

华明圆, 宋 健, 王晓平, 等. 农机装备物联网技术研究现状与展望[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(1): 17–27.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.01.003

农机装备物联网技术研究现状与展望

华明圆^{1,3}, 宋 健^{3,5}, 王晓平⁴, 张春风³, 李 思², 翟长远³

[1. 华中农业大学植物科学技术学院, 湖北武汉 430070; 2. 农芯(南京)智慧农业研究院有限公司, 江苏南京 211899;

3. 北京市农林科学院智能装备技术研究中心, 北京 100097; 4. 北京市平谷区植物保护服务中心, 北京 101299;

5. 北京汇达智慧农业科技发展有限公司, 北京 101200]

摘要:目前,我国农机装备物联网存在高端传感器国产化程度低、无线传输稳定性差、全局化机群调度难的问题。本文从农机作业智能感知技术、农机装备信息传输技术和农机作业数据处理与决策技术等方面对国内外研究现状进行综述,阐述作物信息、环境信息、农机作业状态信息和农机识别等智能感知技术的成果,分析车载物联网技术和远程物联网技术的研究进展,此外还论述了农机作业智能决策技术在农机作业异常检测、作业质量评价和农机调度方面的技术突破以及农机装备远程监管平台的应用现状并分析各环节待解决的问题。在此基础上提出农机装备物联网技术未来的发展方向及应用前景,即农机高端传感器研发、基于 5G 的新一代移动互联技术研究、基于大数据和机器学习的智能决策技术、多机协同与智慧农场应用。

关键词:农机装备;物联网;远程传输;智能感知;智能决策

中图分类号:S126;S232.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)01-0017-11

为解决“谁来种地”的社会问题,农机装备科技变革正在兴起,《中国制造 2025》实施纲要中将智能农机装备列为重点发展的十大领域之一^[1],“智能在端、智慧在云、管控在屏”,即现场控制智能化、云端决策智慧化、监控调度移动终端化是未来智慧农机的发展方向,实现农业机械的现代化、智能化和规模化^[2]。智慧农机的发展催生了农业物联网等高新技术应用到农机领域。农机物联网是指通过农业信息感知设备,按照约定协议,把农机终端与客户端连接起来,进行信息交换和通信,以实现对农机工作环境、工作状态等智能化监控和管理的一种网络。农机设备上各类传感器、数据采集器、控制器、定位装置等智能终端部件,构建一个完整的产品工况运行数据实时采集传输系统,赋予农机感知和通信的能力。农业现代化离不开农业物联网技术,2013 年原农业部在粮食主产区启动了农业物联网区域试验工程,利用无线传感、定位导航与地理信息技术,实现了农机资源管理、田间作业质量

监控和跨区调度指挥。农机应用规模化是现代农业的发展趋势,农机集群作业的实现离不开农机作业远程监测,物联网技术使得农机数据的采集成本大大降低,实现农机作业状态、作业场景准确监测,便于农机协同作业管理,减少作业质量参差不齐、重复作业等不良现象的发生。农机物联网能对农业机械的作业状况与自身情况实时监测,当作业机械出现问题时可以及时发现,许多问题无需技术人员亲临现场就可以进行诊断与处理,提升了农机的作业效率,节约了人力物力。本文在分析智能农机装备发展和物联网技术概况的基础上,归纳农机物联网智能感知、信息传输、智能决策及远程监控平台应用的最新研究进展,分析各部分相关技术的基本工作原理、特点及典型应用,并在此基础上,结合我国国情,展望未来发展趋势(图 1)。

1 农机智能感知技术

通过在农机产品中应用先进的感知技术,将物联网系统与农机产品有机结合,有利于实时监测控制农业机械的生产作业活动,推进智能农机的发展。物联网农机感知按感知内容分类,分为机外感知和机内感知。机外感知是指对农机作业环境和对象信息参数的感知,包括土壤信息感知、障碍信息感知、杂草识别、作物冠层信息及病虫草害信息感

