

浙 江 大 学

电 气 电 子 电 路 综 合 实 验

可调直流稳压电源设计



姓名与学号	邢毅诚 3190105197
指导教师	张伟
年级与专业	2019级电子信息工程
所在学院	电气工程学院
完成日期	2021 年 6 月 21 日

目录

一、 设计任务与要求	1
1 设计任务	1
2 设计要求	1
二、 设计方案	1
1 总体方案设计	1
2 总体电路选择	2
三、 变压器、整流、滤波电路的设计	4
1 变压器选择	4
2 整流二极管选择	7
3 滤波电容选择	10
四、 +15V 稳压电源的设计	10
1 稳压电路方案选择	10
2 LM317 稳压电路电阻阻值选择	11
3 散热器的选择	12
五、 脉宽调制电路的设计	13
1 脉宽调制电路选择	13
2 脉宽调制频率确定	14
3 过流保护电路设计	15
六、 开关管和续流二极管的选型	16
1 开关管的类型选择	16
2 功率场效应管以及续流二极管温度测量	21
七、 场效应管驱动电路的设计	25
1 驱动电路的选择	25
2 栅极驱动器 IR2117	26
3 自举电路原理	29
八、 PI 调节器参数的确定	30

1 可调稳压电路结构框图	30
2 各级传递表达式的确定	30
3 Simulink 仿真.....	35
九、 整机原理图绘制	37
1 整机原理图.....	37
2 元件清单	37
十、 测试数据	39

一、设计任务与要求

1 设计任务

设计一可调直流稳压电源，将 220V/50Hz 的单项交流电源转换为电压赋值稳定、输出电流为几十安以下的直流电源。

2 设计要求

本项目所设计的直流稳压电源所要求的技术参数如下：

- 最大可调输出电压：30V
- 最大输出电压：1A
- 电压调整率： $\leq 1\%$
- 纹波电压： $\leq 100mV$
- 电源条件：电压 AC220V($1 \pm 5\%$)，频率：50Hz

二、设计方案

1 总体方案设计

可调直流稳压电源设计由电源变压器，整流电路，滤波电路，稳压电源过程，将单相交流电转换为稳定的直流电压，其方框图与各个电路的输出电压波形如下图所示：

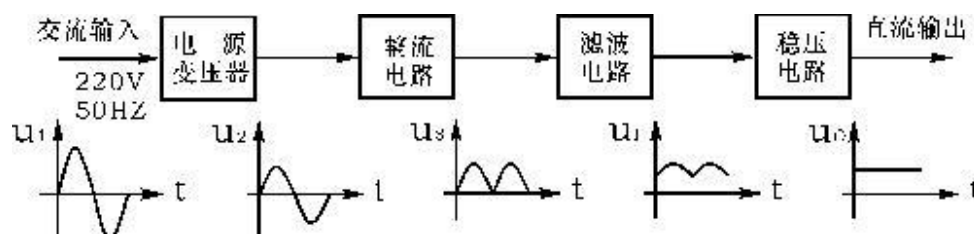


图 2.1: 直流稳压电源构成方框图

各个部分的功能与可选择种类分别为：

- 电源变压器：将交流电网 220V/50Hz 的交流电压变成所需的交流电压，电源变压器的结构有很多种，在设计时要按设计要求，安装控件和成本等多种因素考虑；
- 整流电路：将交流电压转变成脉动的直流电压。整流电路通常有半波整流电路、全波整流电路、桥式整流电路等等，其中以桥式整流较为常见；
- 滤波电路：将整流所得到的脉冲直流电 (大小规律性变化) 中的交流成分滤除，常用的滤波电路有电容滤波，电感滤波以及阻容滤波等电路
- 稳压电路：滤波后的电压还会随电网电压波动 (一般有 $\pm 10\%$ 左右的波动) 和随负载和温度的变化而变化。稳压电路的作用是克服电网电压波动、负载和温度变化时所引起的输出电压的变化，维持输出直流电压的稳定。

2 总体电路选择

就整体而言，直流稳压源有着多种类型，目前来讲常见的主要有以下几种类型：

2.1 稳压二极管稳压电源

稳压二极管稳压电源由电阻和稳压二极管构成，通过利用二极管的稳压特性实现电压的稳压输出，其具体的电路原理图如下图所示：

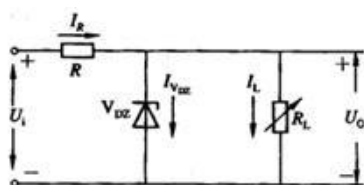


图 2.2: 稳压二极管稳压电源电路原理图

其特点是电路结构简单，但同时功率较小，稳压精度较低。另外，整流、滤波得到的直流往往会随着时间有所变化。因此，整流之后必须加上一级稳压电路，来获得稳定的直流电压。稳压二极管电路图如上图所示。稳压管 D_z 和负载 R_L ，故称为并联型稳压电路， R 为限流电阻。

2.2 晶体管串联调整式稳压电源

晶体管串联调整式稳压电源结构集成运放，调整管等一系列电子器件构成，其具体电路原理图如下图所示：

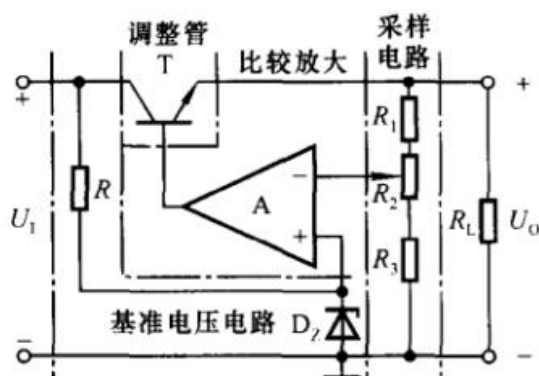


图 2.3: 晶体管串联调整式稳压电源电路原理图

其特点是电路结构比较简单，工作可靠，功率较大，稳压精度高，无电磁干扰，但相对而言效率较低。

其中，如 LM7805 等稳压器也属于这一类型，一般用于小功率的场合，集成稳压器的特点是体积小，可靠性高以及温度特性好，而且使用方便，价格偏移。

2.3 开关型稳压电源

开关型稳压电源由运放以及二极管等多个电子元件构成，其具体电路原理图如下图所示：

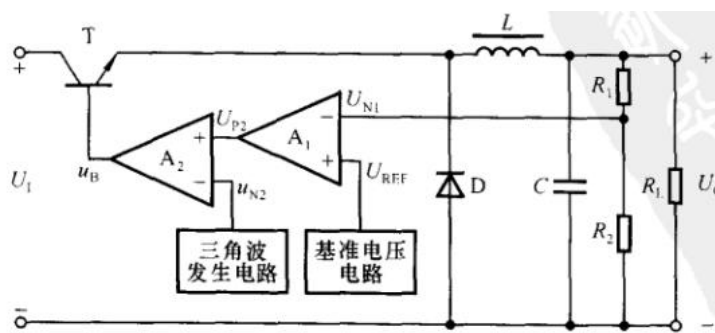


图 2.4: 开关型稳压电源电路原理图

其特点是效率高，温升低，电路便于集成化，但电路较为复杂，并有高频干扰的存在，

当负载要求功率较大且效率较高时，常采用开关型稳压电源。

三、变压器、整流、滤波电路的设计

1 变压器选择

现在电源变压器的设计和制作都已经专业化了，有专门的变压器制造商完成。我们只需要会选型或提出技术参数就可以了。希望详细了解电源变压器的同学可以阅读《新电工手册》。我们需要向制造商提出的技术参数就是额定电压和额定电流，其它的工作由制造商完成。但我们也需要知道电源变压器的一些特性，以便提出合理的额定电压和额定电流。电源变压器的电压调整率 $\Delta U\%$ 一般为 10%，变压器的效率如下表所示。

输出容量(V·A)	<10	10~30	30~80	80~200	200~400	>400
效率(%)	60	70	80	85	90	>95

图 3.1: 小型变压器效率与容量经验数据表

当 220V 输入时：36V/1A, 空载 $36V \times 1.1 = 40V$, $220V \times 1.05 = 231V$, $40V \times 1.05 = 42V$

对于本次设计，我们可以采用 PSpice 的方式来确定变压器的技术参数，按照下图连接仿真电路图：

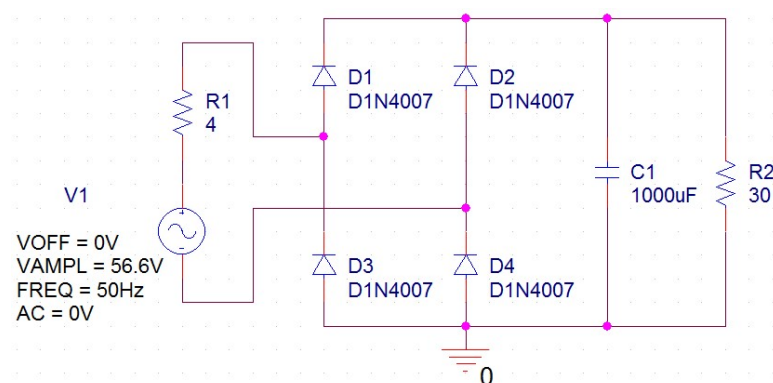


图 3.2: 变压器仿真电路图

获得仿真波形如下图所示：

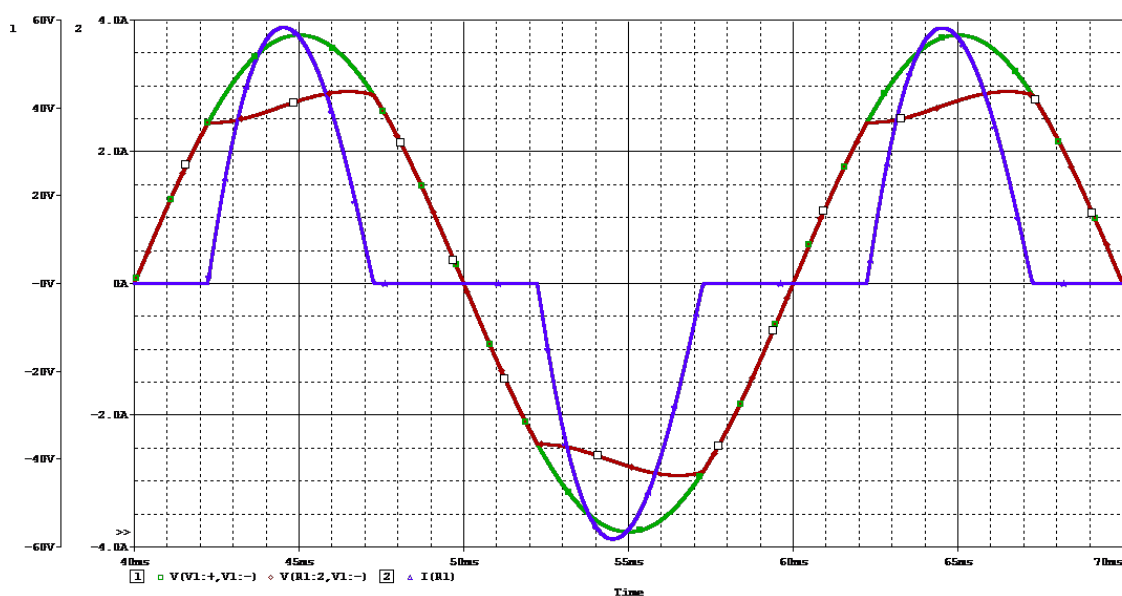


图 3.3: 变压器仿真波形

绿线是 V1 的输出波形，是一个完整的正弦波，峰值电压为 56.6V。紫线是电源变压器的输出电流波形，可以发现由于滤波电容的影响，输出电流已经不是连续的波形了。红线是电源变压器的输出电压波形，由于变压器内阻的缘故，其最大压降已接近 16V。

因此在本次设计中，我们选择输入 220V/50Hz，输出额定电压为 36V，额定电流为 1A。

根据通常来讲，按照铁心的形状分类有 R 型变压器，CD 型变压器，环形变压器，EI 型变压器，灌封线路板安装变压器等等，其具体特点分别如下：

1.1 R 型变压器

R 型变压器铁芯采用宽窄不一的冷轧钢带卷制成腰圆形，而且截面呈圆形，不用切割即可绕制。因此，R 型变压器无噪声、漏磁小、空载电流小、铁损低、效率高；并且由于线圈是圆柱形，每圈的铜线长度短，所以内阻小、铜耗低、温升低、过载波动小，爆发力比环形变压器好；另外，初、次级线圈采用阻燃 PBT 工程塑料制成的骨架分别绕制，从而抗电强度高，阻燃性好。当然价格也是比较高的。

1.2 CD 型变压器

CD 型变压器具有低损耗、效率高、节能等特点，主要用于高档音响设备和焊接设备、电抗、高压设备等高档电气设备。CD 型变压器比 R 型变压器价格低、比 EI 型变压器电磁性能好。

相比于其他变压器，CD 型变压器主要用于高档音响设备和焊接设备，电抗、高压设备等高档电气设备。

1.3 环型变压器

环型变压器电效率高、铁心无气隙，绕组均匀紧紧包住环形铁心，电磁噪声低、铁损小。环形变压器只有中心一个安装螺杆，在电气设备中特别容易安装和拆卸。环形变压器应用于家电设备和其它技术要求较高的电子设备中，尤其是高保真音响设备，它的主要用途是作为电源变压器和隔离变压器。

1.4 EI 型变压器

EI 型变压器是最常见的一种电子变压器，EI 型变压器的铁心是由“E”形和“I”形两种矽钢片交错叠加而成，因此叫做 EI 变压器。EI 变压器一般是工频（低频）变压器（50HZ 或 60HZ）、电源变压器、某些音频变压器也是 EI 的，如音响上用的。按照安装方式分类分为插针式、引线骑马夹式，插针式是直焊线路板上的，引线式是外部带引线，大部分是外面有铁壳，并且铁壳有安装孔，可以用螺丝安装。

由于 EI 型变压器制造工艺简单，系列化程度较高，因此成本最低，应用范围也最广。

1.5 灌封线路板安装变压器

灌封变压器是近年来发展起来的一种变压器结构形式，其特点是将电源变压器的本体用环氧树脂等绝缘材料封装在塑料外壳中，具有结构安全、便于线路板安装的特点，提高了电气设备的工艺水平。灌封变压器的铁心部分，铁心夹持方式有了较大的改进，取消了传统的螺栓夹紧形式，采用了钢带捆扎，使铁心的漏磁通损耗降低 60%、空载损耗减少 20%。

由于灌封变压器可以在线路板上直接安装，在电气设备加工过程中减少了接线等工序、节约了人工，特别在大批量生产电子产品时经济效益非常可观，因此在电子产品设计中被大量采用。

2 整流二极管选择

采用 Pspice 仿真方式来确定最高输出电压（电网电压上浮 5% 及空载时）和最低输出电压（电网电压下浮 5% 及额定负载时），仿真电路图即为变压器仿真电路图。

设定变压器的额定电压为 36V，额定电流为 1A，用 V1 和 R1 模拟电源变压器，V1 为空载电压， $V1=36V/0.9=40V$ ， $VAMPL=1.4142 \times 40V=56.6V$ 。R1 为变压器的内阻，设为 4Ω ，当输出额定电流 1A 时，压降为 4V。

