

固态降水传感器现场核查装置技术研究

赵建凯, 重 阳, 张平贵

(内蒙古自治区大气探测技术保障中心, 呼和浩特 010100)

摘要: 针对气象观测台站固态降水传感器现场核查及测试的实际需求, 研制了现场核查装置, 结合砝码法实现了固态降水传感器的现场核查和测试; 现场核查装置由基于 ZigBee 无线网络的数据获取装置和加重装置构成, 数据获取装置具备环境气压、温度、相对湿度的实时检测能力, 具备 RS232、RS485 及通断信号方式 3 种固态降水传感器接口的数据读取能力; 加重装置由三角支架、OPD 降水模拟器及砝码托盘组成, 其中降水模拟器采用阻挡原有 OPD 降水发生探测器红外光束, 人为给定指定频率脉冲信号的方法实现了降水的模拟, 能够兼容多种型号的固态降水传感器; 经实验测试, 固态降水传感器能够准确识别加入其中的砝码重量, 数据获取装置的 3 种接口数据读取准确度均达到 100%; 降水量测量值与理论值相关系数为 0.999 9; 表明现场核查装置能够应用于固态降水传感器现场核查及测试业务。

关键词: 固态降水传感器; 降水发生探测器; 降水模拟器; 砝码法; 现场核查; ZigBee

Research on Solid-state Precipitation Sensor's Field Verification Device Technology

ZHAO Jiankai, CHONG Yang, ZHANG Pinggui

(Inner Mongolia Autonomous Region Atmospheric Detection Technology Support Center, Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010100, China)

Abstract: Aimed at the actual needs of on-site verification and testing of solid state precipitation sensors at meteorological observation stations, an on-site verification device was developed, and the on-site verification and testing of the solid state precipitation sensors was realized by combining the weight method; The on-site verification device is composed of a data acquisition device and an weighting device based on the ZigBee wireless network. The data acquisition device has the real-time detection abilities of ambient air pressure, temperature, and relative humidity, and it has the data reading ability of three solid-state precipitation sensor interfaces of RS232, RS485, and on-off signal mode; The weighting device is composed of a triangular bracket, an optical path difference (OPD) precipitation simulator, and a weight tray. The precipitation simulator is used to block the infrared beam of original OPD precipitation generation detector, and a specified frequency pulse signal is artificially given to achieve the precipitation simulation, which is compatible with various types of solid-state precipitation sensors; Through experimental testing, the solid-state precipitation sensor can accurately identify the added weight, and the data reading accuracy of three interfaces of the data acquisition device reaches 100%; The correlation coefficient between the measured precipitation value and the theoretical value is 0.999 9; The results show that the on-site verification device can be applied to the on-site verification and testing business of the solid-state precipitation sensors.

Keywords: solid-state precipitation sensor; precipitation occurrence detector; precipitation simulator; weight method; field verification; ZigBee

0 引言

当前地面气象观测设备种类越来越多, 随着山洪地质灾害防治气象保障工程、气象监测预警补短板工程等建设项目的推进^[1], 气象系统安装运行的固态降水传感器(称重降水传感器)数量越来越大, 同时, 基于冬季降水气象服务的需求, 固态降水传感器的降水监测数据越来越重要, 其数据质量要求也越来越高^[2]。结合中国气象局 ISO9001

气象观测质量管理体系的要求, 在设备运行保障方面必须保证观测设备的数据稳定可靠、数据精度可信, 所以对固态降水传感器的现场核查测试、计量检定显得尤为重要^[3], 但由于目前我国并没有量产可购专门针对固态降水传感器成熟应用的测试测量仪器, 所以在开展固态降水传感器现场核查工作时, 操作人员面临较繁琐的操作步骤。同时, 《JJG 669-2017 称重传感器检定规程》^[4]及《QX/T320-2016 称重式降水测量仪》^[5]中提出了通过砝码进行校准核査的方

收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2023-04-07。

基金项目: 内蒙古自治区气象局科技创新项目基金(nmqxkjcx202327); 内蒙古自治区大气探测技术保障中心科技项目基金(nmdqtkjcx202201)。

作者简介: 赵建凯(1987-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 硕士, 高级工程师, 主要从事气象设备保障及探测技术方向的研究。

通讯作者: 重 阳(1968-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事气象设备保障及探测技术方向的研究。

引用格式: 赵建凯, 重 阳, 张平贵. 固态降水传感器现场核查装置技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(7): 305-312.

法^[6]，但并没有可靠有效易于操作的仪器设备。

基于目前的运行情况，非常有必要开发并推广应用固态降水传感器的现场核查装置。

1 固态降水传感器结构与原理

固态降水传感器是一种为了弥补双翻斗雨量传感器不能用于冬季降水观测的短板而业务化使用的一种气象观测设备，主要用于冬季降水观测。其工作原理是通过落入其中的降水进行称重，然后将重量经过计算换算成气象行业通用的以毫米为计量单位的降水量数据，从而实现可兼容液态和固态降水的观测设备。

如图 1 所示，固态降水传感器主要由称重单元、数据处理单元以及外围组件组成。其中称重单元由载荷元件和信号调理电路组成，依据生产厂家和设备型号的不同，载荷元件分为弦振式传感器和平行梁式传感器，前者由 3 支传感器将集水桶悬挂在结构件上，后者由 1 支传感器将集水桶承托在底座上。外围组件包括安装基座和防风圈、降水入口的保护罩、承载降水的集水桶等^[7-8]。

固态降水传感器配备单独的电源箱以及数据采集箱，在业务使用时，可以通过连接自动气象站作为一个观测要素使用，也可以通过配备通讯模块单独进行使用。其信号输出端口包括模拟翻斗雨量传感器输出的脉冲端口，以及 RS232 和 RS485 的串口形式。

