

DOI: 10.19788/j.issn.2096-6369.210201

中国农业智能传感器的应用、问题与发展

颜瑞¹ 王震¹ 李言浩¹ 李哲敏^{1,2} 李娴^{1*}

(1. 中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081;

2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081)

摘要: 农业智能传感器是智慧农业的关键核心技术之一。本文首先阐述了智能传感器的概念、特征和实现方法, 从而引入了农业智能传感器的构成、发展与应用。根据检测对象的不同, 将农业智能传感器分为生命信息、环境信息和品质安全三大类, 其中, 生命信息智能传感器分为植物和动物生命信息, 环境信息智能传感器分为水体、土壤、畜禽和气象环境信息。从目前农业智能传感器的构成与应用现状可以发现, 当前我国农业智能传感器存在集成化程度较低(模块化方式实现)、农业智能传感器的核心元件(传感器元器件和微控制器)严重依赖进口、智能化程度不高等问题, 应用范围有限。针对上述问题, 分别从农业智能传感器技术中的核心控制器、农业传感器、无线通信网络和配套算法四个方面进行了深入剖析, 其根源在于我国缺乏农业专用的核心控制器、自主研发的高端农业传感器少、缺乏农业适用的无线通信网络协议及高精度的智能传感器算法。针对以上问题, 分别从研发中国“农业芯”和高性能MEMS传感器、构建农业专用无线网络和开发高性能智能算法方面提出可行对策, 将有助于推进农业智能传感器的中国智造进程。在智慧农业快速发展的当下, 农业智能传感器的中国智造之举至关重要。

关键词: 农业智能传感器; MEMS传感器; 智能算法; 无线通信; 微控制器; 科学数据采集

中图分类号: TP212.6

文献标识码: A

文章编号: 2096-6369 (2021) 02-0003-13

引用格式: 颜瑞,王震,李言浩,等. 中国农业智能传感器的应用、问题与发展[J]. 农业大数据学报,2021,03(02):3-15.

Yan Rui, Wang Zhen, Li Yanhao, et al. The Application, Problems and Development of China's Agricultural Smart Sensors[J]. Journal of Agricultural Big Data, 2021, 03(02): 3-15.

The Application, Problems and Development of China's Agricultural Smart Sensors

Yan Rui¹ Wang Zhen¹ Li Yanhao¹ Li Zhemin^{1,2} Li Xian^{1*}

(1. Institute of Agricultural Information, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Agricultural smart sensors are among the key technologies of intelligent agriculture. This paper describes the concept, characteristics, and implementation methods of smart sensors and introduces the composition, development, and application of agricultural smart sensors. The agricultural smart sensors were classified into three categories,

收稿日期: 2021-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(U19A2070), 中国农业科学院重大产出科研选题项目(CAAS-ZDXT2019002), 中国农业科学院创新工程项目(CAAS-ASTIP-2016-AII-02)

第一作者简介: 颜瑞,男,硕士研究生,研究方向:农业智能传感器及信息技术;E-mail: yanrui_98@163.com

通讯作者: 李娴,女,博士,副研究员,研究方向:农业智能传感器及信息技术;E-mail: lixian@caas.cn

based on the type of information they detect: life information, environmental information, and quality and safety sensors. The life information smart sensors detect plant and animal life information, and the environmental information smart sensors detect information about water, soil, livestock and poultry, and meteorological events. Currently, the application of agricultural smart sensors in China faces several problems. These include a low degree of integration (modular implementation), a heavy reliance on imports for the core components of agricultural smart sensors (sensor components and microcontroller), a low degree of intelligence, and limited application scope. The root causes of these problems mainly lie in the lack of core controllers dedicated to agriculture, the lack of self-developed high-end agricultural sensors, and the lack of dedicated wireless communication network protocols and high-precision smart sensor algorithms. The paper proposes some feasible countermeasures, such as manufacturing China's "agricultural core" and high-performance MEMS sensors, constructing special agricultural wireless networks, and developing high-performance smart algorithms. If implemented, these countermeasures will help promote the intelligent manufacturing of agricultural smart sensors in China. With the rapid development of smart agriculture, China's smart manufacturing of agricultural smart sensors is crucial.

Keywords: agricultural smart sensor; MEMS based sensor; intelligent algorithm; wireless communication; microcontroller; scientific data acquisition

1 引言

发展数字经济建设,建设数字强国,是国家重要的发展战略。2020年中国的数字经济总量达到39.2万亿,占GDP比重38.6%,其中,农业、工业、服务业数字经济渗透率分别为8.9%、21.0%、40.7%^[1],且农业产业数字经济增速相较于2019年增长仅0.7个百分点,分别小于工业和服务业的1.6和2.9个百分点。农业产业数字经济发展明显落后于工业和服务业,因此,加快传统农业向数字化农业转型对我国数字经济发展有重要意义。“十四五”规划指出推进产业数字化转型,要加快发展智慧农业,聚焦传感器、高端芯片等关键领域。2021年“中央一号文件”也特别指出要发展智慧农业,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。智慧农业也是满足不断增长人口对农产品高需求的重要内容^[2]。因此,作为发展智慧农业和建立农业农村大数据体系的关键技术,农业智能传感器是实现农业产业数字化技术领域的制高点^[3],是国家在国际前沿高科技技术领域竞争的重要环节。目前农业智能传感器领域仍面临企业技术创新能力不足、关键技术缺失、国际竞争力不足、产业生态不健全等诸多问题^[4]。随着智慧农业的快速发展和对农业智能传感器需求的日益增长,农业智能传感器的中国智造发展已不容迟缓。

2 农业智能传感器的概念和特征

20世纪70年代末,美国宇航局将传感器与微处理器结合在一起,智能传感器由此诞生。传感器与微处理器的有机结合,使传感器具备信息采集和信息处理功能,呈现出初级智能化的特征。随后,通信技术和半导体技术的发展,智能传感器加载通信芯片、驱动程序和软件算法构成多元件集成电路,实现智能传感器的信息交换和存储等功能,推动智能传感器由最初数字化阶段发展到智能化应用和网络阶段(图1)^[5-7]。

同传统的传感器相比,智能传感器的智能化特征表现为^[8-11]:

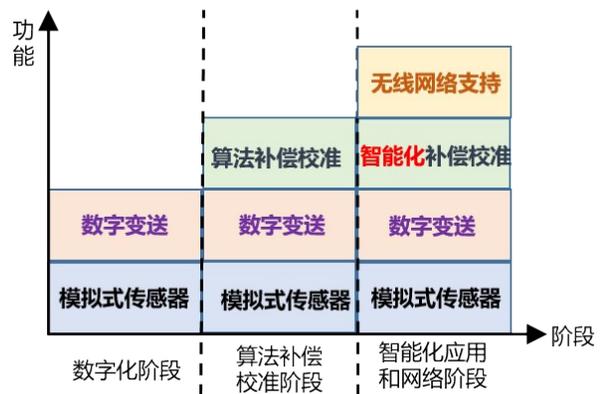


图1 智能传感器的发展历程

Fig.1 The development history of smart sensors

1) 自校准/诊断:自动校正整体系统的非线性误差,保证智能传感器高精度传感;

