

基于 NB-IoT 的室外环境空气质量 在线监测系统设计

董莹¹, 孙拥军²

(1. 山东省潍坊生态环境监测中心, 山东 潍坊 261041;

2. 潍坊市工业发展促进中心, 山东 潍坊 261041)

摘要: 为精准计量污染性气体在室外环境中的浓度水平, 实现对室外环境空气质量的准确监测, 设计基于 NB-IoT 的室外环境空气质量在线监测系统; 利用电源电路输出的电量信号, 调节微控制器、温湿度传感器、细颗粒物浓度传感器、二氧化碳浓度传感器四类应用设备之间的实时连接关系, 完成空气质量在线监测的硬件终端平台设计; 借助 NB-IoT 密钥文本, 计算空口协议栈表达式, 实现对监测系统安全运行机制的完善; 分别从 main 函数、数据信息采集函数、监测任务函数 3 个角度着手, 求解监测系统运行过程中的主要应用函数, 并根据具体计算数值, 调节各级硬件设备之间的连接关系, 完成基于 NB-IoT 的室外环境空气质量在线监测系统设计; 实验结果表明, NB-IoT 机制作用下, 在线监测系统在不同温度、湿度条件下, 均可以将二氧化碳气体实测浓度与真实浓度之间的差值控制在 3 ppm 以内, 与远距离多通道型监测系统相比, 更符合室外环境空气质量监测的实际应用需求。

关键词: NB-IoT 密钥; 室外环境; 空气质量监测; 浓度传感器; 空口协议栈

Design of Outdoor Air Quality Online Monitoring System Based on NB-IoT

DONG Ying¹, SUN Yongjun²

(1. Shandong Weifang Eco-environment Monitoring Center, Weifang 261041, China;

2. Weifang Industrial Development Promotion Center, Weifang 261041, China)

Abstract: In order to accurately measure the concentration level of polluting gas in outdoor environment and realize the accurate monitoring of outdoor air quality, an online monitoring system of the outdoor air quality based on narrow band internet of things (NB-IoT) is designed. Using the power signal output by the power supply circuit, adjust the real-time connection relationships of the microcontroller, temperature and humidity sensor, fine particle concentration sensor, carbon dioxide concentration sensor, and complete the hardware terminal platform design for the online air quality monitoring. With the help of the NB-IoT key text, the air interface protocol stack expression is calculated to improve the security operation mechanism of the monitoring system. Starting from the main function, data information collection function, and monitoring task function, the main application functions in the operation process of the monitoring system are solved, and the connection relationship between the hardware devices at all levels are adjusted through the specific calculation values. The NB-IoT online monitoring system is designed for outdoor ambient air quality. The experimental results show that under the action of the NB-IoT mechanism, the online monitoring system can control the difference between the measured concentration of carbon dioxide gas and real concentration within 3ppm under the different temperature and humidity conditions, compared with the long-distance multi-channel monitoring system, the system meets the practical application requirements of outdoor ambient air quality monitoring.

Keywords: NB-IoT key; outdoor environment; air quality monitoring; concentration sensor; air interface protocol stack

0 引言

空气质量可以反映出大气污染程度, 它是依据空气中污染性物质的浓度高低水平来作出判断的。从宏观角度来讲, 空气污染是一种极为复杂的环境现象, 在所选监测区域中, 空气污染物浓度受到多种因素的共同影响^[1]。在对室外环境空气质量进行监测时, 如何精准计量污染性气体

的浓度水平, 是一项亟待解决的应用难题。传统远距离多通道型监测系统利用气体检测传感器, 完成空气样本选型, 再根据 PAMS 标准, 测试气体样本的表征性能, 分析已获取样本中污染性气体颗粒的浓度水平^[2]。然而随着温度、湿度条件的改变, 利用该系统所得到的污染性气体浓度测量值并不能真实反映出室外环境的空气质量水平, 这

收稿日期: 2022-06-22; 修回日期: 2022-07-28。

作者简介: 董莹(1990-), 女, 山东寿光人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事环境监测方向的研究。

引用格式: 董莹, 孙拥军. 基于 NB-IoT 的室外环境空气质量在线监测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(2): 28-33.

