

基于颗粒物衰减法的室内换气率无线测量装置

陈帅, 彭超华, 邓勇, 邵建新, 倪培永, 田为广, 李欣瑶, 唐晨

(南通大学, 江苏 南通 226019)

摘要: 换气率(ACH)是评价影响人体健康的室内空气质量的重要参数。由于传统的基于室内CO₂衰减来测量房间换气率的方法存在诸多局限性,且无法做到快速测量,因此有必要对现有的换气率测试方法进行改进。本文以大气中常见的PM_{2.5}作为示踪剂,建立起了基于室内颗粒物去除法的房间换气率计算的数学模型,结合误差分析的方法,设计了求解房间换气率的数值求解算法。

基于上述模型和算法,借助嵌入式技术,开发了测量房间换气率的无线测量装置。装置分为数据采集端、运算处理端和用户端。在数据采集端的硬件上,基于便携式应用标准设计,支持锂电池独立供电与USB供电,供电方式可以自动切换;在软件上,采用RT-Thread操作系统进行任务调度,实时性高。在运算处理端上,基于树莓派搭建了运算处理终端,具备前端界面显示、后台TCP服务器以及换气率计算功能。采用多线程技术,将前后台数据显示、处理业务逻辑分离,提升了软件的运行效率。在用户端上,基于Java技术,开发了可以从树莓派上获取数据的APP,以此实现数据采集装置、运算处理终端和用户端之间的数据交互。

本文选取了两个普通房间进行了换气率测试。房间1的空气体积约为22.5m³,房间2的空气体积约为18.8m³。在稳定实验结果的基础上,算得房间1的换气率约为0.36h⁻¹,房间2的换气率约为0.16h⁻¹。为了验证本文基于室内颗粒物去除法求得的房间换气率的准确性,采用国标推荐的CO₂衰减法对这两个房间的换气率进行了测试,测试结果表明房间1的换气率约为0.38h⁻¹,房间2的换气率约为0.17h⁻¹。对比于颗粒物衰减法的结果,房间1两种方法的相对误差为10.5%,房间2的相对误差为5.9%,但基于颗粒物衰减法的测试时间仅为CO₂衰减法的一半,这意味着,基于颗粒物衰减法不仅可以同样获得高精度的换气率结果,并且具有极大的时间成本优势,可以实现室内换气率的快速测量。

关键词: 换气率;PM_{2.5};数学模型;嵌入式设计;数据交互;误差分析

Design of the wireless measurement system for air change rates based on indoor particles attenuation

Abstract : Air change rate (ACH) is an important parameter to evaluate the indoor air quality affecting human health. Due to many limitations from the traditional method for ACHs based on CO₂ decay and it cannot quickly measure ACHs, it is necessary to improve the existing air exchange rate test method. In this paper, the common PM_{2.5} in the atmosphere was used as the tracer and a mathematical model for calculating the ACHs based on the indoor particles removal method was established. Combined with the error analysis method, a numerical algorithm for solving the ACHs was designed.

Based on the above models and algorithms, a wireless measurement device for measuring ACHs had been developed by the embedded technology. The device was divided into data collection terminal, operation processing terminal and user terminal. On the hardware of the data collection terminal, it was designed based on portable application standards, supporting independent lithium battery power supply and USB power supply, and the power supply mode can be automatically switched. On the software, the RT-Thread operating system was used for task scheduling with high real-time performance. On the computing processing end, a computing processing terminal was built based on the Raspberry Pi, with front-end interface display, background TCP server and air exchange rate calculation functions. Multi-threading technology was used to separate the front and back data display and processing business logic, which improved the operating efficiency of the software. On the user side, based on Java technology, an APP that can obtain data from the Raspberry Pi was developed to realize the data interaction among the data collection device, the computing processing terminal and the user side.

Two ordinary rooms were selected to conduct the ACH test experiments. The air volume of room 1 was about 22.5 m³, and the air volume of room 2 was about 18.8 m³. Based on stable experimental results, the air exchange rate of room 1 was calculated to be about 0.36h⁻¹, and the air exchange rate of room 2 was about 0.16h⁻¹. In order to verify the accuracy of the ACHs obtained by

the indoor particles removal method, the ACHs for these two rooms was tested using the CO₂ attenuation method recommended by the national standard. The results showed that the ACH for room 1 was about 0.38h⁻¹ and the ACH for room 2 was about 0.17h⁻¹. Compared with these two methods, the relative error for room 1 was about 10.5% and the relative error for room 2 was about 5.9%. However, the cost time for the particles removal method was only a half compared with the CO₂ decay method, which indicated that the particles removal method could not only obtain high-precision ACH results, but also had a great time cost advantage. In brief, the new method built in this paper can realize the rapid measurement of indoor air exchange rates.

Keywords : Air change rate;PM_{2.5};Mathematical model;Embedded design;Data interaction;Error analysis

1 引言

1.1 课题背景及研究意义

随着生活水平的不断提高,人们的健康意识逐渐提升。越来越多的人追求更高的生活质量^[1]。对于一个宜居性好的房子,则必须考虑其室内空气质量(IAQ)。新风量是衡量室内空气质量的重要指标^[2]。在中国国家标准 GB/T 18204.18-2000 中,新风量定义为通过空调系统通道和房间门窗之间的缝隙进入房间的空气总量。我们知道,当房间的门窗自然关闭时,新风量大约等于间隙风流量^[3]。此外,当净空气流量和房间的风量相对固定时,也可以确定实验室内的换气率。一些研究中指出,较小的换气率很容易导致高 CO₂ 浓度,这在导致病态建筑综合症(SBS)^[4,5]中起着重要作用。考虑到人们大部分时间都在室内度过,房间的通风不畅将对人们的公共健康构成潜在的巨大危害^[6-8]。此外,随着室外温度下降和污染增加,人们愈发不想打开门窗,这也会导致室内通风不良,这些所有变化都加剧了通风条件的恶化^[9]。

实际上,示踪气体浓度衰减法通常用作空气变化率的测试方法。主要步骤如下:将适量的示踪气体引入室内进行试验。由于室内外空气通过密闭房间的缝隙进行交换,室内示踪气体的浓度呈指数衰减。最后,可以根据浓度随时间的变化计算空气变化率。一般采用 CO₂ 作为示踪气体^[10]。对于这种方法,需要事先将一定浓度的气体引入室内进行实验,等待它们均匀扩散后再进行实验,非常不方便。另外,基于 CO₂ 衰减法测量房间的换气率一般需要较长的测试时间,难以做到快速测量。因此,很有必要寻找新型示踪剂以实现既快又准地测量房

间的换气率的目标。

1.2 本系统的难点和创新

空气中 PM_{2.5} 等细颗粒物与人们的关系相当密切[11-14]。由于空气阻力和重力的影响，PM_{2.5} 等细颗粒物广泛存在于空气中[15]。此外，这些颗粒物还可以通过间隙风中渗透至室内[16]。因此，可以通过研究这些细微颗粒物进入房间的过程来估算其中的间隙风风量，进而计算房间的换气率，某种程度上可以将空气中 PM_{2.5} 视为一种示踪剂。然而，目前鲜有文献讨论如何利用室内颗粒物来测量房间的换气率，本项目将就对此展开相关研究，验证室内颗粒物衰减法测量房间换气率的模型在原理的正确性和工程上的可行性。

2 系统原理与方案设计

2.1 基于室内颗粒物去除的换气率模型建立

由于重量轻、体积小，PM_{2.5} 等细小颗粒很容易从门窗缝隙通过间隙风渗入室内，当他们进入房间后，由于室内环境的影响，室内颗粒物可能会凝结、沉积或重新悬浮。图 2-1 展示了一个自然封闭房间内颗粒物的运动模型。

