

刘婉茹, 张国忠, 周勇, 等. 智能化技术在水稻生产全程机械化中的应用研究与发展趋势[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(1): 105-122.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.01.010

智能化技术在水稻生产全程机械化中的应用研究与发展趋势

刘婉茹¹, 张国忠¹, 周勇¹, 徐红梅¹,
吴擎¹, 付建伟¹, 黄成龙¹, 张建²

1. 华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070;
2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

摘要 智能控制是水稻生产全程机械化向智能化发展的关键核心技术。本文从水稻作业环节中的耕整地、种植、田间管理和收获四个方面概述分析了国内外水稻生产机具使用情况和机械化作业情况, 着重阐述了智能化技术在水稻生产全程机械化中的应用研究, 涵盖了耕深智能调节与自动平地技术、工厂化育秧移栽与精量直播技术、田间管理智能化技术(灌溉、施肥、除草和病虫害防治)、收获机在线监测和智能控制技术、自动驾驶与无人驾驶技术等。指出了制约水稻生产全程机械化向智能化发展的技术难点, 并展望了其未来发展趋势, 以期智能化技术在水稻生产全程机械化中的应用提供参考。

关键词 水稻; 全程机械化; 智能控制; 自动驾驶; 无人驾驶; 智慧农业; 智能化

中图分类号 S 233 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)01-0105-18

水稻是稻属谷类作物, 所结籽实即稻谷, 稻谷脱去颖壳称糙米, 糙米碾去米糠即可得到大米。中国作为世界上最大的水稻生产国和消费国, 2020 年水稻播种面积 3 007.6 万 hm^2 , 占世界水稻播种面积的 20%, 水稻总产量 21 186 万 t, 位居世界第一^[1]。我国稻区分布广泛, 水稻生长周期长, 生产管理环节众多, 水稻生产全程机械化包括耕整地、种植(育秧移栽和水稻直播)、田间管理和收获等主要作业环节。水稻生产工序繁多, 我国三大主粮中, 水稻的耕种收综合机械化率最低, 仅为 83.78%, 机械化作业未能全面覆盖水稻生产的各个环节。其中, 机耕率为 98.84%, 机收率为 93.43%, 机播率仅为 53.89%, 各环节机械化作业率不统一、缺乏能够适应水稻品种多样性和生产条件差异性的先进技术与通用机具, 智能化发展缓慢。提高水稻生产全程机械化、智能化水平是实现水稻产业高质量发展的重要途径。

本文以我国水稻生产全程机械化作业现状为基础, 概述国内外水稻生产机具使用情况和机械化作业情况, 重点阐述智能化技术在水稻生产全程机械

化中的应用研究, 分析智能化在水稻生产全程机械化中的技术难点和发展趋势, 以期为我国水稻产业的自动化、智能化发展提供参考。

1 水稻耕整地智能化技术研究进展

水稻生产全程机械化主要作业环节如图 1 所示。其中, 耕整地是使用铧式犁、旋耕机或平地机完成耕、耙、平地等作业过程, 实现翻耕土层、松碎土壤与残茬、改善土壤结构, 水稻耕整地装备如图 2 所示。耕整地机械作业过程中的作业参数有位置、姿态、压力、耕作深度等^[2], 其中耕深均匀性和地面平整度是衡量耕作质量的重要指标。耕整地机具大多由拖拉机通过三点悬挂进行驱动作业, 由于地表不平等复杂环境因素影响, 拖拉机作业时会随地形变化起伏不定, 耕整地作业易出现机体倾斜、耕深不均、平整度低等问题。

1.1 耕深智能调节技术

针对耕整地作业中出现的耕深不均匀问题, 国内外专家学者在拖拉机悬挂系统的基础上结合机电

收稿日期: 2021-10-08

基金项目: 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划(T201934); 中央高校基本科研业务费专项(2662018PY038)

刘婉茹, E-mail: 18595850940@163.com

通信作者: 张国忠, E-mail: zhanggz@mail.hzau.edu.cn

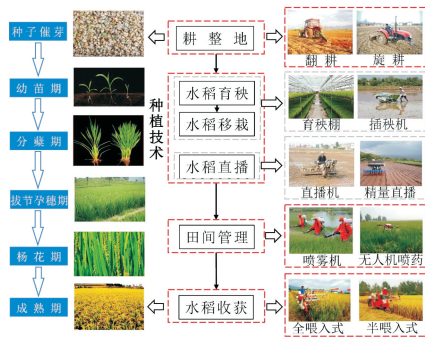
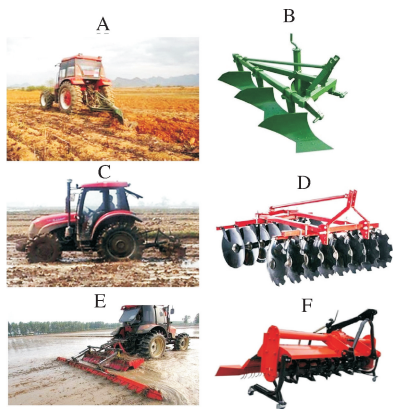


图 1 水稻生产全程机械化主要作业环节

Fig.1 Rice production full mechanization of the main link



A: 机械化翻耕 Mechanized tillage; B: 1L-320 型铧式犁 1L-320 plowshare; C: 机械化耙地 Mechanized harrowing; D: 1BJX 型圆盘耙 1BJX disc harrow; E: 机械化打浆平地 Mechanized beating flat; F: 打浆平地机 Batter grader.

图 2 水稻耕整地装备

Fig.2 Rice tillage equipment

液一体化技术,对耕深自动调节进行了广泛研究。国外将电液悬挂系统应用到拖拉机上的典型代表有 John Deere、CASE、AGCO 旗下的 Massey Ferguson 和 Deutz-Fahr 等。Lee 等^[3]利用传感器测量拖拉机提升臂距离、机具与地面间相对高度和拖拉机俯仰角,通过信号输出控制三点悬挂机构,有效提升了耕深控制精度,控制系统原理图如图 3 所示。Kim 等^[4]设计了一种耕作深度实时测量装置与系统,实现了耕深自动控制,耕作深度实时测量系统的配置如图 4 所示。国内谢斌等^[5]分析了倾角传感器的输出特性,得出传感器电压值与耕深的线性关系,结合闭环实现耕深的自动控制。商高高等^[6]基于 PID 模糊控制设计了耕深自动检测与控制系统。白学峰等^[7]基于模糊控制并结合拖拉机滑转率的检测分析,对自动耕深系统进行了仿真分析与试验。耕

深调节多依赖拖拉机进行悬挂式作业,由于水田作业环境的特殊性,机具作业时需同步考虑水田地形起伏变化、拖拉机滑移率、传感器响应特性、机器行走中产生的振动等多方面因素的影响。

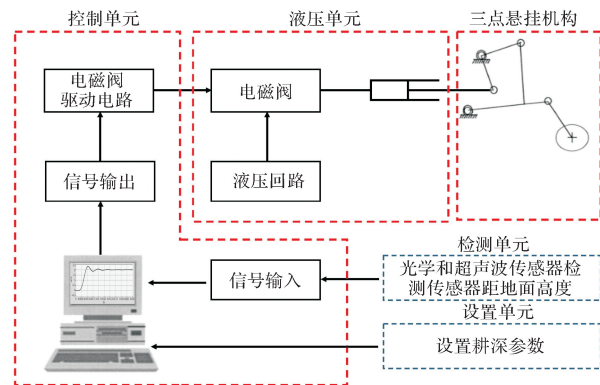


图 3 耕深电液控制系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of electro-hydraulic control system of tillage depth

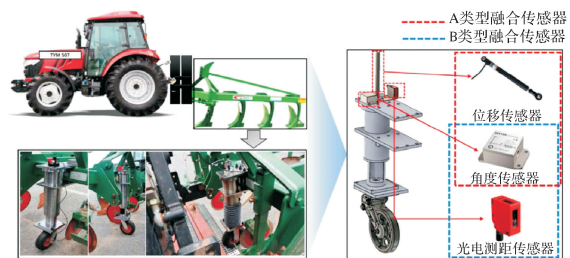


图 4 耕作深度实时测量系统

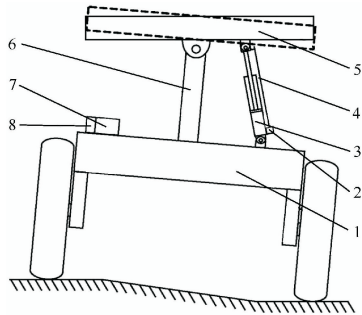
Fig.4 Real-time measurement system of tillage depth

1.2 自动平地技术

针对耕整地作业中存在的平整作业精度低的问题,美国 Trimble 公司开发的 FieldLevel II 平地系统,利用厘米级 PTK-GPS 差分定位可以精确采集农田地势变化信息,根据计算的基准高程和平地铲高程之间的差值自动调节液压系统,进而控制机具的升降。国内赵润茂等^[8]设计了激光控制水田打浆平地机,控制原理如图 5 所示。王少农等^[9]开发的精准平地系统具有响应速度快、受环境干扰小、平地作业高程偏差小等特点。周俊等^[10]采用模糊 PID 控制算法设计了一种基于 GNSS 的智能水田旋耕平地机,经水田平整试验平整度达 3 cm。

在水稻耕整地智能化应用方面,我国对自动控制系统的开发和应用相比国外起步较晚。国内虽对耕深智能检测和自动平地技术开展了广泛的研究,但是并未形成规模化的推广和应用。结合无人驾驶

拖拉机研制配套的智能化耕整地机具,可快速采集农田地形,智能规划整地路径,并在耕整地机械的基础上增加打浆、压实、开沟、施肥等功能,不断提高耕整地作业质量和作业效率,是稻田平整的重点方向。



1.拖拉机 Tractor; 2.位移传感器 Displacement sensor; 3.液压油缸 Hydraulic cylinder; 4.钢丝绳拉绳 Agricultural machinery; 5.农具 Agricultural implements; 6.转向机构 Steering mechanism; 7.滚角传感系统 Roll angle sensing system; 8.自动调平控制器 Automatic leveling controller.

