



# 单相功率分析仪（B题）

上海交通大学  
姜国华 [shguohua@sjtu.edu.cn](mailto:shguohua@sjtu.edu.cn)

2024年9月21日 南京

# 主要内容

- 01 题目背景
- 02 基本要求分析
- 03 硬件方案
- 04 算法软件方案
- 05 总结

# 主要内容

- 01 题目背景
- 02 基本要求分析
- 03 硬件方案
- 04 算法软件方案
- 05 总结

# 常用电力功率测量仪表

**功率表**一种用于测量电路中功率的仪器。它可以测量电压、电流和功率因数，从而计算出有功功率、无功功率和视在功率。功率表广泛应用于电力工程、电子设备测试和能效评估等领域。

**功率分析仪**一种用于测量和监测电功率的仪器，能测量电压、电流、有功功率、无功功率和视在功率等电参数。它广泛应用于电力系统、工业生产和科研领域，用于电力系统的运行监控、设备性能测试和能源管理。

**电能质量分析仪**是一种用于监测和分析电力系统中电能质量的设备。它可以检测和记录电压、电流、频率、谐波、闪变、电压暂降和暂升等参数。



Cosφ表



单相功率表



Cosφ表



功率表



功率表

# 市场功率分析仪的主要功能

□电压和电流测量

□功率测量

有功功率

无功功率

视在功率

□功率因数

□谐波分析

□能量计量

□波形显示

□频率测量

□数据记录和存储



市售的一款功率分析仪

# 主要内容

- 01 题目背景
- 02 基本要求分析
- 03 硬件方案
- 04 算法软件方案
- 05 总结

# 任务

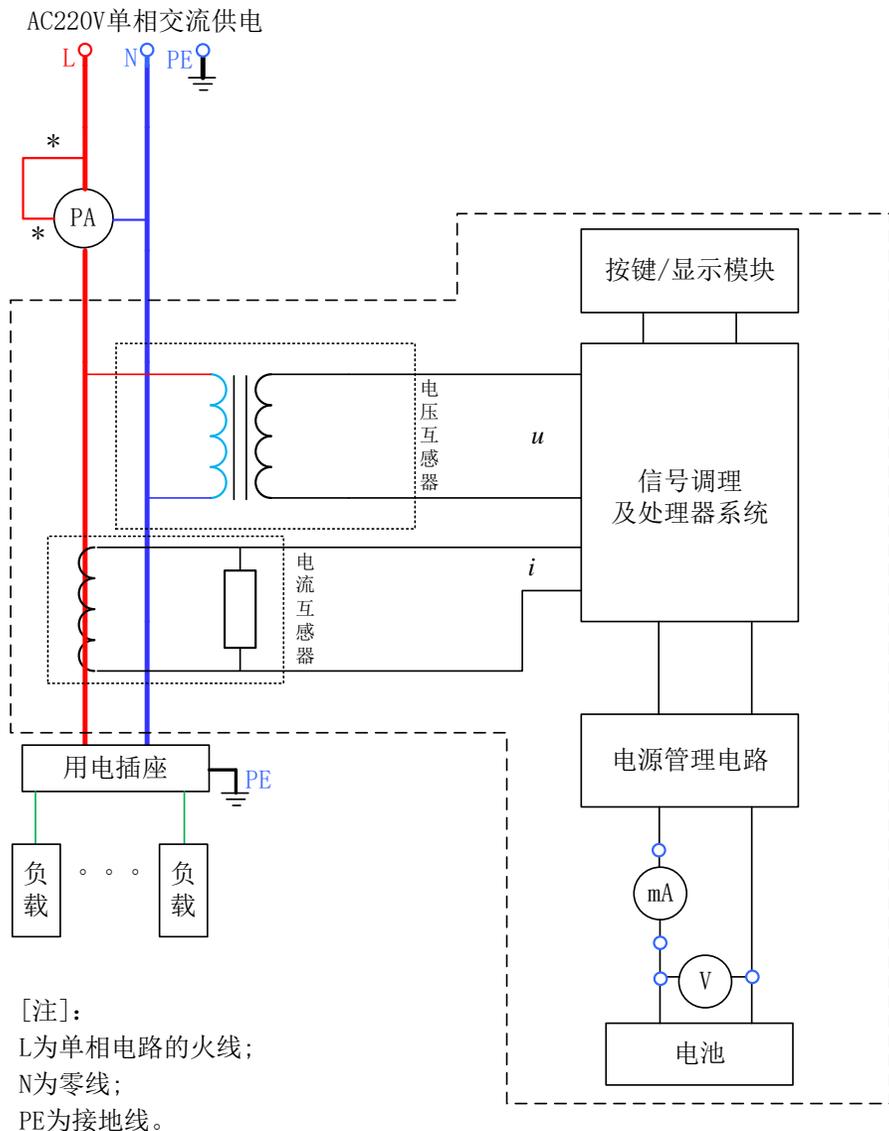
## 单相功率分析仪（B题）

### 【本科组/高职高专组】

#### 一 任务

基于TI公司的微控制器（MCU）芯片，设计并制作图1所示针对单相交流供电系统的单相功率分析仪，图中的PA为市售功率分析仪，用于标定和比对本自制系统；系统实现测量用电插座上的负载的电流、电压、有功功率、功率因数、电流谐波系数（*THD*）、电流基波及其2~10次谐波分量的有效值等参数，系统由电池供电。

# 系统框图和要求



## 二 要求

(1) 基于安全要求, 电流测量、电压测量采用电流互感器和电压互感器的传感方法或其他强弱电隔离的传感方式, 其中的交流电流互感能用原方多匝缠绕的方法提高其灵敏度, 并能在系统中设置匝数比, 电流量程为有效值4A, 电压量程为有效值250V。实现对用电插座上负载的电流和电压的测量, 与PA读数相比, 相对误差绝对值 $\leq 1\%$ 。(20分)

(2) 实现用电插座上负载的有功功率、功率因数测量, 与PA读数相比, 相对误差绝对值 $\leq 1\%$ 。(25分)

(3) 实现用电插座上负载的电流总谐波系数 ( $THD$ ) 和谐波电流的测量和显示, 谐波至少测量至10次, 与PA读数相比, 相对误差绝对值 $\leq 2\%$ 。(40分)

(4) 自制系统采用低功耗电路并进行功耗管理设计, 系统工作时 (非休眠状态) 系统功耗 $\leq 50\text{mW}$ 。(10分)

(5) 其他。(5分)

(6) 设计报告。(20分)

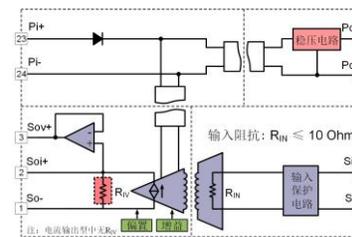
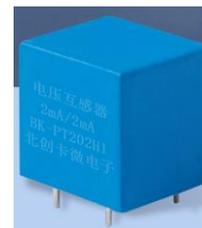
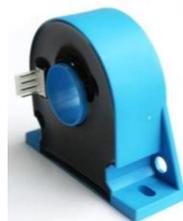
# 主要内容