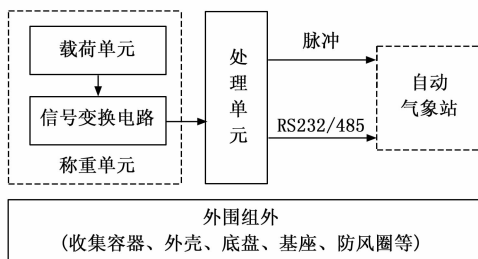


图 1 称重式降水传感器结构框图

需要特别说明的是，在固态降水进入集水桶时，需穿过被支架架在集水桶的上端且与集水桶口无接触的 OPD 降水发生探测器。如图 2 所示，OPD 利用红外线光束探测，一端为接收端，另一端为发射端。当有颗粒穿过红外光束时，导致接收端信号产生电平变化，固态降水传感器数据处理单元通过信号变化识别并判断是否有降水发生，从而控制数据处理单元是否将变化的重量作为干扰数据^[9]。

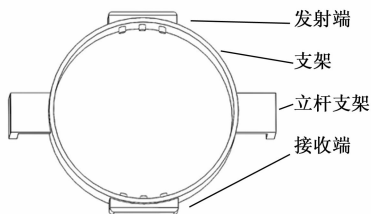


图 2 OPD 降水发生探测器结构俯视图

OPD 降水发生探测器的加入，主要用于设备端的数据质量控制。由于固态降水传感器的检测核心是称重，所以在设备实际使用中，由于风中携带的落叶和异物、虫鸟的落入，以及人为投入的异物等原因都会导致固态降水传感器检测到重量变化而输出降水量野值。而加入 OPD 降水发生探测器后，当上述异物从三路光束覆盖范围以外区域落入时，OPD 接收端并不会产生电平变化；当异物从光束中穿过时，接收端的电平只发生一次变化，即只发生一个脉冲信号。而发生降水现象时，可以认为无论是降雨还是降雪，雨滴和雪花都是在一个小区域均匀下落的，足以覆盖固态降水传感器 20 厘米口径的入口口沿，并且持续的降水现象，可以不断阻挡红外光束，致使 OPD 接收端输出连续的脉冲，依据降水强度的不同，脉冲的频率也会不同。基于此原理，OPD 可以尽最大可能排除设备端落入异物导致的观测数据野值。

2 系统结构及原理

固态降水传感器核查设备主要由数据获取装置和加重装置构成，前者完成固态降水传感器采集器的监测数据读取、环境气压、温度、湿度信息的检测，加重装置和人机交互部件的控制，以及与现场核查平台的交互。加重装置主要以配备降水模拟器和砝码托盘的三角支架及砝码组构成，实现降水的模拟及砝码的承载。

此外，由于目前我国气象观测台站业务在用的固态降水传感器主要有 3 个型号，在进行数据读取时，有的型号可以在固态降水传感器上完成，而有的型号在不拆解传感器外壳的情况下需要在主采集器端读取，因此，为了增加核查设备的适应性和便捷性，核查设备的数据读取部分和加重装置需进行分体设计，通过 ZigBee 无线方式进行数据交互。系统结构如图 3 所示。

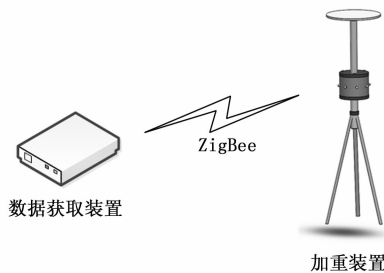
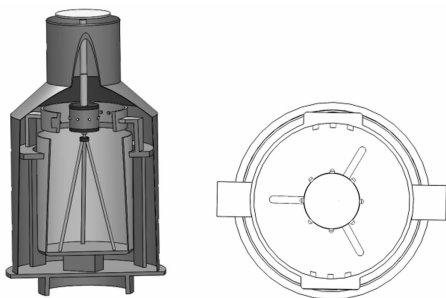


图 3 现场核查设备结构

3 加重装置硬件设计

OPD 降水模拟器作为加重装置的核心，安装于加重装置三角架上，在现场核查时，需要将三角架放入固态降水传感器集水桶，同时保证降水模拟器能够阻断 OPD 降水发生探测器的红外光束，并且发出的可控频率和占空比的光束能够被 OPD 降水探测器检测到。加重装置安装后的结构如图 4，加重装置三角支架高度可调，当用于 DSC3 型固态降水传感器时，由于该型号集水桶高度固定，所以降水模拟器红外光束与三角支架底部的垂直距离约为 33.2 cm 即

可; 当应用于 DSC2 型固态降水传感器时, 由于该型号集水桶由三支弦振传感器悬挂安装, 而弦振传感器安装时高度具有一定的调整空间, 经实际测量验证可知, 降水发生探测器红外光束距离集水桶底部的垂直距离约为 33.0 cm 到 34.5 cm 之间, 在实际使用时, 经过实际测试验证, 将降水模拟器红外光束与三角支架底部的垂直距离调整为 33.8 cm 时, 能够确保集水桶安装高度在最高或最低时降水发生探测器均能够正常探测到降水模拟器信号。



(a)加重架构安装剖面 (b)降水模拟器安装截面图

图 4 加重装置安装效果图

在降水模拟器红外发射管点亮时, 需结合固态降水的实际情况, 进行频率和占空比的设计, 尽可能模拟真实降水发生的情况, 以保证降水模拟有效可靠, 在该装置中, 降水模拟器红外管点亮时, 相当于无降水现象发生, 当降水模拟器红外管熄灭时, 降水模拟器完全阻挡降水发生探测器光束, 当降水模拟器红外管再次点亮, 由亮一灭一亮的过程形成一个信号脉冲, 相当于有物体穿过降水发生探测器。

在电路信号上, 当无粒子穿过 OPD 降水发生探测器光束时, OPD 输出信号为高电平, 当粒子穿过光束发生光路遮挡时, 信号呈现低电平, OPD 光束共三路, 只要有一路有粒子穿过, 整体输出信号就会出现一个脉冲, 所以在降水现象发生时, 也就是固态降水传感器称重量发生变化的同时, OPD 信号需要输出连续的脉冲信号。

