

文章编号:1008-1534(2025)02-0164-08

无线气体传感器在环境监测中的应用设计

班瑞凤, 宋继红

(太原航空仪表有限公司, 山西太原 030006)

摘要: 为了满足环境监测系统监测危险源气体的长时需求, 设计了无线气体传感器及低功耗运行策略。该传感器集成甲烷、一氧化碳和二氧化碳气体浓度检测模块, 以 STM32L071CBT6 为核心微处理器进行数据采集、处理和存储, 通过 LoRa 无线通信模块将监测数据上传至环网。在此基础上, 提出了低功耗运行策略及能源管理策略, 并对该无线气体传感器开展实验验证。结果表明: 该传感器能够实时、准确监测甲烷、一氧化碳和二氧化碳浓度, 检测误差均在敏感元件允许误差范围内; 按电池总容量 6 000 mA·h 计算, 引入低功耗运行策略和 Autosleep 电源管理机制后, 用于环境气体监测的续航时间可达 142.9 d, 相比持续运行模式增加了 378%。设计的无线气体传感器具有较好的应用价值, 其性能指标具有较强的竞争优势, 可为智能环境监测系统及无线传感器的设计提供理论参考和实践指导。

关键词: 传感器技术; 环境监测; 无线气体传感器; 低功耗策略; 实时监测

中图分类号: TP212; X851 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7535/hbgykj.2025yx02008

Application design of wireless gas sensors in environmental monitoring

BAN Ruifeng, SONG Jihong

(Taiyuan Aviation Instrument Company Limited, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: To meet the requirements for long-term monitoring of hazardous gases in environmental monitoring systems, a wireless gas sensor with a low-power operation strategy was designed. The sensor integrated detection modules of methane, carbon monoxide, and carbon dioxide concentrations, with STM32L071CBT6 as the core microprocessor for data acquisition, processing, and storage. A LoRa wireless communication module was employed to transmit monitoring data to the industrial ring network. On this basis, low-power operation strategies and energy management mechanisms were proposed, and experimental verification was conducted on the wireless gas sensor. The results show that the sensor can monitor the concentrations of methane, carbon monoxide, and carbon dioxide in real-time and accurately, and the detection errors are within the allowable error range of the sensitive components; Based on a 6 000 mA·h battery capacity, the implementation of low-power operation strategies and Autosleep power management mechanism extends the monitoring duration to 142.9 days, representing a 378% increase compared to continuous operation mode. The designed wireless gas sensor demonstrates significant application value with competitive performance indicators, providing theoretical reference and practical guidance for intelligent environmental monitoring systems and wireless sensor design.

Keywords: sensor technology; environmental monitoring; wireless gas sensors; low-power operation strategy; real-time monitoring

收稿日期: 2024-09-14; 修回日期: 2024-12-30; 责任编辑: 王海云

基金项目: 山西省专利转化专项项目(202305005)

第一作者简介: 班瑞凤(1982—), 女, 山西大同人, 高级工程师, 硕士, 主要从事传感器技术方面的研究。

E-mail: 122805830@qq.com

班瑞凤, 宋继红. 无线气体传感器在环境监测中的应用设计[J]. 河北工业科技, 2025, 42(2): 164-171.

BAN Ruifeng, SONG Jihong. Application design of wireless gas sensors in environmental monitoring[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2025, 42(2): 164-171.

随着工业智能化进程的推进,长时监测工业生产环境空气质量的需求日益迫切^[1-2]。尤其在煤矿^[3]、化工厂^[4]、城市下水管网^[5]等环境中普遍存在的可燃气体或有害气体,如甲烷、一氧化碳、二氧化碳等,会影响生产与人员安全。目前的气体检测方式仍主要为人工巡检或布置单点式有线传感器^[6]。人工巡检方式监测范围小、难以做到实时监测。单点式传感器依赖于工业总线,在复杂地形和移动环境中,布线成本高且维护繁琐。因此,当前的气体传感器研究主要面向无线化和多功能化发展。在无线化方面,王璐^[7]设计了一氧化碳无线传感器,用于煤矿安全监控。宋连洪^[5]采用可充电锂电池和太阳能互补供电的方式,设计了一种光电互补的无线激光甲烷传感器。张佳乐等^[8]设计了有害气体安全监控系统,通过无线传感节点采集各类气体传感器的数据并进行汇聚和监控。在多功能化方面,陈宇等^[9]设计了气压、温度、湿度、一氧化碳及烟雾等多敏感元件融合的小型化传感器。李佳怡^[10]设计了多参数空气质量监测传感器,可以实现对一氧化碳、二氧化氮等气体的实时监测。DONG 等^[11]设计了车载环境监测无线传感器,对甲醛、PM_{2.5}、一氧化碳和二氧化碳的浓度进行检测。然而,无线化要求传感器没有外部供电,而对多个敏感元件的多功能化集成会导致能耗的提升,从而降低无线传感器的续航时间。因此,如何在传感器设计上有效管理功耗以延长续航时间,是无线气体传感器发展中亟待解决的问题。

