

引用本文格式 陈言行, 李斌, 裴月忠, 等. 物联网技术在农业生产中的应用[J]. 农业工程, 2025, 15(2): 26-32. DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.202502304. CHEN Yanxing, LI Bin, PEI Yuezhong, et al. Application of internet of things technology in agricultural production[J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(2): 26-32.

物联网技术在农业生产中的应用

陈言行^{1,2}, 李斌³, 裴月忠⁴, 马本学², 何青海¹, 褚幼晖¹

(1. 山东省农业机械科学研究院, 养分资源高效利用全国重点实验室, 山东 济南 250100; 2. 石河子大学, 新疆 石河子 832003; 3. 山东省应急管理与安全生产协会, 山东 济南 250100; 4. 华能沽化新能源有限公司, 山东 滨州 256800)

摘要: 物联网作为推动传统农业向现代化农业转型的关键技术, 其集成了传感器、无线通信、云计算等先进技术, 对提高农业生产效率和作物质量具有重要意义。综述了物联网基本概念、系统结构、国内外应用现状及在农业应用的关键技术和实例, 并结合我国农业生产的实际情况, 分析了物联网技术推广过程中遇到的问题, 对其未来的发展趋势进行预测和展望, 为促进该技术的广泛推广提供理论依据和实践指导。

关键词: 物联网; 传感器; 农业生产; 农业信息化; 智能调控

中图分类号: S24 文献标识码: A 文章编号: 2095-1795(2025)02-0026-07

DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.202502304

Application of internet of things technology in agricultural production

CHEN Yanxing^{1,2}, LI Bin³, PEI Yuezhong⁴, MA Benxue², HE Qinghai¹, CHU Youhui¹

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, State Key Laboratory of Nutrient Use and Management, Ji'nan Shandong 250100, China; 2. Shihezi University, Shihezi Xinjiang 832003, China; 3. Shandong Province Association of Emergency Management and Work Safety, Ji'nan Shandong 250100, China; 4. Huaneng Zhanhua New Energy Co., Ltd., Binzhou Shandong 256800, China)

Abstract: As a key technology to promote transformation of traditional agriculture to modernized agriculture, internet of things (IoT) integrates advanced technologies such as sensors, wireless communication and cloud computing, which is of great significance to improve agricultural production efficiency and crops quality. Basic concept of IoT, system structure, present situation of application in domestic and foreign countries, and key technologies and examples of agricultural application were summarized. Combined with actual situation of agricultural production in China, problems encountered in promotion of IoT technology were analyzed, and future development trend was predicted and prospected, to provide theoretical basis and practical guidance for promoting widespread popularization of this technology.

Keywords: internet of things, sensor, agricultural production, agricultural informatization, intelligent control

0 引言

目前, 传统农业生产技术在种植环境控制、病虫害防治、生长过程监测等环节存在水、肥、药等资源浪费, 以及劳动力短缺、环境监测手段落后等问题。物联网技术通过传感器对自然界中的光、热、湿度及病虫害等信息进行采集, 并依据数据智能调整环境参

数, 为作物提供最佳的生长环境, 实现对农业生产全过程的精细化管理和智能化决策, 有望从根本上解决传统农业技术的种种痼疾, 推动农业向数字化、智能化和精准化方向发展^[1]。本研究旨在分析物联网技术在农业生产中应用的国内外现状、关键技术、应用方法, 并探讨其存在的不足, 以期物联网在农业生产中的实践应用提供有价值的参考。

收稿日期: 2024-07-24 修回日期: 2024-10-09

基金项目: 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2022CXGC020708)

作者简介: 陈言行, 硕士生, 主要从事农业物联网研究 E-mail: 2675340711@qq.com

褚幼晖, 通信作者, 高级工程师, 主要从事智能农机装备研究 E-mail: 1132666414@qq.com

在线投稿
www.d1ae.com

1 发展与应用概况

1.1 国外物联网技术

2002年,英特尔公司在美国俄勒冈州建立世界上第1个无线传感器网络葡萄园,成为精准农业和智能耕种技术的重要里程碑。2004年,日本将农业物联网技术纳入其发展计划,通过U-Japan计划,力求实现人与人、物与物、人与物之间的互联,形成无处不在的网络社会^[2]。

ALHAQI M A D等^[3]基于物联网的热带温室园艺作物蒸发冷却控制系统研究,通过云服务器实时监测温度、相对湿度和控制执行器的响应。MELLIT A等^[4]通过物联网技术将温室环境信息传输至云端,将病虫害模型布置到树莓派中,样机能够对温室进行远程监测和控制,对植物病害进行识别。KHUDOYBERDIEV A等^[5]利用物联网设备采集土壤湿度,制定土壤湿度的目标函数,利用专家系统与优化算法监测水泵流量,确保得到最优的土壤水分。TANG R等^[6]设计了WMN(无线Mesh网络)的网络拓扑结构,并提出一种改进的ZigBee路由协议EMP-ZBR,解决无线网络能量损耗和网络拥塞的问题。