- 01 题目背景
- 02 基本要求分析
- 03 硬件方案
- 04 算法软件方案
- 05 总结

# 硬件方案

## □ 信号传感及调理

- 电流、电压传感器
- 信号调理



电流互感器

霍尔电流传感器

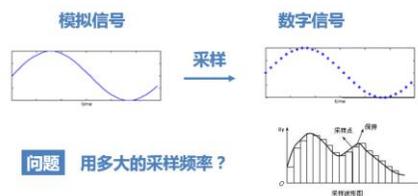
电压传感器

调理电路

## □ 微控制器

- 采样方式
- 定时器
- 数据采集
- 算法

### 模拟信号采样



## □ 人机界面

- 显示LCD
- 按键



## □ 供电电源

- 电池

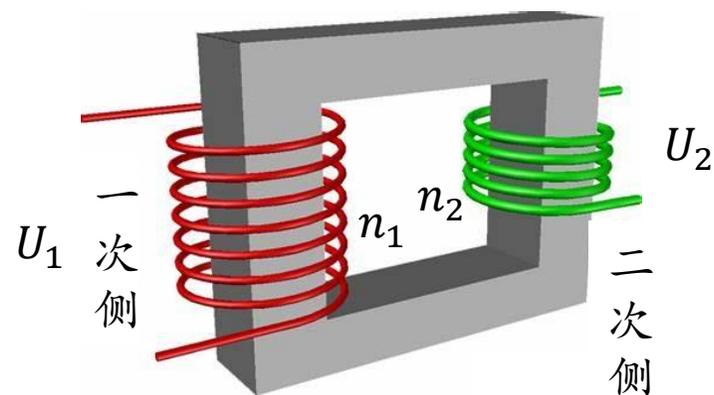


# 信号传感及调理

## □交流电压传感方式

- 分压式，非隔离式，常用于电能表
- 电阻分压
- 电容分压（相位变化）

## □电压互感器（Potential Transformer, 简称PT）

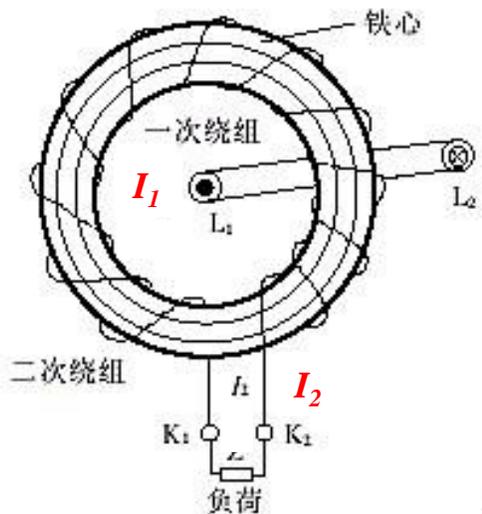


$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$
$$U_2 = \frac{n_2}{n_1} U_1$$

这里 $U_1$ 为一次侧电压， $U_2$ 为二次侧电压， $n_1$ 为变压器一次侧线圈匝数， $n_2$ 为变压器二次侧匝数

# 信号传感及调理

## □ 电流传感方式1 (Current Transformer, 简称CT)



$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$U_2 = I_2 \times R = \frac{n_1}{n_2} I_1 R = k I_1$$

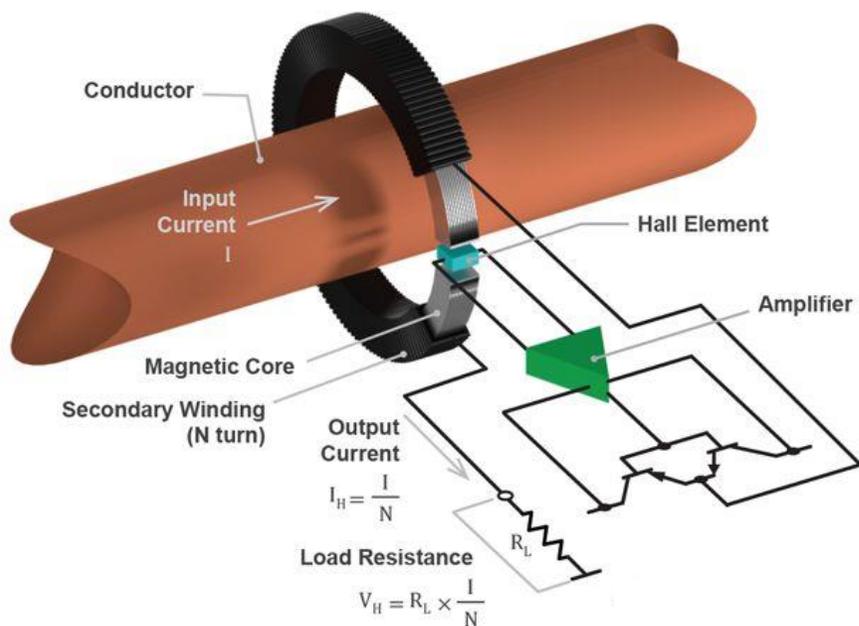
这里 $I_1$ 为一次电流（被测电流）， $I_2$ 为二次侧电流， $n_1$ 为变压器一次侧线圈匝数，可以为1，也可以多匝， $n_2$ 为变压器二次侧匝数； $k$ 为系数