就导致所选用系统难以实现对室外环境空气质量的准确监测。

为提升室外环境空气质量在线监测系统的监测精度, 引入 NB-IoT 技术来精准计量污染性气体在室外环境中的浓度水平。在互联网应用系统中, 基于 NB-IoT (narrow band internet of things, 窄带物联网) 密钥的数据信息连接带宽能够达到 180 kHz, 并可以根据频谱资源的存储数值, 调节连接协议的部署形式。为保证 NB-IoT 密钥的稳定作用能力, 在部署互联网系统时, 需要 Stand-alone 协议、Guard-band 协议的共同配合^[3]。Stand-alone 协议占用 NB-IoT 密钥中未被使用的信息频段, 在网络主机长时间保持正常运转行为的情况下, 该类型应用协议对于基站设备的要求相对较高, 只有当下级连接资源块能够完全负载传输信息参量时, 才有可能确保主机与负载设备之间连接关系的稳定性^[4]。Guard-band 协议具有扩展非连续接收、间歇性接收两种作用模式, 在前一种执行状态下, 互联网主机可以直接存储数据信息参量, 并可以借助寄存器设备, 更改信息文本的传输目的地; 在后一种执行状态下, 互联网主机具有一定的信息过滤能力, 可以将完成删减处理的数据包文件反馈给寄存器芯片, 以供其对这些数据信息参量进行深度处理与分析。

为此, 以 NB-IoT 密钥协议为基础, 设计一种新型的室外环境空气质量在线监测系统, 并通过比对实验的方式, 突出该系统的实际应用价值。

1 空气质量在线监测终端硬件设计

室外环境空气质量在线监测系统的硬件终端平台由电源电路、微控制器、温湿度传感器、细颗粒物浓度传感器、二氧化碳浓度传感器五部分共同组成, 本章节将针对上述几类应用结构的具体连接形式展开研究。

1.1 电源电路

电源电路能够为室外环境空气质量在线监测系统提供稳定的电量供应, 在 +VCC 端口、-VDD 端口之间, 可以借助 IC1 设备, 对电量信号进行整合处理, 一方面稳定温湿度传感器、细颗粒物浓度传感器等硬件设备两端的负载电压数值, 另一方面也可以避免因电量信号堆积而造成的污染性气体实测浓度失准的问题^[5]。在室外环境空气质量在线监测系统中, 一个电量信号对应一个污染性气体实测浓度数据, 当监测主机进入快速运行状态后, 实测数据由微控制器元件向着温湿度传感器、细颗粒物浓度传感器、二氧化碳浓度传感器不断传输, 此时电源电路中的电信号输出量也会不断增大, 理论上讲, 二者的数值水平始终相等。为避免电量信号、污染性气体实测浓度数据之间的数值匹配关系出现变化, IC1 设备也必须具有一定的电信号寄存能力^[6]。完整的电源电路连接结构如图 1 所示。

电量控制器负责接收 DB 元件输出的电信号参量, 然而随着气体实测浓度数据传输量的改变, 二者之间的实时连接关系也会出现变化。

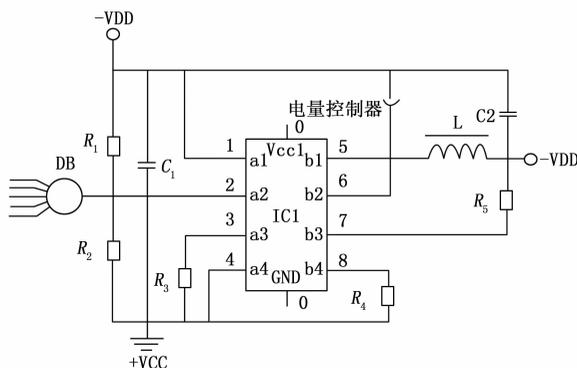


图 1 电源电路结构图

1.2 微控制器

微控制器模块作为电源电路的下级连接结构, 其执行能力决定了系统主机对于室外环境空气质量的监测准确性。在室外环境空气质量在线监测系统中, 微控制器设备负责将电量信号与污染性气体实测浓度数据匹配起来, 由于系统主机只能直接控制电量信号的输出量数值, 所以在采集浓度数据样本时, 还需根据 EEPROM 芯片的实时运行状态, 来判断监测指令的当前执行强度^[7]。EEPROM 芯片具有全双工、半双工两种运行模式, 如图 2 所示。

