

一种超低功耗自守时环境监测模块的设计

高晓冬¹, 李 祺², 刘彦君³, 李 旺³

(1. 海装驻北京地区第三军事代表室, 北京 100074; 2. 北京机电工程研究所, 北京 100074;
3. 成都菁汇科技有限公司, 成都 611731)

摘要: 装备在使用、运输、贮存等条件下, 所处环境对其状态和寿命具有明显影响; 为实现对装备的使用、运输、贮存环境参数的连续、长时监测, 为其全寿命周期健康管理提供原始数据, 设计了一种超低功耗自守时环境监测模块; 给出了环境监测模块的系统架构以及基本功能单元, 主要包括存储电路、主控电路、授时电路、传感器电路和电源电路; 环境监测模块实现-40~60℃温度、0~100%湿度、0.3~1.1 bar 压力以及-16~+16 g 振动等环境监测数据的采集, 并进行本地数据缓存, 数据采集周期可灵活设置, 采集后存储在本地的数据通过网络接口对外传输, 传输速率可达 100 MB/s; 环境监测模块可通过北斗系统进行授时, 并在本地实时时钟支持下自主守时; 系统上包括网口在内的外设电路可在主控电路的控制下实现上电和下电操作; 在低功耗模式下, 主控电路可通过定时唤醒和加速度传感器的外部中断唤醒。

关键词: 低功耗; 自守时; 加速度; 温湿度; 北斗; HC32L196

Design of an Ultra-Low-Power Self-timed Environmental Monitoring Module

GAO Xiaodong¹, LI Qi², LIU Yanjun³, LI Wang³

(1. No. 3 Military Office of Navy Armaments Department in Beijing District, Beijing 100074, China;
2. Beijing Institute of Mechanical and Electronic Engineering, Beijing 100074, China;
3. Chengdu Jinghui Technology Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

Abstract: Under the conditions of use, transportation, and storage of equipment, the environment has a significant influence on their status and life. In order to realize the continuous and long time monitoring of environmental parameters for use, transportation, and storage of equipment, and the original data for its full-life-cycle health management is provided, an environmental monitoring module for ultra-low power consumption self-timed is designed. The system architecture and basic functional units of the environmental monitoring module are given, including storage circuits, main control circuits, timing circuits, sensor circuits and power circuit. The environmental monitoring module realizes the collection of environmental monitoring data such as temperatures from -40℃ to 60℃, humidity from 0 to 100%, pressure from 0.3 bar to 1.1 bar and vibration from -16 g to +16 g, and carries out the local data cache. The data collection period can be set flexibly. After collection, the data stored locally is transmitted to the outside through the network interface, the transmission rate can reach 100 MB/s. The environmental monitoring module can provide time service through the Beidou system and keep time independently with the support of local real-time clock. Peripheral circuits in the system including network ports can realize power-on and power-off operations under the control of the main control circuits. In the low-power mode, the main control circuits can be awakened by timing wake-up and the external interrupts of the acceleration sensor.

Keywords: low power consumption; self-timed; acceleration; temperature and humidity; Beidou; HC32L196

0 引言

装备全寿命周期健康管理是装备综合保障工程的一项主要工作, 可以有效提高装备的可靠性、维修性和保障性。装备在使用、运输和贮存条件下所处的环境对装备的健康状态有直接且关键的影响, 这些环境因素主要包括: 温度、湿度、大气压力、振动等^[1-4]。为更加准确地研究环境因素对装备寿命的影响, 必须积累原始的环境参数数据以支撑装备全寿命周期健康模型中环境参数因子的建立研究工作。研制一种能够全天候、不间断、超长续航、可守时的环境

监测模块, 可以在长时间无人值守的状态下, 自主对装备的环境参数进行采集和存储, 为装备全寿命周期健康模型中环境参数因子的建立提供原始基础数据。

1 系统结构及原理

超低功耗自守时环境监测模块将传感器电路^[5-6]采集到的数据信息传输给主控电路, 由主控电路进行分析、处理后再送入存储电路或者通过通信接口向外传输。系统总体架构如图 1 所示, 环境监测模块可在软件程序的控制下实现长时间自主工作在不同功耗模式下进行数据采集。自主工作时可

收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-02-24。

作者简介: 高晓冬(1976-), 男, 北京人, 硕士, 主要从事导航、制导和控制方向的研究。

引用格式: 高晓冬, 李 祺, 刘彦君, 等. 一种超低功耗自守时环境监测模块的设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4): 72-78.

