

基于 LoRa 与 4G 低功耗物联网灌溉系统设计 与 实现

余威明^{1,2}, 徐群和^{1,2}, 郑胜峰^{1,2}

(1. 浙江工贸职业技术学院 人工智能学院, 浙江 温州 325003;

2. 温州市智能物联与应用协同创新中心, 浙江 温州 325003)

摘要:针对智慧农业中远距离通信与终端低功耗难以兼顾的问题,提出了一种基于 LoRa 与 4G 混合架构的低功耗物联网灌溉系统。通过构建云边端协同体系,系统采用多信道管理机制与基于 CAD 的定时唤醒策略,结合 LoRa 物理层参数优化,建立了终端功耗定量分析模型。测试结果表明,该方案将终端平均工作电流优化至 500 μA 以下,较传统持续接收方案功耗降低 90% 以上,同时通信可靠性显著提升。该研究实现了通信距离与能耗的高效平衡,为智慧农业提供了高效可靠的解决方案。

关键词:LoRa 通信;信道活跃检测;云边端协同;物联网灌溉系统;低功耗优化;智慧农业

中图分类号:TP393.1

文章编号:1000-0682(2026)02-0012-06

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2026.02.003

Design and implementation of a low-power IoT irrigation system based on LoRa and 4G

YU Weiming^{1,2}, XU Qunhe^{1,2}, ZHENG Shengfeng^{1,2}

(1. School of Artificial Intelligence, Zhejiang Industry & Trade Vocational College, Zhejiang Wenzhou 325003, China;

2. Wenzhou Intelligent IoT and Application Collaborative Innovation Center, Zhejiang Wenzhou 325003, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to balance the long-distance communication and low power consumption of terminals in smart agriculture, this paper proposes a low-power Internet of Things irrigation system based on Lora and 4G hybrid architecture. Through the construction of cloud side to side collaboration system, the system uses multi-channel management mechanism and timing wake-up strategy based on CAD, combined with Lora physical layer parameter optimization, and establishes a quantitative analysis model of terminal power consumption. The test results show that the scheme optimizes the average working current of the terminal to less than 500 μA , reduces the power consumption by more than 90% compared with the traditional continuous receiving scheme, and significantly improves the communication reliability. This research realizes the efficient balance between communication distance and energy consumption, and provides an efficient and reliable solution for smart agriculture.

Keywords: LoRa communication; channel activity detection; cloud-edge-device collaboration; IoT irrigation system; low-power optimization; smart agriculture

收稿日期:2025-11-14

基金项目:浙江工贸职业技术学院 2022 年度校级科研创新团队 (cx202203);温州市智能物联技术与应用协同创新中心(温教高[2020]134 号)

第一作者:余威明(1979—),男,浙江天台人,硕士,副教授,研究方向为物联网,嵌入式技术。E-mail:40859103@qq.com

0 引言

随着全球水资源短缺问题日益严峻,传统农业灌溉方式因依赖人工经验存在效率低、实时性差等问题,导致水资源浪费严重。物联网技术为智能灌溉提供了新思路,其中 LoRa 等低功耗广域通信技术凭借其独特优势,在农业监测中展现出巨大潜力。

近年来,学者们在物联网农业领域取得了系列研究成果^[1-9],然而现有方案在技术路径上仍存在局限。一方面,多数研究采用单一通信技术,难以兼顾远距离覆盖与终端极低功耗的双重需求;另一方面,其低功耗设计多集中于休眠调度等高层策略,对 LoRa 物理层参数的深度优化及 CAD 等底层机制的结合应用不足,导致终端功耗仍有较大优化空间。具体而言,张维等^[10]设计的本地监控系统覆盖范围有限且缺乏云平台支持;王一晖等^[11]的云边端系统虽提升了灌溉准确性,但终端功耗优化策略较为常规。这些研究在通信架构协同性与功耗控制精细度方面存在明显不足。

针对上述问题,该文设计一种基于 LoRa 与 4G 低功耗物联网灌溉系统。系统通过构建云边端协同架构,引入多信道管理机制与 CAD 的定时唤醒策略,优化 LoRa 物理层参数,解决通信距离、终端功耗与远程管理问题。为农业灌溉智能化提供了一种