收稿日期:2023-03-06

基金项目:江苏省重点研发计划(编号:BE2021302)。

作者简介:华明圆(1997—),女,湖北荆门人,硕士研究生,主要从事物联网精准配药系统研究。E-mail:huamingyuan2021@163.com。

通信作者:翟长远,博士,研究员,主要从事精准施药技术研究。

E-mail:zhaicy@nrcita.org.cn。

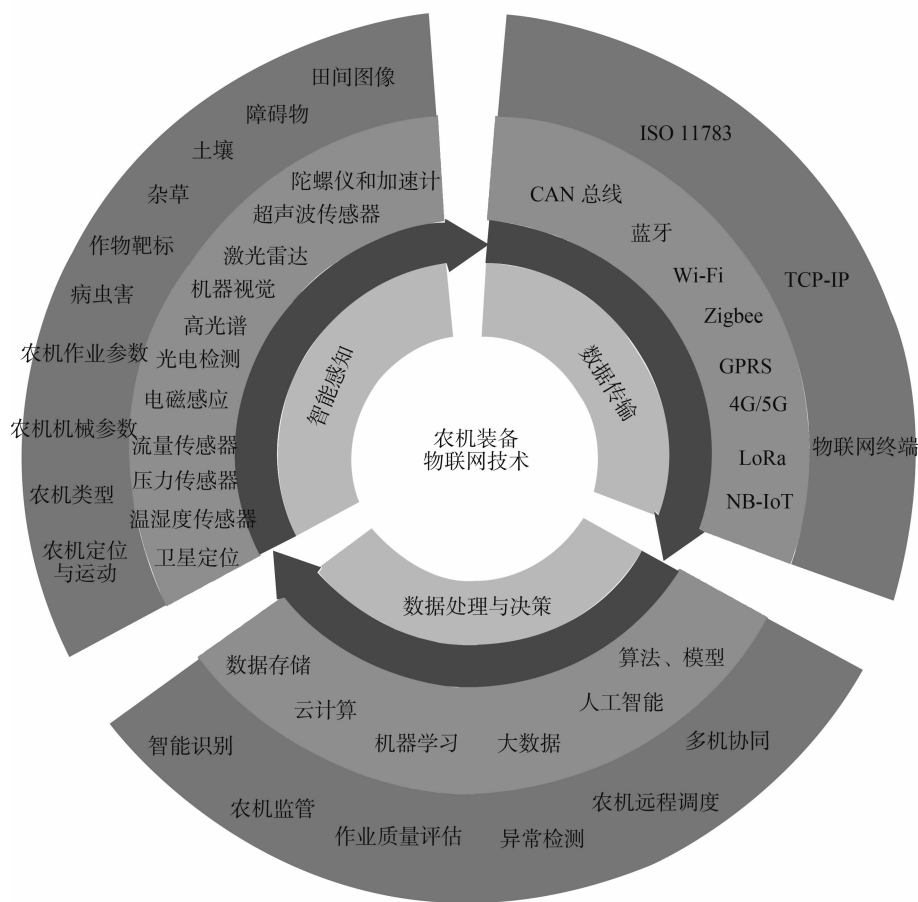


图1 农机装备物联网技术构成

知等。机内感知是指对农业装备自身的感知,包括农机类型、农机位置与运动信息感知、工作部件参数及农机作业状态参数的感知。

1.1 农机机外感知技术

1.1.1 作业环境 作业环境感知是农机作业远程监控的重要依据之一,国内外学者的研究主要集中在农田现场图像、障碍物、土壤等方面。Barusu 等在基于视觉的农业机器人中安装无线摄像头进行现场监测,可以让用户在客户端查看现场的实时视频片段,并结合树莓派获取的天气信息、土壤信息,远程控制作业^[3]。Peña 等使用 IP 摄像机对结构化环境进行视觉反馈,用户根据观察到的机器人行为和作业环境,远程操作机器人执行播种、灌溉、熏蒸和修剪等活动^[4]。李建军等基于物联网技术设计圆捆机作业过程远程监控系统,可实现对圆捆机作业环境实时画面监控的功能^[5]。Sun 等获取高稳定、高清晰全向视觉的农机周围视景图像,并采用图像拼接技术得到全景图像,进而作为障碍物定位与识别的参考^[6-7]。通过采集的视觉图像,Cheein 等使用 SVM 算法使农机正确识别出橄榄园中的树枝障

碍物^[8],置于农机前端的双目视觉采集农机前方视景图像,结合全向视觉多场景图像将数据信息融合,可以实现复杂多变环境如光照不均、目标遮挡、背景杂乱等条件下目标作物、障碍物等的准确识别。通过对视景图像的信息分析,识别障碍物的位置与类型,协助指导农机行进,稳定有效避障,减少漏检漏耕,从而保证农机的精确作业。

物联网感知技术在农业机械上的应用可以实时收集土壤的各种数据,如土壤类型、pH 值等。在智能分析控制技术支持下,农业机械在运行过程中能及时决策,保证环境各项指标都能满足植物生长的需求,起到增产增收的效果。美国威里斯技术公司开发了“实时”的传感器系统,用于监测和绘制土壤参数,产品“U3”在被动力车辆拖动时测量土壤电导率、pH 值和有机质含量并创建空间地图,这些数据将上传至气候公司的 FieldView 数字农业平台,农场管理员或第三方能在网页或移动端上查看高分辨率土壤地图^[9]。Köksal 等在小麦智能生产案例中使用车载相机采集土壤图像上传服务器制作土壤类型地图向农户展示^[10]。韩长杰等设计车载式大

田土壤电导率快速检测系统,实现土壤田块不同区域内电导率的快速实时检测,评价土壤肥力、生产能力及制作精准施肥处方,未来可用于变量施肥^[11-12]。

表 1 农机物联网作业对象感知技术

感知方法	工作原理	感知内容	局限性
机器视觉	利用感光二极管进行光电转换,将摄取图像转换为数字数据	杂草识别 ^[13] 等	计算复杂度高,要求较高
激光雷达	探测目标点距离,结合测量角度,获得目标点的极坐标位置	识别作物位置等	成本较高
超声波传感器	将反射回波信号转换成电信号	冠层 ^[14] 、靶标探测 ^[15] 等	易受温度变化影响
高光谱成像仪	接收反射的电磁波,获取连续、窄波段的图像数据	病虫害监测 ^[16] 、叶面积指数 ^[17] 等	成本较高

计算机视觉在杂草实时检测中具有至关重要的作用,其工作原理是通过摄像头捕获图像,人工智能引擎检测目标杂草,收集到的实时信息通过现场无线传感器网络发送给云平台,用户可以根据所需的信息作出决定,可以实现农药物联网智能对靶喷洒,减少农药用量。Karthikeyan 等使用 Pi 相机采集 1 920 像素×1 080 像素高分辨率的数字图像,这些图像通过树莓派终端转换成 JPEG 或 PNG 格式存储到云上,图像信息包括作物行数和足够分辨率的植物图像,经数据白化、图像分割等系列处理后,利用形态学图像分割算法对农田作物和杂草进行检测,正确率达到 96%^[18]。

作物生长信息感知通常是采用农业无人机遥测,相机和多光谱传感器连接到无人机设备上,用于从大型作物中获取航空图像,这些图像由物联网云端平台处理以计算农业参数,如叶面积指数等。Kumar 等利用叶面积指数与其他参数,评估水稻作物中的氮含量,检测甘蔗作物的疾病^[19]。农业无人机领域的独角兽企业广州极飞科技股份有限公司运用物联网技术,让农业无人机帮助农户监测农

1.1.2 作业对象 农机作业远程监测需要对作业对象进行实时监测,根据作业对象调节作业模式和作业参数,作业对象感知包括杂草检测、作物靶标探测、病虫害监测等(表 1)。

田、分析土壤状况,使精准农业设备变得自动化、智能化。

冠层差异是植保机变量施药的依据,实时获取冠层信息主要有基于超声波和实时传感 2 种方式,Palleja 等提出一种基于超声波的实时方法来估计苹果树和葡萄藤的冠层密度,但还未投入应用实现远程调整植保机参数^[14];姜红花等设计自动对靶喷雾控制系统,使用超声波传感器测量作物距离,并将信号数据传输到物联网终端,同时终端接收用户上位机输入的控制指令进行实时靶标检测,当程序判断为有效靶标时,实施喷雾作业,实现远程调控喷雾机工作参数^[15]。

1.2 农机机内感知技术

农业装备机内参数感知技术通过对机器自身工作状态和作业状态的监测,使用户实现远程控制农机获取农机数据,作为决策依据,进而实现对农机的故障监测、预警,工作性能评价以及作业参数的优化。农业装备机内感知技术包括农机作业参数、农机机械参数、农机识别以及农机定位与运动等(表 2)。

表 2 农机物联网机内感知技术

感知内容	感知方法
农机作业参数	光电编码器获取排肥轴转速数据 ^[20] ;压电传感器对播种、排种检测 ^[21] ;光电传感器获取排种信息 ^[22] ;角度传感器监测耕整机作业深度 ^[23]
农机机械参数	霍尔传感器监测收获机脱粒滚筒转速、输送机转速等 ^[24] ;温度传感器测水箱的温度 ^[25] ;水平传感器监测水箱、肥箱液位 ^[26]
农机识别	陀螺仪和加速度计感知倾斜率和振动 ^[27] ;机器视觉图像识别 ^[28]
农机定位与运动	GNSS 感知经度、纬度 ^[29] ;陀螺仪测角速度获取农机转弯角度 ^[30] ,加速度计测加速度并获取位移 ^[31] ;GNSS ^[32] 、霍尔传感器 ^[21,25] 、旋转编码器 ^[33] 获取行进速度

