

分布式光伏数据采集器的设计与实现

鲍云峰, 田茂, 孙军, 段沛

(湖北大学 计算机与信息工程学院, 武汉 430062)

摘要:“十三五”期间,我国分布式光伏发电将进入加速发展的快车道;针对现有监控设备存在的数据传输低效、传输方式单一和数据无法存储等问题,结合分布式光伏发电监控设备布局分散、网络受限等特点,提出一种基于 ARM Cortex-M3 嵌入式处理器的分布式光伏数据采集器方案,并从硬件和软件两方面进行数据采集器的设计,实现了数据的远程传输、存储备份和本地显示等多种功能;该采集器通过 RS485 接口、Modbus 协议实现了对逆变器数据的采集,通过 GPRS 模块、TCP/IP 协议实现了数据的远程传输,并在本地采用 LCD 显示采集器运行数据、SD 卡备份采集的数据;实验表明,分布式光伏数据采集器具备较高的数据传输成功率,解决了分布式光伏发电的难题,在光伏发电领域将有很好的应用前景。

关键词:分布式光伏; Cortex-M3; RS485 接口; GPRS

Design and Implementation of a Distributed Photovoltaic Data Collector

Bao Yunfeng, Tian Mao, Sun Jun, Duan Pei

(School of Computer Science and Information Engineering, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: During the “13th Five-Year” period, China’s distributed photovoltaic power generation will enter the fast lane of accelerated development. In view of the problems of low efficiency of data transmission, single transmission mode and inability to store data in the existing monitoring equipment, a distributed photovoltaic data collector based on ARM Cortex-M3 embedded processor is proposed in this paper, which is based on the distributed photovoltaic power generation monitoring equipment, which is distributed and limited in network. The scheme is based on hardware and software two. The data collector is designed to realize the functions of remote data transmission, storage backup and local display. The collector realizes the acquisition of the data of the inverter through the RS485 interface and the Modbus protocol, realizes the remote transmission of the data through the GPRS module and the TCP/IP protocol, and uses the LCD to display the data of the collector and the data collected by the SD card. The experiment shows that the distributed PV data collector has a high success rate of data transmission, and solves the problem of distributed photovoltaic power generation. It will have a good application prospect in the field of photovoltaic power generation.

Keywords: distributed photovoltaic; Cortex-M3; RS485 interface; GRPS

0 引言

目前,太阳能并网发电的应用对象主要分为 3 个方向:集中型光伏电站、商用型并网发电和家庭户用型并网发电。光伏数据对于供应运营商和用户都十分重要,如发电量、发电效率和设备运行情况等都是供应商和用户关注的信息,如何高效的收集这些数据就显得非常重要^[1]。

在光伏监控系统中,PC 机直接通过 RS485 总线或 RS485 总线伺服器将采集到的数据直接或通过网络传输至数据中心,传输正确率无法保证,传输方式单一,丢包可能性大,铺设通信线缆成本高,数据无法存储,无法本地显示,出现故障无法报警,无法兼容多种主流受控逆变器设备等^[2]。同时,商用和户用型发电设备具有布局分散、网络连接受限等特点,这就亟需依托嵌入式的平台的具有数据显示、存储、转发功能的软件系统来实现基础数据的

安全管理和传输,而分布式光伏数据采集器能够满足商用和户用型的需求^[3]。

1 总体架构设计

分布式光伏数据采集系统主要包括分布式光伏数据采集器和后台信息中心两部分,其总体架构如图 1 所示。

分布式光伏数据采集器由嵌入式处理器、RS485 通信模块、GPRS 通信模块、LCD 液晶、SD 卡模块组成^[4]。其中,嵌入式处理器采用基于 ARM Cortex-M3 内核的芯片,运行符合工业规范的嵌入式实时操作系统 uCOS II,负责控制数据采集、通信和显示等任务;RS485 通信模块负责采集光伏发电设备组中逆变器等设备的运行参数;GPRS 通信模块负责定时将采集的数据通过网络传输至后台信息中心,供 PC 端应用程序访问,为管理者提供远程的光伏发电数据可视化;LCD 在本地显示设备运行数据,方便普通用户查看光伏发电信息,也利于维修人员检修设备;SD 卡用于自动备份光伏数据采集器获取的信息,在网络条件不稳定的情况下,可延期发送数据,避免数据丢失。

后台信息中心由服务器、PC Web 端和移动 APP 终端三部分组成。分布式光伏数据采集器通过 GPRS 通过 TCP/IP 协议将数据传输到服务器,再由 PC Web 端和移动 APP

收稿日期:2018-05-10; 修回日期:2018-05-28。

基金项目:湖北省教育厅青年基金(Q20161012)。

作者简介:鲍云峰(1992-),男,湖北麻城人,硕士生,主要从事嵌入式系统设计方向的研究。

通讯作者:孙军(1979-),女,湖北襄阳人,讲师,主要从事软件工程、网络安全方向的研究。

终端对光伏数据进行多样展示^[5]。按照数据采集系统的总体结构设计要求, 设计的光伏数据采集器的硬件结构如图 2 所示。本文将从着重描述分布式光伏数据采集器的硬件和软件的设计与实现。

