

罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 8-17.
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8-17.

特约综述

我国智能农机的研究进展与无人农场的实践

罗锡文, 廖娟, 胡炼, 周志艳, 张智刚, 臧英, 汪沛, 何杰
(华南农业大学 工程学院/广东省农业航空应用工程技术研究中心/广东省农业人工智能重点实验室/
南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广东 广州 510642)

摘要: 智慧农业是现代农业的高级形式, 无人农场是实现智慧农业的重要途径, 智能农机是无人农场的物质支撑。本文以植物生产为例, 介绍了智能农机的智能感知、自动导航、精准作业和智慧管理 4 项功能在智慧农业中的地位和关键技术的研究进展; 介绍了华南农业大学集成相关智能农机创建水稻无人农场的实践和无人农场的 5 个特点, 包括耕种管收生产环节全覆盖、机库田间转移作业全自动、自动避障异况停车保安全、作物生产过程实时全监控和智能决策精准作业全无人。在 2020 年的中稻和 2021 年的早稻生产中, 水稻无人农场的稻谷产量均高于当地的平均产量, 表明了其巨大的发展潜力。无人农场的建设为解决“谁来种田”和“如何种田”的问题提供了重要途径。

关键词: 智慧农业; 智能农机; 自动导航; 精准作业; 无人农场; 信息技术; 水稻生产

中图分类号: S22; TP23; F323.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2021)06-0008-10

Research progress of intelligent agricultural machinery and practice of unmanned farm in China

LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, ZHOU Zhiyan, ZHANG Zhigang, ZANG Ying, WANG Pei, HE Jie
(College of Engineering, South China Agricultural University/Guangdong Engineering Research Center for Agricultural Aviation Application/Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural Artificial Intelligence/Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Smart agriculture is an advanced form of modern agriculture. Unmanned farm is an important way to realize smart agriculture, and intelligent agricultural machinery is the material support for unmanned farm. Took plant production of intelligent agricultural machinery in smart agriculture as an example, this paper introduced the research progress of status and key technology of four functions of intelligent agricultural machinery, including intelligent information sensing, automatic navigation, precision operation and smart management. South China Agricultural University integrated the intelligent agricultural machinery of rice production and built the unmanned rice farm. The five characteristics of unmanned rice farm are summarized as follows: 1) All production processes, including cultivation, planting, management and harvesting are unmanned; 2) Transfer

收稿日期: 2021-08-26 网络首发时间: 2021-09-09 12:18:48

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20210909.1038.002.html>

作者简介: 罗锡文(1945—), 男, 教授, 中国工程院院士, E-mail: xwluo@scau.edu.cn

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2019B020224001); 中国工程院战略咨询研究项目(2021-XBZD-13-43, 2019-ZD-5-17); 广东省科技计划(2021B1212040009)

between hangar and field, and operation are full-automation; 3) Avoiding obstacle and parking automatically at abnormal condition ensure the safety; 4) Real-time monitoring of all production process; 5) Unmanned intelligent decision-making and precision operation. In the production of medium rice in 2020 and early rice in 2021, the yield of rice in unmanned farm was higher than the average yield in traditional farm, which indicated that unmanned farm had great development potential. The construction of unmanned rice farm provides an important way to solve the problems of “who will farm” and “how to farm” in the future of China.

Key words: smart agriculture; intelligent agricultural machinery; automatic navigation; precision operation; unmanned farm; information technology; rice production

2012年中央一号文提出,要突出农业科技创新重点,在精准农业技术等方面取得重大突破^[1]。2017年中央一号文提出,要实施智慧农业工程^[2]。智慧农业是未来农业的发展方向,是现代农业的高级形式^[3]。智慧农业是以数据、知识和智能装备为核心要素,通过将现代科学技术与农业深度融合,实现农业生产全过程的数字化感知、智能化决策、精准化作业和智慧化管理的全新农业生产方式^[4]。当前,新一轮科技革命和产业变革正在兴起,信息技术、生物技术、新材料技术和新能源技术广泛渗透到农业领域,催生了一大批战略性新兴产业,农机装备先进制造、农业物联网、农业大数据和农业机器人等高新技术逐步应用到农业生产各个领域,智慧农业呈现出强劲的发展势头。无人农场是实现智慧农业的重要途径。无人农场以生物技术、智能农机和信息技术为支撑。生物技术为无人农场提供适应机械化作业的品种和栽培模式,智能农机为无人农场自动化作业提供装备支撑,信息技术为农机作业的精准定位、数据传输和无人农场的智慧管理提供支撑。无人农场采用4G/5G、物联网、大数据和人工智能等新一代信息技术远程控制各种智能农机,使之自主决策和自主作业,实现各个生产环节的智能化^[5]。智能农机具有智能感知、自动导航、精准作业和智慧管理4个功能,是无人农场的物质支撑,是农业机械的转型升级^[6]。毛泽东同志在1959年就提出农业的根本出路在于机械化。改革开放以来,经过40多年的发展,我国的农业机械化取得了举世瞩目的成就,为提高我国农业生产率作出了巨大贡献。目前,我国用不到世界10%的耕地生产了世界25%的粮食、养活了世界20%的人口^[7]。今天,随着我国农业农村现代化加快推进,对农业机械提出了更高的要求,提高农业机械的智能化水平成为必然选择,也是农业现代化的重要建设内容。国内外实践表明,提高农业机械化和智能化可以大幅度提高劳动生产率、资源利用率和土地产

出率。只有在智能农机的支持下,无人农场才能成为现实。

1 智能农机研究

1.1 智能感知

农作物生长环境、作物长势和作物病虫害信息是智能农机进行精准作业的依据^[8]。“星-机-地”是获取这些信息的主要技术,“星”指根据卫星影像分析获取所需要的各种农情信息,“机”指根据飞机或无人机获取所需要的各种农情信息,“地”指在地面用仪器直接获取所需要的各种农情信息。

1.1.1 作物生长环境信息 农作物生长环境信息的快速感知是实施精准农业中最为基本和关键的问题^[9],农作物生长环境信息包括土壤阻力、田面平整情况、土壤水分和土壤养分等信息^[10]。农田土壤中不同位置和不同深度的耕作阻力(土壤坚实度)差异较大,准确获取土壤的耕作阻力信息是进行精准耕整的重要依据。张利民等^[11]成功研制出带全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)的车载式土壤耕作阻力测定仪,采用GNSS定位信息,通过液压系统将圆锥仪(国际上通用的土壤坚实度测定仪)压入土壤,获取不同地块和同一地块不同位置、不同深度(精度可以达到0.5 cm)的耕作阻力。曾庆猛等^[12]研制出车载式可连续测定土壤耕作状况和含水量的测定仪。

