

## 基于 NB-IoT 技术的环境温湿度监测系统的研制

茅敏敏<sup>1,2</sup>, 居家奇<sup>1</sup>, 欧阳玉玲<sup>3</sup>, 金妍<sup>1,2</sup>

(1. 上海应用技术大学理学院, 上海 201418; 2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所无线传感网与通信重点实验室, 上海 200050; 3. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201210)

**摘要:** 针对传统环境监测系统功耗高、维护成本高、不能实时监测的弊端, 研制了一种以单片机为主控制芯片的基于 NB-IoT 技术的环境温湿度监测系统, 并对主控制器的工作流程及通信模块的工作方式进行优化, 降低系统功耗。利用 NB-IoT 通信技术进行数据传输, 将温湿度传感器采集的数据信息通过基站和核心网发送给云平台, 运用中国移动物联网开放平台 (OneNET 平台) 实现终端设备与应用的相互连接。通过平台的拓展功能实现网页界面及手机应用程序的设计, 最终实现对环境参数的远程实时监测, 提高使用便捷度。

**关键词:** 环境监测; NB-IoT 技术; OneNET; 低功耗; 系统设计

**中图分类号:** TM391

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2021.00223

## Design and implementation of NB-IoT based environmental temperature and humidity monitoring system

MAO Minmin<sup>1,2</sup>, JU Jiaqi<sup>2</sup>, OUYANG Yuling<sup>3</sup>, JIN Yan<sup>1,2</sup>

1. College of Sciences, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China

2. Key Laboratory of Wireless Sensor Network & Communication, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

3. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China

**Abstract:** In view of the disadvantages of the traditional environmental monitoring system, such as high power consumption, high maintenance cost and no real-time monitoring, an environmental temperature and humidity monitoring system based on narrow band Internet of things (NB-IoT) technology was developed, which is mainly controlled by singlechip microcomputer. The work flow of the main controller and the working mode of the communication module were optimized to reduce the power consumption of the system. NB-IoT communication technology was utilized for data transmission to the cloud platform through the base station and core network. China Mobile IoT open platform (OneNET platform) was adopted to achieve the connection between the terminal device and the application, and expanded functions provided by the platform was used to design a mobile phone application to achieve the remote real-time monitoring of environmental parameters and improve the user's convenience.

**Key words:** environmental monitoring, NB-IoT technology, OneNET, low power consumption, system design

### 1 引言

温度和湿度作为环境监测的一项重要指标, 对于生产和生活都有着重要的意义。目前, 环境温、

湿度监测系统常用的通信技术是 ZigBee 或 Wi-Fi (wireless fidelity) 技术。其中, ZigBee 技术数据传输性能好、成本低、功耗中等, 但是其传输距离短 (10~100 m)、穿透能力差, 不太适用于户外通信<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2021-01-05; 修回日期: 2021-11-08

通信作者: 金妍, jinyan@sit.edu.cn

基金项目: 上海市联盟计划项目 (No.LM201836); 上海应用技术大学中青年教师科技人才发展基金资助项目 (No.ZQ2021-22)

**Foundation Items:** Shanghai Alliance Program (No.LM201836), The Fund for the Scientific and Technological Talent Development of Young and Middle-aged Teachers of Shanghai Institute of Technology (No.ZQ2021-22)

Wi-Fi 技术覆盖范围比 ZigBee 更广一些, 传输速率较好, 且穿透能力更好, 但传输距离仍然很短 (1~100 m), 传输过程容易出现丢包现象, 安全性低、功耗高、无线稳定性差<sup>[2]</sup>。近年来, 随着物联网技术的发展与成熟, 基于物联网技术的监测系统逐渐成为研究和应用的热点。

徐爽等<sup>[3]</sup>提出基于全球移动通信系统 (GSM, global system for mobile communications) 环境监测系统的设计与实现, 可以利用 GSM 模块通过短信的方式将环境参数发送给用户, 但只能定时定点地发送短信, 不能实时监测环境参数; 张金等<sup>[4]</sup>设计了基于现场可编程门阵列 (FPGA, field programmable gate array) 的环境参数在线监测系统, 解决了成本高、低功耗的问题, 可实现对环境参数的实时上报, 但只能通过 OneNET 云平台同步监测, 监测方式不便捷; 傅良康等<sup>[5]</sup>设计了基于 STM32 的环境远程监测系统, 采用 Wi-Fi 模块实现远程传输, 但是没有对传输过程进行优化, 功耗高、监测不便捷。与目前主流的环境监测系统相比, 本文设计的监测系统, 解决了维护成本高、功耗高、不能实时监测的缺点, 体积小、制作成本低, 采用 NB-IoT 技术实现数据远程传输, 并对传输过程进行优化来降低系统功耗, 最终成功研制了基于 NB-IoT 技术的低功耗环境温、湿度监测系统, 结合 OneNET 移动云平台, 设计了个人计算机 (PC, personal computer) 端界面及手机小程序 (App, application), 实现对环境参数的远程实时监测, 提高用户使用的便捷度。

