
室内空气质量监测：概念和实现

简介

作者：Ankit Phougat 和 Narrata Dalvi, Microchip Technology Inc.

空气污染是指各种悬浮于大气中的气体、液体和固体，它们会对人体健康造成有害影响。由于大多数人将大量时间花在室内，因此室内空气污染和环境对人类健康具有决定性的影响。室内空气污染是世界上最大的环境问题之一。根据[世界卫生组织](#)的数据，每年有 380 万人因家庭空气污染引起的疾病过早死亡。因此，在办公室和家中使用高质量的空气质量监测系统持续监测空气质量至关重要。

室内空气的主要空气传播污染物包括[总挥发有机物](#)（Total Volatile Organic Compound, TVOC）、二氧化碳（CO₂）和尘粒直径最大为 2.5 微米的[颗粒物](#)（PM_{2.5}）等。还有两个因素会影响室内空气的质量：室内环境的湿度和温度水平。室内空气质量监测器（Air Quality Monitor, AQM）是一种实时监测系统，可测量上述污染物和因素的值。智能安全的 AQM 能够通过无线通信介质将监测到的空气质量参数传输到云服务器，以进行实时数据建模、实时污染数据映射、智能通知以及生成自动报告。

在本应用演示中，AQM 系统是使用 8 位 AVR® 处理器 ATmega4808 单片机（AVR MCU）中独立于内核的外设（Core Independent Peripheral, CIP）和智能模拟外设设计和实现的。Microchip 的 CryptoAuthentication™ 安全元件（ATECC608A）和完全认证的 Wi-Fi® 模块（ATWINC1510）用于将智能 AQM 安全连接到 Google Cloud™ IoT Core 平台。

本应用演示使用 Microchip 的 AVR-IoT WG 开发板以及 MikroElektronika 的传感器和多个 click 板实现。有关 AVR-IoT WG 开发板的详细信息，请参见[AVR-IoT WG 开发板产品页面](#)。

AQM 文档概述

以下文档涵盖了 AQM 文档：

1. 本应用笔记介绍了 AQM 系统的硬件和固件概述及其电源注意事项。
2. 补充固件创建指南 [“AN3417 - Indoor Air Quality Monitor: Firmware Creation Using Atmel START and MPLAB® Code Configurator \(MCC\)”](#) 涵盖 AQM 应用使用 AVR-IoT 协议栈的信息。此外，它还涵盖使用 Atmel START 和 MCC 配置单片机外设和 click 板的详细信息。
3. [“Indoor Air Quality Monitor: User Guide”](#) 涵盖硬件设置、硬件连接、操作步骤、LED 指示、AVR-IoT WG 板 Wi-Fi 模块配置以及 AQM 云数据可视化。

室外和室内空气质量概述

室外空气污染众所周知，主要由工业排放、汽车尾气、烟灰和其他因素引起。

室内空气质量是办公室和家中的主要问题，因为空气污染对室内人员的健康、舒适度、幸福感和生产力产生重大影响。科学研究表明，全世界每年都有很多因室内空气污染导致过早死亡的报告。世界卫生组织（World Health Organization, WHO）表示，这些死亡由肺炎、中风、缺血性心脏病、慢性阻塞性肺疾病（Chronic Obstructive Pulmonary Disease, COPD）和肺癌引起。

大多数室外空气质量监测系统或工作站是由国家和州政府机构建立的。这些室外空气质量传感器或监测器主要用于检测各种毒素，例如臭氧、车辆排放物、颗粒物污染、二氧化氮（NO₂）、二氧化硫（SO₂）和一氧化碳（CO）。

而室内空气质量监测器通常用于检测颗粒物污染（PM_{2.5} 和 PM₁₀）、挥发有机物（Volatile Organic Compound, VOC）和二氧化碳（CO₂）。

颗粒直径最大为 2.5 微米的 PM_{2.5} 颗粒物是最危险的空气污染物之一。由于尺寸小，PM_{2.5} 颗粒可以深入人体肺部并引起各种健康问题；例如，引发哮喘发作或导致心血管疾病。TVOC 被公认为室内卫生和室内空气质量的重要指标。TVOC 水平升高会引起头痛和刺激感。一些 TVOC 是致癌物（例如甲醛），还有一些在一般浓度下就有较强刺激性（例如甲苯）。因此，使用室内空气质量监测器时，测量 TVOC 水平十分重要。如果室内环境中的二氧化碳水平较高，可能导致室内人员昏昏欲睡、头痛或精神萎靡。室内 CO₂ 水平是室外空气流通相对于室内人员密度和代谢活动是否足够的指标。因此，CO₂ 水平由室内空气质量监测器测量。

空气质量取决于空气质量指数（Air Quality Index, AQI）值。国家机构拥有根据空气质量参数计算 AQI 的算法。通常，AQI 值越低，表示空气质量越好。AQI 值越高，空气污染水平越高，对健康的影响就越大。例如，AQI 值为 50 表示空气质量良好，几乎不会影响公众健康；而 AQI 值超过 300 表示空气质量十分糟糕。AQI 值 100 是判定空气中污染物超标的典型空气质量标准，这是环境保护署（Environmental Protection Agency, EPA）为保护公众健康而设定的空气质量水平。通常认为低于 100 的 AQI 值比较理想。AQI 值大于 100 时，空气质量对某些敏感人群的健康不利；而 AQI 大于 151 时，空气质量对所有人的健康均不利。有关更多详细信息，请参见 [9. 参考资料](#) 中由环境保护署发布的《Air Quality Index Guide》。

目录

简介.....	1
室外和室内空气质量概述.....	2
1. 室内空气质量监测器概述.....	5
2. 硬件概述.....	7
2.1. AVR-IoT WG 开发板.....	7
2.2. MikroElektronika 的 Click 板和传感器.....	8
2.3. 针对 5V 电源的 mikroBUS™ 插座修改.....	10
2.4. AQM 应用中使用的 ATmega4808 的特性.....	10
3. 固件概述.....	12
3.1. 固件组件.....	12
3.2. AQM 应用程序固件.....	14
4. 固件开发.....	18
4.1. 软件工具.....	18
4.2. 固件配置和生成.....	18
4.3. 单片机编程.....	18
5. 应用演示.....	19
6. 存储器要求.....	20
7. 电源注意事项.....	21
7.1. 低功耗注意事项.....	21
8. 结论.....	23
9. 参考资料.....	24
10. 附录.....	25
10.1. AQM 原理图.....	25
10.2. AQM 参数可视化.....	25
11. 版本历史.....	27
Microchip 网站.....	28
产品变更通知服务.....	28
客户支持.....	28
Microchip 器件代码保护功能.....	28
法律声明.....	28
商标.....	29
质量管理体系.....	29

全球销售及服务网点.....	30
----------------	----

1. 室内空气质量监测器概述

本应用笔记探讨了如何使用 AVR-IoT WG 开发板以及 MikroElektronika 的传感器和多个 click 板来实现 AQM。AVR-IoT 开发板配备了 Microchip 的 ATmega4808 单片机、CryptoAuthentication 安全元件 (ATEC608A) 和 Wi-Fi 模块 (ATWINC1510)。

本应用的范围仅限于使用提供的硬件模块和应用程序固件 (采用 AVR-IoT WG 开发板的固件 (AVR-IoT 协议栈)) 开发 AQM 系统。AQM 系统使用 Mikroelektronika 提供的 click 板 (装有传感器)、EEPROM 和 OLED 显示屏, 但不包括湿度和颗粒物 (Particulate Matter, PM) 传感器。PM 传感器和湿度传感器使用 PROTO click 进行连接。AQM 系统的硬件和固件详细信息将在本文档的对应部分中进行说明。

AQM 使用已在 Google Cloud IoT Core 平台上注册的 Microchip 沙盒帐户。AVR-IoT WG 开发板经过预先配置, 可与该帐户通信。专为 AVR-IoT WG 开发板设计的 Web 应用程序 (即网页) 可将数据可视化图形。

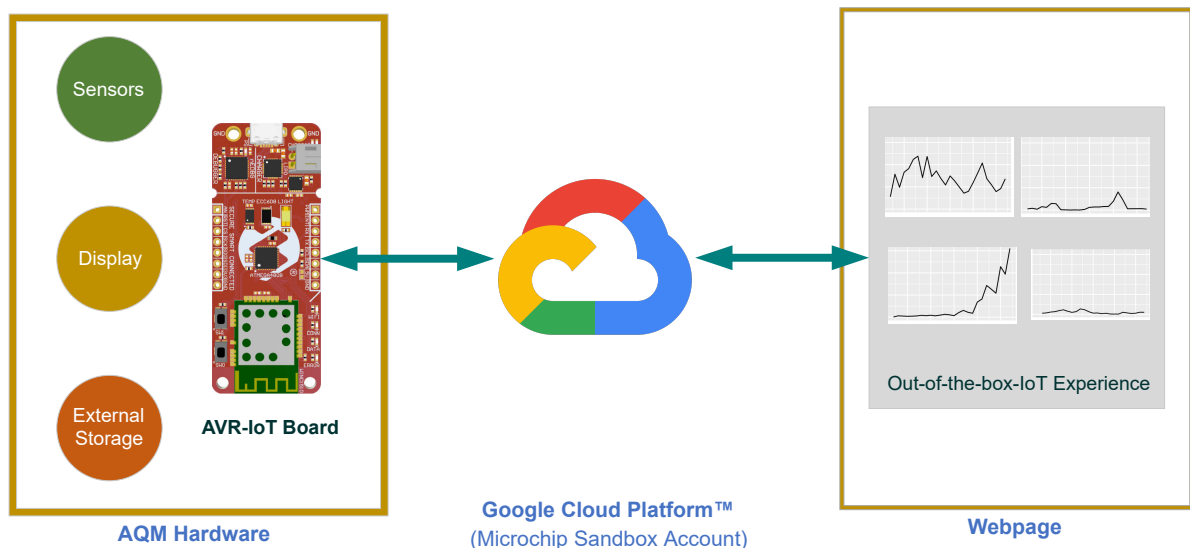
AQM 使用专门设计的网页 (avr-iot.com) 来可视化空气质量参数。

移植到私有 Google Cloud 帐户和 Web 应用程序开发不在本应用笔记的范围内。有关更多信息, 请参见 [AVR-IoT Google Cloud 设置](#)。

