

基于 HPLC 的电能终端集中抄写系统设计

韦映珍 李恒蓁 李佳欣 班琳杰 黄虹景

桂林电子科技大学机电工程学院，广西桂林，541004；

摘要：随着能源结构的不断优化，电力系统面临着智能化、高效化和绿色化的转型需求。传统电能终端集中抄写系统多采用电力线载波通信（power line communication, PLC），具有数据传输速率低、容量小的特点，不仅影响了电网的实时监控和故障快速响应，还制约了分布式能源的有效接入。因此，本文提出基于高速电力线载波通信（high-speed power line carrier communication, HPLC）的电能终端集中抄写系统。微控制器 STM32 作为该系统从机单元，承担电力参数的采集与数据处理工作，采用 HPLC 通信，搭建起主机与从机之间的数据传输通道，支持远程抄表、实时监控与系统控制。

关键词：电能计量；高速电力线载波通信；能量监控；STM32。

DOI: 10.69979/3060-8767.25.12.015

引言

随着电网数字化建设不断提速，用户侧电量数据呈爆发式增长。而传统低压集中抄写系统采用 PLC 技术，因带宽窄、实时性差、容量小，已难以支撑电力系统的精细化管理和分布式能源的有效接入。相比之下，HPLC 具有低延时、大容量的通信优势^[1]。因此，本文设计了一种基于 HPLC 的电能终端集中抄写系统，采用模块化设计，实时测量电压、电流、功率及功率因数等电力参数，并进行远程实时信息交互。

1 系统结构

本设计主要由电源模块、电力参数测量模块、微控制器、显示模块、通信模块、保护模块六部分构成，系统整体框架图如图 1 所示。

系统采用微控制器 STM32F407ZGT6 作为控制核心，电力参数测量模块则采用 IM1281B 计量装置，测量用电设备的电力参数将其传输至微控制器。微控制器 STM32F407ZGT6 接收电力参数信息，将其进行数据处理并将其传输至主机，同时接受主机的指令。其中，从机与主机之间采用 HPLC 通信技术进行双向通信。

2 硬件电路设计

根据图 1 系统整体框架图，各模块硬件电路原理及功能如下。

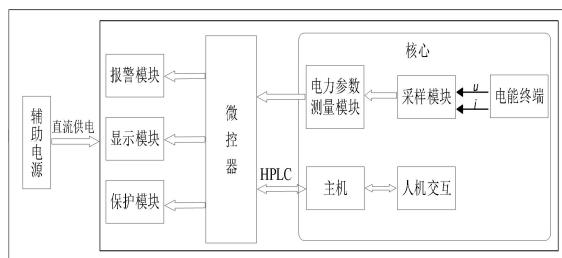


图 1 系统整体框架图

2.1 电源模块

电源模块在市电供电场景下，为微控制器、电力参数测量模块及高速电力载波模块提供稳定供电。通过变压器将 220 V 的市电转换成 18 V 的交流电，经整流滤波后得到直流电 V_{DC} 。同步降压转换芯片 TPS54202 将直流电 V_{DC} 降压至 5 V，给电力参数测量模块和保护电路供电。线性稳压芯片 ME6211 进一步降压至 3.3 V，给高速电力载波模块、微控制器供电。分级完成给不同电路模块所需要的电源电压供电要求，电源模块电路如图 2 所示。

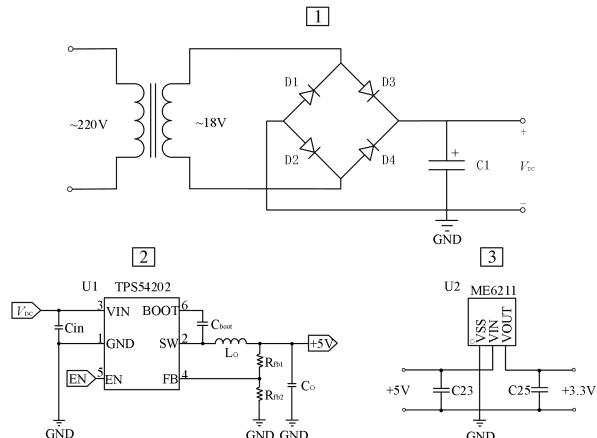


图 2 电源模块电路图

2.2 电压电流采样及电力参数测量模块

电压电流采样及电力参数测量模块是电能终端集中抄写系统实现精准计量的核心单元，本设计采用一款集成的 IM1281B 单相交流电能计量装置，减轻了控制器的运算负担，加快了系统反应速度。该计量装置具备多参数采集能力，拥有较高计量精度，可满足对电力参数的采集需求。