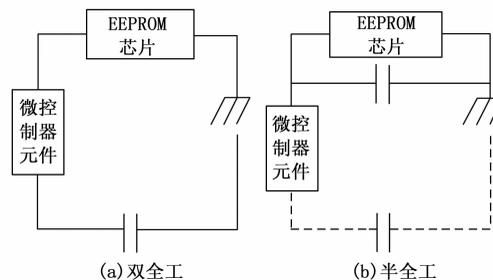


图 2 微控制器模块的运行模式

当 EEPROM 芯片处于全双工运行模式时, 微控制器设备开始全面接收传感器元件输出的污染性气体实测浓度数据, 当前情况下, 电源电路中的 IC1 结构不断释放暂存于其内部的电量信号; 当 EEPROM 芯片处于半双工运行模式时, 微控制器设备主要负责记录传感器元件输出的污染性气体实测浓度数据, 当前情况下, 电源电路中的 IC1 结构停止电量信号释放行为, 直至系统监测主机能够将现有气体浓度实测数据与电量信号完全匹配起来^[8]。

1.3 温湿度传感器

温湿度传感器由核心传感元件、CRC 接线过渡装置两部分共同组成。核心传感元件包含温度转换器、湿度转换器、A/D 转换设备和数据信息存储器。在实际应用过程中, 温度转换器与温度数据采集器相连、湿度转换器与湿度数据采集器相连, 两者都可以感知室外环境中的空气质量水平, 并可以将采集到的数据信息参量以样本文件的形式反馈给 A/D 转换设备^[9-10]。本文采用 OM-TH-B801 型温湿度

传感器, 数据信息存储器负责暂时存储污染性气体实测浓度数据, 当 A/D 转换设备接收到电量输出信号时, 已被存储的数据信息参量自发回流至微控制器模块, 以供其对已制定监测指令的真实性进行核实, 可以设置温湿度上下阈值范围来进行报警设置。A/D 转换设备实现了由文本信息到数据包文件的转换。CRC 接线过渡装置提供了时钟线、数据线、扩展接口三类接线节点, 可以将温湿度传感器设备与微控制器模块、细颗粒物浓度传感器、二氧化碳浓度传感器连接起来。温湿度传感器内部结构如图 3 所示。

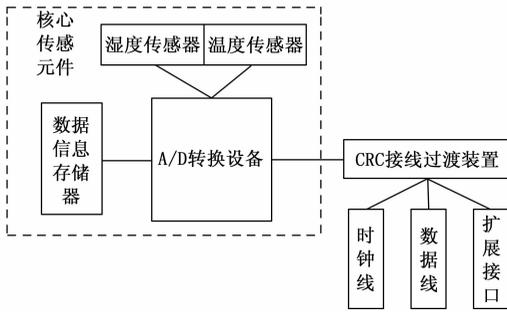


图 3 温湿度传感器内部结构示意图

由于温湿度传感器可以同时监测室外环境空气质量的温度与湿度变化情况, 所以 A/D 转换设备应对采集得到的数据信息参量所属类别进行辨别。

1.4 细颗粒物浓度传感器

细颗粒物浓度传感器负责提取室外环境中具有污染性的颗粒状物质, 可以借助外部传感网络将记录到的数据信息样本反馈给系统监测主机, 以供其对室外环境空气质量水平进行精准评估^[11-12]。本文采用 APM10-激光颗粒物检测传感器, 由于空气环境中细颗粒污染物粒子很难被肉眼直接观察到, 所以为使传感器元件能够得到精准的样本提取物, 还需在实施监测时, 借助红外设备投射出的光线, 标记颗粒污染物的实际运动轨迹。细颗粒物浓度传感器模块的内部元件连接原理如图 4 所示。

