

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2314251

基于 NB-IoT 的燃气流量监测系统设计^{*}

张龙祥 冯全源 刘 彬

(西南交通大学信息科学与技术学院 成都 611731)

摘要:针对传统燃气表存在测量精度低、功能单一、安全性能差等问题,搭建了一种基于 NB-IoT 的燃气流量监测系统。该系统硬件方面采用 STM32 作为主控芯片,通过设计一款热式气体流量计,实现了气体流量的准确测量,并结合多传感器对燃气环境中温湿度、燃气浓度、压强等信息进行实时监测;软件方面使用 FreeRTOS 操作系统进行设计。借助 NB-IoT 技术将监测数据上传至 OneNET 云平台,用户可通过 App 实时查看燃气使用情况。实验结果表明,该系统可实现 $0.016\sim 6\text{ m}^3/\text{h}$ 的气体流量测量,测量误差在 $\pm 1\%$ 以内,重复性小于 2% ,且系统数据无线传输稳定,有效确保了燃气监测的精确性和安全性。

关键词: NB-IoT;监测系统;STM32;FreeRTOS;热式气体流量计

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Design of NB-IoT-based gas flow monitoring system

Zhang Longxiang Feng Quanyuan Liu Bin

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611731, China)

Abstract: A gas flow monitoring system based on NB-IoT technology was developed to address the issues of low measurement accuracy, limited functionality, and poor safety performance in traditional gas meters. The hardware aspect of the system employed an STM32 microcontroller as the main control chip and incorporated a specially designed thermal gas flow meter to accurately measure gas flow. Additionally, multiple sensors were integrated to enable real-time monitoring of temperature, humidity, gas concentration, and pressure in the gas environment. The software design utilized the FreeRTOS operating system. Leveraging NB-IoT technology, the system transmitted monitoring data to the OneNET cloud platform, allowing users to monitor gas usage in real-time through a dedicated mobile application. Experimental results demonstrated that the system achieved gas flow measurement ranging from 0.016 to $6\text{ m}^3/\text{h}$ with a measurement error within $\pm 1\%$ and a repeatability of less than 2% . Furthermore, the system's wireless data transmission remained stable, effectively ensuring the accuracy and safety of gas monitoring.

Keywords: NB-IoT; monitoring system; STM32; FreeRTOS; thermal gas flow meter

0 引言

随着经济蓬勃发展和人民生活水平显著提高,燃气已成为家庭中不可或缺的能源之一,燃气泄漏与计量不准是燃气使用过程中面临的突出问题。据不完全统计,2021年全国燃气事故1140起,造成106人死亡,763人受伤,燃气安全关系着人民生命财产安全。现如今,家庭燃气表大多仍采用传统的机械式气体涡轮流量计来测量流量,测量精度较低,并且不具备无线传输功能,需要工作人员上门抄表,效率低下,同时无法实时监测燃气使用环境,安全性能差。随着物联网技术的发展,智慧燃气的提出为燃气行业升级换代带来了新的机遇和挑战,提高燃气计量精度,保证

燃气使用安全,实现精准、快速、远程的燃气监测显得尤为重要^[1-3]。

众多学者为此进行了相关研究:宋洪儒等^[4]设计了基于窄带物联网(narrow band internet of things, NB-IoT)技术的智能燃气表,可实现燃气数据的远程传输。康文龙等^[5]通过融合通用分组无线业务(general packet radio service, GPRS)技术与 ZigBee 技术,实现了远程自动抄表系统。郑高原等^[6]设计了基于物联网的超声波气体流量监测系统,实现了误差在 $2\%\sim 2.6\%$ 的流量监测。郭丰碑等^[7]设计了基于时差法和新自适应滤波算法的超声波气体流量计,系统的最大测量误差为 1.08% ,满足 1.5 级精度

收稿日期:2023-07-30

^{*} 基金项目:国家自然科学基金重大项目(62031016)、中央在高院所重大科技成果转化项目(2022ZHCG0114)资助

标准^[7]。张禾等^[8]设计了一种结合模式识别的四声道超声波流量计,在流量测量中相比标准流量计具有 96.5% 的准确度。在气体流量测量方面,家用燃气表的测量范围一般是 0.016~6.0 m³/h,现有的流量计大多基于超声波的测量原理,适用于大管径、大流量的测量使用,并不能在家用燃气表的测量范围实现较高精度的测量。而热式气体流量计以其体积小、精度高、响应速度快的特点,相比其他流量计在小流量测量中具有优势^[9-10]。在使用安全性方面,市面上的智能燃气表大多仅仅是实现了远程无线抄表功能,无法对燃气使用环境进行实时监测。