其中, NB-IoT 模组工作在省电模式 (PSM, power saving mode) 下, 通过中断唤醒其工作, 发送数据后系统自动休眠。传感器实时采集温、湿度信息, 并通过 STM32L151 单片机传输数据至 NB-IoT 模组, 通过基站发送数据给 OneNET 平台, 最后用户通过移动云获取环境的温、湿度数据信息。该环境监测系统应用范围广泛, 可应用于仓储、地下车库、大棚等众多环境, 本文将设计的环境温、湿度监测系统应用于大棚中, 成功验证了系统的可行性与稳定性。

## 2 系统总体设计

该监测系统选用 STM32L151 单片机作为微系统控制器, 采用 DHT11 智能数字温湿度传感器实现环境温、湿度的采集, 利用 NB-IoT 通信技术进

行数据传输, 采集到的数字信号被直接送入微处理器进行处理, 数据通过轻量级机器对机器 (LWM2M, light weight machine to machine) 协议传输到 OneNET 移动云平台, 最终实现用户 PC 端的温、湿度信号远程监测。随后, 系统自动判断温、湿度数据是否超过设定阈值, 若超过设定阈值则自动报警, 需要专人进行相应处理。采集终端供电选用可充电式电池, 采集终端将数据发送至云平台后, 即进入休眠模式, 等待下一次唤醒信号再进行数据采集和发送, 从而实现节能和低功耗的目的。此系统成本低、使用便捷, 通过消息队列遥测传输 (MQTT, message queuing telemetry transport) 协议成功开发手机 App 供用户使用, 用户可以通过手机 App 实时监测大棚的温、湿度信息。

系统总体结构如图 1 所示。系统由温湿度传感器、物联网 (IoT, Internet of things) 基站、移动云平台和用户终端 (PC 端和手机端) 构成。设定好温湿度传感器采集数据的周期和频率, 采集到的数据通过 NB-IoT 模组经基站发送到云服务器, 用户可通过手机 App 查询温、湿度信息。

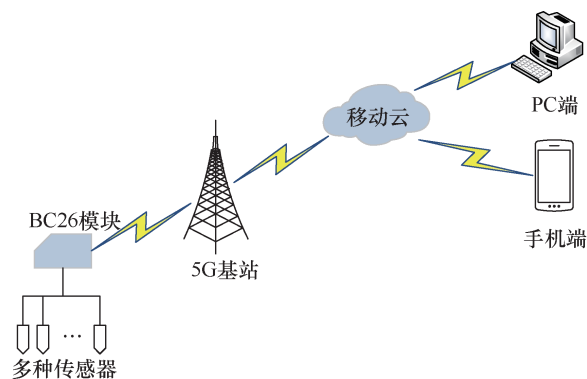


图 1 系统总体结构

## 3 系统硬件设计

NB-IoT 温、湿度无线监测系统总体设计框图如图 2 所示, 系统包括感知层、网络层和应用层 3 个层次, 其中网络层又包括传输层和平台层<sup>[6]</sup>。

感知层由 DHT11 温湿度传感器、STM32L151 微处理器和 NB-IoT 终端构成, 用于监测环境温、湿度, 并通过 NB-IoT 终端与无线网络进行通信。

传输层采用 NB-IoT 广域通信技术, 通过 NB-IoT 终端将传感器采集的数据上传到 IoT 基站。平台层使用 OneNET 移动云平台, 实现不同类型终端设备及不同应用平台的统一接入和管理, 确保互联互通<sup>[7]</sup>。

