doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.023

水稻无人化智慧农场探索与实践

罗锡文[1,2]　胡　炼[1,2]　廖　娟[3,4]　周志艳[3,4]　何　杰[1,2]　马　旭[4]
张闻宇[3,4]　曾　山[3,4]

(1.岭南现代农业科学与技术广东省实验室,广州 510642;2.农业装备技术全国重点实验室,北京 100083;
3.广东省农业人工智能重点实验室,广州 510642;4.华南农业大学工程学院,广州 510642)

摘要:本文阐述了华南农业大学在水稻无人化智慧农场建设中的探索与实践,重点介绍了四大关键技术:对无人农场的作业环境、作业对象和作业机械信息精准感知的数字化感知技术;对土地整治、耕整、移栽、直播、田间管理和收获方案的智能化决策技术;对农机导航和农机精准作业的精准化作业技术;对农作物生长、农机运维和农场经营管理的智慧化管理技术。实现了五大功能: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,作物生长过程实时全监控和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。至 2024 年底,在国内 16 个省启动了 30 多个无人农场的建设,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。特别是取得了一批水稻高产记录,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 kg/hm^2,比当地平均产量增加 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 kg/hm^2。表明人不下田也能种地,也能种好地,为解决谁来种地和怎样种地提供了重要途径。

关键词:水稻;智能农机;无人农场;智慧农场;智慧农业;现代农业

中图分类号:S127　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)10-0277-14　　**OSID**:

Exploration and Practice of Unmanned Smart Rice Farms

LUO Xiwen[1,2]　HU Lian[1,2]　LIAO Juan[3,4]　ZHOU Zhiyan[3,4]　HE Jie[1,2]　MA Xu[4]
ZHANG Wenyu[3,4]　ZENG Shan[3,4]

(1. *Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology*, *Beijing* 100083, *China*
3. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural Artificial Intelligence* (*GDKL-AAI*), *Guangzhou* 510642, *China*
4. *College of Engineering*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*)

Abstract: The exploration and practice of South China Agricultural University in building unmanned rice smart farms were introduced, focusing on four key technologies: digital perception technology: precisely sensing information about the operational environment, objects, and machinery in unmanned farms; intelligent decision-making technology: intelligent decision-making for land reclamation, tillage, planting, sowing, field management, and harvesting; precision operation technology: precision operations for agricultural machinery navigation and targeted farming tasks; smart management technology: smart management for crop production, machinery maintenance, and farm operations. It achieved five functions, including full coverage production links of tillage, planting, field management, and harvesting; automatically transferred from garage and field; automatically obstacle avoidance and parking for safety; real-time monitoring of crop production process and intelligent decision-making precision operation. Remarkable economic, social and ecological benefits were achieved in this unmanned rice farm. By the end of 2024, more than 30 unmanned farms were built in 16 provinces in China, involving crops of rice, wheat, corn and peanuts, soil types of paddy fields and drylands, operation stages of plowing, planting, management, harvesting, and machinery modes of single-machine and multi-machine. In 2021, the yield of Simiao rice variety in the unmanned rice farm in Zengcheng, Guangdong,

收稿日期:2025-07-06　修回日期:2025-07-25

基金项目:井冈山农高区省级科技专项“揭榜挂帅”项目(20222-051252)和岭南现代农业科学与技术广东省实验室科研项目(NT2021009)

作者简介:罗锡文(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事农业工程技术研究,E-mail:xwluo@scau.edu.cn

was 9 934.35 kg/hm^2, 32% more than the local average yield of the same rice variety. In 2023, the yield of ratoon rice in unmanned farm in Qianshanhong Town of Yiyang, Hunan Province was 18 625.5 kg/hm^2 in two seasons, which demonstrated that crops can be planted well in unmanned farm without people. Notably, it set new high-yield records for rice, demonstrating that farming can be done without human in the fields, and even achieve high productivity. The research result can provide a critical solution to the challenges of "who will farm" and "how to farm".

Key words: rice; intelligent agricultural machinery; unmanned farm; smart farm; smart agriculture; modern agriculture

0 引言

目前,我国农村劳动力老龄化日益加重,第三次全国农业普查数据显示,2016 年我国农业生产经营人员中 55 岁及以上者占比 33.58%[1]。未来"谁来种地"和"怎样种地"已成为中国农业和世界农业面临的共同问题,国内外的实践表明,发展智慧农业是解决这一问题的有效途径。

英国哈珀亚当斯大学和英国 Precision Decisions 农业公司于 2016—2017 年创建了世界上第一个大麦无人农场("Hands Free Hectare"项目),实现了耕种管收全程无人化作业。日本关西科技城机器人农场是世界上首家机器人农场,由日本 Spread 公司于 2017 年在本津川市建造。这个农场占地 4 400 m^2,从灌溉到收获全部由机器人操作,每天可生产 30 000 株莴苣,在 5 年内有望达到 500 000 株[2]。华南农业大学从 1996 年起,开展了基于卫星定位的耕作阻力研究,实现了不同地块、不同位置和不同深度的土壤耕作阻力的精准测量[3]。2006 年研制成功国内第一台无人驾驶插秧机[4],每小时可插 0.3 ~ 0.4 hm^2,而传统人工插秧一个强劳动力一人一天只能插 0.07 hm^2,效率提高 50 ~ 60 倍。研制成功的无人驾驶旱旋耕机一小时可旋耕 1.3 hm^2,过去一个人一头牛一天最多只能犁 0.133 hm^2 地,相比之下,效率提高 100 倍[5]。国内外的实践表明,智能农机能大幅度提高劳动生产率、土地产出率和资源利用率。集成生物技术、信息技术、大数据、人工智能和智能农机,华南农业大学于 2020 年在广东省广州市增城区创建了全球第一个水稻无人农场。突破了四大关键技术,包括数字化感知、智能化决策、精准化作业和智慧化管理;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、作物生长过程实时全监控和智能决策精准作业全无人[6]。

本文阐述华南农业大学在水稻无人农场建设中的探索和实践。数字化感知关键技术中,重点介绍不同生长期的水稻长势、养分和病虫草害精准感知技术,特别是根据无人机获取的水稻养分信息进行精准施肥可节省氮肥 20% 以上;针对水田土壤松软,硬底层坑洼不平的特点,重点介绍水田作业机械智能导航关键技术,特别是减少滑移、滑转和侧滑的控制技术;对精准平整、精准种植和精准管理进行系统介绍;为提高水稻收获效率,重点介绍田边卸粮、跟车卸粮和等待卸粮作业模式;智能管控平台是无人农场的指挥中心,华南农业大学创建的水稻无人农场实行三级管理模式,文中详细介绍平台的远程控制、信息管理和任务调度三大功能。华南农业大学建设的水稻无人农场对我国的无人农场建设和智慧农业的发展进行探索和实践,以期为未来"谁来种地"和"怎样种地"提供有效途径。

1 数字化感知

水稻长势、病虫草害胁迫及农机作业环境信息的数字化感知,是水稻无人农场实现智能灌排、精准施肥和高效喷施等无人化作业的前提和基础,包括水稻苗情长势、常见病虫草害、土壤水分及水层高度、田间动静态障碍物及地头等作业环境信息,要求能够精准快速、连续地测量,以便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、自动导航和无人化作业系统。

1.1 水稻长势信息感知

基于反射光谱的低空遥感技术是获取水稻长势信息的重要手段,具有无损非接触、覆盖面积大和获取成本相对低等特点[7]。水稻冠层反射光谱蕴含了丰富的作物生长信息,国内外学者主要利用光谱指数研究反射光谱和作物生长信息之间的定量关系[8]。归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)、绿光归一化差异植被指数(Green normalized difference vegetation index, GNDVI)、归一化红边指数(Normalized difference red edge, NDRE)、归一化缺水指数(Normalized difference water index, NDWI)等植被指数是水稻长势及营养状态的常用指示因子,根据上述指示因子可推算出水稻肥水需求量,对合理施肥灌溉具有重要的指导作用,可提高肥水运筹水平和利用效率,从而降低过量施肥带来的资源浪费、成本增加和农田

环境污染。

在水稻长势信息的快速感知中，影响时效性的主要问题包括气象影响因子多和在农时节点适合遥感的少云时间窗口少等。采用无人机进行水稻长势信息的近地遥感获取，可弥补上述不足，是目前田块级农田水稻长势信息快速获取的主要方法之一，也是精准农业发展的重要方向[9]。