为此,本文设计了一种基于 NB-IoT 的燃气流量监测系统。该系统包含 3 个部分:传感器监测、数据收发、远程监控。在传感器监测方面,为满足高精度、微型化的要求,通过设计一款热式气体流量计,使得流量测量精度有所提升,利用多传感器实时监测燃气环境,提高了燃气使用安全性。在数据收发方面,通过在 STM32 硬件上植入 FreeRTOS 实时操作系统,实现了数据采集、屏幕显示、无线传输等多种功能并发运行。在远程监控方面,可通过电脑管理端或安卓 App 远程查看燃气使用情况。该系统对满足智慧燃气行业的需求具有重要的实际意义和推广价值。

1 系统架构

该监测系统的总体架构由感知层、传输层和应用层组成。系统架构如图 1 所示。

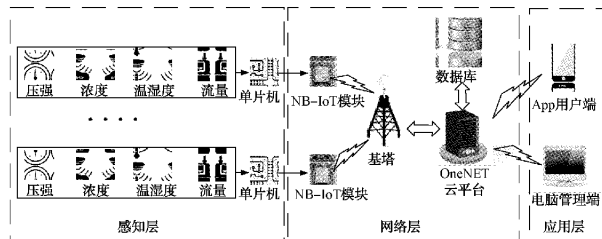


图 1 系统架构

感知层实现燃气环境信息感知、分析和异常监测。利用多传感器实时感知燃气使用信息的动态变化,包括燃气流量、温湿度、燃气浓度、压强等,单片机将采集到的数据进行预处理与分析,对环境中的异常数据进行危险报警。

网络层实现对来自感知层数据的传输与存储。对于数据传输,目前存在多种无线传输技术可供选择:ZigBee 技术具有灵活的组网能力,但信号穿墙能力受限;LoRa 技术则以高信噪比和低功耗为优势,但部署成本较高,技术难度较大。相较而言,NB-IoT 技术直接利用运营商基础设施与云端服务器通信,既保证了通信质量,又降低了系统成本^[11-12]。因此选择 NB-IoT 技术将感知层监测数据通过 4G 网络传输至附近 NB-IoT 基塔,进一步传输至中国移动的 OneNET 物联网云平台,并完成监测数据的云端存储。

应用层实现远程人机交互。涵盖 APP 用户端与电脑管理端,通过从云平台获取燃气监测信息并实现信息可视化,可远程查看监测数据。

2 系统硬件设计

监测系统以传感器检测技术、无线传输技术为基础,将系统硬件设计分为主控模块设计、多传感器模块设计、NB-IoT 通信模块设计、TFT 显示模块设计、报警模块设计以及电源模块设计,各模块相互协调工作。硬件结构如图 2 所示。

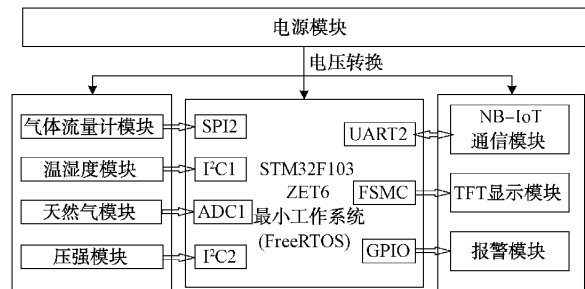


图 2 硬件结构

2.1 主控模块设计

系统的主控模块为搭载了 Cortex-M3 内核的 STM32F103ZET6 单片机。该单片机具有集成度高、主频快、运算能力强、外设功能丰富等特点,因此在各种监测开发装置中被广泛应用。主控模块负责对各传感器监测数据的收集和处理,控制 TFT 屏幕对监测数据进行实时显示。同时将处理后的监测信息按照特定格式上传至云平台,接收云平台指令并解析。单片机的主要 I/O 分配表如表 1 所示。

表 1 STM32 主要 I/O 分配表

引脚号	接口	模块型号	模块功能
PB12-PB15	SPI2	流量计	监测燃气流量
PB6-PB7	I ² C1	AHT10	监测温湿度
PB10-PB11	I ² C2	BMP280	监测压强
PA4	ADC1	MQ5	监测燃气浓度
PA2-PA3	UART2	GA7	NB-IOT 通信
PB8	GPIO	BEEP	危险报警
PE7-PE15			
PD0-PD1			
PD8-PD10	FSMC	TFT 320×240	屏幕显示
PD14-PD15			

2.2 多传感器模块设计

1) 流量监测部分

热式气体流量计的测量方法可分为恒功率型和恒温差型^[13]。恒功率型测量法指保持加热元件功率恒定,气体流量可通过测量测温元件的温度变化而计算得到。恒温差测

量法指保持加热元件与测温元件温差恒定,气体流量与供给功率成比例关系,气体流量越大,为维持恒定温度差所供给的功率越大。本文设计的热式气体流量计采用恒功率的测量方法,测量原理如图3所示。

