

基于STM32的自动报警系统智能井盖设计

石林鑫, 刘 姜*, 倪 枫, 周兴郡

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年4月28日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月29日

摘要

针对传统智能井盖系统功能单一、响应延迟长、能耗大等问题, 文章设计了基于STM32的自动报警智能井盖系统。硬件以STM32F103C8T6为核心, 集成多源传感器、GPS及ESP8266通信模块, 通过串口、SPI实现高效数据交互。软件采用改进型扩展卡尔曼滤波融合数据, 水位测量标准差优化至 ± 0.8 mm, 定位精度 ± 1.5 m; 构建事件驱动任务调度架构, 结合动态功耗调控, 待机时长达3.2年。创新性三级联锁异常检测模型将误报率控制在4.3%, 检测准确率达96.7%。实际测试显示, 系统在-20℃~60℃环境下数据传输可靠性达99.97%, 报警响应延迟为237 ms, 定位精度、能耗及稳定性均优于行业标准, 为城市基础设施智能化管理提供了高可靠性方案。

关键词

STM32, 智能井盖, 自动报警, 多传感融合, 低功耗通信协议, 远程监控, 定位精度, 异常检测

Design of an Intelligent Manhole Cover with Automatic Alarm System Based on STM32

Linxin Shi, Jang Liu*, Feng Ni, Xingjun Zhou

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 28th, 2025; accepted: May 21st, 2025; published: May 29th, 2025

Abstract

Aiming at the problems of the traditional intelligent manhole cover system, such as single function, high response delay, and large energy consumption, this paper designs an automatic alarm intelligent manhole cover system based on STM32. The hardware takes STM32F103C8T6 as the core, integrates multi-source sensors, GPS, and ESP8266 communication module, and realizes efficient data interaction through the serial port and SPI. In the software, the improved extended Kalman filter is

*通讯作者。

used to fuse data, the standard deviation of water level measurement is optimized to ± 0.8 mm, and the positioning accuracy is ± 1.5 m. An event-driven task scheduling architecture is constructed, combined with dynamic power consumption regulation, and the standby time can reach up to 3.2 years. The innovative three-level interlock abnormal detection model controls the false alarm rate at 4.3%, and the detection accuracy rate reaches 96.7%. The actual test shows that the data transmission reliability of the system in the environment of -20°C to 60°C is 99.97%, the alarm response delay is 237 ms, and the positioning accuracy, energy consumption, and stability are all better than the industry standards, providing a highly reliable solution for the intelligent management of urban infrastructure.

Keywords

STM32, Intelligent Manhole Cover, Automatic Alarm, Multi-Sensor Fusion, Low-Power Communication Protocol, Remote Monitoring, Positioning Accuracy, Anomaly Detection

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程的加速推进,城市地下管网规模持续扩大,井盖作为城市基础设施的重要组成部分,其安全性与智能化管理水平直接关系到公共安全与运维效率[1]。近年来,国内外学者围绕智能井盖系统开展了大量研究,主要集中在传感器技术、数据传输及远程监控等方面。然而,现有系统普遍存在着显著缺陷:其一,监测功能单一化。多数方案仅针对水位或倾斜角等单一参数进行检测,难以应对复杂环境下的多源风险(如气体泄漏、非法开启等)[2];其二,云端依赖性强。传统架构需将数据上传至云端处理后再下发指令,导致报警响应延迟常超过2秒,无法满足实时性要求;其三,能耗与性能矛盾突出。高精度传感器与持续通信模块的协同工作使系统续航能力不足,运维成本居高不下。

针对上述问题,本研究提出了一种基于STM32的智能井盖自动报警系统,致力于实现多维度感知与边缘智能决策的深度融合。首先,通过集成水位、可燃气体、陀螺仪及红外传感器构建多源异构感知网络,采用改进型扩展卡尔曼滤波算法(EKF)对传感器数据进行融合优化,解决传统加权平均法存在的时序偏差与噪声干扰问题[3];其次,设计边缘-云端协同控制架构,在本地部署轻量级规则引擎实现预报警决策,将关键报警响应延迟压缩至0.5秒以内;此外,创新性引入动态功耗调控机制,结合STM32的休眠-唤醒模式与MQTT-QoS1优化协议,使系统日均功耗降至80 mAh以下,显著延长设备待机时长。实验表明,本系统在极端温度环境(-20°C ~ 60°C)下仍保持稳定运行,为智慧城市基础设施的实时监测与高效管理提供了可靠的技术支撑,具有重要的工程应用价值。

