

基于NB-IoT技术的轻量化智能灌溉软硬件系统集成

王泽阳 李泽卿 冯吉 张海文 刘畅*

北京农业职业学院

DOI:10.32629/as.v9i5.4014

[摘要] 小农户灌溉系统普遍存在用水效率低、劳动强度大的问题,因此实现小农户灌溉系统的智能控制,对促进农业可持续发展具有重要意义。然而,小农户的生产模式、经济条件与技术能力在一定程度上制约了灌溉系统的数字化升级。本文针对小农户规模小、地块分散的特点,采用NB-IoT技术简化智能灌溉系统的网络结构,使其更适应小农户生产模式;借助易于获取与学习的开源软硬件降低开发门槛,实现低成本、低功耗、低代码快速开发。系统可为用户提供数据可视化和灌溉自动控制功能,为小农户在成本与技术约束条件下参与农业数字化转型提供了一套轻量级智能灌溉系统框架。

[关键词] NB-IoT技术; 轻量化; 智能灌溉; 系统集成

中图分类号: S275 **文献标识码:** A

Integration of Lightweight Smart Irrigation Hardware and Software System Based on NB-IoT Technology

Zeyang Wang Zeqing Li Ji Feng Haiwen Zhang Chang Liu*

Beijing Agricultural Vocational College

[Abstract] Traditional irrigation systems for small-scale farmers commonly suffer from low water use efficiency and high labor intensity. Intelligent control of such irrigation systems is of great significance for promoting agricultural sustainability. However, the production mode, economic conditions and technical capacity of small-scale farmers restrict the digital upgrading of irrigation systems to some extent. Considering their small operation scale and scattered farmland, this paper adopts NB-IoT technology to simplify the network architecture of smart irrigation systems, making the system better adapted to smallholder production modes. Open-source hardware and software with easy accessibility and operability are used to lower development barriers and enable low-cost, low-power and low-code rapid development. The system provides data visualization and automatic irrigation control functions, offering a lightweight smart irrigation system framework for small-scale farmers under cost and technical constraints.

[Key words] NB-IoT Technology; Lightweight; Smart Irrigation; System Integration

1 背景意义

农业用水占全球水资源消耗的70%,过去20年全球人均淡水资源占有量下降了20%以上,超过60%的灌溉农田面临较高缺水风险,提高水利用效率对保障全球粮食安全至关重要。智能灌溉系统可以根据作物、土壤和气象状况进行精准化、自动化灌溉,是提升资源利用效率与作物产量的重要手段。特别是与物联网技术结合后,广泛感知和高效控制进一步提升了灌溉系统的可持续运行能力和应对气候变化的能力,正成为解决农业用水问题的重要途径^[1-2]。

我国农业生产主体仍以小农户为主,灌溉管理普遍依赖人工,存在水资源利用率低、劳动强度大等问题。推动灌溉数字化转型,可以帮助农户在数据支持下通过手机等终端开展远程精

准管理,从而节约水资源、降低劳动投入、提高作物产量,对缓解农业水资源短缺、促进农业可持续发展具有重要意义^[3]。尽管智能灌溉具有明显优势,但与大规模农场相比,小农户在转型过程中仍面临生产模式、技术条件和经济投入等多重挑战。

小农户管理面积小、地块分散,其生产特征难以适配现有智能灌溉技术体系。当前,基于物联网架构的智能灌溉系统常采用Wi-Fi、ZigBee、LoRa等无线通信技术构建覆盖田间的无线局域网,分布式节点设备通常不具备直接接入互联网的能力,需要由高性能汇聚设备进行数据转发。当系统包含大量节点时,该方式可以有效降低单个节点设备的成本和功耗^[4]。但在地块面积较小的情况下,汇聚设备在系统总成本中的占比会明显增加;对于分散地块,甚至需要部署更多汇聚设备才能实现有效覆盖^[5]。

