

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.05.020

唐维东, 张九通, 廖明亮, 等. 基于 ZigBee 的工厂化堆沤有机肥监控系统设计 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(5): 216-228.

基于 ZigBee 的工厂化堆沤有机肥监控系统设计

唐维东¹, 张九通¹, 廖明亮², 吴达科¹, 蒋猛¹

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 遵义市播州区中等职业学校, 贵州 遵义 563102

摘要: 针对工厂化堆沤有机肥过程中相关数据实时监测与废物安全排放的要求, 利用物联网技术设计了一种基于 ZigBee 的工厂化堆沤有机肥监控系统, 主要分为硬件电路设计与软件设计。硬件部分采用模块化方法对 CC2530F256 最小单元进行规划, 扩展数据输入和数据输出两大功能板块相应接口, 设计了数据采集与数据执行节点。软件部分采用 C 语言进行编程, 对组网、数据传输等环节进行程序设计, 并依托 ETL 工具对数据进行清洗, 采用自适应加权平均融合算法对数据进行融合。为检验系统的功能, 进行了为期 1 个月的性能测试, 测试结果表明: 系统数据采集、数据传输、数据储存、远程监控功能完备, 数据丢包率为 1.2%, 机构平均响应时间为 1.25 s, 误动作次数为 0, 温度误差范围为 ± 1.8 °C, EC(电导率)值偏差极值为 0.02 mS/cm, pH 值误差范围为 ± 0.1 , 氨气浓度偏差极值为 0.02 mg/L, 系统运行情况稳定。

关键词: 堆沤有机肥; ZigBee 技术; 模块设计; 监控系统;
数据处理

中图分类号: TP274; S224.22

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2024)05-0216-13

Design of Monitoring System for Industrial Composting Organic Fertilizer Based on ZigBee

TANG Weidong¹, ZHANG Jiutong¹, LIAO Mingliang²,
WU Dake¹, JIANG Meng¹

1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Zunyi Bozhou District Secondary Vocational School, Zunyi Guizhou 563102, China

Abstract: Aiming at the requirement of real-time monitoring of relevant data and safe waste discharge in the process of industrial composting organic fertilizer, a ZigBee-based monitoring system for industrial composting organic fertilizer was designed using the Internet of Things technology. The main work was divided into hardware circuit design and software design. The hardware part adopted the modular method to plan the minimum unit of CC2530F256, expanded the corresponding interface of the two functional plates

收稿日期: 2023-12-15

基金项目: 贵州省科技厅农业支撑项目(黔科合支撑[2020]1Y127号); 重庆市渝北区科技计划项目(2022(农社)09)。

作者简介: 唐维东, 硕士研究生, 主要从事农业物联网研究。

通信作者: 蒋猛, 高级实验师, 硕士研究生导师。

of data input and data output, and designed the data acquisition and data execution nodes. In the software part, C language was used for programming, to design the programs for networking, data transmission and other links, also data was cleaned by ETL tool, and adaptive weighted average fusion algorithm was used to fuse the data. In order to verify the function of the system, a one-month performance test was carried out. The test results showed that system data acquisition, data transmission, data storage, remote monitoring functions were complete, data loss rate was 1.2%, the average response time of the mechanism was 1.25 s, the number of misoperation was 0, the temperature error range was $\pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, the extreme deviation of EC (electrical conductivity) value was 0.02 mS/cm, the pH value error range was ± 0.1 , the extreme deviation of ammonia concentration was 0.02 mg/L, and the system ran stably.

Key words: composting organic fertilizer; ZigBee; module design; monitoring system; data processing

堆制发酵是有机肥生产过程中的重要环节, 好氧微生物对有机物料的分解会引起急剧的温升, 含水率、pH 值、曝气量等参数交互影响着堆制发酵的进行, 堆肥中氮磷钾离子含量的变化决定了堆肥的质量, 而该过程中对外排放的氨气、硫化氢、甲烷等气体既污染环境, 又存在极大的安全隐患^[1-4].

相关学者对堆肥反应过程各项数据的监测已进行了多种方案的探讨. 缪宏等^[5]建立了一套基于传感器技术的适用于好氧堆肥反应器的内部环境在线监测控制系统, 可以实现堆肥环境温度及氧浓度的实时监测, 并设定阈值进行预警. 王纪章等^[6]设计了一种杆体模块化、可拼接的低功耗组合式多层温度监测系统, 可以实现废弃物堆肥发酵过程的温度多层长期监测. 李梦洋等^[7]对堆肥环境监测感知设备的国内外研究、应用现状及存在问题进行了相关分析, 提出了便捷化无线传输式的研究方向. Oliveri 等^[8]指出工厂化堆肥监测技术方案具有极高的社会和经济效益. Mahmoud 等^[9]则选择用化学分析和光学分析来对堆肥过程的有机质变化进行监测.

上述研究对堆肥反应过程的监测取得了一定成果, 但均是依托于单一定点式或少数监测点位展开的研究, 对多点位乃至工厂化堆制过程的协同监测尚未展开具体的研究, 且并未对堆制过程中的废气排放进行监测与控制, 数据的储存与批量导出功能尚不完善. 针对以上问题, 运用农业物联网技术设计了一种基于 ZigBee 的工厂化堆沤有机肥监控系统.

1 系统构成与工作原理

该系统应用于厂房环境, 故选择短距离无线通信技术对系统进行开发. 常用的几种短距离无线通信技术主要的优缺点如表 1 所示^[10-12].

在工厂化堆肥应用场景中, 数据采集点位较多, 数据传输速率没有较高要求, 故 ZigBee 技术优势明显, 选择采用此技术进行系统设计.

