# 低功耗MCU电能测量系统及其采样电路与高精度算法研究

郭继威,张珊珊,鹿　璐,付希林,董　静

(中电装备山东电子有限公司,济南 250104)

**摘　要:** 智能电表与边缘能耗监测终端在实际运行中需同时满足低功耗与高精度两项要求,因此设计一套基于低功耗MCU的电能测量系统。该系统由电力信号采样电路与高精度电能测量算法两部分构成:采样电路采用分压与电流互感结构完成电压、电流信号采样,并搭配低噪声前端调理电路与高分辨率ADC获取对应信号;测量算法引入滑动窗口滤波、数字延时补偿与相位修正等方法,以增强测量过程的稳定性并提升整体抗干扰能力。

**关键词:** 低功耗MCU;电能测量;信号采样;误差补偿

**中图分类号:** TM933　　**文献标识码:** A

# Low-power MCU energy measurement system and research on sampling circuit and high-precision algorithm

GUO Jiwei, ZHANG Shanshan, LU Lu, FU Xilin, DONG Jing

(CET Shandong Electronics Co., Ltd., Jinan 250104, China)

**Abstract:** Smart meters and edge energy consumption monitoring terminals require both low power consumption and high measurement accuracy in practical operation; therefore, a power measurement system based on a low-power MCU is designed. The system consists of two parts: a power signal sampling circuit and a high-precision energy measurement algorithm. The sampling circuit employs a voltage divider and current transformer structure to sample voltage and current signals, combined with a low-noise front-end conditioning circuit and a high-resolution ADC to acquire the corresponding signals. The measurement algorithm incorporates techniques such as sliding window filtering, digital delay compensation, and phase correction to enhance measurement stability and improve overall anti-interference capability.

**Key words:** low-power MCU, energy metering, signal sampling, error compensation

## 1　引言

物联网和智能电网规模的持续扩大,推动了分布式电能监测终端部署数量的快速增长,也对电能测量系统的性能提出了更高要求。其中,低功耗需求主要面向长期运行、电池供电等应用场景,而测量精度需求则服务于电能测量与能效分析等功能目标。现有常规电能测量方案多基于专用计量芯片实现,存在可调整空间有限、后期算法新增或修改受限等问题。相比之下,基于低功耗MCU的电能测量方案具备支持自定义编程、采购成本较低、易于与其他功能模块集成等优势,近年来逐渐成为相关领域的研究热点。然而,该类方案在实际应用中仍面临诸多挑战,包括采样过程引入噪声、相位计算偏差、ADC非线性特性以及低功耗运行模式下测量精度下降等问题[1]。因此,面向低功耗与高精度双重需求,本文设计一套基于低功耗MCU的电能测量系统,重点研究其中的电力信号采样电路与高精度电能测量算法,以提升系统在低功耗运行下的测量精度与稳定性。

## 2　系统总体设计

本文系统以低功耗MCU为核心,由电力信号采样电路与高精度电能测量算法两部分构成,其中算法运行于MCU之上,并采用低功耗设计策略贯穿系统运行全过程。为满足长期运行与电池供电场景的低功耗需求,系统从MCU调度、动态采样及外设管理等方面降低能耗。

(1)电力信号采样电路分为电压和电流两类,前者采用高阻值分压与隔离设计,将高压交流信号幅值降至ADC安全采集区间;后者可依据实际应用场景选用电流互感器(CT)或分流电阻方案,以实现负载电流的精确转换。采样信号随后进入信号调理电路,经运算放大器完

成滤波、放大和直流偏置处理，使交流信号整体电平落入 MCU ADC 输入范围，从而保证采样过程的完整性与稳定性[2]。

（2）高精度电能测量算法运行于低功耗 MCU 之上，MCU 负责电压、电流信号的同步采样和实时运算，并依托相应算法计算有效值、功率、电能等关键参数。硬件选型阶段，系统优先选用内置 12—16 位高分辨率 ADC 或支持外接高精度 ADC 的低功耗 MCU。此类 MCU 支持 DMA 模式下的高速连续采样，可显著降低 CPU 负载；具备 Sleep/Stop 等低功耗模式，可有效抑制待机功耗；集成 DSP 指令集或 FPU 运算单元，从而提升复杂电能计算的实时性与运算效率[3]。

