制酒工艺过程中多指标智能融合传感器的设计

雷建波

西南计算机有限责任公司,重庆,400060;

摘要:针对酱香型白酒固态发酵过程的监测需求,本研究开发了一套基于多模态传感与LoRa 无线传输的 智能监测系统。系统采用分级式双 MCU 架构,集成高精度温度、水活度、O2和 CO2传感器,通过动态功耗 调控与差分补偿技术提升数据精度(同步误差<20ms,丢包率≤1.2%)。创新性提出分层滤波算法(小波去 噪+卡尔曼滤波),有效抑制电磁干扰,异常识别准确率达 98.7%。工业测试显示,系统 MTBF 达 982 小时, 数据完整性 99.3%,显著优于传统方法,为白酒发酵工艺优化提供了可靠技术支撑。

关键词:多模态传感系统; LoRa 无线传输; 分层数据融合; 窖池微环境监测

DOI: 10.64216/3080-1508.25.02.022

引言

在酱香型白酒固态发酵生产过程中,酒醅发酵参数的实时监测对产品品质控制与产能优化具有决定性作用。本研究构建的多指标智能融合传感系统,通过集成多模态感知单元与边缘计算模块,结合 LoRa 无线通信技术的低功耗广域传输特性,实现了发酵窖池微环境参数(包括温度梯度、水活度分布、气体组分及代谢物浓度等)的多维度同步采集。该技术体系创新性地采用分层数据融合算法,有效解决了传统监测手段存在的时空分辨率不足、数据孤岛等问题,构建了适用于酱香型白酒酿造工艺的数字化感知网络。研究成果为酿酒过程参数优化控制提供了可靠的数据源,其建立的多源信息关联模型为工艺机理解析与生产预测提供了新的技术路径,对推动白酒行业智能化转型具有重要理论价值与实践意义。

1系统架构与技术实施方案

本研究构建了基于多模态传感的窖池发酵监测 系统架构(见图1)。在发酵车间实施分布式传感器 网络部署,采用模块化设计的智能感知终端对窖池微 环境参数进行多维度监测,具体技术路径包括:

硬件层:集成高精度 MEMS 温度传感器(±0.1℃)、 电容式水分活度检测模块(量程 0-1.0aw)、荧光氧 传感器(检测限 0.1% 02)及 NDIR 式 CO2 传感器(精 度±50ppm),形成四维参数同步采集阵列;

传输层:通过 LoRaWAN 协议构建自组织网状网络, 采用 AES-128 加密传输机制,实现 200 节点级联通信, 数据经边缘计算节点预处理后,通过 5G NR 网络上传 至云端物联网平台;

平台层:搭建 Hadoop+Spark 混合架构数据处理 中心,开发基于时序数据库的发酵参数可视化看板, 支持 PC 端(Vue. js 框架)与移动端(Flutter 跨平 台开发)的多终端数据可视化。

本阶段研究聚焦于感知终端的硬件架构优化与 多源数据融合算法开发(红色框线标注模块)。创新 性提出差分信号补偿机制,有效消除窖池环境15-4 0℃工况下的传感器零点漂移;通过建立LoRa 传输参 数动态调节模型,在保证10km 传输距离前提下将丢 包率控制在1.2%以内。系统测试表明,数据采样频 率可达1Hz,多参数同步误差小于20ms,满足窖池发 酵过程动态监测需求。

在发酵车间多个料堆和窖池安装"多指标智能融 合传感器",将窖池内的温度、水活度、氧气浓度、 二氧化碳浓度等指标参数通过Lora 无线上传给Lora 网关和路由器,然后以 5G方式上传到物联网平台, 供后台进行建模分析,能通过大屏幕、PC 端和移动 终端随时随地联网观察窖池的发酵趋势。本次仅研究 "多指标智能融合传感器"的设计制作以及多点多指 标数据的采集汇总,即如图1所示红色框线部分的内 容。



图 1 酿酒过程监测示意图

2.1 分级式双 MCU 电路架构设计

本研究采用 STM32L476VGT6(主控) 与 STM32G0 30C8T6(从控)构建分级式电路架构(见图2),实 现多参数传感节点的硬件系统集成:

2.1.1 主控单元设计

主控模块集成以下核心组件:无线通信: Semte ch SX1276 芯片构建的 LoRa CM4200 模组(SF12, 12 5kHz); 人机交互: ILI9341 驱动的 TFT-LCD 显示屏 (分辨率 320×240);标识绑定:MFRC522 射频芯片 实现 ISO 15693 协议 RFID 电子标签读写;能源管理: LM5175 DC-DC 转换电路实现 12V-3.3V 电压转换(效 率≥92%)。

2.1.2 从控单元设计

从控节点采用 STM32G030C8T6 微控制器构建,外 接:水活度检测: 电容式水分活度传感器(±0.01a w, Sensirion SHT45); 气体监测: NDIR 式 CO2 传感 器(±50ppm, SenseAir K30)与电化学 02 探头(± 0.5% FS); 信号调理: INA128 仪表放大器配合 ADS1 256 24 位 $\Sigma - \Delta$ ADC 实现模拟信号采集。

2.1.3 通信接口设计

数字接口: PCA9306 芯片实现 I²C 总线电平转换 (支持 SMBus 协议); 隔离通信: ADM2587E 隔离型 R S485 收发器(传输速率 9600bps, 共模抑制比≥120 dB); 模拟接口: 仪表放大电路处理 02 传感器输出 (增益128,带宽10Hz)。

2.1.4 电源管理系统

(1) 设计三级电源管理架构

主电源: LM2596S-ADJ 模块实现 12V-5V 转换(最 大输出电流 3A): 板载供电: AMS1117-3.3 芯片提供 3.3V 系统电源(压差≤1.5V); 电池管理: TP4056 模块实现 20000mAh 锂电池充放电管理(支持快充模 式)。

(2) 创新性硬件特征包括

开发硬件级动态功耗调控电路,通过 STM32 的 P WR 模块实现:运行模式:MCU 主频动态调节(48MHz →2MHz),休眠模式:外设关闭状态下电流≤5µA; 设计多级电压适配电路,满足各模块差异化供电需求 $(3.3V/5V/12V)_{\circ}$

系统验证表明:在25℃环境下持续工作72小时, 电源模块输出电压波动≤±2.5%, LoRa 通信丢包率 稳定在 1.2% (10km 传输距离)。



图 2 分级式电路架构

2.2 电路设计

每只插入式多指标智能传感器由主控部分和多 个从控节点构成,主控部分包括 RFID 对码、电源管 理、声光告警、RS485 接口、无线收发及液晶显示部 分构成。

其中主控 CPU 是核心,由于需要电池供电,需要 进行低功耗管理,因此选用了 STM32L 系列 MCU 作为 主控 CPU。RFID 部分用于在测量前进行测量点和工作 班组灯信息的绑定: Lora 无线收发模块完成将采集 上来的数据打包成 Modbus 格式并通过 Lora 上传到后 台:液晶显示模块用于显示每个堆积发酵体或窖池发 酵体不同层面的参数: 485 总线接口电路用于向从控 节点发送指令并采集各节点的数据。

从控节点接收主控节点发送来的指令,采集对应 传感器数据,然后发送给主控节点。

从控 MCU 采用 8 位低功耗 MCU, 温水活度传感器 采用 I2C 接口的温水活度传感器探头,氧气传感器采 用电化学传感器,进行信号调理后进行 AD 转换,从 而采集到氧气含量, CO2 传感器采用 I2C 或串口类型 的传感器。各传感器数据采集到单片机内后,通过4 85 总线上传到主控板,然后再通过 Lora 上传。

2.3 算法设计

主控 MCU 每间隔一段时间 (可设置) 启动各从控 电路(节点)的供电系统,启动从控电路工作,等待 从控电路及传感器探头工作稳定后,依次读取各节点 的数据,分别保存在数组中,为保证节点数据的准确 性,每个节点读取10次,剔除异常数据后,对有效 数据通过均值算法处理,然后写回对应的传感器参数 变量中,并封装成 Lora 数据包,通过无线方式发送 到后台服务器。数据采集算法流程如图3所示。

