

An Improved Buck Circuit

《电路原理》电路设计报告

2024.11.07 - 2024.12.31

目录

1 设计要求	2
2 脉冲发生器	2
2.1 脉冲发生器原理	2
2.2 脉冲发生器改进方案	3
3 Buck 电路	4
3.1 Buck 电路原理	4
3.2 Buck 改进方案 1	5
3.3 Buck 改进方案 2	7
4 仿真电性能测试	8
4.1 改进方案 1 仿真测试	8
4.2 改进方案 2 仿真测试	11
4.3 Typical 方案仿真测试	13
5 设计合理性检查	14
5.1 设计参数检查	14
5.2 关键元件检查	14
5.3 设计修改	14
5.4 单电源(虚地) 仿真测试	15
6 实际电性能测试	16
6.1 脉冲发生器	16
6.2 完整电路	19
6.3 性能测试	20
7 设计总结与讨论	23
参考文献	25
附录 A 部分元件实测参数	26
A.1 通用二极管 1N4007 IV 特性	26
A.2 N-MOSFET 2N7000 IV 特性	27
附录 B Matlab 源码	29

Buck 电路是一种开关型 DC-DC 变换器，用于将输入的（高）直流电压转换为输出（低）直流电压。在本次，我们将设计一个开关频率和占空比可调的 Buck 电路。其中，开关频率主要影响输出的正弦（三角）纹波大小，占空比可以控制输出电压大小。

需要注意的是，开关频率和占空比都可能影响电路的稳定性（如抗噪性能），实际使用时应做抗干扰测试，或者进一步改进后再使用。

1 设计要求

利用运算放大器 OPA 和 MOSFET 实现 Buck 电路，下面是具体的设计要求：

- (1) 输出电压 3.3 V，电压输出纹波比 $r = \frac{\Delta U_o}{U_{o,\text{ave}}} < 5\%$, $3.3 \text{ V} \times 5\% = 165 \text{ mV}$, 相当于 $\pm 82.2 \text{ mV}$;
- (2) 使用一个 +15 V 电源和一个 -15 V 电源供电；
- (3) MOSFET 型号为 2N7000；
- (4) 运放型号为 LM258N；
- (5) 整流二极管型号为 1N4007；
- (6) 电阻电容电感数量不限；最后的滤波电容最大值不超过 $470 \mu\text{F}$ ，最后的负载电阻不要小于 $2 \text{ k}\Omega$ ；
- (7) 电感非理想，所以需要测试电感的 Q 值和 DCR (Direct Current Resistance)，仿真时将 DCR 考虑进去；
- (8) 电容非理想，所以需要测试电容的 ESR (Equivalent Series Resistance) 和实际容值；
- (9) 实验报告里面包含原理说明、设计的电路图、仿真结果、实际电路照片、实际电路测试结果及分析。

2 脉冲发生器

2.1 脉冲发生器原理

Buck 电路中最关键的无疑是 MOS 的开关作用，为了能产生提供给 MOSFET 的脉冲电压，我们先讨论脉冲发生器 (Pulse Generator)，典型的脉冲发生器如下图所示：

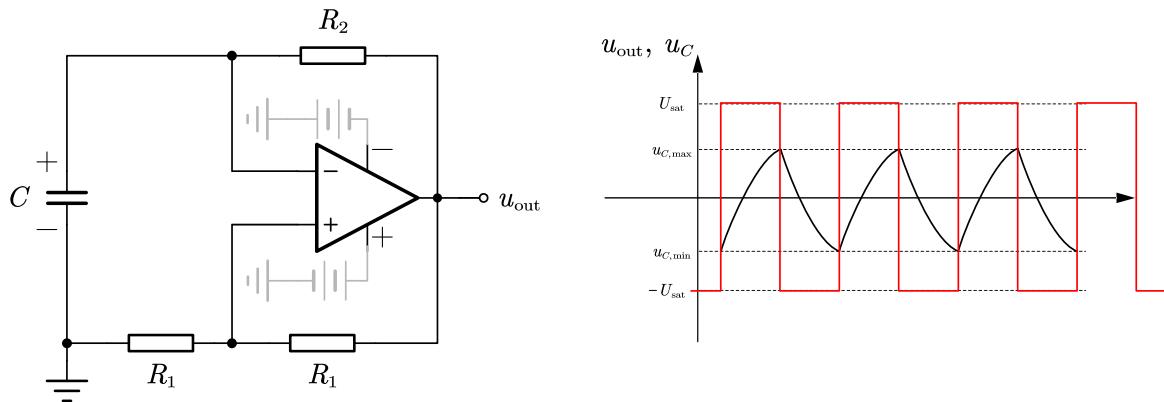


图 1: 典型脉冲发生器 (Typical Pulse Generator)

为 OPA 提供 +15 V 和 -15 V 电压，记 OPA 饱和电压为 $\pm U_{\text{sat}}$ 。设 $t = 0$ 时 $u_C < 0$ 位于最小值，处于上升阶段，则此时 $U_o = +U_{\text{sat}}$ ，当 u_C （也即 u_- ）上升到 $u_+ = \frac{R_1}{R_1+R_1}U_{\text{sat}} = 0.5U_{\text{sat}}$ 并超过它的瞬间，OPA 输出突变为 $-U_{\text{sat}}$ ， u_C 进入下降阶段。

同理，在下降阶段， $U_o = -U_{\text{sat}}$ 。当 u_C 下降到 $u_+ = -\frac{R_1}{R_1+R_1}U_{\text{sat}} = -0.5U_{\text{sat}}$ 并低于它的瞬间，OPA 输出突变为 $+U_{\text{sat}}$ ， u_C 进入上升阶段。如此循环往复，即可得到脉冲信号。由于上升和下降过程完全对称，脉冲占空比恒为 50 % 不变，且周期为：

$$T = 2R_2C \ln \left(1 + 2 \frac{R_1}{R_1} \right) = 2R_2C \ln 3, \quad f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

为了方便参考，我们也给出 OPA 正负电源分别接 V_{DD} 和 V_{SS} 时的脉冲周期：

$$T = 2R_2C \ln \left(\frac{1 - \frac{V_{SS}}{V_{DD}} \cdot \frac{R_f}{R_f + R_1}}{1 - \frac{R_f}{R_f + R_1}} \right), \quad f = \frac{1}{T} \quad (2)$$

2.2 脉冲发生器改进方案

显然，占空比恒为 50 % 会使 Buck 电路输出电压恒为 $0.5U_S$ ，这无法满足我们的需求，需要改进脉冲发生器。改进方案如图 3 所示。

在图 3 中，我们将 R_f 换为滑动变阻器（可调电阻），并在 R_2 与电容之间加入二极管与滑动变阻器 R_k 的并联，这样便可以通过 R_f 调节电容电压振荡的幅度，从而调节脉冲频率，同时又能通过 R_k 与二极管的并联，实现上升下降阶段有不同的时间常量 τ ，以此来调节脉冲占空比。

设二极管导通电阻 R_D ，改进的脉冲发生器占空比 k 和周期 T 为（为 OPA 提供 +15 V 和 -15 V 电压）：

$$k = \frac{1}{1 + \frac{R_2 + R_D \parallel R_k}{R_2 + R_k}}, \quad T = (2R_2 + R_k + R_D \parallel R_k) C \ln \left(1 + \frac{2R_f}{R_1} \right), \quad f = \frac{1}{T} \quad (3)$$

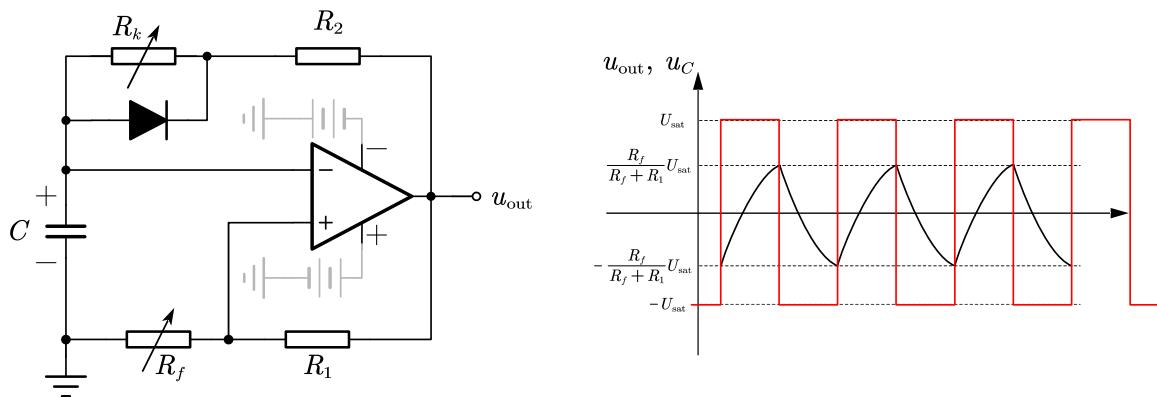
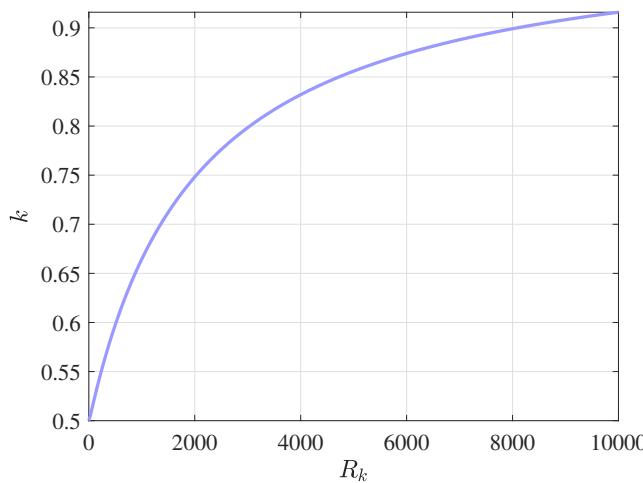
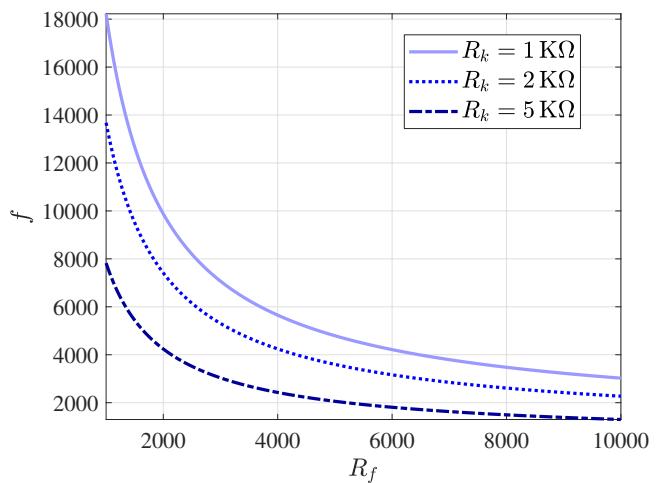


图 2: 改进的脉冲发生器 (Improved Pulse Generator)



(a) 占空比 k 关于 R_k 的变化情况



(b) 频率 f 关于 R_f 的变化情况

图 3: 改进后的脉冲发生器

为了直观感受 R_k 对占空比的调节作用和 R_f 对频率的调节作用，我们作出占空比 k 关于 R_k 变化的图像，以及频率 f 关于 R_f 变化的图像。令 $R_2 = 1 \text{ K}\Omega$, $R_D = 10\Omega$ ，则占空比如图 3 (a) 所示；再令 $C = 100 \text{ nF}$, $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$ ，作出频率变化如图 3 (b) 所示。

3 Buck 电路

3.1 Buck 电路原理

图 4 是一个典型的 Buck 电路：

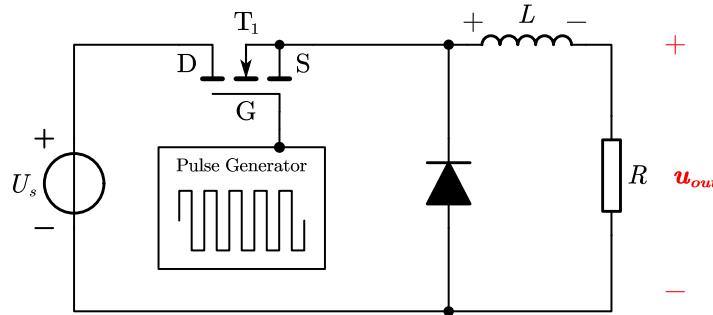


图 4: 典型 Buck 电路 (Typical Buck Circuit)