仿真获得二极管两端电压波形如下图所示，可以看出其承受的最大反向电压约为 -43V

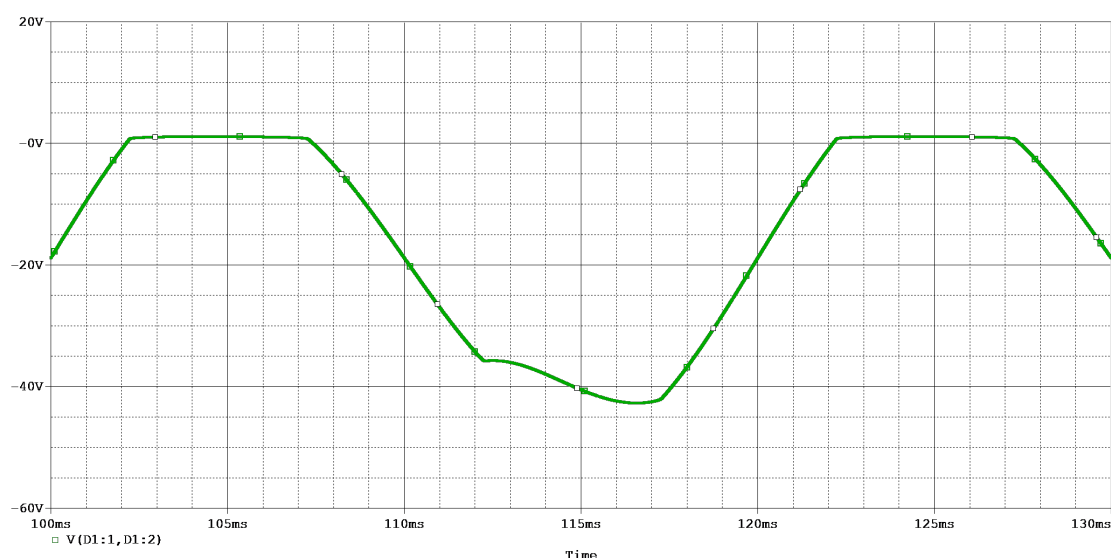


图 3.4: 二极管电压仿真波形

仿真获得二极管两端电流波形如下图所示，可以看出其电流的最大值约为 3.90A。

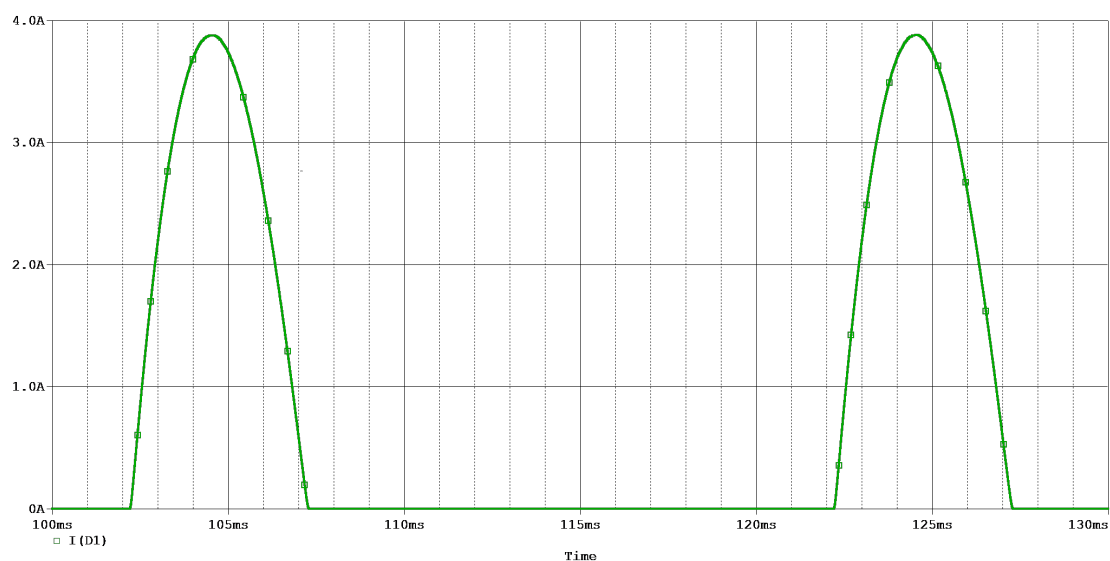


图 3.5: 二极管电流仿真波形

仿真获得二极管的功率波形如下图所示，可以看出其功耗大约在 1W 左右。

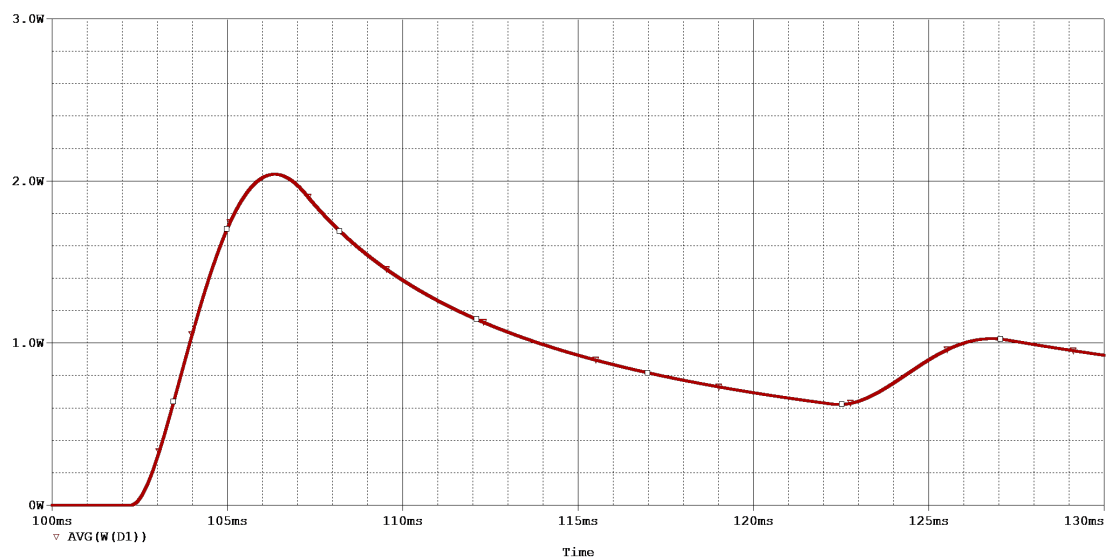


图 3.6: 二极管功率仿真波形

在本次设计中，有 1n4007 和 1n5408 两个二极管可供我们选择，查阅数据手册可得 1n4007 电气参数如下表所示：

MAXIMUM RATINGS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)									
PARAMETER	SYMBOL	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	UNIT
Maximum repetitive peak reverse voltage	V_{RRM}	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS voltage	V_{RMS}	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC blocking voltage	V_{DC}	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum average forward rectified current 0.375" (9.5 mm) lead length at $T_A = 75^\circ\text{C}$	$I_{F(AV)}$	1.0							A
Peak forward surge current 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load	I_{FSM}	30							A
Non-repetitive peak forward surge current square waveform $T_A = 25^\circ\text{C}$ (fig. 3)	$t_p = 1\text{ ms}$	I_{FSM}							A
	$t_p = 2\text{ ms}$								
	$t_p = 5\text{ ms}$								
Maximum full load reverse current, full cycle average 0.375" (9.5 mm) lead length $T_L = 75^\circ\text{C}$	$I_{R(AV)}$	30							μA
Rating for fusing ($t < 8.3\text{ ms}$)	I^2t (1)	3.7							A^2s
Operating junction and storage temperature range	T_J, T_{STG}	- 50 to + 150							$^\circ\text{C}$

图 3.7: 1n4007 电气参数

查阅数据手册获得 1n5408 电气参数如下表所示：

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	1N5400	1N5401	1N5402	1N5404	1N5406	1N5407	1N5408	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V_{RRM} V_{RWM} V_R	50	100	200	400	600	800	1000	Volts
Non-repetitive Peak Reverse Voltage	V_{RSM}	100	200	300	525	800	1000	1200	Volts
Average Rectified Forward Current (Single Phase Resistive Load, 1/2" Leads, $T_L = 105^\circ\text{C}$)	I_O	3.0							Amp
Non-repetitive Peak Surge Current (Surge Applied at Rated Load Conditions)	I_{FSM}	200 (one cycle)							Amp
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J T_{stg}	- 65 to +170 - 65 to +175							$^\circ\text{C}$

图 3.8: 1n5408 电气参数

对比发现，1n4007 允许的最大电流过小，不符合本次的设计要求，因此在本次设计中不予考虑。而对于 1n5408，查阅数据手册获得其温升参数如下表所示：

Characteristic	Symbol	Typ	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient (PC Board Mount, 1/2" Leads)	$R_{\theta JA}$	53	$^\circ\text{C/W}$

图 3.9: 1n5408 温升参数

计算可得到二极管与环境的温度差为： $\Delta T_D = 53 \times 1 = 53^\circ\text{C}$ ，而环境温度为 25°C ，二极管工作在最大温度之下，因此可以正常工作。综上所述，结合最大电压，工作温度等种种考量，我们选取二极管 1N5408 作为二极管进行设计。有

3 滤波电容选择

使用变压器电路图，对滤波电容进行仿真，可以获得电容两端电压的仿真波形如下图所示：

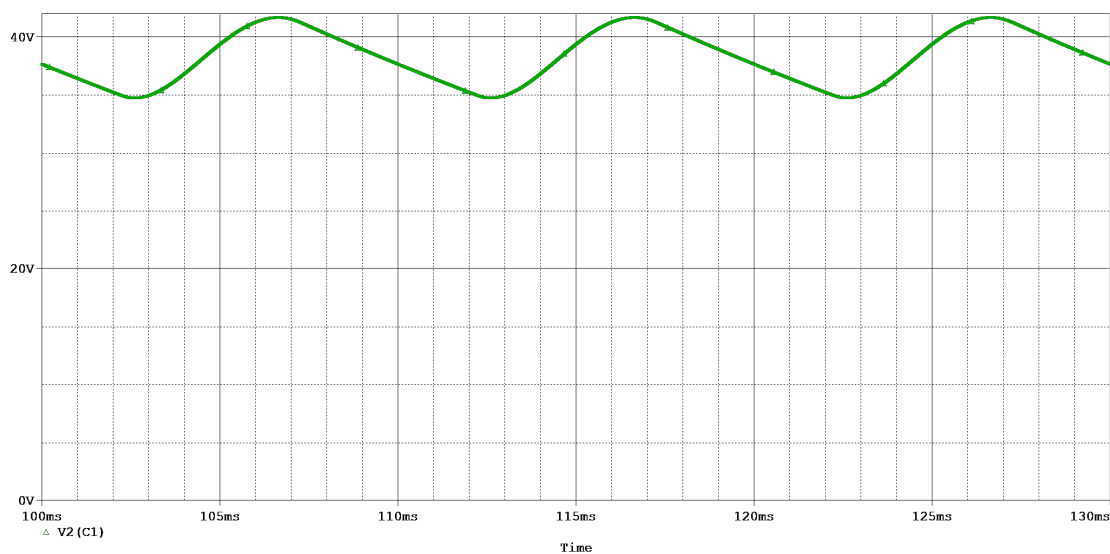


图 3.10: 滤波电容两端电压仿真波形

根据仿真曲线，我们可以看出其最大电压约在 42V 左右。在本次设计中，滤波电容采用电解电容，其标称值有 $220\mu F$ 、 $470\mu F$ 、 $1000\mu F$ 、 $2200\mu F$ 、 $3300\mu F$ 、 $4700\mu F$ ，而耐压等级有 25V、35V、50V、100V 等等，根据仿真结果，我们选择电容为 $1000\mu F$ ，耐压等级为 100V 的电解电容作为本次设计中选取的电容。

四、+15V 稳压电源的设计

1 稳压电路方案选择

查阅数据手册，我们可以得到 TL494 工作电源的相关参数如下表所示：

			MIN	MAX	UNIT	
V _{CC}	Supply voltage ⁽²⁾			41	V	
V _I	Amplifier input voltage			V _{CC} + 0.3	V	
V _O	Collector output voltage			41	V	
I _O	Collector output current			250	mA	
θ _{JA}	Package thermal impedance ⁽³⁾⁽⁴⁾	D package		73	°C/W	
		DB package		82		
		N package		67		
		NS package		64		
		PW package		108		
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds				260	°C	
T _{sto}	Storage temperature range			−65	150	°C

图 4.1: TL494 工作电源相关参数

IR2117 的工作电源的相关参数如下表所示:

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V_B	High side floating supply voltage	-0.3	625	V
V_S	High side floating supply offset voltage	$V_B - 25$	$V_B + 0.3$	
V_{HO}	High side floating output voltage	$V_S - 0.3$	$V_B + 0.3$	
V_{CC}	Logic supply voltage	-0.3	25	
V_{IN}	Logic input voltage	-0.3	$V_{CC} + 0.3$	
dV_S/dt	Allowable offset supply voltage transient (figure 2)	—	50	V/ns
P_D	Package power dissipation @ $T_A \leq +25^\circ\text{C}$ (8 lead PDIP)	—	1.0	W
	(8 lead SOIC)	—	0.625	
R_{thJA}	Thermal resistance, junction to ambient (8 lead PDIP)	—	125	°C/W
	(8 lead SOIC)	—	200	
T_J	Junction temperature	—	150	°C
T_S	Storage temperature	-55	150	
T_L	Lead temperature (soldering, 10 seconds)	—	300	

图 4.2: IR2117 工作电源相关参数

考虑 TL494 以及 IR2117 和功率场效应管的驱动电压要求, 功率场效应管位于整流滤波电路的电源输出端上, 峰值电压可以达到 56.6V。且功率场效应管的源极电压当管子导通时为高电压 40V-56.6V, 管子截止时为-0.7V, 因此确定稳压电源的电压值为 +15V。

2 LM317 稳压电路电阻阻值选择

LM317 可调式三端稳压器的原理框图如下图所示:

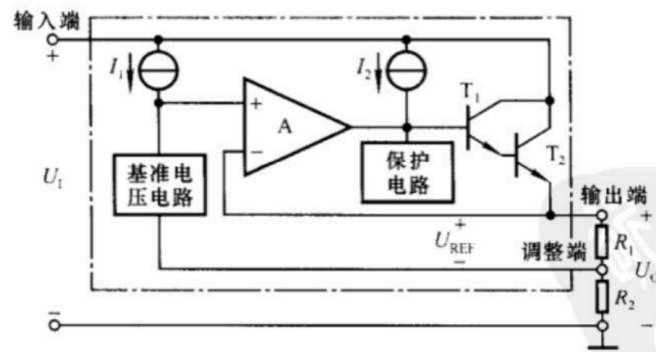


图 4.3: LM317 原理框图

根据 LM317 电路框图, 可以计算得到: $U_o = 1 + \frac{R_2}{R_1} \cdot U_R$, $U_R = 1.25V$, $\frac{R_2}{R_1} = \frac{15}{1.25} - 1 = 11$, 因此选择 R_1 为 240Ω , 选择 R_2 为 $2.7K\Omega$, 可以得到输出电压为 $15.31V$ 。

