

## 适用于自动需求响应的分体式智能用电测控终端

华锦修<sup>1,2</sup>, 史守圆<sup>1,2</sup>, 程乐峰<sup>1,2</sup>, 徐伟枫<sup>1,2</sup>, 王文睿<sup>1,2</sup>, 余涛<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641; 2. 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510641)

**摘要:** 能源互联网中自动需求响应(Automated Demand Response, ADR)的实现离不开对终端用电设备的准确测控。为解决目前智能用电终端控制方式缺乏灵活性及数据采集处理能力偏弱的问题, 研制了具备数字信号处理与红外精准控制功能的分体式智能用电监测控制终端。装置由装置本体和红外控制器两个分立的部分组成, 其中装置本体包含 DSP 芯片、电气采样电路、ADC 芯片、WiFi 模块、ZigBee 模块和温湿度传感器, 红外控制器包含单片机、ZigBee 模块、红外编码与收发模块以及锂离子电池。装置本体根据采集的用电和环境信息、综合需求响应要求向红外控制器下达指令, 进而准确调整负荷电器运行状态。得益于分体式与可充电设计, 此终端可适应复杂家居环境, 为实现有效的家庭能量管理、推动家庭负荷参与需求响应(尤其是 ADR)打下硬件基础。

**关键词:** 自动需求响应; 红外遥控; 智能用电; 测控终端; 家庭能量管理; 分体式

### Split-type smart power measurement and control terminal for automated demand response

HUA Jinxiu<sup>1,2</sup>, SHI Shouyuan<sup>1,2</sup>, CHENG Lefeng<sup>1,2</sup>, XU Weifeng<sup>1,2</sup>, WANG Wenrui<sup>1,2</sup>, YU Tao<sup>1,2</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** The implementation of Automated Demand Response (ADR) in Energy Internet is inseparable from accurate measurement and control of the terminal electrical appliances. To resolve the shortcomings of current intelligent power terminal control methods, such as lack of control flexibility and weak data acquisition and processing capabilities, a split-type intelligent power measurement and control terminal with digital signal processing and infrared precision control functions is developed in this paper. This device contains two separate parts: the device body and the infrared controller. Among these, the device body comprises a DSP chip, an electrical sampling circuit, an ADC chip, a WiFi module, a ZigBee module and a temperature-humidity sensor. The infrared controller includes a MCU, a ZigBee module, several infrared encoding, receiving and transmitting modules, and some lithium-ion batteries. The device body provides commands to the infrared controller according to the collected power and environmental information and the comprehensive Demand Response (DR) request, thereby accurately adjusting the operating status of the power load devices. Due to the split and rechargeable design, this terminal can adapt to a complex home environment, laying the hardware foundation for effective home energy management and household loads participation in DR, especially ADR.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477055 and No. 51777078), and Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company Limited (No. GZKJQQ00000419).

**Key words:** automated demand response; infrared remote control; smart power consumption; measurement and control terminal; home energy management; split-type

## 0 引言

需求响应技术(Demand response, DR)是解决可再生能源消纳和电力系统供需实时平衡的有效手

段<sup>[1-2]</sup>, 自动需求响应(Automated Demand Response, ADR)是电力系统用户侧参与能源互联网的重要体现<sup>[3-4]</sup>。随着人民生活水平的提高, 家庭用电负荷占社会总用电负荷的比例不断攀升<sup>[5]</sup>, 以家庭能量管理系统(Home Energy Management System, HEMS)为基础的广泛家庭用户对需求响应参与的重要性日益突出<sup>[6-8]</sup>, 智能计量系统和高级量测体系<sup>[9]</sup>也逐渐应用到家庭用户的能量管理系统中来。要实现家庭

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477055, 51777078); 中国南方电网有限责任公司重点科技项目资助(GZKJQQ00000419)

负荷的自动需求响应, 需要开发有效的负荷控制功能的智能用电终端<sup>[10]</sup>, 这对于信息-物理融合(Cyber-physical systems, CPS)甚至是信息-物理-社会融合(Cyber-physical-social systems, CPSS)<sup>[11]</sup>的 HEMS 运行与控制显得至关重要。

智能用电终端相关研究方面, 文献[12]开发的智能控制器具有电气计量、无线通信和远程控制功能, 但只能进行通断控制, 不具备负荷调节能力。文献[13]提出了一种集成红外收发模块和无线通信模块的智能装置设计, 具备远程控制、通信组网等功能, 但仅支持 38 kHz 载频的红外信号, 也不具备用电信息采集功能。文献[14]研制了一种基于 DSP 数字信号处理芯片的智能用电终端, 得益于 DSP 的运算优势, 该装置实现了强大的数据分析功能, 具有远程控制和定时控制能力, 但仍是简单的通断控制。文献[15]设计了一种具备用电数据采集与红外遥控功能的需求响应控制器, 但因使用单片机为核心芯片, 运算处理能力有限, 难以支持高频采样和数据分析功能, 其红外控制仅支持 38 kHz 载频, 未配置红外编码库, 使用稍显复杂, 且文中未考虑红外光直线传播的特点, 未提及红外发射头的形态及布局。

由以上研究可看出, 目前多数装置存在控制方式简单以及数据采集处理能力偏弱的不足。非通即断的简单控制方式使得诸如空调, 风扇等可调节用电设备失去连续调节能力。红外遥控是实现此类电器精准控制的首选低成本方案, 但在目前部分具有红外控制功能的装置中还存在红外载波频率单一, 无红外编码库等问题。且由于装置往往安装在用电器背后, 装置与红外模块一体的设计未考虑红外光直线传播可能遇到障碍的情况, 限制了装置的灵活性和适用场景。