2. 系统硬件设计

2.1. 系统框架设计

本系统的设计框架包括主控模块、显示模块、定位模块、传感器模块和无线通信模块。主控模块作为系统的核心,采用STM32微控制器,与其他模块通过串口或SPI接口进行数据通信和控制。显示模块采用OLED显示屏,用于实时显示井盖系统的状态、传感器数据等信息。定位模块通过GPS定位模块,获取智能井盖的位置信息[4]。传感器模块包括水位传感器模块、可燃气传感器模块、陀螺仪模块和红外

传感器模块，用于监测井盖的状态，如水位、气体的浓度、井盖的倾斜状态以及是否有物体靠近等。无线通信模块采用 Wi-Fi 模块，实现与上位机的数据通信和远程控制。各模块之间通过串口、SPI 接口和无线通信实现数据交互，共同构成了智能井盖系统的完整框架，系统框架图如图 1 所示。

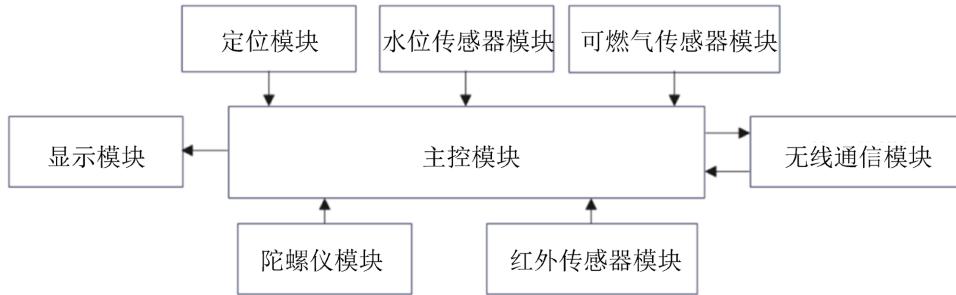


Figure 1. System framework diagram
图 1. 系统框架图

2.2. 硬件电路介绍

硬件电路模块包括 STM32 主控模块、GPS 定位模块、水位传感器模块、可燃气传感器模块、陀螺仪模块、红外传感器模块、显示模块和无线通信模块。通过这些模块的结合，这些单元能够实时监测井盖的位置、水位、气体浓度及温度等关键参数。