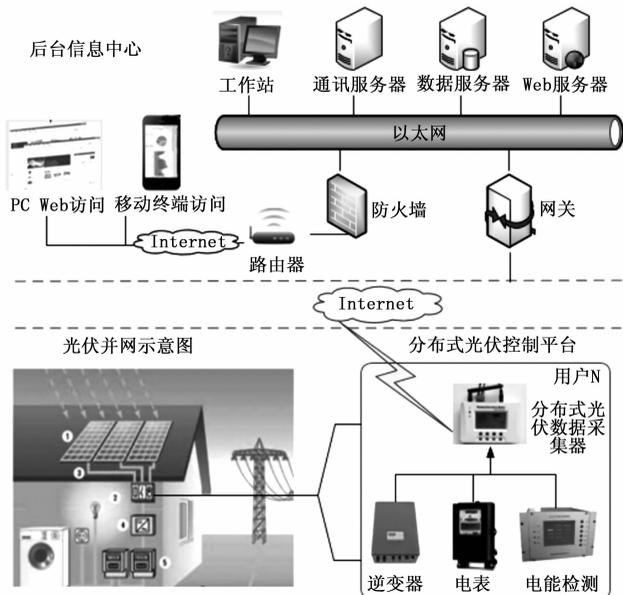


图 1 分布式光伏数据采集系统架构

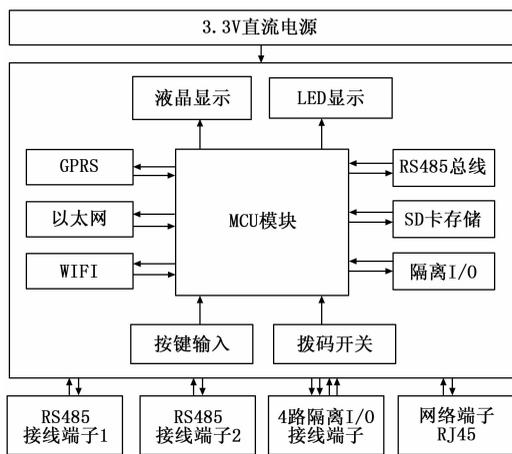


图 2 分布式光伏数据采集器硬件框图

2 硬件设计部分

硬件设计主要包括基于 ARM Cortex-M3^[6] 内核的控制器最小系统、RS485 通信模块、GPRS 通信模块、LCD 显示、SD 卡外部存储和电源模块。

分布式光伏数据采集器控制器选型综合处理器速度、存储容量和外设接口等情况, 采用低成本、稳定性高的 STM32F207VET6 芯片。该芯片为 32 位处理器, 主频可达 120MHz, 能够运行 uCOS II 实时操作系统; 拥有 192KB SRAM、512KB FLASH、32 位定时器、2 个 DMA 控制器、6 个串口、1 个 RTC (具备日历功能)、1 个 SDIO 接口、1 个以太网 MAC 控制器和 1 个 FSMC 接口等硬件资源, 配置

满足光伏数据采集器的硬件电路设计需求^[7]。

LCD 显示选用晶联讯电子的 JLX256128G-257 型模块, 驱动 IC 为 ST75256 功能较强、稳定性好, 采用 3.3V 供电, 整个 LCD 带背光情况下功耗不大于 100 mW。LCD 可显示图片、汉字、英文、数字和符号, 如最大显示 256×128 点阵单色图片或显示 16 个×8 行=64 个的 16×16 点阵的汉字, 单页面可显示信息量满足本次需求。LCD 不带字库, 降低 LCD 成本, 将设备所需文字取模后, 存放在数据采集器本地, 实现 UI 的自定义显示, 提升界面的美观性。LCD 接口连接在处理器自带的 FSMC 总线上, 提高了 LCD 的刷屏速度, 降低了 LCD 驱动开发难度, 采用 8080 时序并口方式进行数据传输。LCD 背光通过处理器的 GIPO 进行控制, 用户触发液晶显示时点亮背光, 超时未操作液晶时背光将熄灭。液晶显示电路如图 3 所示。

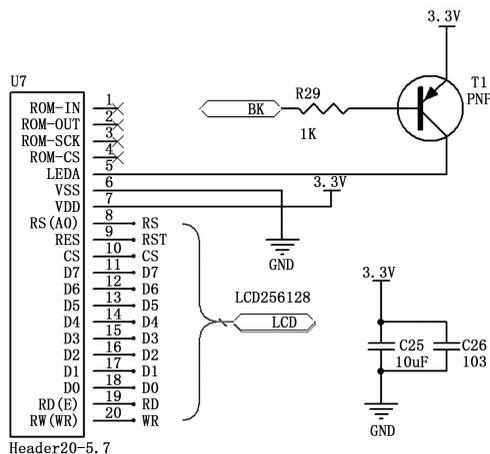


图 3 液晶显示电路

RS485 通信模块采用 MAX3485 芯片进行电平转换, RS485 接口电路如图 4 所示。R33 为终端匹配电阻, 减弱反射信号, 保证通信稳定。R32 和 R34 为偏置电阻, 以保证 RS485 总线空闲时维持高电平^[8]。RS485 具有抗干扰能力、传输距离远、数据传输速度快和支持大量节点等特性, 在工业领域得到广泛应用。设计的两路 RS485 接口均增加隔离环节, 即完成电平转换又实现信号隔离, 减少了干扰信号经由信号线传入传出, 提高系统的抗干扰能力。RS485 总线在 10m 时数据传输速率最高可达 10Mbps, 总线最长可传输距离为 1200m, 此时速度可达 100kbps。一般 RS485 最多支持 32 个节点, 特定的 RS485 芯片节点最大可达 400 个, 本次设备连接 8 个节点, 即支持对 8 台光伏逆变器进行数据采集。