关闭空闲的传感器电路以及其他功能电路以达到超低功耗的目的。同时, 搭载北斗芯片的环境监测模块具有优异的捕获灵敏度和优秀的跟踪灵敏度, 可以在信号极弱的情况下任然捕获和跟踪到多颗卫星, 为授时和定位打下良好的基础。模块具有单星授时功能, 可长时间稳定的工作在单星情况下, 大幅度提升模拟授时的整体稳定性^[7-9]。

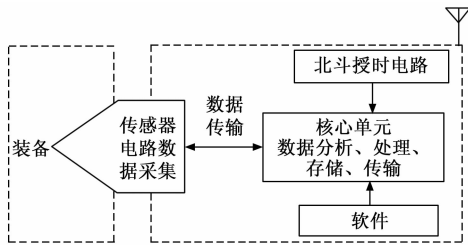


图 1 系统结构框图

2 系统硬件设计

装备在使用、运输和贮存时将面临复杂的环境特点, 为保证环境监测模块在不同使用条件下保持系统稳定、高效的自主工作, 系统采用模块化设计, 根据不同的功能单元划分各个电路。环境监测模块主要包含 5 个部分: 存储电路、主控电路、授时电路、传感器电路和电源电路。其中主控电路负责处理传感器电路采集到的温湿度、气压、振动数据, 并控制存储电路和显示接口以实现数据的存储、交互和显示, 电源电路负责为整个系统提供稳定的电源电压, 并在主控电路的指令下完成不同工作模式下各电路的电源供给, 本节将具体阐述各电路的功能作用及工作原理, 同时列出模块设计参数如下所示:

- 1) 数据传输速度: 100 MB/s;
- 2) 温度测量范围: $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 精度: $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 3) 湿度测量范围: $0\sim 100\%$, 精度: $\pm 2\%$;
- 4) 气压测量范围: $0.3\sim 1.1\text{ bar}$, 精度: $\pm 100\text{ mbar}$;
- 5) 振动测量范围: $-16\sim +16\text{ g}$, 精度: $\pm 0.1\text{ g}$;
- 6) 电池充满电的状态下, 设备连续工作时间: 在采样周期为 1 800 s 时, 可保持 12 个月连续工作, 在采样周期为 3 600 s 时, 可保持 24 个月连续工作。

系统硬件框架如图 2 所示。

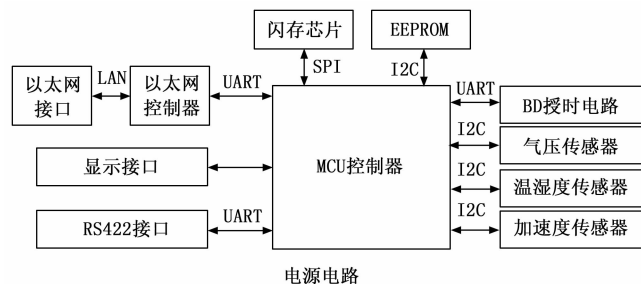


图 2 硬件框架图

2.1 主控电路

主控电路作为环境监测模块的控制中枢, 不仅需要快

速、高效的数据处理能力, 而且应具有丰富的外设接口满足同时挂载众多不同的传感器以及其他功能接口。在此前提下, 本系统采用华大 HC32L196 系列 MCU 作为主控芯片, 其基于 ARM 32-bit Cortex-M0+ 嵌入式内核, 时钟速率高达 48 MHz, 并且拥有 4 路 UART 标准通讯接口、可工作于深度休眠模式下的 2 路 LPUART 低功耗通讯接口、2 路 SPI 标准通讯接口以及 2 路 I²C 标准通讯接口。除此之外, 该控制芯片内部集成高精度的 SARADC, 工作时可确保对装备所处环境中振动信号的精确采集。同时其具有灵活的功耗管理能力, 超低的功耗性能, 可以在以下 6 种功耗模式中切换。

- 1) $0.6\text{ }\mu\text{A}@3\text{ V}$ 深度休眠模式: 所有时钟关闭, 上电复位有效, IO 状态保持, IO 中断有效, 所有寄存器、RAM 和 CPU 数据保存状态时的功耗;
- 2) $1.0\text{ }\mu\text{A}@3\text{ V}$ 深度休眠模式+RTC 工作;
- 3) $8\text{ }\mu\text{A}@32.768\text{ kHz}$ 低速工作模式: CPU 运行, 外设关闭, 从 Flash 运行程序;
- 4) $30\text{ }\mu\text{A}/\text{MHz}@3\text{ V}@24\text{ MHz}$ 休眠模式: CPU 停止, 外设关闭, 主时钟运行;
- 5) $130\text{ }\mu\text{A}/\text{MHz}@3\text{ V}@24\text{ MHz}$ 工作模式: CPU 运行, 外设关闭, 从 Flash 运行程序;
- 6) $4\text{ }\mu\text{A}$ 超低功耗唤醒时间, 使模式切换更加灵活高效, 系统反应更为敏捷。

环境监测模块在全天候、不间断的工作环境中根据模块工作要求选择相应的功耗模式是实现超长续航的关键要素之一。

2.2 传感器电路

传感器电路是作为环境监测模块最前端的功能模块, 负责装备所处环境数据的采集, 因此传感器电路的选择尤为重要, 另一方面传感器自身性能很大程度决定了环境监测模块整体的精度和稳定性。