高可靠性、低功耗的通信解决方案。

1 系统总体设计

系统总体由终端感知控制层、网络传输层及应用平台层 3 个部分构成。终端层部署土壤墒情检测终端与灌溉阀门控制终端,负责采集土壤环境数据并执行灌溉动作。网络传输层采用 LoRa 与 4G 技术相结合的方式,通过 LoRa 无线通信技术组建本地低功耗广域网络,将分散的终端数据汇聚至 LoRa 收发器;收发器通过 485 接口与 4G 物联网控制器连接,由后者利用 4G 网络将数据远距离传输至云平台,同时接收来自云平台的控制指令。应用平台层集成了数据库、业务服务器及物联网云平台,提供数据存储、智能分析与决策功能。用户可通过 Web 端或移动 App 实时监控田间信息,并进行远程控制。系统组成框图如图 1 所示。

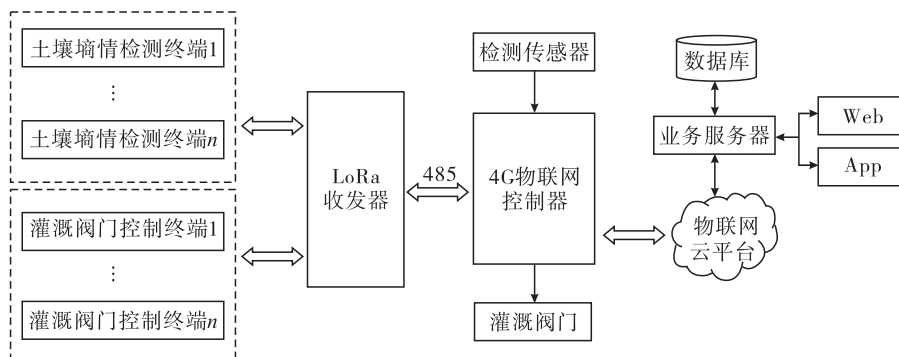


图1 系统组成框图

2 系统硬件设计

系统硬件采用三级架构,由终端感知层、网络汇聚层和远程传输层构成,各层核心硬件模块协同工作。终端感知层由电池供电的 LoRa 终端组成,负责土壤墒情数据采集与灌溉阀门控制。网络汇聚层以 LoRa 收发器为核心,通过星型网络汇聚终端数据。远程传输层的 4G 物联网控制器通过 RS - 485 接口接收数据,并经由 4G 网络上传至云平台。该系统通过 LoRa 与 4G 的混合组网、有线与无线的结合,实现了通信距离、功耗与可靠性的平衡,为低功耗运行奠定了硬件基础。

2.1 LoRa 收发器设计

LoRa 收发器作为系统区域网络协调器,设计聚焦于电源效率及通信可靠性需求。LoRa 收发器硬件系统架构如图 2 所示。LoRa 收发器的主控芯片采用 ARM Cortex - M3 内核的 STM32F103RCT6 微

控制器。电源管理采用 DC - DC 降压电路,将 5 ~ 24 V 宽电压输入稳定转换为 3.3 V 系统电压。通信接口采用分层设计:上行通过隔离型 RS - 485 接口与 4G 物联网控制器连接,下行则集成 Ra - 01S LoRa 模块组建本地星型网络。此外,配备的 OLED 显示屏与按键构成了本地人机交互界面,便于现场监控与参数配置。

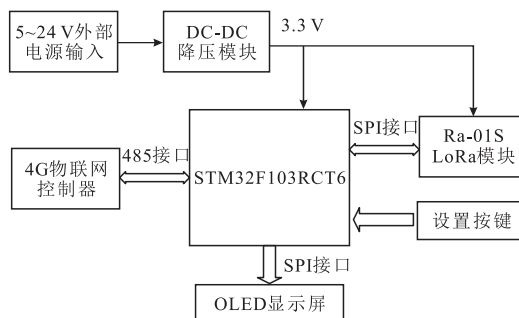


图2 LoRa收发器硬件系统架构框图

2.2 LoRa 终端电路设计

LoRa 终端包含土壤墒情监测终端和阀门控制终端两种大类型。LoRa 终端以 STM32L071RBT6 微控制器为核心,该芯片在停止模式下,RTC 保持工作时电流仅需 0.86 μA ,在低功耗方面性能优异,

