

光伏并网发电模拟装置

全国二等奖

西安电子科技大学 沈敏 郝爽 任腊梅

本系统涉及三大关键技术：全桥驱动电路、H桥功率变换电路、变频低通滤波器。系统以全桥驱动电路为核心，以MSP430F1611单片机为主控制器和SPWM信号发生器。根据输出电压采样值，调整SPWM信号幅度，实现最大功率点跟踪。根据负载电压采样，对SPWM信号做出调整，实现频率跟踪相位跟踪。系统功能完善，达到了所有指标。

关键词： 并网 SPWM 跟踪

Abstract

The system contains three key technology :full bridge driving circuit 、H bridge power converter circuit and variable low pass filter .The core of the system is the full bridge circuit and the main controller is the MSP430F1611.The magnitude of SPWM is adjusted based on the output voltage sampling ,so that the output power keep being the largest .The output frequency is following the reference frequency based the sampled load voltage .The system is full functional ,meets all the target of the basic and exent demands .

一、 方案论证

光伏发电主要是完成 DC-AC 逆变，通常逆变有几种方案。

方案一：采用分立元件搭建三角波产生电路，正弦波产生电路，通过比较器比较产生正弦脉宽调制信号，通过功率驱动全桥，完成功率放大，实现逆变。

方案二：采用专用集成 SPWM 芯片，产生 SPWM 信号，通过全桥驱动，实现逆变。

方案三：采用软件产生 SPWM 信号，经 MOS 管全桥功率驱动，实现逆变。

方案比较：方案一模块明确，分立元件成本低。方案二电路简单，易于控制。方案三硬件少，功耗小，容易实现闭环控制和改善系统性能。

综合考虑成本及效率问题，本系统选用方案三，单片机采用 MSP430F1611，软件内实现正弦脉宽调制。根据脉宽调制原理，软件计数产生高频三角波，与慢变的正弦波数据进行比较，当计数值大于正弦波数值时，输出高电平，当计数值小于正弦波数值时，输出低电平。这样输出脉冲宽度反映了正弦波的幅度变化。该信号通过外围浮栅驱动器 IR2010 驱动 MOS 管 IRFB2 3 N15D 全桥，实现功率放大，由低通滤波器滤出功率正弦波，即完成了 DC-AC 逆变。

系统总体框图如图 1-1 所示。

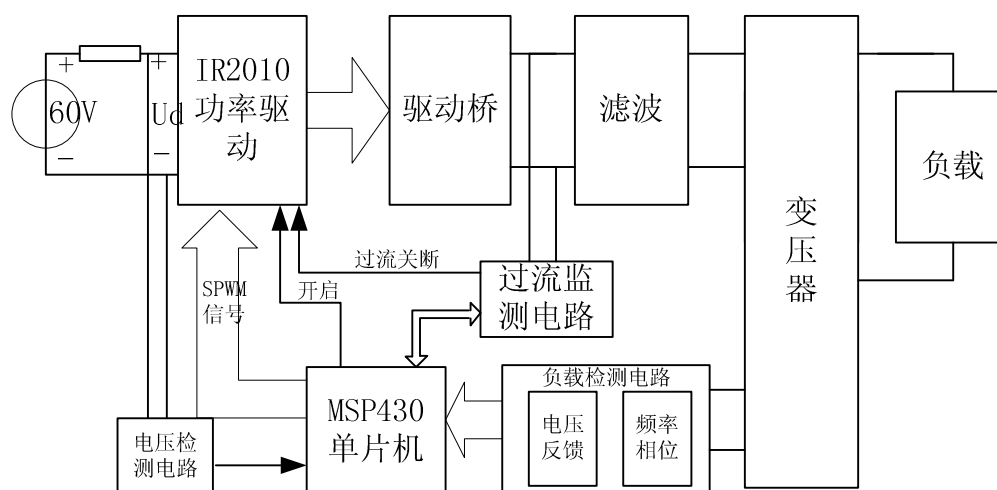


图 1-1 系统总体框图

二、 理论分析与计算

1.MPPT 的控制方法与参数计算

由电路知识知，输出最大功率时有 $R_s=R_L$ ，此时 $U_d=30V$ ，因此只要监视 U_d ，通过调整，使其始终保持在 30V，便完成了最大功率跟踪。

