



2021年 TI 杯全国大学生电子设计竞赛 (浙江赛区)

设计报告

竞赛题号： C 题

竞赛题目： 三端口 DC-DC 变换器

参赛学生： 徐鑫磊 邹文 王来龙

参赛学校： 杭州电子科技大学

三端口 DC-DC 变换器（C 题）

【本科组】

摘要

本作品完成一个用于光储系统的三端口 DC-DC 变换器，其中主要包括以 TMS320F28069 核心控制电路、对接光伏板的 Boost 斩波电路、用于电池充放电的双向 Buck/Boost 斩波电路。TMS320F28069 核心控制器通过采样和反馈补偿，实时调节 Boost 斩波电路的输出等效电阻与模拟光伏电池内阻关系，设计最大功率跟踪（MPPT）算法，实现光伏输出功率最大化；针对双向 Buck/Boost 斩波电路，设计数字闭环控制算法，使其工作在充放电两种模式，并可自动切换，实现稳压输出，且工作效率大于 95%。在此基础上，对软件部分的数字滤波器和 PID 参数等进一步优化，实现较低的电压调整率与负载调整率。本作品所有参数指标均达到题目要求。本设计在“其他”项测试功能完成了 OLED 显示设计，且设置电池满电后退出工作。

关键词：双向 Buck/Boost 电路；三端口；MPPT；数字控制；电力电子

1. 系统方案论证与比较

本作品的系统方案主要包括控制电路设计、电池充放电电路设计、MPPT 控制算法设计三部分。

1.1 控制电路设计方案的论证与选择

方案一：利用纯模拟电路搭出整个控制电路，对最大功率点跟踪(MPPT)、电池充放电电路和负载电压稳定电路都用模拟方案实现。但是这种方案复杂度较大，调试困难，制作周期较长。

方案二：利用 DSP 为核心搭建整个数字控制框架，实现数字 PWM 控制、数字采样、控制环路设计等功能。数字控制方法，实现简单，调试可视性好，便于实时校正调试错误，可极大缩短调试周期。

综上所述，本系统选择方案二。

1.2 电池充放电电路方案的论证与选择

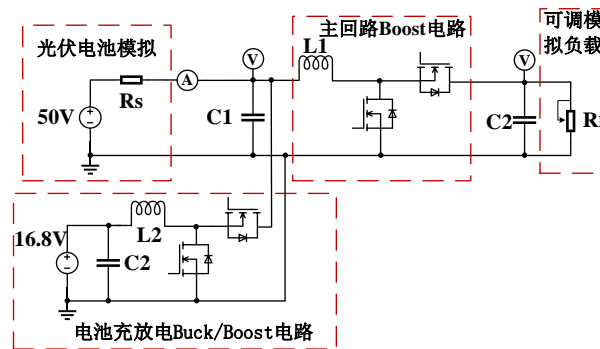


图 1 Boost 与 Buck/Boost 级联方案

方案一：如图 1 所示，电池充放电模块采用电池放电为 Boost 模式，充电为 Buck 模式的双向 Buck/Boost 电路（下文相同），将其连接在光伏输出侧，同时由光伏输出侧通过 Boost 电路与负载连接，如图 1 所示。在光伏电池电压 U_s 小于 33V 时，最大功率点跟踪电压 U_i 可能会低于电池电压，导致 Buck/Boost 电路无法实现 MPPT 功能。另外电池由 Buck/Boost 和 Boost 电路两级放电，损耗较大。

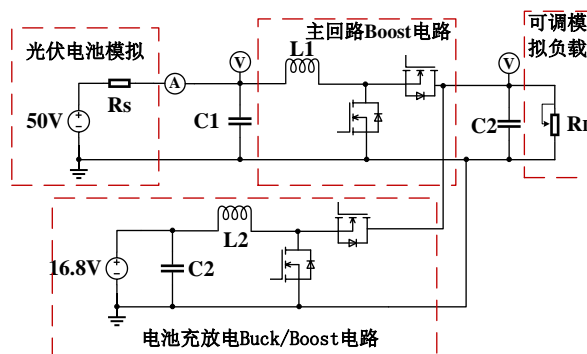


图 2 双 Boost 级联方案

方案二：如图 2 所示，电池充放电模块采用 Buck/Boost 电路，将其连接在主回路 Boost 电路的输出侧，并与负载并联。该方案可实现全范围的 MPPT 调节，并在电池放电时，只经过一级 Boost 电路，损耗较小。

综上所述，本系统选择方案二。

1.3 最大功率点跟踪控制（MPPT）方案的论证与选择

方案一：常见的基于扰动观察法的最大功率跟踪调整时间较长，对采样和电路精度要求较高，易受干扰影响，鲁棒性低。

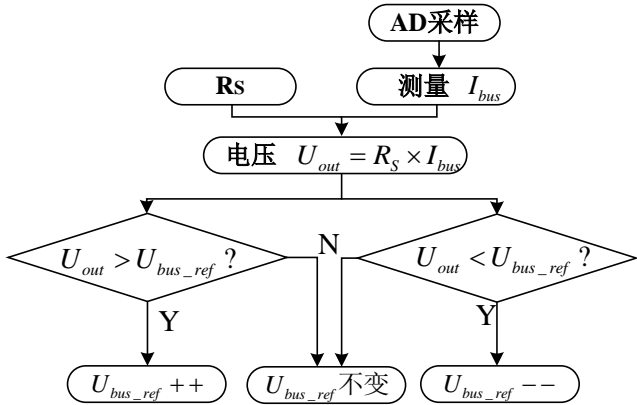


图 3 MPPT 算法流程

方案二：如图所示，因为电源内阻值 R_s 固定，由电路最大功率计算公式得出只要将电源输出负载的等效阻抗控制为 R_s 即可得追踪最大功率点。此方法逻辑简单、高效，调试周期短，且控制较为稳定。