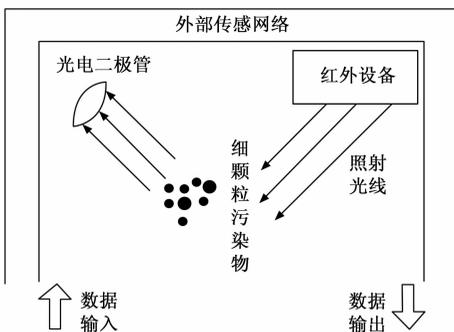


图 4 细颗粒物浓度传感器内部原理图

在监测细颗粒污染物时, 为避免多余红外光线对空气环境造成二次污染, 还需设置独立的光电二极管装置, 用于吸收红外设备发出的照射光线。

1.5 二氧化碳浓度传感器

二氧化碳是造成温室效应的主要气体, 在大气环境中, 若二氧化碳浓度过高, 不但会造成空气质量水平的大幅下降, 还会随着气体流通作用, 将这种区域性污染扩散至周围环境中^[13]。针对二氧化碳气体的监测需要借助 COZIR-W 设备 (监测原理如图 5 所示), 将其与滤波电容元件直接相连, 不但可以根据碳元素与氧元素的含量水平, 计算二氧化碳气体的浓度数值, 还可以感知温度、湿度等环境因素的变化情况。

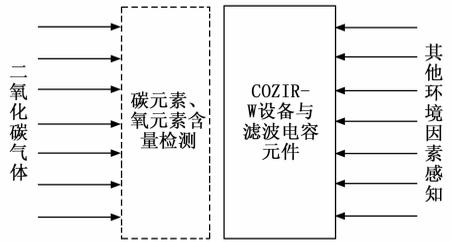


图 5 二氧化碳浓度传感器监测原理

为将传感器元件所监测到的数据信息参量反馈给系统主机, COZIR-W 设备所采集到的二氧化碳浓度数据会自动转换成 .txt 文本的存储形式^[14]。

2 基于 NB-IoT 的室外环境空气质量在线监测系统软件设计

在线监测系统安全机制可以协调硬件终端设备之间的连接关系, 本章节将从 NB-IoT 密钥文本、空口协议栈两个角度, 通过 NB-IoT 密钥同时获取硬件传感器模块单元、微控制器模块输出的空气质量数据信息文本, 能够实现海量数据的安全传输, 提升室外环境空气质量在线监测系统的数据处理能力。设计 main 函数、数据信息采集函数、监测任务函数表达式, 实现室外环境空气质量在线监测。

2.1 NB-IoT 密钥

对于室外环境空气质量在线监测系统而言, NB-IoT 密钥可以约束传感器模块单元与电源电路之间的实时连接关系, 其作用行为包含数据信息加密、监测指令调节两个环节, 在室外环境空气质量在线监测系统中, NB-IoT 密钥的作用对象并不局限于一种或几种终端设备, 而是会随着系统运行状态的变化, 来回作用于所有处于连接状态的终端设备元件。

在数据信息加密处理阶段, NB-IoT 密钥可以将系统监测主机所采集到的空气质量数据由明文状态改写成密文状态^[15]。设 α 表示一个随机选取的空气质量数据信息样本, P_0 表示编码系数的初始赋值, i 表示基于 NB-IoT 密钥的空气质量数据转码系数, \bar{P} 表示系统监测主机内的编码系数值, \hat{u} 表示空气质量数据密文信息样本的监测特征。联立上述物理量, 可将数据信息加密处理阶段的 NB-IoT 密钥作用表达式定义为:

$$P(\alpha) = P_0 \cdot [i(\alpha) \cdot \hat{u} \cdot \bar{P}] \quad (1)$$

在监测指令调节处理阶段, NB-IoT 密钥的作用目的在于同时获取传感器模块单元、微控制器模块输出的空气质量数据信息文本, 且随着数据信息输出量的增大, NB-IoT 密钥的编码安全等级也会不断提高^[16]。设 β 表示传感器模块单元中的信息文本输出系数, ε 表示微控制器模块中的信息文本输出系数, e 表示数据信息编码参量的初始赋值结果, R 表示基于 NB-IoT 密钥所选择的数据样本特征值, \tilde{y} 表示与微控制器模块匹配的数据样本选值系数。

