

中国大田无人农场关键技术与建设实践

罗锡文，胡 炼，何 杰，张智刚，周志艳，张闻宇，
廖 娟，黄培奎

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室，广州 510642；2. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室，广州 510642；3. 广东省农业人工智能重点实验室，广州 510642)

摘 要：智慧农业是现代农业的发展方向，无人农场是实现智慧农业的重要途径。为了探索和推广无人农场在现代农业中的应用，华南农业大学对大田无人农场的关键技术进行了深入研究，包括无人农场作业环境、作业对象和作业机械装备信息的数字化感知技术；土地整治、耕整、种植、播种、田间管理和收获方案的智能化决策技术；农机自动导航和农机精准作业的精准化作业技术；农作物生长、农机运维和农场经营管理的智慧化管理技术。2020年在广东增城创建全球首个水稻无人农场，实现了五大功能，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，智能决策精准作业全无人。取得了显著的经济、社会和生态效益，2021年广东增城水稻无人农场种植的优质丝苗米十九香产量达到 $9\,934.35\text{ kg/hm}^2$ ，比当地的平均产量高32%；2023年湖南益阳千山红镇再生稻无人农场两季产量达到 $18\,625.5\text{ kg/hm}^2$ ，说明了人不下田也能种地，也能种好地。截至2023年11月，在国内15个省启动了30个无人农场的建设，包括水稻、小麦、玉米和花生4种作物，实践结果证明了无人农场和智慧农业发展的巨大潜力，为解决“谁来种地”和“如何种地”提供了重要途径。

关键词：智慧农业；无人农场；水稻；智能农机；现代农业

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202312126

中图分类号: S232.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-01-0001-16

罗锡文，胡炼，何杰，等. 中国大田无人农场关键技术与建设实践[J]. 农业工程学报，2024，40(1): 1-16. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202312126 <http://www.tcsae.org>
LUO Xiwen, HU Lian, HE Jie, et al. Key technologies and practice of unmanned farm in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 1-16. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202312126 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

随着中国农村劳动力“老龄化、女性化、副业化”的日益加重，“谁来种地”和“怎样种地”已成为我国农业和世界农业面临的共同难题。第三次全国农业普查数据（第五号）显示，2016年全国农业生产经营人员31 422万人，其中年龄55岁及以上的10 551万人，占比33.58%，女性14 927万人，占比47.50%^[1]。2022年全国第一产业从业人员29 562万人^[2]，比2002年减少了7 078万人，第一产业中青壮年劳动力向第二、三产业转移带来了农村劳动力数量的减少和结构的改变。农民进城务工后，留在农村中的地只能利用假期回家管理，种地从“主业”变成了“副业”，耕种质量难以保证，甚至造成耕地撂荒。

国内外研究表明，发展智慧农业可有效解决“谁来种地”的难题，而无人农场是实现智慧农业的重要途径^[3]。英国和美国等发达国家先后启动了无人农场、无人温室、

无人猪场和无人渔场的建设，2017年英国哈珀亚当斯大学创建了全球首个小麦无人农场，采用无人驾驶拖拉机配备整地机与播种机、无人驾驶植保机和无人收获机等智能化农机完成小麦耕种管收全程无人化作业^[4]。中国对大田无人农场也开展了关键技术研究 and 建设实践，华南农业大学从2003年起开展农业机械导航技术的研究，2006年中国研制第一台无人驾驶水稻插秧机^[5]。20a的实践证明，智能农机、精准作业和自动导航等无人农场技术可大幅度提高土地产出率、劳动生产率和资源利用率。首先是提高劳动生产率，以水稻生产为例，过去一个人一头牛一天最多能犁2亩地，现在一台无人驾驶旋耕机一小时能旋耕20亩地；过去一个劳动力一天最多只能插1亩秧，现在一台无人驾驶插秧机一小时就能插5~6亩地；人工用唧筒打农药，一天最多只能打3亩地，而一台无人机一小时就能喷施200亩地；过去一个人一天最多只能收0.5亩地水稻，现在一台无人驾驶收获机一小时就能收5~6亩地。其次是提高土地产出率，采用基于北斗的精准导航技术后，农机直线行驶横向误差小于2.5 cm，较传统生产方式提高0.5%~1.0%的土地产出率。第三是提高资源利用率，以农田精准平整为例，相比传统平地方法，采用农田精准平整技术可节水20%~30%，节肥5%~10%，增产5%~10%，提高效率

收稿日期: 2023-12-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000600); 岭南现代农业实验室科研项目(NT2021009); 广东省科技计划项目“广东省农业人工智能重点实验室(2021年度)”(2021B1212040009)。

作者简介: 罗锡文, 华南农业大学, 教授, 主要从事农业工程技术研究, E-mail: xwluo@scau.edu.cn

30% 左右^[6]。

为探索无人农场在现代农业中的作用, 本文提出了大田无人农场系统架构, 分析了无人农场的“数字化感知、智能化决策、精准化作业、智能化管理”四大核心技术, 阐述了耕种管收全程作业装备与管控平台系统和根据大田作物生产需求集成形成了耕种管收智能装备配置方案, 介绍了水稻、小麦、玉米和花生等作物的大田无人农场, 重点介绍了水稻无人农场和花生无人农场全程无人化作业实践, 以期通过探索与实践大田无人农场, 为中国现代农业智慧生产提供有力支撑。

1 大田无人农场系统架构

大田无人农场的系统架构如图 1 所示, 包括数字化感知、智能化决策、精准化作业和智慧化管理四大关键技术; 集成云管控平台、智能设备和无人化智能农机形成无人农场总体解决方案; 通过农场基础设施建设, 以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(少人)化可持续运行。

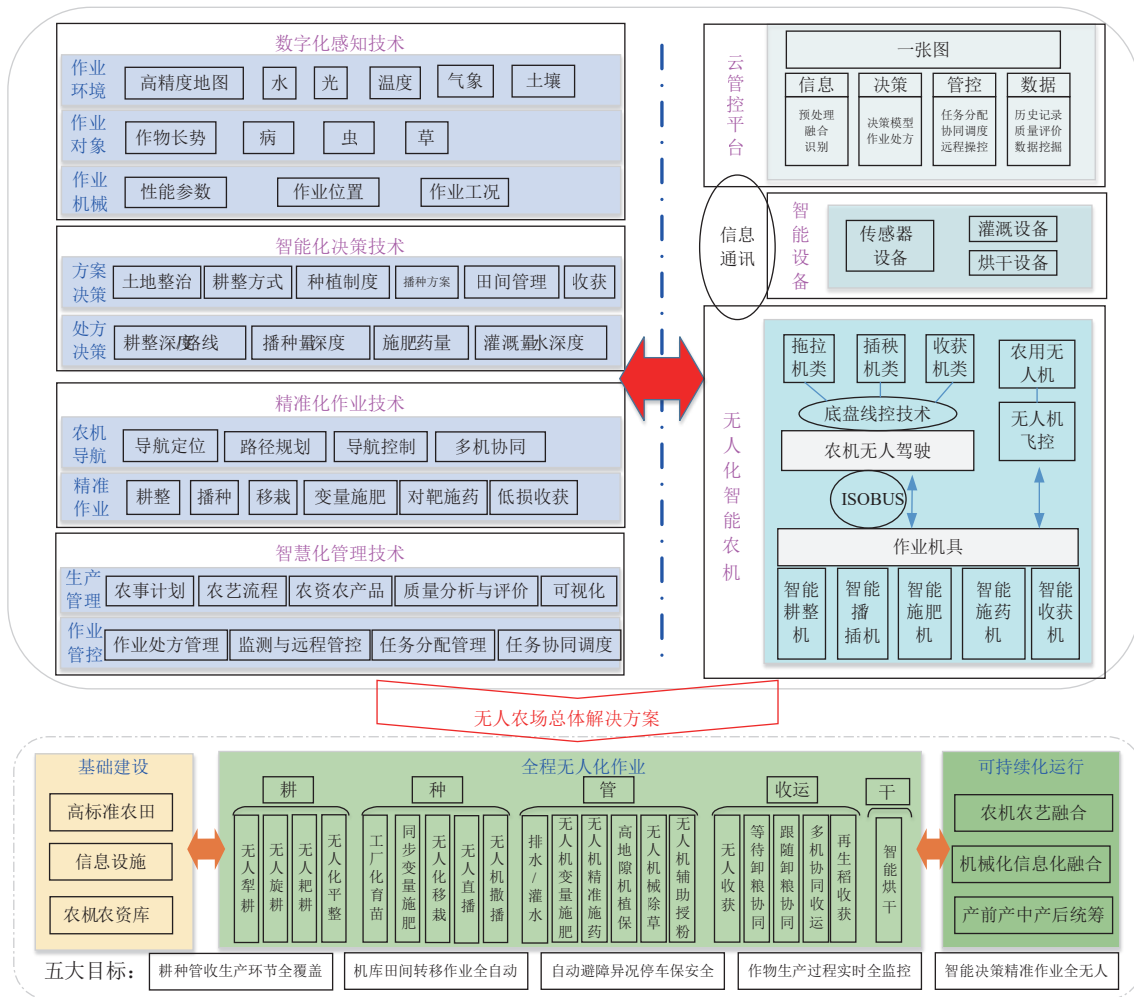


图 1 大田无人农场系统架构

Fig.1 Architecture of field unmanned farm system

2 大田无人农场关键技术

2.1 数字化感知技术

数字化感知技术包括无人农场的作业环境、作业对象和作业机械信息的精准感知, “星-机-地”是数字化感知的主要技术。其中, “星”指采用卫星影像获取较大范围的各种信息, “机”指采用农用飞机获取农田区域所需要的各种信息, “地”指采用地面机载仪器直接获取农田所需要的各种信息。

(1) 作业环境信息感知

无人农场的作业环境信息包括农场高精度地图构建

以及水、光、温、湿、气和土壤养分等信息。农场高精度地图包括农场位置、地块位置和大小、同一地块和不同地块的田面高差、田埂位置和走向, 机耕道的位置、走向和宽度, 机库位置和机库至田间的道路, 田中电线杆等障碍物位置, 不同地块和同一地块不同位置、不同深度的耕作阻力, 地块中不同位置 and 不同土壤深度的含水量和养分分布等信息。