上电后, AQM 将搜索预配置的 Wi-Fi 路由器进行连接。如果有 Wi-Fi 路由器, AQM 会与其相连并访问互联网。如果没有 Wi-Fi 路由器, 它将持续搜索并点亮红色 LED 来指示 Wi-Fi 连接错误。单片机将监测室内环境温度和湿度以及主要空气传播污染物, 例如 PM_{2.5}、CO₂ 和 TVOC。单片机将处理获取的这些读数, 并根据 PM_{2.5} 传感器的读数计算 AQI 值。AQI 和获取的其他空气质量参数存储在外部 EEPROM 中, 并显示在 OLED 上。

如果 AQM 找到互联网连接, 则会将 AQI 和其他参数上传到 Google Cloud。此后, 单片机进入待机休眠模式, 之后会定期唤醒以监测传感器并将经过处理的数据传输到云端。此外, 单片机还可以从休眠状态立即唤醒以响应开关按下事件, 并在 OLED 上显示空气质量参数。图 1-1 显示了包含云端和网页的整个 AQM 系统。

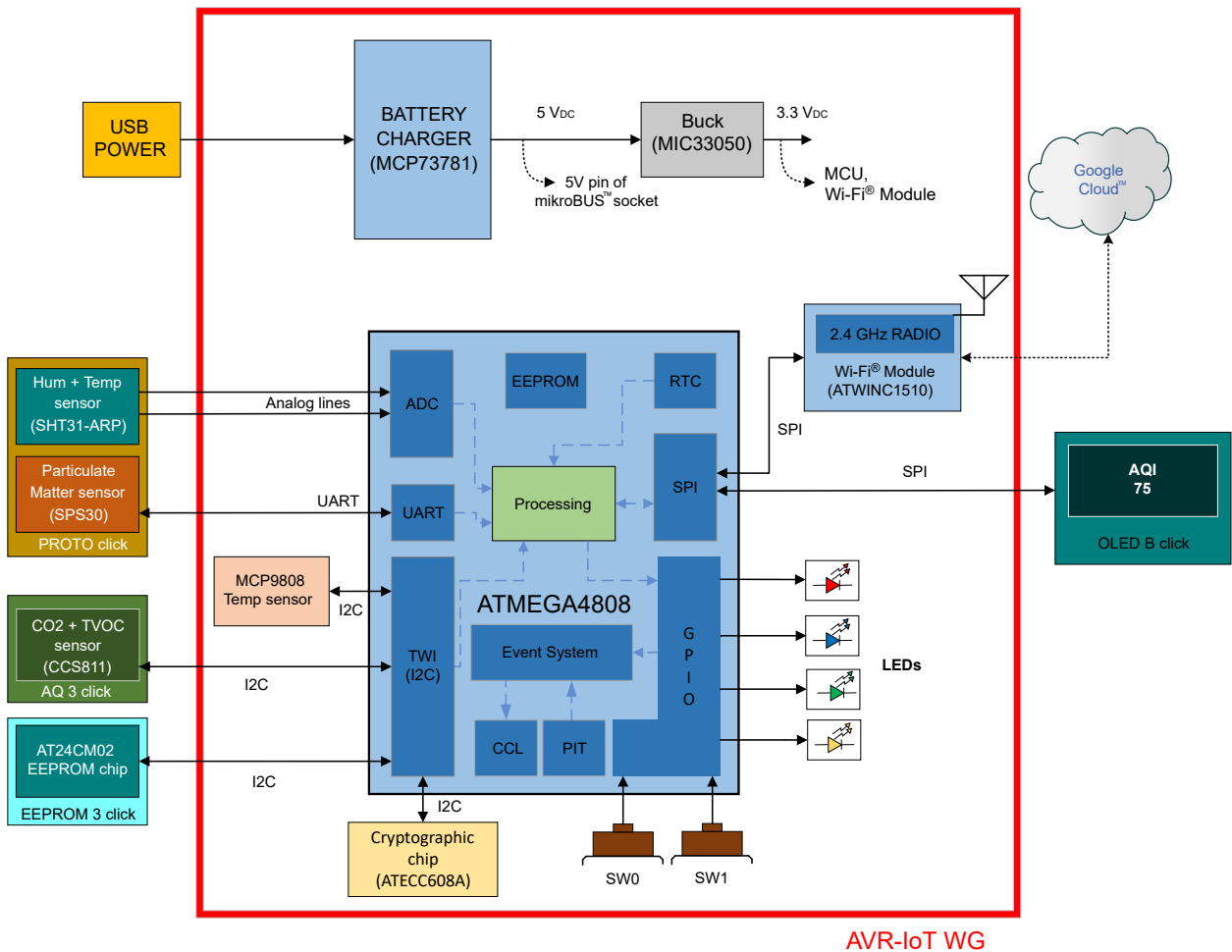
图 1-1. 包含云端和网页的整个 AQM 系统



单片机与 Google Cloud 之间的通信由安装在 AVR-IoT WG 开发板上的安全元件 ATECC608A 保护。用户可以通过访问 AVR-IoT WG 板为开箱即用 IoT 体验设计的网页来查看所有空气质量参数。此网页每秒都会从 Google Cloud 获取数据, 并更新空气质量参数图。

图 1-2 给出了所设计 AQM 的 AQM 系统框图, 其中突出显示了用于本应用的单片机的外设以及与外部硬件通信所需的接口。

图 1-2. AQM 框图



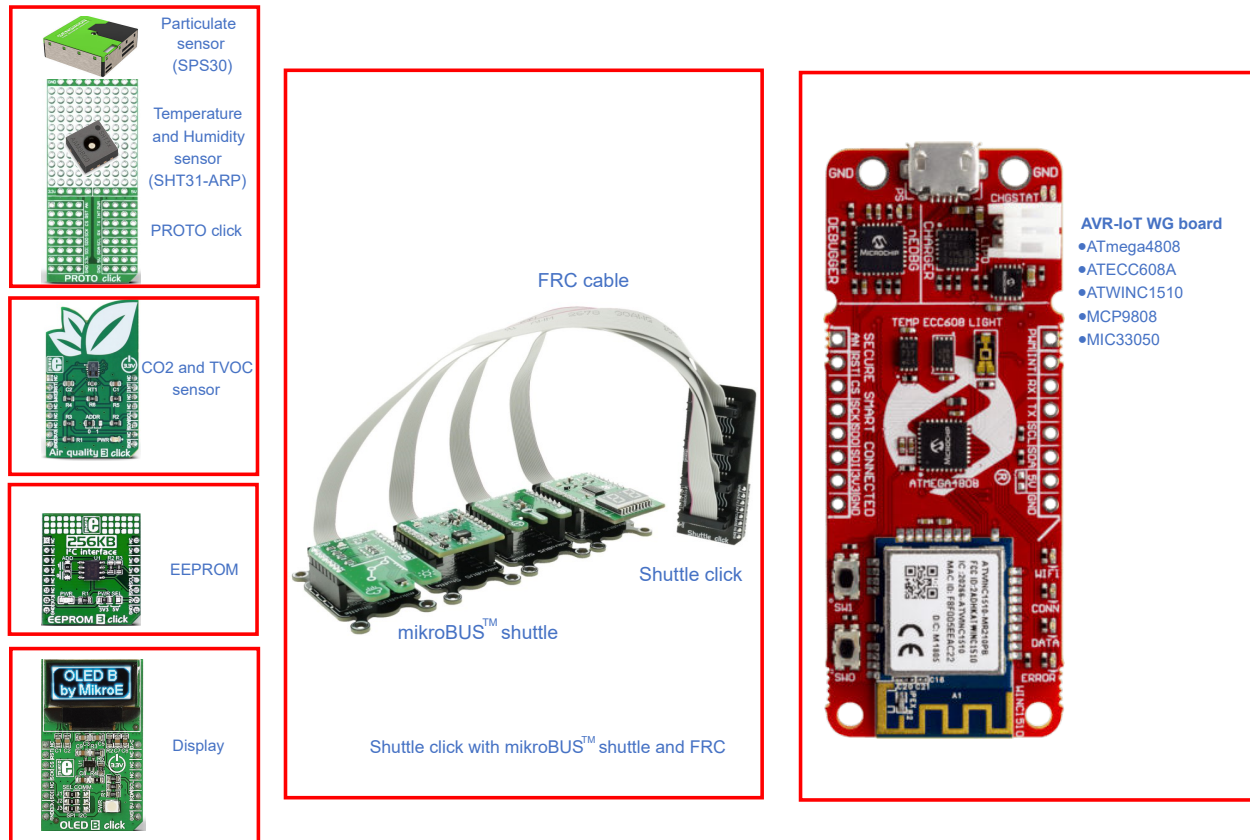
设计的 AQM 系统具有以下功能：

- Microchip megaAVR®单片机——具有 CIP 和智能模拟外设的 ATmega4808
- PM_{2.5}、CO₂、TVOC、湿度和温度监测
- 硬件安全：CryptoAuthentication 安全元件 ATECC608A
- 无线连接：经过完全认证的 Wi-Fi 模块 ATWINC1510
- Google Cloud 连接
- OLED 显示屏
- 数据记录

2. 硬件概述

AQM 硬件包括 AVR-IoT WG 开发板、安装在 MikroElektronika click 板上的传感器、外部 EEPROM 存储和 OLED 显示屏 click 板。AVR-IoT WG 开发板有一个 mikroBUS™ 插槽。可使用 Shuttle click 与 mikroBUS Shuttle 和扁平带状线（Flat Ribbon Cable, FRC）扩展 mikroBUS 插槽，如图 2-1 所示。将传感器 click、外部 EEPROM click 和显示屏 click 放置到 mikroBUS 插槽上。

图 2-1. Click 板与 AVR-IoT WG 开发板的连接



以下几节将介绍用于实现 AQM 系统的硬件模块及其元件的详细信息。

2.1 AVR-IoT WG 开发板

AVR-IoT WG 开发板结合了功能强大的 8 位 ATmega4808 单片机、ATECC608A 和 ATWINC1510，能够以最简单高效的方式将嵌入式应用程序连接到 Google Cloud IoT Core 平台。该开发板包含一个板上调试器，无需外部硬件即可对单片机进行编程和调试。有关更多详细信息，请参见 [AVR-IoT WG 开发板产品页面](#)。

在 AVR-IoT WG 开发板上，AQM 系统使用单片机（ATmega4808）、安全元件 IC（ATECC608A）、Wi-Fi 模块（ATWINC1510）、降压稳压器（MIC33050）、数字温度传感器（MCP9808）、机械开关和 mikroBUS 连接器。以下几节提供有关 AVR-IoT WG 开发板主要元件的详细信息。