基于此, 本文融合 DSP 数字信号处理技术与红外遥控技术, 考虑实际应用需求, 设计了具有用电数据采集分析、环境状态感知负荷灵活调控等功能的分体式智能用电终端。此终端可适应复杂家居环境, 为实现有效的家庭能量管理、推动家庭负荷参与需求响应打下了硬件基础。

### 1 家庭能量管理与需求响应框架

分体式智能用电测控终端的设计目标是作为家庭能量管理与需求响应系统中电力通道与信息通道的关键节点。在电力通道方面, 终端连接电器与市电, 测量电器的电气信息并可以通过继电器开断线路。信息通道方面, 终端测量电器的电压电流等电气量信息以及温度湿度等环境量信息, 并把数据上

传至云端; 终端同时接受云服务器控制, 一般电器直接通过终端进行开断, 一些兼容红外控制的电器则通过红外控制器进行连续调节, 如空调和风扇。用户通过手机移动端连接云服务器进行家庭能量管理, 电网侧通过云服务器发布需求响应指令。具体框架如图 1 所示。

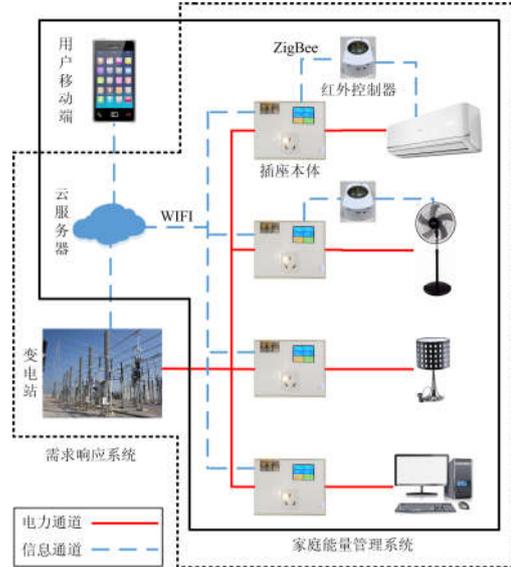


图 1 分体式智能用电测控终端应用框架图

Fig. 1 Split-type smart power measurement and control terminal application framework

鉴于空调容量大, 可控性好<sup>[16]</sup>, 参与需求响应的效果较好, 图 2 以空调为例, 展示了使用分体式测控终端在需求响应过程中发挥的良好作用。

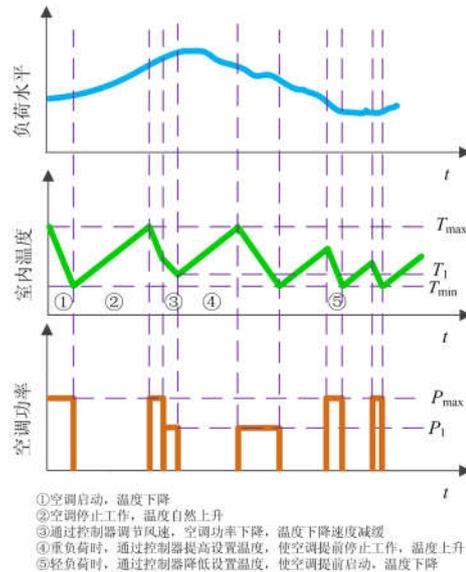


图 2 智能终端作用下空调参与需求响应的过程

Fig. 2 Process of air conditioning participating in demand response under the action of smart terminals

如图 2 所示, 根据用户需求在家庭管理系统中设置好家庭内温度的上下限, 在温度达到  $T_{max}$  时终端通过红外控制器启动空调, 然后低于  $T_{min}$  时关闭, 温度参数由终端内置的温湿度传感器获取。空调参与需求响应过程如下: 在满足温度上下限的前提下, 在整体负荷水平较重时, 通过红外控制器把用户空调的温度提高、风速调小以降低其功率, 在负荷水平达到峰值时, 甚至可以关停这些空调, 从而实现削峰。在负荷水平较低时, 可以开启处于停机状态的空调, 使其满功率运行, 实现填谷, 或促进光照强、风速大情况下的新能源的消纳。

分体式测控终端是实现家庭能量管理系统与需求响应系统的重要硬件基础, 搭配合适的控制策略<sup>[17]</sup>, 可以很好地实现削峰填谷等功能。正是基于这一框架, 本文提出了分体式智能用电测控终端的硬软件设计思路。

## 2 硬件方案设计

考虑到家居环境复杂多变与红外光直线传播的特点, 本论文的智能用电终端采用分体式的设计思路, 将终端分成装置本体与空调控制器两部分, 装置本体对电气设备进行电气量数据、环境量的采集与电路通断控制, 红外控制器则可以自由放置, 以解决红外通信直线传播的不足。装置本体与红外控制器之间使用 ZigBee 进行无线通信, 装置本体与云服务器之间使用 WiFi 进行通信。

### 2.1 装置本体硬件设计

装置本体是以 DSP 为核心的数字信号系统, 包含的元器件主要有温湿度传感器、ADC 芯片、继电器、DSP 芯片和通信模块, 可以实现的功能有电气量采集处理、环境量采集、线路开断、谐波计算与无线通信等诸多功能。装置本体结构如图 3 所示。

