

基于电力载波通信技术的智能小区抄表系统

俞海猛¹, 隋仕伟¹, 刘梦爽², 赵艳³

(1. 国网南瑞南京控制系统有限公司, 南京 210000;
2. 国网新疆电力有限公司, 乌鲁木齐 830000; 3. 南京工程学院, 南京 210000)

摘要: 阶梯电价改革的背景下, 智能小区电表的改造升级成为电力部门关注的焦点问题, 提出了一种基于电力载波通信技术的智能小区抄表系统设计方案; 该方案采用分布式的 B/S 模式, 介绍了电力载波通信技术的工作原理, 详细阐述了用户端的功率计量、电力载波通信和测控主机等硬件模块的设计原理、参数设置方法和关键技术, 给出了各个模块的电路原理图和工作流程; 详细阐述了上位 PC 机端的具体开发方案, 给出了软件工作流程图和关键代码; 工程测试证明: 基于电力载波通信技术的智能小区抄表系统, 功耗低于 1 kW/月, 测量误差低于 $\pm 0.1\%$, 能够达到计算阶梯电价、测控小区用户电力能源消耗的目的; 系统干扰能力强, 在浪涌和尖峰未超过正常值的 50% 时, 系统能够正常工作。

关键词: 智能抄表; 功率计量; 电力载波通信; 光电耦合; 阶梯电价

Electric Meter Reading System in Intelligent Community Based on Power Carrier Communication Technology

YU Haimeng¹, SUI Shiwei¹, LIU Mengshuang², ZHAO Yan³

(1. State Grid Nari Nanjing Control System Co., Ltd., Nanjing 210000, China;
2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, China;
3. Nanjing Institute of engineering, Nanjing 210000, China)

Abstract: Under the background of the step electricity price reform, the transformation and upgrading of electric meters in the intelligent community has become the focus of the power sector. A design scheme of the meter reading system in the intelligent community based on the power carrier communication technology is proposed. The scheme adopts the distributed B/S mode, introduces the working principle of power carrier communication technology, expounds in detail the design principle, parameter setting method and key technology of hardware modules such as power metering, power carrier communication and measurement and control host of user terminal, and gives the circuit schematic diagram and work flow of each module. The specific development scheme of the upper PC is described in detail, and the software flow chart and key codes are given. The engineering test shows that the power consumption of the intelligent community meter reading system based on the power carrier communication technology is less than 1 kW/month, and the measurement error is less than $\pm 0.1\%$, which can achieve the purpose of calculating the step electricity price and measuring the power consumption of the community users. The system has strong interference ability. When the surge and peak do not exceed 50% of the normal value, the system can work normally.

Keywords: smart meter; power measurement; PLC; photoelectric coupling; tiered pricing for electricity

0 引言

2012 年初, 国家发展改革委员会出台了居民电价按照阶梯电价进行计费的文件规定, 目前全国除西藏和新疆以外, 所有省份都实行居民阶梯电价政策。居民阶梯电价政策实施后, 小区管理员和用户要求及时测控电功率的消耗, 以达到节约电力能源的目的。

鉴于阶梯电价在实施过程中存在一些问题。所以 2021 年国家发展改革委员会提出了“要在不增加居民基本生活用水、用电、用气负担的前提下推进资源能源价格改革, 完善阶梯电价”的改革措施, 同时国家的“双碳”战略对

电力能源管理也提出了更多的要求, 因此如何围绕阶梯电价开展电力计量系统的改革就成为研究的热点。

传统的电力抄表方式是人工抄表, 需要工作人员来到用户家中抄写用电的数据, 消耗了大量人力, 同时存在误差大的问题。后来出现了 IC 预付费卡和射频识别 (RFID, radio frequency IDentification) 卡抄表系统。但是基于 IC 预付费卡和 RFID 卡的电力抄表系统只能显示整体功率消耗情况, 数据必须通过专业设备读取, 不具备报警提醒、阶梯计价功能, 需进行改造^[1]。

智能抄表系统 (AMR, automatic meter reading sys-

收稿日期: 2022-08-01; 修回日期: 2022-08-25。

基金项目: 江苏省产学研项目 (BY2020058)。

作者简介: 俞海孟 (1988-), 男, 江苏盐城人, 大学本科, 工程师, 主要从事电力营销管理、电力计量与用电信息采集方向的研究。

引用格式: 俞海猛, 隋仕伟, 刘梦爽, 等. 基于电力载波通信技术的智能小区抄表系统[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(11): 251-256, 278.