高精度地图是制定无人农场各项规划的重要依据, 无人农场高精度地图一般采用人工手持设备打点或利用相机和激光雷达等传感器获取相关信息, 再通过人工智

能识别算法进行构建^[7]。华南农业大学采用大疆精灵4RTK 无人机获取农场图像，再建立农场水田和机耕道边界语义分割数据集，采用改进型 DeepLab V3+网络和基于 Blob 分析法与霍夫变换边界识别算法实现农田和机耕道边界连续分割和提取，精度为 5.18 cm^[7]，为无人驾驶农机作业和机库至田间的转移路径规划提供了支撑。固定障碍物一般直接在地图中标出，移动和临时性障碍物采用传感器实时识别并进行避障，采用激光雷达识别障碍物和绕行避障方法^[8]以及采用毫米波雷达与视觉融合的避障算法和农机停车避障系统^[9]。

水田硬底层不平直接影响水田农机行走和作业质量与效率，国内外至今尚未见相关研究报道。为给无人驾驶农机提供水田硬底层三维地形信息，TU 等^[10]设计了水田硬底层轮廓信息采集方法，提出了 Delaunay 三角剖分构建硬底层轮廓数字化模型方法，水田硬底层轮廓采集平均误差为 1.25 cm，标准误差为 1.49 cm，实现了水田硬底层轮廓数字化模型构建和水田任意点硬底层高程值估计，为水田无人驾驶农机作业提供了精准“地图”。

为获取农田土壤的耕作阻力，张利民等^[11]研制了一种基于 GNSS 的车载式土壤耕作阻力测定仪，将土壤坚实度测定圆锥仪压入土壤，采用拉压力传感器测得的压入阻力作为耕作阻力，采用 GNSS 定位信息，获取不同地块以及同一地块不同位置、不同深度（精度可以达到 0.5 cm）的耕作阻力信息。土壤中的氮磷钾至今仍无法实时在线快速准确测定，赵新等^[12]采用带 GNSS 定位的土壤取土器，将不同位置、不同深度的土壤取出放在专制的容器中，并记录其位置，在实验室中分析后即可获得不同位置不同深度处的氮、磷、钾、PH 值和有机质值，为变量施肥提供了支撑。

为检测土壤水分和水田田面水深，肖克辉等^[13]研制成功土壤水分无线测定系统，该系统可在水田田面有水时测定水深，在田面无水时测定土壤水分，并将测定结果实时发送至网络终端，根据水深/水分情况为远程控制自动灌水和排水提供了支持。

（2）作业对象信息感知

作业对象信息的精准感知，是水稻无人农场田间管理环节实现无人化作业的前提和基础，在此基础上开发适用于水稻生产无人化作业的肥药处方智能决策系统，可为水稻无人农场的田间管理提供数据和作业决策支撑。水稻无人农场的作业对象信息主要包括作物长势、病虫害等信息。

1) 长势信息感知

作物长势信息是表征作物生长状态的重要参数。及时、准确、快速、无损地获取作物长势信息，对于诊断作物生长特征、判断作物营养状况，进行精准施肥，促进作物生长具有重要意义。NDVI（normalized difference vegetation index，归一化植被指数）是作物长势及营养状态的常用指示因子，根据该参数可解析出水稻对氮的需求量，指导合理施肥。

采用传统的航天、航空遥感技术获取水稻长势信息

存在周期长、分辨率低、气象影响因素多等问题，尤其在广东等南方地区，适合遥感的无云气象条件的时间窗口期更少。无人机近地遥感技术，可弥补现有航天、航空遥感技术的不足。但受载荷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达 5 000 幅，普通图形工作站完成校正和拼接及解析等处理工作需要 5 h 以上。而作物田间管理要求处理时间短，需要即时生成作业处方图，这就要求遥感信息的获取和解析处理有较高的实时性才能满足实际生产的要求。为此，周志艳等^[14]研制了 5 通道（494、532、653、745 和 843 nm）并行获取的感存算一体化机载作物长势遥感传感器，配合自适应光照校正和数据自动分片同步处理算法，实现了水稻长势信息的精准获取，无人机落地几分钟内即可生成作物长势专题图。与国外机载遥感监测系统相比，反射率和辐射度测量精度与专业级高光谱仪或多光谱相机近似，但成本降低了 50%，作物长势信息解析速度为 37 hm²/min，效率提高了 30 倍以上。臧英等^[15]通过获取的水稻长势信息，构建了水稻养分信息快速解析和施肥决策模型，并采用与已有标准种植模型比对的方式生成施肥处方图，采用变量施肥无人机根据处方图执行施肥作业，结合北斗卫星导航系统定位，进行精准的肥料“补缺”；无人机能自主起降，根据航线进行自主飞行和自动变量作业，可断点续航，大幅度减少了劳动力投入，实现了肥料均匀撒施和用量的精准控制。应用示范结果表明，采用机载遥感处方施用氮肥，亩均氮肥用量比传统施肥方式最大可减少 30%，且水稻生长整齐一致，青枝腊秆，籽粒饱满，产量与传统施肥处理相比增产 6%~10%，亩均可增收 100 元。达到了稳产、节本和绿色环保的效果。

2) 病虫害信息感知

作物病虫害的早期准确检测信息是实施病虫害精准防治作业的重要依据。目前，常用的作物病虫害检测方式主要有电子鼻检测法、光谱检测法、图像识别法和激光雷达检测法等。

为精准检测褐飞虱数量和对水稻的侵害信息，HE 等^[16]提出了双层 R-FCN 网络的褐飞虱检测和计数算法，有效提升了褐飞虱识别精度，平均准确率达 90% 以上。刘又夫等^[17]研究发现褐飞虱侵害水稻冠层后水稻冠层温度特征发生变化，通过水稻冠层热图像温度特征变异评估水稻受褐飞虱侵害状况的精准率达到 87.15%；廖娟等^[18]基于高光谱技术获取水稻茎秆和冠层光谱特征波段信息，建立 BLS（broad-learning system）茎秆与冠层光谱特征信息相融合的褐飞虱危害识别及危害等级判定模型，水稻褐飞虱危害识别率为 98.3%，褐飞虱危害等级判定准确率为 97.2%，为进一步研发水稻光谱特征多方位监测装置提供了支持。

为支撑农户远程进行病虫害识别与智能诊断，指导

精准用药,彭红星等^[19]提出了基于 FRNet 深度学习网络模型的水稻病虫害识别系统,目前已能识别 23 种水稻病害、19 种虫害,识别的准确率分别为 93.41% 和 90.25%。

(3) 作业机械信息感知

作业机械信息是在无人农场生产中制定作业机械作业规划的重要依据。作业机械信息主要包括作业机械的性能参数、作业位置和作业工况等。

作业机械的性能参数包括功率、前进速度、转弯半径和 PTO 转速等。在无人驾驶系统中设计了数据采集模块^[20],通过 T-BOX 对农机实时工况数据如实时航向、位置偏差、RTK 信号等数据进行运算和记录,通过 CAN 总线通讯获取农机的胎压、时速、发动机转速等信息,并将这些信息发送至云平台^[21]。利用这些数据可为智能农机自动驾驶技术的改进或作业质量的评估提供参考,如采用基于 GNSS 和 IMU 融合的农机前进速度测量方法,可提高农机转向时速度测量的准确性^[22]。

作业机械的作业位置主要根据安装在作业机械上的卫星天线信号获得,考虑到作业机械移动可能产生的误差,采用基准站的差分信号进行校正。多机协同作业时主机与从机的位置信号通过数传电台或 4G/5G 模块传送。

作业机械的工况信息通过安装在相关部位的传感器获得,如旋耕机的转速和旋耕深度;播种机的穴粒数、穴距、播种深度和堵塞情况;施肥机的排肥轮转速、施肥量和堵塞状况;喷雾机的流量、喷雾压力和堵塞情况等;收获机的谷物流量、脱粒损失、清选风扇转速、脱粒滚筒转速、净粮升运转速和皮带损失等。何杰等^[23]通过在无人驾驶旋耕机上安装视觉传感器、姿态传感器和车载处理终端,实时采集并处理旋耕作业后的土壤图像,识别并统计图像中的土块大小和数量,根据计算的碎土率评价无人驾驶旋耕机的碎土作业质量,并自主决策是否需要重复旋耕作业。张帆^[21]以水稻旱直播机为平台自动获取农机实际作业距离、作业覆盖率、作业效率、作业直线度和作业面积等信息,通过播种监测装置监测作业漏播率及播种覆盖率。张闻宇等^[24]通过 GNSS 采集多机协同作业时农机主机与从机的位置信号,并通过数传电台或 4G/5G 模块传送。

采集的工况信息自动传送到机上的控制中心和远程监控平台,控制中心根据接收到的工况信息做出相应的处理。如发现收获机脱粒滚筒转速降低过多,就控制收获机降低前进速度,以防脱粒滚筒发生堵塞;如发现播种机、施肥机或喷雾机堵塞则立即停机,并通知操作人员排除故障。

2.2 智能化决策

智能化决策指根据数字化感知获取的各种农情信息对精准作业进行智能决策,包括土壤整治、耕整、种植、播种、田间管理和收获。

智能决策土地整治方案。在无人农场建设中,为了提高机械化作业的效率,田块应尽可能大,田面应尽可能平,连片面积应尽可能大,所以,应根据地形地貌和田面高差,智能决策土地整治方案,包括地块大小和机

耕道等,地块应尽可能按长方形布置,农机下地口布置应合理。灌排渠道布置也是土地整治方案中应重点考虑的一个问题^[25]。在无人农场建设时首先采用无人机航拍农田图片,然后拼接生成高程分布图,根据各田块高程差再决策出小田块合并为大田块的整治方案以及灌排渠道布置方案。

智能决策耕整方案。不同作物、不同生长期对土壤结构的要求不一。耕作方式是影响土壤结构甚至微生物的重要因素,所以,应根据不同作物对土壤结构的要求和耕整习惯等,智能决策耕整方案,包括犁地、耙耕和旋耕等^[26]。不同耕作方式要根据作物生长要求优化组合,如犁一耙,犁一旋和冬翻春旋/耙等,还有水田旱耕和水田水耕等。精准平整对实现水田“寸水不进地”的要求尤为重要,包括水田水平整和水田旱平整方式等,要根据农田土壤含水率和时期选用^[27],华南农业大根据平地作业过程中的地形实时测量值实现了作业深度和路径动态决策^[6]。