表 1 短距离通信技术对比

技术	优点	缺点
Wi-Fi	高速数据传输; 高互操作性	功耗高; 传输效果随距离递减; 成本高
Bluetooth	功耗低; 支持广泛的对接功能	成本高; 抗干扰能力弱; 传输距离有限
ZigBee	功耗低; 成本低; 自组网; 节点容量大	传输速率低
IrDA	功耗低; 连接方便	两点(非多点位)之间传输
UWB	高速数据传输; 高精度定位	功耗高; 传输距离有限
NFC	双向识别; 连接方便	传输距离有限

1.1 系统结构组成

基于 ZigBee 的工厂化堆沤有机肥监控系统主要由数据采集节点、数据执行节点、路由节点、现场控制系统、云平台和应用终端等构成.

数据采集节点的主要作用是监测堆肥现场参数变化和環境状态; 数据执行节点的主要作用是接收由协

调器经路由器节点下发的指令,并控制执行机构实现不同的功能,如喷水防火、通风曝气、声光报警等。

路由节点有两个作用,一方面接收片区内采集节点的数据,并上传至协调器,另一方面接收协调器下发的指令,并将指令传输至对应的执行节点执行。

现场控制系统包含协调器、串口屏、数据透传装置(DTU)。协调器同时作为控制单元进行指令传递,串口屏用于现场人机交互功能的实现,数据透传装置是现场数据与云平台数据交互的中转单元。

云平台接收现场监控参数,实现数据处理和数据存储,提供数据共享。

应用终端包含 PC 应用终端、手机应用终端等,其作用是利用云平台,实现远程数据管理。

各节点的数量依据现场情况和用户需求进行布置,其结构框图如图 1 所示。

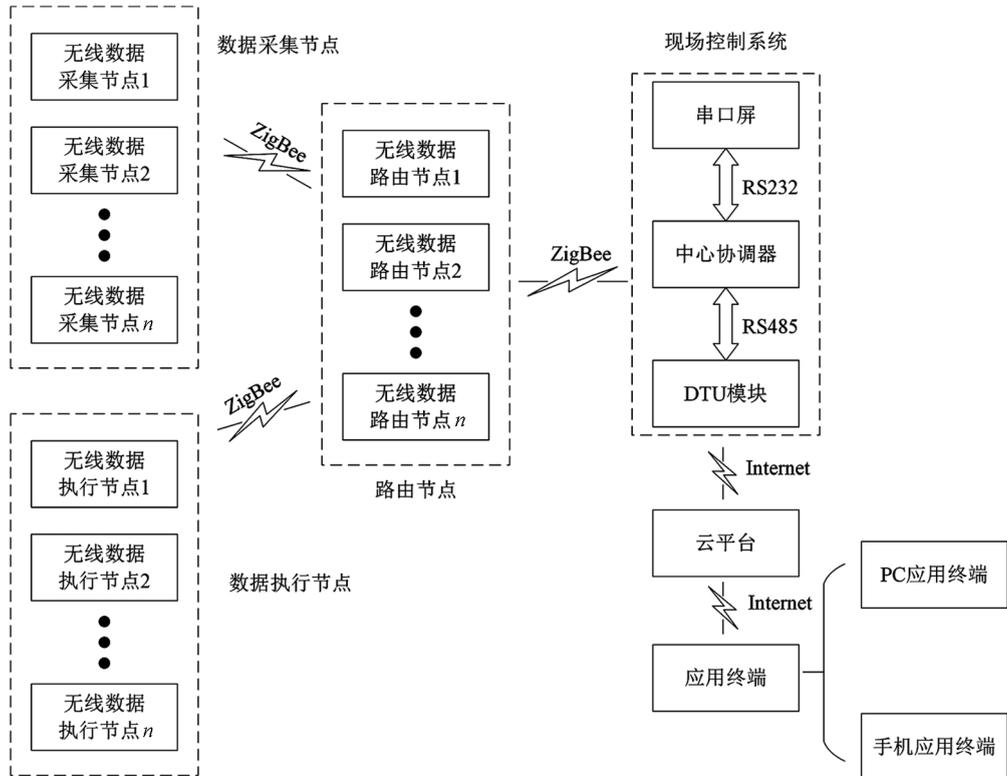


图 1 系统结构框图

1.2 系统工作原理

系统上电后,协调器进行 ZigBee 组网,各节点开始运行。采集节点的数据经路由节点无线传输至协调器,串口屏对现场实时数据进行显示,同时将数据通过数据透传装置(DTU)上传至云平台,云平台接收后对数据进行处理并存储,应用终端可进行数据访问,实现数据远程管理、数据共享、历史数据查询等功能。

1.3 系统主要功能

该系统主要包括以下 4 项功能:

1) 现场数据实时监测。通过搭载不同的传感器,对堆沤现场的参数变化进行监测,可监测参数包含堆内温湿度、pH 值、氮磷钾含量、EC 值以及堆肥环境中的空气温湿度、光照强度与二氧化碳、甲烷、氨气、硫化氢等气体浓度。

2) 现场安全监控与报警。可通过后台远程操作和现场人机交互设备进行系统控制,将指令下发至执行节点,执行相应动作,如打开电磁阀喷水、启动风机排气、接通声光报警装置报警,实现现场安全监控和报警功能。

