

基于嵌入式以太网的远程监控系统的设计与实现

胡祖辉¹, 施 俊², 吴国庆¹

(1. 南通大学 信息科学技术学院, 江苏 南通 226019;

2. 南通大学 交通与土木工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 为了以较低成本实现对环境和设备的远程监控问题, 采用 MSP430 单片机和 CS8900A 以太网控制器设计了一种基于嵌入式以太网的远程监控系统; 对系统的总体结构和软硬件设计进行了介绍; 通过移植简化的 TCP/IP 协议栈实现了嵌入式以太网; 将嵌入式网页存储于 MSP430 单片机的 Flash 存储器中, 通过软硬件协同构建了嵌入式远程监控服务器; 用户通过网络访问嵌入式网页可以随时查看和远程管理系统, 从而实现对系统的远程监控; 实验测试结果表明系统能够满足设计要求, 系统设计方案是可行的。

关键词: 嵌入式; 远程监控; MSP430; CS8900A

Design and Implementation of a Remote Monitoring System Based on Embedded Ethernet

Hu Zuhui¹, Shi Quan², Wu Guoqing¹

(1. School of Information Science and Technology, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. School of Communications and Civil Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: In order to realize remote monitoring of environment and equipment at low cost, a remote monitoring system based on embedded Ethernet is designed by using MSP430 microcontroller unit (MCU) and CS8900A network controller. The overall structure of the system and the design of software and hardware are introduced. Embedded Ethernet is implemented by transplanting simplified TCP/IP protocol stack. Embedded web pages are stored in Flash memory of MSP430 MCU, and an embedded remote monitoring server is constructed through hardware and software cooperation. Users can visit the embedded web pages to view and remote manage the system at any time through the network, so as to realize the remote monitoring of the system. The experimental results show that the system can meet the design requirements and the system design scheme is feasible.

Keywords: embedded system; remote monitoring; MSP430; CS8900A

0 引言

近年来, 随着互联网信息技术和嵌入式技术的发展, 基于 Internet 的远程监控系统成为监控领域发展的新趋势^[1]。基于 Internet 的远程监控系统因具有松耦合性、互操作性好、开发便利、异构资源可共享等优点而得到了广泛应用^[2]。国内外基于 Internet 的远程监控系统已经有了很多解决方案, 如段萍等^[3]采用 DSP 和 MQTT 协议实现了大棚温湿度远程监控系统, Sahu 等^[4]设计了基于嵌入式系统的数字温室监控系统, 郭稳涛等^[5]采用 ARM 和嵌入式 Web 技术设计了智能家居远程监控系统, 邓昀等^[6]采用 ARM 和 ZigBee/Wi-Fi 无线网络实现了基于物联网的智能家居远程

无线监控系统, 张文广等^[7]基于嵌入式技术设计了导弹测试设备远程监控数据采集设备, 冯建文等^[8]基于 ARM 和 TCP 协议实现了远程实验系统, 郑宇平^[9]基于物联网和嵌入式技术设计了船舶远程监控系统。本文提出了一种基于嵌入式以太网的远程监控系统, 硬件上采用 MSP430 单片机作为微处理器, CS8900A 作为以太网控制器, 软件上通过在 MSP430 单片机的 Flash 存储器中移植简化的 TCP/IP 协议栈和存储嵌入式网页来实现嵌入式 Web 服务器, 并基于嵌入式 Web 服务器实现对环境和设备的远程监控。与传统采用 DSP 和 ARM 作为处理器的嵌入式远程监控系统相比, 本文提出的系统方案具有低成本、低功耗、通用性强、稳定性高等特点。

1 系统总体设计

基于嵌入式以太网的远程监控系统由嵌入式监控服务器、监测模块和控制模块 3 个部分组成。整个系统以嵌入式监控服务器为核心, 通过在嵌入式监控服务器上实现以太网功能来实现系统的远程监测和控制。将嵌入式 Web 页