2) 自补偿:环境参数改变导致传感器产生基线漂移,实时根据测量参数变化改换量程,自我检验、分析、判断采集数据可用性,保证智能传感器传感高稳定性和高可靠性;

3) 自降噪:通过运行设定多数据融合算法消除传感噪声,提高多参数下多单一参数测量的分辨率,保证智能传感器传感的高分辨率;

4) 自决策:根据测量环境和能耗情况调节数据采集和传输速度,保证智能传感器低能耗、高效采集和传输数据;

5) 高性价比:采用廉价的集成电路工艺和强大的程序算法实现高性能,保证智能传感器高性价比。

智能传感器的实现途径有三种:

1) 模块化(非集成式):将传感器、信号调理电路和带总线接口的微处理器组合而成;

2) 集成化:采用微机械加工(MEMS)和大规模

集成电路组合成一个整体,基于MEMS技术集成的农业传感器通常具有小尺寸、低功耗的特点,还具有数据记录的功能,是实现农业传感器智能化的有效途径^[12];

3) 混合式:根据需要,将系统各个环节,以不同组合方式集成在数块芯片上,并封装在一个外壳中。

3 农业智能传感器的构成、发展与应用

作为信息化时代感知层的关键技术,智能传感器在农业领域的应用范围十分广阔。农业生产环境复杂,多目标监测需求下,通常需要多个传感器单元,高度智能化下控制单元具备对传感器数据进行数字转换、数据处理、数据存储等功能,通信单元作为农业智能传感器与外界通信的接口,负责与外部网络的信息交互(图2)。在智慧农业背景下,配套的智能算法更是实现农业传感器智能化的关键^[13-16]。

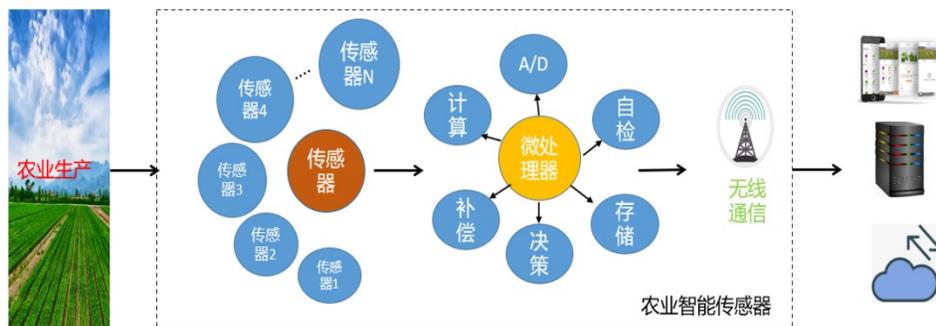


图2 农业智能传感器的基本结构

Fig.2 Basic structure of agricultural smart sensor

农业生产具有多样性,应用于农业领域的智能传感器逐渐发展形成一个种类繁多的技术领域。根据农业智能传感器检测对象的不同,大致分为生命信息智能传感器技术、环境信息智能传感器技术、以及新兴的食品品质与安全智能传感技术^[17]。

生命信息智能传感技术是指对动植物生长过程中的生长信息和生理信息进行感知的智能传感技术^[17]。植物生长信息和生理信息的检测传感器主要包括植物茎秆直径^[18]、植物径流^[19]、植物叶片叶绿素含量^[20]、植物叶片厚度^[21]、植物归一化植被指数^[22]等智能传感器。动物生命信息的检测传感器主要包括动物行为^[23]、呼吸^[24]、脉象^[25]、体温^[26]等智能传感器。

环境信息智能传感器技术是指对动植物生存所需的环境要素进行监测的智能传感技术^[18]。环境信息智能传感器主要包括土壤类^[27]、气象类^[28]、水体类^[29]、畜禽类^[30]等智能传感器。土壤类智能传感器应用于土壤温湿度、电导率、酸碱度、氮磷钾养分、农药含量等监测。气象类智能传感器应用于环境温度、湿度、氧气浓度、二氧化碳浓度、氨气浓度、光照度等监测。水体类智能传感器应用于水产养殖水体温度、酸碱度、溶解氧、电导率、浊度等监测。低成本、小型化、高精度、多参数、寿命长以及集成感知的环境信息智能传感器是目前环境信息智能传感技术的研究重点^[18]。畜禽类智能传感器应用于畜禽养殖环境中温

度、湿度、氨气、硫化氢、二氧化碳、二氧化硫、光照等环境参数的监测与调控。

农产品品质与安全智能传感技术是指对新鲜果蔬、果汁、食品、农副产品等品质与安全监测的智能传感技术,主要包括嗅觉、味觉、视觉、听觉等智能传感技术^[31]。嗅觉智能传感技术应用于新鲜果蔬品质的成熟度、新鲜度、腐败度等无损检测。味觉智能传感技术应用于果蔬汁制品味道、成分、添加剂等监测。视觉智能传感技术应用于农产品分级、外部品质、受损情况等监测。听觉智能传感技术应用于果蔬内部品质缺陷、水果硬度等监测。

3.1 生命信息智能传感器

3.1.1 植物生理信息智能传感器

植物的含水率、叶绿素、植物径流、植物叶片厚度、植物茎秆直径等代表植物生长和生理信息,其检测/监测有助于获取植物的生长和生理状态,对植物的生长进行评价,为农业生产管理提供科学依据和指导建议。

目前对植物生长和生理信息采集主要采用的是基于光学的智能传感器技术。如杨彪^[32]等人采用光学传感器配合STC12C5A60S2单片机,研发出植物叶片叶绿素含量检测仪,具有便携、无损测量、可视化、测量误差小的优点,测量响应时间小于2s。史增芳^[33]等人以近红外光谱分析技术为基础,采用AT89C52作为控制核心,使用TCL7135实现模数转换功能,设计出便携式的玉米叶片含水率检测仪,测量误差小于0.2%,装置体积小、测量精度高和稳定性好。刘九庆^[34]等人利用压力传感器和单片机实现对植物叶片厚度信息的无损自动测量,测量最大相对误差0.42%,所构建的仪器具有可视化、自动化测量、高精度、人机交互等智能化特点。浙江大学智能生物产业装备创新团队采用自主研发可穿戴的柔性植物径流传感器,结合无线通信模块,实现对植物径流的无损在线实时监测^[35]。智能传感器技术更是实现无土栽培监控系统的关键,温、湿度、光强、PH值、营养液浓度、二氧化碳传感器等集成,加载无线传感器网络和智能算法便可实现,便于使研究者获取无土栽培关键参数^[36]

3.1.2 动物生命信息智能传感器

对动物的体温、行为、呼吸、血压等动物生长和生理信息的监测,有助于对动物生长发育状态做出客观

评价,尤其是识别动物的特殊状态(如患病症状),可及时采取有效应对措施来降低损失。现代智能传感器具有效率高和低成本的优势,相较于传统的人工观察,对现代大规模养殖工厂更具有应用价值。