1.2.1 农机作业参数感知 传感器分布在农机装备作业的各个环节,组成传感器节点网络,物联网

技术通过嵌入式平台融合多节点数据,经云端处理让田间作业过程可视化、数据化,进而实现农户对

农机作业质量的实时监控。

耕整机的主要作业参数是耕作深度,一般通过角度传感器和超声波传感器感知耕作深度。角度传感器固定在犁具上测出角度变化,基于深松机运动姿态得到作业深度^[34]。超声波传感器监测深松机的机架与地面距离的变化,得到深松机的深松铲入土深度,即实际的深松深度值^[35]。Lou 等使用多个超声波独立检测每行的耕作深度用于调整、显示和记录,并试验验证应用超声波传感器检测耕作深度的方法是可靠的、准确的^[36],但田间作物残茬、地面凹凸不平环境因素会对超声波检测造成一定干扰。

播种施肥机主要对种子、肥料等固体颗粒播量、播速、播深、漏播情况进行监测,排放效果直接决定农机工作的质量。国内外学者将物联网技术、传感器技术与定位技术相结合,用于播种施肥机漏播、重播位置、播种量等数据的远程检测,通常使用红外光敏传感器、视觉传感器、光电传感器、压电传感器等。使用红外传感器和视觉传感器监测种子流量具有可靠的监测精度^[37-38]。压电传感器可以监视播种、检测排种以及是否漏播、重播^[21],光电传感器可以实时监测漏播、播种位置和播种量等作业信息,施肥监测实时监测堵塞^[22]、缺肥、排肥速度^[20]和排肥量等作业信息,但光电、电容等不同传感器易受环境中灰尘影响而不准确。Xie 等使用激光束光电传感器监测排量,具有方向性好、亮度高、单色性好等优点,可以穿透透明物体在多尘条件下使用^[39]。美国约翰迪尔公司推出的 GreenStar^{TM2} 系统能够实时监测小麦的播种行数、播种行距、漏播量、平均播种总量,并以图表形式实时显示^[40]。

收获机主要基于电阻传感器、 γ 射线传感器、光电传感器、压电传感器等测量粮食产量、含水率、破损率等参数,为农场提供粮食产量^[41]以及品质^[42]判定的参考。国外科乐收农业机械贸易(北京)有限责任公司(<http://www.claas.cn/products/claas>)的收获机大多已安装水分、流量等传感器,传感器原理和产品均较成熟,国内的传感器还存在检测精度与可靠性不高的问题。

植保机的作业状态参数包括喷雾压力、喷雾流量、喷杆姿态等,研究人员通常选择压力传感器安装在喷头的管道中,测量机器的工作压力;在供应管路中放置流量传感器来测量流量^[43]。目前对于植保机的作业参数实时监测的研究较少,还须要解

决传感器的抗腐蚀性和精度稳定性问题。

1.2.2 农机机械参数感知 工况良好是农机正常作业的前提,对农机部件工作状态的感知是故障预警的主要依据,陈进等将物联网技术与农业机械参数采集装置相结合,采集联合收获机脱粒滚筒转速、输送器转速等关键信息并上传,实现收获机主要部件工作情况的远程监测及故障诊断^[24]。Cortés 等选用温度传感器和水平传感器监测水箱的温度以及水箱、肥箱、油箱液面高度等工况信息,以便管理员能够确认有足够的投入品供农机作业^[26]。以农机物联网技术为基础,国内外学者对农业机械状态进行监控的系统研发已较成熟,多传感器采集农机各个部件的状态并上传,数据分析确认农机能否正常执行作业任务,并进行故障预警,方便管理员对故障部件及时发现和修理。

1.2.3 农机识别 在远程控制农业机械执行现场活动前需要确认农机类型,农业机械的分类是实现身份验证的重要手段,没有健全的农机识别系统,有可能造成农机被错误操作。国内外有关农机类型远程识别的研究主要采用机器视觉图像识别和依据机械振动频率与倾斜度分类 2 种方法。雷雪梅等设计了卷积神经网络,使用摄像头识别播种机、起垄机、翻转犁、深松机、旋耕机 5 种类型的农机,实现了农机机具的自动识别^[28]。振动^[44]和倾斜^[45]一直被认为是机械的重要特征,由于机械在使用过程中引起不同的振动和倾斜,通过采集农机作业时的振动与倾斜数据可以确认农业机械种类的系统。Waleed 等收集来自平整机、旋耕机和耕作机的振动和倾斜数据,这 3 类机械数据在平均值和标准差方面具有明显区分,试验验证通过振动和倾斜识别平整机、旋耕机和耕作机的准确率可达 82% 以上^[27]。

1.2.4 运动感知 农机定位与运动感知内容主要包括动力机械的位置、行驶方向、行进速度、作业姿态等。农机一般采用全球差分定位技术获取实时位置信息,GPS 基准站通过基站接收器获取差分改正量信息,定位终端模块将信号发送至核心处理器,核心处理器根据差分改正量和移动站的输出量,计算出差分定位结果。在实际应用中,GPS 移动站被固定在动力机械驾驶舱,基准站放置在作业地块附近,且位置不允许变动,在作业过程中,远程服务器软件系统根据全球差分定位系统提供的经纬度信息,确定农机的实时位置,并绘制农机的实时位置地图用于用户查看。美国天宝导航公司开发

的在线农场系统使用 GPS 差分技术,实现管理人员对农机位置与历史轨迹进行远程查看,在线监督作业情况^[46]。姿态信息一般采用陀螺仪和加速度计获得,陀螺仪输出参考轴向的角速度,通过积分计算获取角度;加速度计算出参考轴向的加速度,通过积分计算获取速度,通过二次积分计算获取位移。农机行进速度可以通过 GPS 定位获取位移和时间计算得到,或通过霍尔传感器直接获得。

2 农机物联网信息传输、处理与决策

2.1 信息传输技术

实现农业设备信息互联互通是构建农业物联网的前提条件^[47-48]。农机物联网技术主要应解决 2 个层面的物联:一是单机各部件之间的车载物联,二是农机与云台的远程物联。目前车载物联主要采用基于 ISO 11783《串行总线标准》、协议标准 GB/T 35381.10—2020《农林拖拉机和机械 串行控制和通信数据网络 第 10 部分:任务控制器和管理信息系统的数据交换》的农机总线通信技术,实现任务控制器和管理信息系统的数据交换;农机远程物联标准 2022 年由中国农业机械工业协会和中国农业机械学会提出,由潍柴雷沃智慧农业科技股份有限公司等单位牵头起草,目前《农业装备远程数据传输技术要求》(征求意见稿)等 4 项团体标准已完成征求意见稿,处于公开征求意见阶段,意见稿采用 TCP/IP 传输协议,使用 4G/5G、NB-LoT、LoRA 或无线局域网等技术,实现农业装备物联网终端远程传输数据至网络服务平台。