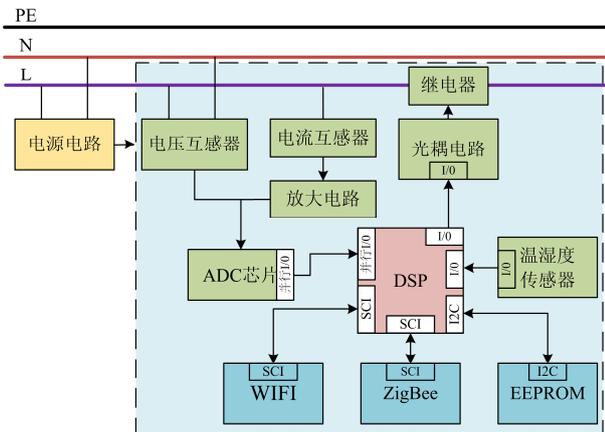


图 3 装置本体结构框图

Fig. 3 Structure diagram of the device main body

### 2.1.1 核心处理单元选型

由于智能用电终端要实现工频电气量采集, 模数转换, 基于快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 的谐波分析, 同时兼容 WiFi 与 ZigBee 无线通信等众多复杂的功能, 核心处理器需要有较强的运算能力, 较快的控制速度与较多的通信接口, 因此本设计选择了由 TI 公司生产的 DSP 芯片, 型号为 TMS320F28335, 该芯片具有 150 MHz 的高速处理能力和 32 位浮点处理单元, 搭载 SCI、SPI、I2C 串行通信接口及 eCAN、ADC 等功能模块, 十分适合作为智能用电终端的核心处理器。

### 2.1.2 工频电气量测量电路设计

电气量信号的处理思路是把电气量模拟信号通过互感器与放大芯片进行信号的转化, 使该信号满足 ADC 芯片 5 V 的输入幅值要求, 然后通过 ADC 芯片实现模数转换, 之后把这些数字信号传输至 DSP 芯片, 进行数字信号的处理<sup>[18]</sup>, 其中接线如图 4 所示。

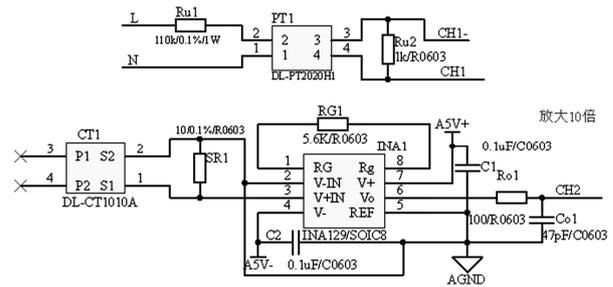


图 4 电压电流采样电路原理图

Fig. 4 Voltage and current sampling circuit schematic

本设计中所选用的 ADC 芯片型号是 AD7606, 这款芯片能实现 16 位同步采样, 采样率高达 200 kHz, 可以保证采样的速度与精度。

电压互感器为 2 mA/2 mA 电流型电压互感器, 型号为 DL-PT2020H, 从火线与零线间获取输入电压信号, 经过限流电阻  $Ru1$  后, 将电压信号转化为 2 mA 的电流信号输入至互感器中, 互感器实现 1/1 等比转换并输出 2 mA 电流, 然后经过输出端并联电阻  $Ru2$ , 实现电流信号重新转化为 2 V 的电压信号, 满足 ADC 输入限制。电流互感器的选型为 DL-CT1010A, 匝数比为 1 000/1。当输入电流为额定值 16 A 时, 互感器输出 16 mA 电流, 通过采样电阻  $SR1$  转化为 320 mV 电压信号, 再通过运放电路实现 10 倍的信号放大, 最终实现 3.2 V 的输出信号。

与传统的电阻分压式<sup>[14]</sup>采集方式相比, 此设计避免了采样电阻温升对采样精度的影响, 保证了采样的精度, 此外, 互感器实现了配网侧与装置侧的

电气隔离, 起到保护作用。

### 2.1.3 无线通信功能设计

智能用电终端同时支持 ZigBee 与 WiFi 两种无线通信方式, 通过 ZigBee 通信方式对红外控制器进行控制命令的下发, 通过 WiFi 通信方式把装置本体采集到的数据上传到云服务器中。

ZigBee 通信功耗小, 自组织能力强, 通信距离远, 最远可以达到 1 km<sup>[19]</sup>, 缺点是传输速度较慢, 适合于装置本体与红外控制器这种通信量少, 通信距离不确定的通信。ZigBee 模块的选型为 DRF1609, 其处理能力强大, 使用方便。智能终端使用一组串口与 ZigBee 模块相连, 波特率设置为 38 400, 将装置本体设为主节点, 将红外控制器设为从节点, 使用透明传输模式进行控制命令的下发。

WiFi 通信速度快, 数据量大, 由于智能终端与云服务器之间需要进行大量数据传输, WiFi 通信便成为最为合适的方式。WiFi 模块选型为 USR-C215, 该模块硬件上集成了 MAC、基频芯片、射频收发单元以及功率放大器, 支持 WiFi 协议以及 TCP/IP 协议。设置装置本体为 TCP 客户端, TCP 服务器为数据存储的云服务器, 使用透明传输模式, 实现智能终端中所采集的电气量、环境量信息的上传。

### 2.1.4 其他电路设计

装置本体上各模块需要 5 V 或 3.3 V 两种不同的工作电压。本设计使用电源模块 HQ05P10, 实现 220 V 交流转为 5 V 直流, 该模块效率高达 78%, 输出电压稳定, 误差在±1%内, 纹波噪音低, 自带过流保护。然后使用 TI 公司的 TPS73633 稳压器芯片, 实现 5 V 直流到 3.3 V 直流的转换。供电电路如图 5 所示。