应用层即为客户端，可以通过 App 和 PC 端实时监测温、湿度的相关信息。

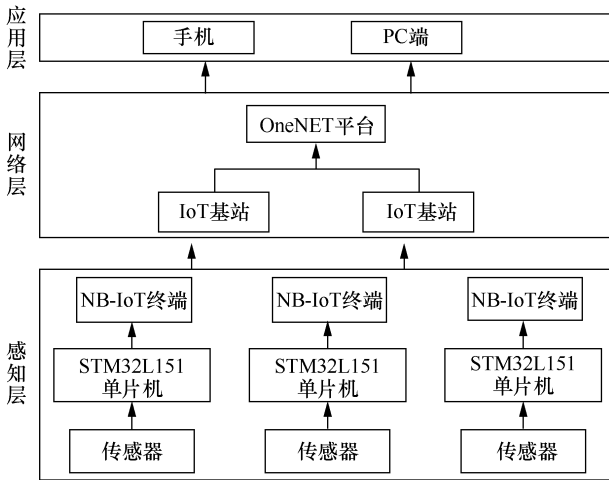


图2 NB-IoT 温、湿度监测系统总体设计框图

### 3.1 NB-IOT 终端低功耗设计

系统选用由 BC26 模块、滤波天线电路、用户识别模块 (SIM, subscriber identity module) 卡座、复位电路和网络指示灯组成的 NB-IoT 模组。其中, BC26 芯片是 NB-IoT 模组的核心, 其内置的 TCP/IP 协议可进行数据传输, 最大的优点就是可以实现全网通功能<sup>[8]</sup>。BC26 串口电平是 1.8 V, 如果直接跟外部设备通讯, 可能会导致电压超过阈值, 毁坏整个温、湿度采集终端。因此在硬件设计时, 加入电平转换芯片 YF08E, 可实现 1.2 V、1.8 V、3.3 V 和 5 V 电压节点之间的任意低压双向转换, 使得设备信号转成外部单片机可识别的信号。BC 核心板和电压转换电路如图 3 所示, 其中输出电压

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ref}} \times \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) = 1.8 \text{ V} \quad (1)$$

其中, 参考电压  $V_{\text{ref}} = 0.6 \text{ V}$ ,  $\frac{R_1}{R_2} = 2$ 。

### 3.2 微处理器低功耗设计

系统选用可充电式电池供电, 采用 STM32L151 单片机作为核心控制器, 具有低功率、高效能的优点, 同时还兼备 STM32F 和 STM8L 的优越功能<sup>[9]</sup>。片内外设资源丰富, 集成多个通信接口, 便于与无线传输驱动器连接。实时时钟 (RTC, real time clock) 功能可以实现定时唤醒功能, 不工作时系统休眠, 降低功耗, 此时单片机的 I/O 口均设为低电平输出, 时钟频率也为最低, 电流一般小于  $1 \mu\text{A}$ <sup>[10]</sup>。

STM32L151 单片机的硬件设计如图 4 所示, 系

统初始化后, 可以通过外部中断唤醒单片机, 发送数据后, NB 模块进入 PSM 模式, 单片机迅速休眠, 等待下一次唤醒。

## 4 系统软件设计

### 4.1 移动平均滤波器的设计

上海市奉贤区昼夜温差较小, 大棚环境的温、湿度等参数不会发生突变, 本文采用限幅滤波法对递推算法优化, 设计合适的移动平均滤波器。

将一段时间内连续的采样数据设成长度为  $N$  的队列, 测出一个新数据后, 将队列的首个数据去掉, 其余  $N-1$  个数据依次前移一位, 将新测量的数据插入队列的列尾, 形成新的队列, 并对新队列重复上述运算, 将  $n$  次后的结果作为最终采样结果。设输入值为  $x(n)$ , 最终采样值为  $y(n)$ , 队列长度为  $N$ , 则

$$y(n) = \frac{x(n) + x(n-1) + x(n-2) + \dots + x(n-N+1)}{N} \quad (2)$$

通过限幅滤波法对移动平均滤波器进行优化、判断被测信号的变化幅度、消除缓变信号中的尖峰干扰, 从而有效克服偶然因素引起的脉冲干扰。通过比较相邻两时刻的采样值  $y(n)$  和  $y(n+1)$ , 根据前一队列  $n$  个数据的离散程度, 确定两次采样值的最大偏差值  $\varepsilon$ , 如式(3)所示。若采样值超过最大偏差范围  $U$ , 如式(4)所示, 认为最新的采样值  $y(n+1)$  为非法值, 应删除, 用  $y(n)$  代替  $y(n+1)$ ; 若采样值未超过偏差范围, 认为数据有效, 加入队列。其中,  $\bar{X}$  为上一队列算术平均值。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

$$U = \bar{X} \pm \varepsilon \quad (4)$$

### 4.2 软件设计

系统通电后, 初始化单片机端口、中断和外接温湿度传感器等外部设备以及 NB-IoT 模块 (包括设置电信频段、自动找网、工作模式等), 打开定时器中断和串口中断, 通过定时器中断唤醒单片机及 NB 模块, 传感器开始工作, 检测环境的温、湿度信息, 并将检测到的数据信息发送给 NB-IoT 模块, 按照 LWM2M 协议将数据信息上传至 OneNET 平台, 平台接收到数据后反馈收到信号给 NB 终端。若 NB 终端未收到平台的反馈信息, 将周期性地监听平台的反馈数据 3 次, 若仍未收到平台的反馈信息, 将再一次发送数据给平台, 直至收到平台的反馈信息。收到反馈信息后, 系统自行判断温、湿度