田面平整情况是进行农田平整的重要依据^[13]。周浩^[14]和胡炼等^[15]采用水准仪、全站仪、地面激光扫描仪和无人载激光扫描仪快速采集农田平整度信息,研制出基于GNSS的农田三维地形实时采集系统,可在平整作业过程中快速精准获取田面的平整度信息。

土壤水分是影响作物生长的重要参数,Xiao等^[16]研制出既可在有水田田面有水时测定水层深度又可以在无水田田面无水时测定土壤水分的无线测

量系统,并可以根据田面/土壤中的水层/水分情况远程控制自动灌水和排水。

“庄稼一枝花,全靠肥当家”,土壤中氮、磷、钾的实时在线快速测定是世界难题,至今尚未取得实质性的突破,大都只能进行间接测量。孙建英等^[17]采用光谱测量技术,分析了东北黑土地和华北潮土的土壤参数和光谱特性,采用 GNSS 定位信息标志土壤的位置,通过实验室分析可准确给出 pH 以及氮、磷、钾和有机质含量的分布图,为精准施肥提供依据。Dong 等^[18]尝试采用激光诱导技术测定土壤中的氮素。

1.1.2 作物长势信息 作物长势信息主要包括作物生长状况(株高、叶面积指数、生物量、倒伏面积等)、养分胁迫和产量等信息,目前多采用高清数码相机、多光谱相机以及热像仪等传感器进行测定。杨贵军等^[19]研发了一套农业多载荷无人机遥感辅助小麦育种信息获取系统,可以实现冠层叶面积指数、作物倒伏面积和产量的高通量数据获取。孙红等^[20]基于作物在红光范围 660 nm 附近的光谱深吸收和近红外 850 nm 附近的光谱强反射特征,设计了一种采用主动光源的双波长便携式叶绿素含量检测装置,可以高效检测作物叶绿素含量。杨燕琼等^[21]采用卫星、高光谱仪和 3CCD 摄像机多信息融合技术,进行了水稻生产过程中的叶绿素含量、叶面积指数测定以及生物量和产量估测,估产方程的复相关系数均大于 0.92,精度均在 89% 以上。汪沛等^[22]采用无人机遥感平台获取水稻冠层图像,提出了基于矩形约束对低空多光谱图像存在的桶形畸变进行校正的方法,该校正方法解决了没有或缺少地面控制点的图像校正的困难。臧英等^[23]建立了基于标准种植比值法的水稻养分信息快速解析和施肥决策模型,通过与已有标准种植模型比对的方式生成施肥处方,该方法可以有效地减少施肥决策中对土壤肥力数据的依赖,提高了管理决策的效率。

在作物长势信息的快速获取和解析处理中,传统的航天、航空遥感技术存在气象影响因子多、周期长、分辨率低等问题,尤其在广东等南方地区,适合遥感的无云气象条件的窗口期更少。采用无人机进行作物长势信息的近地遥感获取,可弥补现有航天、航空遥感技术的不足。受载重量及滞空时间的限制,无人机挂载的遥感传感器要求质量轻、体积小。此外,受航空管制的影响,飞行高度通常比较低,这就决定了无人机低空遥感单张影像的覆盖面积难以达到传统航空航天的遥感覆盖面积。按照传统的做法,遥感监测 66.67 hm²,拼接前的影像采

集量可达 5 000 幅,普通图形工作站完成校正、拼接及解析等处理工作需要 5 h 以上。而作物的田间管理对农时要求通常时间比较短,需要即时生成作业处方图,遥感信息的获取和解析处理需要有较高的实时性才能满足实际生产的要求。Jiang 等^[24-25]研制的遥感传感器可以提供与专业级高光谱仪器和多光谱相机相近的反射率和辐射照度测量精度,在水稻长势信息解析中,该研究信息解析数据量可达 534.6 hm²/min,相比传统方法,长势专题图的生成速率和变量施肥处方图的决策效率大幅度提升。

1.1.3 作物病虫害草害信息 作物病虫害的早期准确监测是精准喷施作业的基础,对精准用药和早期防治具有重要意义。作物光谱反射特性与作物叶绿素含量具有高度相关性,当植株遭受病虫害时,可以通过光谱的方式进行检测。目前,常用的作物病虫害监测方式主要有光谱检测法、图像识别法和电子鼻检测法等。袁媛等^[26]利用 R 分量和中值滤波进行图像预处理,并采用支持向量机的方法对水稻纹枯病进行分类识别。刘又夫等^[27]对褐飞虱 *Nilaparvata lugens*(Stal) 诱导的水稻冠层热图像温度特征变异评估方法进行了研究,将水稻冠层的温度特征作为输入向量,对水稻受褐飞虱侵害状况测试集判断的精准率达到 87.15%。He 等^[28]采用深度目标检测网络对水稻局部图像中的褐飞虱进行检测和计数,提出双层 R-FCN 网络的褐飞虱检测和计数算法,可以有效提升算法的召回率,召回率可达 60.44%。邓向武等^[29]基于多特征融合的 DBN 模型和深度置信网络对稻田苗期杂草进行识别,识别率为 91.13%。Liu 等^[30]采用深度卷积网络对 5 136 幅图片进行了虫害识别(12 种水稻虫害),准确度约为 95%。李泽轩^[31]收集并整理了包含 15 种病害和 22 种虫害的水稻病虫害数据集,在深度残差网络的基础上提出了改进算法 FRNet,对水稻病虫害的识别率超过了 80%。李梓和^[32]建立了一个包含 8 种稻田杂草的目标检测数据集,针对稻田杂草数据存在复杂背景以及目标相互遮挡等问题提出了 Det-ResNet,检测精度达到了 91.6%,并提出了一种轻量化的 RetinaNet 检测模块 Efficient retina head(ERetina-Head),可以使模型的检测精度提高 1.2%。

1.1.4 农田障碍物目标识别与定位 农田中存在着各种障碍物,影响了智能农机的正常作业,并存在安全隐患,因此,智能农机必须具备障碍物识别与检测的能力。在智能农机对障碍物检测的研究中,按照所使用的传感器种类可以将障碍物检测分