由 A/D 采样输入电压 U_d ，与最大功率点（30V）进行比较，采用 PI 算法进行调节。当 U_d 大于 30V 时，减小 SPWM 调制频率的幅度，当 U_d 小于 30V 时增大 SPWM 调制频率的幅度，从而使得 DCAC 逆变功率为最大功率点。

2. 同频同相的控制方法与参数计算

1) 频率跟踪

首先通过硬件将正弦波整形为矩形波送往单片机，单片机根据矩形波电平进行计数，计数值反应频率信息，因此根据计数值改变 SPWM 步长，便可实现频率跟踪。

由计数测频法得 $f = f_{osc} / N$

而 SPWM 频率为 $f_o = \frac{f_{osc}}{M \times 2^n} \times K$, 其中 f_{osc} 为系统时钟, K 位步长。本系统时钟为 7.3768MHz, 为保证频率跟踪精度, 选最小频率步进为 0.25Hz, 因此当 $n=13$, $M=3600$ 时, 有 $f_o=0.25\text{KHz}$ 。当频率在 45Hz 到 60Hz 间以 0.25Hz 变化时, 频率步进为 180 到 240 以 4 间隔。

为减少软件计算量, 将这些数存入表中, 软件只需根据计数值进行查表改变步长, 即可实现频率跟踪。

2) 相位跟踪

首先将 U_f 和 U_{ref} 整形为矩形波, 通过鉴相电路, 将相位信息转换为脉宽信号, 送单片机。单片机根据该脉宽信号对 SPWM 输出起始地址进行修正, 实现相位跟踪。

3. 提高效率的方法

1) 使用合适的 MOS 管和驱动电路, 比如 IR 的高性能 MOS 和半桥驱动 I R 2 0 1 0 ;

2) 使用较低的开关频率, 因为功率管开关和磁性材料的磁通变化会带来损耗, 使用可以满足 D C A C 逆变需求的尽可能低的 P W M 频率, 如 8 ~ 10KHz, 可以降低开关管和滤波电感的损耗, 另外使用高频损耗较低的磁性材料做滤波电感, 如铁硅铝磁芯的电感, 也可以降低系统的损耗。

3) 尽可能降低变压器损耗, 变压器的损耗包含铜损和铁损, 采用电流密度较低的绕组可以降低变压器的铜损, 而是用较薄硅钢片的变压器可以降低铁损, 本设计使用了低损耗的 0.35mm 硅钢片的 R 型变压器。

4. 滤波器参数的计算

滤波的目的主要是滤除高频开关频率分量, 本系统中开关频率为 8.096KHz, 有用信号周期为 45Hz~55Hz。为使有用信号输出衰减小, 需使滤波器在低频时

输出幅度衰减极小, 采用 LC 型滤波器, 其 3dB 带宽频率为 $f \approx \frac{1.553}{2\pi\sqrt{LC}}$, 选截止频率为 2000Hz, 得 $LC=1.529 \times 10^{-8}$ 。选 $L=1.6\text{mH}$, $C=9.4\mu\text{F}$ 。仿真结果如图 2-2 所示。

