

农业物联网技术研究进展与发展趋势分析

李道亮^{1,2} 杨昊^{1,2}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京市农业物联网工程技术研究中心, 北京 100083)

摘要: 以人力为主的现有生产模式与劳动力持续减少、人均农业资源匮乏与农业资源利用率低、新农民年轻化与劳动力老龄化是阻碍我国农业实现现代化的主要矛盾。依赖智能装备实现精准化、自动化和智能化的农业生产,提高农业生产率、资源利用率和土地产出率,是解决以上矛盾的重要途径。农业物联网是以挖掘农业生产力、提高农业装备精准化水平、实现农业生产智能化的新兴技术,集农业信息感知、数据传输、智能信息处理技术于一体,并根据大田种植、设施园艺、畜禽养殖、水产养殖以及农产品物流的重大需求,形成典型的产业应用。本文重点总结了近年来农业信息感知方向在农业个体标识研究与感知机理及工艺的最新发现、农业信息传输方向在低功耗广域网的最新成果、农业智能信息处理方向的农业大数据技术与农业人工智能技术的重大突破,提出以农业业务模型驱动农业业务控制、以设备管理设备的农业物联网架构,人的主要角色是实时数据与价值信息的消费者,农业物联网驱动的农机装备智能化作业是最主要的劳动力来源;进而对比国内外农业物联网技术应用与集成现状,分析农业物联网发展的制约因素,提出我国农业物联网发展策略,最终得出农业物联网技术的未来研究重点与发展方向。

关键词: 农业物联网; 农业信息感知; 无线传感器网络; 农业大数据; 人工智能; 集成应用

中图分类号: S24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)01-0001-20

State-of-the-art Review for Internet of Things in Agriculture

LI Daoliang^{1,2} YANG Hao^{1,2}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Beijing Research Centre for Internet of Things in Agriculture, Beijing 100083, China)

Abstract: In China, agricultural production still mainly based on manpower, while agricultural labor population continuously declining, low agricultural resource efficiency, average agricultural resource shortage, low average age of new generation farmers and population aging in practical agricultural labor are the main troubles in developing agriculture. Research of intelligent devices and models to realize precise agriculture is a criticle approach to solve the problems and realize modernlization agriculture in China. IoT (Internet of things) in agriculture is an advanced technology aims at digging agricultural productivity potential, intelligentize agricultural equipment and realizing intelligent production, it includes agricultural information perception, agricultural information transmission and intelligent information processing technologies, IoT in agriculture focusing on applying in field planting, facility horticulture, livestock feeding, aquaculture and agricultural products logistics according to individual requirements. The progress of IoT in agriculture was concluded in last three years, which mainly focused on important breakthroughs of agricultural individual identification technologies, agricultural sensing theories and crafts, low-power wide-area network (LPWAN) technologies, agricultural big data technologies and artificial intelligent technologies. A framework of IoT in agriculture was proposed that agricultural operational control was based on agricultural operational models and self managed device network, according to the framework, the role of human was consumer of real-time data and valuable information, the labor output was based on IoT driven intelligent equipment. Furthermore, restriction factors were summarized by contrasting IoT applications in China and in advanced agricultural countries, the development strategy was raised for the development of IoT in Chinese agriculture, and finally the perspectives and main research issues of IoT were concluded in Chinese agriculture.

Key words: Internet of things in agriculture; agricultural information perception; wireless sensor networks; agricultural big data; artificial intelligence; integrated application

0 引言

作为人口大国,以小规模粗放劳作为主的传统农业依然是我国农业的主要生产、经营模式。由于传统农业生产规模小、组织化程度低,导致我国农业劳动生产率低下,作为已实现农业现代化的发达国家,美国、法国、德国的人均劳动力所负担耕地面积分别是我国的 145 倍、55 倍、45 倍。同时,伴随着农业劳动力老龄化问题,劳动力成本大幅提升,农产品的劳动力成本高达 70%,导致我国农产品价格全面超过国际水平。在资源利用率方面,发达国家主要粮食作物的水分生产效率、废料利用率、农药利用率分别为 2 kg/m^3 、65%、50%~60%,相比之下,我国主要粮食作物的水分生产效率、废料利用率、农药利用率分别仅有 1 kg/m^3 、35%、25%。传统农业低下的资源利用效率进一步加剧了生态环境恶化、人均农业资源短缺,并由此带来更为严峻的农产品质量安全问题。发展高效、精准、环保的现代化农业生产、经营模式^[1]是解决当前我国农业诸多难题的主要出路。

我国提出“感知中国”的物联网发展战略,“设施农业物联网”是其中至关重要的应用^[2]。我国农业正处于从传统农业向现代农业迅速推进的过程中,农业物联网是我国农业现代化的重要技术支撑。农业物联网技术在农业生产、经营、管理和服务中的具体应用,就是运用各类传感器、RFID、视觉采集终端等感知设备,广泛采集大田种植、设施园艺、畜禽养殖、水产养殖、农产品物流等领域的现场信息^[3-9];按照约定的协议,通过建立数据传输和格式转换方法,充分利用无线传感器网络、电信网和互联网等多种现代信息传输通道,实现农业信息的多尺度的可靠传输;最后将获取的海量农业信息进行融合、处理,并通过智能化操作终端实现农业的自动化生产、最优化控制、智能化管理、系统化物流、电子化交易,进而实现农业集约、高产、优质、高效、生态和安全的目标^[10]。

农业物联网是一个复杂的系统,涉及电子、通讯、计算机、农学等学科和领域。依据信息学的基本研究内容,即信息的获取、处理、传递和利用,农业物联网关键技术可划分 4 个层次,即感知层、传输层、处理层、应用层,重点解决农业个体识别、情景感知、异构设备组网、多源异构数据处理、知识发现、决策支持等问题。在农业物联网中,不同种类的农业设备、传感器突破数据共享屏障,通过 M2M 通讯技术共享运行参数,遵循基于大数据与人工智能的控制策略实现农业全过程的最优自动化控制。农业物联

网将扭转当前农业生产以人为主,以机器、科技为辅的局面,开创以机器、科技为主,以人为辅的生产模式,解放农业设备生产力,大幅提高农产品质量、物流的透明度,全面降低农产品生产经营成本。

目前,农业物联网已在我国实现初步应用,然而随着信息技术的不断升级,农业现代化进程迈入了全新的信息时代,传统农业的升级过程对农业物联网提出了新的需求。本文依次针对农业物联网的架构与标准化、感知技术、传输技术、智能信息处理技术、集成与应用现状进行梳理,分析在新信息环境下农业物联网的发展瓶颈,提出我国农业物联网发展策略。

1 农业物联网技术进展

1.1 农业物联网架构与标准化进展

农业物联网架构如图 1 所示,标准化的数据共享协议、数据接口、业务模型访问协议、用户外部访问协议促成农业系统的实时环境数据及设备运行状态共享,并实现多源异构分布式的海量农业数据存储;农业智能信息处理技术是建立农业业务模型的途径,是智能控制策略的来源,结合大数据技术获取价值关系信息与业务特征、结合人工智能算法获取业务模型的主要参数。在农业物联网的技术框架中,人的主要角色是实时数据与价值信息的消费者;农业全过程业务的运行,例如农业产前、产中、产后及补给运维管理业务等,则主要依靠控制策略自动运行,控制策略由业务模型与底层控制网络共同完成,人仅可以通过顶层软件平台的人机接口进行辅助控制,农业各个过程的业务控制已不再是人的主要任务,农业物联网驱动的农机装备智能化作业是最主要的劳动力来源。

农业物联网标准是实现农业物联网技术应用的关键^[11]。作为底层控制网络、海量农业数据存储系统、业务模型、用户需求的交互中心,顶层平台与各部分的接入必然涉及各种网络制式、数据接口、行业接口、异构数据交汇,此外,底层控制网络不同厂商设备的组网、业务模型的标准交互通道、海量农业数据存储、用户访问通道内部更是需要更为详细、精确的标准规范,因此数据共享协议、数据接口、业务模型访问协议、用户外部访问的标准化是农业物联网建设的基础,也是目前制约我国农业物联网解放设备生产力、以设备为主以人为辅,最终实现无人化管理的主要难题。

近年来专门面向农业物联网的技术标准体系正在不断完善,我国农业物联网行业应用标准工作组和国家传感器网络标准农业应用研究项目正在努力

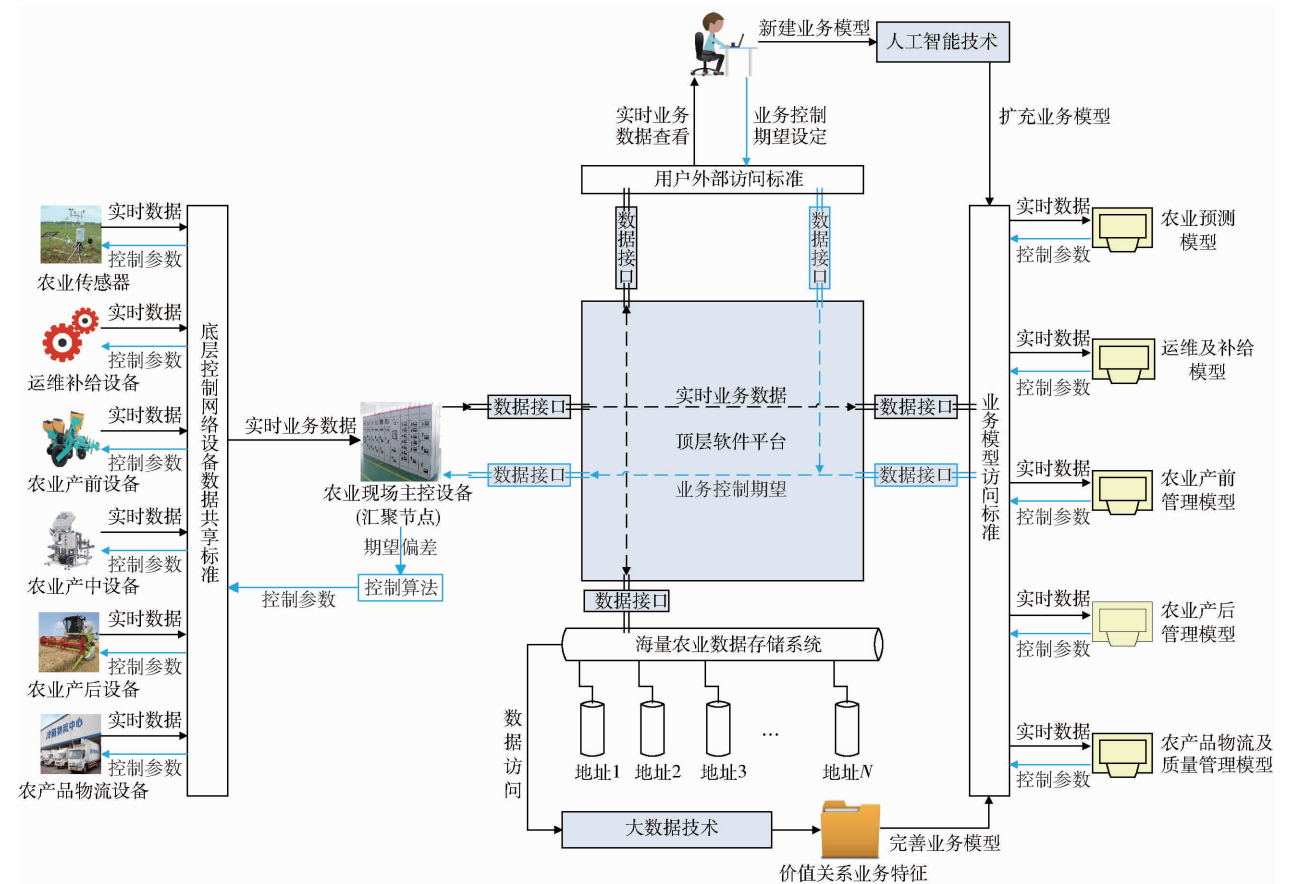


图 1 农业物联网架构

Fig. 1 Technical framework of IoT in agriculture

攻关。虽然如此,由于农业物联网的学科间交叉深度达到了前所未有的水平,当前的农业物联网标准体系还不足以全面支撑农业物联网发展的标准化。

根据《国务院关于推进物联网有序健康发展的指导意见》,农业物联网标准体系应着重基础共性标准、关键技术标准和重点应用标准建设。我国提出初步的物联网标准体系框架大体上由总体共性标准、感知层标准、网络层标准、服务支撑标准、应用层标准等部分组成。按照目前农业中行业的规模和信息化状况,以及农产品产前、产中、产后的农业产业链,可以划分选取大田种植、设施园艺、畜禽养殖、水产养殖、农产品物流 5 个代表性农业领域的物联网标准体系进行重点攻关。目前已有国家批准立项的 14 项农业物联网国家标准已取得重大进展。由于农业业务受地域分布影响较大,各地也相应推动局部地区的农业物联网标准体系研究。