监测指令调节处理阶段的 NB-IoT 密钥作用表达式定义为:

$$\delta(\alpha) = -\beta \frac{R}{\sum_{\varepsilon=1}^{+\infty} \varepsilon \cdot \tilde{y}} \quad (2)$$

联立式 (1)、式 (2), 可将 NB-IoT 密钥对于室外环境空气质量在线监测系统的作用表达式定义为:

$$Q(\alpha) = P(\alpha) \times \delta(\alpha) \quad (3)$$

2.2 空口协议栈

空口协议栈是在 NB-IoT 密钥基础上, 定义的监测数据选择算法, 能够准确判定温湿度传感器、细颗粒物浓度传感器、二氧化碳浓度传感器三类传感器模块所采集到的数据信息参量是否满足系统主机的监测需求, 并可以借助微控制器设备, 将满足协议栈判别需求的数据信息参量输入至系统数据库之中, 以供监测主机的调取与利用^[17-18]。设 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 是两个随机选取的空气质量数据监测样本, ω_1 表示基于样本数据 ε_1 的 NB-IoT 密钥选值特征, ω_2 表示基于样本数据 ε_2 的 NB-IoT 密钥选值特征, ΔY 表示空气质量数据的单位监测量。

联立式 (3), 可将基于 NB-IoT 密钥的监测数据空口协议栈表达式定义为:

$$\varphi = \frac{Q(\alpha)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot |\Delta Y|} \cdot \ln \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (4)$$

采用 NB-IoT 密钥及空口协议栈算法, 能够实现室外环境空气质量数据的精准传输, 保障微控制器、温湿度传感器等多个系统应用模块的数据传输准确性。

3 应用函数设计

在 NB-IoT 密钥体系的基础上, 求解 main 函数、数据信息采集函数、监测任务函数表达式, 并根据具体计算数值, 调节室外环境空气质量在线监测系统硬件设备之间的实时连接关系。

3.1 main 函数

main 函数负责在线监测系统中的所有数据初始化与主任务创建工作, 能够根据 NB-IoT 密钥表达式, 调节微控制器终端模块对于空气质量数据的采集能力, 一方面使得系统传感器单元能够准确感知室外环境中的空气质量水平, 另一方面也可以避免电信号参量出现过度输出的行为^[19-20]。由于 NB-IoT 密钥体系可以同时作用于微控制器、温湿度传感器等多个系统应用模块, 所以在求解 main 函数时, 要求

空气质量数据在系统各个模块单元中的传输速率必须保持一致。设 q 表示基于 NB-IoT 密钥的空气质量数据采集向量, t 表示时间系数的初始赋值, η 表示空气质量数据在系统监测主机中的传输效率, f 表示监测执行任务的初始化系数, γ 表示室外环境中的气体污染特征。联立上述物理量, 可将室外环境空气质量在线监测系统的 main 函数表达式定义为:

$$A = \frac{1}{q} \sum_{t=1}^{+\infty} \frac{\eta \cdot \varphi}{|f(\gamma)^2|} \quad (5)$$

由于空气质量数据在监测系统传输速率不可能为零, 所以 main 函数的求解结果也不可能等于零。

3.2 数据信息采集函数

对于在线监测系统运行主机而言, 数据信息采集函数可以判断传感器模块是否已经完成对空气质量数据的提取与处理^[21]。若将 main 函数看作一个既定已知条件, 则可认为数据信息采集函数取值大于零, 则表示系统传感器模块已经完成对空气质量数据的提取, 且计算数值越大, 代表传感器模块对于数据信息的处理速度越快; 若数据信息采集函数取值小于零, 则表示系统传感器模块尚未完成对空气质量数据的提取, 微控制器设备还需继续对电量信号与数据信息参量进行匹配处理^[22]。按照 NB-IoT 密钥作用标准, 可将在线监测系统数据信息采集函数表示为:

$$D = \tilde{H} \times \left| \frac{\lambda \cdot A}{g^{t+\kappa} \cdot \bar{v}^2} \right| \quad (6)$$

