

2016年TI杯大学生电子设计竞赛

朱*_顾*_陈*

A 题：降压型直流开关稳压电源

摘要：系统核心部分均采用 TI 的器件，包括降压控制器 LM5117 芯片和 CSD18532KCS MOS 管，设计并制作一个降压型直流开关稳压电源。系统包括 Buck 降压电路、稳压电路、限流电路。系统首先由以 LM5117 芯片为核心的 Buck 降压电路将输入的直流电压，输出电压通过电阻分压反馈至 FB 脚，自调整 MOS 管输出电压占空比，从而得到 5V 稳压。题目制定条件下，用 TI 提供的 Tina 仿真软件和 Webench 设计仿真均能顺利通过，焊出成品，经测试，各部分指标均可实现。此外，系统具有输出过流保护功能，并且效率可达 90%以上。

关键词：LM5117、CSD18532KCS、Buck 电路、稳压限流

一、方案论证

1. 总体方案描述

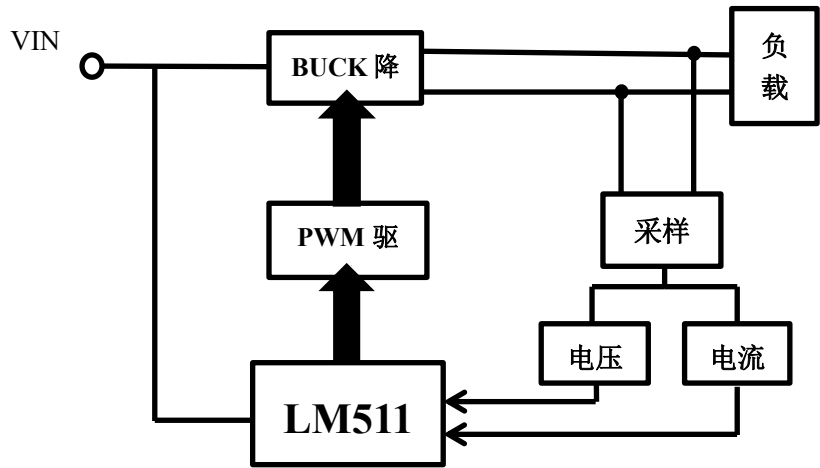


图 1 整体流程图

如图 1 所示，输入电压，使 LM5117 芯片工作，输出 PWM 波来驱动 MOS 管开断，由 BUCK 电路实现降压，通过对负载的电压电流采样，再反馈回芯片，由芯片自动调节 PWM 波的占空比，最终稳压在设置电压。

2. 比较与选择

1) 稳压部分

Rb2 对输出电压的分压反馈到 FB 脚。如图 2。

FB脚说明：反馈脚，内部误差放大器的反相输入。取自此引脚输出的电阻分压信号可设定输出电压电平。FB 引脚的调节阈值为 0.8V。

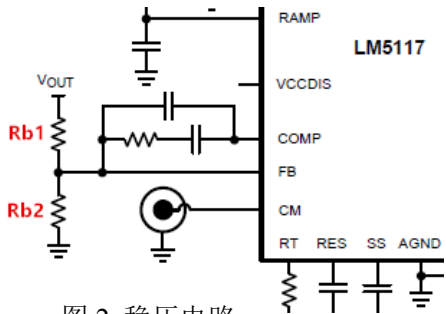


图 2 稳压电路

2) 限流部分

方案一：LMV431 和 PNP 晶体管可在电流环路中建立一个电压-电流放大器。当输出电流小于电流限制设定点时，此放大器电路不影响正常运行。当输出电流高于电流限制设定点时，PNP 晶体管灌出一个电流进入 CRAMP，并在输出电流小于或等于电流限制设定点之前，增加仿真电感电流斜坡的正斜率。如图3和4。