图5 自动调平控制原理图

Fig.5 Automatic leveling control principle

2 水稻种植智能化技术研究进展

2.1 水稻育秧移栽

从育秧方式上,机械移栽分为毯状苗移栽和钵体苗移栽,插秧机插作业时多使用毯状苗,钵苗移栽是水稻秧苗采用营养钵培育后进行移栽作业。移栽机构是移栽机的核心部件,其质量直接决定整机的工作性能。

1) 水稻工厂化设施育秧技术。水稻工厂化育秧是促进水稻增产、农业增效、农民增收的重要措施,工厂化育秧多采用生产线型式,通过除芒机、精选机或催芽器进行种子处理,使用碎土筛土机、土壤肥料拌合机和床土输送等设备进行苗床准备;采用播种覆土联合播种机进行水稻播种,借助喷雾机、施肥机进行苗期管理,育秧设备如图6所示。①水稻秧盘育秧精密播种性能检测技术。为提高水稻播种精度,国内外专家学者采用光电传感技术、机器视觉等方法检测秧盘育秧精密播种性能。Mebatsion等^[11]利用傅立叶椭圆描述粘连稻种图像的边界,根据凹点最短原则分割粘连稻种。Urena等^[12]开发了工厂化育秧播种检测系统,提出用图像处理技术实时检测漏播问题。国内董文浩等^[13]基于嵌入式机器视觉检测装置实现了播种量的闭环智能控制。何培

祥等^[14]采用光电传感器控制穴盘精密播种装置,试验结果显示单粒率达98%以上,重播率小于2%。刘彩玲等^[15]设计了一种气吸式水稻钵盘精量播种装置,满足工厂化钵盘育秧空穴率低、单粒率高的要求。谭穗妍等^[16]基于机器视觉和BP神经网络实现了播量的精确监测。



A:种子精选机 Seed cleaner; B:水稻种子催芽 Prompt germination of rice seeds; C:2BPX-800X 水稻秧盘播种机 2BPX-800X rice tray planter; D:水稻秧苗 Rice seedlings; E:水稻秧盘输送机 Rice tray conveyor; F:水稻秧盘 Rice seedling tray.

图6 水稻工厂化育秧装备

Fig.6 Equipment for industrial rice seedling cultivation

②水稻秧盘育秧智能补种技术。水稻秧盘育秧漏播补种技术能够降低精密播种空穴率,Mganilwa等^[17]基于机器视觉实现移动秧盘种子漏播检测,同时实现自动补种。王桂莲等^[18]采用LabVIEW模块进行图像处理和穴位坐标分析,实现播种质量的在线检测和智能补种,补种器三维模型如图7所示。齐龙等^[19]将视觉方法与水稻秧盘播种技术相结合,实现了水稻秧盘空穴在线检测。水稻育秧智能化还应用在自适应清种、秧盘自动供盘和叠放以及育秧环境智能监控等方面。马旭等^[20-21]研制了一种气动式自动供盘装置,实现秧盘的自动供送。

2) 水稻钵苗移栽技术与装备。水稻钵苗移栽具有不伤根、无缓苗期等优点,国外研制水稻钵苗移栽机以日本井关、久保田和洋马最为突出,日本井关PZP-80型水稻全自动钵苗移栽机主要采用杆机构取出一排钵苗至输送带上,由栽植机构将钵苗植入

田中,如图 8A 所示。久保田 NSPV-6CMD 插秧机搭载自主研发的北斗农机直行辅助自动驾驶系统、施肥器、除草剂施药器和平地辊,可以实现插秧的同时直行辅助驾驶,以及平地、施肥、施药等多功能作业,如图 8B 所示。洋马 VP6 乘坐式插秧机采用超级回转式栽植臂,高速插秧不伤秧苗,如图 8C 所示。移栽机构是移栽机的核心部件,对整机工作性能产生直接影响,叶秉良等^[22]、俞高红等^[23]、吴国怀等^[24]为提高水稻钵苗取苗成功率和栽植效果,对移栽机构进行了大量研究,提出了多种移栽机构形式,包括旋转式、夹钵式、非圆齿轮行星轮系和三移栽臂非圆齿轮行星系式。蔡金平等^[25]提出了一种新型的曲柄摇杆夹持式水稻钵苗移栽装置,并设计了一种行距可变的钵苗移栽装置,平均取苗成功率达到 89.96%。左彦军等^[26]设计了非圆齿轮行星

轮系钵苗移栽机构,可依次完成取秧、送秧和栽植 3 个动作。国内代表机型有吉林鑫华裕农业装备有限公司生产的 2ZB-630 独轮乘坐式以及 2ZBM-430 手扶式钵苗移栽机,常州亚美柯机械设备有限公司生产的日神 2ZB-6(RX-60AM)乘坐式钵苗移栽机等如图 8D 所示。

在育秧方面,现阶段基于智能化水稻工厂化育秧的农业机械装备多集中在智能化取种检测、漏播检测和定点投种检测,检测系统单一,各检测系统间没有形成密切联系,缺少检测后的即时执行机构。在移栽方面,目前研究主要集中在优化栽植系统运动结构,还未涉及大田作业的水稻全自动移栽机械。完善栽植机构运动轨迹和执行策略,实现准确、自动、高效移栽作业,是未来全自动移栽机械发展的方向。

2.2 水稻直播

机械水直播和机械旱直播是水稻机械化直播的两种形式^[27],我国南方地区多应用机械水直播,以芽种条播为主,代表机型有 2BD 型水稻精量穴直播机和 2BD 型折叠式宽幅水稻精量穴直播机。黑龙江、新疆、宁夏和山东等地多采用机械旱直播,旱直播代表机型有 2BDH 型水稻精量旱穴直播机和 2BDQJ-20 气吹集排式水稻旱直播机,如图 9 所示。采用直播技术时,播量过多造成稻谷浪费,播量过少难以保证田间成活率,因此,需精确控制播种量。排种器是控制播种精度的关键部件,国外水稻精量排种器型式较多,日本洋马公司采用枪管式排种器和水平圆盘式排种器,久保田和东洋等公司采用槽轮排种器。机械式和气力式排种器是国内常见的两种水稻精量直播排种器,机械式直播机多通过地轮驱动排种器,气力式直播机借助风机产生的气流实现排种。

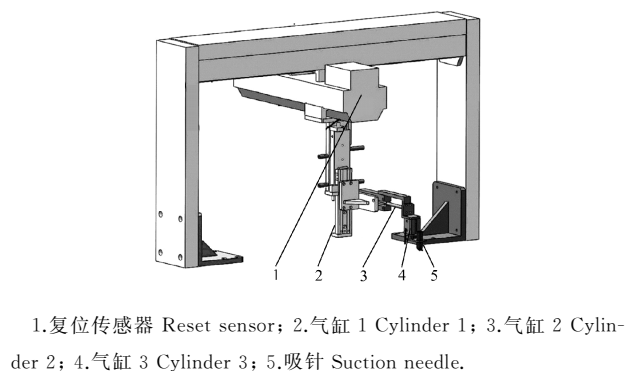


图 7 补种器三维模型

Fig.7 Model of reseeding device

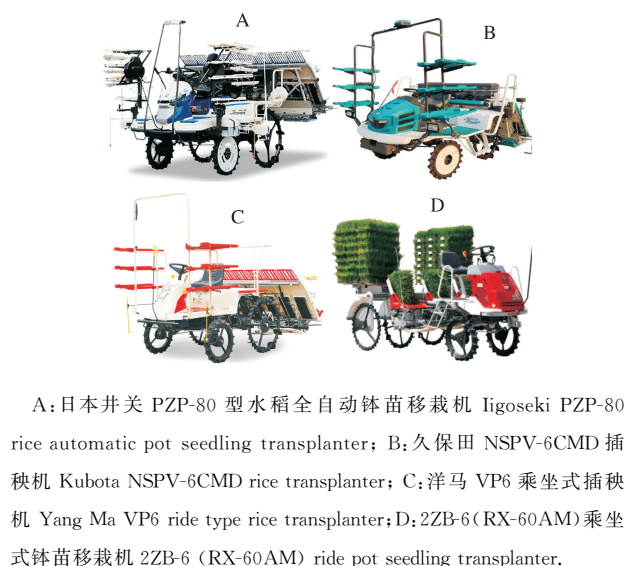


图 8 水稻机械式插秧装备

Fig.8 Mechanical rice transplanting equipment



A: 机械化水直播 Mechanized rice water direct seeding; B: 机械化旱直播 Mechanized rice drought direct seeding.

图 9 水稻直播机械

Fig.9 Rice direct seeding machine

为提高水稻机械式精量排种器的排种精度,张明华等^[28]设计了一种由型孔轮壳、型孔轮和调节机构组成的组合型孔排种器。水稻播种时有破胸露白的普通种子和芽种之分,水稻芽种形状复杂,机械式排种器芽种难以充进型孔,易产生机械损伤,针对此问题,罗锡文等^[29]设计了一种具有2个充种室的型孔式水稻精量穴直播排种器。气力式水稻排种器与机械式相比具有播量精确、伤种率低等特点,针对气力式水稻精量排种器,张国忠等^[30]针对杂交水稻3~4粒/穴精量直播要求,采用3种方法进行研究:(1)设计了1种垂直粘贴于吸种盘表面的直线型搅种齿,降低了种子与吸种盘间的速度差;(2)在排种器的吸种盘上设计并安装由2个搅种齿组成的导向型搅种装置;(3)设计1种用于水稻气力式精量排种器的具有群布吸孔的吸种盘。邢赫等^[31]也分析了水稻气力式排种器的稻种在送种正压作用下脱离排种盘后的轨迹及其投种成穴性,为改善稻种的重吸附现象,设计了一种垂直于排种盘平面的清种装置。杜俊等^[32]、梅志雄等^[33]设计了一种稻麦通用型气力滚筒式精量排种器,通过性能试验探究了转速、倾斜角度和出种孔对稻麦穴播合格率、重播率的影响。受水稻品种、气候环境和土壤类型等因素影响,需根据各地域实际生产需求,研究不同类型的水稻精量直播机具与装备。

针对水稻直播精量播种控制精度低、易漏播等问题,国外 LEMKEN 公司的播种机代表机型 Saphir 系列可通过操作电脑控制终端 Easytronic 系统实现播量预设、播量校对和施肥量校准,完成多种作物的播种作业^[34]。国内李洪昌等^[35]设计了一套水稻直播机播量自动控制系统,实时检测排种管内的播种量,当出现卡种、排量变异系数较大情况时,通过发出报警及时对作业做出调整。王在满等^[36]设计了水稻精量穴直播机播量监测系统,控制系统如图10所示。林颀等^[37]通过下位机监测各播行的播种情况、上位机进行数据处理和控制,设计了一种播种实时监测系统,实现了播种作业的自动监测。赵天才等^[38]利用PID调速算法和排种轴反馈转速对直流电机进行闭环控制,实现水稻直播机播量控制。祁兵等^[39]拟合出4种稻种状态下排种量与种层高度、排种轮转速的回归模型。建立水稻早直播和水直播播量监测、漏播监测等智能化监测系统,对满足水稻精量直播要求、推动智能化技术在水稻直播中的应用具有重要意义。

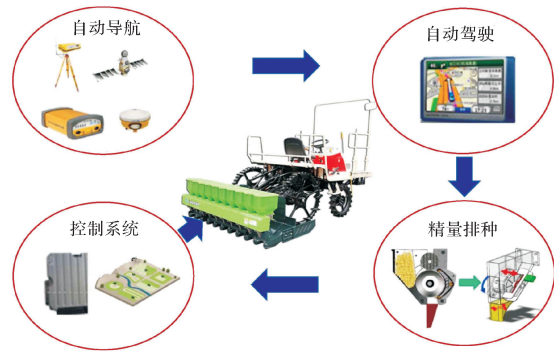


图10 水稻直播机控制系统

Fig.10 Control system of rice seeding machine

3 田间管理智能化技术研究进展

田间管理贯穿了水稻从播种到收获的整个流程,主要包括灌溉、施肥、除草和病虫害施药4个环节。

3.1 节水灌溉技术

目前国内设施农业智能灌溉系统侧重于喷灌和滴灌,水稻大田种植多运用改造电磁阀或蝶阀控制方式的明渠灌溉^[40]。作为精准农业重要组成部分的节水灌溉技术是水稻灌溉关键技术之一,节水灌溉是根据作物生长所需要的水分控制灌溉用水量。