STM32 通过 SPI 总线及 GPIO 口与 Ra-01S 的 LoRa 模块通信。3.7 V 的锂电池输入通过 LDO 稳压芯片 XC6206 稳压输出 3.3 V 电压为电路供电。主控芯片与 LoRa 模块的接口如图 3 所示。

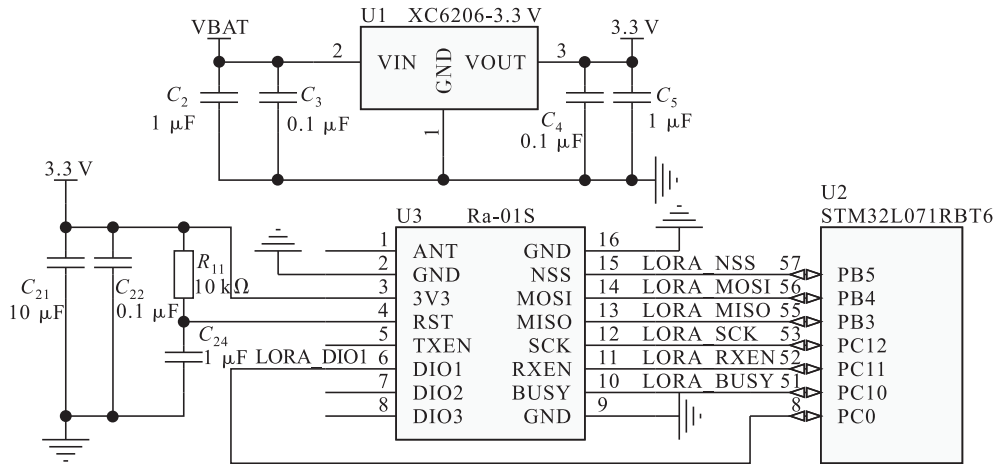


图 3 主控芯片与 LoRa 模块接口图

2.3 4G 物联网控制器设计

4G 物联网控制器以 STM32F405RGT6 为主控芯片,通过串口与 ML307A 4G 模组通信,实现连接物联网平台功能。控制器配置 3 路独立的 485 接口电路,用于连接各种外部 485 设备以及 LoRa 收发器。主控器外接 PCF8563 时钟电路,为系统工作提供 RTC 时钟,外接 24C256 存储电路,用于读写工作参数,控制器扩展了继电器驱动电路、数字及模拟输入接口,实现对执行机构的控制和多种信号的采集。4G 物联网控制器的组成框图如图 4 所示。

统采用 LoRa 收发器与终端组网^[12-13],并通过交互式参数配置流程确保灵活部署与集中管理。相较于 LoRaWAN OTAA 依赖随机接入,易导致信道冲突,且复杂的云端握手流程增加功耗与延迟具有一定的优势。该方案通过本地收发器统一管理,实现终端快速入网与信道资源优化分配,在私有局域网场景下有效降低了终端功耗与系统复杂性,提升了网络部署效率。

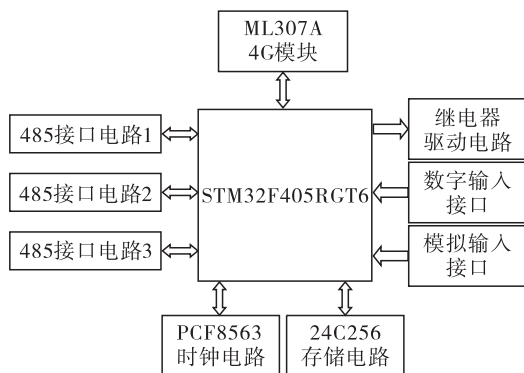


图 4 4G 物联网控制器的组成框图

配置始于终端侧,用户长按配置键,终端进入配置状态,通过配置信道广播其唯一 ID 和设备类型标识符。收发器侧操作员通过人机界面启动“添加终端”,预设工作信道、扩频因子等参数,并监听配置信道,在接收到终端广播后,解析 ID 和类型,随即向终端发送完整配置信息。终端接收配置后,将关键参数永久存储至存储器,发送确认应答,并自动配置射频前端以接入网络。收发器收到确认后,将终端加入数据轮询序列,完成配置。LoRa 收发器配置流程图如图 5 所示,LoRa 终端配置流程图如图 6 所示。此交互式机制确保网络参数配置的可靠性与准确性,为大规模物联网部署提供了有效的设备管理方案。