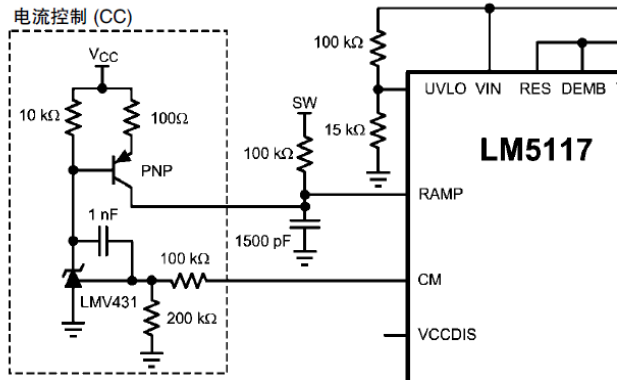


图 3 限流电路

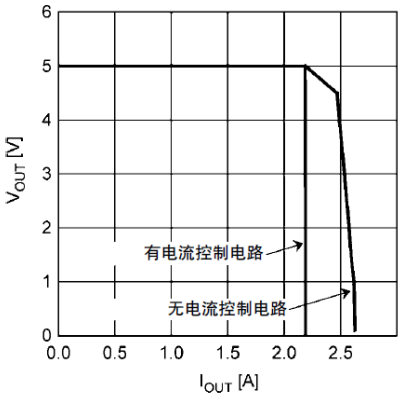


图 4 电压与电流的关系

方案二：通过LM5117芯片提供的CM脚输出的平均电压，通过电阻分压至VCCDIS脚，实现控制输出电流。如图5。
CM 输出的平均值用以下方法计算：

$$V_{CM_AVE} = (I_{PEAK} + I_{VALLEY}) \times R_S \times A_S \quad [V]$$

VCCDIS脚说明：当 $V_{CCDIS} > 1.25V$ ，内部 VCC 稳压器被禁用。VCCDIS有一个内部 $500\text{ k}\Omega$ 下拉电阻，当此引脚浮置时，可启用 VCC 稳压器。用一个连接至外部偏置电源的，电阻分压器上拉 VCCDIS 至 $1.25V$ 以上，可以重写 (override) $500\text{ k}\Omega$ 内部下拉电阻。