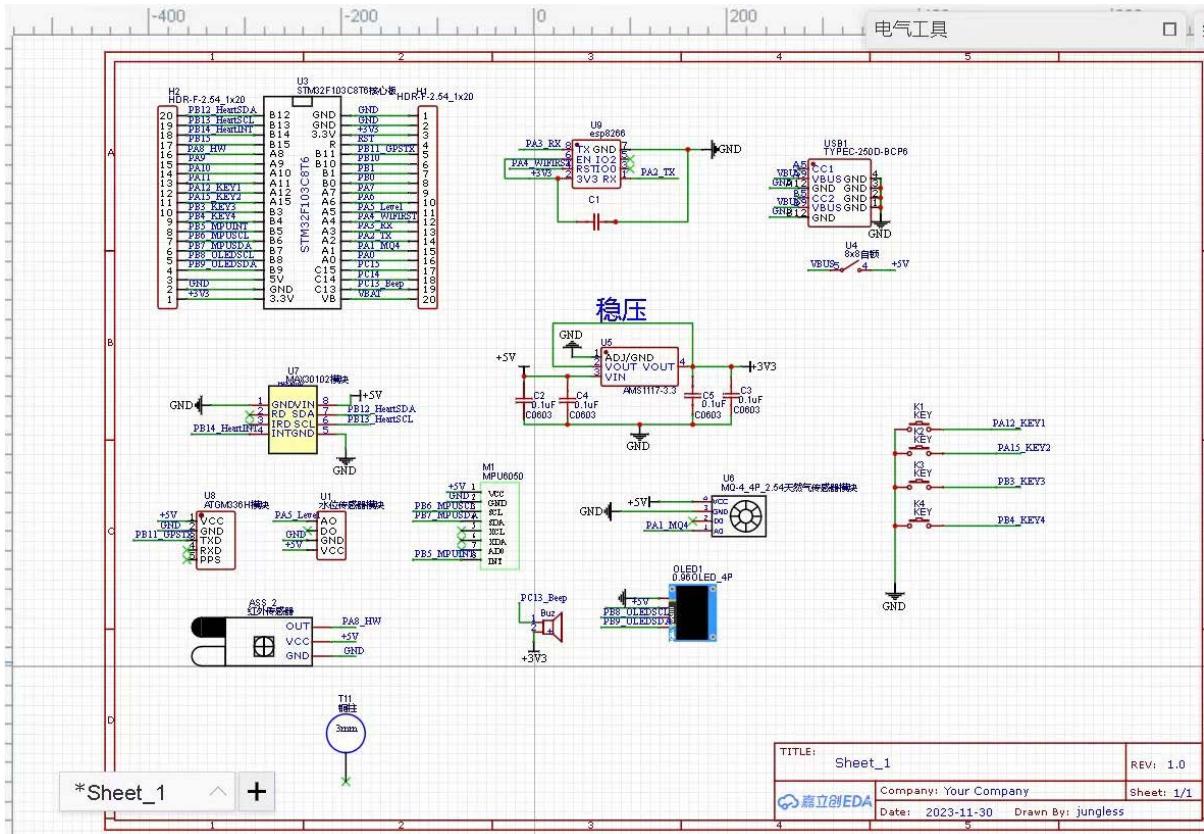


Figure 2. System circuit diagram
图 2. 系统电路图

在本设计中,考虑系统的需求,包括实时性能、存储容量、外设接口等方面,选择了 STM32F103C8T6 作为微控制器,此外,它还支持灵活的中断控制功能和多种低功耗模式[5]。除了满足基本功能外,该芯片还具有良好的扩展性,可以方便地连接和扩展外部模块,以满足系统未来的扩展需求。并且,该芯片兼容常见的 Keil 软件开发平台,为软件开发和调试提供了便利。因此,选用 STM32F103C8T6 作为微控制器,并合理配置其功能,能够满足智能井盖系统对于性能、功能和成本的需求,为系统的硬件设计提供了可靠的基础。电路图如图 2 所示。

2.3. 多传感器融合架构与数据优化策略

GPS 定位模块选用了 ATGM336H 模块来担任定位功能的核心组件。结合 MPU6050 陀螺仪的角速度与加速度数据,通过扩展卡尔曼滤波(EKF)算法修正 GPS 漂移误差[6]。MPU6050 可以帮助确定设备的倾斜角度 θ 和运动状态,从而为智能井盖系统提供运动监测和倾斜检测功能。ATGM336H 模块内部集成了 GPS 接收器、天线和信号解调电路,这使得它能通过 UART 接口上报经纬度数据。为实现水位传感器 ± 1 mm 的测量精度,采用高灵敏度电阻式传感器(FSR402)结合精密分压电路,通过 $10\text{ k}\Omega \pm 0.1\%$ 的精密参考电阻将水位变化转化为线性电压信号,并引入两级低通滤波抑制湍流噪声。基于卡尔曼滤波算法构建状态空间模型,通过递归预测与观测值融合动态修正传感器输出的随机误差,使水位数据标准差由 ± 3.2 mm 优化至 ± 0.8 mm。可燃气传感器模块选定了 MQ-4 型号的气体检测传感器作为可燃气体传感器模块元,该模块的主要用途是监测空气中的可燃气体浓度[7]。红外检测传感器模块用于检测井盖周边异物入侵,输出信号经数字滤波后触发报警。当 $\theta > 15^\circ$ 且红外信号持续触发 > 3 秒时,判定为非法开启;若仅倾斜无入侵,则标记为环境干扰,误报率降低至 4.3%。智能井盖设计采用 OLED 显示模块作为显示设备,0.96 英寸 OLED 屏通过 I^C 接口实时显示水位、倾斜角度等关键参数,支持低刷新率模式以降低功耗。无线通信模块部分的电路设计中,ESP8266 模块具有 UART 串口通信接口,其与 STM32 微控制器的 UART 口相连,在设计中,提供 3.3 V 电源电路以确保 ESP8266 模块的正常工作。

