

# 全国大学生电子设计竞赛设计报告

## 单相逆变器并联运行系统（A 题）



2023 年 8 月 5 日

## 摘要

本文设计并制作了由2个单相逆变器组成的并联系统，系统可以向电阻负载 $R_L$ 供电，也可以通过变压器T并入220V电网。系统采用GD32F470ZGT6作为主控MCU，使用H桥SPWM方式实现逆变原理，通过使用霍尔传感器进行电流采样，过零比较器进行相位调整，使用PID算法进行电流电压控制，从而监测与控制电路，使其满足并网要求。系统的性能经过测试和分析，满足设计要求，具有较高的效率和稳定性，能够实现逆变器的并联运行和并网运行。本设计各个模块布局合理，系统稳定性好，制作成本低，经测试，能够完成题目的基本要求与发挥部分。

**关键词：** SPWM 波逆变、增量式PID算法、过零比较器、并网、LC滤波

# 目录

1	设计任务与要求 .....	5
2	系统方案设计 .....	5
2.1	设计方案的比较与选择 .....	5
2.1.1	H桥设计方案 .....	5
2.1.2	主控 MCU 的选择 .....	6
2.1.3	电流采样方案的选择 .....	6
2.2	系统设计结构原理 .....	7
3	系统理论分析与计算 .....	7
3.1	逆变器电路原理与SPWM .....	7
3.2	逆变器并网运行原理与控制 .....	8
4	电路与程序设计 .....	8
4.1	电路设计 .....	8
4.1.1	电路总体设计 .....	8
4.1.2	交流电压采样 .....	8
4.1.3	过零比较器 .....	9
4.1.4	电流取样 .....	9
4.1.5	H桥 .....	9
4.1.6	辅助电源 .....	10
4.1.7	SPWM的生成 .....	10
4.1.8	电压、电流控制环路 .....	10
5	系统测试及结果分析 .....	11
5.1	测试方案 .....	11
5.2	测试结果及分析 .....	12
6	结论 .....	12
A	附录 .....	13
A.1	主要元器件清单 .....	13
A.2	部分程序代码如下 .....	13
A.2.1	增量式PID运算 .....	13
A.2.2	PWM的设置 .....	14

A.2.3 电流环运算 .....	14
A.3 阻性负载测试结果 .....	15
A.4 3.3V辅助电源设计图 .....	16
A.5 $\pm 5V$ 电源设计图 .....	16