2.2.1 温湿度传感器

装备所处环境由于天气、季节、地点等多方面因素的影响, 模块需要完成较宽温度范围和湿度范围的高精度测量^[10-12]。模块选择的温湿度传感器 AHT20 可测量温度范围达 $-40\sim +85\text{ }^{\circ}\text{C}$, 可测量湿度范围为 $0\sim 100\%\text{ RH}$, 并且配有一个全新设计的 ASIC 专用芯片、一个经过改进的 MEMS 半导体电容式湿度传感元件和一个标准的片上温度传感器, 其性能已经大大提升甚至超过了前一代传感器的性能水平。新一代的温湿度传感器, 经过改进使其在恶劣环境下的性能更加稳定。它嵌入适于回流焊的双列扁平无引脚的 SMD 封装, 体积小, 输出为标准的 I²C 格式数字信号。

2.2.2 气压传感器

气压传感器负责完成装备在不同海拔环境下的气压参数采集。为了满足不同条件下装备所处环境气压数据的精确采集, 模块使用了一种小型化数字气压传感器 SPL13-001, 该传感器具有高精度和低电流消耗的特点。该气压传感器基于电容传感原理^[13], 保证了温度变化范围内的高度精度测量。工作时, 气压传感器将输出信号转换为 24 位的

数字测量结果，每个压力传感器都已单独校准，并包含校准系数，应用中使用系数将测量结果转换为真实压力值。同时，气压传感器可以存储最新的 32 个测量值，通过使用 FIFO，主机处理器可以在两次读取之间保持较长时间的睡眠模式，减少系统总功耗。

2.2.3 加速度传感器

装备在运输、使用、贮存过程中不同程度的振动可能导致装备机械结构损坏、精度变差、甚至使装备无法正常工作等一系列问题。

在振动测量方面，传统的振动测量法可采用电测法、光测法、机械法进行测量^[14-15]。但随着对倾斜测量、姿态测量、冲击和振动测量要求越来越高，传统测量方法显然不能够满足要求。三轴加速度传感器 QMA7981 不仅体积小，而且具有宽电压输入范围，在典型供电电压时，测量模式下功耗低于 25 μ A，待机模式下低至 1 μ A；另外具有 14 位高分辨率有利于运动和倾斜检测，测量范围达 ± 32 g，完全覆盖模块所设计的 ± 16 g 振动测量。通讯接口上可通过 SPI 或者 I²C 数字接口访问。

2.3 存储电路

环境监测模块采集到的各类传感器数据需要进行本地数据缓存，监测数据采集周期从 1~3 600 s 可设置，采样周期为 1 800 s 时，需保持 12 个月连续工作，在采样周期为 3 600 s 时，至少保持 24 个月连续工作。模块选用 SPI 接口闪存 (Flash) 芯片完成传感器数据和通电时间数据的存储。同时，存储电路还包括一片 EEPROM 芯片进行本地信息、设置参数和总计通电时长数据的存储。Flash 芯片容量为 512 Mbits，共计可存储 64 MByte 数据。其中分配 24 Mbyte 空间用于存储温度、湿度和气压监测数据，24 Mbyte 空间用于存储电源参数，8 Mbyte 空间用于存储电源超限事件，6 MByte 空间用于存储振动监测数据，2 MByte 空间用于存储通电时长记录数据。图 3 为 Flash 空间分配图。

24MByte	时间戳	温度	湿度	气压		
	时间戳	温度	湿度	气压		
24MByte	时间戳	A相电压	B相电压	C相电压	A相相位	B相相位	C相相位
	时间戳	A相电压	B相电压	C相电压	A相相位	B相相位	C相相位
8MByte	时间戳	电源超限事件				
	时间戳	电源超限事件				
6MByte	时间戳	X轴	Y轴	Z轴		
	时间戳	X轴	Y轴	Z轴		
2MByte	时间戳	通电时间				
	时间戳	通电时间				

图 3 Flash 存储空间分配

振动数据只在检测到发生振动时进行保存，不计入定时采样检测的范围。温度、湿度和气压测量按 1 800 s 采样周

期，连续工作 12 个月计算，所需存储容量为 172 800 byte。按 3 600 s 采样周期，连续工作 24 个月计算，所需存储容量为 172 800 byte。

通电时间长度按秒为单位进行记录，记录数据长度为 32 位，与时间戳一起保存时，单次通电时间长度需要占用 8 byte 存储容量。

根据前述计算结果，30 Mbyte 存储空间可在 1 800 s 采样间隔的条件下存储约 182 年。按最长 1 年的存储记录计算，最小采样间隔可达 12.5 min。

可连续记录的电源参数数据条数可达 196 万条。

可连续记录的电源超限事件数据条数可达 13.1 万条。

可连续记录的振动数据条数可达 21 万条。

可连续记录的通电时间数据条数可达 13.1 万条。

同时，为了保证 Flash 的写入寿命，所有记录数据采用连续滚动方式写入 Flash。

2.4 低功耗电源电路

设备采用 28 V 直流电源供电，需设计供电电池向设备供电。供电电池采用直流 3.7 V 输出，需将直流 28 V 电源转换为 +5 V 电源供电，再由 5 V 转换为设备所需的 3.3 V 直流电源。因为电源模块分化成微单元，每一路电源输出都可以在开关的控制下进行输出与断开。设备电源网络如图 4 所示。

