doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.002

主要粮油作物无人化精密播种技术与装备研究进展

汪　昕[1,2]　张凯良[1,2]　张东兴[1,2]　牟金声[1,2]　尹新伟[1,2]　崔　涛[1,2]
和贤桃[1,2]　杨　丽[1,2]

(1.中国农业大学工学院,北京 100083;2.农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室,北京 100083)

摘要:无人化精密播种技术能有效解决农业劳动力短缺的问题,是主要粮油作物实现智慧农业的关键技术之一。近年来,随着现代信息技术的不断进步和精密播种技术的日趋完善,精密播种无人化的实现成为可能。本文结合国内外研究现状与应用案例,系统阐述了实现主要粮油作物精密播种无人化的 6 项关键技术:环境感知、高性能排种、作业参数智能调控、作业质量监测、路径规划及轨迹跟踪。其中,环境感知包括地块边界、障碍物识别及土壤肥力信息获取,作业参数智能调控包括播深与播量智能调控,作业质量监测包括作业速度与播种质量监测。最后,总结了主要粮油作物无人化精密播种技术与装备现有研究存在的问题:高速作业与高精度排种之间的技术矛盾突出、高精度自主导航系统鲁棒性不足、多源传感器环境适应性差与成本约束显著、装备轻量化与续航能力之间的结构性冲突、系统集成能力弱与标准化生态体系缺失;并展望了未来发展趋势。

关键词:主要粮油作物;无人化精密播种;智慧农业

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)09-0020-22　　**OSID**:

Research Progress on Unmanned Precision Seeding Technology and Equipment for Major Grain and Oil Crops

WANG Xin[1,2]　ZHANG Kailiang[1,2]　ZHANG Dongxing[1,2]　MOU Jinsheng[1,2]　YIN Xinwei[1,2]
CUI Tao[1,2]　HE Xiantao[1,2]　YANG Li[1,2]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Soil-Machine-Plant System Technology*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Unmanned precision seeding technology can effectively address the issue of labor shortages in agriculture, which is one of the key technologies for achieving smart agriculture in major grain and oil crops. In recent years, with the continuous advancement of modern information technology and the increasing sophistication of precision seeding technology, the realization of unmanned precision seeding has become feasible. The current state of research and application cases both domestically and internationally was combined to systematically elaborate on the six key technologies for achieving unmanned precision seeding of major grain and oilseed crops: environmental perception, high-performance seed distribution, intelligent regulation of operational parameters, monitoring of operational quality, path planning, and trajectory tracking. Among these, environmental perception included field boundary identification, obstacle recognition, and soil fertility information acquisition; intelligent regulation of operational parameters includes intelligent regulation of seeding depth and seed quantity; and monitoring of operational quality includes monitoring of operational speed and seeding quality. Finally, the existing issues in the research on unmanned precision seeding technology and equipment for major grain and oil crops were summarized: the technical contradiction between high-speed operation and high-precision seed distribution was prominent; the robustness of high-precision autonomous navigation systems was insufficient; the environmental adaptability of multi-source sensors was poor, and cost constraints were significant; there was a structural conflict between equipment lightweighting and

收稿日期:2025-06-30　修回日期:2025-07-24
基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000404)和财政部和农业农村部:国家食用豆产业技术体系项目(CARS-08)
作者简介:汪昕(2001—),男,博士生,主要从事智能农机装备技术研究,E-mail:wangx1n@cau.edu.cn
通信作者:杨丽(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业机械装备及其智能化研究,E-mail:yangli@cau.edu.cn

endurance capacity; system integration capabilities were weak, and a standardized ecosystem was lacking. The future development trends were also outlined.

Key words: major grain and oil crops; unmanned precision seeding; smart agriculture

0　引言

根据 2024 年中国统计年鉴,我国主要粮油作物播种面积在全国农作物总播种面积中的占比达到 70% 左右[1],对国家粮食安全起到至关重要的作用。主要粮油作物在农作物生产中占据关键地位,在发展智慧农业的大背景下[2-4],起到智能农机装备的技术引领作用,为提高单产形成有力支撑。播种环节作为农业生产中极其重要的一环,高质高效的播种作业质量是实现稳产高产的基础。

精密播种是指用精密播种机依据农艺要求的播种密度,按照一致的行距、均匀的粒距和精确的深度将种子播入土壤中并准确定位的过程,可节省种子、减少间苗作业,同时达到苗齐、苗全、苗壮的效果,既节约成本又提高产量,是规模化生产实现节本增效的重要手段[5]。近年来,中国农村人口老龄化现象不断加剧、农业生产副业化趋势日益加重[6],造成的劳动力短缺和耕种质量难以保证等问题给国家粮食安全带来严重的挑战。随着现代信息技术的不断进步和精密播种技术的日趋完善,无人化精密播种的实现成为可能,在一定程度上可有效缓解上述问题。对无人化精密播种技术开展研究,不仅能促进智能农机装备作为新质生产力实现行业高质量发展,也是加快推动中国农业强国建设的重点方向之一,在抢占全球智能农业装备的战略制高点和竞争焦点上具有建设性的价值和意义。

无人化精密播种技术研究与应用以高土地产出率为最终目标,深度融合机械、电气、信息、生物等多学科交叉知识,实现高效高质无人化精密播种作业。当前无人化精密播种技术与装备国外处于试验推广阶段,已陆续推出几款较为成熟的产品,并达到一定的智能化水平;国内处于起步探索阶段,对播种作业环节研究的针对性和深入性不足,仍面临诸多挑战。

本文结合国内外研究现状与应用案例,系统阐述实现主要粮油作物无人化精密播种的 6 项关键技术:环境感知、高性能排种、作业参数智能调控、作业质量监测、路径规划及轨迹跟踪。最后,总结主要粮油作物无人化精密播种技术与装备研究现状并展望未来走向,以期推动产业持续升级和行业高质量发展。

1　无人化精密播种装备研究现状

2012 年前后,欧美等发达国家开始陆续推出无人化农机装备[7]。2016 年,凯斯纽荷兰工业集团推出凯斯 Magnum 系列无人驾驶拖拉机和具有无人驾驶技术的纽荷兰 T8.410 型拖拉机,通过挂接大型播种机,可实现无人化精密播种作业[8-9]。2020 年以后,国外无人化精密播种作业装备开始进入爆发式增长期,德国 HORSCH、丹麦 Agrointelli、德国 Fendt、美国 Amos、法国 Naïo、丹麦 Farmdroid、荷兰 AgXeed、德国 Phoenix 等纷纷推出可实现精密播种的无人化作业装备[10-17]。主要粮油作物无人化精密播种作业装备的关键技术主要包括环境感知、路径规划、轨迹跟踪、作业参数智能调控及作业质量监测等。国内,2018 年,一拖和雷沃分别推出具有无人驾驶技术的东方红 LF1104-C 和阿波斯拖拉机,在各大现场演示会中挂接播种机具演示无人化精密播种作业[18-19]。2020 年以后,国内以中国农业大学、华中农业大学及河北农业大学为代表的科研单位对无人化精密播种作业开展积极研究,验证相关技术搭载在无人化精密播种装备上的作业效果[20-33]。主要粮油作物无人化精密播种装备展望构想、发展历程与技术组成如图 1 所示。

当前国内外无人化精密播种装备形式多样,各大企业及科研单位自身研究基础及发展方向各不相同,导致实现无人化精密播种技术路线有一定差异性。按照作业装备结构形式不同,大体可分为 3 种:大型无人驾驶拖拉机 + 播种机具、中型多功能作业平台 + 播种单体、小型一体式专用无人播种装备。三者优缺点如表 1 所示。

1.1　国外研究现状

国外对无人化精密播种技术研究起步较早,结构形式多样且达到了一定的智能化水平。欧美等国陆续推出的主要粮油作物无人化精密播种装备基本具备地块边界识别及障碍物识别的环境感知能力,自主根据作业田块完成路径规划及轨迹跟踪,使用用户设定的播种深度及播种量进行作业,完成对作业质量的监测并上传云平台,用户可通过云平台实时获取机器及作业质量信息。

德国 HORSCH 公司于 2021 年左右推出 Robot 18MT 无人化播种概念机,如图 2 所示[10],通过大功率无人驾驶拖拉机挂接 HORSCH Maestro 24 SV 中央集排式播种机,配合 GPS-RTK 精准导航系统以及播深控制系统实现玉米、油菜、大豆等作物无人化播种作业。整机作业宽度 18 m,料斗容量 10 900 L,

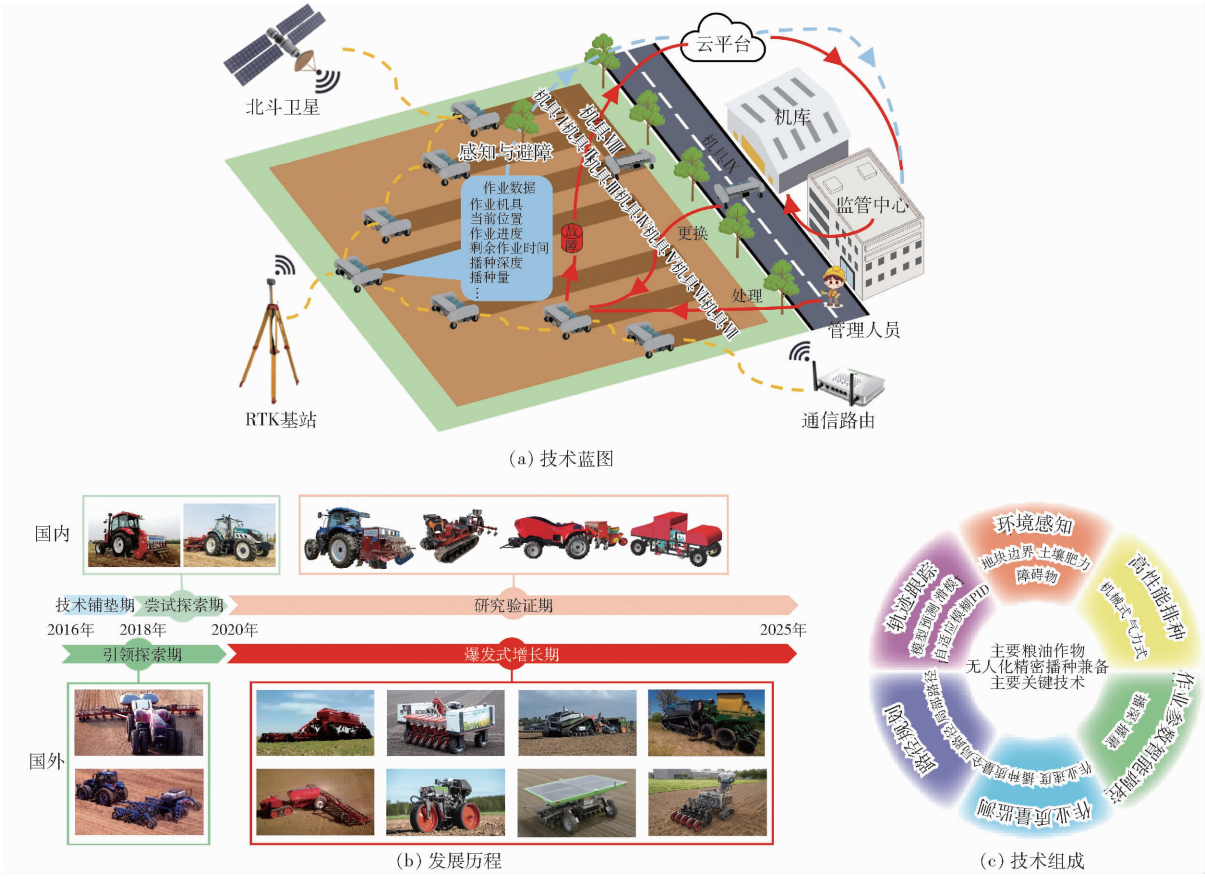


图 1 主要粮油作物无人化精密播种装备技术蓝图、发展历程与技术组成

Fig. 1 Development history and technical composition of unmanned precision seeding equipment for major grain and oil crops

表 1 不同结构形式无人化精密播种装备特点

Tab. 1 Features of unmanned precision seeding equipment with different structural forms

结构类型	典型机型	典型机型实物图	优点	缺点
大型无人驾驶拖拉机 + 播种机具	凯斯 Magnum 无人驾驶拖拉机 + 凯斯 2000 系列播种机		通用性高、作业效率高、作业稳定性好	对作业田块要求高、土壤压实严重
中型多功能作业平台 + 播种单体	Agrointelli Robotti LR 多功能作业平台 + Kverneland 播种单体		通用性较高、作业效率较高	对播种作业环节的针对性普遍不高
小型一体式专用无人播种装备	Fendt Xaver 小型播种机器人		集成度高、避免土壤压实	功能单一、作业稳定性不高、作业效率较低



图 2 德国 HORSCH 公司 Robot 18MT[10]

Fig. 2 Robot 18MT, HORSCH, Germany[10]

集成了液压缸驱动的下压力控制技术与作业实时监测技术，作业速度可达 15 km/h。

丹麦 Agrointelli 公司生产的 Robotti LR 采用柴油驱动，如图 3 所示[11]，机具左右两侧内部分别安装了公司生产的久保田 53 kW 柴油发动机和 300 L 柴油箱，一次加满油可满足机具作业 60 h。整机质量 2 850 kg，与传统拖拉机相比，减少了对土壤压实的作用。在机械结构上，使用三点式铰链挂接方式可以配备多种标准的农具；模块化设计针对不同需求调节作业幅宽；四轮驱动灵活转弯实现原地掉头。在智能化控制上，使用 RTK - GPS 技术进行精确导航，精度为 ±2 cm；通过网页版的机器控制系统完成对田间障碍物的标记以及机器作业路径的规划，并