# 1 设计任务与要求

设计并制作由2个单相逆变器组成的并联系统，系统框图如图1所示，逆变器并联后可为电阻负载 $R_L$ 供电，也可通过变压器T并入220V电网。

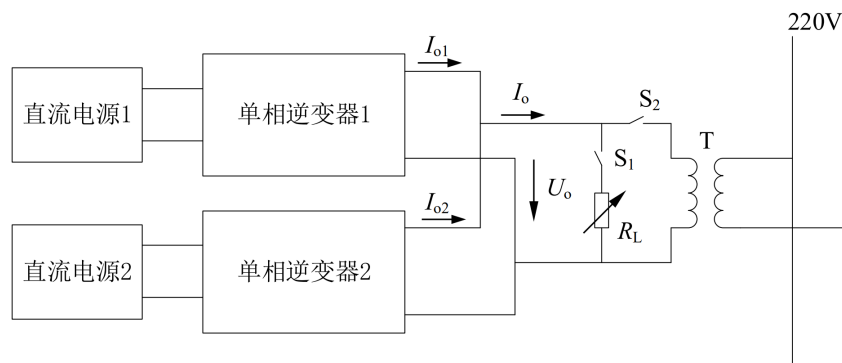


图 1: 单相逆变器并联示意图

1. 断开 $S_2$ ，闭合 $S_1$ ，仅用逆变器1向 $R_L$ 供电。 $U_o = 24V \pm 0.2V$   $f_o = 50Hz \pm 0.2Hz$ 时， $I_o = 2A$ 。输出交流电压 $THD \leq 2\%$ 。 $\eta \geq 88\%$ 。 $I_o$ 在 $0A \sim 2A$ 间变化时， $S_{I1} \leq 0.2\%$ 。逆变器1和逆变器2并联时，共同向 $R_L$ 供电， $U_o = 24V$ ， $f_o = 50Hz$ 时， $I_o = 4A$ 。
2. 断开 $S_1$ ，闭合 $S_2$ ，逆变器1与逆变器2并联且能并网，能在 $2A \sim 4A$ 范围内按数字设定 $I_o$ ，其误差绝对值应小于设定值的6%。 $I_o$ 在 $1A \sim 3A$ 间变化时，逆变器1及逆变器2的输出电流比值 $K = I_{o1} : I_{o2}$ 可在 $0.5 \sim 2$ 内按数字设定自动分配，其相对误差的绝对值不大于5%。

## 2 系统方案设计

### 2.1 设计方案的比较与选择

#### 2.1.1 H桥设计方案

1. 使用EG2104S栅极驱动芯片和BSC070N10NS

EG2104S是一种自举升压的栅极驱动芯片，有一路驱动信号的输入端有较强的拉灌电流能力，有一个驱动信号的输入和一个使能端，可以自动生成互补信号并插入内建死区时间，且内置下拉电阻，防止误触发。

## 2. 采用UCC27211和BSC070N10NS

UCC27211是自举升压型栅极驱动器，有两个驱动信号的输入端，可以独立控制上下MOS管，需要MCU生成互补信号和插入死区时间，控制程序更为复杂。

综合以上两种方案，我们选择方案1。

### 2.1.2 主控 MCU 的选择

#### 1. 梁山派GD32F470ZGT6

梁山派采用基于 ARM Cortex-M4 内核的GD32F470ZGT6，主频可达240MHz，能够满足电源环路的高速运算，板上具有丰富外设，并引出多个GPIO接口，支持多种通信接口和外设，具有2.6Mbps的ADC，每个ADC具有19个通道，可供高速取样模拟信号，且开发板上具有大功率3.3V的输出，可以满足外设的供电需求，是国产芯片，封装的函数库简洁高效。

#### 2. STM32G431RBT6

基于 ARM Cortex-M系列内核，主频可达 170MHz，具有52个GPIO接口，多个定时器，支持较多通信接口和外设，ADC DAC精度很高，但其使用的HAL库代码较为抽象难懂。