受载荷量、滞空时间及航空管制的限制，无人机低空遥感单幅影像覆盖面积通常只有几百平方米，同时还要考虑拼接中的准确率，通常重叠度需要达 70% 以上，以遥感监测 66.67 hm^2 稻田为例，拼接前的多波段光谱影像采集量可达 5 000 幅，校正、拼接及解析等处理工作需耗时 5 h 以上。华南农业大学针对水稻长势获取和解析等处理中耗时过长的问题进行了研究。JIANG 等[10]提出了一种无人机低空遥感获取作物长势信息的快速采集及数据处理方法，并开发了传感器校准流程。所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，信息解析数据量可达 534.6 hm^2/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，飞机落地即可出图，大大缩短了飞防等待时间。

臧英等[11]提出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，利用无人机搭载多光谱传感器获取水稻 NDVI 植被指数，建立了 NDVI、标准种植比值指数（RISP）与水稻植株氮含量之间的相关关系，结合有效积温，建立水稻关键施肥节点施肥量决策模型，决定系数为 0.991，田间试验表明，模型种植区平均施氮用量为 99.64 kg/hm^2，而传统种植区平均用量为 135.60 kg/hm^2，施肥量减少 26.52%。

通过无人机低空遥感进行水稻长势信息感知，可快速获知水稻生长的营养丰缺情况，为制定施肥处方图提供基础数据，使无人化田间管理中肥料的“补缺”精准到位，从而达到稳产、节本和绿色环保的效果。

1.2　病虫草害信息感知

水稻病虫害是影响水稻品质和产量的主要因素之一。常用的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。

李泽轩[12]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，识别准确率分别为 93.41% 和 90.25%，可指导农户远程进行病虫害识别、智能诊断和精准防控。褐飞虱由于其迁飞性、爆发性、变异性和抗药性等特点，位列影响我国水稻生产最严重的生物灾害之首。为准确检测褐飞虱数量，何越[13]采用图像识别方法，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%。

在褐飞虱发生早期，快速、准确地掌握褐飞虱的虫情情况是进行褐飞虱精准防治的前提和关键。光谱检测法可在作物病虫害危害早期，通过检测作物光谱特征监测病虫害的发生和发展情况，是目前比较常用的作物病虫害监测方式。刘又夫等[14]基于热红外成像技术，通过水稻冠层热图像温度特征变异，研究了褐飞虱侵害水稻冠层温度变化特征，评估水稻受褐飞虱侵害状况的精准率达到 87.15%。

褐飞虱主要发生在水稻茎秆下部，以吸取茎秆汁液为食，从而改变水稻茎秆光谱特征。LIAO 等[15]创新性地融合水稻冠层与茎秆敏感波长光谱数据，构建了基于 S－G 平滑、PCA 与 BLS 的算法组合，突破了单一器官光谱分析的局限性。结果表明，多源数据融合使分类准确率提升至 99.08%，显著优于传统单器官模型（83.75%），验证了茎秆光谱对虫害胁迫响应的补充价值。此外，BLS 模型在保证精度的同时降低了计算复杂度，为田间实时监测提供了技术支撑。这一成果不仅填补了多器官光谱协同分析的研究空白，也为无人机遥感技术在水稻害虫精准防控中的应用奠定了基础，推动农业病虫害监测向高效化和智能化方向发展。

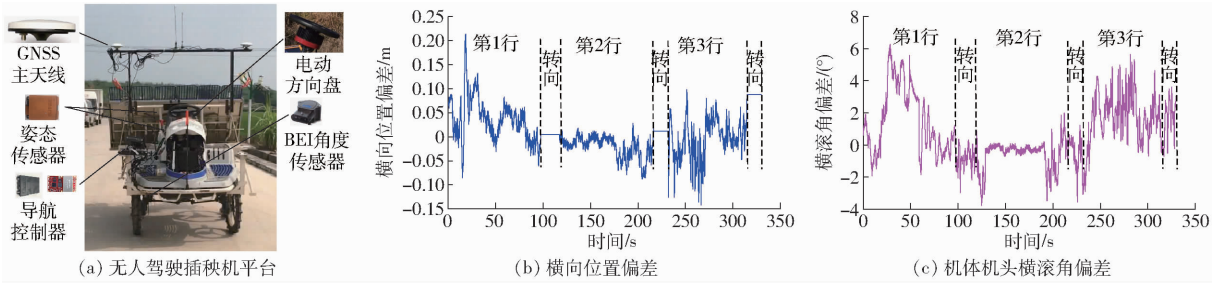
2　智能导航

农机自动导航系统的核心是通过 GNSS 定位与路径跟踪控制算法实现高精度路径跟踪。国内外学者在农业机械自动驾驶路径跟踪控制方面进行了大量研究，主要采用纯追踪[16]、PID、LQR 和 MPC 等方法。但是水田泥脚深浅不一、土质松软，水田农机的行走轮与水田硬低层的附着力小，纵向和侧向滑移现象非常严重，极易失去操纵稳定性，严重影响水田作业机械智能导航的精度和作业效率。水田作业农机导航中一般将侧滑滑移等视为不确定性和突变性干扰，采取抗干扰导航控制方法。

国内外学者针对地形起伏、坡地、侧沟等场景提出了多种抗干扰控制方法以改善农机导航的性能。何杰等[17]针对自动导航拖拉机在侧偏侧滑干扰工况下路径跟踪误差大、纠偏易超调且调节时间长等问题，研究了基于驱动轮横向侧偏补偿的改进纯追踪路径跟踪控制方法，提升了自动导航拖拉机在复杂工况下的控制精度和稳定性。

水田农机和机具运动耦合扰动的影响使自适应导航决策和抗干扰方法面临严峻挑战。尽管采用与

旱地拖拉机类似的算法结构进行改进与优化，但在控制精度和对不同农田的适应性上尚未取得重大突破。华南农业大学对水田农机抗侧滑滑移导航控制方法进行了系列研究。王辉[18]提出的基于预瞄跟随和侧滑补偿的复合路径跟踪控制算法在水田作业机械导航中得到了广泛应用。该算法通过预瞄机制，提前获取前方路径信息，使机器能提前做出转向响应。在预瞄点的选择上，结合水田作业特点，根据机器的行驶速度和转向性能，确定合适的预瞄距离和角度。同时，引入侧滑补偿环节，根据传感器监测到的侧滑信息，实时调整转向控制量，对侧滑进行补偿。遇到侧滑时，算法会增加转向角度，以抵消侧滑带来的偏移，确保机器沿着预设路径行驶，有效提高了农机在水田作业时的导航精度。HE 等[19]建立的基于农机姿态修正的农机运动学模型，结合 MPC 技术，为水田农机的智能控制提供了有效手段。通过建立精准的机械运动学模型，考虑到农机的动力学特性、土壤力学特性以及作业环境因素，可预测农机在未来一段时间内的运动状态。基于此模型，设计了水田农机的线性模型、目标函数和约束函数。目标函数通常以最小化机械的行驶偏差和能耗为目标，约束函数则考虑机械的物理限制和作业要求，如转向角度限制和速度限制等。在实际作业中，MPC 控制器根据当前机械状态和预设路径，计算最优的控制输入，如转向角度和动力输出等，使机器在满足约束条件的前提下，准确地跟踪预设路径。田间试验结果表明，基于该方法的直线路径跟踪平均均方根误差为 0.043 m，平均绝对误差为 0.033 m，如图 1 所示，算法有效抑制了机具受侧滑滑移引起的横向位置偏差和突变性横向位置偏差，控制精度较高。



(a) 无人驾驶插秧机平台 (b) 横向位置偏差 (c) 机体机头横滚角偏差

图 1 基于农机具位姿的水田农机抗干扰导航控制

Fig. 1 Anti-interference navigation control of water field agricultural machinery based on position and posture of agricultural machinery and implements

将侧滑和滑移视为干扰进行抗干扰导航方法研究，可以较好地提高水田农机导航的精度，但在不同的水田环境作业效果差异较大，作业质量的稳定性较差。为此，刘兆朋等[20]提出了基于侧滑估计补偿器的农机导航复合路径跟踪控制方法，利用侧滑估计补偿器对侧滑量进行实时估计。通过建立精确的侧滑模型，结合传感器数据，准确预测机器的侧滑趋势。根据估计结果，调整导航路径和控制参数，补偿侧滑对机器行驶的影响。何杰等[17]基于数据驱动，进行了水田农机侧滑在线估计方法研究，可为提高农机自动驾驶作业系统对水田侧滑的抗干扰能力和作业的稳定性提供支持。研究采用水田农机机身经纬度坐标、AHRS 6 自由度的姿态、GNSS 双天线航向，Inertial + 采集到的纵向运动、侧向运动、垂向运动对应轴上的侧倾、俯仰和横摆运动参数，采用离线数据人工标注(通常人工判定突变性偏离预定轨迹 5 cm 左右视为发生侧滑)和在线学习预估方法结合，设计了基于数据驱动的水田农机侧滑位姿估计方法。采用人工标注判定突变位姿和正常位姿变化，采用随机森林算法反复学习进行分类，将分类结果形成专家知识，用于在线学习；采用卡尔曼滤波算法进行在线处理，预测下一时刻拖拉机的位姿和加速度值，如受到侧滑等突变影响，下一时刻农机实际位姿与最优估计位姿将产生偏差，结合专家知识可进一步判定为侧滑位姿变化，如图 2 所示。