为基于超声波、毫米波雷达、激光雷达、机器视觉以及多传感器融合等多种方法^[33]。贾闯等^[34]研制了山地果园单轨运输机超声波避障系统,在一定条件下,该系统能够识别轨道上的障碍物和轨道旁的非障碍物,提高了单轨运输机无人驾驶运行时的安全性和可靠性。王水满^[35]基于单线激光雷达传感器进行了无人机360°全方位障碍物检测与识别,根据获得的障碍物信息和无人机的状态信息,实现无人机的自动避障。高振海等^[36]采用自适应卡尔曼滤波算法对毫米波雷达数据进行分析,估计前方目标的运动状态,估计结果精度较高且滤波收敛稳定。基于深度学习的目标检测算法根据候选框的生成方式,分成一阶段(One-stage)目标检测算法和二阶段(Two-stage)目标检测算法:一阶段目标检测算法的代表有YOLO系列^[37]和SSD系列^[38]等,一阶段目标检测算法计算量小、检测速度快,但准确率较低;二阶段目标检测算法的代表有R-CNN^[39]、Fast R-CNN^[40]和SPP-NET^[41],二阶段目标检测算法的计算量大、检测速度慢,但准确率高。蔡舒平等^[42]对YOLOv4目标检测模型进行了改进,改进后的模型参数减少,检测速度提高了29.4%,鲁棒性强、实时性好。马佳良等^[43]在传统的Fast R-CNN基础上,提出了Accurate R-CNN目标检测框架,可以在不同数据集和不同的任务上取得良好的检测效果。

单一的传感器在智能农机的环境感知中具有局限性,一般都应将多个传感器信息进行融合检测。目前比较常用的多传感器信息融合的方法有激光雷达与视觉融合、毫米波雷达与视觉融合等融合方式。薛金林等^[44]将摄像机与激光雷达的信息进行融合,实现了智能农机车辆前方障碍物的实时检测。谭力凡^[45]利用毫米波雷达与机器视觉数据进行特征级融合,先从毫米波雷达数据中获取感兴趣区域,再通过坐标系转换和时间数据融合,基于图像处理技术,实现了对目标物的检测与识别。

1.2 自动驾驶

自动驾驶是智能农机的核心。我国农机导航的研究起步较晚,但经过10多年的努力,我国农机导航取得了长足进展,目前与世界上先进水平基本上处于“并跑”的态势。华南农业大学^[46-47]、上海交通大学^[48-49]、国家农业信息工程技术研究中心^[50]、上海联适导航技术股份有限公司^[51-52]和潍柴雷沃重工股份有限公司^[53]等单位为我国农机导航技术的发展作出了重要贡献。针对我国地域广、作物品种多、作物环境和种植制度复杂等问题,我国农机的自动驾驶与作业需要重点解决导航定位、导航控制和系

系统集成三大难题,华南农业大学等单位对此进行了系统深入的研究并取得了重大突破。目前,我国已研制出了适应旱地和水田不同作物的耕、种、管、收等作业环节的电液转向和电机转向的农机北斗自动驾驶产品,达到了国外同类产品先进水平,可满足无人农场生产的需要。

1.2.1 导航定位 针对复杂农田环境和农机作业工况严重影响农机姿态测量精度的问题,黄培奎等^[54]将北斗和惯性传感器相结合,设计了外部加速度补偿的卡尔曼滤波算法,俯仰角平均误差从2.00°降低至0.55°,航向角测量精度由5.0°提高至0.3°。针对作业环境复杂、单一传感器精度有限的问题,朱忠祥等^[55]采用多传感器信息融合的方法,利用各传感器的优势特征,构成数据冗余或数据互补,以陀螺仪、加速度计和电子罗盘设计了农机的航迹推算系统,结合GNSS系统的绝对定位信息,利用卡尔曼滤波融合方法,获得了较好的定位测姿精度。针对复杂农田环境中卫星信息遮挡、电磁干扰和卫星定位精度降低的问题,张闻宇等^[56]采用基于北斗和MEMS惯性传感器的线性时变自适应卡尔曼滤波算法,在RTS差分信号丢失30s内导航系统定位精度(REM)仍可保持在3cm以内,显著地提高了导航系统的断点续航能力。

1.2.2 导航控制 针对不同作物、不同生产环节和不同地块的导航作业路径需要优化规划的问题,孟志军等^[57]提出了面向自动驾驶和农田全区域覆盖作业路径优化规划方法,实现了农机自动驾驶系统最优作业方向计算和路径自动生成。针对农田起伏多变,现有农机自动驾驶系统的控制精度和上线速度不能满足精准作业要求的问题,王辉等^[58]采用由预瞄跟随控制器、前视距离自适应调节器、状态预估器和抗饱和变速积分器构成的农机导航复合路径跟踪控制器,显著地提高了农机导航系统的控制精度和上线速度;针对水田侧滑严重、农机俯仰横滚变化频繁且幅度大的问题,在农机导航复合路径跟踪控制器中增加侧滑估计补偿器,显著地提高了农机导航系统的水田抗侧滑干扰能力。针对现有农机导航系统缺乏避障功能,影响农机自动驾驶作业安全的问题,苗峻齐等^[59]采用基于激光雷达的农田障碍物识别与定位三次样条函数的路径规划和纯追踪算法的路径跟踪控制,开发了农机自动避障技术,可以准确识别和绕行农田典型障碍物。针对现代农业生产中需要多机协同作业技术支撑的问题,张闻宇等^[60]采用基于无线自组网络的主从装备平行跟踪导航控制技术,使主从装备旋耕和收获作业

直线行走段的横向位置误差小于 5 cm、纵向跟踪误差小于 10 cm。

1.2.3 导航集成 针对现有农机缺乏自动导航作业的底盘线控装置的问题,开发了适用不同农机的车载线控控制装置,满足了农机自动导航作业的控制要求。提出了行为决策、动作规划和反馈控制的多层智能控制策略与方法,智能决策自动导航作业控制量,可以满足不同种类农机自动导航作业的需要,基于 SAE J1939 和 ISO 11783 总线标准,制定了团体标准,实现了农机自动导航作业系统的有效集成^[61-62]。