降水模拟器的工作通过数据获取装置无线控制, 主要包含红外发光管控制电路、蜂鸣器提示电路、Zigbee 网络电路, 其供电采用外接 5 V 蓄电池的方式实现, 电路结构图如图 5 所示。

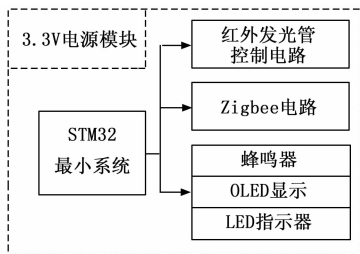


图 5 电路结构图

4 数据获取装置硬件设计

数据获取装置主要实现固态降水传感器的检测数据读

取以及系统运行控制和人机交互。其结构如图 6 所示。在进行硬件设计时, 充分考虑使用的方便性和合理性, 并结合现场核查业务相关指导文件要求, 设计了气压、温度、湿度检测模块, 并预留了自动气象站现场核查平台(此处不涉及现场核查平台具体内容)连接端口。

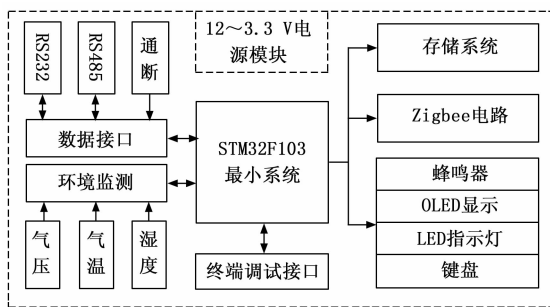


图 6 结构图

数据获取装置采用 STM32F103VCT6 单片机作为核心处理器, STM32F103VCT6 是一款高密度性能 ARM Cortex-M3 32 位微控制器, 它包含 72 MHz 运行频率高性能 RISC 核心, 高速嵌入式存储器, 具有 12 位模数转换器, 计时器, PWM 计时器, 以及 3 个 SPI 外设接口, 2 个 I2C 外设接口, 以及 5 个 UART 外设接口, 广泛应用于嵌入式设计与开发, 电机驱动与控制, 医用, 便携式器材, 无线, 工业, 成像, 视频和目视, 消费电子产品等领域, 能够满足本设计的需求^[10-11]。

4.1 电源控制电路

数据获取装置使用时, 位于与其连接的自动气象站主采集器机箱或固态降水传感器采集箱, 而采集箱均具备 12 V 直流电源供电, 所以数据获取装置的工作电源采用业务设备电源即可。数据获取装置的电源模块, 采用 TPS5430 作为核心电源芯片^[12-13], TPS5430 是德州仪器公司生产的电源管理芯片, 该芯片支持 5.5~36 V 的宽输入电压范围, 具备高输出电流的能力, 能够输出高达 3 A 的持续电流。其电路结构如图所示, 通过设置电阻 R8 为 10 k, R7 为 5.9 k 确定电源电路输出电压为 3.3 V。

4.2 接口电路

气象系统业务在用的固态降水传感器输出信号主要有三种, 分别为 RS232、RS485 和脉冲方式, 所以在数据获取装置接口电路设计时, 需同时具备 3 种数据的数据采集能力。如图 8 所示, RS232 采用 MAX3232ESE 芯片作为 RS232 电平与 TTL 电平的转换芯片, 连接到 MCU 的 UART5 端口, RS485 采用 SSP3485 芯片实现 RS485 与 UART 端口 TTL 电平的转换, 连接于 MCU 的 USART1 端口, 此外还需要将 SSP3485 的 /RE 和 DE 引脚连接于 MCU 的对应引脚, 作为 RS485 通信数据收发控制^[14]。同时为了增加系统的稳定性和可靠性, 在串口输入端口增加了瞬态抑制二极管及可恢复保险丝作为端口保护。

此外, 脉冲输入方式采用光电耦合器作为隔离器件连接到 MCU, 以便增强电路的可靠性和耐用性。

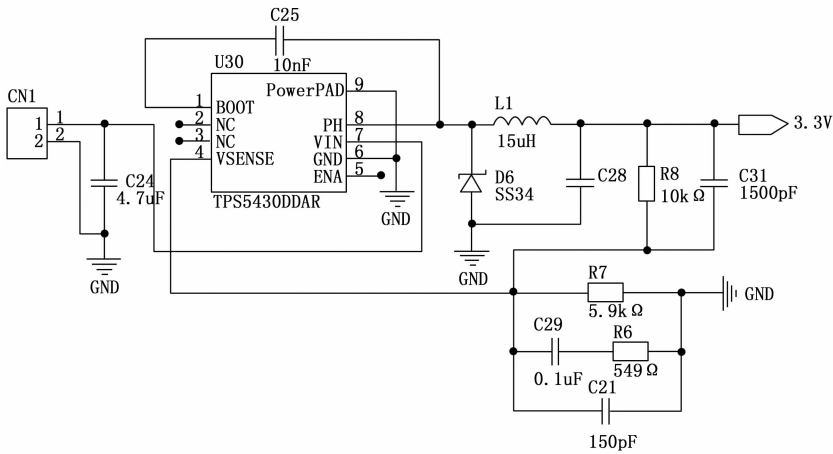
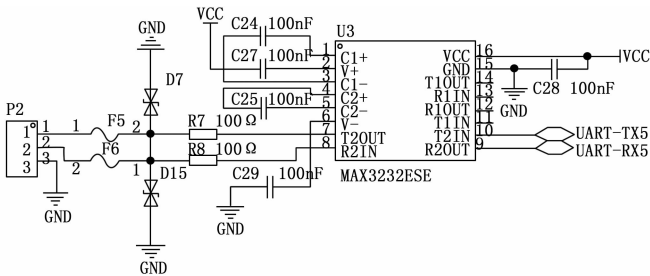
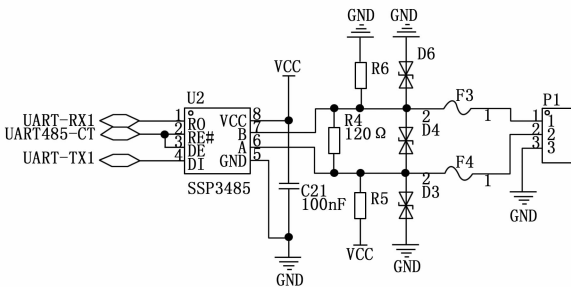