#### 3. STC89C52

价格便宜，但基于 8051 内核，主频只有 12MHz，内存容量小，IO和定时器数量少。

综合以上两种方案，我们选择方案2。

### 2.1.3 电流采样方案的选择

#### 1. INA199电流采样芯片

电路简单，成本低，但是需要采用电流取样电阻，电阻功耗大，而且承受的共模电压低，不能用高端电流取样，且电阻的阻值会随着温度的变化而变化，影响采样精度。

#### 2. 使用CC6903霍尔传感器

电路简单，成本低，芯片价格便宜，而且霍尔传感器共模电压高，且不需要采样电阻，损失能量少，不受温度影响，采样精度高。

3. 使用HLW8032电能采样芯片

采样简单，不需要进行滤波和运算，直接输出有效值和功率值；缺点是采样精度低，数据刷新速度慢。

综合以上两种方案，我们选择方案2。

2.2 系统设计结构原理

根据题目要求和设计方案，本文设计了如图2所示的系统结构原理图。

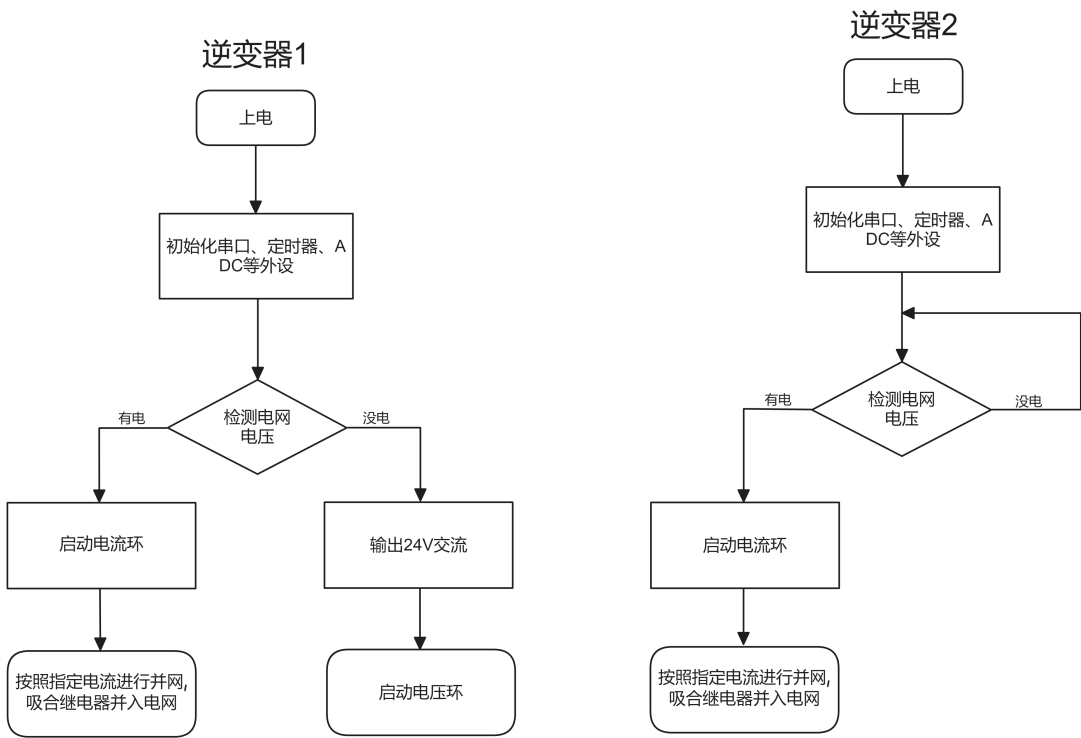


图 2: 系统结构原理图

3 系统理论分析与计算

3.1 逆变器电路原理与SPWM

逆变是将直流电能转换为交流电能的过程，逆变器是实现逆变的电路。本文采用H桥SPWM方式实现逆变，SPWM是一种常用的逆变控制方法，其基本思想是将正弦波信号与三角波信号进行比较，当正弦波大于三角波时，输出高电平；当正弦波小于三角波时，输出低电平。这样就可以得到近似于正弦波的波形。

根据 SPWM 法的原理，可以推得

$$T_{on} = \frac{ARR - CCR}{ARR} = \frac{U_c \sin(\omega t_o)}{U} \quad (1)$$

故单片机中寄存器的值应赋值为

$$CCR = ARR - \frac{U_c \sin(\omega t_o)}{U} \times ARR \quad (2)$$

### 3.2 逆变器并网运行原理与控制

逆变器并网运行需要满足以下条件：并网逆变器的输出电压幅值与电网电压幅值相等，频率与电网频率相等，相位与电网电压相位相等并网逆变器具有良好的并网保护功能，本文采用相位移控制方式实现逆变器并网运行，本设计通过过零比较器检测电网零点，并将信号送入单片机进行计数，得到电网周期和频率。通过霍尔传感器采样电流，并将信号送入单片机进行处理，单片机将电网与逆变器差异对比计算出误差信号，并通过PID算法进行反馈调节。根据反馈调节结果，调节SPWM信号的相位差，实现逆变器与电网之间的并网。

## 4 电路与程序设计

### 4.1 电路设计

#### 4.1.1 电路总体设计

电路总体框图如图3所示，主控通过电流采样，以及过零比较器调整相位，控制逆变器的输出，使其满足并网要求。

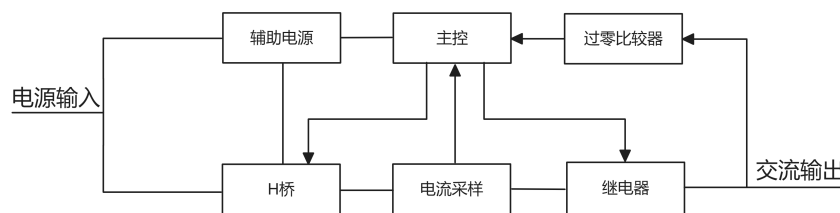


图 3: 电路总体框图

#### 4.1.2 交流电压采样

如图4所示，交流电压取样采用把交流电压先经过电阻分压，然后使用LM358作为电压跟随器，然后经过SGM8632运放进行反向和抬升，使原本的交流电压落在0 ~ 3.3V的范围之内，经过RC滤波电路后输入到ADC进行采样。