可监控机具作业进程和实时视频监控，并上传作业日志方便后续查看；配备 3D 激光扫描仪和车轮打滑监控及防卡死系统实现对周围环境的感知和作业故障预警。通过挂接不同播种单体，已经实现玉米等多种作物的精密播种。



图 3　丹麦 Agrointelli 公司 Robotti LR[11]

Fig. 3　Robotti LR, Agrointelli, Denmark[11]

德国 Fendt 公司生产的 Xaver 采用轻量化设计，如图 4 所示[12]，在三轮小型移动平台中集成了一个 Precision Planting 的播种单元、20 L 种箱、2.6 kW·h 锂电池以及 FendtONE 数字平台，整机空载质量约 150 kg，总长度 2 m。机器前方双轮驱动，后方单轮负责转弯并充当传统播种单体中覆土轮的角色完成覆土。Xaver 小型播种机器人满电工况下可持续作业约 1.5 h，通过 Fendt Xaver Cloud 智能平台实现多机协同作业，6 个播种机器人集群作业作业速度达到 3 hm^2/h。并且机器配备了 VarioGuide 车道引导系统，该系统以厘米级的精度控制机器人，保证作业质量。目前，Xaver 小型播种机器人正在集成 Precision Planting 的 Smart Firmer 系统，期望通过使用传感器测量土壤含水率、温度、腐殖质含量和植物残留物，以决策不同地块条件下的变量播深和播量，实现更高的产量。



图 4　德国 Fendt 公司 Xaver[12]

Fig. 4　Xaver, Fendt, Germany[12]

其他典型国外主要粮油作物无人化精密播种装备型号及技术特点如表 2 所示。

表 2　典型国外主要粮油作物无人化精密播种装备型号及技术特点

Tab. 2　Typical foreign major grain and oil crops unmanned precision sowing equipment models and technical characteristics

研发单位与机具型号	动力来源	实物图	技术特点
美国 Amos 公司 A4	电驱动		功率为 55 ~ 62 kW，全电动 PTO，运行时间 4 ~ 8 h，使用先进的机器学习算法和立体摄像头对周围环境进行实时感知；履带式行走机构设计，挂接播种单体进行作业，对坡度地形有较高的适应性[13]
法国 Naïo 公司 Oz	电驱动		尺寸（长 × 宽 × 高）：1 300 mm × 470 mm × 830 mm，质量：150 kg，Oz 小型农业机器人平台采用四驱设计，牵引质量最高 300 kg，速度最高可达 1.8 km/h；搭载 Naïo Core 系统，通过 GNSS RTK 进行导航和任务参数化，通过挂接小型播种单体可实现全自主的播种作业[14]
丹麦 Farmdroid 公司 FD20	电驱动（带太阳能电池板）		Farmdroid FD20 是一款太阳能田间机器人，用于播种和除草；通过使用高精度 RTK GPS，Farmdroid FD20 在播种时标记每株植物的位置，随后进行行间和行内杂草控制；并搭载作业质量监测预警系统，对漏播重播进行预警通知[15]
荷兰 AgXeed 公司 AgBot 5.115T2	柴油驱动		履带式驱动轮设计，同时适用于沙质土和黏性土，对地形也有较高的适应性，作业速度 8 ~ 12 km/h；搭载 LiDAR 传感器、超声波传感器、雷达传感器和接触式敏感缓冲器对作业环境进行实时监测[16]
霍恩海姆大学 Phoenix	电驱动		使用 Phoenix 机器人平台挂接 5 行重新设计的小型播种单体，实现精准播种和及时施肥，并搭载了基于处方图的播种施肥控制系统（NOcsPS 种植系统），达到了较高的播深一致性和施肥精度[17]

1.2　国内研究现状

当前，国内对主要粮油作物无人化精密播种技术与装备研究处于起步探索阶段，近几年以高校和科研院所为主，探索并尝试实现无人化精密播种中的地块边界识别、路径规划与轨迹跟踪等几项基本功能。

华中农业大学丁幼春教授团队[20-21]针对长江中下游地区不同规模田块分别创制了履带式和轮式

无人播种作业装备,如图 5 所示。并搭载了以北斗定位传感器为主、角度传感器等传感器为辅的无人播种作业系统,综合环境感知技术、路径规划与跟踪算法以及导航控制策略,实现了机具无人转弯精度小于 15 cm、作业对行精度小于 2.5 cm、无人直线跟踪精度小于 3.5 cm[22-26]。丁幼春教授团队开发了油菜无人播种作业系统云平台,通过人工在云平台网页端点击控制按钮,实现对油菜直播机组的远程规划和调度,并可以将油菜播种作业过程中作业速度、播种量、播种频率及导航规划轨迹等关键信息实时显示并上传到云数据库中进行保存,便于后续查询管理。

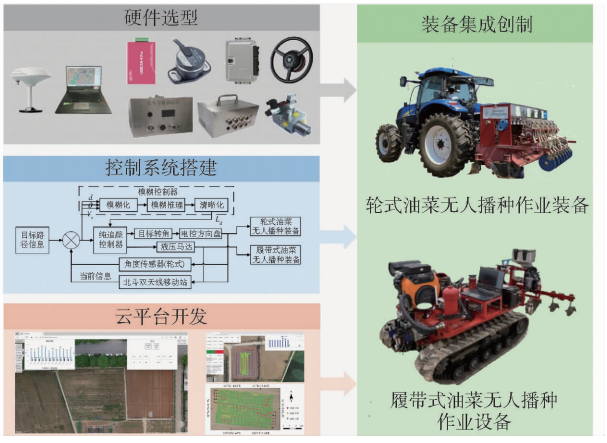


图 5 油菜无人播种作业装备[20-26]

Fig. 5 Equipment for unmanned seeding operation of oilseed rape[20-26]

中国农业大学何进教授团队[27]结合玉米根茬地玉米种植模式和实际需求,提出了一种基于无线遥控技术的前后双驱双转向玉米播种机器人底盘,如图 6 所示。并且开发了底盘控制系统,其中,遥控手柄与整车控制器(Vehicle control unit,VCU)之间进行无线电信号传输,VCU 与其他控制模块之间采用 CAN 总线通信方式连接。VCU 采集处理遥控信号、CAN 总线和其他执行部件信号,进而控制下层各执行部件,实现底盘正常行驶,搭载玉米播种作业部件实现无人化玉米播种。

河北农业大学王家忠教授团队[28-33]针对华北地区“八密一疏”小麦-玉米对行套作种植模式,设计研发了一种无人驾驶小麦密植播种机组,如图 7 所示。整机结构上,在保留原有拖拉机传动结构的基础上,采用驱动电机固定齿比直连驱动后桥的方式取代内燃机,同时采用动力电池组为整机功能,经动力匹配计算适配了合适的动力系统。采用组合导航系统提供实时车辆姿态数据,并对无人驾驶小麦密植播种作业过程中拖拉机的能量管理策略展开研究。

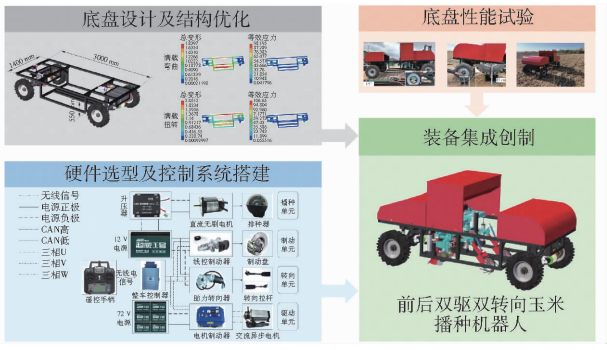


图 6 前后双驱双转向玉米播种机器人[27]

Fig. 6 Front and rear dual drive dual steering corn seeding robot[27]

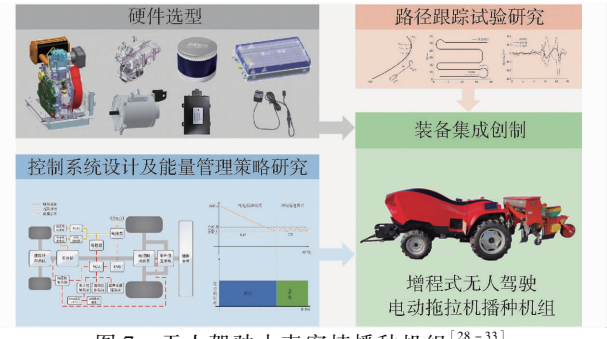


图 7 无人驾驶小麦密植播种机组[28-33]

Fig. 7 Driverless wheat dense planting unit[28-33]

2 无人化精密播种主要关键技术

2.1 环境感知技术

环境感知是无人化精密播种装备作业决策的信息来源。无人化精密播种作业工况下需要感知的环境主要包括地块边界、动静态障碍物以及土壤信息识别。

2.1.1 地块边界识别

农田地块的边界信息用于无人农业装备的路径规划和电子围栏设定,因此,地块边界识别是保障无人化精密播种装备正常作业的前提。根据农田地块边界信息采集的载体和原理划分,主要有 3 种采集方式,分别是基于人工或无人机遥感图像打点方式的作业前离线数据采集以及基于车载传感器数据融合的作业中实时感知[34]。其数据采集方式及特点如表 3 所示。

目前无人化精密播种装备采用的农田地块边界信息采集方式主要还是人工打点,利用高精度卫星定位装置采集地块边界的坐标信息。该方法在小地块表现出了良好的精度和鲁棒性,然而对于面积较大或内部含有多个固定障碍物的农田场景,该方法的经济性和采集效率较低,不具有实用性。利用车载传感器进行农田地块边界信息采集通常存在两个难点:光照、阴影与极端天气会影响地块边界识别的准确性;部分农田周边杂草丛生,地块内外边界不明

表 3　农田地块的边界信息采集方式

Tab. 3　Boundary information collection methods for agricultural plots

采集载体	传感器	优点	缺点
人工	GNSS 接收机/全站仪/水准仪	位置精度高	测绘效率低、地理信息数据稀疏
无人机	低空遥感相机	覆盖面积较大、作业效率较高	续航时间短
车载传感器	毫米波雷达/激光雷达/双目相机	局部范围内精度高	标定困难、抖动大

显，容易造成边界识别不完整的问题。张朝宇[20]提出了一种基于无人机重构的高精度地图构建方法，通过将无人机采集的多视影像和 POS 数据结合 RTK 采集地面点数据进行多视影像匹配和联合平差处理，得到图像上选取的经纬度坐标与实际经纬度坐标匹配的高精度地图，并用于油菜无人化播种作业中。

2.1.2　障碍物识别

无人播种作业过程中，农田中会出现的障碍物主要包括土坡、电线杆等静态障碍物以及人、牲畜等动态障碍物。无人化精密播种装备不仅需要在作业过程中识别障碍物体，并且需要测量出机器与障碍物的相对距离，用于机器后续的避障与作业决策。目前，常见的障碍物检测传感器包括：视觉传感器、激光雷达、毫米波雷达和超声波传感器等。视觉传感器利用图像特征检测与跟踪障碍物。激光雷达通过测量激光往返时间精准获取目标位置与轮廓。毫米波雷达具有较强的穿透能力，利用无线电信号进行距离测量，可检测障碍物的位置与运动状态。超声波雷达测量反射时间感知近距离障碍物。常见的障碍物检测传感器类型与性能对比如表 4 所示[39]。

表 4　不同类型障碍物检测传感器特点对比

Tab. 4　Comparison of characteristics of different types of obstacle detection sensors

类型	优点	缺点
视觉传感器[35]	信息丰富、高分辨率、低成本	受环境光照影响大
激光雷达[36]	精准测距、精度高、范围广	成本高
毫米波雷达[37]	穿透性强、环境适应性强	分辨率低
超声波[38]	体积小、成本低	感知范围小

荷兰 AgXeed 公司生产的 AgBot 5.115T2 集成了由雷达传感器、超声波传感器、接触式敏感缓冲器、摄像头、激光雷达传感器组成的环境感知系统，硬件系统如图 8 所示，实现了在无人播种作业过程中对周围障碍物的实时监测。

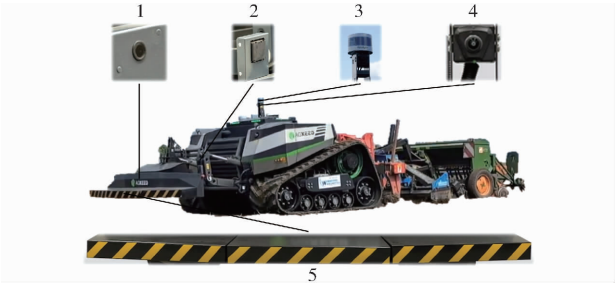


图 8　AgXeed 公司 AgBot 5.115T2 环境感知硬件系统

Fig. 8　AgXeed's AgBot 5.115T2 environmental awareness hardware system

1. 超声波传感器　2. 雷达传感器　3. 激光雷达传感器　4. 摄像头　5. 接触式敏感缓冲器

合肥工业大学陈无畏团队[36]针对农业机械复杂的作业环境下，基于 3D 激光雷达的障碍物检测和跟踪方法精度低、实时性差的问题，提出了一种基于网格地图的聚类密度阈值算法用于障碍物检测和跟踪，并搭载在无人驾驶拖拉机上进行玉米播种作业试验，如图 9 所示。试验结果表明，该方法在移动障碍物识别精度、检测速度上均优于基于密度的噪声应用空间聚类方法。