智能决策种植方案。我国地域辽阔,农作物品种众多,种植习惯各异,所以,应根据不同区域、不同作物的生长要求,智能决策种植方案。首先是熟制的选择,包括一熟制或多熟制,如稻一麦、稻一油(菜)、稻一稻等;其次是种植品种,以水稻为例,包括粳稻和籼稻,常规稻、杂交稻和超级杂交稻,早稻、中稻和晚稻,还有再生稻等;第三是种植方式,如水稻的直播和移栽,直播又包括水直播、旱直播和飞机撒播,移栽包括插秧和抛秧等^[28-29]。

智能决策播种方案。首先是播种时间,农谚说:“春争日,夏争时”播种时间的选择,一是要根据作物生长的要求选择,二是根据当地的气温选择,如水稻直播一般要求温度在 12°以上;三是要根据气候选择,如晴天或下雨前等。其次是播种量,如行距、穴(株)距和每穴(株)种粒数^[30]。第三是播种精度,如玉米播种要求每穴 1 粒、穴距相等、播深一致等^[31],如采用电驱播种技术和北斗定位技术实现穴距调整和播种种子坐标与深度三维定位

智能决策田间管理方案。田间管理包括水、肥、药和杂草的管理^[32]。首先是水的管理,应能根据作物生长情况和土地墒情进行自动灌溉和排水,如水稻生长要求“三青三黄”,即晒三次田,灌三次水,所以要求适时掌握稻田水层深度或土壤中的含水量^[33]。第二是施肥,目前,根据 NDVI 推算作物对氮的需求量的研究取得重要进展,对合理施用氮肥具有重要的指导作用^[34]。华南农业大学首先采用无人机获取水稻长势信息,然后根据水稻养分信息和施肥决策模型生成施肥处方图,再采用变量施肥无人机根据处方图执行施肥作业,大幅提高了肥料利用率^[14-15]。第三是对病虫草害的防控,目前,对病虫草害的快速精准实时识别尚未取得重大突破,所以,应采取光谱检测,图像识别和在田头加装摄像头等多种技术融合的方法,以实现病虫草害的早期识别^[35]。

智能决策收获方案。首先是要确定收获时间,俗语

说：“九成熟，十成收；十成熟，九成收”，不同品种的作物对收获成熟度的要求不一样，应注意把握。其次是收获方式，如水稻的全喂入收获与半喂入收获，倒伏水稻的收获等^[36]。第三是机器的调整，如水稻收获机，应能根据水稻长势自动调整收获机前进速度，割幅宽度，割台高度和拨禾轮转速等，还有脱粒滚筒转速和清选风扇转速也应能自动调整^[37]。

2.3 精准化作业

精准化作业包括农机自动驾驶技术和农机精准作业技术。

(1) 农机自动驾驶

1) 定位与测姿

农田环境、作业工况和复杂地面均影响农机定位和姿态估计，而定位的偏离会导致作业路线偏离，进而影响作业质量，采用北斗/GNSS 卫星导航系统的厘米级平面定位数据和惯性传感器 IMU(Inertial Measuring Unit) 测得的农机横滚俯仰、线加速度和角加速度信息，可以获得农机精准的位姿^[38]。农机在田间作业时因树木遮挡导致差分信号丢失，为此，张闻宇等设计了一种融合北斗定位数据和 IMU(inertial measurement unit) 数据的 Kalman 滤波方法，依据四自由度农机运动学模型设计了 BDS/INS 信息融合算法，基于自回归模型的航向校准方法和 INS 传感器角速率测量零偏实时校准方法，设计了自校准变结构滤波器进行位姿信息处理，结合导航跟踪控制方法实现失锁续航功能。试验结果表明，在行驶速度为 1 m/s 时，农机的平均失锁续航距离为 16.65 m，在此范围内如果信号恢复则转为正常行驶^[39]。在较为偏远的山区因网络信号覆盖不全面时可能无法获取差分信号，为此，张智刚等^[40]采用星基增强精密单点定位技术开发了农机自动驾驶系统，替代地基 RTK 系统，采用卫星通讯替换蜂窝网络传输差分信号，广东、江西、湖北三个区域的定位性能测试表明，动态定位标准差分别为 9.19、13.16 和 12.679 mm。

2) 路径规划

路径规划是农机导航与自动作业的关键技术之一，为实现田块的全覆盖路径规划，可将田块分为矩形、曲边形和不规则形等类，针对矩形地块采用平行作业内圈和矩形套外圈的方法；针对不规则边界采用平行边界路径内缩的方式套外圈；对于内接矩形采用平行作业进行全覆盖。为减小农机自动驾驶中地头的预留距离，采用往复作业法结合弓形转弯和鱼尾转弯法，适用于智能喷雾机无人喷雾作业和智能拖拉机无人播种作业；采用套行法结合弓形转弯及边界补漏作业的方式，适用于智能拖拉机无人旋耕作业。采用不同的作业策略可以改变作业时间，针对最短作业时间问题，提出了在保留对转弯空间进行补漏的基础上，采用基于贪婪算法与禁忌搜索算法 (Greedy-TS) 相结合的组合优化方法对田间路径规划进行全局优化，所设计的组合优化方法可平均缩短作业距离 4% 以上^[21]。路径规划所需的田块边界位置信息可采用高清晰度可见光遥感影像快速准确地获取^[41]。

3) 导航控制

导航控制是智能农机自动驾驶控制系统的核心技术之一，华南农业大学针对旱田路径跟踪设计了 PID 直线路径跟踪导航控制器，前进速度为 0.8 m/s 时，直线跟踪误差不超过 15 cm，平均误差不超过 3 cm^[42]。农机作业时部分地头转弯曲率较大，路径跟踪难度增加，无法采用简单模型实现精准跟踪，为此，采用深度强化学习方法建立基于性能指标的导航控制网络，该网络能在一定范围内的任意初始偏差和不同速度情况下进行跟踪，运用并行计算单元 (GPU, Graphic Processing Unit) 计算输出，计算周期仅 12 ms。还设计了基于 JetsonTX2 嵌入式开发板的无人农场田间监测机器人导航系统，导航实验结果表明：前进速度为 1.0 m/s 时，对同一组曲线路径进行跟踪，深度强化学习方法的平均超调量较纯追踪方法减少 23 个百分点，平均调节时间减少 3.9 s^[43]。

水田农机作业时因侧滑严重影响农机导航精度，王辉等^[44]针对水田侧滑控制进行了深入研究，设计了基于预瞄跟随和侧滑补偿的复合路径跟踪控制算法^[44]；刘兆朋等^[45]提出了一种基于侧滑估计补偿器的农机导航复合路径跟踪控制方法，显著地提高了农机导航系统的水田抗侧滑干扰能力。针对水田农机俯仰横滚变化频繁且幅度大的问题，HE 等^[46]建立了基于农机姿态修正的农机运动学模型。基于模型和模型预测控制 (MPC)，设计了水田农机的线性模型、目标函数和约束函数，建立了基于农机姿态的 MPC 路径跟踪控制方法，田间试验结果表明，直线路径跟踪的平均均方根误差为 0.043 m，平均绝对误差为 0.033 m，为提高水田农机无人驾驶作业直线度提供了技术支撑。

(2) 农机精准作业

农机精准作业主要包括大田生产耕种管收环节的智能农机的精准化作业。

1) 耕整环节

农田田面和硬底层不平导致旋耕作业深度变化和旋耕机倾斜，影响耕后作业平整度和耕深。为实时调节机具作业耕深，胡炼等^[47]研制了一种机具高程连续调节机构和耕深自动调节方法，针对旋耕机受拖拉机左右倾斜影响作业质量问题设计了农机具自动调平控制系统，研制了一种具有自动调平功能的旋耕机，相比无调平功能的旋耕机，耕后地表横向平整度和耕深稳定性显著提高，具有自动调平功能的旋耕机耕后垄面横向最大高差和耕深横向最大高差分别为 1.9 cm 和 1.8 cm，而无自动调平功能的旋耕机分别为 9.8 cm 和 9.7 cm^[48]。为满足我国农田精准平整作业需求，TANG 等^[49-52]采用激光和北斗信号实现了平整机具高程精准测量，研制成功高精度激光接收器，精度从 ± 10 mm 提高至 ± 3 mm；胡炼等^[47]提出了平整机具高程与水平联合控制方法，高程和水平控制误差分别 ≤ 17 mm 和 0.24° ，实现了平整机具精准作业控制，平整作业精度 $\leq \pm 30$ mm^[53]；汪沛等^[54]针对人工确定平整深度和路径难的问题，创新了平整过程中基于车体位姿估计的农田表面高程测量技术，误差 ≤ 11 mm；

HU 等^[53, 55-57]研制成功系列旱地和水田平整机具, 胡炼等^[58]研究成功采用精准平整系统引导推土机和挖掘机进行耕地耕层剥离和精准作业, 提高了高标准农田建设质量和效益。

2) 种植环节

在大田作物生产中, 保持作物种植的合理株距是保证大田作物产量和品质的重要措施之一。传统的地轮驱动播种机易因地轮滑移造成播种不均、漏播及株距调节精度不高等问题, 基于卫星和雷达测速的电驱播种技术可实现株距和播量的精准调节^[59-60], 王在满等^[61]设计了基于北斗卫星信号的株距和播量控制系统, 用于水稻和花生播种机。为监测排种器的播量和漏播情况, 设计了基于时间序列的播种量穴粒数和穴数监测系统, 实现了对水稻精量穴直播机播种量、排种器转速、种箱料位高度和机具行驶速度的监测, 可满足不同播种转速和不同品种的水稻播种量实时监测要求^[62, 63]。结合北斗定位技术, 还可精确获得播种种子的空间位置分布信息^[64], 为后续的中耕、植保、对行收获等田间精准作业提供支撑。

3) 田间管理

田间管理是大田作物生产的关键环节, 肥、药、草的精准防控是影响作物产量的重要因素。大田作物追肥可采用无人机变量喷施, 首先由无人机搭载光谱传感器获取作物光谱信息, 解析获得作物营养丰缺并根据专家知识及决策支持系统生成施肥处方图, 再由变量施肥无人机进行精准施肥作业, 亩均氮肥用量比传统施肥最大可减少 30%。大田病虫害的防控常采用植保无人机和喷杆喷雾机喷施农药^[65]。无人机植保的药液浓度通常较大、雾滴细小, 采用雾滴防漂移、添加助剂等技术和优选作业参数可提高无人机植保的药效利用率 10% 以上^[66]。喷杆喷雾机是大田作物植保作业的重要装备之一, 采用 GNSS 的定位和速度信息可精准控制喷雾量以提高喷施均匀性和覆盖率, 采用激光雷达和机器视觉技术识别目标对象并通过电磁阀进行对靶喷施, 可提高农药利用率^[67]。此外, 智能化的机械除草技术也在大田除草作业中应用, 为大田作物杂草防控提供了非化学除草技术与机械^[68]。

