

基于自适应分布式边缘计算的智慧农业大棚 控制系统

何颖¹, 郭潇雨¹, 陈羿成², 胡瑜¹, 陈淑鑫¹, 周妍³, 王睿馨⁴

(1. 天津仁爱学院 智算工程学院; 2. 天津仁爱学院 信息与智能工程学院;
3. 天津仁爱学院 能源与化工学院; 4. 天津仁爱学院 建筑工程学院, 天津 300000)

摘要: 为提高基础设施薄弱地区农业大棚控制系统的数据传输稳定性、安全性以及资源利用率, 设计一个基于自适应分布式边缘计算的智慧农业大棚控制系统, 包含数据采集模块、边缘计算模块、执行装置模块、智能决策模块以及远程控制模块。该系统通过在大棚内部署边缘计算节点, 实现了对大棚内部环境参数的实时、精准采集与处理, 从而根据采集到的数据智能调节大棚内的灌溉、温控、光照等关键设备; 同时结合卷积神经网络和多模态数据融合技术实时监控农作物生长状态, 进行病虫害预测与农作物健康评估。通过各边缘节点的协同学习, 系统整体智能水平有所提高, 数据隐私亦得到有效保护。分别以 500 条/s 和 1 000 条/s 的传输速率模拟不同负载进行测试, 结果表明该系统不仅传输速率保持平稳, 而且实现了零丢包的可靠传输, 为农业大棚控制提供了智能化、绿色化解决方案, 具有广阔的应用前景与推广价值。

关键词: 自适应; 分布式边缘计算; 智慧农业大棚; 智能调控; 多模态; 数据融合; 卷积神经网络

DOI: 10.11907/rjdk.251379

扫描二维码阅读全文: 

中图分类号: TP39

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2026)008-0139-08

Smart Agricultural Greenhouse Control System Based on Adaptive Distributed Edge Computing

HE Ying¹, GUO Xiaoyu¹, CHEN Yicheng², HU Yu¹, CHEN Shuxin¹, ZHOU Yan³, WANG Ruixin⁴

(1. School of Intelligent Computing Engineering, Tianjin Ren'ai College; 2. School of Information and Intelligent Engineering,
Tianjin Ren'ai College; 3. School of Energy and Chemical Engineering, Tianjin Ren'ai College;
4. School of Architectural Engineering, Tianjin Ren'ai College, Tianjin 300000, China)

Abstract: In order to improve the data transmission stability, security and resource utilization of the agricultural greenhouse control system in areas with weak infrastructure, a smart agricultural greenhouse control system based on adaptive distributed edge computing is designed, including data acquisition module, edge computing module, execution device module, intelligent decision-making module and remote control module. The system realizes real-time and accurate collection and processing of the internal environmental parameters of the greenhouse by deploying edge computing nodes inside the greenhouse, so as to intelligently adjust the irrigation, temperature control, lighting and other key equipment in the greenhouse according to the collected data; At the same time, the convolutional neural network and multimodal data fusion technology are combined to monitor the crop growth status in real time, and to predict pests and diseases and assess crop health. Through the collaborative learning of edge nodes, the overall intelligence level of the system has been improved, and data privacy has also been effectively protected. Simulating different loads with transmission rates of 500 lines/s and 1 000 lines/s respectively for testing, the results show that the

收稿日期: 2025-07-16

基金项目: 天津市教委科研计划项目 (2024KJ135)

作者简介: 何颖 (1984-), 女, 天津仁爱学院智算工程学院副教授, 研究方向为人工智能与图像识别; 郭潇雨 (2004-), 女, 天津仁爱学院智算工程学院学生, 研究方向为计算机科学与技术; 陈羿成 (2004-), 男, 天津仁爱学院信息与智能工程学院学生, 研究方向为物联网工程; 胡瑜 (1970-), 男, 博士, 天津仁爱学院智算工程学院副教授, 研究方向为智能制造; 陈淑鑫 (1978-), 女, 博士, 天津仁爱学院智算工程学院副教授, 研究方向为光谱图像与模式识别、计算仿真; 周妍 (2004-), 女, 天津仁爱学院能源与化工学院学生, 研究方向为新能源科学与工程; 王睿馨 (2005-), 女, 天津仁爱学院建筑工程学院学生, 研究方向为水利水电工程。本文通讯作者: 郭潇雨。

system not only maintains stable transmission rate, but also realizes reliable transmission of zero packet loss, providing intelligent and green solutions for agricultural greenhouse control, and has broad application prospects and promotion value.

Key Words: adaptive; distributed edge computing; smart agricultural greenhouse; intelligent control; multimodal; data fusion; convolutional neural network

0 引言

大棚控制系统作为现代农业设施的核心技术,近年来在智能化、精准化和网络化方面取得了显著进展^[1]。目前,该类系统主要依托物联网、传感器网络、云计算及人工智能技术实现环境参数的实时监测与调控,通过部署温湿度、光照、CO₂浓度、土壤墒情等多类型传感器,结合无线通信技术(如LoRa^[2]、NB-IoT^[3]、5G等)动态采集大棚环境数据,并通过边缘计算或云平台进行数据分析,控制通风、遮阳、灌溉、补光等执行设备,进而优化作物生长周期,提高产量和质量。