综上所述，本系统选择方案二。

1.4 系统方案

通过对比分析，可采用的系统框架如图 4 所示，本系统以 TMS320F28069 为控制核心，包括 AD 信号调理采集模块、光伏电池模拟直流电源、Boost 主回路电路、电池管理及充放电控制模块以及可调电阻的负载等。

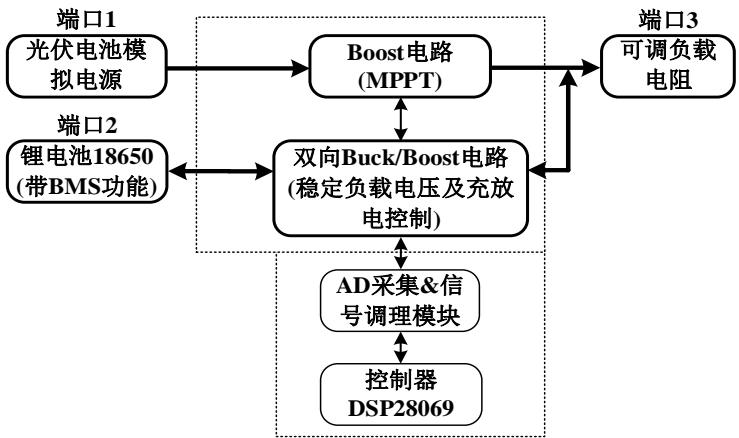


图 4 系统方案框图

2. 硬件电路设计

2.1 对接光伏板的 Boost 斩波电路器件选型

2.1.1 PWM 驱动电路器件的选型

由于 DSP 的 PWM 输出口的输出电压较低，且驱动能力不强，为了实现对 MOSFET 的驱动，设计采用专用驱动芯片 LM5109。LM5109 的开通和关断时间分别为 56ns 和 15ns，能够满足功率 MOSFET 的高速开通和关断。另外，LM5109 的功耗在同类芯片中较低，且具有欠压保护功能，满足电路功能的要求。

2.1.2 肖特基二极管的选择

选择型号为 SS510BF-S510B 的肖特基二极管，其耐压值为 100V，通过 1 A 电流时仅为 0.19V，具有导通压降和导通损耗小，恢复时间短，满足此题电路功能的要求。

2.1.3 功率 MOSFET 的选择

选择型号为 NVMFD6H846NLT1G 的功率 MOSFET，其导通电阻为 15mΩ（ $V_{GS}=10V, I_D=17A$ ），击穿电压为 80V，漏极电流最大值为 114A（ $V_{GS}=10V, 25^\circ C$ ），满足此题电路功能的要求。

2.1.4 电感参数计算

根据题目要求，PWM 占空比 D 计算要求为：

$$D = \frac{V_{out} + V_D - V_{in}}{V_{out} + V_D} = (30 + 0.4 - 25) / (30 + 0.4) = 0.177 \quad (1)$$

最大占空比计算可得：

$$D_{max} = \frac{V_{out} + V_D - V_{in(min)}}{V_{out} + V_D} = (30 + 0.4 - 12.5) / (30 + 0.4) = 0.5888 \quad (2)$$

理论电感值为：

$$L = \frac{V_{in} \times D \times (1 - D)}{I_{outmax} \times F_{SW}} = (30 + D \times (1 - D)) / (0.3 \times 1.2 \times 20K) = 1mH \quad (3)$$

电路通过的峰值电流为：

$$I_{L_{Peak}} = I_{L_{DCMAX}} + \Delta I_L / 2 = 2.76 + 0.3375 / 2 = 3A \quad (4)$$

考虑裕量，故选用 1mH，饱和电流为 5A 的铁硅铝电感。

2.1.5 电容参数计算

理论电容值和 ESR 为：

$$C_{out} \geq \frac{I_{outmax}}{V_{out} \times F_{SW}} = 1.2 / (0.01 \times 30 \times 20K) = 200\mu F \quad (5)$$

$$ESR < \frac{C_{out}}{I_D} = (0.01 \times 30) / 1 = 300m\Omega \quad (6)$$

故选用耐压值 100V，220uF，ESR<0.3Ω 的电容。

2.1.6 对接光伏板的 Boost 斩波电路图

见附录 1。

2.2 电池充放电的双向 Buck-Boost 斩波电路器件选型

电池充放电的双向 Buck/Boost 斩波电路与对接光伏板的 Boost 斩波电路参数基本一致，器件选型相同。见附录 2。

2.3 采样电路的器件选择

2.3.1 电流采样器件的选择

常用电流采样芯片有 INA826 和 ACS 系列，但 INA826 共模电压不够高，容易烧坏。而 ACS722 霍尔电流传感器成本低，精度高，体积小。且供电方便（工作电压为 3.3V），精度符合题目要求。

2.3.2 电压采样器件的选择

为了实现高精度电压采样，我们使用高精度采样电阻进行差分采样，并选用四运放 TL084 做信号的滤波、偏置、放大和阻抗匹配，保证采样电压稳定性和精度。

2.3.3 采样电路的电路图

见附录 3

2.4 辅助电源器件的选择

为了实现稳定的辅助电源电压，且要求宽范围输入得输出 12V，12V 转 5V，5V 转 3.3V，5V 转 -5V 等，我们分别选用低功耗电源芯片：SY8502，MP2233，AMS1117 和 LM2776，只要有一路宽范围直流电输入，就可以获得一系列辅助电源，且转换效率高，符合题目高效率的需求，见附录 4。