Shayan Sharif等智慧畜禽管理的关键在于智能传感器、农场管理自动化进程和数据驱动的决策平台,其中,智能传感器实时收集多目标畜禽操作参数,也是智慧畜禽管理的核心环节,智慧畜禽管理系统的使用有助于有效预防畜禽疾病,同时为消费者提供透明的肉类产品生产过程^[37]。Luis Nobrega等介绍了SheepIT项目,采用加速度计、无线传感器网络、连接于云的计算平台用于检测羊的各种姿态,采用机器学习的方法对羊的吃、移动、跑、站立等姿态识别准确率达91.78%,该系统还可应用于其他畜禽姿态监测^[38]。山东农业大学研究人员^[39]利用微控制器、无线通信模块和振动、姿态、温度传感器设计出一套监测奶牛发情行为的智能传感器,用来监测奶牛行走步数、静卧时间、行走时间和体表温度,建立上述四个参数与奶牛发情概率的学习向量量化神经网络模型,可以准确快速的判断出奶牛是否处于发情状态和预测奶牛发情日期。南京农业大学^[40]采用红外线、水流量、射频识别传感器,STM32微控制器和ZigBee无线通信模块设计出监测母猪饮水行为的智能传感器及管理信息系统,实现群养母猪饮水频率监测准确率100%,还具有实时远程监测功能。浦雪峰^[41]等人采用图像传感器、三星S3C2410、通用无线分组业务无线通信模块设计出监控群养猪行为的智能传感器,实现疑似患病病猪的自动识别。刘飞龙^[42]采用加速度传感器MPU6050模块、微控制器、GPRS无线数据通信模块,研发出监测识别羊群牧食行为的智能传感器,结合多层前馈神经网络算法,对羊群牧食行为的平均识别率高达88.05%。

3.2 环境信息智能传感器

3.2.1 水体环境类智能传感器

监测溶解氧、温度、酸碱度、盐度、电导率、氨氮等水体环境重要因子,有利于对水产养殖提供科学指导和提升水产养殖的水质,从而降低水产养殖成本、提高水产养殖产量,增加水产养殖经济效益。水产养殖智能化是农业数字经济的重要一环。

杜剑锋^[43]采用温度、酸碱度、溶解氧、电导率以及浊度传感器、STM32C8T6微控制器、ZigBee和

ESP8266无线通信模块构建低功耗的水质监测智能传感器,并建立水产养殖水质在线监测系统,提高了养殖效率同时节约了人力,促使科学水产养殖进一步智能化。上海海洋大学研究人员^[44]集合水体盐度、酸碱度、氨氮、温度和溶解氧传感器,MSP430F149单片机和LoRa无线通信模块,研发出一款可视化水产养殖水质智能传感器,其所测水体溶解氧含量绝对误差小于0.12mg/L,温度绝对误差小于0.05°C,PH值绝对误差小于0.017,盐度绝对误差小于0.001%。金光^[45]等人针对在海岛环境中水产养殖的特殊性,采用电压、电流、浊度、PH值、水位、水温传感器,Arduino单片机和SX1276 LoRa射频模块,研制出一款监测海岛水产养殖水质的智能传感器,采用无线通信将智能传感器采集数据传输至服务器,在终端平台实现实时监测海岛养殖水质情况,具备低功耗、低成本、实用性强、网络覆盖范围广、数据可视化的优势。Lorena Parra^[46]等人采用温度、浊度、电导率、油层传感器、Arduino Mega2560微控制器和ESP8266无线通信模块,研制出监测鱼类养殖的智能传感器,成本低于90欧元,通过网页即可实时监测水质和鱼类行为。

3.2.2 土壤环境类智能传感器

农田土壤环境数据采集和研究是农业领域重点研究方向^[47]。靠人工的传统农田土壤数据采集方法耗时耗力,大规模种植的现代化农场,更需要发展多功能的土壤环境数据的智能传感器,可有助于提高农作物产量、改善土壤品质、防控农业面源污染具有重要的研究意义,同时也可助力于建设高标准农田。

薛飞^[48]采用温湿度、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)位置传感器、STM32F103ZET6微控制器和华为MG323 GPRS无线通信模块,实时采集土壤的位置信息和温湿度信息,通过GPRS将采集的土壤信息传送到上位机中解析,并在MySQL数据库中存储。田二林^[49]等人采用温度、湿度、PH传感器、TMS320C5545DSP控制核心和GPRS无线通信模块,监测土壤环境信息,与专用仪器测试结果对比验证了高精度和稳定性。华中农业大学的研究人员^[50]采用土壤水分、霍尔、超声波传感器,STM32微控制器,SIM900A GPRS无线通信模块,研发出移动式智能传感器,采用自走式循环轮检对西瓜土壤信息进行检测,提高了土壤信息采集效率。高凯凯^[51]采用温湿度和PH值传感器,土壤养分速测仪,Android和STM32F103微控制器,LoRa和ZigBee无线通信模

块,针对耕地面积大小采用不同智能传感器对土壤参数进行测量,分析测量结果后配置土壤营养配方,实现对耕地土壤科学施肥和精准施肥。Yang L^[52]等采用湿度、温度、PH值、EC传感器,低功耗数字处理器和远距离无线电(Long Range Radio, LoRa)通信模块,结合深度置信网络(Deep Belief Network, DBN)模型可以准确预测6种农药或化肥品种,准确率高达98.5%。

3.2.3 畜禽环境类智能传感器

对养殖环境中温度、湿度、氨气、硫化氢、二氧化碳、二氧化硫、光照等环境参数的监测与调控,有助于为畜禽提供适宜的生产环境,保证畜禽安全、畜牧环保和畜禽产品质量安全等问题,是现代规模化畜禽养殖的重要技术支撑^[53]。同时,畜禽生长过程中产生的甲烷、甲醇和二氧化碳等,对生态环境也具有一定威胁^[54]。

Lin Tao^[55]等在综述论文中提出,各种家禽生产环境的实时监测系统对于精准畜牧师非常有价值的,低成本、轻量化、模块化和可移植性好的传感器研究意义重大。Pereira WF等^[56]采用模块化的方法构建了基于DHT22温湿度传感器、MQ-137电化学氨气传感器(郑州炜盛)、配置有无线传输功能的Wemos Mini D1主控制器(中国, Sunlephant)的低成本监测系统,来实现家禽养殖环境数据的收集、分析与传输,并在手机终端可远程获取养殖环境数据。河北农业大学李帅^[57]等采用模块化方法构建了畜禽养殖远程监测系统,采用了SHT30温湿度传感器(瑞士 Sensirion)、MH-Z19B型二氧化碳传感器(郑州炜盛)、电化学氨气和硫化氢传感器(日本 Nemoto)、以及激光SDS011PM_{2.5}/PM₁₀激光传感器来获取畜禽环境,并选用了STM32L0微控制器、LoRa通信模块(AI-thinker Ra-02射频模块和SX127通信模块)、GPRS模块等共同构建实现,最终实现对鸡舍环境的实时远程监测,有助于为鸡舍生产管理提供技术支撑。梁圆媛^[58]则选择STC89C单片机、温度传感器(美国 SALLAS)、MQ-2烟雾传感器(郑州炜盛)和ADC0809转换器来获取畜禽环境的温度和烟雾浓度,当温度和烟雾浓度参数超出预设范围,系统将自动识别并报警。Wang Xuhai^[59]等以STM32F103为主控制器,配置了MQ135空气污染传感器(郑州炜盛)监测二氧化硫和氨气、以及湿度传感器DHT11(广州奥松)和温度传感器DS18B20(美国 SALLAS)来实时监测牛舍环境