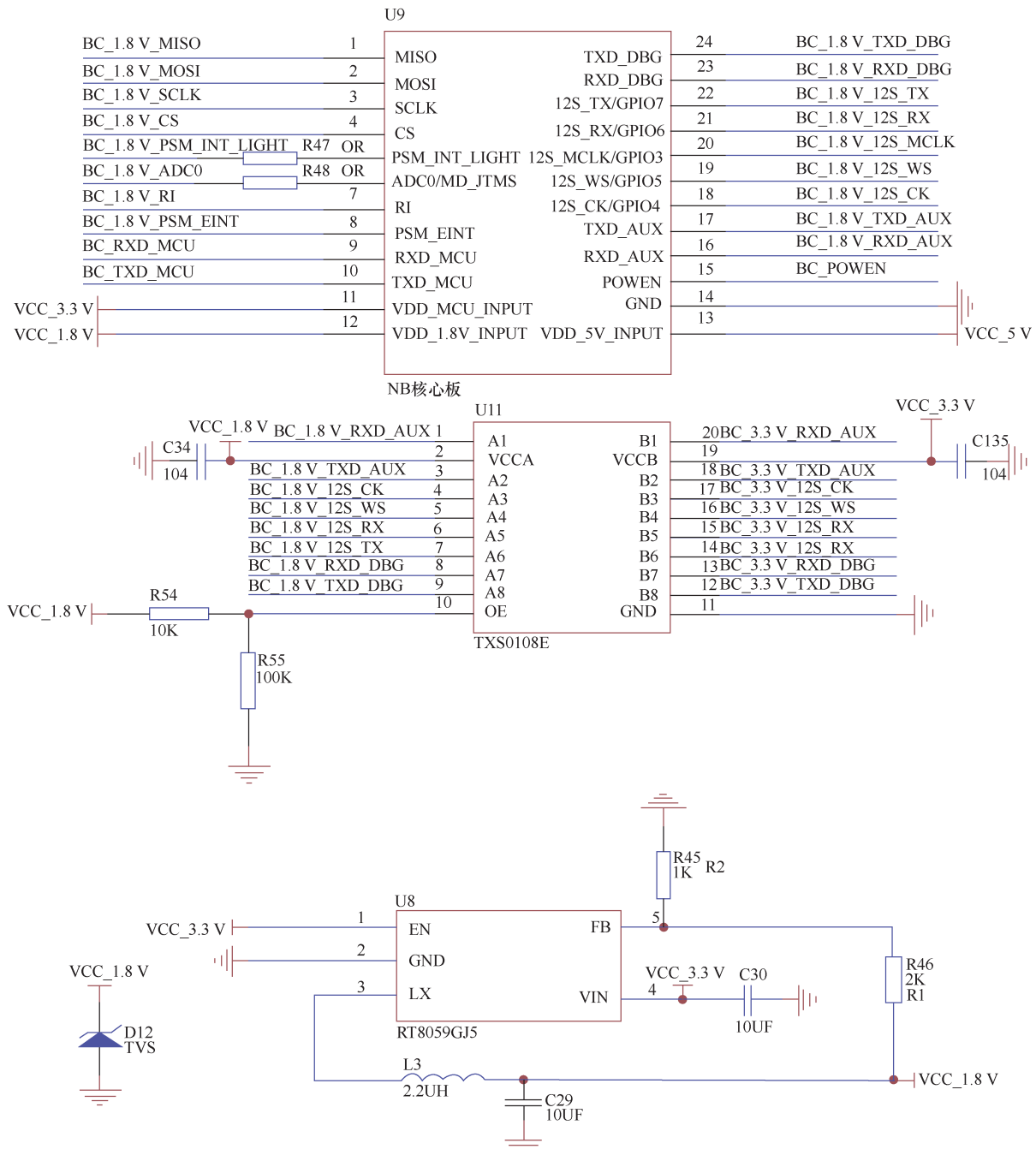


图3 BC核心板和电压转换电路图

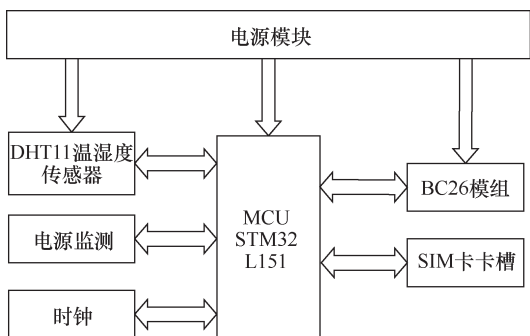


图4 STM32L151单片机的硬件设计

数据是否超过设定的阈值，若超过设定的阈值则自动报警。一个循环过后，NB模块进入PSM模式，同时单片机快速进入休眠状态，等待中断的下次唤醒，节省电能、降低功耗。基于NB-IoT技术的大棚无线监测系统的整体流程如图5(a)所示。

系统由可充电电池供电，对低功耗和省电的要求较高。新型NB-IoT通信有3种部署方式：(1)独立作为专用载波；(2)占用宽带LTE载波；(3)在现有的LTE载波的保护带内<sup>[11]</sup>。本系统采用第3种部署方

式作为 NB-IoT 的部署方式，其工作模式有两种：省电模式（PSM）和扩展不连续接收（eDRX, extended discontinuous reception）模式，均为低功耗模式<sup>[12]</sup>。

PSM 模式下，模块发送完数据后进入空闲状态，等待定时器激活，其间周期性监听核心网是否有数据发出。定时器超时后，模块休眠（即进入 PSM 模式），无法发送和接收数据，终端收不到下行数据，但仍保留网络注册信息，等待定时器激活后模块被唤醒，退出休眠状态，模块便能快速入网<sup>[13]</sup>，注册入网连接流程如图 5(b)所示。PSM 模式下模块大部分处于休眠状态，对下行业务反应不及时，但该模式下模块功耗最低。eDRX 模式为间断性睡眠模式，设置了一定的时间同步，延长信道寻呼间隔<sup>[14]</sup>，使下行链路可达性更好。相比而言，PSM 模式比 eDRX 模式更加省电、功耗更低。