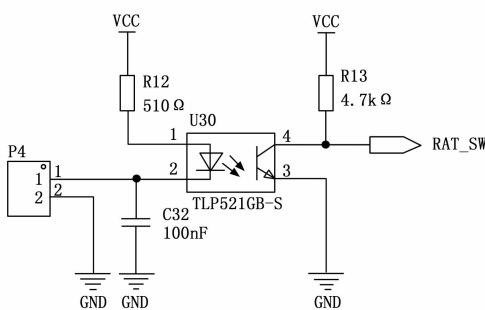
图 7 电源电路



(a) RS232 接口电路



(b) RS485 接口电路



(c) 通断雨量信号接口电路

图 8 接口电路图

4.3 传感器电路

气象设备的现场核查相关规定要求，在进行探测设备现场核查时，需同时记录当时压温湿等气象要素数据，该核查设备通过在数据采集模块上设计相关检测电路和传感器，实现现场环境压温湿气象要素的检测和记录，并连同

固态降水传感器的检测数据进行打包存储和上传。

气压的检测选用 BMP180 作为敏感元件，BMP180 是 Bosch Sensortec 的一种高精度数字气压和温度传感器，可以测量环境温度、压力和高度^[15-16]。BMP180 是超低功耗，低电压的电子元件，经过优化，具有高精度和高稳定性，适用于移动电话，PDA，GPS 导航设备和户外设备。

它由压阻传感器、模数转换器，带 E-2PROM 和串行 I2C 接口的控制单元组成，通过 I2C 总线实现数据交互，其压力测量范围为 300 至 1 100 hPa（海拔 9 000 米~ -500 米），芯片电压 1.62~3.6 V（VDD），高线性模式下，分辨率为 0.03 hPa，内部温度传感器精度为 0.5℃。

温湿度的检测选用 SHT21 作为敏感元件，SHT21 是新一代 Sensirion 湿度和温度传感器，该传感器出厂时都经过了校准和测试，确保检测数据的准确，其输出数据的分辨率可通过命令进行修改。该元件相对湿度的分辨率典型值为 0.04%RH（12bit），精度误差的典型值在 20℃ 到 80℃ 间为 ±2%RH，在接近 0%RH 和 100%RH 附近约为 ±3%RH。温度的分辨率典型值为 0.01℃（12bit），精度误差典型值为 ±0.3℃。传感器的供电电压典型值为 3.0 V，最大值为 3.6 V。SHT21 还包含了一个放大器、A/D 转换器、OTP 内存和数字处理单元，并且通过 I2C 接口实现数据的交互^[17-20]。

由于选用的微处理器具备两个 I2C 接口，而数据采集模块配置的人机交互显示器为 I2C 接口，所以气压传感器和温湿度传感器只能用同一个 I2C 接口，由于选用的两个传感器均无法设置地址，所以可以通过数字开关切换进行复用或通过专用芯片完成 I2C 端口的扩展。综合运行可靠性及稳定性，选用总线切换器 PCA9548 完成 I2C 总线的扩展。

PCA9548 是恩智浦公司生产的 I2C 总线扩展器，可将 1 路 I2C 总线扩展为 8 路，实现在不设置 I2C 总线设备地址的情况下，1 台主设备与 8 台从设备的数据交互。使用 PCA9548 的气压、温湿度传感器检测电路如图所示。PCA9548 的地址线 A2、A1、A0 均连接到 GND，设置地址值为“000”，在 PCA9548 的前后端 I2C 总线 SDA、SCL 信号线上均连接 4.7 kΩ 上拉电阻。

PCA9548 是恩智浦公司生产的 I2C 总线扩展器，可将 1 路 I2C 总线扩展为 8 路，实现在不设置 I2C 总线设备地址的情况下，1 台主设备与 8 台从设备的数据交互。使用 PCA9548 的气压、温湿度传感器检测电路如图所示。PCA9548 的地址线 A2、A1、A0 均连接到 GND，设置地址值为“000”，在 PCA9548 的前后端 I2C 总线 SDA、SCL 信号线上均连接 4.7 kΩ 上拉电阻。

4.4 ZigBee 无线局域网

在自动气象站的日常维护及计量检定工作中，所有运行的设备，均需进行周期性的计量检定，所以现场核查是一种面向所有观测设备开展的基础性工作，但不同的观测设备使用的现场核查设备和流程均不同，为了工作的整体一致性和工作人员的便捷性，以一个现场核查主机结合多个现场核查设备组成的一主多分式现场核查平台是非常有

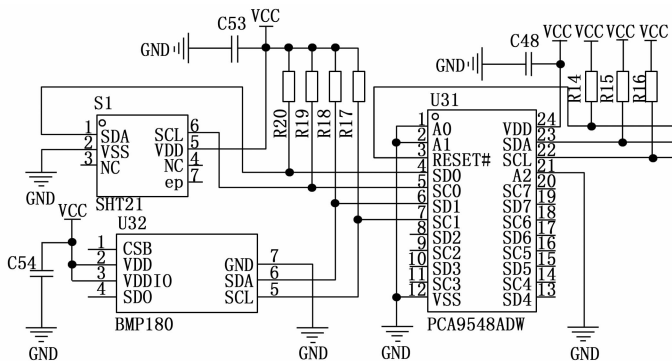


图 9 传感器检测电路

必要的, 但受制于观测场中各观测仪器安装位置的分布情况, 各设备的连接采用无线通信方式无疑是最佳的选择。在无线通信领域, ZigBee 通信方式恰恰是最适合该领域的一种方式。