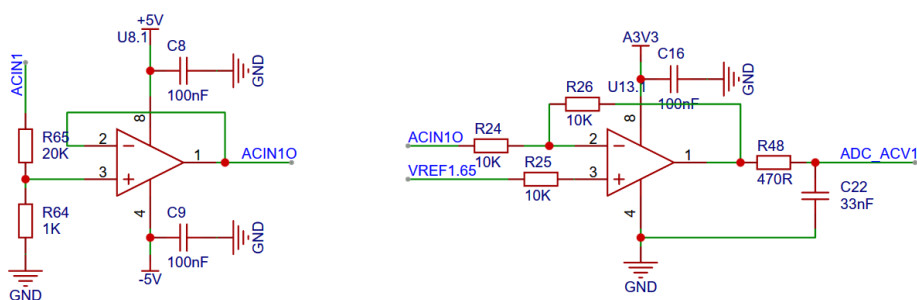


图 4: 交流电压采样设计图

### 4.1.3 过零比较器

如图5所示，采用SGM8632运放把输入的交流电经过电阻分压之后，过零比较器输出上升沿，单片机进入中断，调整sin函数的计数值为0，即一个周期的开始，使程序中的正弦信号与外部电网同步。

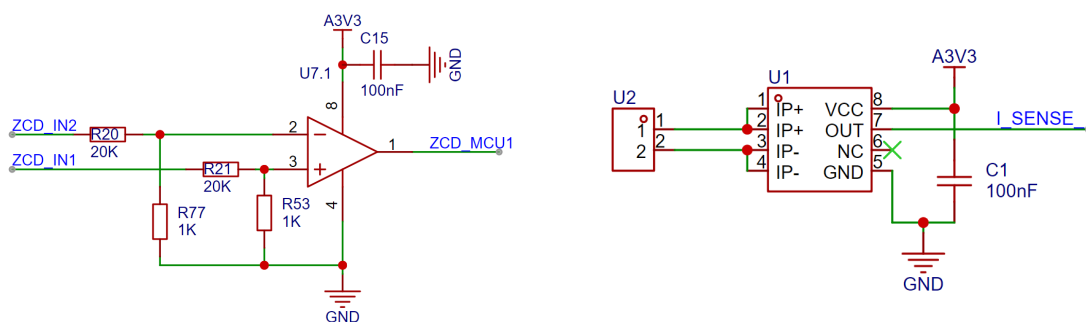


图 5: 过零比较器设计图

图 6: 电流取样设计图

### 4.1.4 电流取样

如图6所示，电流取样采用CC6903霍尔传感器。

### 4.1.5 H桥

H桥电路独立设计，板上集成栅极驱动电路和母线电容，预留控制信号的输入端口和电源的输入输出端口。

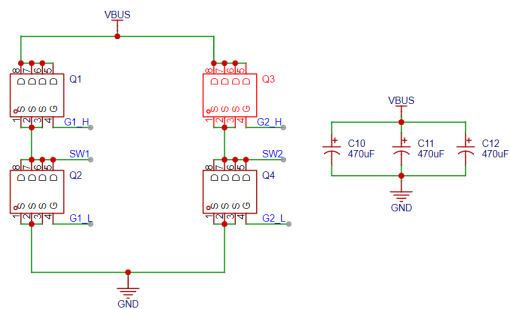


图 7: H桥设计图

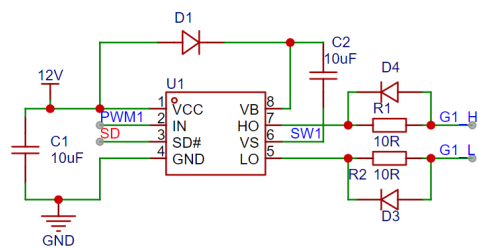


图 8: 栅极驱动电路图

#### 4.1.6 辅助电源

辅助电源采用XL8015和LM2596开关电源芯片， XL8015支持最高80V的输入，输出功率最大12V，作为第一级电源把主电源的电压降到12V，用于给MOS的栅极驱动芯片和串口屏供电，然后LM2596把12V的电压降为5V，用于给主控板供电，主控板上有TMI3411把5V降到3.3V，用于给GD32F470ZGT6供电和运放供电，使用SGM3204电荷泵芯片产生-5V的电源，给运放供电。详见附录图14，图15。