3. 软件设计

软件控制流程如图所示，本作品中的控制采用中断模式进行周期性控制，根据电压误差实时调节 PWM 的占空比，实现三端口 DC-DC 电路的控制。

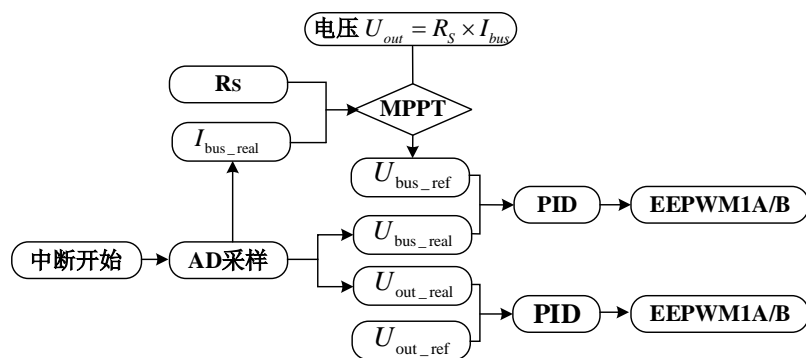


图 5 控制流程框图

软件源代码见附录 5。

3.1 控制方法与参数计算

单片机根据电压的设定值和电压反馈信号调整 PWM 控制信号的占空比，实现主回路 Boost 控制 MPPT 电压稳定，充放电同时，单片机与采样电路相结合，将为系统提供过流保护、过压保护等措施，并电池输入输出功率的测量和显示。

$$\text{PWM 信号占空比: } D = \frac{V_{\text{out}} + V_D - V_{\text{in}}}{V_{\text{out}} + V_D} ;$$

当 $U_s=25\text{V}$ 时， $U_I=U_s/2=12.5\text{V}$ ，最大值 $D_{\text{MAX}}=0.5888$ ；

当 $U_s=55\text{V}$ 时， $U_I=U_s/2=27.5\text{V}$ ，最小值 $D_{\text{MIN}}=0.0954$ 。

系统对于单片机 A/D 采样精度的要求：题目中最高精度要求为 0.1%，欲达到这一精度，A/D 精度要达到 1/1000，即至少为 9 位 A/D，DSP28069 内置 A/D 为 12 位，只要合理设定测量范围，完全可以达到题目的精度要求。

4 电路效率优化和保护方案的实现

4.1 电路效率优化

4.1.1 Boost 电路中开关管的选取

从工作频率和降低损耗的角度考虑，选择电力场效应管作为开关管。最初我们采用了单个 MOSFET，后来发现损耗较高，后来采用了两个 MOSFET 并联的方式降低了损耗。

4.1.2 选择合适的开关工作频率

为降低开关损耗，应尽量降低工作频率；为避免产生噪声，工作频率不应在音频内。我们起初把开关频率设定为 60kHz，但是后来发现效率较低，效率优化后改为 20kHz。

4.1.3 主电路半桥中二极管的选取

开关电源对于二极管的开关速度要求较高，可从快速恢复二极管和肖特基

二极管中加以选择。与快速恢复二极管相比，肖特基二极管具有正向压降很小、恢复时间更短的优点，但反向耐压较低，多用于低压场合。考虑到降低损耗和低压应用的实际，选择肖特基二极管。

4.1.4 控制电路及保护电路的措施：

控制电路采取低功耗 TI 的 DSP TMS320F28069，其工作电流仅 $280\mu\text{A}$ ；显示采取低功耗 OLED；控制及保护电路的电源采取了降低功耗的方式，具体实现见附录图 2，单片机由低功耗直流稳压芯片单独供电。

4.1.5 单片机功耗：

将运行中有大约 1.35W 功耗的 DSP 的主频从 90MHz 降到 10MHz ，功耗降低到大约 0.9W 。

4.2 电路保护

在电池输入输出端串联一支保险丝（ 250V ， 5A ），从而实现过流保护；反接保护功能由输入端的正向二极管完成，但直流输入反接时整个电路断路；利用 NVMFD6H846NLT1G 的欠压保护功能，对其电源电压进行检测，使场效应管严格工作在非饱和区或截止区，防止场效应管进入饱和区而损坏；在程序设计中加入电池电流过流保护，过压保护，可随时停止电路。