3 系统软件设计

3.1 LoRa 组网通信设计

为实现大面积农田数据采集与远程控制,本系

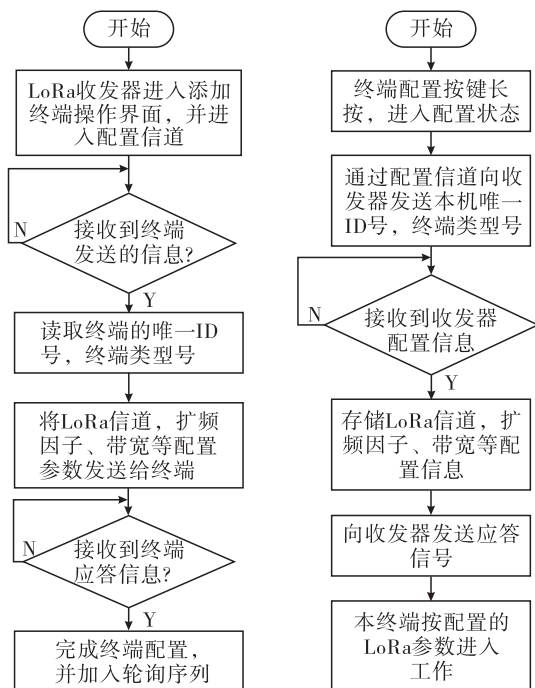


图5 LoRa收发器配置流程图

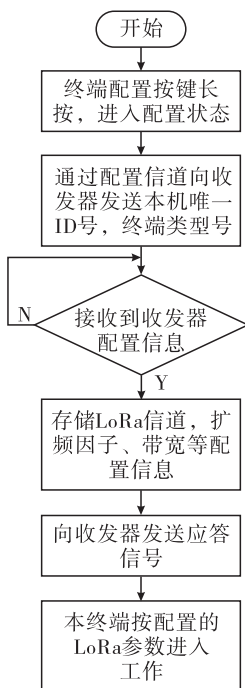


图6 LoRa终端配置流程图

3.2 基于云边端协同的双向通信架构设计

系统通过中移 ML307A 模组的 4G 通信网络接入移动基站,并基于 MQTT 协议与阿里云物联网平台建立双向通信链路^[14-16]。设备与 App 通过订阅和发布以设备 IMEI 号命名的特定主题进行消息交互。4G 物联网控制器将采集的数据通过 MQTT 协议发布至平台,平台通过 AMQP 等消息队列协议将数据转发至业务服务器进行处理与存储。当需要远程控制时,业务服务器通过 HTTPS 协议调用云平台 API,平台接收指令后,再通过 MQTT 协议将其投递给指定的控制器执行操作。此架构有效实现了设备、云平台与业务应用之间的解耦和可靠通信。设备-云-业务服务器数据流示意图如图 7 所示。

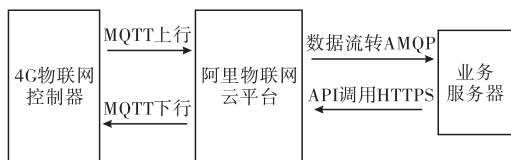


图7 设备-云-业务服务器数据流示意图

4 LoRa 低功耗通信模型与优化

在实际的农业物联网应用中,LoRa 节点大多依靠电池供电,而且部署位置非常分散。因此,设备到底能运行多长时间,直接决定了整个系统在工程上能不能真正落地。如果采用常规的持续监听方式,接收模块一直开启,终端的电量很快就会被耗尽。但如果在省电的同时,终端又漏掉了下发的控制指

令,通信就会失去可靠性。为了平衡省电和通信这两个需求,该文引入了信道活跃检测(CAD)功能,并在此基础上设计了一套定时唤醒机制,目的就是在不漏掉指令的情况下,把终端耗电量压到最低。