我们只考虑电路达到稳定工作状态时的情况，即输出电压在平均值附近小范围摆动。为了推导其工作原理，先作出一些必要的假设：

- (1) 经过可接受的启动时间后，电路能够达到稳定输出状态，此时输出电压在均值附近小幅振荡；
- (2) MOSFET 可视为 Switch-Resistor Model，且导通电阻极小（相比于 KΩ 量级）：这意味着电路其它电阻在 KΩ 级别，且 MOSFET 各级电压满足：

$$u_{GS} > U_T \quad \text{and} \quad u_{GD} > U_T \quad (4)$$

- (3) 二极管可视为 Switch-Source-Resistor Model，且导通电阻极小（相比于 KΩ 量级）；
- (4) MOSFET 开关周期远小于电感时间常量 τ ，即 $T \ll \tau$ ，这等价于开关频率 $f \gg \frac{1}{\tau}$ ，此时输出纹波可近似视为三角波（或正弦波）；
- (5) MOSFET 开关频率不高于 500 KHz，以避免高频状态下元件性能异常，此时可不考虑高频效应。

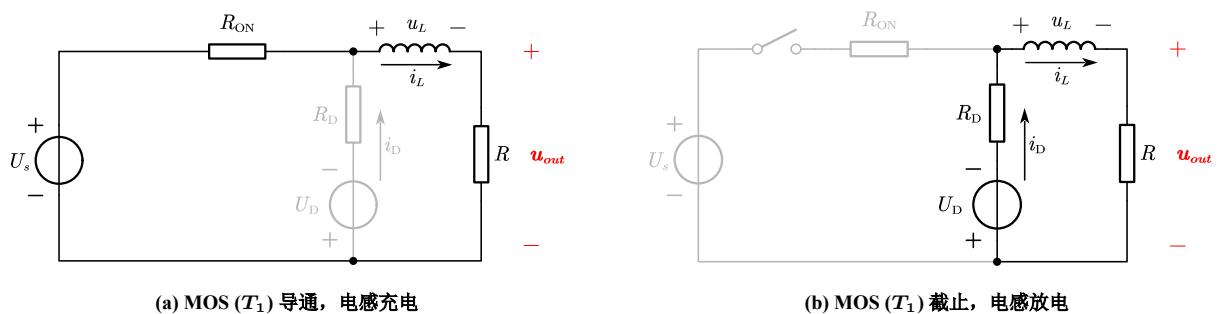


图 5: Buck Circuit 等效电路

设脉冲频率为 f ，占空比为 k ，一个周期 T 分为高电平 T_{ON} 和低电平 T_{OFF} 。下面作具体的推导。设 $t = 0$ 时，MOSFET 的 G 级接收到高电平脉冲信号，MOSFET 导通，等效电路如图 5(a) 所示。此时电感电流应为最小值，设其为 $(i_L)_{min}$ ，稳态值是 $\frac{U_s}{R + R_L + R_{ON}}$ ，由三要素法，有：

$$i_L(t) = (i_L)_{min} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ON}}} + \frac{U_s}{R + R_L + R_{ON}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{ON}}}\right) \Rightarrow \quad (5)$$

$$i_L(t) = \left[(i_L)_{min} - \frac{U_s}{R + R_L + R_{ON}} \right] \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{ON}}} + \frac{U_s}{R + R_L + R_{ON}}, \quad \tau_{ON} = \frac{L}{R + R_L + R_{ON}} \quad (6)$$

经过 T_{ON} 时间，MOSFET 关断，则 $[0, T_{ON}]$ 时间段内的电感电流增量为：

$$(\Delta i_L)_{ON} = \left[(i_L)_{min} - \frac{U_s}{R + R_L + R_{ON}} \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_{ON}}{\tau_{ON}}}\right), \quad \tau_{ON} = \frac{L}{R + R_L + R_{ON}} \quad (7)$$

类似的思路, 设 $t = 0$ 时, MOSFET 的 G 级接收到低电平脉冲信号, MOSFET 关断, 等效电路如图 5 (b)。此时电感电流应为最大值, 设其为 $(i_L)_{\max}$, 由于二极管存在导通压降 U_D , 电流“稳态值”是 $-\frac{U_D}{R+R_L+R_D}$, 由三要素法, 有:

$$i_L(t) = (i_L)_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{OFF}}}} - \frac{U_D}{R + R_L + R_D} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\text{OFF}}}}\right) \Rightarrow \quad (8)$$

$$i_L(t) = \left[(i_L)_{\max} + \frac{U_D}{R + R_L + R_D} \right] \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\text{OFF}}}} - \frac{U_D}{R + R_L + R_D}, \quad \tau_{\text{OFF}} = \frac{L}{R + R_L + R_D} \quad (9)$$

经过 T_{OFF} 时间, MOSFET 又导通, 则 $[0, T_{\text{OFF}}]$ 时间段内的电感电流增量为:

$$(\Delta i_L)_{\text{OFF}} = \left[(i_L)_{\max} + \frac{U_D}{R + R_L + R_D} \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_{\text{OFF}}}{\tau_{\text{OFF}}}}\right) \quad (10)$$

电路输出达到稳态, 所以应有 $(\Delta i_L)_{\text{ON}} + (\Delta i_L)_{\text{OFF}} = 0$, 简记 $e_{\text{ON}} = e^{-\frac{T_{\text{ON}}}{\tau_{\text{ON}}}}$ 和 $e_{\text{OFF}} = e^{-\frac{T_{\text{OFF}}}{\tau_{\text{OFF}}}}$, 得到:

$$(i_L)_{\max} = \frac{U_s}{R + R_L + R_{\text{ON}}} \cdot \frac{1 - e_{\text{ON}}}{1 - e_{\text{ON}}e_{\text{OFF}}} - \frac{U_D}{R + R_L + R_D} \quad (11)$$

$$(i_L)_{\min} = e_{\text{OFF}} (i_L)_{\max} = \frac{U_s}{R + R_L + R_{\text{ON}}} \cdot \frac{e_{\text{OFF}} - e_{\text{ON}}e_{\text{OFF}}}{1 - e_{\text{ON}}e_{\text{OFF}}} - \frac{e_{\text{OFF}} U_D}{R + R_L + R_D} \quad (12)$$

$$\Delta i_L = (1 - e_{\text{OFF}}) (i_L)_{\max} = \frac{U_s}{R + R_L + R_{\text{ON}}} \cdot \frac{(1 - e_{\text{ON}})(1 - e_{\text{OFF}})}{1 - e_{\text{ON}}e_{\text{OFF}}} - \frac{U_D(1 - e_{\text{OFF}})}{R + R_L + R_D} \quad (13)$$

由于功率损耗发生在二极管导通电阻 R_D 、压降 U_D 和 MOSFET 导通电阻 R_{ON} 上, 我们可以进一步计算功率损耗和转化效率:

$$P_{\text{loss}} = k (i_L)_{\text{average}}^2 R_{\text{ON}} + (1 - k) (i_L)_{\text{average}}^2 R_D + (1 - k) (i_L)_{\text{average}} U_D \quad (14)$$

$$= (i_L)_{\text{average}}^2 [k R_{\text{ON}} + (1 - k) R_D] \quad (15)$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{out}} + P_{\text{loss}}} = \frac{(u_o)_{\text{average}}}{(u_o)_{\text{average}} + (i_o)_{\text{average}} [k R_{\text{ON}} + (1 - k) R_D + (1 - k) U_D]} \quad (16)$$

如果取近似 $(u_o)_{\text{average}} = k U_s$, $(i_o)_{\text{average}} = \frac{k U_s}{R}$, 则转化效率为:

$$\eta = \frac{R}{R + k R_{\text{ON}} + (1 - k) R_D + \frac{(1-k) U_D}{k U_s} R} \quad (17)$$

3.2 Buck 改进方案 1

一方面, 上面的电路, 输出电压纹波比 $r = \frac{\Delta U_o}{U_{o,\text{ave}}}$ 可能较大; 另一方面, 二极管的导通压降 U_D 可能使电路效率明显降低 (尤其在输出低电平时)。改进方案见图 6。

在图 6 中, 一方面, 我们在输出加一个较大的电容 C , 这可以明显降低输出纹波幅度; 另一方面, 我们用另一个 MOSFET 来替代二极管 D, 此 MOSFET 的 G 级由脉冲信号经过反相器得到, 这样相当于将二极管的导通压降 U_D 降低为 0, 同时将 R_D 换为 R_{ON} , 既可以避免压降 U_D 带来的占空比失调, 也可以提高电路的转化效率。

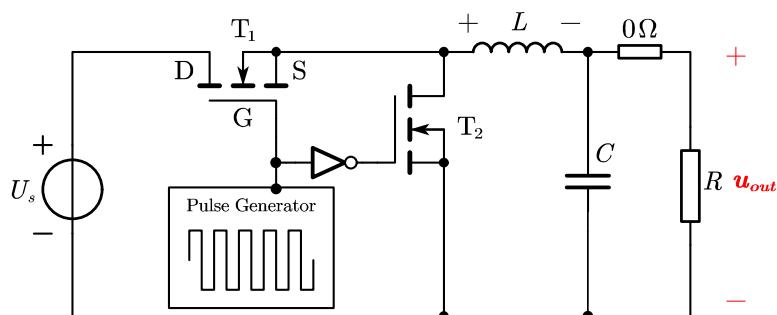


图 6: Buck 改进方案 1

另外，我们在输出端串联了一个 0Ω 电阻，这使得我们可以方便地串入小电阻（示波器测电压）或电流表来测量输出电流。改进之后，开关 MOS 导通与不导通时的等效电路如下图：

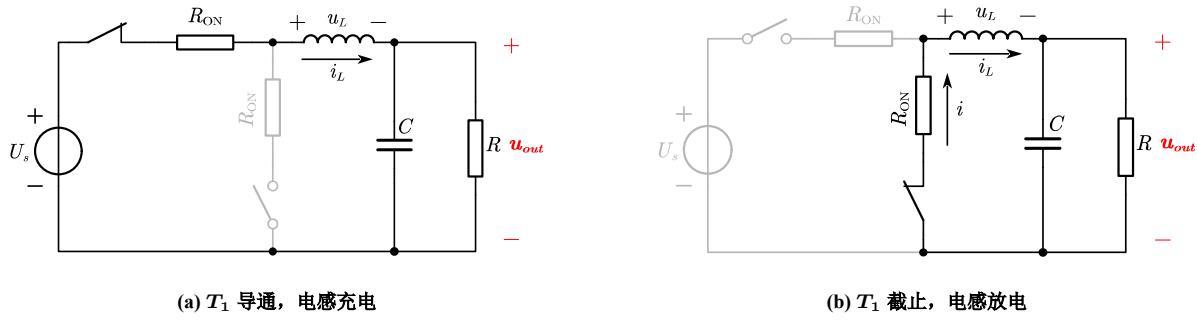


图 7: 改进方案 1 等效电路

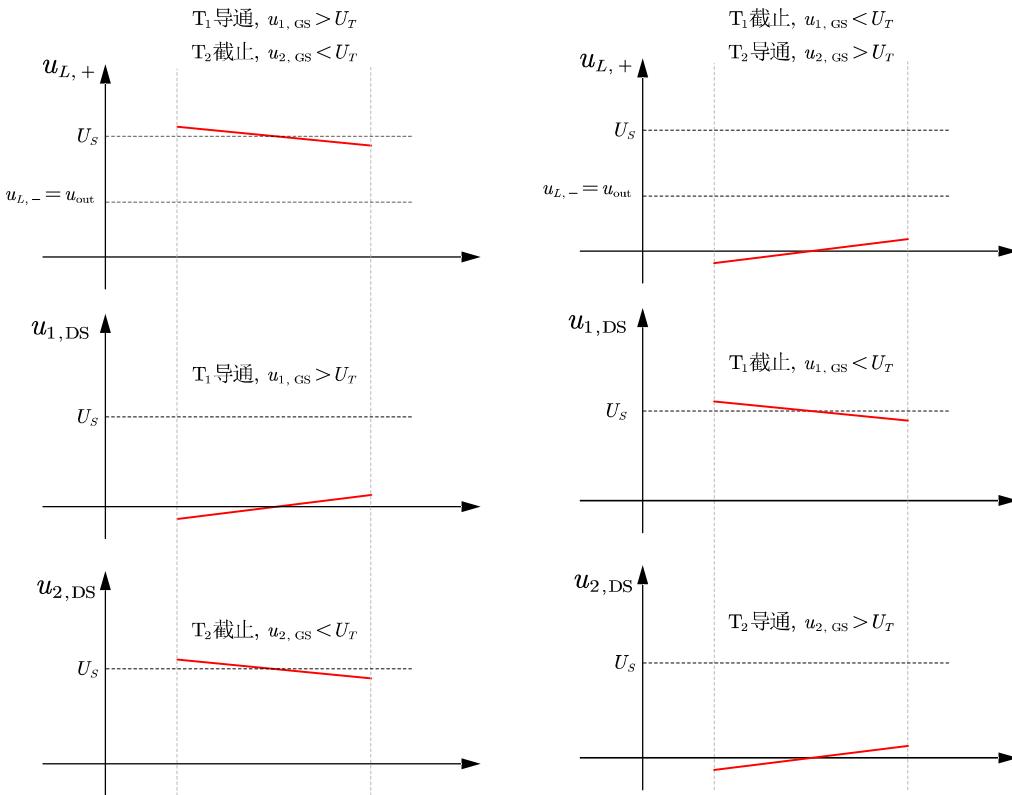


图 8: 改进方案 1 中各元件电压波形

作出两种状态下的各元件电压波形，如图 8 所示。稳定工作时，可分为两种状态。记开关 MOS 为下面以输出负端 $u_{o,-}$ 为电压参考点，定性地分析两种状态下的电路行为：