2.1.1 CAN 总线 农机内部多个控制系统均有独立的 ECU 作为各自的控制单元,CAN(控制器局域网)总线可实现多节点数据交换和共享,与其他通信方式相比,CAN 总线具有以下优点:(1)可靠性好,抗干扰能力强;(2)可多节点接入,灵活性强;(3)可调整节点优先级,网络负载低;(4)可自动切断错误节点通信,具有检错机制。CAN 总线技术作为农机物联网感知层与物联网终端间数据通信的主流方案,将拖拉机或其他农业机械上的传感器和设备采集的数据上传至物联网终端存储分析。

2.1.2 农机远程信息传输 远程数据终端将解析后的数据发送至云端服务器的过程需要借助无线通信技术。物联网的无线通信技术有很多,主要分为 3 类:第 1 类是 ZigBee、WiFi、蓝牙等短距离通信技术,通常具有高数据传输速率和低功耗的特点;

第 2 类是蜂窝网络如 GPRS、3G/4G/5G,可实现长距离通信和高数据传输速率,但是具有高功耗和许可成本;第 3 类是低功耗广域网如 LoRA、NB-LoT 等,可实现超长距离通信,低功耗,但是数据传输速率很低(表 3)。

表 3 物联网常用无线通信技术参数对比

物联网	成本	功耗	最远传输距离(m)	稳定性	缺陷
蓝牙	中等	低	10	较差	传输距离短
WiFi	较高	高	100	较好	传输距离短
ZigBee	极低	低	100	较差	传输距离短
蜂窝网络	较高	高	长距离	较好	功耗高、成本高
LoRA	较低	低	15 000	较好	传输速率慢
NB-LoT	较低	低	15 000	较好	传输速率慢

短距离无线通信通常作为物联网网关向下与传感器节点进行数据通信的方式。WiFi 是最常用的无线技术之一,传输速率快但传输距离很短,通常情况下只能达到约 50 m 的距离,且耗电量非常大。ZigBee 是一类新兴的可实现双向无线通信的技术,该技术具有复杂度低、功耗小、数据传输速率低、成本小、自配置、灵活性高的网络结构,适用于短距离范围内的无线通信,如播种机采用 ZigBee 无线传输技术实现排种状态的无线监控^[49]。

长距离通信作为物联网网关向上接入网络与上层平台进行交互的方法。国内外学者在农机数据远程上传的研究中,最常用的远程传输方法是通过 GPRS 模块接入到运营商移动通信网络中,再通过基站以封包的形式传输到服务器端。低功耗广域网常用来实现超长距离通信,NB-LoT 是一种新兴的无线通信技术,相较于其他无线通信技术具有以下优点:(1)覆盖范围广,信号较弱地点也能保证连接质量;(2)支持节点多,在一个基站覆盖范围内最多接入较传统蜂巢网络 100 倍的设备接入数量;(3)功耗控制出色,延长设备的待机时间;(4)成本低。LoRA 是一种低能耗和数据传输低速率的、点到点的通信模式,在无障碍情况下通信距离可达 15 km,作为网关可将一定数量无线传感器节点连接起来。NB-LoT 和 LoRA 技术发展仅数年,但在国内已有一定应用,如采用 NB-LoT 技术实现施肥工况数据远程监测的变量施肥机^[19]、基于 LoRA 技术的病虫害实时监测无人机等^[15]。Civelek 基于低功耗广域网设计了一种用于远程监测拖拉机扭矩、速度、燃油流量等性能参数的系统。由于使用了低

功耗广域网技术,相较于传统的 GSM(global system for mobile communications)技术,传感器电池寿命从 1 周提高到 5 年,且可以大大减少基站的建设数量^[50]。

短距离通信技术通常用于传感器与终端通信,长距离通信技术用于终端上传服务器,二者结合完成网络层搭建,但由于物联网网关采集数据和上传数据使用通信方法不同,遵循的协议也不同,因此,物联网网关应在接收到传感器数据后,对传感器数据进行协议转换,并将重封装后的传感器数据上报^[51]。万雪芬等结合 LoRA 模块和蓝牙 2 种传输方式满足不同传输需求,实现农业设备快速接入物联网体系^[52]。

2.2 数据处理与决策技术

2.2.1 数据处理技术 众多学者研究出许多方法和模型用于数据处理,实现农机作业对象实时识别、异常检测、作业质量评估等。数据处理技术包括云计算、机器学习、大数据、人工智能等^[53]。

深度学习算法是一种基于人工神经网络数学原理,具有多层参数学习体系结构、使用海量数据训练参数的机器学习算法。图像数据是农机采集的主要数据之一,深度学习技术广泛应用于图片分析,在这些图像中进行识别/分类并获得有用的信息。深度学习使用特殊算法从原始数据中提取特征或特性,并只关注正确的特征或特性,即特征提取,当输入数据被转化为特征的集合,就能清楚地描述输入数据。Sladojevic 等创建了一个模型,利用深度卷积网络对叶子的图像进行分类并识别植物病害,该模型能够识别 13 种植物病害,模型精度达到 96.3%^[54]。Karthikeyan 等使用卷积神经网络和 k -means 算法识别阔叶杂草,用于将特定的除草剂施用到杂草上^[18]。

检测农机工作状态下的异常情况是非常重要的,能避免相应的经济损失。对农机部件进行远程异常监测,需要模型模拟系统的正常行为。模拟模型需要系统的所有输入,如行驶速度、农机部件信息等,如果实际测量值与预测值相差很大,则该行为被归类为异常行为^[55]。Steckel 等提出一种针对联合收割机的异常检测和性能评价系统,使用奥塔拉算法作为行为模型,从收割机系统及其部件在正常、无故障运行时的数据中学习,使用 MapReduce 技术来识别行为模型进行农机部件工作状况的异常检测^[56]。Catalano 等提出一种异常检测系统,降

低智能农业领域的基础设施故障损失,系统架构设计是基于多元线性回归和长期记忆神经网络算法的机器学习算法的方法^[57]。Paudyal 提出一种故障检测和分类的方法,利用振动信号对旋转机械的故障进行分类,使用机器学习算法正确识别/分类设备的状况,如正常、错位、不平衡和裂纹等^[58]。