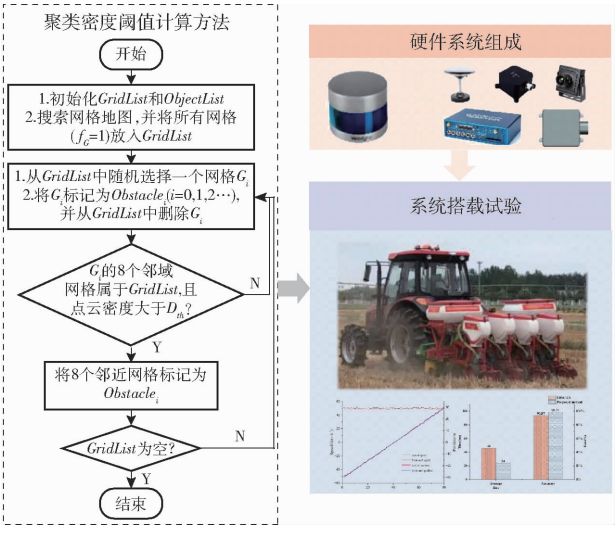


图 9　无人化精密播种聚类密度阈值算法搭载试验[36]

Fig. 9　Unmanned precision seeding clustering density thresholding algorithm piggybacking test[36]

2.1.3　土壤肥力信息获取

精准农业要求根据田间各个地块的具体情况，精准高效地管理土壤和各项作物，最大程度地优化农业生产资料投入，以期获得更高的产量和经济效益[40-42]。而科学的播种方法可以优化种子生长环境，从而达到高产目标。以播深、株距一致性的传统种植方法忽视了土壤特性的田间可变性，基于局部土壤条件下的变量以及变深播种被证明对作物幼苗生长和最终产量有着积极的影响[43]。因此，在智慧农业背景下，对无人化精密播种作业中

土壤肥力信息的精准高效获取,具有研究价值和意义。

土壤肥力信息主要包括土壤有机质含量、土壤含水率、氮磷钾含量、电导率等指标,而对土壤肥力信息精确获取方法主要有近地传感和遥感测量两种。近地传感通过将光学以及电信号等传感器检测系统搭载在作业装备上,实现土壤肥力信息实时监测。遥感测量是将多光谱或高光谱设备搭载在人造卫星、无人机等平台上进行反演预测[44]。主要研究成果如表 5、6 所示。

表 5 基于近地传感的土壤肥力信息获取技术主要研究成果

Tab. 5 Main research results of soil fertility information acquisition technology based on near-earth sensing

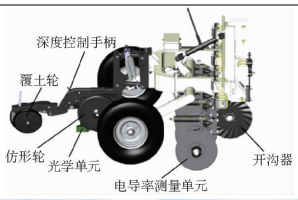
研制单位	实物图	肥力信息	原理	使用效果
Gyeongsang National University		土壤有机质含量	一个波长 660 nm、带宽 ±25 nm 的红外发光二极管,一个带宽 ±25 nm、波长 940 nm 的近红外发光二极管和一个波段 400 ~ 1 000 nm 的硅光电二极管组成的光学传感器测量土壤反射率	在田间测试中,所有田地都给出了良好的结果,土壤有机质的预测与偏差之比大于等于 2[45]
Cranfield University		磷含量	由安装在开沟器底部、测量范围为 305 ~ 2 200 nm的 AgroSpec 移动式光纤型近红外分光光度计测量漫反射模式下的土壤光谱	预测图与实测图表现出空间相似性,为农民提供了施肥参考[46]
Precision Planting LLC		土壤有机质含量、土壤含水率	使用波长 468、592、858、1 198、1 468 nm 近红外测量土壤反射率	使用该传感器测量与实验室测量的土壤有机质含量呈正相关[47-48]
Veris Technologies, Inc.		土壤有机质含量、电导率	使用红光和近红外双波长设备 OpticMapper 以检测频率 1 Hz 测量土壤反射率	对美国 7 个州、20 块田地测量表明,传感器估计的有机物含量与实验室分析的土壤有机质含量之间具有很强的相关性[49]

表 6 基于遥感的土壤肥力信息获取技术主要研究成果

Tab. 6 Main research results of soil fertility information acquisition technology based on remote sensing

研制单位	检测技术	肥力信息	预测方法	使用效果
Ohio State University	多光谱遥感	土壤有机质、钾含量	神经网络预测土壤有机质含量、向量机预测钾含量	土壤有机质含量:R^2 = 0.64、RMSE 为 0.44;钾含量:R^2 = 0.21、RMSE 为 0.49[50]
东北农业大学	多光谱遥感	土壤有机质含量	利用 Landsat 8 影像和哨兵 2 号影像数据结合 DEM 数据并加入地形因子对黑土区田块尺度土壤有机质含量进行反演研究	模型精度(建模 RMSE 为 0.492,检验 RMSE 为 0.499)和稳定性(建模 R^2 = 0.917,检验 R^2 = 0.928)进一步提高[51]
核工业北京地质研究院	高光谱遥感	全氮、速效磷、速效钾含量	使用偏最小二乘回归和 BP 神经网络方法对黑土土壤航空高光谱数据分别建立土壤养分元素含量的高光谱定量反演模型	BP 神经网络建模相比偏最小二乘建模有更好的精度和预测能力,预测精度分别提高 6.5%、10.1% 和 6.6%[52]
浙江大学	高光谱遥感	电导率	使用偏最小二乘回归和随机森林回归对新疆阿克苏地区的裸土区、稀疏植被区以及茂密植被区法建立遥感数据与土壤盐分含量之间的定量预测模型	随机森林回归模型的预测表现显著优于偏最小二乘回归模型[53]

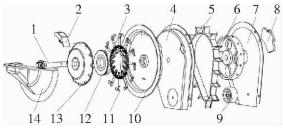
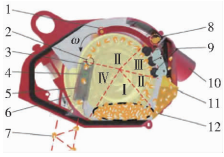
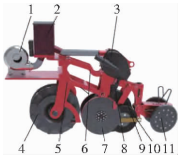
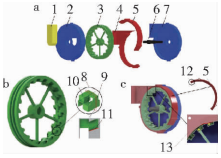
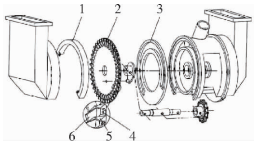
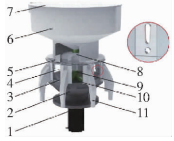
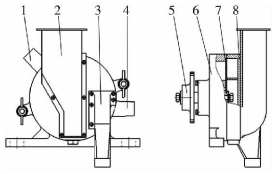
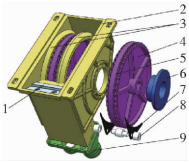
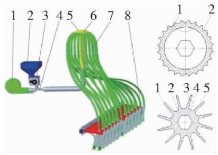
2.2 高性能排种技术

排种过程是指将种子从种箱中按预定的排种量、行距和株距分布在土壤中,是无人化精密播种的执行环节,高性能排种技术是决定无人化精密播种最终作业质量的关键技术之一。根据工作原理和排种方式,排种器可分为机械式和气力式等。自 20 世纪 40 年代开始,国外农机企业及研究单位对精量排种器开展相关研究,初期主要研制开发了多种类型的机械式精量排种器[54]。机械式排种器主要包括圆盘式、窝眼轮式、外槽轮式以及指夹式。随着现代

农业的发展和精量播种的要求，气力式排种器较机械式排种器在伤种率上有着明显优势[55]，学者对其开展大量研究与应用。气力式排种器主要包括气吹式、气吸式、气压式以及气送式。由于不同的主要粮油作物在种子形态、粒径、千粒质量、种植方式及需求等方面存在显著差异，因此其排种器设计和工作原理也存在一定的差异。主要粮油作物典型排种器结构如表 7 所示。

表 7　主要粮油作物典型精量排种器结构及性能

Tab.7　Structure and performance of typical precision seeders for major grain and oil crops

作物	研发单位	排种方式	排种器结构图	整机结构图	配套拖拉机	性能指标
玉米	东北农业大学[54]	机械指夹式			约翰迪尔 454 型拖拉机（33 kW）	作业速度 5 ~ 9 km/h，重播率 6.62% ~ 14.56%，漏播率 2.37% ~ 4.49%，变异系数 13.98% ~20.14%
	黑龙江八一农垦大学[56]	气压式			–	台架试验表明：充种高度 40.598 mm、气腔正压 3.763 kPa、作业速度 11.358 km/h 时，品字合格指数高于 91.2%、双行株距变异系数低于 6.97%
大豆	西北农林科技大学[57]	机械式			洛阳路通 504E 型（36.8 kW）	作业速度 4 ~ 14 km/h，粒距合格指数均高于 89.32%，漏播指数均低于 5.05%，伤种指数均低于 1.02%
	吉林大学[58]	气吸机械复合式			CASE IH 210 型拖拉机（157 kW）	作业速度 6 ~ 12 km/h，重播率 5.59% ~ 14.86%、漏播率 3.83% ~12.29%、粒距变异系数 16.25% ~28.87%
玉米大豆兼用	德国 HORSCH 公司[59-60]	气吸式			12 ~ 24 行对应 200 ~ 400 kW	
油菜	华中农业大学[61-63]	机械离心式			雷沃 M1004 - 3B 型拖拉机（73.5 kW）	作业速度 7.89 km/h，各行株数一致性变异系数 8.57% ~ 10.26%，稳定性变异系数 10.81% ~ 11.21%；作业速度 11.98 km/h，各行株数一致性变异系数 8.57% ~ 10.26%，稳定性变异系数 11.44% ~12.07%
		正负气压组合式			雷沃 804 型拖拉机（58.8 kW）	作业速度 2.6 km/h，株距稳定性变异系数 4.39%，各行苗数一致性变异系数 8.14%
小麦	河北农业大学 河北农哈哈机械集团有限公司[64]	机械式			配套动力 25.7 ~ 43.9 kW	作业速度 4.8 km/h，粒距合格率 82.50%，重播率 9.17%，漏播率 8.33%，合格粒距变异系数 32.87%，播种均匀性变异系数 30.12%
油菜小麦兼用	华中农业大学[65]	气送式			约翰迪尔 1054 型拖拉机（77.23 kW）	油菜单行苗数变异系数 5.38% ~ 10.14%，各行苗数一致性变异系数 7.63%；小麦单行苗数变异系数 6.25% ~ 11.26%，各行苗数一致性变异系数 8.11%

由于欧美等国在主要粮油作物上以规模化生产发展为主,对作业速度及作业精度要求较高,形成了以气力式为主的排种技术研究发展模式,且部分排种器可通过更换排种盘实现不同作物的高质量排种,代表排种器有德国 HORSCH 公司的 AirVac 和 AirSpeed 排种器等。国内从 20 世纪 70 年代对机械式精量排种器进行研究开发,并不断提升机械式精量排种器的性能。目前机械式精量排种器仍是我国玉米、大豆等作物在实际生产过程中最常用的排种器[66-69]。20 世纪 80 年代初期,国内开始针对气力式精量排种器展开相关研究,形成以气吸式为主,气吹、气压、气送式为辅的研究应用模式[70-74]。近年来,开始开展对可换排种盘式通用精量排种器的研究,如玉米-大豆通用气吸式排种器、水稻-小麦/油菜-小麦兼用气送式排种装置等[75-76]。

2.3 作业参数智能调控技术

作业参数智能调控是无人化精密播种的关键技术之一,实现了机器根据获取的环境感知信息,代替传统播种装备的人工调节,自主决策并完成对机器作业参数的实时调节,达到更优播种质量以及作物生长环境的目标。无人化精密播种作业过程中智能调控的作业参数主要包括播种深度以及播种量。

2.3.1 播深智能调控

播深一致性是评价精密播种机播种质量的重要指标,对作物苗全、苗齐、苗壮及后续的生长发育具有重要影响[77]。人工操作精密播种机进行播种作业时,在作业前,操作人员使用开沟深度调节装置调整限深轮的位置以改变播种深度。无人精密播种作业需要面对不同的地块中不同土壤类型和质地的情况,同时即使同一地块也会出现土壤坚实度分布不均的情况,因而可能出现由平行四杆之间弹簧给播种单体提供下压力不足而导致的开沟器入土困难,或者过高而导致的种床带土壤过分压实的问题[78]。因此,对无人精密播种装备开展播深智能调控研究具有重要的意义和应用价值。当前,播深智能调控根据检测方式的不同,可分为基于开沟深度检测的播深智能调控和基于下压力检测的播深智能调控。

基于开沟深度检测的播深智能调控系统通过传感器实时直接或间接检测作业过程中播种单体的开沟深度,并将实际播深与期望播深的差值输入控制器中,控制器按照控制规则驱动执行元件动作,最终达到期望播深[79-81]。基于开沟深度检测的播深智能调控系统对不同土壤条件下的播深控制效果有较好的适应性,但对系统稳定性和响应性也有着较高的要求。