4) 收获环节

农作物机械收获作业精准化主要包括在线测产技术和减损收获技术。为实现联合收获机在线测产设计了联合收获机双板差分冲量式谷物流量传感器^[69], 测产精度误差小于 3.8%, 并开发了具有空间数据插值、误差产量数据过滤、产量数据统计分布、原始产量点图、栅格图和等值线图的谷物产量图生成系统^[70], 联合收获机在线测量技术的应用以及产量分布图为大田无人农场种植管理方案制定和作物生产过程中科学调控投入提供了数据支撑^[71]。

采用传感器和图像识别技术实时检测作物的倒伏情况, 可为割台控制提供信息; 采用仿形结构感知地形变化, 设计模糊 PID 自适应仿形控制系统, 可自动调整收获机的割台高度, 减少收获作业损失^[72]。

2.4 智慧化管理

传统农场管理人力物力资源耗费大、农场规划不统一、缺乏科学管理或管理不完善。随着现代农业和智慧农场的发展, 农机管理数字化平台和农场管理系统等快速发展, 促进了农场的智慧化管理。智慧化管理包括农作物生长管理、农机管理和农场管理, 其中农作物生长管理包括农作物长势和对病虫害的管理; 农机管理包括远程监控农机作业位置、作业进度和作业质量, 远程监控农机作业状况并进行故障预警和指导维修以及对农机进行远程调度; 农场管理包括产前、产中和产后的全程农事管理、农资管理和经营管理^[43, 73-74]。

(1) 作物生长管理

为实现作物生产智慧化管理, 首先, 应邀请农学家一起建立作物长势、水肥胁迫和病虫害侵害的信息数据库。以水稻生产为例, 包括水稻生产各个时期, 如幼苗期、分蘖期、拔节期、始穗期、抽穗期、齐穗期、灌浆期、腊熟期、成熟期等, 这些信息应包括叶片的数量、颜色、叶绿素和冠层的颜色, 茎秆的直径和颜色等, 不同生长期这些信息不一样, 受肥水胁迫和病虫害侵害后这些信息也会发生变化^[32, 34]。其次, 在无人农场中应有能自动获取这些信息的技术和措施, 如采用无人机携带多光谱、高光谱和高分辨相机拍照, 在田边安装摄像头和监控系统等^[14, 35]。第三, 应有能将田间获取的信息(如图片等)与数据库中的信息自动进行比对的技术^[15]。第四, 应能根据比对结果进行智能决策, 做出施肥/施药的处方图, 准确给出施肥的种类和施肥量^[15], 或施药的药剂和药量等。

(2) 智能农机管理

农机的智慧化管理包括三个方面, 一是远程监控农机作业位置, 作业质量和作业速度, 通过安装在农机上的卫星天线, 可获得农机的作业位置、作业轨迹和作业进度^[23], 通过安装在农机上的摄像头监控装置和传感器, 可精准获得农机的作业质量, 如犁、耙、旋耕质量, 插秧质量和漏插率及漂秧情况等, 喷雾雾滴大小、均匀性和喷嘴堵塞情况等, 收获机收获幅宽和夹带损失等^[23, 68]。二是远程监控农机工况并进行故障预警和指导维修, 如旋耕机的旋耕刀转速和收获机脱粒滚筒转速等, 并与数据库中正常工作的数据进行比对, 如发现异常立即进行智能决策并提出处理方案, 如出现故障立即指导维修, 或提供最近的维修点地址^[73]。三是进行远程调度, 如某台农机完成指定作业任务后, 根据农场全场作业任务安排, 以行驶距离和行驶时间最短为原则, 将机器调至新的作业地块, 并告知转移路线和入田口位置^[21, 73]。

(3) 农场管理

农场的智慧化管理包括三个方面, 一是农事管理, 包括产前、产中、产后管理。以水稻生产为例, 产前主要包括稻种品种的选择和稻种加工, 要根据种植区域和市场要求, 选择市场欢迎、品质好、产量高的品种, 稻种加工包括清选、分级和包衣/丸粒化等, 直播稻的播前处理对播后生长尤为重要。产中主要包括耕、种、管、

收、干燥和秸秆处理。产后处理主要包括加工和储藏。二是农资管理, 主要包括肥料和农药的管理。要合理安排基肥和追肥的施用比例。测土配方施肥是确定基肥的主要依据, 追肥主要根据作物长势施用^[14]。多用有机肥是施肥技术的主要方向。三是经营管理, 节本增效是经营管理的基本目标, 要在保证品质和产量的前提下, 减少作业环节, 减少作业投入, 提高单产^[21]。

3 大田无人农场系统集成

3.1 无人化作业系统设计与耕种管收装备集成

大田无人化作业系统与耕种管收装备需集成无人驾驶系统、农机动力底盘和相关作业机具。

农机动力底盘线控技术是农机装备智能驾驶的核心技术之一, 满足遥控驾驶、自动驾驶的线控底盘控制器 ECU 是智能农机装备的核心主控制单元, 通过 CAN 总线等方式与线控点火、线控油门、线控离合器、线控转向、线控制动、线控换挡和线控空气悬架等系统进行信息交互, 通过对接收到的信息, 判断各个子控制单元和整机系统的行驶状态, 下达安全、合理的指令, 从而使各个子控制单元协调安全地工作, 实现遥控驾驶或辅助驾驶或自动驾驶。

智能农机通过农机动力底盘配备不同作业机具完成相关作业, 各种作业机具通过机械接口和电气接口与(无人驾驶)农机动力底盘连接, 并通过农机动力底盘与机具的一体化协同控制, 实现无人作业^[75]。其中电气接口通常采用 ISOBUS 标准, 其标准化了通信协议、电气接口和软件, 农户仅通过简单的“热拔插”即能实现不同品牌机具与拖拉机间的挂接切换, 对所有机具的管控交互仅需一个终端显示屏。

华南农业大学设计了大田生产农机无人化作业系统, 通过 CAN 总线/ISOBUS 与无人驾驶系统各 ECU、底盘线控各分布式 ECU 和作业机具 ECU 联接^[76], 构成耕种管收全程无人化作业装备, 包括拖拉机类、插秧机类、联合收获机类和农用无人机。

(1) 拖拉机类

拖拉机主要用于耕整、播种、施肥、灌溉、收获和

运输等作业。华南农业大学针对拖拉机特点设计了拖拉机类无人化作业系统, 开发了水田/旱地和不同马力段的系列无人驾驶拖拉机, 实现了高精度路径跟踪, 变速、调头、升降和 PTO 控制等功能^[77], 并针对不同拖拉机和不同作业, 设计了相应的路径规划技术、导航跟踪控制和安全保障系统^[78]。

(2) 插秧机类

水稻插秧机、水稻直播机和水田高地隙喷杆喷雾机具有类似的运动特性和控制方式, 为实现这类水田农机的无人化作业, 华南农业大学开发了插秧机类底盘线控系统, 设计了运动控制器、电动方向盘、直流驱动电机和驱动执行机构等部件, 研制了满足生产要求的插秧机类无人化作业系统, 实现了无人驾驶和作业的自主控制。此外, 还实现了插秧机类自主作业系统作业量在线统计、作业状态实时检测和作业位置监控^[79]。

(3) 联合收获机类

联合收获机主要包括履带式和轮式两类, 收获机作业过程比其他农机复杂, 包括行驶离合、转向控制、割台、搅笼、脱粒离合、粮筒和卸粮离合等操控, 还要监测粮仓空、满状态等。华南农业大学针对收获机的操控特点, 设计了割台升降、脱粒离合和卸粮离合等功能线控系统, 与测产系统集成设计了联合收获机类无人化作业系统, 实现了水稻、小麦、玉米和花生等作物的无人收获作业^[3]。此外, 还基于多机协同技术实现了多台收获机和运粮车的协同作业。

(4) 农用无人机

通过在农用无人机上搭载各种传感器可实时获取农作物生长和病虫害的高分辨图像和数据, 为农田管理、决策和作业提供信息支持(图 2)。配合智能喷洒和播撒装置可实现精准喷洒农药、精准施肥和精准播种^[80]。周志艳等^[13]研制了五通道感存算一体化作物长势遥感传感器和作物长势快速监测无人机^[14]; 集成离心圆盘式和多流道气力式施肥装置创制了变量施肥无人机。还研究优选了植保飞防作业质量评价参数, 明确了水稻、玉米、棉花、柑橘等喷施作业参数, 为指导精准施药提供了支撑。



图 2 农用无人机及其应用

Fig.2 Agricultural UAV and applications

3.2 智能农机多机协同作业

大田无人农场生产中有时需要两台农机进行协同作业,如收获机和运粮车、播种机(或施肥机)与种肥补给车等,两者需要保持精确的位置关系以保证作业任务完成。有时还需要多台农机同时协同作业以提高作业效率,满足“抢种抢收”农事生产需求,包括多台农机在同一块地中作业或多台农机在不同地块中作业,要求合理分配各农机作业任务以及协同各农机间或任务间的逻辑关系。

(1) 两台农机协同作业

为实现收获机和运粮车以及播种机(或施肥机)与种肥补给车协同作业时,要求两者保持精确的位置关系以完成卸粮或补给作业,华南农业大学研发了两台农机等待协同模式和跟随协同模式。两台农机等待协同模式是当作业农机(主机)需要配合农机(从机)卸粮或补给时,主机行驶到合适地点后停车召唤从机,从机根据召唤前往指定地点并与主机保持协同作业位置关系^[81]。为实现收获机和运粮车协同,建立了收获机和运粮车协同模型,采用预设路径方式将二维控制问题解耦为两组一维控制,通过分析纵向驱动系统和转向系统的动力学和运动学模型,基于辨识的纵向驱动系统传递函数构建预测控制器,预测并补偿系统惯性所导致的停车滑移;结合积分环节改进纯追踪方法消除或减小路径跟踪中系统误差。采用上述两种方法设计停车对齐控制系统,纵向对齐精度小于 0.2 m,横向对齐精度小于 0.1 m^[82],收获效率为 0.35 hm²/h^[83]。