1.2 农业信息感知技术进展

1.2.1 农业个体标识技术

统一标识体系是农业物联网建设的基础,农业物联网经由全球定位系统、基础网络以及传感器、RFID、条码技术等各类信息承载技术,实现到具体对象如人员、传感器、农机设备、农田水域等地理设施、农产品等的精确定位、查找和信息追溯;此外,基

于统一标识体系所建立的无线传感器网络能够在统一规划的前提下,兼容现有的基础建设体系,避免信息资源的重复建设,及时发现问题、排除故障,能够实现对农业监测环境的精准信息搜寻^[12]。

射频识别(RFID)是一种无线通信技术,它通过无线信号自动识别和感知贴附在物体上的射频标签并读写相关数据,RFID 技术具有防水、防磁、耐高温、读取距离大、数据加密、存储数据容量大、信息更改简单等特点,还可以实现多个标签的防冲突操作,从而可以解决很多传统识别技术上的缺陷,以上特点使得 RFID 成为实现农业物联网个体规模化识别的主要技术^[13]。近年来,RFID 在质量追溯、仓储管理、图书管理、物流运输、产品唯一性标识、医药及病人样本跟踪、电力通讯标识等领域的应用已取得令人瞩目的成果。进一步而言,基于 RFID 进行标识的研究热点已延伸至精准位置标识、定位及自主导航上^[14-15],具体的研究内容包括参数提取、几何位置估计、指纹位置估计、代价函数最小化、贝叶斯估计,主要通过将 RFID 信号同 WSN、ZigBee、GPS 信号中的位置信息加以融合从而实现物体位置标识、定位以及自主导航。此外,针对 RFID 的链路及防碰撞协议、远距离通讯、改进标签技术等方面的研究将进一步改进 RFID,使其适应更多的应用场

景^[16-17]。综上,农业个体标识技术已在个体识别、个体信息共享上取得巨大进展,将颠覆传统农业粗放、不区分个体差异的管理方式,是实现农业物联网内节点设备、农业动植物的精细化个体管理的基础。

1.2.2 农业信息感知机理与工艺

(1)电化学感知机理与工艺

电化学感知是以待测物质、修饰电极分别作为

敏感源和转化元件,把电流、电势或者电导等作为特征检测信号的机理^[18]。电化学传感器通常由 2 个或 2 个以上的电极组成,可分为参比电极、工作电极和辅助电极,根据电极界面间电子或离子的交换情况,电极又可分为电子交换型电极和离子交换型电极(也称膜电极)。农业传感器电极的分类如表 1。

表 1 农业传感器电极主要材料类型与优点

Tab.1 Main types and advantages of agricultural sensor probe

电极类型	主要材料	优点
金属基电极	以金属元素为主的具有金属特性的材料构成的电极 ^[19]	性能稳定,耐碱腐蚀,相对较小的极化电阻和温度系数 ^[20] ;制备工艺简单,抗恒电流极化性能较好 ^[21] ;使用寿命较长,具有良好的重现性、可逆性 ^[22]
化合物电极	由两种或两种以上元素组成的化合物为主要材料的电极	部分类型的制作工艺简单,无需电镀;部分类型的内阻低,能够在较高温度和压力下保持良好性能 ^[23] ;部分类型的电催化活性良好,耐腐蚀性能良好 ^[24] ;部分类型的原料来源丰富,生产成本较低 ^[25-26]
单质电极	由单种元素组成的纯净物为主要材料的电极	例如石墨电极,原料资源丰富,易于加工,化学性能稳定,理论比容量较高 ^[27-28] ;纯度较高的情况下,具有较高的精度;部分类型对特定环境条件表现出较高的抗腐蚀性 ^[28]
膜电极	在电极结构上配备有膜组合的电极,该膜具有特异性识别或选择的功能	可用于测定有毒重金属离子含量;部分膜对碱、碱性金属和一些重金属离子具有很强的抗干扰作用 ^[29] ;硫系玻璃膜电极性能稳定,其选择性在腐蚀性溶液中依然保持良好 ^[30] ;硫系玻璃膜具有优秀的环境监测性能 ^[31]

新型电化学感知机理在农业中的重金属、有毒物质监测具有极大潜力,例如:纳米材料与纳米技术的发展实现了单链 DNA 在电极表面的固定,各种类型的 DNA 电化学传感机理得以广泛研究^[32];基于电化学感知机理,针对重金属、有毒化合物的痕量监测已有较为广泛的研究^[33],并取得较好的效果。电化学传感器制备工艺的研究热点是纳米片修饰电极工艺^[34]、分子印迹工艺、丝网印刷工艺^[35]。

(2)光学感知机理与工艺

相比于电化学传感器,基于光学感知机理的传感器不需要与被检测物质发生化学反应的电极,不存在电极表面钝化、中毒以及电极膜污染的问题,重复性与稳定性良好,能够实现长期在线监测^[36]。农业物联网所应用的光学感知机理主要包括荧光淬灭效应^[37-38]、分光光度法^[39-40],此外也有应用光纤倏逝场效应检测氨气的研究^[41-42],在农业物联网领域具有应用潜力。

(3)电学感知机理与工艺

电学感知机理在农业物联网中主要用于温度、湿度的测量^[43]。介电法是土壤水分定量检测的最佳机理^[44-45]。测量土壤含水率的方法主要包括时域反射法(TDR)和频域法(FD)^[46],基于 TDR 法的土壤水分测量是国外的主流方法,也是国内亟需进行深度研究的热点^[47]。

(4)遥感学感知机理

遥感学的理论基础是物质成分在不同波段电磁

波下的光谱吸收和反射特征。农业遥感技术具有覆盖面积大、重访周期短、获取成本相对低等优势^[48],对大面积露天农业生产的调查、评价、监测和管理具有独特的作用,能够解决农业作物种植种类分散、地域复杂的难题。农业遥感的收益约占遥感应用总收益的 70%,可分为四大研究方向^[49]:农业资源调查、农作物估产、农业灾害预报、精准农业。

综上,农业信息感知研究不仅涉及到化学分析、物质表面特性、光谱学、生物学、微电子学、遥感学等多门学科的机理探索,还在不断突破加工方式,以追求更高的工艺精度、更长的使用寿命、更低的感知成本。其中基于电化学、光学、电学感知机理的农业传感器,应侧重于感知机理与硬件工艺的改善,同时注意组合不同机理的优势,研发多参数、多途径的农用传感器;另一方面,基于高光谱遥感、无人机遥感的精准遥感是特殊的农业感知途径,是实现精准农业的重要技术,应侧重于数据处理、挖掘与特征提取算法的改进,组合农业遥感数据与地面农业传感网数据,进行信息融合以提高农业遥感精度。

1.3 农业信息传输技术进展

1.3.1 农业现场总线技术

农业现场总线(Field bus)为恶劣工作环境设计,保证了农业机械控制系统的高可靠性和实时性^[50]。目前农业现场总线技术主要包括控制器局域网总线(CAN bus)、RS485 总线。此外,对应于特定厂商的硬件产品,还有 LON 总线、Avalon 总线、

1-wire 总线、Lonworks 总线。

CAN 总线协议是汽车计算机控制系统、嵌入式工业控制局域网的标准总线,可靠性高、错误检测能力强,是农机自动化控制、农业物联网、精准农业应用最多的总线技术,基于 CAN 2.0B 协议,国际标准化组织制订了农林业机械专用的串行通信总线标准 ISO11783 协议^[51],广泛应用于农机数据采集传输^[52]、农机导航控制、分布式温室控制^[53]、农业环境监测^[54]、节水灌溉^[55-56]、水产养殖监控系统等领域。

RS485 总线是串口通讯的标准之一,采用平衡传输方式,当采用二线制时,可实现多点双向通信,抗干扰能力强,可实现传感器节点的局域网兼容组网^[57]。由于灵活、易于维护,广泛应用于农业监控系统中。

农业现场总线技术实现了农业控制系统的分散化、网络化、智能化,同时,由于其鲁棒性、抗干扰能力强,故障率低,是确保农业物联网关键节点信息传

输的必备技术。由于农业物联网节点的信息传输往往关系到农业业务的正确执行、农业业务信息的准确共享,即使已通过其它信息传输方式实现了通讯,也应尽可能额外配置一条农业现场总线作为其它传输方式故障时的紧急信息传输通道。

1.3.2 农业无线传感器网络

无线传感器网络 (WSN) 是由大量具有片上处理能力的微型传感器节点组成的网络^[58]。根据通讯距离、覆盖范围可以分为无线局域网技术、无线广域网技术^[59-61],在无线广域网技术中,低功耗广域网 (Low-power wide-area network, LPWAN) 技术是近年来物联网研究的热点方向之一,相对于传统的无线广域网蜂窝移动通信技术 (如 2G、3G、4G 等),具有低成本、低功耗的特点^[62]。WSN 的传输技术对比如表 2 所示。

无线局域网技术主要包括 ZigBee、Wi-Fi、Bluetooth,是主要频段为 2.4 GHz 的短距离通讯技术。三者的具体性能比较如表 3 所示。

表 2 无线传感网主要传输技术对比
Tab. 2 Contrast of main WSN communication technologies

性能指标	无线局域网技术 (WLAN)	无线广域网技术 (WWAN)	
		低功耗无线广域网技术 (LPWAN)	蜂窝移动通信技术
传输距离	短距离 (10 m ~ 3 km)	长距离 (空旷地可达 50 km ^[63])	长距离 (最大 36 km)
传输速率	较高	低	高
功耗	高	低	高
总体续航能力	一般	长 (约 10 a)	短
总体成本	低	低	高

表 3 无线局域网技术性能对比
Tab. 3 Contrast of wireless local area networks communication performance

性能指标	技术类别		
	ZigBee	Wi-Fi	Bluetooth
协议标准	IEEE 802. 15. 4	IEEE 802. 11b/g/n	IEEE 802. 15. 1x
传输速度/(Mb·s ⁻¹)	0. 1	11 ~ 15	1
通信距离 (室内)/m	30 ~ 50	< 100	< 10
通信距离 (室外)/m	100 ~ 2500 (增强后)	< 700	< 10
安全性	一般	低	高
功耗/mA	5	10 ~ 105	20
成本/美元	5	5 ~ 25	2 ~ 5

无线广域网技术包括蜂窝移动通信网、LPWAN (低功耗广域网);蜂窝移动通信技术目前经历了 4 代技术更新,以“万物互联”为目标的第 5 代移动

通信技术 (5G) 也已在 2016 年公布,将为农业物联网进一步升级农业数据传输效率带来新的动力。各代技术对比如表 4 所示。

表 4 蜂窝移动通信技术性能对比
Tab. 4 Contrast of cellular mobile communication performace

性能指标	技术类别			
	2G	3G	4G	5G
接口标准	GSM、CDMA	CDMA2000、WCDMA、TD-SCDMA	TD-LTE、FDD-LTE	尚未公开
理论最高传输速率	100 kb/s	3. 6 Mb/s	1 Gb/s	20 Gb/s