1.3 精准作业

1.3.1 精准耕整 精准耕整的目的是为作物生长提供良好的种床。智能耕整农机应根据作业的种植农艺要求和土壤质地对作业机具的位置、姿态、压力和作业深度等进行精准控制。目前,液压系统、传感器和电子控制系统已广泛应用于各种耕整机械中,大大提高了耕整机械的智能化水平。国内外耕整机械的发展方向是多功能、复式作业、大型化和精量化,对智能化水平提出了更高的要求。

农田精准平整是精准耕整的重要环节,华南农业大学^[63-64]和中国农业大学^[65]成功研制出与插秧机头和拖拉机配套的水田激光平地机和旱地激光平地机,平地时平地铲的高程和水平可同时调整,平整后水田平整精度小于 3 cm、旱地平整精度小于 5 cm,大大提高了水肥利用率,提高了作物产量。采用卫星信息控制的平地机已投入生产使用。

土壤深松是一种国内外公认的提高土壤耕作质量的先进技术,也是我国农业农村部重点推广的先进技术之一。孟志军等^[66]成功研发出土壤深松系统,该系统采用卫星定位系统和耕深测量系统,可同时准确测定土壤深松的深度和面积。

1.3.2 精准种植 “秧好半年禾”,精准种植是农作物的关键之一。智能种植机械能够根据不同作物生长特性、土壤特性和种植时的气候情况实现精准播种和移栽,包括开沟宽度和深度,同步施肥方式,行距、穴(株)距,播种量和覆土深度等。直播和移栽是最常见的 2 种植方式。对播种精度要求最高的是超级杂交稻、玉米、大豆、棉花(都要求每穴播 1 粒种子)以及一些园艺作物和经济作物。排种器是智能播种机械的核心,由于不同作物种子的大小、形状各异,对排种器的要求各不相同,常用的排种器有机械式和气力式 2 大类,目前,我国这 2 类排种器的研究与国外的先进水平不断缩小,部分已达到国外先进水平,如勺轮式、指夹式和气力式玉

米精量排种器基本上与国外处于“并跑”水平。气力式排种器对种子的大小、形状要求不严格,适合形状不规则的种子,可以实现高速播种,播种精度高,株距均匀,广泛应用于各种智能播种机中^[67]。华南农业大学^[68-70]采用型孔轮式和气力式排种器,研制成功同步开沟起垄穴播、同步开沟起垄施肥穴播和同步开沟起垄喷施穴播的“三同步”水稻精量穴播机,实现了行距可选、穴距可调、播量可控和仿形作业,在国内 26 个省市推广应用,取得了一批高产记录,在新疆水稻产量超过 15 000 kg/hm²。采用电机驱动代替地轮驱动排种器,在播种机上加装播种量检测和调控系统以及补种装置,可以在播种时同步施肥和喷施农药,该技术的应用范围不断扩大,部分地区已经普及^[71-72]。

采用移栽作业方式的作物主要有水稻、蔬菜以及一些园艺作物和经济作物。目前,我国作物移栽技术研究取得重大进展,与国外基本上处于“并跑”的态势,特别是水稻插秧机,通过采用毯状苗、钵体苗和毯状钵体苗,实现了不同品种水稻的精准移栽,插秧时同步施肥,该技术正在逐步普及^[73-75]。油菜移栽技术也取得重大突破^[76]。

1.3.3 精准田间管理 田间管理主要包括水、肥、药的管理。精准施肥主要包括基肥和追肥。作物种植前精确获取土壤中的养分情况是精准施基肥的前提。目前,田间实时在线测量土壤中氮磷钾的技术尚未取得实质性突破,主要是利用卫星定位信息田间取土并在实验室分析获得土壤中的养分分布图;根据养分处方图,采用智能施肥机实现精准施肥。精确获取作物的长势和养分胁迫情况是精准施追肥的基础。目前,国内外众多学者采用光谱技术获取作物长势信息的研究取得了一定进展。李克亮等^[77]在广东早稻生长中根据水稻长势采取精准施肥,产量增加 9.27%。

精准施药的机械主要包括地面施药机械和航空植保机械,根据获取的作物病虫害信息制定的处方图,进行精准对靶变量喷施。喷雾压力可调、喷雾流量可调等先进技术已广泛应用于地面施药机械和航空植保机械中^[78-79]。高地隙宽幅喷杆喷雾机已得到了广泛应用,通过变轴距调节技术,可以适应多种耕地和不同垄距的作业需要^[80]。袁琦堡等^[81]成功研究出自动混药技术,水箱、药箱和混合器分别设置,根据病虫害信息和喷施处方图在田间作业时实时混药,实现了药液浓度和喷量自动调节。航空植保技术近 10 年来在我国得到了快速发展,成为大田作物植保的主流技术之一,2020 年,无

人机植保作业面积超过 0.67 亿 hm^2 , 田块边界自动识别、作物路径自动规划、高效低污染施药、多机协同作业等先进技术等得到了广泛应用^[82]。

精准灌溉技术在国内得到了广泛应用。在土壤中设置传感器, 精确获取土壤中的含水量, 根据作物不同生长期的需水规律, 进行精准灌溉, 可实现水肥药一体化灌溉^[83]。实践表明, 精准灌溉可大幅度减少用水量, 提高作物产量^[84]。徐刚等^[85]采用物联网技术和传感器网络采集农田的温湿度和光照强度等参数, 以此优化灌溉策略。阮俊瑾等^[86]设计了一种能实现灌溉、混药和施肥一体的球混式水肥灌溉系统。

1.3.4 精准收获 对精准收获的基本要求是根据作物成熟度适时收获, 根据作物长势和产量自动调节收获机前进速度、割台高度、脱粒滚筒转速和清选等工作参数, 对各部件工作状况实现监控、显示和报警。目前, 国内外的收获机普遍采用电子和液压技术, 实现了上述功能, 还可以生成产量分布图^[87]。陈进等^[88]采用图像处理的方法, 对收获的水稻成分进行在线识别, 破碎籽粒、稻秆杂质以及稻梗杂质的综合评价指标分别达到 92.92%、90.65% 和 90.52%, 为调节作业参数提供了依据。麻芳兰等^[89]设计了一种以切割系统负载压力作为反馈信号的甘蔗收获机入土切割切深自动控制系统, 切割器可随负载压力的变化而调整切割深度, 入土切割深度达 20 mm 左右, 调整误差为 2 mm 左右。张光跃等^[90]研制了一种基于压电陶瓷传感器的清选损失率在线监测系统, 实现了联合收获机工作过程中谷物损失率的实时监测, 测量误差小于 4.1%。