与后台中心通信采用 GPRS 模块进行数据通信, 预留了以太网和 WIFI 扩展接口。GPRS 是在现有 GSM 系统上发展出来的一种新的数据承载业务, 支持 TCP/IP 协议, 可以与分组数据网 (Internet 等) 直接互通。GPRS 无线传输系统的应用范围非常广泛, 几乎可以涵盖所有的中低业务和低速率的数据传输, 尤其适合突发的小流量数据传输业务。本硬件平台的 GPRS 无线通信模块为 SIM900A, 内嵌

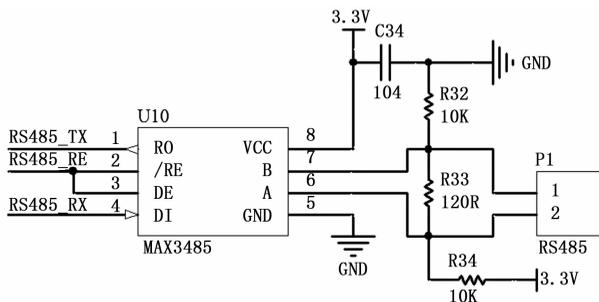


图 4 RS485 接口电路

了 TCP/IP 协议，采用工业级的 GPRS 模块，适用于单片机数据采集传输系统没有 TCP/IP 协议栈但采用串口通信的情况。SIM900A 采用 4V 供电，功耗较低，待机模式电流低于 18mA，支持 900/1800 MHz 频段，满足分布式光伏数据采集器所处网络环境。采用 SIM900A 设计的最小系统如图 5 所示，模块射频发射时电流峰值可达 2A，设计时 VBAT 引脚应并接大电容，且 VBAT 在 PCB 走线时尽量短、宽来减少走线阻抗，提高模块的稳定性。

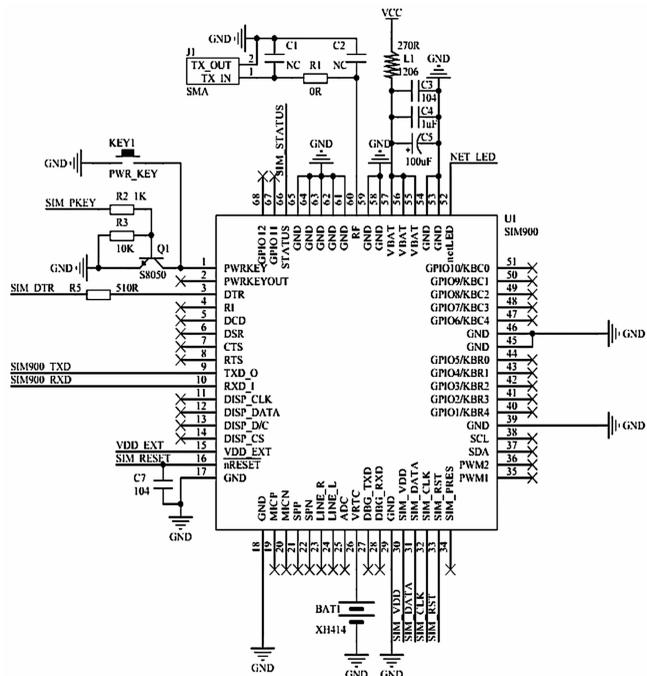


图 5 GPRS 模块最小系统

SD 卡接口采用 STM32F207VET6 自带的 SDIO 接口^[9]进行连接，其连接电路如图 6 所示。SD 卡通过 SDIO 接口进行数据读写，通过时钟信号线 CLK (SDIO_CLK 引脚)控制时钟周期，命令信号线 CMD (SDIO_CMD 引脚)传输 SD 卡主机发送的命令，数据线 DATA (SDIO_D0~SDIO_D3 引脚)传输 SD 读写的数据。SD 卡采用容量为 8GB 的 micro SD，减少设备体积。

电源模块电路如图 7 所示，输入 5V/2A 直流电，通过 ASM1117 芯片转换为 3.3V，为整个设备（除 GPRS 模块外）供电。5V 通过 MIC29302 芯片转换为 4V，为 GPRS 模