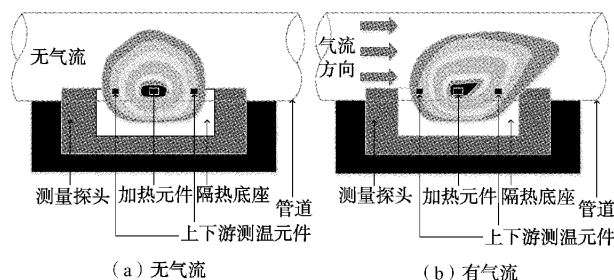


图3 测量原理

将热式气体流量计测量探头插入待测气流管道。在测量探头插入部分中,上下游测温元件以加热元件为中心对称分布在两侧,使用恒定功率对加热元件进行供电加热。加热元件及测温元件共处于隔热底座上,防止热量通过电路板传递。图3(a)中,无气流通过时加热元件两侧对称位置的温度相同;图3(b)中,当管道内有气体从左向右流过时,管道内温度分布发生变化,等温线向右侧倾斜,加热元件两侧对称位置的温度不再相同,通过上、下游测温元件测得温度 T_1 、 T_2 ,可得温度差 ΔT 为:

$$\Delta T = T_2 - T_1 \tag{1}$$

由置于加热元件两侧的测温元件测定得到温差 ΔT 后,可推算出气体质量流量。气体质量流量 q_m 的计算公式为:

$$q_m = K \frac{A}{C_p} \Delta T \tag{2}$$

式中: K 为仪表常数; A 为感温元件与环境热交换的热传导常数; C_p 为被测介质的定压比热容。

根据等温线分布特点,当气体流速过大时,上下游测温元件与气体的热量交换不够充分,上下游测温元件温度差 ΔT 趋近于0,从而会影响到流量的测量范围。为扩大流量测量范围,在加热元件两侧设置一组距离更远的测温元件;为排除环境温度干扰,引入环境测温元件进行温度补偿^[14]。

在热式气体流量计硬件设计中,由于电压波动对测量结果影响较大,选择 REF2033 稳压芯片对输入电压进行稳压,该芯片具有出色的温漂性能、功率低且精度高 ($\pm 0.05\%$),可提供 3.3 V 和 1.65 V 稳定电压。为了将传感器测得的电压模拟信号转换成主控可处理的数字信号,选择 16 位 8 通道高精度的 ADS8345 芯片对测量电压进行模数转换。ADS8345 芯片是一种逐次逼近寄存器 (successive approximation register, SAR) A/D 转换器,串行输出数据,具有高达 100 kHz 的转换率,可满足实时性要求高的测量场景。为读取转换数据,单片机使用串行外设接口 (serial peripheral interface, SPI) 协议与该芯片进行通信,数据读取指令格式如图 4 所示,其中输入模式包括模拟数据单端输入和差分输入,为方便测量数据的统一处理,使用稳压芯片提供的 1.65 V 基准电压作为参考电压,选择模拟数据单端输入模式进行测量。由外部时钟对芯片的转换速率进行控制,因此选择外部时钟转换模式。将起始位置高代表转换开始,配置通道选择位读取不同测量点电压值。热式气体流量计电路图如图 5 所示。



图4 数据读取指令格式

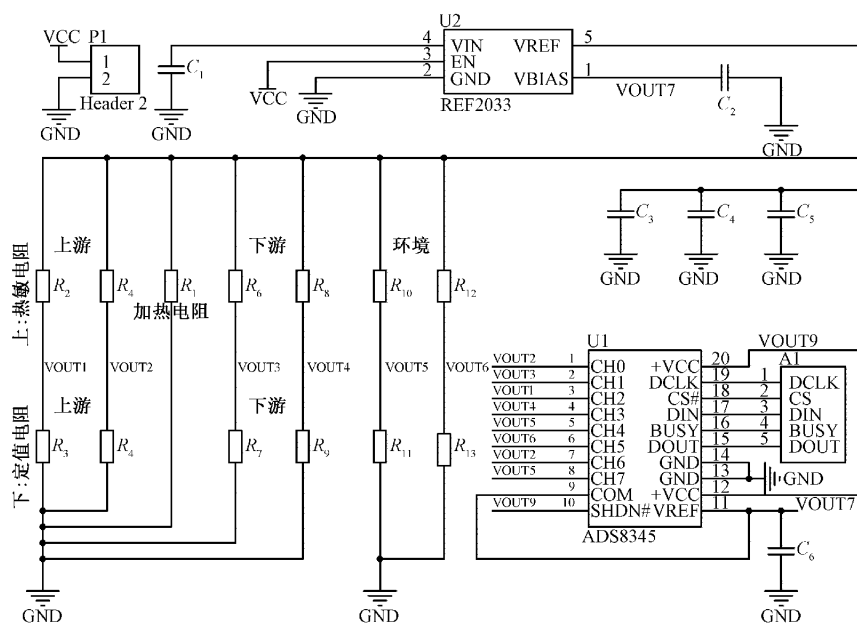


图5 热式气体流量计电路图

2) 环境监测部分

当环境温度过高, 超过 45 °C 时, 可能导致老化管道因气体膨胀而破裂, 造成燃气泄漏。针对环境湿度的监测, 采用 AHT10 型号的温湿度传感器。该传感器由改进型的半导体电容式温度、湿度传感器原件组成, 具有高精度和高可靠性的特点, 可测量的温度范围为 -40 °C ~ +85 °C, 精度为 ±0.5 °C; 湿度范围为 0~100%RH, 精度为 ±3%RH。