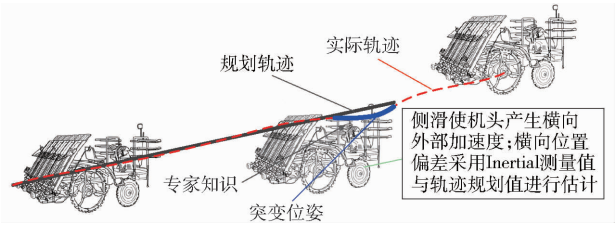


图 2 突变性位姿变化界定

Fig. 2 Definition of mutational pose changes

在基于数据驱动的水田农机侧滑位姿估计中引入有界光滑非线性不确定函数，建立水田农机横向运动模型；离线获取并分析人工驾驶农机处理侧滑的经验知识，综合在线获取水田农机运动信息，采用离线和在线数据结合的迭代学习数据驱动方法，设计了抗突变导航控制方法，用以快速决策纠正横向位置偏差，如图 3 所示，结果表明：当航向角误差突变 3°、位置偏差突变 7 cm 时，基于抗突变导航控制方法在 0.5 s 内控制量趋于稳定收敛。

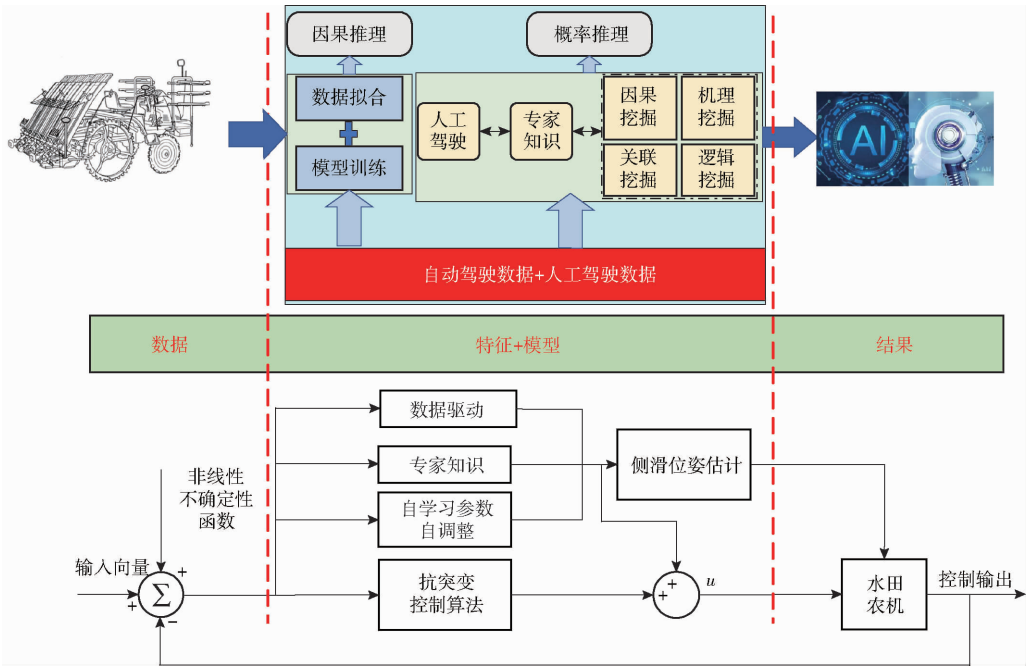


图 3　数据驱动的抗突变农机导航控制框图

Fig. 3　Block diagram of data-driven anti-mutation agricultural machinery navigation control

3　精准平整

水田耕整包括犁耕、耙耕、旋耕和平整。我国自古就有“寸水不过田”的农谚，精准平整的水田能大幅度节水、节肥和提高作物产量。为适应我国水田平整作业需求，华南农业大学创制了旱田平地机（图 4）和水田平地机（图 5），根据对平地铲高度和姿态感知方式的不同，分为激光控制平整系统和 GNSS 控制平整系统。



图 4　多轮支撑悬挂式旱平地机

Fig. 4　Multi-stage supported suspension type dry flatbed tractor



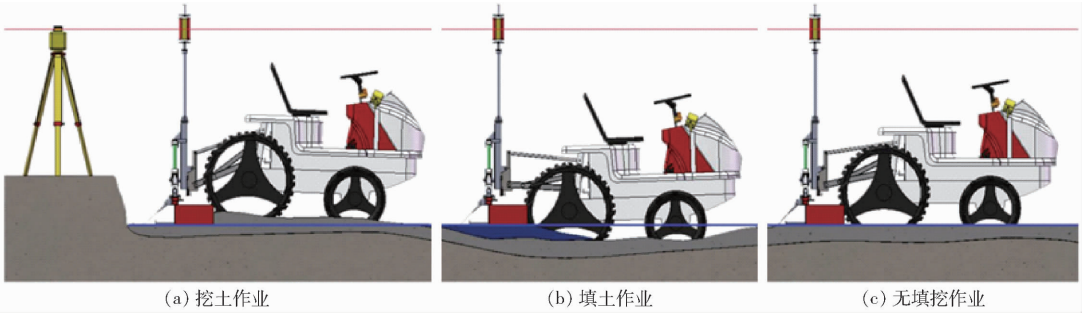
图 5　与插秧机底盘配套的水田平地机

Fig. 5　Water field leveling machine that was compatible with chassis of transplanting machine

（1）激光控制平整系统

激光控制平整系统主要由激光发射器、激光接收器与控制终端组成。如图 6 所示，其原理是以激光发射器发射的旋转激光束形成的平面作为基准高度，安装在平地铲上的激光接收器接收激光信号，计算与基准高度的距离，并发送至控制终端，控制终端生成控制信号驱动执行元件动作，控制平地铲距离基准高度始终保持恒定值。

由于水田硬底层不平和土壤松软导致平地机左右轮陷深不一，作业机具不能保持水平导致作业质



(a) 挖土作业　　(b) 填土作业　　(c) 无填挖作业

图 6　激光控制平整技术原理图

Fig. 6　Principle of laser control leveling technology

量差,为此,华南农业大学创新设计了基于拖拉机/插秧机横滚角的平整机具自动调平方法(图 7)。采用基于外部加速度和向心加速度估计的平地机具姿态估计算法,研制成功低成本横滚角传感器,建立了平地铲和拖拉机/插秧机的相对倾斜角度转换模型,通过控制电磁换向阀实现平地铲水平控制。应用结果表明,横滚角传感器测量均方根误差小于等于 0.18°,平地铲倾斜角度均方根误差小于等于 0.24°,水平控制精度从 1°提高到 0.24°[21]。

激光平地机控制系统如图 8 所示。采用变增益过程函数对机具高程和调平液压系统流量非线性环节进行补偿,消除了平地机具运动死区对执行控制信号的影响,研制成功高程和水平联合控制系统,平整精度小于等于 3 cm,实现了水田精准平整。