- (1) 开关 MOS (T_1) 导通：此时二极管 MOS (T_2) 截止，电路如图 7 (a)。 $u_{L,-}$ 维持在 u_{out} 附近，电感正端（即 T_2 D 极） $u_{L,+} = u_{2,DS}$ 在 U_S 附近小幅下降（近似线性），这使得 T_1 的 DS 电压 $u_{1,DS}$ 在 0 附近小幅线性上升（从负到正）；
- (2) 开关 MOS (T_1) 截止：此时二极管 MOS (T_2) 导通，电路如图 7 (b)。 $u_{L,-}$ 仍维持在 u_{out} 附近，电感正端（即 T_2 D 极） $u_{L,+} = u_{2,DS}$ 在 0 附近小幅线性上升（从负到正）， T_1 的 DS 电压 $u_{1,DS}$ 在 U_S 附近小幅线性下降；

3.3 Buck 改进方案 2

如果想进一步降低输出纹波，可考虑下图所示的改进方案：

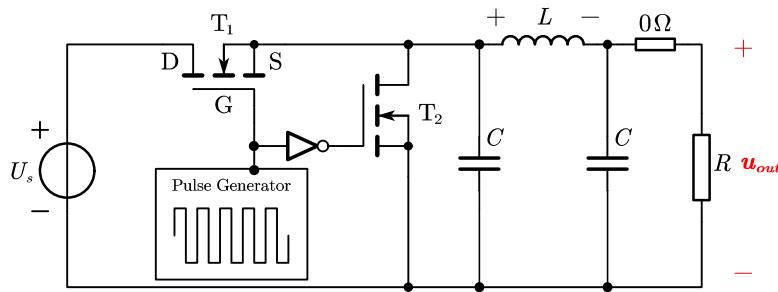


图 9: Buck Circuits 改进方案 2

与第一种方案相比，这种方案只是将 LC 滤波换为了 $CLC \pi$ 型滤波，看似变化不大，实则从原理层面作了改变。

由于 T_2 两端并联了较大的电容 C ，它 DS 间的电压 $u_{2,DS}$ 无法发生突变，经过半定量推导可知 $u_{2,DS}$ 会在 u_{out} 附近以锯齿波形小幅振荡。同理， T_1 的 DS 电压 $u_{1,DS}$ 在 $(U_s - u_{out})$ 附近以锯齿波形小幅振荡。

也就是说，如果想采用此种电路，便需要 MOSFET 在 $\max\{u_{out}, U_s - u_{out}\}$ 能正常工作，对元件的要求比较高，2N7000 不能满足此要求，需要另选其他型号。

从右图中的电压波形可以看到，各元件的工作方式发生了根本性的改变。

虽然对元件要求高，但这样带来的收益也是极高的，在后文的仿真性能测试中，我们将看到， CLC 滤波可以将输出电压纹波降至 1 mV 以下，达到 0.030 % 的纹波率。

此改进方案的等效电路如图 11 所示。

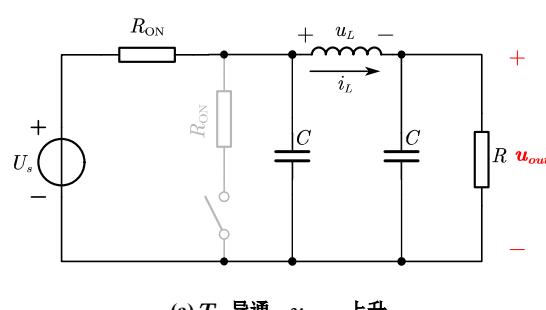
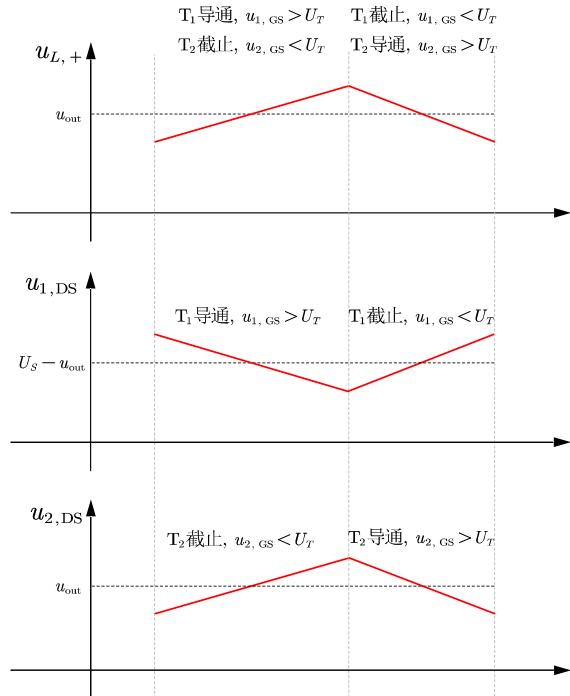
(a) T_1 导通, $u_{L,+}$ 上升

图 10: 改进方案 2 中各元件电压波形

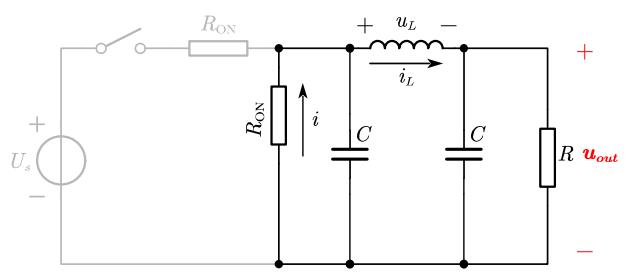
(b) T_1 截止, $u_{L,+}$ 下降

图 11: 改进方案 2 等效电路

4 仿真电路性能测试

4.1 改进方案 1 仿真测试

如图 12 搭建仿真电路，选取负载电阻 $R = 5 \text{ K}\Omega$ ，电路各元件的参数见图中标注，需要强调的是 $R_k = 2350 \Omega$ 、 $R_f = 2.2 \text{ K}\Omega \sim 2.6 \text{ K}\Omega$ 。后文进行仿真电路的性能测试。

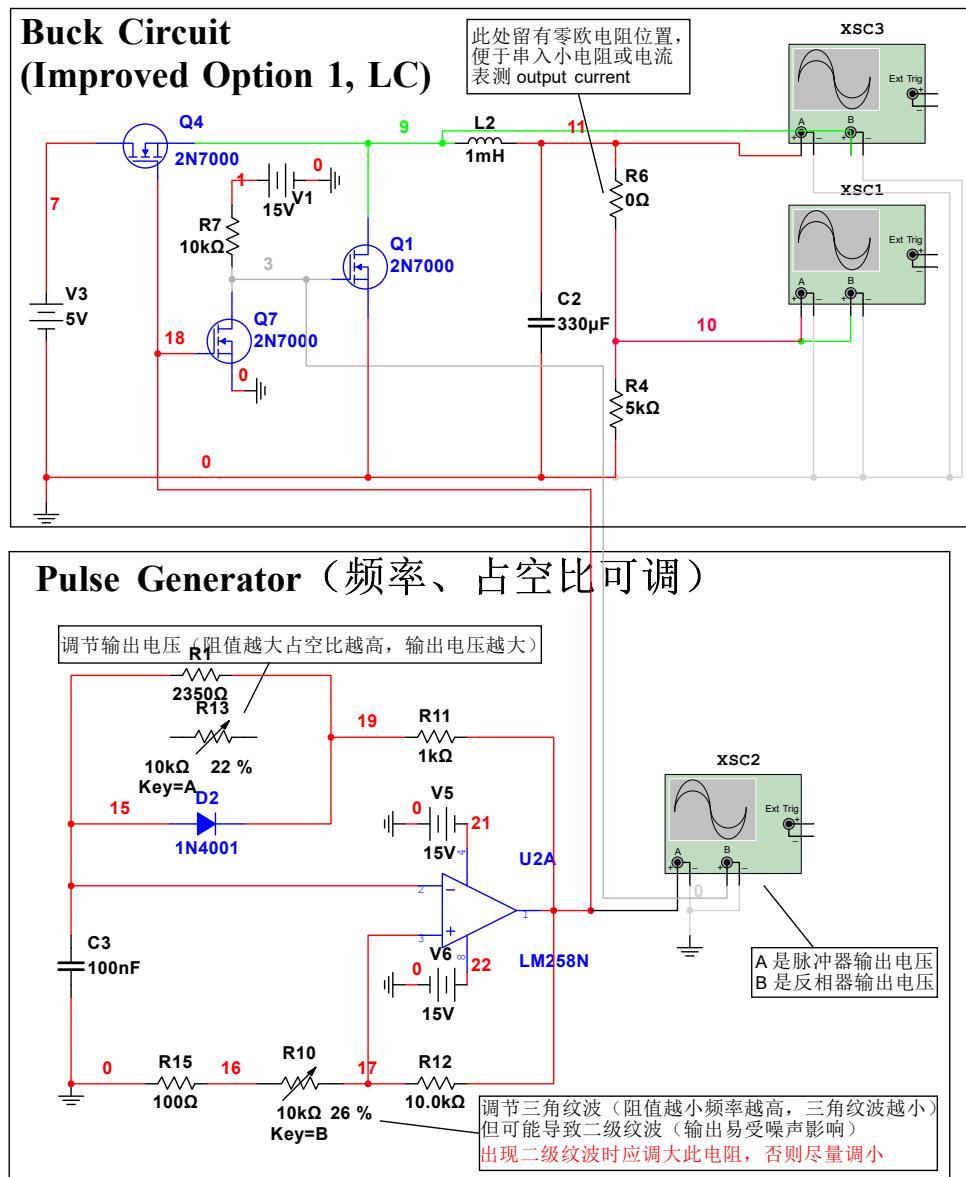


图 12: Buck Circuit 方案 1 仿真电路

4.1.1 方案 1 输出性能

3.3 V 工作点性能：

- (1) 输出电压：3.320 V ($\pm 17 \text{ mV}$, $r = 0.5120 \%$), 此时 $R_k = 2350 \Omega$ 、 $R_f = 2.6 \text{ K}\Omega$, 详见图 13;
- (2) 启动时间：13 ms, 20 ms 后完全稳定, 详见图 19。

极限性能测试：

- (1) 最小输出电压：2.117 V ($\pm 5.0 \text{ mV}$, $r = 0.2362 \%$), 此时 $R_k = 0$ 、 $R_f = 2.2 \text{ K}\Omega$;
- (2) 最大输出电压：4.26 V ($\pm 62.4 \text{ mV}$, $r = 1.4648 \%$), 此时 $R_k = 10 \text{ K}\Omega$ 、 $R_f = 2.4 \text{ K}\Omega$;

在方案一的基础上，我们修改参数做了多次仿真测试，结果汇总在下表：

表 1: 方案 1 不同参数下的仿真结果

OPA	L (mH)	C (μ F)	C_f (nF)	u_{out} (V)	Δu_{out} (mV)	r	R_k (10 K Ω)	R_f (10 K Ω)	输出稳定性
LM258P	2	300	100	3.2975	± 12.5	0.7582 %	20 %	38 %	一般
LM258P	4	300	100	3.3090	± 6.00	0.3626 %	20 %	36 %	较好
LM258P	4.7	300	100	3.3209	± 5.00	0.3011 %	20 %	36 %	极好
LM258P	4.7	330	100	3.3215	± 4.63	0.2788 %	22 %	40 %	极好
LM258P	6	300	100	3.2955	± 1.50	0.0910 %	36 %	8 %	较好
LM318N	6	300	100	3.3445	± 0.50	0.0299 %	14 %	20 %	较好
LM318N	6	300	50	3.3685	± 0.50	0.0297 %	14 %	42 %	较好
LM318N	6	300	10	3.3233	± 0.26	0.0157 %	38 %	20 %	较差