情况,同时还研发了空气提纯盒(气泵、压缩机、加热板和风扇)来调控牛舍环境来保证牛的健康生长、繁殖和育肥。

3.2.4 气象环境类智能传感器

对二氧化碳浓度、氧气浓度、氨气浓度、光照、温度、湿度等气象环境信息的监测,有助于调控改善农作物和动物生长环境,而氨气、二氧化碳、氧化亚氮、甲烷等农业污染气体的监测,有助于促进农业生态可持续发展。设施农业更需要实时监测温室大棚内气象环境信息,来维持最适宜农作物生长的环境^[60]。

吉林大学研究人员^[61]采用S300红外二氧化碳、光照度和温、湿度传感器,STM32F103R微控制器,NR24L0无线通信模块,研发出温室环境信息智能传感器,智能传感器将数据上传至基于LabVIEW设计的上位机终端,即可实时监测温室大棚内的环境信息。李小平^[62]等人采用光照强度、空气温湿度、二氧化碳、土壤水分和PH值传感器,C8051F350微控制器和ZigBee无线通信模块,研发出一款用于农田生产环境信息监测的智能传感器,智能传感器将农田生产环境信息通过ZigBee模块传回到监控平台,实现对农田生产环境信息的监测、存储、分析等操作,具有低成本和通用性的优点。刘映江^[63]采用土壤温湿度、光照、土壤电导率、PH值和空气温室度传感器,EFM32G222F128微控制器和LoRa无线通信模块,也设计出监测农田环境信息的智能传感器。Lakhia A等人^[64]采用酸碱度、电化学传感器、光照度、湿度、二氧化碳、水位、定时器传感器,Arduino微控制器及WRTnode无线通信模块,研发出监测气雾栽培环境信息的智能传感器,减少了气雾栽培中人工监视和控制过程的复杂度,提高了气雾栽培的可靠性和可用性,为植物学家提供植物生长与营养参数和生长环境相关联的信息。我们团队针对施加氮肥后的氨损失现象,基于新型纳米技术构建了聚合物/二维材料复合薄膜氨气传感器,该传感器具有小尺寸、低成本和高性能的优点,相比于传统检测技术具有良好的可靠性,借助无线传感器网络 and 智能算法有实时获取氨气损失浓度^[65]。

3.3 农产品品质与安全监测智能传感器

农产品品质检测对产品分级、溯源和维护食品安全有重要意义。模拟人类感官的电子鼻、电子舌、光谱、声波等技术可有效检测农产品品质和安全,尤其

在食品安全愈发重视的当下,相比于以上传统农业智能传感器,这类新兴智能传感器技术发展潜力巨大。

任敏^[66]等人使用PEN3电子鼻(Airsense,德国)和SA402B电子舌传感器(Insent,日本),对191株不同乳酸乳球菌制备的发酵乳进行感官研究,分析不同产酸和蛋白水解程度的菌株对发酵乳风味品质的影响,为开发不同风味的发酵乳提供了新方向。杨晨昱^[67]等人采用近红外光谱(Bruker Optics,德国)和PEN3电子鼻(Airsense,德国)对苹果品质进行无损检测,建立神经网络模型对苹果霉心病的判别正确率达到了87.7%,为苹果品质判别和分级提供依据。王彬^[68]采用FOX4000电子鼻(AlphaMOS,法国)采集不同品种和产地鸡蛋挥发性物质响应数据,并建立鉴别模型来实现鸡蛋产地和品种判别,准确率分别达98.36%和97.65%;而采用USB2000+光纤光谱仪传感器采集数据所鉴别的产地和品种预测准确率97%和97.78%,这表明低成本电子鼻产品相比于传统昂贵大体积光谱设备,具有更好的检测效果。王永瑞^[69]等人采用PEN3.5电子鼻(Airsense,德国)来辨别真假烤羊肉,通过对5组掺入烤鸭肉样品释放的挥发性风味物质检测发现,掺假样品具有极显著挥发性风味物质,该方法比传统方法的评价更准确、高效、客观,为烤羊肉品质检测提供了高效的鉴别方法。我们团队也开展苹果风味品质方面的研究,在富士苹果香气物质和成熟因子乙烯的显著相关性基础上,研制了基于新型纳米材料的乙烯传感器,联合苹果可溶性固形物来快速鉴定苹果品质^[70]。

3.4 综合评述

以上不同应用场景中的农业智能传感器,相比于传统检测技术,具有节约人力、降低成本和提高效率等优势,部分传感器还具有实时动态监测的性能,这为数字农业的大数据分析提供了基础数据。农业智能传感器也成为目前智慧农业感知层技术研究的热门方向。但是总体来看,我国农业智能传感器研究还存在诸多问题:1)农业智能传感器实现方式还处于初级阶段,多数文献采用将工业级传感器、微控制器、无线通信以模块组成方式实现,应用成本较高,传感器尺寸较大,不利于在智慧农业物联网中大规模应用于农业生产;2)农业智能传感器的生产和应用没有统一的技术标准;3)农业传感器在抗干扰、能耗和信息安全^[71]等方面还存在问题,还无法完全具备智能传感

器的特征,同时对复杂农业环境的适用性不足,且目前多局限于基础研究;4)传感器高端核心技术基本靠进口,拥有自主知识产权的传感器产品少,应用于农产品品质和安全监测方面智能传感器的研究较少;5)基于MEMS技术的农业智能传感器研发极少。

4 中国农业智能传感器技术存在的问题

中国智慧农业发展起步晚于西方农业发达国家,中国农业智能传感器技术在农业专用芯片、硬件集成度、传感器算法、制造成本、技术生态、数据通信安全、无线网络功耗、应用推广、高端农业传感器、技术创新、使用寿命、抗干扰等多个方面存在问题。具体如下:

4.1 核心微控制器方面

农业智能传感器中,核心微控制器负责传感器信号转换、数据处理及存储。本文检索文献中,仅有9%研究报道采用国产微控制器。近两年受国外发达国家对中国高端科技的封锁与新冠疫情的影响,芯片价格暴涨。以国外ST公司STM32F103RCT6微控制器为例,2021年6月相比于2020年1月价格增幅达479%。微控制器价格巨幅上涨,不仅增加农业智能传感器生产成本,同时还间接增大了农业生产成本,对于中国农业信息安全也是隐患。国产芯片研发起步较晚,目前国产芯片企业聚焦于消费、桌面级、手机终端、汽车等领域,尚无专门研发“农业芯”的芯片企业。农业智能传感器一般需要集成多种类型传感器,这就要求“农业芯”具有较多的通信资源和计算资源,从而满足终端农业大数据处理需求。同时,国产芯片的配套设计软件、编译软件发展落后,质量低于国外产品,还不具有良性循环的技术生态。国产芯片的可靠性和稳定性还需经历考验,而后实现大规模应用。

4.2 农业传感器方面

目前,我国使用的中、高质量传感元器件几乎100%进口国外产品,90%传感器芯片来自于国外品牌^[72]。国产传感器企业以仿制或组装国外同类产品居多、自主研发创新少,导致核心技术积累不足,落后于发达国家。以基于MEMS技术主流传感器芯片为例,研发成本耗费高,具有规模化的专业科研团队至