3 散热器的选择

由于我们并不能直接获得 LM317 在工作时的具体温度, 我们需要进一步计算出其工作温度以确定是否需要安装散热器, 查表获得 LM317 的相关参数如下表所示:

Symbol	Parameter		Value			Units
P _D	Power Dissipation		Internally Limited			W
R _{θJA}	Thermal Resistance, Junction to Ambient		80			°C/W
R _{θJC}	Thermal Resistance, Junction to Case		5			°C/W

I _{L(MIN)}	Minimum Load Current to Maintain Regulation	V _I - V _O = 40 V			3.5	12.0	mA
I _{O(MAX)}	Maximum Output Current	T _A = 25°C	V _I - V _O ≤ 15 V, P _D ≤ P _{MAX}	1.5	2.2		A
			V _I - V _O ≤ 40 V, P _D ≤ P _{MAX}		0.3		A

Product Number	Package	Packing Method	Operating Temperature
LM317T	TO-220 (Single Gauge)	Rail	0°C to +125°C

图 4.4: LM317 相关参数

又已知 LM317 的电路图如下图所示:

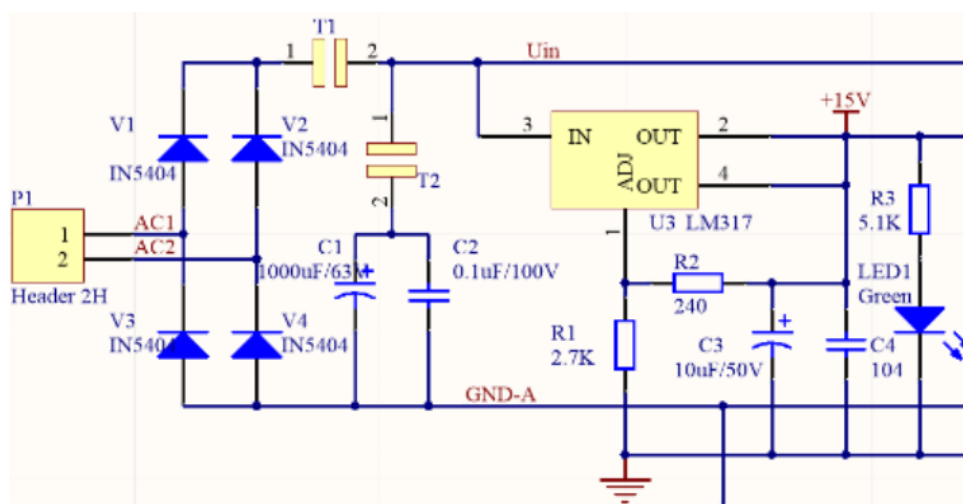


图 4.5: LM317 电路图

可以计算得到 LM317 的最大温度约为： $0.6 \times 80 + 14 = 73^{\circ}\text{C}$ ，仍在其工作范围之内，因此不需要安装散热器。

五、脉宽调制电路的设计

1 脉宽调制电路选择

对于脉宽调制电路，我们有 TL494,SG3525,UC3842 以上三种选择，具体分析如下：

1.1 TL494 电路

TL494 是一种开关电源脉宽调制 (PWM) 控制芯片，其价格便宜，在低端和中端市场中仍然大量使用，查阅 TL494 的数据手册，并进行分析，发现 TL494 符合设计要求。

1.2 SG3525 电路

SG3525 是一种性能优良，功能齐全且通用性强的单片集成 PWM 控制芯片，输出驱动为推拉输出形式，但单端输出占空比只能接近 50%，输出两路共用才能达到接近 100%，并不能满足本次的设计要求。

1.3 UC3842 电路

UC3842 是一种性能优良的电流控制性脉宽调制芯片。该调制器单端输出，能直接驱动双极型的功率管或场效应管，但其中只存在一个放大器，而本次所需要的脉宽调制电路需要两个放大器，因此并不能满足设计要求。

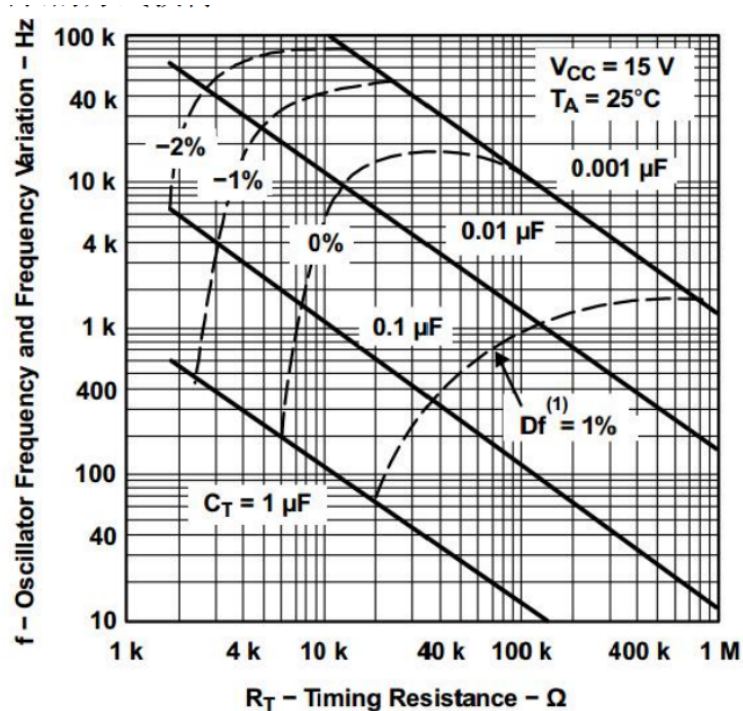
综合上述分析，我们选取 TL494 作为本次设计所采用的脉宽调制电路。

2 脉宽调制频率确定

调制频率应该与以下几个方面相关：

1. 场效应管的功耗分为静态功耗和动态功耗，动态功耗与场效应管的工作频率成正比；
2. 滤波电感根据铁氧体的材料不同，有不同的最高工作频率；
3. 工作频率越高，LC 滤波的纹波越小。在一定的纹波电压要求时，频率越高，滤波电感可以越小

根据 1, 3 两袋奶，我们需要在动态功耗足够小的前提下要求工作频率做勾搭，综合考虑，选择工作频率为 100KHz。另外，根据下表所示，我们可以选择适当的 RT 和 CT：


 图 5.1: R_T - Timing Resistance - Ω

选择 $C_T = 0.001\mu F$, $R_T = 11K\Omega$

3 过流保护电路设计

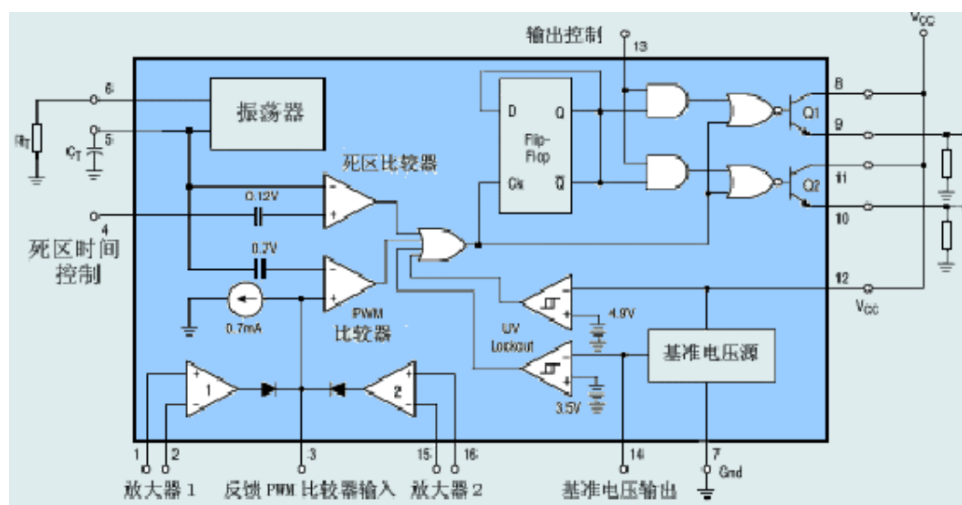


图 5.2: 过流保护电路

过流保护电路主要依靠 TL494 以及 R8, R9, 当电路中输出电流过大时, R9 接入主电路的一端电压过低 (流过 R5 的电流增加), 故 TL494 的 15 脚输入电压降低。当 TL494 的 15 脚输入电压降低到 0V 的时候 YL494 就会停止输出, 降低电路中输出的电流, 这就构成了闭环的过流保护。如果设置截止电流为 1.2A, 则此时 R9 上端的电压应该为 -0.612V, 此时 TL494 的 15 脚的输入电压为:

$$V_{15} = \frac{R_9}{R_8 + R_9} \times 5 - \frac{R_8}{R_8 + R_9} \times 0.612 = 0V \quad (5-1)$$

选择 $R_8 = 2.7K\Omega$, $R_9 = 330\Omega$

六、开关管和续流二极管的选型

6

1 开关管的类型选择

在稳压电路主电路中, 开关管为最重要的器件; 一般来讲, 可以选择双极型晶体管和功率场效应管两大类器件。

1.1 开关管采用双极型晶体管

使用开关管为双极型晶体管的主电路的仿真电路图如下图所示:

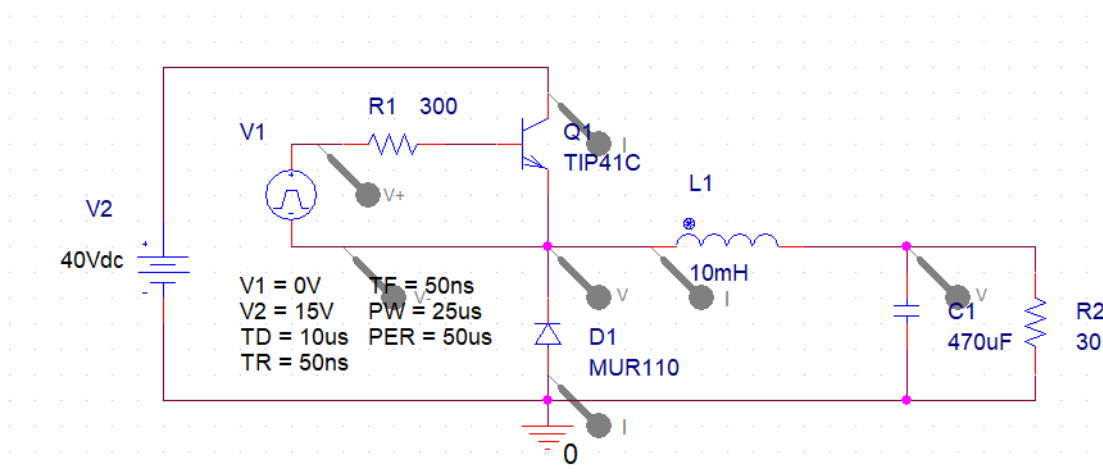


图 6.1: 双极型晶体管电路仿真原理图

在本次仿真中，双极型晶体管采用 TIP41C，其电气参数如下图所示：

Symbol	Parameter	Test conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
I_{CEO}	Collector cut-off current ($I_B = 0$)	$V_{CE} = 60\text{ V}$			0.7	mA
I_{EBO}	Emitter cut-off current ($I_C = 0$)	$V_{EB} = 5\text{ V}$			1	mA
I_{CES}	Collector cut-off current ($V_{BE} = 0$)	$V_{CE} = 100\text{ V}$			0.4	mA
$V_{CEO(sus)}^{(1)}$	Collector-emitter sustaining voltage ($I_B = 0$)	$I_C = 30\text{ mA}$	100			V
$V_{CE(sat)}^{(1)}$	Collector-emitter saturation voltage	$I_C = 6\text{ A}$ $I_B = 0.6\text{ A}$			1.5	V
$V_{BE(on)}^{(1)}$	Base-emitter voltage	$I_C = 6\text{ A}$ $V_{CE} = 4\text{ V}$			2	V
$h_{FE}^{(1)}$	DC current gain	$I_C = 0.3\text{ A}$ $V_{CE} = 4\text{ V}$ $I_C = 3\text{ A}$ $V_{CE} = 4\text{ V}$ Group R Group O Group Y	30 15 15 24 42		75 28 44 75	

图 6.2: TIP41C 电气特性

由于负载上存在一个过渡过程，在经过 18ms 后基本上进入稳定状态，因此在仿真时，我们可以设置 18ms 到 20ms 这段时间的波形，观察左半边电路仿真图如下所示：

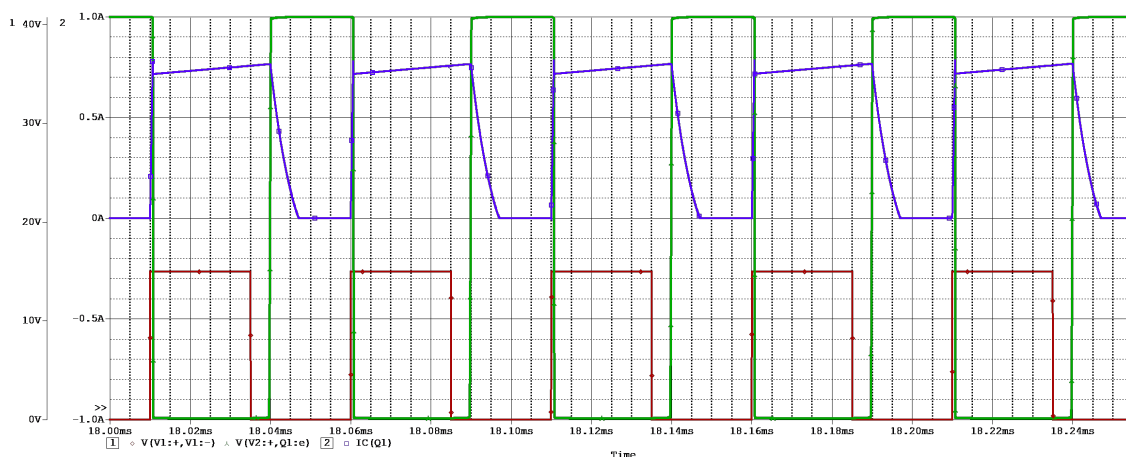


图 6.3: 稳压电路仿真波形

可以看到开关管脉冲信号 V_1 低电平为 0V，高电平 15V，其周期为 15V，而 V_{CE} 在 $V_1 = 0V$ 时， $V_{CE} = 40V$ ，开关管截至，当脉冲信号为 15V 时， $V_{CE} = 0V$ ，开关管饱和导

通。蓝线为通过三极管电流波形，可以看到， V_{CE} 在开通时有约 $7\mu s$ 的滞后，在关断时有约 $47\mu s$ 的滞后，同时电流关断还有 $70\mu s$ 的过渡过程。