精确计算农业机械的工作区域,对于机械使用情况的评估、更好地分配资源、估算产量、工作计费都具有重要作用,手工测量农机作业面积耗时较长且误差较大,利用物联网技术实现农机作业面积准确监测,为农机作业提供准确量化依据,进而提升农机作业管理信息化水平。尤其是在深松作业中,有效作业面积(深松机作业深度大于指定深度的作业面积)的测算决定了作业质量是否达到要求。Yin 等利用云计算统计总面积、有效面积、作业里程等耕作数量指标,评估平均耕作深度、面积符合率等耕作质量指标,并分析时间利用率、有效里程率等耕作效率指标^[59]。形状规则的田地边界检测很容易计算,研究难点在不规则形状的面积测算上,Waleed 等设计一种用于精准测量规则和不规则农业机械工作面积的智能系统,通过将 KNN 算法与 FLANN 算法结合起来,精确计算不同形状的田地和作业区域面积,系统误差最大为 9%^[30]。Xiang 等采用跟踪法和像素法分别计算矩形、多边形和不规则区域的面积,如农田总面积、作业面积、跳过面积、重叠面积和转弯超出农田面积,用于评价农机作业质量^[60]。

2.2.2 智能决策技术 智能决策技术较典型的应用于农机远程调度。目前大部分农机仍是人工调度,存在调度周期长、效率低的问题。农机调度决策是多因素控制下的最优解问题,实现不同因素(环境、农机等)、不同需求(最优路径、最大收益、最短时间等)下得到最优农机调度方案^[61]。王涛等采用 WiFi 聚类算法在无信号环境下也能获取定位信息,采用遗传算法模拟分析农机与农田土壤墒值的最佳匹配关系,从而推算出最佳农机调度方案,进而提高农业生产中耕地、播种、收获等各个环节的工作效率^[62]。李雯等建立农机设备信息化调度平台,提供最满足需求的调度决策^[63]。杨立国等基于 GNSS 等技术,利用车载终端集成开发农机调度系统,并提升农机管理调度的效率^[64]。王娜等使用 MapGIS 和云计算技术为农机提供行驶与作业路径的优化方案,实现农机联合作业,提高农机工作效

率^[65]。马军岩等采用多背包农机服务调度模型,结合模拟退火和粒子群优化的混合智能算法,设计协调调度方法用于多区互联农机服务资源配置,在农机任务量高时可以明显提高农机的工作效益^[66]。Sun 等为跨区域工作中的农机智能调度提供了一种架构,包括农机私有云、通信线路和监控前端三部分,综合考虑不同地区的农作物成熟时间、农机分布及状态、当前农作物种植情况以及灾害情况等因素,采用 Floyd 算法计算最小路径矩阵,采用扫描算法分配任务,实现对农机的智能调度^[67]。农机调度方法研究已取得一定成效,但主要从局部优化角度进行农机调度研究,统筹各区域农户损失和机手收益问题仍存在薄弱环节。在此基础上,李洪等尝试从全局角度分析农机调度问题,实现基于 GIS、GPRS 及 GPS 等技术的农机监控调度管理系统设计与开发^[68-69]。Blender 等开发管理集群播种机器人的 OptiVisor 云控系统,可以协调控制多个农业机器人的播种模式、播种密度、路径规划、播种补种、多机避碰^[70]。综上文献梳理可知,国内外诸多学者在农机设备调度算法和调度平台的研究上成果显著。国外农机设备调度平台发展较成熟,而国内虽然在农机设备管理、农机设备调度平台研发方面已经有一定成果,但是对于如何综合考虑农机手、农机服务组织和农户的需求,开发适用于多区互联的农机调度模型和全局优化智能调度算法还需要进一步研究。

3 农机物联网监控技术应用

目前农机物联网监控系统国内外均有成熟的产品。在我国,农机车联网技术已经在新疆生产建设兵团的精准农业中得到应用^[71]。大型农机的远程监控调度系统已投入运行,依托北斗卫星导航与位置服务平台、地基增强系统,为各团场农机管理部门、采棉机公司和农机合作组织提供作业农机的实时信息服务。通过农机车联网系统可以准确获

取当前作业机具的实时位置,跟踪显示当前农机的作业情况,准确获取作业面积、主油耗等相关数据,并能观看农机作业实时作业画面,监控作业质量,提高农机作业服务的效率,降低服务成本。吕新等开发农业全程机械化云管理服务平台,发明采棉机作业工况实时监测与智能控制技术,构建采棉机作业质量远程监测与调度云管理系统^[72]。黑龙江省建三江七星农场研发的农业物联网综合服务信息平台初步具备智能农机系统功能。浙江省智慧农业云平台已在该省农业农村管理部门进行应用,数字农机管理系统整合农机监理、发展水平、购机补贴、服务主体等相关业务和数据,为农机调度和决策管理提供科学依据^[73]。吴东林等将云平台和并行计算技术运用到无人收割机远程监测系统中,系统采集作业环境、收割机状态监测和收割机位置等数据,通过对漏收率、破损率的实时监测来提高收割机的自主作业水平,农机管理人员可以根据系统显示的实际作业进度和待收割地块的情况对收割机进行调度^[74]。马俊飞基于山东省计算中心通用平台构建农机物联网云平台,针对农业环境监控的业务需求进行扩展和补充,为用户提供集中模式的数据实时采集、分析预警和智能调控等功能。用户通过计算机 IE 浏览器或手机客户端随时随地了解监控点的实时情况并进行远程管理^[75]。在农机智能监测装备方面,我国哈尔滨工业大学、北京市农林科学院智能装备技术研究中心等单位分别研究开发了基于北斗定位技术的农机作业监控终端和管理平台,并在东北、华北、华东等地推广应用。

国外很多大型农业机械均已安装远程实时监控系統,并多以农场为单位提供整套农机作业综合管理方案。智能农机品牌公司如约翰迪尔、凯斯、芬特、科乐收、格兰等均开发了网络化农业装备管控平台(表4)。

表 4 农业机械监测系统与功能

公司	产品	功能
约翰迪尔	JDLINK	查看设备位置、故障信息,设置地理围栏和宵禁,管理维护计划和警报,诊断故障代码,共享地图和 AB 线,生成报告
凯斯	AFS Connect	远程监控农机的状态和位置,管理维修计划,故障信息分享,警报处理,远程诊断维护
芬特	FendtONE	远程查看、分析和优化机器的状况,查看故障代码
科乐收	EASY	管理数据,远程监控,多平台共享
格兰	iM Calculator	使用 GPS 数据计算施肥、喷药、播种的成本,给出合理化建议
凯斯纽荷兰	PLM Connect	跟踪设备并显示位置 and 实际活动、设置地理围栏和宵禁