目前智慧农业大棚系统主要采用物联网技术、Qt、MQTT协议等实现实时数据显示、智能控制等功能,并对大量大棚环境数据和农作物生长数据进行分析,预测未来的环境变化趋势,从而提前采取相应的控制措施^[4-5]。例如,宋怡瑶等^[6]设计了一款以Arduino开发板为核心处理单元的智慧大棚控制系统,通过数据采集模块采集大棚内的各项环境参数并采用ESP8266芯片将数据实时传输至阿里云平台和Blinker云平台。王家旭等^[7]利用“互联网+”技术将参数信息传输至远程服务器,主控制系统根据环境参数阈值生成相关控制指令,实时对农业大棚内的环境参数进行调整。龚瑞昆等^[8]探讨了模糊控制技术在智慧农业大棚环境调控中的具体应用,并通过ZigBee物联网技术实现了环境参数的实时监测与智能控制。尽管现有智慧农业大棚控制系统已具备一定的智能化水平,但仍面临诸多挑战,如设备成本较高,中小型农户普及率有限^[9-10];在基础

设施薄弱地区的自适应控制能力不足,无法保证数据的安全性和完整性^[11];能源消耗问题突出,资源利用效率低,水、电、肥料等浪费严重^[12]。

为此,本文设计并实现了一种基于自适应分布式边缘计算的智慧农业大棚控制系统,采用群智计算与自适应边缘计算架构,通过容器化技术部署多个算法模块,结合消息中间件实现松耦合通信,在边缘端完成实时数据处理;同时采用云边协同机制,在降低网络带宽的同时减少云端计算资源。该系统能在网络环境复杂、基础设施薄弱的地区保障数据的安全性和完整性,提升农业生产的稳定性与可持续性。

1 系统总体架构

如图1所示,基于自适应分布式边缘计算的智慧农业大棚控制系统包含数据采集模块、边缘计算模块、智能决策模块、执行装置模块以及远程控制模块。其中,数据采集模块部署多种传感器(如温湿度传感器、光照强度传感器、土壤水分传感器、CO₂传感器和pH传感器),实时采集大棚环境数据并发送至边缘计算节点进行处理;边缘计算模块集成数据处理、ESP32控制器和HMI触控屏,确保快速响应^[13];智能决策模块利用AI算法提供病虫害防治和环境调控策略;执行装置模块根据智能决策模块的指令调控温湿度、灌溉、照明、通风等设备;远程控制模块通过Web平台实现用户与云服务器的交互,云服务器作为核心数据处理中心,负责生成环境调控策略。通过云端与边缘计算模块的协同,该系统实现了大棚环境的智能监控与精

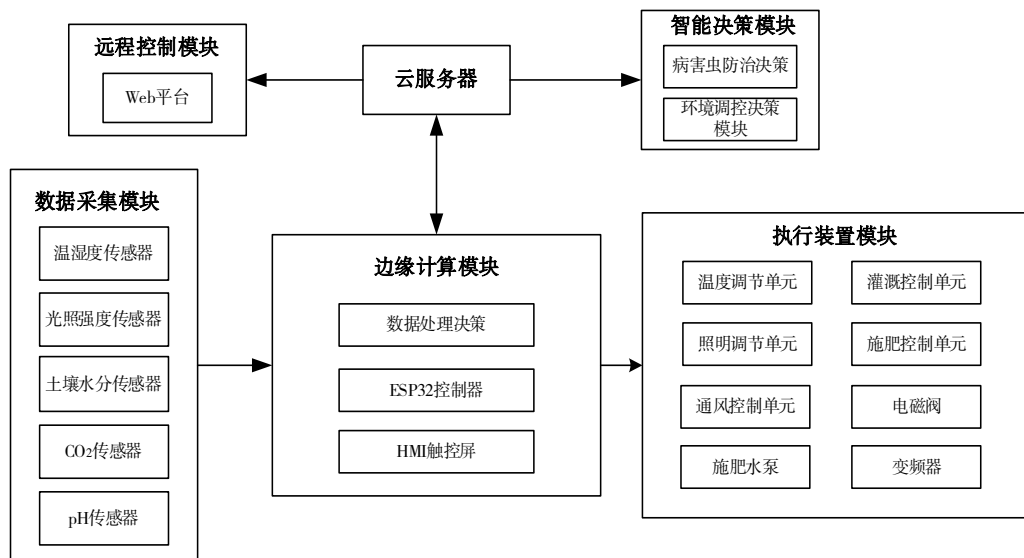


Fig. 1 Architecture of intelligent agricultural greenhouse control system based on adaptive distributed edge computing

图1 基于自适应分布式边缘计算的智慧农业大棚控制系统架构

准调节。

2 系统硬件设计

2.1 数据采集模块

数据采集模块作为大棚智能监控系统的核心,通过部署高精度温湿度、光照及土壤水分传感器,实时精准采集环境数据,经有线/无线传输至边缘计算节点清洗聚合,确保数据准确可靠。该模块采用标准化设计,支持传感器扩展,为植物生长提供理想环境参数。微控制单元(Microcontroller Unit, MCU)作为数据采集与处理中枢,通过SPI、I²C等标准通信协议协同各类高精度传感器,实现对土壤湿度、温度、酸碱度(pH值)以及大气温湿度、光照强度、CO₂浓度等环境参数的实时监测与数字化采集。其中,土壤湿度检测装置由探测电极和信号处理电路构成,采用双模输出设计。数字输出用于快速判断土壤干湿状态,模拟输出则提供精确的湿度。温度检测装置基于半导体材料的电阻温度特性(即热敏效应)将模拟信号转为数字输出。pH值检测装置采用玻璃电极传感器,配合信号调理电路和温度补偿技术,可实时反映土壤酸碱度变化。气象信息采集模块集成温湿度传感器、光照传感器和CO₂传感器等多功能环境监测装置,实现相关指标的实时监测。所有传感器通过标准I²C数字接口与主控MCU连接,内置自动校准功能。

