

基于家庭异构网的智能用电终端系统设计

张云翔¹, 李厚恩¹, 钟晓雄², 张盛²

(1. 深圳市供电局有限公司, 广东 深圳 518001;

2. 清华大学深圳国际研究生院智能传感网络工程中心, 广东 深圳 518055)

摘要:为了实现用户对用电设备的智能化控制及节约用电的目的,设计了一种基于家庭异构网的智能用电终端系统。首先,阐述了兼容 WirelessHART 协议、PLC 通信以及以太网通信的智能用电终端系统的作用;然后,再详细描述系统的软硬件设计;最后,通过测试结果充分验证了设计方案的有效性。

关键词:智能用电终端;异构网;WirelessHART 协议;PLC 通信;以太网通信

中图分类号:TP393 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2020)06-0055-05

Design of Intelligent Power Terminal System Based on Family Heterogeneous Network

Zhang Yunxiang¹, Li Houen¹, Zhong Xiaoxiong², Zhang Sheng²

(1. Shenzhen Electric Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, Guangdong,

China; 2. Smart Sensor Network Engineering Center of Shenzhen International

Graduate School of Tsinghua University, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: In order to achieve the user's intelligent control of electrical equipment and the purpose of saving electricity, an intelligent power terminal system based on family heterogeneous network is designed. Firstly, the function of intelligent power terminal system is described which is compatible with WirelessHART protocol, PLC communication and Ethernet communication. Then, the hardware and software design of the system is described in detail. Finally, the test results fully verify the effectiveness of the proposed design scheme.

Key words: intelligent power terminal; heterogeneous network; WirelessHART protocol; PLC communication; Ethernet communication

0 引言

电网,一般是指排除发电侧之外的,由变电装置和输配电线路组成的整体。智能电网是以物理电网为基础,将现代先进的传感测量技术、通信技术、信息技术、计算机技术和控制技术与物理电网高度集成而形成新型电网^[1]。

在未来的智能电网架构中,灵活的智能用电管理将成为其中的重要环节。在用电方面,智能电网的重要目标是鼓励和促进用户参与自身运行和管理,实现用户互动^[2-4]。因此,研究合理、高效的智能

用电方法有利于电力资源的合理利用和节能减排。

文献[5]改进了 k-means 算法,能够精确、高效地挖掘出智能用电海量数据的潜在有用信息,将为制定最优的用电策略、开展阶梯定价提供有利的指导。文献[6]设计了一种以 DSP 为处理核心的智能用电终端,能够实现智能电网下对市政、商区以及居民住宅等用电设备的高级用电检测和远程用电控制。文献[7]提出了一种稳定且能够自适应各类模式的 DR 系统架构,能够调节电网动态需求和用户动态意愿之间的平衡以及电力公司和用户之间的平衡。

但是上述的几种方法均是针对电网公司或者国家部门用来制定电价或者宏观调控的,而不是针对

用户自身来实现智能用电,从而达到节约用电的目的。于是设计了一种基于家庭异构网^[8]的智能用电终端系统,它是一种兼容 WirelessHART 自组网络、PLC 通信以及以太网通信的异构型网络终端系统,能够实现智能控制用电终端(如智能化控制家用电器)以及远程手动控制的功能。最后通过实验验证了系统的可行性,并探讨了异构网络环境下家用电器智能化的发展方向。

1 系统软硬件设计

智能用电终端系统是一种融合多种家用通信网络技术以及传感器技术,通过获取、分析周围环境的各种因素,实现智能化控制家用电器、节省电能等功能的设备。下面设计一种基于 WirelessHART 和 PLC 的家庭异构网的智能用电终端系统,能够实现智能化控制家电,从而实现节约用电的功能。

1.1 系统设计的目标和原则

1.1.1 系统设计目标

所设计系统的主要目的是实现一个兼容 WirelessHART 协议与 PLC 技术的智能用电终端系统,设计的功能目标如下:

1) 支持 WirelessHART 网络。WirelessHART 网络可以通过和支持 WirelessHART 网络的智能电表互连互通,达到对电表系统的控制以及计量信息获取的功能。