4.1.2 方案 1 工作点各元件电压波形

下面是各元件在工作点的电压波形:

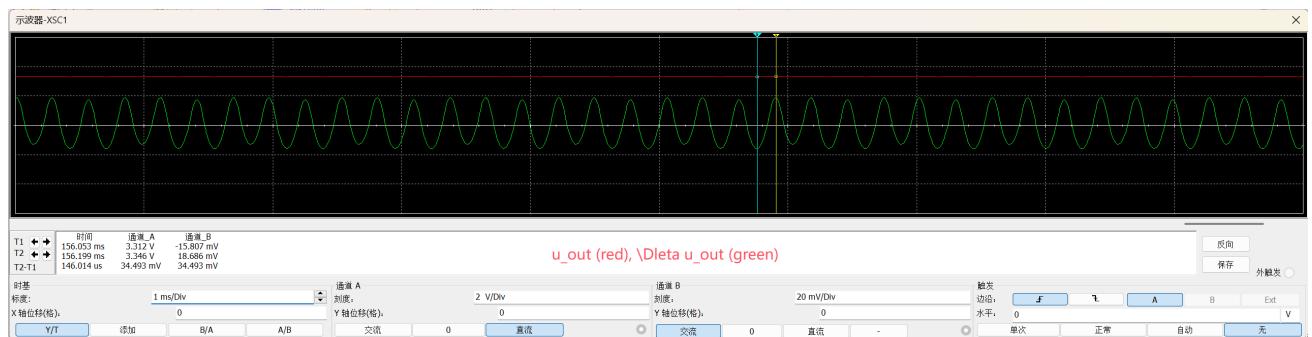
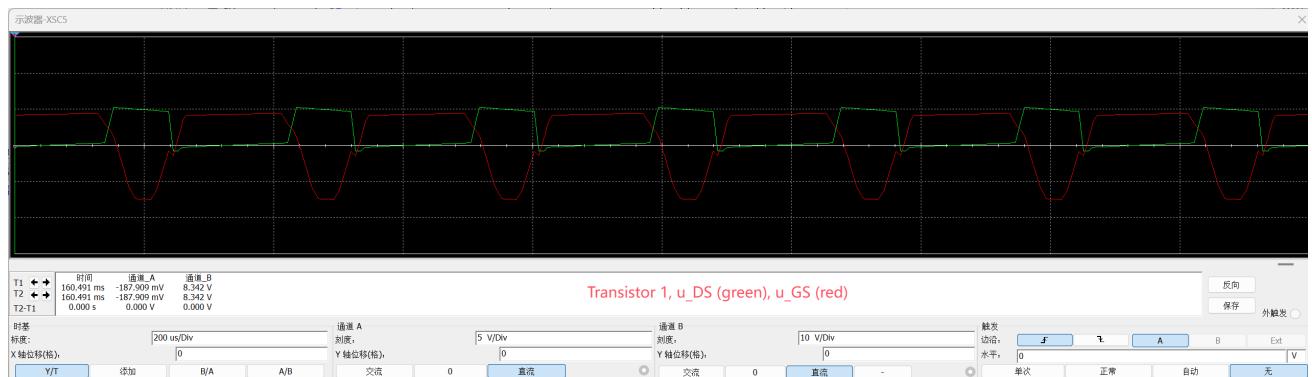
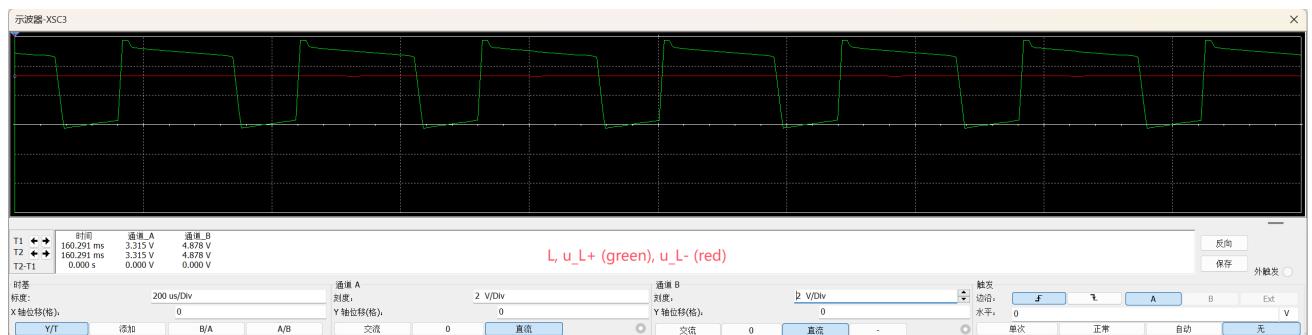
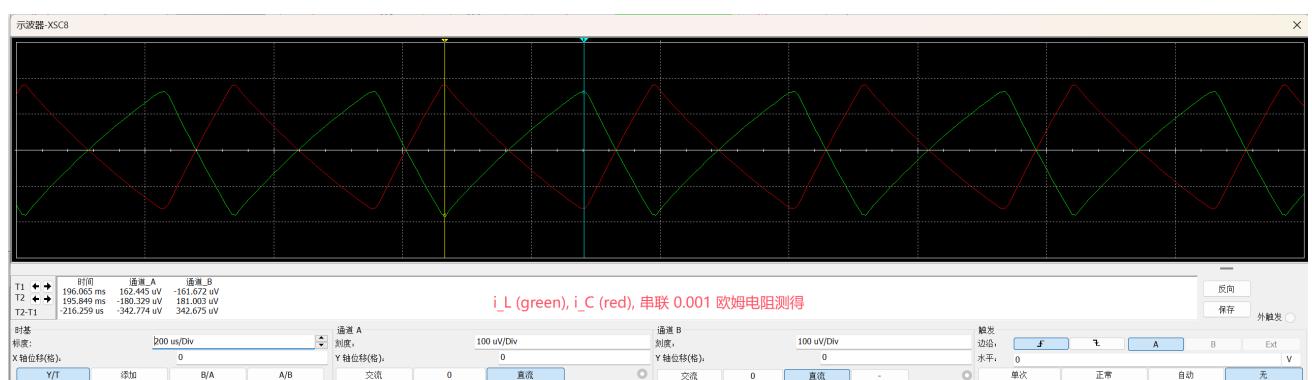
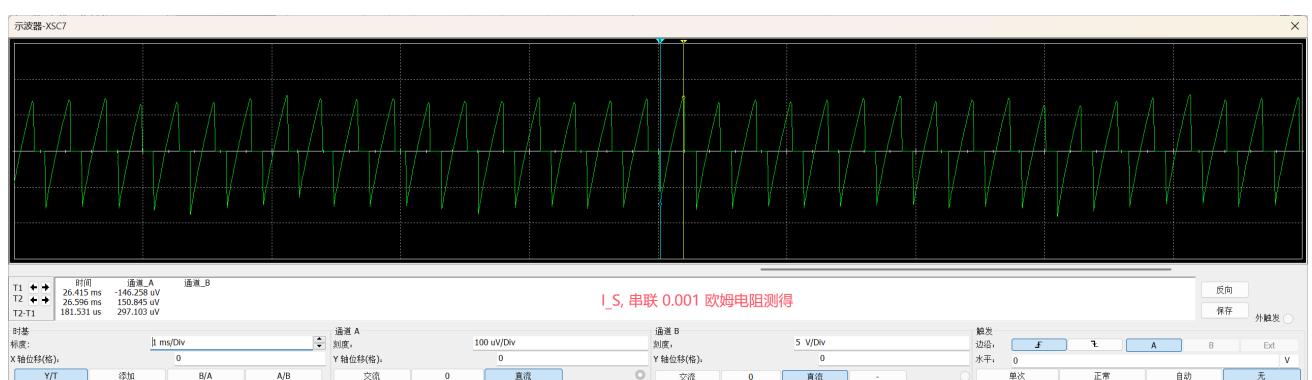
图 13: 输出电压 u_{out} 图 14: MOS T_1 电压

图 15: MOS T_2 电压图 16: 电感电压 u_L 图 17: 电感电流 i_L 和电容电流 i_C (从下向上)图 18: 电压源输出电流 I_S

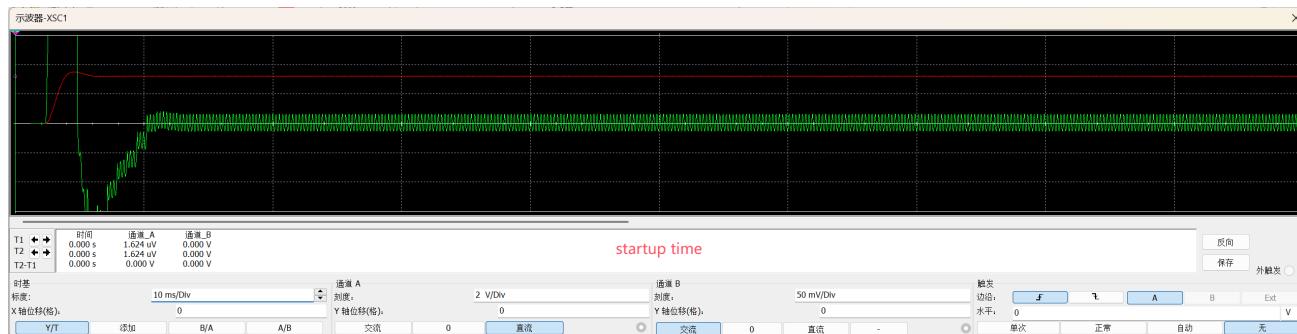


图 19: 电路启动时间

4.2 改进方案 2 仿真测试

如图 20 搭建仿真电路，同样选取负载电阻 $R = 5 \text{ k}\Omega$ ，电路各元件的参数见图中标注，需要强调的是 $R_k = 2520 \Omega$ 、 $R_f = 3.2 \text{ k}\Omega$ 。后文进行仿真电路的性能测试。

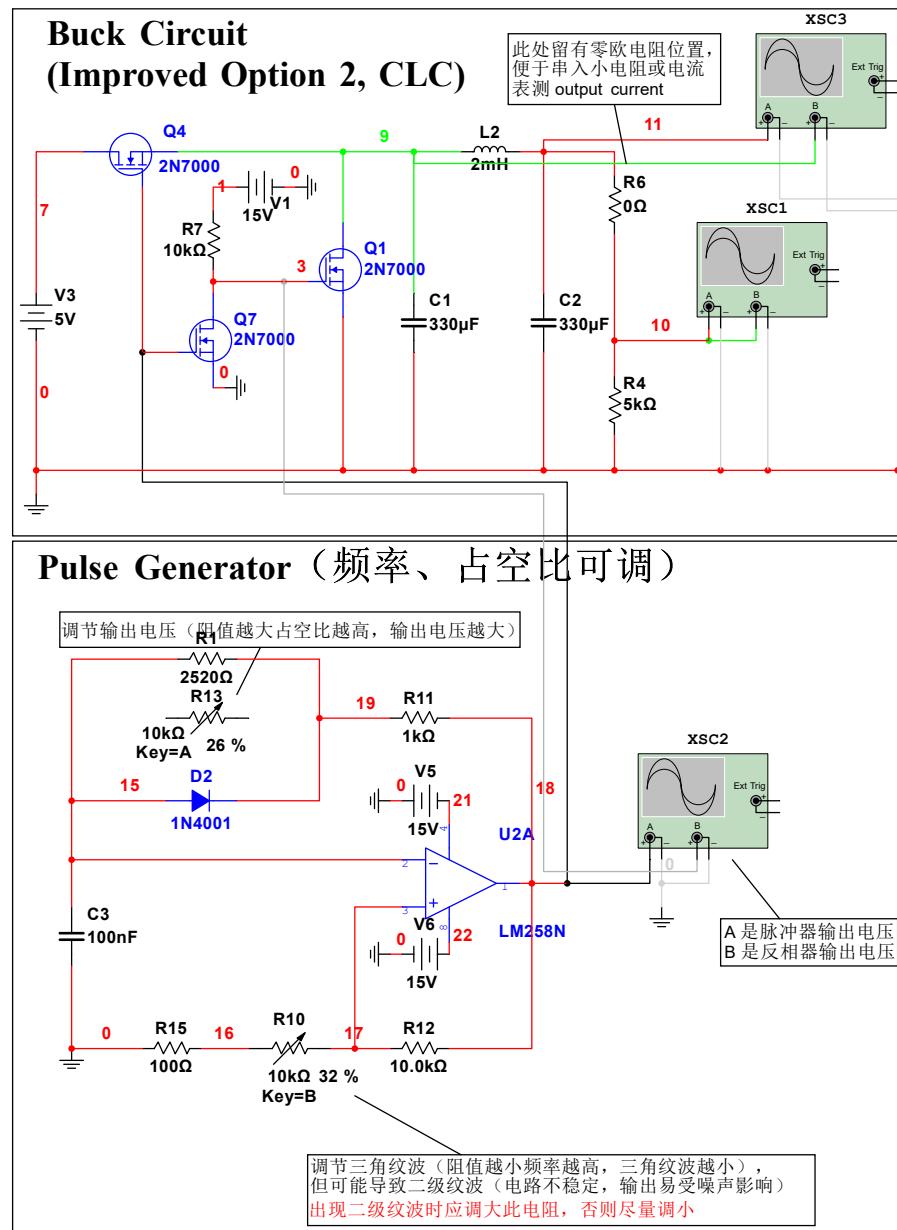


图 20: Buck Circuit 方案 2 仿真电路

4.2.1 各元件电压波形

性能测试：

- (1) 输出电压: 3.308 V (± 0.678 mV, $r = 0.0205\%$), 此时 $R_k = 2520\Omega$ 、 $R_f = 3.2\text{ K}\Omega$, 详见图 21;
- (2) 启动时间: 35 ms, 40 ms 后完全稳定, 详见图 26;
- (3) 最小输出电压: 1.895 V (± 0.252 mV, $r = 0.0133\%$), 此时 $R_k = 0$ 、 $R_f = 5.2\text{ K}\Omega$;
- (4) 最大输出电压: 4.252 V (± 8.87 mV, $r = 0.2086\%$), 此时 $R_k = 10\text{ K}\Omega$ 、 $R_f = 2.6\text{ K}\Omega$;