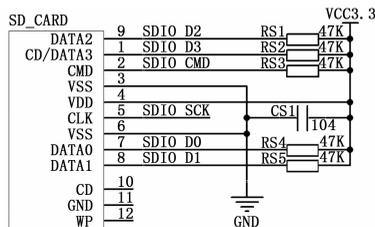


图 6 SD 卡接口电路

块供电。整个电路具有完善的滤波电路，供电稳定可靠。在 PCB 设计时应考虑电源布局和布线，GPRS 模块的供电走线应适当加宽、布线短。

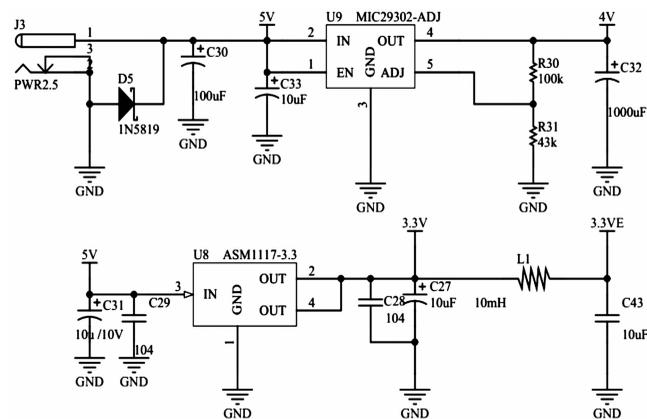


图 7 电源模块电路

数据采集器选用小功率的 LED 指示灯来实现电源供应、设备运行状态和网络情况的指示，便于观察、分析整个设备运行情况。数据采集器还预留了四位拨码开关，用于后期设备功能的扩展。4 个按键用于切换 LCD 显示界面、本地配置数据采集器运行参数，如服务器 IP 地址和端口号、数据采集波特率、数据发送时间间隔和屏幕休眠时间参数。

由于分布式光伏数据采集器通常用在网络环境有限的环境，数据在网络不稳定的情况下不能及时传输，结合 SD 卡数据备份功能，通过 GPRS 网络可在网络良好且无工作任务的情况下，将未发送的数据继续传输，数据传输成功率要求达到 100%。整个采集器实现了本地数据可视化、运行状态可视化、参数可配置和低功耗运行等功能，通过 GPRS 网络实现了数据和状态的远程可视化，极大地方便了对分布式光伏逆变器的监控，提升了用户使用效果。

3 软件设计部分

光伏数据采集器软件系统基于 C 语言开发，在集成开发环境 Keil MDK 下编译、调试。设计时采用由总到分策略进行模块化开发，以便于调试、维护、升级。开发的软件保存在用户层，通过调用 CMSIS 层的设备外设函数和 uCOS II API 来管理硬件以及实现相应的功能，其架构如图 8 所示。

光伏数据采集器软件系统主要包括 5 个部分，分别是在线设备查询、数据获取、数据存储、数据传输和人机交互界面。该软件系统通过查询和识别在线的受控设备，并

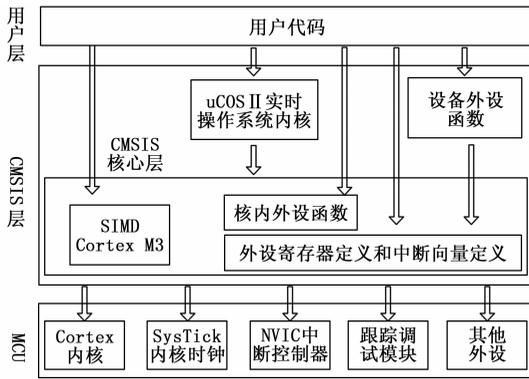


图 8 光伏数据采集器软件架构

定时的从这些设备上获取光伏电参量数据和环境数据。同时, 通过 GPRS 模块或以太网与服务器建立的 TCP/IP 连接将数据传输到服务器上, 相关数据也被保存到 SD 卡中。人机交互界面则用以实现实时数据显示与系统参数的显示和修改。光伏数据采集器软件结构如图 9 所示。

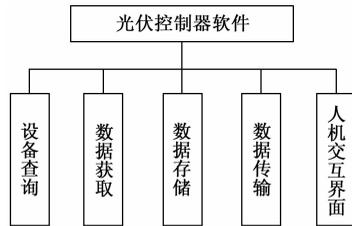


图 9 数据采集器软件功能划分

1) 设备查询流: 光伏数据采集器通过 485 总线与受控逆变器连接, 其通信接口为串行通信口采用标准的 RS485, 信息传输方式为异步方式, 起始位 1 位, 数据位 8 位, 停止位 1 位, 无校验位。传输时先传高字 (节), 后传低字 (节), 数据传输波特率默认使用 9600bps。检查在线设备之前先设置所查询的初始设备地址, 根据地址生成测试帧。发送测试帧, 根据 Modbus 协议, 如果该设备号地址在线则会响应包含地址的数据帧。通过解析发送和响应的地址相同则可判断该设备在线, 依次增加地址查询设备即可获取所有在线设备, 并将这些地址保存在在线设备地址表中, 同时记录总的在线设备数。查询在线设备流程如图 10 所示。