LPWAN 依工作频谱是否授权,又可分为为非授权频谱 LPWAN 和授权频谱 LPWAN。其中 LoRa 是非授权频谱 LPWAN 代表,NB-IoT 是授权频谱 LPWAN 代表。表 5 为非授权频谱 LPWAN 技术对比,表 6 为 LoRa 与 NB-IoT 技术对比。目前国内三大运营商以及华为、中兴等设备供应商已在 2017 年推动 NB-IoT 的应用,然而 NB-IoT 对具体行业的需

求适应性相对 LoRa 较弱,更适合分散型应用;LoRa 作为最重要的非授权频谱 LPWAN 技术之一,运营方式更加灵活,可以是以运营商主导的大范围公开网络,也可以是私人部署的专用局域网络^[64]。另一方面,低功耗广域网技术按协议调制方式可以分为扩频技术、超窄带技术、窄带技术。如图 2 所示。

表 5 非授权频谱 LPWAN 技术性能对比
Tab.5 Contrast of non-authorized spectrum LPWAN performace

性能指标	技术类别				
	LoRa	SigFox	Telensa	Weightless-N	Weightless-P
距离(空旷)/km	15~45	40	<8	>5	>2
距离(城市)/km	3~8	10	<8	>5	>2
频率/MHz	433/470~510; 868,902~928	868,902	868,915;470	Sub-GHz	Sub-GHz
传输速率/(kb·s ⁻¹)	0.3~50	0.1	低速	30~100	100
覆盖节点数	>10 ⁶	>10 ⁶	1.5×10 ⁵		
运营模式	公开或私有	公开	公开	公开或私有	公开或私有
标准化	LoRaWAN	无	无	Weightless-N	Weightless-P

表 6 LoRa 与 NB-IoT 技术对比
Tab.6 Technical contrast between LoRa and NB-IoT

性能指标	技术类别	
	LoRa	NB-IoT
技术特点	线性扩频	蜂窝
网络部署	独立建站	基于蜂窝基站复用
频段	150 MHz~1 GHz	运营商频段
最远传输距离/km	15	20
速率/(kb·s ⁻¹)	0.3~50	<100
连接数量	200~300k/hub	200k/cell
1 节 5 号电池下的续 航时间/a	10	10
模块成本/美元	5	5~10

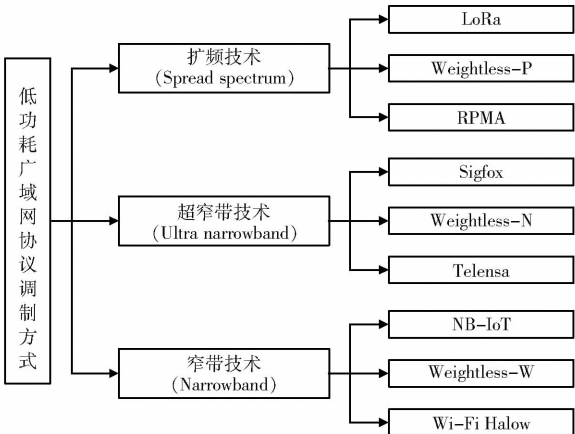


图 2 LPWAN 调制方式
Fig.2 Modulation types of LPWAN

综上,WSN 具有端节点和路由双重功能:一方面实现数据的采集和处理;另一方面将数据融合经多条路由传送到路由节点,最后经互联网或其他通

信网络传送到信息消费者。就无线局域网而言,已发展出基于不同协议标准的技术,Wi-Fi 通讯速率高,但功耗高,适合易部署、固定点位的传感器网络组网;Bluetooth 安全性高,但通讯距离过短、功耗高,适合短时近距离组网;ZigBee 由于功耗较低,同时具有多跳、自组织的特点,每个节点均可作为相邻节点传输数据的中转站,容易扩展传感器网络的覆盖范围,是理想的长距离、大范围传感器组网方式。就无线广域网而言,以 LoRa、NB-IoT 为代表的 LPWAN 是未来农业传感器网络组网的主要途径,虽然架设 LPWAN 基站的成本高,但低功耗、低运营成本、大节点容量的特点无疑是为农业物联网量身定做的组网技术,必将拥有巨大的应用空间;作为 LPWAN 的传输速率补充,4G、5G 移动通讯技术将使农业图像、音频为代表的大文件传输变为现实,进一步扩充农业信息维度。就研究侧重点而言,无线传感器网络的研究主要集中于通信、节能和网络控制 3 方面,将其应用于农业环境监测领域是无线传感器网络的研究热点之一。

1.4 农业智能信息处理技术进展

1.4.1 基于农业物联网的大数据技术

随着信息技术的不断普及,计算机存储技术快速发展,数据量跨入 ZB(1.024×10²¹ bit)时代,待处理的信息量超过了一般计算机在处理数据时所能使用的内存量,新的分布式系统架构 Hadoop 和计算模型 MapReduce 应运而生。全新的技术条件使得对海量数据的整合、聚类、回归等变得可行。舍恩伯格

提出,大数据是人类学习新知识、创造新价值的源泉^[65]。大数据的主要特征可以概括为“4V”特征,即规模性 (Volume)、快速性 (Velocity)、多样性 (Variety)、真实性 (Veracity)。

农业数据主要是对各种农业对象、关系、行为的客观反映,农业大数据技术是多源异构的海量农业数据的抽象数学描述,是挖掘农业生产、加工、销售、资源环境、过程等全产业链价值信息的有效工具^[66],通过统计学的方法量化农业对象、关系、行为,为精细农业的研究与实施提供知识支持。基于 web of science 核心合集数据,将近 5 年农业大数据的研究重点分类统计如表 7。

农业大数据的主要处理技术是 MapReduce 软件模型与 Hadoop 架构。具体框架如图 3,主要包括分布式文件系统 (Hadoop distributed file system, HDFS) 与 MapReduce 的并行计算框架:HDFS 的主要作用是整合不同地址的海量数据资源^[73],为并行计算分配不同的数据资源并向用户共享可公开访问的数据;MapReduce 框架包括 Mapper 主机、Reducer 主

表 7 近 5 年国际范围农业大数据研究重点
Tab.7 Main research issues of big data technologies in recent five years

研究内容	文献量	文献序号
监测预警	25	[67]
农产品营销	12	[68]
农业大数据平台	7	[69]
农业生产决策	12	[70]
农业资源分析	28	[71]
农业大数据应用综述	7	[72]

机、Worker 主机,Mapper 主机根据用户请求转化为对应的计算任务,根据 Worker 主机数量建立任务池,并下发给各 Worker 主机,Worker 主机依照任务从 HDFS 资源池获取资源、进行运算,运算结果将提交给 Reducer 主机进行进一步的整合、统计,获取从海量数据中挖掘出的价值信息,并将价值信息反馈给用户或进行存储。

农业大数据资源的重要性日益凸显,国家于 2003 年启动农业科学数据共享中心项目,经过多年发展,数据量的积累已初见规模,截止 2016 年

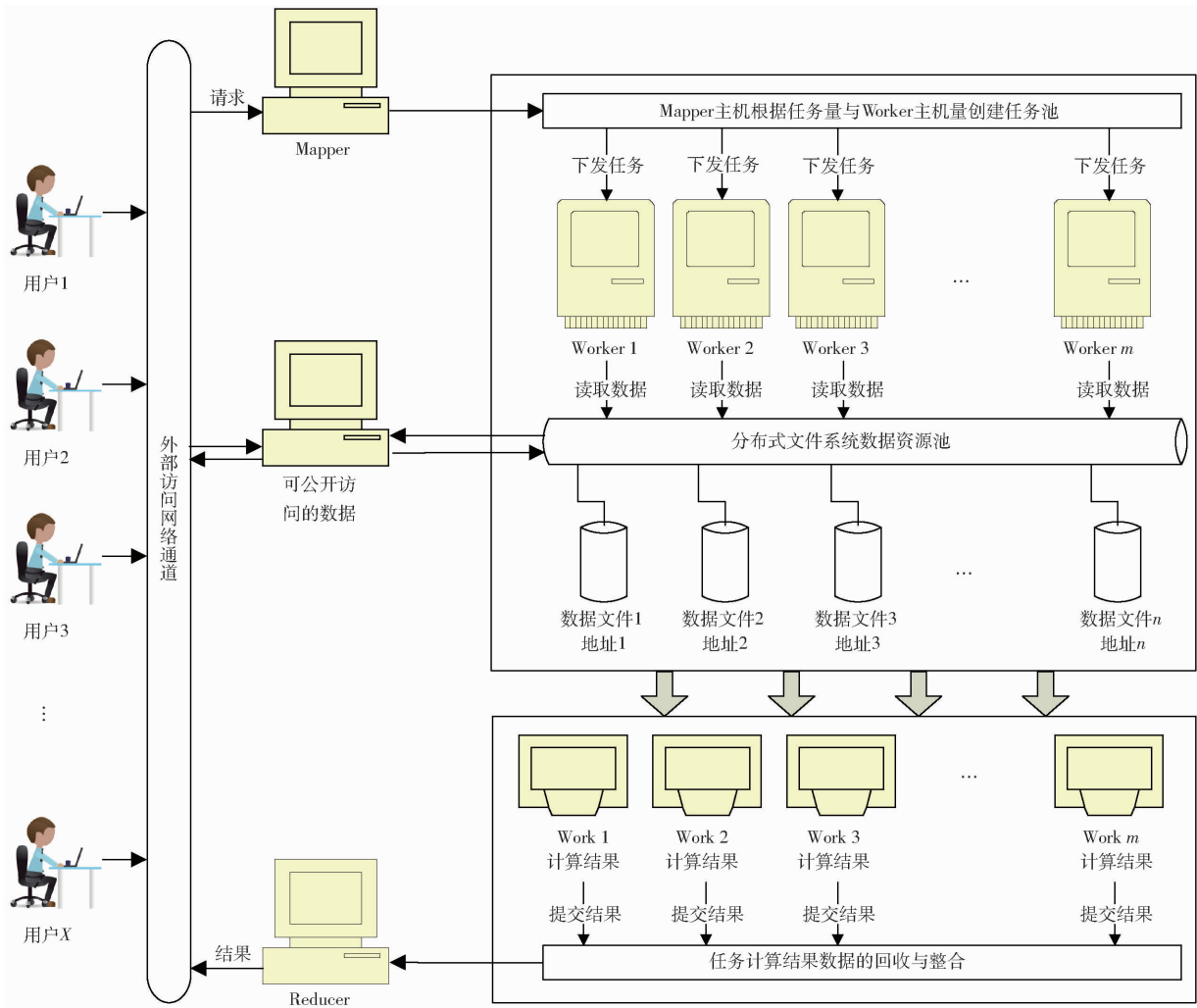


图 3 基于 Hadoop 架构与 MapReduce 软件模型的大数据处理与计算框架示意图

Fig.3 Processing and calculation route based on Hadoop framework and MapReduce programming model

底,共积累 2.9 TB 的农业数据,其中包括 1.2 TB 的高分辨率影像数据。农业大数据的来源包括:农业生产环境数据;生命信息数据;农田变量信息;农业遥感数据;农产品市场经济数据;农业网

络数据抓取。海量多源数据为农业大数据的研究奠定了基础,相关方面的研究主要集中在监测与预警、数据挖掘、信息服务等方面,其数据资源如表 8 所示。

表 8 国家农业科学数据共享中心数据资源
Tab.8 Data resources of China agricultural science data sharing center