MCU-ATmega4808

ATmega4808 是一款采用 8 位 AVR 处理器的单片机，运行速度最高为 20 MHz，同时配有 48 KB 的闪存、6 KB 的 SRAM 和 256 字节的 EEPROM。该单片机使用最新低功耗 CIP（包括事件系统、智能模拟外设和高级外设）。

AQM 系统中使用的 ATmega4808 的外设包括：

- 模数转换器（Analog-to-Digital Converter, ADC）
- 通用同步/异步收发器（Universal Synchronous and Asynchronous Receiver and Transmitter, USART）

- 串行外设接口（Serial Peripheral Interface, SPI）
- 双模式主/从双线接口（Two-Wire Interface, TWI）：I²C 兼容型
- 实时计数器（RTC）
- 周期性中断定时器（Periodic Interrupt Timer, PIT）
- 休眠控制器
- EEPROM 数据存储
- 事件系统
- 可配置定制逻辑（CCL）

安全元件——ATECC608A

ATECC608A 采用基于硬件的超安全加密密钥存储和加密对策，消除了与软件漏洞相关的潜在后门。**ATECC608A** 用于存储安全 IoT 通信所需的私钥和公钥。**ATECC608A** 通过 I²C 接口与主机控制器通信。

无线连接——ATWINC1510 Wi-Fi®模块

ATWINC1510 是一个 IEEE 802.11 b/g/n IoT 网络控制器。**ATWINC1510** Wi-Fi 模块集成了 **ATWINC1510** SoC、26 MHz 振荡器、阻抗匹配电路和印刷天线或用于外部天线的微型同轴（μFL）连接器。该模块通过 SPI 接口与主机控制器通信。

数字温度传感器——MCP9808

MCP9808 数字温度传感器适用范围广泛，精度为 0.5°C（温度范围为-20°C 至+100°C），高温分辨率为 12 位。其他功能包括关断、欠温/过温监测器以及临界温度报警。该数字传感器通过 I²C 接口连接到单片机。

降压稳压器——MIC33050

MIC33050 是具有内部电感的高效 600 mA PWM 同步降压稳压器。它的主要特点包括：输入电压范围为 2.7V 至 5.5V，输出电流为 600 mA，静态电流为 20 μA，输出电压纹波低。

2.2 MikroElektronika 的 Click 板和传感器

AQM 使用 MikroElektronika 的 Click 板作为外部硬件。

Shuttle Click、mikroBUS™ Shuttle 和 FRC

Shuttle click 是 mikroBUS 插座扩展板，可轻松在一个 mikroBUS 上堆叠最多四个 Click 板。带有 **FRC** 的 **mikroBUS shuttle** 与 **Shuttle click** 一起使用时，可用于实现 1x4 扩展。在 AQM 中，**Shuttle click** 放置在 AVR-IoT WG 开发板的 mikroBUS 插槽上，四个 mikroBUS shuttle 使用 **FRC** 线缆与 **Shuttle click** 连接。借助这种组合，可以在 mikroBUS shuttle 上放置四个不同的 click。

湿度和 PM 传感器接口的 PROTO Click

PROTO click 是适用于 mikroBUS 外形的配件板。它拥有 10 x 11 的原型设计区域和附加电源焊盘，可用于组装定制电子元件，打造定制 click 板。**PROTO click** 用于将模拟输出湿度传感器和 PM 传感器与单片机连接，因为这些传感器 click 不可用。

PM 传感器模块

Sensirion 的 [SPS30](#) 传感器是一种用于空气质量监测和控制的光学颗粒物传感器。AQM 使用该传感器模块监测 PM_{2.5}。该传感器具有用于与单片机通信的 UART 接口。

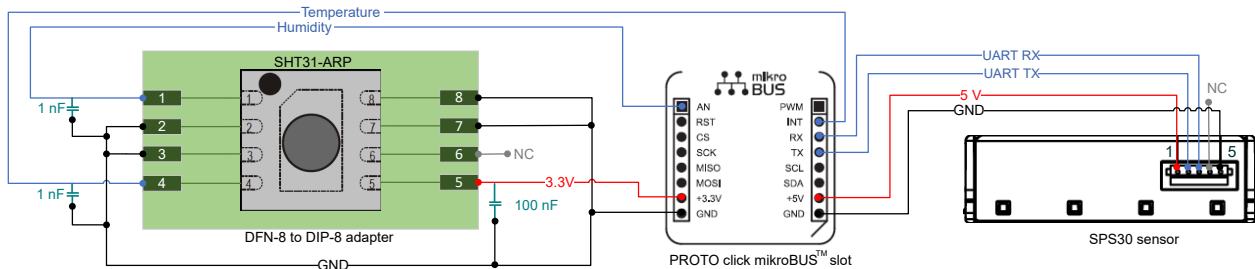
湿度传感器

[SHT31-ARP](#) 是经过完全校准、线性化和温度补偿的模拟输出湿度和温度传感器。它连接到单片机的 ADC 外设。AQM 使用该传感器模块监测湿度。

注： 对于温度测量，AQM 将使用安装在 AVR-IoT WG 开发板上的 MCP9808 数字传感器。

SHT31-ARP 传感器 IC 采用 DFN 封装。此 IC 使用 DFN-8 转 DIP-8 适配器安装在 PROTO click 上。DFN-8 转 DIP-8 适配器和 PROTO click mikroBUS 连接器之间的引脚连接如 [图 2-2](#) 所示。PM 传感器（SPS30）是一个单独的模块，具有 5 引脚连接器。SPS30 和 PROTO click mikroBUS 连接器之间的引脚连接如 [图 2-2](#) 所示。更多详细信息，请参见 [表 2-1](#)。

图 2-2. PROTO Click mikroBUS™ 连接器与湿度和 PM 传感器之间的连接



[表 2-1](#) 列出了连接到 PROTO click mikroBUS 连接器的已用湿度和 PM 传感器引脚。

表 2-1. mikroBUS™ 引脚连接器与 SHT31-ARP 和 SPS30 传感器

SHT31-ARP	PROTO Click 的 mikroBUS™ 连接器		SHT31-ARP	SPS30
引脚 1（湿度）	AN	PWM		
	RST	INT	引脚 4（温度）	
	CS	RX		引脚 3（TX）
	SCK	TX		引脚 2（RX）
	MISO	SCL		
	MOSI	SDA		
引脚 5（V _{DD} ）	3.3V	5V		引脚 1（5V）
引脚 2、3、7 和 8（V _{SS} ）	GND	GND		引脚 5（GND）

Air Quality 3 Click

AQM 使用 [Air quality 3 click](#) 来测量 TVOC 和 CO₂ 当量（eCO₂）。二氧化碳当量是一种用于根据各种温室气体排放的全球变暖潜势比较排放情况的度量值。Air quality 3 click 配有 [CCS811](#)，这是一种超低功耗数字气体传感器解决方案，集成了金属氧化物（Metal Oxide, MOX）气体传感器以检测各种挥发有机物（VOC）和 eCO₂。该 click 通过 I²C 接口连接到单片机。

OLED B Click

[OLED B click](#) 装有一个 96 x 39 px 蓝色单色无源矩阵 OLED 显示屏。为了驱动该显示屏，它配备了一个 SSD1306 控制器。OLED B click 通过 SPI 与单片机通信。

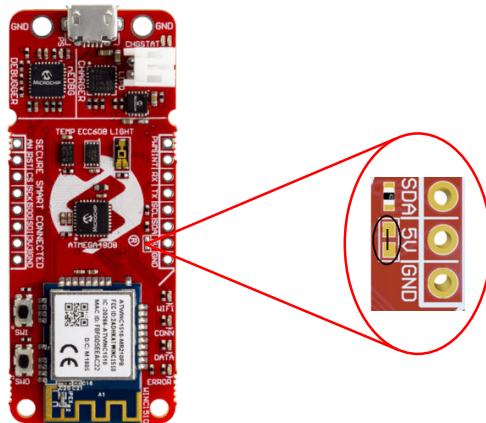
EEPROM 3 Click

EEPROM 3 click 提供 256 KB 的电可擦除可编程只读存储器。使用的 EEPROM 模块为 **AT24CM02**，它是一种 I²C 串行 EEPROM。AT24CM02 的主要功能之一是错误检测和校正（Error Detection and Correction, EDC）方案，它可利用内部分配给一组四个字节的六个附加位进行纠错。这种保护方案可以纠正某些类型的位错误，同时保持对最终用户透明。位比较和错误校正正在内部完成。该 click 通过 I²C 接口连接到单片机。

2.3 针对 5V 电源的 mikroBUS™ 插座修改

SPS30 传感器需要 5V_{DC} 才能正常工作。要将 SPS30 传感器与 mikroBUS 插座搭配使用，需要进行硬件修改。默认情况下，5V 电源不连接到 mikroBUS 插座。要使 5V 电源连接到插座，应按图 2-3 所示焊接 0Ω 电阻来短接跳线。

图 2-3. 短接 AVR-IoT WG 板上的 5V 跳线



注：有关 AQM 原理图和连接的信息，请参见附录部分。

2.4 AQM 应用中使用的 ATmega4808 的特性

本节将介绍 AQM 应用中使用的单片机的特性和外设配置详细信息。

ADC

ATmega4808 的 ADC 在 8 位分辨率下的最大转换速率为 150 ksp/s，在 10 位分辨率下的最大转换速率为 115 ksp/s。它具有内置噪声滤波功能。ADC 支持的噪声抑制方法包括：

- 硬件采样累加器
- 采样延时
- 自动采样延时变化（Automatic Sampling Delay Variation, ASDV）

在 AQM 中，ADC 配置为 10 位分辨率，硬件采样累加器配置有 8 个采样（采样之间有固定延时）。ADC 根据 V_{DD} 的 ADC 参考电压（单片机输入电源）对湿度传感器（SHT31-ARP）的电压输出进行采样。

USART

USART 外设用于与 PM 传感器（SPS30）通信。USART1 配置为 115200 波特率、奇偶校验位 0 和停止位 1，以与 PM_{2.5} 传感器进行连接。

SPI

AQM 使用 SPI 与 ATWINC1510 Wi-Fi 器件和显示屏（OLED B click）通信。SPI 数据时钟频率为 2.5 MHz，并且工作在模式 0 下。

TWI (I²C)