ZigBee 是一种用于短距离传输的低速无线网络通信协议, 具备功耗低、成本低、安全可靠的优点, 可搭建多种网络拓扑结构^[21]。

固态降水传感器核查装置中, 数据采集模块和加重装置均可作为 ZigBee 网络的协调器或终端节点, 在进行网络连接时, 数据采集模块作为协调器与终端节点加重装置进行组网连接完成固态降水传感器的现场核查, 然后数据采集模块作为终端节点与作为协调器的现场核查平台连接组网, 实现现场核查数据的上传。

现场核查设备的 ZigBee 网络, 采用基于 CC2530 的 E18-MS1-IPX 模块实现, CC2530 是 TI 公司开发的一款专门用于无线传感器网络中进行数据传输的集成芯片, 具备低功耗和低成本的优势, 目前在军民领域都有着广泛的应用。

而集成了 CC2530 的 ZigBee3.0 自组网低功耗串口透传工业级物联网模组 E18-MS1-IPX 内置了 PA+LNA、内置了 ZigBee 协议栈, 其功率为 4 dBm, 通讯距离达到 0.24 km, 可作为协调器、路由器和终端。采用该模块的电路如图 10 所示。

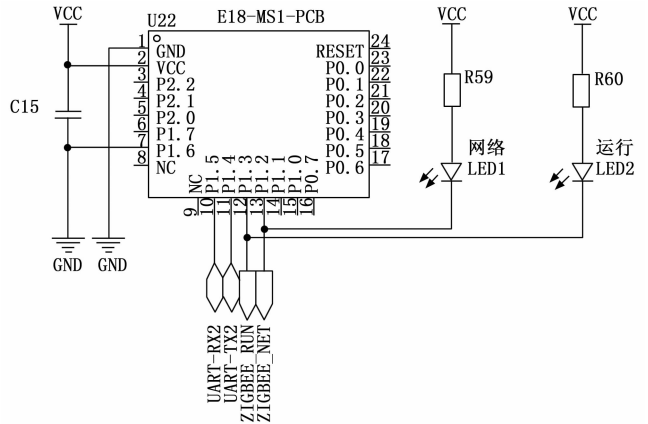


图 10 ZigBee 无线组网电路

其中, 模块通过串口与 MCU 进行通讯, 同时连接两颗 LED 指示灯, 作为网络连接和运行正常的信息指示, 同时为了增强用户体验, 将网络状态和运行状态信息引脚也接入了 MCU。

4.5 人机交互设计

现场核查装置在使用中, 无法避免的需要进行人工交互, 考虑到核查装置需简单易用, 所以在人机交互部件中设置了显示屏、按键、蜂鸣器以及必要的 LED 指示灯。

其中显示装置采用 12864OLED 显示屏实现, 其供电电压为 3.3 V, 通讯方式为 I2C, 占用 MCU 一个 I2C 外设接口, 用来显示固态降水传感器检测到的重量数据以及换算出的降水量; 蜂鸣器主要用于加重装置的操作提醒, 在设备进行使用时, 操作人员需根据蜂鸣器及显示屏的提示信息进行操作。

5 系统软件设计

5.1 软件设计思路和编程方法

固件程序基于 Keil 开发平台设计, Keil 软件是一款广泛应用于单片机硬件开发领域的 C 语言程序设计软件。数据读取装置的固件程序主要完成 RS232、RS485 以及脉冲雨量采集端口的驱动和控制, 环境压温湿气象要素的检测, 以及人机交互、加重装置交互等功能; 同时对数据打包处理并发送到现场核查平台 (现场核查平台不在此处叙述) 及现场 OLED 显示屏。加重装置固件程序主要完成 OPD 降水模拟器的驱动、人机交互装置的驱动以及数据读取装置的交互等。

固件程序的开发, 采用模块化编程方式, 程序结构由主程序文件以及功能部件程序文件组成。

5.2 软件实现流程图

软件实现流程如图 11 所示, 数据获取装置首先进行外设初始化并读取设置参数, 然后实现开机信息的显示。

当开始核查按键按下后, 数据获取装置开始进行环境气象要素检测; 其次通过 RS232 及 RS485 端口每间隔一分钟发送 DMPR 命令到固态降水传感器采集器串行端口, 依据中国气象局固态降水传感器功能需求书命令格式要求, 读取 4 位状态标识、分钟降水量、分钟降水量质量标识、小时降水量、小时降水量质量标识和实时质量数据, 并对读取的降水量进行统计, 同时依据状态标识和质量标识做出数据正常、不合格、警告的提示。

与此同时, 数据获取装置的脉冲雨量检测端口开启工作, 针对既有串口数据输出、又有脉冲雨量输出的设备, 进行二者的同步检测与数据比对, 针对只有脉冲方式输出的设备, 通过脉冲端口进行降水量的记录。

此外, 数据获取装置同时通知加重装置开启 OPD 降水模拟器, 并通过显示屏和蜂鸣器通知加重。加重完成后, 为避免风吹及人为晃动导致的数值误差, 需要在数据获取装置上点按加重完成按钮, 数据获取装置通知加重装置关

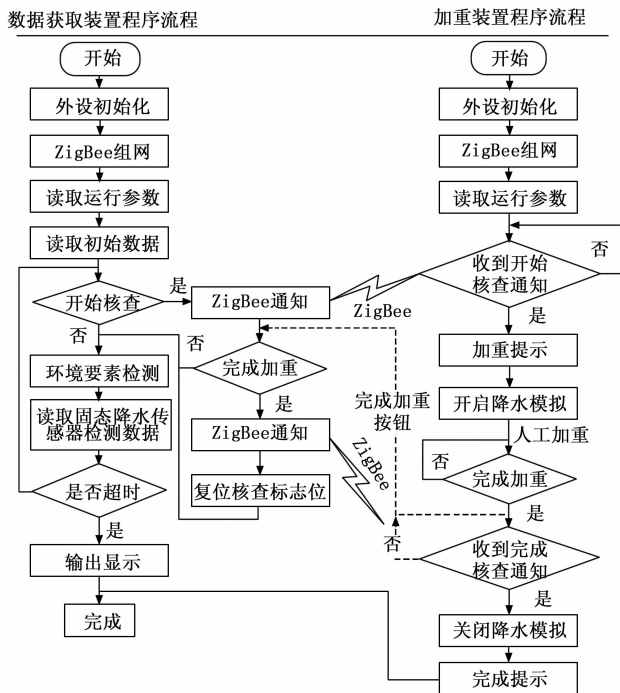


图 11 软件实现流程图

闭 OPD 降水模拟器，以免造成数据干扰，影响固态降水传感器的测量。

系统完成现场核查后，数据获取装置显示读取到的降水量数据、环境气象要素值及重量变化值，并将重量变化值对应的降水量与直接输出的降水量值进行比对，最后通过 ZigBee 网络上上传至现场核查平台。