数据资源	资源链接网址
区划科学数据分中心	http://region.agridata.cn/index.html
作物科学数据分中心	http://crop.agridata.cn/
动物科学与动物医学数据分中心	http://animal.agridata.cn/
热带作物科学数据分中心	http://trop.agridata.cn/
渔业与水产学数据分中心	http://fishery.agridata.cn/
草地与草业科学数据分中心	http://grassland.agridata.cn/
中国农业有害生物数据库	http://pests.agridata.cn/
我国转基因生物安全审批数据库	http://old.agridata.cn/module_db/hit.asp? rid = A100509&start = 5
美国生物科技国家信息中心	https:// www. ncbi. nlm. nih. gov/
病毒功能基因数据库	http://old.agridata.cn/module_db/hit.asp? rid = A100212&start = 5
模式动物功能基因数据库	http://old.agridata.cn/module_db/index_new.asp? rid = A100209&start = 5&bs = &url =
非脊椎动物功能基因数据库	http://old.agridata.cn/module_db/index_new.asp? rid = A100208&start = 5&bs = &url =
脊椎动物功能基因数据库	http://old.agridata.cn/module_db/index_new.asp? rid = A100213&start = 5&bs = &url =
作物功能基因数据库	http://old.agridata.cn/module_db/index_new.asp? rid = A100107&start = 5&bs = &url =
微生物基因组数据库	http://old.agridata.cn/module_db/index_new.asp? rid = A100108&start = 5&bs = &url =
动物基因组数据库	http://old.agridata.cn/module_db/index_new.asp? rid = A100109&start = 5&bs = &url =
农业气象指标数据库	http://old.agridata.cn/module_db/hit.asp? rid = A070414&start = 5
中国北方 8 省市主要作物需水量数据库	http://old.agridata.cn/module_db/index_new.asp? rid = A070106&start = 5&bs = &url =
农业资源综合区划数据库	http://region.agridata.cn/page/Combinatorialsearch.html? sjj = QTA4MDEwNw = =
气候资源数据库	http://region.agridata.cn/page/Combinatorialsearch.html? sjj = QTA4MDIwNA = =
农村能源数据库	http://region.agridata.cn/page/Combinatorialsearch.html? sjj = QTA4MDIwNg = =
土壤资源数据库	http://region.agridata.cn/page/Combinatorialsearch.html? sjj = QTA4MDIwMw = =
生物资源数据库	http://region.agridata.cn/page/Combinatorialsearch.html? sjj = QTA4MDIwNQ = =
水资源数据库	http://region.agridata.cn/page/Combinatorialsearch.html? sjj = QTA4MDIwMg = =

农业数据体量大、结构复杂、模态多变、实时性强、关联度高,通过大数据技术从海量农业数据中获取价值关系,是解决农业变量高维、强耦合问题的主要途径。农业大数据的本质在针对特定农业问题,依托大体量农业数据与处理方法,分析数据变量间的关系,制定解决方案,农业大数据的规模性 (Volume)、多样性 (Variety) 决定其复杂程度,农业大数据处理方法的快速性 (Velocity)、真实性 (Veracity) 决定其质量。基于农业大数据技术,深入分析农业数据,发现潜在价值是农业物联网智能信息处理的研究重点,大数据的应用主要集中在精准农业可靠决策支持系统、国家农村综合信息服务系统、农业数据监测预警系统、天地网一体化农情监测系统、农业生产环境监测与控制系统。

1.4.2 基于农业物联网大数据的人工智能技术

人工智能 AI(Aritificial intelligence)指基于计算机技术模拟或实现的智能,亦称人造智能或机器智能,AI 的 3 个核心技术是:表示、运算、求解^[74]。农

业人工智能是人工智能技术在农业生产、业务上的具体实现,农业人工智能的主要研究方向可概括为知识表现、模式识别、智能规划、信息搜索 4 方面。农业知识表现的研究内容是农业知识的数字化及决策支持;农业模式识别的研究内容是农业对象的识别方法;农业智能规划的研究内容是农业机械的智能化作业;农业信息搜索的研究内容是农业主题信息的搜索;表 9 是基于中国知网的 SCI、EI、中文核心期刊检索数据,对近 5 年农业人工智能技术专题的中文文献分类统计结果,通过该表可以对我国当前农业人工智能的研究侧重点进行分析。

近 5 年我国农业人工智能的重点研究方向是农业模式识别和农业智能规划,农业模式识别的研究热点趋向于同深度学习算法的结合,农业智能规划的研究热点侧重于建模与控制方法的研究;农业知识表现的最新研究热点是知识图谱,农业信息搜索的研究侧重点在于网络爬取技术及农业信息搜索引擎技术。在国际上,农业人工智能技术的研究始于

表 9 近 5 年农业人工智能技术专题中文文献分析

研究方向	按年份统计的文献篇数					文献序号
	2017 年	2016 年	2015 年	2014 年	2013 年	
农业知识表现	16	16	13	28	21	[75 – 78]
农业模式识别	38	29	23	29	22	[79 – 89]
农业智能规划	67	54	60	46	41	[90 – 98]
农业信息搜索	3	6	0	7	5	[99 – 103]

2000 年,农业发达国家已经出现商业化的耕作、播种、采摘等面向单一农业业务的智能机器人,也具备比较完善的智能土壤探测、病虫害识别、气候灾害预警的智能系统,用于畜禽养殖业的畜禽智能穿戴产品也已实现量产^[104]。农业人工智能技术在农业的产前、产中、产后、运维方面均有应用^[105],产前业务的研究包括:土壤分析及土地景观规划、灌溉用水供求分析及河川日常径流量预报、种植品种鉴别;在产中业务的研究包括:水质预测预警、水产养殖投喂管理、作物种植及牧业管理专家系统、插秧系统、田间杂草管理;在产后阶段的研究包括:农产品收货,农产品检验、品种分类、染料提取及蒸馏冷点温度预测;运维业务包括:农业设施装备运行管控、农业设施装备故障诊断等。

随着大数据技术的成熟、海量基础数据技术的不断积累,深度学习算法迎来第 3 次科研成果爆发,深度学习算法是一种以人工神经网络数学原理为基础、以多层参数学习体系为结构、以海量数据训练参数的机器学习算法,其特点是可自动抽取数据中蕴含的特征,并可对高维复杂变量间的关系进行数学

表示,理论上可以通过深度学习算法对现实世界的一切过程进行数学表达^[106-111]。深度学习算法有许多变种,从有无人工标注的参与可以分为监督学习、非监督学习;从算法输出可以分为判决式学习、生成式学习。深度学习算法已在数据预测回归、图像识别、语音识别等模式识别方面应用成熟,在自然语言处理、图像内容的语义表达(看图说话)、图像问答等非数值型数据的特征提取、建模方面不断取得进展,为异构数据的融合提供更加强大的解决方案。

通过以上的分析可以看出,我国农业人工智能的研究侧重点在由以往单一的知识表现研究向复杂系统规划、模式识别、机器学习迁移,这也与国际农业人工智能领域的研究热点相符合,同时我国农业人工智能技术主要侧重于农业产中业务,基于农业机器人的综合业务研究正处于基础性研究阶段;我国农业人工智能技术在农产品物流方面的研究比较欠缺。深度学习的研究成果与未来研究方向将对农业人工智能技术的发展具有重大意义,表 10 是当前深度学习算法在农业人工智能领域的应用潜力分析。

表 10 深度学习算法在农业人工智能领域的潜力分析

研究内容	数据类型	应用潜力	代表算法
图像识别	图像	农业模式识别	卷积神经网络(CNN)
目标识别	语音、数值	农业模式识别	深度玻尔兹曼机(DBM),深度堆叠网络(DSN)
预测回归	时序数值	农业复杂系统规划	深层神经网络(DNN),循环神经网络(RNN)
图像内容的语义表达	图像	农业模式识别、农业复杂系统规划	卷积神经网络(CNN)与循环神经网络(RNN)的组合
图像问答	图像	农业模式识别、农业复杂系统规划	卷积神经网络(CNN)与其它算法的组合
自然语言处理	语言、字符	农业知识发现与表示	循环神经网络(RNN)
变量间关系挖掘	数值	农业知识发现与表示	深度置信网络(DBN)、深层玻尔兹曼机(DBM)、和积网络(SPN)

由于农业业务的未知变量多,且变量间相互影响、关系复杂,对某个区域农业业务有效的农业人工智能技术在另外的区域内不足以代替人类在农业业务上的重要作用。因此,通过全新的机器学习、模式识别技术研究变量间的复杂关系,从根本上提高基于农业人工智能的复杂系统在不同地区的兼容性、准确性,进一步推进农业机器人技术的整合,是我国

农业人工智能未来发展的侧重点。

2 农业物联网技术集成与应用现状

2.1 农业物联网嵌入式平台与智能装备

农业智能机械是代替人力的直接农业劳动力来源,也是农业物联网底层控制网络的具体执行机构。国际各大嵌入式平台与芯片平台开发

表 12 国外农业环境智能监控平台

Tab. 12 Intelligent agriculture monitoring and control platform abroad

平台名称	适用场景	辅助决策	移动客户端	平台域名
Niwa	鱼菜共生	具备	具备	https://www.getniwa.com
Open Garden	园艺、大田灌溉、鱼菜共生	具备	具备	https://www.cooking-hacks.com/documentation/tutorials/open-garden-hydroponics-irrigation-system-sensors-plant-monitoring
Spruce	大田灌溉	具备	具备	https://www.spruceirrigation.com/
Iro	大田灌溉	具备	具备	https://rachio.com/
Edyn	园艺	具备	具备	https://www.edyn.com/
Botanicalls	园艺	不具备	不具备	https://www.botanicalls.com/

无线传感器网络架构,通过分析温室环境特点,国内外均已实现基于无线传感器网络技术的低成本温室环境监控系统,结合专家系统指导,采取远程控制滴灌等适当的措施,实现科学栽培、降低管理成本。

农业环境信息的精度与实时性程度,决定了农业业务执行的精度与实时性,农业环境监控的精细化程度决定了农业资源利用效率的高低,有效且精细的农业环境监控可提高农业资源利用效率。通过上述分析可知,国外绝大多数农业智能环境监控平台能够实现农业物联网基本的智能环境监控业务,即做到农业环境数据实时共享、农业环境控制方案的辅助决策、用户对农业环境的实时与定制化控制,且绝大多数平台同时具备移动客户端。在各大科研院所的推动下,我国也已具备相同水平的农业环境监控平台,然而平台的用户量、普及率远远低于国外平台。普及农业环境智能监控平台、推动平台智能决策机理的进一步研究,以及平台的标准化、组件

化、云化是国内农业物联网发展的重要任务之一。

2.3 农业业务模型与云平台

农业业务模型是农业大数据技术、农业人工智能技术的结合,是农业智能决策、农业智能控制的重要依据,涉及知识表示、模式识别、机器学习、图像处理等领域,在作物栽培、节水灌溉优化、农业灾害预测预警、养殖场智能管理、饲料配方优化设计、土壤信息与资源环境系统管理以及农机信息化管理等方面进行了广泛应用。例如,通过挖掘特定农业业务的专业知识、变量间关系,整合农业专家多年积累的知识、经验和成果,对专家知识库建模,模型以农业问题为输入,输出等同于专家水平的结论。云平台是农业业务建模的广泛数据资源,也为建模算法提供了更为有效的运算途径。表 13 列举了国外 4 个物联网云平台,均具备实时数据获取、抓取、数据可视化功能,绝大多数都具备数据分析功能,开发费用均较低,多数为开发者开放了足够的免费开发支持。

表 13 国外主要物联网云平台对比

Tab. 13 Contrast of main IoT cloud platform abroad

平台名	平台域名	云服务类型	数据分析	免费范围
Xively	https://xively.com	IoTaaS	不具备	完全免费
ThingSpeak	https://thingspeak.com	公开	具备	完全免费
Exosite	https://exosite.com	IoTaaS	具备	限 2 个设备
GroveStreams	https://grovestreams.com	私有	具备	限 10 000 条事务

