doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.23.001

智能收获装备关键技术研究综述

张　漫[1,2]　李顺达[1,2]　肖坚星[1,2]　王　宁[1,2]　李　寒[1,2]

(1.中国农业大学信息与电气工程学院,北京 100083;
2.中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室,北京 100083)

摘要:智能收获农机装备作为现代农业生产技术体系的重要组成部分,能够有效提升作业效率、降低驾驶员的工作强度,同时推动农业生产向智能化、无人化转变。智能收获农机装备技术体系主要包括产量监测、智能导航以及作业信息远程管控三项核心关键技术,且彼此之间通过数据融合和功能互补,构建起紧密耦合的关系。本文首先阐述了谷物产量监测中的流量传感器、割幅宽度传感器和谷物含水率传感器,并结合研究进展深度分析了当前产量监测系统的特点和局限性。其次,从定位测姿、环境感知、路径规划、任务分配以及运动控制 5 个维度,综合分析智能导航系统在整个智能收获装备中的作用,同时指出其所面临的挑战和技术瓶颈。此外,农机装备作业信息远程管控系统作为智能收获农机装备技术体系的最后一环,承担着打通"装备-田间-云端"数据链路、汇聚分析多源作业数据、协调调度装备机群等重要核心职能。然而,该远程管控系统在实际农业生产场景中尚未得到广泛普及和推广。因此,本文从系统工作原理、架构组成、功能特点及性能特性四个角度对其展开剖析,探究得出推广应用受限的核心诱因,主要包括系统协议不兼容、农机机型不匹配、系统功能单一等关键因素。最后,结合当前农业生产实际需求和智慧农业的发展趋势,展望了智能收获农机装备未来发展前景,为农业生产"降本、提质、增效"提供坚实的技术支撑。

关键词:农机装备;智能收获;产量监测;导航控制

中图分类号:S24　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)23-0001-23　　**OSID**:

Research Progress and Prospect of the Smart Harvesting Technology of Agricultural Machinery

Zhang Man[1,2]　Li Shunda[1,2]　Xiao Jianxing[1,2]　Wang Ning[1,2]　Li Han[1,2]

(1. *College of Information and Electrical Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: As a crucial component of the modern agricultural production technology system, smart harvesting agricultural machinery can effectively improve operation efficiency and reduce labour intensity. Meanwhile, it significantly promotes the transformation of agricultural production mode toward intelligence and unmanned operation mode. The key technology system for smart harvesting agricultural machinery mainly includes three core elements: yield monitoring, intelligent navigation, and remote management and control of field operation. These elements establish a tightly coupled relationship through data fusion and functional complementarity. Firstly, this paper briefly explains the roles of grain flow sensors, cutting width sensors, and grain moisture content sensors in yield monitoring system, and conducts a deep analysis of the characteristics and limitations of current yield monitoring technology in combine. Furthermore, this paper provides a comprehensive presentation on the function and role of intelligent navigation technology in the smart harvesting agricultural machinery from five dimensions: positioning and attitude measurement, environmental perception, path planning, task allocation, and motion control. Meanwhile, the challenges and technical bottlenecks it faces are pointed out completely. In addition, the remote management and control system for agricultural machinery operation, as the final component of the technical system for intelligent harvesting equipment, undertakes core functions such as connecting the

收稿日期:2026-07-20　修回日期:2026-08-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFD2001600、2022YFD2001601)和中国农业大学 2115 人才工程项目

作者简介:张漫(1975—),女,教授,博士,主要从事精细农业、智慧农业和农业机械导航定位等研究,E-mail:cauzm@cau.edu.cn

data link among "equipment-field-cloud", aggregating and analyzing multi-source real data, and organizing agricultural equipment fleets. However, this remote management and control system has not yet been widely adopted and promoted in current agricultural production scenarios. Therefore, this paper analyzes the system from four perspectives: working principle, system structure, functional characteristics and performance characteristics, and identifies the core causes restricting its popularization and application, mainly including incompatible system protocols, mismatched agricultural machinery types and simple system functions. Finally, integrating the actual needs of current agricultural production and the development trend of smart agriculture, this paper provides a comprehensive outlook on the future of smart harvesting agricultural machinery, offering solid technical support for "cost reduction, quality improvement, and efficiency enhancement" in agricultural production.

Key words: agricultural machinery; smart harvesting; yield monitoring; navigation control

0 引言

随着我国城镇化和工业化进程持续提速,叠加人口老龄化程度加剧、人口出生率下滑的双重影响,导致当前农业生产面临用工成本大幅攀升和劳动力供给严重短缺的双重挑战。在此背景下,智慧农业应运而生。智慧农业在传统计算机和电子技术的基础上,充分融合人工智能、大数据、机器学习等新一代电子信息技术的优势,与农业生产、经营、管理和服务产业链的各个环节实现生态融合和基因重组,旨在持续突破并拓展农业生产技术的效益边界。

从"耕、种、管、收"的农业生产流程视角出发,收获装备在智慧农业的推广和建设中,扮演着不可或缺的关键角色,其信息化、智能化程度直接影响着农业生产的效率和最终收益,同时对下一季度种植计划的科学制定具有重要影响。当前,随着农业规模化、集约化种植模式的加速推进,传统农业机械收获技术局限性使其严重依赖操作员的个人经验与主观判断问题日益凸显[1]。例如,联合收获机需要频繁手动调整方向以实现对行收获、无法精准感知地块内各小区的产量差异、农机调度和路径规划凭借个人经验等。显然,传统的农业机械收获方式难以高效应对复杂繁重的现代化收获任务,更无法适配未来农业的发展需求。

现代农业智能化收获技术体系以"感知-控制-管控"为核心逻辑,主要涵盖了产量监测技术、智能导航技术以及作业信息远程管控技术。这 3 项核心关键技术并不是相互割裂和孤立存在的,而是通过功能互补与数据互通,形成了高度关联的耦合体系。在产量监测技术体系中,谷物流量传感器承担着核心器件的角色,其能实时捕获收获过程中谷物流量变化,有效突破了传统农机收获技术无法精确获悉地块内特定位置作物产量的技术瓶颈。智能导航技术通过融合激光雷达的三维环境建模能力、相机的视觉识别功能、毫米波雷达的全天候探测优势,构建起多传感器协同感知体系,能够精准捕捉非结构化农田中的作物分布、田埂边界、障碍物位置等动态信息,有效解决了传统农机依赖人工肉眼判断来调整农机姿态与轨迹的局限性。此外,其所依托的大数据驱动的路径规划技术与任务分配机制,可在多台农机之间实现作业区域划分、作业流程衔接与机群调度协同,从根本上改变传统单机作业的低效率局面,推动收获作业向规模化、集约化、高效化转型,确保收获效益达到最优水平。农机装备作业信息远程管控系统,是面向现实农业生产场景的专业化信息管理平台,其核心目标在于通过数字化技术手段优化农机作业流程、提升作业效率与管理精度,以及推动农机与农艺深度融合。该系统的核心功能模块主要涵盖:作业数据的实时记录与多维度分析、基于生产任务内容与农机工况的智能调度管理、农机运行状态的远程实时监控,以及依托大数据分析的故障报警与预测等,全方位覆盖农机作业从计划、执行到运维的全流程管理需求。

本文充分梳理国内外智能收获装备关键技术的研究动态和前沿进展,紧扣"感知、控制、管控"的农业生产逻辑,分别从产量监测系统、智能导航系统以及作业信息远程管控系统 3 个维度,对当前智能收获装备的关键技术进行深度阐述,并深入剖析每个技术单元的核心优势与不足。最后,结合当前农业生产实际需求和人工智能技术的发展趋势,对智能收获农机装备的技术发展进行展望。

1 产量监测系统

产量监测系统作为智能谷物联合收获机的核心装置,其能在联合收获机开展作物收获作业的过程中,实时获取当前收获位置的谷物流量、含水率等信息,以及收获机自身运行状态参数,为农田产量空间分布信息及后续管理决策提供重要的数据支撑。产量监测系统的核心单元包括谷物流量传感器、谷物含水率传感器、割幅传感器、升运器转速传感器

和定位系统等，如图 1 所示。本文重点剖析前 3 类不同用途的传感器，首先从制造成本、技术成熟度、环境适应性 3 个维度进行统一评价，如表 1 所示。结合其工作原理、系统组成和当前国内外的研究现状，总结分析其所取得的进展和仍存在的技术挑战。



图 1　产量监测系统构成图

Fig. 1　Schematic diagram of grain yield monitoring system

表 1　产量监测系统中传感器分类

Tab. 1　Classification of sensors in yield monitoring system

传感器类别	制造成本	技术成熟度	环境适应性	文献序号
谷物流量传感器	中	待优化	弱	[2]
谷物含水率传感器	低	成熟	强	[3]
割幅传感器	低	成熟	强	[4]

1.1　谷物流量传感器

谷物流量传感器作为产量监测系统的核心部件，在获取作物产量信息方面起到至关重要的作用。1992 年，美国 Ag Leader 公司率先推出了冲量式谷物流量传感器。由于其技术成熟和性能可靠，在世界农机市场得到了大面积装配与推广[4]。目前，虽然国内众多研究团队和学者在谷物流量传感器的研制方面开展了相关尝试与研究，但仍没有商业化成熟产品。根据工作原理的不同，常见的谷物流量测量方法包括冲量测量法、体积测量法、射线测量法、转速测量法、扭矩测量法以及压力测量法等，具体性能分析如表 2 所示。

1.1.1　冲量式

由联合收获机工作原理可知，在谷物籽粒被刮板式升运器以一定的速度提升至粮仓的过程中，谷物籽粒获取了一定动能和飞行速度。冲量式谷物流量传感器正是利用了谷物籽粒的这一特点，将谷物流量的每次打击作用转换为可测量的机械形变，借助应变片将微弱的机械形变转换为可供微控制器处理分析的毫伏级电压信号，通过标定实现作物产量的实时精确测量。截至目前，虽然谷物流量传感器已经衍生出多种具有不同特点的型号，但其主要部件均由导流板、应变梁（或应变板）、测量电路等组成。

单臂冲量式传感器因结构简单、成本较低、易于安装，已成为实际农业生产中应用较广的谷物流量监测装置。相关研究通过在应变梁表面布置电阻应变片或采用 PVDF 压电薄膜[13]获取谷物冲击信号，并结合参数标定、线性回归和定位信息实现谷物流量测量及产量空间分布绘制，最大测量误差通常可控制在 3% ~4% 范围内。针对单臂结构易受联合收获机机械振动、地形起伏及背景噪声干扰的问题，

表 2 谷物流量传感器分类

Tab. 2 Classification of grain flow sensors

测量原理	传感器类型	核心器件	安装位置	优缺点	文献序号
冲量测量法	单臂冲量式谷物流量传感器	电阻式应变片	升运器顶部	安装方便、维护成本低,但易受振动干扰	[4]
	双臂冲量式谷物流量传感器	电阻式应变片	升运器顶部	结构复杂、成本较高、校准配对过程复杂	[5]
体积测量法	对射式谷物流量传感器	光电开关	升运器中部两侧	检测精度高,发射端与接收端直线对应,谷物遮挡信号的反馈直接且稳定	[6]
	漫反射式谷物流量传感器	光电开关	升运器中部两侧	安装方便,发射与接收集于一体,无需校准配对	[7]
	可见光式谷物流量传感器	可见光相机	升运器中部两侧	结构复杂、易受粉尘污染或堵塞,维护成本高	[8]
射线测量法	射线式谷物流量传感器	射线源	升运器顶部	存在辐射源,对人体造成伤害	[9]
压力测量法	压力式谷物流量传感器	电阻式应变片	升运器顶部螺旋输送器出口底部	压力信号的传递和转换存在滞后,对瞬时流量变化的捕捉能力弱	[10]
扭矩测量法	扭矩式谷物流量传感器	电阻式应变片	粮仓	旋转结构复杂、安装维护成本高	[11]
转速测量法	转速式谷物流量传感器	光电编码器	卸粮筒	无法实时监测作物产量	[12]

研究者进一步研发了双臂差分式冲量式传感器,通过设置参考平行梁同步采集振动信息,并利用差分方式削弱共模干扰,使测量稳定性和信噪比显著提高,具体如图 2 所示。

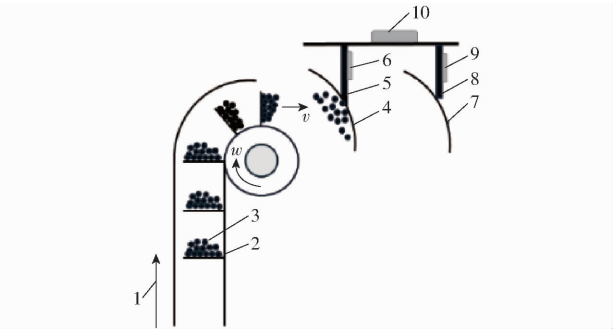


图 2 双臂冲量式谷物流量传感器工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram of double plates impact-type grain flow sensor

1. 谷物输送方向 2. 升运器的刮板 3. 谷物籽粒 4. 导流板 5. 应变梁 6、9. 应变片 7. 参考导流板 8. 参考应变梁 10. 测量单元

在结构优化方面,研究主要集中于导流板材料、尺寸、厚度、曲率半径及支撑结构设计[14],并采用声学黑洞[15]、有限元分析[16]等方法改善振动传递特性和应力分布;安装导流板还可增强谷物冲击响应,提高有效信号幅值[14]。硬件测量方面,电阻应变片桥路、差分放大电路[17]及压电薄膜[13]等成为主要信号采集手段,可进一步提高弱冲击信号的检测灵敏度与抗干扰能力。在算法方面,均值滤波[18]、差分补偿[19]、频域自适应噪声消除[20]及随机森林[21]等方法被用于噪声抑制、零点漂移补偿、流量标定和产量预测。总体而言,冲量式谷物流量监测技术正由单一机械测量向“结构优化—差分检测—智能信号处理—产量空间映射”一体化方向发展,测量精度和复杂工况适应性不断提高。