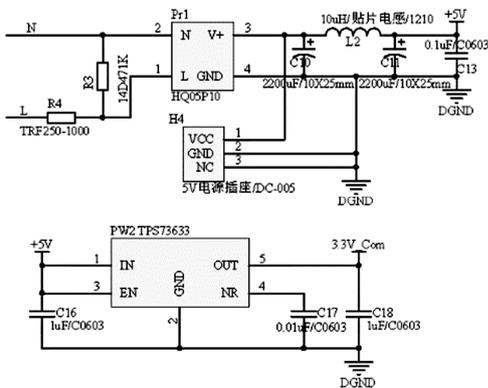


图 5 供电电路原理图

Fig. 5 Power supply circuit schematic

装置具有用于控制电器开断的继电器, 为了避免电路开断过程中的干扰影响装置正常工作, 本设

计通过光耦隔离来驱动继电器的通断, 电路接线如图 6 所示。继电器型号为 HF7520, 光耦芯片为 PC817。DSP 使用一个 I/O 口输出高低电平就可以控制继电器的通断。

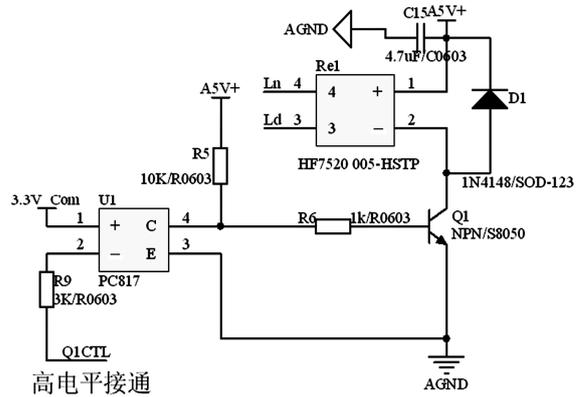


图 6 光耦继电器原理图

Fig. 6 Optocoupler relay schematic

为了避免装置中一些重要信息在掉电后丢失, 装置上配有一片 EEPROM 芯片。EEPROM 选型为 AT24C64AN, DSP 与 EEPROM 之间使用 I<sup>2</sup>C 通信方式。

装置上还配置有温度传感器, 用于获取室内的实时温度。温度数据的获取可以为红外控制重要对象——空调的控制提供决策的依据, 也可以用于用户舒适度等其他用途。温度传感器的选型为 AM2302, 该传感器基于 NTC 测温元件, 温度测量分辨率达 0.1 °C, 测量误差小于±0.5 °C。

## 2.2 红外控制器设计

红外控制器的整体结构如图 7 所示。控制器以单片机为核心, 通过 ZigBee 与装置主体进行通信, 根据装置主体发来的命令控制红外控制芯片, 红外控制芯片将红外波形从码库中取出送给红外驱动芯片使红外发射头向外发送控制信号。

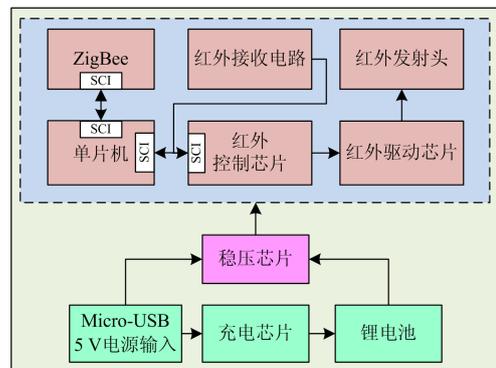


图 7 红外控制器结构框图

Fig. 7 Structure diagram of the infrared controller

### 2.2.1 单片机选型

为实现与装置本体的命令信息交互，同时控制红外信号收发等，红外控制器需要一个中心控制单元。综合考虑成本与功能需求，本装置选用STC15L2K60S2单片机。该芯片是STC生产的单时钟/机器周期新一代8051单片机，速度快，内置2组超高速异步串行通信端口(SCI)。单片机的一组SCI端口与ZigBee模块相连，用以实现和装置本体的通信；另一组SCI端口与红外控制芯片相连，用以控制其动作及工作状态。

### 2.2.2 红外控制芯片选型

市场上采用红外控制的电器产品众多，厂家和型号的不同导致红外信号编码方案复杂多样。为了增强产品的易用性，避免在使用前对红外编码冗长的学习配置，本装置采用了一款内置丰富编码库的红外控制芯片XK2233来解决这个问题。该芯片是一款针对家用电器红外控制的高性能解决方案，内置近千种型号的空凋遥控器红外编码信息，采用载波学习型扩展方法，可学习不同载波频率和任意编码格式的红外指令，支持电视、机顶盒、DVD、风扇等各种家用电器。该芯片使用SCI接口与外部通信，支持休眠省电模式，静态维持电流小于6μA。

### 2.2.3 红外接收电路设计

为增强红外控制器的扩展能力，本装置实现了红外遥控信号的接收与学习功能。红外遥控信号本身为光信号，不能被芯片处理，需要通过红外接收电路将光信号转换成高低电平信号。红外学习电路如图8所示，由红外光敏二极管和三极管放大电路组成，结构简单且效果良好。