收稿日期:2019-04-12; 修回日期:2019-05-08。

基金项目:2019 年江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (KYCX19-2055)。

作者简介:胡祖辉(1984-),男,江西婺源人,博士研究生,助理研究员,主要从事智能信息处理、现代教育技术方向的研究。

面存储于微处理器中, 通过软硬件协同构成嵌入式远程监控服务器。用户通过 Web 浏览器访问嵌入式监控服务器, 可以实时查看监测模块采集的传感器数据信息, 同时可以进行开关控制操作, 通过控制模块实现对设备的远程控制。系统结构如图 1 所示。

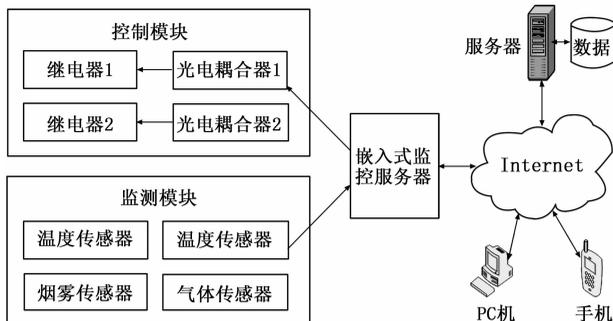


图 1 系统结构图

嵌入式监控服务器是一个集成了嵌入式以太网的面向远程监控服务的嵌入式系统。嵌入式技术就是将专用的计算机系统作为一个信息处理部件嵌入到应用系统中的一种技术, 它将软件固化集成到硬件系统中, 使软硬件一体化^[10]。嵌入式以太网是将 TCP/IP 协议嵌入硬件系统中以实现以太网功能。通过嵌入式以太网, 系统可以直接连入 Internet, 用户可以通过网络访问嵌入式监控服务器。用户可以通过 PC 机或手机等终端的 Web 浏览器对系统进行远程监测和控制, 从而实现基于 Internet 的远程监控。

监测模块包括温度传感器、湿度传感器、烟雾传感器、气体传感器等各种传感器, 负责对现场环境和设备等各种数据的采集和处理。传感器的种类和数量可以根据实际应用的需要增加或减少, 只需在系统软硬件上进行相应地调整即可。监测模块采集到的数据信息可以通过嵌入式监控服务器和 Internet 网络提供给用户远程访问和查看。

控制模块由多路光电耦合器和继电器组成的控制电路组成。通过光电耦合器和继电器来实现弱电控制强电, 输入端与输出端完全实现了电气隔离, 具有响应速度快、抗干扰能力强、稳定性高等优点。用户通过访问嵌入式监控服务器可以远程发出控制信号, 由控制模块作出相应的开关响应, 实现对系统的远程控制。

2 系统硬件设计

系统硬件主要采用 MSP430 单片机和 CS8900A 两个核心控制芯片来进行设计, 本设计采用的 MSP430 单片机的具体型号为 F 系列的 MSP430F1611。硬件原理图如图 2 所示。

从图 2 可以看出, MSP430F1611 单片机与 CS8900A 之间通过 8 位数据线 D [0] ~ D [7]、4 位地址线 A [0] ~ A [3]、读写控制线 IOR 和 IOW 相连。MSP430F1611 单片机提供了监测模块接口、控制模块接口和 JTAG 接口。监测模块接口主要是连接各种传感器, 控制模块接口可以连接