3) 数据上云,实现数据共享与历史数据查询。

4) 远程数据监控。通过 PC、手机等设备,实现生产现场远程监管。

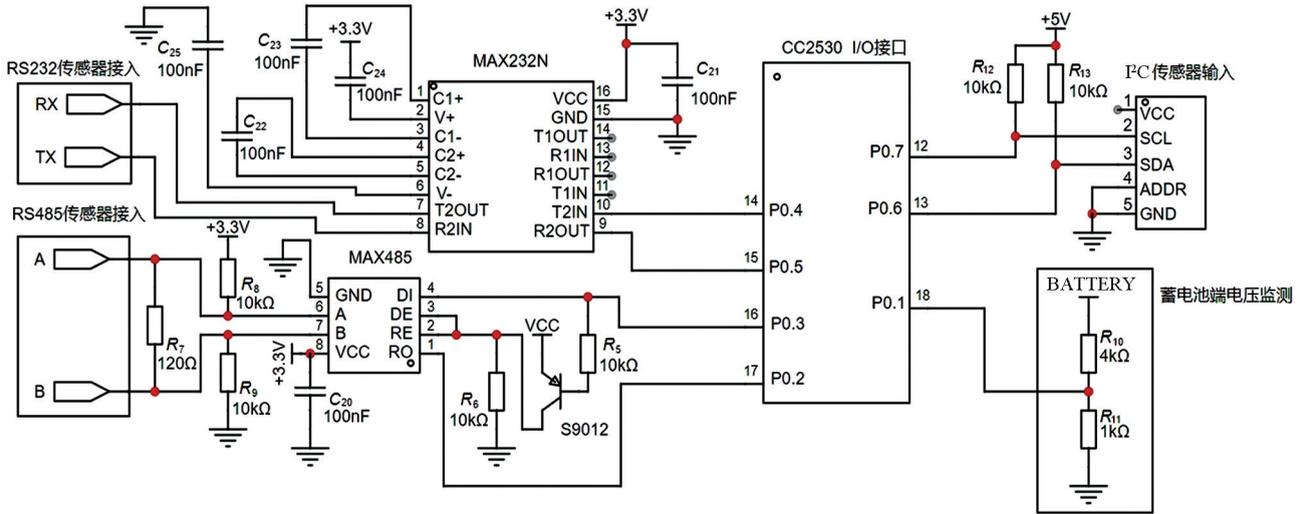


图 3 输入接口(数据采集)扩展单元电路设计

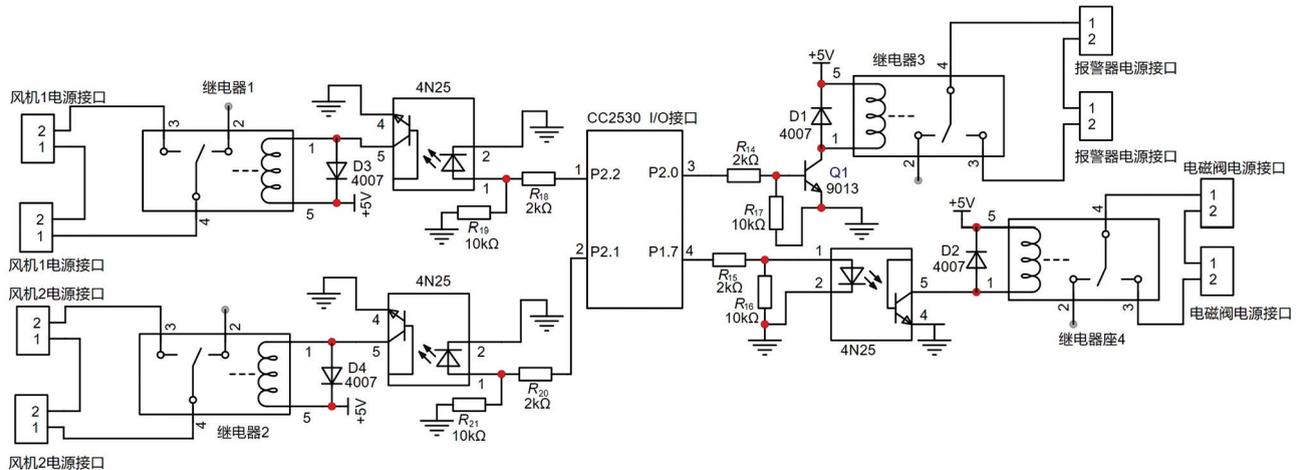


图 4 输出接口(数据执行)扩展单元电路设计

系统将外部环境、肥堆内 2 部分参数纳入监测范围,以研究堆肥机理,实现高效安全生产.系统选用传感器综合考虑堆肥环境的复杂多变程度以及实际采集需求,相关配置如表 2 所示^[13-15].

表 2 传感器组配置

监测参数	芯片/产品型号	通信协议	监测参数	芯片/产品型号	通信协议
空气温湿度	SHT30	I ² C	氨气浓度	MIX8415	RS485
光照强度	BH1750	I ² C	硫化氢浓度	MIX8416	RS485
二氧化碳浓度	MH-Z19C	I ² C	pH 值	PH-4502C	RS485
肥堆内温湿度	SHT30	I ² C	氮磷钾含量	ISE 电极	RS485
甲烷浓度	MC107B	RS485	EC 值	ECS-1802	RS232

2.4 无线数据执行节点设计

执行节点由输出接口扩展单元模块、CC2530F256 最小单元模块和执行负载 3 个单元组成,各单元直接按对应接口连接,如图 6 所示.各类执行负载包括但不限于蜂鸣器、喷水电磁阀、报警指示灯、环流风机等设备.

2.5 现场控制系统设计

现场控制系统由串口屏、CC2530F256 最小单元模块、输入接口扩展单元模块和数据透传装置(DTU)4

个单元组成, 各单元按设定接口进行连接, 如图 7 所示.