AQM 使用 I²C 兼容型 TWI 与 ATECC608A 加密芯片、外部存储器（EEPROM 3 click）、数字温度传感器（MCP9808）、TVOC 和 CO₂ 传感器（air quality 3 click 板）通信。TWI 配置为 100 kHz 数据时钟频率。

休眠控制器

ATmega4808 单片机支持三种休眠模式（空闲、待机和掉电）。AQM 使用待机休眠模式。在这种模式下，用户可以使用相应的 RUNSTBY 位将外设配置为在休眠期间运行。在待机休眠模式期间，AQM 会使能 CCL 来检测开关是否按下。

RTC

在 CPU 工作期间，AQM 使用 RTC 模块来产生 1 ms 的周期性中断。固件使用这 1 ms 的周期来调度任务。有关详细信息，请参见 3. 固件概述。

PIT

PIT 是 RTC 外设的一部分，可单独使能，与 RTC 使用相同的时钟源。在 AQM 中，PIT 配置为使用 RTC 时钟产生两秒钟的周期性中断。PIT 在所有休眠模式下均运行。因此，AQM 使用它来定期地将单片机从待机休眠模式唤醒。

事件系统

事件系统是用于在外设间直接传输信号的系统。AQM 使用事件系统的两个通道。GPIO（PF6）通过事件通道 1 连接到 CCL 的 LUT1 的输入 1。PIT 输出 3 通过事件通道 4 连接到 CCL 的 LUT1 的输入 2。在这种配置下，事件系统可用于为开关 SW0（安装在 AVR-IoT WG 开发板上）的输入信号去抖。有关更多详细信息，请参见[使用事件系统、CCL 和 PIT 实现开关去抖](#)部分。

CCL

CCL 是可编程逻辑外设，可以连接到器件引脚、事件或其他内部外设。AQM 使用 CCL 外设并借助事件系统和 PIT 来处理开关去抖。[使用事件系统、CCL 和 PIT 实现开关去抖](#)部分详细介绍了开关去抖的设计与实现。

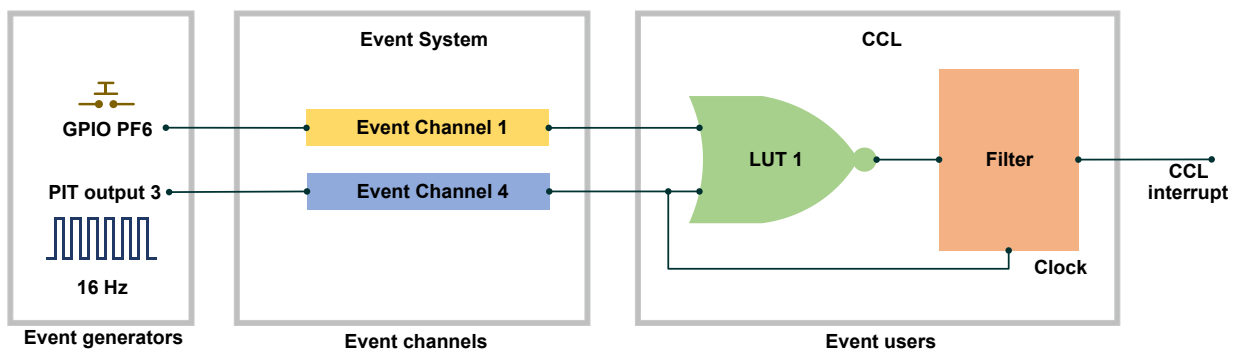
EEPROM 数据存储

ATmega4808 具有 256 字节的 EEPROM。AQM 使用单片机的内部 EEPROM 存储参数（默认配置参数和外部 EEPROM 数据存储索引）。

使用事件系统、CCL 和 PIT 实现开关去抖

使用事件系统、CCL 和 PIT 时钟实现开关去抖，无需任何软件干预。每次按下或释放机械按钮时，按钮发出的信号通常都会在高电平和低电平之间来回切换几次，这就是所谓的抖动。为了使用该信号并且仅在按下或释放按钮后生成事件，需要通过硬件或软件实现某种形式的滤波，也就是所谓的去抖。开关信号去抖的实现方式如下：通过 CCL 对开关信号进行滤波（如图 2-4 所示），然后使用滤波后的信号针对开关按下事件产生中断。

图 2-4. 使用 CCL 滤波器进行开关去抖

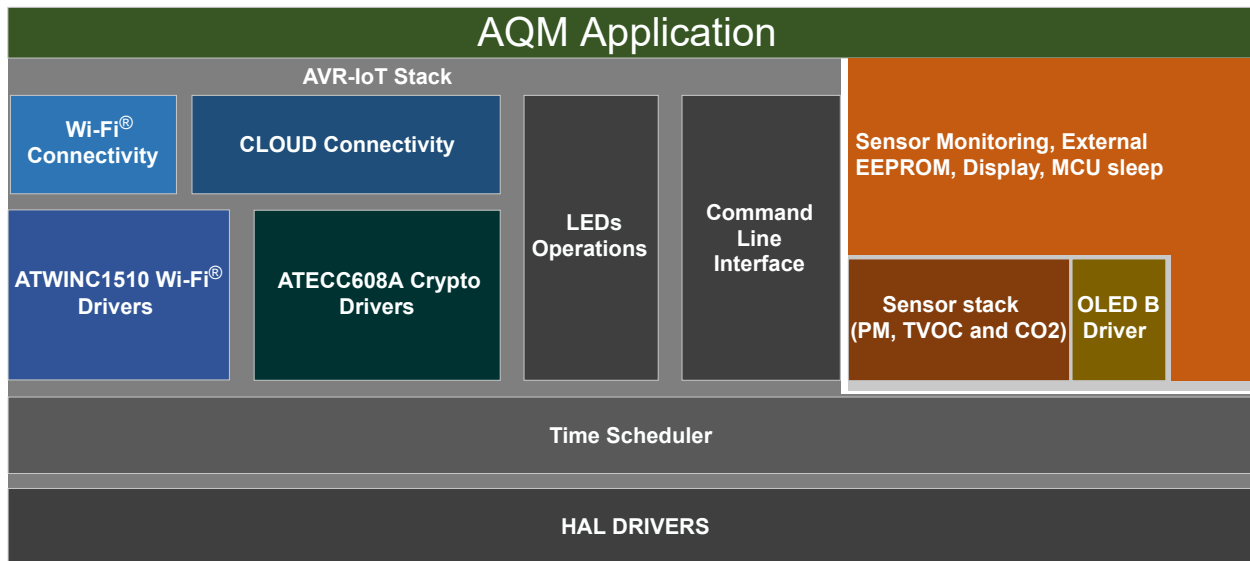


该滤波器需要合适的时钟频率才能正常工作。LUT 中短于两个时钟周期的任何输出都将被滤除。在本应用中，PIT 输出 3 用作时钟源（频率：16 Hz）。信号通过事件系统进行传输。事件通道 1 用于传输开关信号，事件通道 4 用于将时钟传输到 LUT 的事件输入。因此，GPIO 和 PIT 充当事件发生器，而 CCL 充当事件用户。有关更多详细信息，请参见[AVR 上独立于内核的外设入门](#)。

3. 固件概述

本章将详细介绍室内空气质量监测器的固件实现。AQM 应用程序固件基于 AVR-IoT 协议栈开发；有关 AVR-IoT 协议栈的更多详细信息，请参见 [AVR-IoT WG 开发板](#) 及其文档。图 3-1 给出了 AVR-IoT 协议栈和应用程序固件模块。

图 3-1. 应用程序固件层



3.1 固件组件

3.1.1 AVR-IoT 协议栈

AVR-IoT 协议栈是借助 Atmel START 和 MCC 配置器工具生成的固件库。它使用 AVR-IoT WG 开发板定制和配置，旨在提供开箱即用的 IoT 体验。

AVR-IoT 协议栈使用定制的时间调度程序，其调度节拍为 1 ms。RTC 用于生成调度节拍。用户可以为调度程序队列添加或删除任务以及设置任务的调度频率。Wi-Fi 连接、安全云连接和 LED 指示均为 AVR-IoT 协议栈的组成部分。