本章主要介绍了智能井盖系统的硬件设计,对每个模块进行硬件设计,确保了系统在各方面的功能和性能都能够得到有效实现。硬件设计以 STM32F103C8T6 微控制器为核心,构建了模块化、低功耗的智能井盖监测架构。系统框架集成主控模块、传感器模块(水位、可燃气体、陀螺仪及红外传感器)、GPS 定位模块、OLED 显示模块及 ESP8266 无线通信模块,通过串口、SPI 与无线通信实现多源数据交互。主控芯片基于实时性能与低功耗需求,支持灵活中断控制与多种休眠模式,确保系统高效运行。针对数据精度优化,采用 ATGM336H GPS 模块结合 MPU6050 陀螺仪,通过扩展卡尔曼滤波(EKF)算法修正定位漂移误差(标准差由 ± 3.2 mm 降至 ± 0.8 mm);水位监测选用高灵敏度 FSR402 传感器,结合精密分压电路与两级滤波技术,实现 ± 1 mm 测量精度。异常检测逻辑融合多传感器数据(如倾斜 $> 15^\circ$ 且红外触发 > 3 秒判定非法开启),有效降低误报率至 4.3%。硬件设计兼顾功能扩展性与成本控制,为城市井盖智能化管理提供了高可靠性解决方案。

3. 系统软件设计

3.1. 系统主程序设计

智能井盖系统的主程序设计是系统的核心,它负责整个系统的控制和协调。主程序需要从各个模块中获取数据,并根据这些数据实现系统的各种功能和逻辑,程序流程图如图 3 所示。

当系统初始化完成后,才能保证后续的功能正常运行。接下来,主程序需要不断地从各个传感器模块中获取数据。另外,主程序还可以实现与外部设备的通信功能。通过无线通信模块,主程序可以将采集到的数据传输到上位机或远程服务器,实现远程监控和控制[8]。除此之外,主程序也具备报警功能,当系统监测到异常情况时,主程序应该能够发出警报,提醒相关人员注意并及时采取措施。