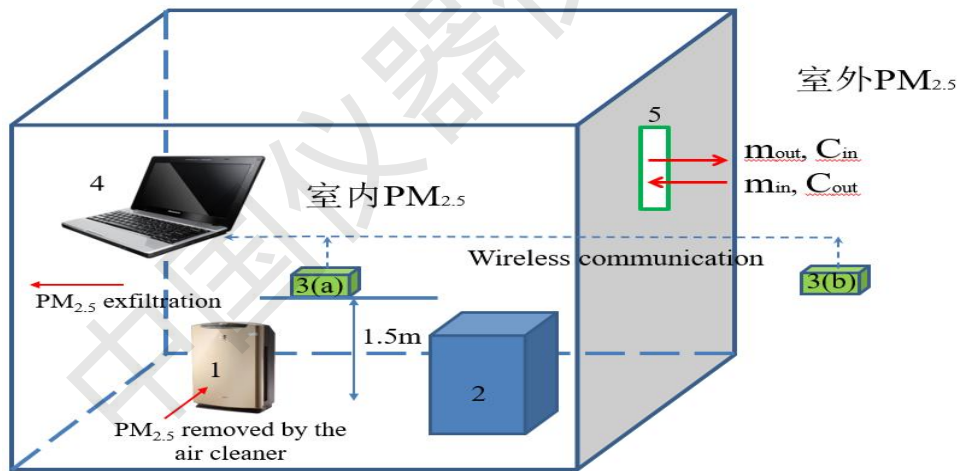


图 2-1 自然对流下封闭房间的颗粒物运动模型

在本研究中，室内颗粒浓度由大金 MC71NV2C 空气净化器控制。根据文献[17]的研究结果，颗粒物在室内外运动过程中始终遵循质量守恒定律，并且当房间的门窗关闭且没有室内排放源时，颗粒再悬浮的作用可以忽略不计。根据图 2-1 建立的颗粒物运动模型，室内存在颗粒物的质量 (m) 由室内初始滞留粒子的质量 (m_0)、进入室内并从室内渗出的颗粒物质

量 (m_{in})、渗出房间的颗粒物质量(m_{out})、空气净化器清除的颗粒质量(m_c)和沉积颗粒的质量 (m_d)。因此，室内粒子的平衡方程可得如下：

$$m = m_0 + m_{in} - m_{out} - m_c - m_d \quad (2-1)$$

对式(2-1)进行微分处理，可得到室内瞬时的颗粒物质量

$$dm = dm_{in} - dm_{out} - dm_c - dm_d \quad (2-2)$$

对上式进行等量替换，可得到如下方程：

$$VdC = PC_{out}Qdt - CQdt - CQ_cdt - KVCdt \quad (2-3)$$

式中，式中 V 为实验房间的空气体积 (m^3)， C 和 C_{out} 为室内、外颗粒物浓度 (mg/m^3)， t 为实验持续时间 (h)， Q 为间隙风风量 (m^3/h)， Q_c 为空气净化器的 CADR (m^3/h)， P 为实验房间的颗粒渗透系数， K 为颗粒物的自然沉积率 (h^{-1})。

文献[18]指出，颗粒物的自然沉积率一般很小，可以直接忽略。因此对于式(2-3)，结合初始条件，可以解得其通解：

$$C = \left(C_0 - \frac{PC_{out}Q}{Q+Q_c} \right) e^{-\left(\frac{Q+Q_c}{V}t\right)} + \frac{PC_{out}Q}{Q+Q_c} \quad (2-4)$$

式中， C_0 为房间的颗粒物浓度初始值。对于式 (2-4)，当室内测试时间足够长时，上式可以化简为：

$$C_{in\infty} = \frac{PC_{out}Q}{Q+Q_c} \quad (2-5)$$

上式中， $C_{in\infty}$ 可以理解为室内经净化器作用至平衡态时的颗粒物浓度，考虑到空气净化器的 CADR 远大于间隙风的风量，因此式(2-5)可以进一步化简为：

$$C_{in\infty} \approx \frac{PC_{out}Q}{Q_c} \quad (2-6)$$

因此，式(2-4)可以简化为：

$$C = \left(C_0 - C_{in\infty} \right) e^{-\left(\frac{Q_c}{V}t\right)} + C_{in\infty} \quad (2-7)$$

对式(2-7)移项处理并取对数，可得到以下等式：

$$\ln \left(\frac{C - C_{in\infty}}{C_0 - C_{in\infty}} \right) = -\frac{Q_c}{V} t \quad (2-8)$$

2.2 基于室内颗粒物去除的换气率求解算法设计

一般来说换气率 ACH 可按下式计算：

$$ACH = \frac{Q}{V} \quad (2-9)$$

对于式(2-8)的左边， C 可以通过室内的颗粒物传感器实时测得， C_0 亦可得知。对于 $C_{in\infty}$ ， C_{out} 可以通过室外的颗粒物传感器实时测得， Q_c 为空气净化器的设定值。对于颗粒物渗透系数 P ，一般认为颗粒物穿透系数主要受换气率和门窗结构特点等因素的影响。文献^[17]的研究结果同样表明，换气率对 P 值影响不大。由此可见，当建筑结构固定时， P 的值是相对确定的。通常颗粒物穿透系数的变化范围为 0.7-1.0^①[19]。因此，只有间隙风风量 Q 会影响 $C_{in\infty}$ 的求解，但值得确定的是，式(2-8)的左边求得的是一群离散点。

观察式(2-8)的右边，这是一个正比例函数，斜率可求且为负。因此欲使式(2-8)成立，式(2-8)的左边散点的拟合斜率应等于右边，基于此可以设计换气率的求解算法，为减少计算冗余度，可采用误差检验的方法对直线的逼近程度进行判断，具体算法设计如下：

- ①通过室内颗粒物传感器测量室内颗粒物浓度，记为 C_1 ；
- ②通过室外颗粒物传感器测量室外颗粒物浓度，记为 C_2 ；
- ③输入参数 P ， Q_c ， V ；
- ④令 $ACH=0.1$ ；
- ⑤ $Q = ACH \times V$ ；
- ⑥计算 $C_{in\infty}$ ；
- ⑦计算离散点集 $\ln((C_1 - C_{in\infty}) / (C_1(1) - C_{in\infty}))$ ，记为 $\{m\}$ ；
- ⑧对 $\{m\}$ 随测试时间 t 进行线性拟合，得到直线 y_1 ；
- ⑨记直线 $y_2 = -(Q_c/V)t$ ；
- ⑩对 y_1 和 y_2 进行 R-Score 检验；
- ⑪若 R-score 大于 0.82，则输出此时的 ACH，否则 $ACH = ACH + 0.02$ ，并返回步骤⑤继续执行；

① Bennett, D. H., Koutrakis, P. Determining the infiltration of outdoor particles in the indoor environment using a dynamic model. *Journal of Aerosol Science* 2018. 37, 766-785.

