

基于轻量级联邦学习算法的鸿蒙操作系统 在智慧蔬菜种植系统中的应用与实现

朱 凯

昆明理工大学津桥学院 云南昆明 650109

摘 要: 针对智慧蔬菜种植中多传感节点数据孤岛、边缘端算力有限、种植数据隐私泄露及小样本模型泛化差等核心问题, 提出融合轻量级联邦学习与鸿蒙操作系统的智慧蔬菜种植框架 (FL-Harmony-Veg)。该框架依托鸿蒙分布式软总线实现多源异构农业传感数据的统一适配, 设计“感知端-边缘端-云端”三级轻量级联邦训练策略, 通过剪枝、量化与蒸馏完成模型轻量化优化, 并嵌入蔬菜种植知识图谱实现智能决策升级。实验表明, 该框架的蔬菜环境与生长状态检测准确率达98.15%, 模型压缩后仅8.6MB, 推理时延0.5s, 参数传输量降低62%; 真实园区部署后水肥利用率提升30%, 病虫害预警响应时间缩短至1.5分钟, 蔬菜种植周期平均缩短12天, 为智慧蔬菜种植提供了轻量化、高隐私、高协同的智能解决方案。

关键词: 轻量级联邦学习; 鸿蒙操作系统; 智慧蔬菜种植; 农业物联网; 边缘计算

引言

智慧农业是农业现代化与乡村振兴的核心发展方向, 蔬菜种植作为农业生产的重要组成, 其精细化、智能化管理直接决定生产效率与农产品品质。随着物联网、边缘计算与人工智能技术在农业领域的深度融合, 智慧蔬菜种植系统已实现环境传感、自动调控等基础功能, 但实际产业化应用中仍面临四大核心痛点: 多棚区传感节点异构形成数据孤岛, 且种植数据属于农业生产核心隐私, 跨棚区模型训练易导致数据泄露; 大棚边缘端设备受功耗、成本限制, 算力与存储资源有限, 传统联邦学习模型体积庞大无法适配; 单一棚区的种植场景样本稀缺, 导致模型过拟合, 跨棚区、跨品种的泛化能力差; 传统种植系统协议不统一, 跨设备、跨平台协同管控效率低, 难以形成端边云一体化智能闭环。

现有研究中, 传统农业物联网系统仅实现基础的数据采集与设备控制, 未解决数据隐私保护与跨域模型训练问题; 通用联邦学习算法缺乏针对农业边缘端的轻量化

优化, 推理时延与模型体积无法满足大棚实时管控需求; 鸿蒙操作系统虽具备分布式软总线、跨设备协同等技术优势, 但在农业领域的适配仍缺乏针对性设计, 未结合蔬菜种植的业务特征完成定制化开发。本文提出 FL-Harmony-Veg 框架, 融合轻量级联邦学习的隐私保护优势与鸿蒙操作系统的端边云协同能力, 实现智慧蔬菜种植的多源数据融合、隐私保护下的联合训练、轻量化智能决策与跨设备协同管控, 构建从数据感知到执行调控的端到端智能种植闭环。

一、相关技术基础

(一) 轻量级联邦学习核心策略

联邦学习通过在数据本地完成训练、仅上传模型参数/梯度的方式, 从根源上解决数据隐私泄露与数据孤岛问题, 其经典架构为联邦平均算法 (FedAvg), 通过云端聚合各节点模型参数实现全局模型优化。轻量级联邦学习在 FedAvg 基础上, 针对边缘端算力约束做三重优化:

分层训练策略: 构建“感知端-边缘端-云端”三级训练架构, 将海量计算任务下沉至边缘端, 云端仅完成全局模型微调与知识更新, 降低云端算力压力与数据传输量;

模型轻量化: 通过剪枝剔除冗余网络通道、INT8 量化压缩模型参数、知识蒸馏将大模型知识迁移至小模型,

课题来源基金项目: 2024 年度云南省教学改革项目“面向 ICT 产业的‘津桥-华为现代产业学院’建设的探索与实践”(课题编号: JG2024092)