美国约翰迪尔集团有限公司多年前就将农机物联网技术用于日常的农机管理中,其成果就是 JD LINK 系统,农机管理人员可通过该系统在计算机端和移动端在线对农机作业位置、农机参数信息等数据进行查询,实时了解农机的行驶路线、车载农具的运作状态和工作时间与进度,且农机上装载有检测农场的土壤结构、作物长势、土壤营养成分等传感器,可以预测收成和计算效益^[76]。美国凯斯公司的农业机械上安装有“网络农场”系统,使用该系统可以实现从手机到办公室、从农机到办公室、农机对农机之间的无线通信,形成农业物联网系统,管理人员在办公室可以对农事操作进行有效管理,通过调度提高农机作业的效率 and 农业生产的经济效益。德国芬特公司研发的“爱·农”农机车联网系统(<http://www.agcocorp.cn/products/inong.html>)通过大数据和云技术的应用,将田地的天气、土壤、降水、温度、地理位置等数据上传到云端,数据可以实时在 Web 端和手机/平板 APP 端进行显示。德国科乐收公司开发的 EASY 高效农业系统利用 GPS 卫星,确定机器的位置,并定期通过移动通信向单个服务器传输 GPS 坐标、工作时间和性质、技术指标等数据,采用数据处理技术将农机机群位置、驾驶室虚拟仪表盘、农机机群生产效率等信息可视化,支持农场管理人员利用手机和计算机等对农机进行远程监控(<http://www.claas.cn/products/claas>)^[77]。美国纽荷兰机械公司开发的 PLM Connect 远程信息处理系统(<http://agriculture.newholland.com/en-us/nar/products/plm>)实时发送和接收信息,包含在交互式地图上跟踪机器的移动、查看每个移动设备的移动路径、为农场和田地创建地理位置、设置宵禁通知、当农机离开地理位置或非工作时间开关打开时通知管理员,以及显示各种图像以监测操作参数和机器错误代码的功能^[78]。

目前,国外的拖拉机、联合收割机和其他移动式农业机械的制造商使用各种遥测和监测系统,提高其使用效率,降低组织工作控制的成本和拥有设备车队的成本。系统对设备的运行模式和状态进行 24 h 监控,可获得一般参数如油耗、燃料情况、发动机温度等信息以及关键零件运行的参数如监测液压系统、脱粒滚筒的运行情况,向粮箱中注入粮食或粮箱中的粮食数量、粮食湿度等。监控系统的使用可以减少设备维护和运行的费用,对设备的运

行模式和状态进行全天监测,并计划其维护。应用最广泛的系统是远程通信、远程指挥、JD LINK、AFS Connect 等。

随着移动端设备的普及,利用移动端架设调度平台将成为未来的新趋势。叶文超等设计了一种基于安卓手机建立农机调度与管理平台,实现农机的数据采集及管理调度,以及和农机主、农田主与管理部门对农机农田的数据共享^[79]。张正飞等开发移动客户端作为移动展现层,目前安卓版本采用原生开发,与 Web 端数据同步,主要实现农机信息远程监测查看和数据统计等,模块配置和权限管理依然由 Web 后台管理,移动端后台实现方式主要通过调用 Web Service 接口,将后台数据传输给手机,从而便于农机操作人员和移动客户直接用手机查看相关数据,主要功能包括基本功能、农机列表、监控详情、数据统计和巡检信息上传,为农机管理信息化转型提供了一定的基础^[80]。王诚龙等对播种、施肥、深松环节进行作业质量在线监测研究,并采用 B/S 结构平台结合智能移动终端 APP 进行数据管理^[81]。

4 现状问题分析

4.1 感知层问题分析

在信息感知设备与技术方面主要存在以下 2 个难点:(1)缺乏农业专业感知设备;(2)缺乏普适性传感器。我国农机装备作业环境复杂,且地面不平整造成农机振动会影响感知设备的探测精度,需要研发适应农业作业环境的高精度感知产品,尤其是农机作业环境与作业对象立体的感知;大田作业环境地域差异性较大,且作业具有农时限制,目前大多感知产品仅适用于某些作物或某些区域,缺乏普适性,导致农机物联网获取的信息不准确,进而影响后续的数据分析与决策。

4.2 网络层问题分析

在数据传输技术方面受到作业区域和地理位置的影响,在地块坡度较大时,有时获取的数据与实际情况有一定偏差。另外,在地理位置较偏僻的地块,有时无线信号较弱,造成数据无法传输,需要提高网络层的可靠性、稳定性、实时性和通用性,需要研发适合农村不同地理环境的高通量、低资费的信息通信技术。此外,农机远程传输技术标准体系还未正式实施,使得物联网技术在农机装备规范化应用发展方面受到制约。

4.3 应用层问题分析

在信息处理与决策方面存在模型稳定性、准确性不够和数据挖掘不充分的问题。国内农机数据主要由农机制造企业和地方管理部门管理,数据较分散,尚未形成全国范围的农机作业大数据系统,没有大量的数据集支撑模型训练,算法检测的性能受到限制,模拟模型与实际生产差别较大。如对于视觉相似但症状不同的病虫害,模型需要利用气候环境、地理位置和历史病虫害数据等信息来源来增加模型的稳定性和准确性。目前,在大田智慧农业生产中,农机作业模式识别、农业病虫害诊断机器学习等方面都取得了显著进展,但部分模型、算法还不足以全面反映客观现实,数据没有得到充分挖掘利用,还需加强对农业智能决策模型的研究。

5 结论与展望

我国大田农机装备物联网技术应用已取得一定成果,但在农机信息准确获取、远程传输和智能决策方面仍与世界先进水平存在差距,在农业专用传感器研发、新一代移动互联技术、大数据支撑的智能决策模型研究、多机协同与智慧农场应用方面需要加大研发力度。

5.1 农业专用传感器研发

农机物联网感知技术是智能农机科学决策的数据来源。持续改进现有传感器在复杂环境下的准确性、稳定性和耐用性,从传感器材料、固定结构方面进行商品化研发;针对农机作业环境、作业对象研发国产化低成本立体感知设备,支撑远程作业控制;使用原位精准测量技术针对不同需求进行感知设备研究设计,提高产品的适用范围和农机作业效率。

5.2 基于 5G 的新一代移动互联技术

随着我国对 5G 基站大力建设,为农业信息在复杂的地理地势、辽阔的地域进行高速稳定远程传输提供硬件支撑。在平台与物联网终端互通互联技术中,5G 技术拥有大带宽、低时延的优势,能提高数据传输效率;构建基于 5G 的传输节点网络,对农机感知信息进行分布式管理。

5.3 大数据支撑的智能决策模型研究

农机大数据技术通过对农机信息的存储、融合和挖掘等,将信息转变为科学决策,为用户提供实用建议。在移动互联技术支撑下,构建农机云平台,发展以机器学习为代表的云端决策技术,利用