4.1 低功耗通信机制与理论模型

该系统利用 CAD 机制来管理终端的运行状态。平时强制让终端进入深度休眠,只在设定的时间点短暂醒来一下,去探测当前信道里有没有前导码。如果在这次短暂的“采样”中没有发现前导码,设备立刻继续睡觉;只有明确检测到了前导码,终端才会真正打开射频接收模块。因此,终端的一个工作周期就被物理拆分成了三部分:休眠阶段、CAD 检测阶段以及数据收发阶段。LoRa 终端 CAD 检测与通信流程图如图 8 所示。

基于此,可建立终端在一个工作周期内的平均电流理论模型:

$$I_{avg} = (T_{sleep} \times I_{sleep} + T_{CAD} \times I_{CAD} + T_{comm} \times I_{comm}) / T_{total} \quad (1)$$

其中: $T_{total} = T_{sleep} + T_{CAD} + T_{comm}$ 为总周期, I_{sleep} 、 I_{CAD} 、 I_{comm} 分别为对应状态的典型工作电流。该模型表明,优化功耗的途径在于最大化低功耗的 T_{sleep} 时长,最小化高功耗的 T_{CAD} 与 T_{comm} 时长及其电流。

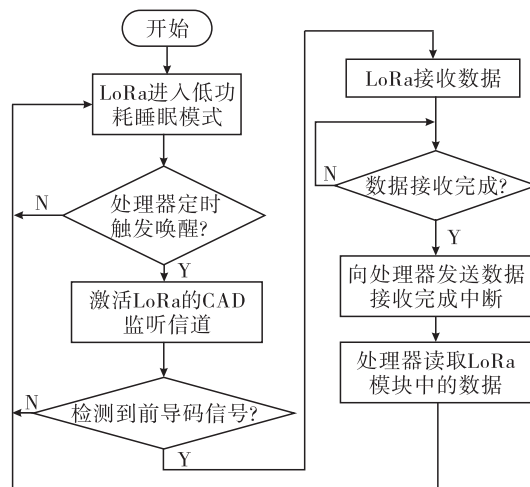


图8 LoRa终端CAD检测与通信流程图

4.2 基于 CAD 的功耗优化分析

CAD 检测时长 T_{CAD} 是影响功耗的关键参数。其计算公式为:

$$T_{CAD} \approx (N_{symbol} + N_{overhead}) \times T_{symbol} \quad (2)$$

其中, T_{symbol} 为单个 LoRa 符号的持续时间,由通信参数决定:

$$T_{symbol} = 2^{SF} / BW \quad (3)$$

式(3)揭示了扩频因子 SF 和带宽 BW 对功耗的直接影响。增大 SF 会以指数级延长 T_{symbol} ,从而

增加 T_{CAD} 和功耗,但能显著提升接收灵敏度和通信距离;增大 BW 则可线性缩短 T_{symbol} ,降低功耗,但会牺牲一定的接收灵敏度。

该系统通过权衡通信距离与功耗需求,将参数折中设置为 $SF = 10, BW = 125 \text{ kHz}$ 。代入公式(3)计算得 $T_{symbol} = 2^{10}/125 \text{ kHz} = 8.192 \text{ ms}$ 。进而由公式(2)求得单次 $T_{CAD} \approx 40.96 \text{ ms}$ 。这一优化选择在保证田间通信范围的同时,将每次信道检测的活跃时间控制在毫秒级,为终端进入深度休眠争取了足够长的时间窗口(T_{sleep} 设置为 900 ms),从而显著降低了平均电流。

4.3 通信实时性约束与参数权衡

T_{sleep} 的设定并非越长越好,它受到系统最大允许通信延迟的严格约束。该灌溉系统中,设定控制指令应在 1 s 内被终端响应。因此,工作周期 T_{total} 必须小于此约束时间。设计中, $T_{total} = 900 \text{ ms} + 40.96 \text{ ms} + \text{通信时间} \approx 944.96 \text{ ms} < 1 \text{ s}$,在满足实时性要求的前提下实现了功耗优化。通过建立理论功耗模型,并深入分析 CAD 参数与通信性能之间的内在联系,为 LoRa 终端提供了一种在给定实时性约束下的量化低功耗设计方法,为系统的长续航能力奠定了理论基础。