经查询, 燃气使用时应满足环境压强在 86~106 kPa 范围内, 由于楼层高度或天气原因造成环境压强低于或高于正常值时, 可能出现燃气脱火现象, 引发安全事故。针对燃气环境压强的监测, 采用 BMP280 型号的压强传感器。该传感器功耗低且稳定性好, 可监测大气压强范围为 0~20 000 hPa, 相对精度为 ±0.12 hPa。该模块提供了 I²C 和 SPI 通信协议, 将模块的 CSB 引脚接入高电平, 选择 I²C 接口进行通信。

燃气泄漏导致环境燃气浓度增加。针对环境燃气浓度的监测, 采用 MQ5 型号的天然气管传感器。当环境中燃气浓

度增加时, 传感器中二氧化锡的导电率会增大, 输出电阻变低, AOUT 引脚输出的模拟电压值随之增大, 其电压输出可由单片机的 12 位模/数转换器 (analog-to-digital converter, ADC) 进行测量, 经过公式转换后可得出燃气浓度。当环境燃气浓度超过 200×10^{-6} 时, 即表示出现燃气泄漏。

2.3 NB-IoT 通信模块设计

该系统选用果云 GA7 模块, 这是一款高性能、高度集成的 NB-IoT 无线通信模块, 集成电源模块、基带模块、存储模组和射频模块于一颗芯片内, 极大地简化了外围电路的设计。为确保通信的可行性, 需要将 NB_ANT 引脚与 50 Ω 射频天线进行连接。该模块作为射频模组与中国移动的物联网卡进行数据传输, 经由射频天线将数据发送到中国移动网络基站。GA7 模块可通过通用异步收发传输器 (universal asynchronous receiver/transmitter, UART) 与单片机进行通信, 使用 AT 指令并基于消息队列遥测传输 (message queuing telemetry transport, MQTT) 协议与 OneNET 平台建立通信连接, 完成数据的远程无线传输^[15]。GA7 模块电路图如图 6 所示。