针对上述问题,本文基于多源传感技术和低功耗设计理念,提出一种面向环境监测的低功耗无线气体传感器设计方案,在保证系统实时性的同时实现了能耗的精细化管理,更加适应矿井等复杂环境中的长期无线监测需求。

1 无线气体传感器硬件设计

本文设计的无线气体传感器包含微控制器模块、电源模块、LoRa 无线通信模块,以及气体传感模块,总体设计框图如图 1 所示。

微控制器模块采用 STM32L071CBT6 低功耗芯片作为核心处理器。外设资源配置,包括 3 组通用同步异步收发器(universal synchronous asynchronous receiver transmitter, USART)、1 组集成电路总线(inter-integrated circuit, I2C)、1 组串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)以及若干通用输入输出接口(general purpose input/output,

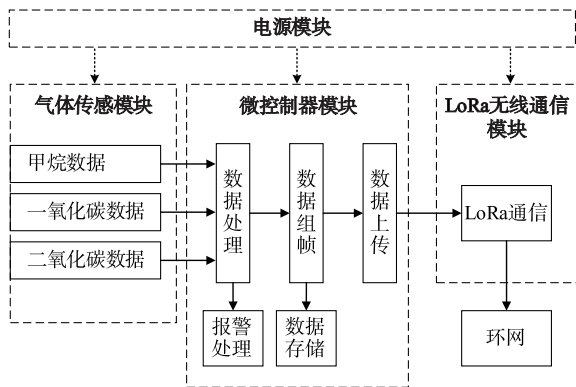


图 1 无线气体传感器总体设计框图

Fig. 1 Block diagram of the general design of the wireless gas sensor

GPIO)。同时,根据系统需求设计了相应的外围支撑电路,包括供电、时钟和复位等基础电路单元。

电源模块采用 2 节 18650 锂离子电池作为电源,考虑各敏感元件对电压的要求,为充分利用电池电量并提高电源效率,使用 Buck-Boost 升降压电路进行电源电路设计^[12]。

考虑环境气体监测应用中传感系统通信距离长、数据量较小、延时要求低、待机时间长、数据可靠性高的要求^[13],本文选择采用 LoRa 无线通信方式将气体传感器接入工业环网。LoRa 技术在工业环境中具有三方面优势:1)采用扩频调制技术和前向纠错编码,具有较强的抗干扰能力和纠错能力;2)具有超高接收灵敏度,可以穿透建筑物、地下管道等障碍物实现远距离通信;3)其低功耗特性特别适合电池供电的无线传感应用。本文采用基于 SX1268 射频芯片的 LoRa 无线通信模块,支持空中唤醒、载波监听、通信密钥、分包长度自定义等功能,深度休眠下整机功耗低至约 2 μ A,最长通信距离可达 16 km。虽然 LoRa 技术在高速数据传输场景下带宽受限,且网络容量受到扩频因子的限制,但这些特点使其更适用于低频率采样的环境监测应用。

根据环境监测需求,以监测甲烷、一氧化碳和二氧化碳 3 种危险源气体的浓度为例,设计了融合 3 种气体检测能力的气体传感模块,包含 1 个甲烷敏感元件、1 个一氧化碳敏感元件和 1 个二氧化碳敏感元件。甲烷敏感元件选用的非分散红外(non-dispersive infrared, NDIR)型元件,以红外吸收原理为基础,具备良好的线性检测范围和抗干扰能力。矿井等环境中甲烷的浓度监测关系到矿井安全,需要高灵敏度和准确度。选用的 NDIR 传感器能够以 1 Hz 的测量频率,在 0~0.05(体积分数,下同)量程的甲烷检测中实现 $\pm 3\%$ 满量程(full scale, F. S.)的误差控制,分辨率达到 5×10^{-5} ,满足高精

度的要求。基于固态聚合物电化学检测原理的元件能以相对较低的功耗在低浓度范围内表现出高灵敏度,适用于监测一氧化碳等对人体健康有严重威胁的有毒气体,其分辨率为 10^{-7} ,测量范围为 $0 \sim 10^{-4}$,全量程测量误差为 5%,可精准捕捉一氧化碳的浓度变化。二氧化碳敏感元件选用热导式测量元件,基于导热性原理工作,适合宽量程范围检测,具有 16 位分辨率,精度为 5×10^{-3} ,量程为 $0 \sim 100\%$ 。热导式传感器的误差相对较大,尤其受环境温度和湿度的影响显著。在大多数环境应用中,二氧化碳的浓度相对稳定且较高,因此对其监测的精度需求低于甲烷和一氧化碳的监测需求。各气体敏感元件选型如图 2 所示。