#### 4.1.7 SPWM的生成

根据系统功能需求，本文SPWM生成流程如图9所示。代码详见附录A.2.2。

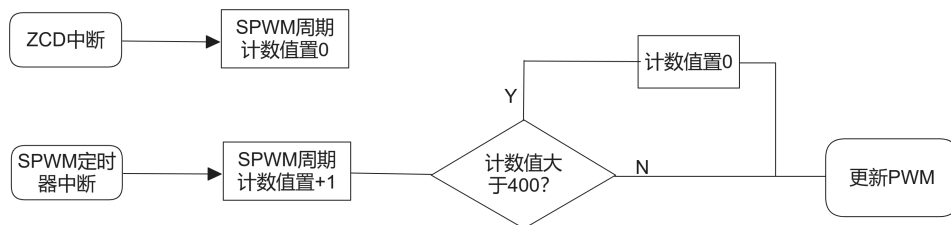


图 9: SPWM生成程序框图

#### 4.1.8 电压、电流控制环路

电压、电流控制环路如图10所示，当定时器溢出后，会进行ADC采样，采样完成后，会进行增量式PID运算，从而更新PWM值，实现电压、电流的控制。代码详见附录A.2.1，A.2.3。

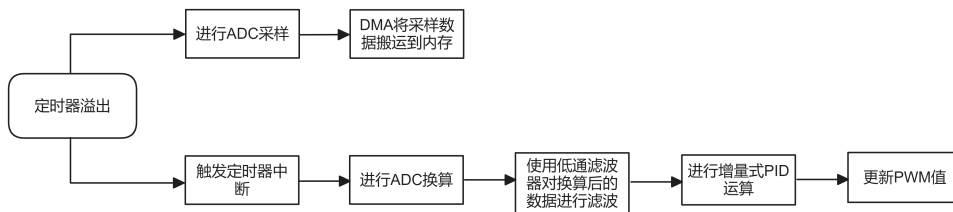


图 10: 电压、电流控制环路

## 5 系统测试及结果分析

### 5.1 测试方案

为了验证系统的性能是否满足设计要求，本设计采用了以下测试方案，测试仪器见表1。

1. 断开S2，闭合S1，测试逆变器1向负载供电时的 $U_o$ 、 $I_o$ 、 $f$ 、 $THD$ 以及负载调整率等。
2. 断开S2闭合S1，测试两个逆变器并联向负载供电时的 $U_o$ 、 $I_o$ 、 $f$ 等。
3. 断开S2闭合S1，测试两个逆变器并联且并网后的输出电流、输出电流比值、其误差绝对值。

表 2: 测试结果

序号	测试指标	测试结果	结论
1	$U_o$	24.1V	满足要求
	$I_o$	2.1A	
	$f_o$	50.1Hz	
	$THD$	1.8%	
2	$U_o$	24.0V	满足要求
	$I_o$	4.1A	
	$f_o$	50.1Hz	
3	$I_{o1}$	2.1A	满足要求
	$I_{o2}$	1.0A	
	$K$	2.1	