本文设计的基于 NB-IoT 的温、湿度监测系统，被应用在大棚的温、湿度监测中，以验证系统的可行性。同一天中大棚的温、湿度不会发生较大的变化，因此设定系统的工作频率不用过高，采用功率更低的 PSM 工作模式，即可满足监测系统的应用条件。通过定时器来唤醒 NB-IoT 模组和单片机，发送数据，平台接收到数据后采用循环冗余校验（CRC, cyclic redundancy check）技术校验是否正确，确认正确后反馈收到信息给终端，终端收到反馈信息后，清空数组，整个系统快速进入休眠状态，等待下次被唤醒，串口中断流程如图 5(c)所示。

## 5 平台设计方法

### 5.1 模块标准化接入

终端设备要与 OneNET 平台进行数据交互，首先要完成 SDK 的移植工作，在“MCU+NB 通信模组”架构中，将 SDK 移植到 NB 通信模组中，并插入 AT 指令封装，通过调用 AT 相关指令，检查 BC26 状态（是否注册成功、卡号、IMEI 等相关信息）。

访问平台官网登录并注册用户，依据平台的标准接入流程在平台上创建产品及设备，获取项目 ID、设备 ID、auth\_info 等信息，其中，设备 ID、IMEI 要和 NB-IoT 模组保持一致。

本系统中 NB26 模块对接 OneNET 平台采用 LWM2M 协议和 CoAP（constrained application protocol）协议实现，使得温、湿度采集终端与移动 OneNET 云平台实现互联互通。其中，CoAP 协议属于轻量级的传输层协议，数据发送格式为 1 位起始位、6 位数据位、1 位校验位，采用 CRC 校验，以二进制码进行数据传输<sup>[15]</sup>，LWM2M 属于应用层协议（在 CoAP 协议之上），面向低功耗广域网市场，具有广覆盖、多连接、优架构、低功耗、低成本等优点<sup>[16]</sup>。本系统调试时，将波特率设置为 115 200 bit/s，服务器地址为 47.105.44.99，目的地址端口号为 866 971 030 936 061。