4.3 拓展部分功能实现

4.3.1 电路工作模式显示装置

根据电池方向判断电池的充放电状态并在 OLED 当前电路工作模式。

4.3.2 电池满电监测与电源管理机制

当储能电池充满之后，光伏自动退出 MPPT，其输出功率等于负载吸收功率，电池不再充电，通过按复位键可触发该功能进行测试。

5. 测试方案与测试结果

5.1 测试仪器清单

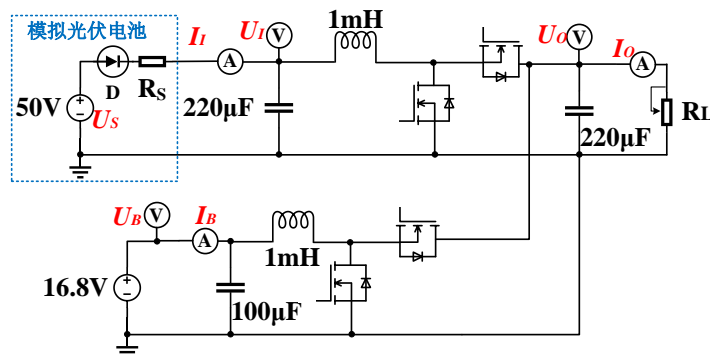


图 6 测试电路图

测试电路如图 6 所示。测试采用六台五位半万用表，型号为 SIGLENT SDM3055X-E，分别测量模拟光伏电池输出电压 U_I 、电流 I_I ，电池电压 U_B 、电流 I_B ，输出电压 U_O 、电流 I_O 。用学生电源输出和调节 U_S 。负载电流通过本作品后端的开关进行模式切换。电池采用具有 BMS 功能的田字四串 18650 电池，安全电压为 14.8V 到 16.6V，通过一个电池保护板与主电路相连接。负载电路由两个 50Ω 大功率黄金铝壳电阻和一个开关组成，可通过开关调节负载在 50 欧和 25 欧档位切换，即调节负载电流在 0.6A 和 1.2A 档位切换。具体测试设备如表 1。

表 1 测试仪器清单

测试仪器	品牌及型号
万用表	鼎阳科技 SIGLENT SDM3055X-E(五位半)
学生电源	普源精电(RIGOL) DP832 电源(最大 32V,3A,两口串联)
电池	池能@2600mAh(四节 18650 电池)
电阻	大功率黄金铝壳电阻 $50\Omega//50\Omega$

5.2 测试方法

(1)效率测试

基础 4)条件下: $U_I=24.95V, I_I=2.52A; U_O=30V, I_O=1.19A; U_B=16.12V, I_B=1.521A$

$$\eta_I = (U_O * I_O + U_B * I_B) / (U_I * I_I) * 100\% = 95.8\%$$

发挥 2)部分: $U_I=17.47V, I_I=1.81A; U_O=30V, I_O=1.19A; U_B=16.02V, I_B=-0.363A$ 。

$$\eta_{II} = (U_O * I_O) / (U_I * I_I + U_B * -I_B) * 100\% = 95.3\%$$

(2)负载调整率 S_I 测试

基础 3)条件下: $I_O=1.2A$ 时, $U_{O1.2}=30.01V$; $I_O=0.6A$ 时, $U_{O0.6}=30.02V$ 。

负载调整率 $S_I = (U_{O0.6} - U_{O1.2}) / U_{O1.2} = 0.03\%$ 。多次测试均小于 0.4%。

发挥 3)条件下: $I_O=1.2A$ 时, $U_{O1.2}=30.023V$; $I_O=0.6A$ 时, $U_{O0.6}=30.036V$

负载调整率 $S_I = (U_{O0.6} - U_{O1.2}) / U_{O1.2} = 0.04\%$ 。多次测试均小于 0.05%。

(3)电压调整率 S_U 测试

基础 2)条件下: $U_S=55V$ 时, $U_{O55}=30.01V$; $U_S=45V$ 时, $U_{O45}=30.02V$ 。

电压调整率 $S_U = (U_{O55} - U_{O45}) / U_{O45} = 0.03\%$ 。多次测试都小于 0.03%。

发挥 1)条件下: $U_S=55V$ 时, $U_{O55}=30.01V$; $U_S=25V$ 时, $U_{O25}=30.0V$ 。

电压调整率 $S_U = (U_{O55} - U_{O25}) / U_{O25} = 0.03\%$ 。多次测试都小于 0.03%。

(4)最大功率点跟踪

发挥 1)条件下: $U_S=55V$ 时, $U_{I55}=27.47V$; $U_S=45V$ 时, $U_{I45}=22.43V$; $U_S=35V$

时, $U_{I35}=17.461V$; $U_S=25V$ 时, $U_{I25}=12.53V$

$$\text{MAX}\delta_I = \left| U_I - \frac{U_S}{2} \right| = 0.07V$$

(5)自动切换模式

将负载从 25 切换到 50 欧姆时, 从电池充电模式 $I_B>0A$ 自动转换到放电模式 $I_B<0A$ $S_I\leq 0.05\%$, 满足自动切换模式要求。