1.2 国内物联网技术

2015年,《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》发布,明确提出将互联网的创新成果与经济社会各领域进行深度融合的战略方针^[7]。

肖鹰等^[8]设计了基于云计算的生态农业物联网监控系统,融合物联网、云计算、数据挖掘技术,实现对农业生产环境的实时监测与数据处理。潘飞龙等^[9]采用ZigBee构建无线通信网络,并通过网关将数据存储至监测平台与云端,温室数据的均方根误差 <0.5 、系统丢包率 $<0.8\%$ 。陈维娜等^[10]通过NB-IoT技术和多个传感器模块实现农田环境信息的实时采集和传输,利用自适应加权融合与神经网络技术将传感器数据融合,提高监测数据的准确性。杨俊成等^[11]将采集的微气候数据与通过图像处理技术获取的植物叶片信息,作为神经网络的输入输出量,训练神经网络,分析微气候因素与植物叶片生长速度的关系。朱德兰等^[12]设计了环境监控系统,并构建温湿度数学模型,实现分段多区间的精准调控。景旭等^[13]利用联盟链的数据防篡改和强共识性特点,构建多方交互流程,实现数据哈希可验证和决策结果上链执行,解决传统农业物联网中数据共享和决策执行不可信的问题。

2 系统结构与关键技术

物联网系统结构由感知层、传输层、应用层构成,每个层次具有不同的功能,确保物联网系统正常运转,

监控农业生产^[13]。物联网系统结构如图1所示。

2.1 感知层

感知层是物联网架构的最底层,与物理世界交互,由传感器、射频识别(RFID)设备、全球卫星定位系统(GPS)等传感设备组成,并识别和采集物体的各种信息。传感器技术利用智能传感、视觉图像、生化传感等方法获取作物的环境信息,如温度、湿度、光照强度和病虫害等农业信息。RFID模块由RFID标签、读写器、天线等部分组成,通过无线射频方式对记录媒体进行读写,常用于农产品溯源。GPS技术是基于人造地球卫星的无线电导航定位系统,能够为用户提供全天候、高精度、自动化的精准坐标,一般用于农产品监测。

感知层作为物联网系统的基石,通过广泛部署的环境信息采集节点,搜集作物的各项信息数据,通过网络传输至数据处理中心,进行智能分析与决策。基于这些决策,系统控制中心向环境控制设备发出指令,从而实现对作物环境的自动化、精细化调控。

在感知层中,采集节点主要由高性能的传感器设备构成,这些传感器不仅覆盖温湿度监测,还可能包括光照强度、土壤湿度、CO₂浓度等多种环境因素的监测,以及视频监控设备用于实时观察作物生长情况。这些传感器需具备高精度、耐高温、耐高湿及耐腐蚀的特性,以确保在复杂环境中长期稳定工作,提供可靠的数据支持。研发满足需求且低能耗的传感器设备已越发重要^[14]。

2.2 传输层

传输层主要负责数据的传输和管理,通过有线与无线两种传输方式,将收集到的数据传输到其他设备

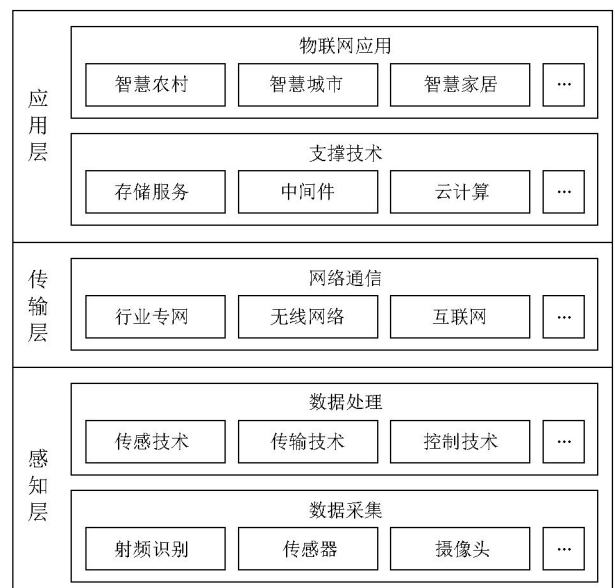


图1 物联网系统结构

Fig. 1 Internet of things system structure

或系统。有线传输方式主要由 RS232、RS485 构成，由于 RS232 传输距离 15 m 左右、电压范围 $-12\sim+12\text{ V}$ 及易损坏设备，在实际生产生活中逐渐被 RS485 所取代^[15]。RS485 采用差分信号的传输方式，抗干扰能力强，最高传输速率 10 Mbps、最远传输距离 1 200 m、最多支持 128 个设备。由于 RS485 的诸多优点，在生产实际中，有线传输方式大多采用 RS485。