5 系统测试与性能分析

系统硬件包括 4G 物联网控制器、LoRa 收发器、LoRa 阀门控制终端,为验证系统功能与性能,对硬件模块进行全面测试,内容包括各模块独立功能、相互通信以及与物联网平台、服务器和客户端的联动。测试重点为基于 CAD 定时唤醒策略的 LoRa 终端功耗:通过量化一个完整监听周期(包含休眠、CAD 检测和接收模式)的平均电流,以评估其低功耗性能。LoRa 阀门控制终端实物如图 9 所示。

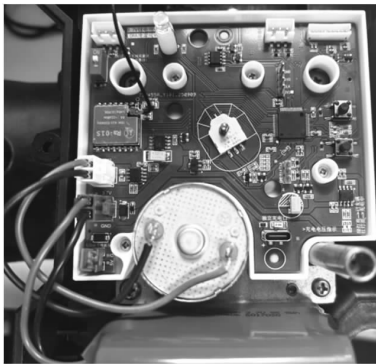


图 9 LoRa 阀门控制终端实物图

5.1 低功耗性能验证与对比分析

为定量评估基于 CAD 定时唤醒策略的实际效

能,进行了严格的功耗测试。测试设定终端在典型工作周期内休眠 900 ms ,随后进行 40.96 ms 的 CAD 检测。各状态下的工作电流已通过精密仪器实测标定,具体数据见表 1。

表 1 LoRa 定时 CAD 检测的工作电流

工作状态	工作电流/ μA	持续时间/ ms
LoRa 休眠状态	1	900
LoRa 的 CAD 检测	5000	40.96
MCU 休眠状态	2	900
MCU 工作状态	6000	4
LoRa 启动和退出	500	4

在未检测到信道活跃时,单周期时间 $T_{CAD} = 900 + 40.96 + 4 = 944.96 \text{ ms}$,其中 LoRa 启动和退出与 MCU 工作时间是重叠的,则 LoRa 与 MCU 的完成一轮 CAD 检测的平均工作电流为:

$$I_{CAD} = (\sum (I_{state} \times T_{state})) / T_{total} \quad (4)$$

$$= (900 \times 1 + 40.96 \times 5000 + 900 \times 2 + 4 \times 6000 + 4 \times 500) / 944.96 \approx 247.1 \mu\text{A}$$

当终端接收到收发器发送过来的 LoRa 联络信号,还需要进行数据接收与发送,对于土壤墒情检测终端,还需要完成传感器数据的采集,对于阀门控制类终端,需要启动阀门的控制功能。若收发器以每隔 1 个小时与某个 LoRa 终端建立通信,LoRa 终端接收到数据后并上报数据,在 LoRa 发射功率为 19 dB 时,发送 10 个有效字节,各个部分的工作电流与持续时间如表 2 所示。

表 2 LoRa 接收到本信道数据的工作电流

工作状态	工作电流/ mA	持续时间/ ms
LoRa 数据接收	5	550
MCU 数据接收	10	60
MCU 数据上报	10	60
LoRa 数据上报	70	500

以收发器每隔 1 个小时与某信道终端联络一次为例,LoRa 终端的平均工作电流为:

$$I_1 = (5 \times 550 + 10 \times 60 + 10 \times 60 + 70 \times 500) / (3600 \times 1000) \approx 0.0108 \text{ mA} = 10.8 \mu\text{A} \quad (5)$$

对于阀门控制终端,每天执行一次开合动作,电机动作的电流约为 500 mA ,持续时间约为 40 s ,则平均电流为:

$$I_2 = \frac{500 \times 40}{3600 \times 24} \approx 0.2315 \text{ mA} = 231.5 \mu\text{A} \quad (6)$$