tem) 的提出消除了传统系统的所有缺点。智能抄表系统是一个复杂的系统, 允许管理员在不访问网站的情况下收集数据。AMR 包括各种先进的数据采集和传输技术, 如电力载波通信 (PLC, power line commutation)、RFID 和现代通信网络等。AMR 能够帮助客户和能源服务提供商从电表中获得准确和更新的数据^[2]。AMR 系统可以按小时、每月或按要求发送能耗。这些数据被发送到中央系统进行计费 and 故障排除, 数据存储在数据库服务器中, 用于处理和记录。AMR 降低了劳动力成本、收集时间、能源盗窃, 避免了延迟付款^[3], 提高了数据安全性, 改善了客户服务, 减少了售电公司的收入损失。AMR 不仅发送数据, 还提供电源断开/连接功能、断电功能和异常报警功能。所有这些优点使 AMR 具有巨大的使用优势。

近年来, 基于 AMR 的电力抄表系统发展较快, 特别是在应用领域。解亚军等在探讨分析 Zigbee 应用在 AMR 中的可能性后, 提出了一种利用 ZigBee 传输协议的电力抄表系统解决方案, 该方案能够实现自动抄表和按需抄表功能, 通信稳定, 但是需要增设太多的 Zigbee 无线节点设备, 成本较高^[4]。叶加星等提出了一种低成本宽量程低功耗无线 AMR 系统, 该系统采取远程使用公网无线数据传输、在线使用红外接触抄表相结合的方式, 达到快捷电力能源管理的目标, 但是同样存在成本较高, 有安全隐患的问题^[5]。刘卓鸿分析了 110 kV 以下小区使用智能抄表和非智能抄表前后的经济效益比, 得到使用建设成本更低的 AMR 系统, 后期经济效益更佳的重要结论^[6]。

本文结合电力能源管理需要, 提出了一种具备功率计量、阶梯电价计费、高电价报警及异常开闸功能的新型智能小区抄表系统。该系统属于 AMR, 基于 PLC 关键技术, 具有建设成本低、经济效益好的特点。

1 系统结构及原理

1.1 系统结构

系统工程方法是为了实现系统最优化的目的, 对系统的构成元素、整体框架、数据流、控制器、执行机构等开展分析的一种科学方法^[7]。它应用先进的组织管理技术, 使系统的整体与局部之间的关系协调最优化, 最终实现整个系统的总体最优运行。用系统工程方法划分小区智能抄表系统设计工作。

参照模块化硬件、软件开发规范, 将小区智能抄表系统的总体设计方案分为用户终端、小区管理员终端两部分。

如图 1, 用户终端通过功率智能计量设备计量电功率并处理, 后由 PLC 调制器编码, 经普通供电线路传输到小区管理员终端, PLC 解调器解码数据传输至上位 PC 机, 小区管理员通过操作上位 PC 机软件完成阶梯电价计算、异常分析、开闸合闸等测控操作, 最终实现对小区电力资源的智能管控。

1.2 PLC 原理

PLC 是一种使用现有电缆 (如电力线、同轴电缆、双

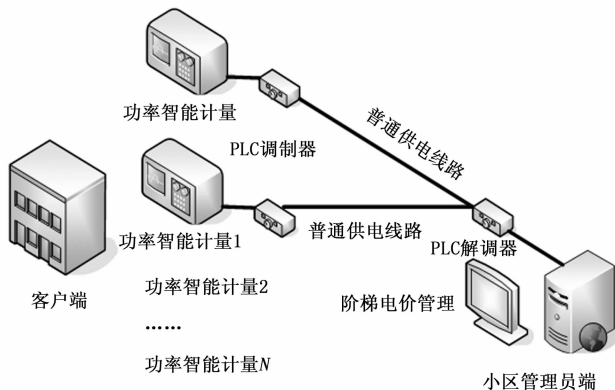


图 1 方案总体示意图

绞线等) 的数据传输技术。PLC 通过使用现有电缆作为传输介质, 可以以低成本快速构建网络^[8]。在使用电力线的情况下, 电力和数据传输可以用一根电缆完成, 这可以降低系统的复杂度和建设成本。