## 3　电力信号采样电路设计

### 3.1　电压采样电路

电压采样电路通过高阻值分压网络对市电交流电压进行比例衰减，将其幅值降至 MCU ADC 的安全输入范围内。同时，分压链路的后级设置 RC 低通滤波器，以抑制高频噪声和电磁干扰，从而增强采样信号的稳定性与抗干扰能力。为进一步提升信号质量，可在 ADC 输入端口前加装运算放大器缓冲级。该结构可提升输入阻抗，减小负载效应，并改善信号的驱动能力。最终的电压采样输出符合线性比例关系：

$$V_{out}=V_{in}\cdot\frac{R_2}{R_1+R_2} \tag{1}$$

其中，$R_1$，$R_2$为分压电阻参数。

### 3.2　电流采样电路

电流采样电路需结合具体使用场景，选择 CT 或分流电阻两类方案：CT 方案适用于交流大电流测量场景，电气隔离性能较好，安全性能更突出；分流电阻方案则适用于低压或小电流的高精度测量需求，且结构简单，线性度更稳定[4]。CT 输出的信号通常需先接入负载电阻，将电流信号转换为电压信号，再送入运算放大器完成放大和滤波处理，以适配 ADC 的输入范围，从而提高最终的测量精度。

### 3.3　偏置与信号调理电路

MCU 内部 ADC 普遍采用单极性输入模式，输入范围为 0~3.3 V 或 0~5 V，交流信号难以直接完整采样，因此需设计偏置与信号调理电路，将交流波形整体平移到中点电压附近，对应的表达式为：

$$V_{adc}=V_{signal}+V_{bias} \tag{2}$$

通常选用$V_{bias}$=2.5$V$或$V_{bias}$=1.65 V作为基准电压，可使正负半周信号均落在 ADC 有效采样范围内，避免削顶失真，并保障波形完整性。

## 4　高精度电能测量算法设计

设电压和电流采样序列分别为$v(n)$，$i(n)$，二者$n$=1，2，…，$N$经同步采样获得离散数据序列。对照瞬时功率定义，可推得$p(n)=v(n)\cdot i(n)$，之后采用时间平均法计算有功功率，具体为$P=\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}p(n)$，从而稳定估算周期性交流信号的功率。计算有效值时，电压与电流的 RMS 对应表达式为$V_{rms}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum v(n)^2}$，$I_{rms}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum i(n)^2}$。为减少采样噪声对结果的干扰，本文引入一阶滑动窗口滤波模型$x'(n)=\alpha x(n)+(1-\alpha)x(n-1)$，以优化数据平滑性和抗干扰能力。针对 CT 采样延迟引发的相位偏差问题，可选用数字延时补偿方法$i'(n)=i(n+\Delta t)$，也可引入相位修正因子完成功率校正$P_{corrected}=P\cdot\cos(\theta_{error})$，从而提高感性负载条件下的测量精度[5]。功率因数定义为有功功率与视在功率的比值，具体为$PF=\frac{P}{V_{rms}\cdot I_{rms}}$，可用于表征负载特性和能效水平。将上述算法融合处理后，可在维持低计算复杂度的基础上达到较好的测量精度与系统稳定性。

## 5　低功耗设计与实现

除了采样电路与测量算法，低功耗设计是保障系统长期稳定运行的关键。本节从 MCU 调度、动态采样及外设管理 3 个方面介绍系统的低功耗设计与实现。

### 5.1　MCU 低功耗调度

在低功耗 MCU 电能测量系统中，MCU 的能耗优化效果直接影响整个系统的运行周期和稳定性。该系统采用“ADC 定时采样+DMA 传输+CPU 间歇处理”的调度架构，使数据采集与计算两个环节解耦运行。ADC 由定时器触发周期性采样，采样数据通过 DMA 自动转存至内存缓冲区，无需 CPU 频繁介入，从而减少中断产生的资源开销。当缓冲区数据量达到设定阈值时，MCU 从低功耗模式唤醒，完成电压、电流及功率的计算，处理完毕后立即进入 STOP 模式，等待下一次采样周期启动。该系统平均功耗可表示为：