### 5.2 设备接入平台

本系统设计中，终端设备发送连接请求（携带鉴权信息）给平台，平台对鉴权信息鉴权，

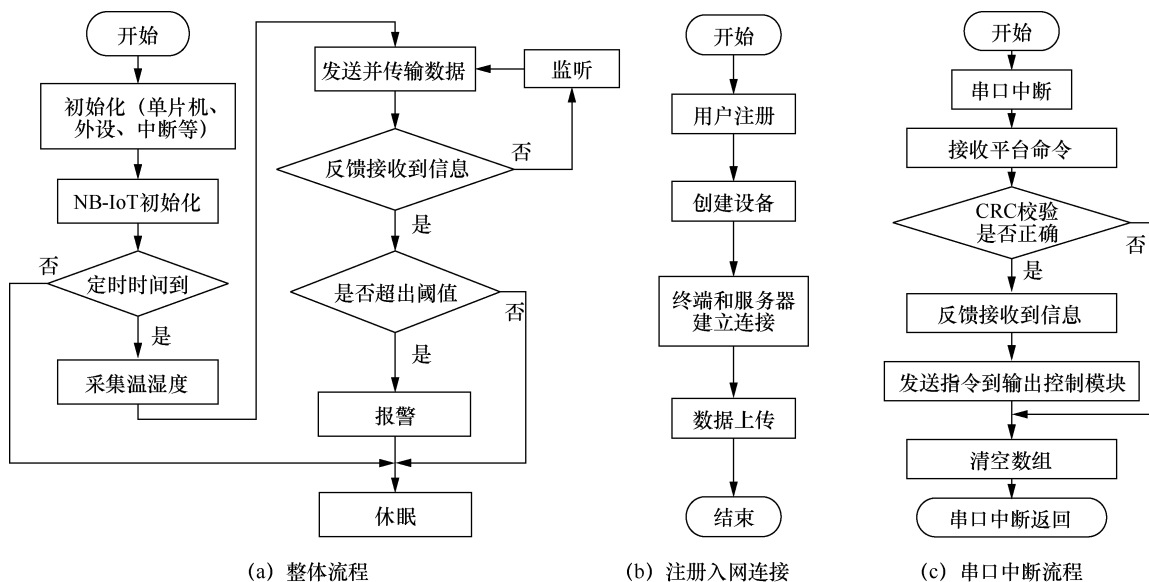


图 5 基于 NB-IoT 技术的大棚无线监测系统

cleansession=0, 平台加载并保存设备信息, 如订阅列表等, 最后返回 ConnAck 鉴权结果。

平台向设备发送主题 (topic) 消息, 以 QoS0 级别推送命令下发; 平台在收到请求后, 推送主题到相关的订阅设备, 可支持离线设备的推送, 具体流程如图 6 所示, 完成后平台显示订阅成功, 即 OneNET 平台与终端设备已连接成功, 平台可实时监测大棚的温、湿度。

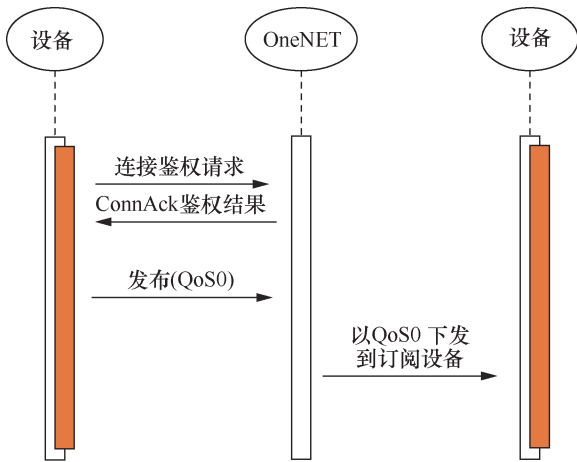


图 6 设备接入平台的流程图

## 6 结果分析

将本文设计的环境监测系统应用于 96 m<sup>2</sup> 的蔬菜大棚中, 实地监测大棚的温、湿度; 也可将该系统放在室内, 测量对环境温、湿度要求较高的特殊实验室、厂房、居民楼室内环境等。用温湿度检测仪 TESTO440 来检验本系统采集数据的准确性 (TESTO440 温度测量范围为 25~74.9℃, 测量精度