4.2.2 方案 2 工作点各元件电压波形

下面是各元件在工作点的电压波形:

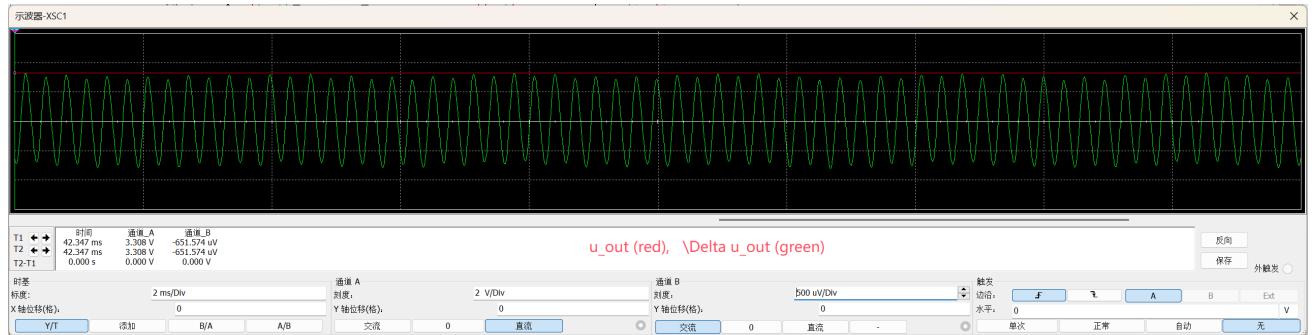


图 21: 输出电压 u_{out}

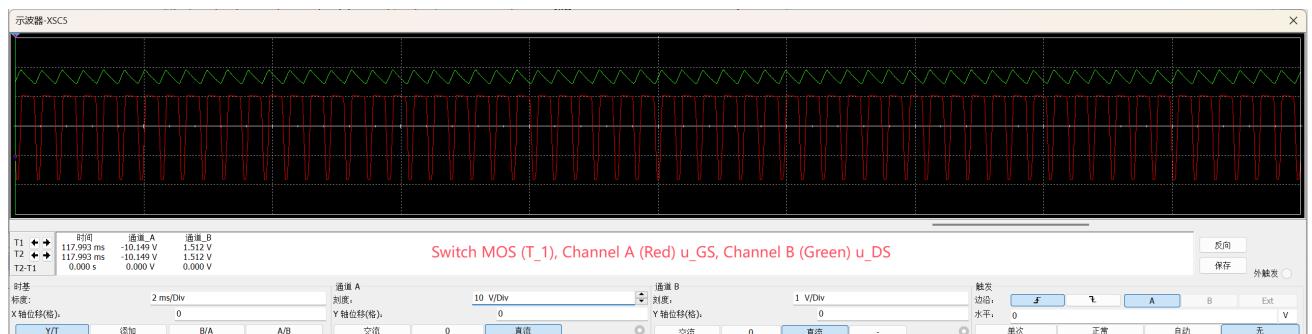


图 22: MOS T_1 电压

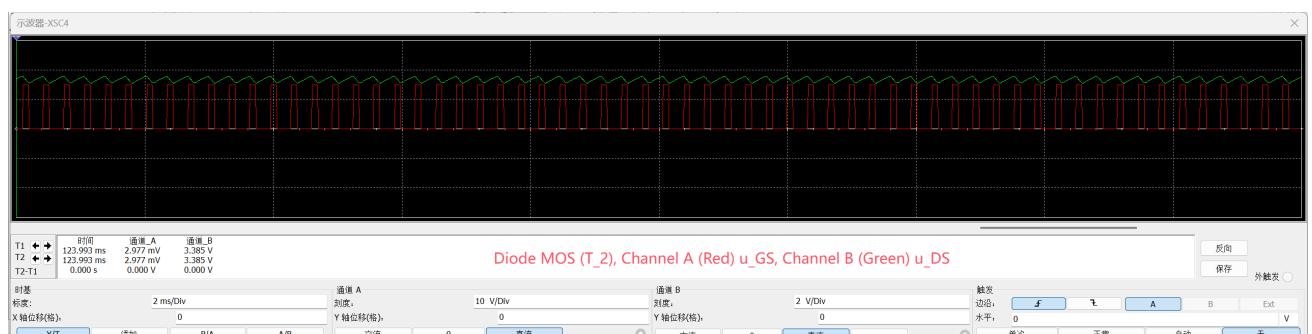
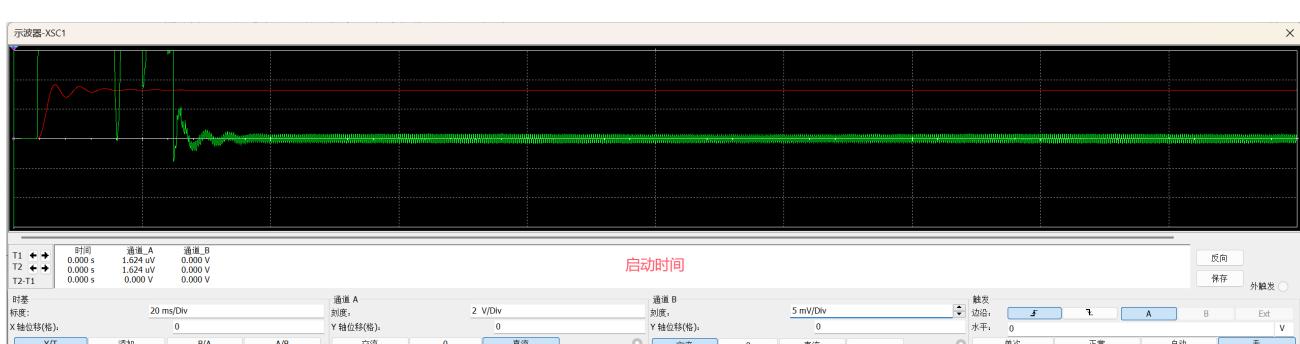
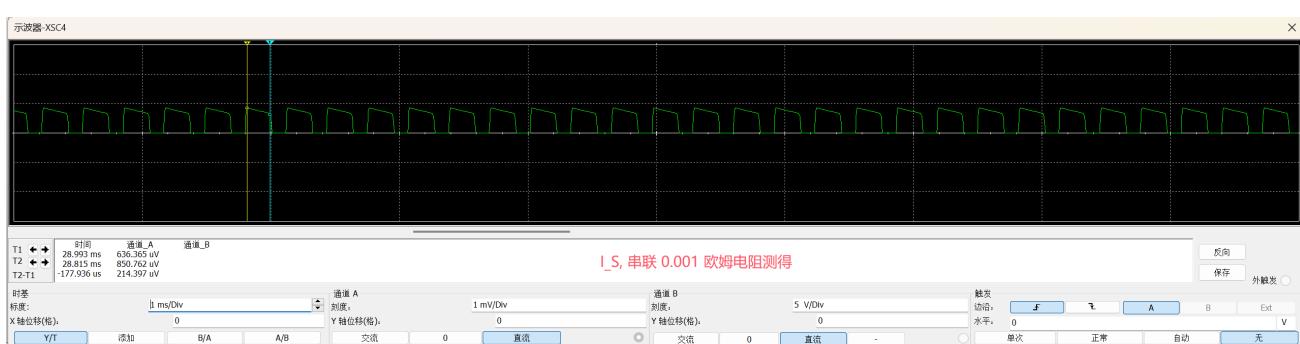
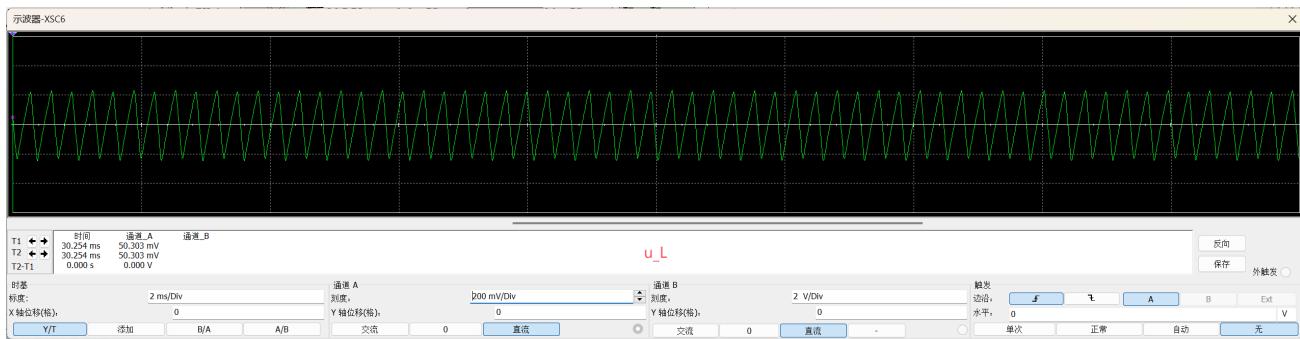
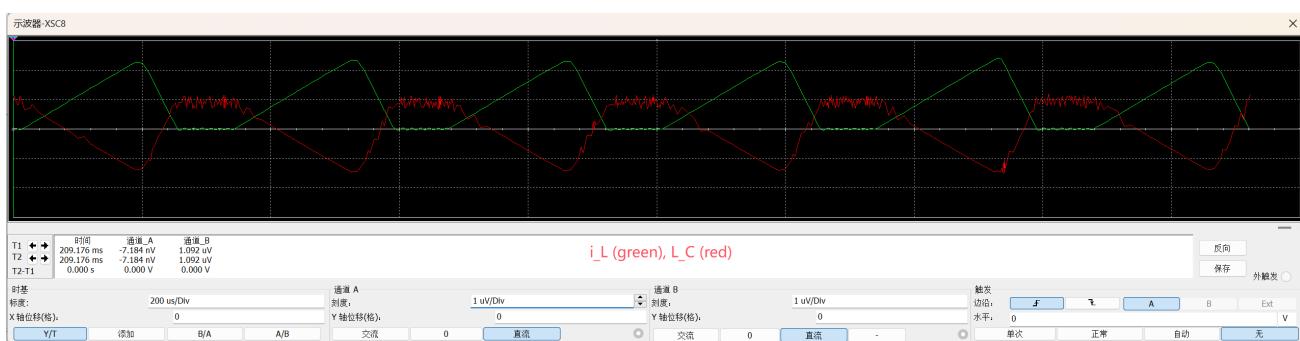


图 23: MOS T_2 电压



4.3 Typical 方案仿真测试

不妨对典型方案进行仿真测试。选取 T_2 为整流二极管 2N7000, 得到电感和电容的电流波形(串联 0.001 Ω 电阻测得), 见 27 和图 28, 出现了“振荡情形”, 事实上, 这是因为在此小段, 二极管在导通与截止之间不断跳变。与改进电路相比, Typical 情形下输出稳定性较差, 有难以消除的二级纹波。