在具体的应用方面,刘双印等^[113]以南美对虾养殖为研究对象,融合养殖环境实时数据、对虾疾病图像数据和专家疾病诊治经验等多种信息,构建了基于物联网的南美对虾疾病远程智能诊断模型。在国外发达畜牧业国家,已有通过在牛身上安装运动颈圈和 GPS 传感器,观察和记录牛的觅食、反刍、走动、休息和其他活动的行为(包括与物体磨蹭、摇头、梳理皮毛),对牛的行为分类进行建模,实现了对动物个体行为的准确掌握,提升了养殖场的管理水平;在国外发达畜禽养殖业国家已广泛存在针对各类畜禽动物的健康诊断模型,基于该业务模型的 ZigBee 监控系统可根据热湿度指数分析畜禽的应激

水平,已广泛普及。

精准的农业业务模型有助于农业业务摆脱对传统主观经验的过度依赖而导致的盲目性、不确定性,使农业业务各具体环节的决策依赖于科学的数据统计结果与专业业务知识,推进农业业务的智能化、集群化、跨媒体管理,提高自动化水平与精度,实现稳定的高产、高效、低成本。

2.4 农产品物流与安全溯源

农产品物流与安全溯源层面的集成与应用主要体现在农产品包装标识信息化及农产品物流配送控制技术,农产品物流配送信息化的主要技术包括条形码技术、电子数据交换技术、个体标识技术、射频

技术等;农产品物流配送控制技术主要包括冷链技术、农产品配送机器人分拣与自主行走等技术。通过电子数据交换技术、条形码技术和 RFID 电子标签等技术实现物品的自动识别和出入库,利用无线传感器网络对农产品配送机器人的分拣与自主行走进行控制,并通过冷链技术保证配送过程中农产品的质量与鲜活度要求,实现配送过程农产品的保质保量、来源可追溯、去向可追踪的目标。

国外对农产品可追溯系统进行了深入研究,如美国的农产品全程溯源系统、瑞典的农产品可追溯管理系统、澳大利亚的牲畜标识和追溯系统、日本的食物追溯系统和欧盟的牛肉可追溯系统等^[114];RFID 技术在动物个体标号识别、农产品包装标识及农产品物流配送等方面得到非常广泛的应用,如加拿大肉牛已从 2001 年起使用的一维条形码耳标过渡到电子耳标;日本 2004 年构建了基于 RFID 技术的农产品追溯试验系统,利用 RFID 标签实现对农产品流通的管理和个体识别;国外发达国家也已实现猪肉的可追溯系统,并通过实验证明了该系统的可行性。

我国在北京、上海、天津等地相继采用条码技术、RFID 技术、IC 卡技术等建立了以农产品流通体系监管为主的质量安全溯源系统,国内学者针对各类农产品可追溯系统进行了较为全面的研究:例如已有将数据网格技术与 RFID 技术相结合,构建了基于数据网格的 RFID 农产品质量跟踪与追溯系统,实现农产品跟踪与信息共享的物联网系统应用^[115];以 RFID 电子标签为数据载体、结合 EPC 编码体系对猪肉进行唯一标识的基础上构建 RFID/EPC 物联网架构下的猪肉跟踪追溯系统,实现猪肉供应链各环节溯源信息数据的自动采集和猪肉生产全程的网络化管理^[116];针对水产品冷链配送控制研究方面,汪庭满等^[117]基于 RFID 对每批次的冷链罗非鱼进行编码,实现了冷链配送过程中的实时温度监控及运输后罗非鱼的货架期预测;对于农资产品,我国已具备由农资溯源防伪、农资调度和农资知识服务 3 个子系统组成的农资溯源服务系统。

荷兰、比利时、美国等国家的农产品交易市场已经搭建好具备农产品物流自动配送、农产品质量追溯业务功能的农产品物联网:每个农产品均通过个体标识技术连接进入农产品交易网络,农产品信息会上报至交易平台供用户估价、交易,交易成功的农产品由配送机器人自动下单、筛选、搬运,质量追溯信息会随个体标识信息伴随农产品配送至每个消费者。我国目前还处于农产品物流与安全溯源相关物联网技术的关键研发期,虽然国内在个体标识技术、

机器人室内定位与导航技术、质量追溯技术的研究已经比较完善,但并不适合应用在当前相对落后的农产品交易模式,政府也在积极搭建农产品质量追溯环境,培育民众的食品安全意识,使农产品物联网真正在国内普及。

3 农业物联网发展的瓶颈

(1)我国农业生产仍以小规模模式为主,使以物联网为代表的新兴信息技术的进入门槛较高,此外,我国在农业生产精细化、自动化方面还比较薄弱,现有的农业监测及自动控制技术普及率较低,物联网应用环境还不完善,严重制约了农业物联网发展。农业物联网技术产品的稳定性差,故障率高,影响了用户的使用积极性。

(2)农业物联网配套标准滞后。目前国内还没建立完整的农业物联网技术标准体系。由于农业物联网应用标准规范缺失,使得物联网技术在农业领域规范化应用发展受到制约,农业传感器标准化程度不够,可靠性难以保证,难于实现广泛的集成应用;传感网建设缺乏统一的指导规范,多采用自定义传输协议,随意性较大;感知数据的融合应用和上层应用系统的开发也没有标准可循,无法互联共享,不利于产业化技术发展。

(3)物联网传感器实用化程度较低,管理不方便。与国际先进的物联网传感器技术相比,我国的物联网传感器还存在着设备体积大、功耗高、感知数据精度低、设备在恶劣自然环境下不稳定等问题。由于农田环境下传感器电源不易更换、损坏检修困难,传感器的上述问题给传感器管理带来了不便,阻碍了传感器在农业生产环境下的广泛部署。

(4)物联网数据传输可靠性较差,数据收集不稳定。农业生产环境的自身特点和传感器低功耗的技术需求给农业物联网数据传输提出了更高的要求。我国在低功耗下的网络传输安全性技术抗干扰技术、自动动态组网技术等方面相比国际先进水平还存在一定的差距,网络传输的不稳定给后端数据处理和智能分析带来了一定的困难。

(5)农业业务模型的实用性需要加强。虽然农业物联网应用汇集了大量农业数据,但这些实时感知数据没有得到充分挖掘利用。目前主要还是时序控制、单一指标控制,难于实现按需控制和多指标控制,应用系统的智能化程度需要提高。虽然目前在农业知识模型、农业模式识别、农业知识表示、农业业务模型的机器学习方面已有突破性进展,但部分的模型、算法不足以反映客观现实,以致于失去了指导农业精细生产的实际意义。

(6) 农业物联网广泛存在异质性问题。农业物联网中的异质性问题涉及不同厂商的异构设备、不同格式的异构数据、不同输出格式的业务模型。设备的异构性阻碍了农业物联网的扩展,数据的异构性阻碍了模型对融合信息的利用。

4 农业物联网发展策略

我国农业物联网发展的关键在于结合中国国情和农业特点,实现关键核心技术和共性技术的突破创新,最终成为精细农业应用实践的重要驱动力。发达国家在农业物联网技术研发和产业化应用方面已经取得了较大的进展,相比我国存在以下优势:美欧日韩等发达国家在物联网的发展中非常重视基础技术的研发,尤其是传感器技术的研发,并投入大量支持经费;农业生产规模大,为以农业物联网技术提供了广阔的应用空间,农业物联网技术进一步提高了农业机械的生产效率,形成了以平台推技术,以技术提高平台优势的良性循环;政府支撑强大,互联网基础网络环境完善、物流基础环境等各类硬件基础设施先进。以养殖大户、家庭农场为主的高级农村主体的互联网和电商知识扎实;农业物联网技术标准体系完善,具备有国际影响力的标准体系,如 IEEE、EPC global、ETSI M2M、ITU-T 等,涵盖了 M2M 通信、标签数据、空中接口、无线传感网等农业物联网所需的关键数据与通讯标准。

我国农业物联网的发展应重点对比发达国家农业物联网的优势,同时结合我国农业特点,在拉近与农业发达国家在农业物联网技术差距的同时,克服制约我国农业物联网发展的瓶颈问题:

(1) 农业物联网应用重点改革各地农业小规模经营现状,应适当引导扩大农业种植规模,集中连片的大面积耕地,提高农业机械化程度和新技术采用率,增强种植的专业化水平和土地产出率,为农业物联网的实施提供适宜的环境。

(2) 农业物联网标准化重点是攻克农业物联网相关标准的研究与修订,缩短行业达成共识的时间,统一农业物联网技术和接口标准,掌握物联网在农业市场的控制权,加强国际合作,积极参与国际标准建设工作,借鉴和引进国际先进标准。

(3) 农业感知技术重点发展高灵敏度、高适应性、高可靠性传感器,并向嵌入式、微型化、模块化、智能化、集成化、网络化方向发展,攻克数字补偿技术、网络化技术、智能化技术、多功能复合技术,完善制造工艺,提高环境适应能力与精度,在新材料应用、生产制造工艺与产业化技术水平上,也要形成明显的竞争优势。

(4) 农业信息传输技术重点发展无线传感器网络在精细农业中的应用,具体可概括为 4 方面:空间数据采集、精准灌溉、变量作业、数据共享与推送,攻克低功耗无线传输技术。推进传输节点的集成化与小型化、网络的动态自组织、信息的分布式处理与管理的发展。

(5) 农业智能信息处理技术重点发展大数据技术、人工智能技术在农业物联网中的具体实现,深入研究深度学习算法,以深度学习算法提高农业模式识别准确度、业务模型准确度、复杂农业变量间关系的知识表示准确度,重点攻克海量数据的分布式存储系统与业务模型在智能装备中的嵌入技术,发展流数据实时处理技术。

(6) 基于主流农业物联网嵌入式平台以统一的接口连接异构设备;结合深度学习算法处理非常规类型数据(语音、自然语言、图像)的异构数据,实现非常规异构数据间、非常规类型与常规类型数据的融合。

此外,国内农业物联网技术的先驱平台要理解农业行业本身,理解物联网,依托资源优势,渗透农村和农业市场,进而提升平台与技术优势,形成以平台推技术,以技术发展现代农业,以现代农业提升科研平台的良性循环。

5 结论与展望

农业物联网技术是实现精准农业的必要支撑,为应对重大变化的农业信息环境,农业物联网技术必须进行全面升级以进一步提升其普适性、可靠性、智能化水平,同时降低成本,推进其更广泛的应用。科研方面需重点突破:新感知机理的优化应用;农业传感器工艺升级;低功耗传输技术;基于农业大数据技术、农业人工智能技术的农业业务模型升级;具备标准统一、基于云计算和分布式技术的农业物联网顶层平台;农业物联网自维护技术;底层装备的智能化。

标准化的数据共享协议、数据接口、业务模型访问协议、用户外部访问协议促成农业系统的实时环境数据及设备运行状态共享,并实现多源异构分布式海量农业数据存储;个体信息标识、感知机理研究、传感器制作工艺是农业信息感知技术的研究重点,基于 RFID 的农业个体标识技术日趋成熟,不断得以应用,新的感知机理结合先进的制作工艺,使新型多参数低功耗传感器不断涌现,基于高光谱遥感、无人机遥感的特殊农业感知技术,已经成为国内农业作业的必要支撑;无线传感器网络组网简单、无需布线,同时能够克服复杂的农业生产环境,在高温、

高湿、低温、雨水等恶劣多变环境下运行,是农业物联网传输的主要方式,其中低功耗广域网技术是研究热点,无线局域网技术是目前底层测控网络的主要组网方式;农业智能信息处理技术是建立农业业务模型的途径,是智能控制策略的来源,研究热点包括大数据技术、人工智能算法。