为±0.3℃; 湿度检测范围为 5%~90%RH, 检测精度为±2%RH<sup>[17]</sup>)。同时, 用 COM 端采集到的温、湿度作为本系统采集数据的对比, 验证在 NB 模组传输过程中数据是否准确、是否丢失数据等, PC 端和 TESTO440 检测仪实地测量的温度和湿度数据对比如图 7 所示。用该系统连续采集 100 组温湿度数据, 在网页端查看数据传输、接收情况, 记录数据并分析, 平台数据收/发界面如图 8 所示, 结果表明本系统在数据传输过程中 NB 模组传输速率较快且准确, 极少出现丢包现象, 证明了本系统的可行性和稳定性。NB-IoT 技术与传统 Wi-Fi 及 ZigBee 技术相比, 传输距离更远, 3 种通信方式性能对比见表 1, 系统唤醒工作, 大多数时间处于睡眠状态, 耗电仅 0.003 mA, 本系统测量两个星期, 消耗电池电量占原电量的 10%。借助 OneNET 平台, 分别通过 LWM2M 协议和 MQTT 协议设计了 PC 端和对应手机 App, 手机 App 界面如图 9 所示, 更加方便使用者对大棚状态的实时监测, 提高用户的使用感。

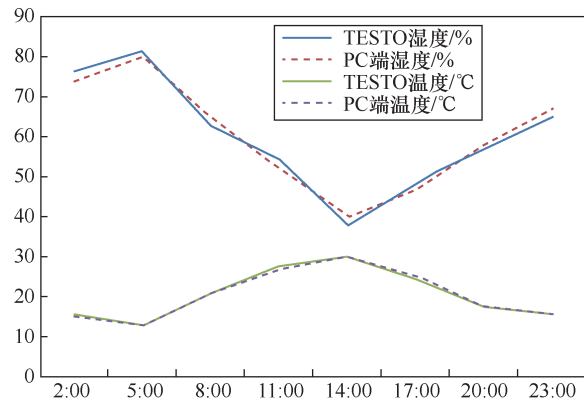


图 7 PC 端和 TESTO440 检测仪实地测量的温度和湿度数据对比

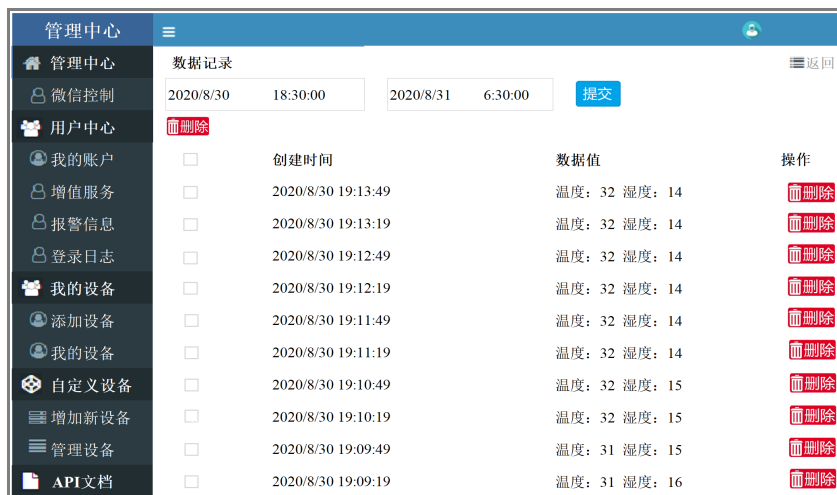


图 8 平台数据收/发界面

表 1 3 种通信方式性能对比

通信模块	ZigBee (CC2420)	Wi-Fi (ESP8266EX)	NB-IoT (BC26)
工作电压/V	3.6	3.3	3.7
数据传输速率/(kbit·s <sup>-1</sup> )	250	100	86
传输距离/m	1~100	10~100	1~15 000
工作模式平均耗电/mA	21.35	65	30.3
睡眠模式电流/mA	9.06	0.03	0.003



图 9 手机 App 界面

## 7 结束语

本文研制了以 STM32L151 单片机为主控制器的基于 NB-IoT 技术的环境温、湿度监测系统，并将其成功应用于大棚环境的温、湿度监测中。利用 NB-IoT 通信技术进行数据传输，优化主控制器的工作流程及通信模块的工作方式，达到低功耗、省电的优势，同时通过 OneNET 云平台的拓展功能设计了用户的 PC 端界面及手机 App，用户可以远程实时监测环境参数。同时，本系统在设计时，单独留出一队传感器接口，便于连接 CO 传感器、pH 传感器、气敏传感器等其他环境检测传感器，增加系统的应用场景，提高系统的适用能力。与传统的监测系统相比，本文所设计的系统具有更低的系统功耗和更便捷的使用感受。

### 参考文献：

[1] LUAN S W, TENG J H, HWANG L C, et al. Wireless network deployment for intelligent fault indicators - A case study with Zig-Bee[C]//Proceedings of TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1246-1250.