⑫结束计算。

详细的求解流程如图 2-2 所示。

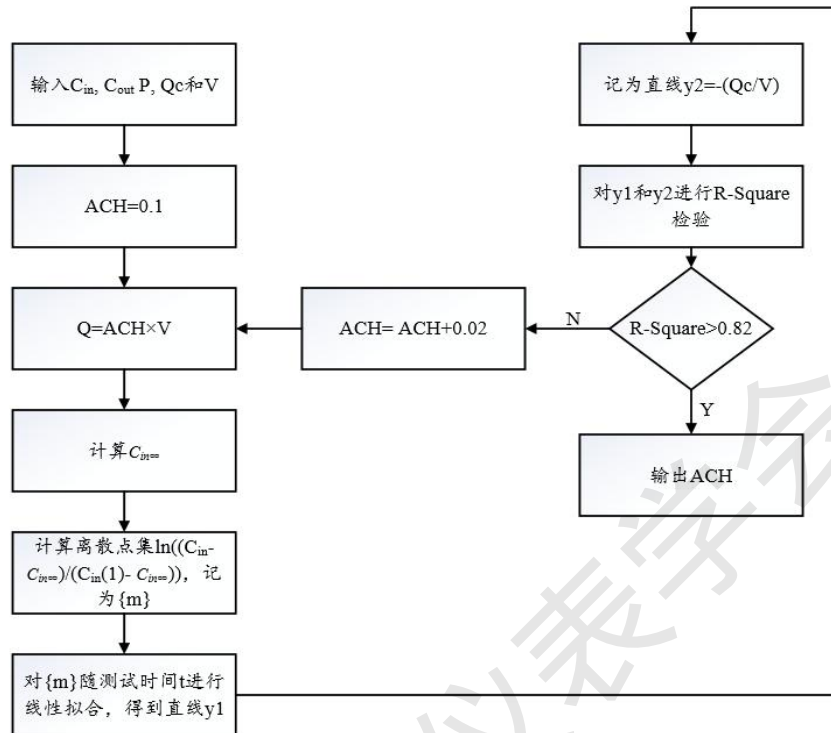


图 2-2 换气率模型求解流程

2.3 基于室内颗粒物去除的换气率测量装置实物图

基于嵌入式技术，开发了一款基于室内颗粒物去除的换气率测量装置，其实物图如图 2-3 所示。

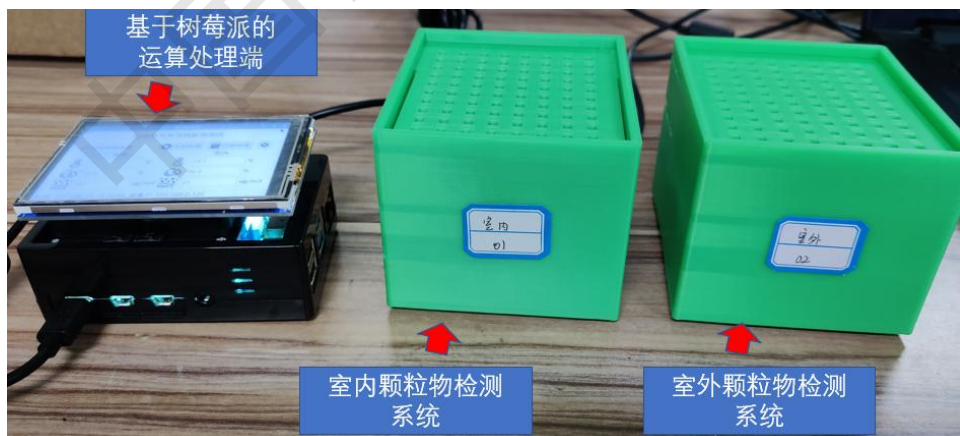


图 2-3 基于室内颗粒物去除的换气率测量装置

3 系统硬件与软件设计

3.1 系统总体架构设计

本系统分为前端数据采集端、运算处理端及用户端软件三部分组成。采集装置以 STM32 为核心控制器获取传感器的数据并进行数据解析计算，得到相关环境参数，然后由 WIFI 模块通过 TCP 协议将数据上传到运算处理终端。运算处理终端部署在树莓派上，通过搭建本地服务器，进行数据接收、换气率计算以及界面显示。用户可通过网络访问树莓派服务器，获得检测数据。系统总体架构如图 3-1 所示。

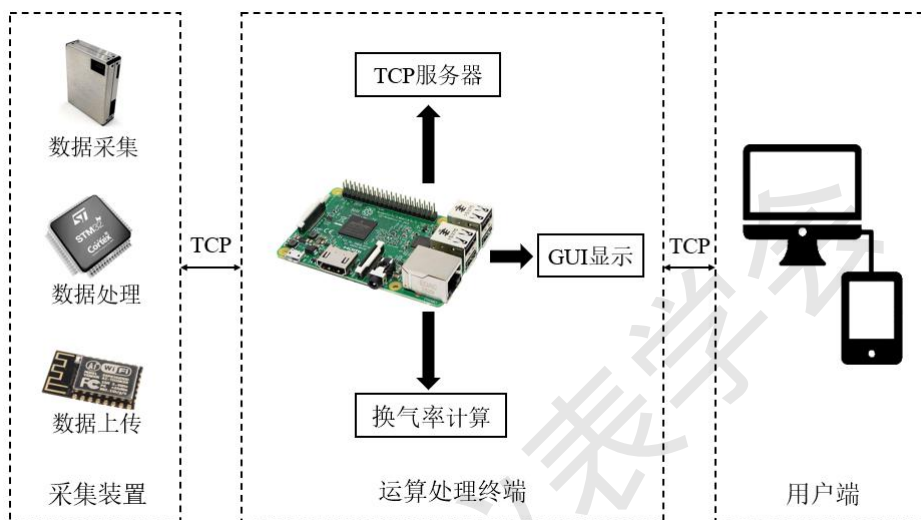


图 3-1 系统总体架构设计图

3.2 数据采集端设计

3.2.1 数据采集端传感设备选型

本作品选用 SI7021 型温湿度传感器模块，它支持 0~100%RH 的湿度量程和 -40℃~+125℃ 的温度量程，适用于测量湿度、露点和温度。Si7021 采用 I2C 接口，最高支持 400KHz 的通信速率，单片机可以访问其寄存器以获得当前环境的温度和湿度数据，传感器实物如图 3-2 所示。



图 3-2 SI7021 温湿度传感器实物

对于颗粒物的探测，本作品选用了基于激光散射原理的 PMS7003 颗粒物传感器。PMS7003 是一款数字型粒子浓度传感器，可连续采集和计算单位体积空气中尘粒的浓度。该传感器相关参数如表 3-1 所示。

表 3-1 PMS7003 传感器规格

检测原理	激光散射原理
检测范围	0-1200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
检测精度	$\pm (10\mu\text{g}/\text{m}^3+10\%\text{读数})$
通讯接口	UART_TTL(3.3V)
刷新频率	200~800ms

该传感器采用串口 UART 输出采集的数据，单片机接收后在内部解析协议并计算出 $\text{PM}_{2.5}$ 的含量。传感器实物如图 3-3 所示。



图 3-3 PMS7003 传感器实物

本作品选用安信可公司的 ESP-12F 型号 WIFI 模块组网，完成数据的无线传输。该模块的核心处理器 ESP8266 性能优越，主频支持 80 或 160 MHz 两种模式。同时，该模块内部具有 TCP/IP 协议栈，并支持标准 IEEE802-11 b/g/n 协议，可通过串口与 MCU 通信。



图 3-4 WIFI 模块实物图

在本项目中，SI7021 需要 I2C 通信接口传输数据， $\text{PM}_{2.5}$ 和 WIFI 模块均需要 USART 接口。为满足设计功能，采集装置的主控核心选用 STM32F103CBT6，该芯片基于 ARM 32 位 Cortex-M3 内核架构，主频高达 72MHz，内置 128 kB 的 FLASH、20 kB 的 RAM，同时具备 USART、I2C 等丰富外设，满足本设计需求。芯片引脚资源分配如表 3-2 所示：

表 3-2 主控芯片引脚资源分配

应用对象	IO 口	复用功能	本项目资源配置
ESP8266	PB10	USART3_TX	串口 2 发送端

	PB11	USART3_RX	串口 2 接收端
PMS7003	PA2	USART2_TX	串口 3 发送端
	PA3	USART2_RX	串口 3 接收端
SHT30	PB8	I2C_SCL	软件模拟 I2C 时钟信号线
	PB9	I2C_SDA	软件模拟 I2C 数据信号线
LED	PD2		程序运行指示灯

3.2.2 数据采集端硬件设计

数据采集端的硬件电路设计包括 STM32 单片机最小系统电路、电源电路和外围传感器电路设计。电源电路保证系统稳定供电。外围拓展为 2 个传感器接口和 1 个无线通信模块的设计电路。

最小系统是微处理器能够满足正常运行的基本电路，是整个系统硬件系统的基础。对于 STM32 控制器，最小系统电路设计包括芯片引脚相关电路、时钟晶振电路、复位电路、程序下载调试电路。

(1) 芯片引脚电路

芯片引脚电路主要为功能引脚的复用，如串口、I2C 等，同时芯片的电源引脚部分应用退耦电容确保芯片的稳定运行。引脚 BOOT0 和 BOOT1 串联 10K 的电阻接地，将片内 FLASH 作为芯片上电的启动区域，如图 3-5 所示。

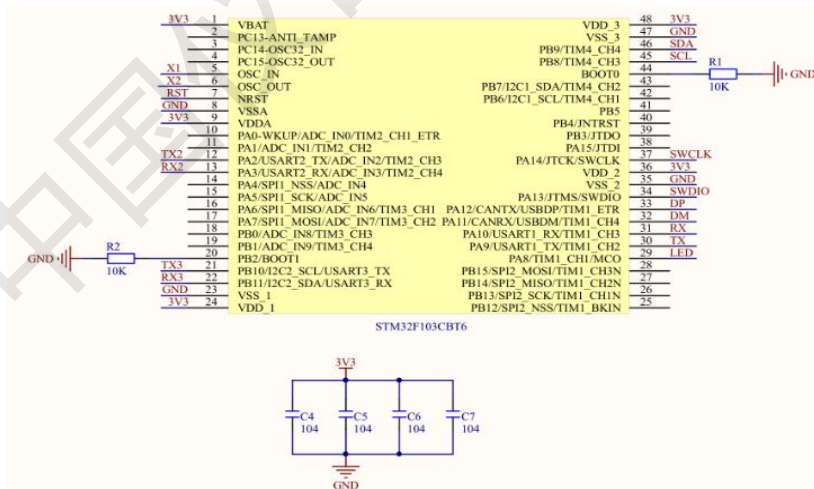


图 3-5 芯片引脚电路原理图

(2) 时钟晶振电路

芯片的片上外设均由时钟系统驱动，STM32 有外部和内部两种时钟源。本设计中不需要外部 RTC 功能，因此只需要外接片外高速时钟晶振，本文选用 8M 无源晶振。STM32 的时钟