电流互感器

# 信号传感及调理

## □ 电流传感方式2

### 霍尔电流传感器



两种工作方式：

1. 开环（直接）方式：电流通过导体产生的磁场直接作用于霍尔元件。霍尔元件感应到磁场后产生霍尔电压，该电压与通过导体的电流成正比。

特点：结构简单、成本较低、响应速度快、适用于对精度要求不高的场合；存在温度漂移和线性度误差。

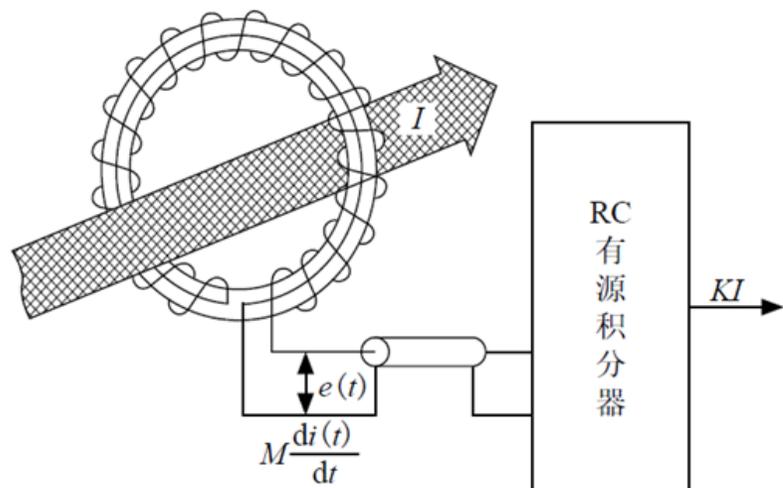
2. 闭环（补偿）方式：电流通过导体产生的磁场同样作用于霍尔元件。霍尔元件感应到磁场后产生霍尔电压，该电压用于驱动一个补偿线圈。补偿线圈产生一个与原磁场方向相反的磁场，以抵消原磁场。通过测量补偿电流，可以间接测量原电流。

特点：精度高，线性度好、温度稳定性好、响应速度较慢，结构复杂，成本较高；适用于对精度要求高的场合。

# 信号传感及调理

## □ 电流传感方式3

### 罗茨线圈 (Rogowski Coil)



- 1. 结构：**一根均匀缠绕的线圈组成，通常是一个柔性、闭合的环形结构；线圈没有铁芯，因此不会饱和，适合测量大电流。
- 2. 工作原理：**当交流电流通过导体时，会在其周围产生一个变化的磁场。罗茨线圈放置在该磁场中，根据法拉第电磁感应定律，变化的磁通量在线圈中感应出电动势（电压）。  
**感应电动势与通过导体的电流变化率成正比。**
- 3. 信号处理：**需要对输出信号进行积分，以得到与原电流成正比的信号
- 4. 特点：**线性度好，适合测量快速变化的电流。  
广泛应用于电力系统、电子设备和工业控制中，用于测量交流电流，尤其是在需要高频响应和大电流测量的场合。