(2)GNSS 控制平整系统

如图 9 所示,GNSS 控制平整技术是依据卫星定

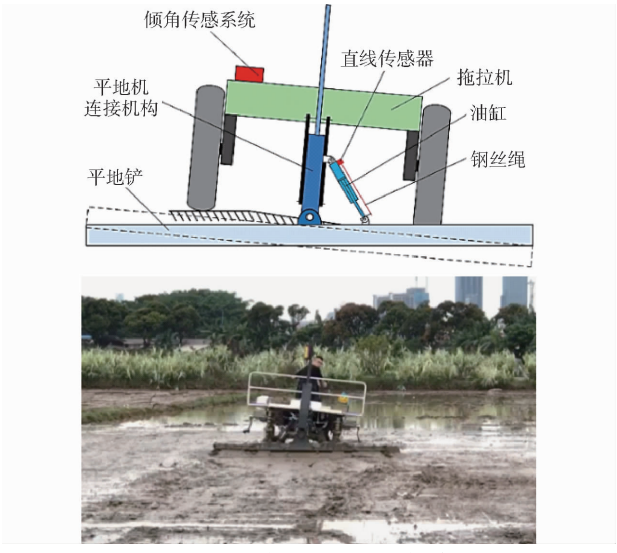


图 7 平地机自动调平原理与效果图

Fig. 7 Automatic leveling principle and effect diagram of bulldozer

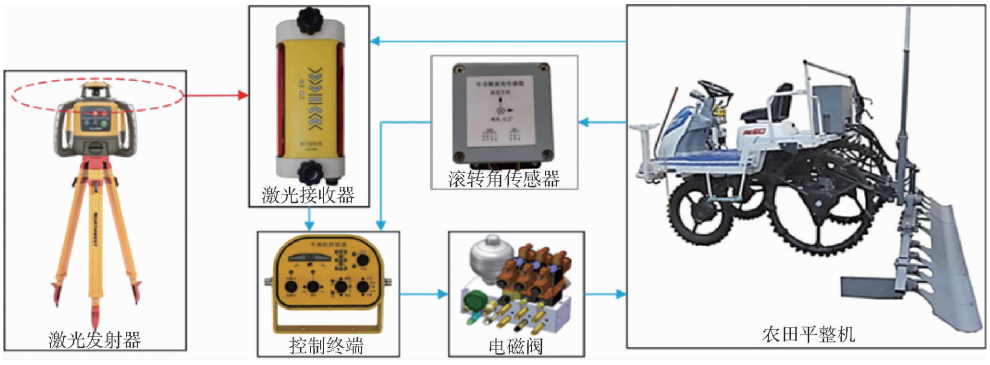


图 8 平地机控制系统构成图

Fig. 8 Diagram of ground control system

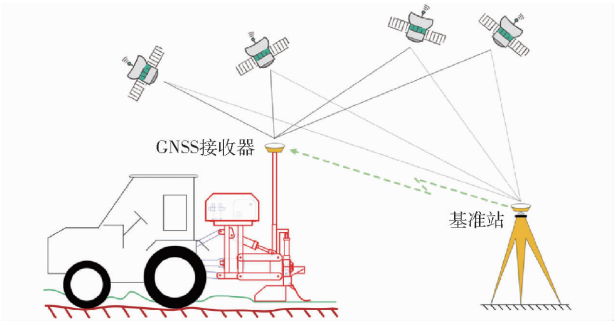


图 9 GNSS 控制平整技术原理图

Fig. 9 GNSS control leveling technology principle diagram

位原理,获取安装在平地铲上的 GNSS 接收器的实时高度,快速设定和调整平整基准,计算平地铲实时高度和基准的高差,自动控制平地铲运动至基准位置。

GNSS 控制平整系统应具备设计平整基准与自动控制平地铲高度的基础功能。此外,GNSS 接收器还可以输出经纬度、姿态信息以及速度等信息。采用多源信息,GNSS 控制平整技术扩展了农田三维地形测量平整路径规划等功能。

(3)基于北斗的平整机具准确高程测量技术

针对平地铲高程升降运动频繁、RTK 短暂丢失引起高程精度和稳定性降低的问题,采用基于北斗与自由加速度的变参数卡尔曼融合算法,实现了平整机具高程的精准测量。结果表明,测量误差小于等于 13.43 mm(RMS);在短暂差分丢失情况下高程测量误差小于等于 15.22 mm(RMS),差分连续丢失 29 s 内高程测量的均方根误差小于 30 mm(RMS)。

(4)平整作业过程中农田三维地形实时更新技术

针对农田平整作业过程中无法实时更新田面地形的问题,设计了一种农田精准平整过程中三维地形实时测量方法(Real-time 3D terrain measurement, Rt3DTM)。以安装有 GNSS 双天线和姿态传感器的支撑轮式旱地平地机为地形测量平台(图 10),采用卡尔曼滤波器融合 GNSS 与加速度提高定位精度,通过建立平地铲运动学模型获得支撑轮底点的车体坐标,结合平地铲位姿信息对支撑轮底点进行世界坐标解算,并利用最邻近插值法生成地形图。

旱地平整作业中的地形测量均方根误差为 16.5 mm，平整度为 16 mm，小于 30 mm 的高差分布列为 95.8%，相比传统测量方法的均方根误差准确性提高 29.5%，平整度准确性提高 11.1%，高差分布列准确性提高 9.5%。提出的 Rt3DTM 方法能实时准确地获取平整作业过程中平后区域的地形信息，为无人化农田平整实时路径规划提供了基础。

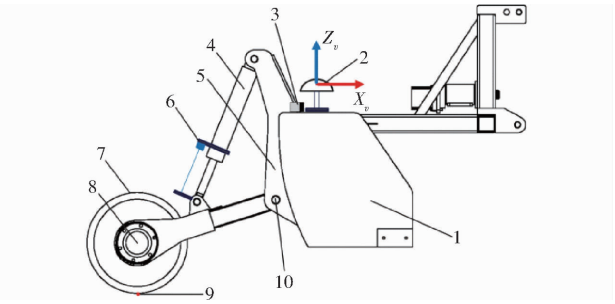


图 10　农田精准平整过程中三维地形实时测量方法

Fig. 10　Real-time three-dimensional terrain measurement method during process of precise land leveling in farmland

1. 平地铲　2. BDS 天线　3. 姿态传感器　4. 液压油缸　5. 高程调节架　6. 位移传感器　7. 支撑轮　8. 支撑轮中心　9. 支撑轮底点　10. 支撑轮架转动点

(5)平整机具高程控制技术

针对水田硬底层不平引起平地机俯仰角频繁变化导致高程控制性能变差的问题，首次提出了水田硬底层三维轮廓采集与数学表达模型，建立了水田不平整分级方法。基于时间序列理论构建了平地机俯仰角在线预测的 15 阶自回归模型 AR(15)，预测值与真实观测值平均绝对误差百分比为 6.81%；以干扰信号主频为输入、微分参数为输出，建立了模糊逻辑规则，设计了水田硬底层不平干扰的自适应 PD 控制器和基于 AR(15)模型的平地铲高程前馈补偿器，构建了平地机高程复合控制系统，加快了对由俯仰角引起的较大高程偏差的调节速度，平整机具高程控制误差小于等于 17 mm(RMS)。

(6)平整路径实时规划、作业决策与自动导航平整技术

针对传统农田平整凭经验设置平整深度和选择平整路径从而导致作业质量差和作业效率低的问题，平整前基于三维地形提出了改进蚁群算法的农田平整作业路径规划方法，平整过程中基于实时地形提出了农田土方分布趋势评价和平地深度调整的实时路径规划方法，并基于平地作业载荷检测和地形实时更新规划作业路径，制定平整作业辅助决策，采用辅助决策后平地铲的过载或空载率总和不大于 6.9%；根据平地机作业目标区域的三维地形，以提高平地机作业效率为原则确定平地铲入土深度和平地路径，提出了平地机侧滑估计及自适应路径跟踪控制方法，实现了自动导航平地作业。

4　精准种植

水稻种植主要有移栽和直播两种方式，其中移栽有机械插秧和机械抛秧两种模式，直播有机械直播(旱直播、水直播)和无人机撒播两种模式。

4.1　水稻育秧生产线秧盘播种量控制装置

水稻育秧质量决定水稻移栽质量以及水稻产量，水稻育秧生产线秧盘播种量控制对于保证水稻育秧质量具有十分重要的意义，马旭等[22-23]设计的水稻育秧生产线秧盘播种量智能调控装置为水稻精准育秧播种提供了有力的技术支持。

4.1.1　秧盘播种前后质量称量

为了精准获得秧盘播种量，获取播种前、后两次秧盘质量，并以此判定秧盘播种量是否在设定范围，并决定是否需要调整秧盘播种量，该调控装置通过变速称量机构(前后称量机构相同)获取播种前后秧盘质量。机构如图 11 所示，其中前、后驱动轮与橡胶驱动轮组转速相同，前、后驱动轮半径大于橡胶驱动轮半径，形成前、后驱动轮驱动秧盘速度大于前、后橡胶驱动轮组驱动秧盘速度。工作时，由于输送速度差异，前驱动轮使前秧盘加速与后秧盘产生间距，保证秧盘在前、后支撑轮上进行称量时，实现静态无接触高精度称量；后驱动轮使称量后的秧盘加速追赶前秧盘消除间距，保证秧盘在育秧生产线上动态无间隔连续输送。