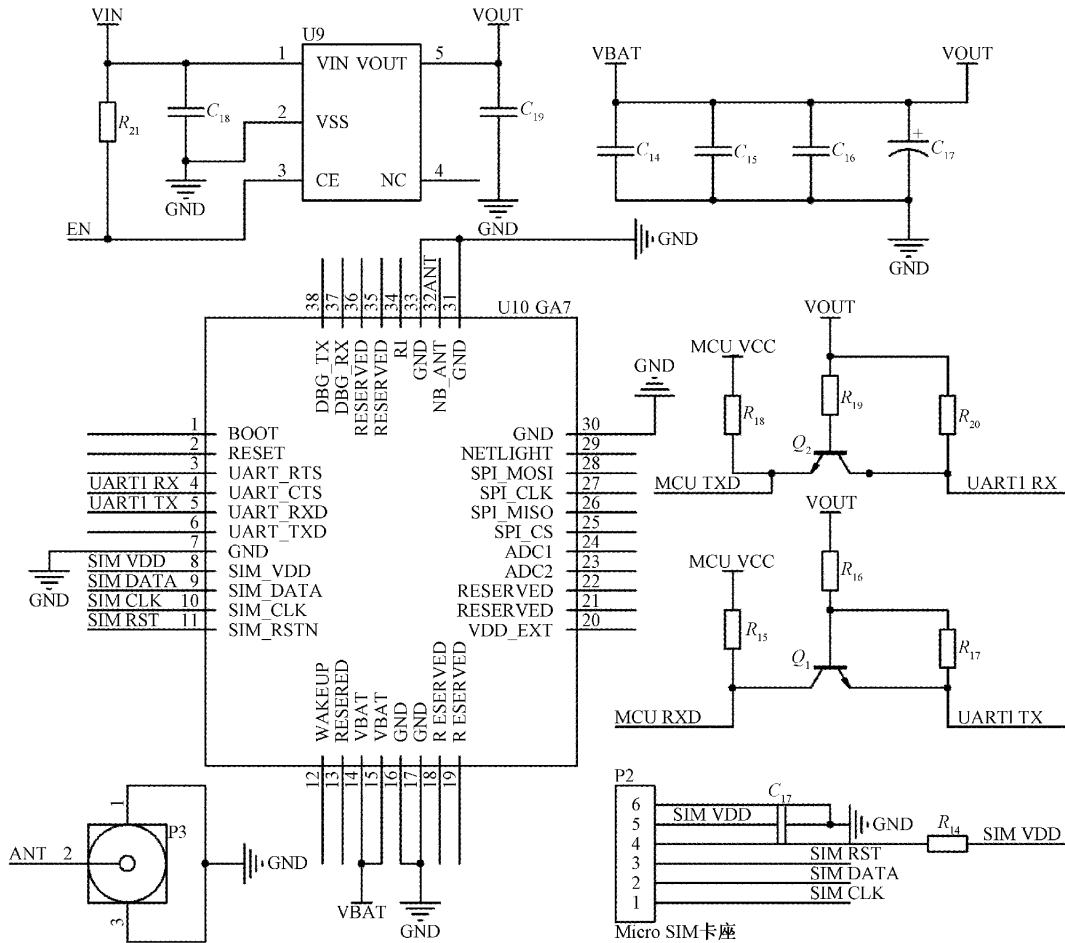


图 6 GA7 模块电路图

2.4 TFT 显示模块设计

采用 TFT 显示屏实现监测信息的实时显示。TFT 是

薄膜晶体管液晶显示屏, 具有分辨率高、对比度高、彩色保真高的特点, 分辨率为 320×240。用户可通过显示屏直观

地观察到用户信息、燃气使用流量、燃气环境状态等信息,提高了燃气使用的便捷性。

2.5 报警模块设计

设置环境温度正常范围为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境压强正常范围为 $86\sim 106\text{ kPa}$,燃气浓度正常范围为小于 200×10^{-6} 。当环境数据处于正常范围内时表示燃气状态正常;当采样值超过预设的阈值时,单片机将控制蜂鸣器三极管导通,使其发出声音。设置低、中、高3种报警等级,温度异常时报警等级为低;压强异常时报警等级为中;燃气浓度异常时报警等级为高。根据脉宽调制(pulse width modulation, PWM)技术,改变单片机与蜂鸣器相连引脚的输出方波频率和占空比,控制蜂鸣器音调变化,从而区分不同的报警等级。

2.6 电源模块设计

考虑到监测系统工作独立性,采用锂电池组进行供电。该锂电池组容量为 $3\ 200\text{ mAh}$,电源电压为 12 V ,具有使用寿命长、耐高温等特点,适合燃气监测等复杂环境使用。采用 LM2596 电压调节模块将 12 V 输入电压转换为 5 V 电压,并通过 LM1117 电压调节模块将 5 V 电压转换为 3.3 V 电压,可满足不同模块的供电需求。电源模块电路图如图 7 所示。

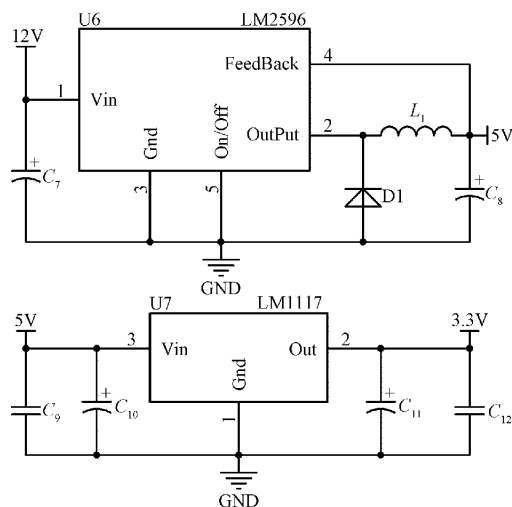


图 7 电源模块电路图

3 系统软件设计

3.1 软件总体设计

STM32 传统的单 while 编程方式无法满足数据的采集、处理、控制、传输等实时性要求。为了提高燃气监测系统的响应速度,采用具有强大任务管理和调度功能的 FreeRTOS 实时操作系统。系统上电后进行硬件和 FreeRTOS 系统初始化,创建系统任务,分别实现流量测量、环境监测、NB-IoT 通信、TFT 显示等子任务创建。FreeRTOS 系统通过任务调度器完成调度,实现多任务并发处理,提高了系统的效率和响应速度。软件总体设计流