PLC 是电力系统特有的专用通信模式, 它通过载波方式将模拟或数字信号, 在电力线中进行高速传输。因为它不需要重新布线, 所以具有很强的便捷性和成本优势。

PLC 的调制方法是正交频分复用 (OFDM, orthogonal frequency division multiplexing)。如图 2, 它将数据信号和高频的载波信号 $\sin(x)/x$ 在频域上进行波形叠加运算, 实际传输时每个载波的带宽大约为 24.4 kHz。PLC 发送信号过程模数转换 (DAC, digital to analog converter) 是核心: 调制芯片将数据先进行串/并转换, 再将 OFDM 的子载波进行分离, 做后通过反傅立叶运算, 将频域信号转换成时域信号。为了避免传输过程中的叠频干扰, 混频会把子载波升高到对应的传输频率, 最后合成发送信号。PLC 接收信号的过程是上述步骤的逆向过程, 不同的是在混频之后还有滤波环节, 目的也是为了减小干扰。

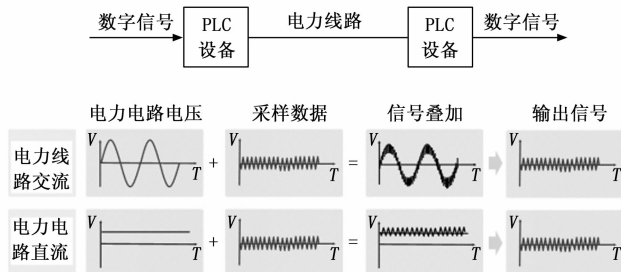


图 2 PLC 基本原理

如图 2, 在两个设备之间传输和接收数据时, 数据在发射器上进行调制, 调制信号叠加在交流或直流电源电压上。在接收器中, 通过使用滤波器分离电源电压和调制信号并解调调制信号来提取数据^[9]。PLC 可以用于交流电源线, 也可以用于直流电源线。

综上所述: PLC 是一种新型的宽带接入技术, 在这种传输模式下, 多媒体业务信号 (包括高速数据、语音和视

频) 都可以通过电力线传输。PLC 最大的优点是作为一种有线通信技术, 它可以连接到任何测量和控制点, 信号可以通过电力线传输, 利用的是电力线路, 不需要增加另外架设线路的成本。但是 PLC 最大的缺点是如传输速度不高, 对干扰、非线性失真、电力线路通道之间的交叉调制干扰较为敏感。在设计的时候通常使用容量较大的电容和电感构成抗干扰电路, 以弥补以上缺点。

1.3 B/S 构架

本设计采用的 B/S 架构即为浏览器/服务器结构。浏览器是指用户端的采集终端硬件, 采集终端硬件在小区呈分布式排列, 它只实现的电力数据采集的事务逻辑。主要的事务逻辑在服务器端, 即小区管理员上位 PC 机端实现的。用户端的采集终端硬件、小区管理员上位 PC 机端和数据库端组成的三层架构。B/S 的系统无需特殊安装。B/S 架构将电力数据的处理管理等事务逻辑放到小区管理员上位 PC 机端上, 从而减轻了客户端的数据计算压力。

采用 B/S 架构的主要原因和优点是: (1) 它是一个开放的广域网结构上, 通过一定程度的权限控制, 就可以达到多客户接入、强交互的目的。这对于用户随时在增减的小区非常实用; (2) B/S 架构的功能升级非常简单, 在服务器端口进行即可, 不需要升级多个客户端。这对于未来改变小区阶梯电价的收费标准、管理标准等也很容易。

2 用户端设计

用户终端主要由功率计量模块、数据通信模块、测控主机、PLC 转串口模块组成。其主要功能是准确采集用户的用电数据, 调制后传输到管理员端。设计的基本原则是在满足设计需求的前提下尽可能的考虑抗干扰措施, 同时降低成本。

2.1 功率计量模块

功率计量模块易于使用、准确, 是广泛应用中成本效益高的功率测量解决方案的首选仪器, 例如: 电气设备的生产线测试、大电流设备的评估、电池或直流驱动设备的评估, 质量保证, 工业电机、旋转机械和校准实验室的效率测量, 用于安装和维护任务, 部分用于研发, 它还用于测量电网功率^[10]。本设计中的功率计量模块本质是一个实时的在线的系统, 系统有数据采集与处理、状态监测和报警、通信功能。设计需求是: 配备 1 个测量通道, 可测量交流 (AC, alternating current) 系统中的所有参数, 如视在功率、有功和无功功率、电流、电压、频率、功率因数、视在能量、有功和无功能量。