尽管上述优化手段可在一定程度上改善传感器测量效果,但整体性能提升幅度有限,其根本原因在于受加工与生产工艺限制,前后导流板的机械特性与电气参数难以实现完全一致,导致振动干扰无法被完全差分抵消。目前,由于冲量式传感器具有易安装、少维护、成本低的特点,使其得到了较多的推广与应用。同时,由于冲量式谷物流量传感器的自身机械结构特点,导致无论是单板冲量式还是双板式谷物流量传感器,都没有彻底解决复杂农田环境下的剧烈振动干扰问题。同时,填充时间、延迟时间、地面坡度、空气温湿度、弹性元件的老化问题也同样综合影响着冲量式谷物流量传感器的测量精度。

1.1.2 体积式

为了克服非结构化农田环境带来的振动干扰问题,相关学者又提出了体积式谷物流量传感器。体积式谷物流量传感器通过实时监测升运器内部刮板上的谷物厚度与形状,推算出每个刮板上的谷物体积,同时结合谷物籽粒含水率信息,最终换算出谷物流量。根据工作原理的不同,体积式谷物流量传感器又可分为对射式谷物流量传感器、漫反射式谷物流量传感器以及可见光式谷物流量传感器。

对射式谷物流量传感器通常有一对光电传感器,分别是由红外光电二极管构成的光发射器和由光敏三极管构成的光接收器。光发射器和光接收器以水平对称方式安装在刮板式升运器两侧,安装方向与升运器内部刮板运动方向垂直,具体如图 3a 所示。当联合收获机正常工作时,光发射器所发射出的光电信号会被升运器内部刮板及其所承载的谷物所阻断或衰减,故光接收器接收的是随着谷物厚度变化的脉冲调制光电信号。根据单位时间内光电信号的占空比变化,准确推算出当前实时谷物流量。为精准获取升运器刮板的谷物质量、提升联合收获机产量监测精度,国内外学者围绕谷物堆积分布特

性、检测测量手段、谷物流量模型 3 个维度开展了系统性优化研究。在谷物堆积分布研究层面，现有研究多依托 EDEM 离散元仿真技术[22]，揭示升运器内部谷物籽粒的流动特性与堆积分布规律，为检测误差溯源与结构优化提供理论支撑。在测量检测层面，主要通过近红外波段梯度试验[23]，筛选匹配适配当前谷物的最优近红外波段，或通过增加近红外传感器数量[24]，细化谷物堆积状态信息，有效提升谷物堆积量的检测精度。在流量建模层面，学者相继引入 BP 神经网络[25]、分层积分法[6]、高斯函数[23]等建模方法，构建高精度谷物流量拟合模型，进一步优化产量监测的拟合精度与稳定性。

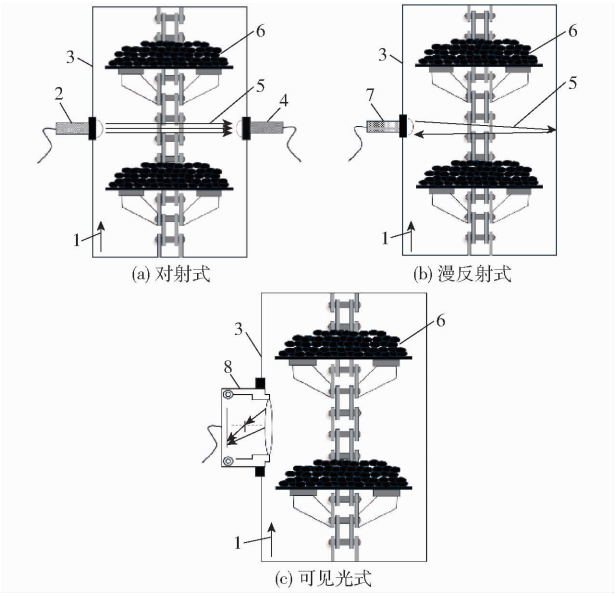


图 3　体积式谷物流量传感器工作原理图

Fig. 3　Working principle diagram of volumetric grain flow sensor

1. 谷物输送方向　2. 光电发射器　3. 刮板式粮食升运器　4. 光电接收器　5. 光电信号　6. 刮板及其所承载的谷物籽粒　7. 光电发射接收一体部件　8. 可见光相机

除此之外，相比对射式谷物流量传感器而言，漫反射谷物流量传感器所使用的光电传感器数量减少一半[26]，结构上的优化带来了生产制造成本和维护成本的大幅减少，具体如图 3b 所示。同时，得益于可见光相机分辨率高、图像细节丰富的优势，不少学者开展了基于 RGB 视觉图像的谷物流量检测方法研究[8]，具体如图 3c 所示。该类方法通过采集升运器刮板表面的谷物堆积图像，获取谷层厚度与堆积形态特征，并结合梯形微元法[27]、机器视觉建模[28]等理论手段构建谷物流量测算模型，实现对实时谷物流量的精准估算。

虽然上述光电式谷物流量传感器为作物产量监测提供了一种可行的技术解决方案，但该方案依然存在易受粉尘、振动干扰等不足。首先，联合收获机的升运器内部存在大量的粉尘，容易污染甚至堵塞光源和镜头，致使传感器无法正常工作。其次，升运器刮板上的谷物籽粒是在三维空间上不规则分布，且在被升运器输送的过程中，因机械振动和车身晃动而不断变化。最后，光电式谷物流量传感器只能获悉某一时刻谷层的某个侧面具体信息，致使传感器的测量误差增加。

1.1.3　其他

为了进一步克服谷物流量测量中的振动大、粉尘大等一系列问题，国内外学者提出了其他不同的谷物流量测量方法，涵盖了基于射线[9]、螺旋输送器转速[12]、谷物流量压力[10]、毫米波[29]、传动轴扭矩[11]等方法。相比于冲量式和光电式谷物流量传感器，虽然上述谷物流量测量方法存在一定的优势，但也存在缺陷。例如，射线式谷物流量传感器存在造价高，且辐射源有害健康；虽然旋抛式和压力谷物流量传感器一定程度克服了机械振动的难题，但其存在结构复杂、通用性低等缺点，且难以维护和推广。

1.2　割幅传感器

为了计算每秒钟联合收获机的作业面积，需要实时获取进入收获机的谷物幅宽和收割机的作业速度。通常，驾驶员需要通过肉眼来估测当前作物收获宽度，但误差较大。为了解决此问题，割幅传感器应运而生。根据测量原理的不同，割幅传感器主要分为基于超声波、基于机器视觉和基于激光雷达 3 种类型，具体特点如表 3 所示。

表 3　割幅传感器分类

Tab. 3　Classification of cut-width sensors

传感器类别	优点	缺点	文献序号
超声波式割幅传感器	结构简单，造价低廉，性能稳定	作物稀疏时容易穿透作物，造成测量误差	[4]
基于视觉割幅传感器	造价低廉，结构简单	易受粉尘、阴影和遮挡干扰	[30]
基于激光雷达割幅传感器	测量精度高	造价高昂，计算量大	[31]

超声波在空气中传播时，遇到障碍物后会以相同的速度返回。超声波式割幅传感器便利用发射波与反射波之间的时间差，实现割台与作物间距离的测量。刘仁杰[4]在谷物联合收获机上的割台内侧安装了基于超声波的割幅传感器，构建了一套完整的联合收获机产量监测系统。然而，超声波式割幅传感器只能检测当前时刻的割幅宽度，并不能判断联合收获机车身姿态与作物行的相对位置关系，为后续收获机的满幅收获提供基本的数据支撑。为了克服超声波割幅传感器的这一缺点，实现割幅参数

的实时感知,国内外学者尝试采用多模态数据源开展检测,借助可见光相机获取 RGB 图像[30]、激光雷达采集三维点云[31],实现割幅参数的解算。同时,进一步融合地理位置、车身姿态信息以及农机控制系统,以此支撑农田无人化收获作业的实施[32],并达到预期实验效果。

综上所述,由于超声波式割幅传感器自身性能的局限性,推动了一系列基于可见光相机和基于激光雷达的割幅传感器的研究。然而,因可见光相机易受光照影响、激光雷达造价高和算力有限等问题,导致目前商品化的产量监测系统大部分还未预装割幅传感器。

1.3 谷物含水率传感器

谷物含水率是谷物品质关键参数之一[33],也是计算谷物产量的重要参数。谷物含水率的测量精度直接决定着所绘制的作物产量分布图是否具有科学性及合理性。根据在检测过程中谷物籽粒是否受损,谷物含水率检测方法大致分为有损检测和无损检测。在有损式谷物含水率检测方法中,常见的是烘干失重法。而在无损式谷物含水率检测方法中,常见的有电容式、微波式、射频式、电阻式、光谱式等,具体如表 4 所示。谷物产量监测系统中,为了实现谷物含水率的实时检测,常采用无损式。

表 4 谷物含水率传感器分类

Tab. 4 Classification of grain moisture sensors

传感器类别	特性	优缺点	文献序号
烘干失重式水分测定仪	有损检测	常用作测量谷物水分的通用标准方法,但是存在测量时间长、破坏谷物籽粒、便携性差等缺点	[34]
电容式谷物含水率传感器	无损检测	结构简单、造价低廉、便携性强,目前广泛应用于农业机械上,但易受空气温湿度、籽粒孔隙度等影响	[35]
微波式谷物含水率传感器	无损检测	灵敏度高、检测时间短,容易引起驻波干扰	[36]
高频电磁波式谷物含水率传感器	无损检测	造价低廉、性能稳定,影响测量精度的主要因素包括探测单元的材料、长度和间距	[3]
电阻式谷物含水率传感器	无损检测	设备结构简单,成本低廉,但取样要求高,易受振动影响	[37]
近红外式谷物含水率传感器	无损检测	光路结构复杂、体积庞大、制造和维护成本高	[38]

现阶段国内外谷物含水率在线检测技术可归纳为四大技术路径,分别基于电容介电特性、电阻阻抗特性、信号衰减特性与光谱特征来实现谷物含水率检测。其中,电容式传感器主要分为平行板[35]与同心圆[39]两种结构,但其检测精度易受田间机械振动、谷物颗粒尺寸不均及籽粒动态间隙变化的干扰,检测稳定性较差。电阻式传感器依靠接触式阻抗检测原理实现含水率测量[37],但存在检测速度慢、无法满足高速在线监测的缺陷。基于信号衰减特性的检测方式,主要涵盖微波反射[36]、高频电磁波[3]、声波检测[40]3 类技术;而基于光谱特征的检测手段,则以高光谱检测[41]与近红外光谱检测[38]为主流应用方案。

设备结构简单可以极大地降低设计制造、维护保养等方面的成本,同时设备的可靠性和稳定性也会相应增加。相比于其他类型的谷物含水率传感器,电容式和电阻式谷物含水率传感器结构组成最为简单,但电阻式谷物含水率传感器存在取样流程复杂等问题,因此,从制造成本、维护成本、可靠性和稳定性等方面来看,电容式谷物含水率传感器更适合应用于农业装备。

2 智能导航系统

“感知-控制-管理”作为智能收获装备技术的内在核心逻辑,贯穿收获作业任务的始终。其中,智能导航系统在智能收获农机装备技术体系中,承担着实时感知环境信息并进行姿态调整,从而实现自动收获的任务。收获机智能导航系统主要由定位测姿、环境感知、路径规划、任务分配以及运动控制 5 部分构成。本节将从这几个方面展开阐述,同时结合其研究现状和发展趋势,剖析当前该项技术存在的瓶颈和挑战。

2.1 定位测姿与环境感知

定位测姿和环境感知技术作为智能导航系统的信息输入源头,其主要解决了农机“在哪里”和“处在何种农田环境”的问题,搭建起了农机与作业环境之间的信息桥梁。根据工作原理不同和功能划分,在农机装备的定位测姿和环境感知方面,可划分为全球卫星导航系统、惯性导航系统和多传感器融合导航系统 3 部分。

2.1.1 全球卫星导航系统

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)是一种能在任何时间为身处地球表面任何地点的用户及设备,提供全天候、连续、实时的地理位置信息的无线电导航定位系统,其涵盖了空间经纬度、速度、时间、海拔、卫星数量等信息。从系统结构上来看,全球卫星导航系统主要包括了 3 部分:近地轨道的卫星、负责误差校准的地面基站,以及实时解算定位数据的用户移动站。当前 GNSS 系统常用伪距绝对定位方法,且需要至少 4 颗近地卫星完成用户空间位置的解算任务。截至目前

为止，全球卫星导航系统国际委员会公布有四大主流全球卫星导航系统，包括中国的北斗卫星导航系统（Beidou navigation satellite system，BDS）、美国的全球定位系统（Global position system，GPS）、俄罗斯的格洛纳斯卫星导航系统（Global navigation satellite system，GLONASS）和欧盟的伽利略卫星导航系统（Galileo satellite navigation system，GALILEO）。

在实际农业生产过程中，全球卫星导航系统通常并非独立运行，而是融合多源传感器信息实现协同感知与控制，现已广泛应用于农田产量分布图绘制[42]、大田智能化无人收获[43-44]、果园自主巡检[45]与植保喷施等作业场景。值得注意的是，无论何种农田作业场景，常常因树木遮挡造成信号强度降低、农机定位偏差等一系列问题。为此，王法安等[46]提出了基于卡尔曼滤波的改进型全球卫星导航系统定位算法，同时采用贝叶斯信息准则优化正则化参数，实现定位模型的稀疏化。

目前，经过长期的技术攻关与迭代更新，全球卫星定位系统除了为近地空间的用户全天候提供精准定位服务以外，还可提供滚动角、航向角、俯仰角等一系列关键的姿态信息，为智慧农业的建设与推广提供了前提。但是全球卫星导航系统也存在若干技术缺陷，即无法获悉关于周围作业环境的局部信息，例如行人、农机、田埂、作物收获边界等信息。

2.1.2　惯性导航系统

从时间轴上来看，惯性导航系统的诞生时间远早于全球卫星导航系统，早期广泛应用于军用飞行器，例如导弹、飞机等。惯性导航系统以牛顿力学作为理论基础，在已知当前装置的具体位置，借助陀螺仪、加速度计、磁偏计等一系列传感器，解算出当前装置的姿态和下一时刻的空间位置，进而驱使农机按预定的航迹行走。此外，惯性导航系统作为一套独立完整的导航系统，无需任何外部信息作为解算当前空间位置和姿态的前提，同时也避免了外部环境的电磁干扰，尤其适合因树荫遮挡严重导致全球卫星系统信号微弱的农田环境。根据工作原理的不同，惯性导航系统的核心传感器主要分为磁力计[45]、陀螺仪[47]、加速度计[48]，如表 5 所示。