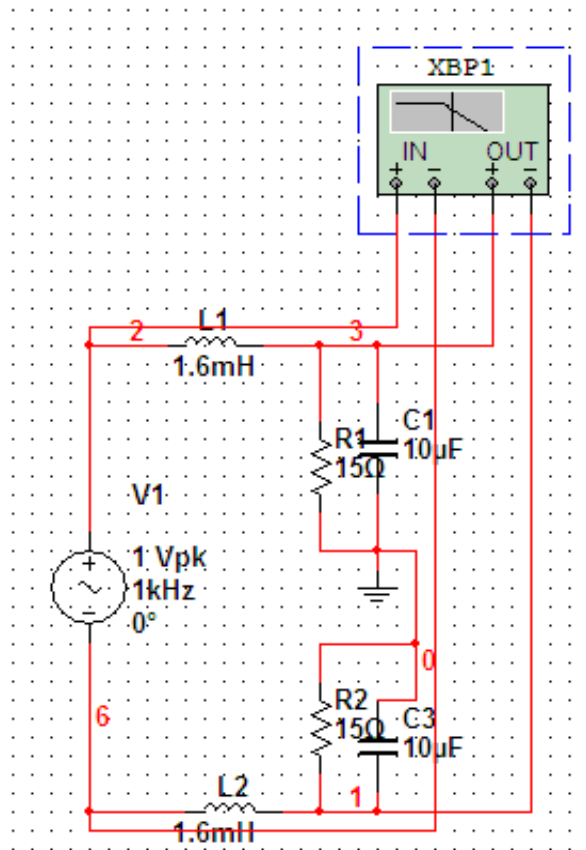


图 2-1 滤波器电路图

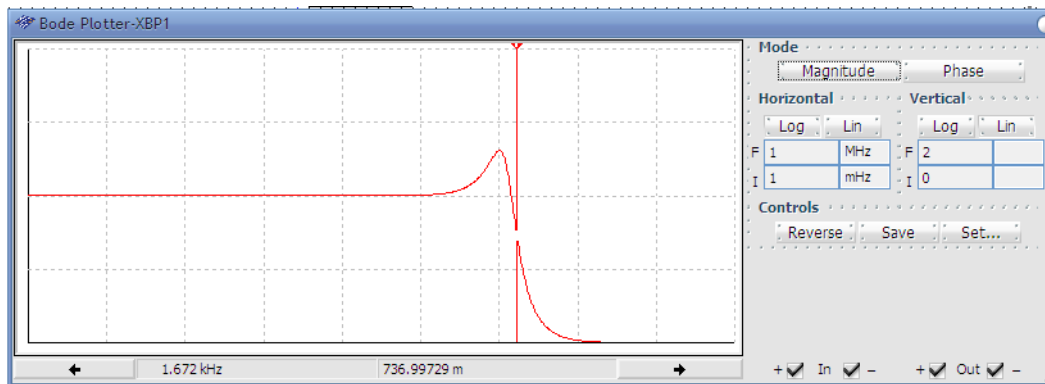


图 2-2 滤波器 multism 仿真结果

5. 关于 DC-AC 输出直流成分和变压器偏磁问题

在 SPWM 开关电路中由于正负信号的不对称，通常在变压器初级产生直流偏置。直流偏置的存在使得变压器磁芯容易饱和，一方面导致逆变效率低下，另一方面，较大直流分量的存在使变压器温升增大，容易损坏，工作不正常。因此，有效降低逆变器偏磁对系统性能非常关键。

本系统通过将桥臂中点与输出电压中点电压取样，判断偏置极性大小，并对 SPWM 进行相应调整，闭环控制使直流偏置保持在较小范围内。

三、电路与程序设计

1. DC-AC 主回路与器件选择

主回路包括 SPWM 信号的产生及放大。

首先由低功耗单片机 MSP430 产生 SPWM 信号，送驱动电路。驱动电路完成将 SPWM 脉宽调制信号功率放大的功能，目的是功率放大，要求放大效率要高。本系统选用 IR2010 浮栅驱动器对全桥进行驱动，该驱动芯片耐压高达 200V，输出电流 3.0A，输出电压 10—20V，开通关断时间分别为 95ns 和 65ns。功率管选用高耐压，导通电阻小，开关损耗小的高效 MOS 管 IRFB2 3 N15D，如图 3-1 所示为逆变主回路。