功率计量模块专用芯片较多, 普通居民用电一户一表总电流一般小于 50 A^[11], 考虑裕量后选用最大电流量程为 50 A 的专用功率计量芯片 AD7755。AD7755 芯片是常用的标准化电力参数测量芯片, 其参数指标精度高, 测量和采样结果符合 GB/T17215-1998 国家标准和 IEC 62052-11、IEC 62053-21 国际标准。

AD7755 芯片的测量原理是通过预设的多根 Pin 引脚引

入电流、电压数据。AD7755 芯片内置两个 ADC 都是 16 位二阶模拟转换器 (ADC, analog-to-digital converter) 对引入的数据进行数字化, 将内部相对匹配电路的预设数值和引入电流、电压数据的相位进行匹配, 待匹配误差无线接近零值的时候, 预设数值即为测量结果。AD7755 芯片内部设置了的空载值特性, 以避免零漂等现象的发生。AD7755 芯片采样速率达 900 kHz, 满足本设计的需求。

使用 24 脚 DIP 封装的 AD7755 芯片, 搭建图 3 所示外围电路。

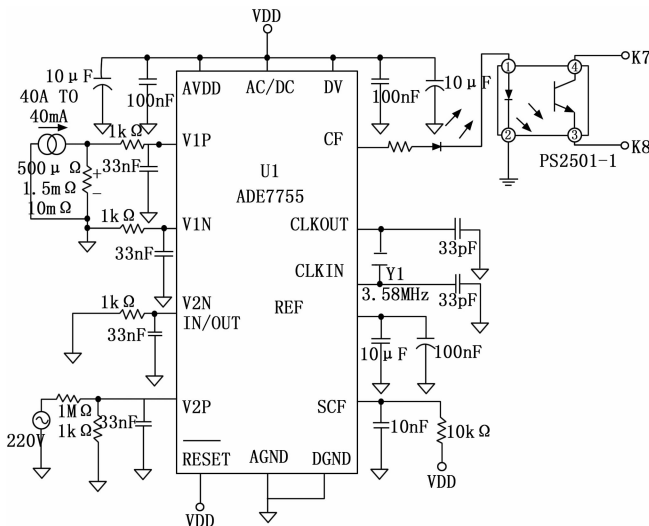


图 3 功率计量电路

外围电路包括电流采样、电压采样、晶体振荡三大部分。采样后的电流 I_c 输入 V1P 和 V1N 引脚, 另通过电阻网络将电压 V_c 采样结果送至 V2P 和 V2N 引脚。 I_c 、 V_c 经内部转换、相乘后得到有功功率瞬时值 P_c 。 P_c 从引脚 CF 以较高频率输出至测控主机。

功率计量电路的安全性是计量模块的重要问题。按照《GB/T 5226.1 电气设备安全标准要求》^[12], 本功率计量电路中间用 NEC PS2501 光电耦合器隔离以保证信号安全。NEC PS2501-1K 晶体管输出光耦光耦合隔离器, 由一个砷化镓发光二极管和一个 NPN 硅光电晶体管组成, 内含一个 5 kV 的 1 通道。砷化镓发光二极管将输入电信号转换为光信号, 并将其传输到 NPN 硅光电晶体管, 将其转换为电信号输出^[13]。由于没有直接的电气连接, 它不仅耦合和传输信号, 而且隔离干扰。

根据电网的国家标准^[12]和普通家庭电力能源消耗的普遍情况, 实际使用时对模块作如下设定: 输入电压 220 V AC, $I_{\max} = 50$ A, $I_b = 5$ A, 分流器 $R = 10$ mΩ, $S_1 = 1$, $S_0 = 0$, $G_1 = 0$, $G_0 = 1$, 增益 $G = 8$ 。