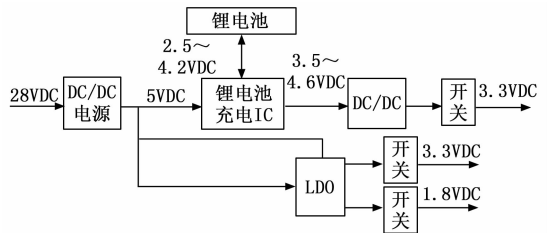


图 4 设备电源网络示意图

直流电源设备选用 URF2405LP-20WR3，该电源设备输入范围为 9~36 V，最大输出电流 4 A。为了提供设备的安全性，在直流电源 28 V 的输入端设计自恢复保险丝及防反接电路。此 5 V 电源同时用作锂电池充电和设备功能电路供电。

使用专用的单芯锂离子电池充电管理芯片实现对锂电池的充放电管理，该芯片可以在 5 V 输入条件下达到约 90% 的转换效率，可以最大 3 A 的电流为电池充电。芯片自带电源管理功能，可同时为后续电路提供 3.5~4.6 V 的直流电源输出。

充电管理芯片输出的 3.5~4.6 V 直流电源通过 DC/DC 电源芯片转换为稳定的 3.3 V 直流电源为主控单元、传感器单元、存储单元供电。

电路中包含一片独立的双输出 LDO 芯片，此芯片用于将直流电源设备输出的 5 V 电源降压为 3.3 V 和 1.8 V 电源，此两路电源为网络接口和管理接口相关电路供电。故在无外部 28 V 电源输入时，网络接口和管理接口相关电路不能工作。

根据模块各功能电路的设计, 对整机在电池供电模式下的功耗进行估计, 估计结果如表 1 所示。

表 1 电路功耗估计表

供电电压/V	MCU	闪存	振动	温湿度	气压	北斗	合计/ μ A
3.3	400	170	25	0.4	1.3	70	666.7

电池供电时, 按照振动监测持续工作, 温湿度、气压监测间隔 1 800 s, 每次工作 5 s 预估。BD 授时按每 10 天工作 1 次, 每次工作 10 分钟预估。以太网和 RS422 接口关闭。

2.5 授时电路

环境监测模块在长时间无网络连接的环境中持续工作时, 时钟基准由设备自身的晶体振荡器提供。但晶体振荡器随着工作时间的推移会产生累积误差。为了消除时间累积误差, 模块集成了北斗授时电路, 为模块的本地时钟提供精准的校准时钟基准。模块采用的授时电路具有灵活的模式选择, 可以工作在 GPS、北斗和 GPS/北斗联合授时 3 种模式下, 同时该电路不仅具有优异的 PPS 波动指标, 可达到 10 ns 的量级, 而且可输出专用闰秒, 时时刻刻关注闰秒的变化情况, 在刚开机时刻可用来判断初始化时间的有效性。在硬件设计上采用 TTL 电平的 UART 通讯模式, 可直接与 MCU 的 UART 接口相连, 一定程度上简化了硬件设计上的复杂度。图 5 为北斗设备接口原理图。

2.6 接口电路

如图 6 和图 7 所示, 环境监测模块具备以太网和 RS422 接口, 主要包括 1 路 10 M/100 Mbps 网络接口^[16]、RS422 串口和 LED 数码管显示接口; 其中以太网和 RS422 通讯接口^[18]用于接收外部控制器的操作指令并依据操作指令完成相应的功能控制和处理。显示方面, 模块自身提供本次上电时间和累计上电时间显示, 因为其显示内容全为数字形式, 故而选择经济且