晶振电路如图 3-6 所示。

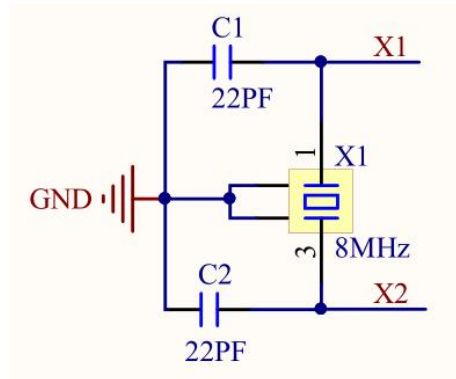


图 3-6 时钟电路原理图

(3) 复位电路

STM32 芯片的复位引脚 NRST 在低电平时发生系统复位。本文采用 CAT809ZTBI 芯片作电源监控，当系统电源电压低于芯片设定的阈值电平 2.32V 时，RESET 引脚产生低电平给 STM32 的复位引脚，使系统复位，设计电路如图 3-7 所示。

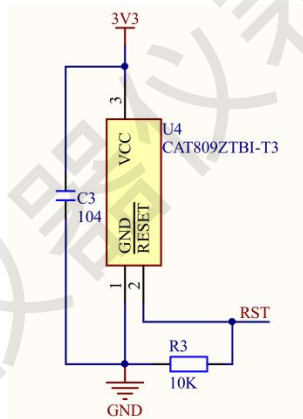


图 3-7 复位电路原理图

(4) 程序下载调试电路

STM32 的代码下载调试模式有 JTAG 与 SWD 模式两种，JTAG 模式下所需占用 CPU 引脚资源多，而 SWD 调试协议仅需要两根数据线，因此采用 SWD 调试模式。此外还引出串口 1 接口用于调试，如图 3-8 所示。

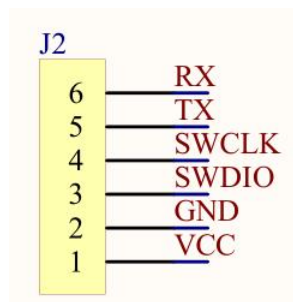


图 3-8 程序下载调试接口

由于采集装置需要两个不同的直流电压源：5V DC 及 3.3V DC，考虑到装置的便携性与实用性，采用 USB 有线供电与锂电池独立供电两种方式，USB 供电的同时给锂电池充电。5V 电源由 USB 或锂电池经 ME2188 芯片升压得到，为 PM_{2.5} 传感器供电。3.3V 电源经过 RT9193 芯片稳压后得到，为芯片及其他外设提供工作电源。整个供电系统结构如图 3-9 所示。

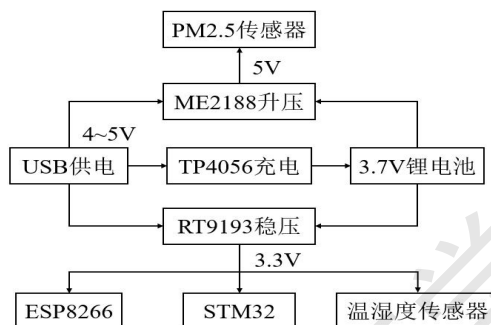


图 3-9 供电系统架构

(1) USB 供电

USB 选用目前使用广泛的 Type-C 接口，方便用户使用。USB 的 D+ 接 1.5K 电阻上拉，可拓展虚拟串口功能，如图 3-10 所示。

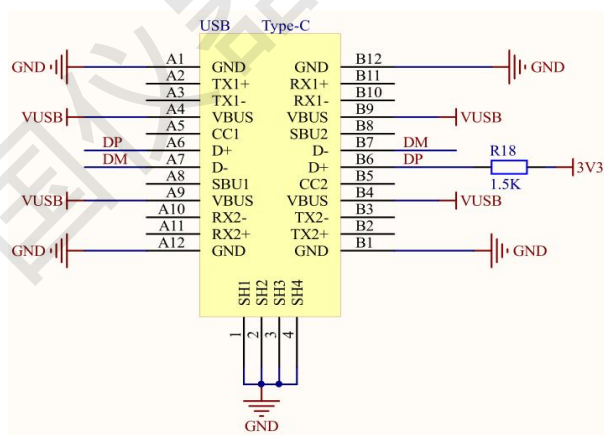


图 3-10 Type-C 接口电路

(2) 锂电池充电

锂电池的充电过程为涓流充电(低压预充)、恒流充电、恒压充电以及充电终止四个阶段，需由特定的 IC 芯片控制。本作品选用 TP4056 芯片方案，这是一款采用恒定电流/电压的线性锂电池充电器，适用于 USB 电源和适配器电源下工作，是便携式应用的理想选择。根据 TP4056 芯片手册设计充电电路，原理图如图所示。在电源输入端接入 0.3 欧姆的限流电阻 R6

以及两个退耦电容 C12、C13。PROG 引脚接 1.2K 的电阻下拉接地，将充电电流设置为 1A。CHRG 以 STDBY 引脚分别串接两个 LED 用于指示充电状态。由于充电功耗较低，无需监测电池温度，所以将 TEMP 引脚直接接地。BAT 引脚加两个退耦电容接到电池的接口。设计电路如图 3-11 所示。

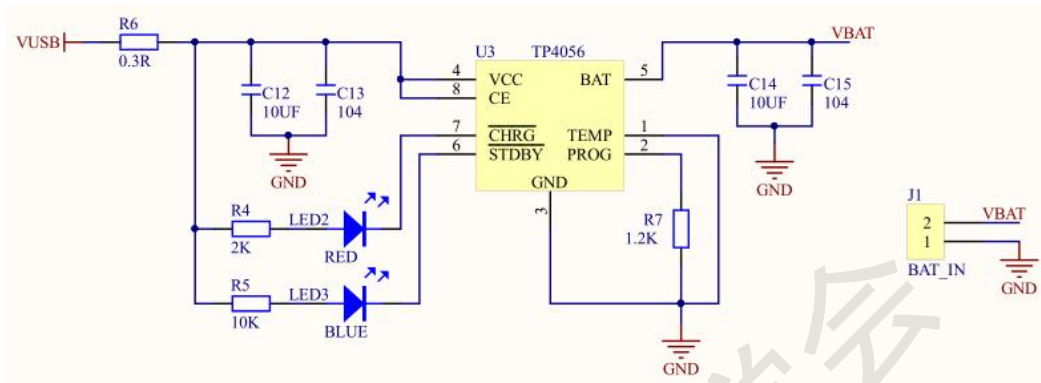


图 3-11 锂电池充电电路

(3) 供电模式自动切换

考虑到锂电池充电的同时再进行放电会缩短电池的寿命，因此供电方式需要能自动切换。本作品采用 P-MOSFET 管 IRLML6401 作切换器件，电池正极 VBAT 连接 IRLML6401 的 D 极，USB 正极 VUSB 分别串接二极管 D1 和电阻 R8 接在 S 极与 G 极。当只用 USB 供电时，直接经 D1 给系统供电；当只有电池供电时，IRLML6401 导通，电池为系统供电；当 USB 与电池同时接入时，电池满电电压为 4.2V，而一般 USB 电压为 4.5~5V，那么此时 IRLML6401 截止，系统只有 USB 供电，如图 3-12 所示。

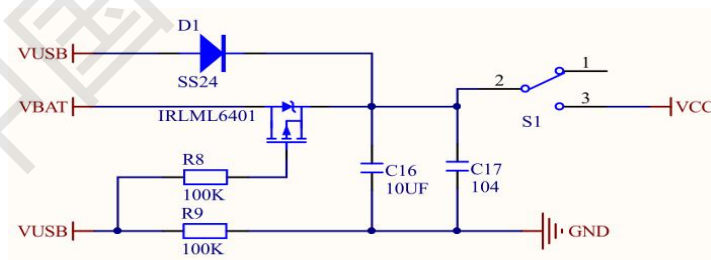


图 3-12 供电模式自动切换电路

(4) 升压电路

采集装置中有部分器件，如 PM_{2.5} 传感器，需要 5V 供电，而锂电池供电最高 4.2V，因此采用 DC-DC 芯片 ME2188C50M5G 进行升压。该芯片外围简单，功耗低，转换效率高，原理图如图所示。根据芯片手册，使能引脚 CE 决定其输出电压，当其接 VCC 时，稳定输出 5.16V 左右。具体设计电路如图 3-13 所示。