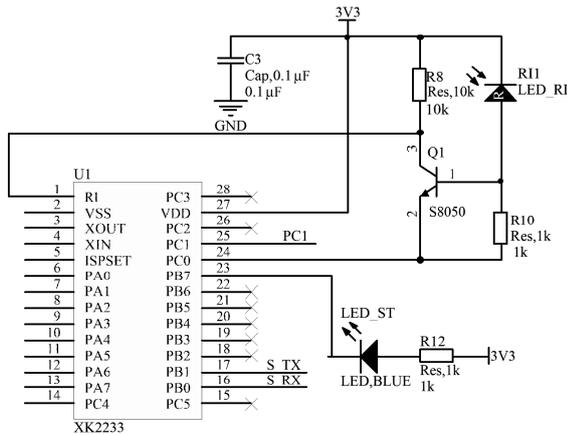


图 8 红外学习电路原理图

Fig. 8 Infrared signal learning circuit schematic

### 2.2.4 红外发射电路设计

与手持遥控器使用时由人工对准目标设备不

同，本装置主要目标是实现对电器的无人化自动控制。为避免安装时调校方向，本装置采用了7个红外发射头放射式分布的方案，并提高脉冲强度以保证信号可靠送达。

如图9所示，红外发射电路由驱动芯片和7个红外发光二极管组成。驱动芯片为ULN2003A，是高压大电流达林顿晶体管阵列系列产品，具有电流增益高、工作电压高、温度范围宽、带负载能力强等特点。红外发光二极管为发光波长940nm的5mm发光二极管。其中6个二极管分布在一个正六边形的6个顶点上并与底面成30°斜向外发射，另外的一个二极管位于六边形的中心位置竖直向上发射。

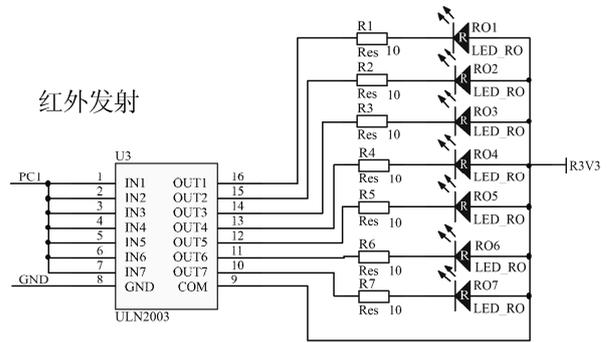


图 9 红外发射电路原理图

Fig. 9 Infrared transmitting circuit schematic

### 2.2.5 电源电路设计

考虑到红外控制器放置的随机性，本装置采用外部适配器供电和内置可充电锂电池供电两种供电方式，大大降低了由于供电布线带来的安装成本。红外控制器电源部分电路如图10所示。两节锂电池的正极与外部5V输入的正极各自通过一个导通电压降很低的肖特基二极管并联向稳压芯片供电。可防止两节锂电池之间形成环流或锂电池向外部供电。

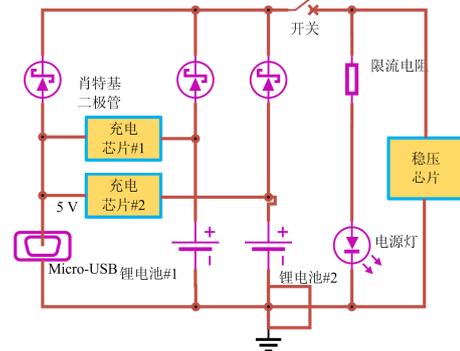


图 10 红外控制器电源电路

Fig. 10 Power supply circuit of the infrared controller

图 10 中, 外部直流电源接口为 Micro-USB 接口, 具有通用性强, 使用方便等特点。充电控制芯片采用的 TP4056 芯片工作安全可靠, 支持高达 1 000 mA 的可编程充电电流。锂电池为 2 600 mAh 的 18650 电池, 内置过充、过放保护功能, 大大提高安全性。稳压芯片采用的 XC6206P332MR 芯片是一款高精度, 低功耗的正电压调整器, 输出电压额定 3.3 V, 可为其他器件理想的工作电压。

### 3 软件设计

#### 3.1 装置本体程序设计

装置本体程序由主程序和中断服务程序组成, 如图 11 所示。上电后, 进入初始化, 配置通信, 定时和中断等参数。随后进入每个周期为 1 s 的采样循环, 采样频率为每周波采 128 个样本点。采集 4 个工频周波后, 进行数据处理, 通过离散的样本点计算得电压电流有效值、功率、功率因素与谐波含量等电气量参数。然后把这些数据存储在 EEPROM 中, 避免掉电后的数据丢失。最后等待 1 s 定时的结束后重新开启采样并重复上述流程。中断服务程序在装置本体接收到云端命令后触发启动, 先确定是否为本机地址, 如果是则进行命令的判断: 若为数据上传的命令, 则把装置中存储的电气量信息通过 WiFi 进行上传; 如果为红外控制的命令, 则通过 ZigBee 转发命令, 让红外控制器响应并执行。

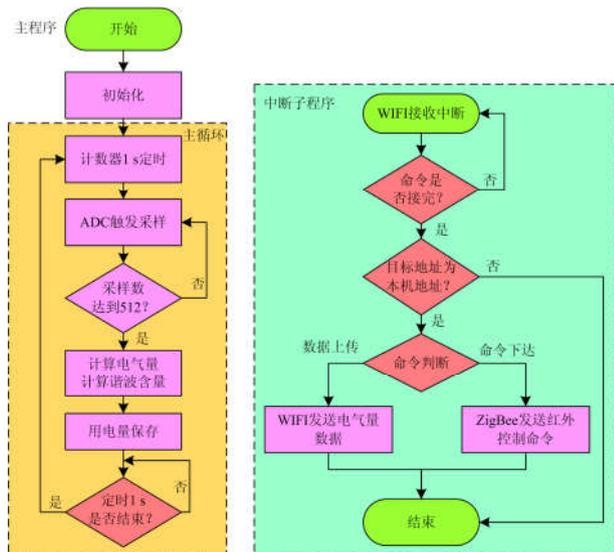


图 11 装置本体程序流程图

Fig. 11 Program flow chart of the device main body

#### 3.2 红外控制器程序设计

红外控制器程序主要由主程序和中断服务程序组成, 如图 12 所示。

其中主程序完成装置软硬件初始化工作, 然后进入主循环中处理接收到的指令; 无待处理指令时则使整个装置进入低功耗状态等待中断唤醒, 达到节省电量、延长电池寿命的目的。中断服务程序用于响应 SCI 接收中断, 将接收的字节进行缓存组成完整的指令, 并判断该指令目标是否为本机, 是则存入指令队列, 否则将该指令丢弃。由于红外指令发送速度较慢, 当装置本体连续传来多条指令时, 如果直接传输给红外控制芯片将会产生冲突, 故设计了一个循环队列用于指令缓存, 解决了两种高低速传输方式的配合问题。