机器学习提供的技术进行数据挖掘来分析大数据,促进农机大数据融合,并研究多种模型,如基于农机作业对象实时识别精准施药决策模型、异常检测 and 智能诊断模型、农机作业质量评估模型、农机远程调度、多机协同决策模型等。

5.4 多机协同与智慧农场应用

智慧农场采用物联网、大数据等信息技术,对农机作业参数进行远程监控,实现智能化生产作业。现代化农机作业趋向于机群协作,机群协作能大大提高作业效率和运输效率。研究大数据、机器学习等物联网技术,构建农场远程监控调度系统,通过传输节点网络和无线传输技术,来实现农机信息的自动采集和处理、科学决策以及农机远程控制等功能。

综上,农机物联网已进入高速发展期,应结合我国农业的特点,攻克农业专用传感器、智能决策模型等核心技术;研制农机智能终端、农机远程控制系统等高端产品;加快农机远程传输标准化建立;加强政策扶持,推动产品应用,进而提高我国农机智能化水平。

参考文献:

- [1] 周 济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273–2284.
- [2] 刘成良, 林洪振, 李彦明, 等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 1–18.
- [3] Barusu M, Reddy K, Shanmugapriya R, et al. Irrigation, fertilizing and weed cutting in the row crops with IoT controlled robot[J]. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 2019, 8(3): 512–518.
- [4] Peña C, Riaño C, Moreno G. RobotGreen: a teleoperated agricultural robot for structured environments[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2019, 12(1): 87–98.
- [5] 李建军, 王 岩, 姜永成, 等. 共享农机技术可行性研究——以圆捆机为例[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(9): 81–84.
- [6] Sun D, Chen D, Wang S M, et al. A dynamic instability detection and prediction system for high clearance tractor[J]. IFAC, 2016, 49(16): 50–54.
- [7] Zhang Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. Kerkyra, 2002: 666–673.
- [8] Cheein F A, Steiner G, Paina G P, et al. Optimized EIF – SLAM algorithm for precision agriculture mapping based on stems detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 78(2): 195–207.
- [9] Veris launches U3 mobile soil sensor platform[EB/OL]. (2021–12–

- 04) [2023 - 03 - 01]. <https://www.globalagtechinitiative.com/in-field-technologies/sensors/veris-launches-u3-mobile-soil-sensor-platform/>.
- [10] Köksal Ö, Tekinerdogan B. Architecture design approach for IoT-based farm management information systems[J]. Precision Agriculture, 2019, 20(5): 926 - 958.
- [11] 韩长杰, 杨文奇, 窦汉杰, 等. 大田土壤电导率快速检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 301 - 310.
- [12] 梁 栋, 胡丽娜, 王 秀, 等. 车载式大田土壤电导率在线检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 274 - 285.
- [13] Alam M, Shakil K A, Khan S. Internet of things (IoT) [M]. Berlin: Springer, 2020: 273 - 284.
- [14] Palleja T, Landers A J. Real time canopy density estimation using ultrasonic envelope signals in the orchard and vineyard [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 115: 108 - 117.
- [15] 姜红花, 白 鹏, 刘理民, 等. 履带自走式果园自动对靶风送喷雾机研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊1): 189 - 195.
- [16] 史东旭, 高德民, 薛 卫, 等. 基于物联网和大数据驱动的农业病虫害监测技术[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(5): 967 - 974.
- [17] Li S Y, Ding X Z, Kuang Q L, et al. Potential of UAV-based active sensing for monitoring rice leaf nitrogen status [J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1834.
- [18] Suresh P, Saravanakumar U, Salameh M, et al. Advances in smart system technologies [C]. Singapore: Springer, 2021: 495 - 505.
- [19] Kumar S, Mishra S, Khanna P. Precision sugarcane monitoring using SVM classifier [J]. Procedia Computer Science, 2017, 122: 881 - 887.
- [20] 温 鑫. 基于 CAN 总线的变量施肥机远程数据终端研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2022.
- [21] 姜鑫铭. 玉米免耕播种机精确播种关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [22] 陈 幸, 贺智涛, 姬江涛, 等. 基于云平台的玉米播种位置监测系统设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(8): 71 - 75.
- [23] 陈兴和, 孙 超, 刘 辉. 农机深松作业远程监测装备发展现状及建议[J]. 农业工程, 2018, 8(9): 6 - 8.
- [24] 陈 进, 王学磊, 王一帆. 基于 Android 手机的联合收获机主要部件工况监测系统[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊1): 203 - 207.
- [25] 杜志伟, 郝凤琦, 程广河, 等. 基于物联网的农机状态监控系统研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(11): 189 - 194.
- [26] Cortés C A P, Jaimes C I R, Moreno G G. RobotGreen: a teleoperated agricultural robot for structured environments[J]. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2019, 12(1): 87 - 98.
- [27] Waleed M, Um T W, Kamal T, et al. Classification of agriculture farm machinery using machine learning and internet of things[J]. Symmetry, 2021, 13(3): 403.
- [28] 雷雪梅, 张光强, 姚 旗, 等. 基于卷积神经网络的农机图像自动识别研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(5): 140 - 147.
- [29] 杨 洋, 温 兴, 马强龙, 等. 基于贝塞尔曲线的动态识别区农机避障路径实时规划[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 34 - 43.
- [30] Waleed M, Um T W, Kamal T, et al. Determining the precise work area of agriculture machinery using internet of things and artificial intelligence[J]. Applied Sciences, 2020, 10(10): 3365.
- [31] 董 胜, 袁朝辉, 谷 超, 等. 基于多学科技术融合的智能农机控制平台研究综述[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 1 - 11.
- [32] 王 培, 孟志军, 尹彦鑫, 等. 基于农机空间运行轨迹的作业状态自动识别试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 56 - 61.
- [33] 王至秋, 员玉良, 秦振朕. 基于物联网技术的农机作业参数采集器的设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(1): 75 - 79.
- [34] 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1): 43 - 48.
- [35] 刘焯韬, 牛 康, 李治国, 等. 深松作业质量监测系统的设计与应用[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(9): 163 - 165, 177.
- [36] Lou S Y, He J, Lu C Y, et al. A tillage depth monitoring and control system for the independent adjustment of each subsoiling shovel [J]. Actuators, 2021, 10(10): 250.
- [37] Karimi H, Navid H, Besharati B, et al. A practical approach to comparative design of non-contact sensing techniques for seed flow rate detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 165 - 172.
- [38] Besharati B, Navid H, Karimi H, et al. Development of an infrared seed-sensing system to estimate flow rates based on physical properties of seeds[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 874 - 881.
- [39] Xie C J, Zhang D X, Yang L, et al. Precision seeding parameter monitoring system based on laser sensor and wireless serial port communication [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 190: 106429.
- [40] GreenStar™ 3 command center™ release notes [EB/OL]. (2015 - 08 - 04) [2023 - 03 - 03]. https://www.deere.com/en/stellarsupport/release_notes/greenstar3-commandcenter/.
- [41] Oksanen T, Linkolehto R, Seilonen I. Adapting an industrial automation protocol to remote monitoring of mobile agricultural machinery: a combine harvester with IoT[J]. IFAC, 2016, 49(16): 127 - 131.
- [42] Blank S, Pfeiffer D. Real-time operator performance analysis in agricultural equipment [C]// 5th IFAC Conference on Sensing, Control and Automation Technologies for Agriculture Agricontrol. Seattle, 2016: 359 - 364.
- [43] Sarri D, Martelloni L, Vieri M. Development of a prototype of telemetry system for monitoring the spraying operation in vineyards [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 248 - 259.
- [44] Cutini M, Costa C, Bisaglia C. Development of a simplified method for evaluating agricultural tractor's operator whole body vibration [J]. Journal of Terramechanics, 2016, 63: 23 - 32.
- [45] Serap G, Eugenio C, Dennis M. Perceptions of tilt angles of an agricultural tractor[J]. Journal of Agromedicine, 2014, 19(1): 5 - 14.