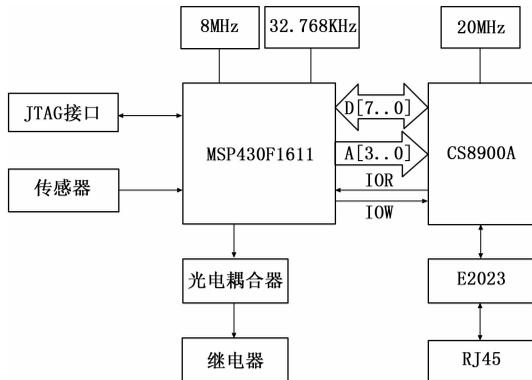


图 2 硬件原理图

多路光电耦合器和继电器。JTAG 接口用于程序下载和调试。CS8900A 以太网控制器提供 RJ45 网络接口, CS8900A 与 RJ45 之间通过网络变压器 E2023 相连。MSP430F1611 单片机有两个晶振: 一个为 8 MHz 的高速晶振, 另一个为 32.768 kHz 的低速晶振。CS8900A 以太网控制器有一个 20 MHz 的晶振。

2.1 MSP430F1611 单片机

本设计采用 MSP430F1611 单片机作为系统的主控制芯片, 用于软件程序的存储和运行。MSP430F1611 单片机是 TI 公司生产的一种 16 位的 430 系列单片机。该芯片具有以下特性^[11]:

1) 超低功耗。工作电压为 1.8~3.6 V, 具有 5 种低功耗模式, 即使在活动模式下也可以根据工作复杂度对时钟频率进行调整, 实现功耗最小化, 待机模式功耗低至 1.1 μA 。不工作时自动保持低功耗状态, 工作时则利用中断来唤醒, 唤醒时间不超过 6 μs 。

2) 独特的时钟系统。由高速晶振和低速晶振等元件构成的多时钟系统可以满足不同的应用设计需要, 低频时钟可以满足低功耗的要求, 高频系统可以满足实时响应的要求。

3) 数据处理能力强。采用 16 位总线, 寻址范围可达 64 K。芯片内部集成了硬件乘累加器, 一条指令只需一个时钟周期就可以完成执行。

4) 丰富的片上资源。具有 48 KB 的片内 FLASH 存储器, 10 KB 的 RAM 存储器, 6 个 8 位 I/O 端口, 2 个 16 位定时器, 2 个串行通信 USART 接口、12 位 A/D 转换器和 D/A 转换器等。

5) 应用开发方便。支持通过 JTAG 接口下载和调试软件程序, 不需要另外的仿真工具, 开发调试方便, 开发成本较低。

2.2 CS8900A 以太网控制器

本设计采用 CS8900A 作为以太网控制器芯片, 主要负责以太网数据帧的发送和接收, 具体包括网络传输数据帧头的产生和检测、冲突检测、循环冗余检查校验码的生成和验证等。CS8900A 是 Cirrus Logic 公司生产的一款适用于嵌入式应用的 16 位以太网控制器。该芯片具有以下

特性^[12]：

1) 以太网功能完善。提供单芯片 IEEE 802.3 以太网解决方案，完全兼容 IEEE 802.3 以太网标准。

2) 高度集成，包含片上 RAM、10Base-T 传输和接收滤波器，以及一个带 24 mA 驱动器的直接 ISA 总线接口。

3) 工作效率高。独特的 PacketPage 架构可自动适应不断变化的网络流量模式以及可用的系统资源，可以大大提高工作效率。支持在冲突、填充和循环冗余检查时自动进行重新传输。

4) 支持灵活配置，可通过内部寄存器的设置来适应不同的应用需要，其工作模式、数据传输模式等都可以根据应用需要进行设置。

5) 适合与 MSP430 单片机配合使用。可采用 3.3 V 电压供电，与 MSP430 单片机的 3.3 V 供电电压相匹配。且 CS8900A 工作于 8 位 I/O 模式时，数据线、地址线和读写控制线均可直接与单片机相连。

2.3 网络接口设计

CS8900A 以太网控制器通过网络接口连接网络，网络接口由 E2023 和 RJ45 组成。E2023 是一种网络变压器，RJ45 是通用的标准 8 位模块化网络接口。网络变压器的作用是将网络中的信号进行转换，同时对外部线路与以太网控制器之间进行电磁隔离，防止元器件之间产生干扰以及因带电插拔而烧坏元器件。当发送数据时，以太网控制器通过 E2023 网络变压器将单片机要发送的数据进行信号转换后再发送到网络上，信号转换的变压比为 1: 2.5。接收数据时，由网络传来的数据也要经过网络变压器进行信号转换，此时信号转换的变压比为 1: 1。网络接口电路如图 3 所示。