与国际先进农业物联网应用集成的实例进行对比分析后可知,我国在关键技术的应用与集成环节已经实现甚至达到领先水平,主要的约束来自于不完善的应用背景与较低的普及程度。农业物联网的应用与集成对每个国家而言都是全新的尝试,在政府的推动与科研院所的成果支撑下,我国目前在应用与集成的初始阶段占得了一定的先机,要保持住优势,未来国内农业物联网应用以及集成的重点任务是:

(1)基于农业物联网嵌入式平台实现农业装备智能化,以提高农机作业的信息透明度、自动化水平、通讯的实时性与大规模协同作业,使农机在更大范围内进一步提高作业效率、连续作业时间和作业精度。

(2)在各大科研院所的推动下,国内也已具备国际先进的农业环境监控平台,然而平台的用户量、普及率远远低于国外平台,普及农业环境智能监控平台、推动平台智能决策机理的进一步研究是国内农业物联网发展的重要任务之一。

(3)随着农业大数据技术、农业人工智能技术的发展,已实现了大数据的深层次挖掘,例如深度置信网络、递归神经网络、人工蜂群算法,结合有监督学习与无监督学习的优势,充分挖掘数据内蕴藏的

实际问题的最优解,为农业生产者、管理者提供智能决策和在线指导。

农业物联网将彻底改变当前以人为主、以设备为辅的农业业务模式,在一个理想的农业物联网中,要以设备为主、以人为辅。因此,农业物联网可以解放设备、机器的生产力,使设备、机械在准确信息与农业业务模型指导下,实现智能化,摆脱人的约束,以优于人为控制的合理性与准确性保持更长时间的运行。模型与底层控制网络的精度是实现这个目标的决定性因素,而精准的农业业务模型依赖于先进的数据处理、价值关系挖掘及模型参数学习技术;精准的底层控制网络则依赖于精准的农业感知、执行装备,更先进的机理、更完善的工艺是决定底层控制网络质量的关键因素。此外,我国农业物联网的推广与实际应用,需要具备达到一定规模的集约化生产模式的支撑。

我国农业物联网的需求日趋强劲,传感器国产化、通信低成本化、信息处理智能化和物联网平台的云化是农业物联网的必然发展趋势。传感器国产化是我国农业物联网的发展方向,一方面国产传感器的稳定性、准确性和可靠性有待进一步提升,需要大学、科研院所和传感器企业联合协同攻关;NB-IoT、5G等新一代通信技术需要进一步降低使用成本,形成各种农业应用终端;各种农业动植物生产模型需要进一步系统化、体系化和实用化,这是一个长期的艰巨的过程;农业物联网平台也要按照标准化、个性化、云计算化的要求,逐步形成行业统一的平台,实现农业物联网、大数据、人工智能、智能装备技术的系统集成。

参 考 文 献

- 1 MISRA S, KRISHNA P V. Efficient medium access control for cyber-physical systems with heterogeneous networks[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9(1):22-30.
- 2 施苗苗,宋建成,田慕琴,等. 基于物联网的设施农业远程智能化信息监测系统的开发[J]. 江苏农业科学,2016, 26(11):392-395.
SHI Miaomiao, SONG Jiancheng, TIAN Muqin, et al. Development of remote intelligent information monitoring system based on IoT in facility agriculture[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 26(11):392-395. (in Chinese)
- 3 BREWSTER C, ROUSSAKI I, KALATZIS N, et al. IoT in agriculture: designing a europe-wide large-scale pilot[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(9):26-33.
- 4 BERTINO E, CHOO K, GEORGAKOPOULOS D, et al. Internet of things (IoT): smart and secure service delivery[J]. ACM Transactions on Internet Technology, 2016, 16(4):Article No 22.
- 5 KAMILARIS A, PITSILLIDES A. Mobile phone computing and the Internet of things: a survey[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(6):885-898.
- 6 PANG Z B, CHEN Q, HAN W L, et al. Value-centric design of the Internet-of-things solution for food supply chain: value creation, sensor portfolio and information fusion[J]. Information Systems Frontiers, 2015, 17(2):289-319.
- 7 阎晓军,王维瑞,梁建平. 北京市设施农业物联网应用模式构建[J]. 农业工程学报,2012,28(4):149-154.
YAN Xiaojun, WANG Weirui, LIANG Jianping. Application mode construction of Internet of things (IoT) for facility agriculture in Beijing[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4):149-154. (in Chinese)
- 8 RAO B, SALUJA P, SHARMA N, et al. Cloud computing for Internet of things & sensing based applications[C]//2012 Sixth

- International Conference on Sensing Technology, 2012: 374 – 380.
- 9 LI L, HU X G, CHEN K, et al. The applications of WiFi-based wireless sensor network in Internet of things and smart grid[M]. New York: IEEE, 2011:789 – 793.
- 10 李道亮. 农业物联网导论[M]. 北京:科学出版社, 2012: 395.
- 11 葛文杰, 赵春江. 农业物联网研究与应用现状及发展对策研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 222 – 230. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140735&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.035.
- GE Wenjie, ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and developing strategies of agricultural Internet of things[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 222 – 230. (in Chinese)
- 12 马文静, 吴东亚, 徐冬梅, 等. 农业物联网统一标识体系建设[J]. 中国标准化, 2014(1): 79 – 83.
- MA Wenjing, WU Dongya, XU Dongmei, et al. Uniform identification system construction for agricultural IoT [J]. China Standardization, 2014(1): 79 – 83. (in Chinese)
- 13 RUIZ G, LUNADEI L. The role of RFID in agriculture: applications, limitations and challenges[J]. Comput. Electron. Agric, 2011, 1(79): 42 – 50.
- 14 张琼, 刘畅. RFID 在散货堆场装卸机械行走定位中的应用[J]. 起重运输机械, 2017(1): 75 – 77.
- 15 熊琼. 果蔬采摘机器人自主定位与导航设计——基于 RFID 和 WSN 信息融合[J]. 农机化研究, 2017, 39(10): 223 – 227.
- XIONG Qiong. Autonomous positioning and navigation design of fruit and vegetable picking robot—based on information fusion of RFID and WSN [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(10): 223 – 227. (in Chinese)
- 16 FU X J, SHARMA A, KAMPANAKIS E, et al. A low cost 10.0 ~ 11.1 GHz X-band microwave backscatter communication testbed with integrated planar wideband antennas[C]//IEEE International Conference on RFID, 2016: 89 – 92.
- 17 LASCIO E, VARSHNEY A, VOIGT T, et al. Poster abstract: localight-a battery-free passive localization system using visible light[C]//2016 15th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), 2016: 1 – 2.
- 18 静平, 张晓梅, 许艳丽, 等. 纳米材料电化学传感器在食品安全检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2013, 36(2): 379 – 382.
- JING Ping, ZHANG Xiaomei, XU Yanli, et al. Applications of electrochemical sensors based on nanomaterials for food safety detection [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2013, 36(2): 379 – 382. (in Chinese)
- 19 吴世杰. 几种金属基电极制备及在重金属检测中的应用研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2013.
- WU Shijie. Electrochemical determination of heavy metals by metal-based electrodes[D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2013. (in Chinese)
- 20 尹鹏飞, 侯文涛, 许立坤, 等. 热浸涂银/氯化银和银/卤化银参比电极对比研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(5): 407 – 411.
- YIN Pengfei, HOU Wentao, XU Likun, et al. Comparative study on Ag/AgCl and Ag/Agx reference electrodes prepared by hot dip coating method[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(5): 407 – 411. (in Chinese)
- 21 何霖, 许立坤, 王均涛, 等. 热浸涂银/氯化银参比电极性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(5): 482 – 485.
- HE Lin, XU Likun, WANG Juntao, et al. Performance of Ag/AgCl reference electrode prepared by hot dip coating method [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21(5): 482 – 485. (in Chinese)
- 22 杨渝, 李龙, 刘红伟, 等. 全固态裸露式 Ag/AgCl 参比电极的研制及应用[J]. 化学传感器, 2011, 31(3): 45 – 48.
- YANG Yu, LI Long, LIU Hongwei, et al. Preparation and application of all-solid exposed Ag/AgCl reference electrode [J]. Chemical Sensors, 2011, 31(3): 45 – 48. (in Chinese)
- 23 李向阳, 杜宝中, 周长强. 全固态 SiC 参比电极的研制及应用[J]. 化学传感器, 2006, 26(3): 39 – 42.
- LI Xiangyang, DU Baozhong, ZHOU Changqiang. Preparation and application of the whole-solid SiC reference electrode [J]. Chemical Sensors, 2006, 26(3): 39 – 42. (in Chinese)
- 24 樊玲, 卫军, 彭述权, 等. 一种可用于混凝土内部固态 MnO_2 参比电极研究[J]. 传感技术学报, 2014, 27(6): 709 – 714.
- FAN Ling, WEI Jun, PENG Shuquan, et al. Studies on the performance characteristics of manganese oxide reference electrode for concrete environments[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(6): 709 – 714. (in Chinese)
- 25 王丽品, 王森林, 段钱花. 复合电沉积制备 $\text{Ni/NiFe}_2\text{O}_4$ 电极及其电催化析氧性能[J]. 应用化学, 2013, 30(6): 690 – 697.
- WANG Lipin, WANG Senlin, DUAN Qianhua. $\text{Ni/NiFe}_2\text{O}_4$ composite electrode prepared by electro-deposition and its electro-catalytic performance towards oxygen evolution reaction [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2013, 30(6): 690 – 697. (in Chinese)
- 26 ANINDITA, SINGH A, SINGH R N. Effect of V substitution at B-site on the physicochemical and electrocatalytic properties of spinel-type NiFe_2O_4 towards O-2 evolution in alkaline solutions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(8): 3243 – 3248.
- 27 庄全超, 魏国祯, 董全峰, 等. 温度对石墨电极性能的影响[J]. 物理化学学报, 2009, 25(3): 406 – 410.
- ZHUANG Quanchao, WEI Guozhen, DONG Quanfeng, et al. Influence of temperature on the performance of a graphite electrode [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2009, 25(3): 406 – 410. (in Chinese)