基于下压力检测的播深智能调控利用了播种单体作业时,不同播种深度下限深轮对地面产生的下压力不同的原理,通过实现对下压力的闭环控制,完成对播种深度的智能调节。同时,合理的下压力能够紧实土壤,为种子创造良好的生存环境,有利于种子的水分吸收和根系发育。Precision Planting 公司分别开发了 AirForce 和 DeltaForce 自动下压力控制系统,实物及安装位置分别如图 10 所示,二者对播种单体下压力的控制原理相似[82-83]。AirForce 气囊/DeltaForce 液压缸取代了传统平行四杆机构中上下两杆的弹簧,通过安装在限深轮上的轴销式传感器实时检测播种单体的对地压力,与控制器根据预设下压力与实际下压力对比后,控制 AirForce 气囊形变/DeltaForce 液压缸伸缩,完成对下压力的闭环控制。国内中国农业大学、吉林大学等[84-92]也对基于下压力检测的播深智能调控系统开展了一定研究,不断提高中高速播种作业时,下压力检测精度、播种深度控制精度与响应速度。



图 10 Precision Planting 公司 AirForce 和 DeltaForce

Fig. 10 Precision Planting Company AirForce and DeltaForce

2.3.2 播量智能调控

变量播种技术是精准农业领域中的关键技术之一。20 世纪 80 年代,欧美等发达国家已经开展变量播种技术研究[93]。随着近年来传感、物联网、大数据以及人工智能等技术的发展,为变量播种提供了高效、及时、精准的技术支撑,变量播种技术进入了快速发展期。播量智能调控是变量播种的最终执行环节,播量决策控制器将基于处方图或实时传感器得出的适宜播量传输至主控制器,主控制器将播量信息转化为转速信号传输至电机或液压马达等排种器驱动元件,控制排种器达到目标转速以实现播量的调控。处方图式变量播种控制系统是在播种前对土壤特性进行测定后,综合天气、地块坡度、往年产量等数据全面评价地块的产量潜能并划分农田管

理区，依据经验法或试验法确定各个肥力地区的适宜播量。传感器式变量播种控制系统是将土壤传感器实时监测土壤肥力信息传递给播量决策系统中，基于以试验数据为依据建立的土壤肥力指标、播量和产量之间的数学模型来确定适宜播量[94]。

(1)播量决策

当前，播量决策方法主要有基于田间试验和基于机器学习的决策方法。

基于田间试验的播量决策需要利用施加有机肥的方法在养分含量较低且分布较均匀的试验田人工构造多个不同梯度的肥力区域，在各个肥力梯度下开展不同种植密度的田间试验。最终通过长期的播量决策试验得到土壤肥力等级、玉米种植密度及产量数据，采用数理统计方法建立三者之间的数学模型，实现播种量的精确决策。LICHT 等[95]在爱荷华州中部 3 个试验地点按照 5 种不同的播种量连续开展了连续 3 年的播量试验，建立了土壤属性、地形特征、播种量与玉米产量之间的数学模型，通过数学模型对不同地点不同年份的最佳播量进行预测，最终仅实现了对一个地点 3 个不同年份的播量优化。美国 Climate 公司[96-97]利用 82 万个试验地点数据建立了玉米最佳播种量决策模型，以此为核心开发的 FieldView 平台可利用多达 20 多种数据图生成变量播种处方图，同时与 John Deere、Agrian 等 10 余家农业或农机公司合作共享数据，将各公司产品收集到的诸如地块边界、土壤检测数据、产量图、土壤光谱图等信息上传到平台，用于决策生成变量播种处方图。国内对变量播种的处方图研究较少，主要集中在探究种植密度对玉米产量的影响[98-100]。

基于机器学习的播量决策需要以大量试验数据作为数据集，对基于土壤肥力条件等环境因子的产量预测模型进行训练，探究不同土壤肥力下产量随播量的关系，最终建立土壤肥力-播种量-产量数学关系，从而得到基于机器学习的最佳播种量决策模型。杜兆辉[101]通过知网、万方、谷歌学术等文献检索平台搜集与玉米播量或种植密度相关的研究文献，从文献中提取试验地点、试验时间、玉米品种、土壤有机质含量、播量、氮肥施用量、磷肥施用量、钾肥施用量、玉米生育期内的积温、光照时数、降水量以及玉米产量等关键信息。将上述文献数据与田间试验数据合并作为建模数据集。对建模数据进行归一化处理并按照比例 7∶3将数据集划分为训练集和测试集。采用 Scikit - learn 机器学习库建立以播量、土壤有机质含量、氮肥施用量、磷肥施用量、钾肥施用量、积温、光照时数、降水量为输入，产量为输出的玉米产量预测模型。将土壤有机质含量作为产量预测模型的输入变量之一使得模拟玉米产量对土壤有机质含量的响应成为可能。利用产量预测模型保持除土壤有机质含量和播量外的其他输入变量为恒定值，保证产量的变化仅来自于土壤有机质和播量的影响。对不同土壤有机质含量和播量下的产量进行预测。通过对土壤有机质含量、播量、预测产量之间的数学关系进行分析，构建土壤有机质-玉米最佳播量数学模型。

(2)播量调控

播量调控是通过控制器控制排种器的驱动电机或液压马达精准、及时、稳定地达到指定转速，以达到播量决策模型规定的机器当前播种量。因此，作为变量播种的执行环节，播量调控直接决定了变量播种的作业质量。根据播量智能调控的实现过程，播量调控的评价指标有播种滞后距离、播量调整精度和播量变异系数。

播种滞后是指播种机进入新的播量区域后达到目标播量的位置滞后于该区域初始边界的现象。播种滞后现象出现在基于传感器式变量播种控制系统，从获取土壤肥力信息到种子落入种沟需要一定的时间，而播种机是动态作业，因此会导致播量的实际调整位置落后于目标调整位置。播种机达到目标播量时的位置与该播量区域初始边界之间的距离被称为滞后距离。滞后距离影响变量播种控制系统的实时性。

播量调整精度和变异系数被分别用于评价播量调整的准确性和稳定性。播量调整精度是指多个采样点下实际播量与理论播量相对误差的平均值。因此，变量播种对排种器驱动电机或液压马达的性能以及控制算法提出了更高的要求。

中国农业大学杨丽教授团队[102-107]在变量播种控制系统开展了大量研究，分别研发了基于处方图和实时传感器的变量播种控制系统，如图 11 所示。分别对处方图式变量播种系统中基于 ArcGIS Runtime SDK for Android 的处方图以及实时传感器式变量播种系统中基于机器学习的实时播量决策模型进行开发；提出了播种滞后距离补偿算法对各播种单体目标播量位置进行校正；并对排种器电驱控制算法开展研究，不断提高变量播种控制系统作业质量。

2.4　作业质量监测技术

高水平作业质量是无人化精密播种技术和装备追求的重要目标之一。实时准确地监测无人化精密播种作业质量既能直观展示作业情况，方便用户及时掌握播种信息；也能将作业质量信息反馈给作业系统，及时调整作业参数，进一步提高作业质量；同

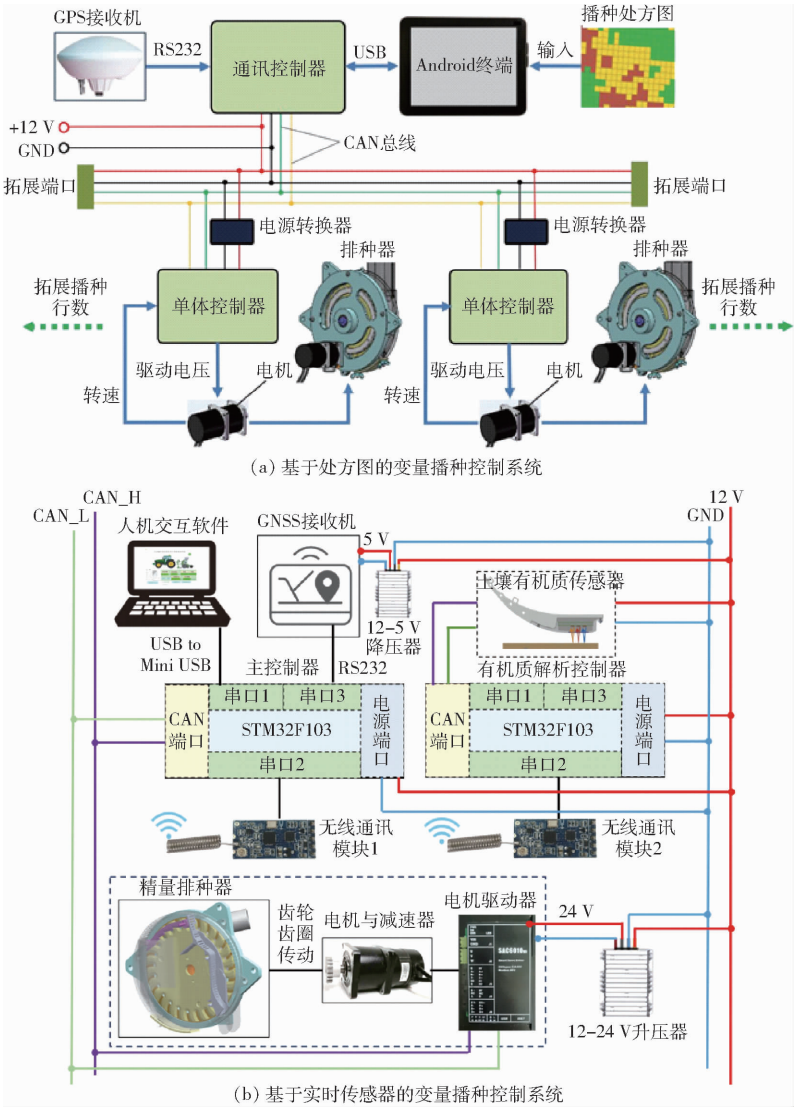


图 11 变量播种控制系统总体结构

Fig. 11 General structure of variable seeding control system

时也是研究人员进一步优化无人化精密播种技术和装备的数据来源和研究基础。无人化精密播种作业质量包括作业速度与播种质量。

2.4.1 作业速度

无人化精密播种装备作业速度直接决定了机器作业效率,同时作业速度获取的准确性和实时性也是影响实时播种粒距监测精度的重要因素,进而影响合格率、漏播率等其他播种质量参数监测精度。

播种机作业速度可以利用 GNSS 接收机或者测速雷达直接测量,也可以利用霍尔传感器、编码器等测量地轮转速间接测量。使用霍尔传感器、编码器的间接测量方式容易受田间地表起伏和机具作业时轮胎打滑的影响,降低测速精度。雷达测速对作业地况有一定要求,在田间杂物较多、地表起伏不平的复杂作业场景下,测速精度受到较大的影响。随着近年来 GNSS 传感器生产成本的降低、安装便捷性以及具有精度高的优势,在智能播种装备上的应用越来越多。丁友强等[108]设计了一种基于 GPS 测速的电驱动式玉米精密播种机控制系统;XIE 等[109]采用 GPS + BDS + SBAS + QZSS + GALILEO 联合定位方式,进一步提高玉米精密播种机前进速度的测量精度。

2.4.2 播种质量

播种质量主要包括播种量、合格率、漏播率以及实时播种粒距。播种质量监测系统通过将种子监测传感器以及整机速度传感器的信号实时传给控制器中,经信号采集判断算法将信号转化为作业质量数据并传输给监视器的人机交互界面中,当传感器识别到导种管堵塞或者缺种等故障时,控制器及时给报警装置发送信号,提醒管理人员及时处理。

在田间灰尘较多、机具作业振动大以及高速播种作业场景下,对种子进行准确及时的监测一直是诸多学者和公司热衷攻克的难题。按照检测原理不同,种子检测传感器分为光电式、压电式、电容式以

及微波式，如图 12 所示。

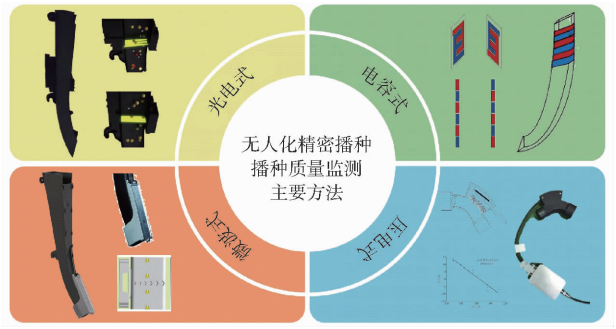


图 12　播种质量监测主要方法

Fig. 12　Main methods of seeding quality monitoring

光电式种子监测目前多采用红外光电式数字信号传感器，通常安装在导种管上部，通过接收由下落种子遮光量变化引起的电压变化而产生的高低电平信号，对播种量、合格率、漏播率以及实时播种粒距等参数进行计算[110-113]。但光电式种子监测方法的监测精度受灰尘影响较大，当长时间连续作业后，随着传感器上附着的灰尘逐渐积累，会出现灵敏度下降或失灵的情况[114]。具有代表性的研究成果有 DICKEY－John 公司的 Hy Rate Plus 种子监测传感器，能实现对从玉米等大粒种子到油菜籽等小粒种子的监测，最新版的 Hy Rate Plus 种子监测传感器的发射端集成了 10 个发光二极管，能有效区分种子与污垢、灰尘和碎屑，对重叠种子的识别能力进一步提升[115]。