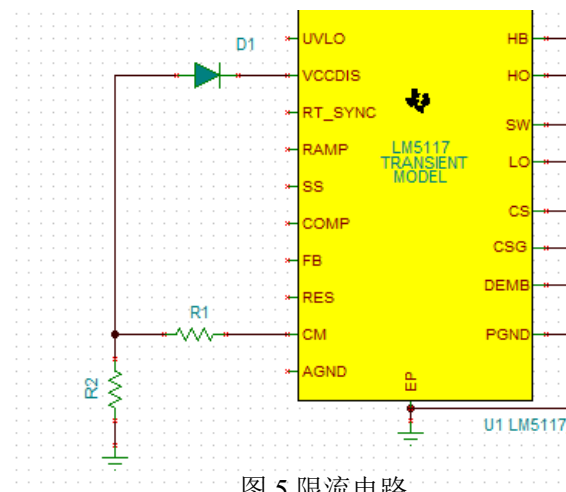


图 5 限流电路

因实验室没有低电压（ $1.24V$ ）可调节精密并联稳压器LMV431芯片，而网上购买考虑到时间因素，寄到学校需要一定时间可能会来不及，故本题采用方案二。

3) 负载识别功能

Rf1为电阻识别端口，通过LM358放大器对输出电压Vout0进行放大调整，输出电压Vout1即可满足要求。如图6。

$$V_{out1} = \frac{R_{f1}}{1\text{k}\Omega} V_{out0}$$

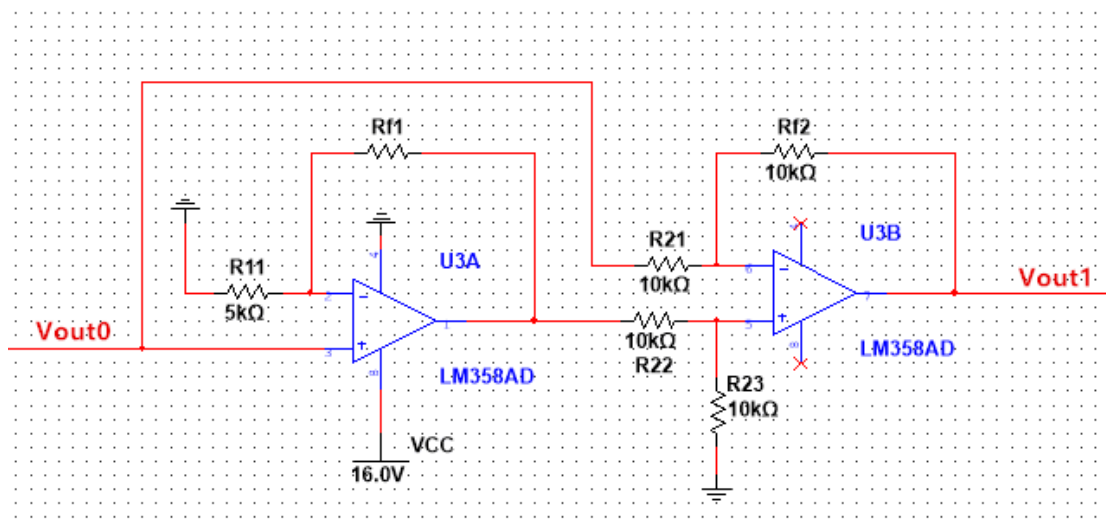


图 6 负载识别电路

二、理论分析与计算

1. 降低纹波的方法

利用输出电容器可以平滑电感纹波电流引起的输出电压纹波，并在瞬态负载条件下提供一个充电电源。对于这个设计实例，选择了一个最大 ESR 为 $20\text{m}\Omega$ 的 $470\mu\text{F}$ 电解电容作为主输出电容。具有最大 ESR 的输出纹波电压的基本元件近似值为：

$$\Delta V_{out} = I_{pp} \times \sqrt{R_{ESR}^2 + \left(\frac{1}{8 \times f_{sw} \times C_{out}} \right)^2}$$

其他低 ESR/ESL 的 CBB 电容器可以与主输出电容并联起来，以进一步降低输出电压纹波和尖峰。本题中加入了多个 $4.7\mu\text{F}$ 的 CBB 电容，进一步降低其纹波。

2. DC-DC 变换方法

BUCK 电路的脉冲宽度调制方式，芯片输出 PWM 波至 MOS 管来控制其导通与关断，开关脉冲的频率一定，通过改变脉冲输出宽度，即 MOS 导通时间，来使输出电压达到要求。而该 MOS 管驱动电压的占空比由芯片的反馈脚自动调节。

3. 稳压控制方法

利用芯片提供的 FB 脚即反馈脚，其调节阈值为 0.8V ，调节好自此引脚输出的电阻分压信号反馈至芯片，内部具有自动调节功能，输出不断改变的 MOS 管驱动电压占空比，最后即可稳定输出指定电压。

电阻的确定，利用以下计算公式：

$$\frac{R_{b1}}{R_{b2}} = \frac{V_{out}}{0.8} - 1$$

三、 电路设计

1. 主回路与器件选择

输出电压	$V_{out}=5\text{V}$
满载电流	$I=3\text{A}$
最小输入电压	$V_{inmax}=17.6\text{V}$
最大输入电压	$V_{inmax}=13.6\text{V}$
开关频率	$f(sw)=50\text{kHz}$

定时电阻 RT

$$R_T = \frac{5.2 \times 10^9}{50 \times 10^3} - 948 = 104000\Omega \quad R_T \text{ 选定了 } 100\text{ k}\Omega \text{ 的标准值。}$$

输出电感 LO

$$L_0 = \frac{V_{OUT}}{I_{PP(MAX)} \times f_{SW}} \times \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN(MAX)}}\right) [\text{H}]$$

LO 选择的最接近标准值为 60 μH。
使用60 μH 的 LO 值。

$$L_0 = \frac{5V}{3A \times 0.4 \times 50\text{KHZ}} \times \left(1 - \frac{5V}{18V}\right) = 60.2[\mu\text{H}]$$

$$I_{PP(MAX)} = \frac{5V}{60\mu\text{H} \times 50\text{KHZ}} \times \left(1 - \frac{5V}{18V}\right) \approx 1.2A$$