该计量装置采用电压电流全隔离采样架构，内置 16 位 ADC 与数字滤波单元，最小电能变量 0.001 kWh，可

精准采集电压、电流、有功功率、功率因数等参数，并通过电能掉电保护功能确保数据不丢失^[2]。

2.3 高速电力载波通信

电力线载波通信技术依托现有配电网作为传输媒介，无需额外搭建专用通信线路，能充分利用电力线网络的广覆盖优势^[3]，具有部署成本低、建设周期短、适配场景广的优势，是实现大容量、低延迟数据传输的关键技术。

HPLC 是在常规 PLC 技术基础上，针对通信速率低、组网规模小、抗干扰能力弱、功能扩展性不足等常规 PLC 技术短板发展而来的进阶技术。由于采用正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术，HPLC 有效避免了符号间干扰与子载波间干扰^[1]，具有低延时、大容量、稳定性强的通信优势，H PLC 和 PLC 的主要区别见表 1。因此，本文选用 HPLC 作为通信媒介。

表 1 HPLC 和 PLC 主要特征表

通信类型	调制方式	通信速率	抗干扰能力
PLC	DBPSK、FSK	<2 Mbps	较强
HPLC	OFDM	>2 Mbps	强

本设计采用一款集成的 JST-HPLC-NC 高速电力线载波模块。该模块内部集成 32 位处理器，采用 OFDM 技术，在复杂电力线环境下仍能保持高抗干扰能力与通信可靠性，支持 200 个节点同时组网，实现多节点同时通信，且具备 15 级自动中继功能，满足本设计的通信要求。

2.4 人机互动模块

人机交互模块由四个按键与一块 OLED 显示屏搭建。其中，四个按键可以实现上选、下选、确认、返回、加减功能^[4]，可完成报警阈值设置、数据查询、系统控制等操作。OLED 显示屏可实时呈现电力参数、通信状态及系统信息，外围电路仅需 4 条 SPI 通信线驱动，接线简洁，为现场调试提供直观交互界面。

3 软件设计

软件设计的主要对象为 STM32F407ZGT6 处理器，该芯片具有 32 位 Cortex-M4 内核，主频 168 MHz^[5]，满足实时数据处理需求。系统程序设计主要由电力参数读取程序模块、数据处理程序模块、双向通信程序模块、人机交互程序模块这四部分组成，从机程序流程图如图 3 所示。

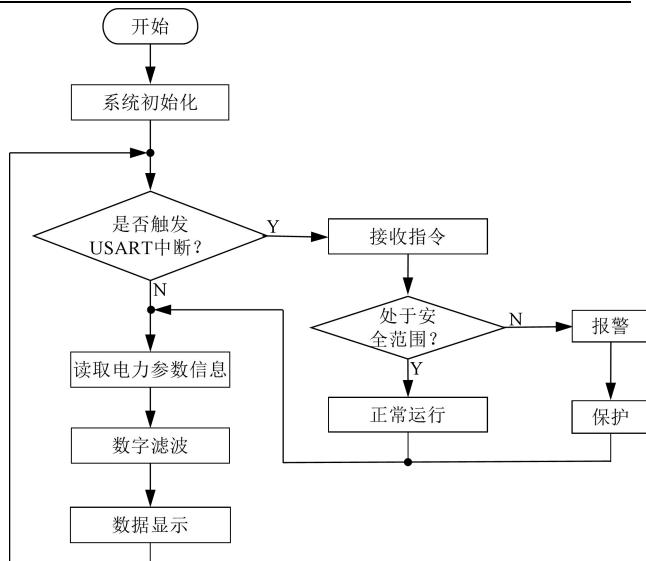


图 3 从机程序流程图

微控器 STM32F407ZGT6 作为数据处理核心，负责电力参数的读取和处理。微控器使用 USART 通信协议与 IM1281B 计量装置进行通信，读取电压、电流、功率、功率因数等电力参数信息，随后对电压、电流有效值进行算术平均数字滤波，算术平均数字滤波算法如公式(1)所示。通过上述过程，微控器完成了电力参数读取程序模块与数据处理模块的核心功能。

$$Y(n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

式中， $Y(n)$ 为滤波后的值， n 为采样点数， X_i 为第 i 次采样值。

微控器 STM32F407ZGT6 作为从机，将数据传输到主机，并接收来自主机的指令，实现从机与主机之间的信息交互。其中，USART 通信每次只能传输 8 个字节，防止因干扰导致的数据传输错误，把读取到的电力参数值分为高位中位低位并存入数组发送^[4]；同时，为了防干扰导致传输错误的数据，通信程序设置起始符、结束符检测。综上，微控器完成了从机与主机的双向通信。

为便于用户监测电力参数及配置过流、过压保护阈值，设计一种文字型多级的菜单系统。首先，需定义一个专用的菜单结构体，该结构体包含两个核心要素：一是用于记录按键触发后产生的索引号变量，二是指向需执行的显示功能的函数指针。按照各个显示界面之间的逻辑联系，构建一个由该结构体组成的数组作为索引表。这个索引表会明确对应按键操作后应跳转至的显示函数索引号，以及当前界面所关联的显示函数指针，通过这种方式实现菜单与显示界面的灵活切换^[4]。最终，人机互动框图如图 4 所示，因此，主机完成了人机互动模块的设计。