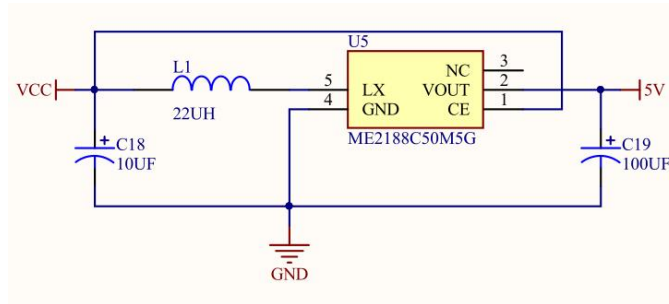


图 3-13 5V 升压电路原理图

(5) 3.3V 稳压电路

STM32 等芯片所需的 3.3V 电源，由供电电源经 LDO 芯片 RT9193 稳压获得。RT9193 支持超低压差，输出精度高，功耗低，适用于各便携式应用，其原理图如图 3-14 所示。

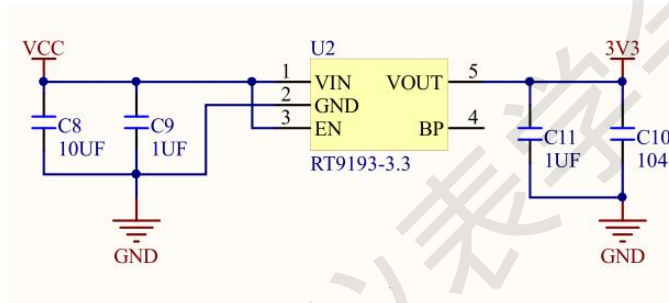


图 3-14 3.3V 稳压电路

采集装置所用的温湿度传感器与单片机通过 I2C 通信接口连接，PM_{2.5}传感器与单片机通过 USART2 通信接口连接，ESP8266 模块与单片机通过 USART3 通信接口连接。整体结构如图 3-15 所示。

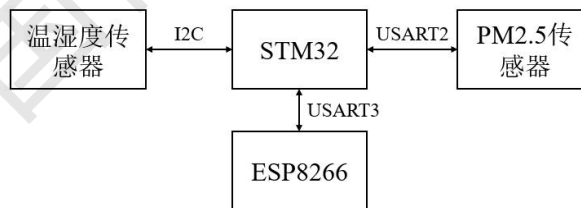


图 3-15 外设模块连接示意图

(1) WIFI 模块接口电路

ESP8266 模块的接口电路如图 3-16 所示，其通信引脚、模式设置引脚和复位引脚单独用排针引出，便于对模块进行设置以及更新固件等操作。通信引脚分别加入两个肖特基二极管 MBR0520 对信号整流，降低噪声影响。

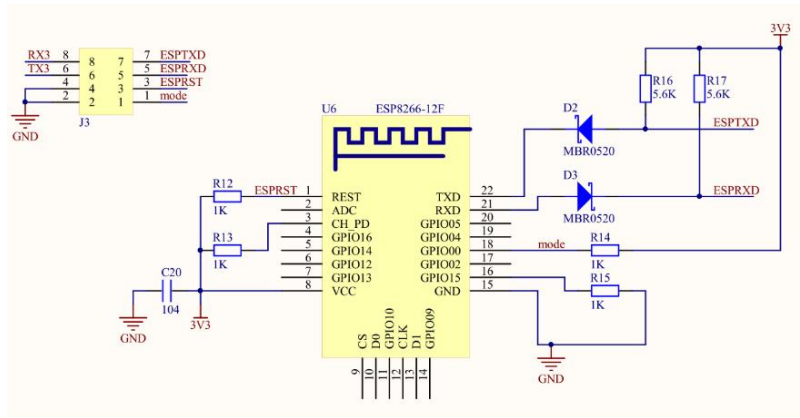


图 3-16 ESP8266 模块接口电路

(2) 传感器接口

温湿度传感器引脚中的第一和第四引脚是电源接口，第三和第四引脚连接到单片机的 I2C 接口。PM_{2.5} 传感器共有 8 个引脚，第四和第五引脚连接到单片机的串口 2，第七和第八引脚是电源接口，其它悬空。传感器的接口原理图如图 3-17 所示。



温度传感器接口 颗粒物传感器接口

图 3-17 传感器接口电路

完成相关硬件设计后，制作出 PCB 电路板，焊接完成后的实物如图 3-18 所示。

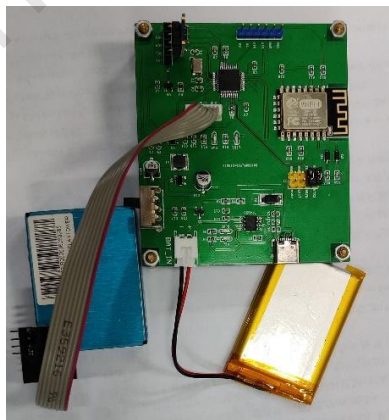


图 3-18 数据采集装置硬件实物图

3.2.3 数据采集端软件设计

数据采集端所需要设计的程序软件为传感器读写、通信模块驱动和数据无线上传程序，实现数据的采集、内部传输及上传。为保证采集数据的实时性，采用国产嵌入式操作系统

RT-Thread 进行各子任务的调度，系统版本为 RT-Thread Nano V3.1.3。图 3-19 为数据采集装置的软件功能架构，可以看到它由多个模块化子程序组成。

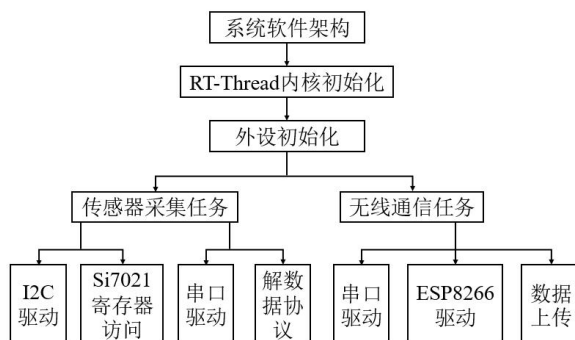


图 3-19 采集装置软件架构框图

系统上电后，先初始化 RT-Thread 内核以及各功能外设。随后 STM32 通过通信总线获取传感器的数据。得到数据后，进行滑动平均滤波处理，降低测量噪声。完成处理工作后，将数据按照制定的协议打包，待接收到运算处理终端的查询命令，通过 TCP 上传到服务器。软件运行流程如图 3-20 所示。

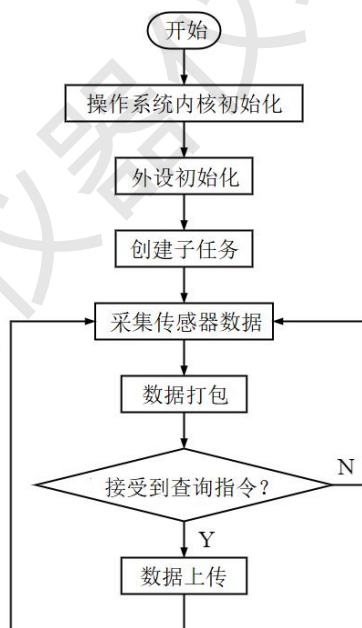


图 3-20 数据采集端软件流程图

STM32 通过 I2C 总线与 Si7021 温湿度传感器进行数据交互，因此程序由 I2C 总线驱动和 Si7021 读写两个部分组成。I2C 驱动程序代码包括 I2C 初始化，启动，结束，ACK 和读写功能等。在 I2C 总线配置完成后，访问 Si7021 的内部寄存器，获取原始数据并根据换算公式进行相应转换。得到数据后，应用滑动平均滤波算法处理噪声。

PM_{2.5}传感器通过串口与 MCU 通信，通信协议是一组十六进制数据帧。当串口接受到数据发生中断后，判断数据是否为数据帧头。若是，则将后续的数据存放到接收缓冲区内直至帧尾，待后续处理；若否，则丢弃该数据。当后台数据接收完毕后，释放一个信号量，前端检测处理任务获取到信号量后，从数据缓存区读取检测数据。一次 PM_{2.5}传感器数据处理的流程如图 3-21 所示。