物联网主要应用无线通信技术，包括近距离传输技术，如 ZigBee、蓝牙、红外数据传输（IrDA），如表 1 所示；远距离传输技术，如 WiFi、GPRS、4G，如表 2 所示。相较于蓝牙、IrDA 技术，ZigBee 作为低功耗和更小延迟的双向无线通信技术，在温室环境测控领域备受关注^[16]。在远程通信技术方面，WiFi、GPRS、4G 技术提供了更加灵活和高速的数据传输能力，使得需要联网的设备能通过 SIM 卡轻松接入互联网，用户仅需为 SIM 卡支付费用。

表 1 近距离无线通信技术对比

Tab. 1 Near range wireless communication technologies

参数	ZigBee	蓝牙	IrDa
传输距离/m	10~100	1~100	1
传输速率/kbps	250	1 000	115.2
模块成本/元	50	20	20
功耗/mA	10	20	10

表 2 远距离无线通信技术对比

Tab. 2 Long distance wireless communication technology

参数	WiFi	GPRS	4G
传输速率/kbps	11 000	171.2	100 000
工作频段/MHz	2 400	1 800	1 880~1 900
模块成本/元	150	130	50
功耗/mA	10~50	10~50	700

2.3 应用层

应用层负责信息处理与决策，其核心功能涵盖数据汇集、转换、分析及服务提供，接收来自传输层的数据，并将其送入各类信息系统中进行处理。应用层根据用户的指令或预设的规则，生成相应的控制信号，并发送给执行机构，实现对系统或设备状态的远程操控。

2.3.1 云平台技术

云平台核心功能包括设备管理、数据收集与存储，为用户提供实时在线监测、定位追踪、远程控制 and 远程维护升级等功能。目前国内较为成熟的云平台有阿里云、腾讯云、华为云和 OneNet 等，这些云平台已经在农业领域得到了广泛应用^[17-20]。张军华等^[21]通过 ZigBee 无线网络实现温室环境参数感知，并由物联网平台嵌入的智能决策系统对是否卷帘进行决策，试验结果表明，作物产量提升 30.74%，并且收获时间提前。

WANG Z H 等^[22]设计了基于物联网的智能水质监测系统，可以检测水质、温度、用水总量和漏水等信息，并将数据实时传输到云平台。

2.3.2 农业智能控制技术

现代温室环境控制技术已从传统的手动控制、定时控制逐步转变为 PID 控制、模糊 PID 控制和神经网络 PID 控制^[23-25]。与传统控制方法相比，PID 控制与模糊 PID 控制效果相对较好，但由于温室环境属于非线性、大滞后、多环境因素相互耦合的系统，PID 控制与模糊 PID 控制易受环境动态变化影响，导致控制过程产生较大波动。

针对温室系统非线性、大滞后、多环境因素相互耦合等特点，神经网络 PID 控制将比例系数 K_p 、积分时间常数 T_i 和微分时间常数 T_d 视为神经网络的权重和偏置，通过训练自动调整 PID 的参数，有较强的自适应能力和鲁棒性。WU W B 等^[26]设计了粒子群优化神经网络 PID 控制方法，稳态平均温度与目标值的误差 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ ，平均湿度值与目标值的误差 $1\%\text{RH}$ 。HUANG S 等^[27]开发一种基于单神经元比例-积分-微分（SNPID）算法的日光温室智能温湿度控制系统，较传统系统在温湿度控制精度上取得 50.2% 的显著提升。

3 具体应用

3.1 作物生长阶段

在作物种植过程中，物联网技术通过传感器持续监测温度、湿度、光照、二氧化碳、土壤氮磷钾含量和土壤含水率等植物生长要素，这些实时数据为物联网管理系统提供决策依据，系统通过调控环境控制装置，自动将环境参数调控至理想生长环境状态。