表 1: 测试仪器

序号	仪器名称	型号	数量
1	示波器	DS2202A	1
2	可调电源	IT6722A	2
3	功率分析仪	TA333H	1
4	万用表	ZT102A	1

## 5.2 测试结果及分析

系统的性能经过测试，具有较高的效率和稳定性，能够实现逆变器的并联运行和并网运行，测试结果见表2及图A.3。

## 6 结论

本设计的主要创新点和优点如下使用高性能的单片机 GD32F470 控制逆变器，充分利用其高速运算和多功能外设的特点，实现多任务的并行处理和高效率的数据传输。使用主从控制方式实现逆变器并联运行，简化了调节机制，提高了同步精度和灵活性。使用相位移控制方式实现逆变器并网运行，简化了控制方法，提高了响应速度和可靠性。使用触摸串口屏作为人机交互界面，方便了用户对系统的操作和监测。

## 参考文献

- [1] 华成英. 模拟电子技术[M]. 高等教育出版社, 2022.
- [2] MANIKTALA S. 精通开关电源设计[M]. 人民邮电出版社, 2015.
- [3] 王兆安. 电力电子技术[M]. 机械工业出版社, 2011.
- [4] YIU J, 吴常玉, 曹孟娟, 等. ARM Cortex-M3与Cortex-M4权威指南[M]. 清华大学出版社, 2015.

## A 附录

### A.1 主要元器件清单

梁山派GD32F470开发板 淘晶驰X2系列串口屏 EG2104S SGM3204 SGM8632  
BSC070N10NS LM358 74HC245 XL8015降压模块 LM2596降压模块 磁环电感  
CBB22电容 可调电阻 稳压模块 双路继电器模块 CC6903 电阻 电感

### A.2 部分程序代码如下

#### A.2.1 增量式PID运算

```
p->Ek_0 = p->Ref - p->Fdb; //计算误差
//误差小于设定死区，不进行PID计算，保持上一次输出
if( fabs(p->Ek_0) < p->Ek_Dead )
{
    p->Increm = 0;
}
else
{
    p->Increm = (    p->a0 * p->Ek_0  \
                  - p->a1 * p->Ek_1  \
                  + p->a2 * p->Ek_2 ); //PID增量计算
}
p->Output += p->Increm; //计算输出
p->Ek_2      = p->Ek_1; //保存k-2误差
p->Ek_1      = p->Ek_0; //保存k-1误差
if(p->Output > p->OutMax)
{
    p->Output = p->OutMax; //最大限幅
    return;
}
if(p->Output < p->OutMin)
{

```

```

    p->Output    = p->OutMin; //最小限幅
    return;
}

```

### A.2.2 PWM的设置

```

void set_spwm(float pwm)//通道2对应输出为正极输出
{
    if(pwm>0)
    {
        tim_ch_output_pulse_config(TIMER1,TIMER_CH_2,(uint16_t)pwm);
        tim_ch_output_pulse_config(TIMER1,TIMER_CH_3,0);
    }
    else
    {
        pwm=-pwm;
        tim_ch_output_pulse_config(TIMER1,TIMER_CH_2,0);
        tim_ch_output_pulse_config(TIMER1,TIMER_CH_3,(uint16_t)pwm);
    }
}

```

### A.2.3 电流环运算

```

void power_ctrl_ACcurrent()
{
    gPID_CurrentOutLoop.Ref=i_acout*_SQRT2*SIN_TIME;
    gPID_CurrentOutLoop.Fdb=i_in1.Value;
    float Bias,kp=200,ki=250; //定义相关变量
    static float pwm_out, Last_bias; //静态变量

    Bias=gPID_CurrentOutLoop.Ref-gPID_CurrentOutLoop.Fdb; //求速度偏差

    pwm_out+=kp*(Bias-Last_bias)+ki*Bias; //增量式PI控制器
    Last_bias=Bias;
    pwm_out+=SIN_TIME*DP_PWM_PER*0.1f;
}

```

```

if(pwm_out>0.90f * DP_PWM_PER)
{
    pwm_out=0.90f * DP_PWM_PER;
}
if(pwm_out<-0.90f * DP_PWM_PER)
{
    pwm_out=-0.90f * DP_PWM_PER;
}
set_spwm(pwm_out);
if(cnt_spwm==100) ip_inverter=i_in1.Value/_SQRT2;
}

