doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.12.001

农业装备运维与作业服务管理信息化技术研究进展

赵　博[1,2]　张巍朋[1,2]　苑严伟[1,2]　汪凤珠[1,2]　周利明[1,2]　牛　康[1,2]
(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 智能农业装备是信息化、自动化、智能化的综合体,其智能化水平主要表现在作业过程状态感知、数据分析、科学决策与自主控制等先进技术的应用。目前,我国农业装备在作业服务方面主要存在故障自动监测实用性差、维修服务资源配置失衡以及服务调度成本高等问题。本文以农业装备中典型机具——联合收获机为例,重点综述了国内外联合收获机运维服务管理相关典型技术的现状和特点,阐述和剖析了农业装备远程运维服务平台、作业数据监测、多机协同作业以及运维服务优化等方面的研究现状和发展动态。阐述了运维服务管理平台总体构架与技术进展;并分别阐述了作业工况、作业质量感知与车载终端管理等远程运维数据监测技术研究进展,路径规划、协同控制与任务分配等多机协同作业技术研究进展,故障诊断预测、维修策略与群体调度等运维服务优化技术研究进展;最后,结合实际应用场景,总结分析了农业装备运维服务管理技术所面临的挑战和机遇,提出了农业装备信息化管理技术的未来发展方向;并指出我国农业装备运维服务管理信息化技术未来研究方向。

关键词: 农业装备; 运维服务平台; 作业服务管理; 多机协同; 农机调度
中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2023)12-0001-26　　**OSID**:

Research Progress in Information Technology for Agricultural Equipment Maintenance and Operation Service Management

ZHAO Bo[1,2]　ZHANG Weipeng[1,2]　YUAN Yanwei[1,2]　WANG Fengzhu[1,2]　ZHOU Liming[1,2]　NIU Kang[1,2]
(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
2. *National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Intelligent agricultural machinery equipment is a complex of informatization, automation, and intelligence. Its intelligence level is mainly reflected in the application of advanced technologies such as state perception, data analysis, scientific decision-making, and autonomous control in the operation process. At present, there are mainly problems in the operational services of agricultural machinery equipment in China, such as poor practicality of fault automatic monitoring, imbalanced allocation of maintenance service resources, and high service scheduling costs. The current situation and characteristics of typical technologies related to the operation and maintenance service management of combine harvester at home and abroad were summarized, and focusing on the research status and development trends of remote operation and maintenance service platform for agricultural machinery equipment, operation data monitoring, multi machine collaborative operation, and operation and maintenance service optimization. Firstly, the overall architecture and technological progress of the operation and maintenance service management platform were elaborated. Then the research progress of remote operation and maintenance data monitoring technologies such as operating conditions, job quality perception, and vehicle terminal management was elaborated, as well as the research progress of multi machine collaborative operation technologies such as path planning, collaborative control, and task allocation. The research progress of operation and maintenance service optimization technologies such as fault diagnosis prediction, maintenance strategy, and group scheduling was also elaborated. Finally, combined with practical application scenarios, the challenges and opportunities faced by agricultural machinery equipment operation and maintenance service management technology were summarized and

收稿日期: 2023-08-25　修回日期: 2023-09-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001505)
作者简介: 赵博(1981—),男,研究员,博士生导师,主要从事智能农业装备研究,E-mail: zhaoboshi@126.com
通信作者: 苑严伟(1980—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械自动控制与智能化仪器研究,E-mail: yyw215@163.com

analyzed, and the future development direction of agricultural machinery equipment information management technology was proposed. Future research directions for informationization of agricultural equipment operation and maintenance service management in China were pointed out.

Key words: agricultural equipment; operation and maintenance service platform; operation service management; multi machine collaboration; agricultural machinery scheduling

0 引言

随着农业机械化和信息化水平的快速提高,需要更加精准的农机运行监控管理方法。中华人民共和国农业农村部印发了《关于推进农业农村大数据发展的实施意见》,指出我国目前已进入传统农业向现代农业加快转变的关键阶段,需要运用大数据提高农业生产精准化、智能化水平,推进农业资源利用方式转变,提高农业全要素的利用效率,提升我国农业国际竞争力,增强农业农村经济运行信息及时性和准确性,加快实现基于数据的科学决策,推进政府治理能力现代化。加快推进农业生产经营精准化、管理服务智能化、引领驱动乡村振兴具有重要意义[1]。

2021 年中央一号文件明确提出,发展智慧农业,建立农业农村大数据体系,推动新一代信息技术与农业生产经营深度融合。目前中国的农业大数据经济规模为 5 778 亿元,预计到 2025 年能够达到 1.26 万亿元,农业大数据发展速度非常快,对农业高质量发展具有重要的意义。《关于加快农机大数据平台建设,引领智慧农机供给侧结构性改革的提案》中指出,农机智慧化是当前农业机械化水平提升的重点任务和高阶目标。以智慧农机大数据平台建设为抓手,促进智慧农机发展,是实现农业装备现代化的必经之路。

借助传感监测技术、信息化管理技术、大数据技术能够改变传统农业的作业场景,将新一代信息技术与农业机械化生产进行全面深度融合,将农民从繁重的劳务中解放出来,极大地提高生产效率。同时,农机大数据平台建设是推进现代农业生产信息化、智能化、精准化的重要环节,农机大数据平台是面向农业领域的物联网应用平台,提供以农机安全监控、合作社管理、农机智慧调度、农机作业监测、作业项目监管及农业大数据可视化服务为核心的智慧农机解决方案[2-3]。同时,远程平台的应用实现了在线监测数据的远程传输、云端管理与智能分析,为故障诊断与实时预警提供了相关数据支撑,对于有效提升农机管理效率和降低生产成本具有重要的意义。

构建基于传感器数据监测、CAN 总线采集、卫星定位、无线传输、电源、人机交互的农机作业管理与决策平台,实现农机监管、运维与决策信息化,提高农机智能决策、故障诊断、远程调度、售后服务的产业化运维水平,是农业装备的发展趋势,这也对促进我国现代农机作业管理具有重大意义[4]。先进技术的应用提高了农机作业质量在线监控水平[5-6]。信息化、自动化和智能化已成为农机远程运维的发展方向,通过车载联网设备和无线通讯技术,管理人员可以实时获取农机的作业状态与作业质量信息,满足农机故障诊断、故障预测、运维调度以及作业规划等运维管理关键环节的实时数据监测需求。

因此,本文综述国内外农业装备作业管理信息化技术的现状、农机远程运维与作业服务管理模式的研究进展,结合我国农业装备作业的实际特点,分析讨论我国现有农业装备实际作业运维特点及存在问题、远程服务作业的先进方法,展望我国农业装备作业管理及远程服务管理技术的研究发展趋势,为我国农业装备信息化管理与运维服务技术提出发展方向。

1 农机远程运维与服务信息管理研究进展

1.1 农业装备信息化建设

农业装备是引领农业转型的重要引擎。随着数字技术和智能制造在农业中的应用,智能农机设备将物联网、大数据、人工智能等技术引入农业生产过程,将工作场景与数字环境紧密相连,实现土壤监测、农业遥感、无人操作、自动驾驶、智能控制,为优化农业系统提供解决方案[7]。

(1)信息采集

农业装备逐渐趋于智能化、节约化、精准化和大型化,农业作业机械工况信息采集是应用在现代大型农业作业机械上的农业智能装备,农业装备信息化是指运用机械电子、光学物理、传感控制、信息通讯、互联网等现代信息技术,使农业机械更安全、更可靠、更高效地完成各项作业[8-9]。

信息采集是农业装备大数据价值挖掘最重要的一环,采用信息技术能够提升农情信息采集、农业机械导航及作业水平,随着“十三五”对智能农机装备的深入研究,我国在耕、种、管、收等主要农机作业环

节均有智能化监应用，以农机智能化工况监测与调度为背景，依托云计算平台，实现了农用机车的实时工作状态的实时监测、作业位置的记录、作业面积的自动计算，同时，在农机信息化管理方面的研究起步较晚，但发展速度较快，在农机作业信息监测、农机监理管理系统、农机作业服务的效率、降低服务成本等方面取得了显著成绩，但也存在一些问题，例如农机信息资源不足，缺乏统一的资源平台；存在信息孤岛及分散问题。

(2)信息传输与存储

农业装备传输技术是指将传感设备接入传输网络，利用有线或无线通信网络随时随地进行高可靠性的信息交换和共享。在农机领域，信息传输技术可以分为两大类：无线传感器网络技术(WSN)和移动通信技术。由于农业装备信息传输通常需要长期运行而无法轻易更换电池或充电，因此需具备低功耗和长寿命的特点。一些专门为农业应用设计的无线传输技术，采用低功耗设计，可以实现长期运行。信息传输技术的实时性、可靠性、通用性和稳定性有待改进。

数据存储是农业大数据的核心环节，目前主要采用云存储技术，包括公有云、私有云和混合云等。数据保护包括备份、恢复和安全管理，以确保数据的完整性和安全性。苑严伟团队[10]针对农业机械大数据平台中，已有数据清洗算法不适用于大规模、多源异构、高维度和强时空相关实时数据的问题，分析了复杂田间环境下农机作业数据异常来源及特征，研究了异常数据检测及修正技术，提出一种基于滑动窗口机制的农机作业数据在线清洗方法。

(3)数据信息处理

数据处理技术包括数据挖掘技术、数据分析技术、数据库技术等，数据处理技术是农业装备信息化技术的最后环节，也是智慧农业装备实现自动控制的基础，采集的农业装备大数据会存在大量杂乱无用、重复或不完整的数据，会严重影响数据的分析与决策，需要对采集到的大量农机作业数据进行处理。运用大数据分析处理技术，对农机作业数据进行分析，从而提供科学的作业、管理方案。当前应用较为广泛的方法有动态贝叶斯网络、卡尔曼滤波、D－S证据理论、粗糙集理论等，通过智能算法对数据处理、挖掘，能够发现数据内部联系，能够预测某件事情发生的概率，对农业决策提供理论基础。

姜含露等[11]针对免耕播种机长时序的田间周期性作业规律，提出基于多条件时间序列分析的监测数据清洗方法及模型(图 1)，提取了工况参数中车速、瞬时面积和播种量的时空特征，再利用通道融合(CONCAT 连接)保证融合后的特征具有个体差异性，数据清洗后约有 63% 的冗余数据被剔除。

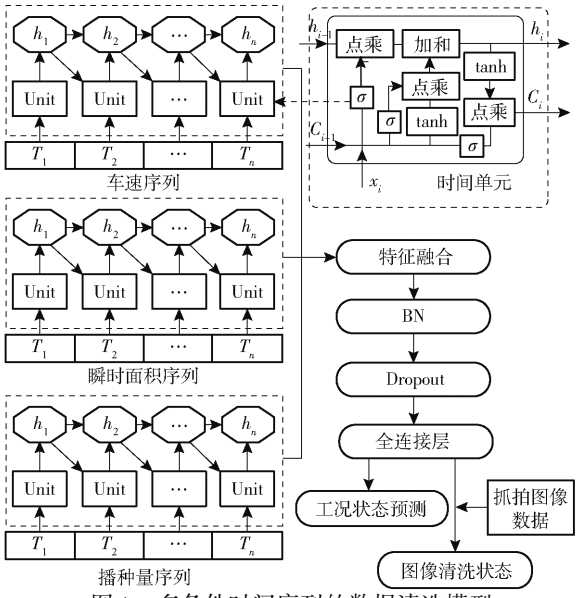


图 1　多条件时间序列的数据清洗模型

Fig. 1　Data cleaning model of multi-condition time series

随着北斗系统、5G 通信、物联网等技术迅速发展，大数据平台不断完善，入网农机数量猛增，数据规模不足问题得到缓解，但数据质量问题成为阻碍平台发展的新瓶颈。

(4)信息化管理应用

信息化是加快农业装备发展的必由之路，在电子信息技术不断发展的背景下，实现农机现代化已成为我国现代化建设的必然要求和保障。利用信息技术提高农业机械化水平是建设现代农业的重要战略需要。我国农机信息化管理的发展速度仍然相对较慢，缺乏统一规划，管理体系不完善，管理体系相对落后，维护成本较高。迫切需要加强研究，特别是加快开发一批适合我国国情的农机管理软件，形成完整的农机管理体系。在深入开展技术研究的同时，确保理论成果的有效转化，为全面推进我国农业现代化发展提供技术支撑。

农机装备信息化管理开创了大数据、人工智能在农机作业和农业生产中应用的先河，更显著地体现了基于大数据的农机装备作业管理和决策在现代农业生产中发挥着越来越大的作用。

1.2　农业装备智能化需求

(1)拖拉机

拖拉机是农业生产中的必备农业机械之一，作为一种常用的动力机械，拖拉机是各类农机具主要的动力输出源，拖拉机在田间作业和运输作业领域得到广泛而有效的应用，其主要功能是实现牵引和驱动各种农业机械完成工作，与各项农机具配合完成耕作、播种、施肥及收获等环节[12]。根据国家“十

四五”要求提高单产水平,需要进一步提高拖拉机的智能化水平,降低高能耗。现有信息技术、数据遥感采集技术、机电液一体化控制技术、卫星定位导航技术等智能化技术的飞速发展,为拖拉机智能化水平的提高提供了强有力的技术支撑[13]。

拖拉机的自动化、智能化与定位及导航、动态路径规划、机器视觉、远程监控等密切相关,涉及导航、图像、协同智能操控、模型与策略、执行器、节能高效、数据链等工程技术。当前对于拖拉机导航和机具智能化设计,取得大量研究成果,但是对于拖拉机机组协同控制研究的较少[14-18]。

如图 2 所示,袁洪良等[19]从建模和控制的角度对上述问题进行了研究改进,设计了智能控制器、转角传感器、RTK 基准站等关键设备,建立包含横摆动力学的状态空间模型,能够满足农机日常生产工作需求。



图 2 智能农机自动导航系统实验平台

Fig. 2 Intelligent automatic driving system for agricultural tractor

(2)播种机

利用信息技术实现精准播种和变量播种将是一项重点研究的先进播种技术。应从多种控制方法、控制系统模块化、播种率检测系统化等方面进行相关研究,我国作为传统农业大国,自动化、信息化控制技术已经在现代播种机械中得到了快速广泛的应用,并大幅度提升了农业生产效率[19]。

中国农业机械化科学研究院研制的小麦变量免耕施肥播种机采用反馈变量施肥播种控制技术及肥料质量与流量的信息融合技术,一次可完成切断秸杆或切开根茬、开沟、施肥、播种、压种、覆土、镇压等联合作业[20-21]。

由于信息化智能农业机械控制系统作为信息管理与操作执行的综合性系统,具有信息数据多、信息数据容量大等特点,在以后的系统应用中必然要求信息数据的准确性、精确性和广泛性[22-24]。现有播种信息化系统技术科技含量不高,积累的技术经验也有限,在用的智能化播种机械设备型号数量单一。采用信息技术实现精量播种和变量播种是需要重点研究的先进播种技术,应从控制方式多样化、控制系统模块化以及播量检测系统化等方面进行相关研究[25]。