张净等^[28]利用物联网技术与模糊控制方法，实时监测水培环境并调节营养液水质参数，数据稳定性较好，能有效控制营养液的 pH 值与电导率。农英雄等^[29]设计了多源异构种植数据采集和传输机制，采集烟田种植环境数据，训练了烟草大田种植期分类模型和烟草智能管理模型，实现烟草的精准种植和智能管理。吴久江等^[30]通过物联网技术实现对草莓生长环境的智能监控，采用专家系统智能调控环境参数，单个大棚产量和收入分别提高 79.7% 和 169.6%。FENG C 等^[31]研发了智能监测系统，不仅提供详细的苹果生长监测数据，而且为种植提供决策支持。FENG X 等^[32]运用物联网和智能控制技术，可根据水稻的 3 个不同生长阶段提供适宜的温度和育秧水分。

3.2 作物病虫害防控

传感器采集的数据通过无线通信模块传送到云平台，利用大数据分析技术实时监测病虫害情况，并结合气象数据和病虫害模型进行预警，提前采取相应的

防治措施。

丁亚会等^[33]利用臭氧灭菌、光源诱导除虫、病虫害识别、远程协同控制和设备云托管等技术,开发了设施蔬菜病虫害防控系统,对于设施农业中的病虫害有较好的防治效果。苏一峰等^[34]利用物联网技术将作物图像传输至服务器,图像识别系统实现对田间农作物病虫害诊断,小麦锈病、蚜虫诊断正确率95%以上。SHARMA R P 等^[35]通过物联网技术收集作物虫害信息,证实天气参数、作物产量和昆虫繁殖之间存在耦合关系,并用多目标进化算法利用模糊规则寻找合适的种植窗口期和降低虫害的繁殖条件。GAO D M 等^[36]通过物联网技术采集天气参数,无人机采集农田病害情况,并将数据传输至云端进行分析,在气温14~16℃时,小麦易患病,降雨可以减少小麦白粉病的传播。王志彬等^[37]研发了温室多功能植保机,实现对病菌、虫卵、幼虫的消杀,番茄晚疫病、白粉虱发病率控制在4.4%和7.2%以下。赵睿等^[38]研究实现了数据采集、数据融合、远程控制等功能,并利用PSO-SVR模型预测温湿度,结合易产生黄瓜病害的环境参数,自动向农户进行预警。MOHAMMED A 等^[39]使用DenseNet-121模型学习输入图像中的复杂特征,并采用鸱鹌算法优化模型,利用多层感知机(MLP)模型对昆虫进行分类识别。

3.3 作物施肥

物联网技术在作物施肥中的应用主要体现在精准化、智能化管理上。通过物联网技术,农户可以实时监测作物生长过程中的土壤养分、湿度等关键参数,并基于这些数据制定精准的施肥方案。

朱德兰等^[40]设计远程灌溉控制系统,将模糊PID控制模型部署至服务器,建立一阶滞后线性系统模型,为水肥精准调控提供理论基础。熊钦等^[41]采用ZigBee网络实现远距离监控与控制执行机构动作,利用模糊控制对水泵进行精准控制,实现对果树的精准施药、施肥、灌溉。季宗虎等^[42]基于水肥电导率调节过程和水肥pH值调节过程,阐述了水肥一体化系统控制对象和策略;利用田间采集系统、灌溉控制系统、水肥一体化系统、云端服务器、传输系统和无线传感器网络,以及远程监控平台,可对前端信息进行实时监测与传输。KOLLU P K 等^[43]利用物联网技术获取农业数据,使用机器学习技术智能决断施肥时间、施肥量。聂训等^[44]设计了基于物联网的水肥一体化管控系统,该系统采用物联网模块思想,针对土壤温湿度、空气温湿度、EC值和pH值进行环境信息采集;通过Zigbee技术和NB-IoT技术实现数据无线传输至云端;采用远程控制继电器控制施肥灌溉区域;利用网络服务器和人机交互界面实现数据的存储和监控。FAJRIN N 等^[45]

对物联网温室的菊花栽培进行浇水和照明控制,并对土壤水分进行监测,系统支持Android、iOS和windows及网站的控制。

3.4 农产品溯源

物联网技术在农产品溯源中发挥关键作用,通过集成传感器、云计算和大数据等技术,实时监测农产品的生长环境、采摘、加工和运输等全过程,确保数据的准确性和实时性。消费者扫描溯源码,可轻松获取农产品的生产、质量检测等信息,有效提升了农产品的安全性和消费者的信任度。