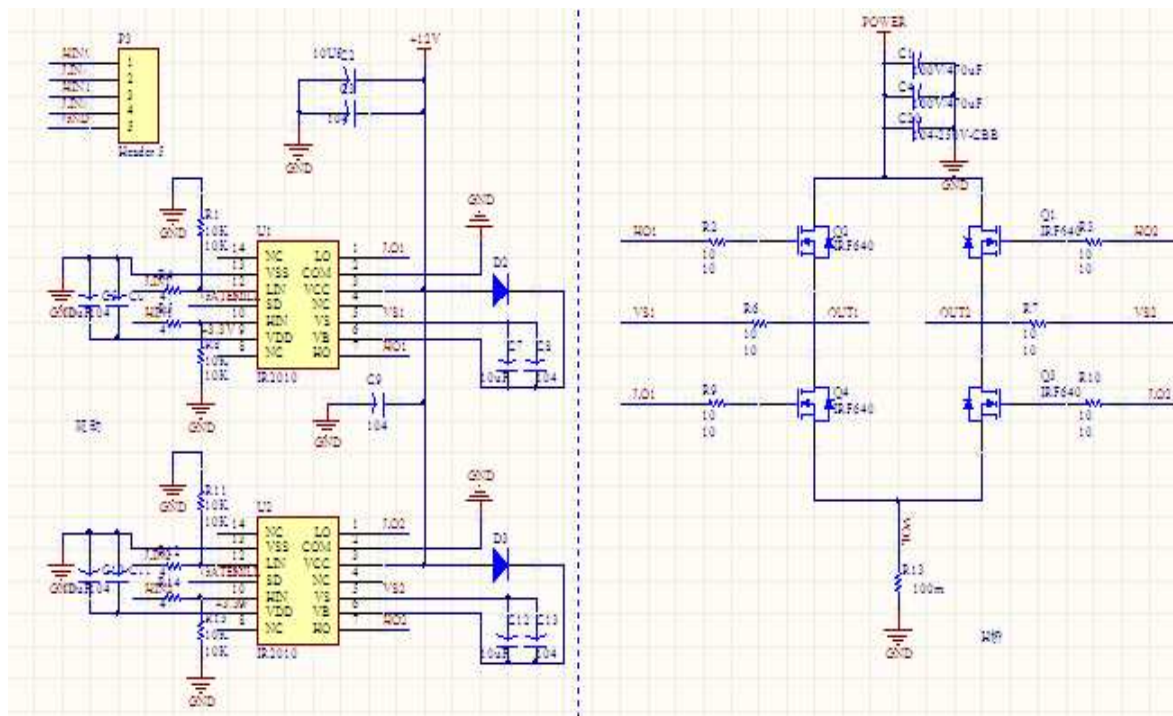


图 3-1 DC-AC 逆变驱动电路

高效率的驱动和 MOS 保证了系统的整体效率。

2. 相位检测及同步的功能实现

鉴相电路将两个周期信号的相位差转换为周期的脉宽信号，送单片机采样判断执行。

3. 保护功能

通过测量输入电压及变压器 U_f 端的输出电压，判断电路状态，并作出相应的回应。有故障出现时，关断电源，故障排除后，自动恢复。

4. 测量功能

输入电压分压调理送 A/D 进行测量，反馈电压，经有效值芯片转换为直流信号，送 A/D 完成测量功能。

5. 控制程序的设计

软件主要负责欠压保护，过流保护，故障消除后自动恢复的控制。其主要流程图如图 3-2 所示。

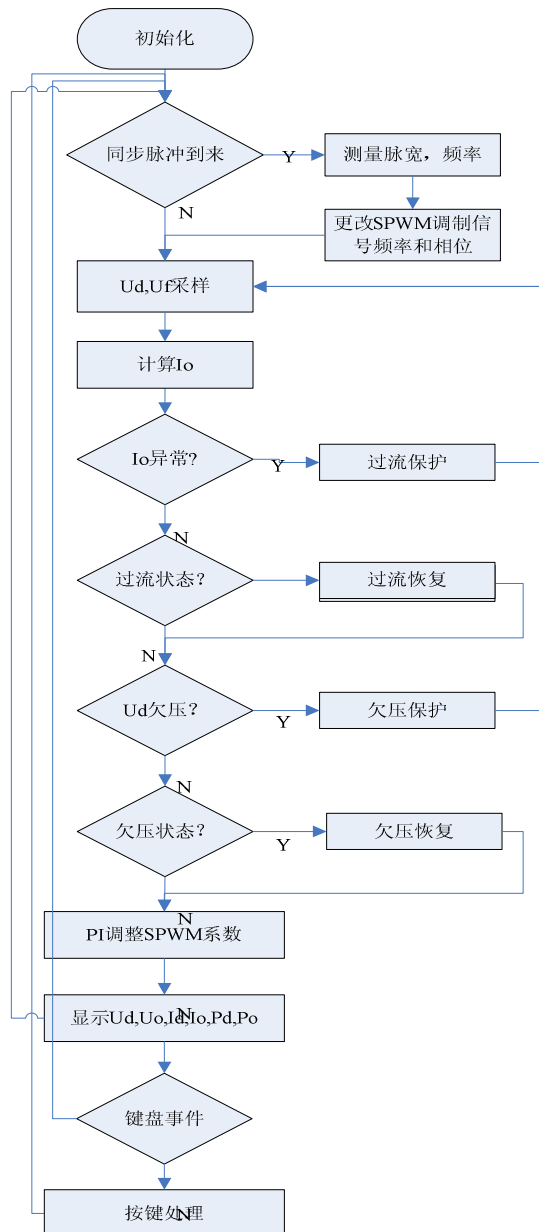


图 3-2 控制程序流程图

四、测试方案与测试结果

- 1.测试仪器：Agilent 54622D MIXED SIGNAL OSCILLOSCOPE
F80 型数字合成/任意波信号发生器/计数器
TAITAN DT9295 数字式万用表

- 2.测试方法步骤及数据

- 1)最大功率跟踪测试

改变 R_s 从 $30\Omega \sim 36\Omega$ ，将万用表接到 R_s 两端测试端子，测量输出电压。

测得当 $R_s=R_L=30\Omega$ 时，输出电压为 30.0V