与 Wi-Fi 模块的通信由 Wi-Fi 任务处理。该任务负责处理 Wi-Fi 模块初始化、配置、Wi-Fi 路由器连接以及数据传输。

与 Google Cloud 的安全通信由 Cloud 任务处理。该任务负责更新云连接状态。如果连接丢失，它将尝试重新连接。

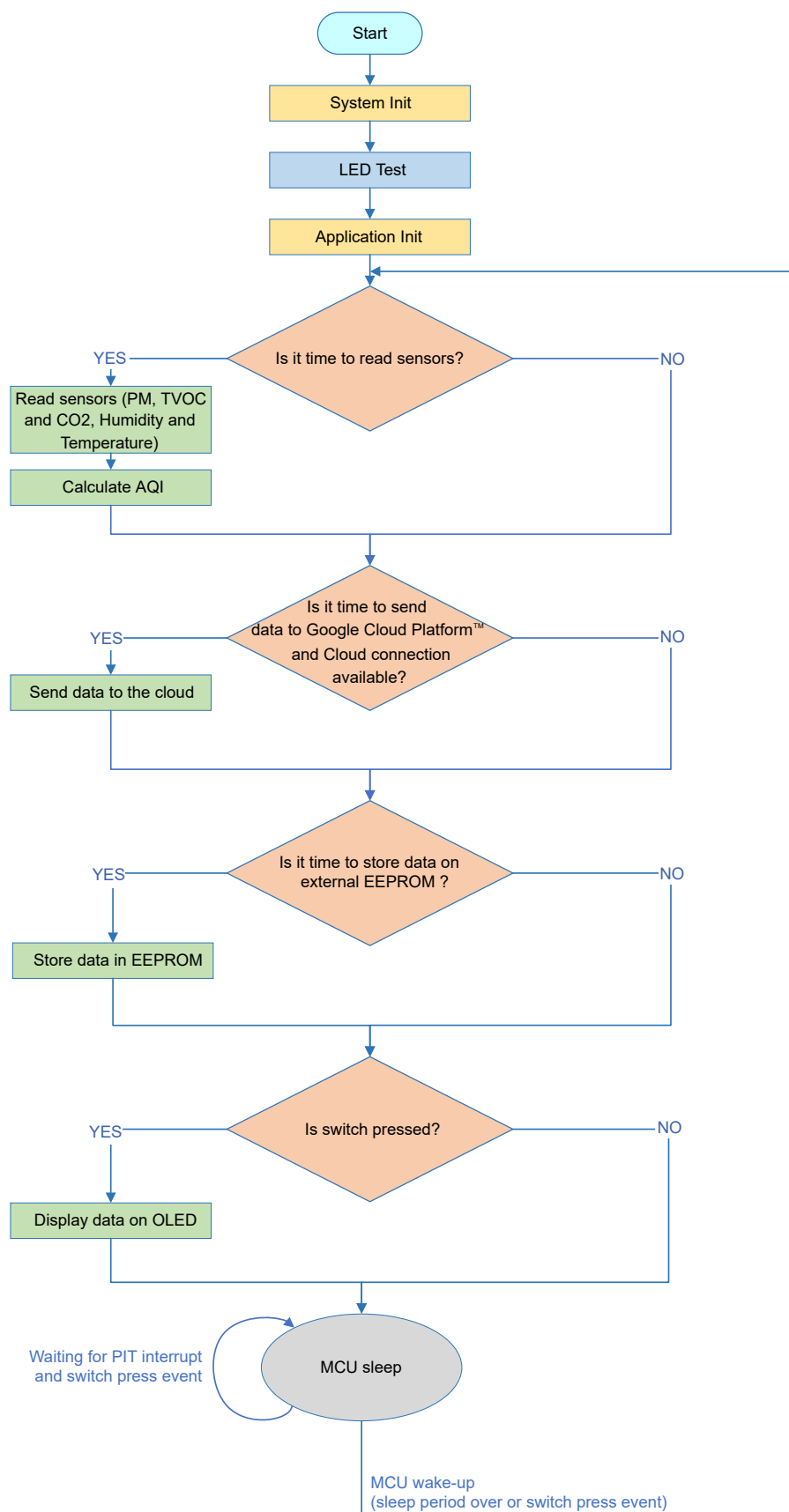
AQM 固件使用以下 AVR-IoT 协议栈版本：

- Atmel START 的 AVR-IoT 协议栈：1.1.1
- MCC 的 AVR-IoT 协议栈：1.2.0

3.1.2 AQM 应用程序代码

应用程序固件定期从传感器获取数据并加以处理。它会计算 AQI 并将处理后的数据发送到 Google Cloud。此外，处理后的数据将显示在 OLED 显示屏上，并存储在外部 EEPROM 中予以记录。图 3-2 给出了应用程序流程图概览。

图 3-2. 固件流程图



3.2 AQM 应用程序固件

3.2.1 初始化

固件首先执行单片机及其外设的初始化。AQM 应用程序使用 SPI、I²C、UART、ADC、数字 I/O、事件系统、CCL、RTC 和 PIT 等单片机外设。此外，AQM 还使能休眠功能。系统的初始化配置如下：

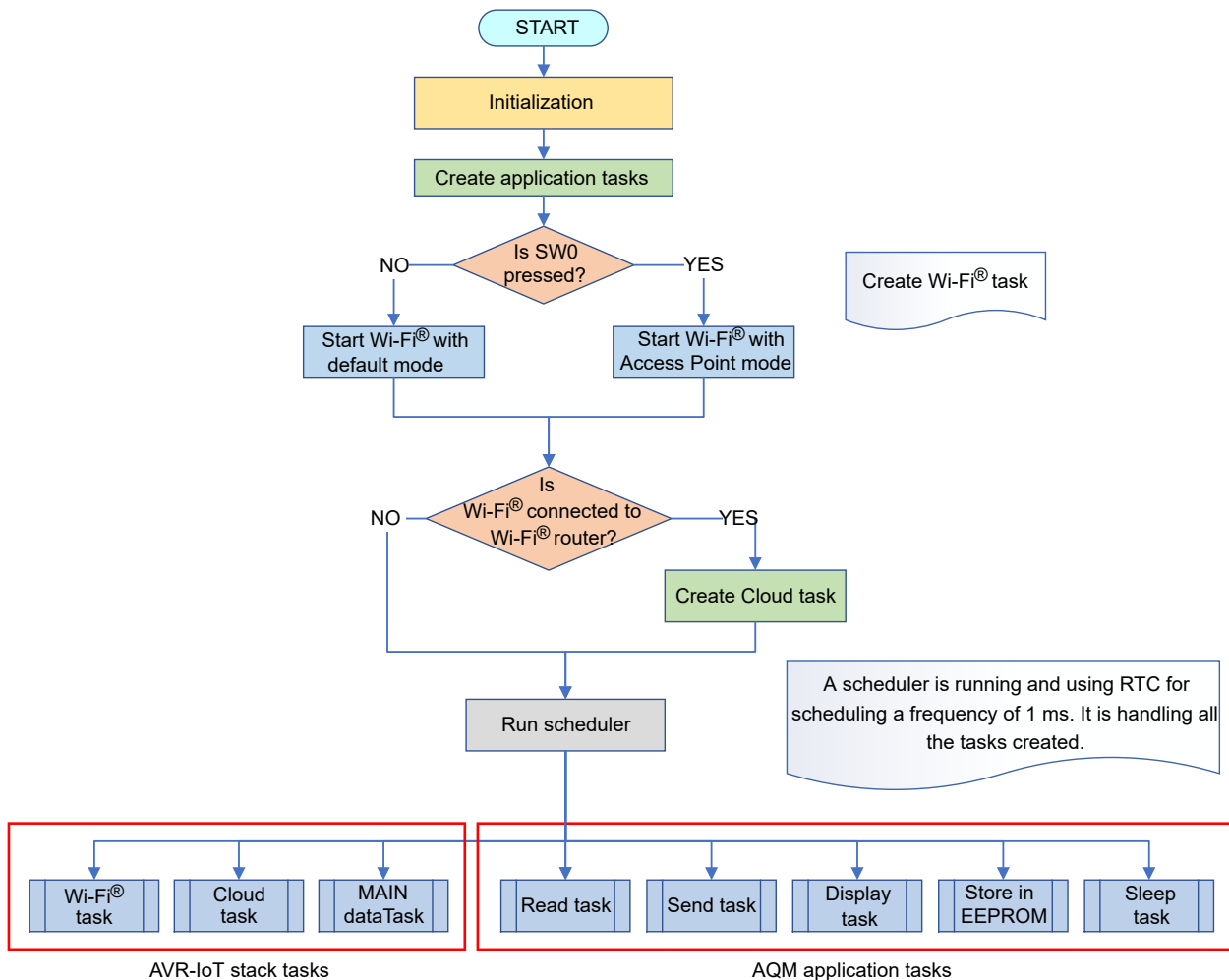
- SPI: SPI 数据时钟 (2.5 MHz)，SPI 模式 (MODE0)
- I²C: I²C 数据时钟 (100 kHz)
- USART1: 波特率 (115200)，奇偶校验位 (0)，停止位 (1)
- USART2: 波特率 (9600)，奇偶校验位 (0)，停止位 (1)
- ADC: 分辨率 (10 位)，采样频率 (48 kHz)，八个采样累加 (具有固定延时)
- RTC 配置为每 1 ms 产生一个中断，PIT 配置为每 2 秒产生一个中断。
- 使用事件系统、CCL 的 LUT1 和滤波器进行开关去抖。
- 将部分 GPIO 配置为 LED 和 SPI 从选择 (Slave Select, SS) 的输出
- 将部分 GPIO 配置为 SW0 和 SW1 的输入
- 休眠控制器：使能待机休眠模式。CCL 外设配置为在待机休眠模式下运行，CCL 中断会将单片机从休眠模式唤醒。PIT 也配置为在待机休眠模式下运行，PIT 中断也会将单片机从休眠模式中唤醒。

AQM 固件基于 AVR-IoT 协议栈开发，在外设完成初始化之后创建应用程序任务。固件执行 (任务调度) 发生在 CPU 工作期间。以下是 AQM 应用程序固件任务：

- READ_Task(): 读取传感器和 AQI 计算的相关数值。
- DISPLAY_Task(): 通过 OLED B click 显示 AQM 参数。
- SEND_Task(): 将 AQM 参数上传到 Google Cloud。
- STORE_Task(): 将 AQM 参数存储到外部 EEPROM。
- SLEEP_Task(): 处理单片机的休眠和唤醒。

图 3-3 给出了应用程序初始化流程图。

图 3-3. 应用程序初始化



3.2.2 应用程序任务介绍了 AQM 应用程序固件的各项任务及其职责。

3.2.2 应用程序任务

读取传感器

该任务处理 PM 传感器和 AQ3 click 的初始化。它将读取所有传感器（PM、CO₂、TVOC、温度和湿度）数据，并根据 PM_{2.5} 读数计算 AQI。所有传感器需要定期读取（每 4 秒钟一次）。

传感器与单片机的连接细节及其数据采集信息如下：

温度传感器

单片机通过 I²C 与数字温度传感器（MCP9808）连接。函数 `SENSORS_getTempValue()` 用于从 MCP9808 传感器（MCP9808 的 I²C 地址为 0x18）读取温度值。

湿度传感器

湿度传感器（SHT31-ARP）具有模拟电压输出，因此通过 ADC 外设与单片机连接。ADC 外配置为以 48 kHz 采样湿度传感器的输出。ADC 会使用硬件采样累加器以固定延时累加八个采样，以此对采样信号进行滤波。函数 `ADC0_GetConversion()` 用于从传感器（SHT31-ARP）获取湿度值。

TVOC 和 eCO₂ 传感器

Air quality 3 click 具有 CCS811 传感器，用于测量 TVOC 和二氧化碳当量（eCO₂）。它通过 I²C 接口与主机单片机通信。函数 `ccs811_GetResults()` 用于从 Air quality 3 click（Air quality 3 click 的 I²C 地址为 0x5A）读取 TVOC 和 CO₂ 值。

注：根据 CCS811 传感器数据手册，建议在首次使用时让传感器持续运行 48 小时进行预烧，之后每次使用时以所需模式运行 20 分钟。在每次的 20 分钟内，用户可能会观察到常量值（TVOC 为 0，eCO₂ 为 400）。在应用程序固件中，48 小时的预烧时间和 20 分钟的延时未得到解决。在 AQM 中，直到掉电再上电后 20 分钟，TVOC 和 CO₂ 读数才可能准确。