少近十年的技术积累,才可能研发成功并面向市场应用。小型国产传感器企业难以投入如此大的时间、人力成本来研发。国内高端传感器生产制造设备主要靠进口,不具有高端核心制造技术的知识产权。中低端国产传感器器件在使用寿命、可靠性、性能指标上远低于国外成熟产品。国产企业产品较单一,系列产品较少;中国高校和科研院所所在传感器前沿领域研发能力逐年提升,发明专利数量可观,但大部分成果以原理性样品居多,距离产业化大规模运用还有一定距离。国内传感器企业目前以面向工业、消费、汽车电子、手机等领域的传感器研发制造为主,农业领域专用传感器研发较少。因此,面对农业复杂环境下的微/小型、强可靠性、低功耗、低成本、长寿命的国产新型农业传感器十分缺乏,这直接影响国产农业智能传感器研发进程。现以工业传感器为基础元器件的国产农业智能传感器,集成化程度受限,难以满足现代智慧农业对农业智能传感器技术的高性能检测需求,也不利于充分发挥农业大数据的服务价值。

4.3 无线通信技术方面

利用无线通信技术进行数据传输,实现实时在线监控、大数据分析、存储和共享功能,是智能传感器的特点之一。面对农业复杂环境和农业生产管理监测需求,单一农业智能传感器需借助无线传感网络才能凸显其优越性。无线传感网络受限于无线信道的物理特性,高山、树木、建筑物、障碍物等地形地势以及自然界风雨雷电均对其产生影响。同时,受传感器能耗影响和无线通信距离要求限制,传输数据有限。目前,尚没有针对农业领域的无线通信协议标准,不同的农业智能传感器由于通信问题可能无法实现在同一无线网络下共同工作,传感节点的自组织能力不足,无线通信技术的通用性待提高。此外,无线传感网络相比有线传输更容易被监听、入侵、破坏,安全性、抗干扰能力较差。面对农业大规模应用及无人值守工作条件,传感节点的通信维护是个难题。

4.4 传感器数据处理和应用方面

农业智能传感器一般需要实现多对象检测,还包括农业生产的环境因子监测。农业温湿度环境复杂多变,引发传感器采集数据误差和精度低,往往导致传感器测得的数据不可用。数据处理受限于农业智

能传感器节点功耗和芯片资源限制,所采用的多传感器融合算法较简单,对数据精度的提高范围有限。针对大规模、多组分农业智能传感器节点的海量数据处理算法,目前发展还不成熟。数据的利用仅实现了简单的可视化,并没有与农业大数据技术、专家系统、农业决策支持系统、农业信息服务系统等农业信息技术相结合形成闭环,无法快速、高效地转化为农业生产力。同时,农业数据的共享和交易服务相比于国外发达国家缺失,实现农业大数据的最大化利用。

5 解决措施和建议

5.1 积极推动研发“农业芯”

鼓励具有高端核心农业芯片制造技术知识产权的高科技企业和半导体芯片企业,面向市场需求结合自身技术积累,积极自主研发低成本、高可靠性、高稳定性的农业芯片;引导农业科技人员使用国产芯片,并辅以适当奖励和支持;鼓励高校、研究所和企业的IT从业人员研发“农业芯”的软件、算法、驱动程序等配套技术,促进形成良好技术生态环境;完善农业芯片科研成果转化机制,从而减少对国外产品的依赖。

5.2 研发高性能农业传感器

促进农学、纳米材料、微电子、通信等学科的交叉融合,加强农业传感器的研发力量。推动高校和科研院所传感器研究团队从基础研究向应用研究转化,并将前沿纳米材料、薄膜制备技术和MEMs技术应用于农业智能传感器实现,自主研发具备微小型、低成本、寿命长、低功耗等性能的新型农业智能传感器,真正将科技论文正在写在祖国土地上;同时加强农业科研队伍、高校和传感器企业的合作,积极转化科研成果,完善科研成果转化机制,面向农业市场需求展开产学研结合,同时加强对国内传感器行业企业的支持力度。在高性能传感器研发上,推动基于MEMs工艺的高集成度农业智能传感器的自主研发,降低价格成本的同时推动农业智能传感器的大范围推广应用,形成从研发到生产的完善产业链。加快应用于农产品品质监测的新型高端传感器技术研发,为食品安全助力护航。

5.3 构建农业专用无线传感网络

农业4.0阶段为无线传感器网络提出了更高要求,保证传感器海量数据长距离传输的同时还需要具有低成本、低能耗和无线电接口的通用性^[73]。加快偏远地区5G基站等通信基础设施建设,尽早完成全国各地通信网络全覆盖。鼓励企业研发具有自主知识产权的无线传感网络操作系统,开发具有低成本、低功耗、高精度优势的无线传感网络时间同步算法^[74-75]。自主研发构建具有低成本、低成本、通用性、信息安全、实时性、智能性等功能的农业专用无线传感网络。建立统一的农业无线传感网络通信协议标准,使不同农业智能传感器具备在同一无线通信网络下共同工作的能力。积极探索区块链技术在农业通信安全领域的大规模运用。针对信息安全问题出台相应政策维护国家农业信息安全,完善农业信息安全相关法律。

5.4 开发高精度传感器智能算法

基于不同应用情境,传感器算法的实现可采取两种应用形式:一是内嵌于农业智能传感器微控制器中的数据处理的算法,近处理该农业智能传感器所采集的数据^[76-77]。二是布置在后台服务器的传感器算法,该算法可处理智慧农业物联网中多农业智能传感器节点上传的大量数据。因此,研发高性能传感器数据算法也有两种途径:1)研发针对单一传感器节点的资源需求少、能耗低的多数据融合高精度处理算法。2)探索人工智能算法^[78]、区块链技术^[79]、大数据技术、机器学习技术^[80]在海量农业智能传感器数据处理领域的运用(图3)。此外,积极开展传感器数据与农业专家系统、决策系统、信息服务系统等农业信息技术融合互通,汇聚农业生产力,为农业生产提供精准科学指导和生产管理依据。构建全国农业数据共享平台,建立数据交易体系,完善促进对农业大数据的共享使用机制。

6 总结与展望

面向智慧农业及农业大数据对农业智能传感器的紧迫需求,本文在智能传感器定义、特征及实现形式的基础上分析了中国农业智能传感器的发展和应用,分别从植物、动物、环境、水体、食品品质等不同方面对农业智能传感器的实现方式和效果进行了介绍。分析发现,我国目前农业智能传感器多采用模块化(非集成化)方式实现,集成化程度偏低,尚不具备智能传感器的四自特征和低成本高性能,进口产品依赖