在数据采集模块中,主控单元采用STM32H743VIT6(ARM Cortex-M7, 480 MHz, 2 MB Flash, 1 MB RAM),配备SPI(50 MHz)、I²C(1 MHz)、UART(12 Mbps)等高速接口和16位ADC(2.4 MSPS)。传感器采用TEROS 10土壤湿度传感器(0~100% VWC, ±3%)、DS18B20温度传感器(-55~125 °C, ±0.5 °C)、Atlas Scientific pH传感器(0~14 pH, ±0.1)、SHT35温湿度传感器(±0.2 °C, ±1.5%RH)、BH1750FVI光照传感器(1~65 535 lux)和SCD30 CO₂传感器(400~10 000 ppm, ±30 ppm)。通信模块采用RS485(MAX3485)、LoRa(SX1276, 433 MHz)和W5500网络接口。

2.2 边缘计算模块

系统采用分布式边缘计算架构构建农业大棚智能监测网关。作为区域数据处理的核心节点,该网关具备多协议异构设备接入、本地化AI计算和智能消息路由三大核心能力。系统通过容器化技术部署害虫识别、数据融合等算法模块,结合消息中间件实现松耦合通信,在边缘端完成实时数据处理;同时采用云边协同机制,在降低网络带宽的同时减少云端计算资源。这种设计不仅解决了传统农业物联网系统在网络条件受限环境下的传输延迟问题,而且通过边缘智能与云端计算的有机协同,在确保数据处理精度的前提下显著提升了系统整体能效比。

在边缘计算网关中,主处理器采用树莓派4B(BCM2711, 4核1.5 GHz),配备4 GB LPDDR4内存和32

GB microSD(Class 10)存储。通信接口包含双频Wi-Fi(2.4 GHz/5 GHz)、蓝牙5.0、千兆以太网、2×USB 3.0和2×USB 2.0。扩展接口采用40pin GPIO。

2.2.1 基于MQTT的服务模块

系统采用Docker容器虚拟化技术构建通信架构,通过Linux内核虚拟网络接口eth0实现容器间数据交换,绕开物理网络设备限制,在处理器内部直接完成数据传输,提升通信速率并降低丢包率^[14]。系统采用3种网络模式:①桥接模式,通过Docker0虚拟网桥为容器分配独立网络空间,实现安全隔离通信;②主机模式,直接共享宿主机网络栈,消除虚拟化开销,提升网络性能;③禁用模式,完全关闭网络功能以确保安全性。这种组网方案可根据边缘计算场景需求切换,平衡通信效率与资源利用率。

系统各容器均使用桥接模式,通过创建成对veth pair接口,将各个容器的虚拟网卡端与Docker0网桥相连接,通过网桥实现容器间的互联互通以及容器与外部网络的数据交换。本文采用桥接网络与消息总线相结合的混合通信架构。在底层网络层面,通过创建veth pair虚拟接口将各容器接入Docker0网桥,建立虚拟通信通道,降低容器间传输延迟。在应用层通信方面,采用基于MQTT协议的发布/订阅模式替代传统IP直连方式,通过内置的MQTT Broker实现统一消息路由,提升系统扩展性^[15]。这种双重通信优化机制一方面利用虚拟网络实现数据传输,另一方面通过消息中间件构建松耦合系统,支持动态节点热插拔,能满足智慧农业场景下大规模边缘节点组网需求。

2.2.2 基于边缘计算的LoRaWAN服务器模块

针对传统LoRaWAN三层架构存在的诸多局限性,本文创新性地提出一种基于边缘计算的LoRaWAN服务器下沉方案,通过重构网络拓扑结构和优化数据处理流程实现了系统性能全面提升^[16]。

(1)网络负载优化与数据处理效能提升。在传统架构中,原始感知数据需直接上传至云端处理,不仅占用大量带宽资源,而且增加了传输延迟。本文系统在边缘计算节点上集成智能数据处理功能,能够直接对来自各类传感器的环境参数进行初步分析与整合。首先,对采集的原始数据进行有效性校验和异常值剔除;其次,提取关键特征信息,同时对不同时间、空间维度的监测数据进行匹配校准;最后,对多个传感器的关联数据进行智能融合处理,形成综合性环境状态评估结果。这种边缘侧的数据预处理机制可有效减少上行数据量,既降低了网络传输压力,又通过数据质量增强算法提升了后续云端分析的准确性。

(2)系统可靠性增强与容错机制完善。传统云端集中式架构存在单点故障风险,一旦网络连接中断将导致整个系统瘫痪。本文采用服务器—网关协同设计理念,通过在边缘设备上移植LoRaWAN协议栈开源代码并集成轻量级本地决策引擎,构建包含物理层调制解调、MAC层协议处理和网络层路由功能的完整协议栈,最终形成具备自主

运行能力的微物联体系。该设计不仅支持断网续传、数据缓存等基础容错功能,而且能基于预设规则执行紧急控制策略,确保在网络异常情况下仍可维持核心业务运行,提升了系统的可用性。