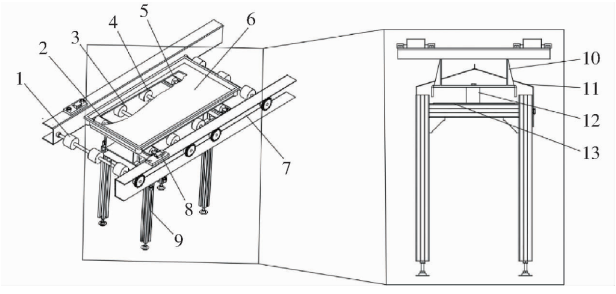


图 11　变速称量机构结构示意图

Fig. 11　Schematic of variable-speed weighing mechanism

1. 橡胶驱动轮组　2. 前支撑轮　3. 前驱动轮　4. 后驱动轮　5. 后支撑轮　6. 称量秧盘　7. 生产线主梁　8. 称量位置检测传感器　9. 支撑架　10. 承重架　11. 挡泥板　12. 称量传感器　13. 底板

4.1.2　秧盘播种量调控原理

振动式精密播种装置通过变频调速电机带动排种轮转动将种子从种箱中分离出来，种子落到气动排种振种盘上，经匀种后播到秧盘上。建立水稻秧盘播种量与电机频率间的模型，通过调整电机变频器输出频率改变排种轮转速实现播种量调控。

4.1.3 秧盘播种量控制系统

控制系统主要由硬件系统与软件系统组成。

硬件系统采用三菱 FX3U－16MT 型 PLC 作为控制系统核心,完成称量信号读取与处理。秧盘播种量调控模块由 FX3U－4DA 数模转换模块、变频器和排种轮电机组成,用于实现秧盘播种量调控。

软件系统控制流程为:开启系统并设定水稻品种和秧盘播种量后,当控制系统预报秧盘已到达前称量位置时,进行称量得到秧盘播种前质量 M;秧盘继续前进,当预报秧盘到达后称量位置时再次称量得到秧盘播种后质量 N,随后计算秧盘播种量:$Q = N - M$。

当控制系统连续检测到 3 个有效秧盘播种量时,取平均值作为秧盘播种量检测值,与设定播种量比较,如果相对误差较大,则进行秧盘播种量调控。

4.2 水稻精量旱穴播机穴距电液比例控制系统

水稻旱直播技术因省去了育秧、插秧等环节,具有节水、用工少、成本投入低和工作效率高等特点。精量旱穴播采用定量播种、控制株距和播深等技术,实现了水稻的有序种植,符合农艺要求,植株间通风采光好,吸收养分和抗倒伏能力增强。因此,精确控制株距是保证精量穴播作业质量的关键技术之一。

目前国内水稻精量旱穴播机普遍采用多组链轮或多组齿轮改变传动比调节穴距,但穴距调节范围有限,难以实现无级调节。针对以上问题,华南农业大学研制了一种基于可编程逻辑控制器(Programmable logic controller,PLC)与触摸屏的电液比例控制系统,与 2BDH－10/20 型水稻精量旱穴播机配套,通过地轮测速传感器和马达测速传感器分别检测地轮和播种马达的实时转速,将脉冲信号传递给 PLC;根据播种穴距要求,PLC 控制比例流量阀,实时调整播种马达转速,进而调节穴距。水稻精量旱穴播机穴距电液比例控制系统包括机械播种系统、液压系统和电控调速系统 3 部分,如图 12 所示。

4.2.1 控制系统设计

PLC 软件是电液比例控制系统核心部分,通过 DeltWPLSoft V2.37 编程环境,采用梯形图语言,主要功能包括参数设定、数据采集与运算、PID 控制等。

4.2.2 穴距控制系统试验

电液比例穴距控制系统田间试验采用 NY/T987—2006《铺膜穴播机作业质量》测试标准,以理论穴距 ±15 mm 为合格,穴距合格率大于等于 80% 符合作业质量指标要求。试验选用的水稻品种为高丰一号,播种量为 12～14 粒/穴;试验中先设定穴距 100 mm,手动调整变频器和人机界面修改 PID 参数;配套 44 kW 拖拉机牵引作业。试验结果表明,当作业速度为 2.8～3.2 km/h 和 3.2～3.6 km/h 时,播种穴距合格率均为 100%,满足播种质量要求;当作业速度为 3.6～4.0 km/h 时,穴距合格率为 70%,不能满足要求,其原因是水稻精量旱穴播机选用的是型孔轮式排种器,当作业速度大于 3.6 km/h 时,型孔轮转速较快,充种质量下降。

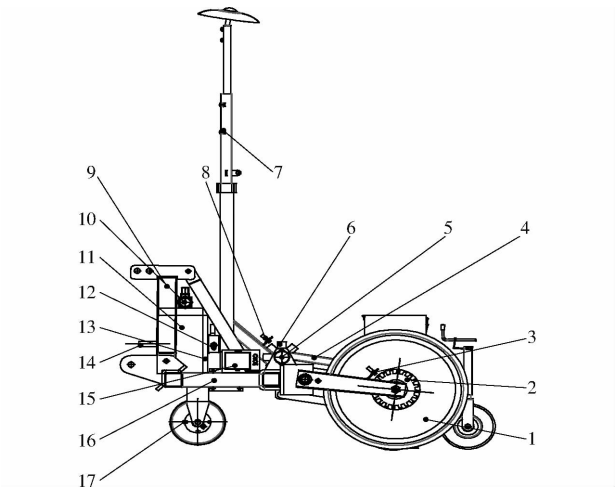


图 12 2BDH－20 型水稻精量旱穴播机结构示意图

Fig. 12 2BDH－20 type rice precision dry hole sowing machine

1. 地轮 2. 地轮测速齿盘 3. 地轮测速传感器 4. 播种单体 5. 液压马达 6. 马达测速齿盘 7. 划行器 8. 马达测速传感器 9. 悬挂架 10. 比例流量阀 11. 油箱 12. 液泵 13. 变速箱 14. 花键轴 15. 触摸屏 16. 机架 17. 镇压辊

5 精准管理

水稻生长精准管理包括对水、肥和药管理。由于稻田土壤含水率高,地面机械不仅通过性差、下田难,而且压苗损失大,特别是在丘陵山区水稻生产中,地块坡度大、面积小且分散,地面机械下田作业条件更差。与地面机械相比,无人飞机通过性好、用工少、人药分离,在解决水稻肥药作业机械化方面,具有天然优势,因此,在水稻智慧农场精准田间管理中,肥药作业主要以农用无人飞机作业为主。

5.1 自动灌排

水稻对水分的要求比较高,科学管水能提高产量、改善品质,并有效防治病虫害。水稻在不同生育期对水分的需求不同:在播种和幼苗期,保证土壤湿润是关键,但不要出现积水,以免影响幼苗生长;水稻的分蘖期是光合能力增强、生长旺盛的时期,对水分的需求较大;抽穗期和灌浆期,应保持充足的水分供应,但应避免大量淹水,以免影响花粉传播和籽粒灌浆;进入成熟期后,需求水分相对较少,应逐渐减少灌溉水量,并适时晒田,以利于收茬。

传统的稻田水分管理，灌排时机主要靠人工经验判断，易出现过旱或过迟的现象，稻田的自动灌排控制是水稻智慧农场的重要组成部分之一。稻田自动灌排系统主要包括田间水分监测、灌排决策控制和灌排执行装置等。

针对稻田灌排口规格不统一、排水口易堵塞等问题，华南农业大学研究了稻田自动灌排决策方法[24]，综合考虑气象信息、田面水分农艺要求和田间水分平衡模型多方面影响因素，建立了基于预测降雨量的灌排决策模型和模糊控制器，提出了软管提放式和翻转斗式两种自动灌排装置，并设计了配套的自动灌排控制软硬件系统，各灌排站点间通过 4G 与 LoRa（Long Range Radio）两种无线通信技术进行网络互联，可实现田间水分信息在线监测、灌排设备智能远程控制、设备状态反馈和数据储存导出等功能。田间试验结果表明，系统决策时间 1.35 s，灌排执行装置动作延时小于 0.4 s，平均启闭时间为 4～6 s，待机电流小于 22 mA，采用太阳能供电可覆盖整个水稻生长季的灌排控制；苗期 15 d 内土壤含水率可保持在 85% 以上，对保持田面湿润并保证田间成苗率方面具有较好的应用效果。

5.2　精准施肥

由于难以快速精准获知田块级的水稻长势差异情况，传统施肥通常采用均一施肥方式，不但造成肥料浪费，同时增加了生产成本。

为实现精准施肥，需要在关键施肥节点对水稻长势情况进行监测，对地块进行栅格化长势分析，依据水稻实际养分的丰缺情况，精准计算施肥量，生成变量施肥处方图，根据水稻实际长势科学决策施肥量，从而实现化肥减量增效。

华南农业大学采用无人机根据施肥处方图进行精准按需补肥，主要包括：无人机遥感监测水稻长势（图 13）；进行群体长势解析；采用智能养分决策系统生成施肥处方图（图 14）；变量施肥无人机加载处方图进行作业[25]。