PM_{2.5} 传感器

单片机通过 UART 接口与 PM 传感器（SPS30）模块通信。来自 SPS30 传感器的数据包含 PM₁₀、PM_{0.5}、PM_{1.5} 和 PM_{2.5} 的值（PM 代表颗粒物；数字表示灰尘的大小，以微米为单位）。室内 AQM 仅使用 PM_{2.5} 数据。函数 `sps30_read_measurement()` 用于从 PM 传感器（SPS30）读取 PM_{2.5} 值。

读取 PM_{2.5} 值后，固件将根据 PM_{2.5} 读数计算 AQI。AQI 值是用于报告空气质量的指数。环境空气的 AQI 值小于 50 时，空气质量为优。

该应用程序采用[美国环保局](#)提供的 AQI 计算公式。

AQI 计算公式：

$$I = \frac{I_{high} - I_{low}}{C_{high} - C_{low}} (C - C_{low}) + I_{low}$$

其中：

I = AQI

C = 污染物浓度

C_{low} = ≤ C 的浓度断点

C_{high} = ≥ C 的浓度断点

I_{low} = C_{low} 对应的指数断点

I_{high} = C_{high} 对应的指数断点

有关 AQI 的更多详细信息，请参见[空气质量指数（AQI）——EPA](#)

PM_{2.5} 平均值计算：

AQI 计算需要最近 12 小时内 PM 传感器的每小时数据。AQM 应用程序固件采用 [AirNow](#) 提供的一种方法来获取最近 12 小时的平均值。

PM 平均值计算方法

1. 计算最近 12 小时内的 PM_{2.5} 浓度范围（最大值和最小值）。
2. 将范围除以 12 小时内的最大浓度，得到缩放的变化率。
3. 用 1 减去缩放率，得到权重系数。权重系数必须介于 0.5 和 1 之间。最低限值约为 3 小时平均值。如果权重系数小于 0.5，则将值限制为 0.5。
4. 将每小时的浓度乘以权重系数（提高到测量浓度前几小时的幂值，对于当前小时，该系数会提高到零次幂值）。
5. 将这些乘积相加，然后除以权重系数（提高到测量浓度前几小时的幂值）的总和，得到 PM 平均值。

注：本演示不需要获取每小时传感器读数。要演示实时数据，所有传感器需要每 4 秒钟进行一次测量。用户可以将传感器测量周期配置为 1 小时。

显示空气质量参数

该任务用于在按下 AVR-IoT WG 开发板的开关 SW0 时显示空气质量参数。按下开关 SW0 后，空气质量参数会按顺序显示在 OLED 上。每个空气质量参数在 OLED 屏幕上大约显示 4 秒钟，然后切换下一个参数。按下开关 SW0 可立即

切换 OLED 上的空气质量参数。当所有 AQM 参数显示完毕后，OLED 显示屏将熄灭。如果再次按下开关，OLED 会点亮并开始显示空气质量参数。

将数据发送到云端

该任务通过 Google Cloud 上传 AQM 数据。如果云连接可用，将定期（每 4 秒钟一次）上传 AQM 数据。AVR-IoT 协议栈处理单片机与 Google Cloud 之间的连接，而该任务负责将参数上传到 Google Cloud。AQM 应用程序固件使用消息队列遥测传输（Message Queuing Telemetry Transport, [MQTT](#)）协议将数据发布（上传）到 Google Cloud。数据通过 JSON 对象从传感器传输到云端：ASCII 字符串的格式如下：{ 'AQI':XXX, 'Temp':YYY, 'RH':XXX, 'PM':YYY, 'TVOC':XXX, 'CO2':YYY }，其中 XXX 和 YYY 是用十进制计数法表示的数值。

注：

1. 在 AVR-IoT WG 开发板网页上，图表由参数名称和参数值构成。
2. JSON 是一种简洁的分层数据序列化语法，在所有现代浏览器中均受支持。这种格式能够以一种轻量级的方式表示对象，同时又保持了人类可读性。

应用程序固件将数据存储在外部的 EEPROM 中。该任务还会检查 AQM 是否有旧数据（在没有云连接时存储在外部的 EEPROM 中的数据）要发送。它会先上传旧数据，然后再上传实时数据。

将数据存储到外部 EEPROM

该任务将 AQM 数据存储到外部存储器（EEPROM 3 click）。它借助 I²C 接口访问外部存储器，并将空气质量参数（AQI、PM_{2.5}、CO₂、TVOC、RH 和温度）存储到外部存储器。该任务定期（即每分钟一次）存储 AQM 数据。

MCU 休眠

该任务负责单片机的休眠周期。当所有任务执行完毕后，该任务会调用 `sleep()` 命令，将单片机置于已配置的待机休眠模式下。在调用 `sleep()` 命令之前，该任务会将单片机的主振荡器从 16/20 MHz（OSC20M）切换到 32.768 kHz 超低功耗（OSC32K）。当单片机从休眠模式唤醒时，该任务会将主振荡器切换回 OSC20M。

在 AQM 中，单片机使用以下两个唤醒源：PIT 中断和 CCL 中断。PIT 中断定期（每 2 秒钟一次）将单片机从休眠模式唤醒。开关 SW0 按下事件也可以将单片机从休眠模式唤醒。

4. 固件开发

4.1 软件工具

Atmel Studio 和 MPLAB X IDE 用于固件开发。

使用 Atmel Studio 开发固件的工具链包括：

- Atmel Studio 7 (v7.0.2397)
- AVR GCC 编译器 (v5.4.0)
- Atmel START 配置器工具 (v1.7.279)

使用 MPLAB X IDE 开发固件的工具链包括：

- MPLAB X IDE (v5.35)
- AVR GCC 编译器 (v5.4.0)
- MPLAB 代码配置器 (MCC) (v3.95.0)

注： 为了运行演示，安装的工具必须为相同版本或更高版本。本示例未使用以前的版本进行测试。

4.2 固件配置和生成

固件可从 GitHub（如下）和 [Atmel START 示例](#) 中获取。



View Code Example on GitHub (Atmel Studio)

Click to browse repository



View Code Example on GitHub (MPLAB® X)

Click to browse repository

应用程序固件可以使用 Atmel START 或 MCC 生成。

有关使用 Atmel START 或 MCC 框架生成固件的过程的更多详细信息，请参见 [“AN3417 - Indoor Air Quality Monitor: Firmware Creation Using Atmel START and MPLAB® Code Configurator \(MCC\)”](#)。

4.3 单片机编程

要对单片机上的应用程序固件进行编程，请参见 [AVR-IoT WG Development Board User Guide](#)。

5. 应用演示

请参见 [“Indoor Air Quality Monitor: User Guide”](#) 了解硬件设置、硬件连接、操作步骤、LED 指示、AVR-IoT WG 板 Wi-Fi 模块配置以及 AQM 云数据可视化。

有关 [AQM 原理图](#)和网页上 AQM 参数可视化的信息，请参见[附录](#)部分。

6. 存储器要求

下面分别给出了使用 Atmel Studio 和 MPLAB X IDE 开发的应用程序固件对程序存储器和数据存储器的要求。

表 6-1. Atmel Studio 7 (v7.0.2397) 的存储器要求

优化	程序存储器	数据存储器
-Os	44416 (90.4%)	2781 (45.3%)

表 6-2. MPLAB® X IDE (v5.35) 的存储器要求

优化	程序存储器	数据存储器
-Os	47272 (96.2%)	2771 (45.1%)

7. 电源注意事项

AVR-IoT 板由 USB 端口（5 V_{DC}）供电。该板上配有一个降压转换器 MIC33050，用于产生 3.3V 电压以用作单片机和其他外部硬件（PM 传感器除外）的 V_{DD}。PM 传感器需要 5 V_{DC} 电源（通过短接 AVR-IoT WG 板上的 5V 跳线提供）。

当单片机处于工作模式时，将捕捉 AQM 的功耗数据。

注： 测量的电流是经过降压转换器（3.3 V_{DC}）之后的电流。

表 7-1. 工作模式下 3.3 V_{DC} 电源的总电流消耗

AQM 中的组件	典型电流消耗[mA]
外部传感器硬件（PM 传感器除外）	29
AVR-IoT 板	96
总计	125

表 7-2. 工作模式下 5 V_{DC} 跳线（仅限 PM 传感器）的总电流消耗

AQM 中的组件	典型电流消耗[mA]
SPS30 传感器模块	50

注： 本应用使用现有的硬件 click 板。待机休眠模式仅适用于单片机。所有其他 click 板和 Wi-Fi 模块始终处于开启状态。为了进行演示，传感器数据每 4 秒钟上传一次到 Google Cloud。根据网页规范，器件每 4 秒钟发送一次数据。

关闭 Wi-Fi 模块和传感器 click 可以进一步降低功耗。

7.1 低功耗注意事项

AQM 是由若干个硬件模块（AVR-IoT WG 开发板和 MikroElektronika 的 click）组合而成，因此其电流消耗高于典型的 IoT 传感器节点。如果对 AQM 系统中的硬件进行自定义设置，则电流消耗可以降低到几 μ A。具体来说，可将单片机振荡器切换到超低功耗、将单片机和 Wi-Fi 模块置于休眠状态以及控制传感器的功耗。此外，降低读取传感器、写入 EEPROM 和上传数据的频率可进一步降低系统功耗。

表 7-3. 单片机和 Wi-Fi®模块处于休眠状态时 AQM 的电流消耗

AQM 中的组件	典型电流消耗[mA]
连接 Shuttle click 和传感器 click 的 AQM（单片机和 Wi-Fi®休眠）（@ 3.3 V _{DC} 电源）	约 29 mA
SPS30 传感器模块（@ 5 V _{DC} 电源）	50 mA

表 7-4. 单片机和 Wi-Fi®模块处于休眠状态时 AQM（未连接外部硬件）的电流消耗

AQM 中的组件	典型电流消耗[mA]
未连接 Shuttle click（无外部硬件 click）的 AQM（单片机和 Wi-Fi 休眠）	约 200 μ A

为了测量 ATmega4808 单片机的电流消耗，将使用 ATmega4809 Xplained Pro 板，因为 ATmega4808 和 ATmega4809 属于同一系列。单片机使用 AQM 固件进行编程。为了获取电流读数，将使用 [Data Visualizer](#) 工具与 [功耗调试器](#)。