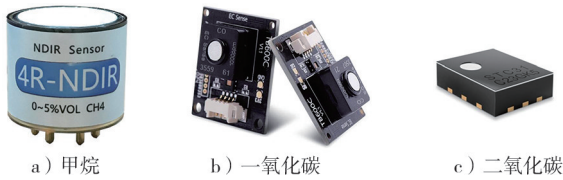


图 2 各气体敏感元件选型

Fig. 2 Selection of each gas sensing component

考虑到环境气体检测可以间断运行以降低功耗,设计了一种可控开关电路,如图 3 所示。EN 端连接微控制器引脚,Power 端连接气体敏感元件电源引脚。当 EN 端输出高电平时,NMOS 管 Q_2 导通,继而使 PMOS 管 Q_1 导通,实现对元件的 3.3 V 供电;当 EN 端输出低电平时,NMOS 管 Q_2 关断,停止对敏感元件的供电。

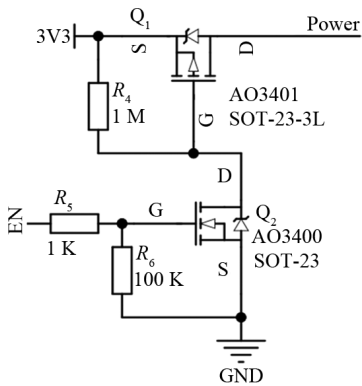


图 3 气体敏感元件可控开关电路

Fig. 3 Controllable switching circuit for gas sensing components

传感器的工作流程如图 4 所示。首先,进行数据采集与处理,由微控制器依次采集各敏感元件的数据,进行数据处理转换成甲烷、一氧化碳、二氧化碳的浓度数值;其次,对采集到的数据进行校验,将处理完成的数据、时间信息、位置信息以及系统工作信息组成数据帧,并进行本地存储;然后,进行数据

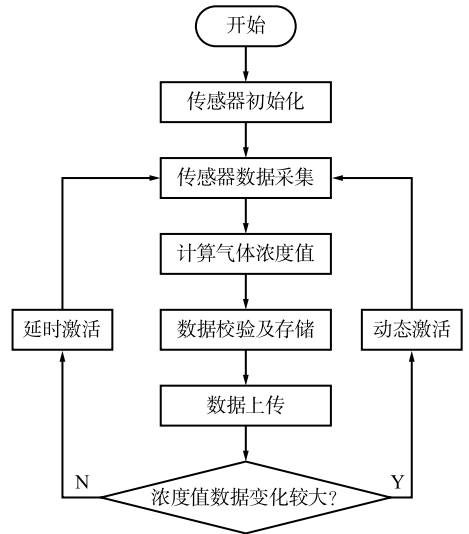


图 4 传感器的工作流程

Fig. 4 Sensor workflows

上传,利用 LoRa 无线通信模块进行无线数据传输,将数据帧发送至云端服务器平台。在数据上传之后,通过一种低功耗软件策略,根据气体浓度值的变化情况,自主确定传感器数据采集的频率,以优化传感器的功耗。

2 低功耗软件策略

功耗是决定无线气体传感器能否长期运行的关键因素。因此,需要确保系统在满足实时性目标的前提下降低功耗。本文从运行策略和电源管理策略 2 个方面进行能耗优化。

2.1 运行策略

气体传感器检测的对象一般是缓慢且连续变化的物理量,其数据变化特征包括:数据恒定不变、数据漂移变化、数据递增变化和递减变化。对于无线气体传感器,从动态和静态的角度分析,其通信部分的能耗呈现出明显的二元特性^[14],即传输数据时主要为动态能耗,能耗较大,无线通信模块在数据发送过程中消耗大量电能;未传输数据时主要为静态能耗,能耗较小,此时,传感器主要维持基本运行和待机状态。

基于上述能耗特征,制定相应的能量管理策略:1)当传感器数据呈现恒定不变或漂移变化时,减少数据传输频率,以有效减少动态能耗的产生;2)当传感器数据呈现递增或递减变化时,正常进行数据传输,以提高传感器对环境变化的响应灵敏度,确保及时捕捉到重要的数据变化。

上述策略通过以下 3 步实现。1)使用滑动窗口法结合时间序列分析技术来判断数据变化类型。具体而言,采用长度为 N 的滑动窗口,计算窗口内数

据的平均值、标准差和线性回归斜率。通过设定阈值来判断数据是否恒定(标准差小于阈值)、漂移(标准差大于阈值但小于另一阈值,且斜率接近于 0)、递增或递减(斜率大于或小于特定阈值)。上述阈值均通过人工经验进行确定。2)根据检测到的数据变化类型动态调整采样率。在数据恒定或缓慢漂移时,采样率逐步降低至最低限度(每 10 min 进行 1 次);当检测到数据开始快速变化时,采样率迅速提高(每 10 s 进行 1 次),以捕捉重要变化。3)在数据传输前,采用差分编码结合 Huffman 编码的压缩算法对数据进行压缩。差分编码利用相邻数据点的相关性,而 Huffman 编码进一步压缩差分后的数据。这种方法可以显著减少传输数据量,从而降低动态能耗。