(3)耕整机

保护性耕作技术的推广与应用提高了土壤质量,土壤的自我修复能力逐渐提高,对于作物生长起到了良好的推动作用[26]。目前,农业机械深松作业的远程监控设备大多基于 GPS、北斗信息系统,以及 CDMA、TDMA 等数字蜂窝移动通信平台,用于实时监控和传输机器定位、作业状态等信息。通过客户端软件进行数据分析,并对现场机器进行远程控制。

精确测量耕深是控制耕作深度和保证耕作质量的关键,中国农业机械化科学研究院机电技术应用研究所成功研制农机深松系统[27],该系统集成了智能传感器技术、卫星定位技术和无线通讯技术,实现了深松作业状态和作业面积准确监测,可显著提高水、肥、药的利用率。

李笑等[28]结合中国土地平整的实际情况和前期的研究成果,开发了适合国内应用的 GNSS 控制平地系统,降低了研发的设备成本,优化完善了平地系统的功能(图 3)。

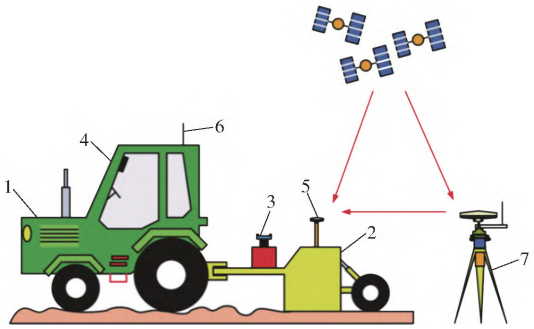


图 3 平地机系统组成

Fig. 3 Composition of grader system

1. 拖拉机 2. 平地铲 3. 液压系统 4. 集成控制终端 5. 移动站卫星天线 6. 移动站电台天线 7. 基站

随着计算机技术、传感器技术和人工智能技术的不断进步,农业装备正在向自动化和智能化发展。未来,研制减少进地次数、节能降耗、智能化、高速宽幅的联合耕整地机械[29-31],已成为农业机械化生产发展的重要方向,在提高工作效率、提高工作质量的同时,应提高农业耕整机械的自动化和智能化水平。

(4)植保机

植保无人机具有作业灵活、效率高、成本低、突击能力强等优点,可适应大田、水田、丘陵山地等多

种环境。与地面植保机具相比，植保无人机在作业效果与作业效率上更具优势[32]。植保无人机将逐渐成为农业生产中施药环节的重要工具。

我国对新型农业植保机械的需求越来越旺盛，植保机信息化服务通过采用地理信息系统、监控管理系统实现植保无人机高精度定位与全自助航线飞行，从而进行无人机的精准喷洒高效作业、平台化管理、安全可靠的植保服务。植保机信息化是针对当前现代精准农业的实际需求，在农业植保细分领域进行的基础开发。植保机信息化发展还存在一些问题，例如：北斗数据采集和分析智能程度不高、北斗终端与部分植保无人机适配性不足等问题[33-34]。在当前农业生产发展环境下，进一步立足农业生产实际，创新推广应用方式策略，全面提升植保无人机应用实效，保障农业生产高质量发展是未来的努力方向。

(5)灌溉机

农业高效节水灌溉是促进水资源可持续利用和保障国家粮食安全、水安全及生态安全的重大战略举措。近年来，国内外学者将先进的电子技术、计算机技术和控制技术应用于农业节水灌溉，逐步改变了传统的灌溉方式[35]。

国外发达国家在农业智能化灌溉控制技术方面研究起步较早，农业灌溉技术实现由半自动化向智能全自动化转变，并且已经大面积的推广，农业灌溉用水利用效率较高，技术应用成效明显[36-37]。

目前我国在智能化地面灌溉管理技术与设备研发方面的工作处于初步探索阶段，与国外存在显著差距。“十四五”开始，我国逐步启动大中型灌区现代化改造工作，明确了“十四五”期间加强灌区信息化、智慧化建设，提升灌区供用水管理能力。智能化灌溉可进行远程智能化控制，减少水资源浪费，提高现代化农业灌溉管理体系的整体效果。智能化精确灌溉利用硬件和软件资源为用户提供计算、网络和存储服务。建立农田灌溉云计算平台，利用计算机、网络和 3S 技术建立云存储和数据库(图 4)，从而形成农田各种结构化、非结构化和精确灌溉数据的存储，为农民提供空间数据，实现大面积农田精准灌溉管理[38-40]。

当下灌溉智慧化发展在数据和算法支撑、多专业融合、运维模式及统筹布局等方面还存在不足，灌溉信息化管理的应用还应提高管理效率，降低软件成本及人力成本，研制出适合我国本土自然气候、土地资源等特殊情况，且符合我国农民实际购买能力的智能灌溉装备，满足我国现阶段灌溉管理的需求是当务之急。

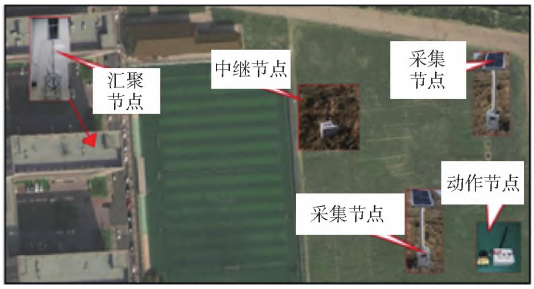


图 4　智能灌溉系统性能测试环境[38-40]

Fig. 4　Intelligent irrigation system performance testing environment

1.3　农机运维服务管理平台

随着智能农业装备的发展，学者希望通过海量农业装备监测数据，挖掘不同种类农机的功能差别、比较不同作物品种农机的作业性能、探究不同机器之间的环境-机器-作物互作关联关系等，因此，农机远程运维服务平台应运而生。农机运维服务平台包含支撑技术层、基础设施层、多元信息层、数据服务层、智能决策层以及应用层(图 5)。根据远程运维服务功能需求，农机运维服务平台关键功能主要包括作业信息采集管理、故障诊断与预警服务管理以及运维服务调度管理。



图 5　农机远程运维服务平台功能框架

Fig. 5　Functional framework of combine harvester remote operation and maintenance service platform

欧美发达国家农业现代化起步较早，机械化、信息化以及智能化程度较高，如 John Deere、AGCO、CASE 等国外先进农机企业均开发了适用于农业装备多参数作业监测的云管控服务平台[41-42]。表 1 展示了国内外典型农机企业信息化平台特点。

德国 CLAAS 公司研发的 TELEMATICS 系统平台能够访问农业装备作业参数、工况数据报表，并进行远程故障维修和智能维服务。日本 YANMER 公司通过搭载在农业装备上的 GPS 天线和通信终端，使农机能够自动发送位置、运转及保养方面的信息，并每天自动生成作业报告，还可实现监视防盗、运转状况管理、保养服务、突发问题自动报警与迅速应对等方面的功能，目前已在日本推广应用。美国凯斯公司通过在不同种类农机中加装各种监测传感器，集成开发了作业监测实时显示系统[9]。凯斯 AFS

表 1 国内外典型农机装备信息化管理平台应用类型与功能

Tab. 1 Types and functions of typical agricultural machinery equipment information management platforms at home and abroad

代表性产品	系统界面	技术原理	功能	平台特点
德国 CLAAS 公司的 TELEMATICS 系统平台		将工作数据自动传送到服务器,并自动在该服务器上为进一步处理做准备,完成数据备份	实时查看农机车队的作业时长、作业面积、耗油量,以及进行远程故障诊断	技术成熟、投入应用较早
日本 YANMER 公司智能辅助遥控系统		在农业装备终端安装传感器、搭载全球定位系统	能够自动发送位置、运转及保养方面的信息,自动生成作业报告等	自主开发、可视化程度高
美国凯斯公司 AFS 信息处理系统		使用精确制导 GPS 信号和无线数据网络	农机的远程控制、产量监控、燃油消耗统计、作业情况统计、机队管理	集成度高、快速、可靠
农业农村部农机作业监测与大数据应用平台		基于北斗终端,集成作业监测、远程定位	监测上线收获机的数量、收获时长、收获效率、热点分布	数据量大、覆盖范围较广
合众思壮-慧农® 平台		自研芯片,定位与惯导融合	位置监控、农机状态监测、作业面积统计、路线规划、统计分析等监控调度功能于一体	适配广、多作业、全过程
潍柴雷沃车辆网平台		安装 T-BOX 设备,农机生产加装传感模块	涵盖耕、种、管、收农业装备,实现精准施肥、喷药,苗情、产量实时监测,科学生产决策	自有企业农机、农业装备类型覆盖全面、交互方便

远程信息处理系统能够帮助农场主和管理者在办公室内监视和管理农业装备,利用 GPS 精确定位信号和无线数据通信网络,实时跟踪农场内农机的作业情况,并允许远程诊断和驾驶员间的即时沟通,同时提供了数据分析处理功能,有助于改善物流,减少燃料消耗,充分发挥设备性能。

国内在大农业、大数据时代背景下,为解决农机服务产业链中信息不对称、农机作业大数据利用程度低等问题,中国农业机械化科学研究院作为代表性农机科研企业,自主研发了国内首个农业全程机械化云服务平台“农业机械化精准作业平台暨希望田野”[43-44]。作为国内首个农业全程机械化云管理服务平台,运用传感器、物联网、云计算、大数据等新技术,以农业增效提质、生态可持续为目标,以信息化为核心,以装备智能化为支撑,形成了集信息化、数据化、智能化、可视化于一体的国内规模最大、功能最全、技术最先进、业务最实用的农业机械化智慧云平台,为我国农业装备的智能化、信息化快速发展提供有力支撑。具有农机作业监管、农机试验鉴定、农机购置补贴、农机安全监理、农机社会化服务、农机大数据分析等特色板块,主要包括保护性耕作、深松整地、试验鉴定、购置补贴、安全监理、社会化服务、其他作业和数据分析共 8 个板块。已在吉林、内蒙古、山东、广东、云南等 22 个省市自治区开通服务,并成为吉林省、青岛市等地官方平台,累计生成作业日报 10 万余份,作业面积 173 余万公顷,管理补贴资金超过 2.8 亿元,农业生产管理效率提升 50% 以上,有效解决现阶段农机作业监管落后、成本高、效率低、风险大等问题,有力支撑了我国农业机械化和农业装备产业转型升级(图 6)。

吴才聪团队[45-46]针对全国范围农机作业动态监测和量化统计的应用需求,通过在农业机械上安装北斗终端,制订数据传输规范,完成了基于北斗的农机作业大数据系统建设。潍柴雷沃农业装备有限



图 6　农业机械化精准作业平台暨希望田野运行界面

Fig. 6　CAAMS – mechanised agriculture smart cloud platform

公司[47]面向农业装备集群精准作业服务与远程运维需求，基于企业数据资产库条件，构建了农业装备智能云服务平台，实现了精准耕整、播种、种植、植保、收获、粮食烘干存储等农业生产全程作业运营管理，实现了农业装备作业数字化，服务所生产各类型农机 20 万台套。

综上，目前我国农机服务平台在技术创新、功能升级等方面仍存在严重不足，不利于我国农机服务平台构建以及进一步发展。此外，我国农业装备大数据的开放和交易尚未形成市场主流形态，数据交易法律和机制有待健全，造成农业大数据资源的整体共享程度偏低，且因缺乏有效的合作开发模式，相关数据资源的分析与应用仍处于萌芽期。农机服务平台在技术创新、功能升级等方面仍存在严重不足，不利于我国农机服务平台构建以及创新发展。

农业全程机械化云服务平台实现了作业地块划分、作业面积计算以及轨迹点识别。具体功能技术如下。

（1）农机作业地块划分

选农机轨迹点经度、纬度、速度、近邻点相互关系等作为特征，用 DBSCAN 方法进行聚类，得到初步的聚类结果和类别标记；利用 BP_Adaboost 方法对轨迹点进行训练和识别；既解决了海量数据标记困难的问题，也解决了不同地块轨迹差异大、田间与道路交界处轨迹点易误识别等问题。

输入层为轨迹点特征，包括轨迹点经纬度、速度、半径 r 内近邻轨迹点个数、与近邻点平均距离和到近邻点的距离。由于各输入变量的单位不一致且数值范围相差较大，提前依据最大最小原则进行归一化。

输出层包含 2 个神经元，分别对应轨迹点状态。输出层中某神经元输出为 1 时，表示农机在田间作业，输出为 –1 时表示农机在道路行驶[48]。隐含层神经元个数确定为 8 个。

如表 2 所示，用 DBSCAN 方法对轨迹点状态识别准确率为 93.35%，用 DBSCAN + BP_Adaboost 方法对轨迹点状态识别准确率为 96.75%。因此 DBSCAN + BP_Adaboost 方法得到的轨迹点状态识别准确率高于 DBSCAN 方法。

表 2　不同方法划分地块结果对比

Tab. 2　Results of dividing plots by different methods

方法	地块类型	识别为地块数	识别为非地块数
DBSCAN	地块	5 072	214
	非地块	378	
DBSCAN + BP_Adaboost	地块	5 184	155
	非地块	184	

（2）农机作业面积计算

农机作业面积是补贴发放、费用收取、效率评估、工资发放等的依据，精准有效的作业面积计算是农机管理部门和农机合作社管理人员的迫切需求。

农机机载设备在开机情况下，会定时发送定位信息。如图 7 所示，有一些特殊点（农机停止散点、漂移点和断点）会影响作业面积计算，应提前去除。



图 7　停止散点和轨迹漂移点

Fig. 7　Dwell scatter point and trajectory drift point

（3）农机行驶轨迹状态识别

机行驶轨迹点包含时间、经纬度、速度等信息，农机田间作业轨迹和道路行驶轨迹交叉，依据轨迹点属性信息，可利用阈值设定、聚类、分类等方法区分轨迹点状态。找到有效的属性信息是取得理想效果的前提；轨迹点数据处理多采用聚类算法，可利用田间作业轨迹点密集、道路行驶轨迹点稀疏的特点，通过 DBSCAN 聚类的方法区分田间作业和道路行驶轨迹，能够达到较好的识别效果。

1.4　作业工况信息监测技术

作业信息采集管理是农机远程运维过程中最重要的功能组成，能够实现对农机关键作业参数信息的实时采集与数据管理。联合收获机是一个复杂的非线性作业系统，由于受作物产量、田间气候、机器工况、脱粒设置和清选设置等多种因素的影响，包括收获损失在内的作业性能参数在田间收获作业过程

中不可避免地发生动态变化[49-51]。现有农机信息采集传感器的研究与应用,实现了农机作业速度、作业油耗、GPS 定位信息、行走轨迹的在线监测,大大提升了农机的使用效率。同时,基于多传感信息融合的参数监测方法已成为农机信息采集的主要发展趋势[52]。