由此可见，最大功率跟踪稳定，达到了系统 1% 偏差的指标要求。

- 2).频率跟踪测试

信号发生器方波输出接到 Uref 端，改变 Uref 的频率从 45Hz 到 55Hz，将示波器接到 RL 测量端子测量输出频率。

表 4-1

fref (Hz)	45	50	55
fout	45.0	50.0	54.6

由表可见，频率跟踪稳定，达到了系统 1% 偏差的指标要求。

3) 效率测量

在 $R_s=R_L=30\Omega$ 时，用万用表直流档测量输入电压电流，表交流档测量输出电压，进而计算出输出电流。

表 4-2

输入电压 Ud (V)	输入电流 Id (A)	输出电压 Uo1 (V)	输出电流 Io1 (A)
29.8	0.925	25.5	25.5/28.5

根据公式 $\eta = \frac{P_o}{P_d} \times 100\% = \frac{I_{o1} \cdot U_{o1}}{I_d \cdot U_d} \times 100\%$ 计算逆变效率得 $\eta=82.77\%$ 。

效率大于 80%，达到了发挥部分 80% 的指标要求。

4) 欠压保护测试

首先将电压值跳到欠压临界值附近，缓慢减小输入电压，使 Ud 减小，用万用表观察 Ud 欠压保护的临界值；将示波器探头接到 RL 端，测量从电压稳定输出到无电压输出响应时间。再将电压逐渐增大，测量从无电压输出到稳定输出的响应时间。