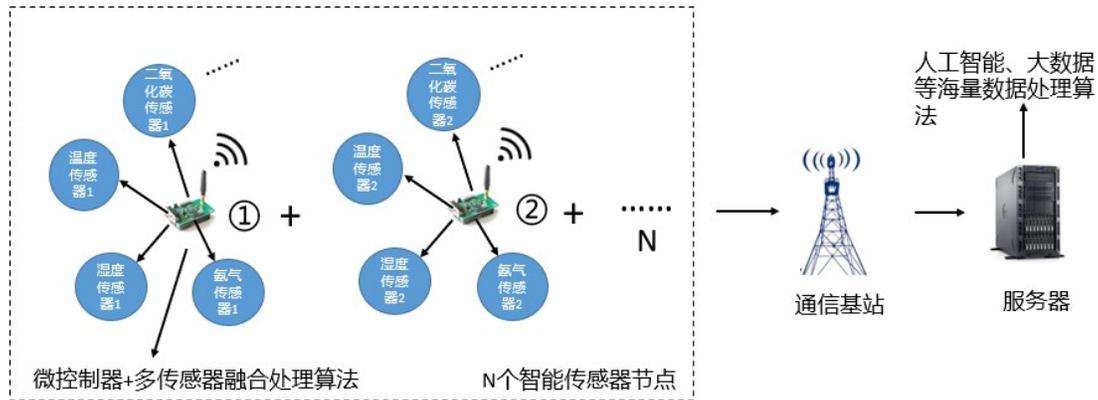


图3 传感器算法应用模式

Fig.3 Sensor algorithm application mode

严重,农业智能传感器发展滞后的根本原因在于缺乏适用于农业复杂环境场景的“农业芯”和具有高集成化程度的高性能传感器元器件,同时无线通信和智能算法方面的发展也不完备。最后,分别从芯片、传感器、无线传输网络和智能算法方面对我国农业智能传感器的发展提出了对策和建议。

未来,在推动乡村振兴与农业现代化的进程中,以农业智能传感器及相关技术为支撑,一是有助于实现农业生产的低成本快速检测和连续监测,提高农业生产的实时反馈能力,同时在智慧农业物联网中与农业大数据技术、专家系统、农业决策支持系统、农业信息服务系统等农业信息技术相结合形成闭环,快速、高效地提升农业生产力,进而助力农业产业提升;二是有助于农业生产、生态环境的监测与管控,从源头上助力农业面源污染治理,减少农业生产中的污染排放,以科技的力量支撑碳达峰碳中和,构建农业农村碳中和监测体系,为农业减排固碳、农业生物质能源、草地固碳增汇、畜禽粪污染资源化利用提供数据支撑,提升农业可持续发展能力,助力农村生态环境和乡村环境改善;三是有助于农民增收,在智慧农业的发展与推动下,农业智能传感器技术有利于农业生产效率提升、农业生产成本降低和农产品品质分选提升,助力实现农业增效农民增收。因此,在智慧农业快速发展的当下,农业智能传感器的中国智造之举至关重要。

参考文献

[1] 中国信通院. 中国数字经济发展白皮书(2020)[R]. 北京: 中国信通院, 2020: 3-4.

China Academy of Information and Communications Technology. White Paper on China's Digital Economy Development (2020) [R]. Beijing: China Academy of Information and Communications Technology, 2020: 3-4.

[2] Kassim M R M. IoT Applications in Smart Agriculture: Issues and Challenges[C]//2020 IEEE Conference on Open Systems (ICOS). IEEE, 2020: 19-24.

[3] Johnson N, Kumar M B S, Dhannia T. A study on the significance of smart IoT sensors and Data science in Digital agriculture[C]//2020 Advanced Computing and Communication Technologies for High Performance Applications (ACCTH-PA). IEEE, 2020: 80-88.

[4] 中国电子技术标准化研究院. 智能传感器型谱体系与发展战略白皮书[R/OL]. [2021-01-20]. [http:// www. cesi. cn/ 201908/5426.html](http://www.cesi.cn/201908/5426.html).

China Institute of Electronic Technology Standardization. Intelligent sensor spectrum system and development strategy white paper [R/OL]. [2021-01-20]. [http:// www. cesi. cn/ 201908/5426.html](http://www.cesi.cn/201908/5426.html).

[5] Hauptmann P R. Selected examples of intelligent (micro) sensor systems: state-of-the-art and tendencies[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(3): 459.

[6] Yurish S Y. Sensors: smart vs. intelligent[J]. Sensors & transducers, 2010, 114(3): 1.

[7] Taymanov R, Sapozhnikova K. What makes sensor devices and microsystems “intelligent” or “smart”?[M]//Smart Sensors and MEMs. Woodhead Publishing, 2018: 1-22.

[8] 刘军华, 汤晓君, 张勇, 等. 智能传感器系统[M]. 第2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010.

Liu J H, Tang Xiaojun, Zhang Yong, etc. Intelligent sensor system [M]. 2nd edition. Xi'an: Xidian University Press, 2010.

- [9] Li D, Wang Y, Wang J, et al. Recent advances in sensor fault diagnosis: A review[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020: 111990.
- [10] Rymarczyk T, Król K, Zawadzki A, et al. An intelligent sensor platform with an open architecture for monitoring and controlling cyber-physical[J].
- [11] Boltryk P J, Harris C J, White N M. Intelligent sensors—a generic software approach[C]//*Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2005, 15(1): 026.
- [12] Singh N, Singh A N. Odysseys of agriculture sensors: Current challenges and forthcoming prospects[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 171: 105328.
- [13] Pathan M, Patel N, Yagnik H, et al. Artificial cognition for applications in smart agriculture: A comprehensive review [J]. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2020.
- [14] Basnet B, Bang J. The state-of-the-art of knowledge-intensive agriculture: A review on applied sensing systems and data analytics[J]. *Journal of Sensors*, 2018, 2018.
- [15] Yang L, Sarath Babu V, Zou J, et al. The development of an intelligent monitoring system for agricultural inputs basing on DBN-SOFTMAX[J]. *Journal of Sensors*, 2018, 2018.
- [16] Channe H, Kothari S, Kadam D. Multidisciplinary model for smart agriculture using internet-of-things (IoT), sensors, cloud-computing, mobile-computing & big-data analysis[J]. *Int. J. Computer Technology & Applications*, 2015, 6(3): 374-382.
- [17] 陈威,郭书普. 中国农业信息化技术发展现状及存在的问题[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(22): 196-205.
Chen W, Guo S P. Development status and existing problems of China's agricultural information technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(22): 196-205.
- [18] 张建华,吴建寨,韩书庆,等. 农业传感器技术研究进展与性能分析[J]. *农业展望*, 2017, 13(01): 38-48.
Zhang J H, Wu J Z, Han S Q, et al. Research progress and performance analysis of agricultural sensor technology[J]. *Agricultural Outlook*, 2017, 13(01): 38-48.
- [19] Baert A, Villez K, Steppe K. Automatic drought stress detection in grapevines without using conventional threshold values[J]. *Plant and soil*, 2013, 369(1): 439-452.
- [20] Schlemmer M, Gitelson A, Schepers J, et al. Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 25: 47-54.
- [21] 李恺,魏晓明,何芬. 基于植物生理检测参数的温室环境控制研究进展[J]. *北方园艺*, 2020(15): 130-137.
Li K, Wei X M, He F. Research progress of greenhouse environment control based on plant physiological parameters [J]. *Northern Horticulture*, 2020(15): 130-137.
- [22] 邱兆美,张昆,毛鹏军. 我国植物生理传感器的研究现状[J]. *农机化研究*, 2013, 35(08): 236-240.
Qiu Z M, Zhang K, Mao P J. Research status of plant physiological sensors in my country [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013, 35(08): 236-240.
- [23] 张小栓,张梦杰,王磊,等. 畜牧养殖穿戴式信息监测技术研究现状与发展分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 1-14.
Zhang X S, Zhang M J, Wang L, et al. Research status and development analysis of wearable information monitoring technology for animal husbandry[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 1-14.
- [24] 王梓乐,汪琳,洪炜,等. 生命探测技术在口岸动物搜检中的应用分析[J]. *检验检疫学刊*, 2017, 27(06): 52-55.
Wang Z L, Wang L, Hong W, et al. Application analysis of life detection technology in port animal search and inspection[J]. *Journal of Inspection and Quarantine*, 2017, 27(06): 52-55.
- [25] Sellier N, Guettier E, Staub C. A review of methods to measure animal body temperature in precision farming[J]. *American Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, 2(2): 74-99.
- [26] 汪开英,赵晓洋,何勇. 畜禽行为及生理信息的无损监测技术研究进展[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(20): 197-209.
Wang K Y, Zhao X Y, He Y. Research progress on non-destructive monitoring technology of livestock and poultry behavior and physiological information[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(20): 197-209.
- [27] Carlos Alberto da Silva Oliveira. Determinação da tensão de água em solo agrícola usando um sensor de dissipação de calor Soil water evaluation in agricultural soil using a heat dissipation sensor[J]. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 1999, 34(8).
- [28] 林兰芬,王瑞松,于鹏华. 基于GIS的农田小气候环境可视监测系统[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(03): 254-260.
Lin L F, Wang R S, Yu P H. GIS-based visual monitoring system for farmland microclimate environment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2015, 46(03): 254-260.
- [29] 胡金有,王靖杰,张小栓,等. 水产养殖信息化关键技术研究现状与趋势[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(07): 251-263.
Hu J Y, Wang J J, Zhang X S, et al. Research status and trends of key technologies for aquaculture informatization [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Ma-*