6 现场核查流程与核查结果

6.1 核查步骤和方法

参照中国气象局《地面气象自动观测规范（第一版）》要求，固态降水传感器需进行周期性现场测试、核查，设备现场核查应选择晴朗的天气进行。

首先关闭固态降水传感器采集器电源，断开固态降水传感器与主采集器连接的数据线，检查承水口水平、高度，以及集水桶内部液面高度。清除承水口的蜘蛛网及其他堵塞物，如遇承水口沿被积雪覆盖，应及时将承水口沿内部的积雪扫入桶内，承水口沿外部的积雪清除。在冬季开展现场核查工作时，观察集水桶内是否有结冰，如有，先对积冰进行清除，待核查完成后加入防冻液以及抑制蒸发油，如在夏季开展现场核查工作，观察集水桶内是否有足够的抑制蒸发油，如果缺少需按照标准进行添加^[22-24]。

完成固态降水传感器维护后，将加重装置放入集水桶内，并使其保持稳定，开启加重装置工作电源，同时使用自动气象站主采集器机箱电源为数据获取装置提供电源并开机。

数据获取装置运行后，会自动与加重装置建立无线网络连接，并读取固态降水传感器称重单元起始重量值。按

下“开始”按钮后，数据获取装置发送指令到加重装置，加重装置开启 OPD 降水模拟器，以设定频率和脉宽发出红外光束，并通知用户放入砝码。

放入砝码后，在数据获取装置上按下“完成”按钮，加重装置关闭降水模拟器，数据获取装置进入数据采集阶段，待固态降水传感器检测的数据全部获取后，结束单次现场核查过程。

6.2 实验验证分析

实验选用由天津华云天仪特种气象探测技术有限公司生产的编号为 202007210245 的 DSC2 型称重式降水传感器为实验对象，数据获取装置采用 RS232 串行通信方式及通断信号方式分别与固态降水传感器采集器的“RS232”和“雨量”端口相连，实验试验结果如下表 1 所示。通过将不同重量值的标准重量块放置到加重装置上，再读取固态降水传感器检测数据并进行误差分析的方法实现。表 1 中的要素说明如下：

1) 加重值 (g)：为了接近实际降水量及凸显固态降水传感器检测性能，加重值包含 1 个 500 g 标准砝码块及其他 8 种不同重量的重量块，每个重量块在加重放置前通过已校准的精度为 0.01 g 的电子天平进行测量，分别进行 3 次测量取算术平均值作为最终重量值，各重量块累积加重。

2) 理论降水量 (mm)：由加重值依据下式换算而来。其中， m 为称重测量所得重量值 (单位 g)； d 为固态降水传感器降水入口直径 (20 cm)； ρ 为水的密度； p 为降水量 (单位 mm)；

$$p = \frac{m}{\pi(d/2)^2\rho} \times 10 \quad (1)$$

3) 雨量端口降水量 (mm)：通过固态降水传感器脉冲输出端口读取的雨量数值；

4) 串口重量测量值 (g)：通过串口读取的固态降水传感器重量检测值；

5) 串口降水量计算值 (mm)：由串口读取的固态降水传感器重量测量值依据公式 (1) 计算而得的降水量值，用于核查固态降水传感器的串口降水量测量值；

6) 串口降水量 (mm)：由串口读取的固态降水传感器检测到的降水量值 (单位 mm)。

7) 重量值误差 (g)：固态降水传感器重量测量值与加重值的差值；

8) 雨量端口降水量误差 (mm)：脉冲输出端口降水量测量值与理论值差值；

9) 串口降水量误差 (mm)：串口读取的降水量与理论值的差值。

此外，由于固态降水传感器的测量误差为 ± 0.4 mm (≤ 10 mm)， $\pm 4\%$ (> 10 mm)，分辨率为 0.1 mm，且重量的测量精度为 0.1 g，所以表 1 中加重值保留 2 位小数，串口重量测量值保留 1 位小数，雨量值保留 1 位小数，串口降水量计算值保留 2 位小数。

表1 核查装置试验验证结果

加重值/g	500.00	271.46	91.75	332.23	290.61	86.76	123.62	49.84	8.51
理论降水量/mm	15.9	8.6	2.9	10.6	9.3	2.8	3.9	1.6	0.3
雨量端口降水量/mm	15.8	8.7	3.0	10.6	9.3	2.8	4.0	1.6	0.2
串口重量测量值/g	500.4	273.4	92.2	334.3	292.2	86.7	124.4	50.3	8.6
串口降水量计算值/mm	15.93	8.70	2.94	10.64	9.30	2.76	3.96	1.60	0.27
串口降水量/mm	15.8	8.7	3.0	10.6	9.3	2.8	4.0	1.6	0.2
重量值误差/g	0.40	1.94	0.45	2.07	1.59	-0.06	0.78	0.46	0.09
雨量端口降水量误差/mm	-0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	-0.1
串口降水量误差/mm	-0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	-0.1

从测量结果可知:

1) 固态降水传感器测得的“串口重量测量值”与标准“加重值”相比最大误差为 2.07 g, 依据公示 (2) 计算出相关系数为 0.999 992。测量误差换算成降水量值误差小于 0.1 mm, 但当下次降水达 1.07 g 时, 会输出 0.1 mm 降水量, 产生新的误差。

$$r_{xy} = \frac{\sum [(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})]}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2} \times \sqrt{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