2) 支持 PLC 设备,并将 PLC 互连设备组成一个网络,在网络内部实现信息互通的目的。

3) 支持人体感应探头作为传感器设备,获取周围环境中的信息。

4) 支持以太网,使得智能的互联网终端可以远程访问系统,支持服务器端图表显示终端信息,支持服务器控制终端。

5) 支持系统对外部电器的控制。

1.1.2 系统设计原则

为了能让系统长期稳定可靠地工作,在设计过程中需要遵循一定的原则。

1) 可靠性:系统的可靠性是指系统不但可以工作于正常的环境下,在一定程度的恶劣环境下也能准确计量并与后台进行正常通信。

2) 智能性:作为所设计系统的核心功能,智能性表现在系统可以快速侦测环境的变化,并将信息反馈至主控模块,由主控模块分析处理,然后向驱动

模块发送控制指令。系统的智能性特点需要靠上层软件完善的逻辑结构来完成。

3) 低功耗性:系统在工作模式下应该可以以较低的功耗进行工作,以节省能源。

1.2 系统方案设计

所设计的系统需要工作在一个家庭网络内,并组成网络协同工作。如图 1 所示,图中左边方框为所设计的系统,而右半部分则为系统的典型应用背景。

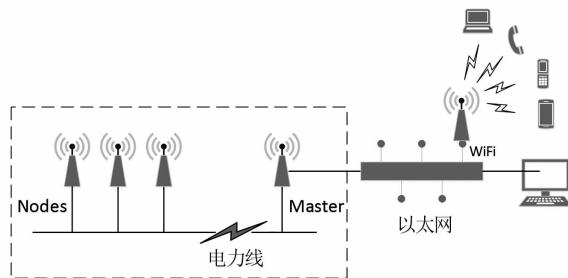


图 1 智能用电终端系统

在图 1 的左半部分,由数个智能用电终端组成。其中一个终端与以太网连接,充当服务器端节点 (Master) 的角色,与外界网络进行通信;其他终端则承担普通节点 (Nodes) 的角色,相互之间可以进行数据传输,但无法直接与外界通信。将系统与外界网络隔绝,一定程度上保障了数据安全与系统的稳定性。每一个智能用电终端都包含 WirelessHART 无线网络模块,用于和其他终端进行无线通信;同时也包含 PLC 模块,通过电力线连接起来,可以进行相互通信。

1.2.1 普通节点的系统设计

在所设计的智能用电终端系统中,每一台设备,包括网关节点,都具备普通节点的功能。对于每一个普通节点,希望它兼容 WirelessHART 网络以及 PLC 网络,又能驱动传感器和外围设备工作,设计方案如图 2 所示。

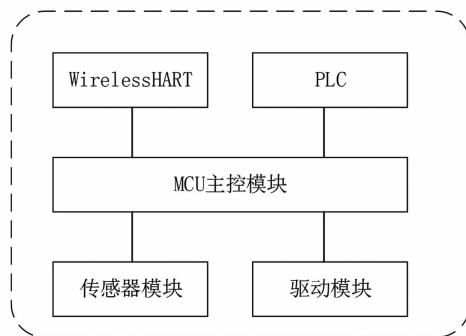


图 2 普通节点的设计

一个普通的节点主要包含微控制器主控模块、

WirelessHART 无线通信模块、PLC 模块、传感器模块以及驱动模块。

1.2.2 服务器端节点的系统设计

服务器端节点,除了包含上述模块外,还应该包含一个以太网模块,如图3所示。

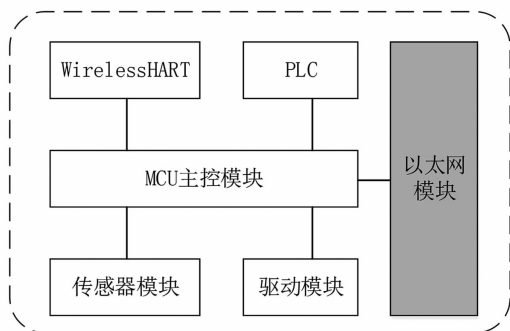


图3 服务器节点的设计

服务器端的以太网模块,使得系统可以通过互联网传输数据。

1.3 系统硬件设计及实现

1.3.1 微控制器主控模块

微控制器主控模块是整个系统的核心,考虑到系统的复杂性和网络的多元性,选取STM32F103ZET6芯片作为核心的微控制器。这是一个32位的Cortex-M3内核的ARM处理器,最高可达72MHz的处理速度,具备睡眠、停止和挂起3种低功耗工作模式,最大限度地降低能源消耗,且所需要的外围支持比较少,仅需要一些基本的电源和外部晶振即可工作^[9]。