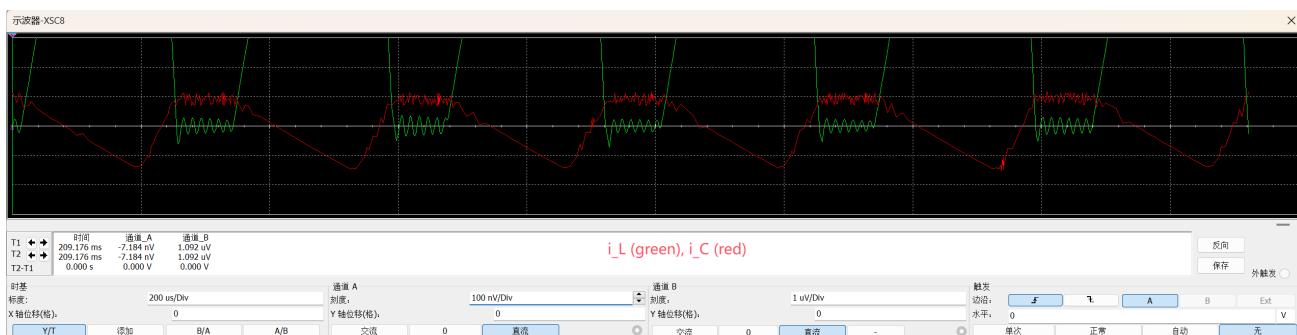


图 28: 电流出现“振荡”

5 设计合理性检查

5.1 设计参数检查

由于设计要求中的元件限制，我们采用上文的方案 1 进行设计检查，并搭建实际电路进行性能测试。下面查找各元件的 Data Sheet^①，依据仿真中的一系列结果，对设计的合理性进行检查，判断各元件是否能正常工作，如果不能，需要修改设计参数以保证元件正常工作。

- (1) MOS T_1 (2N7000) : T_1 截止时， u_{DS} 在 5 V 附近，未超过 60 V，符合标准； T_1 导通时， $u_{GS} = 10$ V， u_{DS} 在 [-200 mV, 200 mV] 之间，依据 Data Sheet 给出的 $V_{SD} - I_{SD}$ 和 $V_{DS} - I_{DS}$ 曲线图， T_1 的电流在 [-1mA, 150 mA] 之间，而 Absolute Maximum Ratings 中规定 Maximum drain current (continuous) = 200 mA, Maximum drain current (pulsed) = 500 mA，符合要求。
- (2) MOS T_2 (2N7000) : T_2 截止时， u_{DS} 在 5 V 附近，符合标准； T_2 导通时， $u_{GS} = 15$ V，电压 u_{DS} 在 [-200 mV, 200 mV] 之间，同上，符合要求。
- (3) 电容、电感的电压电流：依次检查，均符合要求。

5.2 关键元件检查

电路中最关键的无疑是脉冲发生器中的运放，由此产生的脉冲信号是整个电路的枢纽，因此，有必要考察在前文仿真参数下，实际运放是否能正常工作^②。下面分别给出 LM258P、NE5532P 和 LM318 在不同输入下的输出脉冲波形（输入是频率 f 占空比 50 % 的三角波）。

由图可知，为了保证输出方波的理想性，LM258P 的工作频率应在 4 KHz 以下，NE5532P 的工作频率应在 50 KHz 以下，LM318 的工作频率应在 250 KHz 以下。我们前文中的仿真电路工作频率为 3.5 KHz 至 3.8 KHz，因此设计要求中的 LM258P 可以符号要求。

5.3 设计修改

需要注意，由于设计要求中的运放 LM258N 是单电源运放，电源输入为 VCC 和 GND，而我们上面的设计中使用了双电源运放，电源输入为 +VCC 和 -VCC，需要对 Pulse Generator 进行修改。如图 29 所示，创建电压为 0.5 VCC 的“虚地”，这时运放的输出是介于 0 和 VCC 之间的脉冲电压，仍可以直接用于驱动 MOSFET，无需其它修改。

虽然电容的上下突变点发生了变化（幅度变为原来的一半），但其变化速度同样变为了原来的一半。如果运放的正负输出完全对称，正负饱和电压也相等，那么数学上可以知道，修改之后不会对 Buck 电路产生任何影响。但是，实际运放的正负输出并不对称，正负饱和电压也不一定相等，会对 Buck 电路产生一定的影响，所以我们需要重新测定电路工作点参数及性能。

^① 各元件的 Data Sheet 已整理到网址 <https://www.12365.com/s/0y0pTd-ojKj3>。

^② 事实上，这一步应在仿真设计之前完成，因为我们必须依据已有的元件，确定合适的电路工作点，才能进行仿真。否则，仿真结果可能与实际电路有较大差异，又需要重新设计，这会浪费很多时间精力。

0.5 VCC 虚地的 Pulse Generator

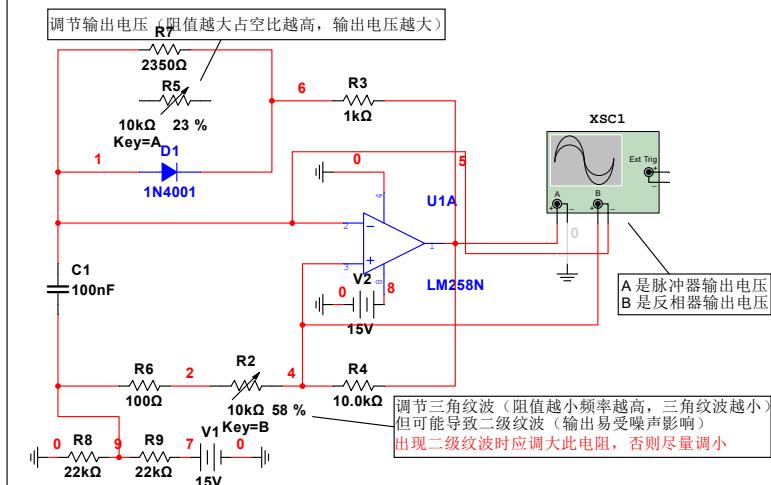


图 29: 利用了虚地的 Pulse Generator (Single Source)

5.4 单电源(虚地)仿真测试

使用上一节所述的虚地 Pulse Generator (Single Source) 进行仿真, 得到 Buck 电路工作点输出电压: 3.304 V ($\pm 29 \text{ mV}$, $r = 1.7554\%$), 此时 $R_k = 3.0 \text{ k}\Omega$ 、 $R_f = 1.0 \text{ k}\Omega$, 详见图 30。部分元件的电压波形如上所示, 由图可以看到, 输出电压的稳定性较差, 纹波较大, 可能需要进一步的调整。我们在仿真的过程中也发现, 参数 R_f 和 R_k 的小变化会对输出电压产生较大的影响, 尤其是影响输出的稳定性。

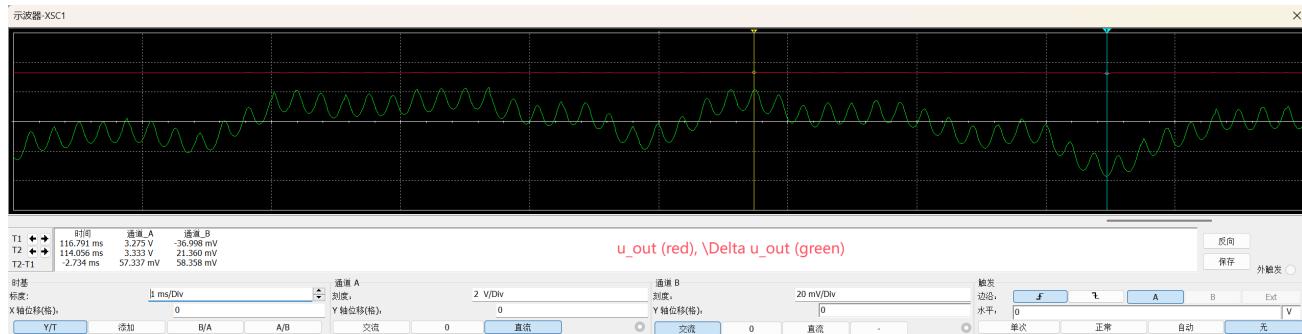


图 30: 输出电压 u_{out}

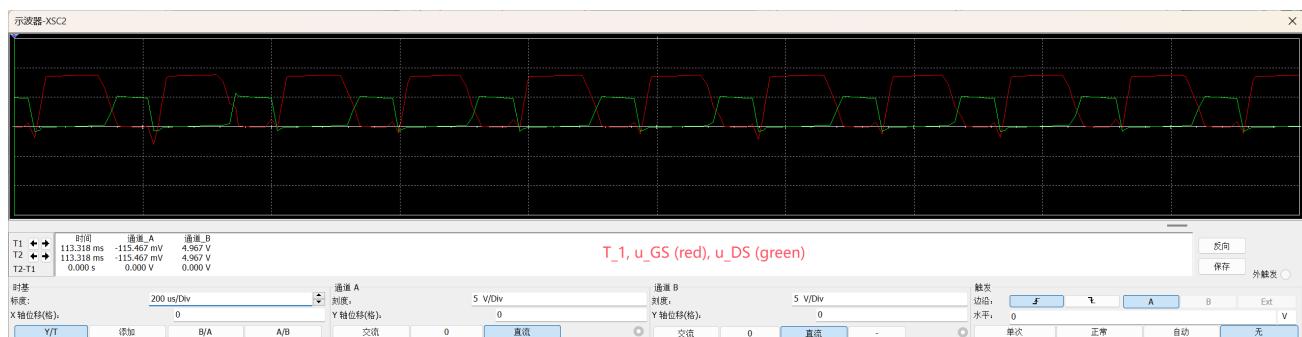


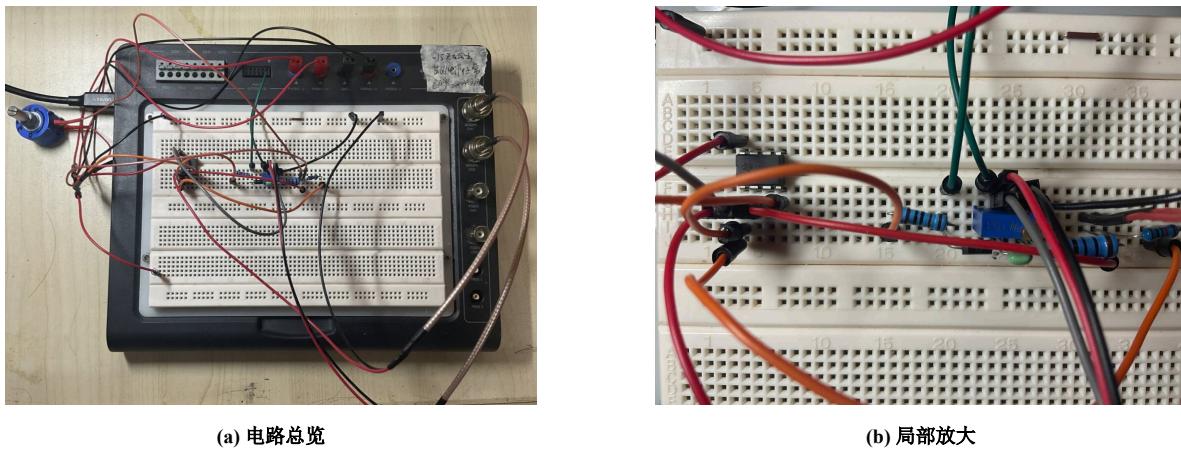
图 31: MOS T_1 电压



6 实际电路性能测试

6.1 脉冲发生器

如图 33 搭建脉冲发生器，运放使用 LM258P。用 RL 电路测得 2 mH 电感的实际值为 2.0795 mH (DCR = 3.4979 Ω)，其它元件的参数见表 2。