2) 固态降水传感器的“雨量端口降水量”值与“串口降水量”值保持一致, 表明在固态降水传感器数据输出时, 即使采用不同的端口, 输出数据是一致的; 降水量测量值与理论降水量相比, 误差最大为 0.1 mm, 依据公示 (2) 得出相关系数为 0.999 90。由于测量原理的原因, 固态降水传感器单次降水换算为降水量后不足 3.14 g 的部分, 依然会存储在设备中, 与下次降水量变化值叠加后, 转移到新的降水量输出, 如加重值 271.46 g、91.75 g 和 123.62 g 所对应的降水量测量值均比理论值大 0.1 mm; 而对于初始加重 500 g 标准砝码出现的重量测量值较大, 但降水量测量值较小的现象, 可能由固态降水传感器质量控制算法和测量误差导致, 可见, 相比于对固态降水传感器重量测量值核查, 直接读取降水量值进行核查更客观真实。

在现场核查时, 由于环境气象要素的检测仅用于指示当前气象环境, 无精度要求, 所以环境气象要素的测试采用与检定合格的业务在用设备 DZZ5 型自动气象站在同一环境中比对实现, 如表 2 所示。

表2 环境要素测试

	气压	温度	相对湿度
数据获取装置	898.8 hPa	23.2℃	17%
DZZ5 型自动气象站	898.3 hPa	23.6℃	13%
误差	0.5 hPa	0.4℃	4%

比对结果误差主要由自动气象站观测数值误差、比对环境差异以及数据获取装置误差构成, 该误差值对固态降水传感器现场核查业务开展没有影响。

经过上述测试分析可知, (1) 数据获取装置能够准确获取当前环境气压、温度、湿度信息并正确显示, 为现场核查和测试业务提供气象条件指示; (2) OPD 降水模拟器

能够输出频率、占空比可调的红外光束, 能够准确模拟降水现象; (3) 加重装置上放置的标准砝码以及随机重量块均能够被固态降水传感器检测, 并输出相应的重量信息及降水量信息, 降水量测量值与理论值相关系数达 0.999 90; (4) 固态降水传感器数据输出时, 3 种端口输出的“降水量”数据保持一致。综上可知, 固态降水传感器现场核查装置可应用于固态降水传感器的现场核查和测试业务。

7 结束语

针对目前在用固态降水传感器业务需求而研究开发的现场核查装置, 其特点在于能够不改变被核查传感器的结构及硬件连接的情况下, 兼容适用现用多种型号的设备。

但在实际使用中, 由于人为放置标准砝码时, 加重装置的降水模拟器已经开始工作, 所以在数据获取装置开始核查和核查完成按钮按下的间隙, 固态降水传感器会有引入由于人为误压或大风导致的误差的风险; 此外, 由于加重机构的三角支架是放置在集水桶中的, 如果在固态降水传感器安装时未调整好集水桶的水平, 则三角支架会存在歪斜的可能, 稳定性会降低, 此时需要打开固态降水传感器外壳, 对集水桶水平进行重新调整。

固态降水传感器现场核查装置的业务应用, 能够大大方便气象部门基层工作人员固态降水传感器的测试与现场核查工作, 并且在故障排除中能够作为重要的“信号源”, 从业务需求考虑, 该装置具备较大的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 刘振宏, 李 娇, 张明哲, 等. 称重式降水传感器日常维护及故障处理 [J]. 吉林农业, 2018, 436 (19): 122.
- [2] 邱 实, 杨茂水, 孙 嫣, 等. 称重式降水传感器测量误差变化研究 [J]. 山东科学, 2023, 36 (1): 124-130.
- [3] 葛瑞婷, 刘 芳. 气象观测质量管理体系不合格工作管理分析 [J]. 青海科技, 2023, 30 (1): 107-110.
- [4] JJG 669-2003, 称重传感器检定规程 [Z]. 国家计量检定规程, 2003.
- [5] QX/T 320-2016, 称重式降水测量仪 [Z]. 中国气象局, 2016.
- [6] 陈国强, 朱海燕, 文斌青. 称重式降水传感器校准方法研究 [J]. 青海科技, 2021, 28 (4): 81-84.
- [7] 张远洪, 黄 菁, 古书鸿, 等. DSC1 称重式降水传感器与降水多传感器标准控制系统观测数据对比分析 [J]. 中低纬山地

气象, 2022, 46 (4): 109-112, 116.

- [8] 沈玉亮, 陆 斌, 赵宝义, 等. DSC1 型称重式降水传感器工作原理及故障判断方法 [J]. 气象水文海洋仪器, 2017, 34 (3): 96-100.
- [9] 卢 舟, 刘钟中, 王 凡, 等. DSC3 型称重式降水传感器维修维护方法 [J]. 气象水文海洋仪器, 2022, 39 (3): 117-120.
- [10] 张红宾, 李晓晨, 赵二刚, 等. 基于 STM32 的便携式数控直流电源设计 [J]. 实验室科学, 2019, 22 (3): 53-56.
- [11] 田小超. 基于 STM32 的测井仪采控一体化电路设计 [J]. 煤矿机械, 2023, 44 (1): 18-21.
- [12] 邱深玉, 张城东, 李思齐, 等. 基于多功能智能充电器的设计与研发 [J]. 科技经济市场, 2022 (4): 31-33.
- [13] 马荣廷, 柳 静, 刘明明, 等. 嵌入式测试系统用高精度数控恒压恒流源 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2018, 18 (6): 65-68, 73.
- [14] 吴蓬勃, 张金燕, 王 拓, 等. 基于 ZigBee 的智慧用电监控系统 [J]. 电子制作, 2023, 31 (3): 42-44, 22.
- [15] 卢 嫒, 袁志军. 基于 OneNet 云平台的智能监控系统设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2022, 22 (7): 34-37.
- [16] 张瑞松, 马志财. 基于物联网的家庭智能气候站设计 [J]. 2023, 33 (2): 110-113.
- (上接第 304 页)