2.2 电源管理策略

为进一步优化能耗,通过周期性检测方式降低运行能耗。当完成一次传感器检测及传输任务时,停止所有任务,系统处于空闲状态,直至下次检测任务被唤醒。

本文引入 Autosleep 的电源管理机制,将电源管理与休眠模式相结合,以实现系统在空闲状态下的自动节能^[15]。具体地,在系统进入空闲状态后,应用程序释放所有电源锁,通过动态频率调节(dynamic frequency scaling, DFS)机制降低频率^[16],以减少功耗。在空闲时间超过预设阈值时,系统直接进入休眠状态。在休眠状态下,系统自动关闭通信模块、振荡器、晶振、锁相环、门控数字内核时钟的电源,并暂停微控制器工作以使系统整体功耗维持在较低水平,从而降低监测过程中的平均能耗。上述策略通过以下 4 个过程实现。

1)使用低功耗实时时钟(real-time clock, RTC)作为唤醒源,以确定休眠唤醒机制。RTC 在休眠状态下仍然工作,但功耗极低。通过编程 RTC 的报警寄存器,可以在预设时间准确唤醒系统。

2)采用基于工作负载的动态频率调节算法。根据微控制器单元(microcontroller unit, MCU)的利用率监控结果,当利用率低于 30% 时,逐步降低 CPU 频率;当利用率超过 70% 时,逐步提高频率。频率调节步长为当前频率的 10%,以平滑过渡。

3)利用片上电源管理单元实现各模块的精细化供电控制。通过 I2C 接口配置电源管理单元,以单独控制每个模块的电源状态。在进入休眠模式时,按预设顺序关闭非必要模块的供电。

4)基于历史数据和环境变化动态调整进入休眠状态的时间阈值。根据过去 24 h 内记录数据的变化频率,计算平均变化间隔。休眠阈值设定为该间

隔的 1/3,但不小于最小允许值(如 10 s)且不大于最大允许值(如 5 min)。

不同的电源管理机制在节能效果和应用场景中具有各自的优势和局限性。无电源管理模式的优势在于其实现简单,不需要额外的功耗控制策略。这种模式下,传感器始终处于激活状态,能够快速响应实时数据的变化,适合需要持续工作的场景。然而,其主要缺点是功耗较高,对于要求较长时间监测的应用场景,其效能有限。相比之下,DFS 机制通过动态调整处理器的工作频率,根据系统负载的变化适时降低功耗,在低负载情况下具有显著的优势。DFS 机制能够在间歇性监控任务或低负载环境中有效降低功耗,但其在高负载或频繁数据传输场景中的效果较为有限。

Autosleep 策略是在无数据传输时,系统自动进入低功耗休眠状态,显著降低待机功耗。此策略的最大优势在于,它能够在长时间无人值守的监测场景中,极大地延长系统的续航时间,特别适用于数据变化较慢或采样间隔较长的应用场景。组合策略(DFS+Autosleep)通过将动态频率调节与自动睡眠相结合,提供了最优的功耗管理方案。在负载变化较大的环境中,组合策略能够在低负载时通过 DFS 降低功耗,而在数据更新较少时,系统进入休眠状态,极大地优化了功耗使用。这种组合策略适合负载波动较大且数据传输频繁的场景,能够在确保传感器性能的同时,最大化延长系统的续航时间。

3 传感器性能测试

3.1 测试环境

本测试在控制环境下进行,以确保实验结果的可靠性与准确性。测试环境温度保持在 20~25 °C,相对湿度控制在 30%~70%,以模拟典型工业环境和室内环境条件。在进行检测时,标准气样的配制和使用均遵循国家标准 GB/T 16157—1996《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》^[17],确保气体浓度的准确性与代表性。

3.2 检测精度测试

进行甲烷浓度检测,并计算检测误差。采用标准甲烷气样,体积分数分别为 0.005 0、0.015 0、0.030 0,通过气量计混合得到 5 个标准体积分数点:0.005 0、0.010 0、0.015 0、0.022 5、0.030 0,检测数值上下浮动不超过 1% 后,记录实验数据,检测结果如表 1 所示。检测分辨率为 5×10^{-5} ,检测误差皆在甲烷传感器允许误差范围之内。

表 1 甲烷检测精度实验结果

Tab. 1 Results of the experiment on the accuracy of methane detection

实验序号	ω (标准)	ω (检测)	F. S. 误差/%
1	0.005 0	0.004 70	0.6
2	0.010 0	0.009 65	0.7
3	0.015 0	0.014 85	0.3
4	0.022 5	0.021 05	2.9
5	0.030 0	0.028 55	2.9