成熟的 LED 数码管显示方案。显示接口在工作时, LED 数码管交替显示本次通电时间和总计通电时间信息, 用户可以

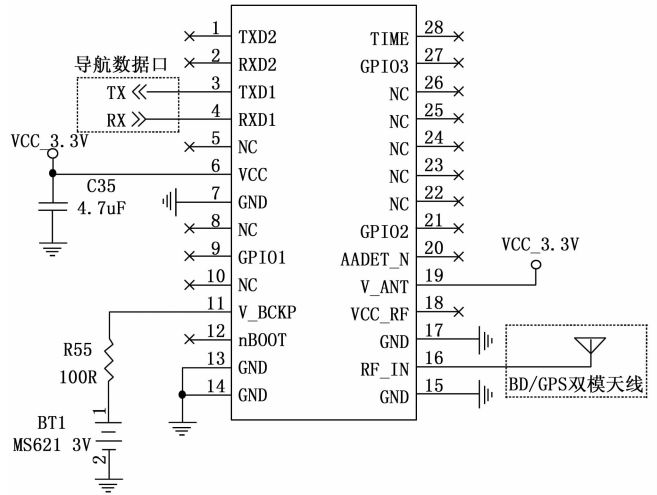


图 5 BD授时设备接口原理

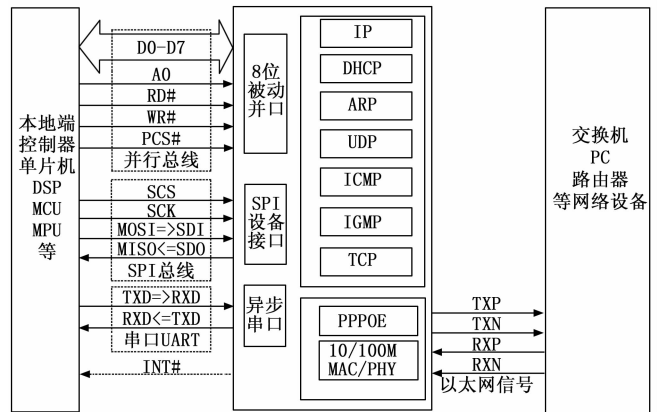


图 6 以太网接口电路

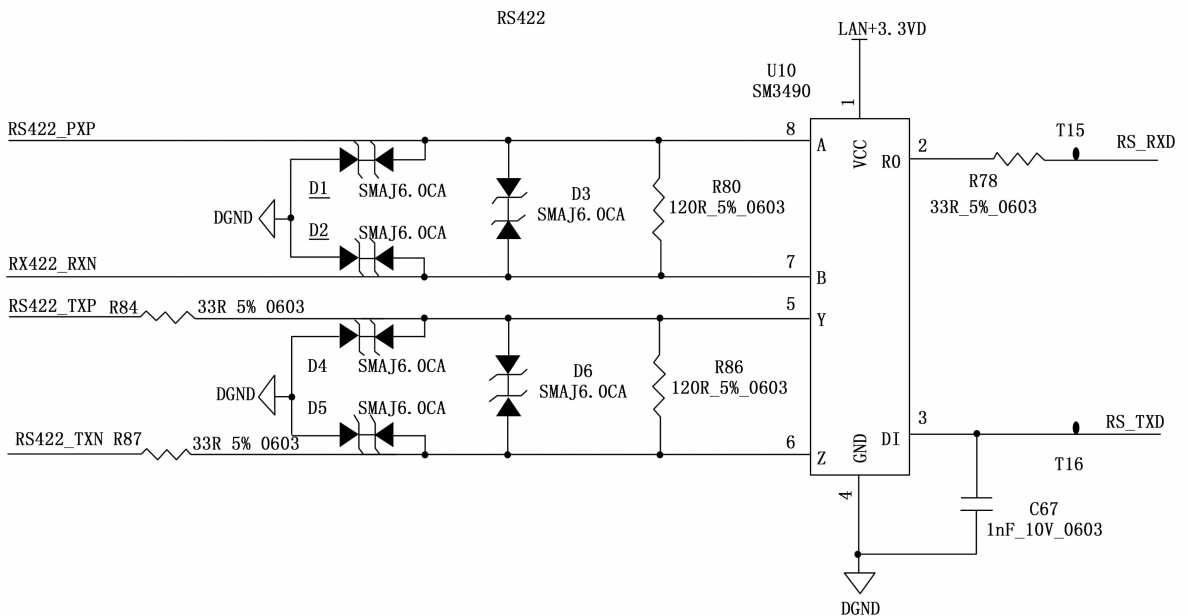


图 7 RS-422 接口电路

通过 LED 数码管下方的独立通电时间指示灯判断当前显示的是本次通电时间还是总计通电时间。通电时间显示仅有外部 28 V 直流供电时提供。

3 系统软件设计

3.1 软件主要功能结构

环境监测模块的软件为基于 MCU 的嵌入式软件，软件功能结构如图 8 所示。硬件管理通过调用硬件逻辑层的硬件接口访问，实现硬件设备层的访问，包括硬件设备的初始化、参数设置、数据发送与接收等，完成所有硬件设备的自检测试并回报自检结果码，供上位机解析完成故障状态显示。硬件管理单元依据设备 RTC 数据自动记录上、下电工作时间，统计本次上电工作时间与累计上电工作时间，并通过显示电路完成信息显示。