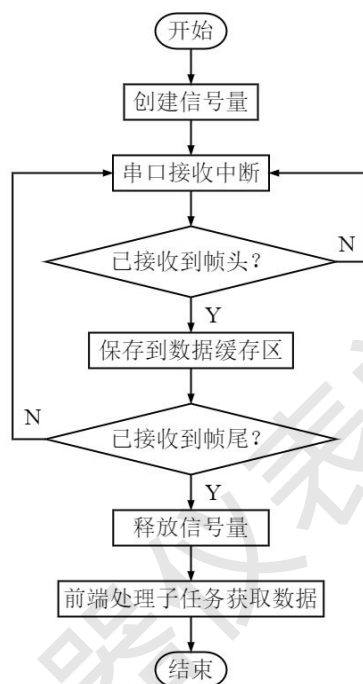


图 3-21 PM_{2.5}传感器数据处理流程图

ESP8266 模块支持三种网络模式(STA、AP、STA + AP)以及三种工作模式(TCP 服务器、TCP 客户端和 UDP)。根据本文设计的功能要求，STM32 通过片上 USART3 给 ESP8266 发送 AT 指令，配置模块为串口转无线 STA 的 TCP 客户端模式。该模式下，模块接入到无线网络，然后连接树莓派服务器的 IP 地址、端口，进入无线透传模式将串口端的数据发送到网络服务器上。

ESP8266 模块的驱动程序设计为底层接口函数和输入输出相关函数，包括 AT 指令的发送与接收、模块状态检测、网络连接等。同时为了便于调试，在 RT-Thread 命令行组件 FinSH 中添加了自定义的 ESP8266 测试 shell 指令，用户可在控制终端输入相应命令，对 ESP8266 进行配置。

3.3 运算处理端设计

运算处理终端主要负责汇总采集装置的测量数据并进行显示，然后保存到本地文件，同时完成换气率的计算，最后更新到用户端 APP。根据性能需求，运算处理终端选用树莓派

4B 来进行开发。树莓派是“Raspberry Pi 基金会”开发的基于 Linux 系统的微型电脑，4B 型号采用了 1.5GHz 四核 64 位 ARM Cortex-A72 CPU 博通 BCM2711 以及 4GB 的 LPDDR4 SDRAM，同时支持千兆以太网以及双频无线网络，性能强劲。本系统中树莓派运算处理终端软件基于 Python 语言开发，有前端 GUI 界面、后台 TCP 服务器以及换气率计算三个主要功能，如图 3-22 所示。

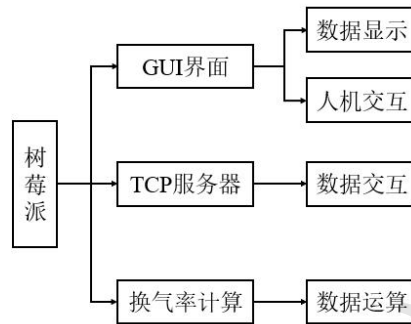


图 3-22 树莓派的功能架构

3.3.1 GUI 界面设计

运算终端部署在树莓派上，使用的是带界面的 Raspbian OS，为了便于用户操作，直观显示测量情况，基于 PyQt5 开发了检测系统操作界面软件。PyQt5 是一套 Python 绑定 Digia 的 QT5 应用框架，以 Python 模块的形式来实现功能，可以运行在所有的主流操作系统中。操作软件共有主界面与两个子界面组成，主界面用于显示测量数据和其他信息，子界面用于设置工作参数以及计算结果。

(1) 主界面

如图 3-23 所示，检测系统主界面主要分为四个部分：第一部分显示连接到树莓派服务器的客户端设备数量，用于判断客户端是否上线、掉线。第二部分为功能按钮区，点击检测按钮即向检测设备请求检测数据，频率 1 次/秒；点击计算按钮，可调出计算功能子界面；点击设置按钮点出设置界面。第三部分为数据显示区，分为室内、室外两个部分，显示检测到的室内外的温度、湿度和 PM_{2.5} 含量，显示过程中，固定时间后保存一次数据到 excel 文件中，用于后续计算。第四部分为本机信息，显示当前时间，以及本地服务器的 IP 地址。



图 3-23 检测系统主界面

(2) 计算功能子界面

计算界面用于检测完成后计算室内换气率，其界面如图所示。操作时，用户点击 Browser 按钮浏览文件系统，选取保存数据的文件。然后在左下方根据当前检测环境设置相关计算参数。最后点击计算按钮，后台将数据以及参数带入算法中计算出结果，显示在右下方的结果显示区，布局如图 3-24 所示。



图 3-24 计算功能子界面

(3) 设置功能子界面

如图 3-25 所示，设置界面主要用于设置树莓派的工作模式，支持服务器 Server 和客户端 Client 两种模式，如图所示。在下拉列表中选择模式，然后设置本机的 IP，点击开启服务即可开启该模式的工作线程，本系统默认开启服务器模式。



图 3-25 设置功能子界面

在 PyQt5 中所有窗口都在 UI 主线程中调用，若执行比较耗时的操作，如网络请求数据时会阻塞 UI 线程响应，导致窗口卡死。因此采用 PyQt 的 Qthread 类来创建多线程将前端界面的数据显示与后台数据获取的逻辑线程分离。

上述设置子界面的初始化中会先创建一个子线程的实例。开启对应的服务后，调用 start() 函数启动线程，然后执行 run() 函数处理业务。子线程的 run() 函数中负责开启服务器服务，获取数据，存放于公共数据缓存区，待前端界面程序调用。显示界面中，调用了计时器模块 QTimer，创建一个时间间隔为 1 秒的定时器更新数据，然后每 30 秒保存一次数据到文件中。

3.3.2 TCP 服务器设计

TCP(Transmission Control Protocol, 传输控制协议)是一种面向连接、可靠的、基于字节的传输层通信协议。使用 TCP/IP 协议的应用程序通常采用 socket 应用编程接口。Python 提供了一套 socket API 实现网络编程，一个是 socket，提供标准的 BSD Socket API；另一个是 socketserver，它提供了服务器中心类，可以简化网络服务器的开发。由于 socket 不支持多并发，因此使用 socketserver 进行开发。

socketserver 中包含了两种类，一种为服务类(server class)，一种为请求处理类(request handle class)。前者处理通信问题，如监听一个套接字并接收连接等；后者则专注于如何处理用户所发送的数据，处理“协议”问题。socketserver 开启服务后等待客户端的请求，一旦获得一个连接请求，就创建一个 socket 实例来与客户端进行通信。

在上述设置界面开启服务器服务后，后台打开服务器子线程。线程中通过 ThreadingTCPServer 方法先创建一个多线程、多并发的 TCPServer，绑定 IP 地址与端口，通过 serve_forever() 处理客户端的连接请求，并永远执行。如果接收到请求信息，实例化服务器对象，然后传入的处理类 MyRequestHandler，并在 handle 方法中处理客户端消息的业务逻辑。

由于本作品的数据采集端是基于 C 语言开发的，运算终端则是基于 Python 开发，APP 是基于 Java(Android)开发的，因此之间的数据交互需考虑到 3 个编程语言的兼容性。经过讨论和研究，选择以 JSON 格式的数据进行交互。JSON(JavaScript Object Notation)是一种轻量级的数据交换格式，采用完全独立于编程语言的文本格式来存储和表示数据，语法简洁、层次结构清晰，易于阅读和编写，同时也易于机器解析和生成，有效地提升了网络传输效率。

考虑到数据采集端是嵌入式 C 平台，因此选择轻量级别的 cJSON 协议。cJSON 是一个使用 C 语言编写的 JSON 数据解析器，具有超轻便，可移植，单文件的特点。检测装置完成数据采集后，利用 cJSON 提供的 API 创建一个数据链表，然后将检测数据添加到链表中的节点，最后通过 cJSON_Print()函数将整条链表中存放的 JSON 信息输出到一个字符串中，送入网络进行传输。由于使用 cJSON 时需要不断申请内存空间，数据传输结束后，需释放已申请的内存。采集装置内置 RT-Thread 操作系统，因此将 cJSON 源码中内存处理的函数替换成 RT-Thread 的内存管理函数。数据打包过程如图 3-26 所示。