对低浓度一氧化碳进行检测,并计算检测误差。选用体积分数分别为 2.00×10^{-5} 、 2.60×10^{-5} 、 1.75×10^{-4} 的标准一氧化碳气体,直接进行检测,传感器数值上下浮动不超过 1% 后,记录实验数据,结果如表 2 所示。检测分辨率为 10^{-6} ,检测误差随浓度的增加而减小。

表 2 一氧化碳检测精度实验结果

Tab. 2 Results of the experiment on the accuracy of carbon monoxide detection

实验序号	ω (标准) $\times 10^5$	ω (检测) $\times 10^5$	F. S. 误差/%
1	2.0	2.3	3.0
2	2.6	2.3	3.0
3	17.5	17.7	2.0

随后,进行二氧化碳浓度的检测,并计算检测误差。选用体积分数分别为 0.01、0.02、0.05、0.10、0.15 的标准二氧化碳气体,待传感器检测数值上下浮动不超过 1.0% 后,记录实验数据,检测结果如表 3 所示。检测分辨率为 5×10^{-3} ,检测误差皆在允许误差 5.0%(F. S.) 范围之内。

表 3 二氧化碳检测精度实验结果

Tab. 3 Results of the experiment on the accuracy of carbon dioxide detection

实验序号	ω (标准)	ω (检测)	F. S. 误差/%
1	0.01	0.015	0.5
2	0.02	0.025	0.5
3	0.05	0.055	0.5
4	0.10	0.011	1.0
5	0.15	0.170	2.0

3.3 功耗测试

先测试各模块在持续运行下的能耗,进而测试在低功耗软件策略下的能耗,以分析能耗优化效果。

使用直流稳压电源和高精度数字电压电流表测试无线气体传感器的主控模块的功耗,结果如图 5 所示。供电电压为 4.2 V。在无外接模块、无负载情况下,主控模块平均电流约为 8 mA。

甲烷传感模块持续采集气体浓度数据的功耗图如图 6 所示。初始化时的最大电流约为 9.3 mA,采集的初始化时间约为 17 ms。连续数据采集时的

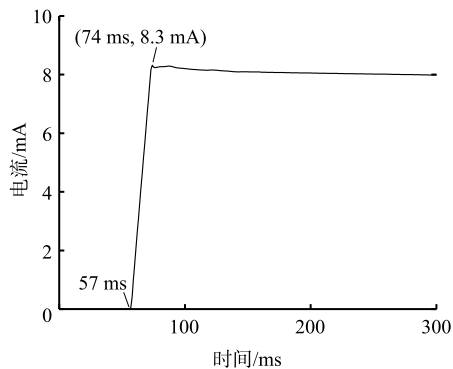


图 5 主控模块持续运行功耗图

Fig. 5 Power consumption graph of the main control module during continuous operation

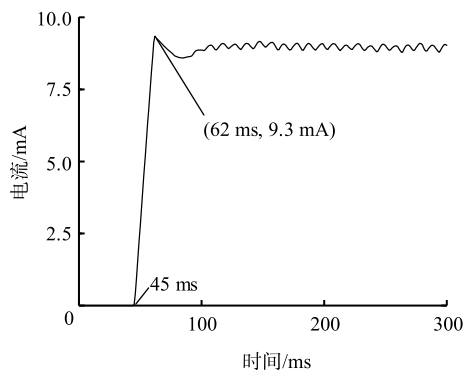


图 6 甲烷传感模块持续运行功耗图

Fig. 6 Power consumption graph of the methane sensor module during continuous operation

电流约为 8.8 mA。

一氧化碳传感模块持续采集气体浓度数据的功耗图如图 7 所示。初始化的最大电流约为 11.5 mA,采集一氧化碳的初始化时间约 17 ms,连续数据采集时的电流约为 10.0 mA。

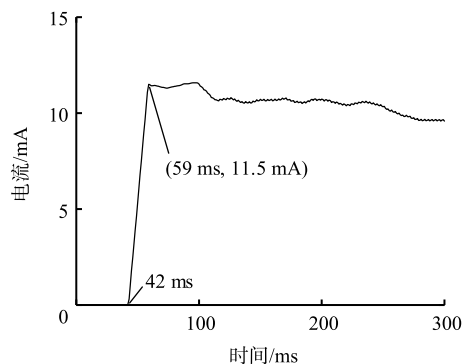


图 7 一氧化碳传感模块持续运行功耗图

Fig. 7 Power consumption graph of the carbon monoxide sensor module during continuous operation

二氧化碳传感模块持续采集气体浓度数据的功耗图如图 8 所示。该敏感元件需要循环检测,初始化及等待检测时的电流约为 10.5 mA,检测时的电流约为 42.0 mA。