针对水稻大田种植灌溉,匡迎春等^[41]以田间含水率作为输入,灌溉时间为输出,建立模糊控制系统,设计了一套精准闭环全自动水稻大田灌溉系统。于婷婷等^[42]设计了一套基于GPRS和GSM的水稻智能灌溉系统,通过液位传感器获取田间水位信息,并根据水稻不同时期的需水量完成灌溉或排水操作,灌溉控制精度在93%以上。张伶俐等^[43]基于调亏理论和模糊控制设计了寒地水稻智能灌溉系统,并在大田进行了试验,结果表明智能调亏控制下节水效果明显。纪建伟等^[44]提出了一种基于PLC和组态软件的稻田灌溉自动控制系统,实现了稻田自动化灌溉控制。

针对设施农业水稻种植灌溉,石建飞等^[45]基于PLC对水稻农田土壤水分、水位、设备工作状态等数据进行采集与分析,实现灌溉与施肥自动控制;李野^[46]基于ZigBee技术设计了水稻自动灌溉控制系统,对设备进行智能化自动灌溉控制,实现了无人值守的远程水稻灌溉监控;赵荣阳等^[47]设计了一种基于物联网技术的水稻自动灌溉系统,用户可以设置ZigBee终端节点水位的上、下限阈值实现自动灌溉。刘峰^[48]基于PLC设计水稻智能排水及灌溉系

统,保证稻田水位维持在预设高度。在灌溉方面,将遥感和地理信息系统融入灌区运营之中,建立智能化和网络化的生产灌溉系统可有效提高水资源利用效率(图 11)。

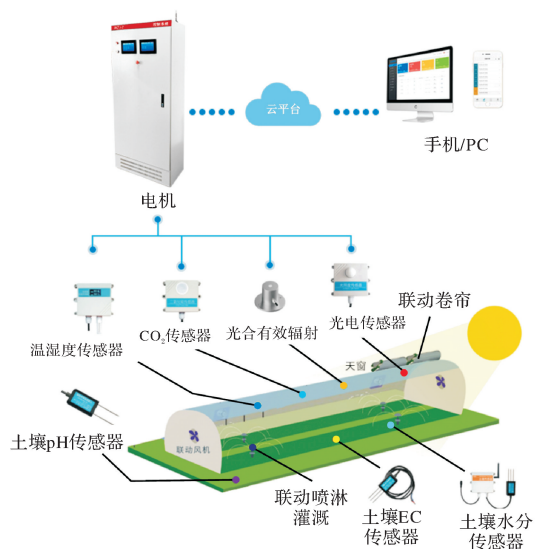


图 11 水稻设施农业智能灌溉系统

Fig.11 Intelligent irrigation system for rice facility agriculture

3.2 变量施肥技术

水田土壤含水率高,流动性强,肥料深施是一种节本增效的施肥方式,多依靠机械同步施肥。变量施肥技术可有效提高施肥精度^[49]。针对水稻旱直播生产中施肥环节存在的依靠机械全层施肥和表面作业导致施肥不均匀或用量过大等问题,曾山等^[50]在同步开沟起垄水稻精量穴直播技术基础上,提出了一种同步开沟起垄施肥水稻精量旱穴直播技术,并研制了与该技术配套的同步开沟起垄施肥水稻精量旱穴直播机。由于水田土壤含水率高,流动性强,对排肥器的排肥性能要求更高。陈雄飞等^[51]设计了一种两级螺旋排肥装置,并根据水稻同步深施肥精量穴播技术的要求,设计了 2BD-3.0 型同步侧位深施肥水稻精量穴直播机。目前水稻变量施肥控制系统多基于旱田变量施肥控制系统开发,Yu 等^[52]设计了适用于稻田及颗粒肥的变量施肥系统,并对系统的控制性能和放电特性进行了评价。杨程等^[53]基于 PID 实现了排肥电机转速的闭环控制,设计了气力式变量施肥控制系统;曾山等^[54]研制了一种水稻直播机气流式分层施肥系统,该系统能够调节深层施肥量和浅层施肥量分配比例满足水稻分层施肥要求。以上研究均以固态肥为基础进行研究,液态肥具有易吸收、有利于实现水肥一体化管理等

优点。随着规模化、集约化生产与现代农业可持续发展,适用于设施农业的水肥一体化技术、同步开沟起垄施肥水稻精量穴直播技术、水稻插秧过程中同步向水稻根侧精量施肥的机插秧同步侧深施肥技术等,可有效提高肥料利用率、促进水稻生长。水肥一体化技术为变量施肥提供了有利条件,变量施肥技术与耕整地、播种、灌溉、杂草与病虫害防治等环节的融合有利于机具集约化作业(图 12)。

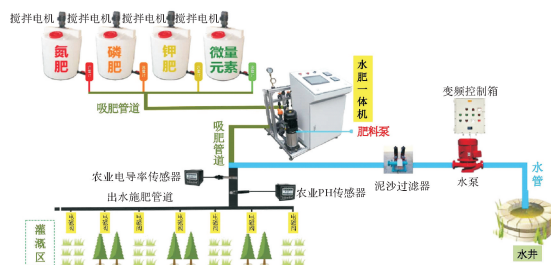


图 12 水肥一体化灌溉系统

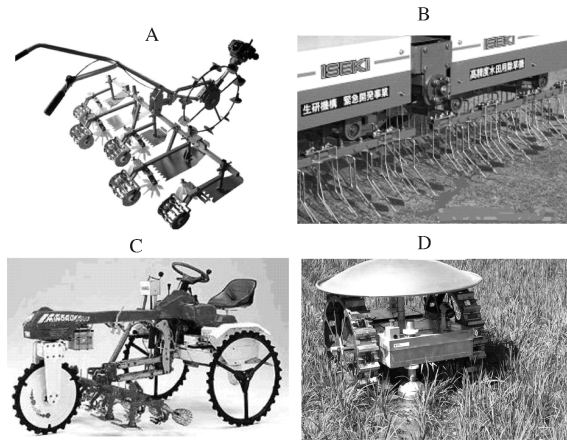
Fig.12 Integrated irrigation system of water and fertilizer

3.3 水田智能机械除草技术

步进式和乘坐式是水稻田间除草机常见的两种形式,国外步进式水稻田间除草机代表机型有日本和同产业 MSJ-4 型步进式水稻田间除草机、美善株式会社研发的 SMW 步进式水田除草机,如图 13A 所示。日本生研机构研制的摆动式水田除草机,如图 13B 所示。乘坐式水田除草机如图 13C 所示,代表机型还有洋马 SJVP 系列、久保田 SJ-6(8)N 系列、井关 SJ-6(8)IVZ 系列水田除草机。国内水稻田间除草机代表机型有 SZD-6 旋耕式水田中耕除草机、2BYS-6 型水田中耕除草机、3ZS-1 水田除草机。国内水田除草技术关键在于提高株间除草率,通过田间杂草与稻株根系深浅差异控制除草部件作业的工作深度实现株间除草。

随着传感器和人工智能技术的应用,杂草视觉识别技术发展迅速,并应用于除草机器人的研究。为了提高除草精度,减少伤苗率,降低能耗,水田除草机器人逐渐向智能化、仿生化和多技术联合化发展。水田智能机械除草技术利用杂草感知功能、识别杂草的分布信息、位置和生长密度等关键信息,控制除草机执行部件精确去除杂草^[55-57]。国外基于机器视觉识别技术研发出的较为成熟的除草机器人产品有瑞士 ECO Process & solutions 公司 2021 年最新发布的 Moondino 稻田自动除草机器人,如图 13D 所示,该机器人由太阳能电池板持续供电,能够在稻田自动行走、执行除草和填充等操作。美国

NTech 公司针对除草装备开发了杂草探测传感器 WeedSeeker,可以对稻田杂草进行实时识别^[58]。日本石井农机株式会社基于距离传感器和机器视觉识别系统实现了水稻田间避苗技术。Sori 等^[59]使用电容式触摸传感器检测水稻幼苗,通过搅拌土壤和水将杂草埋于水田中,阻碍杂草的光合作用防治杂草。国内蒋郁等^[60-61]及 Jiang 等^[62]根据水田作业特点设计了一种水稻株间除草装置,并基于机器视觉开发了水稻植株定位系统实现株间除草。



A:SMW 型步进式水田除草机 SMW type stepping paddy weeding machine; B:摆动式水田除草机 Paddy weeding machine of swing type; C:RW-50 型水田除草机 Paddy weeding machine of the RW-50 type;D:Moondino 稻田除草机器人 Moondino rice field weeding robot.

图 13 水稻田间除草机械

Fig.13 Rice field weeding machine

由于稻田环境的复杂性,将机器视觉除草技术与机器触觉除草技术相融合,提高水田杂草识别精度,并将机械除草技术、化学除草技术、生物除草技术及仿生除草技术等有机结合,改善稻田除草效果。

3.4 稻田病虫害施药技术

农作物病虫害是制约我国农业生产的主要灾害之一,水田植保是我国水稻生产的重要环节,水稻植保作业方式主要包括地面喷药作业和航空喷药作业。

1)稻田地面精准喷药技术。水田变量喷雾和高地隙宽幅喷雾是水田精准喷施的关键技术。刘兆朋等^[63]基于 GNSS,以雷沃高地隙喷杆喷雾机为平台,在实现喷雾作业的基础上开发了能够实现直线、地头转弯的自动导航作业系统。高地隙植保机械方面,曾山等^[64]设计了一种轻型且水田通过性好、压苗少的高地隙喷雾机轮履复合动力底盘;邢全道

等^[65]研制了高地隙窄形橡胶履带行走系统,实现植保喷雾机的作业;王金武等^[66]研制了高地隙折腰式水田多功能动力底盘;曾爱平等^[67]研制了一种液压后驱动式轻型农机水田自走底盘。由于水田环境的复杂性和水稻种植的农艺特点,自走式喷药机对水田土壤环境扰动较大。随着无人机的相对成熟,无人机喷药成为未来喷施农药的“主力军”。

2)稻田航空植保喷药技术。航空植保无人机能够减小传统植保技术受作物长势和地理因素的限制,解决了水稻生长过程中地面机械难以下田作业的问题,逐渐成为一种现代化施药机械。王玲等^[68]研究了风场因素对水稻植保作业的影响,对于合理使用无人机、提高喷施效率具有重要指导意义,并设计了微型无人机脉宽调制型变量喷药系统,实现了变量喷雾调节。张菡^[69]研制了一种植保无人机变量喷药控制系统,依据水稻受病害等级进行无人机变量喷药。邢航等^[70]设计了能够实现植保无人机变量喷洒过程的 PC 地面监控系统,可通过蓝牙实现手机的实时监控。