# 信号传感及调理

## □ 电流传感方式

### ➤ 电阻（接触式）

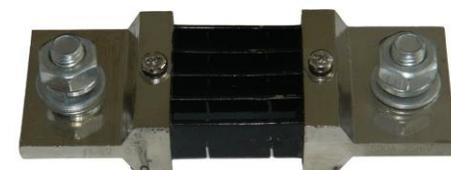
- 小电阻
- 康铜丝
- 分流器



取样电阻



康铜丝



分流器

# 信号传感及调理

## □ 信号调理

### ➤ 信号放大

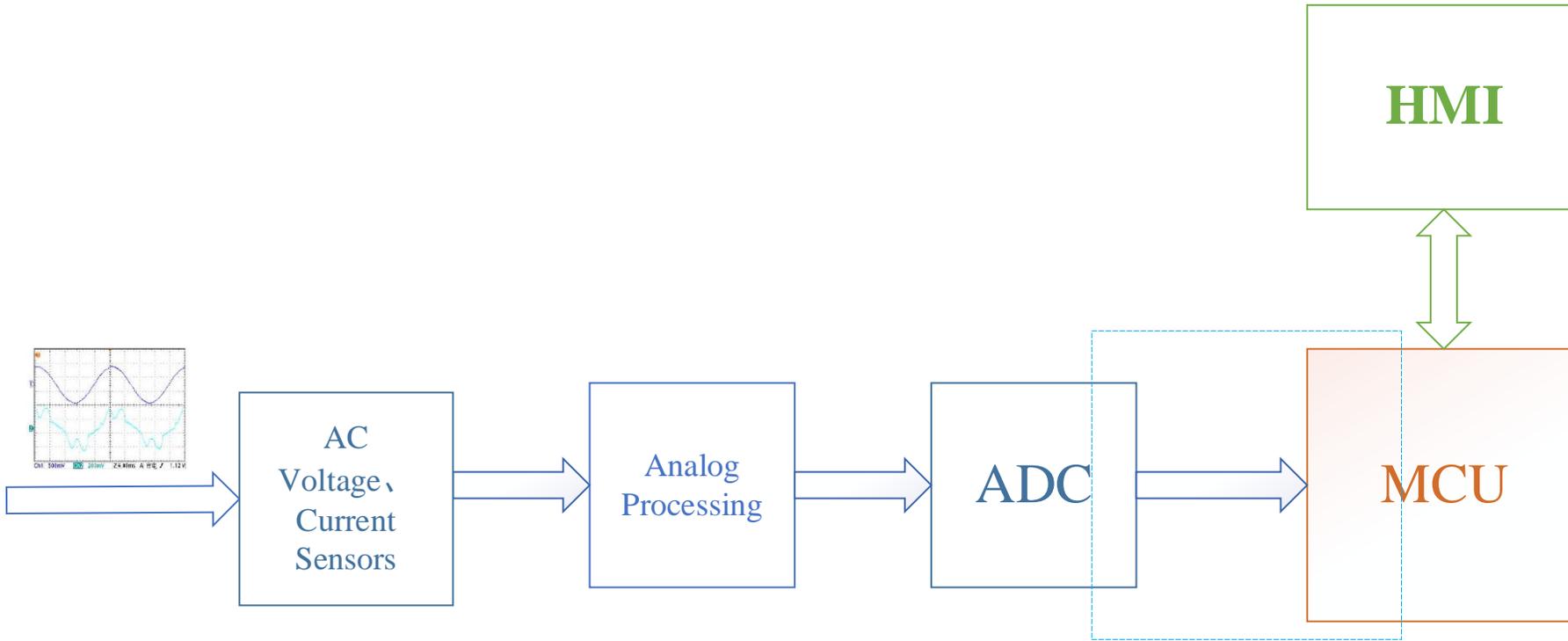
### ➤ 直流偏移

- ADC 输入范围, 0-3V左右

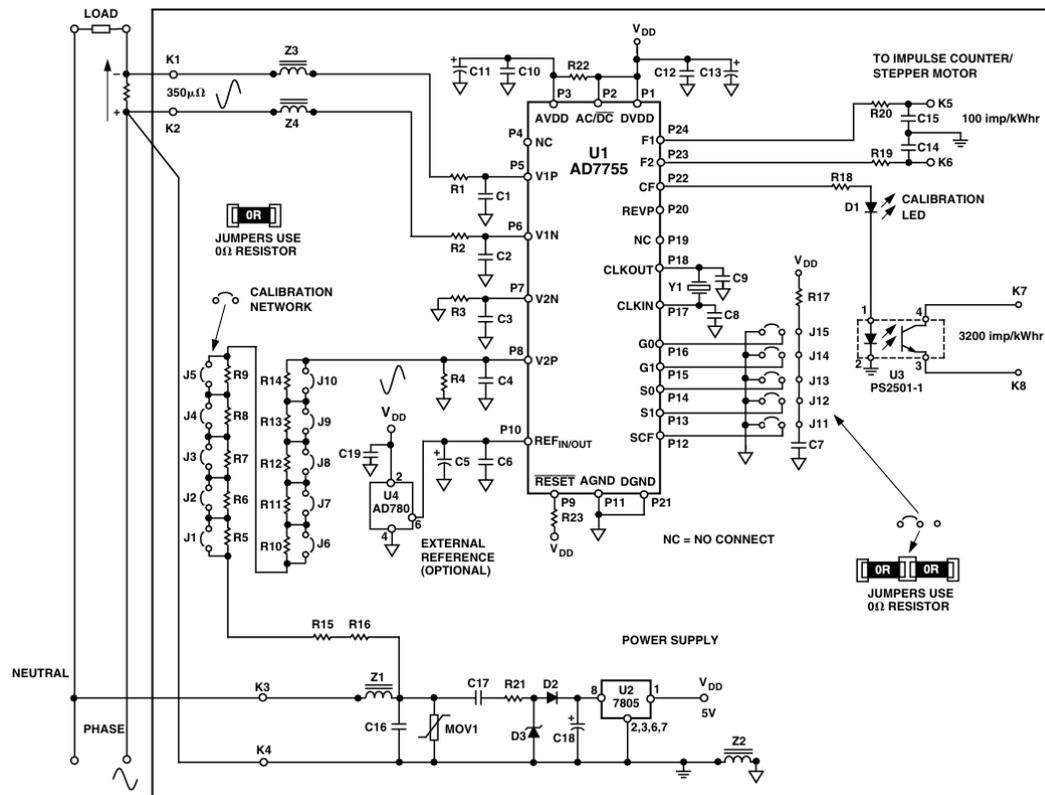
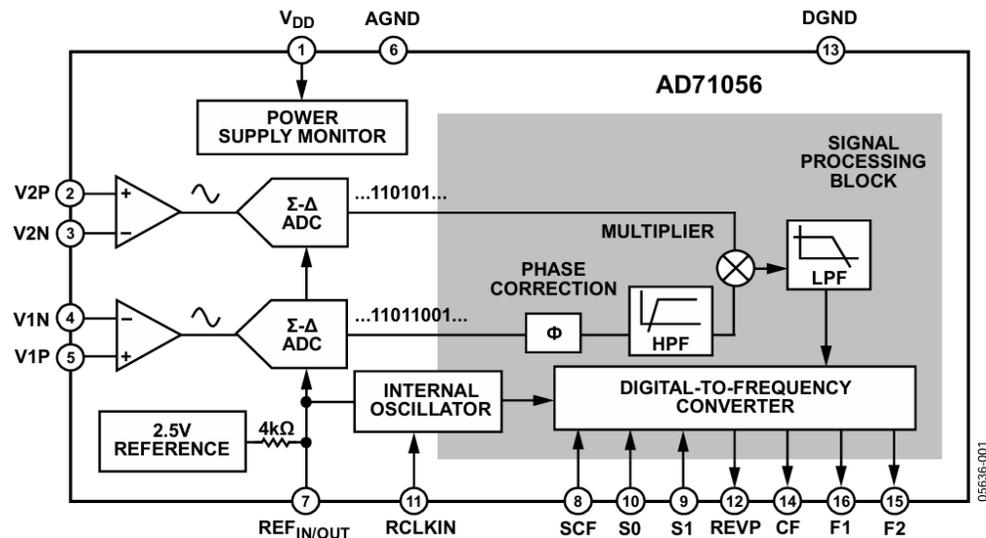
- 单极性