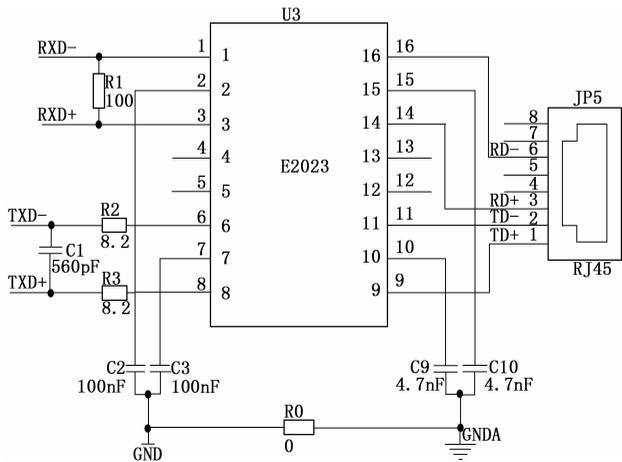


图 3 网络接口电路原理图

由图 3 可见，E2023 网络变压器的 6、8 引脚分别连接发送线 TXD-、TXD+，1、3 引脚分别连接接收线 RXD-、RXD+，9、11、14、16 分别连接 RJ45 网络接口的 1、2、3、6 引脚，2、7、10、15 分别接地线 GND 和 GNDA。

3 系统软件设计

软件是在硬件电路的基础上进行设计的，硬件电路需要软件程序的驱动才能正常工作。软件采用 C 语言进行编程，主要包括以下程序：单片机控制程序、以太网控制器驱动程序、TCP/IP 协议栈和 HTTP 应用服务程序。

3.1 单片机控制程序

单片机控制程序主要完成 MSP430F1611 单片机的时钟系统的初始化配置、I/O 端口的初始化配置、A/D 转换器配置、中断服务、以太网服务调用等。MSP430F1611 单片机时钟系统的初始化配置主要进行晶振的配置。I/O 端口的初始化配置则主要涉及 I/O 端口的功能和输入输出方向的配置。MSP430F1611 单片机的 I/O 端口的功能和输入输出方向可以在驱动程序中进行定义。I/O 端口的功能可以通过 P * SEL 进行定义，0 表示第一功能，1 表示第二功能，默认为 0，即普通输入输出功能。I/O 端口的输入输出方向可以通过 P * DIR 进行定义，0 表示输入，1 表示输出。单片机控制程序流程如图 4 所示。

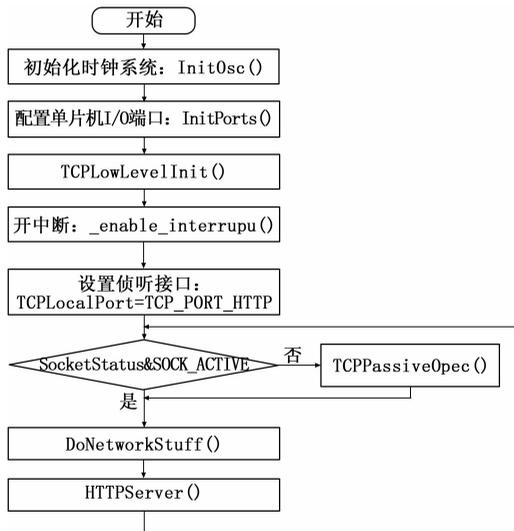


图 4 单片机控制程序流程图

从图 4 可以看出，单片机控制程序首先进行时钟系统、I/O 端口、TCP/IP 服务、中断服务的配置，然后循环提供嵌入式网络服务。在程序整个执行过程中，会根据网络服务需要调用以太网控制器驱动程序、TCP/IP 协议栈程序和 HTTP 应用服务程序。

