 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i8.7035

Research on Intelligent Warehouse Corruption Early Warning System Based on ESP32

Xin He

Anhui Finance and Trade Vocational College, Hefei, Anhui, 231200, China

Abstract

Aiming at the problem of huge economic losses caused by spoilage and deterioration of Dangshan pear during storage, this study aims to design and implement a low-cost, real-time odor monitoring and early warning system based on Internet of Things technology and artificial intelligence. The system takes ESP32-S3 as the main control chip, integrates five gas sensors including methane, carbon monoxide, volatile organic compounds (VOC), alcohol/odor and formaldehyde, and builds an electronic nose array. Collect sensor data and train the classification models of "good pears" and "corrupt pears", and deploy the lightweight TensorFlow Lite model on the ESP32 end for real-time edge inference. The system provides local early warnings through display screens and LED lights, and simultaneously uploads data to the Internet of Things cloud platform via the MQTT protocol, offering a real-time data visualization interface. Experimental tests show that the system's recognition accuracy rate for the rotten state of pear trees reaches 91.3%, and the time consumption for a single inference is less than 700ms. It can achieve data synchronization and real-time monitoring on the local area network and cloud platform. This system provides a non-contact detection solution for the storage of Dangshan pear, featuring low power consumption, high real-time performance and easy deployment. It has broad application prospects in the field of intelligent storage of agricultural products.

Keywords

ESP32, Electronic nose, Edge computing, Odor recognition, The rotten pears, Intelligent warehousing, Internet of Things

基于 ESP32 的智能仓储腐败预警系统研究

何鑫

安徽财贸职业学院，中国 · 安徽 合肥 231200

摘　要

针对砀山酥梨在仓储过程中因腐败变质导致巨大经济损失的问题，本研究旨在设计并实现一种基于物联网技术与人工智能的低成本、实时气味监测预警系统。系统以ESP32-S3为主控芯片，集成甲烷、一氧化碳、挥发性有机物VOC、酒精/臭味及甲醛五种气体传感器，构建电子鼻阵列。采集传感器数据并训练“好梨”与“腐败梨”的分类模型，将轻量化TensorFlow Lite模型部署于ESP32端进行实时边缘推理。系统通过显示屏与LED灯提供本地预警，同时将数据通过MQTT协议上传至物联网云平台，提供实时数据可视化界面。实验测试表明，系统对酥梨腐败状态的识别准确率达91.3%，单次推理耗时小于700ms，能够在局域网和云平台实现数据同步与实时监控。本系统为砀山酥梨仓储提供了一种非接触式检测方案，具备低功耗、高实时性、易于部署的特点，在农产品智能仓储领域具有广阔的应用前景。

关键词

ESP32；电子鼻；边缘计算；气味识别；酥梨腐败；智能仓储；物联网

1 引言

砀山酥梨作为中国国家地理标志产品，是安徽省砀山县的支柱性农业产业，其种植与销售直接影响当地经济发展与农民收入。然而，酥梨属于呼吸跃变型果实，采后贮藏过程中极易因微生物侵染、自身代谢等因素导致腐败变质，产生乙醇、乙烯、醛类、酮类及酯类等挥发性有机物 (VOCs)[1]。据初步统计，仅在砀山地区，每年因仓储腐烂导致的酥梨损失就高达数亿元人民币。传统的仓储监测主要依赖于人工巡检和经验判断，通过观察果皮颜色、触摸果实软硬程度及嗅闻异常气味等方式进行，这种方式不仅主观性强、效率低下，而且无法实现早期预警，往往发现时腐败已扩散，造成不可逆的经济损失。

随着物联网 (IoT) 和人工智能 (AI) 技术的发展，智能农业已成为解决传统农业痛点的新范式。在果实保鲜监测领域，电子鼻 (E-Nose) 技术作为一种模拟生物嗅觉系统的气体分析工具，通过传感器阵列对挥发性成分进行非破坏性检测，并结合模式识别算法对气味进行定性或定量分析，展现出巨大潜力 [2]。加德纳等人早在上世纪九十年代便阐述了电