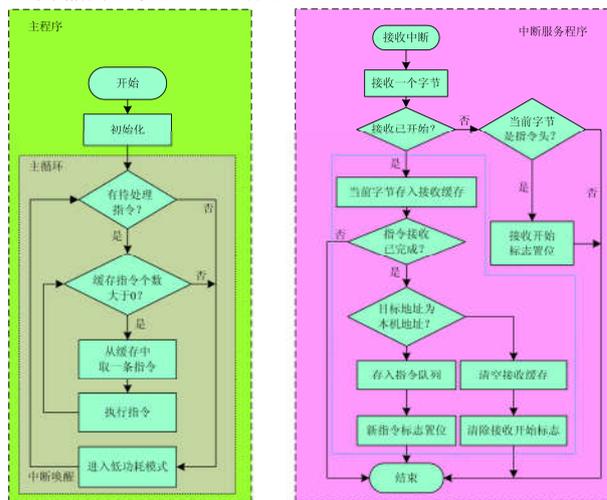


图 12 红外控制器程序流程图

Fig. 12 Program flow chart of the infrared controller

### 4 实验验证

基于前面的硬件设计方案, 本文最终开发的基于 DSP 与红外遥控的分体式智能用电测控终端如图 13 和图 14 所示。

#### 4.1 装置本体测试

为了验证装置的用电信息采集能力, 本文采用 KS833 电测量仪表综合校验装置作为标准源对装置的性能进行了测试, 结果如表 1 所示。由表 1 可以看出, 本装置的电压测量精度达 0.2 级, 在大电流情

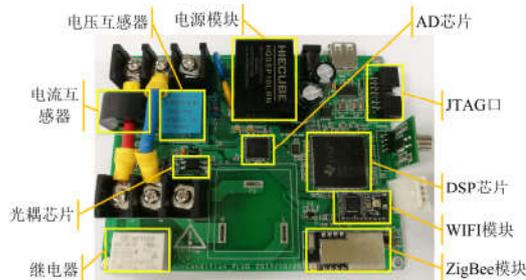


图 13 装置本体原型机

Fig. 13 Prototype of the device main body

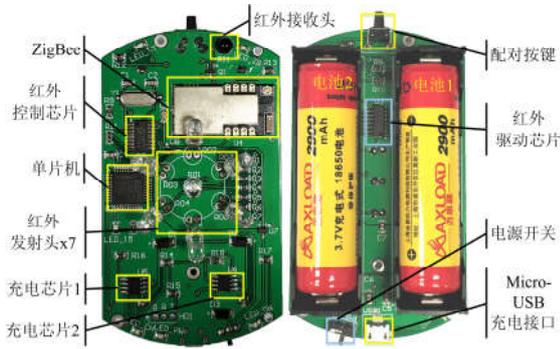


图 14 红外控制器样机

Fig. 14 Prototype of the infrared controller

况下电流测量精度可达 0.2 级，在电流小于 1 A 时亦可达 0.5 级。该测量精度远超一般电表，可以完全满足家庭能量管理和自动需求响应的要求。

表 1 电气测量测试结果

Table 1 Electrical measurement test results

项目	实际值	测量值	相对误差/%
电压/V	220.000 0	220.323 9	0.147 2
	225.000 0	224.695 2	-0.135 5
	215.000 0	215.177 4	0.082 5
电流/A	1.000 0	0.996 3	-0.370 0
	5.000 0	5.004 8	0.096 0
	10.000 0	9.981 5	-0.185 0
功率因数	0.300 0	0.301 1	0.366 7
	0.500 0	0.501 3	0.260 0
	0.800 0	0.795 3	-0.587 5
温度	26.000 0	26.300 0	1.153 8

#### 4.2 红外控制器测试

测试软件界面与球坐标系如图 15 所示。对于红外控制器，本文通过在装置上建立球面坐标系来描述被控目标电器相对于控制器的位置，该坐标系原点为中心位置红外二极管的圆心，z 轴垂直于水平面向上，x 轴指向距 ZigBee 模块最近的红外二极管的圆心，y 轴指向轴左方 90°。在此坐标系下，圆周上 6 个红外 LED 的发射方向可表示为  $\theta=60^\circ$ ， $\varphi=k \times 60^\circ(k=0,1,\dots,5)$ ，中心红外 LED 表示为  $\theta=0^\circ$ 。

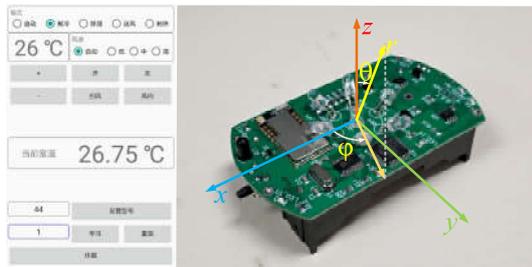


图 15 测试软件界面与球坐标系

Fig. 15 Testing software interface and spherical coordinates

为检验红外控制器发射信号的覆盖能力，对其进行了发射角度与传输距离的测试，结果分别如表 2 和表 3 所示，实验结果表明本装置可以实现 7 m 内多角度的红外遥控功能，对安装环境具有很好的适应性。