张雅倩等^[46]设计一种农产品溯源模型,通过SHA256算法确保数据安全性,采用Hyperledger Fabric联盟区块链技术,保障供应链数据透明且不可篡改。马腾等^[47]设计农产品原产地可信溯源系统,将电子秤采集的农产品数据上传至云服务器,利用改进的SA加密算法对数据进行加密处理,云端检测程序对数据进行比对分析,并将结果展示在检测网站上,供消费者查询。孙莉等^[48]设计开发了农产品全流程追溯系统,该系统基于物联网的3层组织架构,包括设备数据采集、网络数据传输,实现农产品从种植、农事、采收、仓储和运输等环境的实时追溯,搭建模块集成的大数据展示平台,向消费者全方位展示农产品的精准信息,建立供需信任。孙传恒等^[49]通过边缘计算实现数据融合,并在嵌入式设备上部署区块链,提升数据处理效率和安全性,加密上链时间合理,并且存储容量消耗降低,满足实际应用需求。

4 存在问题

4.1 使用成本较高

物联网技术涉及传感器技术、云计算、大数据等多种高新技术,其研发成本较高。物联网设备如传感器、控制器、执行器等也需要大量投入,增加了温室大棚的建设成本。物联网系统需要专业的技术人员进行运营和维护,包括设备的定期检查、维修、更新,以及数据的安全管理等,以确保系统的稳定运行和数据的准确性,也需要资金投入。对于小型企业和农户而言,引入物联网技术所需的初始投资和长期维护费用往往是较大的负担,尽管物联网技术带来了诸多潜在优势,但在缺乏足够成本效益的情况下,很难在这些领域实现大面积推广。

4.2 农户应用困难

物联网技术涉及多个领域的知识和技术,如传感器技术、无线通信技术、云计算技术等。农户在使用物联网设备时,需要了解设备的操作方法和数据分析方法。这些技术对于普通农户比较陌生,需要一定的学习和培训才能掌握,目前针对农户的物联网技术培

训和指导相对较少,农户难以获得及时有效的帮助和支持,导致农户在使用物联网技术时可能会遇到一些困难,如操作不当、数据分析不准确等,影响物联网技术的应用效果。

4.3 数据安全性与隐私泄露

物联网技术在农业领域的广泛应用,极大提升了生产效率与管理水平,但也伴随着数据安全性与隐私问题。这些问题主要源于物联网设备的广泛互联,使得大量农业生产数据在传输、存储和处理过程中面临泄露、篡改和非法访问的风险。农户个人信息、农田种植数据、企业经营生产信息等若被不当获取或利用,将直接威胁个人隐私权益和农业产业的安全稳定。因此,确保物联网数据加密传输、存储安全,以及实施严格的访问控制和隐私保护政策显得尤为重要。加强农户和技术人员的安全意识培训,建立完善的数据安全管理制度,是保障农业物联网健康发展的重要措施。

4.4 设备耐用性和适应性

农业应用中的设备耐用性和适应性问题显著且复杂,由于农田环境多变,如极端气候、土壤湿度、酸碱度及可能的化学污染等,对物联网设备的耐用性提出了较高要求。设备需要能够在高温、低温、潮湿等恶劣环境下稳定运行,同时抵御虫害、鼠害等生物因素的破坏。当前市场上的物联网设备在材料选择、结构设计及防水防尘等级上尚不能完全满足这些需求,导致设备易损坏、寿命短,增加了农业生产的维护成本和不确定性。此外,不同地域、不同作物对物联网设备的具体需求各异,要求设备具备高度的适应性和灵活性,以满足精准农业、智能灌溉、病虫害监测等多种应用场景。提升农业物联网设备的耐用性和适应性,是推动其在农业领域广泛应用的关键所在。

5 结束语

为了应对我国农业生产效率低、生产经营模式粗放和耕地细碎化的挑战,推动农业现代化,必须重视农业物联网技术的研发和应用。政府部门需与农业科研机构、高等院校和企业紧密合作,共同研发符合农业生产需求的低成本、高精度、耐高温、耐高湿及耐腐蚀的农业物联网传感器和产品。通过建立专业科普队伍和培训课程,确保农户对农业物联网设备的熟练应用;建设专业人才培养机构,培养农业物联网领域的应用、管理及服务人才,促进农业物联网技术的产业化发展,全面提升农业生产规模化、智能化水平。

参考文献

[1] 杨晓慧, 张国海, 姚嘉, 等. 物联网技术在果园生产中的应用分

析[J]. 中国果树, 2023(1): 135-140.