表 5　惯性导航系统核心传感器分类

Tab. 5　Classification of key sensors of inertial navigation system

传感器类别	测量原理	典型产品	优缺点	文献序号
陀螺仪	角动量守恒	机械陀螺仪、MEMS 陀螺仪、光纤陀螺仪、激光陀螺仪	精度高、稳定好，可以和加速度计、磁力计融合使用，但存在误差累积，且对环境温度和振动噪声敏感等问题	[49]
加速度计	牛顿第二定律	MEMS 加速度计、压电式加速度计、伺服式加速度计	实时动态监测能力强、结构多样化可适配多种应用场景，但测量参数单一，且精度受限于生产工艺	[48]
磁力计	测量地球磁场分布	霍尔效应磁力计、磁通门磁力计、量子磁力计	功耗低、体积小、三轴方向磁力参数检测，但易受磁场干扰，动态响应差，对环境温度敏感	[50]

但截至目前为止，受限于陀螺仪、加速度计等传感器的测量精度，导航系统经过长时间工作后，仍存在因漂移而导致累积误差的问题。

2.1.3　多传感器融合导航系统

全球卫星定位导航系统和惯性导航系统都存在着一个缺点，无法准确感知当前周围环境信息，只能为农机装备提供全局地理位置和农机姿态信息。然而，局部的农田环境蕴含着有助于农机导航控制智能决策的丰富信息，例如障碍物、农田地块边界、作物行、土壤肥力等。此外，随着农田生产的集约化和规模化程度越来越高，农机自主导航对实时在线的农田环境感知技术的需求也更为迫切。由此，便诞生了基于环境感知传感的多传感器融合导航技术。在环境感知传感器方面，随着生产工艺的提高与处理器算力的大幅提升，相比于以往传统的光、热、温、湿、气功能单一传感器，当前感知环境的手段也变得更为丰富和先进，例如激光雷达、RGB 可见光相机、毫米波雷达等，具体如表 6 所示。激光雷达是“激光探测和测量器”的简称，其利用激光的发射角度和飞行时间来确定目标物体的位置及距离。RGB 可见光相机基于单孔成像原理，借助 CMOS 感光单元来获悉周围环境的二维颜色信息。毫米波雷达利用多普勒效应，结合电磁波在空气中的频率变化，计算出目标的距离、位置、速度等参数。各类环境感知传感器都有着自己的优缺点以及适用场景。

表 6　环境感知传感器分类

Tab. 6　Classification of key sensors of environmental perception sensors

传感器类型	成本	抗光干扰能力	感知范围	分辨率	算力要求
RGB 相机	低	弱	较广	高	高
激光雷达	高	强	较广	适中	高
毫米波雷达	高	强	适中	适中	适中
热红外相机	高	弱	较广	高	高
深度相机	低	弱	较广	高	高

当前，多传感器融合导航技术主要应用于农田

地块边界识别以确定整体农机作业范围、作物行识别以确定地块内的待作业区域,和障碍物识别以排除潜在安全风险。下面围绕农田地块边界识别、作物边界识别和障碍物识别 3 个方面,来阐述如何利用环境感知传感器实现农机多传感器融合导航,进而保障农机作业的效率及质量。

(1)农田地块边界识别

从农田生产管理全环节的角度来看,农机作业内容主要涵盖了犁地、播种、施肥、喷药及收获。但无论开展何种农机作业,都需要获悉农田地块边界信息,以便在此作业区域上开展农机作业路径规划和农机任务调度等相关工作,如图 4 所示。早期,农田地块边界信息的确立往往通过人工打点,或者遥感图像的方式。人工打点方式即在农机安装高精度的全球卫星定位系统,绕农田地块边缘行走一遍,以一定的采样间隔获取边界的经纬度信息,精度为厘米级,但费时费力且效率低。遥感图像可以细分为亚米级的卫星遥感图像和厘米级的无人机遥感图像,利用数字图像处理技术可以从中提取出农田地块边界信息,但遇到杂草丛生的田埂时,存在所提取的地块边界模糊甚至丢失的问题。无论是通过人工打点的方式,还是通过遥感图像数据确定农田地块边界信息,都需要在农机作业前解析相关离线数据,存在所建立的边界信息无法迁移至其他新地块问题,且实时性差。而多传感器融合导航技术中环境感知传感器可以实时准确地获悉农田地块边界信息,构建局部农机作业导航地图,很好地解决以往农田地块边界需要提前离线处理的问题,特别符合当前农机跨区域作业需求。

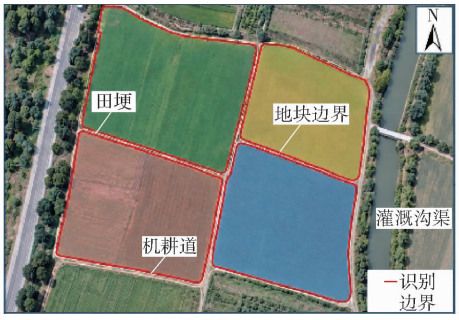


图 4 农田地块边界识别示意图

Fig. 4 Schematic diagram of farmland boundary recognition

在农田地块边界识别任务中,RGB 可见光相机是应用广泛且高效的环境感知传感器[51]。该类传感器可获取场景丰富的色彩与纹理信息,同时硬件购置及维护成本较低。利用农田地块边界在颜色空间中跳变特征,为此现有研究常常采用局部加权法[51]、颜色分量法[52]、支持向量机[53]、超像素分割法[54]、语义分割模型[55]、卷积神经网络[56]等算法,在图像颜色空间中完成农田地块边界特征的精准提取。但可见光成像极易受光照波动影响,检测鲁棒性不足。针对该缺陷,研究人员融合毫米波雷达[53]、激光雷达等多模态传感数据,对感知信息进行动态补偿,以此提升地块边界识别的可靠性。

(2)作物收获边界识别

根据是否已经完成作物收获,农田地块可以划分为已完成收获作业区域和待收获作业区域,其中作物收获边界往往用于区分上述二者不同区域。当联合收获机在农田开展收获作业时,一旦其割台的前进方向与作物收获边界存在角度偏差,就会产生大量的作物漏割、少割、重复割的现象。由于农田边界并不规则,加之农田地面凹凸不平,故联合收获机驾驶员需要在作物收获作业期间,凭借个人经验不断地调整农机转向,以尽可能减少漏割、少割现象的发生,进而实现高质量满幅收割。因此,如何准确识别作物收获边界是实现农机自主导航和无人驾驶的前提条件和关键技术。当前,根据检测原理的不同,作物收获边界识别技术可以分为基于可见光相机、激光雷达以及多传感器融合 3 种方法。

由于收获区与未收获区存在地表高度与图像色彩差异,现有研究多采用 RGB 可见光相机[57]与激光雷达[31]采集环境感知数据。对于 RGB 相机获取的前方场景图像,通常先进行图像形态学处理[30],再采用区域生长法[30]、U - Net[57]等算法提取收获边界关键特征。针对激光雷达输出的三维点云数据,则需剔除地面点云与离群噪声点,统计滤波[31]、中值滤波[32]、K-means 聚类[58]等是该环节的常用处理手段。无论边界特征来源于视觉图像还是三维点云,现有方案大多基于上述特征,采用最小二乘法拟合得到收获作业边界。然而,在真实田间作业环境中,收获区与未收获区的高程、色彩对比度常常较弱,因而需要借助多模态数据融合策略,进一步提升收获边界识别的鲁棒性与检测精度。

(3)障碍物识别与避障

农田作为非结构化的复杂环境,存在障碍物等一系列不安全因素,例如行人、牲畜、联合收获机、运粮车、坑洼沟壑、田埂等。如何准确识别农田环境中的潜在风险以及保障农机作业安全逐渐成为当前研究的热点。此外,障碍物识别作为路径规划和其他农机自主导航任务的前提,其识别障碍物的准确率高低、响应速度快慢直接决定了农机自主导航系统的整体工作质量和效率,具体如图 5 所示。

当前农田障碍物识别研究主要依托 RGB 相机[59]、激光雷达[60]、毫米波雷达[61]以及多传感器融合技术开展。基于 RGB 图像的障碍物识别方法,通

常在图像预处理的基础上结合 Mask R－CNN[59]、YOLO[62]等深度学习模型完成障碍物检测，该方法可充分利用图像色彩与纹理特征，但易受田间光照、粉尘等复杂环境干扰，且无法获取障碍物的深度与空间结构信息，环境适应性有限。基于激光雷达与毫米波雷达的识别方案，可采集田间三维点云数据，在滤除地面干扰点云后，通过欧氏聚类[60]等算法提取障碍物的空间结构特征。该类方式虽能精准获取障碍物三维空间信息，但缺失色彩特征，且对农田障碍物纹理细节的分辨能力远低于视觉图像。

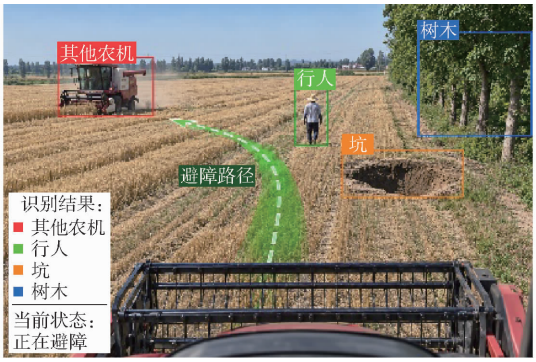


图 5　农田障碍物识别与避障示意图

Fig. 5　Schematic diagram of farmland obstacle recognition and avoidance

从上述多传感器融合导航技术在农田地块边界识别、作物行识别、障碍物识别的研究现状来看，各个环境感知传感器都有自己的优势和局限性，仅靠单一传感器无法完全准确地表征周围农田环境。故此，深层次地融合各类传感器表征农田环境的能力优势，同时互相弥补各自的缺点，可以大幅度地提高目标的识别率和对环境感知的分辨率。虽然由此会给处理器算力和生产制造成本带来挑战，但面对非结构化且复杂的农田环境，多传感器融合的技术解决方案仍是环境感知的发展趋势。

2.2　路径规划与任务分配

从种植规模、农机数量等方面来看，当前农田生产集约化程度得到了极大提高，如何科学有效地规划农机作业路径以及合理分配农机作业任务显得尤为重要。路径规划作为农机自主导航关键技术之一，其能根据作业任务要求，通过环境感知系统获取的当前周围农田环境信息，包括障碍物位置、地形起伏、地块边界、地块面积、作物类别等，并在此基础上自主规划出一条安全且高效的作业路径。根据是否需要预先构建全局农田环境地图，以及所生成的作业路径的适用范围，可以大致分为局部路径规划和全局路径规划两大类。同时，相比于传统农业机械化而言，当前集约化的农业生产管理模式更加重视多农机之间的协调配合，这给农机任务分配带来了巨大挑战。农机任务分配同样作为农机自主导航关键技术，其根据当前作业任务内容，同时结合不同农机类别、工况、性能等参数，为每台农机精准分配合理的作业任务。例如，联合收获机即将完成收获作业任务时，运粮车准时抵达目的地进行装载粮食，避免联合收获机发生任务空闲，降低整体农田生产管理效率。当前，根据架构设计、决策方式及资源调度特点，可以将任务分配技术大致划分为集中式任务分配和分布式任务分配 2 种。

2.2.1　局部路径规划

路径规划是指农业机械（如拖拉机、收获机、采摘机等）在田间作业过程中，通过环境感知传感器（如激光雷达、可见光相机、毫米波雷达、超声波雷达等），获知当前周围局部环境信息后（如障碍物位置及大小、作物分布、地形起伏、田埂位置等），在极短时间内规划出一条从当前位置到局部目的地之间的最佳作业路径。同时，其所规划的局部路径具有实时性、动态性、局部最优、不依赖全局农田地图的特点。针对不同的农田地形条件，国内外学者提出了具有针对性的局部路径规划算法，常见算法有 A* 算法、快速拓展随机树算法、人工势场法、DWA 算法等，具体如表 7 所示。

表 7　局部路径规划算法分类

Tab. 7　Classification of local path planning algorithm

算法类型	优点	缺点	文献序号
A* 算法	可靠性高，灵活性强	算法复杂度高，在特定农田环境中可能需要多次重新规划	[63]
快速拓展随机树算法	搜索效率高，可处理复杂非结构化环境	算法随机性强，可能规划出非最优路径	[64]
人工势场法	动态实时性好，算法简单	可能陷入局部最优解	[65]
DWA 算法	局部避障能力较强	评价函数权重固定，环境适应性差	[66]

在农机避障与局部路径规划研究中，人工势场法凭借结构简洁、实时性强、规划路径平滑等突出优势，被广泛应用于果园[67]、大田[68]、温室[69]等多种农业作业场景，国内外众多学者围绕其存在的固有缺陷开展了大量改进与优化研究[68]。除人工势场法外，现阶段农业无人设备常用的局部路径规划算法还包含 Lattice 算法[70]、动态窗口法[71]、预瞄－切线局部跟踪算法[72]与 RRT* 算法[73]。其中，Lattice 算法适配结构化、规则化的规整农田作业场景；动态窗口法实时性能优异，可精准匹配农机运动约束条件，但存在全局搜索能力不足、易陷入局部最优解的短板；RRT* 算法对复杂未知环境适应性强，擅长多

障碍物杂乱分布工况下的路径搜索;预瞄-切线局部跟踪算法则更适用于农机直线、曲线精准轨迹跟踪的专项田间作业场景。

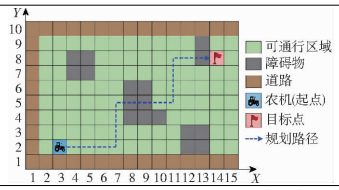
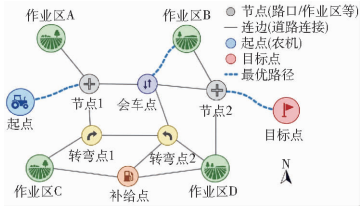
由上述可知,当前局部路径规划技术在收获场景中,主要应用于动态避障绕行以保障作业安全,以及作物的收获采摘以保障最短收获路径等等。虽然该项技术取得了长足的进展,但截至目前,其自身仍存在不足和局限性。例如,环境感知传感器融合算法复杂、二次路径规划效率低、需要大量样本数据进行模型训练等。