为了方便使用，我们将脉冲发生器焊接在洞洞板上，如下图：

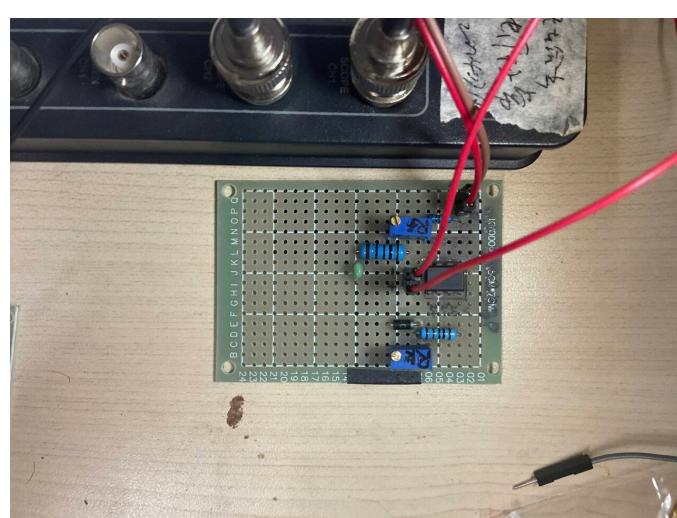
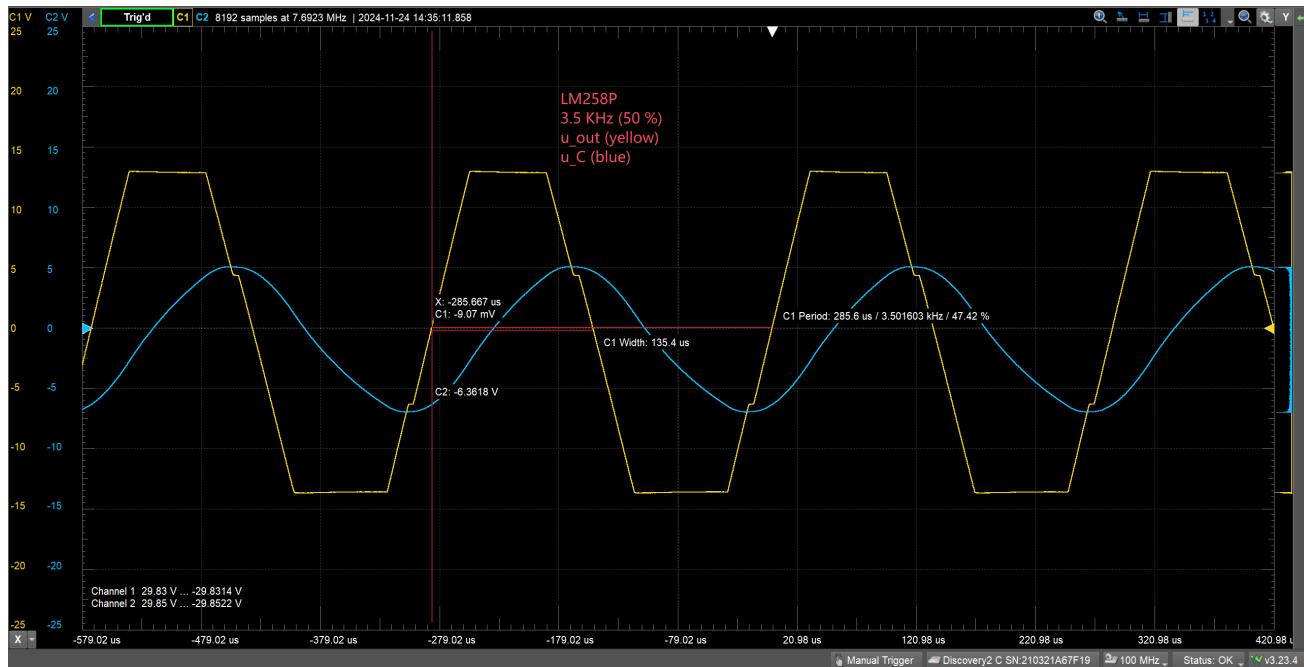
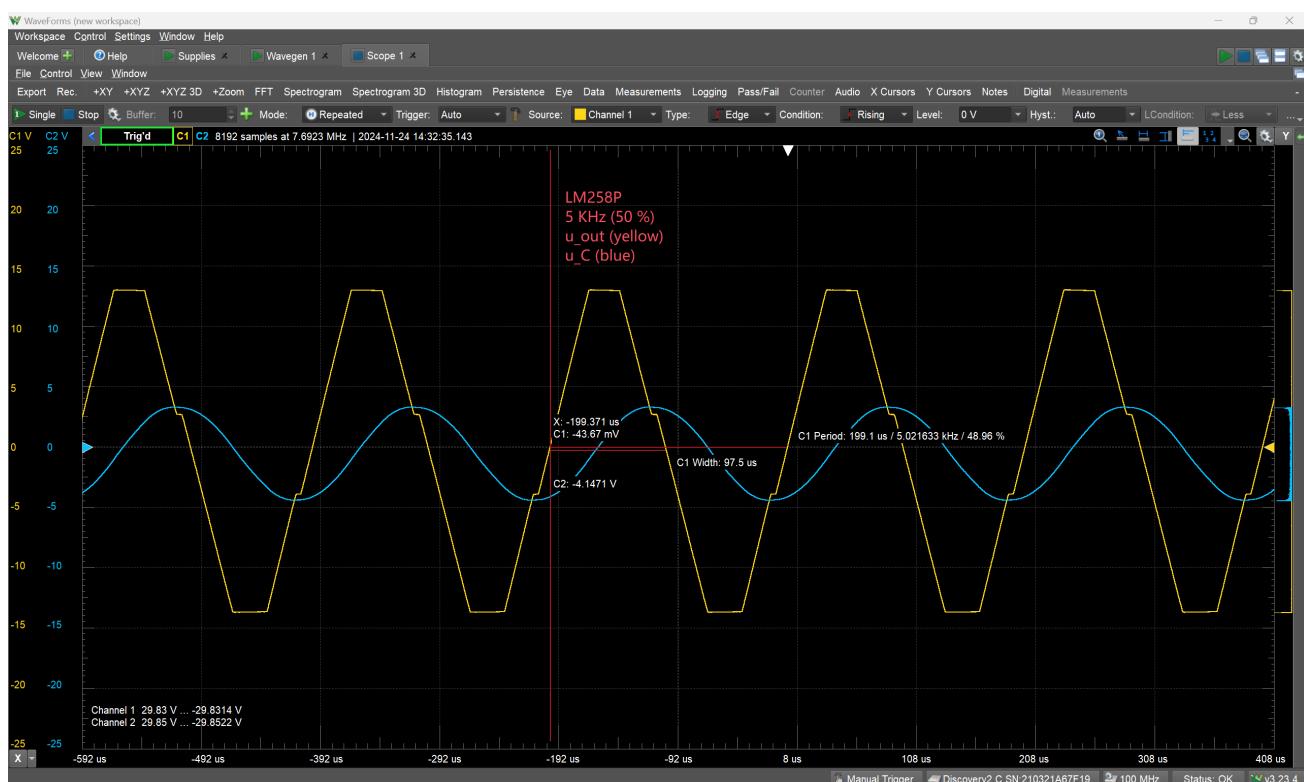
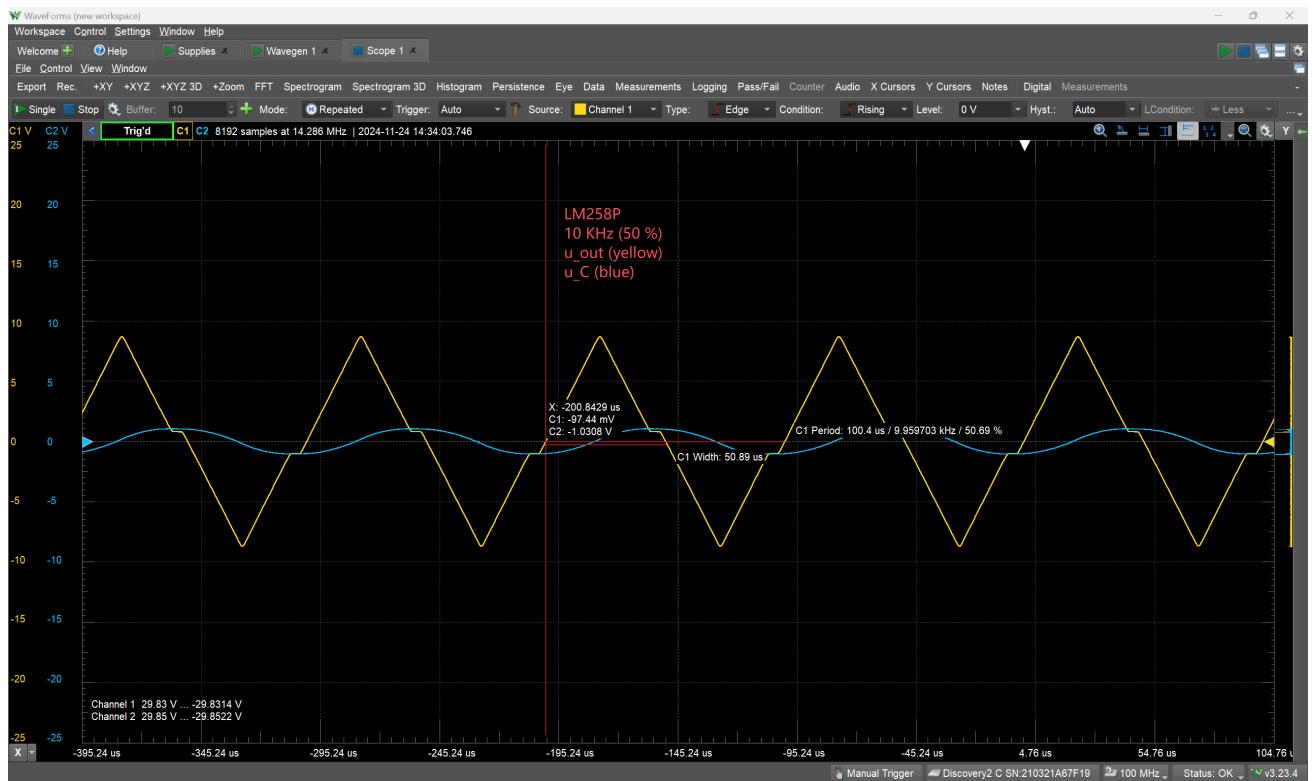


表 2: 实际电路元件参数

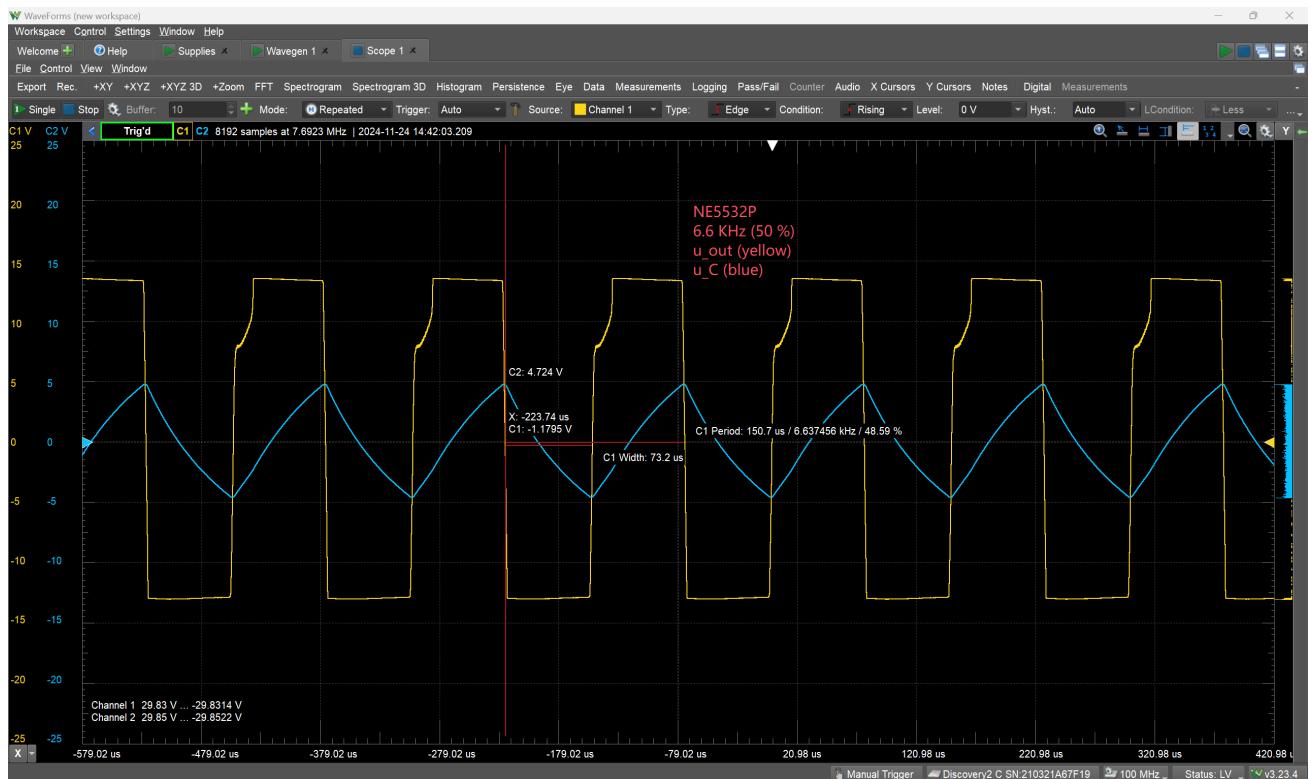
元件	330 μF 电容	100 nF 电容	100 Ω 电阻	1 K Ω 电阻	5 K Ω 负载	10 K Ω 电阻
实测值	300 μF	97.4 nF	98.4 Ω	994 Ω	5.02 K Ω	9.89 K