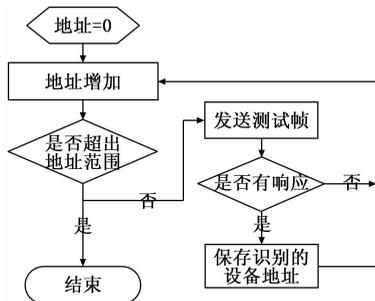


图 10 设备查询流程图

2) 中断信号量: 数据采集器设备的数据获取存储和传输有明显的周期规律, 在工作时间段 (7:00~18:00) 数

据采集器会每个 15 分钟一场采集数据, 存储数据, 发送数据。采集、存储和发送数据的时间依次间隔 1 分钟。该过程的实现是闹钟 A 每分钟产生一次中断, 以 15 次中断为一个周期。每个中断周期中, 当 RTC 时间为工作时间段且中断累积到 13 次时及向获取数据任务发送获取数据的信号量; 当 RTC 时间为工作时间段且中断累积到 14 次时及向存储数据任务发送存储数据的信号量; 当 RTC 时间为工作时间段且中断累积到 15 次时及向传输数据任务发送传输数据的信号量。具体流程如图 11 所示。

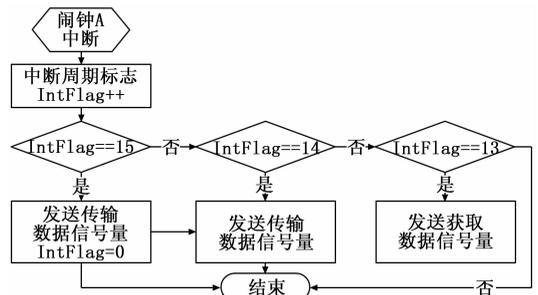


图 11 中断信号流程图

3) 数据获取: 通信的物理层是数据采集器与受控设备通过串口转接的 RS485 连接, 数据采集器串口与转换芯片的收发直接连接, 数据采集器另有 I/O 控制芯片收发方向。软件中先初始化串口和方向控制口, 再通过应用层的 Modbus 协议获取受控设备的数据。

其中物理层通信流程如下:

- (1) 通过将 USART_CR1 寄存器中的 UE 位置 1 来使能 USART;
- (2) 在程序中配置 USART_CR1 中的 M 位来定义字长;
- (3) 在程序中设置 USART_CR2 中的停止位数;
- (4) 若执行多缓冲区通信, 在 USART_CR3 中使能 DMA, 并根据多缓冲区通信方式来进行 DMA 寄存器的设置;
- (5) 使用 USART_BRR 寄存器来配置合适的波特率;
- (6) 将 USART_CR1 中的 TE 设置为高电平, 使得在第一次传输数据时首先发出一个空闲帧;
- (7) 往 USART_DR 寄存器传入需要传输的采集数据;
- (8) 当传输的数据全部写入 USART_DR 寄存器后, 若 TC 位变为高电平, 则表明最后一个帧的传送已完成。

数据采集器与逆变器通信的总线采用 RS485, 应用层协议采用工业界通用的 Modbus 标准协议。Modbus 标准包含两个通信规程中采用的 Modbus 应用层协议及服务规范: 串行链路上的 Modbus 和 TCP/IP 上的 Modbus^[10]。本文的数据采集器应用层通信协议采用的是 Modbus 串行链路上基于 485-A 的通信协议。Modbus 的工业通用帧结构如图 12 所示, 一般通过应用数据单元 (ADU) 来表示。ADU 主要由简单数据单元 (PDU) 和其他的附加域构成, 其中 PDU 与基础通信层无关。对于串行链路通信方式, RS485

ADU 最大可为 256 字节，一般服务器地址域占 1 字节，CRC 校验码占 2 字节，则 PDU 最大为 253 字节。Modbus 通过一个“big-Endian”表示地址和数据项，传输多个数据时将先发送最高有效位。

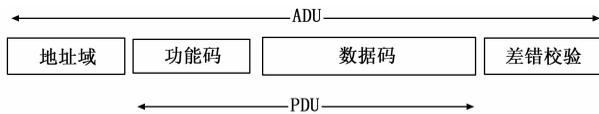


图 12 Modbus 工业通用帧结构

数据采集器在收到 RTC 闹钟 A 中断每 15 分发送给该模块的信号量后，按在线设备地址编号表内的地址依次生成发送数据帧获取光伏数据并更新到数据缓冲区。如果获取数据失败，则只更新对应设备地址号对应缓冲区的设备状态，数据不更新。获取数据流程如图 13 所示。

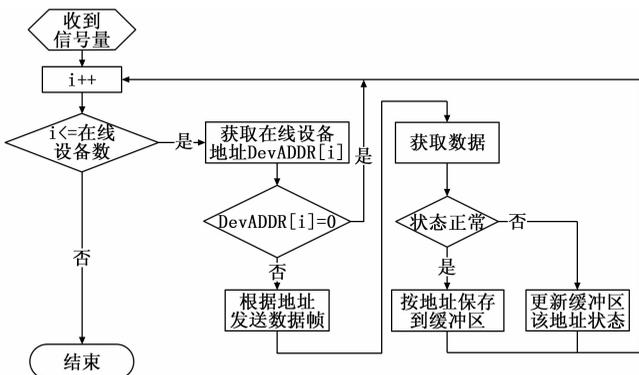


图 13 获取数据流程图

4) 保存数据：在数据获取后，收到 RTC 闹钟 A 中断每 15 分发送给该模块的信号量，则根据获取到的设备状态将缓冲区数据存储到 SD 卡中，同时保持存储时间。保存数据流程如图 14 所示。