【作者简介】何鑫（1997–），男，硕士，助教，从事电子信息工程技术研究。

子鼻的基本原理与应用前景 [3]。近年来，已有研究将电子鼻应用于苹果、香蕉、猕猴桃等水果的成熟度与腐败度检测 [4-5]，但针对砀山酥梨这一特定品类，且专注于解决其大规模仓储场景下实时、在线监测的研究仍相对匮乏。

现有的商业化气体监测设备多存在价格昂贵、体积庞大、需专业操作、依赖云端计算（导致响应延迟）等问题，难以在广大农村地区的梨窖、库房中大规模普及应用。

因此，本研究立足于上述实际需求与技术缺口，设计并实现了一套基于 ESP32 主控与多传感器数据融合的砀山酥梨智能仓储腐败预警系统。本研究的核心内容与创新点在于：

1. 低成本硬件集成：选用高性价比的商用金属氧化物半导体 (MOS) 气体传感器构建阵列，覆盖酥梨腐败的关键标志性气体。

2. 边缘智能实现：利用 Edge Impulse 平台完成数据采集、训练与模型部署，将 AI 推理过程完全放在 ESP32 微控制器上执行，实现了真正的边缘侧实时响应，降低了对网络连接的依赖。

3. 多模态预警机制：结合本地 LED 灯、LCD 显示屏、本地 Web 界面和远程云平台 (App) 四种方式提供分级预警，满足不同场景下的监控需求。

4. 系统化解决方案：提供了一个从传感层、网络层到应用层的完整物联网系统原型，为后续产业化应用奠定了技术基础。

本研究旨在通过一个切实可用的原型系统，验证基于边缘 AI 的电子鼻技术在酥梨仓储监测中的可行性，为降低农产品产后损失、推动智慧农业发展提供一种新的技术手段。

2 系统设计与研究内容

本章将详细阐述整个系统的总体架构、硬件选型与设计、软件算法以及系统工作流程。

2.1 系统总体架构

本系统采用物联网典型的三层架构：感知层、网络层和应用层。

感知层：由 ESP32-S3 主控模块和多种气体传感器组成的数据采集终端，负责采集仓储环境中的气体数据并进行初步的预处理和边缘 AI 计算。

网络层：利用 ESP32 内置的 Wi-Fi 模块，将感知层处理后的状态信息和原始数据通过 MQTT 协议上传至阿里云物联网平台，同时内置 Web 服务器，允许在局域网内通过 HTTP 协议访问。

应用层：包括本地的 LCD 显示屏与 RGB LED 指示灯、局域网内的 Web 可视化界面以及远程的阿里云平台及手机 App，为用户提供多维度的数据展示和预警服务。

2.2 硬件设计与选型

系统的硬件核心是 ESP32-S3 开发板，其选择基于以下考量：双核 Xtensa® 32 位 LX7 处理器，主频高达 240MHz，提供足够的计算能力进行边缘 AI 推理；内置 8MB PSRAM，可满足相对复杂的机器学习模型运行需求；集成 2.4GHz Wi-Fi 和蓝牙 5.0，提供灵活的通信方式；丰富的 GPIO 和外设接口（ADC、I2C 等），便于连接多种传感器和外设。

传感器阵列是系统的“嗅觉”器官，其选型直接决定系统的检测性能。根据前期文献调研与预实验，砀山酥梨腐败过程中会产生乙醇、乙烯、甲烷、醛类、酮类及少量一氧化碳等 VOCs。因此，我们选用了以下五种传感器构成阵列：