表 2 红外发射角度测试结果

Table 2 Infrared emission angle test results

距离 r/m	$\varphi/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)$	结果
2	0	0	成功
	0	30	成功
	0	60	成功
	0	90	成功
	30	0	成功
	30	30	成功
	30	60	成功
	30	90	成功

表 3 红外发射距离测试结果

Table 3 Infrared emission distance test results

距离 r/m	$\varphi/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)$	结果
3	30	30	成功
4	30	30	成功
5	30	30	成功
6	30	30	成功
7	30	90	失败
7	0	60	成功

#### 4.3 与同类产品的比较

分体式智能用电测控终端是基于需求响应与家庭能量管理系统的框架下提出的硬件设计方案，较同类产品有明显优势：①选用的处理核心性能远优于同类产品。同类产品一般选型为单片机或 ARM，仅能满足数据收发及低频的电气量采集，而 DSP 可以支持高频率的电气量、环境量数据采集，支持高速的通信，还能进行 FFT 用以求解各次谐波量。②支持继电器通断控制与红外连续调节两种控制方式，分体式设计可以满足复杂家居环境的布置。同类产品大都只支持继电器通断控制，而无法对空调等调节效果明显的电器进行连续调节控制。其他支持红外控制的智能插座大都使用一体化设计，布局不灵活，受红外直线传播特性影响以致红外控制效果不佳。此外，它们都只支持红外学习功能，而不具备内置的红外数据库，以致初始配置过程繁琐麻烦。③内置温度传感器，可以采集温度信息，该数据可以作为空调调节的重要参考数据以及衡量用户舒适性的重要指标，绝大部分同类插座都未重视温度等环境量数据的价值。分体式智能用电测控终端与同类产品的详细比较见表 4 所示。

表 4 本文开发的分体式智能终端与其他终端产品间的优劣势比较

Table 4 Comparison of advantages and disadvantages between the split-type smart terminal developed in this paper and other terminal products

产品名称	研发时间	核心处理器	电气量采集	环境量采集	通信方式	继电器通断控制	红外调节控制	红外控制灵活性
分体式智能用电测控终端	2018年	DSP	支持高频电压电流采集, 支持谐波分析	支持温度采集	ZigBee WiFi	支持	内置红外库, 不需学习	分体式设计, 放置灵活
基于单片机的智能插座 <sup>[20]</sup>	2012年	单片机	支持电压电流采集	无	不对外通信	支持	无	无
基于 STM32 的无线红外智能插座 <sup>[13]</sup>	2015年	ARM	无	无	射频	无	需要学习红外信号	一体化设计, 缺乏灵活性
居民用户电力需求响应控制器 <sup>[15]</sup>	2016年	AVR 单片机	支持电压电流采集	无	ZigBee WiFi	支持	需要学习红外信号	一体化设计, 缺乏灵活性
支持红外和射频技术的用户智能控制终端 <sup>[21]</sup>	2017年	ARM	无	无	射频	无	需要学习红外信号	支持无线充电, 放置灵活
计及环境舒适度的智能用电监控仪 <sup>[22]</sup>	2018年	DSP	支持高频电压电流采集, 支持谐波分析	支持温度、湿度和颗粒物浓度采集	ZigBee	支持	无	无

## 5 结语

本文研制的具备数字信号处理与红外精准控制功能的分体式智能用电监测控制终端克服了目前智能用电终端控制方式缺乏灵活性以及数据采集处理能力偏弱等不足, 实现了精确的用电信息采集处理和可靠准确的红外控制功能, 解决了传统非通即断的控制方式使可调节用电设备失去连续调节能力的问题, 改变了以往红外控制器载波频率单一、无红外编码库的情况。得益于分体式与可充电设计, 装置安装简便灵活, 可适应复杂家居环境。

本文设计的分体式智能测控终端可为上层的理论应用打下硬件基础, 也可使许多更为全面多样的控制策略得以付诸实践, 并最终为本文下一步开展能源互联网下有效的家庭能量管理、推动家庭负荷参与需求响应(尤其是自动需求响应)的相关研究提供了有利条件。

## 参考文献

- [1] 程乐峰, 余涛. 开放电力市场环境多群体非对称演化博弈的均衡稳定性典型场景分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5687-5703.  
CHENG Lefeng, YU Tao. Typical scenario analysis of equilibrium stability of multi-group asymmetric evolutionary games in the open and ever-growing electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5687-5703.
- [2] 汤毅, 程乐峰, 李正佳, 等. 基于智能台区的配电网经济运行及优化高级分析系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 150-158.  
TANG Yi, CHENG Lefeng, LI Zhengjia, et al. Design of economic operation and optimization analysis system based on intelligent area power network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 150-158.
- [3] 曾鸣, 韩旭, 孙静惠, 等. 能源互联网背景下自动需求响应关键问题及展望[J]. 电力建设, 2017, 38(2): 21-27.  
ZENG Ming, HAN Xu, SUN Jinghui, et al. Key issues and prospects of automated demand response under energy internet background[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(2): 21-27.
- [4] VANTHOURNOUT K, DUPONT B, FOUBERT W, et al. An automated residential demand response pilot experiment based on day-ahead dynamic pricing[J]. Applied Energy, 2015, 155: 195-203.
- [5] CHENG L F, ZHANG Z Y, JIANG H R, et al. Local energy management and optimization: a novel energy universal service bus system based on energy Internet technologies[J]. Energies, 2018, 11(5): 1160.
- [6] 王伟, 何光宇, 万钧力, 等. 用户侧能量管理系统初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 10-15.  
WANG Wei, HE Guangyu, WAN Junli, et al. Preliminary investigation on user energy management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 10-15.
- [7] JIA K Q, GUO G, XIAO J C, et al. Data compression approach for the home energy management system[J]. Applied Energy, 2019, 247: 643-656.
- [8] 武东升, 李中伟, 孟迪, 等. 家庭智能用电管理系统智能交互终端设计[J]. 自动化与仪表, 2017, 32(1): 34-38, 42.  
WU Dongsheng, LI Zhongwei, MENG Di, et al. Design of intelligent interactive terminal of household intelligent power management system[J]. Automation & Instrumentation, 2017, 32(1): 34-38, 42.
- [9] 温克欢, 黄怀东, 李伟华, 等. 基于云平台的智能计量系统典型设计与应用[J]. 电测与仪表, 2016, 53(5): 118-123.  
WEN Kehuan, HUANG Huaidong, LI Weihua, et al. The