- 28 瞿墨, 瞿国瑞, 胡冠昱. 石墨电极的研究与实践[J]. 金属热处理, 2003, 28(11): 56–59.
QU Zhao, QU Guorui, HU Guanyu. Research and practice on the graphite electrode [J]. Heat Treatment of Metals, 2003, 28(11): 56–59. (in Chinese)
- 29 YE G R, CHAI Y Q, YUAN R, et al. A mercury (II) ion-selective electrode based on N, N-dimethylformamide-salicylacylhydrazone as a neutral carrier[J]. Analytical Sciences, 2006, 22(4): 579–582.
- 30 MORTENSEN J, LEGIN A, IPATOV A, et al. A flow injection system based on chalcogenide glass sensors for the determination of heavy metals[J]. Analytica Chimica Acta, 2000, 403(1–2): 273–277.
- 31 PLASCHKE M, CZOLK R, ACHE H J. Fluorometric-determination of mercury with a water-soluble porphyrin and porphyrin-doped sol-gel films[J]. Analytica Chimica Acta, 1995, 304(1): 107–113.
- 32 LOO A H, SOFER Z, BOUSA D. Carboxylic carbon quantum dots as a fluorescent sensing platform for DNA detection[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 3(8): 1951–1957.
- 33 高成耀, 佟建华, 边超, 等. 掺硼金刚石薄膜电极分析检测痕量镉、铅、铜、汞[J]. 新型炭材料, 2017, 32(3): 277–283.
GAO Chengyao, TONG Jianhua, BIAN Chao, et al. Simultaneous detection of trace Cd (II), Pb (II), Cu (II), Hg (II) ions by a boron-doped diamond electrode[J]. New Carbon Materials, 2017, 32(3): 277–283. (in Chinese)
- 34 胡琪, 谭学才, 吴佳雯, 等. 基于石墨烯掺杂金纳米粒子的灭除威分子印迹电化学传感器的制备与性能研究[J]. 分析测试学报, 2015, 34(3): 328–334.
HU Qi, TAN Xuecai, WU Jiawen, et al. Preparation of molecularly imprinted electrochemical sensor for detection of 3,5-xyllyl methylcarbama based on gold nanoparticles-dopped graphene modified glassy carbon electrode [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2015, 34(3): 328–334. (in Chinese)
- 35 毕可, 施晓文, 杜予民. 基于丝网印刷电极的甲胎蛋白电化学免疫传感器[J]. 分析科学学报, 2017, 33(2): 159–164.
BI Ke, SHI Xiaowen, DU Yumin. Disposable screen-printed electrodes for high sensitive electrochemical immunosensing of alpha-fetoprotein[J]. Journal of Analytical Science, 2017, 33(2): 159–164. (in Chinese)
- 36 AL X X, SHI J. MoS₂ nanosheet-based fluorescent biosensor for protein detection via terminal protection of small-molecule-linked DNA and exonuclease III-aided DNA recycling amplification[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2015, 74: 227–232.
- 37 左显维, 冯治棋, 胡艳琴, 等. 基于 MoS₂ 纳米片的荧光生物传感器对饮用水中 Hg²⁺ 的检测[J]. 环境化学, 2017, 36(1): 167–174.
ZUO Xianwei, FENG Zhiqi, HU Yanqin, et al. A fluorescent biosensor based on MoS₂ nanosheets for the detection of Hg²⁺ in drinking water [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(1): 167–174. (in Chinese)
- 38 罗伟, 曾新华, 李森, 等. 检测痕量 Hg²⁺ 的量子点荧光传感器系统设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(11): 3236–3240.
LUO Wei, ZENG Xinhua, LI Miao, et al. A quantum dot fluorescence sensor system design for Hg²⁺ trace detection [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(11): 3236–3240. (in English)
- 39 黄玉芳, 叶优良, 杨素勤. 双波长分光光度法测定土壤硝态氮的可行性研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(2): 43–45.
HUANG Yufang, YE Youliang, YANG Suqin. Feasibility of NO₃⁻-N determination by dual wavelength spectrophotometric method [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(2): 43–45. (in Chinese)
- 40 张学华, 王君玉, 韩敏. 氯胺 T-四碱催化分光光度法测定河南省黄淮平原农业地质调查样品中痕量碘[J]. 岩矿测试, 2007, 26(5): 391–394.
ZHANG Xuehua, WANG Junyu, HAN Min. Catalytic spectrophotometric determination of trace iodine in agricultural geological survey samples from Huanghuai plain of Henan Province in chloramine T-tetabase system[J]. Rock and Mineral Analysis, 2007, 26(5): 391–394. (in Chinese)
- 41 JARZEBINSKA R, KORPOSH S, JAMES S, et al. Optical gas sensor fabrication based on porphyrin-anchored electrostatic self-assembly onto tapered optical fibers[J]. Analytical Letters, 2012, 45(10): 1297–1309.
- 42 李杰, 李蒙蒙, 孙立朋, 等. 保偏微纳光纤倏逝场传感器[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 191–200.
LI Jie, LI Mengmeng, SUN Lipeng, et al. Polarization-maintaining microfiber-based evanescent-wave sensors[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 191–200. (in Chinese)
- 43 高翔, 刘鹏, 卢潭城, 等. 一种土壤湿度测定方法在 ZigBee 无线传感器网络中的应用[J]. 传感器与微系统, 2015, 36(1): 151–153.
GAO Xiang, LIU Peng, LU Tancheng, et al. Application of a method of soil moisture measurement in ZigBee WSNs [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 36(1): 151–153. (in Chinese)
- 44 GAO Xiaodong, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Estimating the spatial means and variability of root-zone soil moisture in gullies using measurements from nearby uplands[J]. Journal of Hydrology, 2013, 476: 28–41.
- 45 HUTTON R J, LOVEYS B R. A partial root zone drying irrigation strategy for citrus-effects on water use efficiency and fruit characteristics[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(10): 1485–1496.
- 46 姜明梁, 方嫦青, 马道坤. 基于 TDR 的土壤水分传感器设计与试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 147–153.
JIANG Mingliang, FANG Changqing, MA Daokun. Design and experimental research of an instrument for soil moisture sensor based on TDR[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(8): 147–153. (in Chinese)

- 47 许景辉, 马孝义, SALLY D. 基于低频滤波法的 T-TDR 含水率测量方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 172 – 176. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140626&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.026.
XU Jinghui, MA Xiaoyi, SALLY D. Measurement of soil moisture with T-TDR probe based on LFF method [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 172 – 176. (in Chinese)
- 48 BASTIAANSEN W. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications [J]. Agricultural Water Management, 2000, 46(2): 137 – 155.
- 49 JIAO X F, KOVACS J M, SHANG J L, et al. Object-oriented crop mapping and monitoring using multi-temporal polarimetric RADARSAT-2 data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 96: 32 – 46.
- 50 刘阳, 马蓉, 曹卫彬, 等. 农业车辆自动驾驶导航系统中 CAN 总线研究进展[J]. 农机化研究, 2011, 33(8): 233 – 236.
LIU Yang, MA Rong, CAO Weibin, et al. Progress on the research of CAN bus in automatic navigation system of agricultural vehicles[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(8): 233 – 236. (in Chinese)
- 51 刘晓光, 张亚靖, 胡静涛, 等. 基于 CAN 总线的农机导航控制系统终端的设计与实现[J]. 农机化研究, 2016, 38(11): 133 – 136.
LIU Xiaoguang, ZHANG Yajing, HU Jingtao, et al. Design and implementation of terminal based on CAN for agricultural vehicle navigation control system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11): 133 – 136. (in Chinese)
- 52 刘传茂, 王熙. 农机数据采集传输系统的设计与实现——基于 CAN 总线[J]. 农机化研究, 2016, 38(12): 207 – 211.
LIU Chuanmao, WANG Xi. Design and implementation of agricultural machinery data acquisition and transmission system——based on CAN bus [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(12): 207 – 211. (in Chinese)
- 53 高祥, 居锦武, 蒋勋, 等. 基于 CAN 总线的分布式农业温室控制系统设计[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(4): 67 – 70.
GAO Xiang, JU Jinwu, JIANG Mai, et al. Design on distributed agricultural greenhouse control system based on CAN bus [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(4): 67 – 70. (in Chinese)
- 54 祝敏. 基于 CAN 总线的大棚温湿度监控系统的设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2010(1): 57 – 60.
- 55 宋娟, 李伟, 李庆锋. 基于 CAN 总线的智能化节水灌溉系统的研究[J]. 节水灌溉, 2012(11): 64 – 66.
SONG Juan, LI Wei, LI Qingfeng. Research on intelligent water saving irrigation system based on CAN bus[J]. Water Saving Irrigation, 2012(11): 64 – 66. (in Chinese)
- 56 张丽红, 孙磊, 伦翠芬, 等. 基于 CAN 总线的连栋温室节水灌溉控制系统[J]. 农机化研究, 2011, 33(6): 168 – 170.
ZHANG Lihong, SUN Lei, LUN Cuifen, et al. A water saving irrigation control system of joined greenhouses based on CAN bus [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(6): 168 – 170. (in Chinese)
- 57 可晓海, 张文超, 唐开辉, 等. 基于 GSM 网络和 485 总线的农业监控系统设计[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(5): 213 – 218.
KE Xiaohai, ZHANG Wenchao, TANG Kaihui, et al. Design of agricultural intelligent monitoring system based on GSM network and 485 bus[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(5): 213 – 218. (in Chinese)
- 58 MISRA S, KRISHNA P V. Efficient medium access control for cyber-physical systems with heterogeneous networks[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9(1): 22 – 30.
- 59 VIJAY G, BDIRA E B. Cognition in wireless sensor networks: a perspective[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(3): 582 – 592.
- 60 ZHANG S, ZHANG H. A review of wireless sensor networks and its applications[C] // Proceeding of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2012.
- 61 ZHU C H, WANG H, LIU X L. A novel sensory data processing framework to integrate sensor networks with mobile cloud[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 10(3): 1125 – 1136.
- 62 BEHZADAN A, ANPALAGAN A, WOUNGANG. An energy efficient utility-based distributed data routing scheme for heterogeneous sensor networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2014, 15: 2020 – 2037.
- 63 郑宁, 杨曦, 吴双力. 低功耗广域网络技术综述[J]. 信息通信技术, 2017, 10(1): 47 – 54.
ZHENG Ning, YANG Xi, WU Shuangli. A survey of low-power wide-area network technology [J]. Information and Communications Technologies, 2017, 10(1): 47 – 54. (in Chinese)
- 64 赵静, 苏光添. LoRa 无线网络技术分析[J]. 移动通信, 2016, 43(21): 50 – 57.
ZHAO Jing, SU Guangtian. Analysis on LoRa wireless network technology[J]. Mobile Communications, 2016, 43(21): 50 – 57. (in Chinese)
- 65 肯尼·库克耶, 维克托·迈尔-舍恩伯格. 大数据时代的历史机遇——产业变革与数据科学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- 66 王文生, 郭雷风. 农业大数据及其应用展望[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(9): 1 – 5.
- 67 DENG M X, DI L P, HAN W G, et al. Web-service-based monitoring and analysis of global agricultural drought[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2013, 79(10): 929 – 943.
- 68 LIU Y F. Innovation of marketing pattern of fresh agricultural products based on internet plus and big data platform[J]. Agro Food Industry Hi-Tech, 2017, 28(3): 1739 – 1743.
- 69 KLEIN L J, MARIANNO F J, ALBRECHT C M, et al. PAIRS: a scalable geo-spatial data analytics platform[C] // IEEE