对电路图的左半边数据进行仿真，获得仿真波形如下图所示：

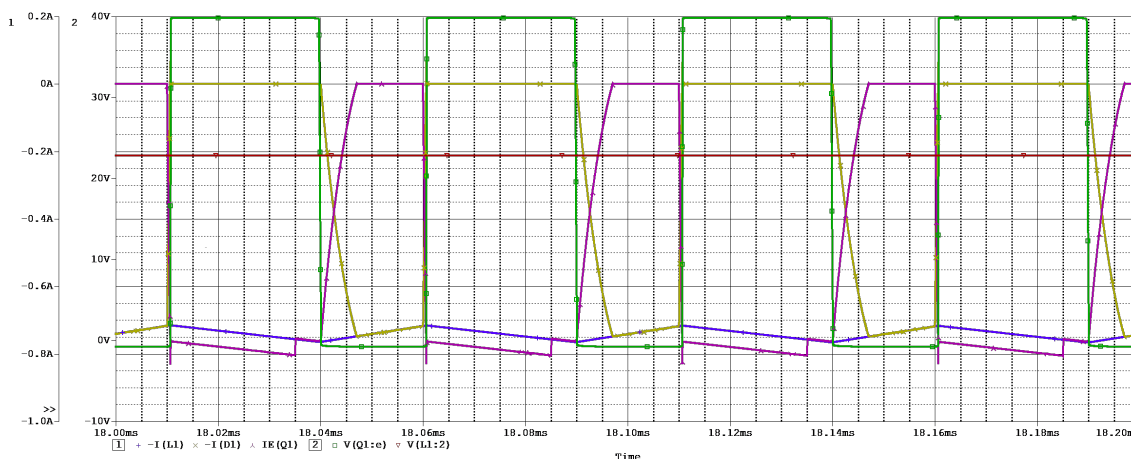


图 6.4: 稳压电路仿真波形

可以看到，在三极管导通和关断时，其电流波形存在一个动态变化的过程。另外，根据流过三极管的电流以及电压，可以看出三极管的功率最大可以达到 $30W$ ，功率消耗较大。

1.2 开关管采用功率场效应管

使用开关管为功率场效应管的电路图如下图所示：

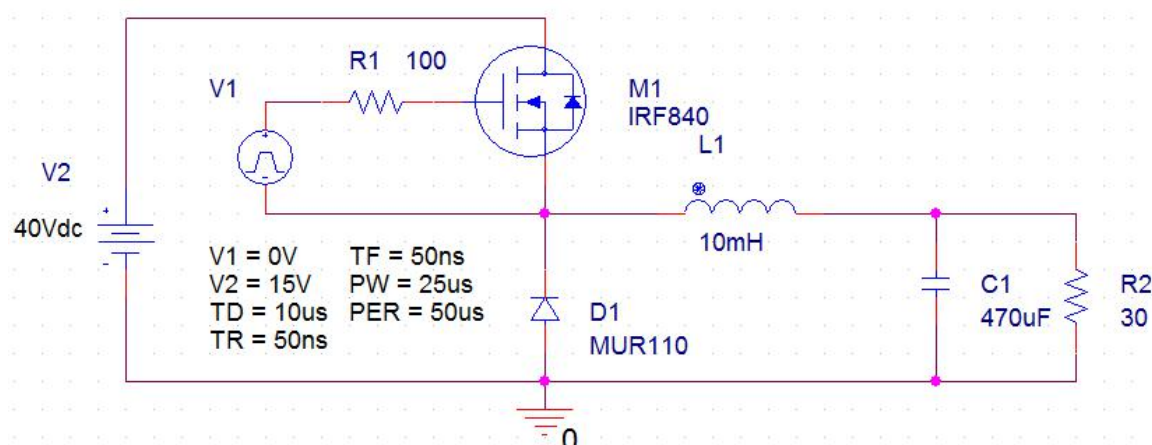


图 6.5: 功率场效应管仿真波形

在本次仿真中，功率场效应管的型号为：IRF840，其电气参数如下图所示：

Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	500	—	—	V	$V_{GS}=0V, I_D=250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	—	0.78	—	V/ $^\circ\text{C}$	Reference to $25^\circ\text{C}, I_D=1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	—	—	0.85	Ω	$V_{GS}=10V, I_D=4.8A$ ④
$V_{GS(th)}$	2.0	—	4.0	V	$V_{DS}=V_{GS}, I_D=250\mu A$
g_{fs}	4.9	—	—	S	$V_{DS}=50V, I_D=4.8A$ ④
I_{DSS}	—	—	25	μA	$V_{DS}=500V, V_{GS}=0V$
	—	—	250	μA	$V_{DS}=400V, V_{GS}=0V, T_J=125^\circ\text{C}$
I_{GSS}	—	—	100	nA	$V_{GS}=20V$
	—	—	-100	nA	$V_{GS}=-20V$
Q_g	—	—	63	nC	$I_D=8.0A$
Q_{gs}	—	—	9.3	nC	$V_{DS}=400V$
Q_{gd}	—	—	32	nC	$V_{GS}=10V$ See Fig. 6 and 13 ④
$t_{d(on)}$	—	14	—	ns	$V_{DD}=250V$
t_r	—	23	—	ns	$I_D=8.0A$
$t_{d(off)}$	—	49	—	ns	$R_G=9.1\Omega$
t_f	—	20	—	ns	$R_D=31\Omega$ See Figure 10 ④
L_D	—	4.5	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	—	7.5	—	nH	
C_{iss}	—	1300	—	pF	$V_{GS}=0V$
C_{oss}	—	310	—	pF	$V_{DS}=25V$
C_{rss}	—	120	—	pF	$f=1.0\text{MHz}$ See Figure 5

图 6.6: ITF840 电气特性

获得仿真结果如下图所示：

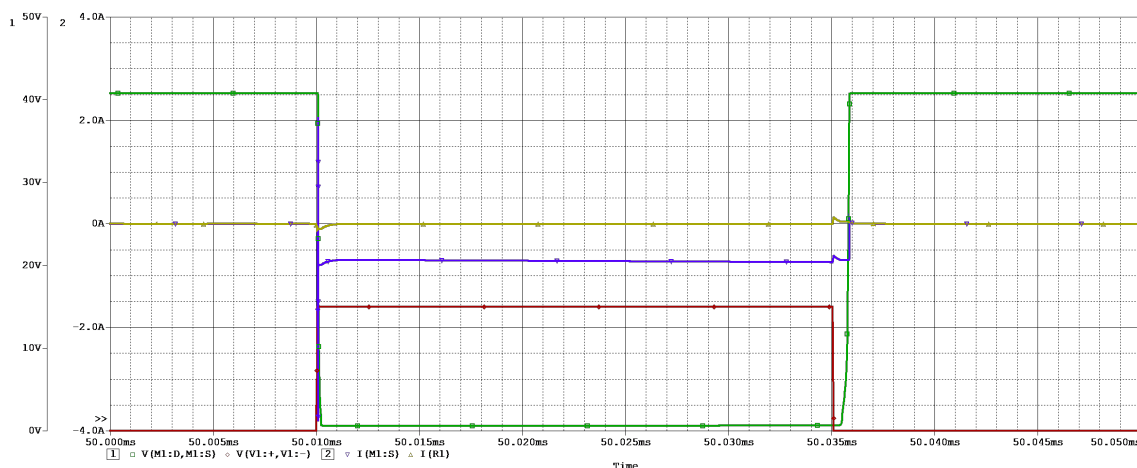


图 6.7: 功率场效应管仿真波形

可以看到，脉冲信号低电平为 0V，高电平为 15V，场效应管驱动电流开通时峰值电流为 120mA，关断时峰值电流为 135mA；场效应管漏极和源极之间电压 V_{DS} 在关断时为

40V，场效应管导通时 V_{DS} 为 6V；在场效应管开通瞬间，我们将仿真波形放大，可以发现流过场效应管的电流和流过续流二极管的电流都有很大的冲击，这是由于续流二极管中存在的结电容引起的。场效应管导通越快，二极管结电容越大，冲击电流就越大。

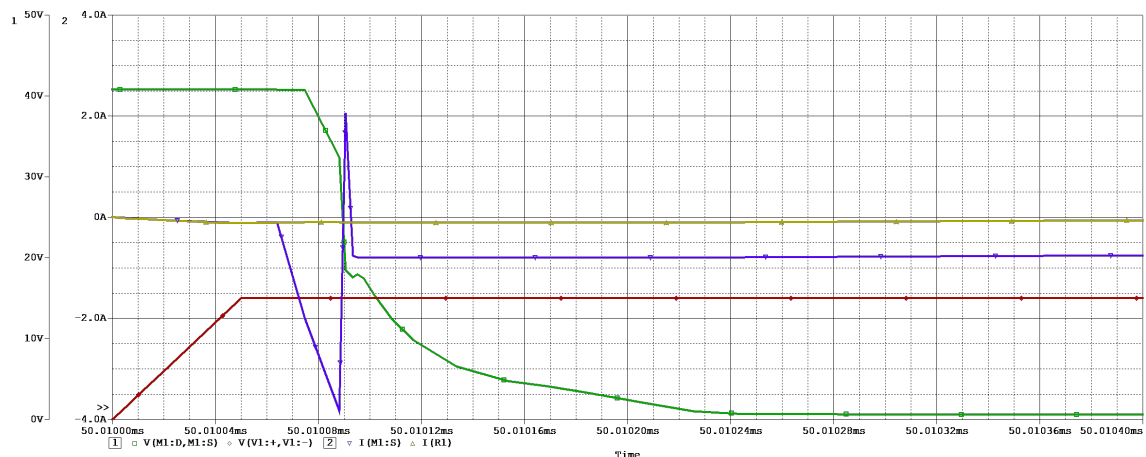


图 6.8: 功率场效应管放大仿真波形

下图为电路图中右半部分的仿真波形：

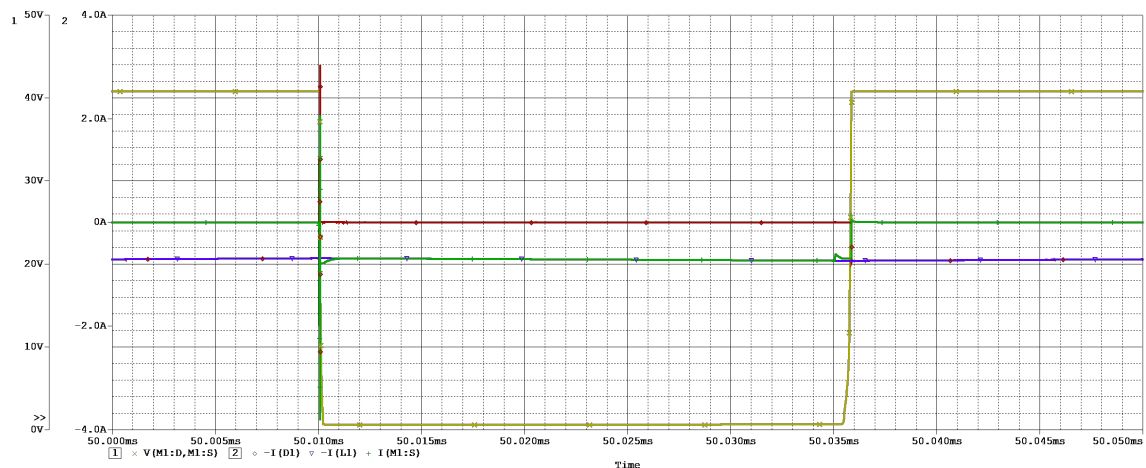


图 6.9: 功率场效应管仿真波形

图中曲线分别为场效应管 D 级和 S 级电流，场效应管 V_{DS} 的电压波形，流过续流二极管的电流波形，流过滤波电感的波形，在图中可以看出，当场效应管导通时， $I(L1) = I(M1:S), I(D1) = 0$ ，当场效应管截至时， $I(L1) = I(D1), I(M1:S) = 0$ 。

1.3 开关管选型

从以上两个仿真文件我们可以看出，开关管采用双极型晶体管和功率场效应管时各有优缺点：

	双极型晶体管	功率场效应管
驱动方式	电流型	电压型
驱动电路	复杂	简单
开通时间	慢	快
关断时间	慢	快
延迟时间	大	小
导通状态	导通电压	导通电阻
适用场合	大电流、低速	小电流、高速

表 6.1: 双极型晶体管与功率场效应管优缺点比较

从仿真文件中我们可以看到，功率场效应管更适用于一些要求小电流、高速的电流中使用，而双极型晶体管则更适用于大电流、低速的电路中使用。在本项目中，由于开关管的电流不大，而要求开关频率较高，宜采用功率场效应管作开关管。

1.4 功率场效应管的型号选择

在选择功率场效应管时，我们应考虑从其耐压，电流容量以及在工作过程中的静态功耗和动态功耗。对于本项目，有很多功率场效应管可以满足本项目的要求，如 IRF520、IRF530、IRF540，IRF840 等等，部分器件在关断时可能会超过 IR2117 所要求的输出电流典型值，但由于时间较短，可以忽略不计。对于本次设计来讲，由于在其他产品中已经采用了 IRF840，为了减少仓库器件的品种，在此项目中依然选择 IRF840 作为开关管。

2 功率场效应管以及续流二极管温度测量

由于需要确定是否需要安装散热器，我们需要分别测量在低压大电流和高压大电流情况下续流二极管以及场效应管的温度。在本次设计中，我们采用的功率场效应管的型号为

IPF840，而采用的续流二极管的型号为 MUR110，从官方文档中获得二者的温升参数如下：

Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	—	1.0	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	—	62	

图 6.10: 功率场效应管温升参数

TYPICAL VALUES FOR $R_{\theta JA}$ IN STILL AIR

Mounting Method		Lead Length, L (in.)			Units
		1/8	1/4	1/2	
1	$R_{\theta JA}$	52	65	72	°C/W
2		67	80	87	°C/W
3		50			°C/W

图 6.11: 续流二极管温升参数

2.1 低电压情况

设定低电压仿真输入电压为 15V，具体电路图如下图所示：

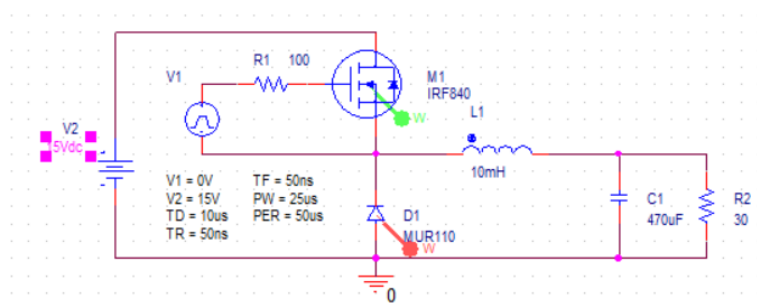


图 6.12: 低电压仿真电路图

分别测量功率场效应管和续流二极管的功率并计算其有效值，获得功率仿真波形如下：

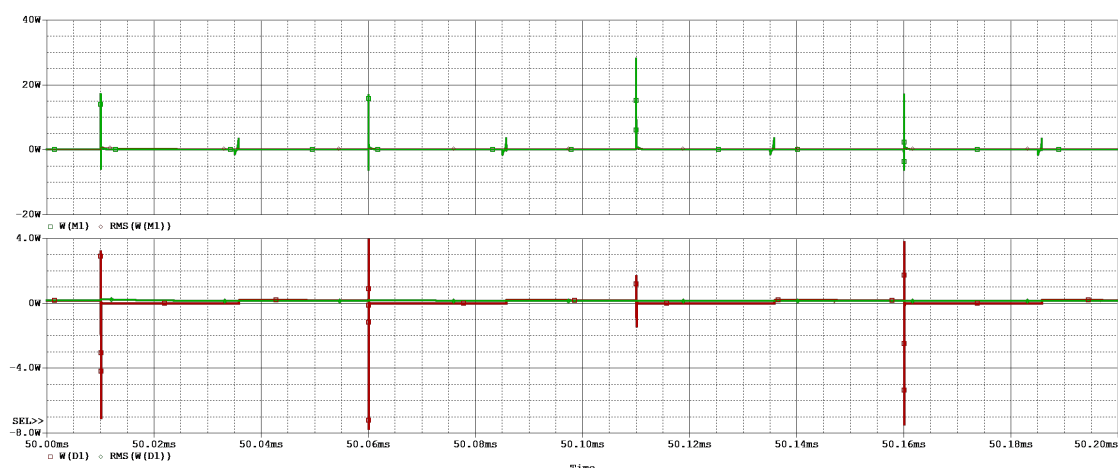


图 6.13: 仿真功率波形

测得整流二极管的功率有效值为 140mW，功率场效应管的有效值为 350mW，计算可得二者温升分别为： $\Delta T_D = 67 \times 0.14 = 7.28^\circ\text{C}$ ， $\Delta T_M = 62 \times 0.35 = 21.7^\circ\text{C}$ ，最高温度分别为： $T_D = 32.28^\circ\text{C}$ ， $T_M = 46.7^\circ\text{C}$