张漫等^[91]在收获机上安装产量传感器和卫星定位信号接收装置, 生成了我国首张小麦产量分布图。我国潍柴雷沃公司、中国一拖集团有限公司和沃得农机公司等一些农机企业生产的收获机已开始安装谷物产量、含水率、流量、损失率和含杂率传感器, 提高了智能化水平。潍柴雷沃公司研制的玉米穗茎收获机, 可一次完成玉米果穗摘取、输送、剥皮、茎秆切割等功能, 具有果穗损伤率低、茎秆喂入均匀、切碎质量好、功率消耗小等特点^[92-93]。中联重机的 AS60 型甘蔗收获机实现了卫星定位和自动导航等功能^[94]。

1.4 智慧管理

智能农机的智慧管理包括远程监控农机作业位置、作业速度和作业质量, 远程监控农机作业工况并进行故障预警、指导维修和农机远程调度。目前, 各种智能农机上都安装有 GNSS 装置, 农机开

始作业就可将农机的位置和作业轨迹实时发送至农机管理中心和农机生产企业, 并支持农机作业历史数据记录与轨迹回放, 而装有质量监控传感器的智能农机可同时发送作业质量的相关数据, 包括耕、种、管、收各环节的作业质量。通过安装在农机上的各种工况传感器, 农机管理中心和农机生产企业可远程监控农机的实时工况, 如拖拉机的发动机参数、PTO 转数、行驶速度等, 收获机的发动机参数、割台高度、实际割幅、脱粒滚筒转速、清选风扇转速、净粮升运速度和谷物流量等, 播种机的播种量、播种堵塞状态和播种深度等, 施肥机的施肥轮转速、施肥量和堵塞状态等, 喷雾机的喷雾压力、药液流量和喷头区段状态等。将所获得的各种工况信息与数据库中的相关数据自动进行对比, 如出现异常, 即向农机驾驶员或无人农场管理中心发出预警信息, 比如发现收获机脱粒滚筒转速降低过多, 就立即建议降低收获机前进速度或减小割幅, 以防止堵塞; 出现故障, 就指导驾驶员或相关人员进行排除或维修; 出现较大故障, 就通知农机所在地的维修站人员前往维修^[95]。通过远程监控智能农机的位置和作业速度, 根据最小转移路径原则, 可以对农机进行远程调度^[96]。

王慧平^[97]采用 Java 语言和 ArcGIS 等开发工具, 结合 ArcGIS JavaScript API、Ajax 及 JSF 等关键技术, 设计了一种基于 WebGIS 的农机远程监管服务系统, 实现了农机实时跟踪、农机历史轨迹回放、农机作业任务报单、农机作业任务计量和农机作业工况报单等功能, 能够及时获取和有效管理农机作业现场各类数据, 实现了农机信息采集、传输、分析和访问的集成化。谢婷婷^[98]开发了一套基于遗传算法 (Genetic algorithm, GA) 的农机作业调度系统, 提出了一种改进的遗传算法。系统还结合北斗卫星导航技术和地理位置信息系统, 生成农机调度方案, 实现了农机跨区作业调度。崔征泽^[99]结合数据传输子系统、数据分析子系统以及监测管理子系统, 设计了一种用于农机终端监测的物联网应用系统, 可以对农机终端数据进行收集、存储和分析, 并根据农机终端传感器数据分析农机作业质量, 实现对农机的高效管理。

2 无人农场的实践

华南农业大学集成相关的智能农机装备, 创建了水稻无人农场, 并在广东增城进行了实践, 2020 年的中稻试验面积为 1.87 hm^2 , 2021 年的早稻和晚稻试验面积为 3.33 hm^2 。增城水稻无人农场从 2020

年 5 月 3 日开始旋耕, 至 8 月 30 日收获, 历时 120 d, 实现了水稻生产耕种管收全程无人作业。水稻无人农场的稻谷产量均高于当地的平均产量, 表明了其巨大的发展潜力。2021 年早稻生产采用优质丝苗米品种 ‘19 香’, 产量 $9\,943.35\text{ kg/hm}^2$, 高于当地的平均产量 $7\,500\text{ kg/hm}^2$ 。2021 年在广东三水启动了花生无人农场建设, 产量 $3\,164.10\text{ kg/hm}^2$, 高于广东省花生种植的平均产量 $2\,400\text{ kg/hm}^2$ 。水稻无人农场具有耕种管收生产环节全覆盖、机库田间转移作业全自动、自动避障异况停车保安全、作物生产过程实时全监控和智能决策精准作业全无人等 5 个特点。

2.1 耕种管收生产环节全覆盖

2.1.1 耕整 采用无人驾驶旋耕机进行早旋耕, 直线行驶横向误差不超过 2.5 cm , 田头转弯对行误差不超过 3.0 cm 。作业质量好、作业效率高, 2021 年在 3.33 hm^2 试验田中的旋耕作业效率可达到 $1.33\text{ hm}^2/\text{h}$ 。

2.1.2 种植 采用无人驾驶直播机进行精量早直播, 这是华南农业大学近 10 年来在国内推广的一种轻简栽培技术, 在新疆采用精量早直播技术 3 年平均产量均超过 $15\,000\text{ kg/hm}^2$ ^[100]。播种时将水稻干种或浸泡 24 h 后的湿种 (不催芽) 直接播在播种机开出的播种沟中并覆土 (2 cm 左右), 然后上水 $5\sim 10\text{ cm}$; 几天后, 待水自然落下后, 稻种吸饱了水, 土壤湿润, 稻种扎根出苗情况特别好。

2.1.3 管理 在水稻生产前期采用无人机施肥和施药, 作业前先用无人机获取水稻生长的养分胁迫和病虫害情况, 然后制定施肥和施药处方图, 实现了精准对靶喷施。在水稻生长后期, 采用无人驾驶高地隙喷杆喷雾机 (地隙 1 m 、喷幅 12 m), 雾化效果好、作业效率高, 由于作业路径采用了优化规划方法, 实现了喷雾时 “不重不漏”。