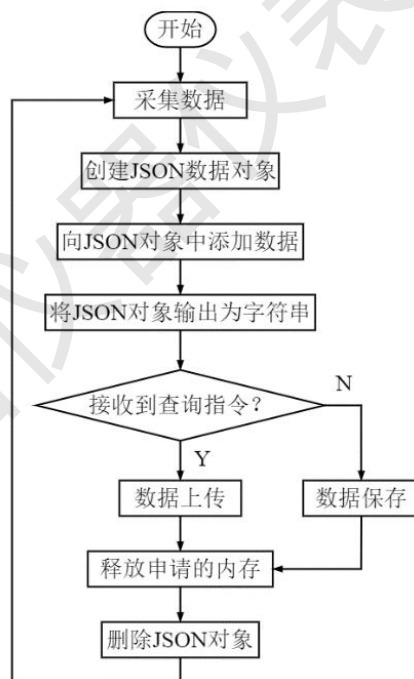


图 3-26 嵌入式端 JSON 数据打包流程

Python 端可以使用 json 模块来对 JSON 数据进行编解码，它包含了两个函数：json.dumps()，对数据进行编码；json.loads():对数据进行解码。服务器线程接受到数据后，通过解码函数将 JSON 数据解析成 Python 的字典对象，然后访问特定的键，获取对应值，解析协议。

3.4 用户端软件设计

为便于用户操作，丰富项目的可拓展性，面向用户开发了 Android 端的手机应用，其应用界面如图 3-27 所示。左图为 APP 的主界面，分为两个部分。上方为显示区域，用于显示采集的测量数据以及计算结果。下方为操作设置，用户可输入指定的服务器 IP 并连接，点击请求数据按键后，向服务器询问数据，并同步显示到上方的数据显示区。点击计算按钮可调出有图的计算参数设置界面，在此界面设置当前测量环境下的计算参数，点击确定按钮将参数上传到服务器中，服务器接受到参数后带入计算，并将结果返回给 APP，显示在主界面中的结果显示区。



图 3-27 APP 操作界面

4 系统实验验证

4.1 实验设计与流程

室内颗粒物衰减实验需要在封闭的、自然通风的卧室里进行的，本文选取了两个带有侧窗和实木门的卧室，如图 4-1 所示，测试房间 1 的空气体积约为 22.5 立方米，房间 2 的空气体积约为 18.8 立方米。



测试房间 1



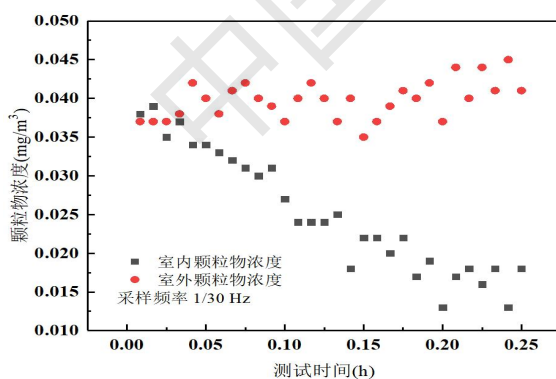
测试房间 2

图 4-1 测试房间整体布局

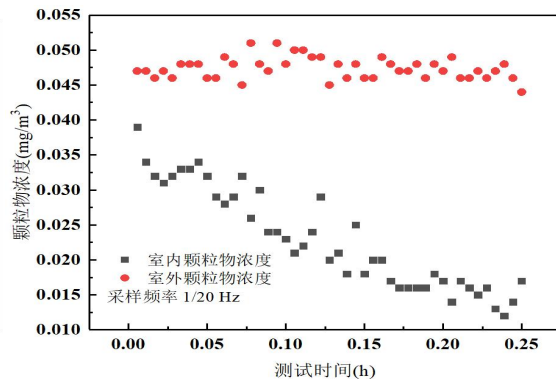
实验前应将门窗打开 0.5h 以上，以保证室内外颗粒物浓度平衡。然后使用 $PM_{2.5}$ 传感器分别测量室内和室外 $PM_{2.5}$ 的自然初始浓度。为避免空气净化器流场的影响，测量点设置在房间角落，距地面 0.8~1.5m，仪器高度放置在室外位置应与室内一致。开启空气净化器后，测量室内外 $PM_{2.5}$ 浓度随时间的变化。测量员应在离开房间前立即关闭门窗，直到室内 $PM_{2.5}$ 浓度基本稳定后结束测量。

4.2 换气率测试结果验证

实验中，选取空气净化器的风量为 $106m^3/h$ 的低工况模式，实验测试时间持续为 0.25h，在房间 1 的采样频率为 1/30Hz，房间 2 的采样频率为 1/20Hz，其余参数设置保持不变。从图 4-2 可以看到，房间 1 的室外颗粒物浓度在 $0.42mg/m^3$ ，室内在使用空气净化器之后，室内浓度急剧降低，0.25h 内室内颗粒物浓度降至 $0.012 mg/m^3$ 左右。类似的，房间 2 的测试结果呈现出相似的衰减规律，再使用空气净化器后，室内的颗粒物浓度在 0.25h 内同样降至 $0.012 mg/m^3$ 左右。实验结果表明这两次实验总体上是稳定的。



测试房间 1 的测试结果



测试房间 2 的测试结果

图 4-2 测试房间的颗粒物测试结果

按照 2.2 节设计的换气率求解算法进行求解，解得结果如 4-3 所示。对于房间 1，当房间的换气率为 $0.34h^{-1}$ 时，R-Square 拟合系数达到 0.8221；对于房间 2，当房间的换气率为

0.16h⁻¹时，R-Square 拟合系数达到 0.8227。

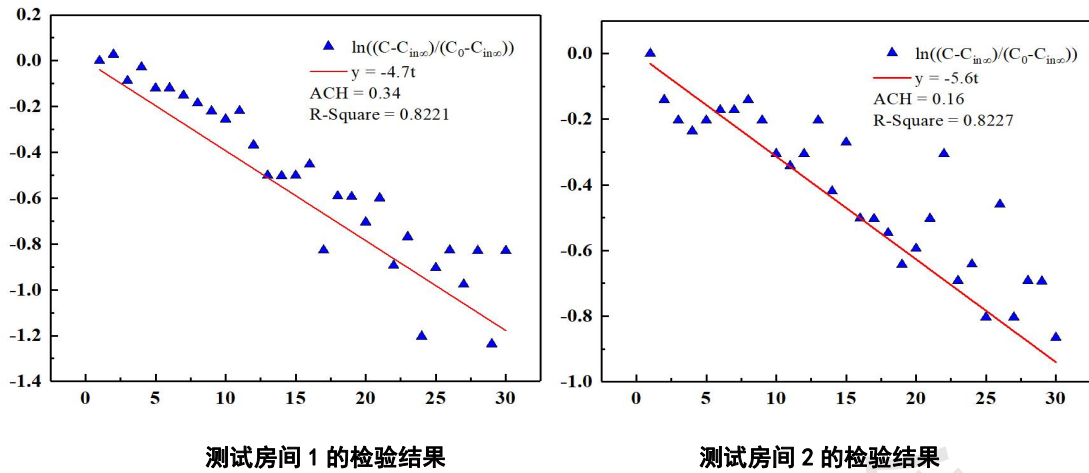


图 4-3 测试房间的换气率检测结果

为验证基于室内颗粒物衰减法算换气率模型的准确性，本文按照国标中推荐的 CO₂ 衰减法对上述两个房间的换气率进行测量，以对原计算结果进行验证，实验中大气 CO₂ 本底浓度均为 600ppm，基于 CO₂ 衰减法计算换气率可按下式求解：

$$ACH = \left(\ln \left(\frac{C_{CO_2,0} - C_{CO_2,m}}{C_{CO_2,t} - C_{CO_2,m}} \right) / t \right) \quad (4-1)$$

式中， $C_{CO_2,0}$ 为室内测试时 CO₂ 的初始浓度， $C_{CO_2,t}$ 为室内测试结束时 CO₂ 的浓度， $C_{CO_2,m}$ 为大气中 CO₂ 的本底浓度。CO₂ 的衰减实验持续三十分钟，采用北京聚创公司生产的 JC-BD 型 CO₂ 检测设备用于实验测试，两个房间的 CO₂ 的衰减实验数据如表 4-1 和表 4-2 所示。

表 4-1 房间 1 的 CO₂ 的衰减实验结果

测试时间 (min)	0	5	10	15	20	25	30
浓度(ppm)	1290	1265	1251	1229	1212	1187	1170

表 4-2 房间 2 的 CO₂ 的衰减实验结果

测试时间 (min)	0	5	10	15	20	25	30
浓度(ppm)	1230	1220	1211	1202	1193	1186	1179

根据式(4-1)，不难算得房间 1 的换气率为 0.38h⁻¹，房间 2 的换气率为 0.17h⁻¹，误差分析结果如表 4-3 所示。

表 4-3 房间 1 和 2 两种方法的换气率计算结果对比

房间	1		2	
测试方法	颗粒物衰减法	CO ₂ 衰减法	颗粒物衰减法	CO ₂ 衰减法
ACH(h ⁻¹)	0.36	0.38	0.16	0.17
测试时间(h)	0.25	0.5	0.25	0.5
相对误差(%)	10.5		5.9	