本文针对小农户在灌溉数字化转型中面临的技术与成本约束问题,提出了一种轻量化智能灌溉系统。该系统基于物联网架构,可提供数据可视化和灌溉自动控制功能;采用低功耗广域网中的NB-IoT技术实现设备低功耗互联网直连,优化网络结构;采用易于获取和学习的开源硬件、轻量级通信协议以及图形化编程方式,实现低成本、低代码快速开发。

2 材料与方法

2.1 系统架构

本文采用4层物联网模型构建系统架构,如图1所示。感知层以Raspberry Pi Pico开源硬件为核心构建终端节点,终端节点分为采集节点与控制节点两类:采集节点用于连接传感器并采集田间数据,控制节点用于连接阀门等执行设备。

传输层采用NB-IoT技术直接连接远程服务器,终端节点通过移动通信基站接入互联网,省去了网关等中间设备。节点与服务器之间采用轻量、硬件开销小、适合低功耗设备的MQTT(Message Queuing Telemetry Transport)协议进行通信。

服务器层采用开源、低代码的Node-RED软件实现应用服务,包括数据可视化、数据处理、灌溉决策和设备控制等功能;同时采用开源Mosquitto MQTT Broker提供协议服务。

在用户层,农户可通过智能手机或电脑以Web方式访问系统UI界面,查看田间数据、进行设备远程控制并实现自动灌溉管理。

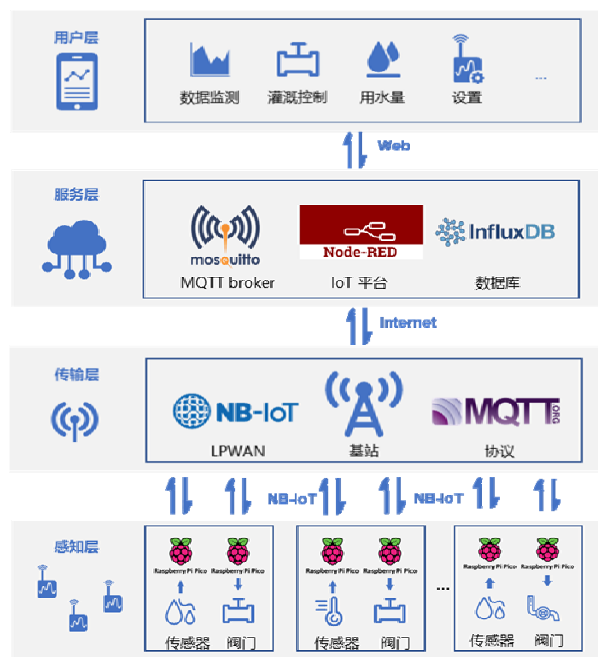


图1 系统架构

2.2 终端节点硬件设计

终端节点的硬件组成,采用Raspberry Pi Pico开发板作为核心控制器。系统使用上海芯通SIM7020C NB-IoT通信模块实现互联网连接,该模块与控制器之间采用UART串口连接。在采集终端节点中,为兼容更多类型的传感器,配置了一个RS485转TTL模块。该模块基于MAX485芯片,可实现RS485传感器接入,同时将

Raspberry Pi Pico的模拟量接口引出,用于连接模拟输出传感器。在控制终端节点中,使用苏州智微RZ7899模块产生脉冲信号,驱动直流脉冲电磁阀;当被控设备为水泵时,也可将该模块替换为继电器。在供电方面,系统采用锂电池与太阳能电池板组合供电,由3.7 V 1000 mAh聚合物锂电池与6 V 5 W太阳能电池板供电,CN3791 MPPT模块负责充电和太阳能电源管理,其输出的3.7~4.2 V电压为单片机和通信模块供电。具有关断功能的5 V DC-DC升压模块用于为RS485转换模块、阀门驱动模块、传感器以及电流较大的阀门供电。其他附件包括防水外壳、天线、支架和开关等。