两台农机跟随协同模式是作业农机(主机)在直线作业时,要求配合农机(从机)与主机保持相同速度和相对位置,以实现边作业边协同卸粮或补给。为保持两台农机速度相同和相对位置不变,张闻宇等^[24]设计了位速耦合纵向相对位置控制方法,结合直线跟踪控制方法,实现了两台农机的纵向和横向位置精准控制。田间试验结果表明,两种协同模式均能确保谷物从收获机准确无误地卸到运粮车的粮仓中,两机间的纵向偏差最大超调量不超过 0.25 m,稳态平均绝对偏差保持在 0.08 m 以内,稳态最大偏差不超过 0.26 m,稳态标准偏差不得超过 0.09 m^[84]。

(2) 多台农机协同作业

多台农机协同作业包括多台农机在同一地块中作业和多台农机在不同地块中作业 2 种场景。

为提高多台无人驾驶智能收获机和运粮车协同作业效率,以 2 台不同型号水稻收获机和 1 台运粮车为例,根据协同作业控制决策约束条件,通过建立协同收获作业中有限个状态过程的改进型连续时间马尔科夫链模型,减少非作业时间为优化目标,通过模型预测未来一段时间内每台收获机的卸粮时间,动态更新每台收获机的卸粮顺序和时间。田间试验结果表明:采用所设计的智能农机多机协同作业控制方法实现了 2 台水稻收获机和 1 台运粮车协同自主作业,减小了收获机的非作业时间,提高了效率。在同一地块协同作业场景中,相对于仓满召唤卸粮模式收获机 1 和收获机 2 非作业时间分别减少

了 71.25% 和 42%,收获效率提高了 6.65% 和 5.22%;不同地块协同作业场景中,相对于仓满召唤卸粮模式收获机 1 和收获机 2 非作业时间分别减少了 77.64% 和 37.09%,收获效率提高了 12.07% 和 5.78%^[9]。

为提高同一地块多台同类农机协同作业效率,研究了基于云平台管控多台同类农机任务分配和各农机配合逻辑关系的协同方法,黄辉(请将 [84] 移至此处)进行了 3 台无人驾驶水稻直播机协同作业试验。作业任务通过云平台分别下发至 3 台水稻直播机,装满稻种的无人驾驶智能水稻精量穴直播机从农机库自动出发并依序进入各自区域开始直播作业。3 台直播机协同作业系统中若任意 2 台直播机在作业路径相交处发生冲突时,执行封行作业的直播机停车等待另一台直播机完成最后一次所有地头转弯后才继续封行,实际播种作业全田覆盖率达 95% 以上^[85]。

3.3 云管控平台开发

无人驾驶农机云管控平台设计为“三级”管理模式,第一级云管控总系统具有最大权限,可管理第二级的所有农场信息,实现一个账户管理多个农场;第二级农场管理员仅可管理自身的一个农场,实现一个账户管理一个农场;第三级终端与设备作为最底层执行者,通过无线网络接收更高级别发来的指令实现远程管控。

无人农场云管控平台包括远程控制、信息管理和任务调度三大功能,如图 3 所示。其中,远程控制包括“耕种管收”无人驾驶农机的远程控制和实时安全管控。农机远程控制以任务为媒介,通过创建任务来实现远程管控。为保证远程控制农机的作业安全,采取作业前任务安全确认,作业中对农机周围环境、作业效果、农机状态和作业进度实时监测;

信息管理分为农场基本要素管理、农机管理、任务管理、设备管理、数据管理和用户管理 6 个模块。无人农场云管控平台采集和分析处理农场要素、农机、任务、设备和作物各生长期的大量数据,如历史图片信息、智能农机作业路径、作业数据和导航数据等多异构数据,结合农事生产要求提供可视化界面展示和分析,还开发了农事决策分析功能,可为农事决策和病虫害防治决策提供支撑^[86-88]。

任务调度包括多台同种无人农机或异种无人农机作业调度,如多台无人驾驶收获机(N)与一台无人驾驶运粮车的调度(N 对 1)、多台无人驾驶收获机(N)与多台无人驾驶运粮车(M)的调度(N 对 M ,其中 $N \geq M$)。

无人农场云管控平台总控中心可创建并管理新的无人农场平台,所有创建的无人农场管控平台隶属于无人农场总控中心。

3.4 大田无人农场系统集成总体解决方案

大田无人农场总体解决方案由云管控平台、耕种管收运智能农机和智能设备通过系统集成形成(图 3)。农场云管控平台包括农场高精度农田数字地图、信息获取、农事任务管理和农事决策等功能(图 4)。智能农

机包括水稻、小麦、玉米和花生等作物生产所需耕种管收运的智能农机，可满足不同轮作和熟制模式以及再生

稻生产技术要求。智能设备包括传感器、灌排设备和烘干设备等。

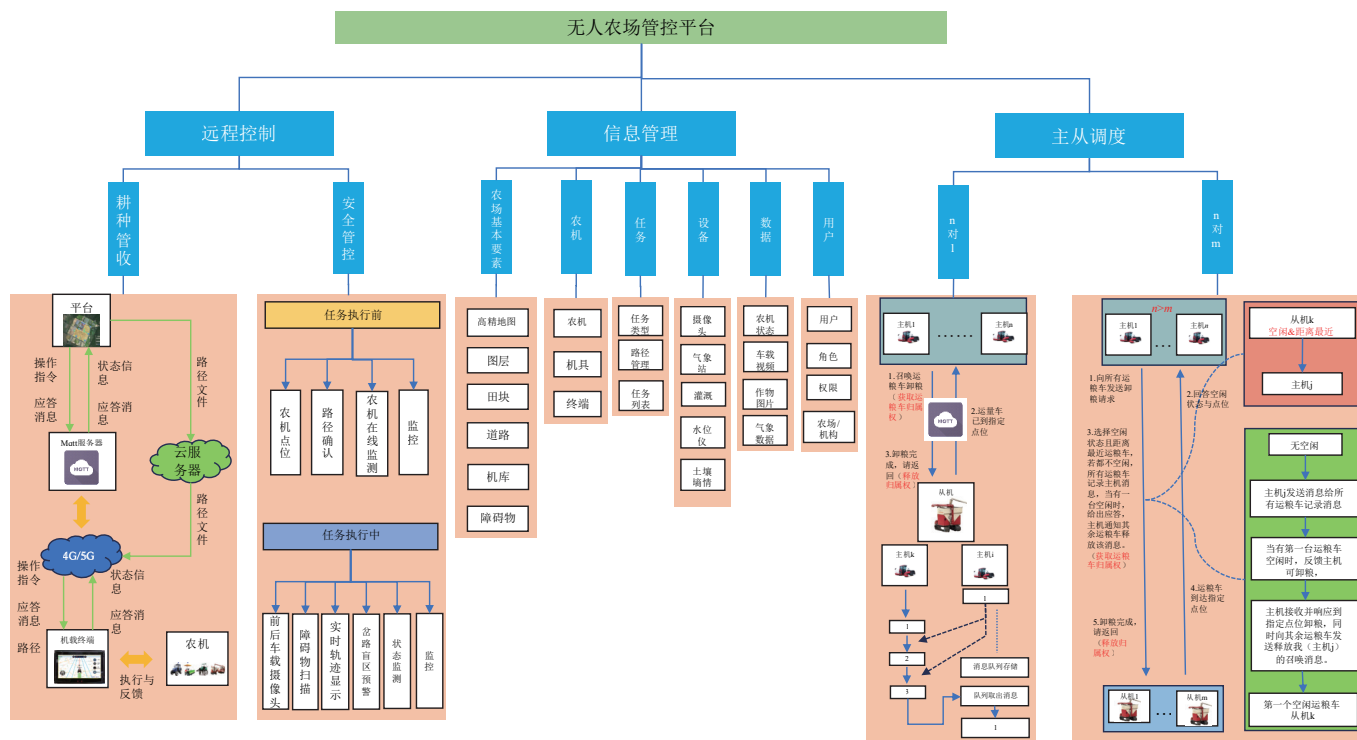


图 3 无人农场管控平台

Fig.3 Control platform for unmanned farm



图 4 大田无人农场作业环节与智能农机

Fig.4 Operation links and intelligent agricultural machinery of unmanned farm

4 大田无人农场的实践

基于数字化感知、智能化决策、精准化作业和智慧化管理四大关键技术，以五大功能为目标^[3]，至 2023 年 11 月，华南农业大学在国内 15 个省启动了 30 个无人农场的建设，包括水稻、小麦、玉米和花生等作物。

4.1 再生稻无人农场

再生稻无人农场于 2023 年在湖南益阳千山红镇启动建设，进行了农田改造和农机库建设，配置了耕种管收无人驾驶农机，部署了再生稻无人农场云管控平台，实现了头季耕种管收环节和再生季管收环节无人作业，4

月 6 日起采用无人驾驶水稻水穴直播机播种，8 月 15 日起进行再生稻头季无人驾驶收获作业，11 月 3 日起进行再生季收获作业。

农田改造主要包括小田块并大田块和精准平整。以大疆 Phantom 4 RTK 无人机采集农田全区域图像，并用大疆智图进行处理，获得农田三维地形图和三维点云数据，根据农田地形数据计算出农田平整作业的基准高度。将北斗卫星信号接收天线安装在推土铲上，农田精准平整系统的显示终端安装在推土机驾驶室内，系统实时测量推土铲高度与基准高度的差值，并将差值实时显示在

显示终端上,减少了驾驶员操作难度,提高了农田平整效率和平整度。

粗平后采用无人驾驶拖拉机配套水田旋耕机进行水田耕整作业,无人驾驶拖拉机采用东风井关羿农 EN954 进行无人驾驶改造,旋耕机幅宽 2.2 m,作业时实现了从机库出发到田间和完成旋耕打浆作业后再返回机库。

旋耕打浆后,再用北斗水田平整机进行精平,通过显控终端设定平地铲平整作业基准高度。农田精准平整系统通过获取平地铲实时高度信息并下发控制信号至液压系统驱动执行元件,实时调节平地铲至基准高度。同时,显控终端实时更新农田地形数据,并实时调整作业路径,实现高效精准平整作业^[89]。

选择 5 个田块并大田块的平整度统计,平整前和平整后的平整度如表 1 所示,由表 1 数据可知,水田的平整度得到明显提高,5 个地块平整度均值为 3.69 cm,相比平整前平整度平均提高了 56.31%。