$$P_{avg}=P_{active}\cdot D+P_{sleep}\cdot(1-D) \tag{3}$$

其中，$D$为占空比。

### 5.2　动态采样策略

为优化系统在不同负载状态下的测量效率与精度，本文引入结合负载变化特征的动态采样策略。当系统监测到负载稳定时，采用 1 kHz 低频采样以降低功耗；一旦识别到电流或功率快速波动，则自动切换至 4 kHz 高频采样，以捕获瞬态变化信息。滑动差分模型可用于判断负载变化：

$$\Delta I=|I(n)-I(n-1)| \tag{4}$$

当参数超出设定阈值时，触发采样频率提升。式（4）既可保障动态响应能力，又能降低平均采样负担，构建起“按需采样”的能耗优化机制，使系统在低功耗与高

精度之间维持动态平衡。

### 5.3 外设关闭策略

当系统处于非工作或低活动状态时，可借助外设级关断策略进一步压低功耗。操作内容分为两类：关闭ADC时钟、切断运放供电。运放的供电通常由MOS管或电源管理芯片控制，可实现硬件级断电，避免静态功耗累积。系统功耗模型可表示为：

$$P_{total}=P_{MCU}+P_{ADC}+P_{opamp}+P_{comm} \quad (5)$$

一旦系统进入休眠状态，令$P_{ADC}=P_{opamp}=P_{comm}\approx 0$，仅保留MCU待机功耗，整体能耗将显著降低。该方案与低功耗调度机制配合运行，可实现从“软件调度”到“硬件断电”的多层次节能优化，适用于长期运行的边缘电能监测场景。

## 6 实验与结果分析

本文搭建的实验平台采用低功耗MCU与开关电源供电方案，ADC分辨率为12位，采样频率设为2 kHz。测试负载包含阻性与感性混合负载，用于验证复杂工况下系统的测量性能与运行稳定性。实验过程中，同步采集并计算电压、电流及有功功率等参数，获得的对比数据如下：电压标准值220 V，测量值218.6 V，误差0.64%；电流标准值2.00 A，测量值1.98 A，误差1.00%；有功功率标准值440 W，测量值433 W，误差1.59%。测试结果表明，系统整体测量精度较高，运行稳定，能够满足工程应用中的电参数监测需求。

对该系统运行情况进一步分析可知，采样电路的分压与调理环节线性响应较好，可保障信号还原精度；算法层面引入滑动窗口滤波后，数据波动幅度有所缩小，系统运行稳定性得到提升；针对感性负载带来的相位偏差问题，数字延时补偿可降低功率计算误差；MCU低功耗运行模式结合DMA采样策略，可在保障实时性的前提下降低平均功耗，实现精度与能耗的较优平衡。

## 7 结束语

本文以低功耗MCU电能测量系统为研究对象，构建了同时覆盖电力信号采样电路与高精度测量算法的完整实现方案。硬件设计部分对电压与电流采样结构及信号调理电路进行了优化，提升了信号采集过程的稳定性与抗干扰能力。算法设计部分引入滑动窗口滤波、数字延时补偿与相位修正3类方法，优化了测量精度与系统鲁棒性。多次测试数据显示，该系统接入阻性与感性混合负载时误差始终处于较低区间，符合工程应用的各项要求。此外，该系统结合DMA采样与低功耗调度策略，兼顾能耗控制与性能表现，具有较强的工程实用性。后续研究可进一步融合边缘计算与人工智能技术，实现负载识别、异常检测与能效优化分析等功能，推进电能测量系统向智能化与自适应方向发展。

**参考文献：**

[1] 于国辉.局部放电信号采样技术研究与电路实现[D].哈尔滨：哈尔滨理工大学，2023.

[2] 曹融，张敏，杜峰，等.使用MCU内置序列发生器控制的交流信号采样[J].计算机测量与控制，2020，28(5)：241-245.

[3] 彭小娟.IEC61850通信协议影响下的数字电能测量算法误差研究[D].北京：北京化工大学，2017.

[4] 王一婧.电能质量精密测量及分析算法与技术研究[D].北京：华北电力大学，2012.

[5] 吴杰康.高精度多功能电能表数字测量方法的理论与应用研究[D].杭州：浙江大学，2004.

**作者简介：**

郭继威(1997—)，本科，助理工程师，研究方向：电能表、电力测量技术。