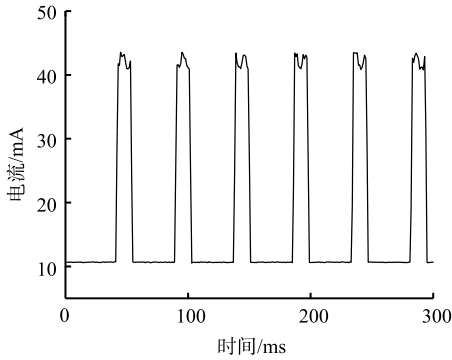


图 8 二氧化碳传感模块持续运行功耗图

Fig. 8 Power consumption graph of the carbon dioxide sensor module during continuous operation

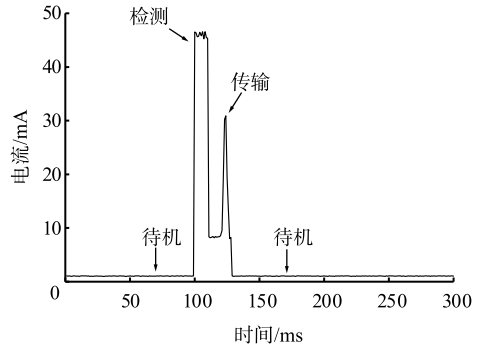


图 9 低功耗策略下的传感器功耗图

Fig. 9 Power consumption graph of the sensor with the low-power strategy

由图 6—8 可知,若主控模块持续运行,每 10 s 运行 1 次检测,按电池总容量 6 000 mA·h 计算,该传感器只可运行 29.9 d。由于检测时间较短,其能耗主要来源于主控模块。进一步,在引入低功耗软件策略后传感器执行一次检测和传输任务时的功耗数据结果如图 9 所示。在进行检测和传输任务之后,系统进入待机状态,待机能耗约为 1.05 mA。

每 10 s 运行 1 次检测,一个周期内的平均能耗约为 1.75 mA。按电池总容量 6 000 mA·h 计算,在引入低功耗策略后,该传感器可运行 142.9 d,相比持续运行模式,续航时间增加了 378%,具有极好的稳定性。

表 4 列出了不同能源管理机制的性能和测试数据,并对每种机制的工作原理进行了详细分析。

表 4 能源管理机制性能分析与测试数据

Tab. 4 Energy management mechanism performance analysis and test data

电源管理策略	机制	平均功耗/mW	场景适用性	测试数据
无电源管理	主控模块始终保持激活状态	36.50	适用于短时监测任务,无法满足长时间运行需求	传感器工作 24 h 后,功耗未显著下降,续航为 29.9 d
DFS	根据负载动态调整处理器频率,降低功耗	18.50	适用于间歇性监测,频繁数据传输时功耗降低较小	系统在低负载时频率降低至 50%,续航时间达到 59.8 d
DFS+Autosleep	智能切换工作与休眠状态	7.35	在负载变化较大且监测频率不固定的场景中表现最佳	系统在空闲时进入休眠状态,待机功耗为 1.05 mA,续航提高至 142.9 d

3.4 与市售产品的性能对比

为进一步分析所设计传感器的性能,将其与市售的模块化甲烷、一氧化碳、二氧化碳传感器进行性能比较。一些市售气体传感器模块的精度和功耗参数

如表 5 所示。从表中数据可知,本文设计的传感器选用的敏感元件精度均较高,因此在精度上与市售传感器基本持平。

表 5 一些市售气体传感器模块的精度和功耗参数

Tab. 5 Precision and power consumption parameters of some commercially available gas sensor modules

厂家	型号	检测气体	F. S. 精度/%	功耗/W	无线传输	与本文传感器的比较
Firstrate ^①	FST100-G109A	CH ₄	3.0	1.500	不支持	单一气体检测,检测精度相近,功耗高于本文传感器,不支持无线传输
四方光电 ^②	JW-05	CH ₄	3.0	0.500	不支持	单一气体检测,检测精度相近,功耗高于本文传感器,不支持无线传输
奥松电子 ^③	ACD10	CO ₂	1.0	0.225	不支持	单一气体检测,采用 NDIR 原理,精度高但量程小,不支持无线传输
四方光电	CM1106S-M	CO ₂	1.0	0.225	不支持	单一气体检测,采用 NDIR 原理,精度高但量程小,不支持无线传输
Firstrate	FST100-2004	CO ₂	3.0	0.400	不支持	单一气体检测,采用 NDIR 原理,精度高但量程小,不支持无线传输
Firstrate	FST100-2012	CO	3.5	0.400	不支持	单一气体检测,检测精度相近,功耗高于本文传感器,不支持无线传输
四方光电	Gasboard-2050	CO、CH ₄ 、CO ₂ 一体	1.0	7.200	不支持	可对 3 种气体同时检测,但本文传感器功耗显著更低