式中, \tilde{H} 表示监测系统运行主机中的空气质量数据提取向量, λ 表示信息参量感应系数, g 表示数据信息提取特征值, κ, \bar{v} 表示两个不相等的的数据样本采集权限指标, \bar{v} 表示数据信息参量在系统传感器模块中的传输速率均值。与 main 函数相比, 数据信息采集函数对于监测系统运行主机的约束作用能力更强, 随着空气质量数据累积量的增大, 该函数表达式的计算数值也会不断增大。

3.3 监测任务函数

监测任务函数决定了系统主机对于室外环境空气质量数据的实时处理能力。从宏观角度来讲, 监测任务函数影响了传感器模块对于空气质量数据的提取速率, 且在既定取值区间内, 数据信息参量的赋值情况会直接影响函数表达式的求解结果^[23-24]。设 ω 表示空气质量监测指令赋值向量, 且 $\omega \neq 0$ 的不等式条件恒成立, c, x 表示两个不相等的空气质量数据提取度量值, θ 表示瞬时取值向量, θ_0 表示基于向量 θ 的空气质量监测权值, 联立上述物理量, 可将监测任务函数定义为:

$$L = \frac{\omega}{\sqrt{(D \times [c + x] \theta_0)}} \quad (7)$$

main 函数、数据信息采集函数、监测任务函数均可以约束室外环境空气质量在线监测系统的实时运行能力, 故而在 NB-IoT 密钥安全机制的基础上, 为实现对空气质量数据的按需提取与处理, 应综合考虑各项应用函数表达式的实际计算取值结果。

4 实验分析

4.1 实验准备

为保障室外环境中的空气质量水平，就必须对污染性气体的浓度水平进行精准计量。本次实验以二氧化气体作为实验对象，将温度传感器、湿度传感器、监测芯片安装在一台搭载 Windows 10 操作系统的实验主机中，分别利用基于 NB-IoT 的在线监测系统、远距离多通道型监测系统对所选实验主机进行控制，其中前者作为实验组、后者作为对照组。该系统实现了对工业仓库环境空气质量的在线监测。设置系统的各个模块设备型号，应用 NB-IoT 技术获取所有处于连接状态的终端设备元件的采集数据，实现系统建立。系统建立完毕，将进行现场检测，以检测仓库中的环境。观察 12 小时，每 2 小时记录一次，获取工业仓库环境空气质量在线监测数据。

表 1 反映了本次实验所选实验仪器的具体型号。

表 1 实验设备

设备	信号
监测芯片	OHR-WS10G
温度传感器	SW-6004
湿度传感器	RS-ZSYC
操作系统	Windows 10
空气样本采样设备	ECO-12W 环境监测仪
滤膜	40 mm
粒子切割器	PM1.0
显示器	Vostro 3 681

本次实验必须严格控制滤膜网眼大小，在保证二氧化碳气体顺利进入采样设备的同时，过滤其他类型的气体分子。

4.2 实验流程

在实验过程中，首先调节温度传感器，使实验温度分别等于 40℃、50℃、60℃，记录在两种不同温度条件下，二氧化碳气体的实测浓度数值；然后调节湿度传感器，使实验湿度分别等于 30%、40%、50%，记录在两种不同湿度条件下，二氧化碳气体的实测浓度数值；最后，将所得二氧化碳气体的实验数值与真实浓度数值进行对比，总结实验规律。

表 2 给出了不同温湿度条件下二氧化碳气体的真实浓度数值。

表 2 二氧化碳气体的真实浓度

温湿度条件		浓度/ppm
温度/℃	40	359
	50	371
	60	385
湿度/%	30	707
	40	715
	50	726

分析表 2 可知，随着温度水平的升高，二氧化碳气体在室外空气环境中的浓度数值会不断增大；随着湿度水平的升高，二氧化碳气体在室外空气环境中的浓度数值也会不断增大。

4.3 数据统计

表 3 反映了不同温度条件下，二氧化碳气体的实测浓度数值。

表 3 温度条件对二氧化碳气体浓度的影响

温度/℃	实验次数	实验组/ppm	对照组/ppm
40	1	357	365
	2	357	365
	3	357	364
50	1	371	367
	2	372	367
	3	371	367
60	1	386	380
	2	385	380
	3	385	380