国外自 20 世纪 70 年代中期传感器技术迅速实用化,进而推动农业机械装备的机电一体化、智能化工况监测技术研究[53-55],通过信息采集与监管,提高了农业智能化的水平,开展了大量工况监测相关技术的研究。其中,国外在联合收获机作业工况信息监测领域的研究与应用趋于成熟[56],正逐步向全自动化方向发展,大多数联合收获机都配备有参数监测传感器,能够持续在线地观测联合收获机的作业状态。例如,John Deere、AGCO、Krone 等企业生产的多种类型农业装备均具有监控多种作业参数的作业监测系统。以联合收获机为例,AGCO 旗下的 Massey Ferguson 公司开发的联合收获机工况监测系统,能够实时监测联合收获机的各个工况信息,并根据作业参数识别联合收获机工作时的故障信息,以声光报警的方式及时提醒驾驶员执行相关操作。日本 Kubota 公司针对联合收获机的不同作业环境,在联合收获机各工作部位安装了不同类型的监测传感器,能够实时观测与显示联合收获机的工作状态,进一步提升了联合收获机的智能化水平。如 John Deere 绿色之星、纽荷兰的 displays interview Ⅲ等通过安装传感器,实时获取产量、定位以及测量作物湿度等信息。美国 John Deere 开发了谷物联合收获机故障监测系统,能够及时掌握机器运行参数,并应用于实时作业调整,有效地降低了故障发生频率(图 8)。



图 8 美国 John Deere 联合收获机故障监测系统

Fig. 8 John Deere combine harvester fault monitoring system

近年来,我国农机作业工况信息监测技术已取得一定成果,但总体智能化程度依然偏低,仍存在作业参数监测自动化水平低、作业质量检测方法缺失等问题[57],传感技术的最新进展和计算能力的提高加速了基于不同方法的农机作业信息采集功能的发展。国内针对联合收获机作业信息采集方面的研究主要集中于作业位置、行走速度、部件转速、部件扭矩、喂入量、收获损失率、割台高度等关键作业参数的检测方法研究[58]。YIN 等[59]为了在线获取联合收获机的机器性能、工况等多参数信息,构建并测试了基于 CAN 总线控制器的分布式数据采集、传输和处理系统(图 9),为联合收获机智能监测技术提供了重要的技术支撑。针对车身监测数据精准感知问题,徐海萍[60]设计了一种农业机械状态监测与分析的安全管理系统,通过监控农机工况参数实现设备运行安全状态的实时监测,避免超负荷使用造成的农机安全隐患。伟利国等[61]利用激光无损探测技术,开发了联合收获机收获边界在线识别系统,利用信号阶跃变化模式识别算法,实现了收获边界的在线检测,准确推算出联合收获机作业割幅,可为联合收获机智能监控系统应用提供参考。



图 9 联合收获机工况信息监测系统总体框图

Fig. 9 Overall block diagram of combine harvester working condition information monitoring system

为满足精准农业与智能农业装备发展需求,应解决当前收获机械参数监测与控制功能单一、智能化程度低和适应性差等问题[62]。联合收获机作为现代化农业生产中广泛使用的农业装备,能够有效提高作物收获效率和减轻人工劳动成本。联合收获机的正常使用涉及大量的维护和管理工作,对农机运营和管理服务提出了一定的挑战。在网络化和信息化时代,联合收获机可以利用远程监测和数据处理实现农田环境信息、机器工况信息的实时获取,并用于农机作业调配、农田产量预测等,从而有效提高农业生产资源的利用情况,确保农业生产顺利实施。

农业装备的作业工况信息监测技术主要涉及到以联合收获机为例的基本参数监测,其基本原理是通过安装传感器和其他设备在联合收获机上,采集联合收获机的各项作业数据,包括机器油耗、机器温度、发动机转速、作业速度等,刘碧贞等[63]将采集的数据传输至作业管理中心,实现收获机的地理位置、

收割面积和谷物质量等数据的采集(图 10)。

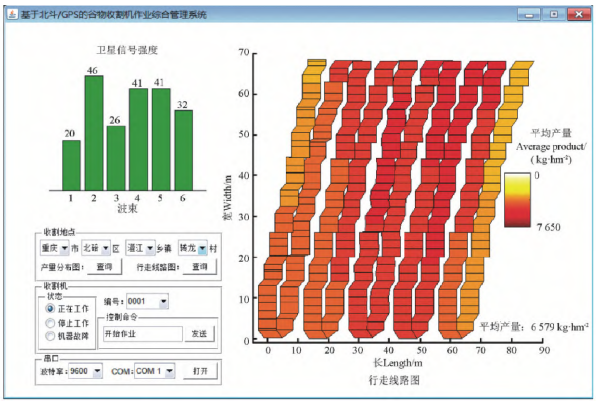


图 10　收获机作业综合管理系统界面

Fig. 10　Harvester operation comprehensive management system interface

如图 11 所示，农业装备参数的监测有助于及时了解农业装备的作业状态以及发现机器的故障，从而减少机器的停机时间，提高机器的使用效率和生产效益。并将这些数据上传到平台，通过数据分析和处理，对联合收获机进行远程运维和监测。

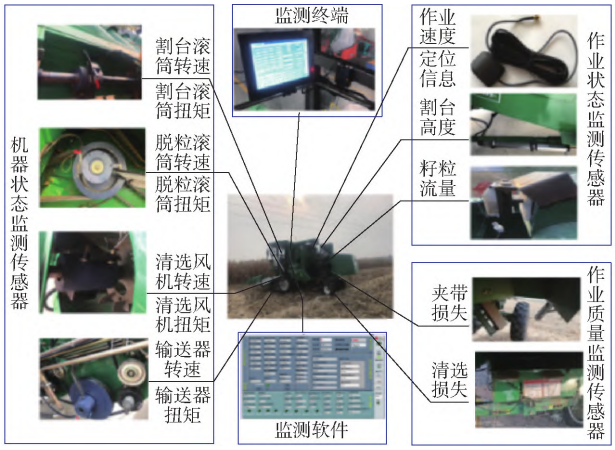


图 11　联合收获机监测与控制系统构成

Fig. 11　Monitoring and control system of combine harvester

相比于国外，国内的研究虽然起步较晚，但针对农机的作业工况监测技术也开展了相关研究[64]，在远程全面作业运维场景中，通过传感监测技术、数据传输技术以及信息管理技术，实现数据监测、故障诊断与预测以及调度等功能(图 12)。ZHANG 等[65]构建了基于多传感器决策级融合的作业产量监测系统，使用错误反馈进行动态校正，增强了作业产量监控系统的准确性和稳定性。CHEN 等[66]针对联合收获机田间作业性能缺乏实时性评价系统，以及用户和企业对联合收获机田间作业性能数据的迫切需求，构建了联合收获机在线田间性能评价系统，该系统可实时采集收获机田间作业数据，可为联合收获机智能作业提供技术支持。

综上，通过农业装备运维工况监测技术，能够实



图 12　远程运维监测场景

Fig. 12　Remote operation and maintenance monitoring scenarios

现农机作业状态实时监测和机器远程维护，避免由于机器故障导致的生产中断，有效提高机器田间作业可靠性和作业效率，降低运维成本，为农业生产提供更加可持续和智能化的解决方案。

1.5　作业质量监测技术

作业质量监测技术主要涉及到联合收获机作业质量相关参数的监测，包括作业中的籽粒破碎含杂率监测技术、损失率在线监测技术、产量动态计量监测技术等。这些参数的监测有助于评估联合收获机的工作效率和收获质量，并及时发现和解决问题[67]。

美国 John Deere 公司、德国 CLAAS 公司、美国 CASE IH 公司等国外收获机智能监控技术较为成熟，尤其是在产量监测和收获损失率监测方面，已形成市场化成熟商品，如 John Deere 公司的 GreenStar 系统，包含了产量监控系统、智能喂入量控制系统、卫星导航系统等。

针对联合收获机作业中收获籽粒杂质检测方法存在精度低、可靠性差等问题，无法满足田间作业质量实时监测与评估分析的技术需求，LIU 等[68]结合玉米籽粒的物料特征和收获环境的干扰因素，设计了一种基于机器视觉的籽粒含杂率监测装置，如图 13 所示，从而提高了联合收获机的收获质量和作业效率，减少了经济损失。

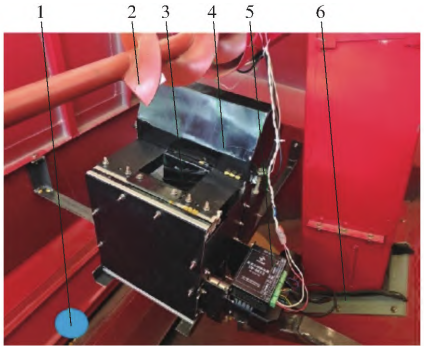


图 13　玉米收获机粮仓中杂质率检测装置的安装位置

Fig. 13　Installation position of impurity rate detection device in corn harvester grain bin

1. 粮仓　2. 螺旋输送机　3. 进料口　4. 含杂率检测装置　5. 电机驱动器　6. 安装架

针对缺乏联合收获机收获过程中破碎含杂率在线监测装置的问题,陈满等[69]提出了基于机器视觉的机械化收获作业质量监测方法,如图 14 所示。利用机载采样与视觉装置在线获取收获后的谷物籽粒图像,并结合籽粒组分自动辨识与智能分类算法,能够快速、稳定地识别完整籽粒、破碎籽粒和收获杂质,并实现收获作业质量参数的可视化监测与实时报警,为谷物联合收获机参数在线监测与自适应调控策略研究提供了技术支持。

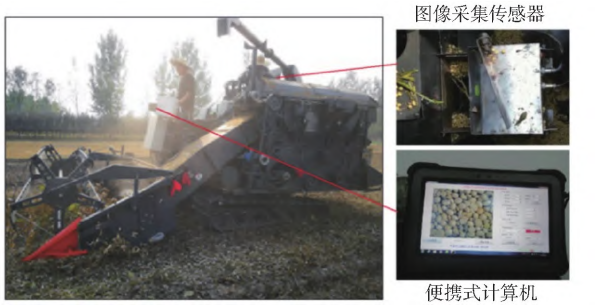


图 14 联合收获机作业质量监测

Fig. 14 Combine harvester operation quality monitoring

针对联合收获机收获损失率检测精度不足的问题,杜岳峰等[70]针对清选损失监测易受脱出物干扰、环境噪声影响的问题,设计了一款基于最小能量准则 EMD 方法的清选损失监测传感器,实现了对采集信号中的振动、工噪和杂余等信号的分离,对于提高清选损失率检测精度特别是信号处理过程中去噪方法的研究具有重要意义。如图 15 所示,王卓等[71]以压电薄膜作为敏感材料,设计了一种由冲击传感器、信号处理电路和安装装置等组成的玉米籽粒收获机清选损失监测装置,并采用支持向量机多分类算法自动提取损失籽粒冲击信号,实现了玉米籽粒损失的实时监测。



图 15 损失监测装置在联合收获机上的安装示意图

Fig. 15 Loss monitoring device installed on combine harvester

1. 筛箱 2. 调理电路 3. 传感器

针对联合收获机产量监测系统成本高、结构复杂和稳定性较低的问题,金诚谦等[72]设计了基于占空比测量原理的联合收获机产量监测系统,应用 EDEM 仿真和理论分析方法建立占空比测量值与谷物质量的计量关系模型,通过对射式光电传感器监测刮板上谷物遮挡与不遮挡的两类电压信号,利用高度占空比与产量计量模型推算作物产量信息,融合系统绝对时间与 GPS 监测信息,实现了联合收获机产量的动态监测。

综上所述,针对农业装备的作业质量检测技术问题,我国用于农业装备监测的传感器与国际一些先进的农机作业监测传感器技术相比,还存在着设备功耗高、体积大、感知精度低、作业参数监测不稳定等问题。这些问题给农业装备在智能化信息管理方面带来了诸多不便,也阻碍了传感器在农业装备作业监测中的应用。国产应用在农机方面的传感器的精确性、稳定性和可靠性有待进一步提升。

1.6 车载终端管理技术

车载终端管理是农业装备远程运维数据监测技术的重要组成部分,可以实现农业装备的远程监测和控制。车载终端管理技术主要包括车载终端设备、远程控制设备等,目前,国内外大型农业装备均已配备有远程监控终端,现有的远程监测终端主要面向农业装备作业参数监测和作业信息管理场景应用,而我国农业装备智能化水平较低,监测终端技术应用相对较少。

国外大型农机的监控研究起步较早,以欧洲等发达国家为代表的很多大型农业装备都配备了远程实时监控系统,如图 16 所示。



图 16 农机作业车载终端

Fig. 16 Terminal management monitoring platform

美国 John Deere 公司开发的 JDLink 远程农机管理系统,利用安装在约翰迪尔农机上的监控终端(MTG)与远程监控中心服务器,能够实现大量农机的高效信息化监控管理。管理者通过远程访问 JDLink 网站可以随时随地获取联合收获机的作业位置、作业数据、作业效率与费用核算等信息,进而实现联合收获机的作业精确管理。

国内车载终端相关研究起步较晚,亟需加强收获测控终端方面成熟产品的研发。武涛等[73]针对现有联合收获机信息化水平低、相关参数监测系统缺乏等问题,设计了联合收获机运行工况数传终端,通过实时采集、记录、存储与传输联合收获机发动机参数、关键部件转速与关键部件扭矩信息,能够实现

远程平台端大量监测数据的存储和处理，并建立了一种连续、稳定、可靠的联合收获机多信息采集方法，可有效管理联合收获机运行工况信息。

汪凤珠等[74]针对当前联合收获机作业参数监测效率低以及参数关联效果差等问题，以玉米青贮收获机为例，开展了多参数系统性测量与融合分析方法研究，搭建了车载终端系统，实现了车载多源传感数据的采集、接收和存储（图 17）。



图 17　车载终端采集界面

Fig. 17　Vehicle terminal acquisition interface

综上，农业装备车载终端管理技术逐渐成为现代农业机械智能化不可或缺的组成部分。国外农业装备不论是主机企业还是配套企业的终端设备，基本都符合 ISOBUS 标准。国内农业装备企业与国外不同，一般使用配套公司的监控终端产品。我国与国外农业装备终端管理与集成技术发展水平相比，在基础技术研究、自主创新能力以及适配程度等方面存在较大的差距，应加快发展我国农业装备车载终端信息化管理技术，有效提高农机管理水平，进而实现农机车载终端作业信息化管理的进一步提升。

2　多机协同作业研究进展

20 世纪 80 年代中期，为了提高大型农机具的利用率，农民自发形成了集群作业模式[75-78]。我国农业生产具有地域性、季节性和周期性等特点，导致我国不同地区间农作物的成熟季节和成熟时间不同，农作物收获时间具有明显的时间梯度。农机集群作业是基于我国国情发展的极具特色的生产模式，为农户小规模生产和机械大规模作业之间的矛盾提供了重要的解决途径[44-45]。