2.2 数据通信模块

计量模块获得的功率数据最后要传输到小区管理员处, 供进一步处理。数据传输可以采用无线热点、有线局域网等传统方式进行传输^[14]。但是传统传输方式需要添置额

外的设备,增加了经济成本和系统的复杂度,此处采用 PLC 技术进行传输功率。

设计选用 SENS-01 嵌入式电力线载波通讯模块作为数据传输主控。SENS-01 嵌入式电力线载波通讯模块是国产的 PLC 模块。模块中嵌入了专用电力载波 IC, 它具有通信速度快, 抗干扰能力强, 误码率低等特点, 特别适合国内住宅小区的电力环境。SENS-01 嵌入式电力线载波通讯模块中嵌入了电源模块, 不仅可以从 220 V AC 取电作为模块本身的电压源, 还可以稳定输出 5 V DC 电源给单片机主控模块供电。因为本设计的数据采集是单向通道, 只能为用户端到小区管理员端提供, 所以 SENS-01 嵌入式电力线载波模块的半双工通信功能较合适。

硬件电路连接图如图 4, SENS-01 的使能端 C、B、A 分别连接“低高低”TTL 电平, 使其工作在 9 600 Kb/s 的速率。使能端 C、B、A 内置上拉电阻, 悬空为高电平, 只需将 C、A 两端接地。RXD、TXD、GND 三个端口均接到测控主机对应的端口以获取其传输出来的计量数据。

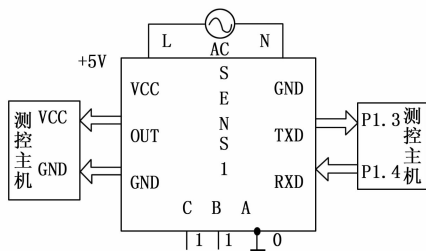


图 4 PLC 模块连接示意图

SENS-01 嵌入式电力线载波通讯模块参数设置如下: 普通居民住宅小区小高层一般在 30 层以下, 传输距离小于 1 000 米^[15], 因此设置 SENS-01 模块工作在 125 kHz 的频率下, 选择过零双模的调制解调方式, 通信波特率为 9 600 Kb/s。一般来说, 同一个小区的所有用户都在同一台电力变压器工作, 所以 SENS-01 嵌入式电力线载波模块实际是连接在同一条电力线路上, 所以通信模式设置成主从模式, 每个用户端的 SENS-01 嵌入式电力线载波模块是独立并行工作的, 互不影响和干扰。

因为小区居民用电存在大功率空调、大功率电热设备等感性、容性设备, 产生的浪涌和尖峰会影响通信, 所以 SENS-01 嵌入式电力线载波通讯模块在实际使用中, 会存在干扰。考虑到以上情况, 在设计本模块的时候, 改进其模拟输入结构, 使其具有宽动态范围, 简化了传感器接口。因为测量的有功功率是从瞬时功率信号推导计算出来的, 所以为了得到有功功率分量, 只要对瞬时功率信号进行低通滤波就行。如图 4, SENS-01 滤掉了电流信号中的直流分量, 从而消除了由于电压或电流失调造成的有功功率计算上的误差。

2.3 测控主机

测控主机功能相对简单, 只要求实现数据处理和用户终端测控的功能, 出于成本的考虑, 选择 C8051 兼容系列

单片机作为解决方案。

测控主机 P1.1 口和 P1.2 连接 2.1 节中功率计量模块, P1.3 和 P1.4 口连接通信模块, P.17 连接继电器和空气开关, 以通过继电器实现合闸和开闸操作控制整个线路的通断。

2.1 节中传输到测控主机的功率 P_c 为瞬时功率, 测控主机需对其计数累加才能获得总功率。设定测控主机 INT₀ 引脚负责产生中断, 实现脉冲计数。测控主机累计脉冲个数 N , 计数满 N 后清零, 并将电能数值减 1, 存入内部 EEPROM 以保存用电数据。

2.2 节中的 PLC 模块提供单独的 5 V 供电, 最大供电功率 2 W, 完全满足测控主机的工作, 可以用其直接供电。

2.2 节中 AD7755 芯片 V_2 引脚连接的分压电阻为可调电阻, 通过调节电阻阻值调整设定计数脉冲常数^[16]。通过反复试验比较得, 将计数脉冲为设定为 45 700, 即计数 45 700 个脉冲消耗 1 度电。

2.4 PLC 转串口模块

接收端仍然选用 SENS-01 嵌入式电力线载波通讯模块作为主控。在 SENS-01 芯片的 RXD 和 TXD 端串联 MAX232 芯片, 将输出信号转换成标准 RS232 串口信号传输至上位 PC 机。