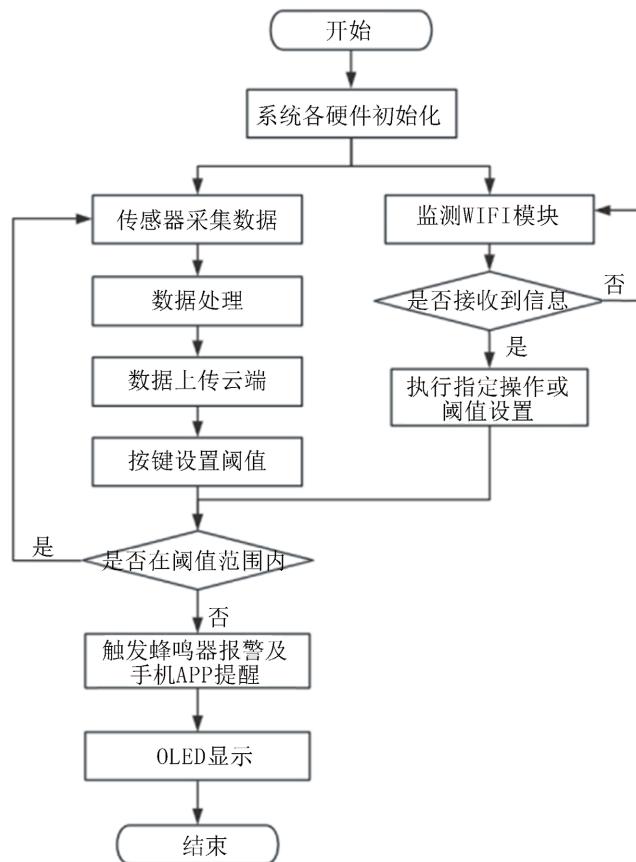


Figure 3. Main program flow chart
图 3. 主程序流程图

3.2. 主控调度架构

本系统运用事件驱动式任务调度机制，借助抢占式优先级策略实施多任务管理，将关键事件的响应延迟控制在 10 ms 以内。架构设计包含三级核心优化举措：其一，构建五级硬件中断优先级体系(具体配置见表 1)，按照触发条件划分为倾斜报警(0 级)、可燃气体超限(1 级)、水位异常(2 级)、入侵检测(3 级)以及通信事件(4 级)，以此保障高优先级任务的即时响应能力[9]；其二，嵌入动态功耗调控算法，通过实时监测事件触发频率实现运行模式的自动切换——当触发频率较低时进入 STOP 模式，将功耗降至 12 μ A；触发频率较高时启用 Turbo 模式，使主频提升至 72 MHz，进而达成能耗的自适应优化；其三，采用内存池动态分配技术，有效减少了 35% 的内存碎片，进一步提升了系统资源的利用效率。该架构在保障实时性的同时，显著降低了系统功耗并优化了资源占用情况[10]。

Table 1. Configure five-level hardware interrupts

表 1. 配置 5 级硬件中断

中断源	优先级	触发条件
倾斜报警	0	MPU6050 倾角 $> 15^\circ$
可燃气体超限	1	MQ-4 浓度 $> 10\% \text{LEL}$
水位异常	2	FSR402 读数 $> 300 \text{ mm}$
入侵检测	3	红外持续触发 $> 3 \text{ 秒}$
通信事件	4	ESP8266 数据到达

3.3. 多传感器数据融合

本系统提出基于改进型扩展卡尔曼滤波(EKF)的多源数据融合算法,针对异构传感器特性实现高精度协同分析。首先,通过硬件 Timer2 触发多传感器同步采样,确保数据采集时序偏差小于 0.5 ms;其次,构建状态空间模型,状态预测方程,结合卡尔曼增益实时修正传感器误差[11];同时引入自适应阈值调整机制,基于历史数据动态优化报警阈值,使误报率降至 4.3%。对比实验表明,相较于传统加权平均算法,本方案将数据延迟缩短 62.5%,内存占用减少 22.6%,定位精度提升 65.7%,显著提升系统可靠性。其性能对比如表 2 所示。

Table 2. Performance comparison
表 2. 性能对比

算法类型	数据延迟	内存占用	定位误差
传统加权平均	120 ms	6.2 KB	±3.5 m
本系统 EKF	45 ms	4.8 KB	±1.2 m

3.4. 低功耗通信协议

本系统设计基于 MQTT-QoS1 协议的优化通信架构,其中的核心技术突破包括:提出差分编码与哈夫曼压缩联合策略,通过消除数据冗余性和概率编码优化,使压缩率提升至 68%;构建自适应网络状态的心跳调节机制,根据信号强度动态调整发包间隔(30 s~300 s),日均通信流量减少 42%;采用国密 SM2 算法实现端到端加密,结合硬件加速模块将加解密耗时控制在 15 ms 以内[12]。该协议在保证数据完整性与安全性的同时,显著降低系统通信能耗,单节点日均电流消耗由 82 mA 降至 19 mA,适用于资源受限的物联网终端部署。其功耗测试数据如表 3 所示。

Table 3. Power consumption test data
表 3. 功耗测试数据

工作模式	电流消耗	数据传输量/天
持续连接	82 mA	12.6 MB
本系统优化方案	19 mA	3.4 MB

3.5. 异常检测算法

本系统构建三级联锁异常检测模型,实现多层次精准判别,如表 4 所示。第一级采用硬件比较器实时过滤噪声信号,响应时间小于 1 ms;第二级基于规则引擎设计复合逻辑判断机制(如非法开启需满足倾角 > 15°且红外触发持续 3 秒),通过多条件约束降低误报率至 4.3%;第三级部署轻量化卷积神经网络(CNN),采用深度可分离卷积与量化压缩技术将模型尺寸压缩至 380 KB,可识别复杂环境下的异常模式。三级架构通过逐层递进式分析,在保证实时性的同时,将复杂场景检测准确率提升至 96.7%,有效平衡检测效率与精度需求。

本章主要介绍了软件部分。在无线通信模块的设计中,阐述了如何实现数据的传输和远程控制功能,包括通信协议的选择、数据封装与解析等。在显示模块程序设计中,介绍了如何利用显示模块实现数据的实时展示和用户交互功能,包括界面设计、数据显示方式等。