5.3 测试结果分析

表 2 测试数据与设计指标的比较

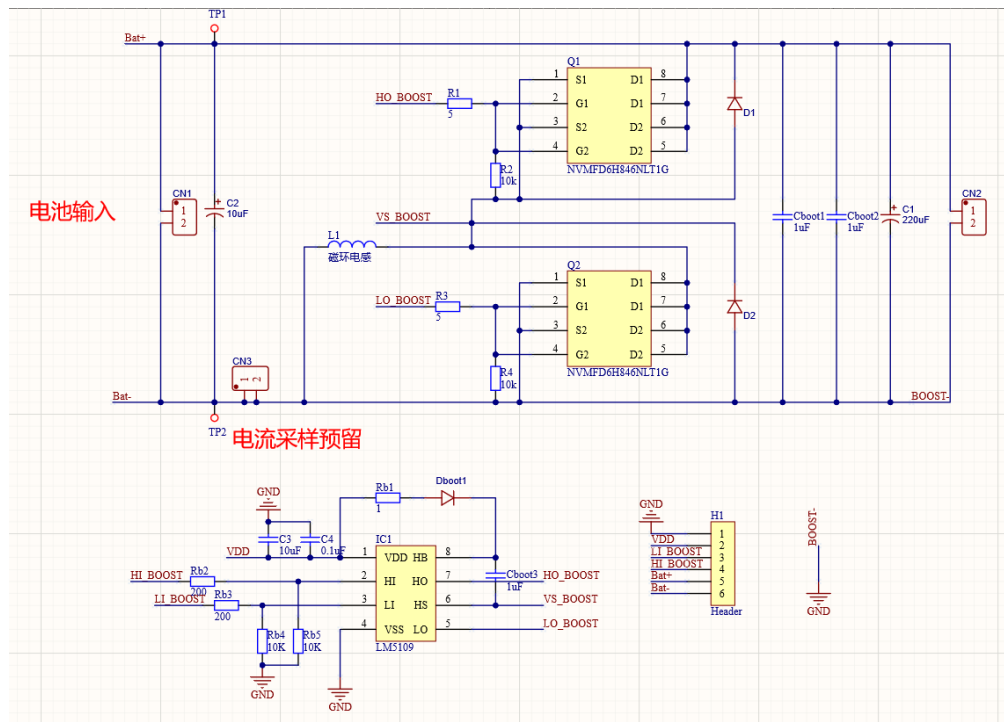
测试项目	基本要求	电路测试结果
基础 1)	$U_O=30V\pm 0.1V$ $I_B\geq 0.1A$	$U_O=30V\pm 0.05V$ $I_B=1.22A$
基础 2)	$S_U\leq 0.5\%$	$S_U\leq 0.03\%$
基础 3)	$S_I\leq 0.5\%$	$S_I\leq 0.04\%$
基础 4)	$\eta_I\geq 90\%$	$\eta_I=95.9\%$
发挥 1)	$\delta_I < 0.1V$ $S_U\leq 0.5\%$	$\delta_I < 0.07V$ $S_U\leq 0.03\%$
发挥 2)	$\eta_{II}\geq 95\%$	$\eta_{II}=95.3\%$
发挥 3)	模式一自动转换模式二, $S_I\leq 0.1\%$	将负载从 25 切换到 50 欧姆时, 电池从充电模式 $I_B>0A$ 自动切换到放电模式 $I_B<0A$ $S_I\leq 0.05\%$
其他		OLED 显示电路工作模式, 电池满电后退出。

各步骤具体测试结果如表 2 所示。从表中可以看出, 采用本设计各项要求指标均已达到。但本系统在效率和 MPPT 的精度可进一步提高, 在效率提升方面可替换导通损耗更小的半导体器件, 优化器件开关频率; 在 MPPT 提升方面, 可在电阻 R_S 上增加散热装置, 减少 R_S 的温漂。由于串接在本系统的电流表内阻偏大, 导致部分参数产生偏差, 可采用内阻更小的电流表来改善。

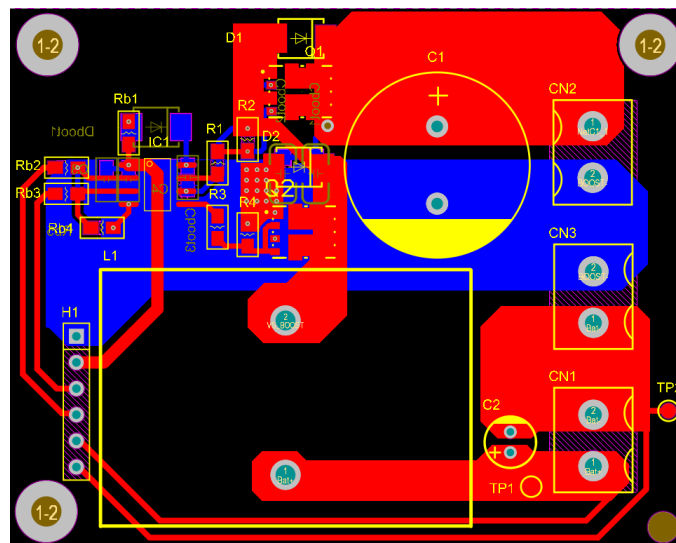
6. 总结

本系统以 TMS320F28069 为主控制器, 光伏 Boost 斩波电路、电池充放电 Buck/Boost 斩波电路为核心, 设计并制作用于光储系统的三端口 DC-DC 变换器。经测试, 系统能够实现基础部分所有要求。通过实时调节输出等效电阻与模拟光伏电池内阻关系, 成功设计了高效的最大功率跟踪控制 (MPPT) 算法; 通过优化器件选型, 实现模式 I 效率 $\eta_I=95.8\%$, 模式 II 效率 $\eta_{II}=95.3\%$; 通过数字滤波器及 PID 参数优化, 实现电压调整率 $S_U < 0.03\%$, 负载变化时的负载调整率 $S_I < 0.04\%$; 附加了工作模式 OLED 显示及电池满电自动切断等功能, 且实现过流、欠压、过压保护等功能, 完成并超出了基本和发挥部分的全部任务要求。