1.3.2 WirelessHART 模块

WirelessHART 模块主要由主控芯片MSP430和RF模块CC1100E组成。其中,MSP430是TI公司的一个16位低功耗、低成本的MCU,而CC1100E为TI公司的一个应用于1GHz频段以下并支持多种解调格式的射频通信模块^[10]。

1.3.3 电力载波模块

电力载波模块负责电力线通信,考虑到成本以及符合中国国家标准,采用KQ330超低功耗载波通信接收模块^[11]。

1.3.4 传感器模块

为了演示系统的智能控制作用,需要在系统中添加一个人体感应传感器。可以探测10m以内没有活动物体走动,并在被触发时生成一个脉冲信号,进而可以把这个脉冲信号通过GPIO端口送入到微控制器。

传感器模块主要由一个芯片及其周围电路组成,选择了CS9803作为人体感应芯片^[12]。

1.3.5 驱动模块

驱动模块是用来控制外围设备的电路,在这里,选取220V家用电灯作为被控制电器,以表现系统的通用性。驱动模块采用达林顿电路驱动的方式。达林顿电路由2个达林顿三极管组成,2个三极管级联,大大提高系统的灵敏度,可以有效地放大输入信号,并有很强的电流驱动能力。

1.3.6 以太网模块

服务端的以太网模块是供服务端与外界进行互联通信的基础,它不但为UART-PLC网络提供网关功能,将内部数据转发到外部网络,还要为外部的智能终端设备提供查询、控制等功能。选取ENC28J60模块作为以太网通信芯片,该芯片是28引脚以太网控制器,具备低引脚数、低成本且高效易用等优点^[13]。

1.3.7 硬件接口

各个模块之间信息的传输以及指令的发送,都是通过特定的通信接口完成,通用的芯片间通信接口有UART、SPI、I2C等几种,其中UART以及SPI接口都具备成本低廉、简单易用、易于集成等特点。这里采用UART以及SPI接口作为芯片间通信的主要协议。

UART是一种收发协议,广泛应用于EIA、RS-232等接口,它能够将信息通过并/串转换成字节流来传输,也可以将字节流汇聚起来通过串/并转换来还原信息^[14]。

SPI是一种可以工作在全双工模式下的同步的数据链路标准^[15]。SPI通信的参与者分为主机和从机,其中主机可以指定数据帧结构,系统中的多个从机是通过片选引脚来决定是否处于工作状态。

1.4 系统软件实现

系统的硬件是支持系统应用的基础,系统的上层软件则是应用的具体实现。这里采用IAR EWARM v5.30作为开发工具,选用C语言作为开发语言,选用ST公司发布的STM32 Firmware Library v2.0.3作为开发库^[16]。

1.4.1 软件设计框架

如图4所示,软件系统主要由三层模块组成,其中STM32固件层是由ST公司官方提供的一个供操M32内部模块的C语言库,包括操作RCC时钟、GPIO接口、中断向量表等功能;微控制器主控模块负责协

调各个模块工作以及资源分配、系统计时、数据处理等任务;应用层包含的范围比较广,包括硬件电路模块上的 LED 指示灯的操作、UART 串口设备组网通信、传感器控制以及外围设备驱动控制模块。

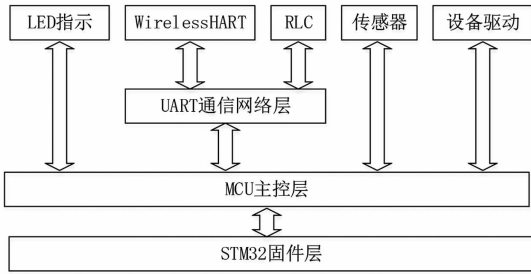


图 4 软件系统架构

1.4.2 微控制器主控模块

微控制器主控层包含主要的调度和控制模块。微控制器主控层需要对 STM32 进行初始化配置,主要包括 RCC 时钟配置、GPIO 引脚配置等。

首先,配置复位和时钟控制。系统先调用 RCC_Deinit() 函数对 RCC 时钟进行初始化设置;再通过调用 RCC_HSEConfig() 函数来配置 STM32 采用外部晶振作为时钟源,并启用该晶振;接着开启 STM32 内部 Flash 预存取功能,然后设置内部高级外设总线 APB1 和 APB2 高速通道时钟,并启用内部的 PLL 锁相环模块作为系统时钟。