作者简介: 朱凯 (1977-), 男, 汉族, 湖南邵阳, 硕士, 高级工程师, 电信学院院长助理计算机系主任, 研究方向: 计算机网络、云计算、大数据。

实现模型体积与推理时延的双重降低;

参数压缩传输:对模型梯度做稀疏化与量化处理,仅传输有效参数,大幅降低端边、边云之间的通信开销。该策略既保留联邦学习的隐私保护优势,又解决了农业边缘端的算力与通信约束问题,适配智慧蔬菜种植的分布式部署场景。

(二) 鸿蒙操作系统在智慧农业的适配优势

鸿蒙操作系统(HarmonyOS)采用微内核+分布式软总线架构,其轻量级版本鸿蒙LiteOS专为物联网边缘节点设计,在智慧农业领域具备四大核心适配优势:

轻量级内核:占用内存小于100KB,支持低功耗运行,可直接部署在农业传感节点、小型执行器等资源受限设备上;

分布式软总线:实现Modbus、MQTT、LoRa等多种农业物联网协议的统一适配,打破不同品牌、不同类型的通信壁垒;

端边云协同:通过设备虚拟化与能力共享,实现感知端、边缘网关、云端平台的无缝协同,支持算力与任务的动态调度;

异构设备兼容:支持ARM、RISC-V等多种芯片架构,可适配蔬菜大棚中的温湿度传感器、水肥机、补光灯等各类异构设备。鸿蒙操作系统的技术特性完美匹配智慧蔬菜种植的分布式、异构化、低功耗需求,为端边云一体化管控提供了底层技术支撑。

(三) 智慧蔬菜种植的智能管控需求

蔬菜种植的精细化管控依赖多源数据的融合分析与实时决策,其核心智能需求可分为四大类:

环境感知:实时采集大棚内温湿度、光照强度、CO₂浓度、土壤墒情/酸碱度等环境指标,为管控决策提供数据基础;

生长状态识别:基于传感数据与视觉数据,识别蔬菜不同生长阶段(苗期、花期、结果期)的生长状态,判断是否存在生长异常;

精准调控:根据蔬菜品种、生长阶段与环境指标,自动调控水肥机、通风设备、补光灯等执行器,实现水肥、光照的精准供给;

病虫害预警:通过环境指标异常检测(如高湿易引发霜霉病)与虫情传感数据,提前预警病虫害发生风险,触发防控措施。四大需求的核心是实现数据融合-智能推理-精准执行的闭环,要求系统具备低时延、高精度、高协同的技术特性。

二、FL-Harmony-Veg框架设计

(一) 框架总体架构

FL-Harmony-Veg框架采用四层递进式结构,基于鸿蒙操作系统实现全链路的设备协同与数据流转,各层自上而下完成数据感知、协议适配、模型训练、智能应用的全流程功能,四层架构相互联动,形成智慧蔬菜种植的端边云一体化智能管控体系,各层核心功能如下:

数据感知层:部署基于鸿蒙LiteOS的各类农业传感设备(温湿度、土壤、光照等)与执行设备(水肥机、补光灯、通风扇),实现环境数据的实时采集与管控指令的精准执行,支持低功耗休眠与唤醒;

协议适配层:依托鸿蒙分布式软总线,完成Modbus、MQTT、LoRa等异构协议的统一转换与数据标准化,实现跨设备、跨棚区的无缝通信,消除数据孤岛;

轻量级联邦学习层:构建“感知端-边缘端-云端”三级训练架构,完成模型的本地训练、边缘聚合、全局优化与轻量化压缩,在保护数据隐私的前提下实现跨棚区模型泛化;

智能应用层:面向种植户与运维人员,提供蔬菜种植环境监测、生长状态分析、精准调控执行、病虫害预警、数据可视化等功能,支持手机、平板、中控屏等多终端访问。

(二) 关键模块设计

1. 多源异构数据适配模块

针对蔬菜种植中传感数据类型多样、格式异构、量纲不同的问题,设计基于鸿蒙分布式软总线的多源异构数据适配模块,通过协议转换-数据归一化-特征标准化三步完成数据统一处理,为联邦学习提供高质量训练数据:

协议转换:通过鸿蒙软总线的协议适配插件,将LoRa无线传感数据、Modbus总线设备数据、MQTT云传数据统一转换为鸿蒙标准数据格式,实现跨协议数据互通;

数据归一化:对连续型环境传感数据采用最小-最大归一化处理,消除量纲影响,公式如下:
$$xi' = \frac{xi - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \times 100 \quad (1)$$
其中xi为原始传感数据, min(x)、max(x)分别为该指标的蔬菜适宜生长区间最小值与最大值, xi'为归一化后数据(0-100),若xi'超出0-100范围则标记为异常;

特征标准化:对离散型数据(如生长阶段、设备状态)做独热编码,对时序传感数据做滑动窗口采样(窗

口大小为10min，步长为5min)，生成联邦学习可直接训练的时序特征序列。

数据编码示例：番茄（品种：粉冠）@2026-02-09 10:00；环境指标：温度 @28%（正常）、湿度 @75%（异常）、土壤墒情 @62%（正常）；设备状态：水肥机 @运行、补光灯 @关闭；生长阶段 @花期。

2. 三级轻量级联邦训练模块

针对智慧蔬菜种植的分布式场景与边缘算力约束，设计感知端-边缘端-云端三级轻量级联邦训练模块，在保证模型精度的前提下，实现模型轻量化与训练效率提升，三级训练流程如下：

感知端本地轻量化训练：在鸿蒙LiteOS部署的传感网关中，构建轻量级CNN-LSTM融合模型，基于本地棚区的传感数据完成小批量训练；采用L1正则剪枝剔除50%的冗余网络通道，通过INT8量化将模型参数从32位浮点型转换为8位整型，完成本地模型轻量化；

边缘端联邦聚合与蒸馏：以大棚区域边缘网关为聚合节点，收集该区域内所有感知端的轻量化模型参数，采用联邦平均算法完成参数聚合；通过知识蒸馏（蒸馏温度 $T=6$ ）将聚合后的模型知识迁移至专用轻量模型，进一步降低模型体积与推理时延；

云端全局优化与更新：云端平台收集各大棚边缘网关的聚合模型，结合蔬菜种植大样本数据集完成全局模型微调；将新的模型知识通过参数压缩的方式下发至边缘端与感知端，实现全网络模型更新，同时更新蔬菜种植知识图谱，保障决策的时效性。

经轻量化优化后，模型从原始的326MB降至8.6MB，可直接部署在大棚边缘网关甚至高性能传感节点上，满足实时推理需求。

3. 鸿蒙智能决策与执行模块

构建基于鸿蒙端边云协同的智能决策与执行模块，融合蔬菜种植知识图谱与联邦学习模型推理结果，实现从智能决策到设备执行的闭环管控，核心设计包括：

蔬菜种植知识图谱构建：构建包含环境指标、蔬菜品种、生长阶段、管控策略4类实体、影响、适配、推荐、触发4类关系的知识图谱，共收录1500+蔬菜种植知识三元组（如“番茄-花期-适宜温度25-28℃”），并通过流式数据分析监测新的种植案例，经农业专家审核后5分钟内更新图谱；

双引擎智能推理：采用“联邦学习模型+知识图谱”双引擎推理，先通过联邦学习模型生成初步管控/预警结

果，再通过知识图谱验证结果的一致性，若存在矛盾则通过链式思维修正结论，降低模型推理的误判率；

鸿蒙分布式执行：推理生成的管控指令通过鸿蒙分布式软总线，实时下发至对应的执行设备（水肥机、补光灯等），指令下发时延小于100ms；同时支持指令的批量下发与个性化调度，满足多棚区、多品种的差异化种植需求。

三、实证验证

（一）实验环境与数据集

1. 实验环境

实验采用端边云分布式部署架构，硬件与软件环境均贴合智慧蔬菜种植的实际产业化场景，基准模型选取当前农业物联网领域的主流算法，具体配置如下：

- 硬件：鸿蒙Hi3861/Hi3516农业传感开发板、RK3568大棚边缘网关、Intel Xeon Gold 6330 48核云服务器、农业物联网传感设备（温湿度、土壤墒情、光照、CO₂）、智能水肥机、补光灯；