- [2] 刘兹恒, 周佳贵. 日本“U-JAPAN”计划和发展现状[J]. 大学图书馆学报, 2013, 31(3): 38-43, 58.
LIU Ziheng, ZHOU Jiagui. The U-JAPAN and its present situation[J]. Journal of Academic Libraries, 2013, 31(3): 38-43, 58.
- [3] ALHAQI M A D, NUGROHO A P, PRASETYATAMA Y D, et al. Internet of things (IoT)-driven on evaporative cooling system for tropical gree-nhouse environmental control[J]. Iop Conference Series: Earth and Environmental Science, 2024, 1302(1): 012112.
- [4] MELLIT A, BENGHANEM M, HERRAK O, et al. Design of a novel remote monitoring system for smart greenhouses using the internet of things and deep convolutional neural networks[J]. Energies, 2021, 14(16): 5045.
- [5] KHUDOYBERDIEV A, ULLAH I, KIM D. Optimization-assisted water supplement mechanism with energy efficiency in IoT based greenhouse[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2021, 40(5): 10163-10182.
- [6] TANG R, ARIDAS N K, TALIP M S A. Design of wireless sensor network for agricultural greenhouse based on improved Zigbee protocol [J]. Agriculture, 2023, 13(8): 1518.
- [7] 国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见[N]. 经济日报, 2015-07-05(5).
- [8] 肖鹰, 曾志丹, 张艳. 基于云计算下现代生态农业物联网监控系统的设计[J]. 农机化研究, 2023, 45(11): 117-121.
XIAO Ying, ZENG Zhidan, ZHANG Yan. Design of modern ecological agriculture IOT monitoring system based on cloud computing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(11): 117-121.
- [9] 潘飞龙, 谭方利, 李峥, 等. 基于物联网的烤房干/湿球温度集中监测系统设计[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(5): 684-691.
PAN Feilong, TAN Fangli, LI Zheng, et al. Design of concentration monitoring system for dry-bulb and wet-bulb temperature in flue-curing barn based on internet of things[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(5): 684-691.
- [10] 陈维娜, 杨忠, 顾姗姗, 等. 基于NB-IoT技术的智能农业环境监测系统设计[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(6): 168-175.
CHEN Weina, YANG Zhong, GU Shanshan, et al. Design of intelligent agricultural environment monitoring system based on NB-IoT technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(6): 168-175.
- [11] 杨俊成, 李淑霞, 李亮. 基于物联网与神经网络的温室监控方案[J]. 控制工程, 2020, 27(9): 1649-1656.
YANG Juncheng, LI Shuxia, LI Liang. Greenhouse monitor approach based on the internet of things and artificial neural network[J]. Control Engineering of China, 2020, 27(9): 1649-1656.
- [12] 朱德兰, 涂泓滨, 王瑞心, 等. 基于分段多区间的温室夏季温湿度智能控制策略[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 334-341.
ZHU Delan, TU Hongbin, WANG Ruixin, et al. Intelligent control strategy of temperature and humidity in greenhouse in summer based on subsection and multi-interval[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 334-341.
- [13] 景旭, 马蓓. 基于联盟链的智能温室群数据共享及决策协同方案[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(12): 245-256.