电容式种子监测传感器利用种子下落过程中，经过电容极板间形成的检测场时，极板间介电常数变化引起电容量变化的原理进行检测[116]。由于电容在种子经过前后的变化量较低，因此需设计信号调理电路实现高精度检测。电容式种子监测方法具有可靠性高、抗灰尘污染能力强等优点，但在高速作业条件下的检测精度有待提高[117]。周利明等[118-119]设计了一款用于小麦播种机的电容式排种量传感器。整个排种量传感器由电容传感器、信号调理电路、通信接口和屏蔽机壳构成。装置采用一体化设计，电容传感器和调理电路均位于屏蔽机壳内，而屏蔽机壳罩在测量管道外面。使用时，传感器安装在播种单体排种口下方，试验表明，长时间作业后，测量管道内壁附着一层尘土，此时传感器基础电容（无种子通过时电容）由 4.240 5 pF 变为 4.257 0 pF，传感器基础电容漂移率仅为 0.39%，可见灰尘对电容传感器电容输出影响很小。

压电式种子检测传感器利用了种子下落碰撞压电或声电传感器，将声脉冲转化为电脉冲，通过测定两个脉冲之间的时间间隔来检测播种质量[120]。压电传感器本身具有极高的阻抗，输出能量较小，它的测量电路通常需要接入一个高输入阻抗的放大器，将压电传感器的高输出阻抗变换成低阻抗输出和放大传感器输出的微弱信号。压电传感器的主要缺陷是种子在与压电材料碰撞后可能会向上反弹，导致种子撞击材料并被多次计数。赵博等[121]为实现气流输送播种机播种质量的快速准确检测，设计了一种基于压电陶瓷的弧形阵列式播种流量传感器。当种子通过检测区时，撞击感知单元产生衰减振荡信号，经信号调理电路处理后输出脉冲信号，采集单元计数脉冲信号并通过 CAN 总线发送种子粒数信息。

微波式种子检测传感器通过微波雷达射频前端作为微波发射源对下落种子进行探测，具有抗灰尘污染能力强等优点。Precision Planting 公司开发了一种安装在导种管末端的微波式种子监测传感器，能有效防止灰尘对检测精度的影响，并采用碳化钨外壳进行封装，防止磨损[122]。中国农业大学解春季等[123-124]设计了一款安装在导种管底部的智能微波雷达传感器用于检测玉米播种质量，通过在传感器最终的信号输出之前加入微型处理器，以微小型单片机作为硬件支撑，并载入研究设计的 SOQ 信号识别判断算法和计算模型，进而可对信号进行处理，这样传感器不仅能够判断是否有种子经过，也可以对重叠种子进行识别，在保证单粒种子识别精度基础上，进一步提高对重叠种子监测精度。

2.5　路径规划技术

路径规划技术是无人化精密播种装备实现高质高效无人作业的关键技术之一。无人化精密播种路径规划需要综合考虑种植方式、田块情况与机具型号。目前国内外常用作业路径规划方式包括梭行作业路径、套作作业路径、绕行作业路径、开垄套行作业路径与闭垄套行作业路径[20]，如图 13 所示。

在无人化精密播种路径规划的转弯和掉头处的局部路径，是影响整机作业效率、作业衔接稳定性以及播种质量的关键作业环节。针对该环节，学者们展开了积极的探索。张闻宇等[125]设计了一种适用于 2BFQ－6 型油菜精量联合直播机组导航的双切圆寻线模型控制方法，将基本双切圆寻线路径分为 3 类，可有效解决套行自动转弯中两条直线快速稳定换线问题。张朝宇等[126]为减小油菜无人播种作业系统掉头产生的未作业区域面积，提高作业行切换对行精度，基于传统鱼尾掉头模型，提出一种两退三切鱼尾调头自动控制方法，并将该方法搭载在由 CaseTM1404 型拖拉机和 2BFQ－8 型油菜精量直播机构成的油菜无人播种作业系统进行试验，结果表明，两退三切鱼尾掉头模型相对于传统鱼尾掉头模

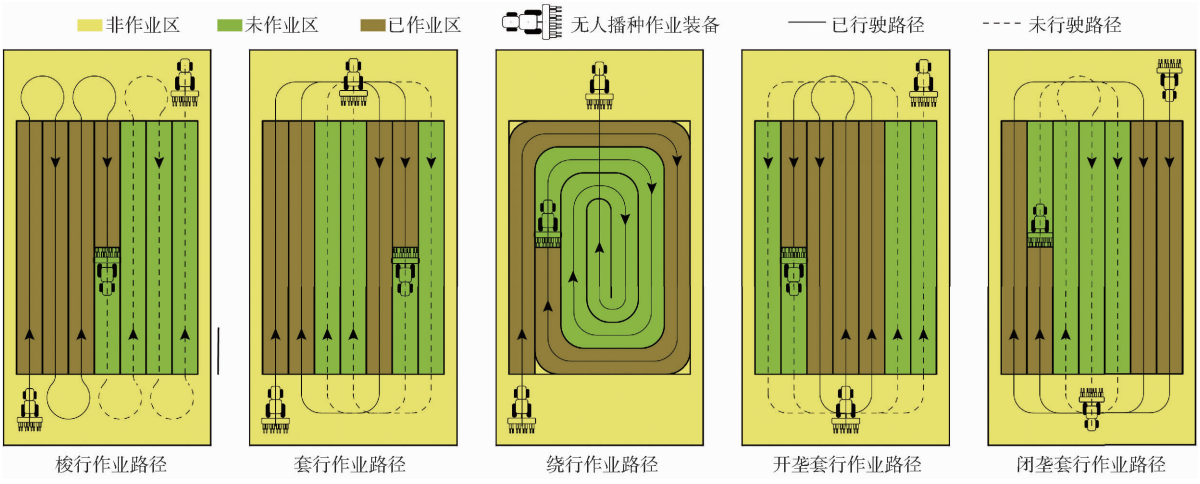


图 13 常用作业路径规划方式[20]

Fig. 13 Commonly used job path planning methods[20]

型田头预留长度减少 0.93 ~ 1.57 m,相对传统鱼尾掉头模型,田头未作业区域面积减少 14.62% ~ 22.43%。

在实际作业中,由于田块形状不规则,无人化精密播种装备的规划路径会不可避免地出现重复路径和转弯路径。因此,面向主要粮油作物无人化精密播种环节的路径规划,需在保障作业效率和田块利用率的前提下,系统考虑以下 3 个关键问题:重复路径下播种作业自动关停的精准播种区段控制;重复路径造成的土壤压实对出苗率的潜在影响;转弯路径下播种的补偿机制及对播种质量的影响。

重复路径下播种作业自动关停的精准播种区段控制可实现播种机具再次进入已作业区域时的自动关停。意大利 Maschio Gaspardo 公司[127]、德国 HORSCH 公司[128]、瑞典 Vaderstand 公司[129]等均拥有自主设计的区段控制系统。具体而言,精准播种区段控制指将单个播种单体划分为独立控制单元,结合高精度定位系统实时获取其位置信息,配合软硬件协同机制,完成播种状态的智能决策与快速响应,从而在作业单元进入已播区域时实现自动关停控制。该策略不仅可有效避免重复播种,降低农资浪费,还可提升作物的总体产量与经济效益。

即使在技术上能解决重复路径下精准播种区段控制,重复路径所引发的土壤压实问题仍不容忽视。相关研究表明,土壤压实通过影响土壤理化性质来影响作物根系的生长,从而影响地上部分的碳积累及分配,影响作物的氮吸收,最终影响作物的产量[130]。因此,在无人化播种路径规划中,应将减少重复路径对土壤压实的影响作为优化目标之一,以最大限度地保障作物出苗质量与后期生长条件。

转弯路径下的播种作业能减少对播种单体的启停控制次数,提高整机作业效率。播种机在转弯播种时,内外侧播种行速度不一致往往造成内侧播种密度过大、外侧播种密度过小的问题。随着播种机行数增加,宽幅增大,该问题尤为突出。转弯补偿技术通过测速元件获取播种机具上特定点的瞬时速度,基于建立平行于地面投影下特定点于各播种单体的速度关系模型,对转弯工况下各播种单体排种器进行独立控制,实现转弯路径下内外行播距一致的目的。需要注意的是,转弯补偿作业效果与机具转弯速度以及转弯半径有较大的影响[131]。因此在路径规划阶段,应将转弯速度、半径与播种均匀性的耦合关系作为综合优化的重要考量因素。

2.6 轨迹跟踪技术

在智能农机领域,轨迹跟踪控制技术需要实现无人驾驶智能农机装备的作业轨迹精准快速跟踪功能,达到高质高效的作业目标。由于作业环境的特殊性和作业轨迹的特定性,农机车的轨迹跟踪控制存在着不同于其他道路车的两个标志性挑战问题:如何应对田地松软及凹凸不平造成的各种系统不确定性影响轨迹精准快速跟踪问题;如何解决自主路径规划中包含直线和对应不同曲线的交替轨迹的精准快速跟踪控制问题[132]。

张朝宇[20]针对油菜无人播种作业过程中,转弯掉头段需要减速,直线播种作业段需要提速的特点,提出一种模糊自适应纯追踪控制算法,并且分别针对履带式和轮式油菜无人播种装备搭建直线导航控制器系统,如图 14 所示,根据实际作业情况,分别确定基本论域和模糊控制规则。最终田间试验结果表明,模糊自适应纯追踪控制器较纯追踪控制器在速度为 0.5、0.8、1.2 m/s 下最大横向偏差导航精度分别提高了 28.2%、35.4%、39.7%,平均绝对偏差导航精度分别提高了 25.7%、34.1%、39.6%。

近年来,除了模糊自适应控制外,模型预测控制

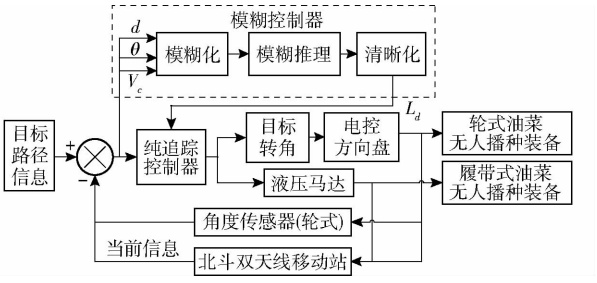


图 14　油菜无人播种装备直线导航控制器系统结构图

Fig. 14　Structure of linear navigation controller system for unmanned seeding equipment for oilseed rape

和滑模控制被较多地运用在智能农机装备的轨迹跟踪中[133-147]。

在无人化精密播种装备的田间作业过程中，复杂多变的农田环境显著影响轨迹跟踪控制的稳定性与可靠性。一方面，地形起伏、土壤湿度变化、残茬干扰以及附着力波动等外部因素极易引发车辆运动状态的非线性扰动，表现为轮胎打滑、姿态偏移和控制延迟等问题，削弱了轨迹跟踪系统的稳态精度与动态响应性能。另一方面，作业装备自身的控制系统存在迟滞特性与响应不一致性，进一步放大了外部扰动对精密播种作业的影响，可能导致播种路径与预设规划轨迹发生偏离，影响播种株距和行距的一致性。为提升轨迹控制系统的鲁棒性与适应性，有必要在研究中构建车辆-土壤耦合动力学模型，系统刻画轮胎-土壤接触特性、打滑行为及其对车体姿态的耦合影响机制。该模型应综合考虑地表物理参数（如黏聚力、内摩擦角、含水率）与装备行驶状态（如车速、转向角、负载分布）之间的耦合关系，为控制策略提供物理层面的严谨支撑。在此基础上，为实现高精度、高鲁棒性的轨迹跟踪目标，应进一步构建路径跟踪控制与播种执行控制的联合调控框架。可通过模型预测控制（Model predictive control，MPC）或多输入多输出控制策略（MIMO）实现播种装备行驶轨迹与排种器启停状态的动态协同调度，确保作业过程中路径误差与播种偏差同步最小化。此外，系统需具备对环境扰动与车辆响应滞后进行实时感知与自适应补偿的能力，从而提升整体播种作业的精准性与稳定性。

3　问题分析与展望

3.1　问题分析

当前，主要粮油作物的无人化精密播种技术已基本突破“能否实现无人化”的初级阶段，正迈入“如何实现高精度作业”与“如何确保可持续发展”并重的深层次发展阶段。系统梳理现有技术体系，主要存在以下关键问题：

（1）高速作业与高精度排种之间技术矛盾突出

无人化播种在追求高作业效率的同时，往往伴随着播种株距与播深精度的明显下降。现阶段对种子运动轨迹及其与气流-离心力耦合机制的研究尚不充分，高速流场下的耦合播种基础理论亦较为薄弱。与此同时，下压力的自动调节系统与微量施肥执行机构在高频响应中普遍存在迟滞问题，电控复合播种装置仍依赖人工干预完成部分关键操作。此外，关键零部件如种子运移机构、电机及比例阀等的国产化替代进程亟待推进。由于小粒径种子播种过程中漏播与重播现象频发，农户对无人化播种的信任度与接受度较低，严重制约了该技术在实际生产中的推广与应用。

（2）高精度自主导航系统鲁棒性不足

在丘陵地形、林网交错及小型不规则地块等复杂作业环境中，农机实现厘米级精准定位仍存在较大困难，其核心瓶颈在于缺乏统一的车辆-土壤耦合动力学模型及轮胎滑移与地块几何特征融合的物理机制建模，导致导航算法在物理约束层面缺乏支撑。虽然部分国产北斗芯片（如 UM982）已具备单系统厘米级定位能力，并通过“芯 + 云”架构逐步降低对国外方案的依赖，但惯性导航器件（IMU）与高精度 RTK 基带芯片仍大量依赖进口。在我国广泛存在的小规模、碎片化地块格局下，路径规划与远程接管任务的复杂度显著上升，进而抬高了系统实施成本，限制了无人播种系统的规模化部署。