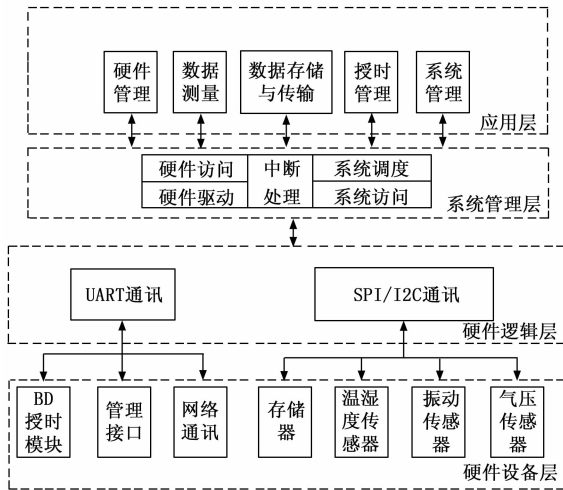


图 8 软件功能结构示意图

系统管理层完成设备工作时间参数的设置与状态管理，设置设备的默认参数，包括采样周期、工作状态等。外部控制器通过 RS422 接口连接到设备后，以太网通讯状态会自动切换为不响应状态，直到外部控制器发送控制指令并断开与 RS422 接口的连接。外部控制器通过 RS422 接口对设备的参数与工作状态进行控制，主要包括在初始化状态下设置环境监测采样周期等参数和通过以太网/RS422 接口装订、启动、切换待机状态和采样状态，启动进入参数采集状态后设置参数不可再进行更改，直到采集工作结束/管理员密码访问人工停止后才能重新更改状态和设置。

3.2 软件主要功能描述

软件主要包含以下几种功能：

1) 设备自检功能：模块上电完成自检测试并记录自检结果。环境监测模块还可通过以太网或 RS422 接口接收自检指令并完成自检测试并回报自检结果码。

2) 环境参数监测功能：可对被监测设备存贮、使用和运输状态的环境温度、湿度、大气压、振动等数据按照设定的采样周期定时监测并同时与监测时间保存在环境监测模块中。

3) 数据存储功能：模块通过内置存储器存储采样数据。存储器中数据可根据指令进行清除，也可以在上次记录数据的基础上循环记录。

4) 数据传输功能：所有已保存的测量数据通过以太网或 RS422 接口迅速传输到外部设备。

5) 通电时间记录功能：通过 MCU 的 RTC 获得绝对时间，通过北斗授时设备完成授时操作，依据上、下电工作时间记录并显示本次通电时间和累计通电时间。

6) 授时功能：通过与北斗授时电路的通讯完成环境监测模块的授时，即依据北斗授时电路的时间数据更新 MCU 的 RTC 时钟。通过以太网接口对外提供授时数据信息，完成对其他设备的授时操作。

7) 系统管理功能：提供模块的参数设置、状态切换与管理。

3.3 软件实现流程图

软件采用多线程的方式进行调度，完成环境参数测量、环境参数存储、环境参数发送、管理接口指令响应、网络通讯接口响应等操作。

当环境监测模块采用外部供电模式工作时，保持模块原有设置，同时为自带锂电池充电。模块首次使用时，通过以太网接口访问模块，进行初始状态与参数设置，然后启动工作。设备非首次使用时，模块保持已设置工作状态，完成环境参数测量并进行数据存储，通过以太网接口进行数据通讯。图 9 为软件工作流程图，上电完成硬件初始化后记录一次上电时间，当硬件自检正常后读取和设置系统参数，开始系统调度工作。

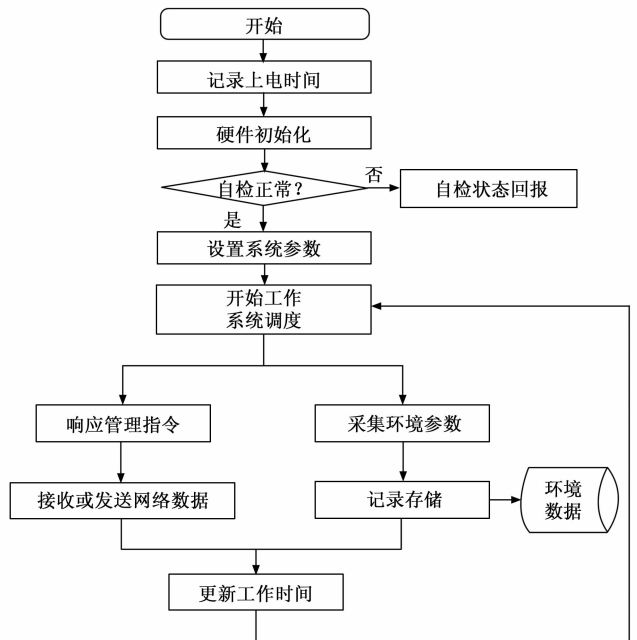


图 9 软件工作流程图

4 实验结果与分析

本设计环境监测模块在专业环境实验室进行了温湿度

测量、大气压力测量、加速度测量、北斗授时精度测试等性能试验, 测试环境如图 10 所示。

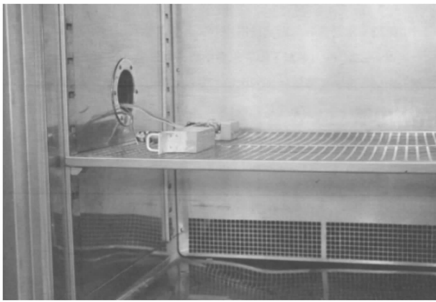


图 10 温湿度测试环境

温度测量试验步骤及测试数据如下所示:

- 1) 实验前在标准大气条件下对样品外观、结构进行目视检查, 并检测功能性能。
- 2) 将样品放置线性快速温度变化试验箱、高低温湿热试验箱内, 按照指标要求对样品施加规定的高低温实验应力。记录数据如表 2 和表 3 所示。

表 2 温度测试数据 $^{\circ}\text{C}$

设置温度	测试数据	温度计	误差
-40	-35.7	-36.5	0.8
-20	-19.8	-19.2	0.6
0	1.7	1.3	0.4
20	20.3	21	0.7
40	41.6	40.8	0.8
60	60.5	59.4	1.1

表 3 湿度测试数据 %

设置湿度	测试数据	湿度计	误差
20	20.5	19.6	0.9
40	41.8	42.1	0.3
60	61.4	61.3	0.1
80	80.6	79.8	0.8

大气压力测量试验步骤及测试数据如下所示:

- 1) 实验前在标准大气条件下对样品外观、结构进行目视检查, 并检测功能性能。
- 2) 将样品放置在如图 11 所示的高低温低气压试验箱内, 按照指标要求对样品施加规定的低气压试验应力。记录数据如表 4 所示。

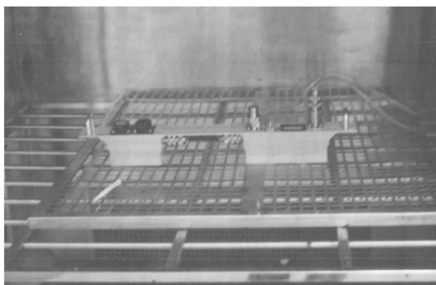


图 11 低气压测试环境

表 4 压强测试数据

设置压强/bar	测试数据/bar	气压计/bar	误差/bar
0.3	0.29	0.294	0.004
0.5	0.51	0.505	0.005
0.7	0.71	0.701	0.009
0.9	0.92	0.899	0.021

加速度测量试验步骤及测试数据如下所示:

- 1) 实验前在标准大气条件下对样品外观、结构进行目视检查, 并检测功能性能。
- 2) 将样品放置在如图 12 所示的离心式恒加速度试验台上, 按照指标要求对样品施加规定的加速度试验应力。记录数据如表 5 所示。

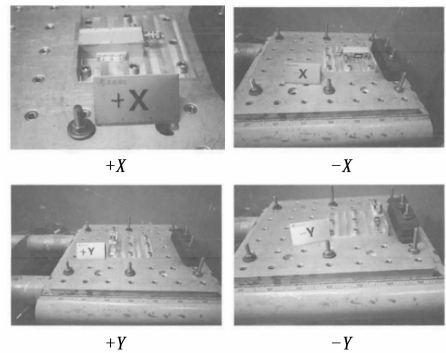


图 12 振动测试环境

表 5 振动测试数据 g

轴向	设置参数	测试数据	试验机数据	误差
X	4	4.010	4.02	0.01
	8	8.070	8.11	0.04
	12	12.203	12.24	0.037
	15	15.328	15.33	0.002
-X	4	3.953	4.02	0.077
	8	8.016	8.11	0.094
	12	12.150	12.22	0.07
	15	15.297	15.29	0.007
Y	4	4.162	4.02	0.038
	8	8.164	8.11	0.054
	12	12.227	12.20	0.027
	15	15.314	15.33	0.014
-Y	4	3.836	3.90	0.064
	8	7.910	7.98	0.07
	12	11.986	12.01	0.024
	15	15.078	15.11	0.032
Z	4	4.103	4.04	0.063
	8	8.144	8.15	0.006
	12	12.254	12.30	0.046
	15	15.302	15.24	0.062
-Z	4	4.012	4.02	0.08
	8	8.088	8.11	0.022
	12	12.183	12.21	0.027
	15	15.245	15.30	0.055

北斗卫星授时时间精度测试：本测试实验步骤较为简单，将模块的本地时间和标准北京时间对比求出误差即可。

表 6 北斗卫星测试数据

测试本地时间	北京时间	误差
09:52:43	09:52:43	0

电池实际功耗测试：将模块监测数据采集周期设置为 1 800 s，断开外部 28 V 供电。连续 12 个月持续检测内部电池电压下降数据，并通过电压/电量换算公式计算得到内部电池电量消耗情况如图 13 所示。