- JING Xu, MA Bei. Scheme of data sharing and decision collaboration of intelligent greenhouse group based on consortium blockchain[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(12): 245-256.
- [14] 聂鹏程, 张慧, 耿洪良, 等. 农业物联网技术现状与发展趋势[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2021, 47(2): 135-146.
- NIE Pengcheng, ZHANG Hui, GENG Hongliang, et al. Current situation and development trend of agricultural internet of things technology[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2021, 47(2): 135-146.
- [15] 吕腾超, 李由, 李阳. 基于S3C2440的新型工业多协议转换器设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2017(10): 38-41.
- LYU Tengchao, LI You, LI Yang. Design of S3C2440 based industrial multiprotocol converter[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017(10): 38-41.
- [16] 贾敬敦, 鲁相洁, 黄峰, 等. 远程控制与无线通信技术在农业中的应用分析与展望[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(S1): 351-359.
- JIA Jingdun, LU Xiangjie, HUANG Feng, et al. Review of remote control technology and wireless communication technology in agricultural applications[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(S1): 351-359.
- [17] 朱辰, 张西晨, 李森杰, 等. 基于云边协同的智能垃圾分类系统设计[J]. *实验技术与管理*, 2023, 40(9): 74-80, 186.
- ZHU Chen, ZHANG Xichen, LI Senjie, et al. Design of intelligent waste sorting system based on cloud edge collaboration[J]. *Experimental Technology and Management*, 2023, 40(9): 74-80, 186.
- [18] 孙钢灿, 张宁宇, 赵传勇. 智能井盖锁云端监测管理系统设计与实现[J]. *计算机应用与软件*, 2022, 39(2): 16-20, 25.
- SUN Gangcan, ZHANG Ningning, ZHAO Chuanyong. Design and implementation of intelligent manhole cover cloud monitoring management system[J]. *Computer Applications and Software*, 2022, 39(2): 16-20, 25.
- [19] 朱红秀, 张柱, 张运九, 等. 基于窄带物联网和华为云平台的工程测试技术实验系统及实验项目[J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(11): 181-185.
- ZHU Hongxiu, ZHANG Zhu, ZHANG Yunjiu, et al. Engineering test technology experimental system and projects based on NB-IoT and Huawei cloud platform[J]. *Experimental Technology and Management*, 2022, 39(11): 181-185.
- [20] 王战备, 冯金松, 孙朝阳. 基于物联网的汉江水环境参数监测系统[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(35): 15681-15687.
- WANG Zhanbei, FENG Jinsong, SUN Zhaoyang. Design of Han River water environmental parameter monitoring system based on internet of things[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(35): 15681-15687.
- [21] 张军华, 陈丹艳, 张仲雄, 等. 多因子约束的卷帘机揭盖被决策方法与控制系统研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(9): 354-364.
- ZHANG Junhua, CHEN Danyan, ZHANG Zhongxiong, et al. Decision-making method and control system for uncovering covering curtain based on multifactor constraints[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(9): 354-364.
- [22] WANG Z H, SUN C Z, MA Y B, et al. Intelligent water monitoring system based on the internet of things[J]. *Advances in Computer, Signals and Systems*, 2023, 7(4).
- [23] 王红英, 范佳宇, 王粮局, 等. 基于PID的饲料制粒调质温度控制系统设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(1): 1-8.
- WANG Hongying, FAN Jiayu, WANG Liangju, et al. Design and test of the temperature control system for the feed pelleting and conditioning based on PID[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(1): 1-8.
- [24] 周艳平, 庄岩. 一种粒子群模糊PID控制算法在温室中的应用[J]. *计算机测量与控制*, 2020, 28(8): 116-119.
- ZHOU Yanping, ZHUANG Yan. A fuzzy-PID control algorithm with particle swarm optimization and its application in greenhouse[J]. *Computer Measurement & Control*, 2020, 28(8): 116-119.
- [25] 屈毅, 宁铎, 赖展翅, 等. 温室温度控制系统的神经网络PID控制[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 307-311.
- QU Yi, NING Duo, LAI Zhanchi, et al. Neural networks based on PID control for greenhouse temperature[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 307-311.
- [26] WU W B, YAO B H, HUANG J X, et al. Optimal temperature and humidity control for autonomous control system based on PSO-BP neural networks[J]. *Iet Control Theory & Applications*, 2023, 17(15): 2097-2109.
- [27] HUANG S, XIANG H Y, LENG C J, et al. Intelligent regulation of temperature and humidity in vegetable greenhouses based on single neuron PID algorithm[J]. *Electronics*, 2024, 13(11): 2083.
- [28] 张净, 姚森耀, 刘晓梅. 基于NB-IoT的水培智能监控系统设计与试验[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(5): 175-181.
- ZHANG Jing, YAO Senyao, LIU Xiaomei. Design and experiment of hydroponic intelligent monitoring system based on NB-IoT[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(5): 175-181.
- [29] 农英雄, 陆瑛, 陈智斌, 等. 基于物联网监控的烟叶精准种植管理系统设计与实践[J]. *中国烟草学报*, 2021, 27(3): 114-121.
- NONG Yingxiong, LU Ying, CHEN Zhibin, et al. Design and practice of tobacco precise planting management system based on IoT-based monitoring[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2021, 27(3): 114-121.
- [30] 吴久江, 汪星, 李群, 等. 简易草莓大棚智慧管理系统设计与性能分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(12): 288-296.
- WU Jiujiang, WANG Xing, LI Qun, et al. Design and performance analysis of intelligent management system in simple strawberry greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(12): 288-296.
- [31] FENG C, WU H R, ZHU H J, et al. The design and realization of apple orchard intelligent monitoring system based on internet of things technology[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 1909(546/547): 898-902.
- [32] FENG X, YAN F, LIU X Y, et al. Development of IoT cloud platform based intelligent raising system for rice seedlings[J]. *Wireless Personal Communications*, 2021, 122(2): 1695-1707.
- [33] 丁亚会, 陈诚, 乔晓军, 等. 基于物联网的病虫草害绿色防控系统研发与应用[J]. *中国农业科技导报*, 2024, 26(4): 77-86.
- DING Yahui, CHEN Cheng, QIAO Xiaojun, et al. Development and application of green pest control system based on IoT technology[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(4): 77-86.