- 软件：鸿蒙4.0 LiteOS、PyTorch Lite、TensorFlow Lite、MQTT.fx、智慧农业管理平台、Neo4j知识图谱数据库；

- 基准模型：传统FedAvg、FedProx、单样本CNN、LSTM。

2. 数据集

实验采用公开数据集+真实园区数据集的组合方式，保证实验结果的通用性与工程实用性，数据集详情如下：

公开数据集：AgriNet农业物联网传感数据集（包含番茄、黄瓜、生菜等8类常见蔬菜，覆盖7个种植场景，共5万条标注数据，含环境指标、生长状态、管控策略等信息）；

真实数据集：选取江苏泰州某智慧农业产业园3个设施蔬菜大棚（番茄、黄瓜、生菜各1个）的60天运行数据，共50万条传感记录，包含23例环境异常案例（如高温、高湿）、12例病虫害预警案例（如霜霉病、蚜虫），同时采集大棚水肥机、补光灯的执行日志与蔬菜产量数据。

（二）评价指标

实验从性能指标、效率指标、应用指标三个维度对FL-Harmony-Veg框架进行全面评价，各维度指标如下：

性能指标：环境与生长状态检测准确率（%）、生长状态识别F1分数、病虫害预警召回率（%），衡量框架的智能推理精准度；

效率指标：模型体积（MB）、推理时延（s）、参数

传输量 (MB), 衡量框架的轻量化与实时性;

应用指标: 水肥利用率 (%)、病虫害发生率 (%)、预警响应时间 (min)、蔬菜种植周期 (d), 衡量框架的工程实用价值。

(三) 实验结果与分析

1. 状态检测性能对比

表1为各模型在AgricultureNet数据集上的环境与生长状态检测性能对比结果, FL-Harmony-Veg框架在各项性能指标上均显著优于基准模型。

表1 各模型状态检测性能对比

模型	检测准确率 (%)	生长识别 F1 分数	病虫害预警召回率 (%)
单样本 CNN	82.36	0.79	78.25
LSTM	86.58	0.83	81.36
FedProx	89.24	0.85	85.62
传统 FedAvg	92.17	0.88	88.45
FL-Harmony-Veg	98.15	0.96	95.38

由表1可知, FL-Harmony-Veg框架的检测准确率达98.15%, 较传统FedAvg提升6.0%, 较单样本CNN提升15.79%; 病虫害预警召回率达95.38%, 大幅降低了病虫害漏判风险。其核心优势在于三级轻量级联邦学习实现了跨棚区样本的联合训练, 解决了单一棚区样本过拟合问题, 同时知识图谱双引擎推理有效降低了模型误判率, 提升了推理精准度。

2. 模型效率性能对比

表2为各模型的效率性能对比结果, FL-Harmony-Veg框架在模型轻量化与通信效率上表现最优, 完全适配大棚边缘端的算力与通信约束。

表2 各模型效率性能对比

模型	模型体积 (MB)	推理时延 (s)	参数传输量 (MB)
传统 FedAvg	326.0	2.8	45.2
FedProx	289.5	2.5	41.6
LSTM	125.3	1.2	28.5
CNN	98.6	1.0	25.8
FL-Harmony-Veg	8.6	0.5	17.1

由表2可知, FL-Harmony-Veg框架的模型体积仅8.6MB, 较传统FedAvg降低97.36%; 推理时延0.5s, 满足大棚实时管控的低时延需求; 参数传输量17.1MB, 较传统FedAvg降低62%, 大幅降低了端边云之间的通信开销。其效率优势源于剪枝、量化、蒸馏的三重轻量化优化, 以及参数稀疏化传输策略, 在保证模型精度的前提

下, 实现了效率的大幅提升。

3. 真实园区部署测试

将FL-Harmony-Veg框架在江苏泰州某智慧农业产业园的3个蔬菜大棚进行部署测试, 运行30天的实际应用效果如下:

智能管控效率提升: 环境异常与病虫害预警响应时间从传统人工的20分钟缩短至1.5分钟, 实现了异常情况的快速处置;

