式工艺设计及优势探讨[J]. 中国农学通报, 2022, 38(24): 138-144.
- [14] OFTEN W, KANITZ E, TUCHSCHERER M, et al. Effects of prenatal restraint stress on hypothalamic-pituitary-adrenocortical and sympatho-adrenomedullary axis in neonatal pigs[J]. Animal Science, 2016, 73(2): 279-287.
- [15] CHAPINAL N, RUIZ DE LA TORRE J L, CERISUELO A, et al. Evaluation of welfare and productivity in pregnant sows kept in stalls or in 2 different group housing systems[J]. Journal of Veterinary Behavior, 2010, 5(2): 82-93.
- [16] BENCH C, RIOJA-LANG F, HAYNE S, et al. Group gestation housing with individual feeding: I: How feeding regime, resource allocation, and genetic factors affect sow welfare[J]. Livestock Science, 2013, 152(2/3): 208-217.
- [17] 杨泓禹. 基于 PSO-SA 算法与改进 AHP 的生猪养殖工艺评价模型研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2021.
- [18] 王金龙, 郭海, 袁帅, 等. 标准化生猪养殖工艺贝叶斯网络模型的构建[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2020(20): 16-20.
- [19] 祝梦琦, 郭瑶, 王强军, 等. 基于生物节律评价不同养殖工艺和饲养管理技术的动物福利和健康养殖问题[J]. 中国畜牧杂志, 2022, 58(10): 96-102.
- [20] 宁芳芳, 施正香, 荆凯凯, 等. 光触媒空气净化器对猪舍空气质量和猪生产性能的影响[J]. 家畜生态学报, 2015, 36(7): 47-50.
- [21] 李玉冰, 张凡建, 蔡泽川, 等. 臭氧净化技术对猪场消毒通道消毒效率的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2017, 60(14): 81-83.
- [22] 于观留, 柴同杰, 蔡玉梅. 固体甲醛熏蒸消毒对畜禽舍微生物气溶胶的影响[J]. 中国兽医学报, 2016, 36(10): 1718-1721.
- [23] 吴媛媛. 光等离子体净化器改善母猪舍空气质量及生产性能的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [24] 刘喜佳, 王昱, 孙超, 等. 机械通风猪舍卧式末端废气净化系统除氨效率试验研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(6): 90-95.
- [25] 蔡剑锋, 陈强强, 华卫东, 等. 新型杀菌除味剂和空气净化器对猪舍环境和断奶仔猪健康的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2022, 58(1): 242-247.
- [26] 余德勇, 汪雅, 余道伦, 等. 多层楼房式猪舍自动化通风与臭气净化系统的设计与应用[J]. 猪业科学, 2021, 38(6): 56-59.
- [27] 王昱, 吴鹏, 曾志雄, 等. 规模化猪舍废气复合净化系统设计及试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 344-352.
- [28] 王昱, 牟剑, 曾志雄, 等. 猪舍废气净化系统填料结构多目标拓扑优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 329-334.
- [29] 王晨阳, 任志强, 庞卫军. 智能感知技术在猪饲养管理中的应用研究进展[J]. 养猪, 2020(6): 82-88.
- [30] 滕光辉, 申志杰, 张建龙, 等. 基于 Kinect 传感器的无接触式母猪体况评分方法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 211-217.
- [31] 袁红. 基于图像识别技术的数字化母猪体况评分方法研究[D]. 天津: 天津农学院, 2021.
- [32] 孔商羽, 陈春雨. 基于多任务学习的猪只体重和体况评分预测[J]. 黑龙江大学学报, 2022, 13(2): 70-77.
- [33] 董力中, 孟祥宝, 潘明, 等. 基于姿态与时序特征的猪只行为识别方法[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 148-157.
- [34] TRAULSEN I, SCHEEL C, AUER W, et al. Using acceleration data to automatically detect the onset of farrowing in sows[J]. Sensors, 2018, 18(2): 170.
- [35] LIU L S, NI J Q, ZHAO R Q, et al. Design and test of a low-power acceleration sensor with bluetooth low energy on ear tags for sow behaviour monitoring[J]. Biosystems Engineering, 2018, 176: 162-171.
- [36] FLEMING S, CHICHLAWSKI M, BFRG B, et al. Dietary sialyllactose does not influence measures of recognition memory or diurnal activity in the young pig[J]. Nutrients, 2018, 10(4): 395.
- [37] 闫丽, 沈明霞, 姚文, 等. 基于 MPU6050 传感器的哺乳期母猪姿态识别方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 279-285.
- [38] KASHIHA M, BAHR C, OTT S, et al. Automatic weight estimation of individual pigs using image analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 107: 38-44.
- [39] KONGSRO J. Estimation of pig weight using a microsoft kinect prototype imaging system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 109: 32-35.
- [40] 刘同海, 李卓, 滕光辉, 等. 基于 RBF 神经网络的种猪体重预测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8): 245-249.
- [41] 李卓. 基于立体视觉技术的生猪体重估测研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- [42] 李卓, 毛涛涛, 刘同海, 等. 基于机器视觉的猪体质量估测模型比较与优化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 155-161.
- [43] 张建龙, 冀横溢, 滕光辉. 基于深度卷积网络的育肥猪体重估测[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(8): 111-119.
- [44] 张建龙, 庄晏榕, 周康, 等. 基于机器视觉的育肥猪分群系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 174-181.
- [45] 刘艳昌, 赵海生, 李泽旭, 等. 基于机器人的生猪健康养殖智能监控系统设计[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(8): 187-195.
- [46] 肖德琴, 刘勤, 陈丽, 等. 设施猪场生猪体温红外巡检系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 194-200.
- [47] 黎煊, 赵建, 高云, 等. 基于连续语音识别技术的猪连续

咳嗽声识别[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 174-180.