(3) 实时性能优化与响应机制改进。本文采用边缘网关与 LoRaWAN 服务器一体化部署架构。在边缘网关硬件平台上直接部署容器化的 LoRaWAN 网络服务器组件,包括网络服务器、应用服务器和入网服务器三大核心功能模块。通过 Docker 容器技术对这些服务组件与网关原有功能进行集成,共享底层硬件资源,并采用轻量级虚拟化技术实现资源隔离。各服务模块间通过本地环回接口进行高速通信,避免了传统架构中网关与云端服务器之间的网络传输环节。同时,为保障服务可靠性,系统设计了双进程守护机制,确保关键服务异常时能够自动恢复。这种一体化部署方式使得 MAC 层指令处理、设备入网认证等关键操作全部在本地完成,实现了端到端的快速响应。其低延迟特性适合智能灌溉、环境预警等对实时性要求高的农业应用场景,使系统能够及时检测并响应各类突发事件。

2.2.3 Docker 容器管理

本文系统采用基于 Docker 的微服务化架构设计,通过容器虚拟化技术将 LoRaWAN 服务器、数据融合引擎和 AI 识别模块等核心功能封装为独立微服务,各服务间通过标准 API 接口实现安全通信,并支持服务发现与动态负载均衡。在资源管理方面,利用 Docker 的精细化控制机制对 CPU、内存等硬件资源进行优化分配,建立 QoS 分级保障体系并实现存储资源的动态配额管理^[17]。该架构支持功能组件的快速替换升级,具备可视化编排工具和版本控制功能,通过智能容器编排技术将异构计算任务高效分配至边缘设备,在确保关键业务实时性的同时大幅提升硬件资源利用率。

Docker Compose 作为容器化应用编排工具,采用 YAML 格式声明式配置文件,实现多容器应用的自动化部署与管理。容器、镜像、仓库作为镜像流转枢纽,在 Docker Compose 触发镜像构建时按需拉取基础镜像层,通过版本标签精准匹配。本地镜像构建完成后,按配置推送指定版本镜像至仓库,形成“开发—测试—生产”环境的镜像版本追溯链。以 Docker 服务程序作为基础支撑,向下通过 Docker 命令单独处理程序,驱动容器创建、启停等操作,借助 Docker Compose 批量化处理解析 YAML 文件,自动构建镜像,从仓库拉取基础镜像或推送本地构建镜像至仓库,同时解析服务依赖,创建专用网络,按配置拓扑顺序启动容器,对容器实例数量、资源分配参数进行精准调度,保障多容器应用栈按预设拓扑稳定运行。最终,通过标准化配置与仓库镜像管理达成复杂分布式系统部署流程的可量化、可追溯以及环境一致性,支撑容器化应用全生命周期的高效开发与运维。

2.3 病虫害防治模块

在智慧农业环境监测体系中,害虫智能识别技术发挥着关键作用。如图 2 所示,首先,通过高清摄像设备获取害虫样本图像;其次,进行图像增强、去噪等预处理操作以提升数据质量;再次,采用深度学习算法提取特征信息;最后,完成害虫分类与数量统计。这种标准化处理流程显著提升了识别准确率和运算效率,为农作物病虫害防治提供了可靠的技术支持。

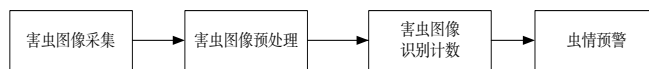


Fig. 2 The process of pest image recognition technology and early warning

图 2 害虫图像识别技术及预警流程

如图 3 所示,本文设计的智能虫情监测装置采用模块化架构,主要由 3 个功能单元构成:①图像采集单元采用树莓派控制器配合红外摄像头,实现全天候高清图像捕捉,并通过 LoRaWAN 低功耗广域网络将采集数据回传至边缘网关;②能源供给单元整合了高效单晶硅光伏板、智能充放电控制器和蓄电池箱,确保设备在野外环境下的持续稳定运行;③害虫诱集单元采用害虫诱捕黄板实现对目标害虫的选择性诱捕。这种三位一体的设计有效解决了传统农业虫情监测中存在的供电困难、数据传输受限等问题。

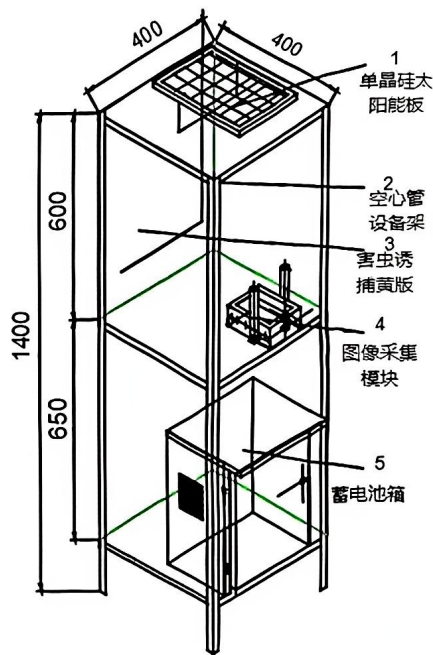


Fig. 3 Intelligent pest monitoring device

图 3 智能虫情监测装置

本文提出实现害虫图像智能识别的深度卷积神经网络 ErtesNet,核心卷积层采用局部感受野设计,通过多层卷积核逐步提取图像的空间特征,并利用参数共享机制降低模型参数量^[18];网络中间层包含交替设置的卷积层和池化层,Softmax 分类层输出各类别的概率分布,采用交叉熵损