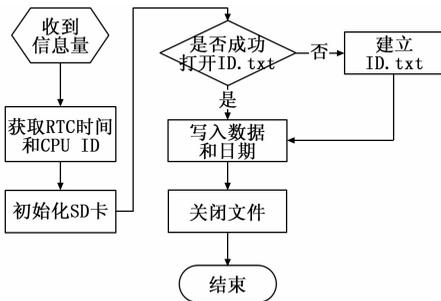


图 14 保存数据流程图

其中 SD 卡的初始化^[12]过程比较复杂，具体过程分析如下：

- (1) 对常见 SD 卡的错误类型进行报错处理，确保 SDIO 接口初始化成功；
- (2) 初始化 SDIO 的外设时钟，进行工作模式设置；
- (3) 上电后发送 CMD0 命令，SD 卡进入空闲状态；
- (4) 发送 CMD8 命令，若 SD 由响应且 CRC 检验一致，则 SD 卡为支持 2.0 版本的 SD 卡，无响应则为 1.x 版本的

SD 卡或者 MMC 卡；

(5) 通过命令 CMD55+ACMD41，检测 SD 卡上电情况，若响应 ACMD41 命令后，OCR 寄存器第 30 位 CCS 为 1，则 SD 卡为 2.0 版本的 SDHC 卡，反之为 SDSC 卡；

(6) 发送 CMD2 命令，判断 SD 卡接入情况，以及获取 CID 寄存器内容，如 SD 卡生产商 ID、名称和生产信息等；

(7) 发送 CMD3 命令，将 SD 卡的相对地址传输给主机（数据采集器），主机发送 CMD9 命令来获得 SD 卡的具体数据，如容量和扇区大小等信息；

根据上面步骤，SD 卡初始化基本完成。通过发送 CMD7 命令，使得 SD 卡进入传输模式，可开始对 SD 卡的读/写操作。

5) 数据传输：在通信流程中，数据获取并收到 RTC 闹钟 A 中断每 15 分发送给该模块的信号量后，则将缓冲区数据通过 TCP 连接发送到远处服务器上。具体流程如图 15 所示。

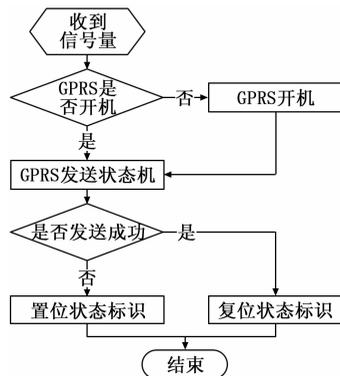
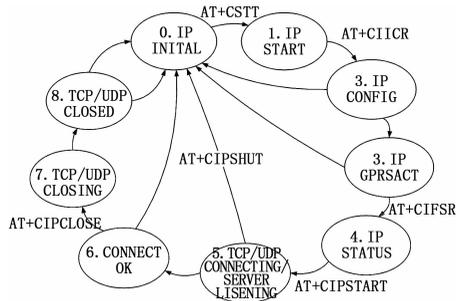


图 15 发送数据流程图

其中，GPRS 状态机是保证软件在多个 GPRS 运行状态之间正常转换，使 GPRS 正常完成数据发送或正常关闭，以保证下一次数据正常发送。其状态转换如图 16 所示。



- (7) 查询本机 IP 地址;
- (8) 建立连接, 配置远程服务器 IP 地址和端口号和 TCP 连接方式;
- (9) 发送数据;
- (10) 发送结束帧标识符;
- (11) 关闭 TCP 连接;
- (12) 关闭移动场景;
- (13) 关机断电。

6) 人机交互界面: 人机界面用于数据显示, 系统状态显示, 系统参数显示和系统设置, 本人机交互的主要设计思想是查找表状态机设计, 窗体结构体设计, 控件设计和回调函数^[13]。

其中, 查找表状态机是用以通过查找表搜索界面跳转的逻辑关系; 窗体结构体这包含了所有界面的窗体信息, 如窗体 ID, 窗体控件指针, 回调函数的指针; 控件设计则是根据控件的不同功能设计窗体中的背景控件, 列表控件和输入焦点; 回调函数则是根据不同的按键和整体的输入所执行的函数, 有些与窗体相关的函数具有通用性可以重复调用, 如窗体初始化函数、窗体切换函数、焦点切换函数和列表内容切换函数等。

对应不同的窗体, 其大部分的结构和回调函数都是相同的, 他们的区别这主要在于背景信息, 焦点信息, 列表控件和初始化过程中的数据绑定函数及按键更新回调中的数据更新函数的不同。其中窗体结构体设计如图 17 所示。