注:①表示湖南菲尔斯特传感器有限公司;②表示四方光电股份有限公司;③表示广州奥松电子股份有限公司。

大部分市售传感器功耗较高,且缺少内置无线传输功能,因此在需要长时监测的场景中应用受到限制。本文设计的传感器的平均运行能耗只约有 7.35 mW,并集成了 LoRa 无线模块,能够在长距离环境中稳定传输数据,适合矿井和工业区的远程监测需求。无论是对于市售的单一气体传感器还是一体式传感器,本文设计的低功耗无线气体传感器均具有更低能耗,这表明其具有较强的续航竞争优势。

本文提出的低功耗设计方案可以推广应用到温度、湿度、光照、振动等其他类型的环境参数传感器中,实现多种传感器的低功耗运行。模块化的硬件设计架构便于更换不同类型的敏感元件,可快速构建适用于不同监测需求的传感系统。所采用的 LoRa 远距离通信方案同样适用于农业、水利、气象等领域的环境监测应用。

4 结 语

针对环境监测系统中气体传感器功耗高、续航能力不足的问题,本文设计了一种集成多种气体检测功能的低功耗无线气体传感器及其运行策略,实现了在对环境气体实时监测的同时减少能源消耗,具体结论如下。

1)所设计的无线气体传感器实现了对甲烷、一氧化碳和二氧化碳 3 种气体的同时检测,检测误差分别为 2.9%、2.0%和 2.0%,均在敏感元件的允许误差范围内,满足环境监测的需求。

2)通过引入 Autosleep 与 DFS 策略,传感器的平均运行功耗降至 7.35 mW,续航时间提升 378%,显著提高了能源利用效率。

3)基于 LoRa 无线通信和低功耗 MCU 的系统设计方案,实现了传感数据的可靠传输和低功耗运行的统一,为环境监测系统提供了新的技术路径。

该方案尚存在不足之处:首先,传感器的抗干扰能力有待提高,环境因素对检测精度的影响需要进一步研究,如在障碍环境中的传感器部署问题^[18];其次,监测气体种类较为有限,难以满足复杂环境下的多参数监测需求。今后,将重点围绕扩展监测气体种类、探索新型能源技术、优化数据处理算法和实现多参数联合监测等方向展开研究,进一步提升系统的实用性和可靠性。

参考文献/References:

[1] 王玮,王建国.基于卫星遥感监测的石家庄市近地面 PM_{2.5} 浓度时空动态分析[J].河北工业科技,2021,38(6):507-514.
WANG Wei,WANG Jianguo. Spatial-temporal dynamic analysis

of PM_{2.5} concentration near ground in Shijiazhuang based on satellite remote sensing monitoring [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology,2021,38(6):507-514.

- [2] 刘长江.环境空气监测现场采样研究[J].黑龙江环境通报,2024,37(2):42-44.
LIU Changjiang. On-site sampling research in environmental air monitoring[J]. Heilongjiang Environmental Journal,2024,37(2):42-44.
- [3] 宁涛.煤矿采空区气体在线监测技术研究与应用[J].煤炭与化工,2021,44(2):101-104.
NING Tao. Research and application of online gas monitoring technology in mining area [J]. Coal and Chemical Industry, 2021,44(2):101-104.
- [4] 邬永利,高艳,吕良伟,等.化工行业环境监测的现状和展望[J].黑龙江环境通报,2024,37(9):69-71.
WU Yongli,GAO Yan,LYU Liangwei, et al. Current status and prospects of environmental monitoring in the chemical industry [J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2024, 37(9):69-71.
- [5] 宋连洪.基于光电互补的无线激光甲烷传感器设计[J].自动化与仪器仪表,2023(12):231-235.
SONG Lianhong. Design of wireless laser methane sensor powered on solar energy combined with battery[J]. Automation & Instrumentation,2023(12):231-235.
- [6] 张永超,赵录怀,张利钊.基于 FDSI 的无线传感器网络煤矿甲烷气体监测系统[J].工业仪表与自动化装置,2019(6):62-65.
ZHANG Yongchao, ZHAO Luhuai, ZHANG Zhaoxuan. A wireless sensor network monitoring system for methane gas in coal mine based on FDSI [J]. Industrial Instrumentation & Automation,2019(6):62-65.
- [7] 王璐.煤矿安全监控系统中一氧化碳无线传感器的设计与实现[J].煤矿机电,2020,41(4):5-8.
WANG Lu. Design and implementation of carbon monoxide wireless sensor in coal mine safety monitoring system [J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2020, 41(4):5-8.
- [8] 张佳乐,宋占锋,王久强.基于无线传感器的煤矿井下有害气体安全监控系统[J].煤炭技术,2022,41(11):130-132.
ZHANG Jiale, SONG Zhanfeng, WANG Jiuqiang. Coal mine underground harmful gas safety monitoring system based on wireless sensor [J]. Coal Technology,2022,41(11):130-132.
- [9] 陈宇,戴亮,戚蕊,等.智能环境监测系统设计[J].数字技术与应用,2021,39(6):157-159.
CHEN Yu,DAI Liang,QI Rui, et al. Design of intelligent environmental monitoring system [J]. Digital Technology and Application,2021,39(6):157-159.
- [10] 李佳怡.基于单片机的室内环境多参数监测系统设计[J].数字技术与应用,2019,37(12):159-160.
LI Jiayi. Design of multi-parameter monitoring system for living environment based on MCU [J]. Digital Technology and Application,2019,37(12):159-160.
- [11] DONG Gang, LU Yumei, LI Chengyong. Design and implementation of vehicle environment monitoring system based on wireless sensor network [C]//2021 IEEE International Conference on Emergency Science and Information Technology