分析表 3 可知，当实验温度等于 40℃、50℃、60℃ 时，实验组二氧化碳气体浓度实测均值分别为 357 ppm、371 ppm、385 ppm，与其真实浓度之间的差值分别为 2 ppm、0 ppm、0 ppm，对照组二氧化碳气体浓度实测均值分别为 365 ppm、367 ppm、380 ppm，与其真实浓度之间的差值分别为 6 ppm、4 ppm、5 ppm。

表 4 反映了不同湿度条件下，二氧化碳气体的实测浓度数值。

表 4 湿度条件对二氧化碳气体浓度的影响

湿度/%	实验次数	实验组/ppm	对照组/ppm
30	1	705	713
	2	706	713
	3	707	713
40	1	714	720
	2	714	721
	3	714	720
50	1	725	731
	2	726	731
	3	725	732

分析表 4 可知，当实验湿度等于 30%、40%、50% 时，实验组二氧化碳气体浓度实测均值分别为 706 ppm、714 ppm、725 ppm，与其真实浓度之间的差值分别为 1 ppm、1 ppm、1 ppm，对照组二氧化碳气体浓度实测均值分别为 713 ppm、720 ppm、731 ppm，与其真实浓度之间的差值分别为 6 ppm、5 ppm、13 ppm。

所选系统的精确度量差 σ 可表示为：

$$\sigma = \frac{|\omega_1 - \omega_0|}{\omega_0} \times 100\% \tag{8}$$

其中： ω_1 表示二氧化碳气体实测浓度， ω_0 表示二氧化碳

气体真实浓度。

利用所记录浓度指标的平均值对系统监测精确度量差 σ 进行计算, 具体数值如表 5 所示。

表 5 σ 指标数值统计

温度 / $^{\circ}\text{C}$	实验组 /%	对照组 /%	湿度 /%	实验组 /%	对照组 /%
40	0.56	1.67	30	0.14	0.85
50	0	1.08	40	0.14	0.70
60	0	1.30	50	0.14	1.79

分析表 5 可知, 整个实验过程中, 实验组 σ 指标平均值为 0.16%, 对照组 σ 指标平均值为 1.23%, 高于实验组数值。由于本次实验是为了准确检测二氧化碳气体浓度, 故应该将监测精确度量差控制在较低的数值水平, 即实验组系统更符合检测需求。

综上可知, 利用基于 NB-IoT 的室外环境空气质量在线监测系统所测得的二氧化碳气体浓度数值与其真实浓度更加接近, 故该系统在监测室外环境空气质量方面的应用能力更强。

5 结束语

室外环境空气质量在线监测系统以 NB-IoT 密钥体系作为完善系统安全机制的主要方法, 联合微控制器、温湿度传感器等多个终端模块, 确定 main 函数、数据信息采集函数、监测任务函数的实际约束作用能力。与远距离多通道型监测系统相比, 在线监测系统可将监测精确度量差数值控制在 1% 以下, 这在精准计量污染性气体在室外环境中的浓度含量可以起到一定的促进性影响作用。

参考文献:

[1] 伏晴艳, 李健军, 田旭东, 等. 我国重大活动环境空气质量监测预报评估技术体系的发展与思考 [J]. 中国环境监测, 2020, 36 (2): 1-9.

[2] 韩利, 张庆霞, 王杰, 等. 基于 5G 网络的变压器噪声在线监测系统的设计与开发 [J]. 环境工程, 2022, 40 (1): 184-189.

[3] 陈崇明, 吴瀛, 姚栋方, 等. 一种电能计量装置状态在线监测及远程诊断系统设计 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42 (4): 203-208.

[4] 曹迅, 陈伟章, 杜华忠, 等. 远距离多通道的无组织排放 VOCs 连续在线监测系统 [J]. 环境工程学报, 2021, 15 (2): 737-745.