失函数进行端到端优化。模型采用 Dropout 正则化技术进行优化控制,在每个训练迭代周期中按照 50% 的概率随机屏蔽部分神经元节点^[19]。

ErtesNet 模型采用 8 层卷积—池化交替结构,浅层使用小尺寸卷积核捕获害虫纹理等底层特征,深层通过大尺寸卷积核提取形态结构等高层语义特征。该模型通过多尺度特征融合手段增强对小尺寸害虫的检测能力,采用数据增强技术提升对拍摄角度变化的适应性,并通过轻量化处理确保在边缘计算设备上的实时运行性能。具体参数设置为:①输入层。输入经过预处理的 500×500 像素图像;②卷积层。1 层卷积核 64 个,maxpooling 池化层 1 层;2 层卷积核 128 个,maxpooling 池化层 2 层;3 层卷积核 256 个,maxpooling 池化层 3 层;4 层卷积核 256 个,maxpooling 池化层 4 层;5 层卷积核 512 个,maxpooling 池化层 5 层;6 层卷积核 512 个,maxpooling 池化层 6 层;7 层卷积核 512 个,maxpooling 池化层 7 层;8 层卷积核 512 个,maxpooling 池化层 8 层;③全连接层。全连接 4 096 个输出;④输出层。共有两个输出节点,识别对象为水稻飞虱和其他害虫。

在病虫害防治模块中,图像采集单元采用树莓派 Zero 2W(四核 1 GHz,512 MB RAM)主控,搭配 IMX219 摄像头(800 万像素,80° FOV)和 OpenCV 4.5 硬件加速图像处理,能源系统包含 100 W 单晶硅太阳能板(18 V/5.5 A)、MPPT 控制器(12/24 V 自动切换)和 12 V/20 Ah 铅酸电池。通信模块采用 SX1276 LoRa(433 MHz,20 dBm),传输距离>3 km(视距环境)。

3 系统软件设计

本文系统采用 3 层 B/S 架构,基于 Django Web 框架构建,自上而下分为用户界面层、应用服务层(含 Web 服务器与 Django MTV 架构)、数据持久层,通过 HTTP 和 WebSocket 协议实现跨层通信,构建了集用户交互、业务逻辑处理、数据存储于一体的智慧农业控制体系^[20-21]。具体如图 4 所示。

用户界面层负责实现前端用户交互,主要包括注册登录界面、实时监测界面、数据分析界面等。应用服务层采用 Django MTV 架构,其中模型层(Model)定义数据结构,映射 MySQL 数据库表,实现数据的增删改查操作。视图层(View)处理 HTTP 请求,通过类视图/函数视图实现 RESTful API 接口,整合业务逻辑,并与模型层交互。模板层(Template)基于 Django 模板引擎生成动态 HTML 页面,支持变量渲染、逻辑控制,结合前端响应式设计实现跨设备适配。URL 分配通过正则表达式映射 URL 到视图函数,实现请求的路由分发。Routing 定义 WebSocket 路由规则,将客户端连接导向指定的 Consumer。消费者层(Consumer)处理 WebSocket 消息的异步逻辑,实现高并发通信。

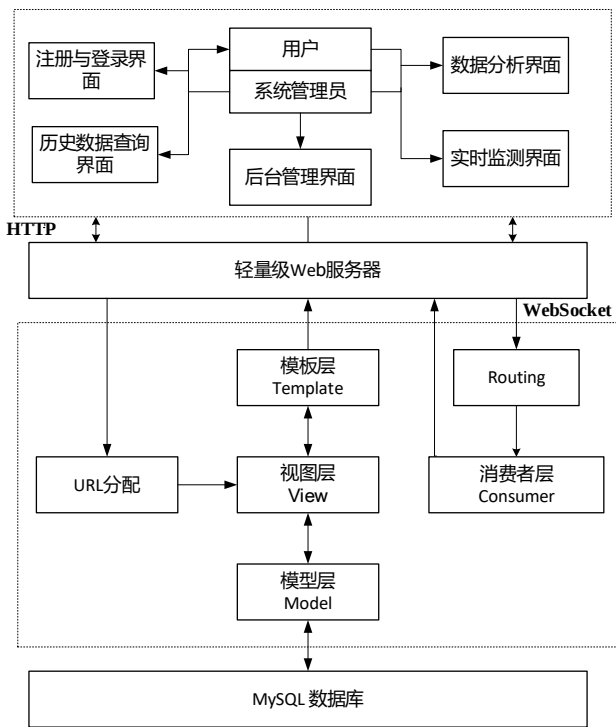


Fig. 4 Software design architecture
图4 软件设计架构

基于自适应分布式边缘计算的智慧农业大棚控制系统主界面如图 5 所示,其主要功能如表 1 所示。

用户通过系统数据实现对大棚环境的远程监控与管理。农业大棚温室环境模块主要展示目前监测点大气环境信息情况,具体功能如表 2 所示。土壤环境模块界面主要展示目前监测点土壤环境信息情况,具体功能如表 3 所示。监测点分布模块主要展示生长环境监测范围内监测点分布情况,具体功能如表 4 所示。

此外,采集控制软件在边缘计算的支持下实现了对节点模块的手动和自动控制,能够更快速地响应环境变化,提高了系统的智能化水平,改善了用户体验感。

4 系统测试与性能评估

4.1 测试环境

测试平台采用树莓派 4B(Broadcom BCM2711,四核 Cortex-A72 1.5 GHz)边缘计算网关,配备 4 GB LPDDR4 内存和 32 GB Class 10 microSD 存储,网络环境为千兆以太网(Realtek RTL8111G)和双频 Wi-Fi(2.4 GHz/5 GHz)。测试期间环境温度为 25℃,相对湿度为 50%。