因为一般小区用户数都较多, 居民用电设备中的空调等大功率感、容性设备的启停导致的噪声、浪涌和尖峰干扰对传输的功率信号影响较大, 按照国家标准 GB 38969-2020 《电力系统技术导则》^[17], 在接收模块中需前置添耦合滤波网络。

耦合滤波网络如图 5, 其中二极管 D_1 、 D_2 、 D_3 构成保护电路: RC 带通滤波器通过高通和低通滤波器以及这两个元件的组合工作。在高频部分, 通过电阻 R_2 的电压分接, 低通通过电容器 C_2 。与这两个组件并联的输出电压 V_{out} 随着输入频率接近中心频率而增大, 因此, 通过电阻与电容的比值, 可以确定通过滤波器的频带。

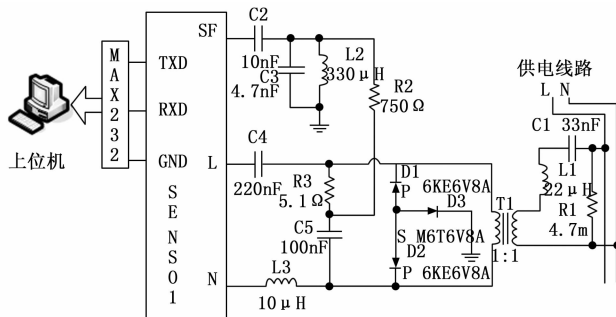


图 5 PLC 信号转串口信号模块电路图

同时, 外围电路元器件电容 C_2 、 C_3 , 电阻 R_2 和电感 L_2 构成 RC 二阶带通滤波电路, 可以滤除浪涌和尖峰信号^[18]。

在设计的时候需要重点考虑模块的抗干扰特性。因为电容 C_2 对直流电相当于开路, 这样整流电路输出的直流电压不能通过 C_3 流到地, 所以电压会加载在 R_L 上。而电流

中的交流成分, 因为 C_2 容量大, 容抗小, 所以交流成分能够通过 C_2 流到地, 不会加载在 R_L 上。电路中的电容 C_2 本质是滤波, 它通过模拟滤波的方式从单向直流电中分离出电压 U 。因此在设计的时候, 需要根据用户端负载的大小, 选择电容 C_2 的容量, 两者成正比关系。同时考虑 RC 二阶带通滤波电路的工作特性, 需要合理地选择电容 C_3 , 电阻 R_2 和电感 L_2 的值, 使之对电流中交流成分的容抗小, 这样残留在负载 R_L 上的交流成分就小, 最后达到较好的滤波效果, 使系统稳定。

3 小区管理员终端设计

小区管理员终端主要实现对小区各住户的用电量查询、电费计算及开闸合闸控制等功能。软件选择 Visual Studio 2008 为开发平台, Visual C++ 作为开发语言进行软件的设计和开发。

小区管理员终端需要良好的用户界面 (UI, user interface), 所以选择基于 Windows 用户界面框架 (WPF, windows presentation foundation) 作为开发框架。WPF 框架支持 Visual C++ 直接调用 API 函数、控件甚至图片作为程序的 UI。本开发中, 应用程序采用一般数据模型, 直接调用图片、图形资源作为小区管理员终端的 UI, 用 MSComm 控件作为硬件数据传输控制核心。

3.1 软件流程

根据实际使用需求, 给软件设定以下流程工作: 初始化软硬件后接收串口传来的用户用电信息, 然后判断用户的异常状态, 如果异常则进行开闸操作, 反之则计算阶梯电价。

软件工作流程图如图 6 所示。

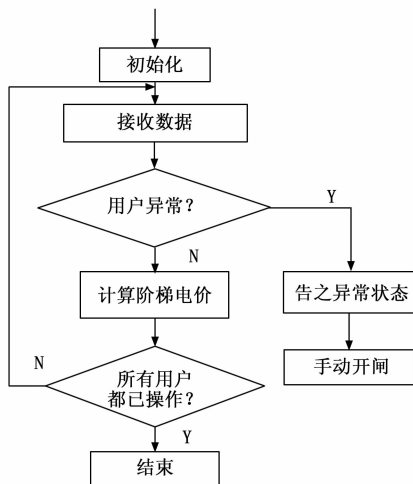


图 6 软件流程图

3.2 初始化

初始化模块功能是通过计算机串口的设置实现上位机和用户终端的互联互通。初始化模块主要包含开启串口, 设定波特率, 建立串行通道等过程。

程序中直接使用 SerialPort 控件控制串口。SerialPort 控件的本质是 .NET 中用于微机接口通信的 System. IO.