在最小输入电压时，这个值是

1.03A。

电流检测电阻 RS

$$R_S = \frac{V_{CS(TH)}}{I_{OUT(MAX)} + \frac{V_{OUT} \times K}{f_{SW} \times L_0} - \frac{I_{PP}}{2}}$$

$$R_S = \frac{0.12V}{3 \times 1.3 + \frac{5V \times 1}{50\text{KHZ} \times 60\mu\text{H}} - \frac{1.02}{2}} \approx 23.7\text{m}\Omega$$

所以用两个50m Ω 并联。

斜坡电阻 RRAMP 和斜坡电容 CRAMP

$$R_{RAMP} = \frac{L_0}{K \times C_{RAMP} \times R_S \times A_S} \Omega$$

RRAMP 选择了标准值 250 kΩ。

$$R_{RAMP} = \frac{60\mu\text{H}}{1 \times 1\text{nF} \times 25\text{m}\Omega \times 10} = 240\text{ K}\Omega$$

环路补偿元件 CCOMP、RCOMP 和 CHF

$$f_{CROSS} = 50/10 = 5\text{KHZ}$$

$$R_{COMP} = 2\pi \times R_S \times A_S \times C_{OUT} \times R_{FB2} \times f_{CROSS} \Omega$$

$$R_{COMP} = 2\pi \times 25\text{m}\Omega \times 10 \times 514\mu\text{F} \times 5\text{K}\Omega \times 5\text{KHZ} = 20184 \Omega$$

RCOMP 选择的标准值为 20 kΩ。

$$C_{COMP} = \frac{R_{LOAD} \times C_{OUT}}{R_{COMP}} [F]$$

CCOMP 选定的标准值为 47 nF。

$$C_{COMP} = \frac{\frac{5V}{3A} \times 514\mu\text{F}}{20\text{ K}\Omega} \approx 42.8[\mu\text{F}]$$

$$C_{HF} = \frac{R_{ESR} \times C_{OUT} \times C_{COMP}}{R_{COMP} \times C_{COMP} - R_{ESR} \times C_{OUT}} [F]$$

因为没有接近的电容器，故这

$$C_{HF} = \frac{10\text{m}\Omega \times 514\mu\text{H} \times 47\text{nF}}{20\text{K}\Omega \times 47\text{nF} - 10\text{m}\Omega \times 514\mu\text{F}} \approx 258.4[\text{pF}]$$

里用两个470pF串联实现。

四、测试方案与测试结果

1. 测试方案及测试条件

四通道隔离示波器，型号 TPS2024B

学生电源，型号 1731SLL5A

万用表，型号 MY65

学生电源供电 13~18V，通过万用表测量输出电流和电压，通过示波器测量输出电压的纹波。

2. 测试结果及其完整性

1) 输出直流电压 U_O 测试：在输入直流电压 $U_S=16V$ 时，用万用表测量输出直流电压 U_O ，测试结果如表 1。

负载	空载	10 Ω	3 Ω	2 Ω	1.5 Ω
输出电压 U_O	5.031	5.022	5.012	5.000	4.786

(2) 输入额定电压 16V，最大输出电流： $I_O \geq 3A$ ；

(3) 测得输出噪声纹波电压峰峰值： $U_{OPP} = 180mV$ 左右；

(4) 测得满载 I_{Omax} 时电压 $U = 4.85V$

测得轻载 $0.2I_{Omax}$ 时电压 $U=5.01V$

负载调整率：

$$S_i = \left| \frac{U_{O \text{ 轻载}}}{U_{O \text{ 满载}}} - 1 \right| \times 100\% = 3.19\% \quad (U_{IN} = 16V);$$

(5) 测得 $U_{O17.6V}=4.999V$ $U_{O13.6V}=4.966V$

U_{IN} 变化到 17.6V 和 13.6V，电压调整率：

$$S_V = \frac{\max(|U_{O17.6V} - U_{O16V}|, |U_{O16V} - U_{O13.6V}|)}{U_{O16V}} \times 100\% = 0.68\%$$