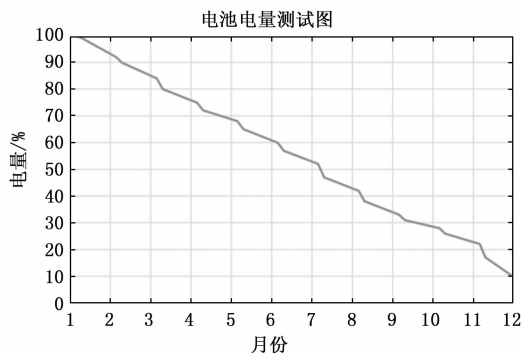


图 13 电池电量消耗曲线图

从以上试验的测试数据和测试结果可以看出，本设计环境监测模块各项指标均能满足设计要求，可以实现自主长时间持续的环境参数监测功能。

5 结束语

本文论述了超低功耗自守时环境监测模块的系统硬件和软件的设计与实现，通过微处理器作为核心控制器对各类传感器采集到的数据进行分析、处理、存储和传输。从而实现武器装备和保障设备在使用、运输、贮存中所处环境参数的监测。该设备可使用在多个方面，具有较高的应用价值，为装备所处环境实时监测提供了一种成熟方案。

参考文献：

[1] 毛会琼, 陈世海, 范建国, 等. 基于无线传感器网络的环境监测系统的设计 [J]. 工矿自动化, 2009, 35 (8): 119-122.

[2] 蔡卓凡. 一种低功耗无线温室培养环境监测系统的设计 [J]. 数字技术与应用, 2014 (3): 145-147.

[3] 吴学军, 雷 雄. 基于低功耗器件的无线环境监测器设计 [J]. 电子技术应用, 2011, 37 (5): 138-141, 145.

[4] 汤朝明. 低功耗煤矿无线监测系统的设计与实现 [J]. 矿业安全与环保, 2013, (4): 31-34.

[5] 刘迎春, 叶湘滨. 传感器原理设计与应用 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2004.

[6] 徐科军. 传感器与检测技术 (第 4 版) [M]. 北京: 电子工业

出版社, 2016.

[7] 张鸣凤, 谢家祖, 吴 箬, 等. 基于 GPS 和北斗卫星授时的高精度时间显示系统设计 [J]. 电子制作, 2021 (12): 66-67, 75.

[8] 张杨泽明, 刘红旺. 基于北斗通信的水环境监测系统设计 [J]. 水电站机电技术, 2021, 44 (8): 108-112.

[9] 曾一凡, 吴思琪. 基于 FPGA 和有限状态机的守时系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (5): 1565-1567.

[10] 一种基于在线监测技术的温度传感器 [J]. 传感器世界, 2021, 27 (3): 43.

[11] 李晓红, 王瑞荣. 基于单片机的温度检测系统设计 [J]. 电子测试, 2020, (15): 24-25.

[12] 邢 凯. 基于单片机的室内无线环境监测系统设计与应用 [D]. 南宁: 广西民族大学, 2014.

[13] 李利华, 高 晓, 潘传芳, 等. 电容应变式压力传感器原理及检测电路设计 [J]. 物理实验, 2002 (5): 10-12.

[14] 王震寰. 基于单片机的振动测量仪设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

[15] 黄应强, 温洪昌. 基于单片机的振动数据实时采集系统 [J]. 电子测试, 2018 (2): 10-13.

[16] 方 舟. 基于以太网的环境监测控制系统的设计 [J]. 信息技术与信息化, 2020 (7): 173-175.

[17] 李庆辉. RS-422A 接口在单片机系统中的应用 [J]. 辽宁师专学报 (自然科学版), 2008 (1): 97-98.

[18] 焦凤昌, 龚仁喜, 臧 慧, 等. 一种新型的无线低功耗环境指数传感器 [J]. 传感器与微系统, 2013, 32 (8): 81-84.

[19] 赖方民. 一种低功耗的通信设备环境监控系统 [P]. 广东: CN206960909U, 2018-02-02.

[20] 张文杰, 邹念龙, 董丹迪. 基于低功耗单片机的矿井环境监测系统设计 [J]. 山东工业技术, 2018 (19): 95, 116.

[21] 刘 旭. 高精度高稳定度水下守时模块设计与实现 [C] // 2017 年中国造船工程学会优秀学术论文集, 2018.

[22] 王 建, 徐木海, 潘斌斌, 等. 一种低功耗无线环境监测装置设计 [J]. 工业控制计算机, 2010 (6): 126-127.

[23] 姚先华, 江数兵, 王正禹. 一种基于 4G 网络的低功耗环境监测设备 [P]. 江苏: CN210627477U, 2020-05-26.

[24] 张军民, 戴 斌. 一种药品存储运输环境监测智能模块 [P]. 浙江: CN107063338A, 2017-08-18.

[25] 姚营营. 基于 MSP430 单片机的环境监测仪设计 [D]. 大连: 大连交通大学, 2012.

[26] 孙瑞瑞. 低功耗嵌入式数据采集系统的设计与实现 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2015.

[27] 石伟峰, 魏 炜. 低功耗环境监测系统设计与实现 [J]. 宇航计测技术, 2014, 34 (1): 67-70.

[28] 李中华. 一种便携式多参数环境监测仪的设计 [J]. 电子技术应用, 2003, 29 (5): 15-18.

[29] 任 伟, 顾小莉, 王丽华. 基于 ZigBee 的低功耗无线温室环境监测系统设计 [J]. 农机化研究, 2014, 36 (9): 103-107.