农机机群多机协同作业技术主要是指两台或两台以上的同种或异种农机的任务分配，并相互配合完成作业，通常包括路径规划、轨迹跟踪、通信以及领导者/跟随者等，是智能农业装备领域的一个新方向，是提高农机利用率、提升农机作业质量、提高作业效率的重要手段。开展农业装备多机协同作业技术的研究与实践，开发符合我国农业生产特点的农机多机协同作业系统，是提高我国农机利用率、提升农机作业质量、提高作业效率的重要手段，同时对于未来无人农场的农机调配也可提供重要的理论依据[46]。农机运维服务平台可以实现区域内多机协同作业的实时远程监控，并对作业农机实现作业管理和调度管理（图 18）。

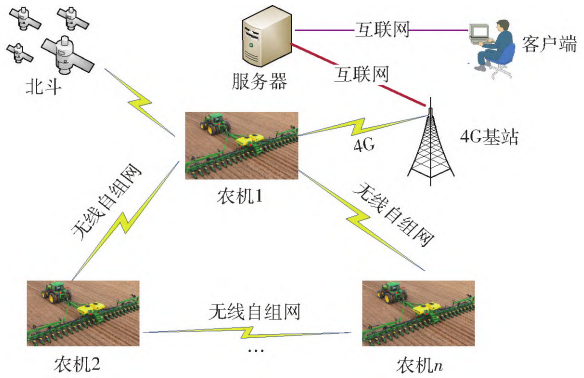


图 18　服务调度构架

Fig. 18　Service scheduling architecture

收获机-运粮车协同作业、农机多机协同作业、农机云端协同智能作业等是农机协同作业关键技术。美国 CASE 针对多机协同作业，通过采用在机群中每台农机上配备一台高精度 GNSS 的方法来解决机群中各农机的定位问题，最终实现多机协同与导航作业（图 19a）。美国 AGCO 旗下的芬特公司推出一款由 1 个驾驶员同时驾驶 2 台拖拉机的协同控制系统，驾驶员在前方手动驾驶 1 台拖拉机作为引导，后方拖拉机通过自动驾驶系统实现自动跟随，2 台拖拉机通过差分 GPS 实现高精度定位，最终实现 2 台拖拉机及机具的协同作业（图 19b）；德国 CLAAS 公司，通过收获机机群协同导航定位方法，采用收获机-运粮车协同作业的方式，以实现不停车卸粮（图 19c）；雷沃重工开展了收获机-运粮车主-从跟随协同作业系统试验研究，该系统由主机自动导航收获机和从机自动导航运粮车两部分组成，自动导航收获机可实现自主路径规划并能实现地头自动转弯（图 19d）；罗锡文院士团队开展了无人驾驶收获机和无人驾驶运粮车协同作业研究，实现了在无人驾驶收获机收获的同时将小麦精准卸至无人驾驶运粮车箱中（图 19e）；中国一拖云-端协同智能收获机器人系统，通过研究收获机器人作业环境感知及场景识别认知、自动驾驶控制及多参数融合智能作业控制等关键技术，实现了自动驾驶功能，完成收获机器人与服务车、收获机器人群组间的协同作业（图 19f）。

农机装备多机协同是智能农业装备的研究新方向，是实现农业装备现代化、智能化和发展无人化农



图 19 多机协同作业场景

Fig. 19 Multicombine harvester test operation scenario

场的重要途径。发展多机协同作业系统可以显著提高农业装备作业质量和时间利用率,加速平台的作业效率[79]。

2.1 多机集群作业

在农业生产中,农机集群协作作业对于实现规模化、精准化以及无人化田间作业起重要作用,并在实际中得到广泛运用;目前,针对农机集群的路径规划主要包含跨区集群作业和区内作业。农机跨区作业是指根据不同地域农作物成熟期差异及农机保有量的不平衡,跨越县级以上行政区域开展耕地、收获、植保等机械化作业的一种农业社会化服务模式[80]。

大多数欧洲国家、美国、加拿大、澳大利亚等土地经营规模较大,经济条件好,配有大型农业机械,不仅能保证农业生产需求,并且机具利用率相对较高。国外对农机跨区作业研究较少,国外农田和农机一般都是农场主自有,很少组织大规模农机跨区作业[81],重点考虑的是各种农业装备的集群作业和协同作业,如收获机与运输车辆之间的配合问题。

中国是农业大国,三夏时节大量联合收获机跨区作业,当恶劣天气来临前或有紧急作业需求时,迫切需要紧急调配区域外的农业装备进行抢收抢种工作。农机跨区作业,以提高农机的利用率为手段,以增加农机经营主体的收益为目标,扩大了农机应用范围,最大限度地提高了农机投资回报率,调动了农民投资农机、发展生产的积极性,加快了农业机械化进程[82]。2021 年全国投入约 1.65×10^7 台各类农机,保障夏收夏种顺利进行,其中小麦联合收获机超过 6.0×10^5 台,参与跨区机收的机具约 2.5×10^5 台,图 20 所示为每年的夏收季节,小麦收获机作业重心迁移情况[45]。

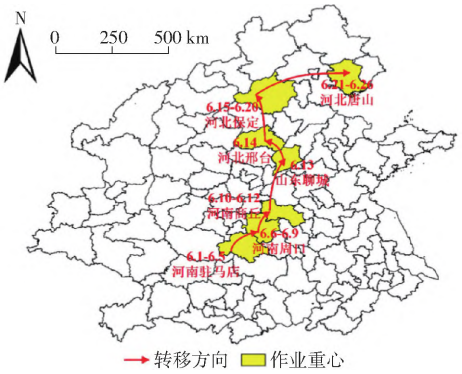


图 20 小麦收获作业重心

Fig. 20 Center of operation of wheat harvesting

许多学者基于区域内的集群作业情况提出了许多优化算法[83-84],这些优化算法可以解决路径冗余和覆盖区域重叠的问题,提高了联合收获机的作业效率。目前,较为常用的优化方法有粒子群算法、蚁群算法、遗传算法、模拟退火算法和 A* 算法。景云鹏等[85]提出了一种基于改进蚁群算法的农田平地导航三维路径规划方法,由于作业场景相似,该方法同样适用于联合收获机作业场景。贾会群等[86]对传统粒子群算法进行改进,使用三角函数变化规律自适应地调整算法中的各个参数,同时引入更新方程对搜索停滞的粒子进行扰动,提高了路径规划精度。殷建军等[87]在 A* 算法的基础上,提出了一种基于改进启发式搜索的 ECA* 路径规划算法,该算法可以在资源受限的情况下完成能量损耗最优路径的规划。姚竟发等[88]提出了联合收获机多机无冲突协同作业路径优化算法,研究结果表明采用 IGA 进行多联合收获机作业路径优化是可行的,可为联合收获机多机无冲突协同作业路径规划提供新思路。

2.2 农机多机协同控制

目前农机多机协同作业一般是指农机在同一田块内的协同作业或不同田块间的协同作业[89]。多机协同控制是指在田间作业可采用多台农机协同作业方式,这种作业模式可以更快的完成农田作业任务,也便于平台的集中管理[90]。多机协同作业具有多种作业模式,主要包括主从配合的作业模式和无需主从配合的作业模式。其中,主从配合的作业模式需要收获机主机与从机保持一定的距离与角度,多采用积分滑模控制方法;无需主从配合的作业模式则是对多台收获机的作业路径进行规划,避免收获机在作业过程中发生碰撞。FENDT 公司研发的

MARS 系统是群体智能控制技术在农业工程领域的第一个商业化应用，一个主机负责给多个自走小型农机添料，监控和带领小型农机协同作业。LI 等[91]提出了一种基于 NSGA－Ⅲ命令的多机协同作业智能调度方法和改进蚁群算法，解决了联合收获机与运粮车多机协同作业的最优调度问题。

在规模化农机服务场景中，田间多机械操作很常见，尤其是在大中型机械合作社中自动转向系统的使用率激增的情况下[92]。如图 21 所示，GUAN 等[93]基于联合收获机在稻田中的运动学特性，构建了圆形反正切线跟踪模型，提出了履带收获机路径跟踪算法和控制策略，为农业装备导航系统的设计与优化提供了技术参考，对提高农业生产效率具有重要意义。

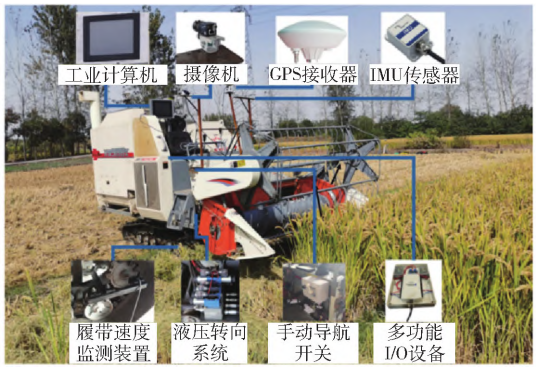


图 21　履带式水稻联合收获机辅助导航系统

Fig. 21　Auxiliary navigation system of crawler type rice combine harvester

白晓平[94]提出了一种基于领航-跟随结构的联合收获机机群协同导航控制方法，基于滑模控制理论和反馈线性方法建立了联合收获机机群的运动学模型，完成了联合收获机机群的路径跟踪控制和队形保持控制。曹如月等[95-96]基于 Web－GIS 设计了一个机群作业远程监控平台，该平台可对多台联合收获机的作业轨迹实时监测，其作业示意图如图 22 所示，实现决策分析、任务调度和作业历史记录查询等功能。王玲等[97]基于虚拟仪器技术设计了一种农机机群远程监测系统，能够采集田间作业机群的地理位置、收获面积、作业转台和行驶轨迹等数据，并利用 GSM 服务将数据传输至 Access 服务器以实现远程监控的目的。

2.3　农机多机任务分配

农业装备跨区作业存在作业任务重、转移范围大、作业时效性强等问题，传统的农机调度缺乏科学合理的调配方案。实现多台同种或异种作业农机之间协同作业，为农机规模化调度和农场规模化作业提供了技术支撑[98]。

农机作业任务分配是指在农业装备全面作业管

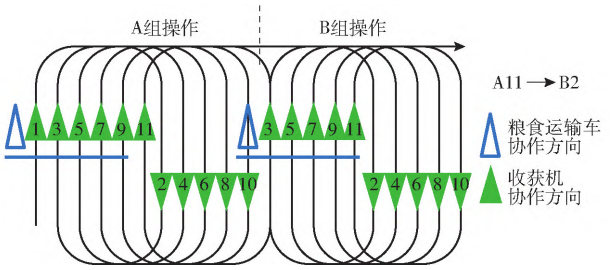


图 22　收获机群编队作业示意图

Fig. 22　Schematic of formation operation of harvester fleet

理过程中，需要将每个任务合理分配给合适的农业作业机器，或在突发任务重新调配新的农机参加作业，使得农机机群的工作效率最大化。可以显著提高土地利用率和工作精度，提高生产效率，降低生产成本，并有效减少农机操作员的劳动力[99]。以联合收获机为例，多机作业任务分配指通过对联合收获机机群设定一个评价指标，将收割任务分配给特定的联合收获机，可以在完成作业任务的前提下，获取最大的机群利用率与收益率[100]。

高效合理的任务分配可以提高整个平台的作业效率，如图 23 所示，GUEVARA 等[101]提出了一种分散的合作协同策略，将田地划分为收获区域，为每个区域分配一辆活动的 N 型拖车，根据有效载荷能力和机动性约束确定要使用的拖车数量，适当地协调共享工作空间。

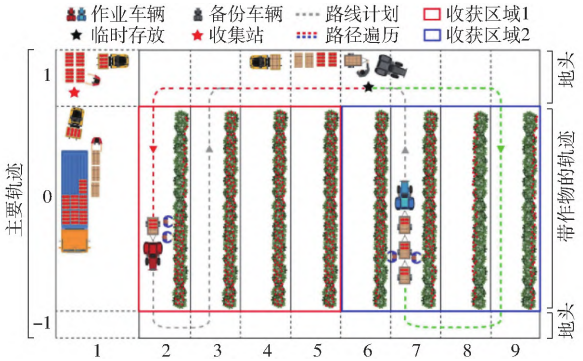


图 23　协调 N 型拖车车队提高人工收割作业效率示意图

Fig. 23　Coordinating N-type trailer fleet to improve efficiency of manual harvesting operations

王宁等[102]将多机任务分配算法分为基于数学规划的任务分配方法、基于启发式搜索的任务分配方法、基于智能群体的任务分配方法和基于市场机制的任务分配方法。如图 24 所示，王猛等[103]提出了一种基于改进合同网算法的同种农机机群动态作业任务分配方法，并在不同时间进行基于传统算法和改进算法的农机机群动态作业任务分配仿真试验和播种作业试验，试验结果表明，基于改进合同网的农机机群动态任务分配方法可以解决机群作业过程中有突发情况且无严格作业时间窗口的动态任务分配问题。曹如月等[104]开展了基于蚁群算法的多机

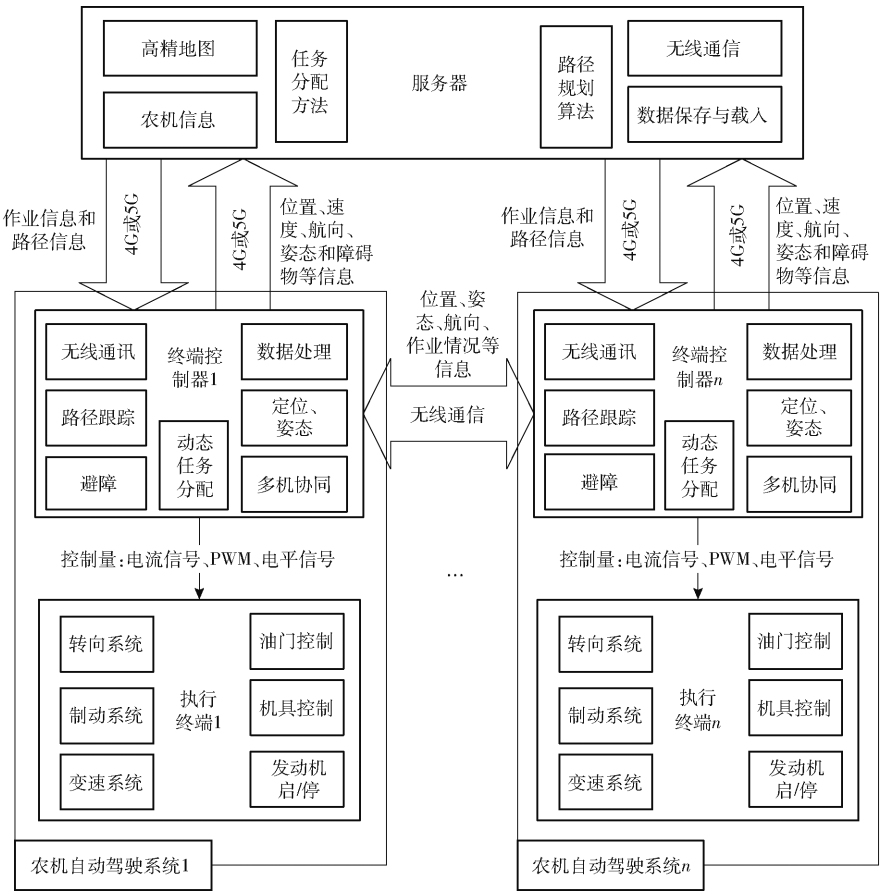


图 24 多机协同作业总体构架

Fig. 24 Overall architecture of multi machine collaborative operations

协同作业任务规划研究,采用蚁群算法对农机已分配的任务进行任务规划,该算法运行满足多机协同作业的实时性需求[105]。

我国对于农业装备多机任务分配已经取得了一些成果,但农业装备具有非线性、高复杂特征,多机任务分配较为复杂,相关技术仍有较大的空白需要填补。且目前的研究主要集中在静态任务的分配,在实际作业中作业环境会随着外部环境的变化发生改变,因此动态任务分配是多机任务分配中亟待解决的难点问题。