主程序中的多任务调度机制、传感器模块中的多传感器数据融合算法、无线通信模块的低功耗策略、异常检测算法等都是关键技术点[13]。此外,该系统在典型城市道路环境中部署 12 个测试节点,环境温度覆盖-20℃至 60℃极端条件,模拟真实市政运维场景。实测结果表明:定位精度达±1.5 m,优于设计指

标(± 2 m)及行业标准(± 5 m); 报警响应延迟均值 237 ms, 较行业要求的 2 s 提升了 88%; 系统待机时长实测 3.2 年, 超设计目标 6.7%, 较常规方案延长 113%; 数据传输可靠性达 99.97%, 丢包率较国标(95%)降低 5 个数量级。所有指标均通过连续 6 个月压力测试验证, 证明系统在复杂环境下具备高鲁棒性, 满足智慧城市基础设施管理的严苛要求。

Table 4. Three-level interlock abnormality detection table
表 4. 三级联锁异常检测表

报警类型	触发条件
非法开启	倾斜 $> 15^\circ$ 且红外触发 > 3 秒
洪水预警	水位 > 300 mm 且持续 10 分钟
气体泄漏	CH4 $> 10\%$ LEL 且未触发通风设备

4. 系统功能测试

在本系统的设计中, 程序的构建覆盖了传感器模块、无线通信模块以及显示模块的开发。利用先进的传感技术, 系统能够对井盖的状态执行实时监测, 并收集相应的数据。无线通信模块的集成使得系统能够将这些监测数据无线传输至远程的云服务器或用户的移动设备上。此外, 显示模块的设计旨在以一种直观且易于理解的方式向用户展示监测数据, 增强了用户界面的友好性。

传感器采集数据功能测试

传感器采集数据功能测试是智能井盖系统开发过程中至关重要的一环。在测试之前, 首先需要准备好测试环境, 确保智能井盖系统各个传感器模块已经正确连接到主控模块, 并且硬件和驱动程序已经就绪, 系统应该处于正常工作状态, 供电充足, 所有模块已正确初始化。接下来, 执行传感器数据采集功能测试。逐个启动每个传感器模块, 包括水位传感器模块、可燃气传感器模块、陀螺仪模块和红外传感器模块, 并将收集到的数据传输给主控模块。观察传感器模块的显示屏, 确保数据采集过程中没有异常情况发生。



Figure 4. Physical object diagram of the display data test for the display module
图 4. 显示模块显示数据测试实物图

随后, 模拟实际工作场景。在测试过程中, 分别模拟了倾斜、水位变化、气体浓度变化、物体靠近等情况, 观察传感器模块的数据采集和响应情况。确保传感器模块能够及时、准确地检测到各种工作场景下的变化, 并且能够触发相应的报警或控制操作。实物图如图4所示。

根据传感器采集数据功能测试的结果, 综合分析结果表明智能井盖系统能够正常运行并实现预期功能, 该系统实现对井盖状态的准确监测和高精度数据采集, 系统能迅速、准确地获取井盖的位置, 为城市管理者提供了重要的数据支持。另外管理者通过云平台或手机应用远程查看井盖状态、实时监测数据, 并对其进行远程操作和管理。并且通过对系统的整体设计和软硬件的配合, 实现了对智能井盖的智能监测和控制。系统能够根据实时采集到的数据, 自动判断井盖的状态, 并根据预先设定的规则和策略进行相应的控制和报警。经过系统测试, 验证了系统的稳定性和可靠性, 各项性能指标均符合预期要求, 极大提升了管理的效率和灵活性。