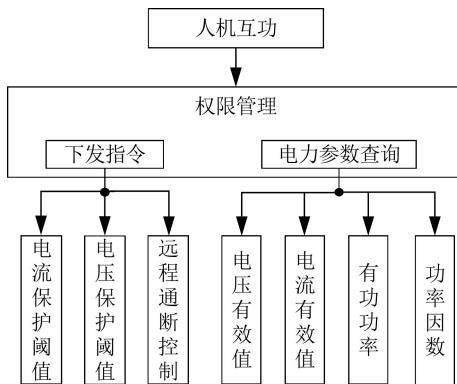


图 4 人机互动框图

4 实验结果

4.1 计量装置测试

对负载进行数据测量，本系统的计量装置的电压量程为0~250V，电流量程为0~2A，电压测量结果见表2，电压相对误差 E_v 计算如式(2)。电流测量结果见表3，电流相对误差 E_i 计算如式(3)，其中， Δ_u 为电压绝对误差， Δ_i 为电流绝对误差。

$$E_v = \frac{U_o - U}{U} \quad (2)$$

式中， U_o 为标准台表测量的电压， U 为本系统中的计量装置测量的电压。

$$E_i = \frac{I_o - I}{I} \quad (3)$$

式中， I_o 为标准台表测量的电流， I 为本系统中的计量装置测量的电流。

表 2 电压测量数据表

U_o / V	U / V	Δ_u	$E_v / \%$
255.4	255	0.4	0.10
230.9	231	0.1	0.04
221.9	222	0.1	0.05
205.6	206	0.4	0.19
187.3	187	0.3	0.16
132.3	132	0.3	0.23
99.2	99	0.2	0.20

表 3 电流测量数据表

I_o / A	I / A	Δ_i	$E_i / \%$
0.059	0.06	0.001	1.67
0.091	0.09	0.001	1.11
0.101	0.10	0.001	1.00
0.966	0.96	0.006	0.63
1.148	1.15	0.002	0.17
1.651	1.64	0.011	0.67
1.952	1.94	0.012	0.62

基于表格数据分析，电压的相对误差最大为0.23%，全量称内最大绝对误差为0.4，则该装置的电压相对百分误差为

$$\delta_u = \frac{0.4}{250} \times 100\% = 0.16\%$$

电流的相对误差最大为1.67%，全量称内最大绝对误差为0.012，则该装置的电压相对百分误差为

$$\delta_i = \frac{0.012}{2} \times 100\% = 0.6\%$$

由于国家规定的精度等级为0.005、0.02、0.1、0.2、0.4、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0等^[4]，所以电压精度等级为0.2级，电流精度等级为1级，达到了通常计量装置的精度范围^[6]，符合设计要求。

4.2 HPLC 通信模块测试

主机成功接收从机发送到电力参数，实验证明HPLC通信成功，接收到的详细数据见表4，表中， P_f 为功率因数， P 为功率。

表 4 主机接收的电力参数表

序号	U / V	I / A	P_f	P / W
1	188.7	0.07	0.6326	8.350
2	225.7	0.06	0.6364	8.700
3	239.1	0.06	0.6104	8.689

5 结论

本文介绍了该基于HPLC的电能终端集中抄写系统的设计方案和工作原理。经过带负载多次测试，该系统的电压精度等级为0.2级，电流精度等级为1级，可查看功率、功率因数、电能等电力信息。通过应用HPLC通信，该系统具有远程监控、远程通断、人机互动等功能，实现了主机和从机之间的信息交互。

参考文献

- [1] 林佳祥. 基于OFDM的宽带电力载波通信系统关键技术研究[D]. 浙江大学, 2021.
- [2] 吴佳桓, 刘晨阳, 陈天森, 等. 基于物联网的电动自行车充电过程监测系统[J]. 电子测量技术, 2023, 46(24): 127-132.
- [3] 刘晓胜, 胡永军, 张胜友. 低压配电网电力线载波通信与新技术[J]. 电气应用, 2006, (02): 5-7.
- [4] 潘梦婷, 何少佳, 朱炜义, 等. 具有双向功能的微电网电能计量装置[J]. 大众科技, 2021, 23(09): 20-22+34.
- [5] 田野. STM32F407 和 FreeRTOS 的嵌入式测试系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2023, 23(11): 54-58.
- [6] 严文亮. 基于模块化的集中式多用户智能电表系统设计与实现[D]. 杭州电子科技大学, 2023.

项目编号：S202510595197；项目名称：基于HPLC的低延迟大容量电能终端集抄系统设计；项目类别：创新训练项目；级别：自治区级。