3 农机运维服务研究进展

3.1 农机维护模式

农业机械是一个结构复杂、组成部件较多的机械装备,其共性强,易损易坏结构类似,其故障特点具有一定规律。在农业装备智能化研究领域,当农业机械在现场的真实环境中工作时,会遇到坑洼甚至泥土。工作环境复杂,有许多不可预测的情况,容易导致机械部件损坏和控制系统故障,影响农机运行的效率和质量。在完成农机的故障诊断和故障预测之后,如何降低停机维修代价,减少停机损失,进行高效维修,是农业机械运维服务中的重要环节,即农机的维修策略设计[106]。如图 25 所示,在农机维护场景中,通常由农机制造商、农户以及服务商等要素组成,实现农业装备的运维服务。

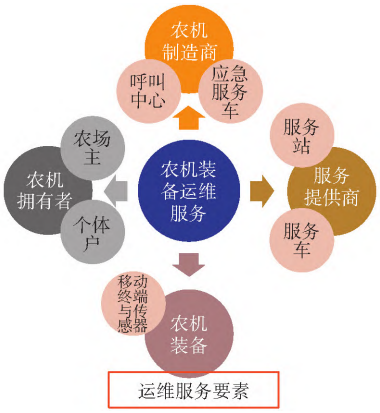


图 25 农机运维服务要素组成

Fig. 25 Composition of agricultural machinery operation and maintenance service elements

此外,运维服务质量以及故障处理时效性是影响农机手和农田作物经济效益的直接因素。由于农业装备等农业机械的功能特殊性,其机器性能远落后于普通汽车,当出现农业装备作业故障之后,只能人工联系农机运维服务站,通过派出维修人员到农机故障现场进行故障排除[107-109]。典型的维修服务工作流程如图 26 所示。

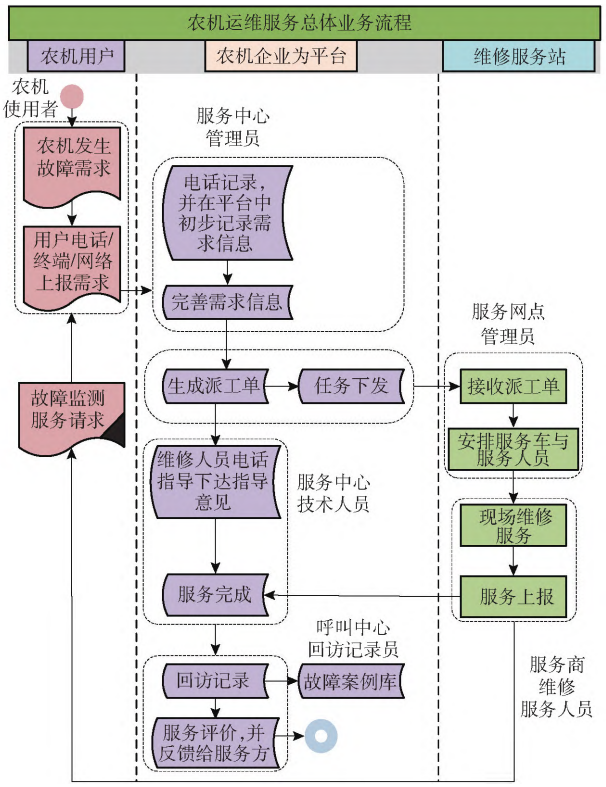


图 26　维修服务工作流程图

Fig. 26　Flow chart of maintenance service work

对于农机出现的常见故障信息，主要基于用户的电话描述进行故障判断与方案制定，可能因描述沟通不畅、描述不准确等问题，导致错误的维修调度方案，当企业维修人员到达故障现场进行服务时，造成了运维资源浪费，并增加了工作量，大大降低了农业装备维护效率[110-111]。GUALBERTO 等[112]根据联合收获机作业位置频繁变化的特征，以收获机维修紧急服务作为案例，综合考虑时间窗、运维成本以及运维距离，开发了应急分析服务系统。随着智能算法的快速发展，也出现了使用基于粒子群算法的重复博弈算法、蚁群算法、深度学习算法等进行农机应急调度的方案[113]，相比于其他算法，具有调度速度更快、考虑更全面的优势[114]。

3.2　农机诊断与预警服务管理

农业装备在作业期间受到场地和作业环境的限制，容易发生磨损和故障。其产生故障的主要原因包括磨损、腐蚀、疲劳、松动等，故障诊断与预警技术能够使被动维修变为主动维护，有效降低故障的影响。农业装备故障诊断服务能够提取表征农机关键零配件运行状态的参数与模型，基于仿真动力学的故障关联模型构建、大数据的故障智能诊断及健康评估、性能演变、回归预测及时间序列分析等技术手段，利用模糊专家系统进行模糊化、知识组织与模糊推理，根据模糊故障信号对农业装备进行故障诊断（图 27）。

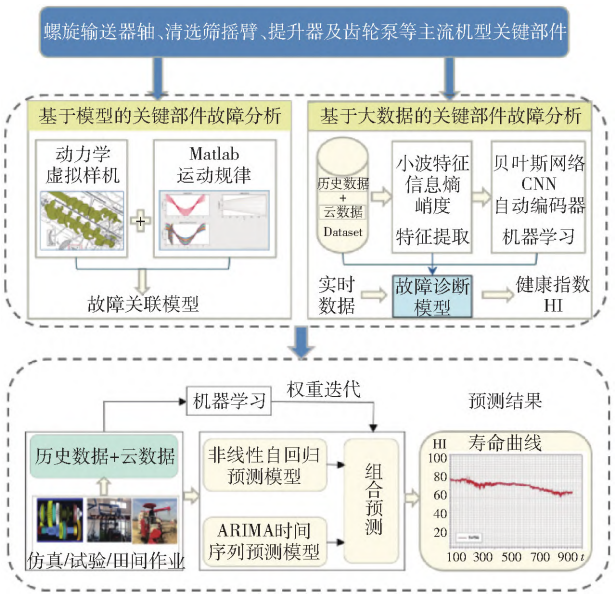


图 27　农业装备关键部件作业故障诊断流程图

Fig. 27　Fault diagnosis and prediction flowchart

农业装备故障诊断服务能够精确描述农机关键部件运行过程中工况参数之间动态关联的逻辑关系，进行数据验证和判断，分析农机关键部件的运行状态[115-116]。并通过各个检测模块和智能监测终端，对农业装备整机关键部件的运行状态进行实时监测和故障预警（图 28）。联合收获机作业环境复杂多变，尤其是在农忙抢收期间，始终处于高负荷运转状态，易导致机器故障频发[117]。因此，通过在线监测技术实时了解联合收获机的作业工况信息，结合故障辨识技术，及时进行诊断处理，可有效避免收获作业故障的发生。



图 28　联合收获机故障预警与决策

Fig. 28　Combine harvester fault warning and decision-making

以联合收获机为代表的复杂农机设备的状态数据监测系统记录了大量的运行故障信息，这些信息在时间维度上具有一定的分布规律，但由于数据来源于不同状态下的设备，故障真实变化规律往往难以发现，造成传统故障预测方法的准确率较低。机器学习、深度学习等人工智能技术能够很好地对采集到的状态数据进行模型训练和优化，可用于实现

联合收获机故障的准确识别。如图 29 所示，JAUMANN 等[118]研究了两种用于圆盘割草机智能状态监测的深度学习模型，通过监测传感器数据变化检测机器过程中的异常。

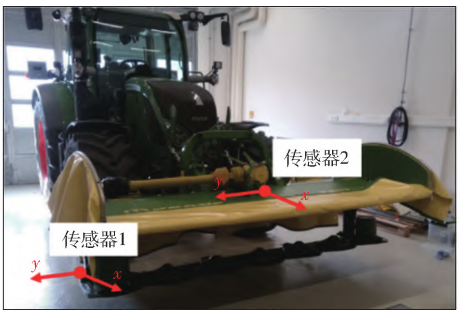


图 29 圆盘割草机作业信息采集

Fig. 29 Collection of operation information for disc mowers

聂国健等[119]根据联合收获机的工作特征，提出了基于混合神经网络的联合收获机故障预测模型，能够对联合收获机的潜在故障进行特征分析并完成历史数据学习训练，然后分别对处于不同潜在故障状态下的时间序列数据进行分析训练并展开预测，为设备健康管理与维修决策提供数据支持。

陈进等[120]基于 ARM 控制器开发了联合收获机远程监测系统，实时接收联合收获机作业过程中的转速信号，并通过对数据进行处理和故障诊断，最终通过搭建上位机终端系统实现了可视化交互功能。LIU 等[121]通过加装传感器的方式，实时获取关键部位的转速信息，并通过车载终端系统实时远程传输作业信息，最后通过诊断系统识别故障原因。随着传感器技术、监测和诊断技术的快速发展，采用智能化方法实现故障诊断得到了广泛的关注和研究。学者通过获取收获机的监测数据，采用 SDAE、随机森林和 SVM 展开了联合收获机的分析和故障诊断[122-125]。SHIN 等[126]根据联合收获机结构组成，将常见的故障类型分为割台故障、脱粒滚筒故障和螺旋输送器故障等特征，并根据各传动情况，提出了预防和事后维修故障的相关措施。

3.3 农机维护服务资源管理

从 20 世纪 50 年代发展至今，利用大数据、人工智能等技术进行装备维修资源配置优化已成为当前维修服务研究的热点。尤其集中在军事装备、电力能源配置以及应急管理等领域。但由于农机具有较强的机动性要求，如何进行系统筹划、科学组织和有效配置[127-131]，在农机维修服务资源方面存在着难点[132]。比如，在农机维修服务中，当企业维修人员到达故障现场进行服务时，若不能准确携带合适的备件，可能需要再次或几轮返回维护服务网点来解决故障，错误的故障决策导致资源浪费，不仅增加了工作量，而且会降低维护效率。

国内外鲜有学者基于农机集群作业的视角，开展农机维修工作的资源配置优化问题研究。农机维修服务是指相关农机企业根据农机用户的运维请求，为故障农机提供的维修、保养和修理故障服务[133]。农机集群作业维修服务请求具有动态性，如何优化服务资源配置，实现对联合收获机运维服务的动态响应、资源供给是保障农机可靠运行的关键，也是开展农机运维维修工作研究的核心所在[134-137]。

依据农机维修服务特点，维修成本最优和维修服务快速到达农机故障点是提高维修工作效率的关键，做好农机服务工作对提升农机作业质量、促进农业生产健康有序地开展具有十分重要的作用。开发农业场景中的系统平台能够有效降低成本，减少资源浪费。如图 30 所示，农机企业通过对农机故障信息的监测和诊断，并通过对区域内服务资源的有效配置，能够快速解决农机故障问题[138]。

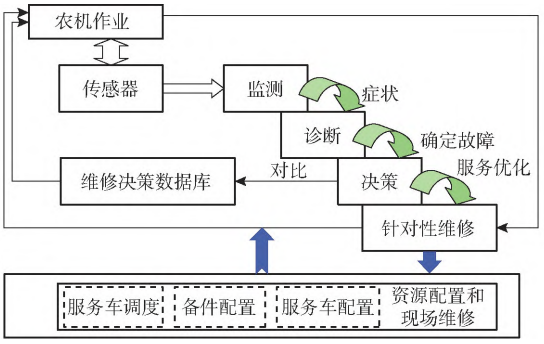


图 30 故障监测与维修决策过程

Fig. 30 Fault monitoring and maintenance decision process

3.4 服务调度管理

在农机维修服务调度方面，欧美国家大多是农场自有大型农机实现农机作业和维修工作[50,101-103]，鲜有开展联合收获机维修服务调度相关的研究，而我国以前在农业机械密集使用过程中，其维修过程管理混乱且不具有科学性，随着农业机械的智能化、集群化发展，亟需解决联合收获机维修服务调度优化问题。运维服务路径优化问题是实现联合收获机维修服务调度的关键，相关内容的研究能够有效节约运维成本。

农机运维服务平台系统具有数据分析、大空间存储和统一管理能力，可即时调度任务事件，并通过农机服务管控平台实现可视化数据管理，便于对任务的实时处理。服务平台系统对农业的贡献在许多研究中都有讨论。通过服务平台对资源的调度优化[139]，可以扩大农机运维服务领域智能化数据的应用，有效管理和控制农业场景中运维服务资源的优化，快速解决联合收获机故障，有助于提高全面作

业运维效率[140]。分析目前的农机维修服务调度研究成果，针对农机跨区集群作业的服务调度和路径优化研究较少。

调度优化问题在不同领域得到专家学者的广泛研究。针对集群调度路径优化问题，目前在物流服务、车辆派送、应急抢救以及军事作战等领域得到了应用[141-142]。针对农机作业场景的调度优化问题在国内外研究过程中得到了广泛关注[143]，大部分研究集中在农机的田间路径规划与调度[144]。而针对农机运维服务调度问题，目前主要围绕作业服务调度和维修服务调度两方面开展研究。

其中，在收获机作业维修调度服务方面，目前多采用静态调度的方式，需根据农机维修场景（单服务点多需求点、多服务点多需求点）获取有效的调度模型[145]。学者们对收获机作业调度问题从不同角度进行了扩展研究。HE 等[146]对于考虑零散耕地的小麦收获，提出了一种混合禁忌搜索方法，以实现最小化收获期和联合收获机之间收获时间差异的最佳时间，通过案例表明，该算法的应用使不同收获机主之间的效率和公平性得到提高。SEYYEDHASANI 等[147]开发了一种优化方法，用于在田地中的农业机械车队之间分配优化路径，从而最大限度地减少了完成田地作业的时间。如图 31 所示，PUNYAKUM 等[148]采用混合差分进化和粒子群优化算法（HDEPSO）实现对机械、液压和电气技术人员服务团队的规划，以解决泰国甘蔗厂现场服务运营中的多次访问和多周期劳动力调度与路径优化问题。