程如图 8 所示。

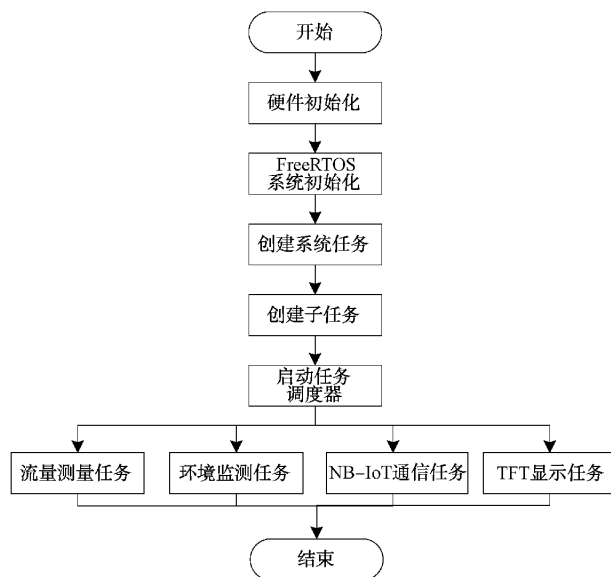


图 8 软件总体设计流程

3.2 流量测量任务设计

流量测量任务负责计算气体瞬时流量及累积流量。气体流量测量流程如图 9 所示。模块初始化后,单片机开启定时器中断,通过 SPI 接口循环采集流量计转换后的一组相关 ADC 数据,将数据导入已拟合得到的气体流量计算公式,可得出气体瞬时流量。由于采集的数据受噪声干扰较大,为减小噪声,使用滑动均值滤波算法对计算出的瞬时流量进行处理。当定时器产生中断时,将定时时间与瞬时流量相乘并累加,得出气体累积流量。

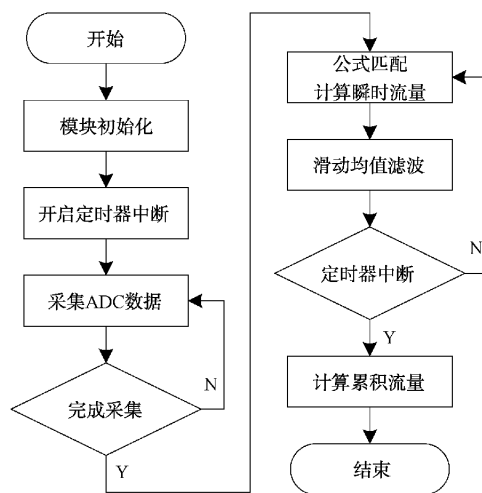


图 9 气体流量测量流程

3.3 NB-IoT 通信任务设计

NB-IoT 通信任务负责将监测数据上传至云平台,并接收来自云平台的命令^[16]。NB-IoT 通信流程如图 10 所示。等待 NB-IoT 模块网络注册成功后,通过 MQTT 协议与 OneNET 云平台建立连接,并向特定的主题(topic)发布

消息,包括环境温湿度、压强、燃气浓度、燃气流量等,数据以 JSON 格式进行上传。为保障监测的连续性,每过 5 s 向云平台上传一次数据,若检测到模块连接断开则尝试重新连接。开启串口接收中断后,如果云平台有命令下发,则触发串口中断,单片机接收命令后,进行命令解析并执行相应操作。

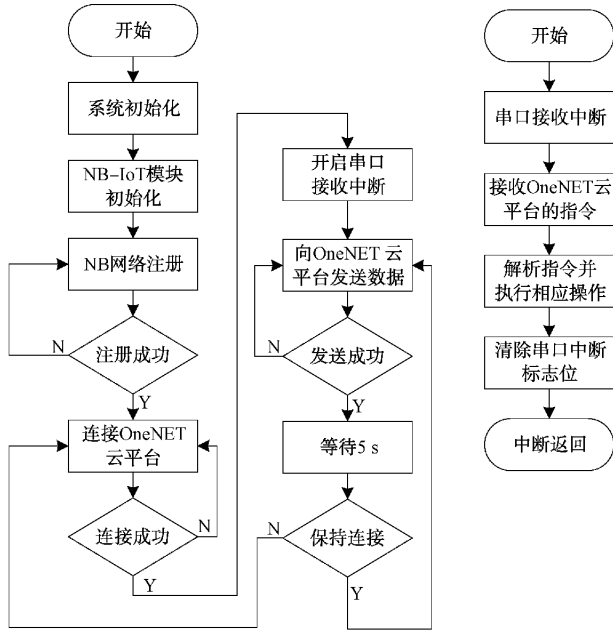


图 10 NB-IoT 通信流程

单片机以发送 AT 指令的方式来控制 NB-IoT 模块连接、登录 OneNET 云平台、相关主题的订阅与发布等操作。其中相关 AT 指令如表 2 所示。

表 2 相关 AT 指令

指令	功能
AT+CREG=0	测试网络注册是否成功
AT+ECMTCFG=0	配置云服务类型
AT+ECMTOOPEN=0	打开 OneNET 客户端连接
AT+ECMTCONN=0	登录 MQTT 服务器
AT+ECMTSUB=0	订阅主题
AT+ECMTPUB=0	发布主题

3.4 终端程序设计

终端程序分为电脑管理端与 App 用户端,电脑管理端使用 C# 语言进行开发,采用 http 协议访问 OneNET 云平台的 API 函数,获取监测信息,并实现数据可视化。

App 用户端使用 JAVA 语言和 Andriod Studio 软件进行开发。进入 APP 软件后,用户需进行注册并登录,功能界面中可选择环境安全、用气分析、故障维修、充值缴费等不同功能。APP 通过 MQTT 协议从 OneNET 云平台订阅相关主题,实现监测数据的接收。App 功能图如图 11