2.1.4 收获 华南农业大学成功研制出 2 种无人驾驶主从收获系统: 第 1 种为随车卸粮模式, 作业时无人驾驶卸粮车与无人驾驶收获机并行, 在直线段卸粮, 直线行驶时收获机和运粮车横向位置误差不超过 5 cm 、纵向位置误差不超过 10 cm , 可保证收获机准确地将稻谷卸至运粮车中。第 2 种为等待卸粮模式, 无人驾驶收获机在田中收获时, 无人驾驶卸粮车在田边等待; 收获机粮仓快满时, 通过云端服务器向卸粮车发出卸粮通知, 卸粮车随即自动行驶至收获机旁边, 收获机准确地将收获的稻谷卸至运粮车中; 卸粮后收获机继续收获, 卸粮车粮仓装满后自动开至田边, 将稻谷卸至运粮卡车中, 由

运粮卡车将稻谷运至干燥中心。在广东增城水稻无人农场的收获中, 采用了第 2 种模式, 即等待卸粮模式。

2.2 机库田间转移作业全自动

农机自动从机库转移至田间, 完成田间作业后自动回到机库。基于无人农场高精度数字地图设计运移路径关键点, 自动生成直线行驶和圆弧过渡路径, 并采用预瞄点跟踪方法实现高精度路径跟踪, 采用路径信息有限状态机理实现机库至田间的转移和田间作业的状态切换。

2.3 自动避障异况停车保安全

智能农机装有障碍物识别传感器, 识别到障碍物为移动式物体 (如人、车、动物等) 时, 则采用等待模式, 待移动式物体通过后再行驶; 若是固定式的障碍物, 则利用三次样条函数的避障路径规划和纯追踪算法的路径跟踪控制, 实现自动避障。作业时如遇异常情况, 如机器故障 (收获机堵塞等) 或信号问题 (卫星或 RTK 信号丢失等), 则自动停车, 并向管理中心发出警告信号。

2.4 作物生产过程实时全监控

在无人农场田头安装了多个监控装置, 可以全程全方位实时监控水稻生长过程中的长势和病虫害情况, 并通过无线网络传输至管理中心和相关人员的计算机或手机中, 必要时, 再辅以无人机拍摄全局和局部的各种信息。

2.5 智能决策精准作业全无人

根据作物的长势和病虫害草害情况, 结合专家知识, 及时作出决策, 并指挥相关智能农机进行精准作业, 包括精准灌溉、精准施肥和精准施药等。

3 结论与展望

农业的根本出路在于机械化, 随着工业化和城镇化的发展, 我国农业生产面临劳动力短缺和老龄化的严峻挑战。现代农业要求大幅提高劳动生产率、土地产出率和资源利用率, 智慧农业技术可为 “三率” 的提高和现代农业建设提供强有力的科技支撑。

智慧农业是农业现代化的高级形式, 依托生物技术、智能农机和信息技术建设的无人农场是实现智慧农业的重要途径。具有智能感知、自动导航、精准作业和智慧管理功能的智能农机是建设无人农场的物质支撑。改革开放以来, 我国农业机械化取得了巨大成就, 智能农机装备和无人农场技术也取得了一定进展。华南农业大学集成相关智能农机建设的水稻无人农场在智慧农业发展中表现出巨大的潜力, 对我国无人农场建设起到了示范作用。

建设无人农场可有效缓解农村劳动力短缺的现状,积极推进现代农业建设。无人农场技术可彻底将农民从繁重的劳动中解放出来,为解决“谁来种田”提供了重要的途径。

目前,我国的无人农场建设刚刚起步,要实现大范围推广应用还需要解决以下5个问题:1) 关键技术的突破,包括适应不同区域、不同地形、不同作物和不同种植制度的无人农场关键技术,特别是智能农机技术及集成和管控平台;2) 适应无人农场的经营规模和土地整治,要大力支持新型农业经营主体,扩大经营规模和加强土地连片整治;3) 要因地制宜,探索各种适宜的无人农场建设模式和制定相应的标准;4) 要加强无人农场建设需要的各类人才的培养和培训,包括各种技术人员和经营管理人员;5) 要加强无人农场建设相关政策制定,调动政府、企业和社会资金投资建设无人农场的积极性。

当前,以互联网、大数据和人工智能为代表的新一代信息技术蓬勃发展,给经济发展、社会进步和人民生活带来重大而深远的影响,也推动了农业机械化和智能化的快速发展,这都必将促进我国无人农场建设进入快速发展期,进而为我国现代农业发展作出重要贡献。

参考文献:

- [1] 中共中央国务院. 关于加快推进农业科技创新持续增强农产品供给保障能力的若干意见[EB/OL]. (2012-08-30)[2021-07-21]. http://www.moa.gov.cn/ztlz/nyfzhsj/zyhwj/201208/t20120830_2901691.htm.
- [2] 中共中央国务院. 提出深入推进农业供给侧结构性改革[EB/OL]. (2017-02-15)[2021-08-03]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-02/05/content_5165613.htm.
- [3] 唐华俊. 智慧农业赋能农业现代化高质量发展[J]. *农机科技推广*, 2020(6): 4-5.
- [4] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. *智慧农业*, 2019, 1(1): 1-7.
- [5] 李道亮, 李震. 无人农场系统分析与发展展望[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(7): 1-12.
- [6] 方宪法, 吴海华. 农机装备亟待智能化转型升级[J]. *中国农村科技*, 2018(2): 54-57.
- [7] FAO. 粮农组织统计数据库[EB/OL]. (2021-02-26)[2021-07-03]. <http://www.fao.org/home/zh/>.
- [8] 尹来武. 农业物联网信息采集与识别关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- [9] 姚元森, 廖桂平, 赵星, 等. 农作物生长环境信息感知技术研究进展[J]. *作物研究*, 2013, 27(1): 58-63.
- [10] JUNG H C, KANG D H, KIM E, et al. Towards a soil moisture drought monitoring system for South Korea[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: 1-10.
- [11] 张利民, 罗锡文. 差分 GPS 定位技术在土壤耕作阻力测量中的应用[J]. *农业工程学报*, 1999, 15(4): 35-39.
- [12] 曾庆猛, 马道坤, 林剑辉, 等. 面向车载式测量的土壤含水量与电导率复合传感器设计[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(9): 163-167.
- [13] 胡炼, 殷延勃, 杜攀, 等. 水稻田激光平地技术研究与展望[J]. *中国稻米*, 2020, 26(5): 16-18.
- [14] 周浩. 激光控制水田精准平地打浆关键技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
- [15] 胡炼, 唐灵茂, 罗锡文, 等. 一种农田三维地形实时测量装置和方法: ZL201910451342.8[P]. 2021.
- [16] XIAO K H, XIAO D Q, LUO X W. Smart water-saving irrigation system in precision agriculture based on wireless sensor network[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11): 170-175.
- [17] 孙建英, 李民赞, 唐宁, 等. 东北黑土的光谱特性及其与土壤参数的相关性分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(8): 1502-1505.
- [18] DONG D M, ZHAO C J, ZHENG W G, et al. Spectral characterization of nitrogen in farmland soil by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Spectroscopy Letters*, 2013, 46(6): 421-426.
- [19] 杨贵军, 李长春, 于海洋, 等. 农用无人机多传感器遥感辅助小麦育种信息获取[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 184-190.
- [20] 孙红, 邢子正, 张智勇. 基于 RED-NIR 的主动光源叶绿素含量检测装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(S1): 175-181.
- [21] 杨燕琼, 罗锡文, 黄农荣. 基于 3CCD 摄像机的水稻农学参数估算[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 174-178.
- [22] 汪沛, 张俊雄, 兰玉彬, 等. 多光谱低空遥感图像光照辐射度校正[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 199-206.
- [23] 臧英, 侯晓博, 汪沛, 等. 基于无人机遥感技术的黄华占水稻施肥决策模型研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2019, 50(3): 324-330.
- [24] JIANG R, WANG P, XU Y, et al. Assessing the operation parameters of a low-altitude UAV for the collection of NDVI values over a paddy rice field[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1-16.
- [25] JIANG R, ARTURO S A, KATI L, et al. UAV-based partially sampling system for rapid NDVI mapping in the evaluation of rice nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 289: 1-16.
- [26] 袁媛, 陈雷, 吴娜, 等. 水稻纹枯病图像识别处理方法研究[J]. *农机化研究*, 2016, 38(6): 84-87.
- [27] 刘又夫, 肖德琴, 刘亚兰, 等. 褐飞虱诱导的水稻冠层热图像温度特征变异评估方法[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(5): 165-172.
- [28] HE Y, ZHOU Z, TIAN L, et al. Brown rice planthopper (*Nilaparvata lugens* Stal) detection based on deep learning[J]. *Precision Agriculture*, 2020, 21(6): 1385-1402.
- [29] 邓向武, 齐龙, 马旭, 等. 基于多特征融合和深度置信网络的稻田苗期杂草识别[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(14): 165-172.
- [30] LIU Z Y, GAO J F, YANG G G, et al. Localization and classification of paddy field pests using a saliency map

- and deep convolutional neural network[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 1-12.
- [31] 李泽轩. 基于卷积神经网络的水稻病虫害识别算法的研究和应用[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.
- [32] 李梓和. 基于深度学习的水稻杂草检测研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2021.
- [33] 李文涛, 张岩, 莫锦秋, 等. 基于改进 YOLOv3-tiny 的田间行人与农机障碍物检测[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S1): 1-8.
- [34] 贾闯, 李加念, 洪添胜, 等. 山地果园单轨运输机超声波避障系统的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(S2): 69-74.
- [35] 王水满. 基于激光雷达的植保无人机自主避障技术研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.
- [36] 高振海, 王竣, 佟静, 等. 车载毫米波雷达对前方目标的运动状态估计[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2014, 44(6): 1537-1544.
- [37] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection [C]//2016 IEEE Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas NV, USA, 2016: 779-788.
- [38] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: Single shot multibox detector[C]//European Conference on Computer Vision. Glasgow, United Kingdom, 2016: 21-37.
- [39] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks [C]//International Conference on Neural Information Processing Systems. Montreal, Canada, 2015: 91-99.
- [40] GIRSHICK R. Fast R-CNN [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Washington, DC, USA, 2015: 1440-1448.
- [41] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 37(9): 1904-1916.
- [42] 蔡舒平, 孙仲鸣, 刘慧, 等. 基于改进型 YOLOv4 的果园障碍物实时检测方法[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(2): 36-43.
- [43] 马佳良, 陈斌, 孙晓飞. 基于改进的 Faster R-CNN 的通用目标检测框架[J/OL]. *计算机应用*, (2021-02-05)[2021-08-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1307.TP.20210205.1531.023.html>.
- [44] 薛金林, 董淑娴, 范博文. 基于信息融合的农业自主车辆障碍物检测方法[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(S1): 29-34.
- [45] 谭力凡. 机器视觉与毫米波雷达融合的前方车辆检测方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [46] 何杰, 朱金光, 张智刚, 等. 水稻插秧机自动作业系统设计及试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(3): 17-24.
- [47] 何杰, 高维炜, 王辉, 等. 基于 GNSS 航向微分和 MEMS 陀螺仪的农机轮角测量方法[J]. *华南农业大学学报*, 2020, 41(5): 91-98.
- [48] 胡鸿彬, 李彦明, 唐小涛, 等. 基于 Android 的农机导航管理系统研究与设计[J]. *农机化研究*, 2019, 41(5): 179-183.
- [49] 曾宏伟, 雷军波, 陶建峰, 等. 低对比度条件下联合收割机导航线提取方法[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(4): 18-25.
- [50] 孟志军, 付卫强, 徐飞军, 等. 拖拉机自动驾驶控制系统及其方法: CN101833334 A[P]. 2010.
- [51] 缪存孝, 楚焕鑫, 孙志辉, 等. 基于双 GNSS 天线及单陀螺的车轮转角测量系统[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(9): 17-23.
- [52] 马飞. 自主、创新、开拓: 联适导航自动驾驶系统的发展应用[J]. *农业工程技术*, 2018, 38(18): 72-74.
- [53] 黄雅威. 潍柴雷沃自动驾驶技术助力春耕春播[J]. *农机质量与监督*, 2021(3): 42.
- [54] 黄培奎, 张智刚, 罗锡文, 等. 田间作业车辆外部加速度辨识与姿态测量系统研制[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 9-15.
- [55] 朱忠祥, 韩科立, 宋正河, 等. 基于置信度加权的拖拉机组合导航融合定位方法[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(1): 210-215.
- [56] 张闻宇, 王进, 张智刚, 等. 基于自校准变结构 Kalman 的农机导航 BDS 失锁续航方法[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(3): 18-27.
- [57] 孟志军, 刘卉, 王华, 等. 农田作业机械路径优化方法[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(6): 147-152.
- [58] 王辉, 王桂民, 罗锡文, 等. 基于预瞄追踪模型的农机导航路径跟踪控制方法[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(4): 11-19.
- [59] 苗峻齐, 罗锡文, 张智刚, 等. 无人驾驶水稻精量穴直播机的自动控制系统设计[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集. 北京: 中国农业工程学会, 2011.
- [60] 张闻宇, 张智刚, 罗锡文, 等. 收获机与运粮车纵向相对位置位速耦合协同控制方法与试验[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(9): 1-11.
- [61] 张智刚, 王进, 朱金光, 等. 我国农业机械自动驾驶系统研究进展[J]. *农业工程技术*, 2018, 38(18): 23-27.
- [62] 张漫, 季宇寒, 李世超, 等. 农业机械导航技术研究进展[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(4): 1-18.
- [63] 胡炼, 杜攀, 罗锡文, 等. 悬挂式多轮支撑旱地激光平地机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(8): 15-21.
- [64] 周浩, 胡炼, 罗锡文, 等. 激光控制水田打浆平地机设计与试验[J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(5): 23-27.
- [65] 刘刚, 李民赞, 唐存干, 等. 一种基于模糊控制的激光平地系统控制方法: CN106155048A[P]. 2016.
- [66] 孟志军, 尹彦鑫, 罗长海, 等. 农机深松作业远程监测系统设计与实现[J]. *农业工程技术*, 2018, 38(18): 34-37.
- [67] 罗锡文, 王在满, 曾山, 等. 水稻机械化直播技术研究进展[J]. *华南农业大学学报*, 2019, 40(5): 1-13.
- [68] 王在满. 同步开沟起垄水田机械化穴播技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.