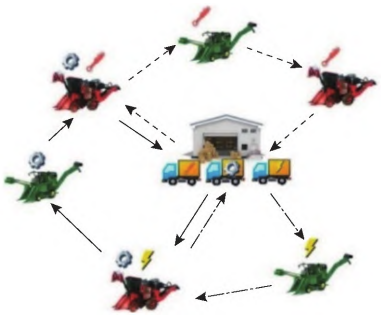


图 31　多次访问和多周期劳动力调度

Fig. 31　Multiple visits and multi-cycle labor scheduling

GRAF 等[149]提出一种基于作物收获分配与车辆路线耦合的收获规划方法，将作物分配与田间车辆路线相结合，进行收获规划，对于农场的多个仓库的多台收获机，开展针对不同作物的分配收获（图 32）。

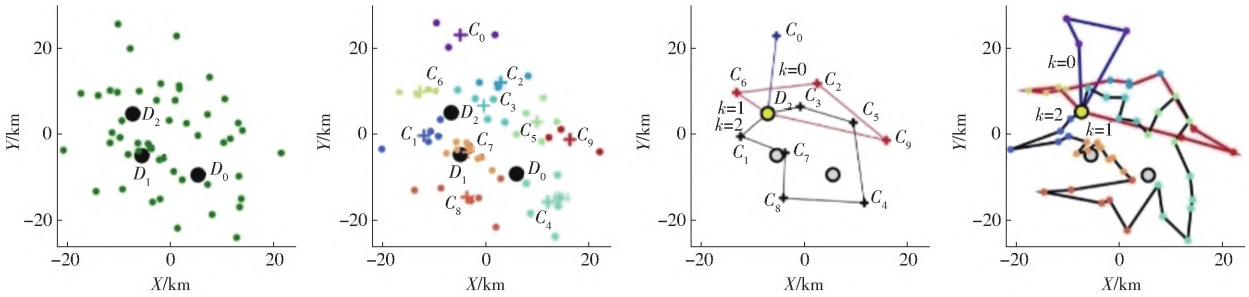


图 32　不同农机的任务分配与路线

Fig. 32　Task allocation and route of different agricultural machinery

如图 33 所示，ZUNIGA 等[150]针对农业生产计划和机械调度，提出了一种农场生产和机械调度方法，最终以最大化农民的净产值为目标，通过案例验证了模型的有效性，并通过地理信息系统产生了优化调度路线。

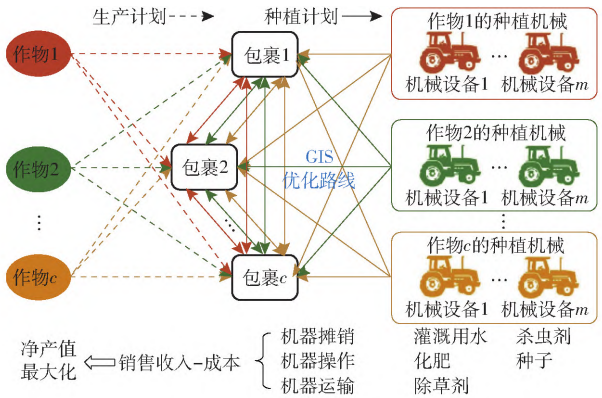


图 33　最大化农民净产值的农机动态调度

Fig. 33　Dynamic scheduling of agricultural machinery to maximize farmers' net worth

4　现状问题分析

我国农业装备信息技术发展正处于由传统农业向现代农业转型的关键时期，农机信息化智能化程度向标准化、智能化与规模化方向发展，农业装备全面远程运维在工况数据监测、故障诊断维修服务配置以及运维服务平台等重点方面均得到了不同程度的研究与进展。随着服务平台、智能感知、大数据等相关技术的发展，农业装备正朝着自动化、信息化和智能化方向发展，农机信息化管理是实现增产提效、降低成本、提升作业可靠性的重要途径之一。

智慧农机大数据平台是国家重点关注的发展内容，通过结合大数据平台的建设，能够全面提升农机机械设备管理效果，目前我国农业装备信息化管理

平台建设主要以政府推动为主,农机大数据平台智能化建设还处于探索阶段。由于当前没有建立稳定的投入机制,加上农机企业、农业管理部门以及科研机构等自身投入能力弱,农机信息管理平台以及农机大数据服务技术在农业领域的应用多以项目建设带动的试点示范阶段(吉林、内蒙、山东等地)。各类农业装备集成技术手段有限,农业装备企业主体地位尚未发挥,推广应用还难以全面实现,信息技术转化为现实生产力的任务仍然艰巨。

从国内外的相关研究来看,农机作业信息化平台管理技术尚处于发展阶段,在服务资源配置与优化方面多为理论研究,且服务管理平台的移植性、通用性较差,与实际作业场景还存在一定差距。

5 研究展望

为了更好地将理论研究、技术应用与实际生产相融合,结合农业装备管理技术发展要求和应用场景分析,未来可从以下方面开展深入研究。

(1) 农业装备故障诊断算法创新

国内外学者对于农业装备故障诊断算法的研究较多,并取得一定成果。大部分农机故障诊断算法仅针对农业生产过程中某单一故障情形,存在一定的局限性。但在实际田间作业过程中,农机经常出现耦合故障以及多故障并发的情况,且现代农业装备监测信号逐渐呈现高维、大量、复杂化的特征,未来可以通过改进现有故障诊断算法或融合多种优化算法,进一步提升故障诊断算法的识别精度和模型泛化能力。

(2) 农业装备作业监测类别多样化

农业装备的故障类型涉及机械、电气、液压等多领域,但现有的农机作业监测系统大多针对某几个特定的故障类型,无法支撑实现全面的故障诊断研究,且作业监测系统在不同类别农业装备间的兼容性较差。因此,未来农业装备作业监测系统可从多类型故障检测、高机型适配性、高参数扩展性等设计目标出发,进一步开展研究,实现多维全面的参数采集。

(3)农业装备运维服务资源配置优化

目前,对于服务资源优化配置的研究主要集中在定点目标或静态环境上,但在实际的田间作业场景下,农机生产作业环境具有较大复杂性、农机作业故障具有明显的突发性、服务车路径规划存在一定的不合理性,这些干扰因素使得服务资源配置在未知环境或动态环境中难以获得较为满意的任务分配效果。因此,服务资源实时动态配置优化方法是未来的研究重点之一,需要综合考虑环境的动态性和不确定性、实施结果存在的误差以及应用场景的真实性等因素,应进一步探索满足高精度、快响应要求的动态资源分配模型。

(4)农业装备管理技术集成

为了满足农业装备日益增加的实际生产需求,进一步提升作业效率和作业质量,国内外研究人员不断尝试将机器视觉、GNSS、物联网等先进技术集成到农机管理平台中,使各技术模块之间可以相互协调配合。未来的农业装备管理平台将逐渐向综合化、系统化、高效化等方向发展,通过实现农机生产作业信息的高扩展、强交互、高可靠,使农业装备在实际作业过程中更加自动化、智能化。

(5)农业装备信息化管理能力提升

针对农业装备田间大数据,如何增加有效作业数据量,运用大数据清洗、大数据分析及大数据管理等现代化农业信息数据处理手段,提高农业装备大数据的利用度与数据共享度,并融合具备自学习能力的人工智能模型,进一步提升农业装备智能化水平是未来的重点研究方向。

参 考 文 献

[1] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. 智慧农业, 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)

[2] 吴才聪, 方向明. 基于北斗系统的大田智慧农业精准服务体系构建[J]. 智慧农业, 2019, 1(4): 83-90.
WU Caicong, FANG Xiangming. Development of precision service system for intelligent agriculture field crop production based on BeiDou system[J]. Smart Agriculture, 2019, 1(4): 83-90. (in Chinese)

[3] 甄鸣, 涛高波. 智慧农机大数据平台发展的问题及对策[J]. 农业经济, 2018(12): 14-16.
ZHEN Ming, TAO Gaobo. Problems and countermeasures for the development of smart agricultural machinery big data platform[J]. Agricultural Economy, 2018(12): 14-16. (in Chinese)

[4] 张昱婷, 滕桂法. 基于大数据的农机作业管理与决策系统[J]. 河北农机, 2018(7): 13-14.
ZHANG Yuting, TENG Guifa. Agricultural machinery operation management and decision system based on big data[J]. Hebei Farm Machinery, 2018(7): 13-14. (in Chinese)

[5] POPOVIĆ T, LATINOVIĆ N, PEŠIĆ A, et al. Architecting an IoT-enabled platform for precision agriculture and ecological monitoring: a case study[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 140: 255-265.

[6] DEBAUCHE O, MAHMOUDI S, MANNEBACK P, et al. Cloud and distributed architectures for data management in agriculture 4.0: review and future trends[J]. Journal of King Saud University—Computer and Information Sciences, 2022, 34(9): 7494 - 7514.
[7] 张彦芳. 基于大数据和区块链技术的农机远程监测系统[J]. 农机化研究,2023,45(9):197 - 200.
ZHANG Yanfang. Agricultural machinery remote monitoring system based on big data and blockchain technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023,45(9):197 - 200. (in Chinese)
[8] 李道亮,杨昊. 农业物联网技术研究进展与发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2018,49(1):1 - 20.
LI Daoliang,YANG Hao. State-of-the-art review for internet of things in agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(1):1 - 20. (in Chinese)
[9] 罗锡文, 廖娟, 邹湘军,等. 信息技术提升农业机械化水平[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 1 - 14.
LUO Xiwen, LIAO Juan, ZOU Xiangjun, et al. Enhancing agricultural mechanization level through information technology[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 1 - 14. (in Chinese)
[10] 苑严伟,徐玲,冀福华,等. 农业机械作业大数据清洗方法与试验优化[J]. 农业机械学报,2021,52(6):35 - 42.
YUAN Yanwei,XU Ling,JI Fuhua,et al. Experimental optimization of big data cleaning method for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(6):35 - 42. (in Chinese)
[11] 姜含露,周利明,马明,等. 基于多条件时间序列的免耕播种机作业数据清洗方法[J]. 农业机械学报,2022,53(1):85 - 91.
JIANG Hanlu,ZHOU Liming,MA Ming,et al. Data cleaning method of no-tillage seeder monitoring data based on multi-conditional time series[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(1):85 - 91. (in Chinese)
[12] 吴杰楠. 基于 Zigbee 云服务的拖拉机作业环境监测系统设计[J]. 农机化研究, 2018,40(8):245 - 248.
WU Jienan. Design of tractor operation environment monitoring system based on ZigBee cloud service[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018,40(8):245 - 248. (in Chinese)
[13] 谢斌,武仲斌,毛恩荣. 农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J]. 农业机械学报,2018,49(8):1 - 17.
XIE Bin,WU Zhongbin,MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(8):1 - 17. (in Chinese)
[14] 汪珍珍,周俊,杨杭旭,等. 电动拖拉机快速原型平台测控系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):412 - 420.
WANG Zhenzhen,ZHOU Jun,YANG Hangxu,et al. Design and test of measurement and control system for rapid prototype platform used in electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):412 - 420. (in Chinese)
[15] 刘孟楠,雷生辉,赵静慧,等. 电动拖拉机发展历程与研究现状综述[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊 1):348 - 364.
LIU Mengnan,LEI Shenghui,ZHAO Jinghui,et al. Review of development process and research status of electric tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(Supp. 1):348 - 364. (in Chinese)
[16] 刘孟楠,徐立友,周志立,等. 增程式电动拖拉机及其旋耕机组仿真平台开发[J]. 中国机械工程,2016,27(3): 413 - 419.
LIU Mengnan, XU Liyou, ZHOU Zhili, et al. Establishment of extended range electric tractor and its rotary cultivator's simulative platforms[J]. China Mechanical Engineering,2016,27(3): 413 - 419. (in Chinese)
[17] 谢斌,朱忠祥,宋正河,等. 拖拉机作业机组分布式控制系统结构模型[J]. 农业机械学报,2011,42(12):182 - 185,196.
XIE Bin, ZHU Zhongxiang, SONG Zhenghe, et al. Structural model of distributed control system for tractor implement combination[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(12):182 - 185,196. (in Chinese)
[18] 杨洋,查家翼,李延凯,等. 拖拉机机组无人作业协同控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):421 - 429.
YANG Yang,ZHA Jiayi,LI Yankai,et al. Design and experiment of unmanned operation cooperative control system for tractor operating unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):421 - 429. (in Chinese)
[19] 袁洪良,郭锐,薛梦琦,等. 基于状态空间建模的智能农机模型辨识与柔化控制[J]. 农业机械学报,2022,53(10):405 - 411.
YUAN Hongliang,GUO Rui,XUE Mengqi,et al. State-space modeling and identification of intelligent agricultural machinery and flexible LQR control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(10):405 - 411. (in Chinese)
[20] 王辉,刘艺豪,周利明,等. 施肥播种机肥料流量分段式 PID 控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):32 - 40.
WANG Hui,LIU Yihao,ZHOU Liming,et al. Design and test of fertilizer flow piecewise PID control system of fertilizer planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(2):32 - 40. (in Chinese)
[21] 苑严伟,白慧娟,方宪法,等. 玉米播种与测控技术研究进展[J]. 农业机械学报,2018,49(9):1 - 18.
YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(9):1 - 18. (in Chinese)
[22] 高原源,王秀,杨硕,等. 基于 CAN 总线的播种深度监测评价系统研究[J]. 农业机械学报,2019,50(12):23 - 32.
GAO Yuanyuan,WANG Xiu,YANG Shuo,et al. Development of CAN-based sowing depth monitoring and evaluation system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(12):23 - 32. (in Chinese)
[23] 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)

[24] 乔金友,万盈贝,丛昕,等. 播种机组加种加肥参数与地块长度关系建模与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(7):43 - 55.
QIAO Jinyou, WAN Yingbei, CONG Xin, et al. Modeling and experiment on relationship between seed and fertilizer adding parameters for seeding machinery unit and plot length[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(7):43 - 55. (in Chinese)

[25] 廖庆喜,卜祥利,孙文成,等. 构建油菜种床合理耕层的驱动型犁旋联合耕整机研究[J]. 农业机械学报,2020,51(11):74 - 84.
LIAO Qingxi, BU Xiangli, SUN Wencheng, et al. Development of driven plow-rotary combined tillage machine for construction of rational tillage in rape seedbeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11):74 - 84. (in Chinese)

[26] 秦宽, 丁为民, 方志超, 等. 复式耕整机耕深与耕宽稳定性分析与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 1 - 8.
QIN Kuan, DING Weimin, FANG Zhichao, et al. Analysis and experiment of tillage depth and width stability for plowing and rotary tillage combined machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(9): 1 - 8. (in Chinese)

[27] 刘阳春,苑严伟,张俊宁,等. 深松作业远程管理系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):43 - 48.
LIU Yangchun, YUAN Yanwei, ZHANG Junning, et al. Design and experiment of remote management system for subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.):43 - 48. (in Chinese)

[28] 李笑, 李宏鹏, 牛东岭,等. 基于全球导航卫星系统的智能化精细平地系统优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 48 - 55.
LI Xiao, LI Hongpeng, NIU Dongling, et al. Optimization of GNSS-controlled land leveling system and related experiments [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 48 - 55. (in Chinese)

[29] 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 cooperation based on multi-variation group genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 19 - 28. (in Chinese)

[30] 尹彦鑫,王成,孟志军,等. 悬挂式深松机耕整地耕深检测方法研究[J]. 农业机械学报,2018,49(4):68 - 74.
YIN Yanxin, WANG Cheng, MENG Zhijun, et al. Operation quality measurement method for tilling depth of suspended subsoiler [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(4):68 - 74. (in Chinese)

[31] WASHIZU A, NAKANO S. Exploring the characteristics of smart agricultural development in Japan: analysis using a smart agricultural kaizen level technology map[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107001.