对于阀门终端,每个终端的总平均工作电流为:

$$I = I_{CAD} + I_1 + I_2 = 247.1 + 10.8 + 231.5 = 489.4 \mu\text{A} \quad (7)$$

采用 10 000 mAh, 3.7 伏的锂电池(有效容量 85%), 电池充满电后理论使用时长(天)为:

$$t = 10\,000 \times 0.85 / 0.489\,4 / 24 \approx 723.7 \quad (8)$$

为了验证设备在复杂环境下的长期表现, 将系统放置在户外进行了为期 30 天的实地测试。后台记录显示, 电池的放电曲线平缓, 实际的掉电速度与前面公式算出的理论值基本吻合。经实测该方案将终端平均工作电流从传统方案的 5 mA 量级成功降低至 500 μ A 以下。经计算, 功耗降低幅度超过 90%, 能效提升明显。该设计较好地兼顾了下发指令的及时性和终端的低功耗, 对于农业环境里那些不方便经常换电池的物联网节点来说, 是一种有效的解决方案。

5.2 系统功能与性能集成测试

为全面验证系统的稳定性和实用性, 在低功耗测试基础上, 对系统进行了端到端的功能与性能集成测试。测试内容涵盖通信链路、数据流完整性和控制实时性等多个维度, 确保系统各组件协同工作无误。



图 10 手机 APP 控制界面

测试结果表明, LoRa 收发器能够有效管理多达 50 个以上终端, 实现稳定的分信道通信与轮询调度。终端数据经 LoRa 网络汇聚后, 通过 4G 控制器可靠传输至阿里云平台, 通信链路稳定。业务服务器对接收到数据进行解析、存储与可视化处理, Web 端与手机 App 均能正确显示实时数据和历史曲线。在控制功能测试中, 本地手动控制与远程自动灌溉

指令均能准确、及时地下发至指定终端, 阀门响应动作准确, 系统平均响应延迟小于 3 s, 满足田间灌溉实时性要求。手机 App 控制界面如图 10 所示, 可清晰展示田间状态并完成灌溉参数设置。

通过上述全方位的测试, 验证了系统在硬件设计、通信协议和软件平台方面的协同性与可靠性, 为实际应用部署奠定了坚实基础。

6 结论

该文设计并实现了一种基于 LoRa 与 4G 的低功耗物联网灌溉系统。该系统通过多信道管理、CAD 定时唤醒机制以及云平台集成, 构建了高效的云边端协同管控模式。测试结果表明, 在确保通信可靠性的前提下, 使终端平均功耗较传统持续接收方案降低 90% 以上, 有效解决了远距离覆盖与终端功耗间的矛盾。该研究为智慧农业提供了一套高性能、低功耗的灌溉解决方案, 未来工作将聚焦于自适应信道分配算法与轻量级 M2M 协议研究, 以进一步提升系统在复杂场景中的扩展性与适应性。

参考文献:

- [1] 王大涛, 滕德贵, 王灵犀. 基于 LoRa 的多传感器低功耗数据采集方法[J]. 现代电子技术, 2024, 47(10): 23-27.
- [2] 顾志强, 朱武, 王光东. 基于 LoRa 和 NB-IOT 的远程温室监控系统[J]. 工业仪表与自动化装置, 2025(02): 48-53.
- [3] 黄光斌. 基于 LoRa 技术的电力检修作业挂接地线智能监测系统[J]. 兵工自动化, 2025, 44(06): 56-61.
- [4] 张铭存, 任浪, 陈浩, 等. 基于 SX1268 的油田数据采集终端设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(04): 67-71.
- [5] 李小敏, 杨延宁, 赵艳丽. 基于云平台的智能家庭控制系统设计[J]. 现代电子技术, 2025, 48(03): 161-166.
- [6] 李贺, 张立新, 郭天圣, 等. 基于物联网的棉田节水灌溉自动控制系统设计[J]. 农机化研究, 2024, 46(05): 66-71.
- [7] 张瑞阳, 陶怡, 周珺成, 等. 基于智慧灌溉的控制器设计与应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2025(03): 38-44.
- [8] 杜青青. 基于 LoRa 的智慧果园墒情监测系统研究与设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2022(03): 13-17+27.
- [9] 任志敏. 一种基于阿里云物联网的远程锁系统设计[J]. 科技与创新, 2025(13): 79-81+85.