- chinery, 2015, 46(07): 251-263.
- [30] Aunsa-Ard W, Pobkrut T, Kerdcharoen T, et al. Development of Intelligent Electronic Nose for Livestock Industries [C]//2021 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST). IEEE, 2021: 221-225.
- [31] Lakshmi S, Pandey A K, Ravi N, et al. Non-destructive quality monitoring of fresh fruits and vegetables[J]. Defence Life Science Journal, 2017, 2(2): 103-110.
- [32] 杨彪,杜荣宇,杨玉,等.便携式植物叶片叶绿素含量无损检测仪设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(12):180-186.
Yang B, Du R Y, Yang Y, et al. Design and experiment of a portable non-destructive tester for plant leaf chlorophyll content[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 180-186.
- [33] 史增芳,姜岩蕾.一种便携式玉米叶片含水检测仪器设计[J].农机化研究,2016,38(08):96-100.
Shi Z F, Jiang Y L Design of a portable corn leaf moisture detection instrument[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(08): 96-100.
- [34] 刘九庆,朱福安.应用电感式位移传感器设计的叶片厚度检测仪[J].东北林业大学学报,2018,46(02):84-87.
Liu J Q, Zhu F A. Blade thickness detector designed with inductive displacement sensor[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(02): 84-87.
- [35] Chai Y, Chen C, Luo X, et al. Cohabiting Plant-Wearable Sensor In Situ Monitors Water Transport in Plant[J]. Advanced Science, 2021: 2003642.
- [36] Lakhari I A, Jianmin G, Syed T N, et al. Monitoring and control systems in agriculture using intelligent sensor techniques: A review of the aeroponic system[J]. Journal of Sensors, 2018, 2018.
- [37] Astill J, Dara R A, Fraser E D G, et al. Smart poultry management: Smart sensors, big data, and the internet of things [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 170: 105291.
- [38] Nóbrega L, Gonçalves P, Antunes M, et al. Assessing sheep behavior through low-power microcontrollers in smart agriculture scenarios[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173: 105444.
- [39] 田富洋,王冉冉,刘莫尘,等.基于神经网络的奶牛发情行为辨识与预测研究[J].农业机械学报,2013,44(S1):277-281.
Tian F Y, Wang R R, Liu M C, et al. Research on identification and prediction of estrus behavior of dairy cows based on neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013, 44(S1): 277-281.
- [40] 陆明洲,沈明霞,丁永前,等.群养母猪饮水行为自动监测系统统设计[J].南京农业大学学报,2013,36(05):133-138.
Lu M Z, Shen M X, Ding Y Q, et al. Design of automatic monitoring system for sow drinking behavior in group breeding[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2013, 36(05): 133-138.
- [41] 浦雪峰,朱伟兴,陆晨芳.基于对称像素块识别的病猪行为监测系统[J].计算机工程,2009,35(21):250-252.
Pu X F, Zhu W X, Lu C F. Sick pig behavior monitoring system based on symmetric pixel block recognition [J]. Computer Engineering, 2009, 35(21): 250-252.
- [42] 刘飞龙.放牧羊群牧食行为监测系统研究[D].内蒙古农业大学,2020.
Liu F L. Research on the grazing behavior monitoring system of grazing sheep [D]. Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- [43] 杜剑峰.基于物联网技术的养殖水质监测系统的设计与实现[D].大连海洋大学,2019.
Du J F. Design and implementation of aquaculture water quality monitoring system based on Internet of Things technology [D]. Dalian Ocean University, 2019.
- [44] 刘传领,陈明,池涛.基于LoRa无线通信的水产养殖监测系统设计及应用[J].华南农业大学学报,2020,41(06): 154-160.
Liu C L, Chen M, Chi T. Design and application of aquaculture monitoring system based on LoRa wireless communication [J]. Journal of South China Agricultural University, 2020, 41(06): 154-160.
- [45] 金光,高子航,江先亮,等.基于低功耗广域网的海岛水产养殖环境监测系统研制[J].农业工程学报,2018,34(24): 184-191.
Jin G, Gao Z H, Jiang X L, et al. Development of island aquaculture environmental monitoring system based on low-power wide area network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(24): 184-191.
- [46] Parra L, Sendra S, García L, et al. Design and deployment of low-cost sensors for monitoring the water quality and fish behavior in aquaculture tanks during the feeding process[J]. Sensors, 2018, 18(3): 750.
- [47] García L, Parra L, Jimenez J M, et al. IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture [J]. Sensors, 2020, 20(4): 1042.
- [48] 薛飞.农田土壤信息智能化采集系统的研究[D].南京信息工程大学,2014.
Xue F. Research on Intelligent Collection System of Farmland Soil Information [D]. Nanjing University of Information Science and Technology, 2014.