3.2 以太网控制器驱动程序

以太网控制器驱动程序主要对 CS8900A 以太网控制器芯片进行初始化配置，提供网络数据帧的发送和接收处理功能。以太网控制器驱动程序流程图如图 5 所示。

由图 5 可以看出，首先调用 Init8900() 函数进行初始化，然后进行以太网控制器内部寄存器的读写操作，以复位以太网控制器，而后开始进行网络数据传输。以太网控制器驱动程序必须配合 TCP/IP 协议栈程序才能完成网络数据传输功能。

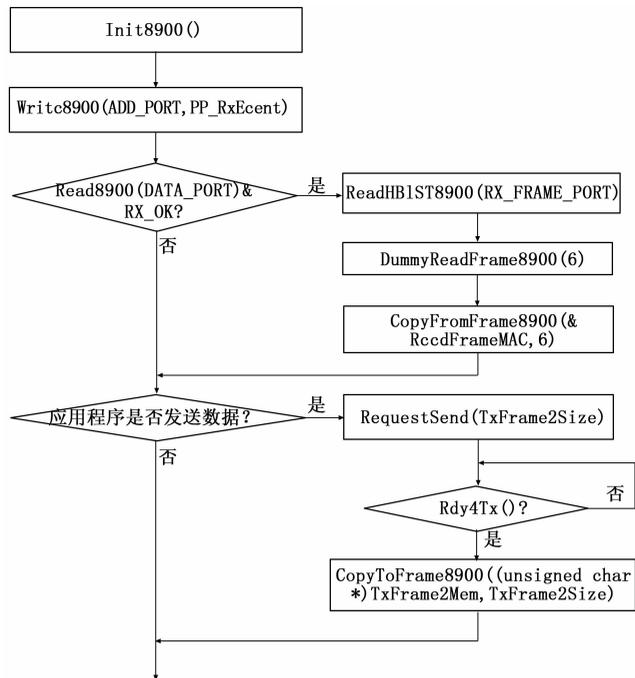


图 5 以太网控制器驱动程序流程图

3.3 TCP/IP 协议栈

TCP/IP 协议栈的移植是实现嵌入式以太网的关键。由于受到微处理器的运算速度和存储容量的限制, 嵌入式以太网不能实现完整的 TCP/IP 协议, 而需要对 TCP/IP 协议进行简化。本设计中 TCP/IP 协议栈每个网络层次实现的协议子集如表 1 所示。

表 1 TCP/IP 协议栈实现的协议子集

网络层次	实现协议
应用层	HTTP 协议
传输层	TCP 协议
因特网层	IP 协议、ICMP 协议、ARP 协议
网络接口层	IEEE 802.3

TCP/IP 协议栈的程序流程图如图 6 所示。

由图 6 可见, 首先要调用 TCPLowLevelInit() 函数进行初始化, 此时会调用以太网控制器驱动程序以保证 CS8900A 能够正常工作。然后判断是否需要调用 TCPPassiveOpen() 函数侦听连接, 否则调用函数 DoNetworkStuff() 执行网络通信和 TCP/IP 事件的进程。最后打开连接以接收或者发送数据, 进行网络服务, 直到接收到终止服务请求。

3.4 HTTP 应用服务程序

HTTP 应用服务程序的流程图如图 7 所示。

首先进行系统初始化, 然后接收网络数据帧, 判断是否为 ICMP (Internet Control Message Protocol, Internet 控制报文协议) 数据包, 如果是则进行 ICMP 协议处理, 否