(6) 效率 $\eta=92\%$ ；

(7) 具有过流保护功能，动作电流 $I_{Oth} = 3.2A$ ；

(8) 电源具有负载识别功能。增加 1 个 2 端子端口，端口可外接电阻 $R(1k\Omega-10k\Omega)$ 作为负载识别端口。电源根据通过测量端口识别电阻 R 的阻值，确定输出电压， $U_O = \frac{R}{1k\Omega} (V)$ ；

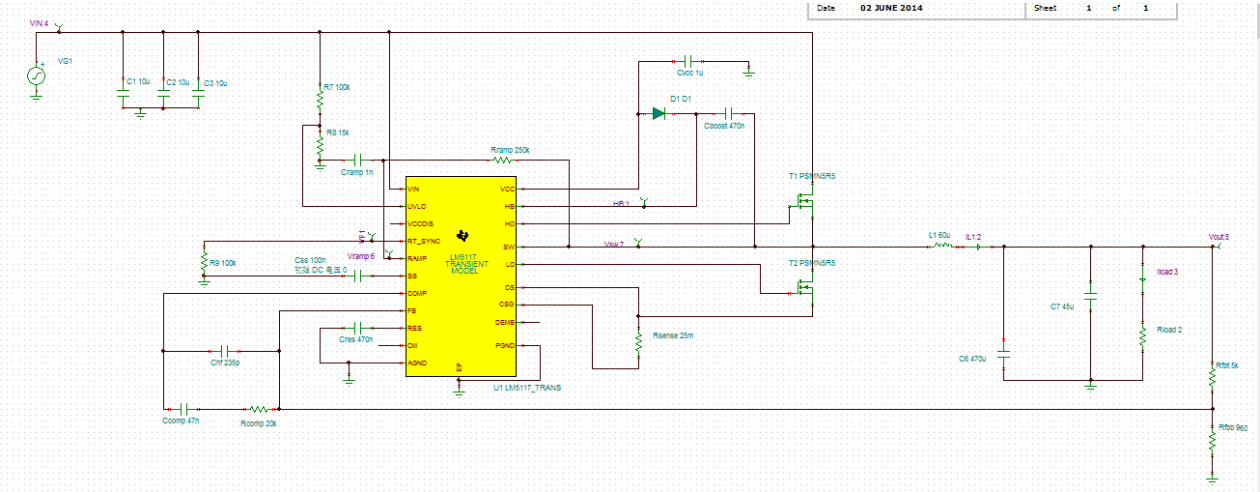
(9) 电源不含负载 R_L 的重量约为 0.19kg。

3. 测试结果分析