我们计划在未来进一步改进本系统, 以实现更轻量化的网络结构, 减小网络的计算量、参数量和推理时间。为此, 我们将采用更高效的模型设计和训练方法, 以便在保持高精度的同时, 能够更好地满足实时检测的需求, 减小时延。后续我们还将研究使用更加精简、更加简单、更加低廉的芯片, 以降低成本, 提高性能。为了让我们的无人果蔬售卖系统更加实用和可靠, 加入免密支付等功能, 使顾客只需要将商品放入购物车, 点击付款按钮, 即可完成付款, 实现真正的智能购物体验。我们将不断探索各种技术和方法, 不断优化算法、改进硬件, 优化界面设计, 提高交互性, 以实现速度和精度的完美平衡, 以打造一个更加高效、更加智能、更加易用的售卖系统, 为顾客带来更好的购物体验和服务。

参考文献:

- [1] 郭潮波. 国外智能硬件产业发展与应用现状 [J]. 互联网经济, 2015 (Z2): 52-55.
- [2] 晏 军, 刘鸿源, 曹 阳. 基于 RFID 技术的无人超市系统设计与实现 [J]. 电子技术与软件工程, 2019 (24): 72-73.
- [3] 孙 华. 大数据环境下实体零售业智能零售研究 [J]. 西安财经学院学报, 2016, 29 (2): 41-46.
- [4] 林付春, 张荣芬, 何倩倩, 等. 机器视觉中的智能无人零售系统设计 [J]. 电子技术应用, 2018, 44 (9): 96-98, 103.
- [5] 徐印赞, 江 明, 李云飞, 等. 基于改进 YOLO 及 NMS 的水果目标检测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36 (4): 114-123.
- [6] 郑太雄, 江明哲, 冯明驰. 基于视觉的采摘机器人目标识别与定位方法研究综述 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42 (9): 28-51.
- [7] 孔 鹏. 基于深度学习的水果目标检测研究及应用 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- [8] 林付春, 张荣芬, 何倩倩, 等. 机器视觉中的智能无人零售系

自动化仪表, 2020, 41 (5): 71-74.

- [17] 王宇晴, 霍佳楹, 张恩萌, 等. 基于物联网的室内环境感知系统设计 [J]. 电脑知识与技术, 2019, 15 (22): 97-98.
- [18] 陈树成, 李晓波, 崔 明, 等. 基于 MSP430 的无线温湿度报警系统设计 [J]. 电子设计工程, 2019, 27 (10): 183-187.
- [19] 洗 进, 洗允廷. 基于 STM32 的智慧农业大棚系统设计 [J]. 现代电子技术, 2023, 46 (4): 70-74.
- [20] 张宏伟. 基于 STM32 的智能环境监测系统设计与实现 [J]. 大庆师范学院学报, 2020, 40 (6): 91-98.
- [21] 赵建凯. 基于 ZigBee 的四线制 PT100 温度传感器采集节点设计 [J]. 内蒙古气象, 2021, 252 (1): 46-48.
- [22] 吴 瑾, 曹兴锋, 李翠华, 等. DSC1 称重式降水传感器安装调试及故障维修 [J]. 气象水文海洋仪器, 2020, 37 (4): 108-110.
- [23] 李晓梅, 王一淞, 陆晓平. DSC2 型称重式降水传感器的安装维护及故障处理方法 [J]. 农业与技术, 2017, 37 (20): 245.
- [24] 周旭辉, 李建宇, 唐 坤, 等. DSC3 称重式降水传感器日常维护及典型故障处理 [J]. 气象水文海洋仪器, 2016, 33 (2): 110-113.
- [9] 葛海江. 基于 HX711 的高精度电子称重研究 [J]. 电子测试, 2019 (10): 31-32.
- [10] 洪博闻, 毛腾慧, 范晔焘, 等. 高精度多点称重系统设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2022 (8): 263-266.
- [11] 叶树芬, 施振华, 苏成悦, 等. 基于 YOLOv5 的电力线和杆塔实时检测算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (11): 77-84.
- [12] 田祥瑞, 贾茆钧, 罗 欣, 等. 基于嵌入式平台的航拍目标智能识别 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (11): 153-160.
- [13] 刘 卉, 汪懋华, 王跃宣, 等. 基于无线传感器网络的农田土壤温湿度监测系统的设计与开发 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2008 (3): 604-608.
- [14] 吴伟铭, 孟巧玲, 倪 伟, 等. 康复机器人系统数据通信技术应用现状 [J]. 上海理工大学学报, 2023, 45 (1): 36-43.
- [15] 安 军. 基于无线通信技术的电气火灾智能监控系统 [J]. 自动化与仪表, 2023, 38 (1): 120-124.
- [16] GE Z, LIU S, WANG F, et al. YOLOX: Exceeding YOLO series in 2021 [EB/OL]. [2021-08-06] (2023-02-21). <https://arxiv.org/abs/2107.08430>
- [17] 邵延华, 张 铎, 楚红雨, 等. 基于深度学习的 YOLO 目标检测综述 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44 (10): 3697-3708.
- [18] JOSEPH R, SANTOSH K, ROSS B, et al. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection [EB/OL]. [2015-06-08] (2023-02-21). <https://arxiv.org/abs/1506.02640>
- [19] 赵 睿, 刘 辉, 刘沛霖, 等. 基于改进 YOLOv5s 的安全帽检测算法 [J/OL]. 北京航空航天大学学报: 1-16 [2023-02-23]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3u0qIhG8C45S0n9fL2suRadTyEVI2pW9UrhTDCdPD65oE1cCnq5ld8uAHQtq_MvLpV9JCNr2gOowds2mSavcawCvYYur0SVC&uniplatform=NZKPT.
- [20] 吕禾丰, 陆华才. 基于 YOLOv5 算法的交通标志识别技术研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35 (10): 137-144.