(下转第 28 页)

消防、降尘等环节,井下循环利用率达到 62.5%,极大地减少了新水的取用量。

(2)水质稳定性:系统对矿井水中悬浮物的处理效果尤为突出。进水悬浮物浓度在 150 ~ 450 mg/L 范围内波动,经处理后,出水悬浮物浓度稳定在 10 mg/L 以下,平均值低于 5 mg/L,远优于规范所要求的用水标准。

(3)节能效益分析:该效益主要源于井下就地处理与回用,避免了将大量矿井水提升至地面所消耗的势能。

$$E = \frac{Q * H}{367 * \eta_{pump} * \eta_{motor}}$$

式中: E 为日节约电量; Q 为流量; H 为扬程; T 为每日平均运行小时数; 367 为换算常数; η_{pump} 为水泵效率; η_{motor} 为电机效率。

以系统给井下供水 1500 m³,扬程 300 m, η_{pump} 为 75%, η_{motor} 为 93% 计算,日节约电量为 1758 kWh,以年生产 330 天计算,年节约用电 588 117 kWh,减少地面水处理量 49.5 万吨。

5 结语

该文设计了一种基于 PLC 的井下矿井水利用与智能抽排控制系统,该系统针对含悬浮物浓度高、低矿化度的矿井水,采用“多级沉淀 - 超磁分离 - 反冲洗过滤”工艺,并通过智能控制算法实现了供水、排水、应急三种运行模式的秒级自动切换,显著提高了系统可靠性和应急响应能力。出水水质稳定

满足井下消防和除尘用水标准,降低了能耗和运行成本。未来研究将进一步优化模糊评价模型,结合机器学习算法提升预测精度。同时在实际应用矿井中开展长期监测,验证系统稳定性、适应性和长期效益,为煤矿的智能化建设与绿色发展提供更可靠的技术支撑。

参考文献:

[1] 王东升. 煤矿矿井水处理技术应用现状及前景分析[J]. 煤质技术, 2021, 36(3): 30 - 34.

[2] 李福勤, 王丛, 郑庚州, 等. 煤矿矿井水处理技术现状与展望[J]. 工业水处理, 2024, 44(9): 1 - 8.

[3] 靳鹏晨. 煤矿井下排水系统的优化设计[J]. 煤矿机械, 2024, 45(6): 17 - 19.

[4] 焦亚军. 基于多阶段决策的煤矿井下排水控制系统优化设计[J]. 江西煤炭科技, 2024(3): 318 - 321.

[5] 史志红. 煤矿智能化排水系统的应用研究[J]. 煤炭工程, 2024, 56(10): 153 - 159.

[6] 王国法, 杜毅博. 煤矿智能化标准体系框架与建设思路[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 1 - 9.

[7] 李明生, 石静. 煤矿多水平排水智能控制系统的设计与研究[J]. 冶金管理, 2023(2): 109 - 112.

[8] 蒋培洪, 欧阳远波, 刘武. 基于加压泵站恒压自动供水的中控系统设计[J]. 机电工程技术, 2022(11): 207 - 211.

[9] 吴文臻. 矿用多水平智能排水系统的应用研究[J]. 煤矿机械, 2022, 43(10): 166 - 168.

[10] 李钢. 基于模糊 PID 控制的恒压供水系统的研究[J]. 电子设计工程, 2024, 32(13): 83 - 87.

(上接第 17 页)

[10] 张维, 强华. 基于 STM32 的智慧农业大棚温湿度监控系统的设计[J]. 工业仪表与自动化装置, 2025(05): 36 - 41.

[11] 王一晖, 徐法虎, 韩腾飞, 等. 基于云边端的小麦田智慧灌溉系统[J]. 农机化研究, 2025, 47(12): 224 - 232.

[12] 徐尚瑜, 张燕, 陈文君, 等. LoRa 低功耗农业传感终端的设计与研发[J]. 传感技术学报, 2021, 34(12): 1690 - 1696.

[13] 曹凯华. 基于 LoRa 技术的物联网通信协议研究与设

计[D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.

[14] 曹小华, 李泊桓, 徐上尉. 基于 MQTT 协议的物联网岸电监控系统[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(03): 11 - 16 + 27.

[15] 刘申, 杨亮亮. 基于阿里云物联网平台的鸡舍环境监控系统设计[J]. 南方农机, 2024, 55(18): 148 - 151 + 169.

[16] 王震鲁, 戴硕, 白涛. 基于 STM32 和 4G 的牛舍环境监测与调控系统设计[J]. 电子设计工程, 2025, 33(18): 21 - 25.