附录 1：对接光伏板的 Boost 斩波电路部分

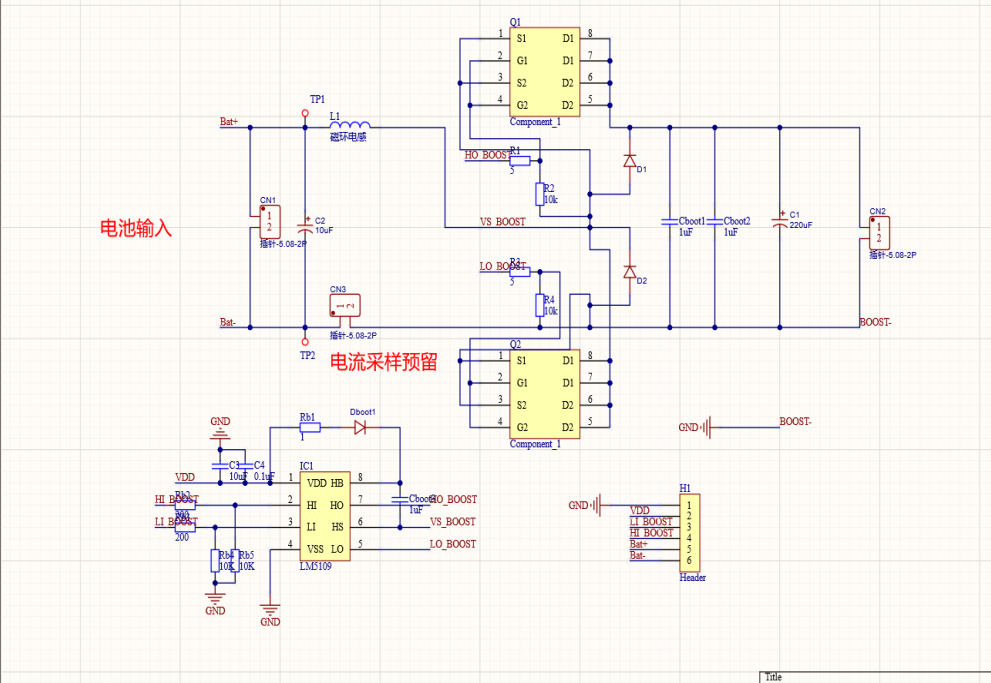


对接光伏板的 Boost 斩波电路原理图

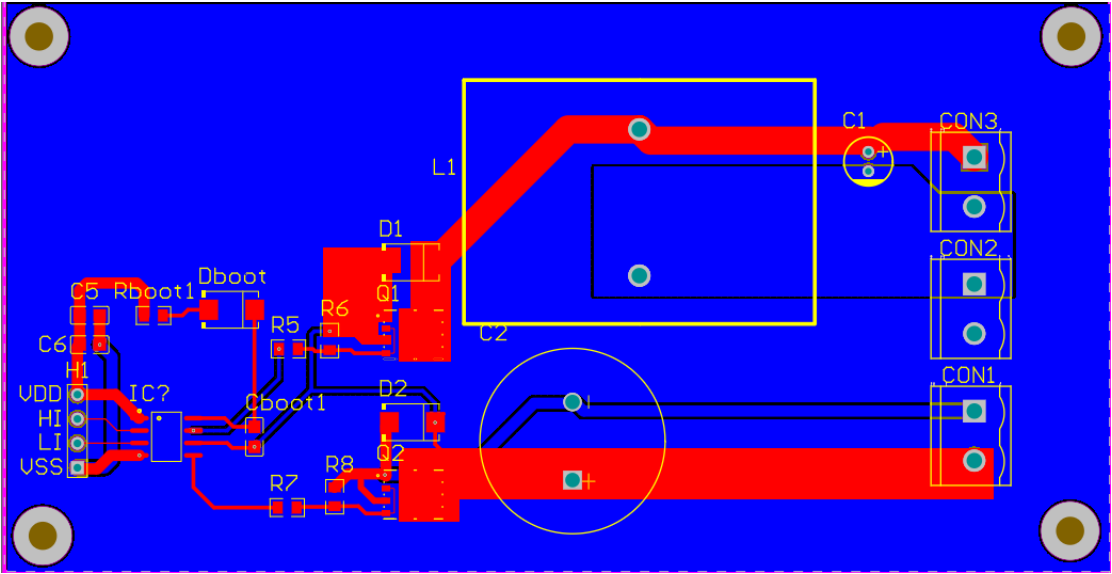


对接光伏板的 Boost 斩波电路 PCB

附录 2：电池充放电的双向 Buck/Boost 斩波电路部分

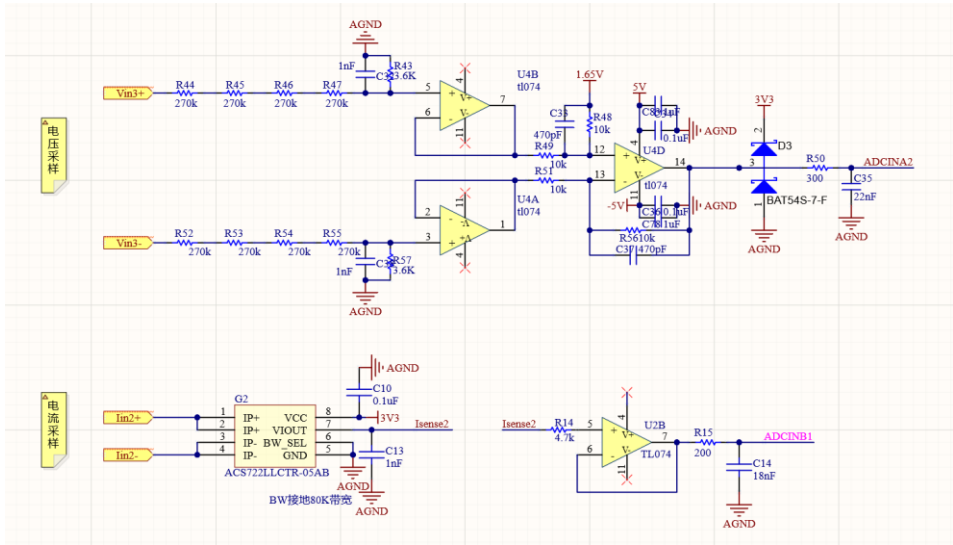


电池充放电的双向 Buck/Boost 斩波电路原理图

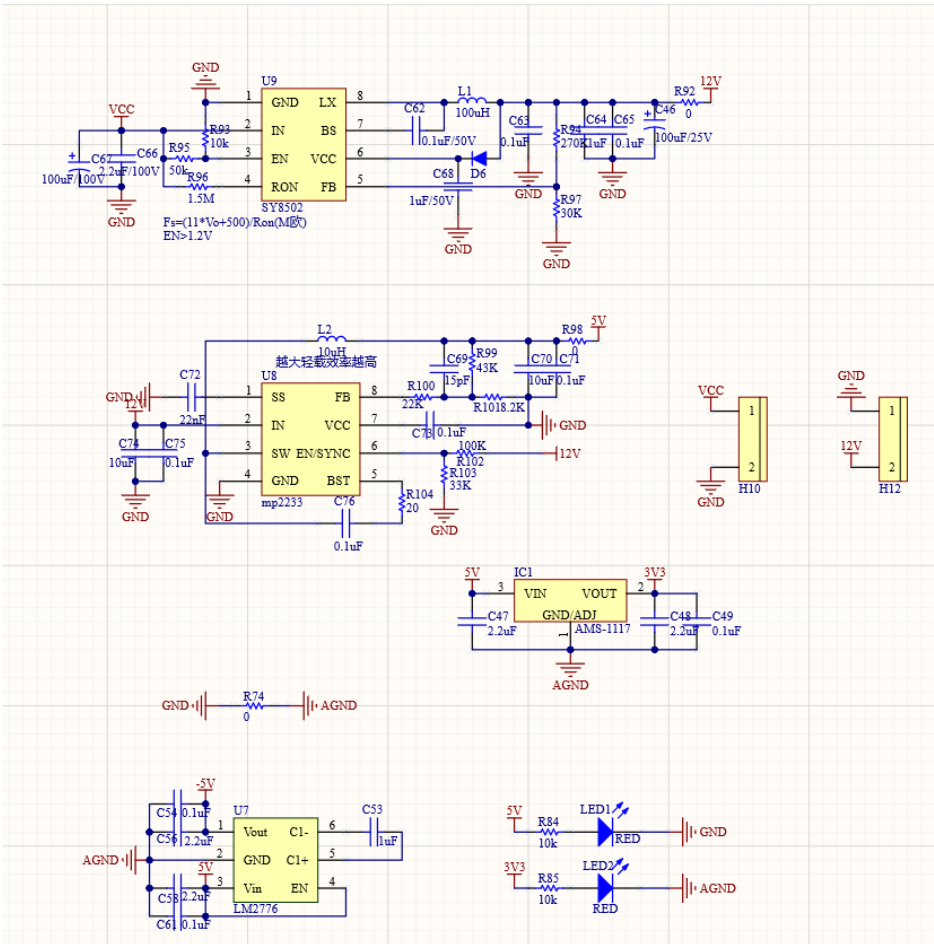


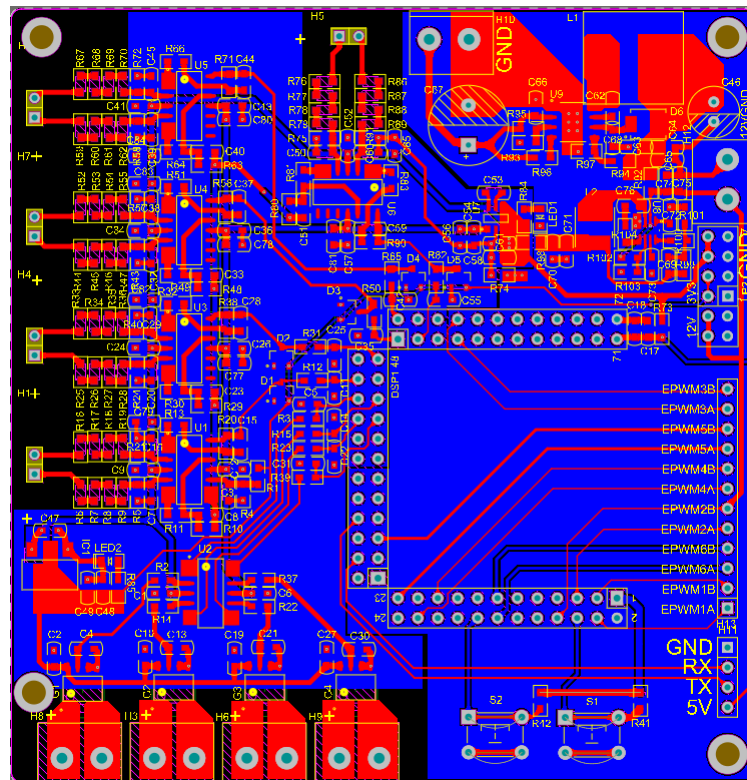
电池充放电的双向 Buck/Boost 斩波电路 PCB

附录 3：采样和辅助电源部分



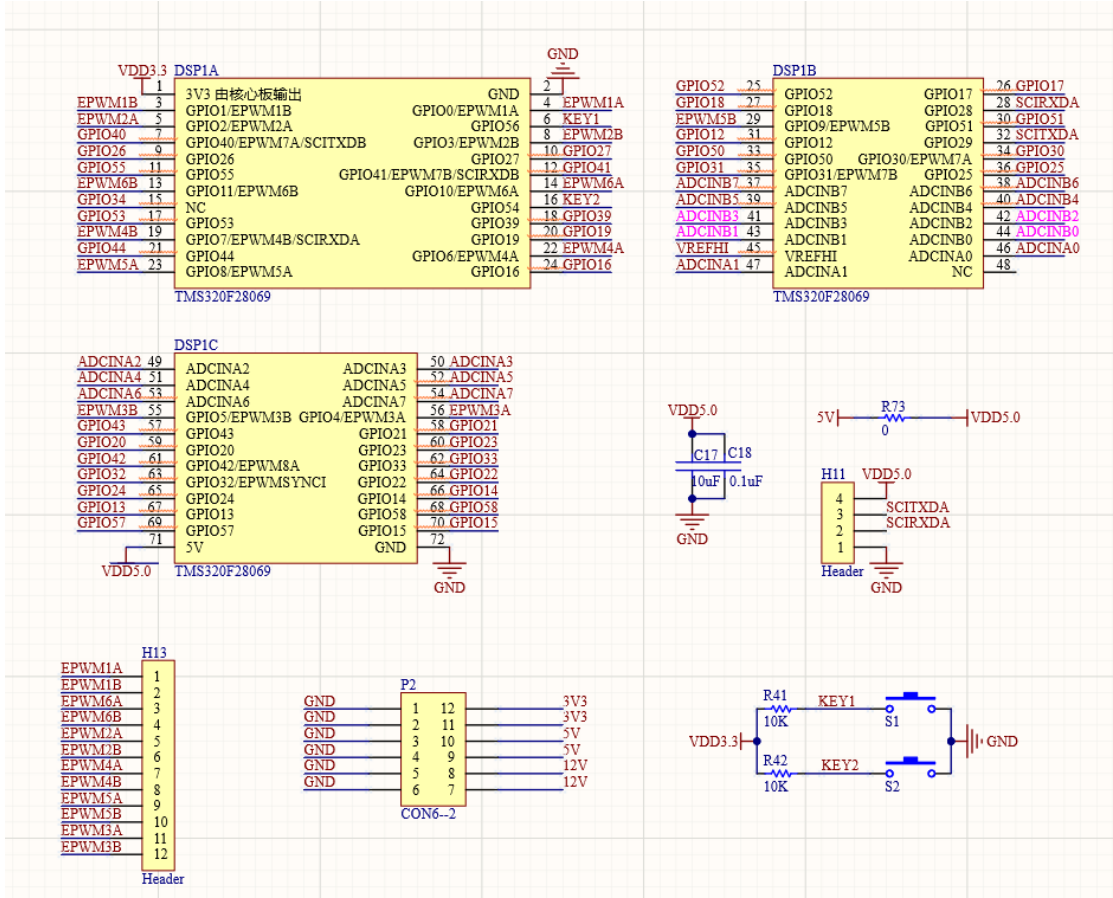
采样模块原理图





采样和辅助电源模块 PCB

附录 4：单片机最小系统板



单片机最小系统板原理图

附录 5: C 题源代码

```
__interrupt void control_boost(void)
{
    //AD 采样部分
    I_bat_real=filter_T0*0.003052-6.16;
    I_bus_real=filter_T1*0.003052-6.145;
    V_bus_real=filter_T3*0.0974853515-197.9;
    V_out_real=filter_T4*0.0974853515-195.62;