3)无人机遥感影像病虫害监测技术。近年来,深度学习和无人机遥感开始应用于遥感影像信息提取研究中。Sugiura 等^[71]利用无人机搭载成像设备对小区域田块进行航空拍摄,分析了作物生长状况。Qin 等^[72]采用无人机机载高光谱数据分析了纹枯病胁迫下的水稻光谱特征。孙盈蕊^[73]基于低空无人机平台搭载高清成像仪获取了冠层水稻高清图像,并将监测到的病虫害信息转化为了喷洒信息。李昂等^[74]运用 K 均值聚类算法对无人机获取的水稻冠层高清图像进行图像分割和聚类分析,进而估算水稻产量。荀栋^[75]以 TH80-1 型植保无人机作为试验平台,针对水稻病虫害的防治飞控参数、药剂配方和防治效果等进行了详细的研究。图像处理技术能够减小传统依赖人工识别带来的主观偏差^[76]。姚青等^[77]建立了分布式移动农业病虫害图像采集与诊断系统,实现了图像定位采集、图像识别与诊断任务。建立全国尺度作物病虫害信息库和服务平台,方便用户通过专家系统进行病情诊断或咨询,实现不同地区之间信息共享,有利于农业病虫害实时监控和有效控制。

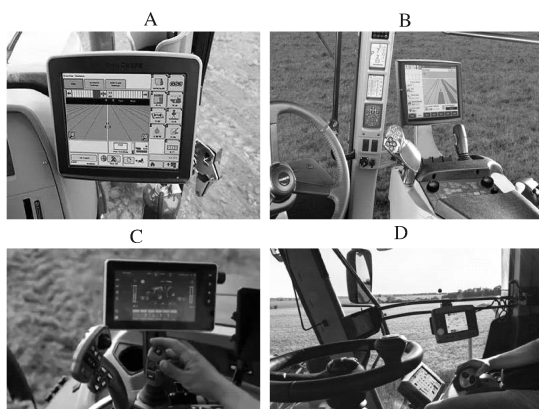
4 水稻收获智能化技术研究进展

水稻联合收获机是集作物切割、输送、脱粒分离、杂余清选、集粮运输等功能为一体的谷物收获作

业机械^[78]。收割机需长时间超负荷工作,建立水稻联合收获机智能监测系统,实现各个部件运行状况智能监测和故障的提前预警,对提高水稻联合收获机工作效率、延长收获机各部件的使用寿命、减轻人工劳动强度、推动我国谷物收获机的自动化和智能化进程有着重要的意义^[79]。

4.1 关键部件监测和智能控制技术

John Deere 70 系列 STS 水稻联合收获机能根据作物属性调整脱粒滚筒转速、风机转速和筛子开度,可按照最小收获损失和最大收获效率两种模式进行作业,实现收获谷物产量和湿度信息的在线检测与信息保存,其驾驶室监测界面如图 14A 所示。CASE 公司生产的 AFS 系统水稻联合收获机安装有多种先进传感器,实时采集收割机作业状态、产量信息、燃油消耗情况及设备运转情况等,其中 IH8010 型水稻联合收获机可自动调节割台升降,配有全自动转向系统,其驾驶室监测界面如图 14B 所示。AGCO 代表机型为 Massey Ferguson 9000 系列联合收割机,该收获机的 Field star 智能监测系统可远距离监测谷物收获状态,喂入量过大时,通过声光警报提示驾驶人员及时调整工作参数,其驾驶室监测界面如图 14C 所示,安装了磁吸式仿形传感器,能够完成割台高度的自我调控^[80]。CLASS 代表机型 LEXION 700 系列联合收获机,具有 CEM-OS AUTOMATIC 自动匹配功能,可实时监测发动机、APS 脱粒系统和 ROTO PLUS 杂余谷物轴流分离系统,其驾驶室监测界面如图 14D 所示。

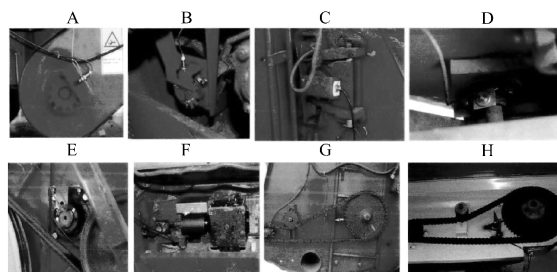


A: John Deere 收获机监测界面 John Deere harvester monitoring interface; B: CASE 收获机监测界面 CASE harvester monitoring interface; C: AGCO 收获机监测界面 AGCO harvester monitoring interface; D: CLASS 收获机监测界面 CLASS harvester monitoring interface.

图 14 国外收获机监测界面

Fig.14 Overseas harvester monitoring interface

联合收获机关键部件监测主要包括:提升绞龙转速监测、风机转速监测、过桥转速监测、杂余绞龙转速监测、滚筒转速监测、出粮绞龙转速监测等,如图 15 所示。国内赵胜华等^[81-82]采用薄膜传感器检测脱粒滚筒喂入量,分析了喂入量、滚筒转速和薄膜传感器采集到的电阻信号之间的关系;梁学修等^[83]设计了间接监测喂入量的方法与系统,结果表明喂入量在线监测误差保持在 5% 以内。李耀明等^[84]利用液压油缸压力大小反映脱粒滚筒负荷变化,设计了能够实现脱粒滚筒负荷监测的凹板间隙调节装置;谢干等^[85]设计了一种鼓形杆齿式纵轴流脱粒滚筒,并对其功耗进行了试验,结果表明鼓形脱粒滚筒能够降低脱粒滚筒平均功耗。我国水稻联合收获机智能监测系统目前仍停留在研发阶段,在智能调控方面,虽基本能够实现田间作业故障预警与关键部件监测,但监测精度不高,缺少先进的控制系统来应对复杂田间作业环境中出现的机器堵塞等突发故障。



A: 提升绞龙转速监测 Improve the monitor of rotor speed; B: 风机转速监测 Fan speed monitoring; C: 过桥转速监测 Bridge speed monitoring; D: 杂余绞龙转速监测 Monitor the speed of miscellaneous stranded dragon; E: 切流滚筒转速监测 Tangential drum speed monitoring; F: 纵轴流滚筒转速监测 Longitudinal axial flow drum speed monitoring; G: 拨禾绞龙转速监测 Dial grain twister speed monitoring; H: 出粮绞龙转速监测 Monitor the rotation speed of grain cutter.

图 15 联合收获机关键部位监测

Fig.15 Monitoring of key parts of combine harvester

4.2 含杂率、破损率在线检测技术

日本 Mahirah 等^[86]基于机器视觉,设计了一套能够计算水稻中的杂质和破碎谷物比例的装置。国内对谷物含杂率、破碎率在线监测方面研究较少,顾琰^[87]研究了水稻图像中的杂质和破碎水稻识别算法,利用机器视觉方法研制出了一种含杂率、破碎率在线监测装置,能够实现谷物中的杂质和破碎籽粒含量的在线检测,并及时检查和调整作业参数。针对水稻大田作业,蔡泽宇^[88]基于光电式传感器实现

了水稻大田作业的产量监测。李朋磊等^[89]基于光谱和激光雷达遥感技术对水稻产量进行了监测研究,为水稻产量监测提供了新的方法。以产量信息为基础建立水稻产量分布图可显示大田产量空间差异。建立水稻联合收获机各关键部件智能监测系统,实现故障的提前预警与自我调控,对于提高水稻联合收获机的工作效率,减轻人工劳动强度,增加收获机各部件的使用寿命,推动我国谷物收获机的自动化、智能化、现代化进程有着重要的意义。

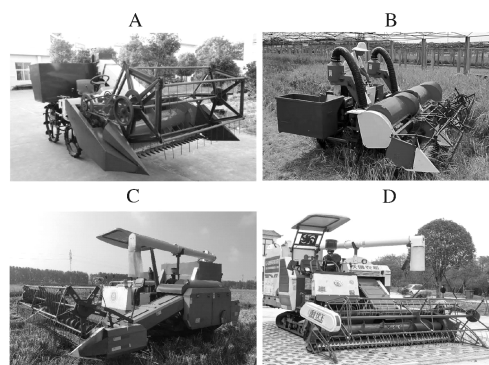
4.3 再生稻收获技术

再生稻是指通过特定的栽培方式使割过的水稻稻茬再次发育成穗的一种种植模式,具有一种两收、省工省时等优点。为提高再生稻产量,头季收获时要求稻茬碾压率低、收获机底盘田间通过性强、茎秆含水率高、收获机对青湿茎秆输送和脱粒效果好。针对再生稻头季收获特殊农艺要求,普通水稻联合收获机行走履带较宽,收获再生稻碾压率高,且底盘离地间隙低,易刮擦再生稻稻茬,破坏再生芽活性。

国外目前尚未开展再生稻头季收获专用机型及相关技术研究。国内张国忠团队从田间行走碾压、田间通过性、路径规划和收割方式等方面展开了大量研究,从减少田间碾压和减少秸秆在田间残茬上的堆积角度出发,设计了一种专用于再生稻穗头收获的高地隙割穗机,如图16A所示^[90];基于履带式车辆设计理论,建立了全履带式收割机田间直行及转弯碾压作业模型,获取了全履带式再生稻收割机结构设计参数要求^[91];从降低再生稻头季收获碾压率角度,2017年研制了一台轻量化、宽割幅、低碾压的双割台双滚筒全履带式再生稻收割机,如图16B所示^[92],2020年研制了一种双通道喂入式再生稻收获机,如图16C所示^[93-94]。杨禹锐等^[95]从履带式收割机收获碾压率高影响再生季萌发和产量方面考虑,设计了全喂入式再生稻收割机和三角履带式再生稻收割机底盘。江苏大学李耀明团队联合沃得农机研发一款再生稻联合收获机,如图16D所示,从再生稻头季收获脱粒分离技术和清选技术出发开展研究,提出适用于再生稻联合收获机的纵轴流脱粒分离装置和清选装置^[96]。

国内多所高校和企业研制了多款再生稻联合收获机,涵盖了履带式、轮式、背负式等多种机型,但是目前都处于样机研制阶段,尚未批量生产。再生稻收获机的智能化可借鉴普通水稻收获机,主要包括关键部件监测和智能控制、喂入量检测与堵塞故障

预警、含杂率和破碎率在线检测等。其中再生稻头季收获过程中基于作业路径规划的自动导航技术是实现再生稻联合收获机低碾压率、高通过性、实现再生稻高效收获的重要发展方向。



A:再生稻割穗机 Ratoon rice head spike harvester; B:双割台双滚筒全履带式再生稻收获机 Tracked combine for ratoon rice with double-headers and double-threshing cylinders; C:双通道喂入式再生稻收割机 Double-channel feeding ratoon rice harvester; D: 4LZ-6.0 再生稻联合收获机 4LZ-6.0 ratoon rice harvester.