```

### A.3 阻性负载测试结果



图 11: 功率分析仪测试结果

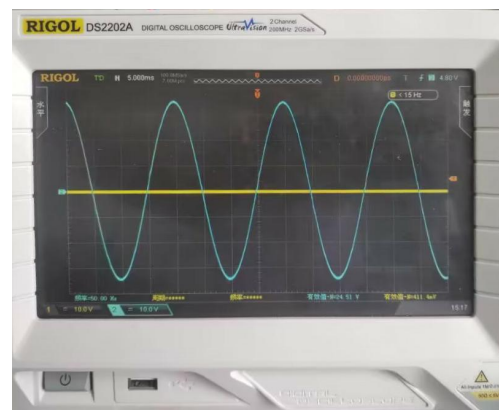


图 12: 示波器波形

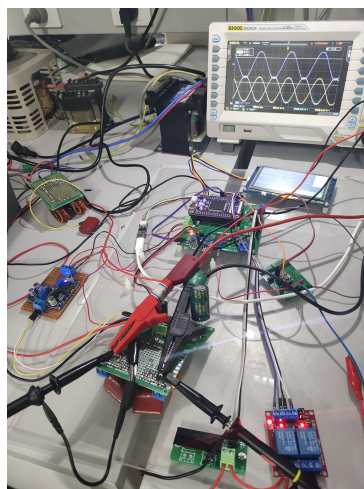


图 13: 部分电路连接图

## A.4 3.3V辅助电源设计图

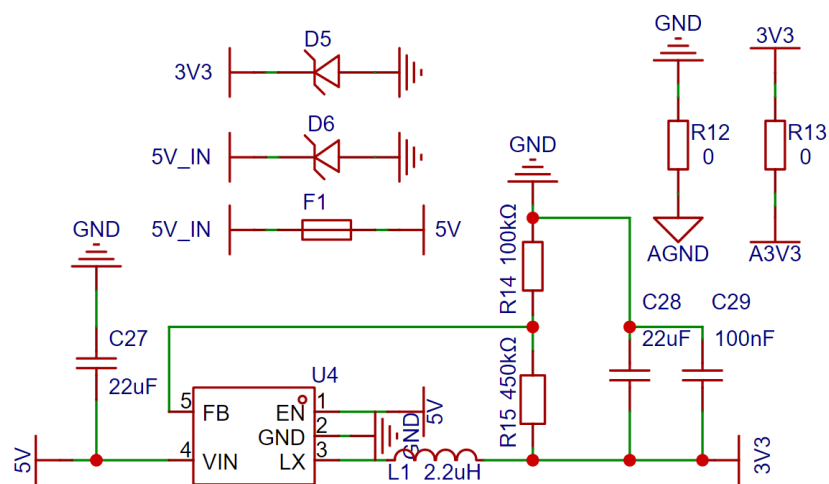


图 14: 3.3V辅助电源

## A.5 $\pm 5V$ 电源设计图

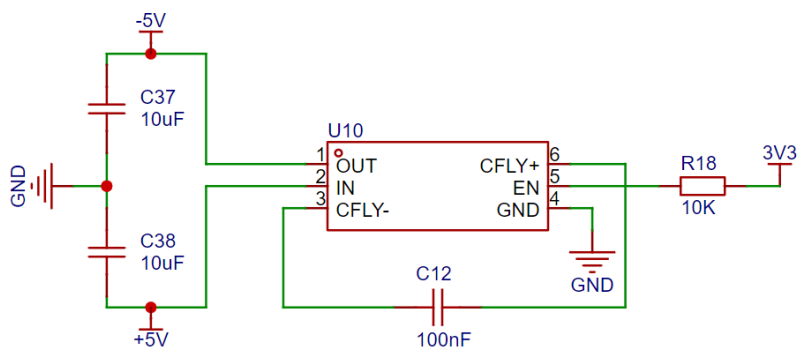


图 15:  $\pm 5V$ 电源