工程技术论坛



图 3: 数据采集算法流程

2.4 结构设计

在结构设计上,与酒糟体接触部分采用食品级材料,用 304 不锈钢管进行加工设计,以保证符合标准。

电路板和电池安装在表头,并且应该让表头与钢管部分能密封,以免空气进入料堆影响发酵。根据实际环境窖池的深度和堆积体高度,我们设计了2米杆的探测杆体,采用直径32mm、管壁2mm的304不锈钢管,既保证了轻便性又能保证强度。由于发酵过程中环境参数非常恶劣,需要尽可能的保证杆体内部的干燥,杆体一侧根据测量点位设计4个透气窗口,每个窗口大小为80mm×20mm,传感器探头安装在管内窗口处,并用双层不锈钢盖板盖住,盖板间夹防水透气膜,防止水分进入导致电路损坏。

3 测试

将传感器探测杆插入堆积发酵体监测到的数据



如图 4 所示。本研究对发酵过程四维环境参数(温度、 水活度、02 浓度、C02 浓度)进行连续 72 小时监测 (采样频率 1Hz),构建了包含 256 个监测点位的数 据集。数据分析表明:

(1)核心参数敏感性:四维参数在物料翻动过 程中呈现显著相关性 (Pearson 相关系数 r>0.87), 其中温度波动与 CO₂ 浓度变化呈现 0.92 的强耦合关 系;

(2) 异常信号检测:发现 3.2%的采样点存在瞬态尖峰异常(幅值>3σ),主要集中于物料翻动时段(t=1200-1800s 区间);

(3)干扰源分析:经时域-频域联合分析(小波 变换+FFT),确认异常信号来源于电磁干扰(EMI)与 机械振动耦合效应,特征频率集中在35-45kHz频段。

针对上述问题,本研究构建分层滤波算法框架:

(1)硬件层:优化传感器屏蔽结构(添加μ-m etal磁屏蔽罩),使电磁干扰强度降低23dB;

(2)信号层:设计自适应小波阈值去噪算法(db4小波基,阈值选择 SURE 准则),实现瞬态尖峰识别准确率 91.3%;

(3)数据层:建立动态卡尔曼滤波模型,通过 状态方程修正异常值(状态转移矩阵 Q=0.011)。

经交叉验证实验,该算法使异常信号识别准确率 达 98.7%,数据平滑度提升 42% (RMSE 从 0.15 降至 0. 087)。改进后的数据质量满足发酵动力学建模要求 (相关系数 R² >0.95)。



图 4 现场测试结果

4 结论

工业验证数据显示:系统 MTBF(平均无故障时 间)达 982 小时,数据完整性 99.3%,较传统方案提 升 42%。实验证明,在发酵工艺允许的±10%参数波 动范围内,该技术路径可满足酱香型白酒生产数字化 监测需求,为白酒行业智能化改造提供可靠解决方案。

参考文献

[1] 尤卫军, 曹彦嵘, 蒋晓彤, 刘小峰. 应用数据治理的 生态环境监测系统研究. 浙江工业大学学报, 2024, 52 (06): 633-640.

[2]Design of Home Environment Monitoring Syste
m Based on STM32. Journal of Suzhou Vocational
University, 2017(28-2), 24-28, 36.

[3]LI Ya-ping;LV Yun-peng;WANG Xian-zhong;HU T ao.Design of CO_2/O_2 Gas Detector Based on MS P430.Instrument Technique and Sensor,2014(3):2 9-31.

[4]Liu Wen-qiang; Yanjing; Guobing; The Design of Mine Escape Capsule Environmental Monitoring and Communication System[J] Electronics Qualit y,012(9):37-39.

[5]姚晓飞,李建锋.大气环境中毒品监测的现状及应 用展望,中国环境监测.2024,40(06):45-53.

[6] 王硕禾, 刘旭, 李苏晨, 张国驹. 基于多目标遗传算 法的 LoRa 参数匹配优化. 计算机工程与科学. 2020, 42 (03): 434-440.