- International Conference on Big Data, 2015:1290 – 1298.
- 70 DUTTA R, MORSHED A, ARYAL J, et al. Development of an intelligent environmental knowledge system for sustainable agricultural decision support[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014,52:264 – 272.
- 71 FRELAT R, LOPEZ-RIDAURA S, GILLER K E, et al. Drivers of household food availability in sub-Saharan Africa based on big data from small farms[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(2): 458 – 463.
- 72 WOLFERT S, GE L, VERDOUW C, et al. Big data in smart farming—a review[J]. *Agricultural Systems*, 2017,153:69 – 80.
- 73 DIALLO O, Rodrigues J J. Distributed database management techniques for wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2015, 26(2):604 – 620.
- 74 刘现, 郑回勇, 施能强, 等. 人工智能在农业生产中的应用进展[J]. *福建农业学报*, 2013,28(6): 609 – 614.
LIU Xian,ZHENG Huiyong, SHI Nengqiang, et al. Artificial intelligence in agricultural applications[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2013,28(6): 609 – 614. (in Chinese)
- 75 张雅琪, 郑荣宝, 付艳华, 等. 近 50 年来全球农田保护的知识图谱研究[J]. *中国农业科技导报*, 2017,19(3): 37 – 49.
ZHANG Yaqi, ZHENG Rongbao, FU Yanhua, et al. Knowledge mapping of research on international farmland protection during 1964—2015 [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017,19(3): 37 – 49. (in Chinese)
- 76 赵明, 杜亚茹, 杜会芳, 等. 植物领域知识图谱构建中本体非分类关系提取方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2016,47(9): 278 – 284. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160938&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.038.
ZHAO Ming, DU Yaru, DU Huifang, et al. Research on ontology non-taxonomic relations extraction in plant domain knowledge graph construction[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016,47(9):278 – 284. (in Chinese)
- 77 郑建丽, 刘平, 张祝利, 等. 基于专家系统的舱室智能化设计在渔船上的应用[J]. *农业工程学报*, 2015,31(6): 208 – 212.
ZHENG Jianli, LIU Ping, ZHANG Zhuli, et al. Application of cabin intelligent compartments based on expert system in fishing vessel [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015,31(6): 208 – 212. (in Chinese)
- 78 戴建国, 赖军臣. 基于图像规则与 Android 手机的棉花病虫害诊断系统[J/OL]. *农业机械学报*, 2015,46(1): 35 – 44. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.006.
DAI Jianguo, LAI Junchen. Image-rule-based diagnostic expert system for cotton diseases and pests based on mobile terminal with Android system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015,46(1):35 – 44. (in Chinese)
- 79 谷利芬, 谢芳. 基于多跳无线网络和机器视觉的新式采摘机器人设计[J]. *农机化研究*, 2018,40(3): 221 – 225.
GU Lifen, XIE Fang. Design of a new picking robot based on multi hop wireless network and machine vision [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018,40(3): 221 – 225. (in Chinese)
- 80 颜秉忠. 机器视觉技术在玉米苗期杂草识别中的应用[J]. *农机化研究*, 2018,40(3): 212 – 216.
YAN Bingzhong. Identification of weeds in maize seedling stage by machine vision technology [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018,40(3): 212 – 216. (in Chinese)
- 81 田磊, 李丽, 王明绪. 基于 Android 的玉米病虫害机器视觉诊断系统研究[J]. *农机化研究*, 2017,39(4): 207 – 211.
TIAN Lei, LI Li, WANG Mingxu. Research on the diagnosis system of maize plant diseases and insect pests based on Android [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017,39(4): 207 – 211. (in Chinese)
- 82 王侨, 陈兵旗, 朱德利, 等. 基于机器视觉的定向播种用玉米种粒精选装置研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017,48(2): 27 – 37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170204&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.004.
WANG Qiao, CHEN Bingqi, ZHU Deli, et al. Machine vision-based selection machine of corn seed used for directional seeding [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017,48(2):27 – 37. (in Chinese)
- 83 丁为民, 赵思琪, 赵三琴, 等. 基于机器视觉的果树树冠体积测量方法研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016,47(6): 1 – 10, 20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160601&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.001.
DING Weimin, ZHAO Siqi, ZHAO Sanqin, et al. Measurement methods of fruit tree canopy volume based on machine vision[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016,47(6):1 – 10,20. (in Chinese)
- 84 王红军, 熊俊涛, 黎邹邹, 等. 基于机器视觉图像特征参数的马铃薯质量和形状分级方法[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(8): 272 – 277.
WANG Hongjun, XIONG Juntao, LI Zouzou, et al. Potato grading method of weight and shape based on imaging characteristics parameters in machine vision system [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016,32(8):272 – 277. (in Chinese)
- 85 王欣, 李道亮, 杨文柱, 等. 基于可见光机器视觉的棉花伪异性纤维识别方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2015,46(8): 7 – 14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150802&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.002.
WANG Xin, LI Daoliang, YANG Wenzhu, et al. Lint cotton pseudo-foreign fiber detection based on visible spectrum computer

- vision[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 7-14. (in Chinese)
- 86 刁智华, 赵明珍, 宋寅卯, 等. 基于机器视觉的玉米精准施药系统作物行识别算法及系统实现[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 47-52.
- DIAO Zhihua, ZHAO Mingzhen, SONG Yinmao, et al. Crop line recognition algorithm and realization in precision pesticide system based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 47-52. (in Chinese)
- 87 刁智华, 王会丹, 魏伟. 机器视觉在农业生产中的应用研究[J]. 农机化研究, 2014, 36(3): 206-211.
- DIAO Zhihua, WANG Huidan, WEI Wei. Summary of research on machine vision application in agricultural production [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(3): 206-211. (in Chinese)
- 88 胡炼, 罗锡文, 曾山, 等. 基于机器视觉的株间机械除草装置的作物识别与定位方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 12-18.
- HU Lian, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Plant recognition and localization for intra-row mechanical weeding device based on machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 12-18. (in Chinese)
- 89 刘同海, 滕光辉, 付为森, 等. 基于机器视觉的猪体体尺测点提取算法与应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 161-168.
- LIU Tonghai, TENG Guanghui, FU Weisen, et al. Extraction algorithms and applications of pig body size measurement points based on computer vision [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 161-168. (in Chinese)
- 90 曹东, 田富洋, 宋占华, 等. AMR 果蔬自动收获机器人动力学建模与实时控制[J]. 农机化研究, 2018, 40(2): 7-13.
- CAO Dong, TIAN Fuyang, SONG Zhanhua, et al. The dynamics and control of AMR vegetable and fruit automatic harvesting robot [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(2): 7-13. (in Chinese)
- 91 黎永键, 赵祚喜, 黄培奎, 等. 基于 DGPS 与双闭环控制的拖拉机自动导航系统[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 11-19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170202&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.002.
- LI Yongjian, ZHAO Zuoxi, HUANG Peikui, et al. Automatic navigation system of tractor based on DGPS and double closed-loop steering control[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 11-19. (in Chinese)
- 92 王冰心, 王孙安, 于德弘. 基于选择性注意机制的果实簇识别与采摘顺序规划[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 1-7. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161101&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.001.
- WANG Bingxin, WANG Sun'an, YU Dehong. Visual selective attention for fruit cluster recognition and picking sequence planning [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 1-7. (in Chinese)
- 93 孟庆宽, 张漫, 杨耿煌, 等. 自然光照下基于粒子群算法的农业机械导航路径识别[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 11-20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160602&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.002.
- MENG Qingkuan, ZHANG Man, YANG Genghuang, et al. Guidance line recognition of agricultural machinery based on particle swarm optimization under natural illumination [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 11-20. (in Chinese)
- 94 胡静涛, 高雷, 白晓平, 等. 农业机械自动导航技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 1-10.
- HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 1-10. (in Chinese)
- 95 张铁民, 李辉辉, 陈大为, 等. 多源传感器信息融合的农用小车路径跟踪导航系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 37-42. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150306&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.006.
- ZHANG Tiemin, LI Huihui, CHEN Dawei, et al. Agricultural vehicle path tracking navigation system based on information fusion of multi source sensor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 37-42. (in Chinese)
- 96 薛金林, 张顺顺. 基于激光雷达的农业机器人导航控制研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 55-60. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140909&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.009.
- XUE Jinlin, ZHANG Shunshun. Navigation of an agricultural robot based on laser radar [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 55-60. (in Chinese)
- 97 周俊, 陈钦, 梁泉. 基于强化学习的农业移动机器人视觉导航[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 53-58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140210&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.010.
- ZHOU Jun, CHEN Qin, LIANG Quan. Vision navigation of agricultural mobile robot based on reinforcement learning [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 53-58. (in Chinese)
- 98 李逃昌, 胡静涛, 高雷, 等. 基于模糊自适应纯追踪模型的农业机械路径跟踪方法[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 205-210. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130139&journal_id=jcsam.

- DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.039.
- LI Taochang, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Agricultural machine path tracking method based on fuzzy adaptive pure pursuit model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 205 – 210. (in Chinese)
- 99 孟繁疆, 姬祥, 袁琦, 等. 农产品价格主题搜索引擎的研究与实现[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(9): 64 – 71.
- MENG Fanjiang, JI Xiang, YUAN Qi, et al. Research and implementation of agricultural prices subject search engine [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47(9): 64 – 71. (in Chinese)
- 100 李冬梅. 基于互联网的农产品直营模式构建研究[J]. 农业经济, 2016, 34(5): 141 – 142.
- 101 王晓琴, 李书琴, 景旭, 等. 基于 Nutch 的农业垂直搜索引擎研究[J]. 计算机工程与设计, 2014, 35(6): 2239 – 2243.
- WANG Xiaoqin, LI Shuqin, JING Xu, et al. Research on agriculture vertical search engine based on Nutch [J]. Computer Engineering and Design, 2014, 35(6): 2239 – 2243. (in Chinese)
- 102 郭俊军, 孟繁疆, 张喜海, 等. 大豆主题网页资源采集系统的研究[J]. 农机化研究, 2014, 36(3): 182 – 185.
- GUO Junjun, MENG Fanjiang, ZHANG Xihai, et al. The research of soybean subject webpage resources acquisition system [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(3): 182 – 185. (in Chinese)
- 103 魏紫京, 孟繁疆, 郭俊军. 基于农业信息搜索引擎分类器的设计与实现[J]. 农机化研究, 2014, 36(3): 186 – 189.
- WEI Zijong, MENG Fanjiang, GUO Junjun. Design and implementation of the agricultural information search engine classifier [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(3): 186 – 189. (in Chinese)
- 104 SINHA K, SAHA P D, DATTA. Response surface optimization and artificial neural network modeling of microwave assisted natural dye extraction from pomegranate rind[J]. Industrial Crops and Products, 2012, 37(1): 408 – 414.
- 105 SHI Y, WANG Z W. Internet of things application to monitoring plant disease and insect pests [C] // Proceedings of International Conference on Applied Science and Engineering Innovation, 2015: 31 – 34.
- 106 GAN M, WANG C, ZHU C. Construction of hierarchical diagnosis network based on deep learning and its application in the fault pattern recognition of rolling element bearings[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016(2): 72 – 73, 92 – 104.
- 107 LIU H, LI L, MA J. Rolling bearing fault diagnosis based on stft-deep learning and sound signals[J]. Shock and Vibration, 2016(2): 1 – 12.
- 108 CHEN C L P, ZHANG C Y, CHEN L, et al. Fuzzy restricted boltzmann machine for the enhancement of deep learning[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 23(6): 2163 – 2173.
- 109 BOJNORDI M N, IPEK E. Memristive boltzmann machine: a hardware accelerator for combinatorial optimization and deep learning: international architecture-proceedings[C] // IEEE Symposium on High-Performance Computing, 2016: 1 – 13.
- 110 MA Y, GUO Z, SU J. Deep learning for fault diagnosis based on multi-sourced heterogeneous data [C] // International Conference on Power System Technology (Powercon), 2014.
- 111 MARTENS J. Deep learning with hessian-free optimization[C] // ICML'10 Proceedings of the 27th International Conference on International Conference on Machine Learning, 2010: 735 – 742.
- 112 白晓平, 王卓, 胡静涛, 等. 基于领航-跟随结构的联合收获机群协同导航控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 14 – 21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170702&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.002.
- BAI Xiaoping, WANG Zhuo, HU Jingtao, et al. Harvester group corparative navigation method based on leader-follower structure [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 14 – 21. (in Chinese)
- 113 刘双印, 徐龙琴, 李道亮, 等. 基于物联网的南美白对虾疾病远程智能诊断系统[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(2): 189 – 195.
- LIU Shuangyin, XU Longqin, LI Daoliang, et al. Research on remote system for disease diagnosis of Penaeus vannamei based on Internet of things[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(2): 189 – 195. (in Chinese)
- 114 RUIZ-GARCIA L, LUNADEI L. The role of RFID in agriculture: applications, limitations and challenges [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 79(1): 42 – 50.
- 115 郭曼, 朱海鹏, 郇晶. 基于数据网格的 RFID 农产品跟踪与追溯系统研究[J]. 农机化研究, 2007, 29(11): 101 – 104.
- GUO Man, ZHU Haipeng, LI Jing. Study on ogsa-dai based r-afts (RFID-agricultural product traceability system) [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(11): 101 – 104. (in Chinese)
- 116 胡敏, 刘波平, 舒令花, 等. 基于 RFID 和二维码的猪肉制品质量安全追溯平台的构建[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(26): 191 – 193.
- HU Min, LIU Boping, SHU Linghua, et al. Construction of traceability platform of pork product quality safety based on RFID and two-dimension code [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(26): 191 – 193. (in Chinese)
- 117 汪庭满, 张小栓, 陈炜, 等. 基于无线射频识别技术的罗非鱼冷链物流温度监控系统[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 141 – 146.
- WANG Tingman, ZHANG Xiaoshuan, CHEN Wei, et al. RFID-based temperature monitoring system of frozen and chilled tilapia in cold chain logistics [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 141 – 146. (in Chinese)