其次,系统调用 NVIC_SetVectorTable() 函数对微控制器的嵌入式中断控制器进行初始化。

最后,系统调用 GPIO_Configuration() 函数对各个引脚进行初始化。

1.4.3 WirelessHART 模块

WirelessHART 模块,通过 UART 接口与微控制器进行通信。其中接口主要有两个:发送数据接口和接收数据接口。发送数据接口函数通过调用主控模块的函数库 USART_SendData() 以及 USART_ReceiveData() 两个函数来实现数据的发送,网络层及更下层的传输功能由 MSP430 芯片负责。接收数据接口是一个缓冲区数据字符,并利用触发中断来通知 MSP430 对数据做进一步处理。

1.4.4 电力载波模块

所采用的 PLC 模块,可以通过 UART 接口与微控制器进行数据传输,将 PLC 模块的 TXD 接口直接连接到微控制器的 UART1 的 RX 数据接收端,将 PLC 模块的 RXD 接口通过 2K 限流电阻,连接到微控制器的 TX 数据发送端。

PLC 模块具备两种工作模式:透明工作模式与

自定义工作模式。为了便于开发,采用自定义工作模式。

1.4.5 服务器端以太网模块

如图 5 所示,以太网模块主要由 ENC28J60 的硬件抽象层 (hardware abstract layer)、SPI 接口、TCP/IP 协议栈以及上层的 Web 服务器组成。其中 SPI 接口负责与微控制器进行通信,进行数据传输;TCP/IP 协议栈实现基本的 TCP/IP 网络功能;Web 服务器提供一个有限功能的 Web 服务器,以便与用户进行交互。

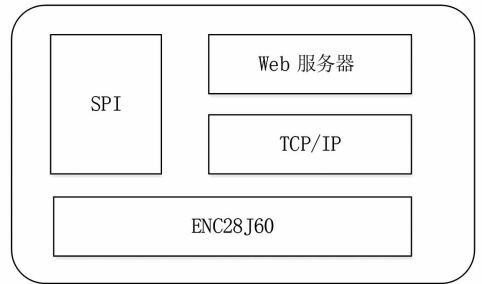


图 5 以太网模块

2 实验

智能用电终端系统测试部分的测试主要有几个方面:传感器动作、家用电器的工作状态显示及手动控制功能;对等节点间的电力线组网以及通信功能;WirelessHART 通信以及 Mesh 网络组建等功能。

2.1 家用电器工作状态显示及手动控制功能测试

该功能的测试仅需要服务器端单节点即可完成。首先将服务端节点外接上传感器模块、继电器驱动模块以及以太网模块,并将以太网模块连接到局域网内,使用笔记本通过无线网络连接到同一个局域网内。对系统进行上电,更改系统源代码里的 IP 地址和子网掩码,以能接入到以太网网络进行通信。更改系统的访问密码,然后将测试代码下载到主控芯片内,并运行。测试步骤如下:

1) 测试人员远离系统,等继电器模块断开,家用电灯熄灭后,系统进入稳定状态。此时,通过笔记本访问同局域网内网址 <http://219.223.168.254/h403/> 页面,可以观察到电灯处于熄灭状态。

2) 逐渐靠近传感器模块,在离传感器约 4~5 m 的范围时,无线传感器上的 LED 指示灯自动点亮,同时,继电器闭合,家用电灯点亮。说明所设计系统的传感器模块工作正常。

3) 访问网址并刷新页面,可以看到电灯处于点

亮状态。说明所设计系统对于家用电器的的工作状态显示功能正常。

4) 在网页中手动点击“关闭”命令,继电器断开,家用电灯熄灭,说明所设计系统的手动控制功能可以正常工作。

结果表明,该系统对4~5 m范围内的人员能够迅速做出反应,打开照明系统,并且可以通过 Web 服务器端查询和手动控制照明系统的工作状态。

2.2 电力组网及通信功能测试

将服务端的电力载波模块连接到主控模块上,并加入5个包含继电器驱动模块以及电力载波模块的客户端节点。编辑测试代码,将每个节点的 UART 地址修改为单独的地址。在测试中,将服务端的 UART 地址更改为1,5个客户端节点的地址依次更改为2~6。对各个板子上电,将测试代码分别下载到各个板子上运行。测试步骤如下:

1) 访问 <http://219.223.168.252/h403/> 页面,可以看到页面上多出了5个灯,每个灯均处于熄灭状态,如图6所示。说明所设计系统的组网功能正常。

2) 在网页上任意点击一个LED灯的“闭合”按钮,相应客户端节点的继电器闭合,点亮相应的LED灯,此时网页上指示该灯处于点亮状态。说明所设计系统电力线通信完全正常。

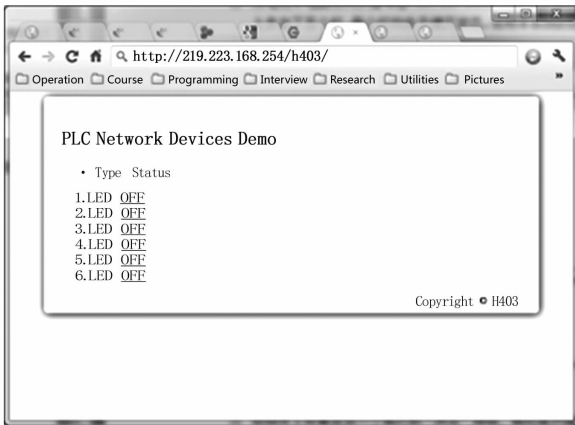


图6 PLC网络通信测试

2.3 WirelessHART 自组网通信功能测试

首先,将 WirelessHART 接收、发送模块通过 RS232 电平转换模块和 USB - RS232 转换模块分别连接到两台笔记本电脑的 USB 接口;然后,在两台笔记本上打开串口调试助手,接收模块监听串口数据,发送模块往串口发送数据,测试接收端是否能完整接收数据;最后,将连接发送模块的笔记本固定放置在马路上,将作为接收方的笔记本逐渐远离发送

模块,观测是否能正常接收。

经过测试,在马路上,丢包率 $\leq 3\%$ 的条件下,使用两个节点进行互相通信,得到的通信数据如表1所示。

在进行了普通测试以后,还对设备进行了穿透能力测试,以普通承重墙作为障碍物,在丢包率 $\leq 3\%$ 的条件下,得到两个节点的传输数据如表2所示。

表1 WirelessHART 普通传输条件测试数据

接收发送设备 离地距离/m	通信速率/ (kb · s ⁻¹)	最长通信距离/ m
2.5	250	240
2.5	150	640
5.0	250	560
5.0	150	700

表2 WirelessHART 穿透条件测试数据

接收发送设备 离地距离/m	通信速率/ (kb · s ⁻¹)	最长通信距离/ m
2.5	250	25
2.5	150	32

3 结 语

针对家居用户,提出了一种基于家庭异构网的智能用电终端系统,在结合如无线传感器的外围设备情况下,实现了系统智能化控制家居电器的目的,并支持以太网实现了远程手动控制终端。由于系统结构的简单性以及软硬件的结合,保证了系统工作的可靠性、智能性以及低功耗性。

在未来,异构网络环境下的智能用电终端系统将会朝着更高的兼容性方向发展,比如兼容更多的无线传感设备。同时,在提高兼容性的过程中,提高系统的负载能力也是必不可少的。

参考文献

[1] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术,2009,33(8):1-7.

[2] 冯庆东,何战勇. 国内外智能用电发展分析比较[J]. 电测与仪表,2012,49(2):1-6.

[3] 章鹿华,王思彤,易忠林,等. 面向智能用电的家庭综合能源管理系统的设计与实现[J]. 电测与仪表,2010,47(9):35-38.

[4] 李江浩,曹敏,张建伟,等. 智能用电终端的设计[J]. 云南电力技术,2015,43(1):73-74.

(下转第70页)

[10] 田伟. 5G 技术应用于远程医疗的探索与展望[J]. 中华外科杂志, 2020(1): 1-4.

[11] 卢向群, 孙禹. 基于 5G 技术的教育信息化应用研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(6): 120-128.