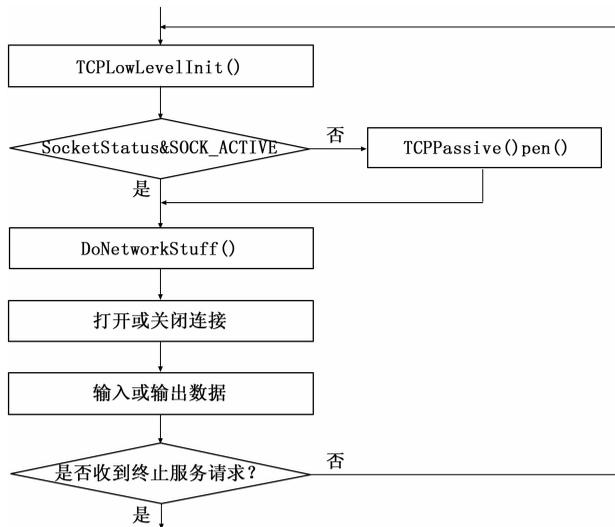


图 6 TCP/IP 协议栈程序流程图

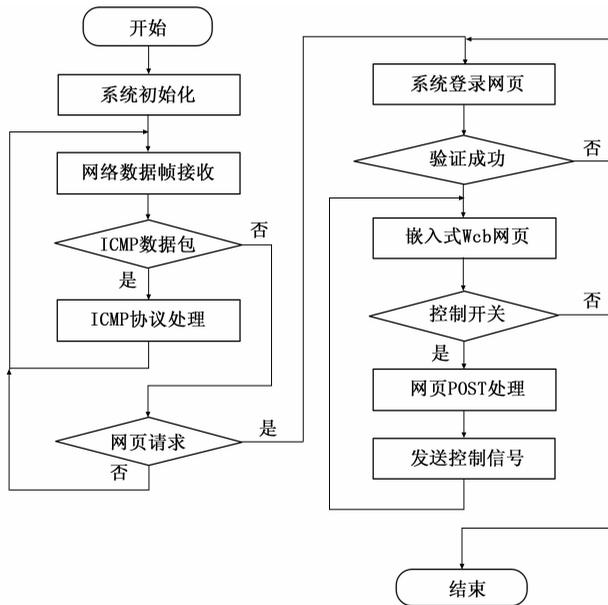


图 7 主程序流程图

则为用户数据。ICMP 数据包是指网络通不通、主机是否可达、路由是否可用等网络本身的控制消息。接下来验证是否为用户网页请求, 如果是网页请求则验证用户登录信息。验证成功后通过嵌入式 Web 网页显示传感器数据信息, 同时接收和响应用户的开关控制信号, 实现系统的远程监控功能。

4 实验结果与分析

4.1 系统实验测试方法

系统实验测试步骤如下:

- 1) 在软件程序中设置系统 IP 地址为 192.168.1.111, 子网掩码为 255.255.255.0;
- 2) 开启系统电源, 连接 MSP430 的 JTAG 仿真器;
- 3) 编译软件程序, 将程序通过 JTAG 仿真器下载到单

片机中；

4) 网络接口连接网线，将系统接入网络，通过 Web 浏览器访问嵌入式网页，访问网址为：
http://192.168.1.111。

4.2 Ping 命令测试结果

使用 Ping 命令在局域网和互联网情况下分别测试 ICMP 协议请求的时间性能，Ping 命令连续测试 100 次的结果如表 2 所示。

由表 2 可知，在局域网内进行 ICMP 协议请求时所需的时间维持在 2.64ms 左右，这是由硬件系统的处理速度和局域网范围大小及连接情况所共同决定的。系统硬件的处理

表 2 Ping 命令测试结果

次数	局域网 IP 地址 访问时间/ms	互联网域名 访问时间/ms
1	2	49
2	2	47
3	2	47
4	2	47
5	3	46
...
100	3	50
平均值	2.64	47.27