### ➤ 单电源电路设计

# 功率分析仪实现方案（推荐方案）



# 电能表芯片和电表方案 (缺THD测量)



采用电表方案，可以测得电压电流、功率、功率因数等值，但一般无法测量THD

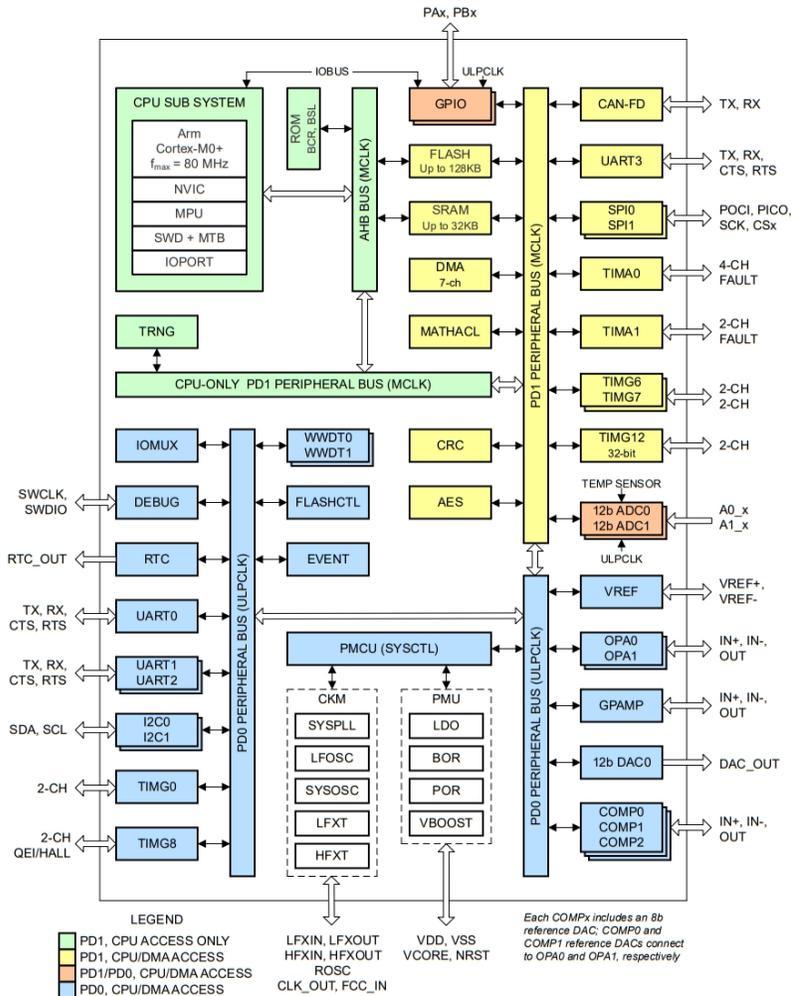
# 微控制器 (MCU) 选择

MCU	性能	低功耗	综合评价
C2000系列	★★★★★(240MIPS)	★(3.3V@200mA+)	★★
Tiva C	★★★★ (100DIMPS)	★★(3.3V@40mA+)	★★★★
MSP430系列	★★(16bit,16MHz)	★★★★★ (3.3V@3mA)	★★
<b>MSPM0系列</b>	★★★★★ (M0 80MHz)	★★★★ (3.3V@8mA)	<b>★★★★★</b>