[2] RAZA S, DUQUENNOY S, HÖGLUND J, et al. Secure communication for the internet of things—a comparison of link-layer security and IPsec for 6LoWPAN[J]. Security and Communication Networks, 2014,

7(12): 2654-2668.

[3] 徐爽, 易东. 基于 GSM 环境监测系统的设计与实现[J]. 电子制作, 2020(23): 3-5, 60.

XU S, YI D. Design and implementation of environmental monitoring system based on GSM[J]. Practical Electronics, 2020(23): 3-5, 60.

[4] 张金, 王文清. 基于 FPGA 的多环境参数在线监测系统的设计[J]. 科技风, 2021(3): 101-103, 178.

ZHANG J, WANG W Q. Design of on-line monitoring system for multi-environmental parameters based on FPGA[J]. Technology Wind, 2021(3): 101-103, 178.

[5] 傅良康, 苏威, 吴文秀. 基于 STM32 的室内环境远程监测系统的设计[J]. 科技资讯, 2020, 18(33): 18-20.

FU L K, SU W, WU W X. Design of indoor environment remote monitoring system based on STM32[J]. Science & Technology Information, 2020, 18(33): 18-20.

[6] 张开生, 田开元, 吕明, 等. 基于物联网技术的农业大棚环境监控系统设计[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(6): 805-811.

ZHANG K S, TIAN K Y, LV M, et al. Design of agricultural greenhouse environment monitoring system based on Internet of Things technology[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015, 35(6): 805-811.

[7] 王博, 刘忠富, 庄婧昱, 等. 基于 STM32 的无线温室大棚控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2017, 40(6): 42-46, 57.

WANG B, LIU Z F, ZHUANG J Y, et al. Design of wireless greenhouse control system based on STM32[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(6): 42-46, 57.

[8] SUN C H, CAO Y T. Design of mushroom humidity monitoring system based on NB-IoT[M]//Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer International Publishing, 2019: 281-289.

[9] ZHUANG J, SHEN G, YU J C, et al. The design and implementation of intelligent microgrid monitoring system based on WEB[J]. Procedia Computer Science, 2017, 107: 4-8.

[10] 马翔. 基于 ZigBee 无线网络的立体仓库自动化物流控制系统[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(6): 67-72.

MA X. Research on intelligent logistics control system based on Zig-Bee wireless network[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2016, 21(6): 67-72.

[11] MANGALVEDHE N, RATASUK R, GHOSH A. NB-IoT deployment study for low power wide area cellular IoT[C]//Proceedings of 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.

[12] RATASUK R, VEJLGAARD B, MANGALVEDHE N, et al. NB-IoT system for M2M communication[C]//Proceedings of 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.

[13] BELLO H, JIAN X, WEI Y X, et al. Energy-delay evaluation and

optimization for NB-IoT PSM with periodic uplink reporting[J]. IEEE Access, 2019, 7: 3074-3081.

- [14] MARTINEZ B, ADELANTADO F, BARTOLI A, et al. Exploring the performance boundaries of NB-IoT[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 5702-5712.
- [15] 黄忠, 葛连升. 基于 CoAP 的物联网 Web 服务统一访问方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2014, 44(4): 16-21, 30.  
HUANG Z, GE L S. An unified access method for Web services in IoT based on CoAP[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2014, 44(4): 16-21, 30.
- [16] RAO S, CHENDANDA D, DESHPANDE C, et al. Implementing LWM2M in constrained IoT devices[C]//Proceedings of 2015 IEEE Conference on Wireless Sensors (ICWiSe). Piscataway: IEEE Press, 2015: 52-57.
- [17] AZAZA M, TANOUGAST C, FABRIZIO E, et al. Smart greenhouse fuzzy logic based control system enhanced with wireless data monitoring[J]. ISA Transactions, 2016, 61: 297-307.

#### [作者简介]



茅敏敏 (1997-), 女, 上海应用技术大学理学院硕士生, 主要研究方向为 NB-IoT 技术及其应用。



居家奇 (1983-), 男, 上海应用技术大学理学院副教授, 主要研究方向为光电照明。



欧阳玉玲 (1987-), 女, 中国科学院上海高等研究院高级工程师, 主要研究方向为通信工程。



金妍 (1988-), 女, 上海应用技术大学理学院副教授, 主要研究方向为 MEMS 传感器、物联网技术。