2.2.2 全局路径规划

不同于局部路径规划,全局路径规划需要借助无人机航拍、卫星遥感、高精度卫星定位等手段,预先获得当前整个农田地块的信息,涵盖障碍物位置及大小、作物种植分布、田埂长度等。接着,在此基础上,结合农机转弯半径、作业幅宽、油耗、农机闲置率、人力成本、农机数量及类别等约束条件,预先规划出从起点到终点之间的最优作业路径,具有高效率、低功耗、农田全覆盖的特点。按照环境模型构建类别区分,全局农田地图可以分为栅格地图、拓扑地图及矢量地图,具体如表 8 所示。

表 8 全局路径规划算法分类

Tab. 8 Classification of global path planning algorithm

类别	核心原理	示意图
栅格地图	将整个农田划分为不同类别的栅格,例如收获区域、障碍物、可通行区域等	
拓扑地图	用节点表示关键位置,边表示路径衔接关系	
矢量地图	通过多边形、线段表示田埂、作物行、障碍物等	

区别于仅关注车身周边环境的局部路径规划,全局路径规划以整片农田作业区域为规划对象,综合考虑农田轮廓、作业面积、作物种类、地形特征、障碍物尺度与分布情况,并结合农机结构参数与运动约束等多重约束条件,依托各类智能优化算法求解最优作业路径,为农机全天候自主作业提供全局路径决策支撑。当前农业场景中常用的全局路径规划算法包含扫描填充算法[74]、遗传算法[75]、麻雀搜索算法[76]、RRT 算法[77]、A* 算法[78]以及最小行距嵌套法[79]等,其中 A* 算法与扫描填充算法凭借稳定性强、规划精度高、适配农田规整作业场景的优势,应用最为广泛。

农机全局规划作为无人农场推广建设的核心关键技术,近年来取得了显著进展,但面对复杂非结构化农田环境和多机协同的收获场景仍存在不足与局限性。首先,在模型构建方面,由于缺乏公开训练数据集和行业标准,导致当前很多全局路径规划算法仅适用于某些特定的收获场景。例如,特定的农作物、农田地形、农机数量和类型。面对集约化的全新收获场景,需要重新获悉环境数据,并将其输入至模型中进行重新训练,极大地降低了路径规划算法的适配性。其次,在多目标优化权衡方面,现有很多路径规划算法动态实时性差,尤其是面对多机协同场景,其二次路径规划耗时长,效率低。将来,收获场景下的全局路径规划应实时充分考虑环境感知、控制执行等约束条件,动态精准调整农机作业路径,助力农业生产的全面智能化。

2.2.3 任务分配

在农田种植规模扩大、集约化程度提高的同时,农业生产任务的复杂性、艰巨性也明显变大,此时仅靠传统的单农机作业模式已无法胜任大田环境下的生产管理任务。因此,在同一农田环境下,便产生了多台同种或异种农机之间的协同作业技术。尤其是面对“抢种抢收”之类的关键生产时期,农机之间的协同作业可以最大程度保障不误农时。任务分配作为多机协同的核心技术之一,其能根据当前生产任务、农机数量、农机性能参数、农田区域面积、作物类别等约束条件,以综合效益最佳、油耗最少、机械损耗最低等作为优化目标,为每一台农机科学制定作业任务,提高整体生产效率。

在农机任务分配技术方面,主要分为集中式和分布式两大类别,如图 6、7 所示。一般来说,在集中式农机任务分配技术中,某一台农机作为中央控制节点对全局任务进行科学分解,通过通信网络下发给当前机群中的其他农机。集中式农机任务分配具有资源利用率高、人工成本低、任务分配方案灵活的优势,同时其也主要适用于已知的农田环境。相较于集中式农机任务分配技术,在分布式农机任务分配技术中,不存在中央控制节点,每台农机具有较高的独立性,其能根据感知系统来自主分配任务、生成作业路径。由于在分布式农机任务分配技术实施过程中,其不具备关于农田生产任务的全局知识,故其主要适用于未知的农田环境。目前,在多机协同作

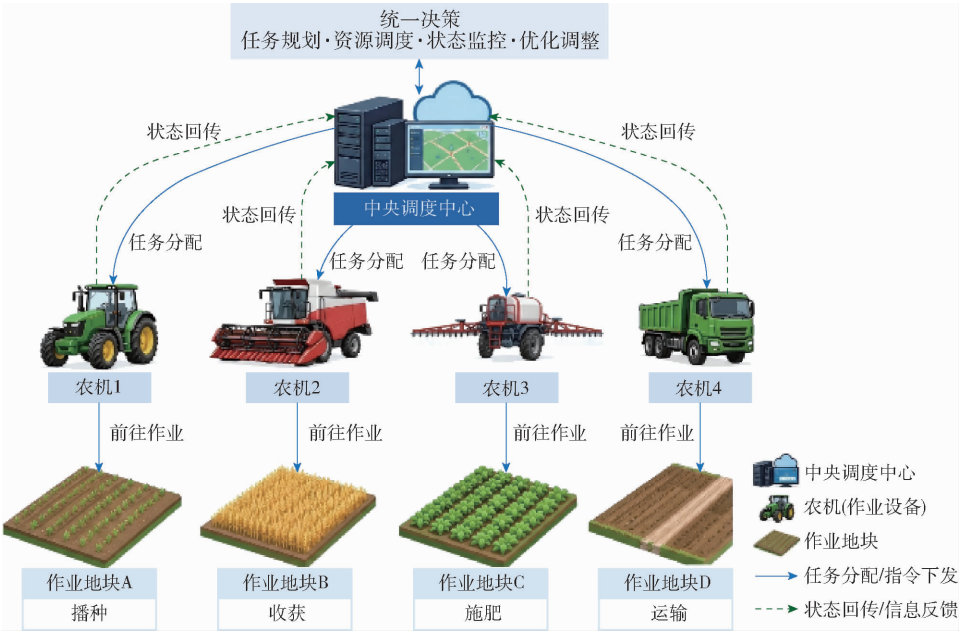


图 6　集中式农机任务分配示意图

Fig. 6　Schematic diagram of centralized agricultural machinery task assignment

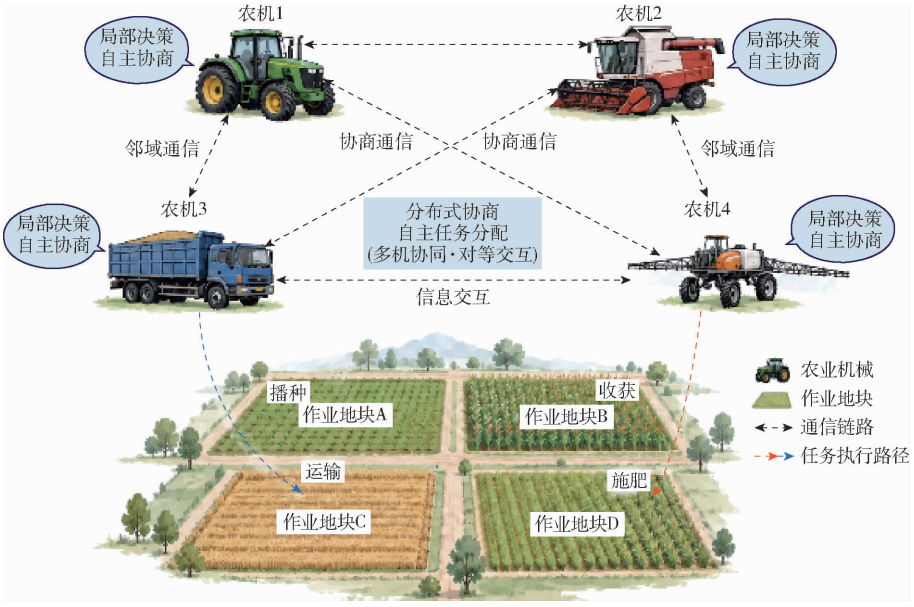


图 7　分布式农机任务分配示意图

Fig. 7　Schematic diagram of distributed agricultural machinery task assignment

业方面，多采用集中式任务分配。

在农机作业任务分配环节中，除常规作业约束外，还需重点考量作业机组的机型匹配特性，常见作业组合包括拖拉机协同作业、联合收获机编组作业、收获机与运粮车协同转运等。作业时长、能耗损耗、转运耗时为各类农机任务分配的通用约束条件，而不同类型农机的作业特性存在差异，对应的约束参数设置与分配规则也有所区别。现阶段农业多机任务分配常用模型与算法主要包括马尔科夫决策模型[80]、有限状态机[81]、遗传算法[82]、蚁群算法[83]、深度强化学习[84]等，其中遗传算法与蚁群算法因寻优能力强、收敛稳定性好、适配多约束农机协同场景等优势，在农田多机任务分配研究中应用最为广泛。

综上所述，虽然在农机调度与任务分配方面取了长足的进展，但当前农机任务分配技术主要为静态集中式，在动态农田环境下鲁棒性和可靠性会明显降低。此外，静态集中式的农机任务分配技术存在明显不足，即在其技术实施之前需要获取关于农田环境和作业任务的全局知识，无法做到像分布式农机任务分配那样，既确保每台农机适应任何未知陌生农田环境，又保障了每台农机在当前作业机群中的独立性。

2.3　运动控制

农机运动控制技术作为实现农机自动驾驶关键

技术之一,直接决定着农机自主作业质量及效率。农机装备首先通过其自身农田环境感知系统动态获取当前作业环境、自身状态及目标信息后,接着借助电机、液压等执行机构,实时精确调整农机运动状态,使其在非结构化的复杂农田环境下沿着所规划的作业路径平稳行驶,完成既定的田间作业任务,例如旋耕、播种、喷药、收获等。根据系统功能和任务目标进行划分,农机的运行控制系统可以细分为决策控制、转向控制、速度控制以及协同控制 4 个子系统。

2.3.1 决策控制

决策控制作为农机装备智能导航的关键技术环节,核心功能是从周围复杂的农田环境中解析出当前农机横向姿态的调整方向与任务目标,进而为下一步农机装备的转向控制提供精准技术支撑,如图 8 所示。早期受限于控制器的算力,在农机的决策控制方面通常采用比例-积分-微分控制(PID)、模型预测控制、重复控制等传统算法。其中,比例-积分-微分控制凭借结构简单、参数易于整定、动态响应快、鲁棒性强且工程实现便捷等优势,在农机决策控制领域应用最为广泛。然而,此类算法结构单一,应用在非线性、大惯性的农机装备和复杂动态农田环境时,鲁棒性差的问题尤为突出。

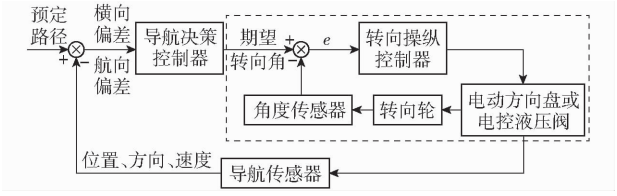


图 8 农机转向控制系统组成图

Fig. 8 Schematic diagram of agricultural machine auto-steering system

由此可见,在农机装备的决策控制环节,仅依赖结构单一传统控制算法,既难以满足实际农业生产需要,更无法适配后期无人农场的建设和智慧农业的发展趋势。其有效的解决路径,在于以传统算法为基础,充分融合现代智能算法的技术优势,来进一步攻克农机装备的非线性、大惯性等技术难题。

2.3.2 转向控制

农机转向系统作为农机自主导航系统的核心子系统,其能保障农机装备能在复杂多变的农田环境中,沿着预先规划的作业路径平稳行驶,完成既定的作业任务。由于泥泞、坡地、坑洼等极端恶劣地形会使轮胎产生侧滑、农机车身侧移下陷等问题,其严重干扰农机转向系统的响应速度、控制精度和可靠性。故此,农机转向系统需要以姿态感知系统和环境感知系统作为依托。例如,姿态感知系统中的惯性测量单元可以实时获悉当前时刻农机航向角、俯仰角、滚动角、速度等姿态信息,为农机转向控制提供当前农机基本的姿态信息。此外,环境感知系统中的激光雷达、相机等传感器则可以动态获取当前周围环境信息,例如田埂、坑洼、土堆等障碍物位置大小信息和作物行位置信息,为农机行驶方向的调整提供具体决策依据。面对复杂严苛的农田环境,农机运动学模型的准确度直接决定了其转向系统的鲁棒性和稳定性。常见的运动学模型有自行车二轮车模型[43]、阿克曼四轮车模型[85]、履带差速模型[86]和拖拉机牵引模型[87],具体如表 9 所示。此外,根据执行驱动机构的不同,农机转向系统可以细分为液压式转向控制系统[50]和电机式转向控制系统[88]。液压方向盘具有输出扭矩大、技术成熟和可靠性高等优点,但存在响应速度慢、反馈灵敏度低、系统结构复杂以及后期改装困难等问题;相比之下,电动方向盘响应速度快、控制精度高、结构简单且便于农机改装,但其输出扭矩相对有限,在大负载转向工况下适用性受到一定限制。

表 9 农机运动学模型分类

Tab. 9 Classification of agricultural machine kinematic models

种类	适用机型	优点	缺点	文献序号
自行车二轮车模型	低速农业机器人	结构简单,便于进行运动学分析和控制算法设计	忽略了车身侧滑倾等因素,模型精度低,适用场景有限	[43]
阿克曼四轮车模型	轮式拖拉机、轮式收获机等	高速行驶时,有较好的转弯稳定性和精度,尤其适用后驱农机	要求较大的转弯空间,且转向驱动机构复杂,研制成本高	[85]
履带差速模型	履带式收获机等	适用多种地形,在泥泞等极端农田环境中,有优异的移动能力	相较于轮式模型,其行驶速度相对较低,且模型构建复杂	[86]
拖拉机牵引模型	拖拉机-运粮车等	模拟拖拉机与牵引设备之间的动力学关系,优化二者之间协同性能	模型构建复杂,且通用性差	[87]

不同农机类型与田间作业环境,对应的运动学模型及转向驱动特性存在一定差异。为此,国内外学者针对不同农机的运动特征与转向形式,开展了大量转向控制算法的设计与优化研究。目前农机转向控制常用方法主要包括比例-积分-微分控制[45]、自适应纯追踪算法[43]、前馈补偿算法[86]、预瞄跟踪算法[89]、粒子群优化算法[87]及卡尔曼滤波[90]等。相比于其他算法,其中比例-积分-微分(PID)控制