2.3 程序与协议

节点程序采用MicroPython语言编写。MicroPython是面向微控制器环境的Python 3轻量级实现,包含部分Python标准库,具有语法清晰、易于学习等特点。节点与服务器之间采用MQTT协议通信,节点设备中的MQTT通信过程通过SIM7020芯片自带的AT指令实现,无需进一步增加复杂代码。控制器通过串口发送特定AT指令即可完成通信。MQTT消息载荷采用JSON格式,包含设备ID(通常为NB-IoT模块自身的IMEI号)、载荷和休眠时间3部分。其中,采集节点的载荷通常为传感器数据,控制节点的载荷为阀门开启或关闭命令;休眠时间为设备进入低功耗状态的持续时间。

2.4 服务器端软件系统

一个物联网软件平台通常涉及多个IT专业领域,需要不同分工的技术人员协作开发。对于小规模灌溉公司或非IT专业的农业技术人员而言,这是一项较大的挑战。为降低开发难度,本文选用Node-RED开源物联网平台作为软件系统。Node-RED是一种低代码开发工具,可通过将预设模块以“流”的方式连接起来,快速完成物联网系统搭建。其基于浏览器的图形化编程方式降低了开发门槛,同时具备丰富的第三方模块资源。

本文在系统实现时使用基础模块和dashboard模块构建UI界面。在功能上,系统通过MQTT与田间设备通信,通过HTTP API获取实时气象数据,并通过函数模块实现灌溉自动控制。用户可以设定作物适宜的土壤水分区间,系统据此自动控制灌溉开启与关闭,使田间水分维持在设定范围内。服务器端还安装Mosquitto MQTT Broker以实现MQTT通信。整个系统既可部署在云端服务器上,也可部署在本地PC或低成本Raspberry Pi上。

2.5 节能策略

智能灌溉系统中的田间设备通常采用电池与太阳能结合的方式供电。降低设备功耗不仅可以减少对电池容量和太阳能充电功率的需求,也有助于保障设备长期稳定运行。在低功耗设计方面,本文选用的Raspberry Pi Pico休眠电流为1 mA, SIM7020C模块支持NB-IoT的PSM低功耗模式,该模式下模块功耗约为10 μ A。对于传感器、阀门驱动等周边模块,则由控制器控制升压模块关断电源以降低能耗。

在工作流程方面,采集节点每次完成数据上报后立即进入休眠模式以节约电能。但控制节点通常需要保持在线以随时接收命令,因此控制器与通信模块需维持唤醒状态,功耗相对较

高。部分系统甚至采用铅酸电池等容量较大但环境风险更高的供电方式。

灌溉管理具有间歇性特征,并非作物生长全过程都需要持续灌溉,而是在土壤水分达到灌溉阈值时进行。基于这一特点,本文对控制终端节点采取了根据土壤水分动态调整休眠时间的策略。控制节点采用长周期休眠,由服务端决定休眠时长;设备每次唤醒时订阅MQTT消息,判断是否需要更新休眠周期。在不需灌溉的情况下,系统采用长周期休眠(30 min/次);接近灌溉阈值时采用短周期休眠(5 min/次);达到灌溉阈值时采取持续在线策略。用户也可手动设置休眠周期。

2.6 测试与评估

2.6.1 测试地点与传感器。测试地点位于北京农业职业学院,选择一座温室大棚作为测试场景。系统共布置两个采集终端节点和两个控制节点。每个采集节点连接2个TDR土壤水分传感器,每个控制节点连接1个直流脉冲电磁阀。

2.6.2 功耗测试。采用EMK850+微功耗测试仪对节点工作电流进行测试,测量精度为0.1 μ A,设定采样率为10 K/s,模块性能与连接方式见补充材料。设备理论续航时间 T_b 计算公式如下:

$$T_b = \frac{C}{24I_{avg}} \quad (1)$$

式中, T_b 为电池续航时间(d), C 为电池容量(mAh), I_{avg} 为设备工作时的平均电流(mA)。

设备工作电流呈现明显的阶段性特征。本文将设备在一个采样周期内的功耗划分为若干阶段,并采用加权方法计算平均电流。

$$I_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i I_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (2)$$