（3）多源传感器环境适应性差与成本约束显著

在高尘土、高湿度和复杂残茬等农田真实环境中，多波段视觉、电磁-光谱类传感器面临感知精度下降、稳定性不足等挑战。传感器在振动、污染等条件下易失效，无法准确监测种子下落状态；同时，农业传感数据缺乏统一标准，导致播种作业数据难以实现闭环利用。土壤类传感器在跨区域、跨类型应用中迁移能力不足，高性能播深、下压力、有机质检测等核心传感器仍依赖进口，价格高昂且运维成本较高。在国产化率尚未提升及核心部件尚未规模化量产的背景下，农户面临“高成本、难维护”的使用困境。

（4）装备轻量化与续航能力之间结构性冲突

轻量化设计是适配小型地块作业、降低土壤压实风险的核心方向，但在当前绿色能源替代趋势推动下，受限于电池技术，轻量化与续航能力存在显著矛盾。提升电池容量以延长续航时间会反向导致装备自重增加，加剧对土壤的压实影响。此外，土壤压实阈值与车辆接地比压之间的理论模型仍不完备，当前主流的纯电或混动平台续航时间有限，难以支

撑高强度全天候作业。快速换电与太阳能补能尚受限于功率密度与基础设施条件,尤其在农村地区,配套的电力基础设施与服务网络尚不健全,迫使农机制造企业通过租赁、托管等服务化路径分摊成本,延长投资回报周期,降低推广效率。

(5)系统集成能力弱与标准化生态体系缺失

当前,无人化精密播种系统缺乏统一的作业-感知-决策系统集成架构,不同厂家间控制器、传感器通信协议及接口标准不兼容,形成典型的"数据孤岛"现象。虽然 ISOBUS 等通用协议已在部分领域应用,但总体推广有限,核心部件与总线控制芯片国产化率较低。平台间作业数据难以互联互通,监测系统与农艺决策平台之间缺乏有效集成,导致生态碎片化严重,显著抬高系统集成与维护成本,削弱了政策补贴对产业升级的引导效力,阻碍了无人化精密播种技术的规模化应用与产业升级。

3.2 展望

面向未来,无人化精密播种技术的发展将围绕关键技术的协同突破与系统层面的集成创新展开,主要呈现以下 4 项趋势:

(1)模块化智能单元体系化构建

"模块化"作为打破生产协作边界、提升产品标准化程度与快速量产能力的重要策略,将成为下一代播种装备设计的核心理念。随着开放接口与标准化协议(如 Ag - API)的逐步完善,播种系统将逐步转向以"智能单元"为基础的解耦协同架构,不再依赖单一企业闭环设计全流程机具。未来的播种装备将以统一的语义总线进行互联,实现种箱、变量施肥器、排种器、感知终端等模块的即插即用。在国家主导的数据基础设施建设支持下,田块、土壤与品种等公共数据将服务于全行业系统集成,推动形成硬件创新与数据标准协同发展的产业生态。

(2)"土壤-种子-环境"一体化边缘感知与闭环控制

受益于国家在半导体产业的持续投入,具备良好环境适应性的高性价比传感芯片将成为播种装备的重要组成。下一代播种单元可通过硅光集成芯片实现对土壤质地、含水率、温度及播深的实时感知,并与排种机构形成局部闭环控制,完成无需高带宽支持的边缘计算与即时调控,有望显著提升系统的鲁棒性与播种作业精度。

(3)基于数字孪生的智能播种决策系统

伴随《全国智慧农业行动计划(2024—2028 年)》等政策文件的落地,农业基础数据与感知体系日趋完备。结合贝叶斯优化等智能算法,可构建融合田间地理信息、高分辨率土壤数据、作物生理模型 + 多机智能协同的数字孪生播种平台。系统可根据实地感知动态生成变量播种处方,实现按株精度的播种策略,使播种决策从经验驱动转向数据驱动,并通过作业反馈到云端数据后持续优化模型,实现播种全周期的数据闭环驱动。

(4)可持续材料与多能源微驱动助力作业性能优化

近年来全球范围内新能源车和人形机器人产业驱动的技术进步,促进了新型可持续轻质材料(如铝镁合金蜂窝结构、碳纤维复合壳体)与高能量密度固态电池的融合应用,可显著改善自重与能效比。结合下一代高能量密度固态电池与光电协同的微能源管理系统,可在不依赖大型能源基础设施的前提下,实现全天候稳定作业。同时,这些技术的推广将进一步缓解装备压实与续航之间的结构性矛盾,推动无人播种装备向高效、绿色与低碳方向演进。

综上所述,无人化精密播种技术正从"设备智能"迈向"系统智能"的演化阶段,其发展路径已不再局限于单点突破或功能模块优化,而是在农艺要求、数据驱动、感知智能、生态开放与材料创新的协同推进下,走向以开放平台、智能协同与绿色低碳为核心的技术生态体系。当高速电控排种、实时感知与数字孪生决策模型充分融合,开放生态与可持续材料体系全面落地之际,农业播种环节将实现从"机械化"向真正意义上的"智能化"全面飞跃。

参 考 文 献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2024[EB/OL]. [2025 - 06 - 20]. https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2024/indexch.htm.

[2] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. 智慧农业(中英文),2019,1(1):1 - 7.
ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectivs of smart agriculture[J]. Smart Agriculture,2019,1(1):1 - 7. (in Chinese)

[3] 罗锡文,廖娟,臧英,等. 我国农业生产的发展方向:从机械化到智慧化[J]. 中国工程科学,2022,24(1):46 - 54.
LUO Xiwen, LIAO Juan, ZANG Ying, et al. Developing from mechanized to smart agricultural production in China[J]. Strategic Study of CAE,2022,24(1):46 - 54. (in Chinese)

[4] 赵春江,范贝贝,李瑾,等. 农业机器人技术进展、挑战与趋势[J]. 智慧农业(中英文),2023,5(4):1 - 15.
ZHAO Chunjiang, FAN Beibei, LI Jin, et al. Agricultural robots: technology progress, challenges and trends[J]. Smart Agriculture, 2023, 5(4): 1 - 15. (in Chinese)

[5] 杨丽,颜丙新,张东兴,等.玉米精密播种技术研究进展[J].农业机械学报,2016,47(11):38-48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(11):38-48. (in Chinese)
[6] 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 and practice of unmanned farm in China[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(1): 1-16. (in Chinese)
[7] 丁晨.无人驾驶轮式农机的高阶滑模路径跟踪控制策略研究[D].镇江:江苏大学,2024.
DING Chen. Research on high-order sliding mode path tracking control strategies for unmanned wheeled agricultural machines[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2024. (in Chinese)
[8] 关群.凯斯纽荷兰工业集团推出无人驾驶概念拖拉机[J].农业机械,2016(9):40-43.
[9] 沈跃,张亚飞,刘慧,等.农业装备自动控制技术研究综述[J].农业机械学报,2023,54(8):1-18.
SHEN Yue, ZHANG Yafei, LIU Hui, et al. Research review of agricultural equipment automatic control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(8):1-18. (in Chinese)
[10] HORSCH pushes different aspects of autonomous driving systems[EB/OL]. [2025-06-20]. https://terra.horsch.com/en/issue-22-2021/company-insights/horsch-pushes-different-aspects-of-autonomous-driving-systems-michael-and-philipp-horsch.
[11] Brand-new model of AGROINTELLI's robot[EB/OL]. [2025-06-20]. https://agrointelli.com/new-robot.
[12] Latest generation of seed sowing robots: the Fendt Xaver comes of age[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.fendt.com/int/2-fendt-xaver.
[13] Amos fully electric agriculture robot to perform tractor activities[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.ducksize.com/amos-electric-agriculture-robot.
[14] Oz: the farming assistant for time-consuming and arduous tasks[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.naio-technologies.com/oz/.
[15] Farmdroid FD20: fully automatic farming robot-a farming revolution[EB/OL]. [2025-06-20]. https://farmdroid.com/products/farmdroid-fd20/.
[16] AgBot 5.115T2[EB/OL]. [2025-06-20]. https://www.agxeed.com/our-solutions/agbot-5-115t2.
[17] VP4: autonomous machines and seed and fertilizer applications in NOcsPS cropping systems[EB/OL]. [2025-06-20]. https://nocsps.uni-hohenheim.de/vp4-robotergesttzte-landwirtschaft#jfmulticontent_c516510-3.
[18] 张攀博.厉害了“东方红”无人驾驶拖拉机首次演示田间播种作业[J].当代农机,2018(10):22.
[19] 岳雯雯.雷沃阿波斯自动驾驶农机开启“三夏”“无人”模式[J].农业机械,2019(7):58-59.
[20] 张朝宇.油菜无人播种作业控制系统关键技术研究与试验[D].武汉:华中农业大学,2023.
ZHANG Chaoyu. Research and experiment on key technology of control system for unmanned seeding operation of rape seed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2023. (in Chinese)
[21] 张朝宇,董万静,熊子庆,等.履带式油菜播种机模糊自适应纯追踪控制器设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(12):105-114.
ZHANG Chaoyu, DONG Wanjing, XIONG Ziqing, et al. Design and experiment of fuzzy adaptive pure pursuit control of crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(12):105-114. (in Chinese)
[22] 卢邦.基于云平台的油菜无人播种作业系统设计与试验[D].武汉:华中农业大学,2024.
LU Bang. Design and experiment of rapeseed unmanned seeding system based on cloud platform[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2024. (in Chinese)
[23] 卢邦,董万静,丁幼春,等.基于云-端高精度地图的油菜无人播种作业系统设计与试验[J].智慧农业(中英文),2023,5(4):33-44.
LU Bang, DONG Wanjing, DING Youchun, et al. An rapeseed unmanned seeding system based on cloud-terminal high precision maps[J]. Smart Agriculture,2023,5(4):33-44 (in Chinese)
[24] 王登辉.油菜直播机组无人播种作业远程监测系统设计与试验[D].武汉:华中农业大学,2023.
WANG Denghui. Design and experiment of remote monitoring system for unmanned seeding operation of rapeseed direct seeding unit[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2023. (in Chinese)
[25] 王登辉,卢邦,李强,等.油菜直播机组无人播种作业远程监测系统设计[J].华中农业大学学报,2023,42(3):260-270.
WANG Denghui, LU Bang, LI Qiang, et al. Remote monitoring system for unmanned sowing operation of rapeseed direct seeding[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2023,42(3):260-270. (in Chinese)
[26] 高鹏宇.油菜无人播种测控管云平台设计与试验[D].武汉:华中农业大学,2022.
GAO Pengyu. Design and experiment of rapeseed unmanned seeding monitoring-control-management cloud[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2022. (in Chinese)
[27] 王泉玉,何进,卢彩云,等.前后双驱双转向玉米播种机器人底盘设计与试验[J].农业工程学报,2025,41(4):10-20.
WANG Quanyu, HE Jin, LU Caiyun, et al. Design and experiment of the maize sowing robot chassis with front and rear dual drive and dual steering[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(4): 10-20. (in Chinese)

[28] 李珊珊,吴正开,王家忠,等. 基于玉米播种的无人驾驶电动拖拉机设计试验[J]. 农机化研究,2025,47(3):247 - 253.
LI Shanshan, WU Zhengkai, WANG Jiazhong, et al. Design test of an unmanned electric tractor based on corn seeding[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2025,47(3):247 - 253. (in Chinese)

[29] 詹文轩,王家忠,弋景刚,等. 基于无人驾驶的小麦密行精密播种机组的设计与试验[J]. 河北农业大学学报,2022,45(1):115 - 120.
ZHAN Wenxuan, WANG Jiazhong, YI Jinggang, et al. Design and test of driverless electric tractor implement combination for wheat precision seeding[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2022, 45(1): 115 - 120. (in Chinese)

[30] 詹文轩. 无人驾驶小麦密植播种机组的设计与试验[D]. 保定:河北农业大学,2022.
ZHAN Wenxuan. Design and experiment of unmanned wheat dense seeding unit[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[31] 吴正开,王家忠,邢雅周,等. 基于无人驾驶电动拖拉机的自适应跟踪算法研究[J]. 中国农机化学报,2023,44(11):176 - 183.
WU Zhengkai, WANG Jiazhong, XING Yazhou, et al. Research on adaptive tracking algorithm based on driverless electric tractor[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(11): 176 - 183. (in Chinese)

[32] 吴正开. 增程式无人驾驶拖拉机播种机组动力优化和能量管理策略[D]. 保定:河北农业大学,2024.
WU Zhengkai. Dynamic optimization and energy management strategy of seeding unit of extended range unmanned tractor[D]. Baoding: Hebei Agricultural University,2024. (in Chinese)

[33] WU Zhengkai, WANG Jiazhong, XING Yazhou, et al. Energy management of sowing unit for extended-range electric tractor based on improved CD - CS fuzzy rules[J]. Agriculture,2023,13(7):1303.

[34] 孟志军,王昊,付卫强,等. 农业装备自动驾驶技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2023,54(10):1 - 24.
MENG Zhijun, WANG Hao, FU Weiqiang, et al. Research status and prospects of agricultural machinery autonomous driving[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(10):1 - 24. (in Chinese)

[35] LI Yang, LI Mao, QI Jiangtao, et al. Detection of typical obstacles in orchards based on deep convolutional neural network[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 181: 105932.