图16 再生稻收获技术装备

Fig.16 Ratoon rice harvesting technology

5 自动导航与无人驾驶技术研究进展

自动导航系统应用于水稻耕整地、播种、插秧、田间管理和收获等自走式作业机械上,几乎贯穿水稻生产全程机械化的整个环节。

1)耕整地方面。耕整地机械作业的动力来源是拖拉机,自动导航拖拉机进行旋耕作业如图17所示。国外自动导航系统如 John Deere 公司的 GreenStar TM 卫星导航系统、Hemisphere 公司的 Outback 卫星导航系统和 Trimble 公司的 Autopilot 自动导航系统。国内张智刚等^[97]开发了一种基于 RTK-DGPS 的自动导航控制系统,路径跟踪表明偏差绝对值的平均值为 0.49 cm。吕安涛等^[98]在拖拉机上搭建 DGPS 自动驾驶系统,设计了自动驾



图17 自动导航拖拉机旋耕作业

Fig.17 Automatic navigation tractor rotary tillage operation

驶、人工驾驶、人工辅助驾驶和遥控驾驶的拖拉机自动驾驶模式。黎永键等^[99]、王新忠等^[100]、纪朝凤等^[101]基于 CAN 总线分别对自动驾驶控制系统进行了研究,其中黎永键等^[99]开发的自动驾驶控制系统包括控制终端、GPS、电子罗盘、角度传感器及转向控制,控制部分采用自适应 PID 控制算法,实现车辆的转向控制。

2) 水稻插秧方面。Matsuo 等^[102]融合光纤陀螺仪、倾斜传感器和地磁方向传感器技术对水稻插秧机进行自动驾驶控制。国内胡炼等^[103]将插秧机转向机构、变速机构和插秧机具升降机构改造为电控操作,实现水稻插秧自动控制;伟利国等^[104]采用 RTK-GPS 定位技术,增加了插秧机转向机构、变速机构和栽插机构的电控功能,结合 GPS 技术与智能控制策略,实现了插秧机的自动驾驶及地头转向等功能。

3) 水稻直播方面。张智刚等^[105]以插秧机为试验平台,进行了电控农机转向控制系统及导航控制系统的相关研究。李志腾等^[106]基于 CAN 总线开发了双闭环轨迹跟踪控制算法,实现了水田直播机档位控制、行进速度控制和电动转向控制。孙承铭^[107]基于水稻智能化穴直播机开发了农机自动驾驶与管理系统,实现了农机自动驾驶路径规划与实时跟踪功能。张雁等^[108]采用倾角传感器获取车身姿态变化角度,设计了一种能够在泥泞水田行走和地头转弯的水稻直播机自动驾驶系统。

4) 水稻收获方面。Yanmar 系列履带式收获机大部分采用了方向盘 + FDS 变速箱的驱动操控系统;Kubota 和井关系列收获机的转向系统采用差速转向(SST)的变速箱结构,可通过作业工况需求和转弯半径,选择切边转向、单边制动转向和差速转向。国内关卓怀等^[109]提出一种水稻收获作业视觉导航路径提取方法,该方法适于提取水稻已收获区域与未收获区域分界线。丁幼春等^[110]提出一种基于前视点的直线路径跟踪控制方法,构建了轮式谷物联合收获机视觉导航控制系统。

我国农机自动驾驶技术不断突破,产品功能不断优化,逐步从单功能旱地作业、小地块作业、简单直线行走作业向水田作业、大规模作业和按规划路径行走作业提档升级。路径跟踪方法也逐渐扩充到 PID 模糊控制、RTK-DGPS 的自动驾驶控制系统、

CAN 总线控制、GPS 定位技术融合发展。

6 技术难点与发展趋势

6.1 技术难点

常用耕深测量方法有 3 种,一是人工直接测量耕深;二是在犁架上安装仿形附加装置换算得到耕深;三是采用角度传感器、光电距离传感器或超声波传感器测量举升臂的倾斜角度和离地高度计算耕深。耕深控制系统在实际耕作过程中连续测量的准确性难以验证,成为制约耕深精度测量的一大难点。耕深检测、自动调平技术均使用传感器采集到的数据作为感知信息传输给主控制器,使用传感器采集数据时,易受水田地形起伏变化、拖拉机滑移率、传感器响应特性、机器行走中产生的振动等方面因素的影响,数据采集易产生误差,因此,研究适用于耕深智能调节和自动调平系统的多传感器融合装置是提高耕深测量精度的重点。

水稻播种性能检测常采用 3 种方法:一是采用步进电机与光电传感器实现精密播种;二是采用高速摄影监测排种器工作状态;三是利用机器视觉实现播种质量的动态检测。实现高速排种的连续粒子流性能的准确检测是光电式播种性能检测的主要难点之一。高速摄影法主要用于坐标提取和数据分析,对精密播种装置播种性能的在线检测适应性不高。精量取种、精准播种、精确投种是水稻育秧精密播种监控系统的主要技术难点,应加强补种决策方法等相关理论研究。移栽方面,目前主要集中在优化栽植系统运动结构,还未涉及大田作业的水稻全自动移栽机械。提高栽植机构作业精准度、优化排苗、取苗、供苗运动轨迹和执行策略、研发自动驾驶和路线自主规划是全自动移栽机械发展的重要方向。

水稻播种时有破胸露白的普通种子和芽种之分,水稻芽种形状复杂,如何降低因芽种难以充进型孔造成的芽谷机械损伤问题;如何改善清种时存在漏清或过度清种问题;以及如何减少水稻气力式排种器工作时存在的精度难以控制、种重吸附等现象是机械结构设计改进的要点。建立水稻旱直播和水直播播量监测、漏播监测等智能化监测系统,简化播量调节方式,实现播量的精准监测、实时调节和及时补种。

智能化应用在设施农业水稻种植方向主要是节水灌溉技术和水肥一体化技术。针对水稻大田种植,如何将遥感、地理信息系统及计算机等多种技术融合引入到灌区运营管理之中是值得思考的一大问题。智能化应用在施肥方向主要是变量施肥技术,同步开沟起垄施肥水稻精量水穴直播技术、水稻插秧同步侧深施肥技术等集约化施肥方式也逐步发展。智能化应用在除草方向主要是智能除草机器人,利用机器视觉识别农田杂草进行机械除草作业时,如何降低复杂作业环境中水、土壤、水稻叶片等周边介质对识别精度的影响是智能除草技术的一大技术难点。如何将机器视觉与机器触觉相融合,打造智能化新型除草机器人是迫切需要攻克的关键技术。智能化应用在水稻病虫害防治方向主要是无人机遥感监测技术,无人机弥补了远距离和重访周期对卫星遥感数据精度的影响,为区域尺度和野外规模的遥感监测提供了良好的技术支持,但是如何降低天气等因素影响提高监测精度仍需深入研究。

目前国内对水稻收获方向的谷物含杂率、破碎率在线监测方法研究较少,研发能够适应多品种、多农艺和多土壤类型的水稻联合收获机,并同步实现关键部件智能化控制和远程故障诊断,实现破碎率和含杂率的在线检测是联合收获机智能化发展的关键。在敏感材料制备方面,我国传感工艺与发达国家有较大差距,现有传感器存在稳定性差、高端农业传感器缺乏等问题,攻克农业专业传感器是水稻生产机械化迈向智能化的根本保障。

6.2 发展趋势

多传感器信息融合发展,探索传感器检测机制,在水稻生产机械关键部位安装传感器,通过整合传感器技术、数据处理技术、网络通讯技术、计算机技术、人工智能技术,综合利用土壤水分、土壤养分、土壤耕作阻力、水稻长势情况等多种信息源的不同特点,多方位地获取水稻生产机械化在耕整地、种植、田间管理和收获作业中的农情信息,将模糊控制、神经网络、支持向量机等有机结合起来,通过实时监控和记录,获取农业大数据,提高多传感器信息融合性能,提升水稻生产机械的智能感知能力。

创新加快水稻高效、精准、节能型智能装备研发,提高水稻装备智能监测与导航控制技术、农机装

备智能化设计与关键环节验证等,开发基于信息传感控制的水稻耕整深度可调、变量播种、精量施肥、收获实时在线减损等控制体系,开展现代农业装备参数信息获取与控制智能一体化,提升水稻耕整地机械、播种机、施肥机、除草机和收获等机械智能化。

强化视觉导航直线和转弯的路径规划和操向控制,探索惯性导航系统和机器视觉系统融合的高端导航系统。开展水稻无人农机路径规划及导航决策、自主避障、多机协同作业的研究,推进未来无人农场复杂多场景作业。

优化智能控制算法,结合深度学习、神经网络等开发变量播种自动控制系统,着重于播种、插秧与侧深施肥一体化集约作业、研发适用于水稻多品种、配备完善监测系统的新型排种器。水稻收获方面:攻克水稻机械化收获实时在线减损技术,建立物料质量和像素面积的预测模型,同步考虑联合收获机振动引起的收获损失的前提下,降低收获机振动对检测精度的影响。实现“一机多用”、节本增效、强化资源利用,适应规模化、集约化生产与现代农业可持续发展。

参考文献 References

- [1] 国家统计局.国家统计局关于2020年粮食产量数据的公告[EB/OL].[2021-10-08].http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202012/t20201210_1808377.html.State Statistics Bureau. Announcement of the national bureau of statistics on grain output data in 2020[EB/OL].[2021-10-08].http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202012/t20201210_1808377.html(in Chinese).
- [2] 刘成良,林洪振,李彦明,等.农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J].农业机械学报,2020,51(1):1-18.LIU C L,LIN H Z,LI Y M,et al.Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J].Transactions of the CSAM,2020,51(1):1-18(in Chinese with English abstract).
- [3] LEE J,YAMAZAKI M,OIDA A,et al.Electro-hydraulic tillage depth control system for rotary implements mounted on agricultural tractor design and response experiments of control system[J].Journal of terramechanics,1998,35(4):229-238.
- [4] KIM Y S,KIM T J,KIM Y J,et al.Development of a real-time tillage depth measurement system for agricultural tractors:application to the effect analysis of tillage depth on draft force during plow tillage[J/OL].Sensors,2020,20(3):912[2021-10-08].<https://doi.org/10.3390/s20030912>.
- [5] 谢斌,李皓,朱忠祥,等.基于倾角传感器的拖拉机悬挂机组耕深自动测量方法[J].农业工程学报,2013,29(4):15-21.XIE B,