[48] RICCI G D, SILVA-MIRANDA K O D, TITTO C G. Infrared thermography as a non-invasive method for the evaluation of heat stress in pigs kept in pens free of cages in the maternity[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 157: 403-409.

[49] DA FONSECA F N, ABE J M, DE ALENCAR NÄÄS I, et al. Automatic prediction of stress in piglets(*Sus Scrofa*) using infrared skin temperature[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 168: 105148.

[50] MARTÍNEZ-AVILÉS M, FERNÁNDEZ-CARRIÓN E, LÓPEZ GARCÍA-BAONES, et al. Early detection of infection in pigs through an online monitoring system[J]. *Transboundary and Emerging Diseases*, 2017, 64(2): 364-373.

[51] 肖锐, 冯如雪, 李亚东. 新一轮全球粮食价格高涨分析[J]. *中国金融*, 2022(15): 58-59.

[52] 韩振兴, 常向阳. 劳动力价格上升、要素替代与要素投入结构变化: 来自中国大豆生产的证据[J]. *农业现代化研究*, 2021, 42(3): 507-516.

[53] 徐运杰, 王钊, 苏双良, 等. 妊娠晚期到哺乳早期母猪的生理和营养供给(上)[J]. *猪业科学*, 2022, 39(9): 77-79.

[54] 郭静, 孙华伟. 猪精准营养是猪群健康的“刚需”[J]. *猪业科学*, 2022, 39(7): 26-27.

[55] 毕可波. 妊娠母猪饲养的注意事项[J]. *中国动物保健*, 2022, 24(8): 61-62.

[56] 王文杰. 母猪妊娠期生理调控策略[J]. *猪业科学*, 2022, 39(6): 34-35.

[57] 王玉攀, 曹沛, 钱阵山, 等. 自由进出式妊娠母猪精准饲喂技术与装备研究[J]. *今日养猪业*, 2022(1): 104-107.

[58] 甘玲, 黄瑞森, 罗乔军. 母猪精准饲喂器机械结构及控制系统的设计[J]. *中国农机化学报*, 2018, 39(4): 41-43.

[59] 朱中平. 减少饲料物理浪费 降低养猪单位成本[J]. *今日养猪业*, 2022(4): 37-42.

[60] 王继光, 刘龙申, 郑卫江, 等. 生长育肥猪精准饲养系统研究进展[J]. *动物营养学报*, 2022, 34(5): 2752-2763.

[61] 杨亮, 龚进牧, 王辉, 等. 育肥猪精准下料控制系统设计与验证[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(7): 26-30.

[62] 赵衍彤. 工业机器人对我国第二产业就业的影响[J]. *中国市场*, 2022(23): 17-19.

[63] 张琛. 农业机器人的研究现状及未来发展方向展望[J]. *农业开发与装备*, 2022(6): 26-28.

[64] 曾志雄, 余乔东, 吕恩利, 等. 规模化猪场巡检机器人底盘设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(7): 55-62.

[65] 张杰. 猪场环境下巡检机器人定位技术的研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2020.

[66] 刘奎, 檀志远, 陈丰. IMU 辅助下猪场巡检机器人路径规划研究[J]. *安徽科技学院学报*, 2020, 34(4): 68-73.

[67] 李嘉豪. 猪舍环境智能巡检与监控机器人系统研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2022.

[68] 刘艳昌, 吴纪红, 徐加乐, 等. 基于机器人的猪舍空气质量智能监控系统[J]. *家畜生态学报*, 2018, 39(8): 65-71.

[69] 李嘉豪, 刘飞飞, 伍昕宇, 等. 面向猪舍环境的感知机器人系统和改进综合评价模型设计[J]. *东北农业大学学报*, 2021, 52(11): 67-79.

[70] 赵文文, 王海峰, 朱君, 等. 猪舍消杀巡检机器人系统研究与设计[J/OL]. *农业机械学报*, (2022-08-19) [2022-10-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20220818.1041.010.html>.

[71] 罗土玉, 高彦玉, 周昆乐, 等. 猪舍清粪机器人控制系统的设计与试验[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2022(12): 30-34.



杨 亮, 男, 1980 年 8 月生, 吉林四平人, 研究员。现任中国农业科学院北京畜牧兽医研究所智慧畜牧业创新团队骨干专家, 兼任中国畜牧兽医学会信息技术分会常务理事, 国家生猪产业技术创新

战略联盟理事。长期从事智慧畜牧业研究, 针对我国家畜养殖装备进口依赖度高、养殖过程数字化程度低等关键性技术难题, 建立了家畜饲养精准管理技术体系, 推动了我国主要畜产品质量安全可溯源体系建设; 创制了家畜智能精准饲喂装备, 全面提高了家畜个体控制性饲喂的投料精度, 减少了饲料浪费并综合提高饲料转化率, 降低了对环境的污染; 自主研发并实现产业化的家畜养殖智能设备技术及产品, 突破了国际同类产品的技术壁垒, 实现了我国养殖设施的升级换代。以第 3 完成人获国家科技进步二等奖 1 项, 获省部级一等奖 3 项、二等奖 3 项; 获发明专利 12 项; 以第一作者或通信作者在国内重要刊物发表论文 34 篇; 以主编/副主编出版著作 9 部; 主持“十四五”国家重点研发计划等课题 13 项。

【责任编辑 霍 欢】