所示。



图 11 App 功能图

4 系统测试

4.1 流量计功能测试

为验证热式气体流量计测量的准确性,在某公司气体实验室使用音速喷嘴法燃气表检验装置进行现场测试。为保证实验安全,在流量测量中使用空气进行测试,同时需要保持温度恒定,减小温度对实验结果的影响。检验装置由气缸、检验台和电脑控制端组成,测试时需将流量计正确安装至检验台合适位置。在电脑控制端设置待检的标准流量值,点击开始检定按钮,控制气缸输出标准气体流量,等待流量输出稳定后,对流量计进行校准。单片机采集流量计的测量数据并处理,最终将实测流量值转换成单脉冲的形式输出到检验装置进行比对,检验装置可自动计算标准流量与实测流量的相对误差和重复性,并显示于电脑控制界面。实验装置如图 12 所示。

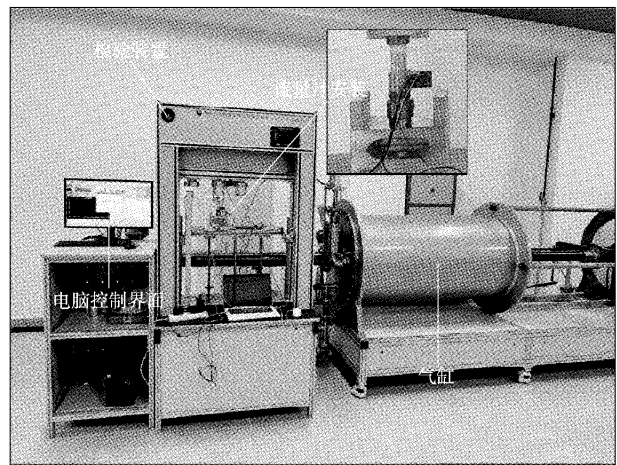


图 12 实验装置

在 0.016~6 m³/h 的流量范围内选择 15 个检定流量点进行多次重复测量。保证实验条件一致情况下,对每个设定的流量进行测量后,记录实测流量、相对误差及重复

性。随机选取一组测试结果进行记录,测试结果如表3所示。

表3 测试结果

标准流量/ (m ³ /h)	实测流量/ (m ³ /h)	测量误差/%	重复性/%
0.016 0	0.016 0	0.03	0.03
0.030 0	0.029 9	-0.25	0.06
0.050 0	0.049 9	-0.18	0.12
0.100 0	0.100 5	0.45	0.07
0.150 0	0.149 9	-0.05	0.14
0.200 0	0.200 4	0.20	0.18
0.250 0	0.250 4	0.14	0.06
0.500 0	0.497 5	-0.51	0.16
0.800 0	0.794 3	-0.71	0.05
1.000 0	1.001 4	0.14	0.09
2.000 0	1.985 4	-0.73	0.14
3.000 0	3.016 2	0.54	0.07
4.000 0	3.974 4	-0.64	0.11
5.000 0	5.028 5	0.57	0.12
6.000 0	6.043 2	0.72	0.09

由表3实验数据可知,热式气体流量计在较小的气体流量测量时(0.016~0.25 m³/h)可满足相对误差在±0.5%以内,随着气体流量增大,相对误差有所增大,但总体相对误差满足在±1%以内,其中最小误差为0.03%,最大误差为-0.73%,满足流量计检定规程中准确度1.0级的等级要求。同时流量计具有良好的重复性,其中最小重复性为0.05%,最大重复性为0.18%。

为验证热式气体流量计测量的稳定性,分别记录在相同实验条件下的三次流量测量的相对误差,如图13所示。由图对比可知,同一检定流量点流量测量的相对误差变化较为稳定。实验结果表明,流量计测试数据的准确性较高,可满足流量计量的实际需求。

4.2 系统功能测试

为验证燃气环境实时监测和危险报警,以及NB-IoT无线通信等功能的可行性,将监测系统放置于可调控温湿度、压强的实验设备中,观察系统采集的环境温湿度、压强、燃气浓度等信息是否在正常范围内。为模拟不同危险场景,通过实验设备控制温度与压强,并使用打火机模拟燃气泄漏情况,观察系统是否可触发危险报警。比对TFT显示屏、手机APP和OneNET平台中的各信息是否传输一致。通过观察发现,TFT屏幕可实时反映数据变化,OneNET云平台中监测数据每5s进行一次更新,手机APP可从云平台接收数据。当出现危险情况时可立即触发蜂鸣器报警并上报。实验结果验证了环境监测和NB-IoT无线通信功能正常,满足设计要求。系统硬件实物图、