表 1 各农田平整前后的平整度情况

Table 1 Paddy levelness comparison of before and after levelling

平整度 Levelness	地块序号 Plot No.				
	1	2	3	4	5
平整前 Before levelling S_d/mm	63.13	76.17	75.42	114.63	110.82
平整后 After levelling S_d/mm	48.72	22.92	24.25	31.76	56.90

水稻种植采用无人驾驶水稻精量穴直播机完成,采用洋马 2ZGQ-60D 插秧机头进行无人驾驶改造并配套 2BDXZ-10 精量穴直播机,在机库加装好种子后无人驾驶水稻精量穴直播机自动从机库驶入目标作业田块中,完成播种作业后自动回到机库。

再生稻头季收获采用沃得再生稻收获机改造为无人驾驶再生稻收获机,收获机履带宽 350 mm,轨距 1 250 mm,割幅 2.8 m,粮仓容纳量 1.5 m³。水稻行距 250 mm,地块长 300 m,作业时无人驾驶收获机两侧履带各碾压 1 行水稻,在地块两头各进行一次卸粮,据此进行全局路径规划。作业时由无人农场管控平台远程下发任务,无人驾驶再生稻收获机自动从机库进入田间按规划路径进行收获作业,以固定路线行驶到卸粮点卸粮,减少了全田碾压率。经统计,无人驾驶再生稻收获机直线部分水稻行碾压率为 18%,地头碾压率为 31%。

2023 年再生稻无人农场头季平均亩产 788.2 kg,再生季平均亩产 411 kg,两季平均亩产 1 199.2 kg。其中超高产品种“玮两优 8 612”头季亩产 830.7 kg,再生季亩产 459.4 kg,两季亩产 1 290.1 kg。

4.2 花生无人农场

花生无人农场于 2021 年在广东三水启动建设,实现了花生耕种管收全程无人化作业。耕整环节采用雷沃 TX1204 拖拉机配备幅宽 2 m 旋耕机进行无人旋耕作业。播种环节采用同一台雷沃 TX1204 拖拉机配备 3 垄 6 行花生播种机进行起垄播种。田间管理采用无人机施药。为实现花生无人化收获作业,以东泰 4HBL-2 型自走式花生联合收获机为平台,胡炼等^[90]设计了具有 CAN 的

自走式花生联合收获机手自一体化电控系统,采用 PD (proportional derivative) 控制算法和 Bang Bang 控制算法实现了花生挖掘、夹持、摘果和翻转卸果等作业系统的控制。为提高无人驾驶履带式花生收获机沙地作业路径跟踪精度,建立了履带式收获机运动学模型与虚拟转向角函数关系,提出了基于预瞄跟踪的双 PID 路径跟踪控制方法,实现了无人驾驶花生收获作业和自动翻转卸果至运输车。田间作业表明:无人驾驶花生收获机在沙地以 0.6 m/s 的速度作业时,系统直线跟踪平均绝对误差为 2.23 cm,最大偏差为 4.14 cm^[91]。2021 年花生实测产量 3 164.10 kg/hm²,高于广东省花生种植的平均产量 2 400 kg/hm²。

5 结 语

至 2023 年底,华南农业大学在国内 15 个省启动了 30 个无人农场的建设,包括水稻、小麦、玉米和花生等不同作物,水田和旱地等不同土壤,耕种管收等不同作业环节,单机和多机等不同作业模式。实现了五大功能,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,作业生产过程实时全监控和智能决策精准作业全无人。在 4 个方面取得了重要进展:一是无人农场关键技术取得重大突破;二是取得了显著的经济、社会和生态效益,特别是取得了多项水稻高产记录,说明了人不下田也能种地,也能种好地;三是得到了农民和社会的广泛认可;四是推进了无人农场和智慧农业的发展,如江苏省提出十四五期间建设 400 个智慧农场,上海计划建设 10 万亩水稻无人农场,广东省计划在大湾区建设 10 个智慧农场等等。

经过 4 年多的努力,数字化感知、智能化决策、精准化作业和智慧化管理四大关键技术取得了重大突破,但仍有一些“卡点”亟需解决。数字化感知是无人农场建设的基础,但仍存在很多短板和薄弱环节,如土壤中的氮、磷、钾、有机质和 pH 值的快速、实时、在线测定至今仍未取得重大突破,目前仍主要采取田中取样实验室测定的方法。作物的病虫害危害情况检测也是一个短板,目前仍主要采取田间近距离观察和检测的方法,采用无人机搭载高光谱和多光谱检测的技术至今仍难以达到实用的精度。精准化作业是无人农场建设的关键,但也存在一些“卡点”,如不规则地块的路径规划,由于水田土壤承载力低和硬底层不平造成农机滑转、滑移和侧滑严重进而影响导航自主控制的问题。必须加大力度,解决这些“卡点”,为无人农场建设提供支撑。

无人农场建设是集智能农机、人工智能、物联网、大数据和现代信息技术于一体的系统工程,要实现大范围的推广应用还需要解决以下问题:1) 扩大农业经营规模,各类新型农业经营主体是无人农场建设的载体,要大力支持各种农业合作社,龙头企业和种田大户扩大经营规模,只有在人认识到“请人种地不如请计算机种地”的时候才会提高对建设无人农场的积极性。2) 无人农场建设的一个基本要求是田块要大,田面要平,连片种植,

机耕道和灌排渠道设置合理等, 这些都要通过宜机化改造来实现。3) 要因地制宜, 探索适应不同区域、不同土壤、不同作物、不同种植制度和生产模式的无人农场建设模式, 要结合各地的现代农业产业园建设统筹推进。4) 要加强无人农场建设需要的各类人才的培养, 一些地方提出将职业学校作为培养无人农场建设的技术人员和管理人员的主渠道, 这不乏是一个好的思路, 要抓紧进行探索和实践。5) 要加快制定推进无人农场建设的相关政策, 特别是建设资金的筹措, 要调动政府、企业和社会投资建设无人农场的积极性, 适当加大智能农机的购置补贴额度亦应尽早考虑。

[参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国国家统计局国务院第三次全国农业普查领导小组办公室. 第三次全国农业普查主要数据公报 (第五号) [EB/OL]. [2023-12-01]. <https://www.gov.cn/xinwen/2017-12/16>.
- [2] 魏玉坤. 2022 年全国农民工总量增加 311 万人 [EB/OL]. [2023-11-03]. <https://www.gov.cn/lianbo/2023-04/28/>.
- [3] 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. (in Chinese with English abstract)
- [4] HFF. Hands free farm successfully completes first drilling operation[EB/OL]. [2022-12-01]. <https://www.harper-adams.ac.uk/news/203508/hands-free-farm-successfully-completes-first-drilling-operation>.
- [5] 张智刚. 插秧机的 DGPS 自动导航控制系统研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2006.
ZHANG Zhigang. Research on DGPS Automatic Navigation Control System of Rice Transplanter[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [6] 唐灵茂. 基于 GNSS 的智能平地系统设计与试验研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
TANG Lingmao. Design and experimental research of intelligent flat land system based on GNSS[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [7] 胡炼, 杨鲁宁, 何杰, 等. 一种农田与机耕道边界线提取方法及系统: CN202310361463. X [P]. 2023-05-09.
- [8] 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 (CSAE), 重庆, 2011.
MIAO Junqi, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, et al. Design of Automatic Control System for Unmanned Precision Rice Hill-Drop Drilling Machine[C]// Chinese Society of Agricultural Engineering (CSAE), Chongqing, 2011.
- [9] 李伟聪. 基于毫米波雷达和视觉融合的无人驾驶农机避障系统设计与试验 [D]. 广州: 华南农业大学, 2023.
- LI Weicong. Design and Experiment of Obstacle Avoidance System for Autonomous Agricultural Machinery based on Millimeter Wave Radar and Vision Fusion[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [10] TU T P, HE J, LUO X W, et al. Methods and experiments for collecting information and constructing models of bottom-layer contours in paddy fields[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 207: 107719.
- [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.
ZHANG Limin, LUO Xiwen. Application of differential GPS technology to the measurement of soil tillage resistance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(4): 35-39. (in Chinese with English abstract)
- [12] 赵新. GPS 和 GIS 技术在草地资源调查中的应用[D]. 广州: 华南农业大学, 2002.
- [13] 肖克辉, 肖德琴, 罗锡文. 基于无线传感器网络的精细农业智能节水灌溉系统 (英文)[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 170-175.
XIAO Kehui, XIAO Deqin, LUO Xiwen. Smart water-saving irrigation system in precision agriculture based on wireless sensor network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(11): 170-175. (in Chinese with English abstract)
- [14] 周志艳, 姜锐, 欧媛珍, 等. 一种感存算一体化的线阵遥感系统及其数据处理方法: CN115993609A [P]. 2023-04-21.
- [15] 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.
ZANG Ying, HOU Xiaobo, WANG Pei, et al. A study on huanghuazhan rice fertilization decision model based on remote sensing technology of unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, 50(3): 324-330. (in Chinese with English abstract)
- [16] HE Y, ZHOU Z Y, TIAN L H, et al. Brown rice planthopper (*Nilaparvata lugens* Stal) detection based on deep learning[J]. *Precision Agriculture*, 2020, 21(6): 1385-1402.
- [17] 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.
LIU Youfu, XIAO Deqin, LIU Yalan, et al. Temperature eigenvalues evaluation method of rice canopy thermal image induced by brown rice panthopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 165-172. (in Chinese with English abstract)
- [18] 廖娟, 汪沛, 臧禹, 等. BP 神经网络模型的训练方法、病虫害检测方法及设备: CN113255894A [P]. 2021.08. 13.
- [19] 彭红星, 徐慧明, 高宗梅, 等. 基于改进 YOLOF 模型的田间农作物害虫检测方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4):