2020 年，在罗定市太平镇示范基地采用无人机基于变量施肥处方图进行了水稻精准施肥作业，在比当地传统施肥模式平均减少 22.16% 尿素用量的情况下，水稻增产 7.42%[26]。2022 年，在东源县柳城镇示范基地，比当地传统施肥模式尿素用量平均减少 15.32%，水稻增产 1.88%[27]。无人机变量施肥技术入选 2022 年度农业农村部化肥减量增效应用典型案例。

5.3　高效植保

传统水稻植保作业的智能化、精准化程度低，难以实现人药分离，是造成资源利用率低和引发药害

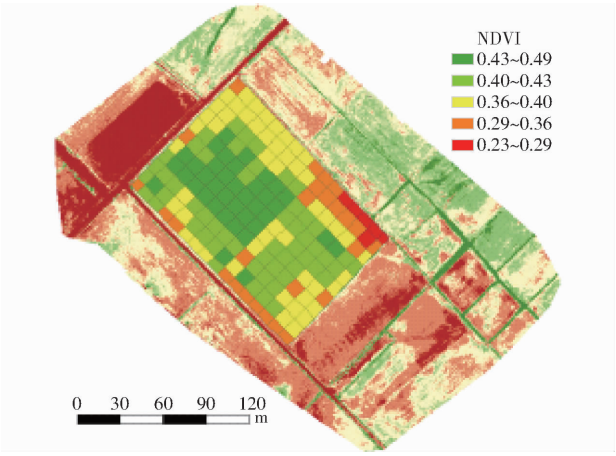


图 13　水稻长势专题图

Fig. 13　Rice growth trend map

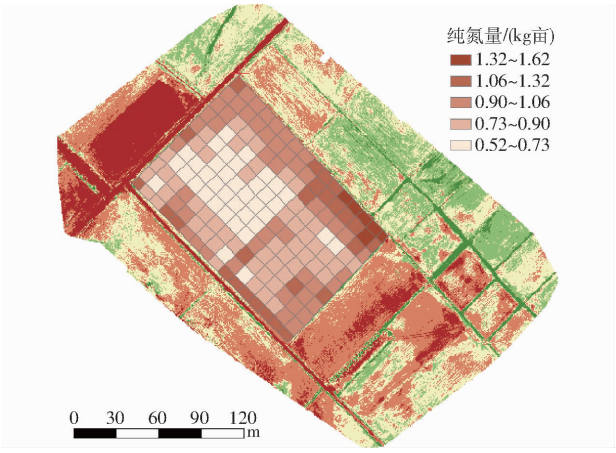


图 14　变量施肥处方图

Fig. 14　Variable fertilization prescription chart

安全事故的主要原因。

针对无人飞机在水稻植保作业中雾滴沉积分布不均匀性、雾滴飘移损失大等问题，华南农业大学通过分析水稻植保主要剂型药液的雾滴运动瞬态动力学信息，建立了喷雾计算模型[28]；针对不同作业对象，建立了不同飞防助剂溶液的蒸发模型以及表面张力和润湿面积、雾滴粒径特性与飘移沉积量预测模型，揭示了植保无人飞机飞防助剂作用机理，创新了飞防气流场控制与药液减失增效和作业质量评价方法，优化了水稻的飞防作业参数，根据作业环境（温度、相对湿度、风速）优化作业时机、飞行高度和速度、航线控制等参数，防治效果最大增效达 30% 以上（稻纵卷叶螟），采用助剂后农药用量减少至传统背负式喷雾器用量的 30% 仍能达到相同防治效果（稻纵卷叶螟）。

6　智能收获

基于高精度北斗/GNSS 定位系统、惯性导航（INS）和多传感器融合技术，智能水稻收获机可实现厘米级精度的自动收获作业[29]。但由于收获机

粮仓容量有限,作业过程中需不断行驶至田边卸粮[30]。针对这一问题,国内外研究者围绕卸粮过程中的路径规划、协同控制与作业策略等关键问题进行了相关研究[31],形成了如图 15 所示的定点卸粮与跟车卸粮 2 种典型作业模式。



(a) 定点卸粮 (b) 跟车卸粮

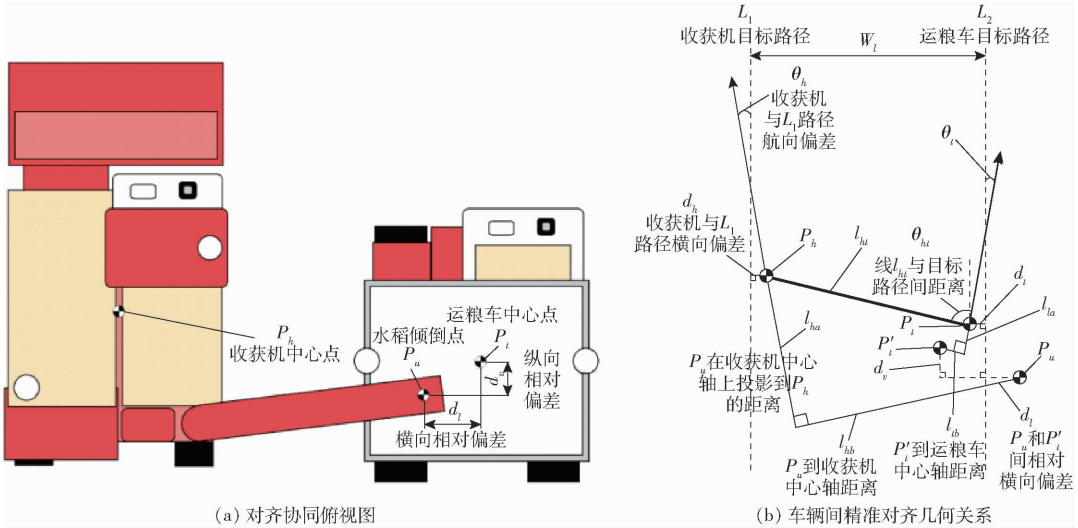
图 15 典型卸粮模式

Fig. 15 Typical grain unloading mode

农田地况复杂、收获机与运粮车的位置误差不易控制,由于速度波动和控制延时等因素干扰,往往导致在定点卸粮模式下收获机停车不准、对位偏差大,高精度的定点停车对位成为提升该模式下协同效率的关键技术。张闻宇等[32]通过分析收获机与运输车的几何关系,建立了如图 16 所示基本几何模型,将点对点精确对齐系统从二维控制系统简化为两个一维控制系统,分别控制横向和纵向偏差以实现最终对齐目标。构建了收获机和运粮车的运动学和动力学模型,包括速度模型和转向动力学模型。通过响应测试和相关公式推导,识别履带车辆的速度传递函数;在转向动力学模型中,引入假设条件,推导出履带车辆转向时的相关力学关系和动态特性,并基于模型设计了纵向和横向控制器。纵向控制采用基于停车距离传递函数的补偿预测器控制器结构,结合比例微分控制器,实现精确停车对齐;横向控制采用改进的纯跟踪控制模型,将纯跟踪控制模型和积分器防饱和保护相结合,以提高路径跟踪精度。试验结果表明,纵向对齐精度小于 0.2 m,横向对齐精度小于 0.1 m。

相比定点卸粮的静态对位控制,跟车卸粮模式中两车实时对接、同步移动和精准卸粮时容易出现纵向偏差,需要保证动态相同对位精度。其中,实时数据的稳定传输是保障跟车卸粮顺利进行的前提。为此,DING 等[33]采用无线电和 4G 两种无线通信融合模式,并结合 RTK - GNSS 定位系统获取高精度定位信息,设计了基于卡尔曼滤波相对位置估计方法,通过建立运动状态预测方程和观测方程,对无线通信数据进行融合、补偿和纠正,有效解决了数据丢失、延迟等问题。试验结果表明,基于卡尔曼滤波相对位置估计方法的最大绝对误差为 0.037 83 m,均方误差为 0.013 17 m,有效解决了无线通信中的数据延迟、丢包、阻塞和错误等问题,并具有较强的短时间断点耐受能力,可为收获机和运粮车的动态对齐和卸粮过程提供准确的数据支持。

然而,即便具备稳定的数据通信基础,在田间复杂环境中实现收获机与运粮车之间的高精度动态相对位置协同控制依然是跟车卸粮模式面临的核心技术挑战之一。国内外学者针对相对位置控制提出了多种控制方法,主要包括滑模变结构控制、比例-微分控制、状态反馈与扰动前馈相结合的控制策略,用于实现主从协同作业中的路径跟踪与位置保持。部分研究还引入了预测模型控制、线性矩阵不等式优化控制等先进控制理论,以进一步提升协同控制的精度和鲁棒性。但在实际作业中,系统存在较强的非线性特性,需应对诸如地形起伏、路径扰动频繁和作业速度变化大等复杂工况,这使得传统控制方法难以在保证系统响应速度的同时实现高精度的位置控制。针对这一问题,张闻宇等[32]设计了一种适用于主从导航协同收获卸粮作业的纵向相对位置协同