测得欠压临界电压为 25V。

经测量，系统可以自动恢复，响应时间约为 500ms，达到发挥部分响应不超过 1s 的要求。

5) 过流保护测试

将万用表调为交流电流测量模式，串入负载电路，减小负载，使输出电流接近临界保护电流，缓慢调节负载，测出临界电流值；将示波器探头接到 RL 端，测量响应时间。

测得过流保护电流为 1.51A。

经测量，系统过流故障排除后，可以自动恢复，响应时间约为 700ms，达到发挥部分响应不超过 1s 的要求。

6) 相位跟踪测试

将变压器 Uf 端接到反馈电压测试端，信号发生器正弦波输出接到 Uref 端，示波器双路分别接到 Uf 测量端，和 Uref 测试端，观察两波形相位差。

五、总结

本电路结构简单，性能优良，各项指标均达到并超过了题目要求。除可自动恢复的欠压保护和过流保护外，还有可靠的短路保护及指示报警功能，使用更安全。

六、附录

1. 完整电路原理图

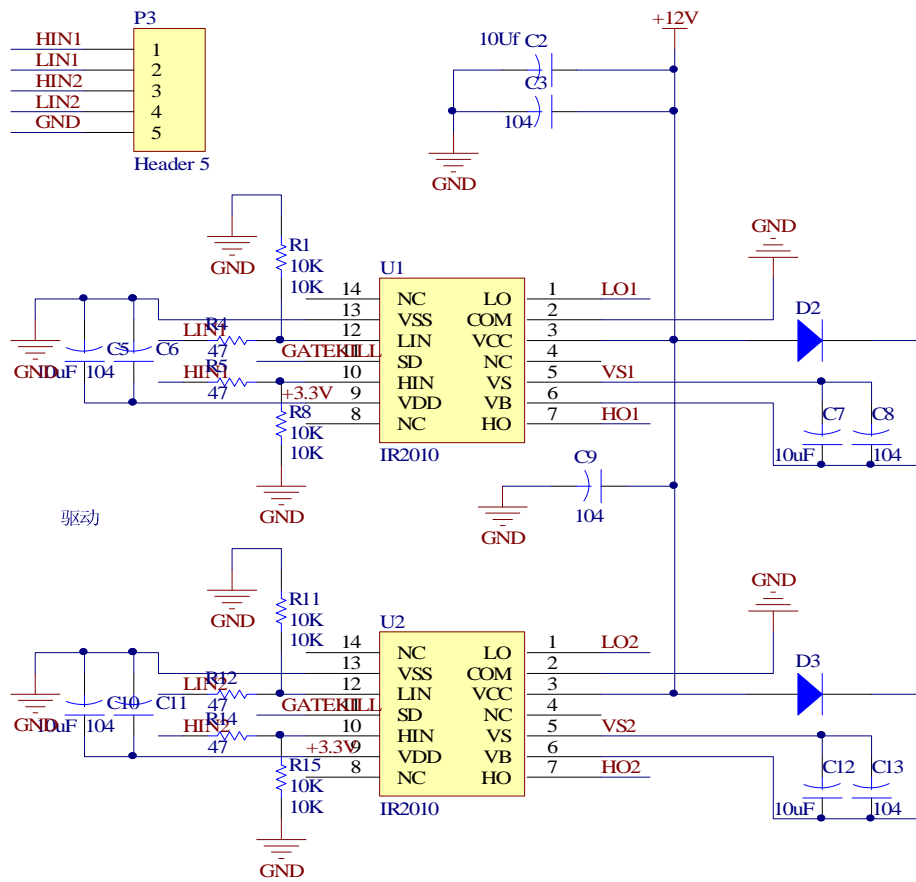


图 6-1 H 桥驱动电路

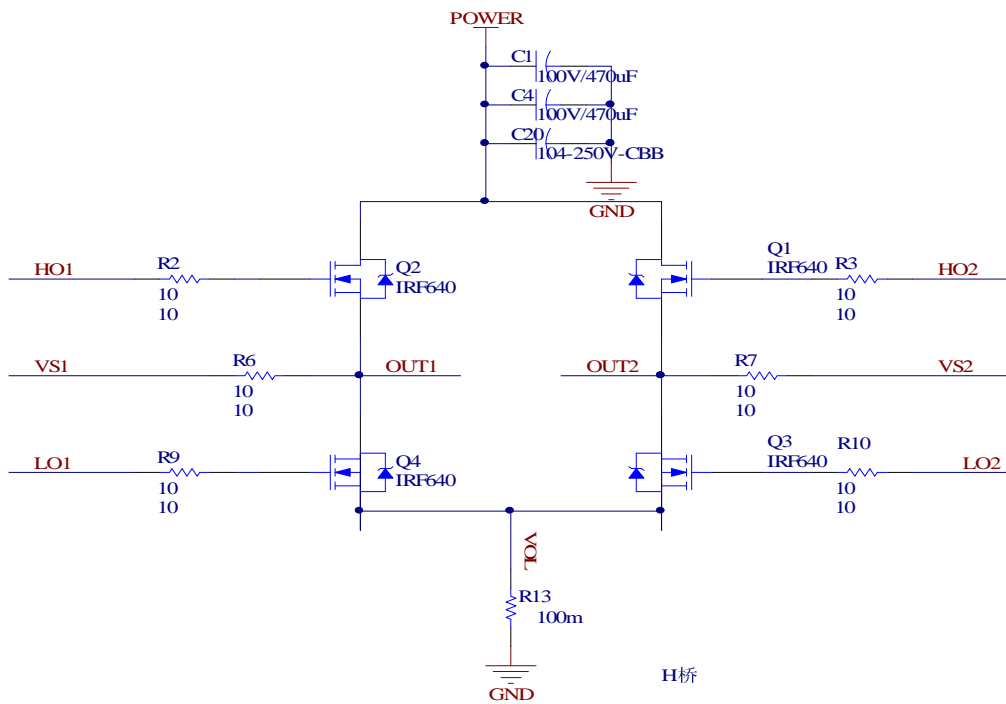


图 6-2 H 桥

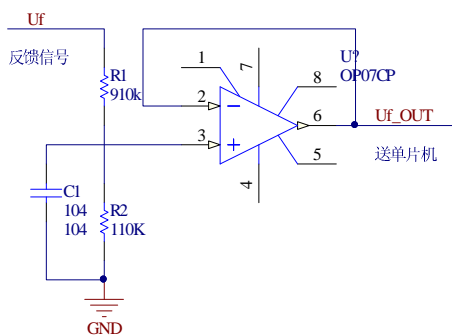


图 6-3 输入电压测量电路

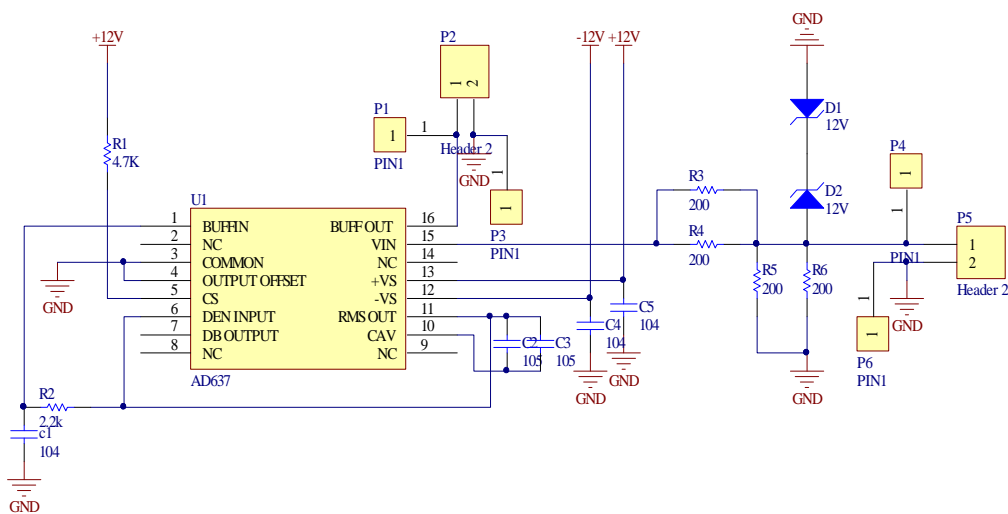