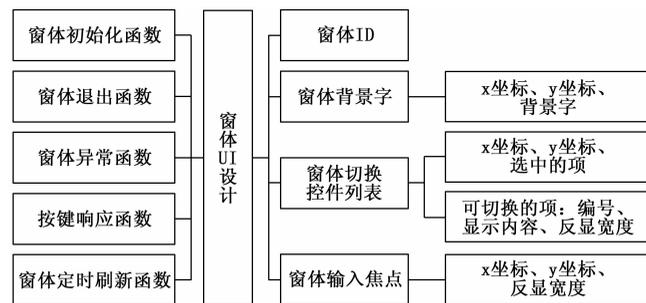


图 17 窗体结构体设计

窗体 UI 设计主要功能函数有窗体初始化函数、窗体退出函数、窗体异常函数、按键响应函数和窗体定时刷新函数。窗体初始化函数负责初始化每个界面显示的内容, 窗体退出函数负责切换到当前窗体退出后的窗体, 窗体异常函数负责跳转到异常发生时所设置的跳转窗体, 按键响应函数负责将窗体切换到按键切换的窗体, 窗体定时刷新函数用于定时更新界面上动态显示的内容, 如设备运行时间和日累计光伏发电量等。

窗体通过唯一的 ID 进行索引来切换。窗体上显示的内容通过 x 、 y 坐标来放置, 利用按键来选择切换项, 反显用来指示选中项。

窗体的运行是依赖于信号量的触发, 信号量主要是通过本地 4 个按键输入来产生, 其运行流程如图 18 所示。

根据光伏数据采集器功能需要, 其界面结构图如图 19

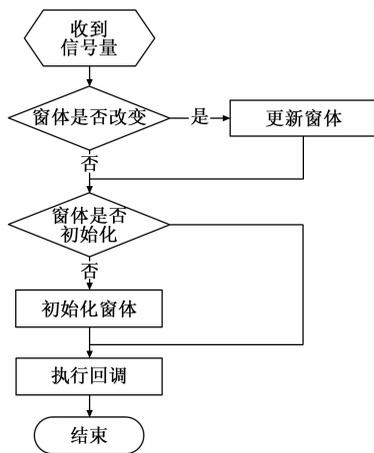


图 18 人机界面流程图

所示。用户可通过本地按键查询所关心的日累计发电量, 工程师可在本地查看数据采集器故障代码, 也可通过本地按键配置设备运行参数。

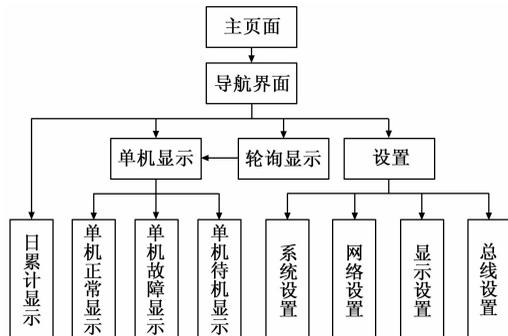


图 19 人机交互界面结构图

4 实物测试与分析

通过硬件设计的电路图绘制 PCB 文件进行打样, 采集元器件进行实物制作。在完成硬件实物基本版本制作后, 根据软件设计的功能进行硬件模块测试。经过多次测试硬件的模块功能, 确认硬件设计无误后, 开始软件和硬件的整体联合测试。

光伏数据采集器的 LCD 显示了连接逆变器的数量和轮询方式查询逆变器运行数据。本地可以通过 4 个按键进行参数设置和界面切换。

光伏数据采集器的维护只需定期检查网络指示灯是否正常, 发送数据时间是否有误。如果网络异常则重新检查网络连接, 若无网络接入条件且需要获取数据, 则将设备中 SD 卡取出, 通过 SD 卡中的 ID.txt 获取该设备保存的备份数据。

数据传输成功率通过数据库中日传输数据量、该数据生成时间戳和传输时间戳来判断, 设置传输时间 (7:00~18:00) 期间, 每隔一小时整点传输一次数据, 7:00 开始传输数据, 日传输数据条目应为 12 条, 且数据生成时间戳与传输时间范围内的整点时间大致接近。若数据传输时间戳不在 7:00~18:00 期间, 则该条数据网络不稳定情况

下,从 SD 卡备份数据导出对应时间段的数据。

在连续一周的 GPRS 网络发送数据测试过程中,数据发送成功率达到 99% 以上,表明光伏数据采集器的数据传输比较稳定。结合本地 SD 卡数据备份,在没有发电数据传输任务期间(18:00 至次日 7:00),对传输失败的数据进行二次发送,数据发送成功率可达 100%。

5 结论

本文设计与实现了分布式光伏数据采集器,解决了户用型光伏领域数据监控的难题。通过分布式光伏数据采集器,可实现对户用型光伏发电数据的远程监控,在网络受限的情况下仍可通过 SD 卡进行数据备份,避免运行数据丢失。

通过分布式光伏数据采集器传输的数据,可以监测光伏电站生产运行情况,统计分析电站历史运行数据,有利于实现电站日常工作和流程的规范化、标准化、数字化管理。分布式光伏数据采集器为光伏电站的正常运行和生产管理提供技术保障,在光伏发电领域将有着很好的应用前景。

参考文献:

[1] 赵柳洁,贺立三,郝庆英,等. 分布式户用并网光伏发电系统的试验研究 [J]. 能源与节能, 2017 (01): 63-67.