- typical design and application of intelligent measurement system based on cloud platform[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2016, 53(5): 118-123.
- [10] CHENG L F, YU T, JIANG H R, et al. Energy internet access equipment integrating cyber-physical systems thinking: concepts, key technologies, system development, and application prospects[J]. *IEEE Access*, 2019, 7(1): 23127-23148.
- [11] 程乐峰, 余涛, 张孝顺, 等. 信息-物理-社会融合的智慧能源调度机器人及其知识自动化: 框架、技术与挑战[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(1): 25-40.  
CHENG Lefeng, YU Tao, ZHANG Xiaoshun, et al. Cyber-physical-social systems based smart energy robotic dispatcher and its knowledge automation: framework, techniques and challenges[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(1): 25-40.
- [12] 李东东, 崔龙龙, 林顺富, 等. 家庭智能用电系统研究及智能控制器开发[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(4): 123-129.  
LI Dongdong, CUI Longlong, LIN Shunfu, et al. Study of smart power utilization system and development of smart controller for homes[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(4): 123-129.
- [13] 梁李柳元. 基于 STM32 的无线红外智能插座系统设计[J]. *现代电子技术*, 2015, 38(19): 156-159.  
LIANG Liliuyuan. Design of STM32-based smart socket system with wireless infrared remote control function[J]. *Modern Electronics Technique*, 2015, 38(19): 156-159.
- [14] 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.  
XU Maoxin, YU Tao, XU Hao. Design and implementation of a smart power terminal based on DSP[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2017, 54(9): 24-29.
- [15] 刘世飞. 居民用户电力需求响应控制器的研究与设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.  
LIU Shifei. The research and design of power demand response controller for residential customers[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [16] 曹昉, 郭培林, 王科, 等. 等室内舒适指数比调整的空调群负荷响应方法[J]. *中国电力*, 2017, 50(11): 152-157.  
CAO Fang, GUO Peilin, WANG Ke, et al. Load response method of air conditioning groups based on equalize proportion adjustment of indoor comfort index[J]. *Electric Power*, 2017, 50(11): 152-157.
- [17] ROCHA-OSORIO C M, SOLIS-CHAVES J S, RODRIGUES L L, et al. Deadbeat-fuzzy controller for the power control of a doubly fed induction generator based wind power system[J]. *ISA Transactions*, 2019, 88: 258-267.
- [18] 程乐峰, 周彬, 余涛. 一种节电潜力在线自动检测和快速能源审计智能系统的设计与实现[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(14): 105-111.  
CHENG Lefeng, ZHOU Bin, YU Tao. Design and implementation of energy-saving potential automatically detecting online and rapid energy audit intelligent system[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(14): 105-111.
- [19] 程乐峰, 王克英, 余涛. 基于双 ATmega128L 和 Zigbee 的电能质量智能诊断仪的设计及其应用[J]. *电测与仪表*, 2014, 51(19): 92-99.  
CHENG Lefeng, WANG Keying, YU Tao. Design and application of power quality intelligent diagnosis instrument based on dual ATmega128L and Zigbee[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2014, 51(19): 92-99.
- [20] 项粤生, 高瑞霞, 邬杨波, 等. 基于单片机的智能插座的设计与实现[J]. *工业控制计算机*, 2012, 25(9): 129-131.  
XIANG Yuesheng, GAO Ruixia, WU Yangbo, et al. Design of intelligent socket based on single chip microcomputer[J]. *Industrial Control Computer*, 2012, 25(9): 129-131.
- [21] 朱煌家, 蒋燕君, 吴嘉磊. 支持红外和射频技术的用户智能控制终端设计[J]. *浙江树人大学学报(自然科学版)*, 2017, 17(2): 1-5.  
ZHU Huangjia, JIANG Yanjun, WU Jialei. Design of user intelligent control terminal supporting infrared and radio frequency technology[J]. *Journal of Zhejiang Shuren University*, 2017, 17(2): 1-5.
- [22] 刘斌, 王冕. 计及环境舒适度的智能用电监控仪设计与研制[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(12): 131-136.  
LIU Bin, WANG Mian. Design and development of intelligent power monitor considering environmental comfort[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(12): 131-136.

收稿日期: 2018-09-30; 修回日期: 2018-11-21

作者简介:

华锦修(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能电网、配网自动化; E-mail: hua1995220@126.com

史守圆(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网、智能用电等相关技术研究; E-mail: shishouyuan@outlook.com

程乐峰(1990—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统优化运行与控制、智能配电网、智能用电、电力市场及博弈论等。E-mail: chenglf\_scut@163.com

(编辑 周金梅)