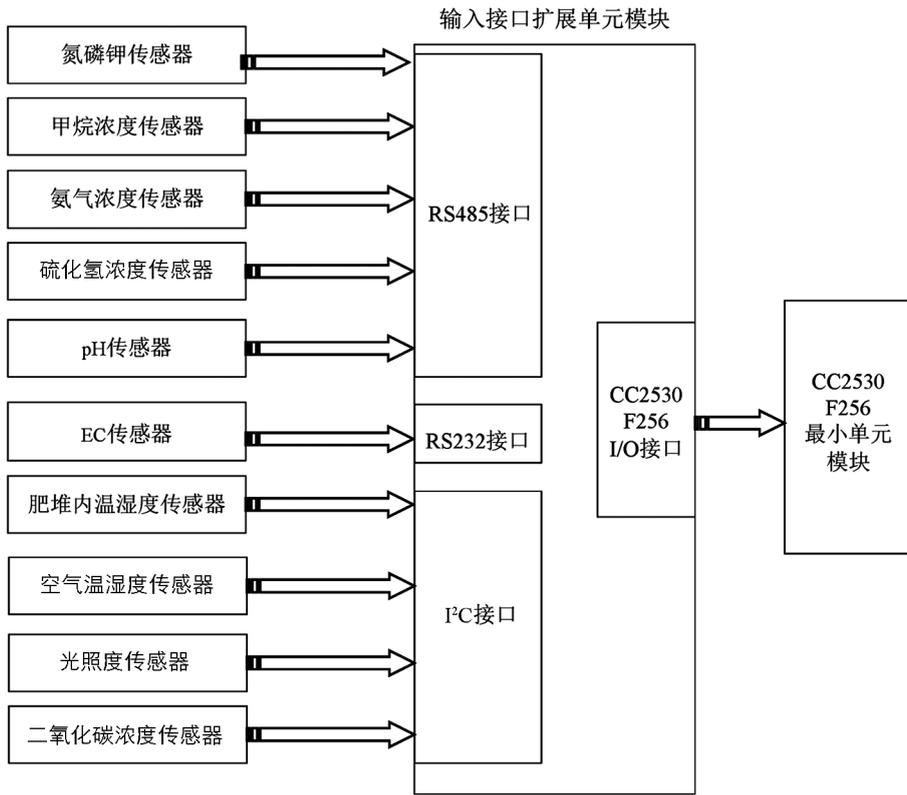


图 5 采集节点框图

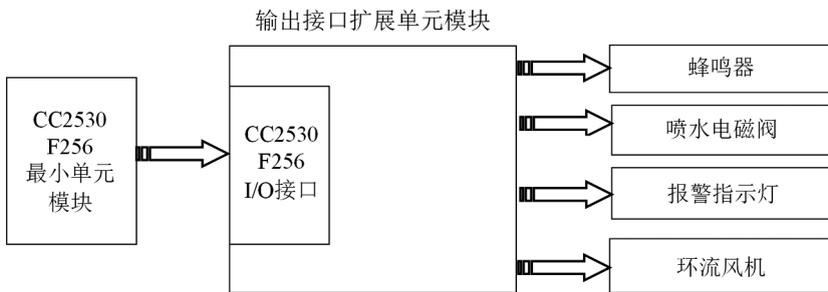


图 6 执行节点框图

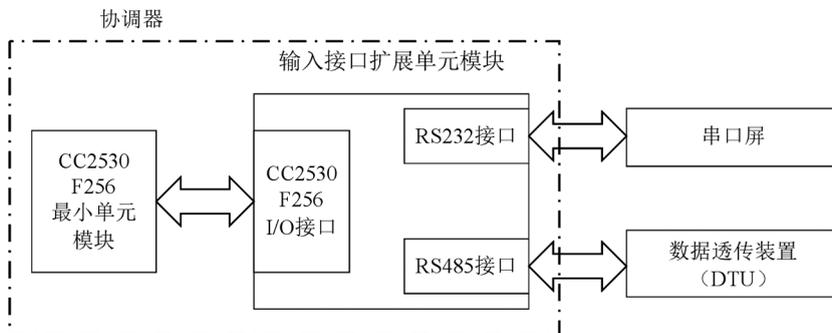


图 7 控制系统构成框图

2.5.1 串口屏选型

本系统选用 10.1 寸电容式触摸串口屏, 通过 RS232 串口与输出单元扩展模块的 RS232 串口直接相

连,使用 USART HMI 开发软件进行界面与功能设计.

2.5.2 数据透传装置选型

本系统利用现有的公有云平台进行二次开发,数据透传装置(DTU)选择 RS485 信号类型,与输入接口扩展单元模块的 RS485 接口直接连接即可.

2.5.3 协调器选型

协调器由 CC2530F256 最小单元模块和输入接口扩展单元模块组合而成,各模块装置直接通过相应的物理接口直接连接即可.

3 系统软件设计

3.1 组网程序设计

系统采用 C 语言进行编程,使用地仅存在单一 ZigBee 网络,且节点均为 FFD 节点^[16-17].协调器进行网络初始化后,选择合适的信道号进行信道扫描,设置网络标识符(PAN ID).路由节点、数据节点通过主动扫描查找网络协调器后,从返回的信标信息中选择合适的网络 ID,发送关联请求命令,协调器返回 ACK 确认帧,节点 mac 层将等待一段时间,接收协调器的连接响应.协调器根据资源分配产生关联响应命令后,节点发送数据请求命令,协调器返回 ACK 确认帧与关联响应命令,节点再返回 ACK 确认帧,至此组网成功.组网程序流程如图 8 所示.

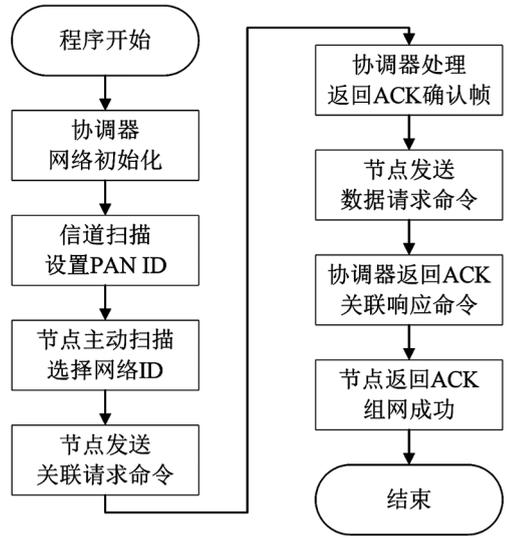


图 8 组网程序流程图

3.2 主控程序设计

组网成功后,主控制器反馈串口屏组网信息,进入数据待接收状态,接收各个采集节点通过 ZigBee 网络传输来的实时数据,判别节点 ID,对数据进行标记.串口屏与云端周期性下发读取指令,对数据进行读取,若有异常数据则产生报警信息与相应控制信号,进行异常状态消除.主控程序流程图如图 9 所示.