[36] JIANG Wuhua, CHEN Wuwei, SONG Chuanzheng, et al. Obstacle detection and tracking for intelligent agricultural machinery[J]. Computers and Electrical Engineering, 2023, 108: 108670.

[37] ABDU F J, ZHANG Yixiong, FU Maozhong, et al. Application of deep learning on millimeter-wave radar signals: a review[J]. Sensors, 2021, 21(6): 1951.

[38] 贾闯,李加念,洪添胜,等. 山地果园单轨运输机超声波避障系统的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(增刊2):69 - 74.
JIA Chuang, LI Jianian, HONG Tiansheng, et al. Design and test of ultrasonic obstacle avoidance system for mountain orchard monorail conveyor[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.2): 69 - 74. (in Chinese)

[39] 肖坚星,王天海,王宁,等. 农业机器人障碍物检测与避障技术研究进展[J]. 农业工程学报,2025,41(8):421 - 436.
XIAO Jianxing, WANG Tianhai, WANG Ning, et al. Research progress of obstacle detection and obstacle avoidance technology for agricultural robots[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(8): 421 - 436. (in Chinese)

[40] 汪懋华. “精细农业”的实践与农业科技创新[J]. 中国软科学,1999(4):22 - 26.

[41] 汪懋华. “精细农业”发展与工程技术创新[J]. 农业工程学报,1999,15(1):1 - 8.
WANG Maohua. Development of precision agriculture and innovation of engineering technologies[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(1): 1 - 8. (in Chinese)

[42] ZHANG Naiqian, WANG Maohua, WANG Ning. Precision agriculture—a worldwide overview[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2002,36(2):113 - 132.

[43] SUN Jialu, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Development of a prediction model to determine optimal sowing depth to improve maize seedling performance[J]. Biosystems Engineering, 2023, 234: 206 - 222.

[44] 杜兆辉,和贤桃,杨丽,等. 玉米精准变量播种技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报,2023,39(9):1 - 16.
DU Zhaohui, HE Xiantao, YANG Li, et al. Research progress on precision variable-rate seeding technology and equipment for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(9): 1 - 16. (in Chinese)

[45] KWEON G, MAXTON C. Soil organic matter sensing with an on-the-go optical sensor[J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(1): 66 - 81.

[46] MOUAZEN A M, KUANG B. On-line visible and near infrared spectroscopy for in-field phosphorous management[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 471 - 477.

[47] Precision Planting. SmartFirmer[EB/OL]. [2024 - 03 - 21]. https://www.precisionplanting.com/products/product/smartfirmer.

[48] CONWAY L S, SUDDUTH K A, KITCHEN N R, et al. Repeatability of commercially available visible and near infrared proximal soil sensors[J]. Precision Agriculture, 2023, 24(3): 1014 - 1029.

[49] Veris Technologies. Veris opticMapper-dual-wavelength optical sensor[EB/OL]. [2025 - 06 - 15]. https://www.environmental- expert.com/products/veris-opticmapper-dual-wavelength-optical-sensor-601563.

[50] KHANAL S, FULTON J, KLOPFENSTEIN A, et al. Integration of high resolution remotely sensed data and machine learning

techniques for spatial prediction of soil properties and corn yield[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 153: 213 – 225.

[51] 刘焕军,潘越,窦欣,等.黑土区田块尺度土壤有机质含量遥感反演模型[J].农业工程学报,2018,34(1):127 – 133.
LIU Huanjun, PAN Yue, DOU Xin, et al. Soil organic matter content inversion model with remote sensing image in field scale of blacksoil area[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 127 – 133. (in Chinese)

[52] 杨越超,赵英俊,秦凯,等.黑土养分含量的航空高光谱遥感预测[J].农业工程学报,2019,35(20):94 – 101.
YANG Yuechao, ZHAO Yingjun, QIN Kai, et al. Prediction of black soil nutrient content based on airborne hyperspectral remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(20): 94 – 101. (in Chinese)

[53] 胡婕.基于多源遥感的干旱地区土壤盐分反演研究[D].杭州:浙江大学,2019.
HU Jie. Estimation of soil salinity in arid area based on multi-source remote sensing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)

[54] 唐汉.波纹曲面指夹式玉米精量排种器设计及其机理研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2018.
TANG Han. Design and mechanism analysis of ripple surface pickup finger maize precision seed metering device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2018. (in Chinese)

[55] 李川.离心充种–清种玉米高速精量排种技术及装置研究[D].北京:中国农业大学,2025.
LI Chuan. Research on centrifugal filling and cleaning mechanism for high-speed precision maize seed metering technology and device[D]. Beijing: China Agricultural University,2025. (in Chinese)

[56] 孙文胜,衣淑娟,齐海龙,等.双盘交错气压式玉米品字形密植高速精量排种器研究[J].农业机械学报,2024,55(10):168 – 179.
SUN Wensheng, YI Shujuan, QI Hailong, et al. Design and experiment of twin discs intertwined air-pressure high-speed precision seed-metering device for maize delta-row dense plantings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(10):168 – 179. (in Chinese)

[57] 陈旭辉.大豆高速精量播种机斜充控种式排种器设计与研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2024.
CHEN Xuhui. Design and research of gradient feeding and control-seed metering device for soybean high-speed precision seeder [D]. Yangling: Northwest A&F University,2024. (in Chinese)

[58] 陈玉龙.气吸机械复合式大豆高速精密排种器研究[D].长春:吉林大学,2018.
CHEN Yulong. Research of air-suction mechanical combined soybean high-speed and precision seed metering device[D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)

[59] AIRVAC AND AIRSPEED METERING DEVICES-Horsch Australia[EB/OL]. [2025 – 07 – 20]. https://horschaustralia.com.au/airvac-and-airspeed-metering-devices/.

[60] Maestro SV/SX-Maestro-Planting | HORSCH[EB/OL]. [2025 – 07 – 20]. https://www.horsch.com/en/products/planting/maestro/maestro-sv-sx.

[61] 廖庆喜,沈文惠,王磊,等.油菜高速机械离心式集排器设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(7):154 – 167.
LIAO Qingxi, SHEN Wenhui, WANG Lei, et al. Design and experiment of high-speed mechanical centrifugal centralized seed metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(7):154 – 167. (in Chinese)

[62] 刘嘉诚.正负气压组合油菜精密播种机设计与试验[D].武汉:华中农业大学,2024.
LIU Jiacheng. Design and experiment of positive and negative pressure combined precision seeder for rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2024. (in Chinese)

[63] YU Jiajia, LIAO Yitao, CONG Jinling, et al. Simulation analysis and match experiment on negative and positive pressures of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(3): 1 – 12.

[64] 赵金,郑超,张晋国,等.差速充种沟式小麦单粒排种器优化设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(12):65 – 74.
ZHAO Jin, ZHENG Chao, ZHANG Jinguo, et al. Parameter optimization and experiment of differential filling groove single grain seed-metering device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(12):65 – 74. (in Chinese)

[65] 王磊.油麦兼用型宽幅高速气送式播种机关键部件设计与试验[D].武汉:华中农业大学,2021.
WANG Lei. Design and experiment on broad width and high speed air-assisted planter for rapeseed and wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2021. (in Chinese)

[66] 和贤桃,齐浩君,张东兴,等.丘坡地水平圆盘式玉米精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(1):151 – 163.
HE Xiantao, QI Haojun, ZHANG Dongxing, et al. Design and test of horizontal disc maize precision seed metering device on hilly land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(1):151 – 163. (in Chinese)

[67] 谢建华,张洪梁,冯浩,等.摩擦调节式小区小麦精密排种器设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(1):164 – 173.
XIE Jianhua, ZHANG Hongliang, FENG Hao, et al. Design and experiment of friction adjustable precision seed feeder device for wheat experimental sowing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(1):164 – 173. (in Chinese)

[68] 李汉青,颜丙新,武广伟,等. 双轨道弹射式水稻精量直播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2):60 - 72.
LI Hanqing, YAN Bingxin, WU Guangwei, et al. Design and experiment of double-track ejection rice precision direct seeding metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(2):60 - 72. (in Chinese)

[69] 李玉环,赵烁,杨丽,等. 独立分充式大豆双排毛刷高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(6):101 - 110.
LI Yuhuan, ZHAO Shuo, YANG Li, et al. Design and test of high-speed precision seeder of independent fractionated soybean double-row brush[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(6):101 - 110. (in Chinese)

[70] 赵鹏飞,邓敏,王孟盛, 等. 气力斜盘式小麦宽苗带匀播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(7):38 - 47.
ZHAO Pengfei, DENG Min, WANG Mengsheng, et al. Design and experiment of pneumatic swash plate wheat wide-seedling-belt uniform sowing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(7):38 - 47. (in Chinese)

[71] 罗海峰,刘光辉,吴明亮, 等. 外凸扰种仿形型孔气吸式水稻芽种精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(3):227 - 239.
LUO Haifeng, LIU Guanghui, WU Mingliang, et al. Design and experiment of precision seed metering device for rice bud seed with protruding disturbing species[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(3):227 - 239. (in Chinese)

[72] 唐汉,王紫恒,徐福东, 等. 玉米高速精量排种器轮式导种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(7):316 - 327.
TANG Han, WANG Ziheng, XU Fudong, et al. Design and test of wheel-type seed guide device for high-speed maize precision seed metering apparatus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(7):316 - 327. (in Chinese)

[73] 王韦韦,宋岚洲,石文兵, 等. 气吸双行错置式玉米密植精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(3):53 - 63.
WANG Weiwei, SONG Lanzhou, SHI Wenbing, et al. Design and experiment of air-suction double-row staggered precision seed metering device for maize dense planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(3):53 - 63. (in Chinese)

[74] 郑娟,赖虹宇,李甜, 等. 小麦宽苗带气吸式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 1):165 - 176,335.
ZHENG Juan, LAI Hongyu, LI Tian, et al. Design and test of precision seed metering device for wheat wide seedling belt with air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp. 1):165 - 176,335. (in Chinese)

[75] 何彬. 气吸式大豆/玉米密植精量排种器的设计与试验[D]. 雅安:四川农业大学,2023.
HE Bin. Design and testing of an air-suction precision seed-metering device for dense planting of soybeans and corn[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University,2023. (in Chinese)

[76] 梁玉玥. 稻麦旱作兼用气吹式精量排种器设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
LIANG Yuyue. Design and experiment of air blowing precision seed-metering device for both rice and wheat under dry cultivation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2022. (in Chinese)

[77] ZUO Qing, KUAI Jie, ZHAO Li, et al. The effect of sowing depth and soil compaction on the growth and yield of rapeseed in rice straw returning field[J]. Field Crops Research, 2017, 203: 47 - 54.

[78] 夏晓蒙. 高速免耕精密播种机清秸装置及播深控制技术研究[D]. 长春:吉林大学,2024.
XIA Xiaomeng. Research on row cleaning mechanism and sowing depth control technology[D]. Changchun: Jilin University, 2024. (in Chinese)

[79] NIELSEN S K, NØRREMARK M, GREEN O. Sensor and control for consistent seed drill coulter depth[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 690 - 698.

[80] NIELSEN S K, MUNKHOLM L J, LAMANDÉ M, et al. Seed drill depth control system for precision seeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 174 - 180.

[81] 赵金辉,刘立晶,杨学军,等. 播种机开沟深度控制系统的设计与室内试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):35 - 41.
ZHAO Jinhui, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and laboratory test of control system for depth of furrow opening[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 35 - 41. (in Chinese)

[82] AirForce. Planter-wide or two-section automated downforce control[EB/OL]. [2025 - 06 - 20]. https://www.precisionplanting.com/products/planters/airforce.

[83] DeltaForce. Automated downforce control[EB/OL]. [2025 - 06 - 20]. https://www.precisionplanting.com/products/planters/deltaforce.

[84] 黄东岩,朱龙图,贾洪雷,等. 基于压电薄膜的免耕播种机播种深度控制系统[J]. 农业机械学报,2015,46(4):1 - 8.
HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(4):1 - 8. (in Chinese)

[85] ZHAO Jiale, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic depth control system for a no-till seeder[J]. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2018, 11(1):115 - 121.