MSPM0G3507 LaunchPad™

# MSPM0G3507



Core – Arm® 32-bit Cortex®-M0+ CPU with memory protection unit, frequency up to 80 MHz ;

Two simultaneous sampling 12-bit 4-Msps analog-to-digital converters (ADCs) with up to 17 external channels , 14-bit effective resolution at 250-ksps with hardware averaging;

Two zero-drift zero-crossover chopper op-amps (OPA) ; 0.5- $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  drift with chopping Integrated programmable gain stage, up to 32x –

One general-purpose amplifier (GPAMP) – Three high-speed comparators (COMP) with 8-bit reference DACs ;

Two I2C interfaces support up to FM+ (1 Mbit/s);

Two SPIs, one SPI supports up to 32 Mbits/s

MSPM0G3507: 128KB flash, 32KB RAM



# 主要内容

- 01 题目背景
- 02 基本要求分析
- 03 硬件方案
- 04 算法软件方案
- 05 总结

对于交流而言，存在瞬时值、有效值、幅值、峰峰值等表示方法，对于工频交流电压电流来说，通常采用有效值来表示，又称均方根值

(RMS)，以电压为例， $u$ 为瞬时值、 $U_m$ 为幅值、 $U$ 为有效值， $\omega$ 为角频率， $\omega = 2\pi f$ ， $f$ 为频率，工频为50Hz；电流也一样；但相对与电压而言存在相位 $\varphi$ ，在纯电阻负载电路时 $\varphi = 0$ ；对于电路的功率，由瞬时功率得到周期内的平均功率。

$$u = U_m \sin(\omega t) = U \sqrt{2} \sin(\omega t)$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (U_m \sin(\omega t))^2 dt} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi) = I \times \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = UI \cos \varphi$$

$P$ 为平均功率， $\cos \varphi$ 为功率因数

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{N-1} u^2(k)}{N}}$$

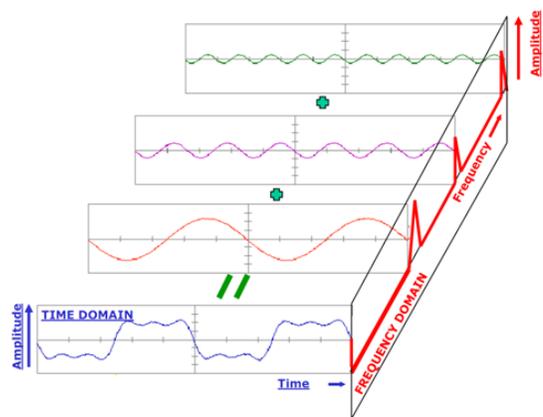
$$I = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{N-1} i^2(k)}{N}}$$

$$P = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} i(k) \times u(k)}{N}$$

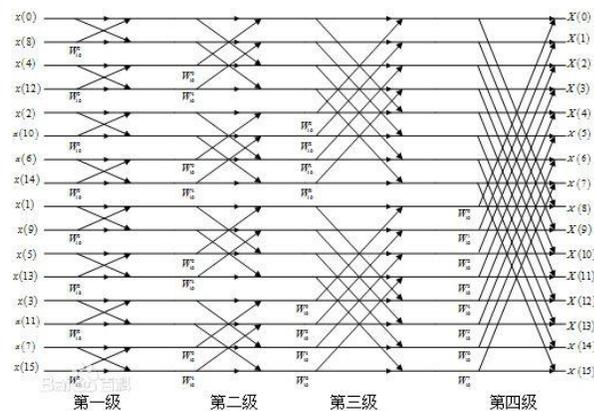
$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}$$

这里 $N$ 为电压电流采样点数；  
先以一个周期工频周期为例，通常取 $2^n$ ，若 $n$ 取10，即一个周期内采样1024个点，则采样频率为 $50 * 1024 = 51200\text{Hz}$ ； $n$ 取过大，计算量会比较大。

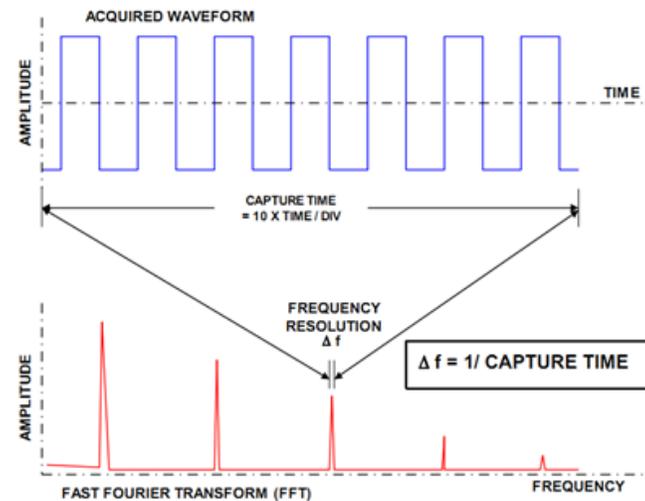
# 快速傅里叶变换 (FFT)