MQ-4 传感器：对甲烷 (CH4) 具有高灵敏度，也可检测其他烷类气体。

MQ-9 传感器：对一氧化碳 (CO) 敏感，也可检测甲烷和 LPG，作为交叉验证的补充。

MQ-135 传感器：对苯、氨氮、硫化物、油烟等 VOC 气体有良好的灵敏度，覆盖范围广。

MQ-3 传感器：对酒精（乙醇）具有极高的灵敏度，是检测果实无氧呼吸产生的乙醇的关键传感器。

ZE08-CH2O 传感器：专门用于检测甲醛 (HCHO)，采用串口输出，数字化程度高，精度较好。

所有传感器均通过 ESP32 的模拟输入引脚或串口进行数据采集。为提供人机交互接口，系统配备了：

LCD1602 显示屏（I2C 接口）：用于实时显示当前 AI 判断结果（如“Good”或“Spoiled”）及模型置信度。

RGB LED 灯：用于提供直观的颜色预警（绿色代表正常，红色代表腐败）。

硬件连接采用面包板和杜邦线搭建原型，布局规整，电源引脚与信号引脚分区布置，采用 AMS1117 稳压模块为系统提供稳定的 3.3V 和 5V 电压，确保各模块工作稳定，无过载风险。

2.3 软件与算法设计

系统的软件部分是实现智能化的关键，主要包括数据采集、模型训练与部署、通信与可视化三大部分。

2.3.1 数据采集与预处理

首先，需要采集足够的数据用于训练分类模型。我们使用 Edge Impulse 平台的数据转发器（Data Forwarder）工具，将 ESP32 通过串口连接的传感器原始数据（模拟电压值或数字浓度值）实时上传至 Edge Impulse 云端项目。在采集过程中，分别对新鲜酥梨和人为诱导腐败的酥梨（刺伤处理）样本进行长时间监测，录制多段数据，并精确标注每段数据对应的状态（“Good”或“Spoiled”）。

原始数据需进行预处理以提升模型性能。预处理步骤包括：

1. 滑动窗口分割：将连续的时序数据流分割成固定长度（如 60 秒）的窗口。

2. 特征提取：对每个窗口内的数据计算时域和频域特

征。Edge Impulse 平台自动计算如均值、标准差、均方根、频谱能量等特征。

3. 数据增强：通过添加噪声、轻微时间偏移等方式扩充数据集，提升模型鲁棒性。

2.3.2 AI 模型训练与部署

在 Edge Impulse 中，我们选择“分类”学习模块，输入区块为经过预处理的传感器数据窗口。神经网络 classifier 采用全连接神经网络（DNN）结构，输入层为提取的特征向量，经过若干隐藏层（如 2 层，每层 20 个神经元），最终通过“Softmax”输出层得到两个类别的概率分布。

模型训练完成后，平台会生成详细的性能报告，包括准确率、混淆矩阵等。确认模型满足要求后，使用 Edge Impulse 提供的“部署”功能，选择“TensorFlow Lite for microcontrollers”格式，将模型下载为一个 C++ 库文件（包含一个 .h 头文件）。将该库文件集成到 ESP32 的 Arduino 项目中，即可在设备端调用“run_classifier()”函数进行实时推理。

2.3.3 系统工作流程与通信

系统上电后的工作流程如下：

1. 初始化：初始化各传感器、LCD、LED、Wi-Fi 连接和 Web 服务器。

2. 数据采集循环：

a. 读取所有传感器的原始值。

b. 将数据填入 Edge Impulse 模型所需的输入张量中。

c. 调用模型进行推理，获取“Good”和“Spoiled”的置信度分数。

d. 根据置信度更高的类别判断当前状态。

3. 本地预警：将判断结果和置信度显示在 LCD 上，同时控制 RGB LED 显示相应颜色（绿 / 红）。

4. 数据上传与服务：

a.Web 服务器：ESP32 内置一个异步 Web 服务器，提供一个 RESTful API 端点（如 `/status`）。当客户端（浏览器）通过 AJAX 轮询该端点时，服务器返回一个 JSON 对象，包含所有传感器读数、AI 判断结果和置信度。前端页面解析 JSON 并动态更新显示。

b. 云平台传输：通过 PubSubClient 库连接至阿里云物联网平台指定的 MQTT Topic，以一定时间间隔将监测数据（如传感器值、状态标志）发布到云端。用户可通过阿里云官方 App 或自定义 App 订阅这些 Topic，实现远程监控。