    //MPPT 算法实现
    V_bus_real_total+=V_bus_real;
    I_bus_real_total+=I_bus_real;
    if(count0>50)
    {
        equ_R=V_bus_real_total/I_bus_real_total;
        if(V_bus_ref>10.04*(I_bus_real))
        {
            V_bus_ref-=0.003;
        }
        else if(V_bus_ref<9.96*(I_bus_real))
        {
            V_bus_ref+=0.003;
        }
        count0=0;
        V_bus_real_total=0;
        I_bus_real_total=0;
    }
    count0++;
    if(V_bus_ref>28) V_bus_ref=30;
    if(V_bus_ref<10) V_bus_ref=10;

    //控制 MPPT 功能
    Kp_V_bus=80;
    Ki_V_bus=1.2;
    error_V_bus=V_bus_real-V_bus_ref;
    sum_error_V_bus+=error_V_bus;
    if(sum_error_V_bus>=300)    sum_error_V_bus=300;
    if(sum_error_V_bus<=-300)    sum_error_V_bus=-300;
    PI_V_bus=Kp_V_bus*error_V_bus+Ki_V_bus*sum_error_V_bus;
    if(PI_V_bus>=475)    PI_V_bus=475;
    if(PI_V_bus<=25)    PI_V_bus=25;
    //1A 控制主电路 MPPT
    EPwm1Regs.CMPA.half.CMPA=PI_V_bus;
```



```

//控制输出电压 30v
V_out_ref=30;
Kp_V_out=100;
Ki_V_out=1.2;
error_V_out=V_out_ref-V_out_real;
sum_error_V_out+=error_V_out;
if(sum_error_V_out>=300)    sum_error_V_out=300;
if(sum_error_V_out<=-300)    sum_error_V_out=-300;
PI_V_out=Kp_V_out*error_V_out+Ki_V_out*sum_error_V_out;
if(PI_V_out>=475)    PI_V_out=475;
if(PI_V_out<=25)    PI_V_out=25;
//2A 控制电池给负载供电
EPwm2Regs.CMPA.half.CMPA=PI_V_out;
AdcRegs.ADCINTFLGCLR.bit.ADCINT1 = 1;
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;
}

```