- LI H, ZHU Z X, et al. Measuring tillage depth for tractor implement automatic using inclinometer[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4): 15-21 (in Chinese with English abstract).
- [6] 商高高, 谢凌云, 季顺静. 拖拉机悬挂系统耕深自动控制策略的研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 136-140. SHANG G G, XIE L Y, JI S J. Research on plowing depth automatic control for tractor hitch system[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2016, 37(7): 136-140 (in Chinese with English abstract).
- [7] 白学峰, 鲁植雄, 常江雪, 等. 基于滑转率的拖拉机自动耕深模糊控制仿真[J]. 农业机械学报, 2012, 43(S1): 6-10. BAI X F, LU Z X, CHANG J X, et al. Fuzzy control algorithm simulation of automatic control of tilling depth for tractor based on slip rate[J]. Transactions of the CSAM, 2012, 43(S1): 6-10 (in Chinese with English abstract).
- [8] 赵润茂, 胡炼, 罗锡文, 等. 基于时序的水田平地机俯仰角预测建模与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 34-39. ZHAO R M, HU L, LUO X W, et al. Modelling and verification for pitch angle of leveler machine in paddy fields based on time series analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 34-39 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王少农, 庄卫东, 王熙. 基于 GNSS 的农田平地系统试验研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(5): 199-203. WANG S N, ZHUANG W D, WANG X. The experimental study of farmland leveling operation based on GNSS[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2016, 38(5): 199-203 (in Chinese with English abstract).
- [10] 周俊, 许建康, 王耀羲, 等. 基于 GNSS 的智能水田旋耕平地机研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 38-43. ZHOU J, XU J K, WANG Y X, et al. Development of paddy field rotary-leveling machine based on GNSS[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(4): 38-43 (in Chinese with English abstract).
- [11] MEBATION H K, PALIWAL J. A Fourier analysis based algorithm to separate touching kernels in digital images[J]. Bio-systems engineering, 2011, 108(1): 66-74.
- [12] URENA R, RODRIGUEZ F, BERENGUEL M. A machine vision system for seeds quality evaluation using fuzzy logic[J]. Computers and electronics in agriculture, 2001, 32(1): 1-20.
- [13] 董文浩, 马旭, 李宏伟, 等. 嵌入式机器视觉的杂交稻低播量检测装置设计[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(6): 2295-2305. DONG W H, MA X, LI H W, et al. Design of low seeding quantity detection and control device for hybrid rice utilizing embedded machine vision[J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2020, 50(6): 2295-2305 (in Chinese with English abstract).
- [14] 何培祥, 杨明金, 陈忠慧. 光电控制穴盘精密播种装置的研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 47-49. HE P X, YANG M J, CHEN Z H. Study on photoelectric controlled precision seeder [J]. Transactions of the CSAM, 2003, 34(1): 47-49 (in Chinese with English abstract).
- [15] 刘彩玲, 宋建农, 张广智, 等. 气吸式水稻钵盘精量播种装置的设计与试验研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(2): 43-46. LIU C L, SONG J N, ZHANG G Z, et al. Design and experimental study on rice precision suction seeder for pot seedling nursery box[J]. Transactions of the CSAM, 2005, 36(2): 43-46 (in Chinese with English abstract).
- [16] 谭穗妍, 马旭, 吴露露, 等. 基于机器视觉和 BP 神经网络的超级杂交稻穴播量检测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 201-208. TAN S Y, MA X, WU L L, et al. Estimation on hole seeding quantity of super hybrid rice based on machine vision and BP neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21): 201-208 (in Chinese with English abstract).
- [17] MGANILWA Z M, NAGATA M, WANG H, et al. Studies on precision planting system for plug seedling production using machine vision (Part 2)[J]. The Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers, 2001, 63(2): 84-91.
- [18] 王桂莲, 刘伟超, 王安, 等. 基于机器视觉的水稻秧盘育秧智能补种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(13): 35-42. WANG G L, LIU W C, WANG A, et al. Design and experiment on intelligent reseeding devices for rice tray nursing seedling based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 35-42 (in Chinese with English abstract).
- [19] 齐龙, 马旭, 周海波. 基于机器视觉的超级稻秧盘育秧播种空穴检测技术[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 121-125. QI L, MA X, ZHOU H B. Seeding cavity detection in tray nursing seedlings of super rice based on computer vision technology[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 121-125 (in Chinese with English abstract).
- [20] 马旭, 谭永炘, 齐龙, 等. 水稻秧盘育秧播种机气动式自动供盘装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 63-69. MA X, TAN Y X, QI L, et al. Design and test on pneumatic type automatic tray feeder of seeder for tray nursing seedlings of rice [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 63-69 (in Chinese with English abstract).
- [21] 马旭, 谭永炘, 齐龙, 等. 水稻秧盘育秧精密播种流水线软硬秧盘自动叠放装置[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 29-36. MA X, TAN Y X, QI L, et al. Automatic tray stacking device for hard and soft tray of rice precision seeding for nursing seedlings pipeline[J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(3): 29-36 (in Chinese with English abstract).
- [22] 叶秉良, 吴国环, 俞高红, 等. 非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 68-73, 67. YE B L, WU G H, YU G H, et al. Optimized design and tests on rice potted seedling transplanting mechanism of planetary gear train with non-circular gears[J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(11): 68-73, 67 (in Chinese with English abstract).
- [23] 俞高红, 金也, 常数数, 等. 夹钵式水稻钵苗移栽机构设计与试

- 验[J].农业机械学报,2019,50(7):100-108.YU G H, JIN Y, CHANG S S, et al. Design and test of clipping-plug type transplanting mechanism of rice plug-seedling[J]. Transactions of the CSAM, 2019, 50(7): 100-108 (in Chinese with English abstract).
- [24] 吴国环, 俞高红, 项筱洁, 等. 三移栽臂水稻钵苗移栽机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 15-22. WU G H, YU G H, XIANG X J, et al. Design and test of rice potted-seedling transplanting mechanism with three transplanting arms[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(15): 15-22 (in Chinese with English abstract).
- [25] 蔡金平, 刘木华, 肖丽萍, 等. 变行距水稻钵苗移栽机移栽装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 50-59. CAI J P, LIU M H, XIAO L P, et al. Design and experiment of transplanting device with variable row-spacing of rice potted-seedling transplanter[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(4): 50-59 (in Chinese with English abstract).
- [26] 左彦军, 曹鹏, 赵匀, 等. B样条非圆齿轮行星轮系水稻钵苗移栽机构的设计与优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 10-17. ZUO Y J, CAO P, ZHAO Y, et al. Design and optimization of transplanting mechanism with B-spline non-circular planet gear train for rice pot seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 10-17 (in Chinese with English abstract).
- [27] 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. LUO X W, WANG Z M, ZENG S, et al. Recent advances in mechanized direct seeding technology for rice[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- [28] 张明华, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻直播机组合型孔排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 29-36. ZHANG M H, LUO X W, WANG Z M, et al. Design and experiment of combined hole-type metering device of rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(9): 29-36 (in Chinese with English abstract).
- [29] 罗锡文, 蒋恩臣, 王在满, 等. 开沟起垄式水稻精量穴直播机的研制[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 52-56. LUO X W, JIANG E C, WANG Z M, et al. Precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 52-56 (in Chinese with English abstract).
- [30] 张国忠, 臧英, 罗锡文, 等. 水稻气力式排种器导向型搅种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 1-8. ZHANG G Z, ZANG Y, LUO X W, et al. Design and experiment of oriented seed churning device on pneumatic seed metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- [31] 邢赫, 臧英, 罗锡文, 等. 水稻气力式排种器清种装置设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 28-33. XING H, ZANG Y, LUO X W, et al. Design and test of seed cleaning device of pneumatic metering device for rice[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(5): 28-33 (in Chinese with English abstract).
- [32] 杜俊, 夏俊芳, 张居敏, 等. 稻麦兼用型气力滚筒式精量排种器设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(3): 127-134. DU J, XIA J F, ZHANG J M, et al. Design and experiment of pneumatic drum type metering device for rice and wheat[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(3): 127-134 (in Chinese with English abstract).
- [33] 梅志雄, 夏俊芳, 张居敏, 等. 稻麦两用螺旋舀种式排种器排种性能试验[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(5): 136-146. MEI Z X, XIA J F, ZHANG J M, et al. Seeding performance of seed metering device with spiral tube scooping for rice and wheat[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(5): 136-146 (in Chinese with English abstract).
- [34] WANG S L, GAO A M, WANG B, et al. Comparative research and design of precision hill-seeder with whole plastic-film mulching on double ridges[J/OL]. Applied mechanics and materials, 2015, 733: 497-500 [2021-10-08]. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.733.497>.
- [35] 李洪昌, 高芳, 牛贺贺, 等. 水稻直播机播种自动控制系统设计与应用[J]. 湖北农机化, 2019(23): 192. LI H C, GAO F, NIU H H, et al. Design and application of automatic control system for rice direct seeding machine[J]. Hubei agricultural mechanization, 2019(23): 192 (in Chinese).
- [36] 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 Z M, PEI J, HE J, et al. Development of the sowing rate monitoring system for precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 9-16 (in Chinese with English abstract).
- [37] 林颀, 郑一平, 花有清, 等. 水稻直播机智能监测系统的设计[J]. 农机化研究, 2006, 28(4): 105-107. LIN K, ZHENG Y P, HUA Y Q, et al. The design of intelligent detector for paddy seeder[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2006, 28(4): 105-107 (in Chinese with English abstract).
- [38] 赵天才, 余洪锋, 郝向泽, 等. 基于PID算法的水稻直播机播量控制系统的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(2): 118-125. ZHAO T C, YU H F, HAO X Z, et al. Design and experiment of sowing control system for rice direct seeder based on PID algorithm[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(2): 118-125 (in Chinese with English abstract).
- [39] 祁兵, 张文毅, 余山山, 等. 气力集排式水稻排种系统播量控制模型研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 125-131. QI B, ZHANG W Y, YU S S, et al. Establishment of seeding amount control model for centralized pneumatic metering system for rice[J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(S1): 125-131 (in Chinese with English abstract).
- [40] 罗文兵, 孟小军, 李亚龙, 等. 南方地区水稻节水灌溉的综合效应研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 145-151.