凭借结构简洁、参数整定便捷、动态响应稳定、工程实用性强且能够有效抑制作业扰动的优势，在农机转向与轨迹跟踪控制领域得到最为广泛的应用。

总体来讲，相比于液压式转向系统的复杂安装过程，电机式转向系统的安装便捷、动态响应快速、转向分辨率高、可靠性高等特点，使其成为农机无人驾驶系统的核心部件，满足当前农机后装的广大市场需求。此外，虽然当前单台农机的横向姿态控制的研究取得了长足的进展，但是仍能清晰看到农机-牵引机具的转向协同控制的研究仍相对匮乏。随着无人农场建设的不断推进和人工智能技术发展，会逐步填补相应领域的技术空白。

2.3.3　速度控制

无论是犁地、播种、喷药、收获、除草中的任何一种作业任务，作业速度都是农机自主导航的核心要素，直接决定着作业质量、作业效率、油耗、元器件损耗等。过高的作业速度会直接降低作业质量和燃油经济性，加剧设备损耗。例如，速度过快导致播种机株距不均匀、收获机谷物破碎率过高、植保机喷药不均匀等一系列作业质量问题。过低的作业速度则会导致设备利用率降低，激增用工成本。根据控制方式和适用场景的不同，农机速度控制系统可细分为手动调速系统、定速巡航系统、地形自适应调速系统和作业协同调速系统，具体如表 10 所示。当前应用最为广泛的农机作业速度控制系统为定速巡航控制系统，该系统包含液压驱动、机械传动和电子控制电路。

表 10　农机速度控制系统分类

Tab. 10　Classification of agricultural machine speed control system

系统类型	适用场景	核心优势	主要局限	文献序号
手动调速系统	小型农机、简单作业	成本低、维护简单	精度低、劳动强度大	[50]
定速巡航系统	平整地块长距离匀速作业	降低驾驶强度、省油	不适应复杂地形和负载波动	[91]
地形自适应调速系统	丘陵山地等复杂地形	提升通过性和安全性	成本高、依赖传感器性能	[92]
作业协同调速系统	高精度播种、植保、收获作业	保障作业质量稳定性	系统复杂、需匹配作业特性模型	[93]

为提升农机装备对非结构化复杂农田作业环境的适应性，国内外学者相继研发了多种高性能速度控制算法，主要包括模糊控制[44]、灰色预测控制[91]、双环控制[94]、比例-积分-微分控制[93]、遗传算法[95]、灰狼算法[96]、模拟退火算法[97]、自适应前馈控制[86]及扰动观测法[98]等。相较于其余智能控制策略，比例-积分-微分(PID)控制具备架构清晰、参数整定简便、动态控制效果优良、抗环境扰动能力突出、工程实用性与通用性强等显著特点，在智能农机装备领域中得到了最为广泛的应用与推广。

综上所述，无论是从农机装备速度调节的操纵灵活性角度，还是其可靠性、鲁棒性等角度，当前农机速度控制技术的研究都取得了巨大的发展，为当前无人农场的建设和推广提供了先进技术范例。然而，仍能清晰看到，当前农机装备的速度控制通常采用“调整发动机转速、传动比保持不变”的方式。由于所涉及的控制变量少，此类速度控制系统往往简单可靠。但是，相比于“发动机转速和传动比协同调整”的复杂控制策略，单变量速度控制系统在发动机利用率和燃油经济性等方面略显不足。此外，为了进一步推动农机无人驾驶、农业机群协同作业和农机跨区作业等技术相继示范与应用落地，农机速度控制系统作为农机系统关键组成部分，应充分考虑当前周围农田环境、农机机群整体作业进展、作物种植农艺、燃油经济性等多方因素，进行动态智能调节，实现农田环境下的变速巡航。

2.3.4　协同控制

传统单台农机的作业模式存在与其他农机作业任务衔接不畅、作业路径重复、机群作业效率低下等诸多问题。为此，多农机协同作业控制技术应运而生。农机协同控制技术以农机机群作为控制对象，而实现机群内部各个农机之间的动作步调一致，需要借助通信网络实时共享农机运动姿态、作业环境、作业任务等信息。当前，农机协同控制技术主要分为两大类，即主-从式多机协同控制技术和分布式多机协同控制技术。在主-从式多机协同控制技术中，往往有一台农机作为主机，机群中的其他农机则为从机，协助主机完成相应特定作业任务。主-从式多机协同技术通常应用于异种农机之间，常见的案例有“联合收获机-运粮车协同收获作业”。在分布式多机协同控制中，所有农机在机群中的优先级一致，其所执行的作业任务取决于当前作物类别、地形、农机工况、农田位置等一系列因素，且最终统一由云端服务器通过通信网络下发至每台农机。分布式多机协同控制技术通常应用于同种农机之间，常见的案例有“多台联合收获机协同收获作业”。针对不同农机运动学模型之间的差异，以及不同农田之间地形土壤差别，各类协同导航控制算法呈现出不同优势和特点，具体如表 11 所示。

当前农机路径跟踪与协同导航相关研究，主要聚焦于单机路径跟踪精度优化、多机协同控制策略

表 11 农机协同控制算法分类

Tab. 11 Classification of agricultural machine collaborative control algorithms

控制方法	优点	缺点	适用系统	文献序号
比例-积分-微分控制	鲁棒性强、算法简单、实时性强	参数整定困难,且严重依靠人工经验	线性系统	[99]
线性二次型调节控制	可保证目标的全局最优性、无需对复杂系统进行变量解耦设计	无法直接处理非线性系统、严重依赖系统模型构建精度、计算复杂度高	线性系统	[50]
纯追踪控制	算法逻辑简单、计算开销低、鲁棒性好	对传感器定位精度要求高、性能优化困难	非线性系统	[100]
滑模控制	动态响应快、工程实现成本低、模型结构简单	依赖设计经验、部分场景存在抖动现象	非线性系统	[101]
模型预测控制	支持多变量耦合系统、抗扰动能力强、实时性强	计算开销大、建模困难、工程调试困难	非线性系统	[102]
模糊控制	无需建立精确数学模型、抗干扰能力强、算法结构简单	控制精度有限、参数整定严重依赖经验	非线性系统	[103]
最优控制	适合多变量复杂系统、鲁棒性强	模型精度要求高、计算复杂度高	非线性系统	[104]

改进及收获作业效率提升三大核心方向。算法层面,国内外学者普遍采用连续时间马尔科夫链[80]、Stanley 算法[105]、模糊控制[100]、反馈线性化[101]、PID 控制[102]、滑模控制[101]、纯追踪算法[106]及模型预测控制[102]等理论方法,通过强化系统鲁棒性、缩短动态响应时长、补偿田间非线性扰动、优化多机任务调度等方式,全方位提升农机路径跟踪精度与协同作业性能。应用场景层面,现有技术已广泛覆盖电动拖拉机复杂地形轨迹跟踪[105]、联合收获机编队协同作业[101]、主从式农机机群协同控制[102]及果园采摘机器人自主导航[106]等多元化农业作业场景。总体而言,现有优化方法可将农机横向、纵向跟踪误差及机群跟随距离误差控制在厘米级精度,有效抑制田间作业过程中的农机侧滑、路径偏移问题,减少无效作业时长。由此可见,智能控制与多机协同技术能够显著提升复杂农田环境下农机导航精度、作业稳定性与机群作业利用率,为大田无人协同作业、农机自主导航技术的落地应用奠定了坚实的理论与技术基础。

由上可知,虽然单一的协同控制策略具有计算逻辑简单、工程应用易实现等优势,但其只适用于低速作业场景,且对农田地形和农机种类要求严格,严重制约农机机群的整体作业效率和燃油经济性。因此,仅靠单一的协同控制策略难以在动态农田场景中,高效可靠地完成复杂作业任务。为此,需要综合考虑各个农机的动力学模型特点、农机之间动力学模型的耦合关系、作业需求、农田地形地貌等各方面因素,以优势互补的方式融合多项协同控制技术,例如模型预测控制、线性二次型调节控制等,进而保障和提升整体农机协同导航系统的鲁棒性和可靠性。

3 收获装备作业信息智能管控系统

收获装备作业信息智能管控系统作为现代农业生产技术体系的关键组成部分,直接决定了农机装备的信息化、智能化水平,同时也为后续农户的科学决策提供建设性意见,具体如图 9 所示。结合实际应用场景,收获装备作业信息管理系统大致可以分为收获装备工况与作业质量监测平台、多机协同作业与调度平台、收获装备故障监测与维保管理平台,具体如表 12 所示。从系统架构角度来看,上述平台主要分 Client/Server 和 Browser/Server 两种。前者侧重数据的实时采集与处理,如安装在驾驶舱的车载终端具备实时监测、紧急控制、本地数据存储等系列实时性强的功能;后者侧重于包括收获装备在内农机机群装备管理、协调、调度等智能策略的生成,例如多机协同作业平台、农机跨区域调度作业平台等。从工作原理角度来看,上述平台均采用前后端分离的 Web 技术框架,利用 TCP/IP 通信协议在前端和后端之间实现高速安全通信。前端主要承担数据呈现、人机交互等职责,其主流技术平台有 Qt、Android 等;后端主要承担数据处理、存储等职责,其主流技术平台有 Spring Boot、Django、Node. js 等。

收获装备工况与作业质量监测平台方面,研究重点在于利用传感器技术、无线通信技术和 Web 服务技术,实现收获装备运行状态与作业参数的实时采集、远程传输和智能分析。现有研究通过集成 MQTT[107]、B/S 架构[110]、RFID[111]、ZigBee[112]等通信技术,构建了面向联合收获机、拖拉机等农业装备的远程监测系统,实现了速度、油耗、位置、作业面积、设备状态等关键参数的动态监控。同时,结合云计算和大数据处理技术,实现了收获装备作业数据存储、分析及作业质量评价,提高了农业装备的信息化管理水平。例如,基于 Hadoop 分布式计算[113]的远程监控平台能够有效提升海量农机数据处理能力,为农机精准管理和智能决策提供数据支撑。

多机协同作业和调度平台方面,针对现代农业

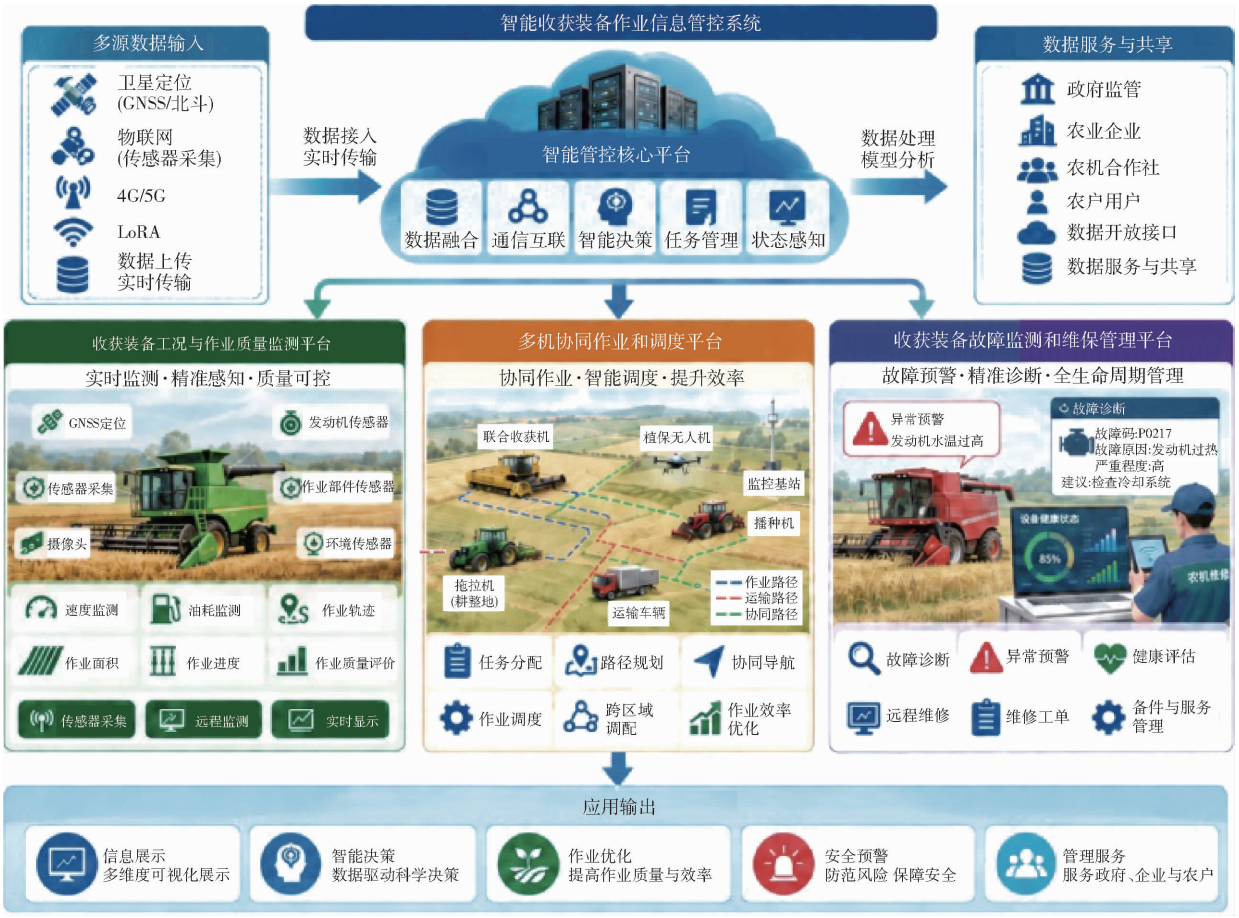


图 9　收获装备作业信息智能管控系统

Fig. 9　Intelligent management system for harvesting machinery

表 12　智能收获装备信息管理系统分类

Tab. 12　Classification of information management systems for harvesting machinery