- [34] 苏一峰, 杜克明, 李颖, 等. 基于物联网平台的小麦病虫害诊断系统设计初探[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(2): 86-94.
SU Yifeng, DU Keming, LI Ying, et al. Preliminary research on diagnosis system design of wheat diseases and pests based on the internet of things[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(2): 86-94.
- [35] SHARMA R P, DHARAVATH R, EDLA D R. IoFT-FIS: internet of farm things based prediction for crop pest infestation using optimized fuzzy inference system[J]. Internet of Things, 2023, 21: 100658.
- [36] GAO D M, SUN Q, HU B, et al. A framework for agricultural pest and disease monitoring based on internet of things and unmanned aerial vehicles[J]. Sensors, 2020, 20(5): 1487.
- [37] 王志彬, 乔晓军, 刘智, 等. 设施蔬菜臭氧植保机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 293-300.
WANG Zhibin, QIAO Xiaojun, LIU Zhi, et al. Design and experiment of multifunctional plant protection machine for controlling vegetable diseases and insect pests in greenhouses[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 293-300.
- [38] 赵睿, 程鑫, 徐晓辉, 等. 基于 PSO-SVR 模型的温室病害预警防治系统[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 854-860.
ZHAO Rui, CHENG Xin, XU Xiaohui, et al. Early warning and prevention system for plant diseases in the greenhouse based on particle swarm optimization support vector regression (PSO-SVR) model[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(4): 854-860.
- [39] MOHAMMED A, ABD E E S, ARUN K, et al. Automated insect detection and classification using pelican optimization algorithm with deep learning on internet of enabled agricultural sector[J]. SN Computer Science, 2024, 5(5).
- [40] 朱德兰, 阮汉铖, 吴普特, 等. 水肥一体机液电导率远程模糊 PID 控制策略[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 186-191.
ZHU Delan, RUAN Hancheng, WU Pute, et al. Strategy on remote fuzzy PID Control for fertilizer liquid conductivity of water fertilizer integrated machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 186-191.
- [41] 熊钦, 肖丽萍, 蔡金平, 等. 基于物联网的果园药水肥一体化控制系统设计与实现[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(3): 73-81.
XIONG Qin, XIAO Liping, CAI Jinping, et al. Design and implementation of integration of medicine, water and fertilizer control system based on internet of things in orchard[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(3): 73-81.
- [42] 季宗虎, 惠磊, 孙栋元, 等. 基于物联网的水肥一体化系统[J]. 农业工程, 2023, 13(11): 68-75.
JI Zonghu, HUI Lei, SUN Dongyuan, et al. Water and fertilizer integration system based on internet of things[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(11): 68-75.
- [43] KOLLU P K, BANGARE M L, HARI PRASAD P V, et al. Internet of things driven multilinear regression technique for fertilizer recommendation for precision agriculture[J]. SN Applied Sciences, 2023, 5(10): 264.
- [44] 聂训, 黄招娣, 黄德昌, 等. 基于物联网的水肥一体化系统设计[J]. 农业工程, 2023, 13(3): 43-49.
NIE Xun, HUANG Zhaodi, HUANG Dechang, et al. Design of water and fertilizer integration system based on internet of things[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(3): 43-49.
- [45] FAJRIN N, TAUFIK I, ISMAIL N, et al. On the design of watering and lighting control systems for chrysanthemum cultivation in greenhouse based on internet of things[C]//Proceedings of IOP Conference Series-Materials Science and Engineering. Bristol: Iop Publishing Ltd, 2018, 288(1): 012105.
- [46] 张雅倩, 刘江平, 陈晨. 应用 Hyperledger Fabric 和物联网技术的农产品溯源系统设计[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(6): 12-23.
ZHANG Yaqian, LIU Jiangping, CHEN Chen. Designing an agricultural product traceability system using hyperledger fabric blockchain and internet of things technology[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2022, 42(6): 12-23.
- [47] 马腾, 孙传恒, 李文勇, 等. 基于 NB-IoT 的农产品原产地可信溯源系统设计与实现[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(12): 58-67.
MA Teng, SUN Chuanheng, LI Wenyong, et al. Design and implementation of trusted traceability system for agricultural products origin based on NB-IoT[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(12): 58-67.
- [48] 孙莉, 杨学坤, 李小杰. 基于物联网的农产品全流程追溯系统设计与实现[J]. 农业工程, 2023, 13(2): 27-34.
SUN Li, YANG Xuekun, LI Xiaojie. Design and implementation of whole process tracing system for agricultural products based on internet of things[J]. Agricultural Engineering, 2023, 13(2): 27-34.
- [49] 孙传恒, 袁晟, 罗娜, 等. 基于区块链和边缘计算的水稻原产地溯源方法研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 359-368.
SUN Chuanheng, YUAN Sheng, LUO Na, et al. Traceability method of rice origin based on blockchain and edge computing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 359-368.