- LUO W B, MENG X J, LI Y L, et al. Research progress in comprehensive effects of rice field water-saving irrigation in Southern China[J]. Journal of water resources and water engineering, 2020, 31(4): 145-151 (in Chinese with English abstract).
- [41] 匡迎春, 沈岳, 段建南, 等. 模糊控制在水稻节水自动灌溉中的应用[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 18-21. KUANG Y C, SHEN Y, DUAN J N, et al. Application of fuzzy control to automatic water-saving irrigation of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 18-21 (in Chinese with English abstract).
- [42] 于婷婷, 朱龙图, 李名伟, 等. 基于 GPRS 和 GSM 的水稻智能灌溉系统[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(5): 988-994. YU T T, ZHU L T, LI M W, et al. Intelligent irrigation system for rice based on GPRS and GSM[J]. Research of agricultural modernization, 2016, 37(5): 988-994 (in Chinese with English abstract).
- [43] 张伶俐, 王润涛, 张长利, 等. 基于调亏理论和模糊控制的寒地水稻智能灌溉策略[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 52-58. ZHANG L Y, WANG R T, ZHANG C L, et al. Intelligent irrigation strategy based on regulated deficit theory and fuzzy control for rice in cold region[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 52-58 (in Chinese with English abstract).
- [44] 纪建伟, 邓巍巍, 赵毅勇. 基于 PLC 的稻田灌溉自动控制系统[J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(3): 257-261. JI J W, DENG W W, ZHAO Y Y. Automatic control system for irrigation of rice based on PLC[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2013, 44(3): 257-261 (in Chinese with English abstract).
- [45] 石建飞, 曹洪军, 衣淑娟, 等. 基于 PLC 的寒地水稻水肥一体化灌溉系统设计[J]. 农机化研究, 2014, 36(12): 58-60, 64. SHI J F, CAO H J, YI S J, et al. Irrigating system design of integration of water and fertilizer of rice in the cold field based on PLC[J]. Agricultural mechanization research, 2014, 36(12): 58-60, 64 (in Chinese with English abstract).
- [46] 李野. 基于 ZigBee 技术的水稻自动灌溉控制系统设计[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015. LI Y. The design on rice automatic irrigation control system based on ZigBee technology[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [47] 赵荣阳, 王斌, 姜重然. 基于物联网技术的水稻自动灌溉系统应用研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(4): 226-230. ZHAO R Y, WANG B, JIANG C R. Application research of automatic irrigation system of rice based on IoT[J]. Agricultural mechanization research, 2016, 38(4): 226-230 (in Chinese with English abstract).
- [48] 刘峰. 水稻智能排水及灌溉系统设计[J]. 发明与创新, 2020(12): 122. LIU F. Design of intelligent drainage and irrigation system for rice[J]. Invention an innovation, 2020(12): 122 (in Chinese).
- [49] 翟建波, 夏俊芳, 周俊华, 等. 气力式水稻芽种精量旱直播机的设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2017, 36(1): 110-116. ZHAI J B, XIA J F, ZHOU J H, et al. Design and field trials of pneumatic precision drilling planter of rice budded seed in dry land[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(1): 110-116 (in Chinese with English abstract).
- [50] 曾山, 汤海涛, 罗锡文, 等. 同步开沟起垄施肥水稻精量旱穴直播机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 12-19. ZENG S, TANG H T, LUO X W, et al. Design and experiment of precision rice hill-drop drilling machine for dry land with synchronous fertilizing[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 12-19 (in Chinese with English abstract).
- [51] 陈雄飞, 王在满, 罗锡文, 等. 2BDF-3.0 型同步深施肥水稻穴直播机的设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2018, 49(3): 309-314. CHEN X F, WANG Z M, LUO X W, et al. Design and experiment of synchronous side deep fertilizing with rice hill-drop drilling of 2BDF-3.0 machinery[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2018, 49(3): 309-314 (in Chinese with English abstract).
- [52] YU J H, KIM Y J, RYU K H. Development of a controller for variable-rate application of granular fertilizer[J]. Journal of biosystems engineering, 2006, 31(2): 108-114.
- [53] 杨程, 臧英, 周志艳, 等. 基于 PID 算法的气力式施肥机变量施肥控制系统设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(3): 320-327. YANG C, ZANG Y, ZHOU Z Y, et al. Design and test of pneumatic fertilizer applicator variable ratio fertilization control system based on PID algorithm[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2017, 48(3): 320-327 (in Chinese with English abstract).
- [54] 曾山, 郑振辉, 杨洲, 等. 水稻直播机气流式分层施肥系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 1-9. ZENG S, ZHENG Z H, YANG Z, et al. Design and test of airflow layered fertilizer system for rice direct seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(4): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- [55] 马旭, 齐龙, 梁柏, 等. 水稻田间机械除草装备与技术研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 162-168. MA X, QI L, LIANG B, et al. Present status and prospects of mechanical weeding equipment and technology in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 162-168 (in Chinese with English abstract).
- [56] 毛文华, 张银桥, 王辉, 等. 杂草信息实时获取技术与设备研究进展[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 190-195. MAO W H, ZHANG Y Q, WANG H, et al. Advance techniques and equipments for real-time weed detection[J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(1): 190-195 (in Chinese with English abstract).
- [57] 胡炼, 罗锡文, 曾山, 等. 基于机器视觉的株间机械除草装置的作物识别与定位方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 12-18. HU L, LUO X W, ZENG S, et al. Plant recognition and localization for intra-row mechanical weeding device based on ma-

- chine vision[J].Transactions of the CSAE,2013,29(10):12-18 (in Chinese with English abstract).
- [58] WANG N,ZHANG N,DOWELL F E,et al.Design of an optical weed sensor using plant spectral characteristics[J].Transactions of the ASAE,2001,44(2):409-419.
- [59] SORI H,INOUE H,HATTA H,et al.Effect for a paddy weeding robot in wet rice culture[J].Journal of robotics and mechatronics,2018,30(2):198-205.
- [60] 蒋郁,齐龙,龚浩,等.气动式水稻行间机械除草装置研制[J].华南农业大学学报,2020,41(6):37-49.JIANG Y,QI L,GONG H,et al.Design and experiment of pneumatic paddy intra-row weeding device[J].Journal of South China Agricultural University,2020,41(6):37-49(in Chinese with English abstract).
- [61] 蒋郁,崔宏伟,区颖刚,等.基于茎基部分区边缘拟合的稻株定位方法[J].农业机械学报,2017,48(6):23-31,49.JIANG Y,CUI H W,OU Y G,et al.Positioning method of rice seedlings based on edge fitting in separated region of stem base[J].Transactions of the CSAM,2017,48(6):23-31,49(in Chinese with English abstract).
- [62] JIANG Y,CUI H W,QI L,et al.Recognition and positioning method of rice seedlings based on machine vision[J].International journal of signal processing,image processing and pattern recognition,2016,9(9):265-278.
- [63] 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 Z P,ZHANG Z G,LUO X W,et al.Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS[J].Transactions of the CSAE,2018,34(1):15-21(in Chinese with English abstract).
- [64] 曾山,刘竣,罗锡文,等.水田高地隙喷雾机轮履复合动力底盘的设计与试验[J].华南农业大学学报,2019,40(5):14-22.ZENG S,LIU J,LUO X W,et al.Design and experiment of wheel-track compound power chassis for high clearance sprayer in paddy field[J].Journal of South China Agricultural University,2019,40(5):14-22(in Chinese with English abstract).
- [65] 邢全道,何瑞银,何彦平,等.高地隙窄形橡胶履带式水旱兼用行走系统设计[J].江西农业学报,2013,25(7):102-104.XING Q D,HE R Y,HE Y P,et al.Design of High-ground-clearance Narrow-rubber-pedrail-type running system for paddy field and upland[J].Acta agriculturae Jiangxi,2013,25(7):102-104(in Chinese with English abstract).
- [66] 王金武,唐汉,沈红光,等.高地隙折腰式水田多功能动力底盘设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(16):32-40.WANG J W,TANG H,SHEN H G,et al.Design and experiment of high clearance roll-waist multifunctional power chassis for paddy field[J].Transactions of the CSAE,2017,33(16):32-40(in Chinese with English abstract).
- [67] 曾爱平,邱秀丽,赵娜,等.液压后驱式轻型农机水田自走底盘的设计[J].农机化研究,2010,32(7):149-151,159.ZENG A P, QIU X L,ZHAO N,et al.Design of hydraulic rear wheel drive light farm machinery paddy field self-propelled chassis[J].Journal of agricultural mechanization research,2010,32(7):149-151,159(in Chinese with English abstract).
- [68] 王玲,兰玉彬,HOFFMANN W C,等.微型无人机低空变量喷药系统设计与雾滴沉积规律研究[J].农业机械学报,2016,47(1):15-22.WANG L,LAN Y B,HOFFMANN W C,et al.Design of variable spraying system and influencing factors on droplets deposition of small UAV[J].Transactions of the CSAM,2016,47(1):15-22(in Chinese with English abstract).
- [69] 张茜.植保无人机变量喷药系统研制[D].泰安:山东农业大学,2017.ZHANG H.Development of variable spraying system for plant protection unmanned aerial vehicle[D].Taian:Shandong Agricultural University,2017(in Chinese with English abstract).
- [70] 邢航,梁宇发,陈伟政.变量喷洒地面监控系统设计[J].安徽农业科学,2017,45(35):219-222.XING H,LIANG Y F,CHEN W Z.Design of variable spraying ground monitoring system[J].Journal of Anhui agricultural sciences,2017,45(35):219-222(in Chinese with English abstract).
- [71] SUGIURA R,NOGUCHI N,ISHII K.Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter[J].Biosystems engineering,2005,90(4):369-379.
- [72] QIN Z H,ZHANG M H,CHRISTENSEN T,et al.Remote sensing analysis of rice disease stresses for farm pest management using wide-band airborne data[C]//IGARSS 2003.2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.Proceedings (IEEE Cat.No.03CH37477).July 21-25,2003,Toulouse.IEEE,2003:2215-2217.
- [73] 孙盈蕊.基于多尺度遥感技术的水稻病虫害监测研究[D].北京:中国地质大学(北京),2019.SUN Y R.Rice pest and disease monitoring based on multi-scale remote sensing technology[D].Beijing:China University of Geosciences,2019(in Chinese with English abstract).
- [74] 李昂,王洋,曹英丽,等.基于无人机高清数码影像的水稻产量估算[J].沈阳农业大学学报,2017,48(5):629-635.LI A,WANG Y,CAO Y L,et al.Rice yield estimation based on high-definition digital image of UAV[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2017,48(5):629-635(in Chinese with English abstract).
- [75] 荀栋.TH80-1 型植保无人机防治水稻病虫害飞控参数及防治效果研究[D].长沙:湖南农业大学,2015.XUN D.Study on flight control parameters and efficiency for rice pest control by TH80-1 plant protection UAV[D].Changsha:Hunan Agricultural University,2015(in Chinese with English abstract).
- [76] YANG C M,CHENG C H,CHEN R K.Changes in spectral characteristics of rice canopy infested with brown planthopper and leaf folder[J].Crop science,2007,47(1):329(in Chinese with English abstract).