信息管理平台	功能	优势	文献序号
收获装备工况与作业质量监测平台	动态监测农机位置、工况参数、作业质量评估与追溯、作业计划制定等	提供决策支持、保证作业质量、降低管理成本等	[107]
多机协同作业与调度平台	作业任务智能规划、作业路径优化、农机跨区域调度等	提升作业效率、降低运营成本、保证作业质量等	[108]
收获装备故障监测与维保管理平台	可视化监测农机运行状况、农机故障溯源、维保资源调度等	加快故障处理进程、降低设备故障风险	[109]

生产规模化、集约化发展需求以及农作物短收获窗口期带来的高效率作业需求，研究者逐渐突破传统单机作业模式，开展了包括智能收获装备在内的农机群协同导航与智能调度研究。相关平台综合利用环境感知、通信网络、WebGIS、路径规划和智能优化算法，实现农机任务分配、作业路径规划、协同导航和作业质量评估等功能。在算法方面，遗传算法[114]、Dijkstra 算法[108]、人工鱼群算法[115]等被广泛应用于农机路径优化和任务调度，有效降低了机群作业路径成本，提高了农机利用率和整体作业效率。此外，多机协同平台通过实时获取农机位置和状态信息，实现收获装备与非收获装备之间的信息交互与协同控制，为大规模农业生产提供了技术支撑。

收获装备故障监测和维保管理平台方面，研究重点由传统人工巡检方式向智能化故障诊断和预测维护方向发展。该类平台融合物联网、云计算、人工智能和故障诊断算法，实现收获装备运行状态实时监测、异常识别、故障定位以及维修资源调度。现有研究利用支持向量机[116]、神经网络[117]等方法，提高了农机关键部件故障诊断和预测能力。同时，通过 WiFi[118]、CAN 总线[119]等通信技术，实现发动机、传动系统等关键部件运行参数采集与远程监控，有效减少设备停机时间，提高农业装备可靠性。

总体来看，当前智能收获装备管理平台已形成覆盖作业状态感知、机群协同调度以及设备健康管理的综合技术体系。其中，工况与作业质量监测平台为智能化运行提供数据基础，多机协同作业和调度平台提高了农业生产组织效率，故障监测与维保平台保障了收获装备长期稳定运行。然而，现有研

究仍主要集中于单一功能模块优化,在复杂农田环境下多源信息融合、自主决策、跨平台协同以及高可靠智能控制等方面仍存在不足。未来需要进一步融合机器视觉、数字孪生、边缘计算和智能决策技术,构建更加自主、高效、可靠的智能收获装备综合管理体系。

虽然当前智能收获装备信息管理系统取得了长足的发展,但在标准化、智能化方面存在一定缺陷。在标准化方面,每个农机厂商、科研院所独自研制农机信息管理系统,彼此之间无法完成适配,造成通用性差。在智能化方面,以收获装备故障为例,收获装备作为非线性复杂系统,其故障往往为并发、耦合。然而当前故障预测算法功能单一,仅能监测若干故障类型,且故障定位不清晰,严重降低农机维保效率。

4 展望

本文对当前智能收获装备关键技术的研究进展进行全面综述,分别介绍了产量监测系统、导航控制系统以及作业信息管理系统的结构组成、技术原理、作用地位及优势不足。从系统功能的角度来看,三者并非彼此独立,而是存在紧密的耦合关系,形成一套完整的生产技术体系,秉承“感知-控制-管控”的内在功能逻辑。其中,产量监测系统扮演着“感知收获作业动态”的角色,导航控制系统肩负着“根据当前收获作业动态来实现最佳收获效率”的任务,农机装备作业信息智能管控系统担负着“将当前收获作业场景全要素反馈给农户以供后续科学决策”的责任。

结合当前智能收获装备关键技术的研究进展和局限性,梳理现有技术研究基础和实际生产需求,同时对未来的研究方向进行展望:

(1)产量监测系统主要由谷物流量传感器、割幅传感器、谷物含水率传感器及其他传感器组成。其中,谷物流量传感器作为该系统的核心器件,直接关系到产量监测系统的性能表现。当前,主流的谷物流量传感器有冲量式和光电式。冲量式谷物流量传感器结构紧凑和易维护,但因地面颠簸和机械振动难以测量微弱谷物流量,且打击板经长期使用因机械损伤会造成性能老化。反观光电式谷物流量传感器虽可以实现对微弱谷物流量的测量,但因农田灰尘需要频繁人工清洁光电测量镜头。将来的谷物流量传感器应充分融合冲量式和光电式的优势,保证结构紧凑简单和免维护的同时,实现对微弱谷物流量的测量。其次,我国幅员辽阔,每个地区的气候、地形条件和作物种类也有所区别,谷物流量模型的构建应充分综合收获区域的土壤、地形、气候、作物品种、谷物流量的填充延迟时间、机械振动及其他一系列关键因素,确保产量监测的可靠性、准确性以及有效性。

(2)导航控制系统作为智能收获装备技术体系的重要组成部分,直接决定了收获期间的效益,其主要由定位测姿、环境感知、路径规划、任务分配,以及运动控制组成。经过多年的研究,农机装备的定位测姿和运动控制因技术成熟、可靠,已在行业内大面积落地应用。反观,在环境感知、路径规划和任务分配方面,则需要继续克服相关技术难题。当前,环境感知技术在复杂农田环境的识别准确率严重依赖大模型的训练样本数据,训练样本越多,识别的准确率就越准确。可现实问题是,农田动态环境千变万化,无法逐一取样来进行训练。为此环境感知大模型可以采用对抗生成网络或其他人工智能算法来扩充训练数据集,或半监督或弱监督学习,进而实现仅用有限的样本数量,甚至零样本,便能极大地提高大模型对未知农田环境的泛化能力。在路径规划方面,其在局部环境下的动态调整能力受限于传感器性能和算力,尤其是当动态障碍物出现在非结构化的农田环境时。为了求解路径规划最优解,需要通过融合激光雷达、可见光相机、毫米波雷达等一系列数据,来准确还原真实的农田环境,并从中提取动态障碍物的色彩信息、形状大小、种类、速度、运动轨迹等特征。所提取的特征信息越丰富,路径规划的动态调整鲁棒性越强。此外,在规模化种植趋势下,任务分配技术应突破地域限制,将分散零星的农机资源充分整合起来,从市级乃至省级层面进行统筹调配,避免因农时延误导致减产歉收。

(3)智能收获装备作业信息管理系统担负着“将当前收获作业场景全要素反馈给农户以供后续科学决策”的责任,其不应仅仅局限于作业动态管理,而是与农艺和农资进行深度融合,打破单一农业生产技术所带来的“孤岛效应”。为此,可以借助数字化技术和通信网络打通农机、农艺及农资之间的数据链,同时利用大数据和大模型技术从海量数据中提取关键特征信息,为农户的科学决策提供数据支撑,进而实现农业生产“降本、提质、增效”的目的。

(4)在现有收获装备的基础上,增设品质检测传感器和接入农机智慧大模型,可使其突破传统技术体系的局限,朝着更完备、更智能的方向升级。一方面,近红外光谱传感器等专用品质检测设备,能够实时精准检测收获作物或果实的蛋白质、淀粉、糖分等核心品质指标,为后续的作物分级、仓储管理、精深加工等环节提供科学的数据支撑,推动农产品从“收获”到“利用”的全链条精细化管控。另一方

面，从农业生产全流程视角来看，农机智慧大模型可搭建起智能收获装备与旋耕、播种、施肥、喷药等其他作业环节技术体系之间的数据互通桥梁，有效打破各环节的“数据孤岛”，实现生产数据的高效流转与协同应用，进而显著降低农业生产的整体运营成本，提升农业生产的智能化与集约化水平。

参 考 文 献

[1] 王宁，韩雨晓，王雅萱，等. 农业机器人全覆盖作业规划研究进展[J]. 农业机械学报，2022，53(增刊 1)：1－19.
Wang Ning, Han Yuxiao, Wang Yaxuan, et al. Research progress of agricultural robot full coverage operation planning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 1－19. (in Chinese)

[2] 李新成，李民赞，王锡九，等. 谷物联合收割机远程测产系统开发及降噪试验[J]. 农业工程学报，2014，30(2)：1－8.
Li Xincheng, Li Minzan, Wang Xijiu, et al. Development and denoising test of grain combine with remote yield monitoring system[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 1－8. (in Chinese)

[3] 甘龙辉. 基于高频电磁波的谷物水分测量研究[D]. 大庆：黑龙江八一农垦大学，2013.
Gan Longhui. Research on grain moisture measurement based on high frequency electromagnetic wave [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2013. (in Chinese)

[4] 刘仁杰. 谷物产量自动监测系统优化及数据空间分析研究[D]. 北京：中国农业大学，2022.
Liu Renjie. Optimization and data spatial analysis of automatic grain yield monitor[D]. Beijing: China Agricultural University, 2022. (in Chinese)

[5] 陈树人，杨洪博，李耀明，等. 双板差分冲量式谷物流量传感器性能试验[J]. 农业机械学报，2010，41(8)：171－174.
Chen Shuren, Yang Hongbo, Li Yaoming, et al. Experiment of dual-plates differential impact-based grain flow sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 171－174. (in Chinese)

[6] 韩帅军，陈进，鲍丙豪. 基于激光对射阵列的谷物流量监测装置研究[J]. 农机化研究，2020，42(10)：1－6.
Han Shuaijun, Chen Jin, Bao Binghao. Research on grain flow monitoring device based on laser array[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(10): 1－6. (in Chinese)

[7] 付兴兰，张兆国，安晓飞，等. 光电漫反射式联合收割机谷物产量计量系统研发与性能试验[J]. 农业工程学报，2017，33(3)：24－30.
Fu Xinglan, Zhang Zhaoguo, An Xiaofei, et al. Development and performance experiment on grain yield monitoring system of combine harvester based on photoelectric diffuse reflectance[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 24－30. (in Chinese)

[8] 曾宏伟，雷军波，陶建峰，等. 基于单目视觉的谷物联合收获机产量测量方法[J]. 农业机械学报，2021，52(12)：281－289.
Zeng Hongwei, Lei Junbo, Tao Jianfeng, et al. Yield monitoring for grain combine harvester based on monocular vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 281－289. (in Chinese)

[9] 田国政，汪懋华，黄季平. 核子式谷物产量自动测量方法[J]. 中国农业大学学报，2000，5(4)：35－38.
Tian Guozheng, Wang Maohua, Huang Jiping. Study on nuclear grain yield auto-monitoring method[J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(4): 35－38. (in Chinese)

[10] 耿端阳，谭德蕾，苏国梁，等. 压力式谷物产量监测系统优化与试验验证[J]. 农业工程学报，2021，37(9)：245－252.
Geng Duanyang, Tan Delei, Su Guoliang, et al. Optimization and experimental verification of grain yield monitoring system based on pressure sensors[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 245－252. (in Chinese)

[11] 童浩，魏新华，姜娅，等. 旋抛式谷物流量测产装置设计与试验[J]. 农机化研究，2025，47(5)：102－108.
Tong Hao, Wei Xinhua, Jiang Ya, et al. Design and experimental of rotary throwing grain flow yield measurement device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(5): 102－108. (in Chinese)

[12] Wagner L E, Schrock M D. Yield determination using a pivoted auger flow sensor[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(2): 409－413.

[13] He W, Jing T H, Lei G, et al. Development and optimization of a novel grain flow sensor based on PVDF piezoelectric film [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(4): 141－150.

[14] 吕佐朝，邱白晶，房义军，等. 承载板式谷物质量流量传感器设计与试验[J]. 农业机械学报，2011，42(增刊 1)：90－93，25.
Lü Zuochao, Qiu Baijing, Fang Yijun, et al. Design and experiment of load plate grain mass flow sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(S1): 90－93，25. (in Chinese)

[15] 胡夏夏，赵梦晨，杜晓飞，等. 基于声学黑洞的谷物流量传感器支架减振优化[J]. 安徽农业大学学报，2024，51(3)：523－529.
Hu Xiaxia, Zhao Mengchen, Du Xiaofei, et al. Damping and optimization of grain flow sensor gantry based on acoustic black hole[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2024, 51(3): 523－529. (in Chinese)

[16] 周俊，刘成良. 平行梁冲量式谷物质量流量传感器弹性元件设计[J]. 农业工程学报，2007，23(4)：110－114.
Zhou Jun, Liu Chengliang. Load cell design for parallel beam impact-based grain mass sensor[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(4): 110－114. (in Chinese)

[17] 胡均万，罗锡文，阮欢，等. 双板差分冲量式谷物流量传感器设计[J]. 农业机械学报，2009，40(4)：69－72.

Hu Junwan, Luo Xiwen, Ruan Huan, et al. Design of a dual-plate differential impact-based yield sensor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 69 - 72. (in Chinese)

[18] 魏新华,张进敏,但志敏,等. 冲量式谷物流量传感器测产信号处理方法[J]. 农业工程学报,2014,30(15):222 - 228.
Wei Xinhua, Zhang Jinmin, Dan Zhimin, et al. Signal processing method of impact-based grain flow sensor for predicted yield [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 222 - 228. (in Chinese)

[19] 胡均万,罗锡文,陈树人,等. 机身倾斜导致谷物流量传感器零点漂移的补偿[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):57 - 60.
Hu Junwan, Luo Xiwen, Chen Shuren, et al. Zero-drift compensation of impact-based grain flow sensor for tilted combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(S): 57 - 60. (in Chinese)

[20] Zhou J, Cong B, Liu C. Elimination of vibration noise from an impact-type grain mass flow sensor[J]. Precision Agriculture, 2014, 15(6): 627 - 638.

[21] Chai X Y, Zhang P T, Hu J P, et al. Development and experimentation of a universal array-style grain flow sensor for multiple crops based on random forest flow regression model[J]. Electronics, 2024, 13(23): 4791.

[22] 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 Zeyu. Design and experiment of yield monitoring system for rice combine harvester[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. (in Chinese)

[23] 赵湛,雷朝鹏,李洪昌,等. 基于近红外光电效应的联合收获机谷物厚度测量方法[J]. 农业机械学报,2019,50(9):381 - 386.
Zhao Zhan, Lei Chaopeng, Li Hongchang, et al. Grain thickness sensor for combine harvester grain flow measurement based on near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 381 - 386. (in Chinese)

[24] Yin J, Zhao Z, Lei C, et al. Improved optical-type measurement method of grain flow using array near-infrared photoelectric sensors[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 183: 106075.