- [49] 田二林,朱付保,张永霞,等.基于DSP的农田土壤信息采集器的改进设计[J].农机化研究,2020,42(06):216-219.
Tian E L, Zhu F B, Zhang Y X, et al. Improved design of farmland soil information collector based on DSP[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(06): 216-219.
- [50] 刘浩蓬,卫佳,刘金,等.自走式西瓜盆栽土壤信息采集装置设计与试验[J].农业现代化研究,2018,39(02):352-358.
Liu H P, Wei J, Liu J, et al. Design and experiment of a self-propelled watermelon potted soil information collection device[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39 (02): 352-358.
- [51] 高凯凯.基于物联网技术土壤多参数采集与传输系统的研究与实现[D].西安科技大学,2018.
Gao K K. Research and implementation of soil multi-parameter acquisition and transmission system based on Internet of Things technology [D]. Xi'an University of Science and Technology, 2018.
- [52] Yang L, Sarath Babu V, Zou J, et al. The development of an intelligent monitoring system for agricultural inputs basing on DBN-SOFTMAX[J]. Journal of Sensors, 2018, 2018.
- [53] 杨飞云,曾雅琼,冯泽猛,等.畜禽养殖环境调控与智能研制装备技术研究进展[J].中国科学院院刊,2019,34(2): 163-173.
Yang F Y, Zeng Y Q, Feng Z M, et al. Research status on environmental control technologies and intelligent equipment for livestock and poultry production. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019,34(2):163-173.
- [54] C.Alan Rotz . Environmental sustainability of livestock production[J]. Meat and Muscle Biology, 2020, 4(2): 11, 1-18.
- [55] Ren G, Lin T, Ying Y, et al. Agricultural robotics research applicable to poultry production: A review. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 169: 105216.
- [56] Pereira W F, Fonseca L D, Putti F F, et al. Environmental monitoring in a poultry farm using an instrument developed with the internet of things concept[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 170: 105247.
- [57] 李帅.基于LoRa的畜禽养殖环境自动监测系统设计与应用[D].河北农业大学,2020.
Li S. Design and application of automatic monitoring system for livestock breeding environment based on LoRa[D]. Hebei Agricultural University, 2020.
- [58] 梁圆媛.畜禽养殖环境监测与控制系统的设计与实现[D].重庆师范大学,2018.
Liang Y Y. Design and implementation of environmental monitoring and controlling system for livestock and poultry breeding. Chongqing Normal University, 2018.
- [59] Wang X, Li W, Wang L, et al. Based on STM 32F103 cowshed environment intelligent control system[J]. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, 782: 052040.
- [60] Zhang Z. Research on Intelligent Measurement and Control System for Internet of Things in Greenhouse[C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2020, 1486(2): 022037.
- [61] 王嘉宁,牛新涛,徐子明,等.基于无线传感器网络的温室CO₂浓度监控系统[J].农业机械学报,2017,48(07):280-285+367.
Wang J L, Niu X T, Xu Z M, et al. Greenhouse CO₂ concentration monitoring system based on wireless sensor network [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2017, 48(07): 280-285+367.
- [62] 李小平,王学,孙艳春.基于物联网的农田环境监测系统设计[J].农业工程,2018,8(10):19-23.
Li X P, Wang X, Sun Y C. Design of farmland environment monitoring system based on Internet of Things[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(10): 19-23.
- [63] 刘映江.基于LoRaWAN物联网技术的农田环境监测系统的设计[D].西南石油大学,2018.
Liu Y J. Design of farmland environment monitoring system based on LoRaWAN Internet of Things technology [D]. Southwest Petroleum University, 2018.
- [64] Lakhari I A, Jianmin G, Syed T N, et al. Monitoring and control systems in agriculture using intelligent sensor techniques: A review of the aeroponic system[J]. Journal of Sensors, 2018, 2018.
- [65] Li X, Xu J, Jiang Y, et al. Toward agricultural ammonia volatilization monitoring: A flexible polyaniline/Ti3C2Tx hybrid sensitive films based gas sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 316: 128144.
- [66] 任敏,多拉娜,王帅,等.基于电子鼻和电子舌技术评价乳酸乳球菌对发酵乳风味品质的影响[J].中国食品学报,2021, 21(01):246-255.
Ren M, Dorana, Wang S, et al. Evaluation of the influence of Lactococcus lactis on the flavor quality of fermented milk based on electronic nose and electronic tongue technology[J]. Chinese Journal of Food Science, 2021, 21(01): 246- 255.
- [67] 杨晨昱,袁鸿飞,马惠玲,等.基于FT-NIR和电子鼻技术的苹果霉心病无损检测[J/OL].食品与发酵工业:1-8[2021-06-03].<https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025671>.
Yang C Y, Yuan H F, Ma H L, et al. Non-destructive detection of apple mold heart disease based on FT-NIR and electronic nose technology[J/OL]. Food and fermentation indus-

- try: 1-8[2021-06-03].<https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025671>.
- [68] 王彬. 基于电子鼻及可见—近红外光谱的鸡蛋品种及产地鉴别研究[D]. 华中农业大学, 2018.
- Wang B. Research on identification of egg varieties and origin based on electronic nose and visible-near infrared spectroscopy[D]. Huazhong Agricultural University, 2018.
- [69] 王永瑞, 柏霜, 罗瑞明, 等. 基于电子鼻、GC-MS 结合化学计量学方法鉴别烤羊肉掺假[J/OL]. 食品科学: 1-14[2021-06-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20210531.1355.018.html>.
- Wang Y R, Bai S, Luo R M, et al. Identification of roast lamb adulteration based on electronic nose, GC-MS combined with chemometric methods [J/OL]. Food Science: 1-14 [2021-06-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20210531.1355.018.html>.
- [70] Qi W, Wang H, Zhou Z, et al. Ethylene Emission as a Potential Indicator of Fuji Apple Flavor Quality Evaluation Under Low Temperature[J]. Horticultural Plant Journal, 2020, 6(4): 231-239.
- [71] de Araujo Zanella A R, da Silva E, Albini L C P. Security challenges to Smart Agriculture: Current State, Key Issues, and Future Directions[J]. Array, 2020: 100048.
- [72] 张保辉, 查燕, 史云. 智慧农业装备依赖进口情况、潜在风险及对策建议[J]. 中国农业信息, 2019, 31(04): 113-120.
- Zhang B H, Zha Y, Shi Y. Importation of smart agricultural equipment, potential risks and countermeasures[J]. China Agricultural Information, 2019, 31(04): 113-120.
- [73] Khujamatov K E, Toshtemirov T K. Wireless sensor networks based Agriculture 4.0: challenges and apportions[C]// 2020 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT). IEEE, 2020: 1-5.
- [74] Singh A, Sharma S, Singh J. Nature-inspired algorithms for wireless sensor networks: A comprehensive survey[J]. Computer Science Review, 2021, 39: 100342.
- [75] Sun Z, Li Z. CoC-SCS: Cooperative-Optimization Coverage Algorithm Based on Sensor Cloud Systems in Intelligent Computing[J]. IEEE Access, 2020, 8: 129058-129074.
- [76] Chai Y. In-sensor computing for machine vision[J]. 2020. Zhou F, Chai Y.
- [77] Near-sensor and in-sensor computing[J]. Nature Electronics, 2020, 3(11): 664-671.
- [78] Reddy K S P, Roopa Y M, Nandan N S. IoT based Smart Agriculture using Machine Learning[C]//2020 Second International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA). IEEE, 2020: 130-134.
- [79] Vangala A, Das A K, Kumar N, et al. Smart secure sensing for IoT-based agriculture: Blockchain perspective[J]. IEEE Sensors Journal, 2020.
- [80] Maduranga M W P, Abeysekera R. Machine learning applications in IoT based agriculture and smart farming: A review[J]. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 2020, 24.