(a) 对齐协同俯视图 (b) 车辆间精准对齐几何关系

图 16 收获机与运粮车对齐协同的基本几何模型

Fig. 16 Basic geometric model for aligning and collaborating between harvesting machine and grain transport vehicle

控制方法。依据当前的位置和速度差改变油门控制策略，将位速控制量分为速度一致性决策分量和位速综合决策分量，将速度一致性决策分量比例-微分控制和位速综合决策分量 Bang－Bang 控制融合，形成位速耦合控制器，依据两车相对位置和速度误差调整运粮车油门，实现纵向相对位置控制。试验结果表明，当主机速度为 1 m/s 时，纵向相对位置控制收敛，平均稳态纵向相对位置偏差为 0.078 m，稳态纵向相对位置偏差标准差为 0.091 m。该方法能适应实际作业工况，协同精度能满足收获协同卸粮的需要。

7　智能管控平台

智能管控平台是无人农场的控制中心，华南农业大学以服务农场生产为出发点，设计了水稻无人化智慧农场智能管控平台，包含设备层、网络层、接口协议层、基础平台层和业务应用层共 5 层架构平台，如图 17 所示。

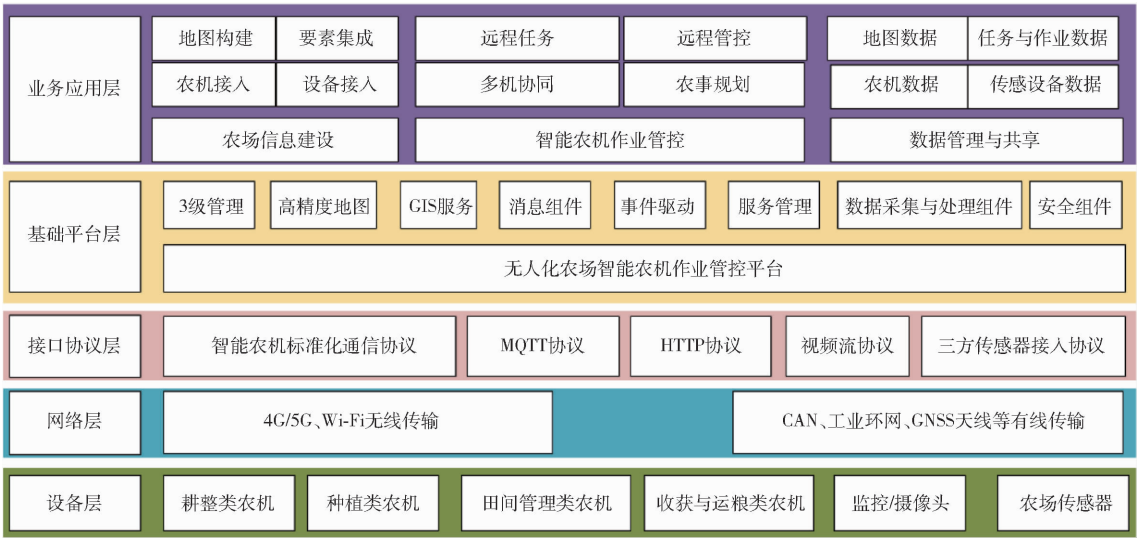


图 17　智能管控平台构建架构

Fig. 17　Intelligent control platform construction architecture

设备层由智能农机与智能装备构成，是作物生产的核心部件；网络层是智能农机、智能装备与平台间的数据传输通道；接口协议层通过对智能农机、智能装备与通信数据集成规范，采用 MQTT 协议实现一体化显控终端与平台的通信；基础平台层在管理上对农场采用“3 级”管理模式，在技术上从网络架构、地图构建、远程管控、数据采集与处理和服务管理进行设计；业务应用层根据实际需求实现业务与应用的交互，涵盖农场信息建设、智能农机作业管控和数据管理与共享。同时，采用无人机获取农场影像数据，利用制图软件与地图服务器进行图像拼接与地图服务，构建高精度地图，并通过在线标注或智能识别算法生成不同区域图层，集成农场多元化信息。在数据管理方面，采用 MongoDB、MySQL、OSS、Redis 等数据库，根据业务划分对不同数据分类进行存储。

7.1　农机管理

依据耕种管收智能农机的功能，农机管理主要包括：底层控制器实现线控装置的离合，包括机具、油门和挡位系统；转向控制搭载电控方向盘和轮角传感器，无人驾驶系统由一体化显控终端和 GNSS 天线组成等；制定农机端、一体化显控终端、平台端的“三级”协议栈，明确通信协议与数据协议，实现对农机组件、各终端模块的信息数据上报和指令控制的平台标准化接入。例如，在农机端与显控终端关系中，采用 NEMA 协议解析卫星信号获取农机位置信息，CAN 总线接受农机底层模块信息与指令控制等。

针对智能农机作业过程建立远程管控模型。通过高精地图采集智能农机作业的地理位置信息，结合农机对象与作业参数，输入路径规划算法得到路径文件，构建路径对象并与农场对应田块和农机绑定。结合农场要素信息与农机对象创建作业任务，对任务进行安全确认后，将指令消息下发给智能农机，实现任务与智能农机绑定。在远程任务与农机匹配完成后，利用指令代码实现对智能农机底层与导航控制，通过精准对接实现农机远程启、停和机具调节等。在农机任务作业过程中，通过农机作业状态数据与环境数据对农机作业安全进行监测，构建相关数据对象进行监管。通过 Web 端、收发端和智能农机终端实现远程管控，并对各阶段数据进行存储。

在多机协同作业调度方面，针对不同作业模式采用不同的调度方法。在同田协同作业模式下，根

据农机作业能力划分作业区域并规划作业路径,创建并下发作业任务,如出现路径冲突,则执行封行作业的农机停车等待,平台实时跟踪作业进度,判断封行作业条件,实现路径冲突决策与平台管控。在一对多协同作业场景中,如多台收获机与一台运粮车的调度过程中,引入“生产者-消费者”模型,将收获机看作生产者,运粮车看作消费者,建立消息模型与自主调度模型,实现主机与从机功能解耦,减少与服务器通信次数,提高系统资源利用率。在多对多协同作业场景下,针对多台收获机与多台运粮车的调度,引入平台决策,采用基于时序的合同网算法,以运粮车运移代价最小为优化目标进行消息分发,并引入“解约”机制处理农机故障,实现多对多调度。

7.2 农事管理

以水稻生产为例,综合考虑农机作业任务与非农机作业任务,以及一天中农事作业时间和农事间的间隔时间等农艺约束条件,构建农事任务分配模型。先构建农事分配数据对象,包括农事生产流程集合、农田集合和农机集合,明确各集合所包含的属性信息。同时对农事分配设置条件约束,如一个田块只作业同一农事任务,一台农机对应一个田块任务等。引入农机田块间转移路程,以转移路程最少为原则,构建转移路程矩阵与代价函数,同时设置作业时间约束、路程约束和油耗约束等,建立任务分配数学模型。

(1)选用改进遗传算法求解任务分配数学模型。初始化包括农事流程、农机等数据对象及相关参数,设置种群规模、最大迭代次数、代价函数权重及交叉变异概率等。采用基于农田序号的编码方式,随机生成初始化种群。以代价函数的倒数作为适应度函数,根据适应度值进行个体选择,采用基于适应度划分结合轮盘赌选择法选择父代个体。通过多父辈 POX 交叉方式结合随机概率判断执行交叉操作,采用交换与随机插入的多变异方式增加种群多样性,同样通过随机概率判断是否执行变异操作。解码过程是编码的逆过程,根据输出结果进行农事任务分配,并在原遗传算法基础上增加最优个体保留法加快进化进程。

(2)通过仿真试验验证改进遗传算法的优越性。以华南农业大学增城试验教学基地水稻水直播生产规划为仿真对象,设置相关试验参数。结果表明,改进遗传算法较传统遗传算法收敛效果更快,寻优结果更好,代价降低 24%。通过设置不同变异方式及代价函数权重对比试验,验证了多变异算子的必要性及时间权重对分配结果的影响。最终对增城试验基地一个水稻生产季节农事生产进行规划,制定了为期 119 d 的水稻农事任务,为实际应用生产提供了理论支撑。