从上表可以看出，基于室内颗粒物衰减法和计算结果和基于 CO₂ 衰减法的计算结果非常靠近，最大误差仅有 10.5%，这表明在误差允许的范围内，这两种方法对于换气率的计算结果具有一致性。但是，需要注意的是，基于室内颗粒物衰减法的测试时长仅有 0.25h，而基于 CO₂ 衰减法的测试时长却要 0.5h，这意味着本文建立的计算模型可以实现室内换气率的快速测量，因而具有极大的时间成本优势。

5 总结

本文基于室内颗粒物去除法，建立起了评估房间换气率的实验模型和数学模型，并开发了相应的测量系统。在室内应用空气净化器的情况下，测量了室内外颗粒物浓度的变化，并计算了两个房间的换气率。基于以上研究，可以得出以下几点结论：

①由于 PM_{2.5} 具有流动、扩散、渗透等特性，因此它是一种很好的可以用来替换 CO₂ 的“气体”示踪剂来进行房间换气率测量。

②相比于国标中推荐的 CO₂ 衰减法测量房间的换气率，基于室内颗粒物衰减法测量房间换气率时，不仅具有较高测量精度，还具有非常明显的时间优势。

③结合误差分析的方法，可以有效减少本文设计的基于室内颗粒物衰减法求解房间换气率的算法可以减少计算冗余度，大大提升程序的计算速度。

④基于 STM32 嵌入式系统设计了数据采集装置。在硬件上，基于便携式应用标准设计，支持锂电池独立供电与 USB 供电，供电方式自动切换。在软件上，采用 RT-Thread 操作系统进行任务调度，实时性高。

⑤基于树莓派搭建了运算处理终端，具备前端界面显示、后台 TCP 服务器以及换气率计算功能。采用多线程技术，将前后台数据显示、处理业务逻辑分离，提升软件的运行效率。

⑥系统软件功能丰富且完善，用户可通过多种方式查看测量结果。通过物联网方式，实现数据采集装置、运算处理终端和用户端之间的数据交互。在局域网络内，数据采集装置通

过 ESP8266 连接网络，通过 TCP 将检测数据上传到树莓派服务器，用户端 APP 也可从服务器获取数据。

⑦后期运算处理终端可迁移至云端服务器，实现公网下远程测量及数据传输，具有一定的商业潜力价值。

参考文献:

- [1] Lei, L.; Chen, W., Xue, Y., Liu, W. A comprehensive evaluation method for indoor air quality of buildings based on rough sets and a wavelet neural network. *Building and Environment* **2019**. 162, 106296.
- [2] Yu, S., Ma, X. N., Yu, Z. T., Zhang, G. J., Feng, G. H. The determination method of fresh air volume in buildings for different density of the crowd. *Procedia Engineering* **2017**. 25, 2577-2584.
- [3] Nazaroff, W. W. Indoor Particle dynamics. *Indoor Air* **2004**. 14, 175-183.
- [4] Baek, S.O., Kim, Y.S., Perry, R. Indoor air quality in homes, offices and restaurants in Korean urban areas-indoor/outdoor relationships. *Atmospheric Environment* **1997**. 31, 529-544.
- [5] Yua, B. F., Hua, Z.B., Liua, M. Review of research on air-conditioning systems and indoor air quality control for human health. *International journal of refrigeration* **2009**. 32, 207-213.
- [6] Andrade, A., Dominski, F. H., Coimbra, D. R. Scientific production on indoor air quality of environments used for physical exercise and sports practice: biblio-metric analysis. *Journal of Environmental Management* **2017**. 196, 188-200.
- [7] Andrade, A., Steffens, R.D.A.K., Vilarino, G.T., Sieczkowska, S.M., Coimbra, D.R. Does volume of physical exercise have an effect on depression in patients with fi-bromyalgia? *Journal of Affective Disorders* **2017**. 208, 214-217.
- [8] Castro, A., Calvo, A.I., Alves, C., Blanco, E.A., Coz, E., Marques, L., Fraile. R. Indoor aerosol size distributions in a gymnasium. *Science of the Total Environment* **2015**. 524, 178-186.
- [9] Persily, A. K. Field measurement of ventilation rates. *Indoor Air* **2016**. 26, 97-111.
- [10] Liu, C., Yang, J. Y., Ji, S. Y., Lu, Y. X., Wu, P. C., Chen C. Influence of natural ventilation rate on indoor PM_{2.5} deposition. *Building and Environment* **2018**. 144, 357-364.
- [11] Nuria, G., Montse, V., Juan, G.M., Eduardo, Y., Jose, N. The Influence of Meteorology on Particulate Matter Concentrations at an Urban Mediterranean Location. *Water, Air, and Soil Pollution* **2011**. 215, 365–372.
- [12] Gertler, A.W., Gillies, J.A., Pierson, W.R. An assessment of the mobile source contribution to pm₁₀ and PM_{2.5} in the united states. *Water, Air, and Soil Pollution* **2000**. 123,203–214.
- [13] Federico, C., Gianluigi, N., Elisa, B., Davide, A. L., Carlo, F., Giancarlo, U. Monitoring of Submicron Particulate Matter Concentrations in the Air of Turin City, Italy. Influence of Traffic-limitations. *Water, Air, and Soil Pollution* **2009**. 196,141–149.

- [14] Wilson, W. E., Chow, J. C., Claiborn, C., Fusheng, W., Engelbrecht, J. et al. Monitoring of particulate matter outdoors. *Chemosphere* **2002**, 49, 1009–1043.
- [15] Ni, P. Y., Jin, H. C., Wang, X. L., Guan, N. X. A new method for measurement of air change rate based on indoor PM_{2.5} removal. *International Journal of Environmental Science and Technology* **2017**. 15, 2561.
- [16] Ni, P. Y., Bai, L., Wang, X. L., Jin, H. C., Xi, G. N. Effect of window ventilation and air cleaner purification on indoor PM_{2.5} emission and air change rate under haze weather, *Fresenius Environmental Bulletin* **2018**. 27, 210-214.
- [17] Peng, C. H., Ni, P. Y., Xi, G. N., Tian, W. G., Fan, L. J., Zhou, D. C., Zhang, Q., Tang, Y. Evaluation of particle penetration factors based on indoor PM_{2.5} removal by an air cleaner, *Environmental Science and Pollution Research* **2020**. 27, 8395–8405.
- [18] 王亚峰, 陈超, 陈紫光, 万亚丽, 赵力. 基于建筑外窗缝隙通风的室外 PM_{2.5} 渗透与沉降特性评价模型[J]. *中国环境科学* 2016, 36 (07) :1960–1966.
- [19] Bennett, D. H., Koutrakis, P. Determining the infiltration of outdoor particles in the indoor environment using a dynamic model. *Journal of Aerosol Science* 2018. 37, 766-785.

附录

本项目在研期间发表的论文如下：

- ①Evaluation of particle penetration factors based on indoor PM_{2.5} removal by an air cleaner, *Environmental Science and Pollution Research* 2020. 27, 8395-8405. (JCR Q2, SCI)
- ②Construction, Application and Verification of a Novel Formaldehyde Gas Sensor System Based on Ni-Doped SnO₂ Nanoparticles. *IEEE Sensors Journal* 2021. 21(9), 11023-11030. (JCR Q1, SCI)
- ③Effect of window ventilation and air cleaner purification on indoor PM_{2.5} emission and air exchange rate under haze weather. *Fresenius environmental bulletin* 2018. 27(1), 210-214(JCR Q4, SCI)
- ④A new method for measurement of air change rate based on indoor PM_{2.5} removal. *International journal of environmental science and technology* 2018. 15(12), 2561-2568. (JCR Q2, SCI)

本项目在研期间获得的专利如下：

- ①一种测量房间颗粒物渗透系数的系统, 201910271461.5 (发明, 实审中)
- ②一种测量房间颗粒物渗透系数的系统, 201920452987.9 (实用新型, 授权)
- ③一种测量房间颗粒物渗透系数的方法及系统, 201910270971.0 (发明, 实审中)

④基于 CO₂ 浓度控制的正压风机通风装置及其使用方法，202010231093.4 (发明，实审中)

⑤一种测量待检测空间内新风量的方法及系统，201610174114.7 (发明，授权)

中国仪器仪表学会