图 6-4 反馈电压 U_f 测量电路

用于MPPT

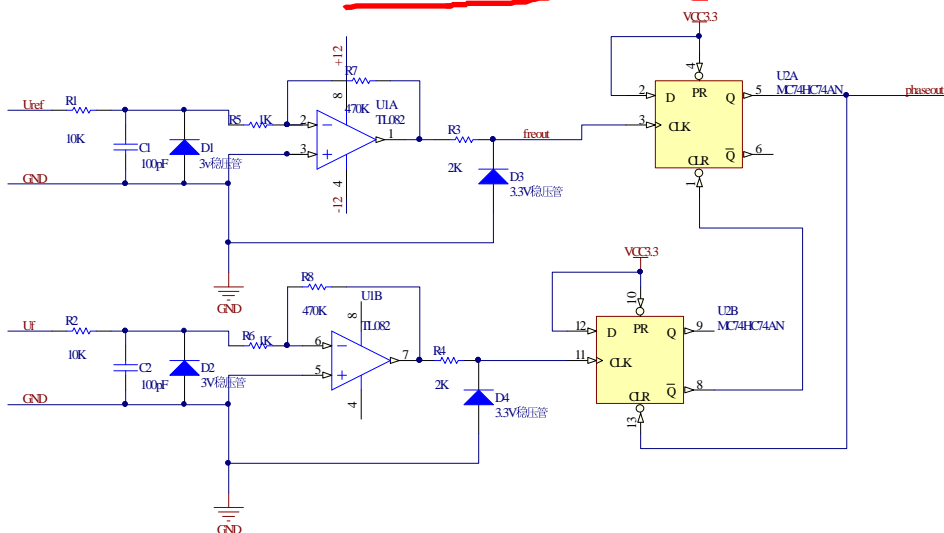


图 6-5 鉴相电路

2. 重要的源程序
 PID 算法
 /*
 功能:增量式 PID 计算
 参数:

```

    p:pid 结构体
    v:采样值
*/
double pid_inc_calc(pid_t *p,double v){
    double err,inc;
    err=p->target-v;//当前偏差
    inc=p->proportion*err//比例项
        -p->integral*p->last_err//积分项
        +p->derivative*p->pre_err;//微分项
    p->sum_err+=err;//积累误差
    p->pre_err=p->last_err;
    p->last_err=err;
    return inc;
}

```

MPPT PI 控制

```

//out_amp_h/out_amp_l 从 1/100~1,作为 DDS 幅度增益
out_amp_l=100;
pid_set_proportion(&pid,0.025);//设置比例系数 P
pid_set_integral(&pid,0.008);//设置积分系数 I
pid_v=pid_inc_calc(&pid,avai_in_va);//计算 PI 输出增量
//控制 DDS 幅度
dds_coef=pid_v;
if(dds_coef>97){
    dds_coef=97;
    out_amp_h=97;
}
else if(dds_coef<3){
    dds_coef=3;
    out_amp_h=3;
}
else{
    out_amp_h=(uint)dds_coef;
}

```

3. 完整的测试结果

1. 最大功率点跟踪

表 6-1

RS (Ω)	30
RL (Ω)	30
Ud (V)	30.0

2. 频率跟踪功能

表 6-2

参 考 频 率 (Hz)	45	46	47	48	49
测量值(Hz)	45.0	46.1	46.9	47.8	48.8
参 考 频 率 (Hz)	50	51	52	53	54
测量值(Hz)	50.0	51.0	52.1	53.2	54.1
参 考 频 率 (Hz)	55				
测量值(Hz)	54.6				

3. 变换效率

输入电压 $U_i=29.8V$ $I_i=0.925A$ 输出电压 $U_o=25.5$ $R_L=28.5\Omega$

效率为 82.77%

4. 输入欠压保护功能

保护点测试电压：25V

实际测试结果：25.0V

5. 动作电流：1.51A