Ports. SerialPort 类。根据 SerialPort 类提供的操作步骤, 能够完成串口的信息收发过程, 本设计中即从特定的串口接收到数据。

3.3 接收与异常判断

因为小区用户数据通常较小, 如果以大型数据库的形式保存数据会增加软件成本和使用难度, 所以采用比较简单的解决方案, 将用户功率数据以 EXCEL 文件电子表格 XLS 的格式保存在上位 PC 机上, 程序和 XLS 数据表格之间的连接由活动数据对象 (ADO, activeX data objects) 实现^[15]。

ADO 由一组用于访问数据源的组件对象模型对象组成。ADO 在编程语言 Visual C++ 和用户功率数据库之间提供了中间件层^[19]。ADO 允许开发人员编写访问数据的程序, 而不知道数据库是如何实现的, 这样的方式大大减小了开发的成本和缩短了开发的时间。

连接电子表格数据库后, 就可以对其进行异常判断操作。异常判断有很多算法, 此处采用传统算法: 将一定时间单位 (24 小时) 的总功率与上一时间单位的总功率相比较, 如果增幅在 200% 以上则弹出预警窗口, 提示用电消耗异常。

3.4 阶梯电价计算

阶梯电价计算和以往的统一电价不同, 它按照总用电量的不同区间分别计算, 计算依据是阶梯电价表。

阶梯电价表通过查询各省市的阶梯电价定价规范文件建立。以江苏省为例, 可以根据《江苏省发展改革委关于完善居民阶梯电价有关问题的通知, 苏发改价格发〔2021〕106 号》文件建立映射阶梯电价简表如表 1 所示。

表 1 江苏省居民阶梯电价计算简表

能耗区间	电价/(元/度)
[0, 200]	0.52
(200, 400)	0.57
[400, +∞]	0.82

软件将阶梯电价对应关系描述成计算机条件语句便于计算, 关键代码如下:

```

int nh;
float dj;
// 定义阶梯电价、定义区间
scanf("%d", &nh);
if(nh <= 200 && nh >= 0)
    dj = 0.52 * nh;
else if(nh > 200 && nh < 400)
    dj = 0.52 * 200 + 0.57 * (nh - 200);
else dj = 0.52 * 200 + 0.57 * 199 + 0.82 * (nh - 399);
// 计算电价结果
  
```

3.5 用户控制

对于用电异常的用户, 软件可以通过发送命令对其进行开闸控制, 如解除异常则进行合闸操作^[21]。用户控制通过将事先约定的命令传输给测控主机, 测控主机 P1.7 口输出动作型号, 带动继电器以控制开闸和合闸动作。在实际

使用中，为了快速达到开闸合闸目的，也可以将继电器和空气开关整体更换为交流断路器。

例：发送开闸/关闸命令只需添加如下关键语句到发送命令按钮的单击事件：

```
UpdateData(TRUE); //读取开闸命令
m_ctrlComm.SetOutput(ColeVariant(m_strTXData)); //发送数据
}
UpdateData(Flase); //读取开闸命令
m_ctrlComm.SetOutput(ColeVariant(m_strTXData)); //发送数据
}
```