[86] 贾洪雷,朱龙图,黄东岩,等. 基于 Flex 传感器的免耕播种机播深自动控制系统[J]. 吉林大学学报(工学版),2019,

49(1):166 – 175.
JIA Honglei, ZHU Longtu, HUANG Dongyan, et al. Automatic control system of sowing depth for no-tillage planter based on Flex sensor[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2019, 49(1): 166 – 175. (in Chinese)
[87] 高原源,翟长远,杨硕,等.播种单体对地下压力测量方法和数学模型[J].农业工程学报,2020,36(5):1 – 9.
GAO Yuanyuan, ZHAI Changyuan, YANG Shuo, et al. Measurement method and mathematical model for the seeding downforce of planter row unit[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 1 – 9. (in Chinese)
[88] LI Mingwei, XIA Xiaomeng, ZHU Longtu, et al. Intelligent sowing depth regulation system based on Flex sensor and Mamdani fuzzy model for a no-till planter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(6): 145 – 152.
[89] 付卫强.玉米免耕精密播种质量控制关键技术研究[D].北京:中国农业大学,2019.
FU Weiqiang. Study on key technology of quality control for maize no-tillage drilling machinery[D]. Beijing: China Agricultural University,2019. (in Chinese)
[90] 付卫强,董建军,梅鹤波,等.玉米播种单体下压力控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(6):68 – 77.
FU Weiqiang, DONG Jianjun, MEI Hebo, et al. Design and test of maize seeding unit downforce control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):68 – 77. (in Chinese)
[91] 高原源,王秀,杨硕,等.播种机气动式下压力控制系统设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(7):19 – 29,83.
GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Design and test of pneumatic downforce control system for planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):19 – 29, 83. (in Chinese)
[92] 曹鑫鹏,王晨,彭晨,等.气动式播种下压力调节装置优化设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(5):257 – 267.
CAO Xinpeng, WANG Chen, PENG Chen, et al. Optimization design and experiment of pneumatic seeding downforce regulating device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(5):257 – 267. (in Chinese)
[93] BAHRI A. Modulating wheat seeding rate for site specific crop management[M]. Lincoln: The University of Nebraska-Lincoln, 1995.
[94] 和贤桃.处方图式变量播种控制系统研究与试验[D].北京:中国农业大学,2018.
HE Xiantao. Research and experiment on map-based control system of variable rate seeding[D]. Beijing: China Agricultural University,2018. (in Chinese)
[95] LICHT M A, LENSSEN A W, ELMORE R W. Corn (*Zea mays* L.) seeding rate optimization in Iowa, USA[J]. Precision Agriculture, 2017, 18(4): 452 – 469.
[96] Build Prescriptions. Find the ideal rate in minutes[EB/OL]. [2025 – 06 – 18]. https://climate.com/en-us/solutions/build-prescriptions.html.
[97] Partners. Partnering with FieldView™[EB/OL]. [2025 – 06 – 18]. https://climate.com/en-us/partners.html.
[98] 张晓龙.耕层深度与种植密度对玉米产量形成的调控[D].长春:吉林农业大学,2024.
ZHANG Xiaolong. Regulation of maize grain yield formation by tillage layer depth and planting density[D]. Changchun: Jilin Agricultural University,2024. (in Chinese)
[99] 杨云山.光辐射对玉米产量及其生长发育的影响[D].石河子:石河子大学,2023.
YANG Yunshan. Effectof solar radiation on the yield and growth of maize(*Zea mays* L.)[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023. (in Chinese)
[100] 郑静.农田覆盖、种植密度和施氮对夏玉米水氮利用影响机理及其增产减排效应研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
ZHENG Jing. Effects of mulching, plant density and nitrogen on grain yield, water and nitrogen use efficiency, and greenhouse gas emissions of rainfed summer maize in Northwest China[D]. Yangling: Northwest A&F University,2021. (in Chinese)
[101] 杜兆辉. 基于土壤有机质的玉米播量决策与精准变量播种控制系统研究[D].北京:中国农业大学,2024.
DU Zhaohui. Research on maize seeding rate decision-making based on soil organic matter and precision variable-rate seeding control system[D]. Beijing: China Agricultural University,2024. (in Chinese)
[102] HE Xiantao, DING Youqiang, ZHANG Dongxing, et al. Development of a variable-rate seeding control system for corn planters Part I: design and laboratory experiment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 318 – 327.
[103] HE Xiantao, DING Youqiang, ZHANG Dongxing, et al. Development of a variable-rate seeding control system for corn planters Part Ⅱ: field performance[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 309 – 317.
[104] DU Zhaohui, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Optimizing maize planting density based on soil organic matter to achieve synergistic improvements of yield, economic benefits, and resource use efficiency[J]. Science of the Total Environment, 2024, 906: 167597.
[105] DU Zhaohui, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of a soil organic matter sensor-based variable-rate seeding control system for maize[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 229: 109752.
[106] DU Zhaohui YANG Li, ZHANG Dongxing. Corn variable-rate seeding decision based on gradient boosting decision tree model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107025.
[107] DU Zhaohui, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Development and testing of a motor drive and control unit based on the

field-oriented control algorithm for the seed-metering device[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 108024.

[108] 丁友强,杨丽,张东兴,等. 基于 GPS 测速的电驱式玉米精量播种机控制系统[J]. 农业机械学报,2018,49(8):42 - 49.
DING Youqiang, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Control system of motor-driving maize precision planter based on GPS speed measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(8):42 - 49. (in Chinese)

[109] XIE Chunji, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Research and analysis on the influence of different speed measurement methods on the monitoring accuracy of seed spacing[J]. Agriculture, 2023, 13(1): 128.

[110] KARIMI H, NAVID H, BESHARATI B, et al. A practical approach to comparative design of non-contact sensing techniques for seed flow rate detection[J]. Computers and electronics in agriculture, 2017, 142: 165 - 172.

[111] LIU Wei, HU Jianping, ZHAO Xingsheng, et al. Development and experimental analysis of an intelligent sensor for monitoring seed flow rate based on a seed flow reconstruction technique[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 164: 104899.

[112] LIU Wei, HU Jianping, ZHAO Xingsehng, et al. Development and experimental analysis of a seeding quantity sensor for the precision seeding of small seeds[J]. Sensors, 2019, 19(23): 5191.

[113] 杨硕,王秀,高原源,等. 玉米精密播种粒距在线监测与漏播预警系统研究[J]. 农业机械学报,2021,52(3):17 - 24, 35.
YANG Shuo, WANG Xiu, GAO Yuanyuan, et al. Design of on-line seed spacing monitoring and miss seeding warning system for maize precision planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(3):17 - 24, 35. (in Chinese)

[114] 孙永佳,沈景新,窦青青,等. 基于 Cortex - M3 的免耕播种机监控系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(8):50 - 58.
SUN Yongjia, SHEN Jingxin, DOU Qingqing, et al. Design and test of monitoring system of no-tillage planter based on Cortex - M3 processor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 50 - 58. (in Chinese)

[115] All seed types planter sensor[EB/OL]. [2025 - 06 - 20]. https://dickey-john.com/products/sensors/population-sensors/hy-rate-plus-seed-sensor/.

[116] 陈建国,李彦明,覃程锦,等. 小麦播种量电容法检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(18):51 - 58.
CHEN Jianguo, LI Yanming, QIN Chengjin, et al. Design and test of capacitive detection system for wheat seeding quantity [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 51 - 58. (in Chinese)

[117] 刘坤. 玉米精量播种装置排种性能电容法检测机理与方法研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2019.
LIU Kun. Detection mechanism and methodology of seeding performance of corn precision seeding device based on capacitive method[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University,2019. (in Chinese)

[118] 周利明,张小超,苑严伟. 小麦播种机电容式排种量传感器设计[J]. 农业工程学报,2010,26(10):99 - 103.
ZHOU Liming, ZHANG Xiaochao, YUAN Yanwei. Design of capacitance seed rate sensor of wheat planter[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 99 - 103. (in Chinese)

[119] 周利明,王书茂,张小超,等. 基于电容信号的玉米播种机排种性能监测系统[J]. 农业工程学报,2012,28(13):16 - 21.
ZHOU Liming, WANG Shumao, ZHANG Xiaochao, et al. Seed monitoring system for corn planter based on capacitance signal[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 16 - 21. (in Chinese)

[120] 丁幼春,杨军强,朱凯,等. 油菜精量排种器种子流传感装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(9):29 - 36.
DING Youchun, YANG Junqiang, ZHU Kai, et al. Design and experiment on seed flow sensing device for rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 29 - 36. (in Chinese)

[121] 赵博,樊学谦,周利明,等. 气流输送播种机压电式流量传感器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(8):55 - 61.
ZHAO Bo, FAN Xueqian, ZHOU Liming, et al. Design and test of piezoelectric flow sensor for pneumatic seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(8):55 - 61. (in Chinese)

[122] WaveVision[EB/OL]. [2025 - 06 - 18]. https://www.precisionplanting.com/products/planters/wavevision.

[123] XIE Chunji, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design of smart seed sensor based on microwave detection method and signal calculation model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 199: 107178.

[124] 解春季. 基于激光和微波雷达的玉米播种质量精准监测方法研究[D]. 北京:中国农业大学,2023.
XIE Chunji. Research on accurate monitoring method of maize seeding quality based on laser and microwave radar[D]. Beijing: China Agricultural University,2023. (in Chinese)

[125] 张闻宇,丁幼春,李兆东,等. 基于双切圆寻线模型的农机导航控制方法[J]. 农业机械学报,2016,47(10):1 - 10.
ZHANG Wenyu, DING Youchun, LI Zhaodong, et al. Dual circle tangential line-tracking model based tractor navigation control method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(10):1 - 10. (in Chinese)

[126] 张朝宇,卢邦,李强,等. 油菜无人播种作业两退三切鱼尾自动调头方法[J]. 农业机械学报,2022,53(10):66 - 75.
ZHANG Chaoyu, LU Bang, LI Qiang, et al. Unmanned seeding automatic control method of rapeseed based on two-back and three-cut fishtail u-turn model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(10):66 - 75. (in Chinese)

[127] High speed precision planters-CHRONO[EB/OL]. [2025 - 07 - 28]. https://www.maschiogaspardo.com/en/web/

international/chrono.

[128] RowControl[EB/OL]. [2025 - 07 - 28]. https://www.horsch.com/en/products/intelligence/rowcontrol.

[129] Väderstad extends precision farming[EB/OL]. [2025 - 07 - 28]. https://www.vaderstad.com/en/about-us/news/news-archive/2017/international/vaderstad-extend.

[130] 王丽. 土壤压实和品种选育对黄淮海大豆根型和氮吸收的影响[D]. 北京:中国农业科学院,2022.
WANG Li. Effects of soil compaction and cultivars on root system architecture and nitrogen uptake in Huang-Huai-Hai region [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022. (in Chinese)

[131] 丁友强. 玉米精量播种转弯补偿与区段控制方法研究与试验[D]. 北京:中国农业大学,2021.
DING Youqiang. Study and experiment on turn compensation and automatic section control of precision maize planters[D]. Beijing: China Agricultural University,2021. (in Chinese)

[132] LIU Zhengduo, ZHENG Wenxiu, WANG Neng, et al. Trajectory tracking control of agricultural vehicles based on disturbance test[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(2): 138 - 145.

[133] 吉鑫. 基于滑模理论的无人农机自动导航路径跟踪控制技术研究[D]. 镇江:江苏大学,2023.
XIN Ji. Research on path tracking control technology of unmanned agricultural vehicles auto navigation based on sliding mode theory[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2023. (in Chinese)

[134] 刘国海,李持衡,沈跃,等. 同步转向高地隙喷雾机模糊自适应轨迹跟踪预测控制[J]. 农业机械学报,2021,52(9):389 - 399.
LIU Guohai, LI Chiheng, SHEN Yue, et al. Tracking and fuzzy adaptive model predictive control of high clearance synchronous-steering sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):389 - 399. (in Chinese)

[135] CHENG Jin, ZHANG Bingli, ZHANG Chengbiao, et al. A model-free adaptive predictive path-tracking controller with PID terms for tractors[J]. Biosystems Engineering, 2024, 242: 38 - 49.

[136] DING Chen, DING Shihong, WEI Xinhua, et al. Output feedback sliding mode control for path-tracking of autonomous agricultural vehicles[J]. Nonlinear Dynamics, 2022,110(3):2429 - 2445.

[137] KAYACAN E, KAYACAN E, RAMON H, et al. Learning in centralized nonlinear model predictive control: application to an autonomous tractor-trailer system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 23(1): 197 - 205.

[138] ZHANG Junjiang, FENG Ganghui, YAN Xianghai, et al. Cooperative control method considering efficiency and tracking performance for unmanned hybrid tractor based on rotary tillage prediction[J]. Energy, 2024, 288: 129874.

[139] MATVEEV A, HOY M, KATUPITIYA J, et al. Nonlinear sliding mode control of an unmanned agricultural tractor in the presence of sliding and control saturation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(9): 973 - 987.

[140] SUN Jinlin, WANG Zhen, DING Shilong, et al. Adaptive disturbance observer-based fixed time nonsingular terminal sliding mode control for path-tracking of unmanned agricultural tractors[J]. Biosystems Engineering, 2024, 246: 96 - 109.

[141] JI Xin, WEI Xinhua, WANG Anzhe, et al. A novel composite adaptive terminal sliding mode controller for farm vehicles lateral path tracking control[J]. Nonlinear Dynamics, 2022, 110(3): 2415 - 2428.

[142] 冀杰,贺庆,赵立军,等. 除草机器人自适应快速积分终端滑模跟踪控制技术[J]. 农业机械学报,2023,54(6):55 - 64.
JI Jie, HE Qing, ZHAO Lijun, et al. Adaptive fast integrating terminal sliding mode tracking control technique for weeding robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(6):55 - 64. (in Chinese)

[143] MAYNE D Q. Model predictive control: recent developments and future promise[J]. Automatica,2014,50(12):2967 - 2986.

[144] YAN Yan, YU Shuanghe, YU Xinghuo. Quantized super-twisting algorithm based sliding mode control[J]. Automatica, 2019, 105: 43 - 48.

[145] HUANG Zhiwu, DU Wei, CHEN Bin, et al. An online super-twisting sliding mode anti-slip control strategy[J]. Energies, 2020, 13(7): 1823.

[146] CRUZ-ZAVALA E, MORENO J A. Higher order sliding mode control using discontinuous integral action[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 65(10): 4316 - 4323.

[147] FAN Xiaofei, WANG Zhanshan, SHI Zhan. Event-triggered integral sliding mode control for uncertain fuzzy systems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2021, 416: 47 - 63.