2.2 高电压情况

设定高电压仿真输入电压为 40V，具体电路图如下图所示：

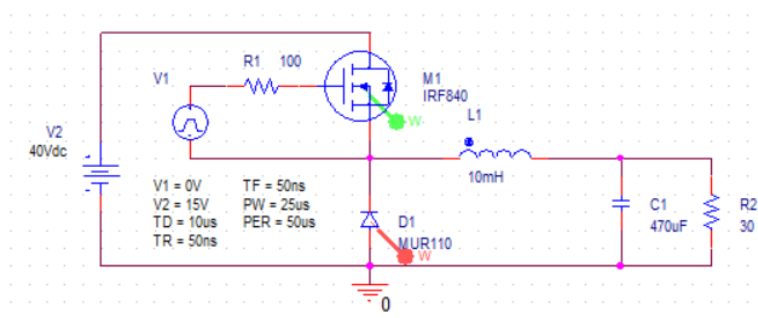


图 6.14: 高电压仿真电路图

分别测量功率场效应管和续流二极管的功率并计算其有效值，获得功率仿真波形如下：



图 6.15: 仿真功率波形

测得整流二极管的功率有效值为 550mW，功率场效应管的有效值为 3W，计算可得二者温升分别为： $\Delta T_D = 67 \times 0.55 = 36.85^\circ$ ， $\Delta T_M = 62 \times 3 = 186^\circ$ ，功率场效应管温度过高，因此需要添加散热器，添加散热器后其温度变为 $\Delta T_M = 20 \times 3 = 60^\circ$ ，最高温度分别为： $T_D = 61.85^\circ\text{C}$ ， $T_M = 85^\circ\text{C}$ 。

2.3 电感、电容参数与元件选型

电感和电容在电路中起到滤波的作用，电感选用贴片功率电感。查看电感生产商的产品样本，选择型号为 CKRH127 系列电感中的 CKRH127-151 电感，电感量为 $150\mu\text{H}$ 。通过进行仿真，我们可以看到输出电压在几十 mV 以内，满足实验要求，其具体仿真波形如下图所示：



图 6.16: LC 电路仿真波形

斩波后的 LC 滤波电容 C2 选择 $470\mu F/50V$ 。电感的电流发生了断续，在断续的时间段源极电压发生了振荡现象；而且流过电感电流的峰值超过了 $3A$ ，在实际电路中电感将进入饱和状态。要避免这种现象的发生，需要增加电感量，采用两个 CKRH127-151 电感串联的方式， $L1=300\mu H$ 。最终，确定电路图如下图所示：

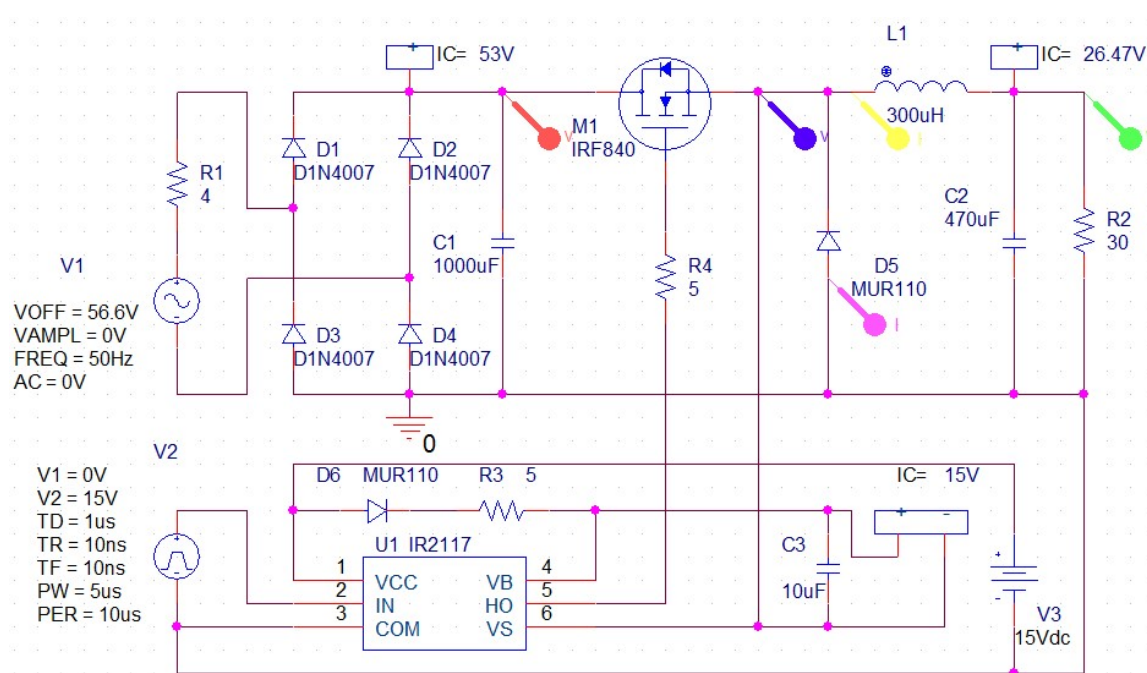


图 6.17: 仿真电路图

七、场效应管驱动电路的设计

1 驱动电路的选择

在之前的电路中，我们确定了稳压电源的功能框图，如下图所示：

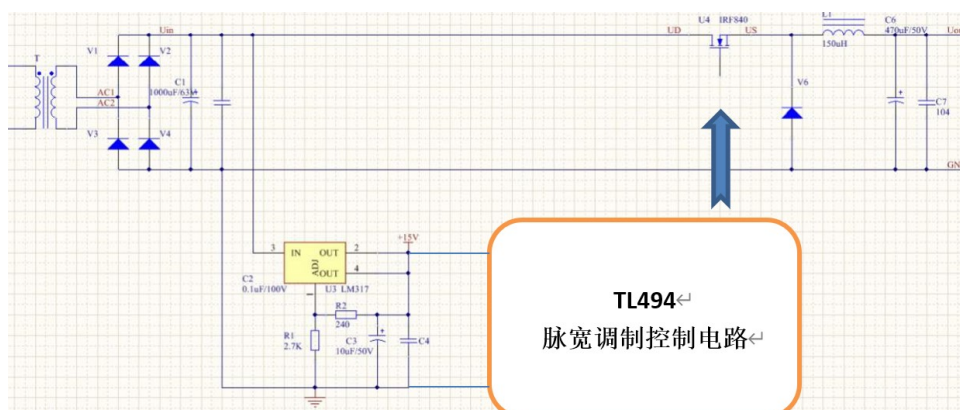


图 7.1: 可调直流稳压源功能框图

可以测得，TL494 的工作电压为 +15V，而功率场效应管的峰值电压可以达到 56.6V，且功率场效应管的源极电压当管子导通时为高电压 40V-56.6V，管子截至时为-0.7V，因此我们还需要一个驱动电路使得 TL494 可以正常驱动 IRF840。通常来讲，我们使用脉冲变压器使得 TL494 可以正常驱动 IRF840，而在本次设计中，我们选取 IR2117 电路作为驱动电路进行驱动。

2 栅极驱动器 IR2117

2.1 IR2117 概述

IR2117 是英飞凌公司专为驱动单个 MOSFET 或 IGBT 设计的高边栅极驱动器，它采用高压集成电路技术和无门锁 CMOS 技术，可用于工作母线电压高达 600V 的系统中。其输入与标准的 CMOS 电平兼容，输出驱动特性可满足交叉导通时间最短的大电流驱动输出级的设计要求。其悬浮通道与自举技术的应用使其可直接用来驱动一个工作于母线电压高达 600V 的、在高边或低端工作的 N 沟道 MOSFET 或 IGBT。

IR2117 的内部结构及工作原理框图如图所示。它在内部集成有一个施密特触发器、一个脉冲增益电路、两个欠压检测保护电路、一个电平移位网络、一个与非门、一个由两个 MOSFET 组成的互补功放输出级、一个 RS 触发器以及一个脉冲滤波器共九个单元电路。

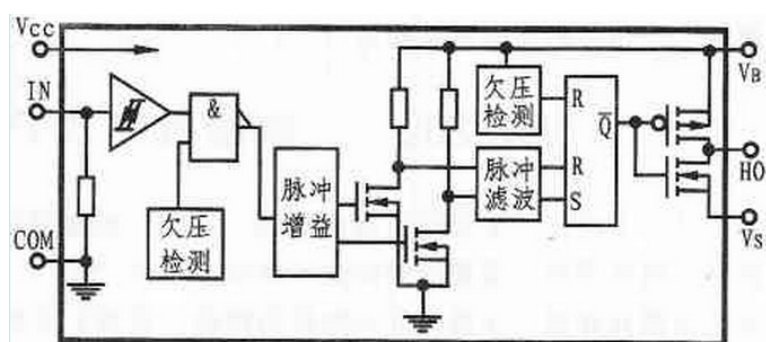


图 7.2: IR2117 功能框图

正常工作时，若 IR2127 的逻辑电源部分及输出电源部分不欠压，则来自用户控制脉冲形成单元的信号先由施密特触发器整形，再经脉冲增益环节放大后，由电平移位网络进行电平移位与匹配，再经 RS 触发器触发后由互补推挽输出级输出驱动外接的 MOSFET 或 IGBT。一旦输入逻辑部分电源或输出功放级悬浮电源中有一个出现欠压，则两部分中将有一个输出信号被封锁而使输出驱动脉冲变为低电平。

2.2 IR2117 主要特点

IR2117 有以下特点：

- 采用悬浮通道设计，内部自举工作可用来驱动从低压到 600V 工作母线电压中的 MOSFET 或 IGBT；
- 对负的瞬态电压上升率无限制；
- 栅极驱动电压范围宽达 10~20V；
- 采用 CMOS 施密特触发器输入及推挽功放输出方式；
- 具有欠压封锁功能；
- 输出与输入同相。

而其工作参数如下：

- 高边悬浮电源电压绝对值 V_B : $V_S + 10V - V_S + 20V$
- 高边悬浮电源参考电压 V_S : 600V

- 高边悬浮输出电压 $V_{HO} : V_S - V_B$
- 逻辑电源电压 $V_{CC} : 10V - 20V$
- 逻辑输入电压范围 $V_{in} : 0 - V_{cc}$

2.3 IR2117 选择理由

IR2117 元件在本次电路中的应用电路如下：

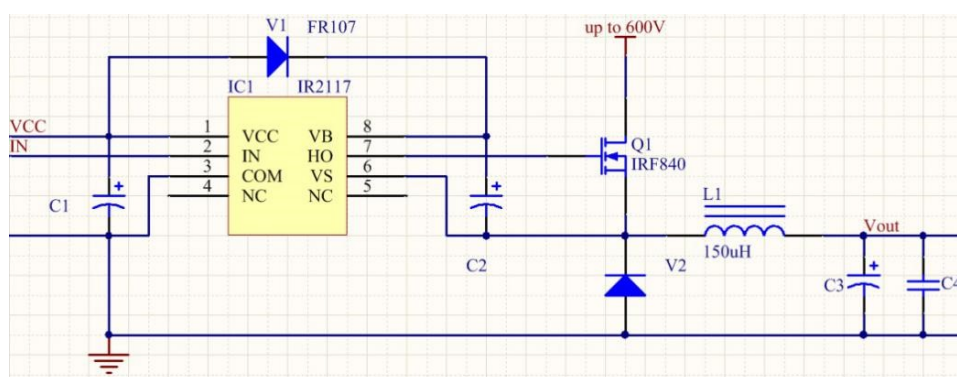


图 7.3: IR2117 应用电路

在这个 IR2117 应用电路中，关键是高边电源 VB 的获取。当场效应管关断时，续流二极管导通，场效应管源极电压-0.7V，电源 VCC 通过二极管 V1 对电容 C2 充电至电源电压；当输入 IN 变高时，场效应管导通，V2 截止，源极电压升至高压，V1 处于反向截止状态。

在这个电路中，V1 必须采用超快恢复二极管，反向耐压要超过高压电压。电容 C2 应采用高频优质电容，容量在 1uF 以上。IR2117 与被驱动的场效应管引线应尽可能短，其往返引线长度应限制在 200mm 以内，引线应使用双绞线或同轴电缆屏蔽线，最好将 IR2117 和被驱动的场效应管布置在同一路板上相近的位置用印刷线路直接相连。

2.4 IR2117 数据测量

根据仿真，我们可以获得 IR2117 的仿真波形曲线，具体仿真电路图如下图所示：

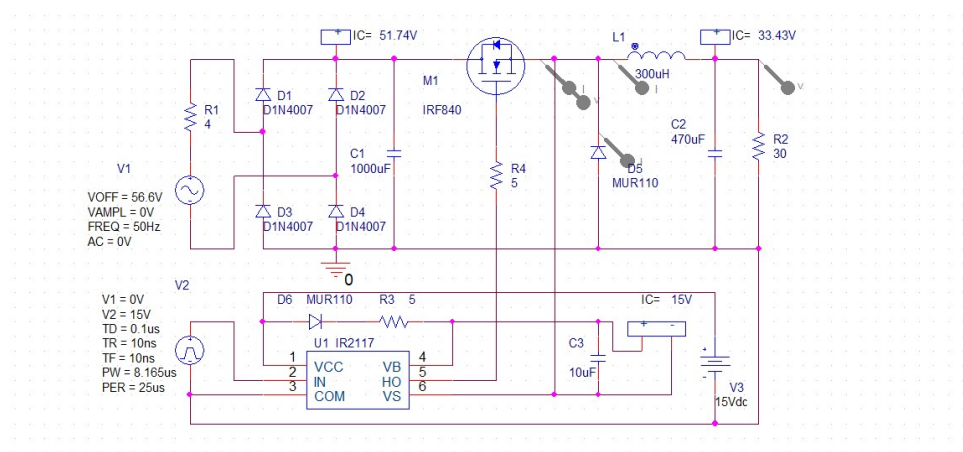


图 7.4: IR2117 应用电路

进而可以获得 IR2117 的 HO 端的电流，具体波形如下图所示：



图 7.5: IR2117-HO 端电流

根据仿真波形，可知 IR2117 在工作时的最大灌电流约为 425mA 左右，最大拉电流为 240mA，根据手册可知，供电 15V 时最大灌电流的最小值为 420mA，典型值为 450mA；供电电压为 15V 时最大拉电流的最小值为 200mA，典型值约为 250mA，说明该电路中 IR2117 工作正常。