[5] 智玉欣, 蔡小五, 赵海涛, 等. 一种宽电源电压输入多通道振荡器的电路设计 [J]. 微电子学与计算机, 2020, 37 (9): 1-5.

[6] 莫玉斌, 秦海鸿, 修强, 等. 基于 SiC BJT 典型双电源阻容驱动电路的开关过程分析及损耗最优的实现 [J]. 电工电能新技术, 2020, 39 (2): 30-39.

[7] 李金热, 杨新春, 王晓勇. 地空两用农业信息采集机器人研究—基于 STM32 微控制器 [J]. 农机化研究, 2020, 42 (3):

232-234.

[8] 程启明, 沈磊, 程尹曼, 等. 电网不平衡下基于 SGSC 和 Lyapunov 控制器的 DFIG 协调控制 [J]. 电机与控制学报, 2020, 24 (10): 27-37.

[9] 张平, 刘彬, 刘正达, 等. 基于氧化石墨烯涂层的侧抛光纤马赫—曾德尔干涉仪温湿度传感器 [J]. 光学学报, 2021, 41 (3): 39-48.

[10] 刘欣, 李金泽, 孙浩. 采用多模光纤级联布拉格光栅的温湿度传感器 [J]. 西安电子科技大学学报, 2020, 47 (3): 92-96.

[11] 李婷苑, 谭浩波, 王春林, 等. 卫星遥感 AOD 反演地面细颗粒物浓度方法与效果 [J]. 中国环境科学, 2020, 40 (1): 13-23.

[12] 吴丹, 张国城, 赵晓宁, 等. 极端颗粒物浓度环境对低成本光散射颗粒物传感器性能影响 [J]. 计量学报, 2021, 42 (12): 1670-1674.

[13] 陈凯彦, 朱斌成, 毛科技. 基于曲面拟合的 NDIR 单通道 CO₂ 气体传感器快速标定算法 [J]. 传感技术学报, 2021, 34 (1): 103-108.

[14] 邓祥征, 蒋思坚, 刘冰, 等. 全球二氧化碳浓度非均匀分布条件下碳排放与升温关系的统计分析 [J]. 自然资源学报, 2021, 36 (4): 934-947.

[15] 高萌萌, 孙志刚, 李硕, 等. 基于 NB-IoT 的区域空气质量监测系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (10): 55-59.

[16] 郭堂伟, 周涵, 俞啸, 等. 基于 ARM 嵌入式的医院空气质量实时检测系统设计与研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (4): 14-18.

[17] 魏春艳, 蔡晓秋, 王天银, 等. 基于量子不经意密钥传输的量子匿名认证密钥交换协议 [J]. 电子与信息学报, 2020, 42 (2): 341-347.

[18] 陈侃松, 李豪科, 阮玉龙, 等. 基于局部邻居节点和链路权值的改进 AODV 路由协议 [J]. 软件学报, 2021, 32 (4): 1186-1200.

[19] 李妍琳, 石小平, 胡锡健. 汾渭平原空气质量数据的函数型主成分分析 [J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2021, 38 (6): 675-680.

[20] 黄宇涛, 普运伟, 吴海潇, 等. 基于栈式自编码机和模糊函数主脊的雷达辐射源信号识别 [J]. 电波科学学报, 2020, 35 (5): 689-698.

[21] 郑国权, 窦健, 卢继哲, 等. 基于冗余分析的用电信息采集系统数据压缩方法 [J]. 电测与仪表, 2022, 59 (5): 70-77.

[22] 高宁, 李杰, 胡陈君, 等. 弹载 SINS/GPS 组合导航系统数据采集与同步设计 [J]. 中北大学学报(自然科学版), 2020, 41 (1): 55-59.

[23] 白云飞, 王代远, 朱庆洋, 等. 基于合闸行程曲线的 12 kV 真空断路器合闸速度在线监测研究 [J]. 高压电器, 2021, 57 (10): 59-65, 76.

[24] 甘若, 陈天伟, 郑旭东, 等. 改进的小波阈值函数对变形监测数据的去噪研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40 (1): 17-22.