[32] 曹光乔,李亦白,南风,等. 植保无人机飞控系统与航线规划研究进展分析[J]. 农业机械学报,2020,51(8):1 - 16.
CAO Guangqiao, LI Yibai, NAN Feng, et al. Development and analysis of plant protection UAV flight control system and route planning research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(8):1 - 16. (in Chinese)

[33] 兰玉彬, 闫瑜, 王宝聚, 等. 智能施药机器人关键技术研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2022, 38(20): 30 - 40.
LAN Yubin, YAN Yu, WANG Baoju, et al. Current status and future development of the key technologies for intelligent pesticide spraying robots[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(20): 30 - 40. (in Chinese)

[34] 郑加强,徐幼林. 环境友好型农药喷施机械研究进展与展望[J]. 农业机械学报,2021,52(3):1 - 16.
ZHENG Jiaqiang, XU Youlin. Development and prospect in environment-friendly pesticide sprayers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(3):1 - 16. (in Chinese)

[35] 何雨田,白美健,张宝忠,等 . 灌区智慧化发展现状与问题分析[J]. 节水灌溉,2023(4):115 - 121.
HE Yutian, BAI Meijian, ZHANG Baozhong, et al. Analysis on current situation and problems of intelligent development in irrigated area[J]. Water Saving Irrigation, 2023(4):115 - 121. (in Chinese)

[36] 刘俊萍,朱兴业,袁寿其,等. 中国农业节水喷微灌装备研究进展及发展趋势[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(1):87 - 96.
LIU Junping, ZHU Xingye, YUAN Shouqi, et al. Research and development trend of agricultural water-saving sprinkler and micro-irrigation equipment in China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Enginecring, 2022,40(1):87 - 96. (in Chinese)

[37] 汤玲迪,袁寿其,刘俊萍,等. 中国喷灌机现状与发展思考[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(10): 1072 - 1080.
TANG Lingdi, YUAN Shouqi, LIU Junping, et al. Challenges and opportunities for development of sprinkler irrigation machine in China[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Enginecring, 2022,40(10):1072 - 1080. (in Chinese)

[38] 李可欣,郑源,陈跃钢,等. 基于微水发电系统的智禁农业物联网设备研发及应用[J]. 排灌机械工程学报,2022, 40(11):1173 - 1180.
LI Kexin, ZHENG Yuan, CHEN Yuegang, et al, Research and application of inteligent agricultural internet of things equipmen hased on micro-hydro power generation system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Enginecring, 2022, 40(11):1173 - 1180. (in Chinese)

[39] 汤玲迪,袁寿其,汤跃. 卷盘式喷灌机研究进展与发展趋势分析[J]. 农业机械学报,2018,49(10):1 - 15.
TANG Lingdi, YUAN Shouqi, TANG Yue. Analysis on research progress and development trend of hose reel irrigator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(10):1 - 15. (in Chinese)

[40] 鲁旭涛,张丽娜,刘昊,等. 智慧农业水田作物网络化精准灌溉系统设计[J]. 农业工程学报,2021,37(17):71 - 81.

LU Xutao, ZHANG Li'na, LIU Hao, et al. Design of the networked precision irrigation system for paddy field crops in intelligent agriculture[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(17): 71 - 81. (in Chinese)

[41] 尹彦鑫, 孟志军, 赵春江, 等. 大田无人农场关键技术研究现状与展望[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(4): 1 - 25.
YIN Yanxin, MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, et al. State-of-the-art and prospect of research on key technical for unmanned farms of field corp[J]. Smart Agriculture, 2022, 4(4): 1 - 25. (in Chinese)

[42] XIE R Z, MING B, GAO S, et al. Current state and suggestions for mechanical harvesting of corn in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21(3): 892 - 897.

[43] 师建霞. 为农机装上"千里眼"和"顺风耳"——国内首个农业全程机械化云服务平台发布[J]. 中国农村科技, 2017(5): 14 - 16.
SHI Jianxia. Installing "Qianli Eye" and "Shunfeng Ear" on agricultural machinery—the first agricultural full process mechanization cloud service platform in China released[J]. China Rural Science & Technology, 2017(5): 14 - 16. (in Chinese)

[44] 孙洁. 农业机械化大数据云服务平台的典型实例[J]. 中国农村科技, 2022(8): 24 - 25.
SUN Jie. A typical example of agricultural mechanization big data cloud service platform[J]. China Rural Science & Technology, 2022(8): 24 - 25. (in Chinese)

[45] 吴才聪, 陈瑛, 杨卫中, 等. 基于北斗的农机作业大数据系统构建[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 1 - 8.
WU Caicong, CHEN Ying, YANG Weizhong, et al. Construction of big data system of agricultural machinery based on BeiDou[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(5): 1 - 8. (in Chinese)

[46] 吴才聪,蔡亚平,罗梦佳,等. 基于时间窗的农机资源时空调度模型[J]. 农业机械学报,2013,44(5):237 - 241,231.
WU Caicong, CAI Yaping, LUO Mengjia, et al. Time-windows based temporal and spatial scheduling model for agricultural machinery resources[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 237 - 241, 231. (in Chinese)

[47] 吴连成, 李庆磊, 袁东阁, 等. 车联网农机实际作业工况下柴油机冷却液温度分布大数据分析[J]. 农业工程, 2023, 13(1): 102 - 107.
WU Liancheng, LI Qinglei, YUAN Dongge, et al. Big data analysis of diesel engine coolant temperature distribution under actual operating conditions of agricultural machinery with internet of vehicles[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(1): 102 - 107. (in Chinese)

[48] 李亚硕,赵博,王长伟,等. 基于 DBSCAN 和 BP_Adaboost 的农机作业地块划分方法[J]. 农业机械学报,2023,54(1): 37 - 44.
LI Yashuo, ZHAO Bo, WANG Changwei, et al. Land division method for agricultural machinery operation based on DBSCAN and BP_Adaboost[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 37 - 44. (in Chinese)

[49] LIANG Z, LI Y, XU L, et al. Optimum design of an array structure for the grain loss sensor to upgrade its resolution for harvesting rice in a combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2017, 157: 24 - 34.

[50] 曹光乔,马斌,陈聪,等. 基于遗传变邻域搜索算法的农机跨区调度优化研究[J]. 农业机械学报,2023,54(10):114 - 123.
CAO Guangqiao, MA Bin, CHEN Cong, et al. Agricultural machinery cross-region scheduling optimization based on genetic algorithm variable neighborhood search[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 114 - 123. (in Chinese)

[51] SINHA B B, DHANALAKSHMI R. Recent advancements and challenges of Internet of Things in smart agriculture: a survey[J]. Future Generation Computer Systems, 2022, 126: 169 - 184.

[52] 翟长远, 杨硕, 王秀, 等. 农机装备智能测控技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 1 - 20.
ZHAI Changyuan, YANG Shuo, WANG Xiu, et al. Status and prospect of intelligent measurement and control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 1 - 20. (in Chinese)

[53] PAUL K, CHATTERJEE S S, PAI P, et al. Viable smart sensors and their application in data driven agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107096.

[54] ABBASI R, MARTINEZ P, AHMAD R. The digitization of agricultural industry—a systematic literature review on agriculture 4.0[J]. Smart Agricultural Technology, 2022, 2: 100042.

[55] SONG Y, ZHANG X, WANG W. Rollover dynamics modelling and analysis of self-propelled combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2021, 209: 271 - 281.

[56] JAVAID M, HALEEM A, SINGH R P, et al. Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies[J]. International Journal of Intelligent Networks, 2022, 3: 150 - 164.

[57] 刘成良, 林洪振, 李彦明, 等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 1 - 18.
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1 - 18. (in Chinese)

[58] 王立军, 宋良来, 冯鑫, 等. 谷物联合收获机筛分装置研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报 2021, 52(6): 1 - 17.

WANG Lijun, SONG Lianglai, FENG Xin, et al. Research status and development analysis of screening devices of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 1 - 17. (in Chinese)

[59] YIN Yanxin, ZHANG Yawei, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of multi-information collection system for grain combine harvesters[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(17): 855 - 860.

[60] 徐海萍. 基于农机设计参数的数据安全管理系统研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(5): 225 - 228, 232.
XU Haiping. Research on data security management system based on agricultural machinery design parameters[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(5): 225 - 228, 232. (in Chinese)

[61] 伟利国, 张小超, 汪凤珠, 等. 联合收获机稻麦收获边界激光在线识别系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 30 - 35.
WEI Liguo, ZHANG Xiaochao, WANG Fengzhu, et al. Design and experiment of harvest boundary online recognition system for rice and wheat combine harvester based on laser detection[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 30 - 35. (in Chinese)

[62] 熊思华, 李彦明, 焦中元, 等. 稻麦联合收获机械总线化监控系统研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(4): 190 - 193, 199.
XIONG Sihua, LI Yanming, JIAO Zhongyuan, et al. Research on CAN - Bus monitoring system of rice and wheat combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(4): 190 - 193, 199. (in Chinese)

[63] 刘碧贞, 黄华, 祝诗平, 等. 基于北斗/GPS 的谷物收获机作业综合管理系统[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 204 - 210.
LIU Bizhen, HUANG Hua, ZHU Shiping, et al. Integrated management system of grain combine harvester based on Beidou & GPS[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 204 - 210. (in Chinese)

[64] LIANG Zhenwei, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Sensor for monitoring rice grain sieve losses in combine harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2016, 147: 51 - 66.

[65] ZHANG Yawei, YIN Yanxin, MENG Zhijun, et al. Development and testing of a grain combine harvester throughput monitoring system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 200: 107253.

[66] CHEN Man, JIN Chengqian, NI Youliang, et al. Online field performance evaluation system of a grain combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107047.

[67] 何勋, 陈旭, 屈哲, 等. 小麦收获智能化技术应用研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2022, 56(3): 341 - 354.
HE Xun, CHEN Xu, QU Zhe, et al. Review on application research and development of intelligent technology in the process of wheat harvest[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2022, 56(3): 341 - 354. (in Chinese)

[68] LIU Lei, DU Yuefeng, CHEN Du, et al. Impurity monitoring study for corn kernel harvesting based on machine vision and CPU - Net[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 202: 107436.

[69] 陈满, 倪有亮, 金诚谦, 等. 基于机器视觉的大豆机械化收获质量在线监测方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 91 - 98.
CHEN Man, NI Youliang, JIN Chengqian, et al. Online monitoring method of mechanized soybean harvest quality based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 91 - 98. (in Chinese)

[70] 杜岳峰, 张丽榕, 毛恩荣, 等. 基于 EMD 的联合收获机籽粒损失监测传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊 1): 158 - 165.
DU Yuefeng, ZHANG Lirong, MAO Enrong, et al. Design and experiment of corn combine harvester grain loss monitoring sensor based on EMD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 158 - 165. (in Chinese)

[71] 王卓, 车东, 白晓平, 等. 玉米联合收获机清选损失监测装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 100 - 108.
WANG Zhuo, CHE Dong, BAI Xiaoping, et al. Improvement and experiment of cleaning loss eate monitoring device for corn combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 100 - 108. (in Chinese)

[72] 金诚谦, 蔡泽宇, 杨腾祥, 等. 基于占空比测量的谷物联合收获机产量监测系统研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 125 - 135.
JIN Chengqian, CAI Zeyu, YANG Tengxiang, et al. Design and experiment of yield monitoring system of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 125 - 135. (in Chinese)

[73] 武涛, 黄清玲, 俞龙, 等. 甘蔗联合收获机运行工况数传终端的设计与试验[J]. 农机化研究, 2023, 45(2): 74 - 79.
WU Tao, HUANG Qingling, YU Long, et al. Design and test of data transmission terminal of sugarcane combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(2): 74 - 79. (in Chinese)

[74] 汪凤珠, 赵博, 刘阳春, 等. 玉米青贮收获机多参数检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 127 - 136.
WANG Fengzhu, ZHAO Bo, LIU Yangchun, et al. Design and experiment of multi-parameter detection system for corn silage harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 127 - 136. (in Chinese)

[75] 高玉军. 农机服务组织对农业机械化的影响探析[J]. 现代农业, 2020(10): 69 - 70.
GAO Yujun. Analysis of the impact of agricultural machinery service organizations on agricultural mechanization[J]. Modern Agriculture, 2020(10): 69 - 70. (in Chinese)