时域到频域



FFT快速计算方法



时域信号和频谱

# 谐波系数 (THD)



$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}{I_1^2}} \times 100\% \approx \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{10} I_k^2}{I_1^2}} \times 100\%$$

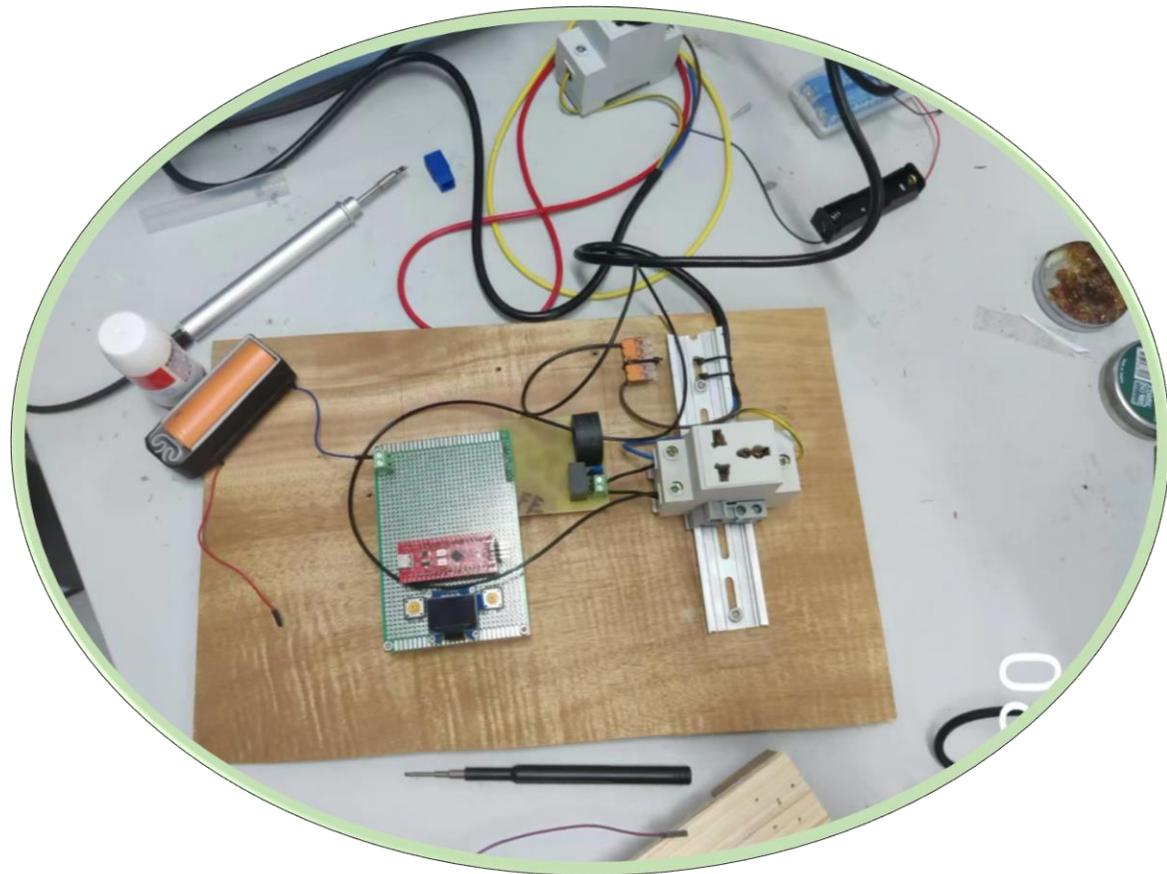
$I_1$  为基波分量,  $I_k$  为谐波分量

# 主要内容

- 01 题目背景
- 02 基本要求分析
- 03 硬件方案
- 04 算法软件方案
- 05 总结

# 总结

- 硬件设计
- 软件设计
- 强弱电结合
- 软硬件协同调试



用200元左右的成本实现了10W+的功率分析仪的效果!



谢谢大家！

欢迎批评指正！

2024.9.21