4.2 边缘计算网关测试

边缘计算网关的数据传输性能直接影响整个物联网系统的运行效率。在消息吞吐量方面,网关需要维持稳定的数据传输速率;在可靠性维度,网关需要保持较高的传输成功率;此外,实时性指标也至关重要。为全面评估网关性能,本文设计分级压力测试方案,分别以 500 条/s 和 1 000 条/s 的传输速率模拟不同负载场景,记录并分析

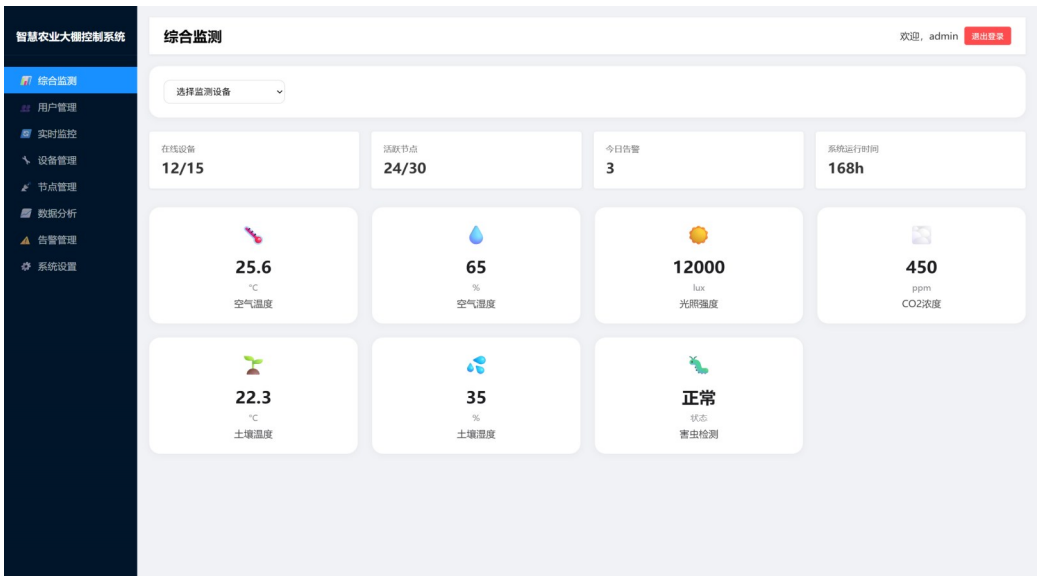


Fig. 5 Main interface of the system

图5 系统主界面

Table 1 Functions of main interface

表1 平台主界面功能

功能	说明
显示监测点信息	中间区域显示指定设备ID的监测信息,包括空气温度、空气湿度、光照强度、CO ₂ 浓度、土壤温度、土壤湿度、土壤电导率(后续会根据需求增加传感器类型)
显示监测点设备ID	根据设备ID号可以查询目前设备分组
显示主要功能菜单	左侧菜单栏列出平台主要功能,用户可点击查看具体功能
显示时间	查看植物生长环境信息更新的具体时间

Table 2 Functions of atmospheric environment module

表2 温室环境模块功能

功能	说明
查询监测点环境信息	查询指定设备ID、指定时间段的空气温度、空气湿度、光照强度及CO ₂ 浓度信息
显示监测点环境信息	显示具体时间的空气温度、空气湿度、光照强度及CO ₂ 浓度信息
导出信息	导出指定时间段的空气温度、空气湿度、光照强度及CO ₂ 浓度信息

Table 3 Functions of soil environment module

表3 土壤环境模块功能

功能	说明
查询监测点土壤环境信息	查询指定设备ID、指定时间段的土壤温度、土壤湿度、土壤电导率信息
显示监测点土壤环境信息	显示具体时间的土壤温度、土壤湿度、土壤热力图信息
导出信息	导出指定时间段的土壤温度、土壤湿度、土壤热力图信息

系统的传输时延、丢包率等关键指标。结果如表5所示。可以看出,当消息并发量分别达到500条/s和1000条/s时,系统的数据传输速率保持线性增长且无数据包丢失,证实了网关设计的合理性,其采用的负载均衡算法和资源

Table 4 Functions of monitoring point distribution module

表4 监测节点分布模块功能

功能	说明
监测节点分布查看	以卫星地图方式展示监测点的具体位置,方便用户查看
监测节点信息显示	鼠标选中指定监测点,实时显示当前点的大气环境及土壤环境信息

调度机制有效避免了系统过载风险,即使在峰值负载下也能保证服务质量,为边缘计算场景提供了可靠的硬件支撑平台。

Table 5 Edge computing gateway message transmission performance test results

表5 边缘计算网关消息传输性能测试结果

测试指标	500条/s测试结果	1000条/s测试结果
平均传输速率/msg/s	500	1000
丢包率/%	0.00	0.00
平均延迟/ms	12.3	15.7
CPU负载(%)	22.5	45.8
内存占用/MB	256	512

如表6、表7所示,在分级压力测试中,网关展现出优异的负载适应能力。当消息并发量为500条/s时,CPU平均负载仅为0.15;提升至1000条/s时,负载维持在3.6的安全阈值内,低于处理器核心数,表明资源调度机制运行有效。

在持续48h的监测中,传感器节点累计发送8640条数据,接收成功率为99.21%;害虫监测节点发送2880条数

Table 6 Average load under the condition of 500 concurrent requests per second

表6 500条/s并发条件下的平均负载

指标/%	CPU0	CPU1	CPU2	CPU3	整体均值
用户态占用	0.3	0.0	0.3	0.0	0.15
内核态占用	0.0	0.0	0.3	0.3	0.15
空闲率	99.3	100.0	99.3	99.3	99.5