- 285-294.
PENG Hongxing, XU Huiming, GAO Zongmei, et al. Insect pest detection of field crops based on improved YOLOF model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 285-294. (in Chinese with English abstract)
- [20] HE J. LUO X. W., ZHANG Z.G. et.al. Positioning correction method for rice transplanters based on the attitude of the implement[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2020, 176.
- [21] 张帆. 面向水稻无人农场的智能农机管控平台关键技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2022.
ZHANG Fan. Research on key technologies of intelligent agricultural machinery management and control platform for rice unmanned farm[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [22] WANG P, HU L, HE J, et al. Method for measuring the steering wheel angle of paddy field agricultural machinery by integrating RTK-GNSS and dual-MEMS gyroscope[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(6): 1-9.
- [23] 何杰, 李明锦, 胡炼, 等. 一种无人驾驶旋耕机碎土质量检测方法: CN202311587877.0[P]. 2023-11-27.
- [24] 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.
ZHANG Wenyu, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Position-velocity coupling control method and experiments for longitudinal relative position of harvester and grain truck[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(9): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [25] 中华人民共和国农业农村部, 国家标准化管理委员会发布, 高标准农田建设通则, GB/T 30600-2022[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 2022-03-09.
- [26] 韩伟峰. 仿生智能整地机通用刀辊设计与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
HANG Weifeng, Design and Experimental Research of Universal Knife Roller for Bionic Intelligent Soil Preparation Machine[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [27] 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.
HU Lian, YIN Yanbo, DU Pan. Research and Prospect of Laser Leveling Technology in Rice Field
- [28] 李恩宇, 陈光辉, 方希林, 等. 不同种植模式对水稻生长发育与产量品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2023(11): 14-18, 29
LI Enyu, CHEN Guanghui, FAGN Xilin, et al. , Effects of different planting patterns on rice growth, yield, and quality[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2023(11): 14-18,29. (in Chinese with English abstract)
- [29] 何椿禹, 刘月月, 邵玺文, 等. 种植模式对水稻根系分布与氮素吸收的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42 (11): 58-66.
HE Chuyu, LIU Yueyue, SHAO Xiwen, et al. Effects of planting method on root growth and nitrogen uptake of rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(11): 58-66. (in Chinese with English abstract)
- [30] 马旭, 王承恩, 刘赛赛, 等. 水稻育秧生产线秧盘播种量智能调控装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(7): 36-46.
MA Xu, WANG Cheng'en, LIU Saisai, et al. Design and experiment of an intelligent regulation device for the seeding amount of seedling trays in the rice seedling raising production line[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(7): 36-46. (in Chinese with English abstract)
- [31] 张海晴, 陈逸飞, 乔平. 玉米精密播种机械的研究现状与发展趋势[J]. 南方农机, 2023, 54(24): 166-168.
- [32] 程元稳. 基于农业信息化技术的小麦种植田间管理[J]. 农业工程技术, 2023, 43(23): 99-100.
- [33] 方程, 关法春, 李晓峰等. 农业智能灌溉系统关键控制要件分析[J]. 农业与技术, 2023, 43(24): 37-39.
- [34] 于丰华, 曹英丽, 许童羽, 等. 基于高光谱遥感处方图的寒地分蘖期水稻无人机精准施肥[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 103-110.
YU Fenghua, CAO Yingli, XU Yutong, et al. Precision fertilization by UAV for rice at tillering stage in cold region based on hyperspectral remote sensing prescription map[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 103-110. (in Chinese with English abstract)
- [35] 廖娟, 陶婉琰, 臧英, 等. 农作物病虫害遥感监测关键技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 1-19.
LIAO Juan, TAO Wanyan, ZANG Ying, et al. Research Progress and Prospect of Key Technologies in Crop Disease and Insect Pest Monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 1-19. (in Chinese with English abstract)
- [36] 王明磊, 周文, 王超, 等. 再生稻收获机作业效果综合评价分析[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(11): 9-13.
WANG Minglei, ZHOU Wen, WANG Chao, et al. Comprehensive evaluation and analysis of operation effect of ratooning rice harvester[J]. Chinese Journal of Agricultural Mechanization, 2023, 44(11): 9-13. (in Chinese with English abstract)
- [37] 潘朝阳. 基于无人机遥感的水稻农艺性状估测及高收获指数植株模型构建[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
PAN Chaoyang. Estimation of rice agronomic traits and construction of high harvest index plant model based on UAV remote sensing[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [38] 黄培奎. 基于 MEMS 惯性传感器的水田作业机械姿态检测关键技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.

- HUANG Peikui. Research on Key Technology of Paddy Field Agricultural Machinery Attitude Estimation Based on MEMS Inertial Sensors[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [39] 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.
- ZHANG Wenyu., WANG Jing, ZHANG Zhigang, et al. Self-calibrating variable structure kalman filter for tractor navigation during BDS outages[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 18-27. (in Chinese with English abstract)
- [40] 张智刚, 王明昌, 毛振强, 等. 基于星基增强精密单点定位的农机自动导航系统开发与测试[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(6): 109-116.
- ZHANG Zhigang, WANG Mingchang, MAO Zhenqiang, et al. Development and test of auto-navigation system for agricultural machinery based on satellite-based precision single-point positioning[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 109-116. (in Chinese with English abstract)
- [41] 张天. 面向水稻无人农场的农机作业路径规划方法研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2023.
- ZHANG Tian. Research on the Path Planning Method of Agricultural Machinery for Unmanned Rice Farms[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [42] 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139-145.
- LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, ZHAO Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(11): 139-145. (in Chinese with English abstract)
- [43] ZHANG W Y, GAI J Y, ZHANG Z G, et al. Double-DQN based path smoothing and tracking control method for robotic vehicle navigation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 166: 104985.
- [44] 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.
- WANG Hui, WANG Guimin, LUO Xiwen, et al. Path tracking control method of agricultural machine navigation based on aiming pursuit model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(4): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- [45] 刘兆朋, 张智刚, 罗锡文, 等. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(01): 15-21.
- LIU Zhaopeng, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(01): 15-21. (in Chinese with English abstract)
- [46] HE J, HU L, WANG P, et al. Path tracking control method and performance test based on agricultural machinery pose correction[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022(200): 1-11.
- [47] 胡炼, 林潮兴, 罗锡文, 等. 农机具自动调平控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 15-20.
- HU Lian, LIN Chaoxing, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on auto leveling control system of agricultural implements[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(8): 15-20. (in Chinese with English abstract)
- [48] 周浩, 胡炼, 罗锡文, 等. 旋耕机自动调平系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 增刊 (47): 117-124.
- ZHOU Hao, HU Lian, LUO Xiwen, et al. Design and Experiment on Auto Leveling System of Rotary Tiller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, Supp. (47): 117-124. (in Chinese with English abstract)
- [49] TANG L, HU L, ZANG Y, et al. Method and experiment for height measurement of scraper with water surface as benchmark in paddy field[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 198-204.
- [50] ZANG Y, MENG S, HU L, et al. Optimization design and experimental testing of a laser receiver for use in a laser levelling control system[J]. Electronics, 2020, 9: 536 - 536.
- [51] ZHAO R, HU L, LUO X, et al. Method for estimating vertical kinematic states of working implements based on laser receivers and accelerometers[J]. Biosystems Engineering, 2021, 203: 9 - 21.
- [52] 陈高隆. 基于 GNSS 与 IMU 的水田平地控制系统设计与试验[D]. 广州: 华南农业大学, 2021.
- CHEN Gaolong. Design and experiment of paddy field flat control system based on GNSS and IMU[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [53] HU L, XU Y, HE J, et al. Design and test of tractor-attached laser-controlled rotary scraper land leveler for paddy fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2020, 146(4).
- [54] 汪沛, 冯达文, 陈高隆, 等. 农田精准平整过程中三维地形实时测量方法研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 41-48.
- WANG Pei, FENG Dawen, CHEN Gaolong, et al. Real-time 3D terrain measurement method and experiment in farmland leveling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 41-48. (in Chinese with English abstract)
- [55] 胡炼, 罗锡文, 林潮兴, 等. 1PJ-4.0 型水田激光平地机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45 (4): 146-151.
- HU Lian, LUO Xiwen, LIN Chaoxing, et al. Development of

- 1PJ-4. 0 laser leveler installed on a wheeled tractor for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 146-151. (in Chinese with English abstract)
- [56] 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.
HU Lian, DU Pan, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on multi-wheel support laser land leveler hanging on tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 15-21. (in Chinese with English abstract)
- [57] ZHOU H, HU L, LUO X, et al. Design and testing of laser-controlled paddy field levelling-beater[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2020, 13(1): 57-65.
- [58] 胡炼, 彭靖怡, 赖桑愉, 等. 基于 BDS 和 IMU 的挖掘机铲斗位姿测量方法与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(23): 12-19.
HU Lian, PENG Jingyi, LAI Sangyu, et al. Method and experiments of excavator bucket position and attitude measurement using BDS and IMU[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(23): 12-19. (in Chinese with English abstract)
- [59] 孟志军, 刘卉, 付卫强, 等. 农田作业机械测速方法试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 141-145.
MENG Zhijun, LIU Hui, FU Weiqiang, et al. Evaluation of ground speed measurements for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(6): 141-145. (in Chinese with English abstract)
- [60] 曾山, 刘赛男, 张智刚, 等. 水稻精量旱穴直播电驱排种设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(6): 171-180.
ZENG Shan, LIU Sainan, ZHANG Zhigang, et al. Design and Experiment of Rice Precision Dry Electric Drive Seeding[J]. Agricultural mechanization research, 2020, 42(6): 171-180. (in Chinese with English abstract)
- [61] 王在满, 裴娟, 何杰, 等. 水稻精量穴直播机播量监测系统研制[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 9-16.
WANG Zaiman, PEI Juan, HE Jie, et al. Development of the sowing rate monitoring system for precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(10): 9-16. (in Chinese with English abstract)
- [62] 胡炼, 田力, 冯达文, 等. 旋耕起垄花生播种机及精准播种作业和种子分布精度评估方法: 2023117332959 [P]. 2023-12-18.
- [63] 颜丙新, 付卫强, 武广伟, 等. 基于卫星定位的玉米高位精播种子着床位置预测方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 44-54.
YANG Binxin, FU Weiqiang, WU Guangwei, et al. Seed location prediction method of maize high-height precision planting based on satellite positioning[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(2): 44-54. (in Chinese with English abstract)
- [64] 田敏. 基于物联网技术的作物养分信息快速获取与精准施肥智能控制系统研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
TIAN Min. Rapid Acquisition of Crop Nutrient Information and Intelligent Control System for Precise Fertilization based on Internet of Things Technology[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [65] 胡红岩, 任相亮, 姜伟丽, 等. 植保无人机棉田喷洒农药沉积分布研究[J]. 华中农业大学学报, 2018, 9(5): 59-64.
HU Hongyan, REN Xiangliang, JIANG Weili, et al. Pesticide spray distribution of plant protection UAV cotton field[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018, 9(5): 59-64. (in Chinese with English abstract)
- [66] SIDOROV V, ZHUKOVSKI E, LEKOMTSTEV P, et al. Geostatistical analysis of the soil and crop parameters in a field experiment on precision agriculture[J]. Eurasian Soil Science, 2012, 45(8): 783-792.
- [67] 何雄奎, 曾爱军, 刘亚佳, 等. 水田风送低量喷杆喷雾机设计及其参数研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 76-79.
HE Xiongkui, ZENG Aijun, LIU Yajia, et al. Design and parameter test of the low volume air assistant rice boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(9): 76-79. (in Chinese with English abstract)
- [68] 刘雪美, 李扬, 李明, 等. 喷杆喷雾机精确对靶施药系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 37-44.
LIU Xuemei, LI Yang, LI Ming, et al. Design and test of smart-targeting spraying system on boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 37-44. (in Chinese with English abstract)
- [69] 胡均万, 罗锡文, 阮欢, 等. 双板差分冲量式谷物流量传感器设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 69-72.
HU Junwan, LUO Xiwen, RUAN Huan, et al. Design of a dual-plate differential impact-based yield sensor design of a dual-plate differential impact-based yield sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 69-72. (in Chinese with English abstract)
- [70] 陈树人, 杨洪博, 李耀明, 等. 双板差分冲量式谷物流量传感器性能试验[J]. 农业机械学报, 41 (8): 171-174.
CHEN Shuren, YANG Hongbo, Li Yaoming, et al. Experiment of dual-plates differential impact-based grain flow sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 41(8): 171-174. (in Chinese with English abstract)
- [71] 冉金毅. 联合收获机割台高度调控系统研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2023.
Ran Jinyi. Research on Cutting Height Control System of Combine Harvester[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [72] 刘伟健, 罗锡文, 曾山, 等. 基于模糊 PID 控制的再生稻自适应仿形割台性能试验与分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 182-184.