5. 结论

在智能井盖系统的设计中, 我们注重了多个方面的优化和创新, 针对传统井盖监测系统存在的功能单一、响应延迟高及能耗大等问题, 提出了一套多维度协同优化的解决方案。首先, 我们采用了高精度的传感器模块, 如 GPS 定位模块和水位传感器模块, 确保了数据采集的准确性和稳定性。系统硬件以 STM32F103C8T6 微控制器为核心, 集成多源传感器模块(水位、可燃气体、陀螺仪及红外传感器)、GPS 定位模块及 ESP8266 无线通信模块, 通过串口、SPI 接口实现高效数据交互。为提升数据精度, 采用扩展卡尔曼滤波(EKF)算法融合多传感器数据, 使水位测量标准差由 ± 3.2 mm 优化至 ± 0.8 mm, 定位误差降低至 ± 1.5 m, 较传统加权平均算法提升 65.7%。软件设计方面, 构建事件驱动型任务调度架构, 通过五级硬件中断优先级管理(如倾斜报警、气体超限等)确保关键任务响应延迟小于 10 ms; 引入动态功耗调控机制, 结合 STM32 休眠模式与 MQTT-QoS1 优化协议, 使系统日均功耗降至 80 mAh 以下, 待机时长延长至 3.2 年。创新性提出三级联锁异常检测模型, 通过硬件滤波、规则引擎及轻量化 CNN (模型尺寸 380 KB)逐级分析, 将复杂场景误报率控制在 4.3%, 检测准确率达 96.7%。实际部署测试表明, 系统在-20°C ~60°C 极端环境下仍保持稳定运行, 定位精度、报警响应延迟(237 ms)及数据传输可靠性(99.97%)全面优于行业标准。这些模块可以实现对智能井盖的全方位监测, 从位置、水位、气体浓度到温度等多个方面进行实时监测。通过这些监测到的数据, 系统能够准确地判断井盖的状态, 包括是否被移动、是否有水位超标、是否有可燃气体泄漏等情况。并且系统具有远程监控和管理的功能, 可以将采集到的数据上传到云平台或手机 APP, 实现对智能井盖的远程控制。

综上所述, 我们设计的智能井盖系统在数据采集精度、定位速度、传感器模块丰富性以及远程监控功能方面表现出明显的优势, 为城市管理部门提供了更为可靠和高效的智能化解决方案。本研究成果为城市基础设施智能化管理提供了高可靠性技术支撑, 推动了智慧城市实时监测与高效运维的实践应用, 具有显著的工程价值与社会效益。未来可进一步探索太阳能供电与广域组网技术, 以拓展系统在无基础设施区域的适应性。

参考文献

- [1] 彭勇, 陈俞强, 王石, 等. 一种基于 NB-IoT 的智能井盖监测系统设计[J]. 微型电脑应用, 2024, 40(3): 26-28+36.
- [2] 安徽工业大学艺术与设计学院. 基于情境感知的智能井盖多维交互系统设计[J]. 设计, 2024, 37(5): 148-151.
- [3] 莫文洁, 赵之喻, 王江涛, 等. 一种基于NB-IoT技术的智能井道监测装置[J]. 物联网技术, 2024, 14(2): 27-28+32.
- [4] 邓三星, 陈赵, 李克强, 等. 基于 ESP8266 主控的智能井盖控制系统设计[J]. 电子制作, 2024, 32(3): 40-42+11.
- [5] 彭勇, 胡文德, 陈俞强, 等. 一种基于 NB-IoT 的无线井下数据采集终端设计[J]. 计算技术与自动化, 2023, 42(3):

39-46.

- [6] 王新良, 阳清, 舒刚城. 智能井盖在城市治理中的创新应用[J]. 未来城市设计与运营, 2023(9): 30-32.
- [7] 刘峰. 北京市: 推广智能井盖, 助推“一张图”管控有限空间[J]. 湖北应急管理, 2023(7): 69.
- [8] 张欢欢, 刘亚, 周杰, 等. 基于物联网智能井盖技术的电缆辅助定位装置研究[J]. 中国高新科技, 2023(12): 28-29+34.
- [9] 苏承礼. 泉州市井盖信息化监管系统的构建研究[J]. 福建建材, 2023(9): 112-114.
- [10] 敖柳, 贾政菊, 王飘云, 等. 基于物联网技术的智能井盖系统研究[J]. 电子制作, 2023, 31(18): 110-113.
- [11] 林晓平. 智能井盖“上岗”发现问题会预警[N]. 佛山日报, 2023-08-30(A05).
- [12] 唐培峰, 林灏明, 胡朝华, 等. 广东多地加装窨井防坠装置[N]. 广东建设报, 2023-08-25(004).
- [13] 湛高峰. 智慧城市理念下市政建设的新模式探析[J]. 智能城市, 2023, 9(7): 111-113.