3.3 数据节点程序设计

采集节点在组网成功后,与传感器进行握手确认,按照写入周期对各类传感器下发采集指令,收集各类堆制反应过程数据与所处环境数据,对数据进行轮次打包并发送.执行节点将接收来自主控制器下发的控制信息,按照写入程序产生相应电平信号,传输至对应继电器,使其触点闭合,让执行机构通电产生动作.待主控制器下发控制解除信息,执行节点断开 I/O 口电平信号,使得继电器触点打开,切断执行机构电源,停止动作.数据节点程序流程如图 10 所示.

3.4 数据透传程序设计

选用公有云平台实现云端功能,进行定制化二次开发,贴近实际应用场景,并通过 JSSDK 实现实时的数据交互,搭建完成数据推送功能.进入云端设备配置界面,将设备 IP 与端口初始化,完成后,建立一个新的 Modbus 数据模板,对接 DTU 透传模式,生成 20 位 SN 码与 8 位通讯码,云端初始设置地址为 1,程序进行“—1”操作使得平台正常解析.地址解析完成后,依据实际测量参数数目进行数据变量添加.变量添加完成后使用 USR-G780 V2.1.3 专用设置软件进行模式与参数配置,上电对接联网完成.数据透传程序流程如图 11 所示.

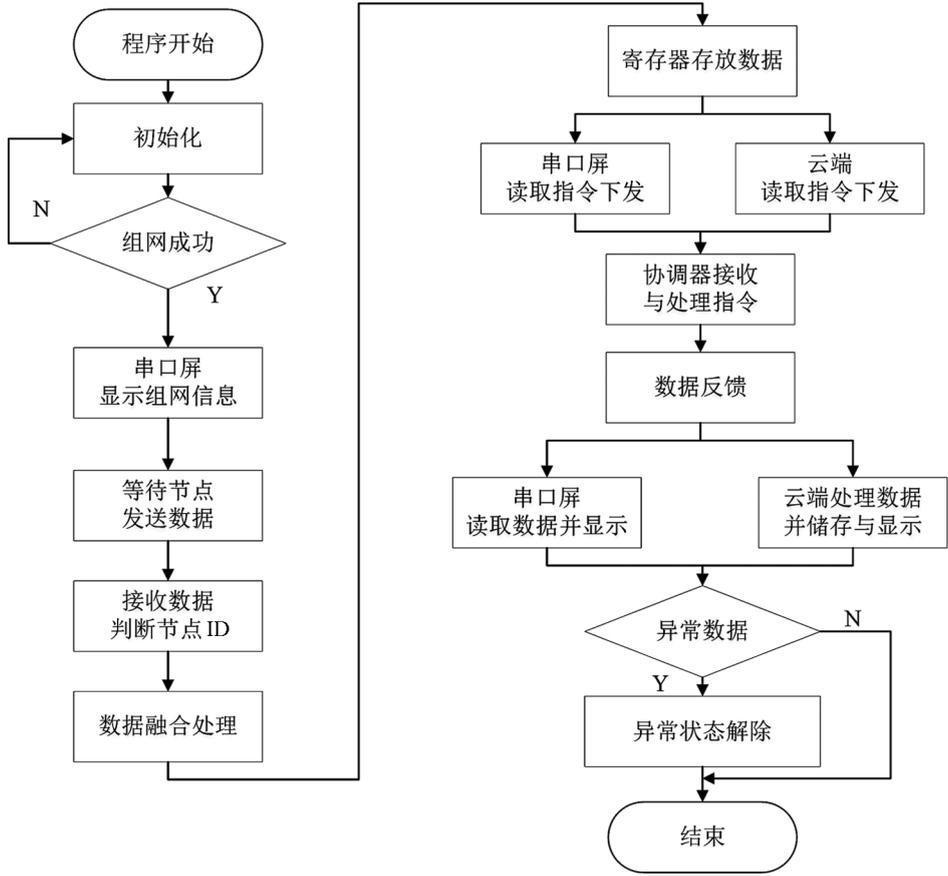


图 9 主控程序流程图

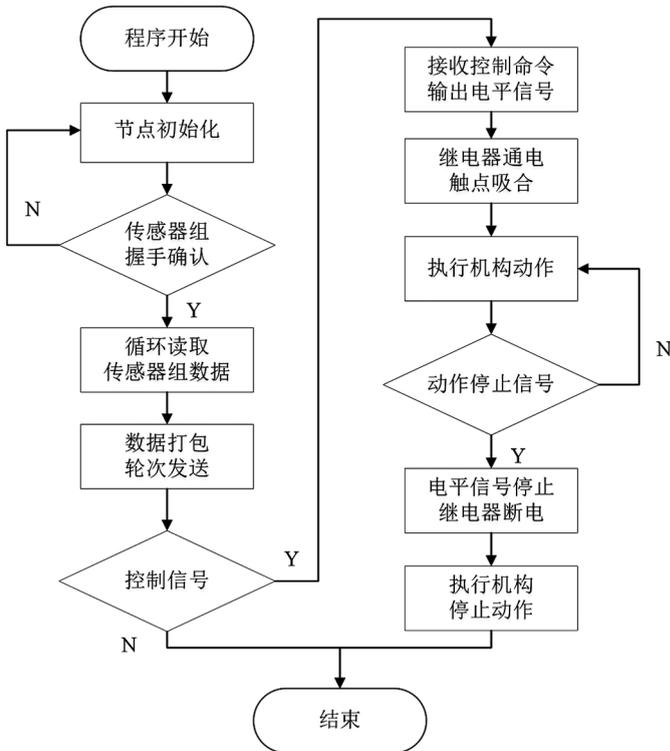


图 10 数据节点程序流程图

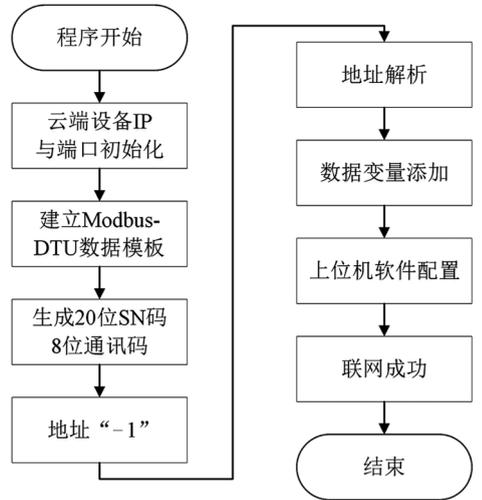


图 11 数据透传程序设计

4 数据处理设计

4.1 数据清洗

在实际的厂区监控应用环境中,数据传输会受到电子设备故障、传输噪声等干扰因素的影响,导致出现数据丢包现象,从而产生一些错误数据、重复数据、缺失数据等“脏数据”。

本系统依托 ETL 工具,对错误数据采用回归方程进行分析识别与剔除,按照字符串匹配法对重复数据进行删除,以统计学中的均值补齐缺失数据,再辅以人工清洗,排除掉“脏数据”的影响,提高数据的质量^[18]。

4.2 数据标准化处理

本系统采集的各类数据量纲不同,对数据进行标准化处理可提升梯度下降求解速度,使得数据分析具有更高的准确性与可解释性。

Z-score 标准化要求数据近似为高斯分布,小数定标标准化则可能造成数据精度的缺失,故采用 Min-Max 标准化方法对固定周期段内的数据进行相应处理,避免新数据加入时可能会导致的最大值与最小值需要重新定义的问题^[19]。当映射区间为 $[0, 1]$ 时,其转换函数为:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中: x_{\max} 为原始数据的最大值; x_{\min} 为原始数据的最小值; x 为原始数据。