[2] 郭跃飞. 户用分布式光伏发电精准扶贫模式研究 [D]. 太原: 山西大学, 2017.

[3] Cirre C M, Berenguel M, Valenzuela L, et al. Feedback linear-
(上接第 298 页)

参考文献:

[1] 高金源,李陆豫,冯亚昌. 飞机飞行品质 [J]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 135-137.

[2] 项国辉,刘鹏,张磊. 飞参在飞机故障诊断中的应用 [J]. 教练机, 2016 (4): 65-68.

[3] 梁建海,孙秀霞,杜军. 基于数据挖掘的飞行参数处理方法研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25 (1): 76-79.

[4] 邸亚洲,姚凌虹. 基于飞参数据的大气数据计算机系统故障诊断 [J]. 计算机与数字工程, 2017, 45 (3): 449-452.

[5] 郑友胜,李泰安. 军用飞机飞行安全影响因素研究综述 [J]. 教练机, 2012 (4).

[6] 秦海勤,徐可君,王永旗,等. 基于飞参数据的航空发动机叶片故障分析 [J]. 航空发动机, 2014, 40 (5): 33-38.

[7] 高峰,曲建岭,周玉平,等. 基于飞参数据和支持向量机的航空发动机建模 [J]. 测控技术, 2013, 32 (9): 52-54.

[8] 施红,王强. 基于飞参数据的发动机碰摩故障检测模型仿真 [J]. 计算机仿真, 2014, 31 (11): 104-107.

[9] 许磊,张凤鸣. 缺失飞参数据填补的组合方法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46 (21): 210-212.

[10] 周文坤. 模糊偏好下多目标群体决策的一种客观赋权方法 [J]. 数学的实践与认识, 2006, 36 (3): 33-38.

[11] 王祖俪,王娟,石磊,等. 基于客观赋权法的多属性社交网络节点重要性排序 [J]. 计算机应用研究, 2016, 10: 2933-2936.

ization control for a distributed solar collector field [J]. Control Engineering Practice, 2007, 15 (12): 1533-1544.

[4] 宋俊慷. 光伏应用系统远程监测平台的研究与实现 [D]. 西安: 西安理工大学, 2016.

[5] 姜晓荣. 基于 GPRS 的太阳能热水系统数据采集器研制 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2015.

[6] Joseph Yiu. ARM Cortex-M3 权威指南 [M]. 宋岩,译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.

[7] 张洋. 原子教你玩 STM32 (库函数版) [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.

[8] 高金转,严帅,张会新. 基于 RS 485 总线的 ADS1258 数据采集网络系统设计与实现 [J]. 现代电子技术, 2018, 41 (7): 174-177, 182.

[9] 意法半导体. STM32F2xx 中文参考手册 [M]. 4 版. 2013.

[10] 曾敏,王永华,余松森,等. MODBUS 通讯协议在光伏发电能源管理控制器中的应用研究 [J]. 电子测试, 2017 (08): 48-50.

[11] 甘振华. 基于 SIM900A 的 GPRS 电能表远程采集模块设计 [J]. 电子技术, 2018 (04): 32-36.

[12] 黄永忠,于朝凯,周晓明,等. 分布式光伏电站数据通讯管理机的设计 [J]. 中国计量大学学报, 2017, 28 (03): 394-398.

[13] 吴坤雄. 一种嵌入式 UI 界面的设计原理浅谈 [J]. 福建电脑, 2017, 33 (01): 122-123.

[12] 姚裕盛,徐开俊. 基于 BP 神经网络的飞行训练品质评估 [J]. 航空学报, 2017, 1.

[13] 汪文革,王珍惜. 一种主客观综合的训练评估指标权重的确定方法 [J]. 舰船电子工程, 2013, 33 (8): 123-125.

[14] Lancaster J A, Khatwa R, Conner K J, et al. Flight simulator evaluation of an airport surface display with indications and alerts (SURF IA) [A]. Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2010 IEEE/AIAA 29th. IEEE [C]. 2010: 4. D. 2-1-4. D. 2-12.

[15] Shutao Z, Jingfeng H, Qitao H, et al. A low-cost PC-based flight simulator development [A]. ISSCAA 2008. 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, 2008 [C]. IEEE, 2008: 1-5.

[16] 樊治平,马建. 多属性决策中权重确定的一种集成方法 [D]. 1998.

[17] 陶菊春,吴建民. 综合加权评分法的综合权重确定新探 [J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21 (8): 43-48.

[18] 曹秀英,梁静国. 基于粗集理论的属性权重确定方法 [D]. 2002.

[19] 刘新建,张瑞凤. 多目标决策中一种确定权重的方法 [J]. 山西师范大学学报: 自然科学版, 2002, 16 (3): 20-22.

[20] 宋之杰,高晓红. 一种多指标综合评价中确定指标权重的方法 [J]. 燕山大学学报, 2002, 26 (1): 20-22.

[21] 郭亚军. 综合评价理论,方法及应用 [M]. 科学出版社, 2007.

[22] 张全. 复杂多属性决策研究 [M]. 东北大学出版社, 2008.