3 自举电路原理

自举电路也叫升压电路，通过利用自举升压二极管。自举升压电容等电子元件，使得电容放电电压与电源电压叠加，从而使电压升高。对于 IR2117 电路，关键是高边电源 VB

的获取。当场效应管关断时，续流二极管导通，场效应管源极电压-0.7V, 电源 VCC 通过二极管 V1 对电容 C2 充电至电源电压；而当输入 IN 变高时，场效应管导通，V2 截至，源极电压升高至高压，V1 处于反向截至状态。

八、PI 调节器参数的确定

1 可调稳压电路结构框图

可调稳压电路的结构框图如下图所示：

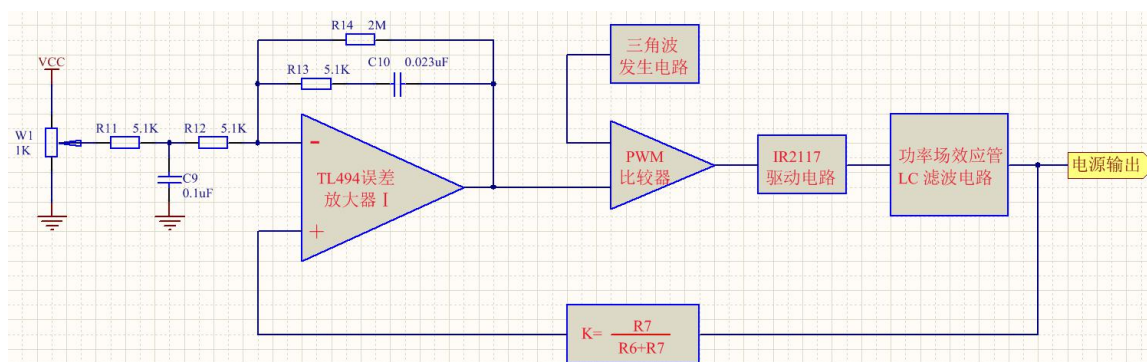


图 8.1: IR2117-HO 端电流

其中误差放大器 I、PWM 比较器和三角波发生电路包含在 TL494 中。

2 各级传递表达式的确定

现已知可调直流稳压源的结构框图，根据结构框图，我们可以较为轻松的确定误差放大器 I 以及反馈系数 K，但 PWM 比较器，IR2117 驱动电路，功率场效应管和 LC 滤波电路我们并不能直接给出其表达式，只能通过仿真的方式获得其数学模型，进而进行求解。

对 TL494 进行仿真，仿真电路图如下图所示：

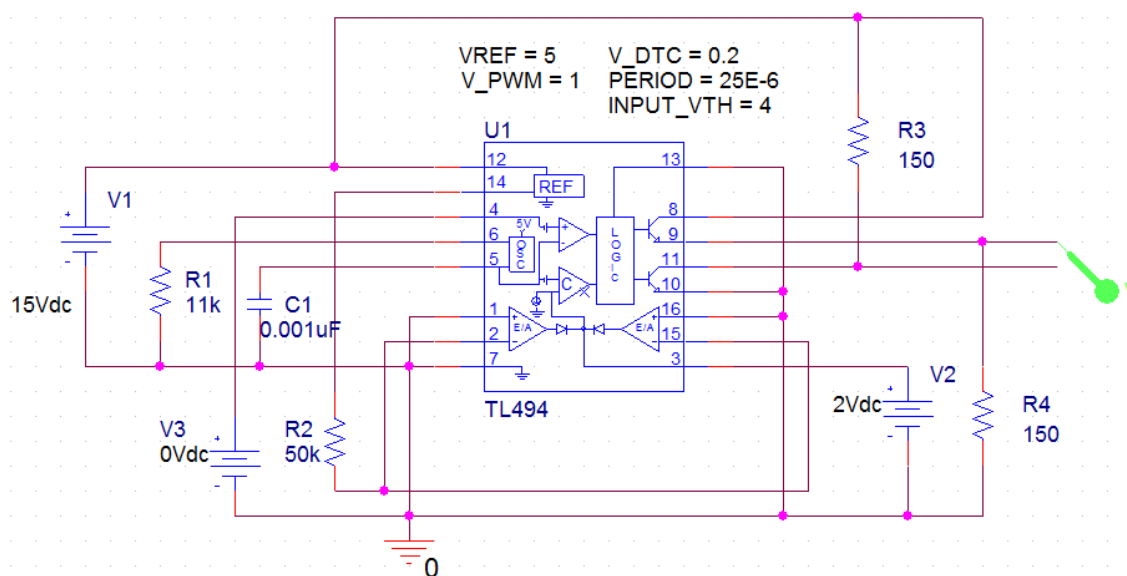


图 8.2: TL494 仿真电路图

当 $V_2=2V$ ，可得到其输出的 PWM 波周期 $25.041\mu s$ ，高电平 $16.459\mu s$ ，低电平 $8.582\mu s$ ，其仿真波形如下图所示：

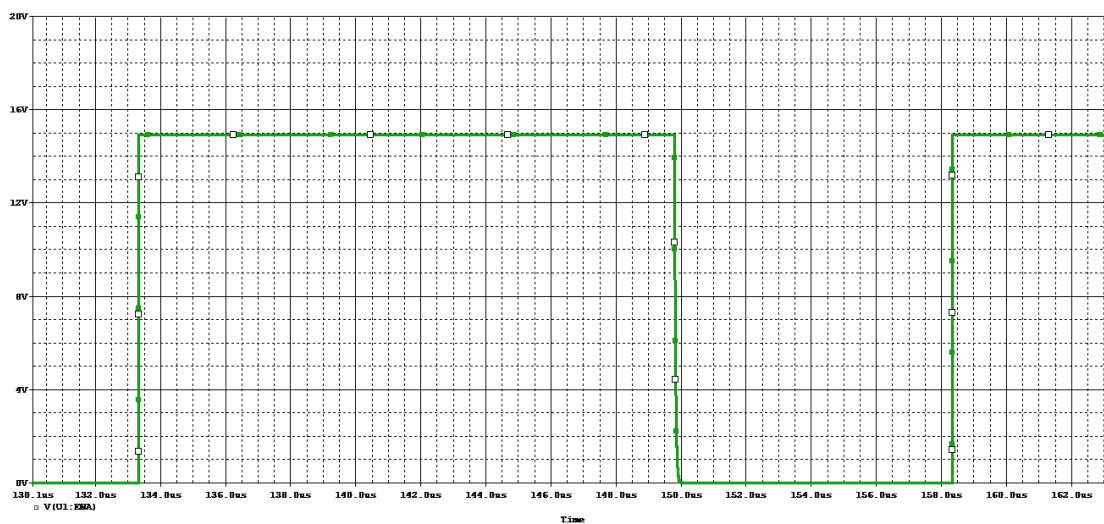


图 8.3: TL494 仿真波形

当 $V_2=3V$ ，可得到其输出的 PWM 波周期 $25.004\mu s$ ，高电平 $8.165\mu s$ ，低电平 $16.839\mu s$ ，其仿真波形如下图所示：

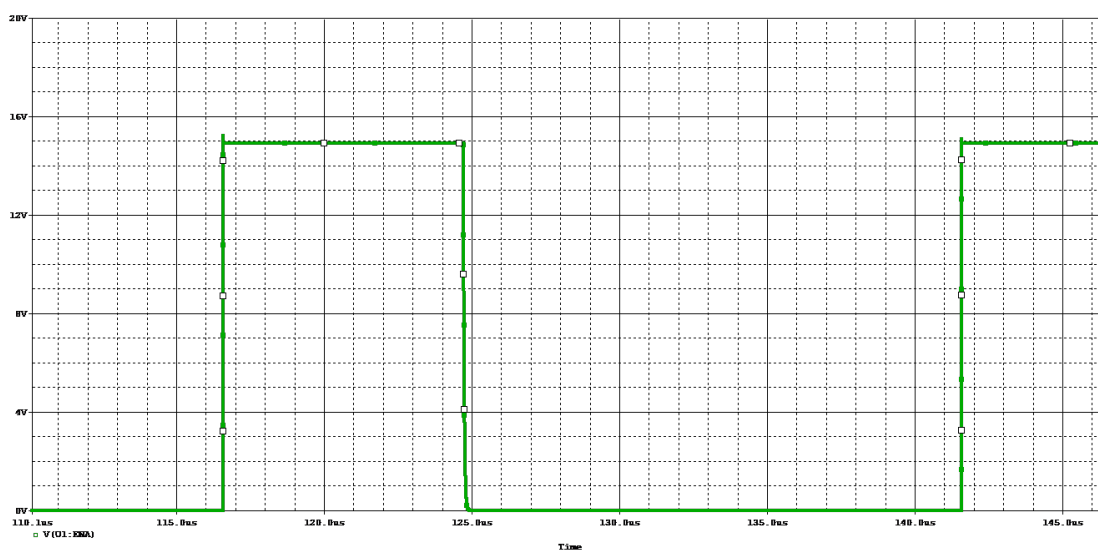


图 8.4: TL494 仿真波形

将以上仿真所得的 PWM 波形的周期和高电平时间代入开关电路仿真文件，可得当 $V_2=2V$ 时的仿真文件如下：

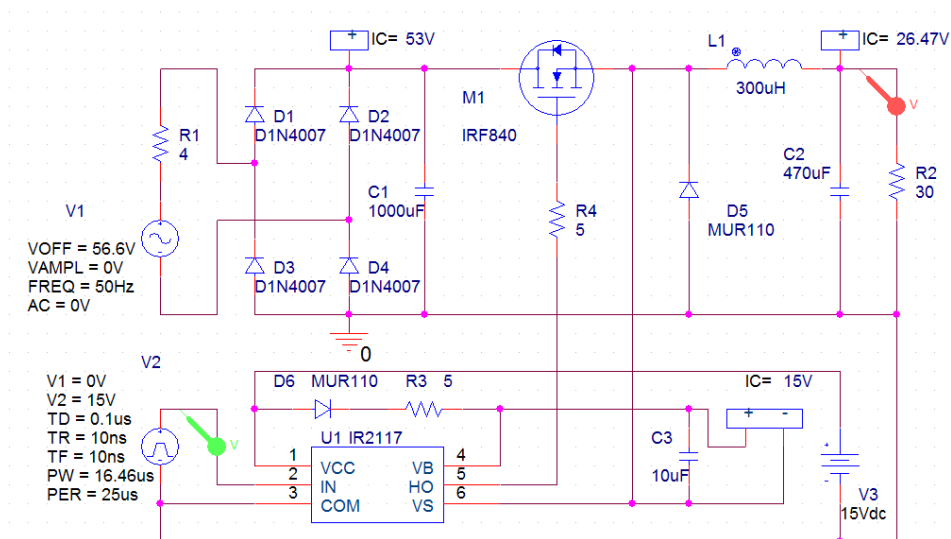


图 8.5: 仿真设置文件

获得仿真波形如下图所示：

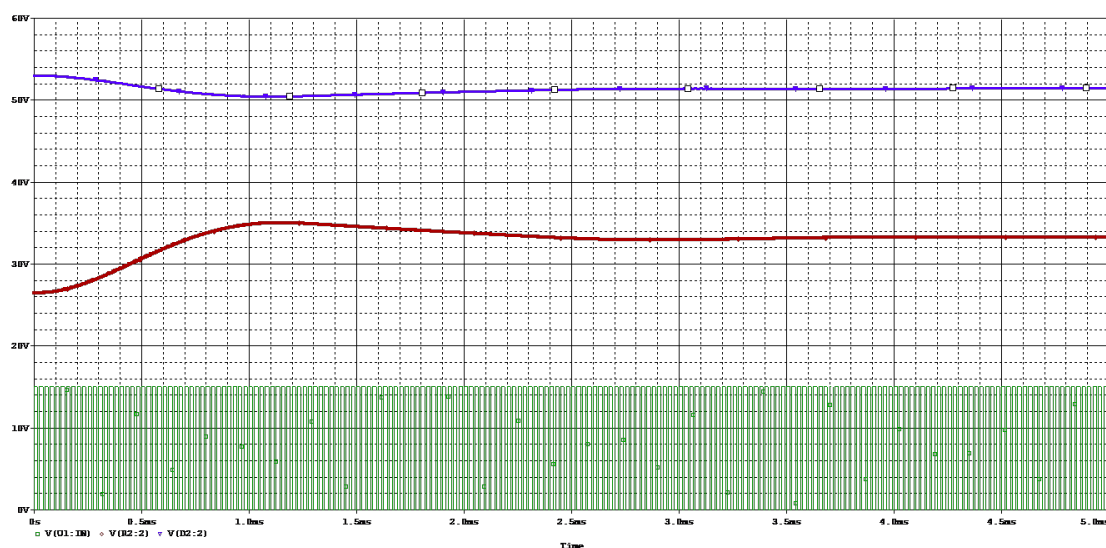


图 8.6: PWM 仿真波形

其中，绿色为 PWM 波形，紫色线为整流滤波后的电压波形，红色线为电源输出电压波形。仿真后可得当 TL494 的 3 号脚电压为 2V 时，稳定后，整流滤波后的电压值为 51.5V，电源输出电压为 32.24V，将这两个电压值作为初始电压值，在仿真文件中设置，同时设置 PW=8.165us，即 TL494 的 3 号脚电压由 2V 阶跃为 3V。设置后如下：