[12] 王廷凤, 余江, 许健, 等. 基于 5G 无线通信的配电网自适应差动保护技术探讨[J]. 供用电, 2019, 36(9): 18-21.

[13] 王常玲, 赵元. 基于 5G 承载网的电力差动保护业务时延抖动分析[J]. 通信世界, 2019(32): 33-36.

[14] 吕玉祥, 杨阳, 董亚文, 等. 5G 技术在配电网电流差动保护业务中的应用[J]. 电信科学, 2020, 36(2): 83-89.

[15] 张君怡, 任鑫博. 非独立组网架构下 5G 网络在智能电网中的应用[J]. 通讯世界, 2020, 27(2): 11-12.

[16] 刘林, 祁兵, 李彬, 等. 面向电力物联网新业务的电力通信网需求及发展趋势[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3114-3130.

[17] 张宁, 杨经纬, 王毅, 等. 面向泛在电力物联网的 5G 通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4015-4025.

[18] 陈艳, 宋英华. 新型配电物联网后台系统架构设计与

关键技术研究[J]. 供用电, 2020, 37(2): 41-46.

[19] 李洪全, 张冀川, 丁浩, 等. 基于 IPv6 的配电物联网通信单元设计[J]. 供用电, 2020, 37(1): 21-29.

[20] Joung J, Ho C K, Adachi K, et al. A Survey on Power-amplifier-centric Techniques for Spectrum- and Energy-efficient Wireless Communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 315-333.

[21] 王扬. 5G 终端加速发展 行业市场全面打开[N]. 人民邮电, 2020-07-30(006).

[22] 钟鹏. 5G 系统毫米波频段上的无线传输技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.

[23] 孙东雪, 王主丁, 田园, 等. 基于分区分压的配电网供电能力计算实用方法[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3081-3091.

[24] 张晶, 代攀, 吴天京, 等. 新一代智能电网技术标准体系架构设计及需求分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 12-20.

作者简介:

郭立(1984), 男, 硕士, 高级工程师, 从事继电保护运行技术。

(收稿日期: 2020-09-27)

(上接第 59 页)

[5] 赵莉, 候兴哲, 胡君, 等. 基于改进 k-means 算法的海量智能用电数据分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2715-2720.

[6] 徐茂鑫, 余涛, 徐豪. 基于 DSP 的智能用电终端设计与实现[J]. 电测与仪表, 2017, 54(9): 24-29.

[7] 高志远, 曹阳, 田伟, 等. 需求响应概念模型及其实现架构研究[J]. 电力信息与通信技术, 2016(11): 8-13.

[8] Wu G, Mizuno M, Havinga P J M. MIRAI Architecture for Heterogeneous Network[J]. Communications Magazine IEEE, 2002, 40(2): 126-134.

[9] STM32 Reference Manual. STMicroelectronics Co., Ltd. [Online]. available: <http://www.st.com/content/st.com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-mainstream-mcus/stm32f1-series/stm32f103/stm32f103ze.html>, 2017.

[10] CC1100E datasheet. Texas Instruments Co., Ltd. [Online]. available: <http://www.alldatasheet.com/view.jsp> Searchword = CC1100E, 2017.

[11] KQ130F 数据手册. 四川省科强电子技术有限责任公司 [Online]. available: <http://www.docin.com/p->

622104574.html, 2017.

[12] CS9803 数据手册. 森川电子科技深圳公司 [Online]. available: http://www.alldatasheet.com/view_datasheet.jsp Searchword = CS9803&sField = 2, 2017.

[13] ENC28J60 datasheet, Microchip Technology Inc [Online]. available: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/102687/MICROCHIP/ENC28J60.html>, 2017.

[14] Shouqian Y U, Lili Y I, Chen W, et al. Implementation of A Multi-channel UART Controller Based on FIFO Technique and FPGA[C]//2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2007: 2633-2638.

[15] SPI 总线简介 [Online]. available: https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus, 2017.

[16] STM32 Firmware Library v2.0.3 开发库 [Online]. available: <http://www.st.com/internet/com/software/firmware.jsp>, 2017.

作者简介:

张云翔(1981), 男, 硕士, 工程师, 从事物联网与智能电网研究工作。

(收稿日期: 2020-06-18)