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{60} \quad (3)$$

式中, t_i 为第*i*个阶段的工作时间(s),如发射、接收等; I_i 为该阶段的算术平均电流(mA); T 为设备采样周期(min)。

3 结果与讨论

3.1 设备功耗

设备初次上电并在网络中注册时,需要较长时间,这与NB-IoT窄带宽、低速率的通信特性有关。因此,本文在休眠时选择将通信模块设置为PSM模式,而不是直接关断模块电源。节点唤醒工作阶段的平均电流为35.3 mA,进入休眠状态后,系统休眠电流小于1.4 mA。在1000 mAh电池支持下,以15 min为休眠周期,加权电流约为1.44mA,设备在完全无外部输入的情况下可工作29 d。由于本文使用的是市面常见开源模块,其低功耗性能与专业低功耗模块仍有一定差距,但仍可实现相对较长的续航。同时,系统选用具备MPPT功能的电源管理模块,可提高电能补充效率。

3.2 系统成本与效益

系统中各硬件的成本,单个采集节点的成本为212.95元,单

个控制节点的成本为219.90元。运行成本包括NB-IoT通信费和云服务器租赁费。系统选用中国移动NB-IoT物联卡,费用为18.00元/年,包含100 MB流量。租用配置较低的共享型服务器(1 vCPU、1 GB RAM、30 GB SSD)时,根据服务商不同,年费用约为240~480元。对于包含10个节点的系统,每年运行费用约为420~660元。也可将服务器程序部署于本地PC或Raspberry Pi等低成本设备上,以进一步降低成本。

智能灌溉系统可为农户节省人工成本。当前北京地区农业劳动力雇佣费用约为150~200元/人·天。采用滴灌时,大田作物每个生产季约灌溉6~10次,人工管理每次按1个工计,全周期人工费用约为900~2000元。与此相比,系统运行费用低于用工费用。同时,智能灌溉系统还有助于节约水资源、降低劳动投入并提高灌溉管理效率,从而加快系统成本回收。

4 结论

本文根据小农户生产特点,提出了一种低成本、低代码、易于搭建的轻量级智能灌溉系统框架。系统采用NB-IoT通信技术简化网络结构,通过开源硬件、简单通信协议和低代码编程方式降低系统构建的技术门槛,并实现了动态低功耗控制。该系统可为小农户提供数据可视化和灌溉自动控制功能,为小农户灌溉数字化转型、提升水分利用效率和降低劳动强度提供物联网解决方案。

在下一步研究中,硬件方面可将现有模块集成为Shield形式,以提高DIY制作的便利性和系统集成度;软件方面可进一步利用Node-RED平台扩展性强的特点,完善灌溉决策方法与多租户云服务模式,从而进一步降低系统运行成本。

[基金项目]

北京农业职业学院2025年度校级科研创新团队项目:北京市郊区地下水滴灌系统灌水器堵塞控制技术研究(编号:XY-TD-25-04)。

[参考文献]

- [1]张琼.基于NB-IoT技术的智慧灌溉系统无线感知节点及集成平台研究[D].石河子大学,2024.
- [2]张兴达.基于互联网+的智慧灌溉系统设计研究[J].农机化研究,2021,43(11):211-215.
- [3]郭亚军.基于智慧灌溉系统的疏勒河灌区来水量预测分析[J].内蒙古科技与经济,2024,(04):110-113.
- [4]梁杰,常硕.基于物联网的智慧灌溉系统与控制技术研究[J].黑龙江科学,2023,14(06):60-63.

[5]时锦豪,李妙祺,张芮.甘肃引大灌区典型智慧灌溉系统设计及应用效果分析[J].水利技术监督,2023(5):184-187+265.

作者简介:

王泽阳(2007—),男,汉族,北京密云人,大专,研究方向:智能灌溉。

*通讯作者:

刘畅(1992—),男,汉族,山东人,职称:讲师,博士,研究方向:智慧灌溉。