[25] 徐海洋. 基于光电对射阵列的联合收获机谷物流量监测装置的研究[D]. 镇江:江苏大学, 2022.
Xu Haiyang. Research on grain flow monitoring device of combine harvester based on photoelectric array[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)

[26] 安晓飞,付兴兰,孟志军,等. 光电信号与收割机谷物产量数据转换模型的构建与验证[J]. 农业工程学报,2017,33(增刊):36 - 41.
An Xiaofei, Fu Xinglan, Meng Zhijun, et al. Grain yield data transformation model based on photoelectric principle and its validation [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(S): 36 - 41. (in Chinese)

[27] 尹文庆,浦浩,胡飞,等. 基于结构光视觉的联合收获机谷粒体积流量测量方法[J]. 农业机械学报,2020,51(9):1 - 9.
Yin Wenqing, Pu Hao, Hu Fei, et al. Measurement method of grain volume flow based on structured light[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 1 - 9. (in Chinese)

[28] 杨刚,雷军波,刘成良,等. 基于线结构光源和机器视觉的高精度谷物测产系统研制[J]. 农业工程学报,2019,35(8):21 - 28.
Yang Gang, Lei Junbo, Liu Chengliang, et al. Development of yield monitoring system with high-precision based on linear structured light source and machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 21 - 28. (in Chinese)

[29] Bidese-Puhl R, Butts C L, Rewis M, et al. An mmWave radar-based mass flow sensor using machine learning towards a peanut yield monitor[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 215: 108340.

[30] 曾宏伟,雷军波,陶建峰,等. 低对比度条件下联合收割机导航线提取方法[J]. 农业工程学报,2020,36(4):18 - 25.
Zeng Hongwei, Lei Junbo, Tao Jianfeng, et al. Navigation line extraction method for combine harvester under low contrast conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(4):18 - 25. (in Chinese)

[31] 程尚坤. 玉米籽粒收获机辅助收获关键技术研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2023.
Cheng Shangkun. Research on key technologies of maize seed harvesters for assisted harvesting[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[32] 尚业华,王昊,孟志军,等. 基于激光雷达的稻麦收获边界检测与自动对齐系统研究[J]. 农业机械学报,2023,54(5):19 - 28,46.
Shang Yehua, Wang Hao, Meng Zhijun, et al. Rice and wheat harvesting boundary detection and automatic alignment system based on LiDAR[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 19 - 28, 46. (in Chinese)

[33] 柴宗文,王克如,郭银巧,等. 玉米机械粒收质量现状及其与含水率的关系[J]. 中国农业科学,2017,50(11):2036 - 2043.
Chai Zongwen, Wang Keru, Guo Yinqiao, et al. Current status of maize mechanical grain harvesting and its relationship with grain moisture content[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(11):2036 - 2043. (in Chinese)

[34] 杨明金,刘恩谷,武逸凡,等. 薄层热风干燥过程含水率在线测量装置研制与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(4):47 - 56.
Yang Mingjin, Liu Engu, Wu Yifan, et al. Development and experiments of an online moisture content measuring device in thin layer hot-air drying process[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(4): 47 - 56. (in Chinese)

[35] 陈进,王月红,练毅,等.高频电容式联合收获机谷物含水量在线监测装置研制[J].农业工程学报,2018,34(10):36－45.
Chen Jin, Wang Yuehong, Lian Yi, et al. Development of on-line monitoring device of grain moisture content in combine harvester with high frequency capacitance[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10):36－45. (in Chinese)

[36] 张伟,杨刚,雷军波,等.基于微波反射法的谷物含水率在线检测装置研制[J].农业工程学报,2019,35(23):21－28.
Zhang Wei, Yang Gang, Lei Junbo, et al. Development of on-line detection device for grain moisture content using microwave reflection method[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(23):21－28. (in Chinese)

[37] 李长友.稻谷干燥含水率在线检测装置设计与试验[J].农业机械学报,2008,39(3):56－59.
Li Changyou. Design and experiment of on-line moisture content metering device for paddy drying process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):56－59. (in Chinese)

[38] Yan J, Tian H, Wang S, et al. Paddy moisture on-line detection based on ensemble preprocessing and modeling for combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107050.

[39] 张越,赵进,赵丽清,等.基于介电特性谷物水分在线测量仪的设计与试验[J].中国农机化学报,2020,41(5):105－110.
Zhang Yue, Zhao Jin, Zhao Liqing, et al. Design and experiment of on-line measuring instrument for grain moisture based on dielectric properties[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 105－110. (in Chinese)

[40] Amoodeh M T, Khoshtaghza M H, Minaei S. Acoustic on-line grain moisture meter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 52(1－2): 71－78.

[41] 芦兵,孙俊,杨宁,等.基于 SAGA－SVR 预测模型的水稻种子水分含量高光谱检测[J].南方农业学报,2018,49(11):2342－2348.
Lu Bing, Sun Jun, Yang Ning, et al. Hyperspectral detection for moisture in rice seeds by SAGA－SVR prediction model[J]. Journal of Southern Agriculture, 2018,49(11): 2342－2348. (in Chinese)

[42] 黄培奎,吴培添,许超锐,等.谷物联合收获机压力式在线测产系统设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(12):311－321.
Huang Peikui, Wu Peitian, Xu Chaorui, et al. Design and experiment of pressure type online yield measurement system for grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12):311－321. (in Chinese)

[43] 何创新,巩蕾,苗中华,等.基于平行轨迹导航的采棉机自动对行控制方法[J].农业机械学报,2024,55(6):34－41.
He Chuangxin, Gong Lei, Miao Zhonghua, et al. Automatic row-follow control method for cotton picker based on parallel trajectory navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 34－41. (in Chinese)

[44] Chen J, Ning X, Li Y, et al. A fuzzy control strategy for the forward speed of a combine harvester based on KDD[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2017, 33(1): 15－22.

[45] 刘梓博,陈羽立,徐梓峰,等.基于双变量限幅 PID 算法的四轮差速转向 AGV 导航控制系统[J].农业工程学报,2025,41(5):27－37.
Liu Zibo, Chen Yuli, Xu Zifeng, et al. Four-wheel differential steering AGV navigation control system based on double variable limiters PID algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(5):27－37. (in Chinese)

[46] 王法安,王博洋,张兆国,等.基于伪距及多普勒频移的改进 GNSS 定位算法研究[J].农业机械学报,2024,55(增刊 1):51－60.
Wang Faan, Wang Boyang, Zhang Zhaoguo, et al. Improved GNSS positioning algorithm based on pseudorange and Doppler frequency shift[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S1):51－60. (in Chinese)

[47] 袁洪良,杨浚宇,唐睿,等.基于低成本惯导和运动约束的农机高精度定位系统研究[J].农业机械学报,2023,54(7):17－25.
Yuan Hongliang, Yang Junyu, Tang Rui, et al. High-precision localization of autonomous agricultural machinery using low-cost IMU and motion constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7):17－25. (in Chinese)

[48] 杨子涵,谷远洋,郭志强,等.大型联合收获机田间作业工况轮耦合试验方法研究[J].农业机械学报,2025,56(8):303－313.
Yang Zihan, Gu Yuanyang, Guo Zhiqiang, et al. Wheel coupling testing method for field operating conditions of large combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(8):303－313. (in Chinese)

[49] 张凯良,胡勇,杨丽,等.玉米收获机自动对行系统设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(2):103－114.
Zhang Kailiang, Hu Yong, Yang Li, et al. Design and experiment of auto-follow row system for corn harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 103－114. (in Chinese)

[50] 张漫,季宇寒,李世超,等.农业机械导航技术研究进展[J].农业机械学报,2020,51(4):1－18.
Zhang Man, Ji Yuhan, Li Shichao,et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(4):1－18. (in Chinese)

[51] 王侨,刘卉,杨鹏树,等.基于机器视觉的农田地头边界线检测方法[J].农业机械学报,2020,51(5):18－27.
Wang Qiao, Liu Hui, Yang Pengshu, et al. Detection method of headland boundary line based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):18－27. (in Chinese)

[52] 李景彬,陈兵旗,刘阳,等. 采棉机视觉导航路线图像检测方法[J]. 农业工程学报,2013,29(11):11 - 19.
Li Jingbin, Chen Bingqi, Liu Yang, et al. Detection for navigation route for cotton harvester based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(11): 11 - 19. (in Chinese)

[53] 张岩,潘胜权,解印山,等. 相机与毫米波雷达融合检测农机前方田埂[J]. 农业工程学报,2021,37(15):169 - 178.
Zhang Yan, Pan Shengquan, Xie Yinshan, et al. Detection of ridge in front of agricultural machinery by fusion of camera and millimeter wave radar[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(15):169 - 178. (in Chinese)

[54] 蔡道清,李彦明,覃程锦,等. 水田田埂边界支持向量机检测方法[J]. 农业机械学报,2019,50(6):22 - 30.
Cai Daoqing, Li Yanming, Qin Chengjin, et al. Detection method of boundary of paddy fields using support vector machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6):22 - 30. (in Chinese)

[55] Gan S, Yu G, Ma Z, et al. Irregular ridge boundary line extraction in paddy fields based on MS - BiSeNetV2 and criss-cross search[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 236: 110467.

[56] Li D, Li B, Long S, et al. Robust detection of headland boundary in paddy fields from continuous RGB - D images using hybrid deep neural networks[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 207: 107713.

[57] Zhang L, Li M, Zhu X, et al. Navigation path recognition between rows of fruit trees based on semantic segmentation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 216: 108511.

[58] 魏新华,张敏,刘青山,等. 基于双目视觉的田间作物高度和收割边界信息提取[J]. 农业机械学报,2022,53(3):225 - 233.
Wei Xinhua, Zhang Min, Liu Qingshan, et al. Extraction of crop height and cut-edge information based on binocular vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3):225 - 233. (in Chinese)

[59] 杜小强,李卓林,马锃宏,等. 基于空间注意力和可变形卷积的无人机田间障碍物检测[J]. 农业机械学报,2023,54(2):275 - 283.
Du Xiaoqiang, Li Zhuolin, Ma Zenghong, et al. UAV field obstacle detection based on spatial attention and deformable convolution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2):275 - 283. (in Chinese)

[60] 尚业华,张光强,孟志军,等. 基于欧氏聚类的三维激光点云田间障碍物检测方法[J]. 农业机械学报,2022,53(1):23 - 32.
Shang Yehua, Zhang Guangqiang, Meng Zhijun, et al. Field obstacle detection method of 3D LiDAR point cloud based on Euclidean clustering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1):23 - 32. (in Chinese)

[61] 薛金林,程峰,汪冰清,等. 基于无效目标滤除的毫米波雷达农田障碍物检测方法[J]. 农业机械学报,2023,54(4):233 - 240.
Xue Jinlin, Cheng Feng, Wang Bingqing, et al. Method for millimeter wave radar farm obstacle detection based on invalid target filtering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4):233 - 240. (in Chinese)

[62] Wang T, Wang N, Xiao J, et al. One-shot domain adaptive real-time 3D obstacle detection in farmland based on semantic-geometry-intensity fusion strategy[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108264.

[63] 代玉梅, 张瑞玲, 马黎. 改进 A* 算法的采摘机器人路径规划与跟踪控制[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(3): 138 - 145.
Dai Yumei, Zhang Ruiling, Ma Li. Path planning and tracking control of picking robot based on improved A* algorithm[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(3): 138 - 145. (in Chinese)

[64] Zhang T, Tang Z, Wang Y, et al. Path planning for citrus harvesting robot based on adaptive parallel-coupled RRT* [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2026, 251: 112035.

[65] Lu E, Zhao X, Ma Z, et al. Robust leader-follower control for cooperative harvesting operation of a tractor-trailer and a combine harvester considering confined space[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(11): 17689 - 17701.

[66] Wang Y, Fu C, Huang R, et al. Path planning for mobile robots in greenhouse orchards based on improved A* and fuzzy DWA algorithms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 227: 109598.

[67] 胡广锐,孔微雨,齐闯,等. 果园环境下移动采摘机器人导航路径优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 175 - 184.
Hu Guangrui, Kong Weiyu, Qi Chuang, et al. Optimization of the navigation path for a mobile harvesting robot in orchard environment[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 175 - 184. (in Chinese)

[68] 郭成洋,刘美辰,高泽宁,等. 基于改进人工势场法的农机避障方法研究[J]. 中国农机化学报,2020,41(3):152 - 157.
Guo Chengyang, Liu Meichen, Gao Zening, et al. Research on agricultural machinery obstacle avoidance method based on improved artificial potential field method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(3):152 - 157. (in Chinese)

[69] 陈澳. 基于改进 RRT* - APF 混合算法的温室农业机器人路径规划研究[D]. 昆明:云南农业大学,2024.
Chen Ao. Research on path planning of greenhouse agricultural robot based on improved RRT* - APF hybrid algorithm[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[70] 戴祯,郭延超,王笑乐,等. 酿酒葡萄收获机自动对行驾驶局部路径动态规划算法[J]. 农业机械学报,2025,56(2):124 - 135.
Dai Zhen, Guo Yanchao, Wang Xiaole, et al. Local path dynamic programming algorithm for automatic row alignment traveling of wine grape harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2):124 - 135. (in

Chinese)

[71] 汪小昂,祁子涵,杨震宇,等. 基于 DAV_DWA 算法的农业机器人局部路径规划[J]. 农业机械学报,2025,56(2):105 - 114.
Wang Xiaochan, Qi Zihan, Yang Zhenyu, et al. Local path planning for agricultural robots based on DAV_DWA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2):105 - 114. (in Chinese)

[72] 何永强,周俊,袁立存,等. 基于履带式联合收获机转向特性的局部跟踪路径规划[J]. 农业机械学报,2022,53(11):13 - 21.
He Yongqiang, Zhou Jun, Yuan Licun, et al. Local tracking path planning based on steering characteristics of crawler-type combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11):13 - 21. (in Chinese)

[73] 鲍秀兰,包有刚,马萧杰,等. 自然环境下柑橘采摘机器人避障规划研究[J]. 农业机械学报,2025,56(2):420 - 428.
Bao Xiulan, Bao Yougang, Ma Xiaojie, et al. Obstacle avoidance planning of citrus picking robot in natural environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 420 - 428. (in Chinese)

[74] 罗承铭,熊陈文,黄小毛,等. 四边形田块下油菜联合收获机全覆盖作业路径规划算法[J]. 农业工程学报,2021,37(9):140 - 148.
Luo Chengming, Xiong Chenwen, Huang Xiaomao, et al. Coverage operation path planning algorithms for the rape combine harvester in quadrilateral fields[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9):140 - 148. (in Chinese)

[75] 张国忠,凌高旻,季超,等. 考虑倒伏与粮仓容积的再生稻头季机收路径规划[J]. 农业工程学报,2024,40(12):33 - 45.
Zhang Guozhong, Ling Gaomin, Ji Chao, et al. Path planning of mechanical harvesting considering the lodging and grain bin capacity for the ratoon rice in main season[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(12):33 - 45. (in Chinese)

[76] 陆健强,陈祖城,兰玉彬,等. 基于改进麻雀搜索算法和贝塞尔曲线的无人农场机器人路径规划方法[J]. 农业机械学报,2025,56(2):115 - 123.
Lu Jianqiang, Chen Zucheng, Lan Yubi, et al. Path planning of robot based on improved sparrow search algorithm and Bessel curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2):115 - 123. (in Chinese)

[77] 崔永杰,王寅初,何智,等. 基于改进 RRT 算法的猕猴桃采摘机器人全局路径规划[J]. 农业机械学报,2022,53(6):151 - 158.
Cui Yongjie, Wang Yinchu, He Zhi, et al. Global path planning of kiwifruit harvesting robot based on improved RRT algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6):151 - 158. (in Chinese)

[78] 张万枝,赵威,李玉华,等. 基于改进 A* 算法 + LM - BZS 算法的农业机器人路径规划[J]. 农业机械学报,2024,55(8):81 - 92.
Zhang Wanzhi, Zhao Wei, Li Yuhua, et al. Path planning of agricultural robot based on improved A* and LM - BZS algorithms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8):81 - 92. (in Chinese)

[79] Wang N, Jin Z, Wang T, et al. Hybrid path planning methods for complete coverage in harvesting operation scenarios[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 231: 109946.