- [77] 姚青,张超,王正,等.分布式移动农业病虫害图像采集与诊断系统设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(S1):184-191. YAO Q,ZHANG C,WANG Z,et al.Design and experiment of agricultural diseases and pest image collection and diagnosis system with distributed and mobile device[J].Transactions of the CSAE,2017,33(S1):184-191(in Chinese with English abstract).
- [78] 王万章,刘婉茹,袁玲合,等.小麦植株建模与单纵轴流物料运动仿真与试验[J].农业机械学报,2020,51(S2):170-180. WANG W Z,LIU W R,YUAN L H,et al.Simulation and experiment of single longitudinal axial material movement and establishment of wheat plants model[J].Transactions of the CSAM,2020,51(S2):170-180(in Chinese with English abstract).
- [79] 张猛,耿爱军,张智龙,等.谷物收获机智能监测系统研究现状与发展趋势[J].中国农机化学报,2018,39(9):85-90. ZHANG M,GENG A J,ZHANG Z L,et al.Research status and development trend of intelligent monitoring system for grain harvester[J].Journal of Chinese agricultural mechanization,2018,39(9):85-90(in Chinese with English abstract).
- [80] CRAESSAERTS G,SAEYS W,MISSOTTEN B,et al.A genetic input selection methodology for identification of the cleaning process on a combine harvester,Part I:selection of relevant input variables for identification of the sieve losses[J].Biosystems engineering,2007,98(2):166-175.
- [81] 赵胜华,张国忠,张仕杰,等.基于薄膜传感器的横轴流脱粒滚筒实时喂入量测量系统设计[J].华中农业大学学报,2020,39(2):160-169. ZHAO S H,ZHANG G Z,ZHANG S J,et al.Designing a real-time feed measurement system for horizontal axial flow threshing drum based on thin film sensor[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2020,39(2):160-169(in Chinese with English abstract).
- [82] 赵胜华.基于薄膜传感器的横轴流脱粒滚筒喂入量测量系统设计[D].武汉:华中农业大学,2019. ZHAO S H.Design of measurement system for horizontal axial flow threshing drum based on film sensors[D].Wuhan:Huazhong Agricultural University,2019(in Chinese with English abstract).
- [83] 梁学修,陈志,张小超,等.联合收获机喂入量在线监测系统设计与试验[J].农业机械学报,2013,44(S2):1-6. LIANG X X,CHEN Z,ZHANG X C,et al.Design and experiment of on-line monitoring system for feed quantity of combine harvester[J].Transactions of the CSAM,2013,44(S2):1-6(in Chinese with English abstract).
- [84] 李耀明,王建鹏,徐立章,等.联合收获机脱粒滚筒凹板间隙调节装置设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(8):68-75. LI Y M,WANG J P,XU L Z,et al.Design and experiment on adjusting mechanism of concave clearance of combine harvester cylinder[J].Transactions of the CSAM,2018,49(8):68-75(in Chinese with English abstract).
- [85] 谢干,张国忠,付建伟,等.鼓形与圆柱形杆齿式纵轴流脱粒滚筒功耗对比试验[J].华中农业大学学报,2021,40(1):202-209. XIE G,ZHANG G Z,FU J W,et al.Comparing power consumption of drum and cylindrical rod-tooth longitudinal axial flow threshing roller[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2021,40(1):202-209(in Chinese with English abstract).
- [86] JAHARI M,YAMAMOTO K,MIYAMOTO M,et al.Double lighting machine vision system to monitor harvested paddy grain quality during head-feeding combine harvester operation[J].Machines,2015,3(4):352-363.
- [87] 顾琰.联合收获机谷物含杂率、破碎率在线监测装置研制及试验研究[D].镇江:江苏大学,2019. GU Y.Development and experimental study of on-line monitoring device for grain impurity rate and broken rate of combine harvester[D].Zhenjiang: Jiangsu University,2019(in Chinese with English abstract).
- [88] 蔡泽宇.水稻联合收获机产量监测系统设计与试验[D].北京:中国农业科学院,2021. CAI Z Y.Design and experiment of yield monitoring system for rice combine harvester[D].Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2021(in Chinese with English abstract).
- [89] 李朋磊,张骁,王文辉,等.基于高光谱和激光雷达遥感的水稻产量监测研究[J].中国农业科学,2021,54(14):2965-2976. LI P L,ZHANG X,WANG W H,et al.Assessment of terrestrial laser scanning and hyperspectral remote sensing for the estimation of rice grain yield[J].Scientia agricultura sinica,2021,54(14):2965-2976(in Chinese with English abstract).
- [90] 张国忠,张翼翔,黄见良,等.再生稻割穗机的设计与性能试验[J].华中农业大学学报,2016,35(1):131-136. ZHANG G Z,ZHANG Y X,HUANG J L,et al.Designing and performance testing a novel head spike harvester of ratoon rice[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2016,35(1):131-136(in Chinese with English abstract).
- [91] 雷志强,张国忠,彭少兵,等.全履带式再生稻收割机行走底盘碾压率的模拟与分析[J].安徽农业大学学报,2017,44(4):738-743. LEI Z Q,ZHANG G Z,PENG S B,et al.Simulation and analysis of the stubble pushing rate by chassis of the completely tracked harvester for the ratoon rice[J].Journal of Anhui Agricultural University,2017,44(4):738-743(in Chinese with English abstract).
- [92] 卢康,张国忠,彭少兵,等.双割台双滚筒全履带式再生稻收割机的设计与性能试验[J].华中农业大学学报,2017,36(5):108-114. LU K,ZHANG G Z,PENG S B,et al.Design and performance of tracked harvester for ratoon rice with double headers and double-threshing cylinders[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2017,36(5):108-114(in Chinese with English abstract).
- [93] 付建伟,张国忠,谢干,等.双通道喂入式再生稻收获机研制[J].农业工程学报,2020,36(3):11-20. FU J W,ZHANG G Z,XIE

- G, et al. Development of double-channel feeding harvester for ratoon rice[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(3): 11-20 (in Chinese with English abstract).
- [94] 付建伟. 双通道全喂入式再生稻收获机研制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. FU J W. Development of double-channel full feeding harvester for ratoon rice[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [95] 杨禹锟, 刘竣, 黄登攀, 等. 全喂入式再生稻收割机的设计[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(18): 129-132, 140. YANG Y K, LIU J, HUANG D P, et al. Design of full-feeding ratoon rice combine harvester[J]. Hubei agricultural sciences, 2019, 58(18): 129-132, 140 (in Chinese with English abstract).
- [96] 王晗昊, 李耀明, 徐立章, 等. 再生稻联合收获机清选装置内部气流场分析与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 84-92. WANG H H, LI Y M, XU L Z, et al. Simulation and experiment of air flow field in the cleaning device of ratooning rice combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 84-92 (in Chinese with English abstract).
- [97] 张智刚, 王桂民, 罗锡文, 等. 拖拉机自动驾驶转向轮角检测方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 352-357. ZHANG Z G, WANG G M, LUO X W, et al. Detection method of steering wheel angle for tractor automatic driving[J]. Transactions of the CSAM, 2019, 50(3): 352-357 (in Chinese with English abstract).
- [98] 吕安涛, 宋正河, 毛恩荣. 拖拉机自动转向最优控制方法的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 116-119. LÜ A T, SONG Z H, MAO E R. Optimized control method for tractor automatic steering[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 116-119 (in Chinese with English abstract).
- [99] 黎永键, 赵祚喜, 黄培奎, 等. 基于 CAN 总线的拖拉机导航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(S1): 35-42. LI Y J, ZHAO Z X, HUANG P K, et al. Design and experiment of navigation control system for tractor based on CAN bus[J]. Transactions of the CSAM, 2016, 47(S1): 35-42 (in Chinese with English abstract).
- [100] 王新忠, 王熙, 王少农, 等. 拖拉机 CAN 总线车载智能终端技术研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(2): 210-214. WANG X Z, WANG X, WANG S N, et al. Research on the technology of CAN bus on vehicle intelligence terminal for tractor[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2017, 39(2): 210-214 (in Chinese with English abstract).
- [101] 纪朝凤, 刘刚, 周建军, 等. 基于 CAN 总线的农业车辆自动驾驶控制系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(S1): 28-32. JI C F, LIU G, ZHOU J J, et al. Automatic guidance system of agricultural vehicles based on CAN bus[J]. Transactions of the CSAM, 2009, 40(S1): 28-32 (in Chinese with English abstract).
- [102] MATSUO Y, HAMADA Y, YUKUMOTO O, et al. Auto-steering rice transplanter for straight traveling[C]//Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceeding of the 7-8 October 2004 Conference, Kyoto, Japan. Kyoto: ASABE, 2004: 292-297.
- [103] 胡炼, 罗锡文, 赵祚喜, 等. 插秧机电控操作机构和控制算法设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 118-122. HU L, LUO X W, ZHAO Z X, et al. Design of electronic control device and control algorithm for rice transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4): 118-122 (in Chinese with English abstract).
- [104] 伟利国, 张权, 颜华, 等. XDNZ630 型水稻插秧机 GPS 自动导航系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 186-190. WEI L G, ZHANG Q, YAN H, et al. GPS automatic navigation system design for XDNZ630 rice transplanter[J]. Transactions of the CSAM, 2011, 42(7): 186-190 (in Chinese with English abstract).
- [105] 张智刚, 罗锡文, 周志艳, 等. 久保田插秧机的 GPS 导航控制系统设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 95-97, 82. ZHANG Z G, LUO X W, ZHOU Z Y, et al. Design of GPS navigation control system for rice transplanter[J]. Transactions of the CSAM, 2006, 37(7): 95-97, 82 (in Chinese with English abstract).
- [106] 李志腾, 李彦明, 唐小涛, 等. 水稻穴直播机自动驾驶控制系统设计[J]. 农机化研究, 2019, 41(2): 150-154. LI Z T, LI Y M, TANG X T, et al. Design of autonomous driving control system for rice hill-drop drilling machine[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2019, 41(2): 150-154 (in Chinese with English abstract).
- [107] 孙承铭. 水稻穴直播机自动驾驶与管理系统开发[D]. 上海: 上海交通大学, 2017. SUN C M. Development of the autonomous drive and management system for rice bunch planter[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [108] 张雁, 李彦明, 刘翔鹏, 等. 水田环境下水稻直播机自动驾驶控制方法[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 15-22. ZHANG Y, LI Y M, LIU X P, et al. An automatic drive control technique for rice drill seeder in uneven paddy fields[J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(11): 15-22 (in Chinese with English abstract).
- [109] 关卓怀, 陈科尹, 丁幼春, 等. 水稻收获作业视觉导航路径提取方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 19-28. GUAN Z H, CHEN K Y, DING Y C, et al. Visual navigation path extraction method in rice harvesting[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(1): 19-28 (in Chinese with English abstract).
- [110] 丁幼春, 王绪坪, 彭靖叶, 等. 轮式谷物联合收获机视觉导航系统设计与试验[J]. 智慧农业, 2020, 2(4): 89-102. DING Y C, WANG X P, PENG J Y, et al. Visual navigation system for wheel-type grain combine harvester[J]. Smart agriculture, 2020, 2(4): 89-102 (in Chinese with English abstract).

Application and development of intelligent technology in full mechanization of rice production

LIU Wanru¹, ZHANG Guozhong¹, ZHOU Yong¹, XU Hongmei¹,
WU Qing¹, FU Jianwei¹, HUANG Chenglong¹, ZHANG Jian²

1.College of Engineering, Huazhong Agricultural University/
Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agriculture
Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Wuhan 430070, China;

2.College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University,
Wuhan 430070, China

Abstract Intelligent control is the key core technology for the development of full mechanization of rice production to intelligence. This article summarized and analyzed the use of rice production machinery and mechanized operations at home and abroad from four aspects of rice cultivation, planting, field management and harvesting. It emphasized the application and development of intelligent technology in the full mechanization of rice production. It covered the plow deep intelligent adjustment and automatic flat plug tray technology, rice seedlings precision seeding performance detection and intelligent seeding technology, precise technology, water-saving irrigation technology, the technology of variable rate fertilization, weeding robot technology, plant diseases and insect pests and unmanned aerial vehicle remote sensing monitoring spraying technology, key components harvester monitoring and intelligent control technology, the impurity rate and on-line monitoring technology, automatic navigation and breakage driverless technology. The technical difficulties limiting the development of mechanization to intelligence in the whole process of rice production were pointed out. The development of multi-sensor information fusion is proposed to improve the intelligent perception ability of rice production machinery. The research and development of high-efficiency, precise and energy-saving intelligent equipment for rice must be innovated and accelerated. The high-end navigation system that integrates inertial navigation system and machine vision system must be explored. Promoting the intensive operation of general machinery and the sustainable development of modern agriculture is the key to realizing the mechanization and intelligence of the entire process of rice production.

Keywords rice; full mechanization; intelligent control; automatic navigation; unmanned vehicle; smart agriculture; intelligent

(责任编辑:陆文昌)