- LIU Weijian, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Performance test and analysis of the self-adaptive profiling header for ratooning rice based on fuzzy PID control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(8): 182-184. (in Chinese with English abstract)
- [73] 刘婵韬, 徐岚俊, 李小龙, 等. 农机管理调度中心系统的设计与实现[J]. 农业技术与装备, 2022(8): 110-113.
- LIU Xingtao, XU Lanjun, LI Xiaolong, et al. Design and implementation of agricultural machinery management and dispatching center system[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2022(8): 110-113. (in Chinese with English abstract)
- [74] 徐会苹. 德国家庭农场发展对中国发展家庭农场的启示[J]. 河南师范大学学报(哲学社会科学版), 2013, 40(4): 70-73.
- XU Huiping. Germany family farms' experience and enlightenment to china[J]. Journal of Henan Normal University (Philosophy and Social Sciences), 2013, 40(4): 70-73. (in Chinese with English abstract)
- [75] 庞春霖. 智能农机技术路线图 1.0[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2022.
- [76] 胡炼, 罗锡文, 张智刚, 等. 基于 CAN 总线的分布式插秧机导航控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 88-92.
- HU Lian, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, et al. Design of distributed navigation control system for rice transplanters based on controller area network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 88-92. (in Chinese with English abstract)
- [77] 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.
- [78] 白学峰, 常江雪, 滕兆丽, 等. 我国智能农业拖拉机关键技术研究进展[J]. 智能化农业装备学报, 2022, 3(2): 10-21.
- BAI Xuefeng, CHANG Jiangxue, TENG Zhaoli, et al. Research progress on key technologies of intelligent agricultural tractors in China[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2022, 3(2): 10-21. (in Chinese with English abstract)
- [79] 何杰, 朱金光, 张智刚, 等. 水稻插秧机自动作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 17-24.
- HE Jie, ZHU Jinguang, ZHANG Zhigang, et al. Design and Experiment of Automatic Operation System for Rice Transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 17-24. (in Chinese with English abstract)
- [80] 何伟灼, 刘威, 姜锐, 等. 无人机点射式水稻播种装置控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 51-61.
- HE Weizhuo, LIU Wei, JIANG Rui, et al. Control system design and experiments of UAV shot seeding device for rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(18): 51-61. (in Chinese with English abstract)
- [81] WANG X W, JIANG R, ZHOU Z Y, et al. Discharge rate consistency of each channel for UAV-based pneumatic granular fertilizer spreader[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(4): 20-28.
- [82] ZHANG W Y, HU L W, DING F, et al. Parking precise alignment control and cotransporter system for rice harvester and transporter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215.
- [83] 张闻宇, 张智刚, 张帆, 等. 水稻收获转运双机协同自主作业策略与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 15(28): 1-9.
- ZHANG Wenyu, ZHANG Zhigang, ZHANG Fan, et al. Cooperative autonomous operation strategy and experiment of the rice harvester together with a rice-transporting vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 15(28): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [84] DING F, ZHANG W Y, LUO X Wen, et al. Gain self-adjusting single neuron PID control method and experiments for longitudinal relative position of harvester and transport vehicle[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215.
- [85] 黄辉. 无人农场智能农机无人化作业仿真系统研究与试验[D]. 广州: 华南农业大学, 2023.
- HUANG Hui. Research and Experiment on Unmanned Operation Simulation System of Intelligent Agricultural Machine in Unmanned Farm[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [86] 徐浩, 张小虎, 邱小雷, 等. 格网化小麦生长模拟预测系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 167-172.
- XU Hao, ZHANG Xiaohu, QIU Xiaolei, et al. Design and implementation of gridded simulation and prediction system for wheat growth[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 167-172. (in Chinese with English abstract)
- [87] 丁文浩. 基于 WebGIS 的安徽省小麦赤霉病监测预警模型的研究及应用[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
- DING Wenhao. Research and Application of Anhui Wheat Head Blight Forecasting Based on Support WebGIS[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [88] 袁德宝, 张冰瑞, 叶回春, 等. 水稻病虫害遥感监测与预测研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(1): 97-107.
- YUAN Debao, ZHANG Bingrui, YE Huichun, et al. Advances in remote sensing monitoring and prediction of rice diseases and pests[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(1): 97-107. (in Chinese with English abstract)
- [89] 刘刚, 林建涵, 司永胜, 等. 激光控制平地系统设计与试验分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 71-74.
- LIU Gang, LIN Jianhan, SI Yongsheng, et al. Development and experiment on laser controlled leveling system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 71-74. (in Chinese with English abstract)
- [90] 胡炼, 关锦杰, 何杰, 等. 花生收获机自动驾驶作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 21-27.
- HU Lian, GUAN Jingjie, HE Jie, et al. Design and experiment

- of automatic driving operation system of peanut harvester based on BDS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 21-27. (in Chinese with English abstract)
- [91] 何杰, 满忠贤, 胡炼, 等. 履带式花生联合收获机路径跟踪控制方法与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 9-17.

HE Jie, MAN Zhongxian, HU Lian, et al. Path tracking control method and experiments for the crawler-mounted peanut combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(1): 9-17. (in Chinese with English abstract)

Key technologies and practice of unmanned farm in China

LUO Xiwen, HU Lian, HE Jie, ZHANG Zhigang, ZHOU Zhiyan, ZHANG Wenyu,
LIAO Juan, HUANG Peikui

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Laboratory of Lingnan Modern Agriculture, Guangzhou 510642, China; 3. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: "Who will farm" and "how to farm" would be one of the common problems in agriculture all over the world in the future. Modern agriculture is the development direction for agriculture, and it is an effective way to solve the problem of "who will farm" and "how to farm". Smart agriculture has been the promising development direction in modern agriculture. Among them, the unmanned farm is one of the most important ways to realize smart agriculture. South China Agricultural University first constructed the unmanned rice farm in Zengcheng, Guangzhou, Guangdong Province of China in 2020. This unmanned rice farm has broken through four key technologies, including (1) Digital perception for the accurate perception of the operating environment, working objects, and machinery information of unmanned farms; (2) Intelligent decision-making for land reclamation, tillage, planting, sowing, field management, and harvest programs; (3) Precision operation for the automatic navigation and precision of agricultural machinery; (4) Intelligent management for crop growth, agricultural machinery operation, and farm management. Five functions were achieved, including (1) Full coverage production links of tillage, planting, field management, and harvesting; (2) Automatically transferring from the garage to the field; (3) Automatic obstacle avoidance and parking for safety; (4) Real-time monitoring of crop production, and (5) Intelligent operation with the decision-making precision. Remarkable economic, social, and ecological benefits were also achieved in this unmanned rice farm. The yield of the Simiao rice variety was 9934.35 kg/hm² in the unmanned rice farm in Zengcheng, Guangdong Province of China in 2021, 32% more than the local average yield of the same rice variety. The yield of ratoon rice was 18625.5 kg/hm² in an unmanned farm in Qianshanhong Town of Yiyang, Hunan Province of China in two seasons of 2023. Therefore, the crops were planted well in the unmanned farm. 30 unmanned farms were constructed in 14 provinces in China by the end of 2022, including rice, wheat, corn, and peanuts unmanned form. The unmanned farm can provide the great potential to solve the "who will farm" and "how to farm" in the future. In order to further promote the development of unmanned farms, the following recommendation were proposed: (1) Enlarge the agricultural farmland scale and agricultural management scale, strongly support the agricultural cooperative, agricultural leading enterprises and large farm landowners to enlarge their farmland scale to suited the construction of the unmanned farm. (2) In light of the basic requirements of unmanned farm for lager farmland, flat field, continuous planting, and convenient farm track path and irrigation and drainage channel, land improvement and develop high-standard farmland should be strengthen . (3) Explore suitable unmanned farm models for different area, different agrotype, different crops, different cropping systems, and different production models. It is necessary to promote the construction of unmanned farms according to the local modern agricultural industrial parks. (4) Explore various talent training for unmanned farm. For example, it would be a good propose to train technician and manager working for unmanned farm in vocational school. (5) It is necessary to speed up the formulation of relevant policies to promote the construction of unmanned farms, especially the financing of construction funds. To mobilize the enthusiasm of the government, enterprises and society to invest in the construction of unmanned farms, and appropriately increase the purchase subsidy amount of intelligent agricultural machinery should also be considered as soon as possible.

Keywords: smart agriculture; unmanned farm; rice; intelligent agricultural machinery; modern agriculture