8 结论

(1)华南农业大学在水稻无人化智慧农场的探索与实践中,融合生物技术、信息技术、人工智能、大数据和智能装备等先进技术,提出了数字化感知、智能化决策、精准化作业和智慧化管理四大关键技术。为智慧农场建设提供了强有力的支持,也为我国种植业和养殖业无人农场/智慧农场建设提供了依据。

(2)经过 5 年努力,无人化智慧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、作物生长过程实时全监控,智能决策精准作业全无人。这五大功能也可作为我国无人农场/智慧农场建设的参考标准。

(3)水稻无人农场取得了显著的经济、社会和生态效益,特别是取得了多项水稻高产记录,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 9 934.35 kg/hm^2,较当地平均产量增加 32%;2023 年湖南益阳千山红镇再生稻无人农场两季产量达 18 625.5 kg/hm^2;2024 年广西贵港水稻智慧农场 2 种再生稻和 1 种双季稻产量都超过 15 000 kg/hm^2。

(4)截至 2024 年底,在我国 16 个省已启动 30 多个无人农场/智慧农场,在不同地区、不同茬口(早稻、中稻、晚稻)的水稻生产的实践表明,可大幅提高劳动生产率、土地产出率和资源利用率,为解决“谁来种地”和“怎样种地”提供了重要途径。

参 考 文 献

[1] 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 farms in China[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(6): 8 - 17. (in Chinese)

[2] 法国新闻社. 世界上首座全自动农场将在日本开业[N/OL]. https://covid-9.chinadaily.com.cn/hqgj/jryw/2016 - 02 - 02/content_14529168.html.

[3] 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.
ZHAN Limin, LUO Xiwen. The application of differential GPS positioning technology in measuring soil tillage resistance[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(4): 35 - 39. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 罗锡文,胡炼,何杰,等. 中国大田无人农场关键技术研究与建设实践[J]. 农业工程学报,2024,40(1):1-16.
LUO Xiwen, HU Lian, HE Jie, et al. Key technologies research and construction practice of unmanned field farms in China [J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(1): 1-16. (in Chinese)

[6] 罗锡文,谷秀艳,胡炼,等. 大田无人化智慧农场农田边界识别技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2025,56(2):1-18.
LUO Xiwen, GU Xiuyan, HU Lian, et al. Research status and outlook of farmland boundary recognition technology in large-scale unmanned smart farms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(2):1-18. (in Chinese)

[7] QIU Z, MA F, LI Z, et al. Estimation of nitrogen nutrition index in rice from UAV RGB images coupled with machine learning algorithms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021,189:106421.

[8] BEREZOWSKI T, KULAWIAK M, KULAWIAK M. UAV-based hyperspectral ultraviolet-visible interpolated reflectance images for remote sensing of leaf area index[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2024,17:8751-8765.

[9] TANAKA T S T, WANG S, JORGENSEN J R, et al. Review of crop phenotyping in field plot experiments using UAV-mounted sensors and algorithms[J]. Drones, 2024,8(6): 212.

[10] JIANG R, SANCHEZ-AZOFEIFA A, LAAKSO K, 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: 125705.

[11] 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)

[12] 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.
LI Zexuan. Research and application of rice disease and pest recognition algorithm based on convolutional neural network[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[13] 何越. 基于双层 R-FCN 网络深度学习算法的褐飞虱检测和计数研究[D]. 广州:华南农业大学,2020.
HE Yue. Research on detection and counting of brown planthopper based on two-stage R-FCN deep learning algorithm[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[14] 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. Evaluation method of thermal image temperature characteristic variation in rice canopy induced by brown planthopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 165-172. (in Chinese)

[15] LIAO J, TAO W, LIANG Y, et al. Multi-scale monitoring for hazard level classification of brown planthopper damage in rice using hyperspectral technique[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2024, 17(6):202-211.

[16] 张闻宇,胡力文,王辉,等. 基于 B 样条优化的改进纯追踪农机导航曲线跟踪方法[J]. 农业机械学报, 2024,55(9): 42-51,115.
ZHANG Wenyu, HU Liwen, WANG Hui, et al. Improved pure pursuit agricultural machinery navigation curve path tracking method based on B-spline optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(9):42-51,115. (in Chinese)

[17] 何杰,曾鸿禧,李明锦,等. 基于驱动轮横向侧偏补偿的自动导航拖拉机改进纯追踪路径跟踪控制方法[J]. 农业机械学报, 2025,56(2):28-37.
HE Jie, ZENG Hongxi, LI Mingjin, et al. Improved pure pursuit path tracking control method for automatic navigation tractor based on drive wheel lateral deviation compensation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 28-37. (in Chinese)

[18] 王辉. 基于双天线 GNSS 的拖拉机自动导航关键技术研究及系统集成应用[D]. 广州:华南农业大学,2019.
WANG Hui. Research on key technologies of automatic tractor navigation based on dual-antenna GNSS and system integration application[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[19] 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: 107185.

[20] 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(1): 15-21.
LIU Zhaopeng, ZHANG Zhigang, LUO Xiwen, et al. The design of the GNSS automatic navigation operation system for the

Leiwo ZP9500 high-ground clearance sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 15 - 21. (in Chinese)
[21] 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 CSAE, 2015, 31(8): 15 - 20. (in Chinese)
[22] 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 intelligent regulation device for seedling tray seeding amount in rice seedling production line[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(7): 36 - 46. (in Chinese)
[23] 胡希红. 水稻育秧秧盘播种量变速称重检测与智能调控装置研究[D]. 广州:华南农业大学,2025.
HU Xihong. Research on variable-speed weighing detection and intelligent regulation device for rice seedling tray seeding amount[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2025. (in Chinese)
[24] 郭能明,周志艳,林键沁,等. 直播稻苗期自动灌排系统的设计与试验[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(9): 57 - 65.
GUO Nengming, ZHOU Zhiyan, LIN Jianqin, et al. An automatic irrigation and drainage system for seedlings of direct-drilled rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024,43(9):57 - 65. (in Chinese)
[25] SONG C, ZHOU Z, ZANG Y, et al. Variable-rate control system for UAV-based granular fertilizer spreader[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021,180(2021):105832.
[26] 姜锐. 水稻氮素营养信息的无人机低空快速获取方法研究[D]. 广州:华南农业大学,2021.
JIANG Rui. Study on rapid low-altitude acquisition method of rice nitrogen nutrition information using UAV[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[27] 王勋威. 无人机均匀撒施机理与撒肥器优化研究[D]. 广州:华南农业大学,2024.
WANG Xunwei. Research on uniform spreading mechanism of UAV and optimization of spreader[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2024. (in Chinese)
[28] 资乐,臧禹,黄俊浩,等. 植保无人机飞防助剂与杀虫剂配伍方式对其防治稻纵卷叶螟效果的影响[J]. 植物保护学报, 2023, 50(2): 538 - 544.
ZI Le, ZANG Yu, HUANG Junhao, et al. Influence of adjuvants and pesticides on the control efficacy against rice caseworm *Cnaphalocrocis medinalis* using crop protection unmanned aircraft system[J]. Journal of Plant Protection, 2023,50(2): 538 - 544. (in Chinese)
[29] 张闻宇,张国城,张智刚,等. 基于 ARMAX - KF 与速度补偿的拖拉机无前轮传感器转角估计方法[J]. 农业机械学报, 2024,55(7):415 - 426.
ZHANG Wenyu, ZHANG Guocheng, ZHANG Zhigang, et al. Steering angle estimation method for tractors without angle sensor using ARMAX - KF and speed compensation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7):415 - 426. (in Chinese)
[30] 赵润茂,黄嘉涛,满忠贤,等. 水稻收获无人驾驶运粮车粮厢图像轻量化分割模型研究[J]. 农业机械学报, 2025, 56(6):196 - 204.
ZHAO Runmao, HUANG Jiatao, MAN Zhongxian, et al. Research on lightweight image segmentation model for grain tank of an unmanned grain cart in rice harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(6): 196 - 204. (in Chinese)
[31] 胡炼,张鸿,何杰,等. 再生稻头季低碾压收获作业路径规划技术研究[J]. 农业机械学报,2025,56(2):19 - 27.
HU Lian, ZHANG Hong, HE Jie, et al. Path planning technical research of low-rolling compaction harvesting operation for the first season of ratoon rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(2):19 - 27. (in Chinese)
[32] 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 CSAE, 2021, 37(9): 1 - 11. (in Chinese)
[33] DING F, LUO X, ZAHNG Z, et al. Dual-unloading mode autonomous operation strategy and cotransporter system for rice harvester and transporter[J]. Engineering, 2024,10(11): 1085 - 1096.