- [46] Martínez C J, Arnó S J. Understanding geolocation and navigation and their uses in precision agriculture[J]. New AG International, 2017, 65: 20–26.
- [47] 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.
- [48] Khanna A, Kaur S. Evolution of internet of things (IoT) and its significant impact in the field of precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157: 218–231.
- [49] 刘志欣. 基于 Zigbee 的播种质量监控系统设计与试验[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- [50] Civelek C. Low power wide area network (lpwan) and internet of things adaptation in agricultural machinery[J]. Scholars Journal of Agriculture and Veterinary Sciences, 2017, 4(1): 18–23.
- [51] 陈 琦, 韩 冰, 秦伟俊, 等. 基于 Zigbee/GPRS 物联网网关系统的设计与实现[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(增刊 2): 367–372.
- [52] 万雪芬, 郑 涛, 崔 剑, 等. 中小型规模智慧农业物联网终端节点设计[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 306–314.
- [53] Navarro E, Costa N, Pereira A. A systematic review of IoT solutions for smart farming[J]. Sensors, 2020, 20(15): 4231.
- [54] Sladojevic S, Arsenovic M, Anderla A, et al. Deep neural networks based recognition of plant diseases by leaf image classification[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2016, 2016: 3289801.
- [55] Faltinski S, Flatt H, Pethig F, et al. Detecting anomalous energy consumptions in distributed manufacturing systems[C]//IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics. Beijing, 2012: 358–363.
- [56] Steckel T, Bernardi A, Gu Y, et al. Anomaly detection and performance evaluation of mobile agricultural machines by analysis of big data[C]//Conference Agricultural Engineering. Hannover: EurAgEng, 2015: 349–355.
- [57] Catalano C, Paiano L, Calabrese F, et al. Anomaly detection in smart agriculture systems[J]. Computers in Industry, 2022, 143: 103750.
- [58] Paudyal S. Classification of rotating machinery fault using vibration signal[D]. Grand Forks: University of North Dakota, 2019.
- [59] Yin Y X, Zhao C J, Zhang Y W, et al. Development and application of subsoiling monitoring system based on edge computing using IoT architecture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 106976.
- [60] Xiang M, Wei S, Zhang M, et al. Real-time monitoring system of agricultural machinery operation information based on ARM11 and GNSS[J]. IFAC, 2016, 49(16): 121–126.
- [61] 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.
- [62] 王 涛, 刘 飞, 高羽佳, 等. 基于遗传算法与 WiFi 聚类算法结合的北斗农机精准调度[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 426–433, 445.
- [63] 李 雯, 白正玉, 侯天龙, 等. 农机设备信息化调度平台架构设计研究[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(9): 172–178.
- [64] 杨立国, 李传友, 贾 生, 等. 北京市农机管理调度系统设计与实现[J]. 农学学报, 2014, 4(8): 96–100.
- [65] 王 娜, 张晓亮. 基于地理信息系统 MapGIS 的农机调度分配优化研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(6): 240–244.
- [66] 马军岩, 袁逸萍, 任年鲁, 等. 多区域协调调度架构下的农机服务资源优化配置方法[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(4): 113–122.
- [67] Sun Z G, Xia H, Wang W S. An architecture for the agricultural machinery intelligent scheduling in cross-regional work based on cloud computing and internet of things [C]//International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture. Berlin: Springer, 2011: 9–15.
- [68] 李 洪, 姚光强, 陈立平. 基于 GPS/GPRS 和 GIS 的农机监控调度系统[J]. 农业工程学报, 2008, 24(增刊 2): 119–122.
- [69] 王春山, 张 璠, 滕桂法, 等. 智慧农机调配管理平台设计与实现[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(1): 61–68.
- [70] Blender T, Buchner T, Fernandez B, et al. Managing a mobile agricultural robot swarm for a seeding task [C]//42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Florence, 2016: 6879–6886.
- [71] 刘基余. 关于北斗卫星导航系统技术标准化的几点建议[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 101–107.
- [72] 吕 新, 苑严伟, 马富裕, 等. 棉花集约化生产关键环节精准技术与装备研发应用[Z]. 石河子: 石河子大学, 2016: 10–34.
- [73] 管孝峰, 陆林峰, 吴晓柯. 浙江省智慧农业云平台建设及应用[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(3): 595–597, 601.
- [74] 吴东林, 张玉华. 收割机远程监测系统的设计——基于云平台数据挖掘并行算法[J]. 农机化研究, 2020, 42(6): 235–239.
- [75] 马俊飞. 基于物联网技术的农机车联网系统的研究与实现[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [76] 王少农, 庄卫东, 王 熙. 农业机械远程监控管理信息系统研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(6): 264–268.
- [77] Golyapin V, Golubev I. Global trends in the development of monitoring systems for mobile agricultural equipment[J]. E3S Web of Conferences, 2020, 157: 01013.
- [78] New holland. Smart solutions for your operation[EB/OL]. (2023–03–01) [2023–03–01]. <http://agriculture.newholland.com/en-us/nar/products/plm>.
- [79] 叶文超, 张小花, 廖东东, 等. 基于 Android 的农机调度与管理平台设计与应用[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2019, 32(3): 53–57.
- [80] 张正飞, 杨 松, 康 敏, 等. 基于物联网的农机信息化平台设计与研发[J]. 南方农机, 2018, 49(15): 4–7.
- [81] 王诚龙, 王吉旭, 葛宝玉, 等. 北斗农机作业全信息质量在线监测终端[C]//卫星导航定位与北斗系统应用 2017——深化北斗应用 开创中国导航新局面. 北京: 中国卫星导航定位协会, 2017: 186–190.