4.3 数据融合

本系统采用自适应加权平均融合算法对多个采集节点的采集数据进行融合,从而得到同一批堆肥实时状态的完整评价^[20]。

在运用场景中,设传感器数量为 n ,数据采集值为 X ,传感器采集数据的无偏差估计值融合结果与加权因子满足以下公式:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (2)$$

$$\hat{X} = \sum_{i=1}^n \omega_i X_i \quad (3)$$

式中: ω_i 为加权因子对应权值; \hat{X} 为融合后的无偏差估计值。

由系统硬件布置可知,各传感器相互独立,采集的数据互不影响,故存在以下公式:

$$E[(X - X_i)(X - X_j)] = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n; i \neq j \quad (4)$$

式中: X_i 和 X_j 分别为第 i 个和第 j 个传感器的采集值。可推导出总方差为:

$$\sigma^2 = E \left[\sum_{i=1}^n \omega_i^2 (X - X_i)^2 \right] = \sum_{i=1}^n \omega_i^2 \sigma_i^2 \quad (5)$$

式(5)为多元二次函数,当 σ^2 取最小值时,各传感器的加权因子应满足公式:

$$\omega_i^* = \frac{1}{\sigma_i^2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

此时最小总方差为:

$$\sigma_{\min}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (7)$$

对各传感器在固定时间段内的数据均值进行估计,测量 k 次的均值为:

$$\bar{X}_i(k) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k X_i(j) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

得融合值 \hat{X} 为:

$$\hat{X} = \sum_{i=1}^k \omega_i \bar{X}_i(k) \quad (9)$$

4.4 准确性测试结果

对肥堆进行为期 30 天的对照测试, 系统与人工采集数据取当日均值, 选取肥堆内温度、EC 值、pH 值以及空气中氨气浓度 4 个参数作为对照, 如图 12 所示。