部分云端数据及手机App如图14所示。

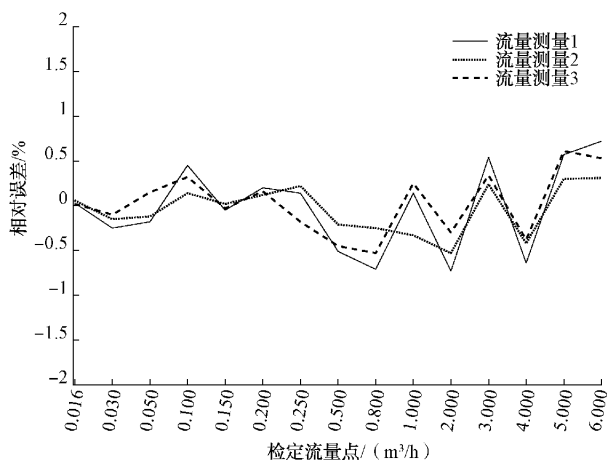


图13 测试结果

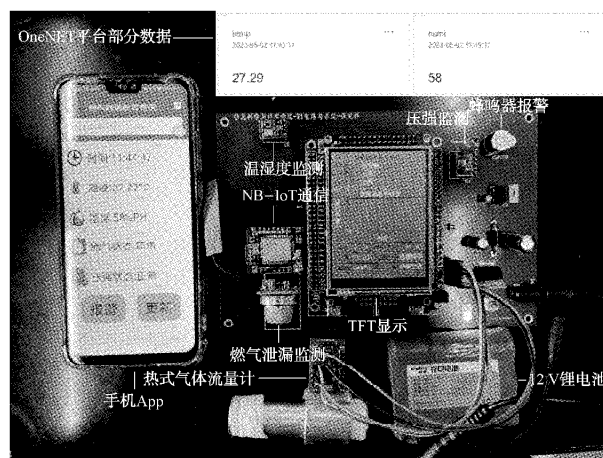


图14 硬件实物图、部分云端数据及手机App

5 结 论

在燃气流量监测方面,本文设计的热式气体流量计提高了家用燃气表中气体流量的测量精度。利用多传感器监测燃气使用环境并通过NB-IoT技术实时上传至云平台,为燃气使用增添了一层保障。本系统简单易用,智能灵活,可应用于燃气流量计量与环境监测等领域,具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 郑贤斌. 中国智慧燃气现状、挑战及展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(11): 152-160.
- [2] 姚懋欣, 刘桂雄, 陈国宇. 燃气表计量检定线首次检定调度技术研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(4): 56-59.
- [3] 孟伟, 何卫, 李璐伶, 等. 城镇燃气行业发展现状与关键前沿技术[J]. 油气储运, 2022, 41(6): 673-681.
- [4] 宋洪儒, 王宜怀, 杨凡. 基于窄带物联网智能燃气表系统设计及实现[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(3): 113-116.

- [5] 康文龙,计东.基于物联网技术的燃气表智能抄表系统设计[J].传感器与微系统,2018,37(12):103-105,113.
- [6] 郑高原,余世刚.基于物联网的高精度超声波气体流量监测系统[J].仪表技术与传感器,2021(2):65-70.
- [7] 郭丰碑,杨宗良,程东旭,等.基于自适应滤波算法的超声波气体流量计[J].仪表技术与传感器,2023(3):24-32.
- [8] 张禾,苟林,梁海波.基于DC-SAM液位识别模型的非满管流量计[J].电子测量与仪器学报,2022,36(3):61-69.
- [9] 黄延祿,李初阳,王庆标.热式气体质量流量计的设计与计算[J].自动化与仪表,2019,34(5):67-71.
- [10] WU C G, LIU G L, ZHAI Y, et al. Development of Gas Meter based on MEMS Thermal Flow Sensor[C]. 2019 IEEE 14th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), IEEE, 2019:192-195.
- [11] 李中阳.基于NB-IoT的智慧燃气物联网系统框架设计与研究[J].自动化仪表,2023,44(5):102-106.
- [12] WANG Z T, HU C, ZHENG D Z, et al. Ultralow-power sensing framework for internet of things: A smart gas meter as a case[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(10): 7533-7544.
- [13] 胡梦飞,刘亚伟,杨露露,等.基于MEMS技术热温差式流量传感器的设计与标定[J].传感器与微系统,2019,38(2):102-104.
- [14] 祁佳莉,王康宁,王瑞金,等.一种新型双层热感式微流量传感器及参数优化[J].仪器仪表学报,2022,43(9):149-157.
- [15] 潘泽锴,阳琼芳,李泰韬.基于物联网技术的智能衣柜系统设计与实现[J].国外电子测量技术,2022,41(5):124-130.
- [16] 张启元,张烈山,兰益成,等.基于NB-IoT的养殖塘水质监测无人艇系统研究[J].电子测量技术,2021,44(7):170-178.

作者简介

张龙祥,硕士研究生,主要研究方向为信息智能感知与获取。

E-mail: 1640789179@qq.com

冯全源(通信作者),博士,教授,主要研究方向为物联网系统。

E-mail: fengquanyuan@163.com

刘彬,博士,主要研究方向为仪表智慧工厂建设研究。

E-mail: 234527073@qq.com