- (ICESIT). Chongqing: IEEE, 2021: 134-138.
- [12] 李梦娇,彭继慎,孙瑄璿. 具有高增益低输出电流纹波的 Buck-Boost 变换器[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2022, 41(4): 372-378.
LI Mengjiao, PENG Jishen, SUN Xuanjin. Buck-Boost converter with high-gain and low output current ripple[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science Edition), 2022, 41(4): 372-378.
- [13] 徐东洋,李博. 气体传感器气敏性能测试技术研究进展[J]. 化学分析计量, 2024, 33(1): 126-132.
XU Dongyang, LI Bo. Research progress of gas sensing performance testing technology for gas sensor[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2024, 33(1): 126-132.
- [14] 穆思宇. NB-IoT 智能传感器低功耗电路设计及软件策略研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
MU Siyu. Research on Low Power Circuit Design and Software Strategy of NB-IoT smart[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.
- [15] 刘浩宇. 适用于 MCU 低功耗 LDO 的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
LIU Haoyu. Research and Design of Low-Power LDO Suitable for MCU[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [16] 李瑞祥. 基于负载监测的系统芯片动态频率调节研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
LI Ruixiang. Research on Dynamic Frequency Scaling for SOC with Bus Load Monitoring[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [17] GB/T 16157—1996, 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法[S].
- [18] 赵建豪,宋华,南新元. 室内障碍环境下空气质量监测异构 WSN 部署[J]. 河北科技大学学报, 2024, 45(1): 91-100.
ZHAO Jianhao, SONG Hua, NAN Xinyuan. Heterogeneous WSN deployment for air quality monitoring in indoor barrier environments[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2024, 45(1): 91-100.

(上接第 151 页)

- [12] ZHAO Yaozhou, PAN Tao, YU Xiaotong, et al. Corrosion inhibition efficiency of triethanolammonium dodecylbenzene sulfonate on Q235 carbon steel in simulated concrete pore solution[J]. Corrosion Science, 2019, 158: 108097.
- [13] VALEK L, MARTINEZ S, MIKULIĆ D, et al. The inhibition activity of ascorbic acid towards corrosion of steel in alkaline media containing chloride ions[J]. Corrosion Science, 2008, 50(9): 2705-2709.
- [14] JIANG Shaobo, GAO Song, JIANG Linhua, et al. Effects of deoxyribonucleic acid on cement paste properties and chloride-induced corrosion of reinforcing steel in cement mortars[J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 91: 87-96.
- [15] 文成,田玉琬,杨德越,等. 智能阻锈剂 LDH-NO₂ 在钢筋混凝土中的控释机制及缓蚀性能[J]. 工程科学学报, 2022, 44(8): 1368-1378.
WEN Cheng, TIAN Yuwan, YANG Deyue, et al. Controlled release mechanism and inhibition performance of smart inhibitor LDH-NO₂ in the reinforced concrete structures[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(8): 1368-1378.
- [16] 朱海威,余红发,麻海燕. 阻锈剂对海洋环境下混凝土中钢筋腐蚀影响的电化学研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(1): 109-119.
ZHU Haiwei, YU Hongfa, MA Haiyan. Electrochemical study on effect of rust inhibitors on corrosion of reinforcing bar in concrete in marine environment [J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2020, 50(1): 109-119.
- [17] 刘洋. 海洋环境钢筋阻锈剂的防腐蚀性性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
LIU Yang. Study on Corrosion Resistance of Steel Bar Rust Inhibitor in Marine Environment[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [18] GB/T 50081—2019, 混凝土物理力学性能实验方法标准[S].
- [19] CCES 01—2004, 混凝土结构耐久性设计与施工指南(2005 年修订版)[S].
- [20] JTS/T 236—2019, 水运工程混凝土试验规程[S].
- [21] ASTM C876-15. Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete[S].
- [22] GB/T 50344—2019《建筑结构检测技术标准》[S].