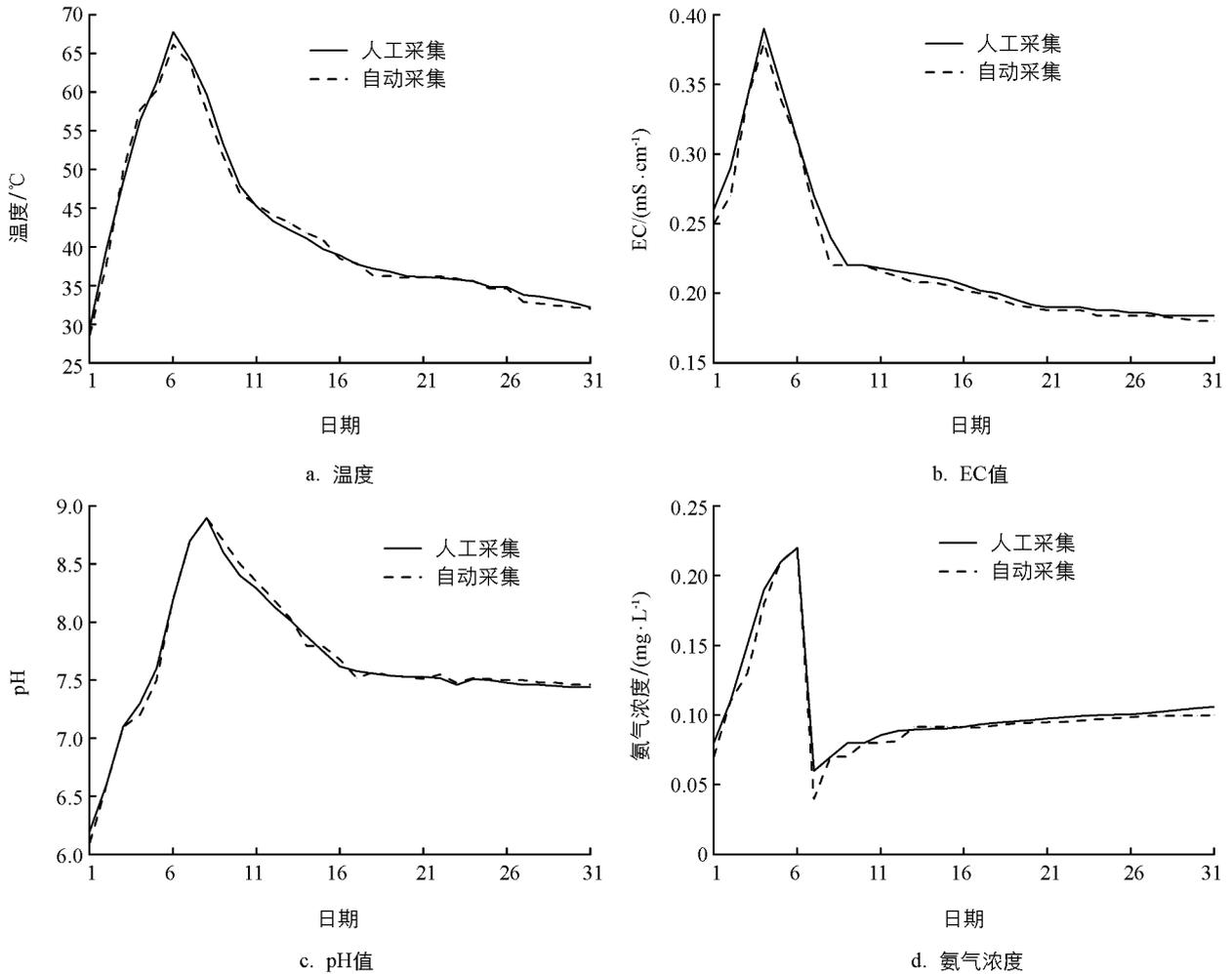


图 12 数据对照

由图可知, 温度误差范围为 ± 1.8 °C, EC 值偏差极值为 0.02 mS/cm, pH 值误差范围为 ± 0.1 , 氨气浓度偏差极值为 0.02 mg/L, 其中第 7 次数据突变原因为氨气浓度达到了预警值, 自动进行了通风曝气。由数据可知, 系统的数据处理误差较小, 满足实际使用过程需求。

5 性能测试

5.1 测试条件

本系统测试场地选择重庆某农业生产公司, 测试厂区占地 670 m², 共 6 个区域, 每个区域布置一个路由节点, 数据采集节点总共布置 47 个, 如图 13 所示, 测试时间为 2023 年 7 月 1 日至 2023 年 7 月 31 日。



图 13 采集点位图

5.2 丢包测试

对系统数据上传的稳定性与可靠性进行测试, 主要测试数据无线上传过程中的丢包情况. 云端设定读取指令下发频次为每次 30 min, 采集节点每次反馈传感器数据 10 组, 相关数据如表 3 所示.

由测试结果可知, 系统平均丢包率为 1.2%, 数据传输成功率为 98.8%, 堆肥反应过程中各项参数的持续监测效果良好, 能较好地反映出各项参数的变化过程.

表 3 丢包测试结果

监测参数	应收包数	实收包数	丢包率/%
空气温湿度	67 680	66 936	1.1
光照强度	67 680	66 597	1.6
二氧化碳浓度	67 680	66 868	1.2
肥堆内温湿度	67 680	66 529	1.7
甲烷浓度	67 680	66 800	1.3
氨气浓度	67 680	67 071	0.9
硫化氢浓度	67 680	67 139	0.8
pH 值	67 680	66 936	1.1
氮磷钾含量	67 680	67 206	0.7
EC 值	67 680	66 936	1.1

5.3 功能验证

系统功能验证如图 14 所示. 现场人机交互功能运行良好, 节点设备掉线次数为 0, 应用终端接口完备, PC 端可进行数据监控, 也可实现手机端远程监控.

其中, 数据执行节点执行相关动作的测试结果如表 4 所示, 误动作次数为 0, 平均响应时间为 1.25 s, 满足实际生产需求.

表 4 丢包测试结果

区域	平均响应时间/s	误动作次数	区域	平均响应时间/s	误动作次数
1	1.2	0	4	1.2	0
2	1.1	0	5	1.4	0
3	1, 3	0	6	1.3	0