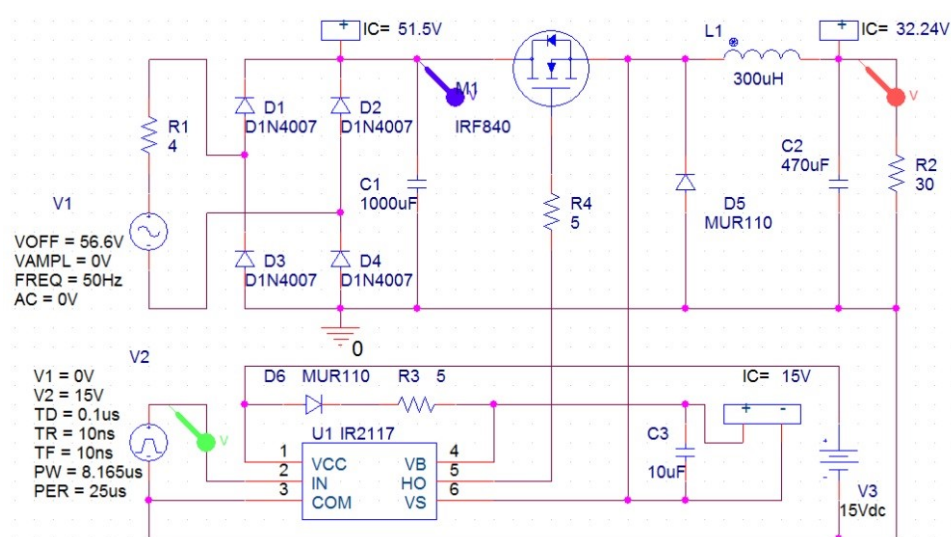


图 8.7: 仿真设置文件

获得仿真波形如下图所示：

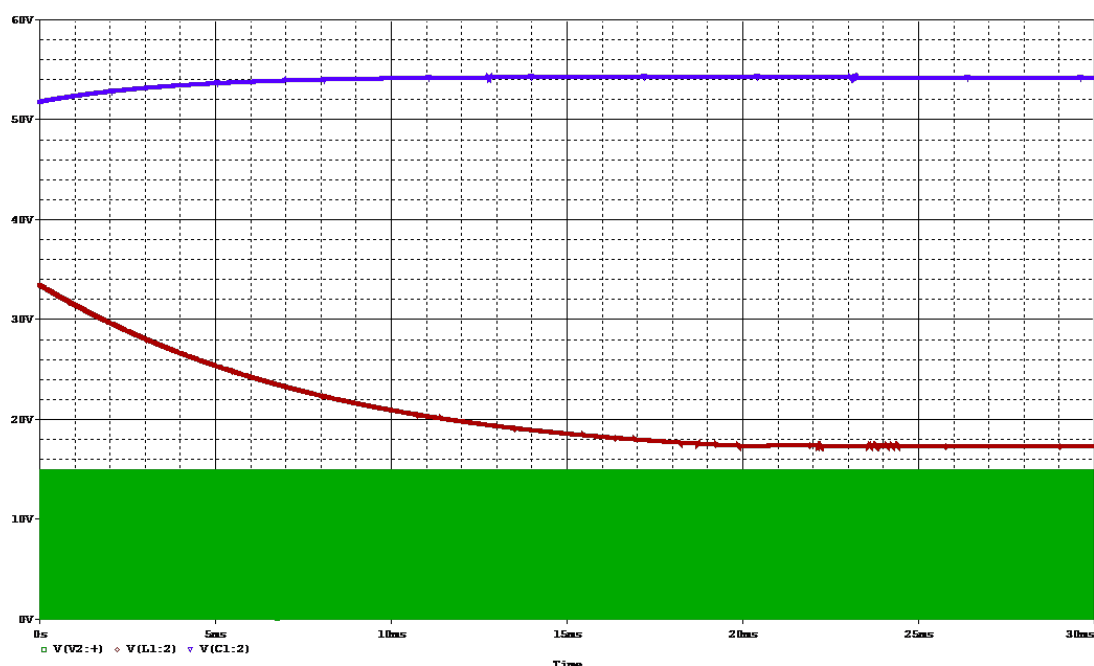


图 8.8: 输出电压仿真波形

输出电压的响应曲线为仿真图中红色线所示,可调电源输出电压从 32.24V 下降到 17.31V。即 TL494 的 3 号脚电压从 2V 阶跃为 3V 后,可调电源输出电压从 32.24V 下降到 17.31V,这个过程大概有 20ms 的时间。将 TL494 的 3 号脚到稳压电源的输出当作一阶对象处理,可得到其传递函数为:

$$G(s) = -\frac{14.93}{1 + 0.008s} \quad (8-1)$$

至此,可调稳压电源的结构框图可以表述如下:

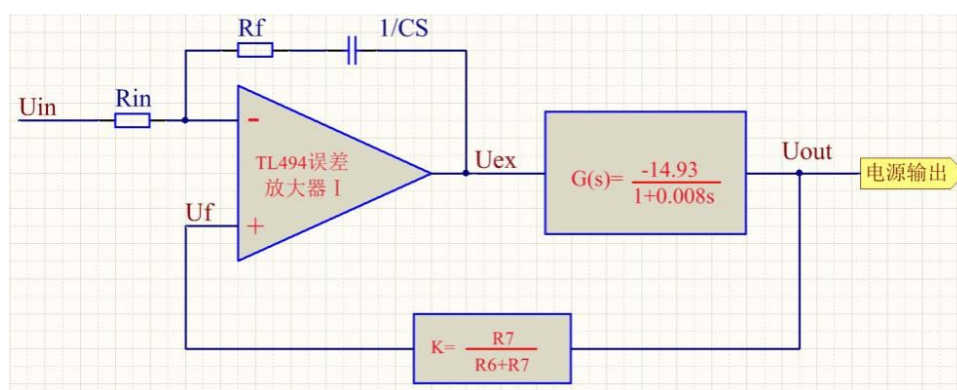


图 8.9: 可调稳压电源结构框图

但需要注意的是,在上面的结构框图中,我们忽略了 C9 以及 R14 的影响, $R_{in}=R_{11}+R_{12}$, $R_f=R_{13}$, $C=C_{10}$ 。Uex 为 TL494 的 3 号脚电压。

$$\frac{U_{in} - U_f}{R_{in}} = \frac{U_f - U_{ex}}{R_f + \frac{1}{CS}} \quad (8-2)$$

$$U_{ex} = -\frac{R_f + \frac{1}{CS}}{R_i}(U_{in} - U_f) + U_f \quad (8-3)$$

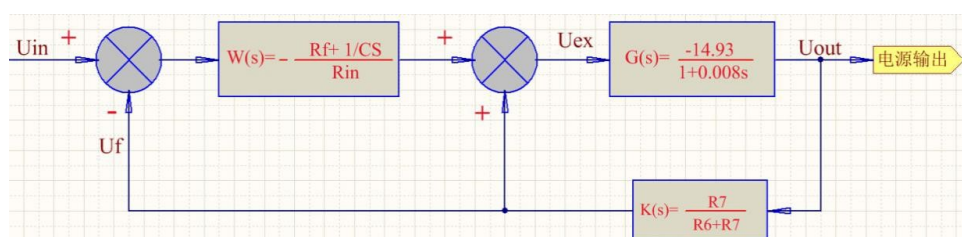


图 8.10: 可调稳压电源结构框图

$$W(s) = -\frac{R_f + \frac{1}{CS}}{R_i} = -(0.5 + \frac{4246}{s}) \quad (8-4)$$

$$K(s) = \frac{R_7}{R_7 + R_6} = 0.1525 \quad (8-5)$$

3 Simulink 仿真

根据上一章节的分析,我们可以获得可调直流稳压源在 simulink 中的仿真结构框图,如下图所示:

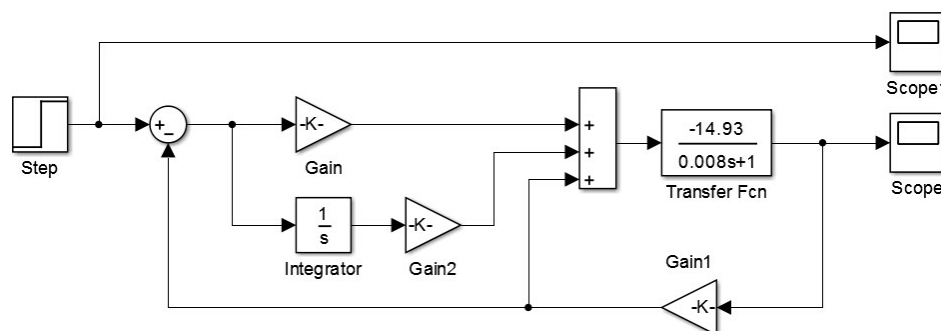


图 8.11: Simulink 仿真结构框图

按照要求设定好仿真参数后，输入给定从 0V 阶跃到 2V，Gain 增益设置为 -0.5，Gain1 增益设置为 0.1525，Gain2 增益设置为 -4246，运行 Simulink 仿真程序后可得稳压电源的输出响应为：

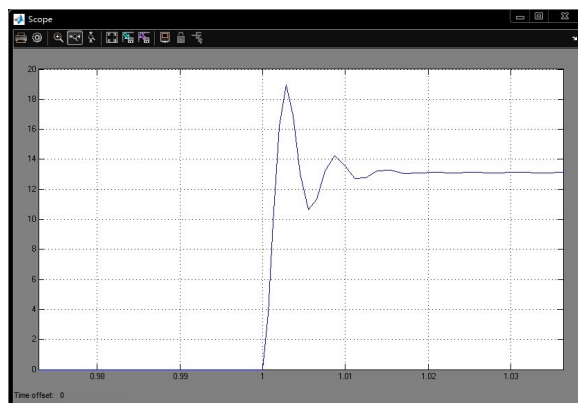


图 8.12: Simulink 仿真波形

从上图中可以看出当给定电压为 2V 时，稳压电源的最终输出为 13.1V。但在上升过程中输出电压最高上冲到 19V，这是不允许的，在实际应用时会损坏负载电路的。改变 Gain2 的增益为 -425，仿真后可得稳压电源输出响应如下：

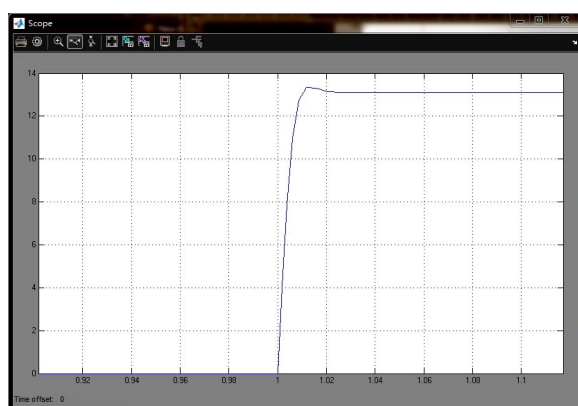


图 8.13: Simulink 仿真波形

可以看出，基本不存在上冲现象，根据 $\text{Gain2} = 425$ ，我们可以求得 $C_{10} = 0.23\mu F$ 比

较合适，进而，我们可以确定本项目电路中 R11, R12, R13, C10 的对应参数。

九、整机原理图绘制

1 整机原理图

根据上述分析，我们可以获得整机电路原理图，如下图所示：

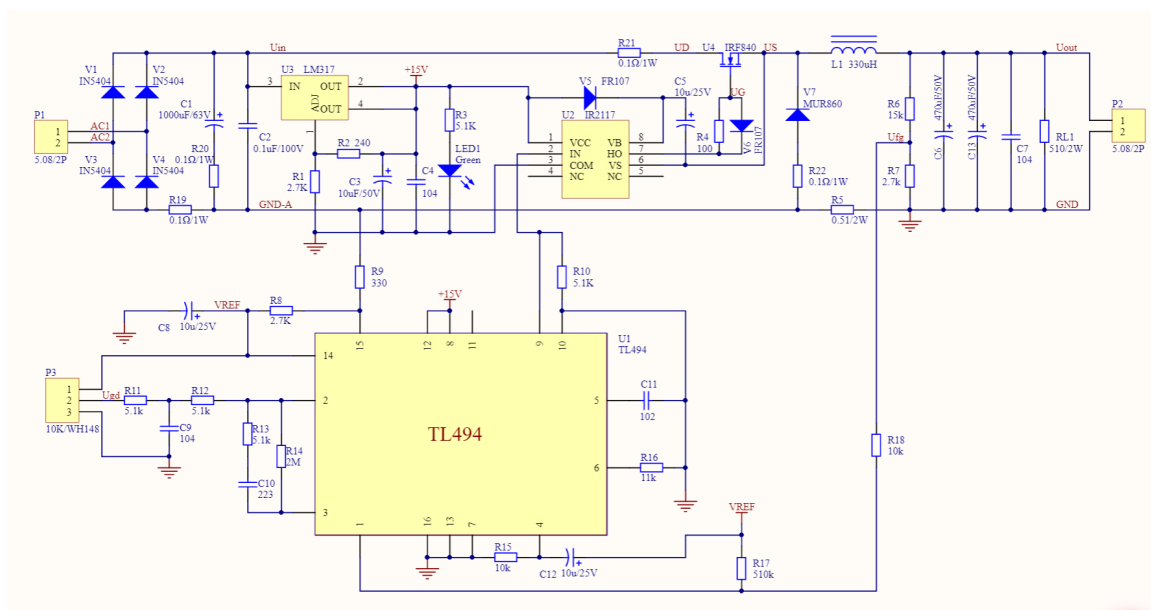


图 9.1: 整机电路原理图

2 元件清单

表 9.1: 可调直流稳压源元件清单

序号	物料代码	物料名称	数量	备注
1		线路板 DCsource V5.1.PCB	1	
2	03.10.03.050	电解电容 CD11-1000 μ F-63V (16*25)	1	C1
3	03.10.01.004	聚丙烯电容 CBB-0.1 μ F-63V (100V)	4	C2, C4, C7, C9,
4	03.10.01.011	聚丙烯电容 CBB-0.022 μ F-63V	1	C10,
5	03.10.01.002	聚丙烯电容 CBB-1000pF-63V (100V)	1	C11
6	03.10.03.034	电解电容 CD11-10 μ F-50V (4*7)	4	C3, C5, C8, C12

7	03.10.03.041	电解电容 CD11-470 μ F-50V (10*21)	2	C6, C13
8	03.30.013	漆包线 QZ-2/130L-0.71mm/公斤	1	1 根 2.5 米长
9	03.30.023	27*14*11 铁粉芯磁环	1	L1
10	03.06.03.002	LED 发光二极管-3mm-绿 (圆头)	1	LED1
11	03.08.03.061	接线端子 KF300/5.0-2T	2	P1, P2
12	03.12.06.163	电位器 WH148-5k Ω	1	P3
13	03.12.01.023	金属氧化膜电阻 RY-1/4W-2.7k Ω \pm 1%	3	R1,R7, R8
14	03.12.01.096	金属氧化膜电阻 RY-1/4W-240 Ω \pm 1%	1	R2,
15	03.12.01.052	金属氧化膜电阻 RY-1/4W-5.1k Ω \pm 1%	5	R3;10 13
16	03.12.01.088	金属氧化膜电阻 RY-1/4W-100 Ω \pm 1%	1	R4,
17	03.12.01.016	金属氧化膜电阻 RY-1/4W-15k Ω \pm 1%	1	R6,
18	03.12.01.099	金属氧化膜电阻 RY-1/4W-330 Ω \pm 1%	1	R9,
19	03.12.01.034	金属氧化膜电阻 RY-1/4W-2M Ω \pm 1%	1	R14
20	03.12.01.008	金属氧化膜电阻 RY-1/4W-10k Ω \pm 1%	2	R15, R18
21	03.12.01.011	金属氧化膜电阻 RY-1/4W-11k Ω \pm 1%	1	R16,
22	03.12.01.054	金属氧化膜电阻 RY-1/4W-510k Ω \pm 1%	1	R17,
23	03.12.02.176	金属膜电阻 RJ-2W-0.5 Ω \leq 100PPM	1	R5,
24	03.12.02.202	金属膜电阻 RJ-2W-510 Ω \pm 1% \leq 100PPM		RL1
25	03.12.01.131	金属氧化膜电阻 RY-1W-0.1 Ω \pm 1%	4	R19, R20, R21, R22
26	03.02.09.046	PWM-TL494CN-DIP16 (德州)	1	U1
27	03.02.09.217	IC-IR2117 (S)-DIP8	1	U2
28	03.06.02.049	VRIC 稳压器 LM317-TO220	1	U3
29	03.06.02.044	场效应管 IRF840-TO220	1	U4
30	03.06.01.005	二极管 1N5408-DO27	4	V1, V2, V3, V4
31	03.06.01.008	二极管 FR107-DO41	2	V5, V6
32	03.06.02.054	快恢复二极管 MUR1560-TO220-2	1	V7
33	03.20.012	蟹形散热器 718	2	