[76] 廖晓莲, 高英武, 江波, 等. 跨区机收作业发展现状与前景展望[J]. 农机化研究, 2008, 30(2): 10 - 14.
LIAO Xiaolian, GAO Yingwu, JIANG Bo, et al. Current situation and prospect forecast of the harvesting wheat across different

countries area[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(2): 10 - 14. (in Chinese)
[77] 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.
[78] 王丹, 刘春明, 周杨. 农业机械化对粮食生产技术效率影响——基于农机跨区服务的空间效应视角[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(4): 223 - 229.
WANG Dan, LIU Chunming, ZHOU Yang. Innuence of agricultural mechanization on technical efficiency of grain production: based on the perspective of spatial effect of cross—regional service of agricultural machinery[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(4): 223 - 229. (in Chinese)
[79] 兰玉彬, 赵德楠, 张彦斐, 等. 生态无人农场模式探索及发展展望[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 312 - 327.
LAN Yubin, ZHAO Denan, ZHANG Yanfei, et al. Exploration and development prospect of eco-unmanned farm modes[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 312 - 327. (in Chinese)
[80] 姚竟发. 智能农机协同作业路径优化技术研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2020.
YAO Jingfa. Study on path optimization technology of intelligent agricultural machinery cooperative operation[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020. (in Chinese)
[81] 张宗毅, 戚山明, 张萌. 全国小麦联合收获机跨区作业空间流动规律[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 19 - 27.
ZHANG Zongyi, QI Shanming, ZHANG Meng. Spatial flow law of cross-regional operation of wheat combine harvesters in China[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(23): 19 - 27. (in Chinese)
[82] 张璠, 滕桂法, 苑迎春, 等. 农机跨区作业紧急调配算法适宜性选择[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 47 - 53.
ZHANG Fan, TENG Guifa, YUAN Yingchun, et al. Suitability selection of emergency scheduling and allocating algorithm of agricultural machinery[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 47 - 53. (in Chinese)
[83] DIN A, ISMAIL M Y, SHAH B, et al. A deep reinforcement learning-based multi-agent area coverage control for smart agriculture[J]. Computers and Electrical Engineering, 2022, 101: 108089.
[84] 梁亚杰, 杨丽丽, 徐媛媛, 等. 不确定场景下无人农机多机动态路径规划方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 1 - 8.
LIANG Yajie, YANG Lili, XU Yuanyuan, et al. Dynamic path planning method for multiple unmanned agricultural machines in uncertain scenarios[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(21): 1 - 8. (in Chinese)
[85] 景云鹏, 金志坤, 刘刚. 基于改进蚁群算法的农田平地导航三维路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 333 - 339.
JING Yunpeng, JIN Zhikun, LIU Gang. Three dimensional path planning method for navigation of farmland leveling based on improved ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 333 - 339. (in Chinese)
[86] 贾会群, 魏仲慧, 何昕, 等. 基于改进粒子群算法的路径规划[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 371 - 377.
JIA Huiqun, WEI Zhonghui, HE Xin, et al. Path planning based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 371 - 377. (in Chinese)
[87] 殷建军, 董文龙, 梁利华, 等. 复杂环境下农业机器人路径规划优化方法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 17 - 22.
YIN Jianjun, DONG Wenlong, LIANG Lihua, et al. Optimization method of agricultural robot path planning in complex environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 17 - 22. (in Chinese)
[88] 姚竟发, 滕桂法, 霍利民, 等. 联合收获机多机协同作业路径优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 12 - 18.
YAO Jingfa, TENG Guifa, HUO Limin, et al. Optimization of cooperative operation path for multiple combine harvesters without conflict[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(17): 12 - 18. (in Chinese)
[89] 王博, 毛罕平, 王亚娜, 等. 多维度农机多机协同技术采纳影响因素与作用机制研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 45 - 53.
WANG Bo, MAO Hanping, WANG Ya'na, et al. Influencing factors and mechanism of multi-dimensional agricultural machinery collaborative technologies adoption[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 45 - 53. (in Chinese)
[90] SHOJAEI K. Intelligent coordinated control of an autonomous tractor-trailer and a combine harvester[J]. European Journal of Control, 2021, 59: 82 - 98.
[91] LI Shichao, XU Hongzhen, JI Yuhan, et al. Development of a following agricultural machinery automatic navigation system [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 335 - 344.
[92] ZHU Yuting, WANG Jie, WU Caicong. Cloud based precise coordination system for multi-machinery of single-operation[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(17): 626 - 630.
[93] GUAN Zhuohuai, LI Ying, MU Senlin, et al. Tracing algorithm and control strategy for crawler rice combine harvester auxiliary navigation system[J]. Biosystems Engineering, 2021, 211: 50 - 62.
[94] 白晓平. 基于跟随-领航结构的联合收获机群协同导航控制策略及方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
BAI Xiaoping. Research on coperative navigation control strategy and method for combine harvester group based on follow pilot structure[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
[95] 曹如月, 张振乾, 李世超, 等. 基于改进 A* 算法和 Bezier 曲线的多机协同全局路径规划[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增

刊):548 - 554.
CAO Ruyue, ZHANG Zhenqian, LI Shichao, et al. Multi-machine cooperation global path planning based on A-star algorithm and Bezier curve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.):548 - 554. (in Chinese)
[96] 曹如月, 李世超, 魏爽, 等. 基于 Web - GIS 的多机协同作业远程监控平台设计[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 52 - 57.
CAO Ruyue, LI Shichao, WEI Shuang, et al. Remote monitoring platform for multi-machine cooperation based on Web - GIS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):52 - 57. (in Chinese)
[97] 王玲, 王新, 刘健, 等. 基于虚拟仪器的柔性化农机机群远程监测系统研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 34 - 39.
WANG Ling, WANG Xin, LIU Jian, et al. Research on flexible remote monitoring system of agricultural machinery based on virtual instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1):34 - 39. (in Chinese)
[98] 张帆, 罗锡文, 张智刚, 等. 基于改进多父辈遗传算法的农机调度优化方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 192 - 198.
ZHANG Fan, LUO Xiwen, ZHANG Zhigang, et al. Agricultural machinery scheduling optimization method based on improved multi-parents genetic algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 192 - 198. (in Chinese)
[99] 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)
[100] 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(Supp. 1):28 - 35. (in Chinese)
[101] GUEVARA L, ROCHA R P, CHEEIN F A. Improving the manual harvesting operation efficiency by coordinating a fleet of N-trailer vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 185: 106103.
[102] 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(Supp. 1):1 - 19. (in Chinese)
[103] 王猛, 赵博, 刘阳春, 等. 同种农机机群动态作业任务分配方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 199 - 210.
WANG Meng, ZHAO Bo, LIU Yangchun, et al. Dynamic task allocation method for the same type agricultural machinery group[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 199 - 210. (in Chinese)
[104] 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): 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(Supp.):34 - 39. (in Chinese)
[105] XIE B, JIN Y, FAHEEM M, et al. Research progress of autonomous navigation technology for multi-agricultural scenes[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 211: 107963.
[106] 郭政杰. 基于知识挖掘的农机装备维修服务决策方法研究与系统实现[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
GUO Zhengjie. Fault prediction of combine harvester based on hybrid neural network [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
[107] HU J, WANG Y, PANG Y, et al. Optimal maintenance scheduling under uncertainties using linear programming-enhanced reinforcement learning[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 109: 104655.
[108] HU Y, GUO Z, WEN J, et al. Research on knowledge mining for agricultural machinery maintenance based on association rules[C]//Proceedings of the Industrial Electronics & Applications, 2015.
[109] HU Y, KE J, GUO Z, et al. Relationship between intangible capital, knowledge and maintenance performance in a PSS network: an empirical investigation[J]. Procedia CIRP, 2015, 30: 378 - 383.
[110] HU Y, LIU Y, WANG Z, et al. A two-stage dynamic capacity planning approach for agricultural machinery maintenance service with demand uncertainty[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190: 201 - 217.
[111] HU Y, XIAO S, WEN J, et al. An ANP-multi-criteria-based methodology to construct maintenance networks for agricultural machinery cluster in a balanced scorecard context[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 1 - 10.
[112] GUALBERTO C R, RODRIGUES L F, MORABITO R, et al. Time-dependent performance evaluation of tire repair emergency systems in the agricultural stage of sugarcane mills[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193: 106701.
[113] 柳剑, 魏泉, 叶进, 等. 在役农机装备预防性成组维修策略研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 316 - 322, 448.
LIU Jian, WEI Xiao, YE Jin, et al. Preventive group maintenance strategy for in-service agricultural machinery equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2):316 - 322, 448. (in Chinese)
[114] 张小花, 叶文超, 陈宗乐, 等. 基于物联网的农机应急调度系统研究[J]. 广东农业科学, 2019, 46(6): 150 - 156.
ZHANG Xiaohua, YE Wenchao, CHEN Zongle, et al. Research on emergency scheduling system of agricultural machinery based on internet of things[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019, 46(6): 150 - 156. (in Chinese)
[115] 许宁, 程娟, 杨化伟, 等. 基于大数据的农机配件供应链服务云平台构建与应用[J]. 农业装备与车辆工程, 2017,

55(3)：71－74.
XU Ning,CHENG Juan,YANG Huawei, et al. Building and application of a cloud platform for agricultural machinery fittings based on big data[J]. Agriculture Equipment&Vehicle Engineering, 2017, 55(3): 71－74. (in Chinese)
[116] 张晓云. 履带式收获机远程状态监测系统智能终端的研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(2)：176－180.
ZHANG Xiaoyun. Research on the monitoring system of the precision seeder based on single chip microcomputer and display DGUS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(2): 176－180. (in Chinese)
[117] STROESCU V C, OLCAY E. Deep learning-based approaches for fault detection in disc mower[J]. IFAC-PapersOnLine, 2022, 55(6): 217－221.
[118] JAUMANN M, OLCAY E, OKSANEN T. Condition monitoring using convolutional neural network in agricultural machinery-use case: disc mower[J]. IFAC-PapersOnLine, 2022, 55(32): 235－240.
[119] 聂国健, 李泉洲, 胡宁, 等. 基于混合神经网络的联合收获机故障预测[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2021, 39(1)：57－62.
NIE Guojian, LI Quanzhou, HU Ning, et al. Fault prediction of combine harvester based on hybrid neural network[J]. Electronic Product Reliability and Environment Testing,2021, 39(1): 57－62. (in Chinese)
[120] 陈进, 杨广静, 徐凯, 等. 基于 ARM 的联合收获机远程监测系统设计[J]. 电子科技, 2016, 29(1)：131－135,141.
CHEN Jin,YANG Guangjing, XU Kai,et al. Combine harvester remote monitoring system based on ARM[J]. Electronic Sci. & Tech., 2016, 29(1): 131－135,141. (in Chinese)
[121] LIU Y, LI Y, DONG Y, et al. Development of a variable-diameter threshing drum for rice combine harvester using MBD－DEM coupling simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 196: 106859.
[122] LIANG Z, LI Y, DE BAERDEMAEKER J, et al. Development and testing of a multi-duct cleaning device for tangential-longitudinal flow rice combine harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2019, 182: 95－106.
[123] XIA M, SHAO H, WILLIAMS D, et al. Intelligent fault diagnosis of machinery using digital twin-assisted deep transfer learning[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 215: 107938.
[124] GARCÍA N P J, GARCÍA-GONZALO E, SÁNCHEZ L F, et al. Hybrid PSO－SVM-based method for forecasting of the remaining useful life for aircraft engines and evaluation of its reliability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 138: 219－231.
[125] 杨丽丽, 田伟泽, 徐媛媛, 等. 谷物联合收获机油耗随机森林预测模型[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9)：275－281.
YANG Lili, TIAN Weize, XU Yuanyuan, et al. Predicting fuel consumption of grain combine harvesters based on random forest[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 275－281. (in Chinese)
[126] SHIN D, PALAZZOLO A. Nonlinear analysis of a geared rotor system supported by fluid film journal bearings[J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 475: 115269.
[127] 李丽. 汽车售后服务供应链资源优化问题研究[D]. 武汉：华中科技大学, 2010.
LI Li. Resource optimization of after-sales service supply chain in automobile industry[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2010. (in Chinese)
[128] 刘彦, 陈春良, 王生凤, 等. 装备维修任务调度理论与策略研究现状综述[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(6)：6－11.
LIU Yan, CHEN Chunliang, WANG Shengfeng, et al. Review of research status of equipment maintenance rask scheduling [J]. Computer Measurement & Control, 2018, 26(6): 6－11. (in Chinese)
[129] 张怀强, 卢远超, 王孟. 基于故障率的舰艇维修备品备件优化配置[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(5)：17－21.
ZHANG Huaiqiang, LU Yuanchao, WANG Meng. Research on optimal allocation of spare parts for ship maintenance nased on failure rate[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(5): 17－21. (in Chinese)
[130] HUSNIAH H, PASARIBU U S, WANGSAPUTRA R, et al. Condition-based maintenance policy for a leased reman product [J]. Heliyon, 2021, 7(4): e06494.
[131] 杨奕飞. 舰船装备健康评估与管理若干关键技术研究[D]. 南京：南京理工大学, 2019.
YANG Yifei. Research on several key technologies of health assessment and prediction for ship equipment[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology,2019. (in Chinese)
[132] NIKKILÄ R, SEILONEN I, KOSKINEN K. Software architecture for farm management information systems in precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 70(2): 328－336.
[133] REN W, WU K, GU Q, et al. Intelligent decision making for service providers selection in maintenance service network: an adaptive fuzzy-neuro approach[J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 190: 105263.
[134] WORASAN K, SETHANAN K, PITAKASO R, et al. Hybrid particle swarm optimization and neighborhood strategy search for scheduling machines and equipment and routing of tractors in sugarcane field preparation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178: 105733.
[135] 刘景,杨光友,马志艳, 等.基于随机森林的联合收获机故障诊断技术[J].中国农机化学报,2019,40(10)：147－153.
LIU Jing, YANG Guangyou,MA Zhiyan, et al. Fault diagnosis technology of combine harvester based on random forest[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(10): 147－153. (in Chinese)
[136] 王猛. 农机多机协同作业任务分配关键技术研究[D]. 北京：中国农业机械化科学研究院, 2021.

WANG Meng. Research on key technologies on farm task allocation for multi-machine cooperative operation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences,2021. (in Chinese)

[137] LIU J, YANG T, BAI J, et al. Resource allocation and scheduling in the intelligent edge computing context[J]. Future Generation Computer Systems, 2021, 121: 48 - 53.

[138] 肖沙沙. 农机装备运维服务网络设计与优化研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
XIAO Shasha. Research on maitenance service network design and optimization for the agricultural machinery[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018. (in Chinese)

[139] 周瑞. 面向农机装备维护服务决策的关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
ZHOU Rui. Research on key technology of decision-making for the maintenance of agricultural equipment[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016. (in Chinese)

[140] 王会会. 基于网点整合的共同配送资源优化调度研究与系统实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
WANG Huihui. Research and suste implementation of joint distribution resource optimal scheduling based on network node integration[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)

[141] BÉLANGER V, RUIZ A, SORIANO P. Recent optimization models and trends in location, relocation, and dispatching of emergency medical vehicles[J]. European Journal of Operational Research, 2019, 272(1): 1 - 23.

[142] LI G, YANG M, ZHANG Y, et al. Comparison model learning methods for methane emission prediction of reservoirs on a regional field scale: performance and adaptation of methods with different experimental datasets[J]. Ecological Engineering, 2020, 157: 105990.

[143] EVANS J T, PITLA S K, LUCK J D, et al. Row crop grain harvester path optimization in headland patterns[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 171: 105295.

[144] EDWARDS G, BOCHTIS D, SØRESEN C G. Multi-machine coordination: scheduling operations based on readiness criteria and using a modified tabu search algorithm[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(18): 191 - 195.

[145] 张广胜. 应急物资调运的动态协同决策优化建模仿真[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(3): 164 - 169.
ZHANG Guangsheng. Modeling and simulation on dynamic collaborative decision-making optimization of emergency materials scheduling and transportation[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(3): 164 - 169. (in Chinese)

[146] HE P, LI J, WANG X. Wheat harvest schedule model for agricultural machinery cooperatives considering fragmental farmlands[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 145: 226 - 234.

[147] SEYYEDHASANI H, DVORAK J S. Using the vehicle routing problem to reduce field completion times with multiple machines[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 134: 142 - 150.

[148] PUNYAKUM V, SETHANAN K, NITISIRI K, et al. Hybrid differential evolution and particle swarm optimization for multi-visit and multi-period workforce scheduling and routing problems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 197: 106929.

[149] GRAF P M. Coupling of crop assignment and vehicle routing for harvest planning in agriculture[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2019, 2: 99 - 109.

[150] ZUNIGA V D A, FAN N, TEEGERSTROM T, et al. Optimal production planning and machinery scheduling for semi-arid farms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 187: 106288.