表 7-5. ATmega4808/9 单片机在待机休眠模式下的电流消耗示例

评估板	ATmega4809 Xplained Pro
-----	-------------------------

工作电压	3.3 V _{DC}
休眠模式	待机休眠模式
休眠模式下运行的外设	PIT 和 CLC
工作模式下的电流（振荡器 OSC20M），主时钟在 10 MHz 下工作	4.8 mA
休眠模式下的电流（振荡器 OSC20M），主时钟在 10 MHz 下工作	1.6 mA
休眠模式下的电流（振荡器 OSCULP32K），主时钟在 32.768 kHz 下工作	约 200 μ A

有关如何实现低功耗设计的更多信息，请参见《[低功耗设计指南](#)》和 [AVR® Low-Power Techniques](#) 应用笔记。

8. 结论

本应用笔记介绍了使用 AVR-IoT WG 开发板（具有 ATmega4808）以及 MikroElektronika 的传感器和多个 click 板实现 AQM 解决方案的详细信息，还重点说明了如何使用 ATmega4808 单片机的 CIP（例如事件系统和 CCL）以及智能模拟外设来实现 AQM 系统。

嵌入式设计可以使用 ATECC608A CryptoAuthentication™ 安全元件来加以保护，该安全元件会处理每个器件的身份验证。使用 Wi-Fi 模块（ATWINC1510）可以将无线连接功能无缝添加到设计中。

9. 参考资料

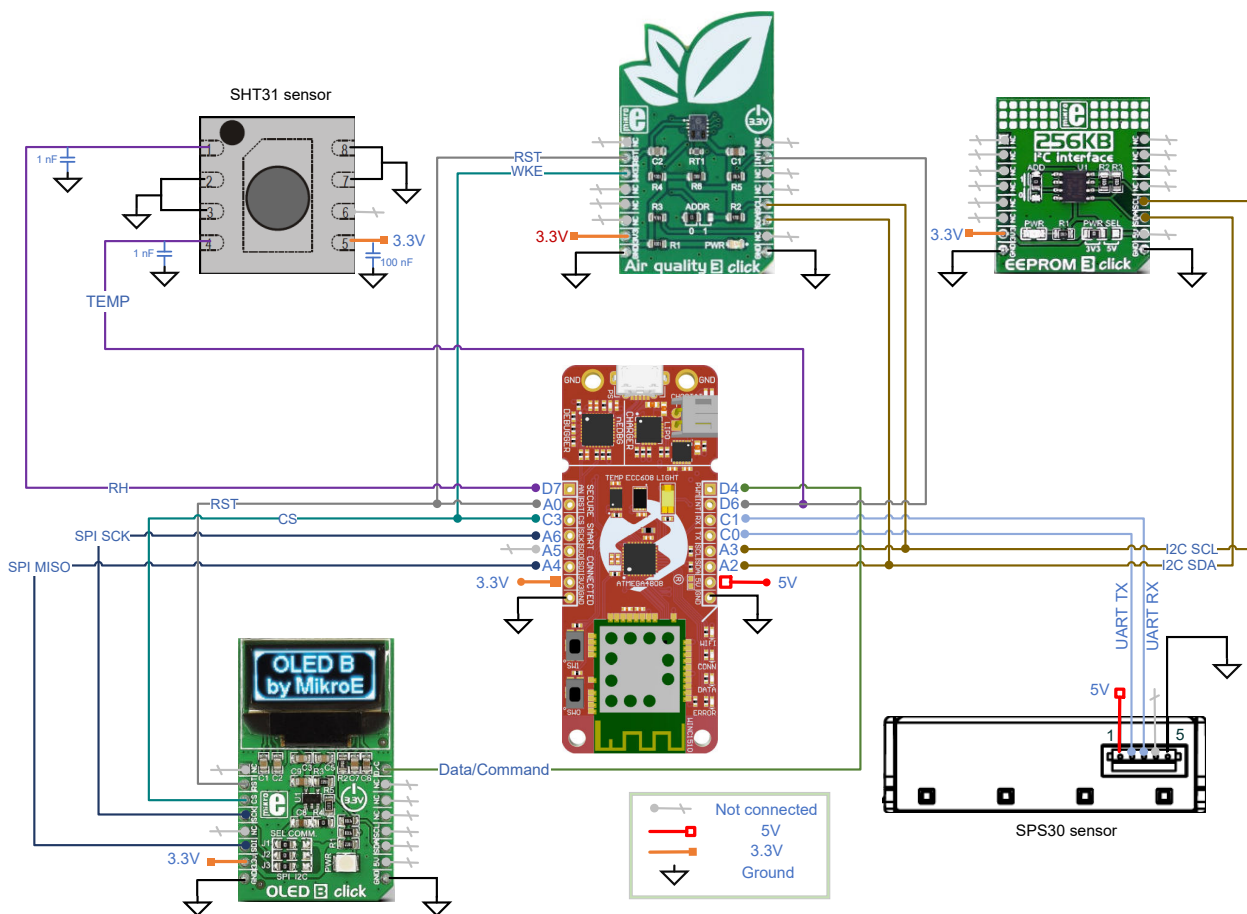
1. 《Air Quality Index Guide》（空气质量指数——空气质量和健康指南）：https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/aqi_brochure_02_14_0.pdf
2. AQI 计算器：<https://airnow.gov/index.cfm?action=airnow.calculator>
3. ATmega4808 产品页面：<https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATMEGA4808>
4. ATmega4809 产品页面：<https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATMEGA4809>
5. CIP 简介：https://ww1.microchip.com/downloads/cn/Appnotes/00002451c_cn.pdf
6. ADC 应用的噪声抑制方法：https://ww1.microchip.com/downloads/cn/Appnotes/00002551c_cn.pdf
7. 使用 AVR-IoT WG 开发板为 Google Cloud IoT 创建智能、安全的节点：<https://www.microchip.com/design-centers/internet-of-things/google-cloud-iot/avr-iot>
8. AVR-IoT WG 开发板用户指南：ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/AVR-IoT-WG-Development-Board-User-Guide-50002809B.pdf
9. 家庭空气污染与健康：www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health

10. 附录

10.1 AQM 原理图

所有外部 click 都连接到 AVR-IoT WG 开发板的同一个 mikroBUS 连接器上。图 10-1 给出了详细的 AQM 原理图。此处未显示 Shuttle click。

图 10-1. AQM 原理图

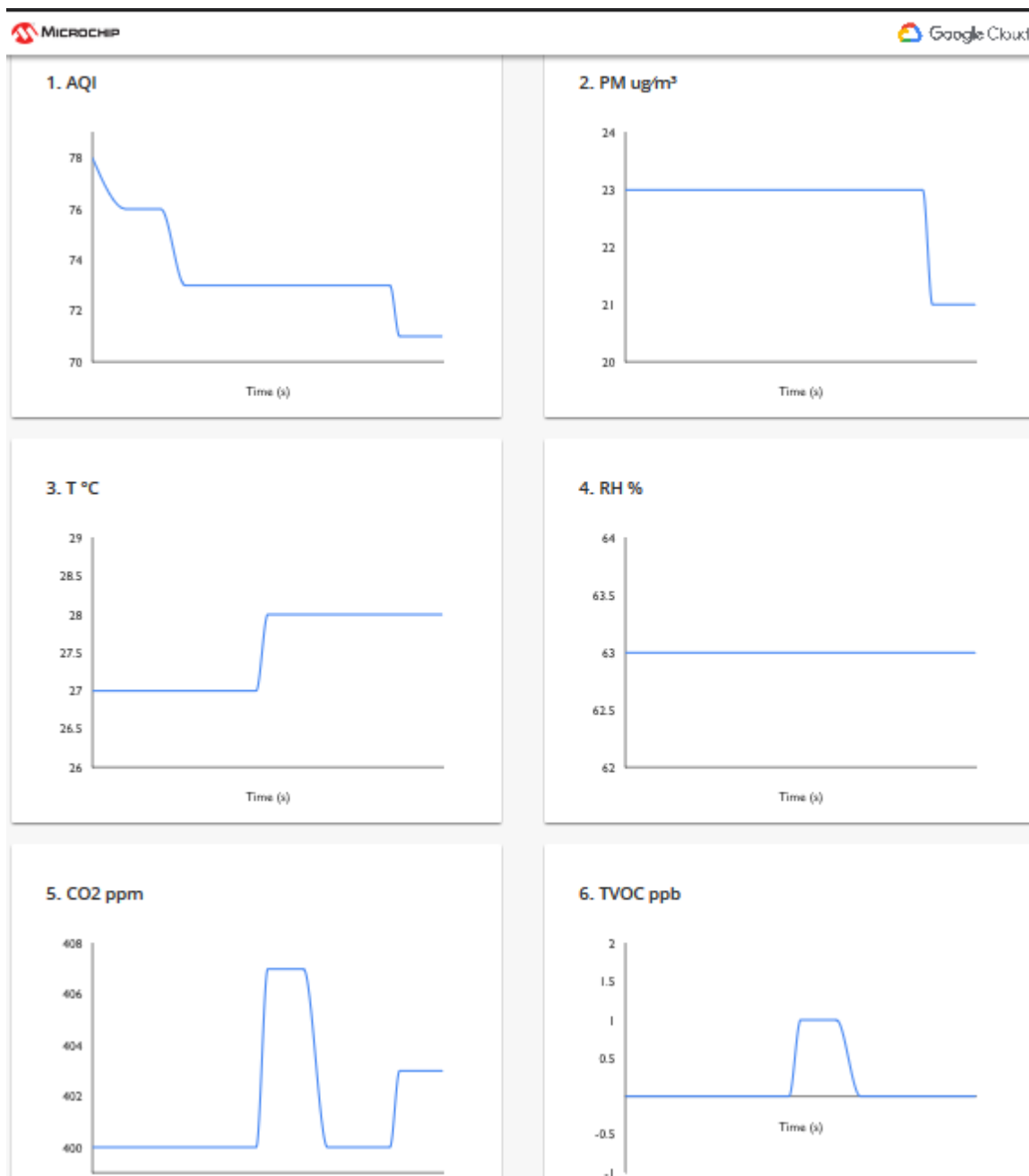


10.2 AQM 参数可视化

当开发板通过 Wi-Fi 接口连接到 Google Cloud 后，AQM 会开始将数据上传到云端。上传数据时，黄色 LED 将闪烁。avr-iot.com 网页以图形视图的形式显示从各传感器收集的数据，如图 10-2 所示。

注：图中所示参数的顺序可以通过修改固件中 JSON 对象的顺序来更改。

图 10-2. 网页上空气质量参数的图形显示



11. 版本历史

文档版本	日期	备注
A	2020 年 3 月	文档初始版本

Microchip 网站

Microchip 网站 (www.microchip.com/) 为客户提供在线支持。客户可通过该网站方便地获取文件和信息。我们的网站提供以下内容:

- **产品支持**——数据手册和勘误表、应用笔记和示例程序、设计资源、用户指南以及硬件支持文档、最新的软件版本以及归档软件
- **一般技术支持**——常见问题解答 (FAQ)、技术支持请求、在线讨论组以及 Microchip 设计伙伴计划成员名单
- **Microchip 业务**——产品选型和订购指南、最新 Microchip 新闻稿、研讨会和活动安排表、Microchip 销售办事处、代理商以及工厂代表列表

产品变更通知服务

Microchip 的产品变更通知服务有助于客户了解 Microchip 产品的最新信息。注册客户可在他们感兴趣的某个产品系列或开发工具发生变更、更新、发布新版本或勘误表时, 收到电子邮件通知。

欲注册, 请访问 www.microchip.com/pcn, 然后按照注册说明进行操作。

客户支持

Microchip 产品的用户可通过以下渠道获得帮助:

- 代理商或代表
- 当地销售办事处
- 应用工程师 (ESE)
- 技术支持

客户应联系其代理商、代表或 ESE 寻求支持。当地销售办事处也可为客户提供帮助。本文档后附有销售办事处的联系方式。

也可通过 www.microchip.com/support 获得网上技术支持。

Microchip 器件代码保护功能

请注意以下有关 Microchip 器件代码保护功能的要点:

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术规范。
- Microchip 确信: 在正常使用的情况下, Microchip 系列产品非常安全。
- 目前, 仍存在着用恶意、甚至是非法的方法来试图破坏代码保护功能的行为。我们确信, 所有这些行为都不是以 Microchip 数据手册中规定的操作规范来使用 Microchip 产品的。这种试图破坏代码保护功能的行为极可能侵犯 Microchip 的知识产权。
- Microchip 愿与那些注重代码完整性的客户合作。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。代码保护功能处于持续发展中。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。任何试图破坏 Microchip 代码保护功能的行为均可视为违反了《数字器件千年版权法案 (Digital Millennium Copyright Act)》。如果这种行为导致他人在未经授权的情况下, 能访问您的软件或其他受版权保护的成果, 您有权依据该法案提起诉讼, 从而制止这种行为。

法律声明

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分, 因为其中提供了有关 Microchip 产品性能和使用情况的有用信息。Microchip Technology Inc. 及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 Microchip Technology Inc. 的英文原版文档。

本出版物中提供的信息仅仅是为方便您使用 Microchip 产品或使用这些产品来进行设计。本出版物中所述的器件应用信息及其他类似内容仅为您提供便利，它们可能由更新之信息所替代。确保应用符合技术规范，是您自身应负的责任。

Microchip “按原样”提供这些信息。Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对非侵权性、适销性和特定用途的适用性的暗示担保，或针对其使用情况、质量或性能的担保。

在任何情况下，对于因这些信息或使用这些信息而产生的任何间接的、特殊的、惩罚性的、偶然的或间接的损失、损害或任何类型的开销，Microchip 概不承担任何责任，即使 Microchip 已被告知可能发生损害或损害可以预见。在法律允许的最大范围内，对于因这些信息或使用这些信息而产生的所有索赔，Microchip 在任何情况下所承担的全部责任均不超出您为获得这些信息向 Microchip 直接支付的金额（如有）。如果将 Microchip 器件用于生命维持和/或生命安全应用，一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切损害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任。除非另外声明，在 Microchip 知识产权保护下，不得暗中以其他方式转让任何许可证。

商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、Adaptec、AnyRate、AVR、AVR 徽标、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、chipKIT、chipKIT 徽标、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、FlashFlex、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemi 徽标、MOST、MOST 徽标、MPLAB、OptoLyzer、PackTime、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32 徽标、PolarFire、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SenGenuity、SpyNIC、SST、SST 徽标、SuperFlash、Symmetricom、SyncServer、Tachyon、TimeSource、tinyAVR、UNI/O、Vectron 及 XMEGA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的注册商标。

AgileSwitch、APT、ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、FlashTec、Hyper Speed Control、HyperLight Load、IntelliMOS、Libero、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plus 徽标、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、WinPath 和 ZL 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、Augmented Switching、BlueSky、BodyCom、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、Espresso T1S、EtherGREEN、IdealBridge、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Intelligent Paralleling、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、maxCrypto、maxView、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICKit、PICtail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、Ripple Blocker、RTAX、RTG4、SAM-ICE、Serial Quad I/O、simpleMAP、SimpliPHY、SmartBuffer、SMART-I.S.、storClad、SQI、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Switchtec、SynchroPHY、Total Endurance、TSHARC、USBCheck、VariSense、VectorBlox、VeriPHY、ViewSpan、WiperLock、XpressConnect 和 ZENA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 为 Microchip Technology Incorporated 在美国的服务标记。

Adaptec 徽标、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology 和 Symmcom 均为 Microchip Technology Inc. 在除美国外的国家或地区的注册商标。

GestIC 为 Microchip Technology Inc. 的子公司 Microchip Technology Germany II GmbH & Co. KG 在除美国外的国家或地区的注册商标。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2021, Microchip Technology Incorporated 版权所有。

ISBN: 978-1-5224-7818-8

质量管理体系

有关 Microchip 的质量管理体系的信息，请访问 www.microchip.com/quality。

全球销售及服务中心

美洲	亚太地区	亚太地区	欧洲
公司总部 2355 West Chandler Blvd. Chandler, AZ 85224-6199 电话: 480-792-7200 传真: 480-792-7277 技术支持: www.microchip.com/support 网址: www.microchip.com 亚特兰大 德卢斯, 佐治亚州 电话: 678-957-9614 传真: 678-957-1455 奥斯汀, 德克萨斯州 电话: 512-257-3370 波士顿 韦斯特伯鲁, 马萨诸塞州 电话: 774-760-0087 传真: 774-760-0088 芝加哥 艾塔斯卡, 伊利诺伊州 电话: 630-285-0071 传真: 630-285-0075 达拉斯 阿迪森, 德克萨斯州 电话: 972-818-7423 传真: 972-818-2924 底特律 诺维, 密歇根州 电话: 248-848-4000 休斯顿, 德克萨斯州 电话: 281-894-5983 印第安纳波利斯 诺布尔斯维尔, 印第安纳州 电话: 317-773-8323 传真: 317-773-5453 电话: 317-536-2380 洛杉矶 米慎维荷, 加利福尼亚州 电话: 949-462-9523 传真: 949-462-9608 电话: 951-273-7800 罗利, 北卡罗来纳州 电话: 919-844-7510 纽约, 纽约州 电话: 631-435-6000 圣何塞, 加利福尼亚州 电话: 408-735-9110 电话: 408-436-4270 加拿大 - 多伦多 电话: 905-695-1980 传真: 905-695-2078	澳大利亚 - 悉尼 电话: 61-2-9868-6733 中国 - 北京 电话: 86-10-8569-7000 中国 - 成都 电话: 86-28-8665-5511 中国 - 重庆 电话: 86-23-8980-9588 中国 - 东莞 电话: 86-769-8702-9880 中国 - 广州 电话: 86-20-8755-8029 中国 - 杭州 电话: 86-571-8792-8115 中国 - 香港特别行政区 电话: 852-2943-5100 中国 - 南京 电话: 86-25-8473-2460 中国 - 青岛 电话: 86-532-8502-7355 中国 - 上海 电话: 86-21-3326-8000 中国 - 沈阳 电话: 86-24-2334-2829 中国 - 深圳 电话: 86-755-8864-2200 中国 - 苏州 电话: 86-186-6233-1526 中国 - 武汉 电话: 86-27-5980-5300 中国 - 西安 电话: 86-29-8833-7252 中国 - 厦门 电话: 86-592-2388138 中国 - 珠海 电话: 86-756-3210040	印度 - 班加罗尔 电话: 91-80-3090-4444 印度 - 新德里 电话: 91-11-4160-8631 印度 - 浦那 电话: 91-20-4121-0141 日本 - 大阪 电话: 81-6-6152-7160 日本 - 东京 电话: 81-3-6880-3770 韩国 - 大邱 电话: 82-53-744-4301 韩国 - 首尔 电话: 82-2-554-7200 马来西亚 - 吉隆坡 电话: 60-3-7651-7906 马来西亚 - 槟榔屿 电话: 60-4-227-8870 菲律宾 - 马尼拉 电话: 63-2-634-9065 新加坡 电话: 65-6334-8870 台湾地区 - 新竹 电话: 886-3-577-8366 台湾地区 - 高雄 电话: 886-7-213-7830 台湾地区 - 台北 电话: 886-2-2508-8600 泰国 - 曼谷 电话: 66-2-694-1351 越南 - 胡志明市 电话: 84-28-5448-2100	奥地利 - 韦尔斯 电话: 43-7242-2244-39 传真: 43-7242-2244-393 丹麦 - 哥本哈根 电话: 45-4485-5910 传真: 45-4485-2829 芬兰 - 埃斯波 电话: 358-9-4520-820 法国 - 巴黎 电话: 33-1-69-53-63-20 传真: 33-1-69-30-90-79 德国 - 加兴 电话: 49-8931-9700 德国 - 哈恩 电话: 49-2129-3766400 德国 - 海布隆 电话: 49-7131-72400 德国 - 卡尔斯鲁厄 电话: 49-721-625370 德国 - 慕尼黑 电话: 49-89-627-144-0 传真: 49-89-627-144-44 德国 - 罗森海姆 电话: 49-8031-354-560 以色列 - 若那那市 电话: 972-9-744-7705 意大利 - 米兰 电话: 39-0331-742611 传真: 39-0331-466781 意大利 - 帕多瓦 电话: 39-049-7625286 荷兰 - 德卢内市 电话: 31-416-690399 传真: 31-416-690340 挪威 - 特隆赫姆 电话: 47-72884388 波兰 - 华沙 电话: 48-22-3325737 罗马尼亚 - 布加勒斯特 电话: 40-21-407-87-50 西班牙 - 马德里 电话: 34-91-708-08-90 传真: 34-91-708-08-91 瑞典 - 哥德堡 电话: 46-31-704-60-40 瑞典 - 斯德哥尔摩 电话: 46-8-5090-4654 英国 - 沃金厄姆 电话: 44-118-921-5800 传真: 44-118-921-5820