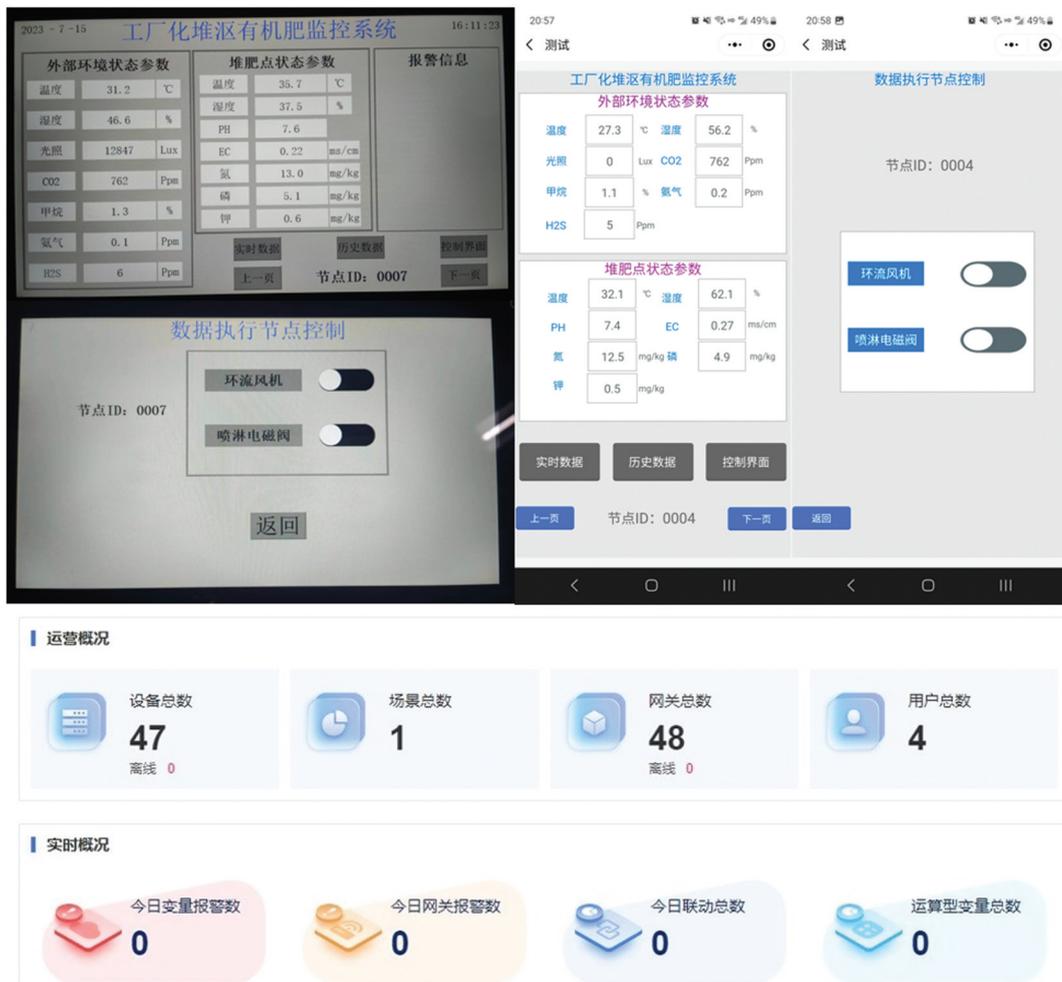


图 14 测试结果

6 结论

1) 应用农业物联网技术设计了一种基于 ZigBee 的工厂化堆沤有机肥监控系统. 以 CC2530F256 为主控芯片, 通过模块化设计完成各单元硬件扩展, 极大提升了系统的拓展性, 并进行控制程序编写, 实现监控区域多点位 ZigBee 组网, 达到监控数据的无线传输与双端共享.

2) 对系统进行了数据传输测试, 数据无线传输中的平均丢包率为 1.2%, 温度误差范围为 $\pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, EC 值偏差极值为 0.02 mS/cm, pH 值误差范围为 ± 0.1 , 氨气浓度偏差极值为 0.02 mg/L, 各项参数的连续监测状态能够保持, 数据能较好地呈现堆肥的发酵变化过程, 系统运行状况良好.

3) 对系统进行了 1 个自然月的性能试验. 试验结果表明: 设计的各项系统功能完备, 数据节点掉线次数为 0, 数据双端呈现效果良好, 可远程监控生产现场, 执行机构误动作次数为 0, 平均响应时间为 1.25 s.

参考文献:

- [1] 杨航波, 张韵, 郑威, 等. 竹醋添加时期对猪粪堆肥腐殖质形成的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(9): 1-9.
- [2] 李丹, 陈豹, 曹云, 等. 二氧化锰对微好氧堆肥腐熟、温室气体及臭气排放的影响 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(13): 202-212.
- [3] 湛卓越, 贺德春, 姜珊, 等. 鸡粪好氧堆肥过程氨气与温室气体排放特征及协同减排机制 [J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(11): 2582-2594.

- [4] 葛启隆, 王国英, 侯瑞, 等. 添加剂对污泥堆肥过程中气体排放和酶活性的影响 [J]. 中国环境科学, 2023, 43(11): 5873-5883.
- [5] 缪宏, 张玲聪, 夏云帆, 等. 好氧堆肥反应器内部在线监测控制系统设计 [J]. 农机化研究, 2020, 42(6): 68-72.
- [6] 王纪章, 茆寒, 王旭, 等. 可组合式堆肥发酵多层温度自适应监测系统设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 359-367.
- [7] 李梦洋, 孙耀杰, 张馨, 等. 堆肥过程环境感知分析技术研究现状与展望 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46(21): 21-27.
- [8] OLIVERI L M, ARFÒ S, MATARAZZO A, et al. Improving the Composting Process of a Treatment Facility via an Industry 4.0 Monitoring and Control Solution: Performance and Economic Feasibility Assessment [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345, 118776.
- [9] MAHMOUD I B, MBAREK H B, MEDHIOUB M, et al. Monitoring Organic Matter Humification during the Composting of Date Palm Wastes Using Chemical and Spectroscopic Analyses for Arid Soil Quality Improvement [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2023, 54(6): 805-818.
- [10] 彭伟豪, 肖东升. 基于 WiFi-蓝牙混合定位技术的震后压埋人员手机定位方法 [J]. 自然灾害学报, 2023, 32(2): 16-25.
- [11] 韩燕南. 基于 UWB 定位技术的无轨胶轮车路径偏离报警 [J]. 煤矿安全, 2023, 54(9): 218-226.
- [12] 刘蓝, 谢明江, 高珊, 等. 基于无线传感技术的秸秆焚烧火点在线监测系统设计与实现 [J]. 东北农业大学学报, 2020, 51(9): 89-96.
- [13] TAO L. Intelligent Table Lamp Based on Single Chip Microcomputer [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2504: 012063.
- [14] CUI J W, CUI L W, HUANG Z Z, et al. IoT Wheelchair Control System Based on Multi-Mode Sensing and Human-Machine Interaction [J]. Micromachines, 2022, 13(7): 1108.
- [15] 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.
- [16] INTHASUTH T, BOONSONG W, NAEMSAI T. Implementation of ZigBee and NB-IoT Networks in Cooling Monitoring Systems for Peltier-Based Mini Refrigerators [J]. PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY, 2023(5): 143212.
- [17] 张智超, 李新娥, 顾攀, 等. 基于 ZigBee 混合滤波 RSSI 的室内定位算法 [J]. 传感器与微系统, 2023, 42(5): 126-129, 134.
- [18] 冯广. 数据清洗与 ETL 技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2022.
- [19] 闫佳和, 李红辉, 马英, 等. 多源异构数据融合关键技术与政务大数据治理体系 [J]. 计算机科学, 2024, 51(2): 1-14.
- [20] 柯显信, 张文朕, 杨阳, 等. 仿人机器人多传感器定位系统 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(7): 1247-1252.

责任编辑 汤振金

柳剑