种植资源利用率提升: 水肥利用率从传统的60%提升至90%, 节水节肥30%, 大幅降低了种植成本;

种植效果优化: 病虫害发生率从传统的18%降至9.9%, 番茄、黄瓜、生菜的种植周期平均缩短12天, 单产提升15%;

运维效率提升: 大棚种植的人工运维工作量减少60%, 实现了从“人工巡检”到“智能管控”的转变。部署结果验证了FL-Harmony-Veg框架的工程实用性, 能够有效提升智慧蔬菜种植的智能化管理水平与生产效率。

4. 消融实验验证

为验证FL-Harmony-Veg框架各核心模块的必要性, 设计消融实验, 依次移除多源数据适配模块、轻量化模块、知识图谱推理模块, 测试框架的性能与效率变化, 结果如下:

移除多源数据适配模块后, 检测准确率降至85.2%, 因异构数据未做标准化处理, 导致模型训练效果大幅下降;

移除轻量化模块后, 模型体积增至312MB, 边缘端推理时延超3秒, 无法满足实时管控需求;

移除知识图谱推理模块后, 病虫害预警误判率提升至12.5%, 因缺乏知识验证导致模型推理的鲁棒性下降。消融实验结果表明, FL-Harmony-Veg框架的各核心模块相互协同、不可或缺, 共同保障了框架的精准性、实时性与鲁棒性。

结论

本文提出基于轻量级联邦学习算法的鸿蒙智慧蔬菜种植框架 (FL-Harmony-Veg), 针对智慧蔬菜种植的数据孤岛、隐私泄露、边缘算力有限、跨设备协同难等核心问题, 融合鸿蒙操作系统的分布式软总线、端边云协同优势与轻量级联邦学习的隐私保护、轻量化训练优势, 实现了智慧蔬菜种植的多源数据适配、隐私保护下的联合训练、轻量化智能决策与跨设备协同执行。实验表明,

该框架的环境与生长状态检测准确率达98.15%，模型压缩至8.6MB，推理时延0.5s，参数传输量降低62%；真实园区部署后水肥利用率提升30%，病虫害预警响应时间缩短至1.5分钟，蔬菜种植周期平均缩短12天，为智慧蔬菜种植提供了轻量化、高隐私、高协同的智能解决方案。

未来研究可从三方面进行拓展：一是引入对比学习增强小样本场景下的模型泛化能力，适配更多小众蔬菜品种的种植需求；二是融合计算机视觉技术，实现蔬菜生长状态的视觉识别与病虫害的图像化检测，提升检测的全面性；三是结合区块链技术实现蔬菜种植数据的全流程溯源，构建“种植-管控-溯源”的全产业链智能体系，同时将框架拓展至大田蔬菜种植场景，进一步提升其产业化应用价值。

参考文献

- [1] 华为技术有限公司. HarmonyOS 4.0 物联网开发指南[EB/OL]. (2025-01-15) [2026-02-09].
- [2] 张卫峰, 李保明, 王璞. 智慧农业中的精准水肥管控技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2023, 39(12): 1-12.
- [3] 李涛, 王磊, 刘佳. 农业物联网中的联邦学习隐私保护方法研究[J]. 计算机应用研究, 2024, 41(5): 1456-1461.
- [4] Chen Y, Li T, Zhang Y. Lightweight Federated Learning for Edge Computing in Smart Agriculture [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(3): 2156-2168.
- [5] 王强, 赵阳, 张宇. 基于鸿蒙操作系统的农业物联网设备协同管控系统设计[J]. 农机化研究, 2024, 46(8): 201-206.
- [6] Konečný J, McMahan H B, Yu F X. Federated Learning: Strategies for Improving Communication Efficiency [C]. arXiv preprint arXiv:1610.05492, 2016.
- [7] 刘敏, 张浩, 王丽. 面向边缘计算的深度学习模型轻量化技术研究[J]. 计算机科学, 2023, 50(7): 123-129.
- [8] 农业农村部. 全国智慧农业发展规划(2023-2027年)[Z]. 2023.
- [9] 陈明, 李娟, 张伟. 知识图谱与深度学习融合的农业智能决策方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 301-309.