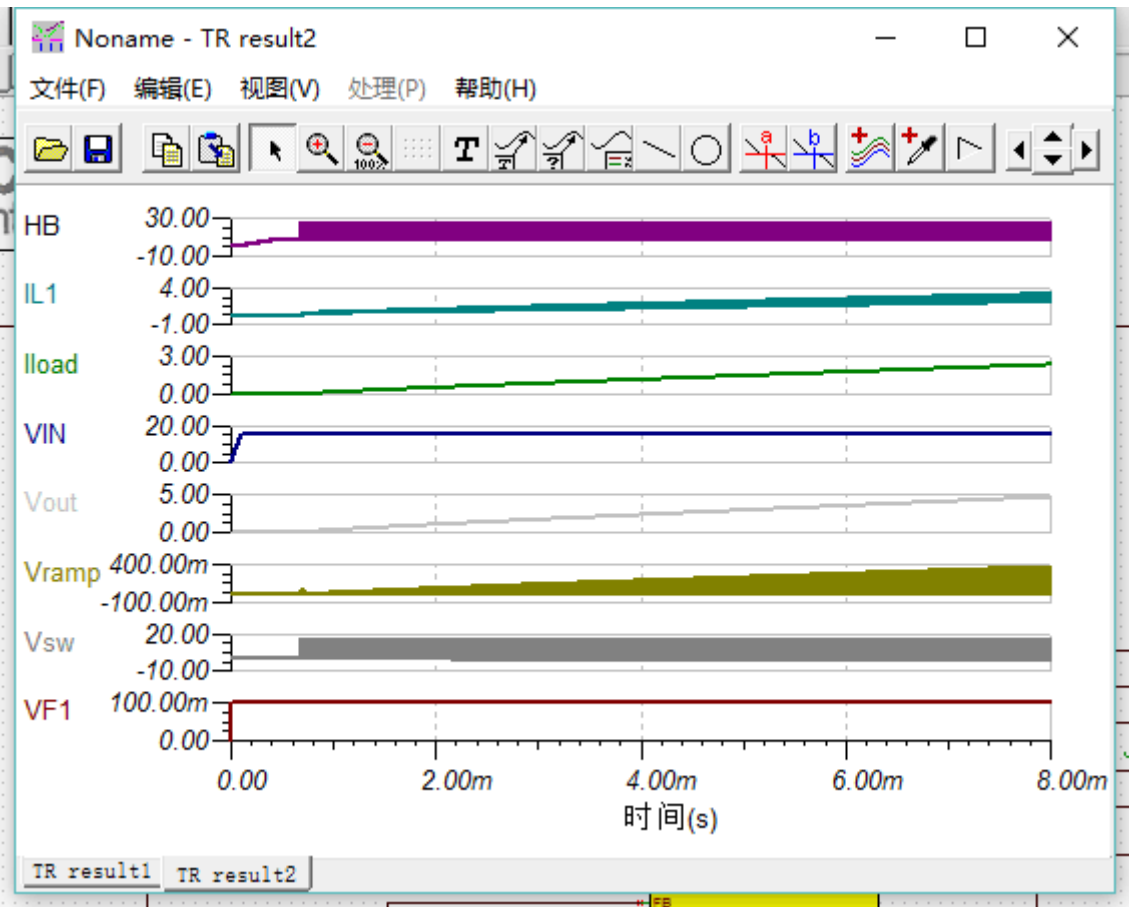
通过对测试数据分析可知，在输入直流电压 $U_S=16V$ 条件下，系统带负载能力强，输出直流电压 U_O 稳定为 $5V \pm 0.05V$ 。系统的负载调整率和电压调整率低，应该跟我们的 PCB 板布局以及使用高品质低电阻的电容有关。

附录:

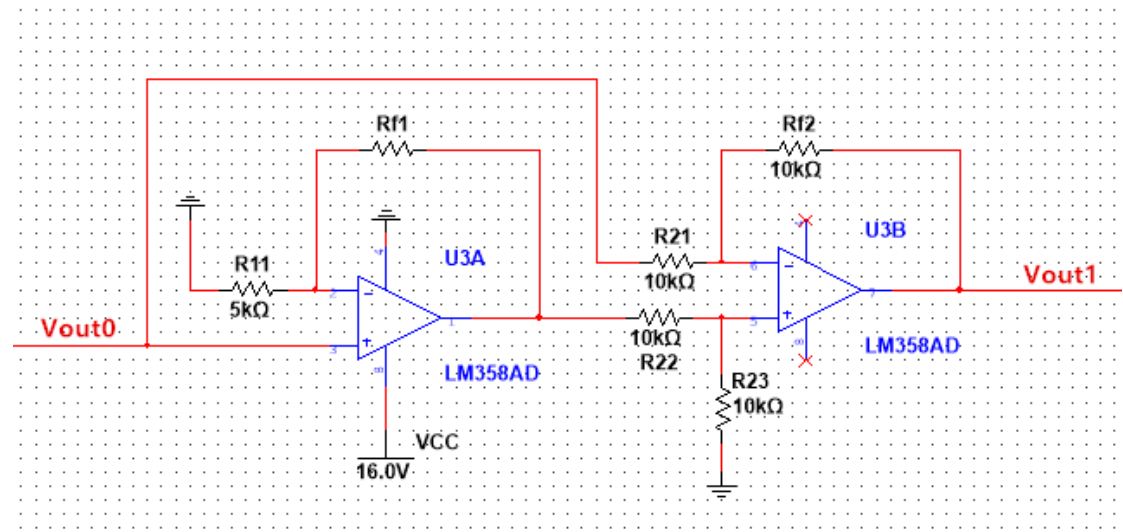
1、主电路电路图 Tina 仿真



仿真结果测试:



2、端口负载识别功能电路图：



仿真现象：