- [69] 陈雄飞, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻穴播同步侧位深施肥技术试验研究[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(16): 1-7.
- [70] 张明华, 王在满, 罗锡文, 等. 水稻精量穴直播机开沟装置的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 10-15.
- [71] 陈建国. 小麦精量播种与精准控制智能决策系统研究与设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [72] 丁幼春, 杨军强, 张莉莉, 等. 油菜精量排种器变量补种系统设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(16): 27-36.
- [73] 罗细芽, 黎刚, 杨青如, 等. 水稻大钵体毯状苗育插秧技术试验[J]. *农机科技推广*, 2019(4): 40-42.
- [74] 陈惠哲, 徐一成, 张玉屏, 等. 超级早稻钵形毯状秧苗机插效果及产量形成[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(23): 4240-4250.
- [75] 王金武, 唐汉, 李响, 等. 水稻密苗插秧分插机构: CN208317376U[P]. 2019.
- [76] 袁文胜, 吴崇友. 我国油菜移栽机械的现状和发展趋势分析[J]. *中国农机化*, 2007(6): 61-63.
- [77] 李克亮, 周志艳. 水稻氮肥精准管理技术研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(12): 18-25.
- [78] 乔白羽, 何雄奎, 王志翀, 等. 基于 LiDAR 扫描的高地隙宽幅喷雾机变量施药系统研制[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(14): 89-95.
- [79] 袁鹏成, 李秋洁, 邓贤, 等. 基于 LiDAR 的对靶喷雾实时控制系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S1): 273-280.
- [80] 顾若波, 刘勇兰, 高素琴. 高地隙遥控自走式智能喷杆喷雾机: CN109380208A[P]. 2019.
- [81] 袁琦堡, 胡炼, 罗锡文, 等. 在线实时混药喷雾系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(S1): 176-181.
- [82] 程忠义. 2020 年度植保无人机行业发展报告出炉[J]. *农药市场信息*, 2020(4): 3.
- [83] 王炜. 精准自动化灌溉系统设计及应用探讨[J]. *陕西水利*, 2020(4): 77-79.
- [84] 王飞, 简菁涓. 基于作物需水曲线的精准灌溉系统设计[J]. *天工*, 2019(4): 138.
- [85] 徐刚, 陈立平, 张瑞瑞, 等. 基于精准灌溉的农业物联网应用研究[J]. *计算机研究与发展*, 2010, 47(S2): 333-337.
- [86] 阮俊瑾, 赵伟时, 董晨, 等. 球混式精准灌溉施肥系统的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(S2): 131-136.
- [87] 朱玉祥. 精准网络通信理念在智能作物收获机中的应用[J]. *农机化研究*, 2021, 43(1): 201-206.
- [88] 陈进, 张帅, 李耀明, 等. 联合收获机水稻破碎籽粒及杂质在线识别方法[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(6): 137-144.
- [89] 麻芳兰, 滕筱, 李科, 等. 甘蔗收获机切割器入土深度自动控制系统设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(4): 1-7.
- [90] 张光跃, 金诚谦, 杨腾祥, 等. 联合收割机清选损失率监测系统设计与实现[J]. *中国农机化学报*, 2019, 40(4): 146-150.
- [91] 张漫, 邝继双. 谷物联合收割机测产数据中的误差分析与处理[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(3): 144-148.
- [92] 王晓亮. 雷沃农业备技下乡助力秋粮丰收雷沃农业装科[J]. *农机科技推广*, 2013(9): 60-61.
- [93] 姚彬. 玉米收割机升级产品: 雷沃谷神 CC04[J]. *农村新技术*, 2018(10): 40.
- [94] 朱茗. 甘蔗收获机: 中联重科引领自主品牌与外资对决[J]. *当代农机*, 2017(1): 30-32.
- [95] 朱登胜, 方慧, 胡韶明, 等. 农机远程智能管理平台研发及其应用[J]. *智慧农业(中英文)*, 2020, 2(2): 67-81.
- [96] 康康. 基于“互联网+”的智慧农机管理信息系统研究与实现[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [97] 王慧平. 基于 WebGIS 的农机远程监管服务系统的设计与实现[D]. 北京: 首都师范大学, 2014.
- [98] 谢婷婷. 基于 GA 的农机作业调度研究与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [99] 崔征泽. 农机监测管理系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [100] 王奉斌, 章秀福, 吴文俊, 等. 新疆南疆垦区水稻机械精量旱穴直播 1000 kg/667 m² 超高产栽培技术[J]. *中国稻米*, 2016, 22(1): 67-69.

【责任编辑 周志红】