这种设计使得系统即使在外网中断的情况下，也能依靠本地边缘计算和局域网 Web 服务维持核心的监测预警功能，保证了系统的可靠性。

3 实验与结果分析

为验证本系统的可行性与有效性，我们在实验室环境下设计了测试方案，并对系统的各项功能与性能指标进行了全面评估。

3.1 实验

样本准备：选取大小、成熟度一致的砀山酥梨若干，分为三组：

A 组（正常组）：完好无损的新鲜酥梨，置于密闭容器中。

B 组（腐败组）：用无菌刀片在酥梨表面制造微小划伤以加速腐败，置于另一密闭容器中。

C 组（对照组）：空容器，用于监测环境本底气体浓度。

将系统的主控板和传感器阵列分别放入 A、B 两组容器中，进行长时间连续数据采集。

测试环境：实验室常温环境（约 25° C）。

3.2 功能测试与性能评估

我们依据设计目标中的性能指标逐项进行了测试，结果如下表 1 所示：

表 1 系统功能与性能测试结果

测试项目	设计目标	测试方法与结果
气体数据采集	稳定读取 5 种传感器数据，范围 0-4095（模拟）	使用 Arduino IDE 串口绘图器监控，数据流平稳，响应环境变化灵敏，预热后无异常跳变。
AI 模型推理准确率	＞ 90%	使用预留的测试集数据（未参与训练）进行验证，模型准确率达到 91.3%（混淆矩阵显示：Good 识别率 92%，Spoiled 识别率 90%）。
AI 推理延迟	＜ 1 秒	使用 millis() 函数测量 run_classifier() 执行时间，平均耗时 580ms，最大耗时 700ms。
LED 响应	状态切换及时，颜色指示正确	人工改变环境气体，LED 状态切换延迟＜ 200ms，颜色指示清晰明确。
LCD 显示	实时更新结果与置信度，清晰无乱码	显示内容每秒刷新，在不同光照条件下可读性良好，无闪烁或乱码现象。
Web 界面	局域网内可访问，数据刷新一致	在 PC 和手机浏览器访问设备 IP，页面每秒自动刷新，数据与 LCD 显示完全同步，平均响应延迟 65ms。
阿里云平台连接	数据稳定上传，App 端可实时查看	连续运行 12 小时，MQTT 连接保持稳定，数据包无一丢失。在阿里云物联管理平台和 App 端可实时观察到数据变化和状态报警。
系统稳定性	持续运行 12 小时无重启、无故障	长时间压力测试，系统无死机、重启或内存溢出等问题。

3.3 结果分析

测试结果表明，本研究设计的系统成功实现了所有预设功能，且关键性能指标均达到或超过了预期目标。

4 结语

综上所述，本研究不仅为砀山酥梨的保鲜提供了一种创新性的技术手段，其系统架构和方法学也具有很强的通用性，经过适当调整后可广泛应用于其他果蔬、粮食乃至中药材的智能仓储管理，在推动农业现代化、助力乡村振兴方面具有巨大的潜在价值。

参考文献

[1] 何玉燕, 吕元芳, 韩敬义. 电子鼻在果蔬贮藏保鲜中应用的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(18): 305-312.

[2] 王霞, 杨玲, 王晓燕, 等. 电子鼻和电子舌在水果检测中的应用进展[J]. 食品科学, 2019, 40(6): 298-304.

[3] Gardner J W, Bartlett P N. A brief history of electronic noses[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1994, 18(1-3): 210-211.

[4] 张建华, 孔汶汶, 姬长英. 基于电子鼻的水蜜桃成熟度评价研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 345-349.

[5] 李宇, 郭志明, 陈全胜, 等. 基于电子鼻技术的苹果霉心病无损检测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 270-276.