34	03.21.01.027	M3*6 十字螺丝	2	
35	03.21.02.002	M3 镀锌螺母	2	
36	03.21.03.002	弹垫 $\phi 3$	2	

十、测试数据

按照下列要求，分别测试数据

1. 输入电源接 +50V 直流电源（直流稳压电源 CH1 和 CH2 串联、限流 1A）；调节输出电压为 15V，输出接负载电阻。

输出电压可以正确的调整到 15V，且电压稳定，测试正确。

2. 用直流电压表测量 LM317 三个引脚的电压，确定 OUT 和 ADJ 的电压与计算值是否相符，用示波器测量 OUT 的直流分量和交流分量（纹波）。将纹波电压与数据手册的数据进行比较。

测量得到 LM317 的引脚数据如下表所示：

对应引脚	电压/V
adj	14.67
out	15.23
in	48.9

表 10.1: LM317 管脚电压

测量得到纹波电压图像如下图所示：

读取得到直流有效值为 19.8mV，交流有效值为 15.4V，与数据手册进行比较，结果大致相同。

3. 测量发光二极管的正向压降和电流值，电流值可通过 R3 上的电压计算。对发光二极管进行测量，获得测量数据如下表所示：

二极管压降/V	1.94
R_3 电压/V	13.65V
二极管电流/mA	2.68

表 10.2: 发光二极管测试数据

4. 测量 TL494 锯齿波的波形参数（最低电压、最高电压、频率等），并与理论值相比较。

TL494 相关参数	
峰峰值/V	3.06
最高电压/V	2.97
最低电压/V	-0.08
频率/KHz	104.28

表 10.3: TL494 相关参数

测量得到锯齿波波形如下图所示：

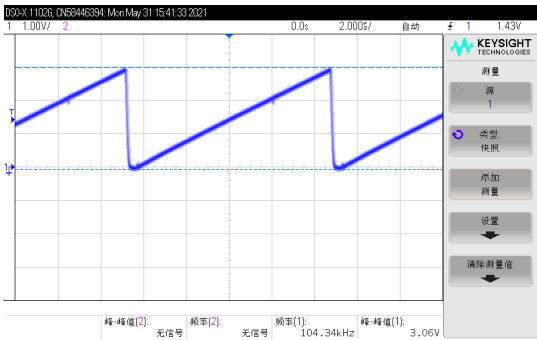


图 10.1: 锯齿波波形

5. 用示波器的通道 1 和通道 2 同时测量 TL494 引脚 9 和 IR2117 引脚 7 的波形，记录波形参数，比较相位关系。

使用示波器测量得到 TL494 引脚 9 以及 IR2117 的引脚 7 波形关系如下图所示：

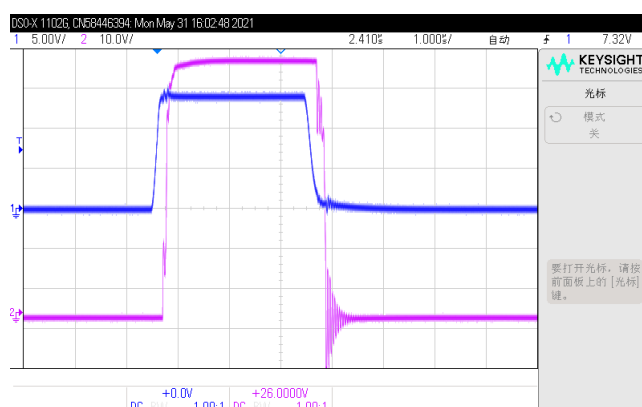


图 10.2: TL494 与 IR2117 相关波形

测得数据如下表所示

测量位置	TL494 管脚 9	IR2117 管脚 7
占空比/ %	34.118	34.98
电压最大值/ V	15.3	63.9
电压最小值/ V	-0.8	-1.225
电压峰峰值/ V	16.1	65.125
频率 /KHz	113.46	113.66

表 10.4: TL494 与 IR2117 相关数据

测得二者相位延迟为 230ns，即相位差为：1.495°，二者相位基本相同，但 IR2117 引脚 7 的波形在突变时会有较大的波动。

6. 用示波器观察 R21 的电流波形，计算实际电流值。

使用示波器观察 R21 的电流波形，获得波形如下图所示：

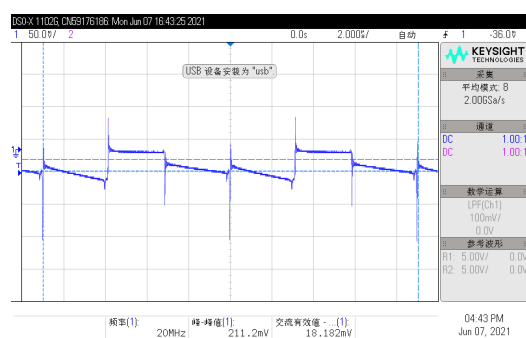


图 10.3: R21 电流波形

测量得到其交流有效值为 4.94V，直流有效值为 5.72mV。

7. 用示波器的通道 1 和通道 2 同时测量 US 的波形和 R22 的电流波形，观测续流二极管等效电容引起的冲击电流产生的时刻和大小，分析此冲击电流流经的路径。

使用示波器同时测量 US 以及 R22 的电流波形，获得波形如下图所示：

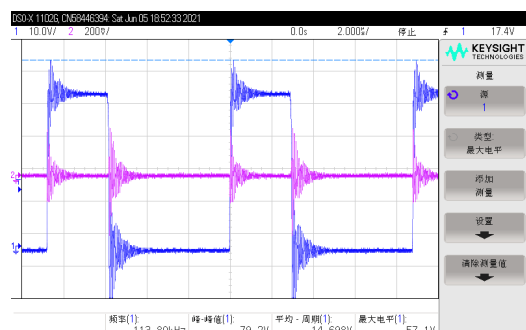


图 10.4: US 及 R22 电流波形

测量得到二者冲击电流所产生的电压分别为：72.5mV 和 -51.875mV。

8. 用示波器的通道 1 和通道 2 同时测量 US 的波形和 R5 的电流波形，分析流过场效应管、续流二极管和电感的三个电流之间的关系。

测量得到 US 和 R4 的波形如下图所示：

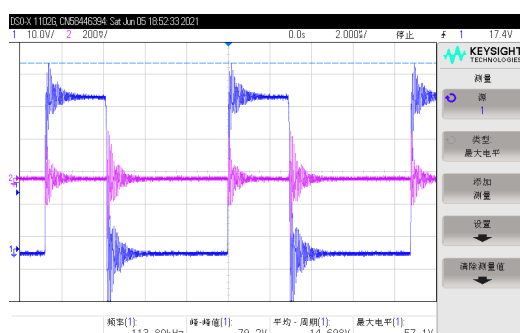


图 10.5: R5 以及 US 波形

9. 用示波器的通道 1 和通道 2 同时测量流过 R5 的电流波形和 TL494 引脚 15 的电压波形，分析电流截止保护的原理和参数整定。

使用示波器分别测量 R5 以及 RL494 引脚 15 的电压波形，获得波形曲线如下图所示：

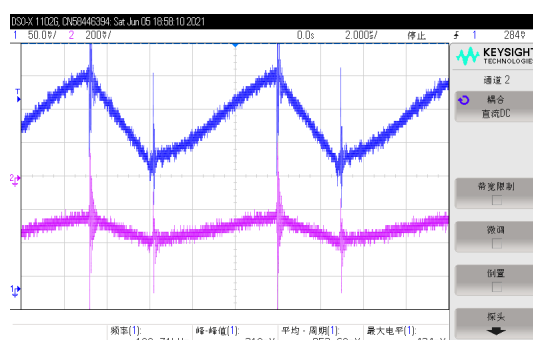


图 10.6: R5 及 TL494 引脚 15 电压波形

R8,R9,TL494 共同负责实现电流截止保护的功能。在 R8 的另一端有一参考电压，而 R9 另一端与控制电流端相连。根据电路原理，随着电流的增大，引脚 15 的电压值减小，当电流进一步增大到引脚 15 的电压值小于 0 时，tl494 内部比较器的控制导致电路关闭，从而实现电流截止保护。

10. 使用示波器观测 R20，R19 的电流波形，分析该电流的成因 (可以用仿真代替)

仿真电路图如下图所示：

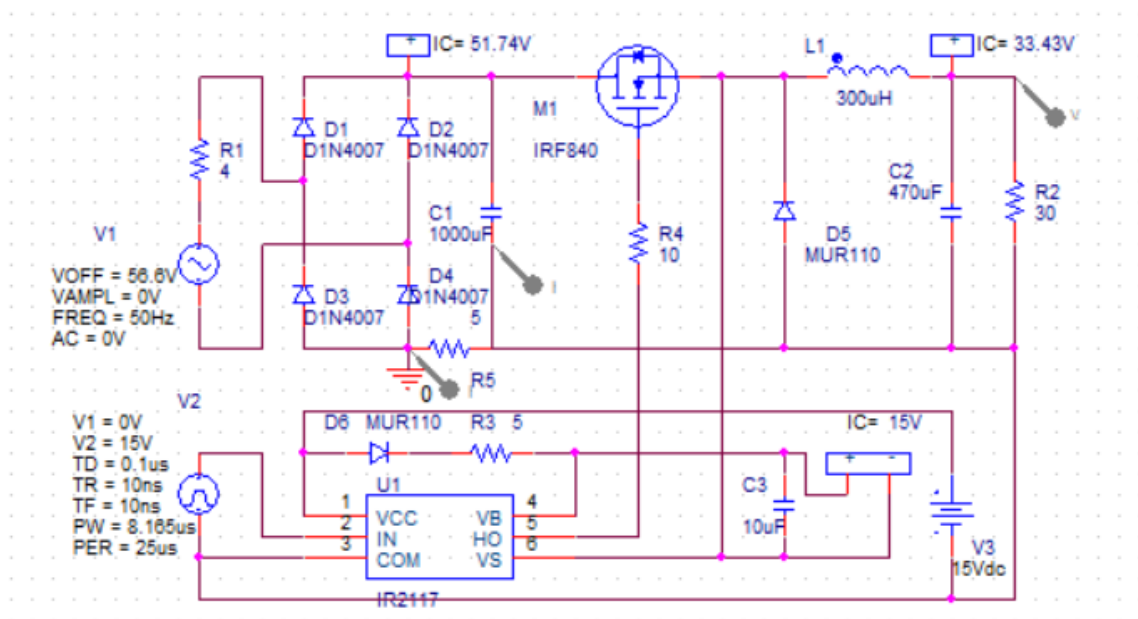


图 10.7: R20,R19 仿真电路图

在此电路图中，由于 IR2117 采用 15V 电源供电，为使仿真收敛，增加电阻 R3 和 R4。

获得仿真波形如下图所示:

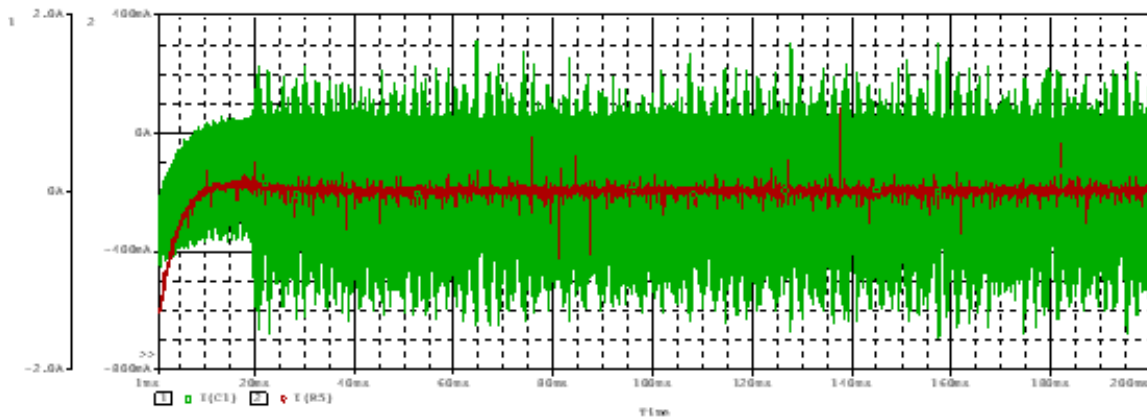


图 10.8: R19, R20 仿真波形

11. 测量 U_{out} 的直流分量和交流分量 (纹波), 计算纹波系数, 分析纹波产生的原因。

测量得到 U_{out} 的相关数据如下表所示:

直流有效值/V	14.6
交流峰峰值/mV	550
交流有效值/mv	27.9

表 10.5: U_{out} 相关参数

纹波系数为：0.038，纹波产生的原因可能为焊接不准，以及器件老化等原因，导致电路中噪声较大，进而产生纹波电压。

12. 测量 U_{out} 和 U_{fg} 的电压值，计算反馈系数，并与计算值比较。

测量得到 $U_{out} = 15.02V$, $U_{fg} = 2.34V$ ，其反馈系数为： $K = \frac{2.34}{15.02} = 0.1556$ ，而理论计算得到的反馈系数 $K = 0.1525$ ，与测量结果极为相近，因此可以认为测试结果正确。

13. 调节输出值为 10V、20V 和 30V，分别测量空载和带载时的输出电压，计算此稳压电源在不同输出电压时的输出特性。（输出电压较高时，测量时间要短，以免负载电阻温度过高）调节空载输出值分别为 10V，20V，30V，进一步测量稳压电源在不同输出电压时的输出特性，为控制变量，我们需要保证输出的电流相同，因此设定负载电阻在输出电压分别为 10V、20V、30V 时分别为 10Ω , 20Ω , 30Ω ，测量得到数据如下表所示：

空载输出电压/V	负载电阻/ Ω	负载输出电压/V
10	9	9.97
20	18	19.97
30	27	29.96

表 10.6: 稳压电源输出特性

14. 记录电源开机时 TL494 引脚 4 和引脚 9 的波形，分析开机过程是否与设计要求一致。

测得 TL494 引脚 4 的开机波形如下图所示：

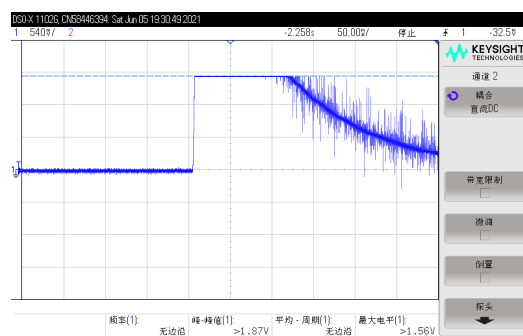


图 10.9: TL494 引脚 4 开机波形

测得 TL494 引脚 9 的开机波形如下图所示：

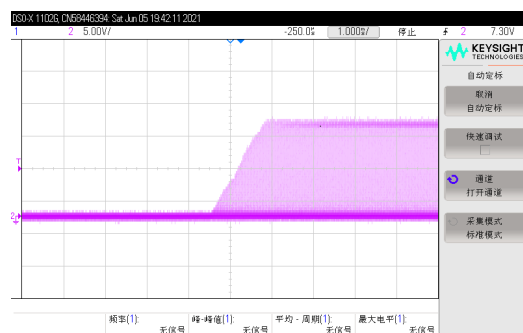


图 10.10: TL494 引脚 9 开机波形