4 工程测试与分析

4.1 测试方法

工程实现 2 节中的硬件如图 7、开发 3 节所述软件图 8，构成成套系统后连续对某小区用户用电情况进行测控。

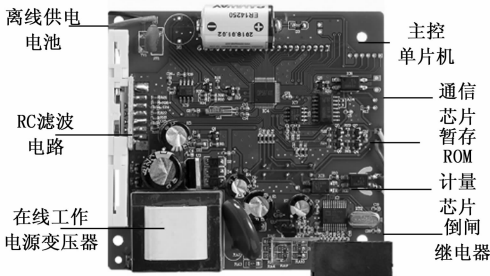


图 7 硬件实物图

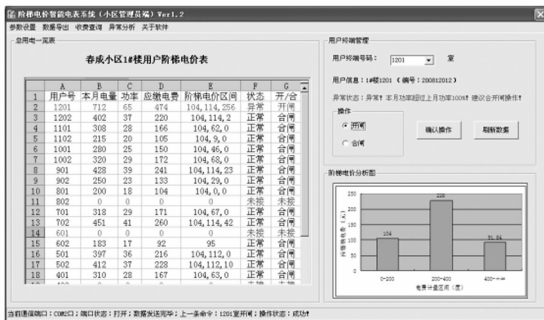


图 8 上位 PC 机软件界面

硬件测试采用静态调试和动态调试相结合的方式^[22]。静态调试是在图 7 电路板加入固定的电源和基本电平信号的条件，用万用表测出电路中各点的电位，同设计时候的理论估算值进行比较，判断电路板工作状态是否符合设计要求。动态调试是将系统接入小区，在实际工况中检测系统的功能是否达标。

软件测试采用灰盒综合测试法，它是一种将“黑盒”测试与“白盒”测试相结合的方法^[23]。具体方法是将小区管理员终端与硬件系统联试联调，检测基于程序运行时的外部表现，同时对小区管理员终端程序设置断点，读取断点的内部逻辑结构和数据^[24]，检测执行程序并采集路径执行信息、检测 RS232 串口等外部用户接口数据，最后确定软件是否运行正常，特别是软件在特殊和极端工况下运行

是否正常。

4.2 结果与分析

测控结果表明：(1) 基于电力载波通信的智能小区抄表系统工作正常，能够测量出用户的瞬时功率并传输至小区管理员处，实现电力计量等基本功能。(2) 基于电力载波通信的智能小区抄表系统用户端硬件使用正常、功率低，约为 1 kW/月，测量误差低于±0.1%，符合《GBT 50063-2017 电力装置电测量仪表装置设计规范》国家标准。(3) 测试中模拟了三种特殊工况：系统出现电磁干扰、电力线路出现浪涌和尖峰、用户端负荷出现突变。在系统出现电磁干扰，干扰强度不大的时候，系统能够正常工作，当干扰出现在功率计量模块旁且较大的时候，系统数据采集和传输均出现误差。电力线路出现浪涌和尖峰时，浪涌和尖峰未超过正常值的 50%，系统运行正常。用户端负荷出现突变时，系统运行正常，当用户端电流超过功率计额定电流 50A 的 20%时，系统仍稳定工作。(4) 上位 PC 机端软件不仅能够计算阶梯电价，而且还能够对超限额的用户实施远程关闸操作，工程测试达到预期目标。(5) 因为 PLC 通信是将信号调制后叠加在电力线路中传输，调制后的信号频率调制后的信号工作频率是 900 kHz，这样的高频信号不能通过电力变压器。因为电力变压器的铁芯是硅钢片，900 kHz 叠加到 50 Hz 上的 AC 上，高频信号很快会被覆盖掉。在传输路径中不能有变压器设备，否则传输的调制信号在变压器的电磁转换过程中会被彻底破坏，导致本系统系统不能正常工作。

5 结束语

基于电力载波通信的智能小区抄表系统设计方案真实有效，具有成本低廉、通用性好、实用性强的特点。因为在设计时考虑了大量抗干扰措施，所以系统在特殊工况下也能够稳定的工作。因为 PLC 的工作原理限制，基于电力载波通信的智能小区抄表系统只能应用在同一台变压器下的用户终端，不适合跨变压器的小区使用。

基于电力载波通信的智能小区抄表系统可以直接用于居民小区、学生宿舍等场合，也可以稍作改造后用于宾馆、公寓等其他一户一表的场合。

参考文献：

- [1] 白燕峰. 实施阶梯电价降低建筑能耗的措施分析 [J]. 绿色建筑, 2021, 13 (4): 82-85, 89.
- [2] 王阳阳, 闫淑娟. 智能抄表系统的研究及应用 [J]. 世界有色金属, 2021 (18): 231-232.
- [3] 姚俊杰, 张新晨. 基于超长距低功耗数据传输技术与无线通信技术的智能水表系统 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (5): 282-285.
- [4] 解亚军, 李建荣, 王慧芳. ZigBee 无线通讯技术在 AMR 系统中的应用 [J]. 电力学报, 2009, 24 (5): 434-436.
- [5] 叶加星, 孙和泰, 李 军, 等. 低成本宽量程低功耗无线 AMR 系统研究 [J]. 中国计量, 2017 (3): 68-69.

(下转第 278 页)