速度主要取决于 MSP430F1611 单片机的运行速度。在本系统中，系统能够以每秒八百万条指令的速度进行数据处理，完全能够满足本系统的设计需求。通过互联网以域名形式进行 ICMP 协议请求时所需的时间大约维持在 47.27ms 左右，在该情况下进行 ICMP 协议请求所需时间较多，主要是由于在实际互联网环境中网络连接需经过多级网关，实际环境的复杂性增加了 ICMP 协议请求的所需时间。

4.3 HTTPWatch 分析工具测试结果

使用 HTTPWatch 数据包分析工具可以测试用户通过网络访问网页时的连通时间性能，连续进行 100 次测试的结果如表 3 所示。

表 3 HTTPWatch 数据包分析工具测试结果

次数	连接请求 时间/s	发送时 间/s	等待时 间/s	接收时 间/s	总时间/s
1	0.023	0.002	0.226	1.021	1.272
2	0.023	0.001	0.209	1.022	1.255
3	0.017	0.003	0.250	1.051	1.321
4	0.023	0.002	0.248	1.021	1.294
...
100	0.025	0.003	0.252	1.056	1.336
平均值	0.0245	0.0025	0.2433	1.0388	1.3155

由表 3 中相关数据可知，客户端进行一次网页连接的时间主要包括连接请求时间、发送时间、等待时间、接收时间。在实际测试中网页连接的时间主要消耗在接收时间上，100 次的平均接收时间大约为 1.038 8 秒，总的网页连接的平均时间约为 1.315 5 秒。由于系统无需传送大量网络数据和满足苛刻的实时性要求，因此上述的测试结果表明系统能够满足设计需求。

5 结束语

基于嵌入式以太网的远程监控系统采用 MSP430 单片机作为主控制器，通过进行简化的 TCP/IP 协议栈移植实现了嵌入式以太网。用户通过网络访问嵌入式网页可以随时查看和远程管理系统，从而实现对系统的远程监控。实验测试结果表明系统能够满足设计要求。系统具有低成本、低功耗、通用性强等特点，性价比较高，具有较好的实际应用价值。

参考文献：

[1] 李秦君, 张玉杰. 基于嵌入式 Web 服务器的水情遥测系统的设计 [J]. 西安石油大学学报 (自然科学版), 2011, 26 (5): 103-106.

[2] 张文广, 肖支才, 秦亮. 基于嵌入式技术的测试设备远程监控数据采集设备 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (2): 38-42.

[3] 段萍, 高雪, 朱志辉. 基于云服务的大棚温湿度远程监控系统研究 [J]. 现代电子技术, 2018, 41 (14): 178-181.

[4] Sahu K, Susmita M, Mazumdar G. Digitally greenhouse monitoring and controlling of system based on embedded system [J]. Russian Journal of General Chemistry, 2013, 83 (4): 652-658.

[5] 郭稳涛, 何怡刚. 智能家居远程监控系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (9): 2109-2112.

[6] 邓响, 李朝庆, 程小辉. 基于物联网的智能家居远程无线监控系统设计 [J]. 计算机应用, 2017, 37 (1): 159-165.

[7] 张文广, 肖支才, 秦亮. 基于嵌入式技术的测试设备远程监控数据采集设备 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (2): 38-42.

[8] 冯建文, 董剑. 改进的 TCP 应用层协议在远程实验系统中的应用 [J]. 计算机应用与软件, 2018, 35 (12): 154-158.

[9] 郑宇平. 基于物联网和嵌入式技术的船舶远程监控系统开发 [J]. 舰船科学技术, 2018, 40 (2): 191-193.

[10] 马维华. 嵌入式系统原理及应用 (第 3 版) [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2017.

[11] 阎肖鹏, 余义德, 张洪祺. 一种基于单片机的 HDLC 通信卡设计 [J]. 自动化技术与应用, 2016, 35 (10): 156-159.

[12] Cirrus Logic. Crystal LAN 10Base-T 嵌入式以太网控制器 [EB/OL]. <https://www.cn.cirrus.com/products/cs8900a>.