Table 7 Average load under the condition of 1 000 concurrent requests per second

表 7 1 000 条/s 并发条件下的平均负载					
指标/%	CPU0	CPU1	CPU2	CPU3	整体均值
用户态占用	10.6	12.8	11.3	13.9	12.2
内核态占用	5.6	2.4	1.7	4.6	3.6
空闲率	80.8	84.8	85.7	78.9	82.6

据,接收成功率为 98.78%,系统整体数据传输可靠性达到 99.10%。具体数据统计见表 8。这些实测数据证实了网关在真实农业环境中的稳定表现。

4.3 害虫识别实验

本文基于 ErtesNet 网络架构开展水稻害虫识别实验,模型训练使用 NVIDIA RTX 3090 GPU(24 GB GDDR6X 显

Table 8 Data sending and receiving of the network within 48 hours

表 8 48 h 内网络收发数据情况			
数据类型	发送数目	接收数目	接收成功率/%
传感器节点发送数据	8 640	8 572	99.21
害虫监测节点发送数据	2 880	2 845	98.78
整体数据	11 520	11 463	99.10

存),搭配 Intel Core i9-10900K 处理器(10 核 20 线程,3.7 GHz)和 64 GB DDR4 内存,训练数据集存储于 1 TB NVMe SSD(读取速度 3 500 MB/s)。软件环境采用 Ubuntu 20.04 LTS,CUDA 11.1 和 cuDNN 8.0.5。测试数据集采用 1 000 张标注样本构建,部分害虫数据集如图 6 所示。模型优化过程中设置训练迭代次数为 50 个 epoch,批量处理规模设定为 20 张图像。



Fig. 6 Partial pest dataset

图 6 部分害虫数据集

本文考察了害虫识别网络模型在 ReLU、ELU、双曲正切函数 Tanh 以及 S 型函数 4 种激活函数下的表现差异。结果见表 9。可以看出,模型在 ReLU 激活函数下的识别准确率最高。

Table 9 Recognition accuracy under different activation functions

表 9 不同激活函数下的识别准确率	
激活函数	识别准确率/%
ELU	96.14
ReLU	98.87
Sigmoid	94.58
Tanh	95.33

将 EvtestNet 与常用神经网络 AlexNet、LeNet、VGG 进行比较,结果见表 10。可以看出,ErtesNet 在害虫识别任务中达到了 98.5% 的准确率。最后将训练完成的模型通过 TensorFlow Lite 转换为轻量级格式,部署到边缘计算网关的害虫监测模块中,以实现实时、高效的田间害虫识别功能。

5 结语

本文设计并实现了基于自适应分布式边缘计算的智慧农业大棚控制系统,通过高精度传感器和边缘计算节点

Table 10 Recognition accuracy under different network models

表 10 不同网络模型的识别准确率	
网络模型	识别准确率/%
ErtesNet	98.5
AlexNet	95.7
LeNet	93.7
VGG	96.1

实现了对温湿度、光照、土壤水分等环境参数的实时采集与处理,通过智能调控灌溉、温控等设备显著提升了资源利用效率。系统采用分布式边缘计算架构,通过节点协同学习,数据传输成功率超过 99%,既提升了整体智能水平,又保障了数据隐私;同时基于深度卷积神经网络实现了 98.5% 的害虫识别准确率。然而,当前系统仍存在一些不足之处:首先,深度学习模型的训练依赖于大量标注数据,而农业场景的数据采集和标注成本较高,可能导致模型在应对未知病虫害或环境变化时的泛化能力不足;其次,系统的能源管理虽然通过太阳能等技术得到优化,但在连续阴雨天气下,能源供应的稳定性仍需进一步提升。后续可采用以下方法优化:一是采用小样本学习、半监督学习与增量学习降低标注成本,提升模型对未知病虫害与环境变化的泛化能力,并融合多模态数据增强识别鲁棒性;二是构建太阳能+储能+备用电源的混合供能系统,结合低功耗

硬件与智能能耗调度,提升连续阴雨天气下的能源稳定性;三是进一步优化分布式边缘协同与分层计算架构,提高数据传输可靠性与节点自治能力,增强系统在复杂农业场景下的适应性与实用性。

参考文献:

- [1] LUO B W, LOU X W. Research on visualization and control system of smart greenhouses based on DNN [J]. Computer Applications and Software, 2019, 36 (1): 117-122, 131.
骆碧雯, 楼雄伟. 基于DNN的WSN智慧大棚可视化与控制系统研究[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36 (1): 117-122, 131.
- [2] GAO Y. Research on remote monitoring of agricultural environment based on LoRa and NB-IoT technology [J]. Internet of Things Technology, 2024, 14 (12): 51-55.
高云. 基于LoRa和NB-IoT技术的精准农业环境远程监测研究[J]. 物联网技术, 2024, 14 (12): 51-55.
- [3] CHEN X L, HUANG W X, LIN J. Application of LoRa and NB-IoT communication technologies in environmental monitoring [J]. Electronic Technology, 2023, 52 (1): 16-18.
陈小利, 黄戎霞, 林静. LoRa和NB-IoT通信技术在环境监测中的应用[J]. 电子技术, 2023, 52 (1): 16-18.
- [4] DAI A N, GUO S R, WANG R. Design of an intelligent agricultural greenhouse experimental system based on ESP32 [J]. Internet of Things Technologies, 2023, 13 (4): 91-94.
代爱妮, 郭书瑞, 王蕊. 基于ESP32的智慧农业大棚实验系统设计[J]. 物联网技术, 2023, 13 (4): 91-94.
- [5] LIU Y R. Application and challenges of big data technology in precision agricultural machinery operations [J]. Southern Agricultural Machinery, 2025, 56 (8): 44-46, 63.
刘艳茹. 大数据技术在精准农业机械作业中的应用与挑战[J]. 南方农机, 2025, 56 (8): 44-46, 63.
- [6] SONG Y Y, LI N. Design of an intelligent agricultural greenhouse control system based on Arduino [J]. Internet of Things Technologies, 2025, 15 (9): 98-101.
宋怡瑶, 李宁. 基于Arduino的智慧农业大棚控制系统设计[J]. 物联网技术, 2025, 15 (9): 98-101.
- [7] WANG J X, PENG L. Research on the design of agricultural greenhouse systems based on "Internet+" [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46 (1): 234-237.
王家旭, 彭霖. 基于“互联网+”的农业大棚系统设计研究[J]. 农机化研究, 2024, 46 (1): 234-237.
- [8] GONG R K, TIAN Y. Application of fuzzy control in ZigBee IoT-based smart agricultural greenhouses [J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43 (8): 93-96, 100.
龚瑞昆, 田野. 模糊控制在ZigBee物联网智慧农业大棚中的应用[J]. 现代电子技术, 2020, 43 (8): 93-96, 100.
- [9] ZHAO Z. Feasibility study on the mechanization of greenhouse vegetable production [J]. Agricultural Science and Technology Information, 2018 (15): 48-50.
赵真. 大棚蔬菜生产实现机械化作业的可行性研究[J]. 农业科技与信息, 2018 (15): 48-50.
- [10] DU Z L, LI C X, WANG B T, et al. Design of an intelligent agriculture system based on STM32 microcontroller [J]. Electronic Production, 2024, 32 (22): 57-60.
都治楠, 李长星, 王斌涛, 等. 基于STM32单片机的智慧农业系统设计[J]. 电子制作, 2024, 32 (22): 57-60.
- [11] ZHANG Y F. A brief discussion on the current status and improvement measures for greenhouse vegetables [J]. Agricultural Technical Services, 2015, 32 (12): 45.
张雨芳. 浅谈大棚蔬菜发展的现状及改进措施[J]. 农技服务, 2015, 32 (12): 45.
- [12] XIE Q L, LU W, YANG J J, et al. Design of a field melon irrigation monitoring system based on location services [J]. Internet of Things Technology, 2019, 9 (8): 14-15, 18.
解乔林, 卢文, 杨锦婕, 等. 基于位置服务的酥瓜大田灌溉监控系统设计[J]. 物联网技术, 2019, 9 (8): 14-15, 18.
- [13] CHENG J X, YANG R, WEI X Y, et al. Design and implementation of an intelligent constant-temperature cup pad based on ESP32 [J]. Internet of Things Technologies, 2025, 15 (10): 63-66.
程计欣, 杨嵘, 魏欣雨, 等. 基于ESP32的智能恒温杯垫的设计与实现[J]. 物联网技术, 2025, 15 (10): 63-66.
- [14] WANG X J. Research on automated testing of software engineering based on Docker containerization technology [J]. Network Security and Informationization, 2025 (4): 110-112.
王曦黎. 基于Docker容器化技术的软件工程自动化测试研究[J]. 网络安全和信息化, 2025 (4): 110-112.
- [15] LI P B, HOU W T, KANG H F. Application of IoT gateway based on MQTT protocol in the new energy field [J]. Industrial Control Computer, 2025, 38 (4): 63-64.
李鹏斌, 侯文腾, 康洪斐. 基于MQTT协议的物联网网关在新能源领域的应用[J]. 工业控制计算机, 2025, 38 (4): 63-64.
- [16] YU H W, HE L. Analysis of LoRa technology and urgent research issues [J]. Electrical Engineering Technology, 2025 (5): 193-197.
于华伟, 何磊. LoRa技术分析与亟待研究的问题[J]. 电工技术, 2025 (5): 193-197.
- [17] SUN C H, CHEN Y M, WANG J. Research on end-to-end QoS deployment strategy for PCC [J]. Telecommunications Network Technology, 2014 (8): 46-52.
孙成虎, 陈艳敏, 王佳. PCC端到端QoS部署策略研究[J]. 电信网技术, 2014 (8): 46-52.
- [18] LIU B, LIU J, WU C, et al. Correlation entropy extreme learning machine combining spatial pyramid and local receptive fields [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43 (8): 2343-2351.
刘彬, 刘静, 吴超, 等. 空间金字塔与局部感受野相结合的相关熵极限学习机[J]. 电子与信息学报, 2021, 43 (8): 2343-2351.
- [19] HUANG D T, HUANG W Q, YUN H J, et al. Application of regularization techniques and low-rank matrix in sparse representation super-resolution algorithm [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30 (5): 868-877.
黄德天, 黄炜钦, 云海蛟, 等. 正则化技术和低秩矩阵在稀疏表示超分辨率算法中的应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30 (5): 868-877.
- [20] WEI P A. Development and application of a web-based learning platform based on Django [J]. Shanxi Electronic Technology, 2023 (2): 71-73.
韦平安. 基于Django的网络学习平台的开发与应用[J]. 山西电子技术, 2023 (2): 71-73.
- [21] BAI T. Research on remote interaction design of service robots based on WebSocket [J]. China New Telecommunications, 2025, 27 (2): 14-16.
白涛. 基于WebSocket的服务型机器人远程交互设计研究[J]. 中国新通信, 2025, 27 (2): 14-16.

(责任编辑:尹晨茹)