[80] 朱烨均,张闯,魏文波,等. 基于动态卸粮阈值优化马尔可夫决策模型的多机协同作业策略[J]. 农业机械学报,2025,56(6):187 - 195.
Zhu Yejun, Zhang Chuang, Wei Wenbo, et al. Multi-machine cooperative operation strategy based on dynamic unloading threshold optimized Markov decision model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(6):187 - 195. (in Chinese)

[81] 张闻宇,张智刚,张帆,等. 水稻收获转运双机协同自主作业策略与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(15):1 - 9.
Zhang Wenyu, Zhang Zhigang, Zhang Fan, et al. Cooperative autonomous operation strategy and experiment of the rice harvester together with a rice-transporting vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(15):1 - 9. (in Chinese)

[82] 王猛,赵博,刘阳春,等. 基于多变异分组遗传算法的多机协同作业静态任务分配[J]. 农业机械学报,2021,52(7):19 - 28.
Wang Meng, Zhao Bo, Liu Yangchun, et al. Static task allocation for multi-machine cooperative operation based on multi-variation group genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7):19 - 28. (in Chinese)

[83] 曹如月,李世超,季宇寒,等. 基于蚁群算法的多机协同作业任务规划[J]. 农业机械学报,2019,50(增刊 1):34 - 39.
Cao Ruyue, Li Shichao, Ji Yuhan, et al. Multi-machine cooperation task planning based on ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(S1):34 - 39. (in Chinese)

[84] 李子康,张璠,滕桂法,等. 基于深度强化学习的收割机省内协同调度优化策略[J]. 农业工程学报,2024,40(14):23 - 32.
Li Zikang, Zhang Fan, Teng Guifa, et al. Deep reinforcement learning-based optimization strategy for the cooperative scheduling of harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(14):23 - 32. (in Chinese)

[85] Zhang S, Liu Q, Xu H, et al. Path tracking control of a large rear-wheel-steered combine harvester using feedforward PID and look-ahead Ackermann algorithms[J]. Agriculture, 2025, 15(7): 676.

[86] 杨然兵,吕士亭,张健,等. 履带式马铃薯联合收获机辅助驾驶作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(12):231 - 239.
Yang Ranbing, Lü Shiting, Zhang Jian, et al. Design and test of assisted driving operation system of tracked potato combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12):231 - 239. (in Chinese)

[87] 赵静慧,赵腾龙,徐立友,等. 基于 APSO 算法的拖拉机牵引性能预测通用模型建立与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(12):519 - 529.
Zhao Jinghui, Zhao Tenglong, Xu Liyou, et al. General model building and experiment on traction performance prediction based on APSO algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12):519 - 529. (in Chinese)

[88] 张成涛,谭彧,吴刚,等. 谷物联合收割机电控全液压转向系统建模与仿真[J]. 农业工程学报,2013,29(20):11 - 17.
Zhang Chengtao, Tan Yu, Wu Gang, et al. Modeling and simulation of electronic control full hydraulic steering system for grain combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(20): 11 - 17. (in Chinese)

[89] 何杰,满忠贤,胡炼,等. 履带式花生联合收获机路径跟踪控制方法与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(1):9 - 17.
He Jie, Man Zhongxian, Hu Lian, et al. Path tracking control method and experiments for the crawler-mounted peanut combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(1):9 - 17. (in Chinese)

[90] Si J, Niu Y, Lu J, et al. High-precision estimation of steering angle of agricultural tractors using GPS and low-accuracy MEMS [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(12): 11738 - 11745.

[91] 陈进,郑世宇,李耀明,等. 联合收获机前进速度灰色预测模糊控制系统[J]. 农业机械学报,2011,42(10):110 - 115.
Chen Jin, Zheng Shiyu, Li Yaoming, et al. Grey predictive fuzzy control system of forward speed for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):110 - 115. (in Chinese)

[92] Wu T, Liu D, Li X. Designing hybrid mobility for agricultural robots: performance analysis of wheeled and tracked systems in variable terrain[J]. Machines, 2025, 13(7): 572.

[93] 苗中华,李闯,韩科立,等. 基于模糊 PID 的采棉机作业速度最优控制算法与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(4):9 - 14,27.
Miao Zhonghua, Li Chuang, Han Keli, et al. Optimal control algorithm and experiment of working speed of cotton-picking machine based on fuzzy PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 9 - 14,27. (in Chinese)

[94] 丁幼春,廖庆喜,黄海东,等. 联合收获机视觉导航控制器设计[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):239 - 243.
Ding Youchun, Liao Qingxi, Huang Haidong, et al. Design of vision navigation controller for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(S):239 - 243. (in Chinese)

[95] 宁小波,陈进,李耀明,等. 联合收获机前进速度模糊控制系统多目标遗传优化[J]. 农业机械学报,2015,46(5):68 - 74.
Ning Xiaobo, Chen Jin, Li Yaoming, et al. Multi-objective genetic algorithm optimization of forward speed of fuzzy control system for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):68 - 74. (in Chinese)

[96] 孙意凡,刘仁杰,李世超,等. 基于 GWO - MPC 的联合收获机喂入量控制方法与仿真实验[J]. 农业机械学报,2023,54(11):83 - 91.
Sun Yifan, Liu Renjie, Li Shichao, et al. Feed rate control method and simulation experiment of combine harvester based on GWO - MPC[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11):83 - 91. (in Chinese)

[97] 王新,付函,王书茂,等. 收割机作业速度多目标控制模型的鲁棒优化设计[J]. 农业工程学报,2012,28(20):27 - 33.
Wang Xin, Fu Han, Wang Shumao, et al. Robust optimal design of multi-objective control model of working speed for combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 27 - 33. (in Chinese)

[98] 张真,王亮,韩科立,等. 基于扰动观测的玉米摘穗收获自适应控制系统研究[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 2):85 - 94.
Zhang Zhen, Wang Liang, Han Keli, et al. Adaptive control system for corn ear-picking harvesting based on disturbance observation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(S2):85 - 94. (in Chinese)

[99] 张闻宇,张智刚,罗锡文,等. 收获机与运粮车纵向相对位置位速耦合协同控制方法与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(9):1 - 11.
Zhang Wenyu, Zhang Zhigang, Luo Xiwen, et al. Position-velocity coupling control method and experiments for longitudinal relative position of harvester and grain truck[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9):1 - 11. (in Chinese)

[100] 魏新华,邓屹,崔鑫宇,等. 基于模糊算法的农机编队转场多机协同控制方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(2): 48 - 60.
Wei Xinhua, Deng Yi, Cui Xinyu, et al. Multi-machine collaborative control method of agricultural machinery formation transfer based on fuzzy algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 48 - 60. (in Chinese)

[101] 白晓平,王卓,胡静涛,等. 基于领航-跟随结构的联合收获机群协同导航控制方法[J]. 农业机械学报,2017,48(7):14 - 21.
Bai Xiaoping, Wang Zhuo, Hu Jingtao, et al. Harvester group corporative navigation method based on leader-follower structure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):14 - 21. (in Chinese)

[102] 徐广飞,陈美舟,苗河泉,等. 基于模型预测控制的农机主从跟随作业控制方法[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 2):11 - 20.
Xu Guangfei, Chen Meizhou, Miao Hequan, et al. Following operation control method of farmer machinery based on model predictive control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2):11 - 20. (in Chinese)

[103] Omid M, Lashgari M, Mobli H, et al. Design of fuzzy logic control system incorporating human expert knowledge for combine harvester[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(10): 7080 – 7085.

[104] 金诚谦,陈钧龙,刘政,等.收获卸粮协同作业位速耦合控制方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(9): 427 – 439.
Jin Chengqian, Chen Junlong, Liu Zheng, et al. Position-velocity coupling control method and experiments for harvesting and unloading cooperative operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(9): 427 – 439. (in Chinese)

[105] 陈仲举,谢斌,罗振豪,等.无人驾驶电动拖拉机犁耕机组路径跟踪与耕深模糊控制策略研究[J].农业机械学报, 2024,55(12):491 – 504.
Chen Zhongju, Xie Bin, Luo Zhenhao, et al. Fuzzy control strategy for path tracking-tillage depth of unmanned electric tractor ploughing unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12):491 – 504. (in Chinese)

[106] Mao W, Liu H, Hao W, et al. Development of a combined orchard harvesting robot navigation system[J]. Remote Sensing, 2022, 14(3): 675.

[107] 马志艳,李江华,章霞东,等.甘蔗联合收割机作业远程信息平台设计与实现[J].中国农机化学报,2022,43(11): 139 – 145.
Ma Zhiyan, Li Jianghua, Zhang Xiadong, et al. Design and implementation of remote information platform for sugarcane combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(11):139 – 145. (in Chinese)

[108] 李寒,钟涛,张可意,等.基于 WebGIS 的农机多机协同导航服务平台设计[J].农业机械学报,2022,53(增刊 1):28 – 35.
Li Han, Zhong Tao, Zhang Keyi, et al. Design of agricultural machinery multi-machine cooperative navigation service platform based on WebGIS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1):28 – 35. (in Chinese)

[109] 赵博,张巍朋,苑严伟,等.农业装备运维与作业服务管理信息化技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 1 – 26.
Zhao Bo, Zhang Weipeng, Yuan Yanwei, et al. Research progress in information technology for agricultural equipment maintenance and operation service management[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 1 – 26. (in Chinese)

[110] 李哲,杨光友,陈学海.基于 B/S 架构的联合收割机远程监测平台研究[J].中国农机化学报,2019,40(4):151 – 157.
Li Zhe, Yang Guangyou, Chen Xuehai. Research on remote monitoring platform of combine harvester based on B/S architecture[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(4): 151 – 157. (in Chinese)

[111] 张九通,唐维东,刘鸿瑞,等.基于 RFID 与 GPS 的拖拉机机库信息管理系统的设计与开发[J].中国农机化学报,2024, 45(5):154 – 160.
Zhang Jiutong, Tang Weidong, Liu Hongrui, et al. Design and development of tractor hangar information management system based on RFID and GPS[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(5):154 – 160. (in Chinese)

[112] 伍坪.基于 ZigBee 通信网络的农机作业监测系统设计[J].农机化研究,2024,46(1):146 – 150.
Wu Ping. Design of agricultural machinery operation monitoring system based on ZigBee communication network[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024,46(1):146 – 150. (in Chinese)

[113] 李中显,蔡宗慧.基于 Hadoop 云平台的联合收割机远程监控系统研究[J].农机化研究,2017,39(12):185 – 189.
Li Zhongxian, Cai Zonghui. Research on remote monitoring and control system of combine harvester based on Hadoop cloud platform[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(12): 185 – 189. (in Chinese)

[114] 黄凰,陈燕燕,朱明,等.基于模糊隶属度的多站点多机协同即时响应调度系统[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 71 – 79.
Huang Huang, Chen Yanyan, Zhu Ming, et al. Multi-site and multi-machine cooperative instant response scheduling system based on fuzzy membership[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(21): 71 – 79. (in Chinese)

[115] 王政,王东,朱学卫.玉米收割机调度系统的设计与实现[J].农机化研究,2025,47(4):137 – 140.
Wang Zheng, Wang Dong, Zhu Xuewei. Design and implementation of corn harvester scheduling system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(4): 137 – 140. (in Chinese)

[116] Zhang W, Zhao B, Zhou L, et al. Research on comprehensive operation and maintenance based on the fault diagnosis system of combine harvester[J]. Agriculture, 2022, 12(6): 893.

[117] 习晨博,杨光友,刘浪,等.基于 SDAE – BP 的联合收割机作业故障监测[J]. 农业工程学报, 2020, 36(17): 46 – 53.
Xi Chenbo, Yang Guangyou, Liu Lang, et al. Operation faults monitoring of combine harvester based on SDAE – BP[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(17): 46 – 53. (in Chinese)

[118] 陈经纬,郝帅华,王成,等.联合收割机脱粒状态监测及故障诊断系统设计[J].农机化研究,2024,46(7):115 – 120.
Chen Jingwei, Hao Shuaihua, Wang Cheng, et al. Design of state monitoring and fault diagnosis system for combine harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024,46(7):115 – 120. (in Chinese)

[119] Zhang W, Guo H, Zhao B, et al. Integrated operational monitoring and fault early warning system for wheat combine harvesters based on CAN bus[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2026, 19(1): 170 – 178.