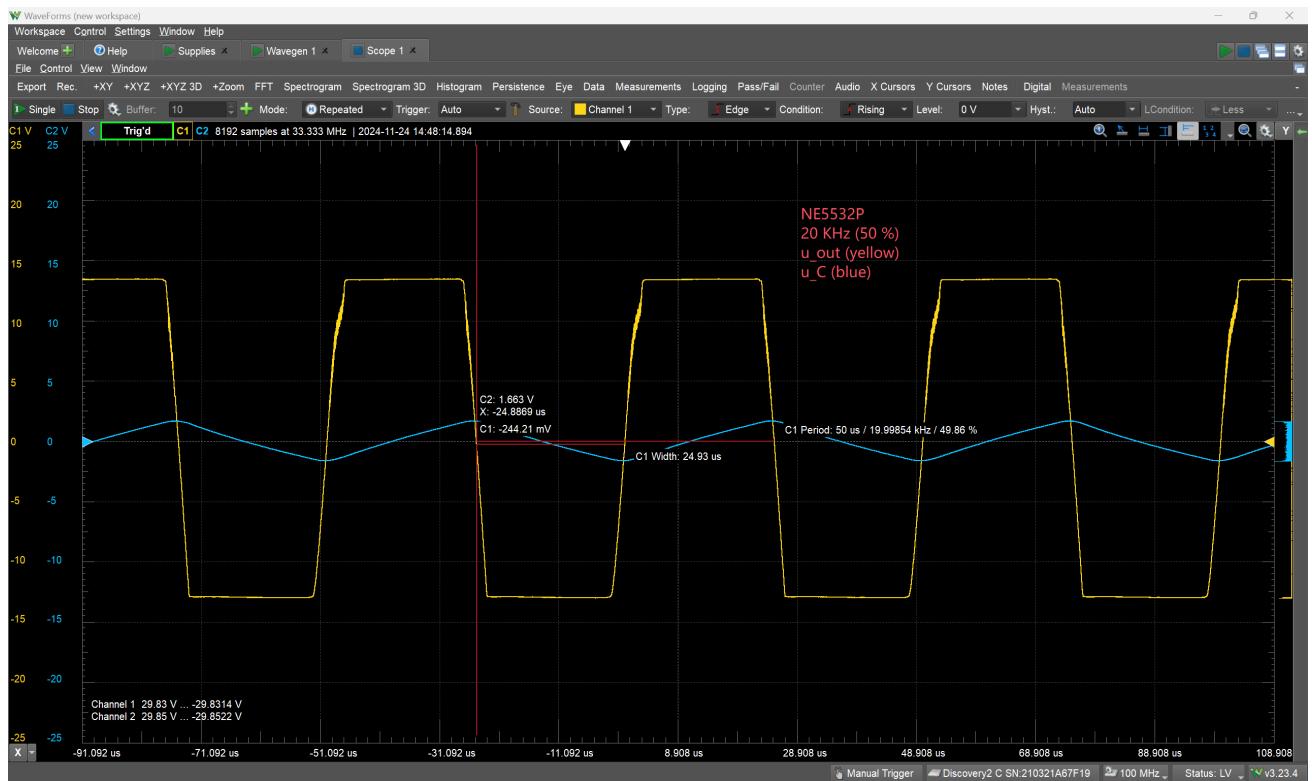
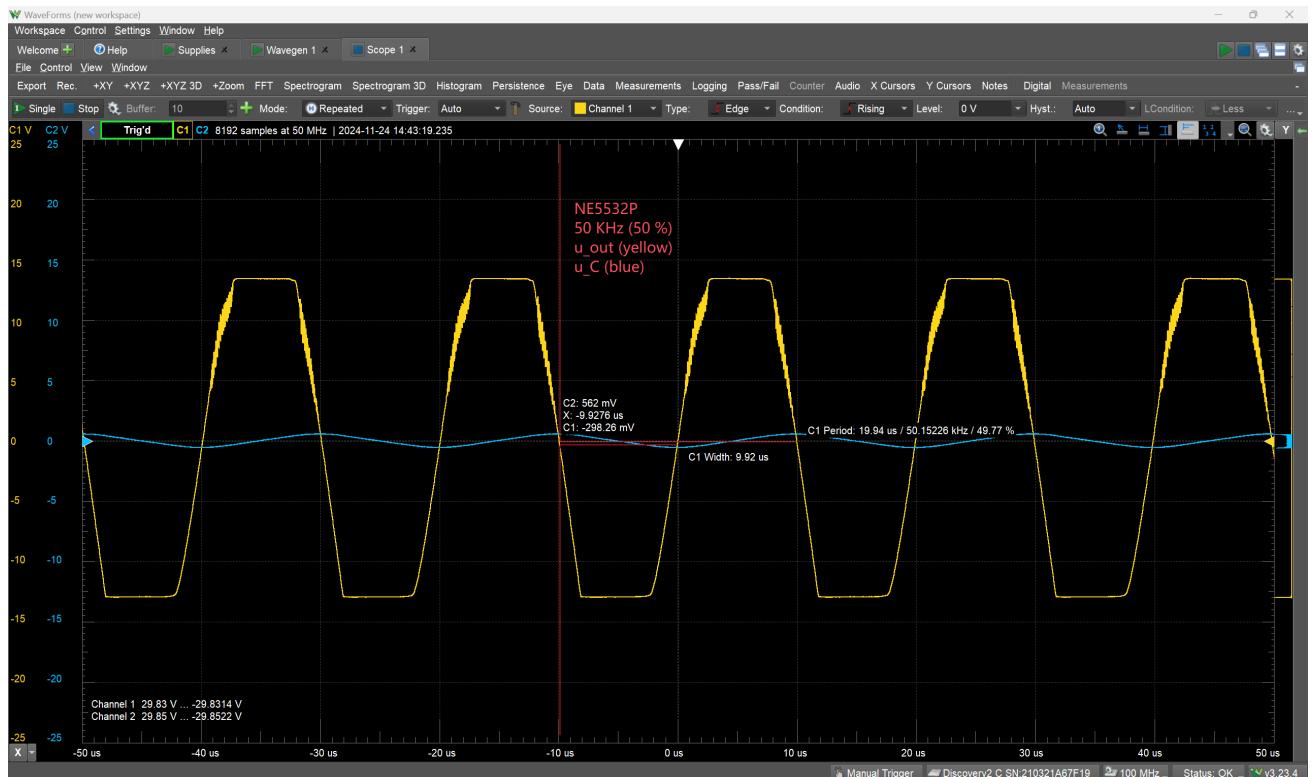
我们分别测试了脉冲发生器使用运放 LM258P 和 NE5532P 的输出情况。LM258P 的输出波形如下：

图 35: LM258P, $f = 3.5 \text{ KHz}$ 图 36: LM258P, $f = 5 \text{ KHz}$

图 37: LM258P, $f = 10 \text{ KHz}$

NE5532P 的输出波形如下:

图 38: NE5532P, $f = 6.6 \text{ KHz}$

图 39: NE5532P, $f = 20 \text{ KHz}$ 图 40: NE5532P, $f = 50 \text{ KHz}$

6.2 完整电路

在脉冲发生器的基础上，搭建完整 Buck 电路，负载电阻 $R = 5 \text{ K}\Omega$ ，如图 41。

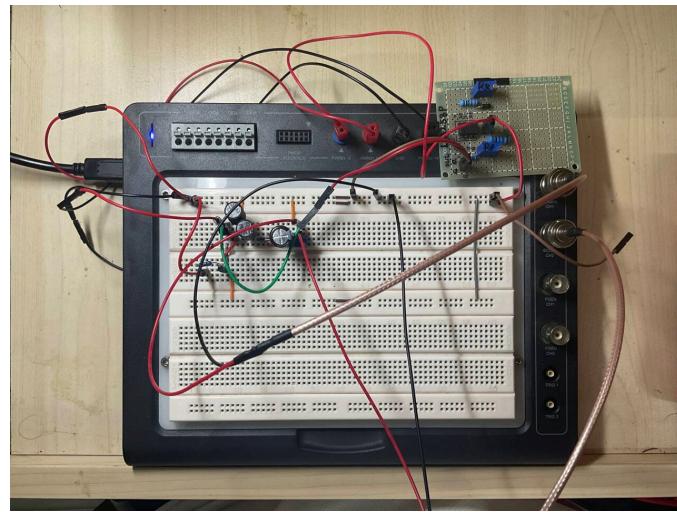


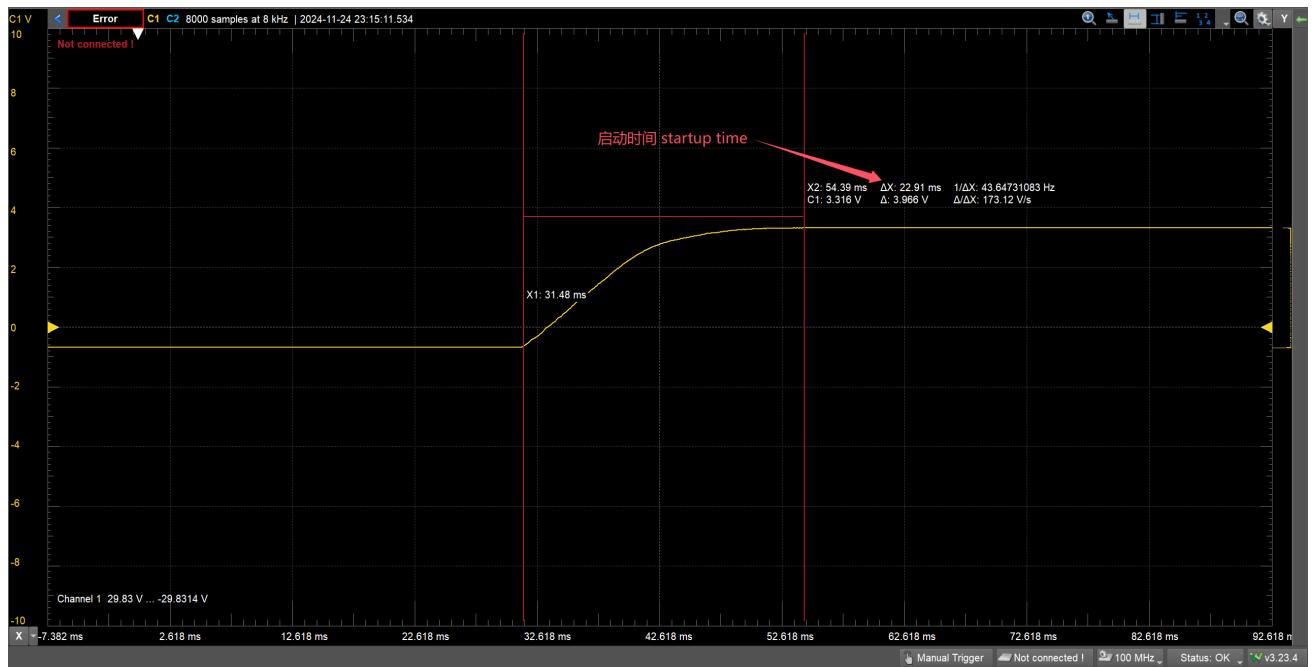
图 41: 完整 Buck 电路

6.3 性能测试

电感 $L = 4 \text{ mH}$ 时的性能如下:

- (1) 输出电压: $3.308 \text{ V} (\pm 7.00 \text{ mV}, r = 0.4232\%)$, 详见图 42;
- (2) 启动时间: $20 \text{ ms} \sim 25 \text{ ms}$, 详见图 43;
- (3) 最小输出电压: $0.822 \text{ V} (\pm 2.30 \text{ mV}, r = 0.5594\%)$;
- (4) 最大输出电压: $4.223 \text{ V} (\pm 12.0 \text{ mV}, r = 0.5683\%)$;

图 42: 实际电路输出电压 ($L = 4 \text{ mH}$)

图 43: 实际电路启动时间 ($L = 4 \text{ mH}$)

另外，我们也分别测试了电感 $L = 2 \text{ mH}$ 和 $L = 6 \text{ mH}$ 时的性能，

- (1) $L = 2 \text{ mH}$ ，输出电压: $3.3415 \text{ V} (\pm 14.50 \text{ mV}, r = 0.8679\%)$ ，详见图 44；
- (2) $L = 6 \text{ mH}$ ，输出电压: $3.306 \text{ V} (\pm 5.00 \text{ mV}, r = 0.3025\%)$ ，详见图 45；

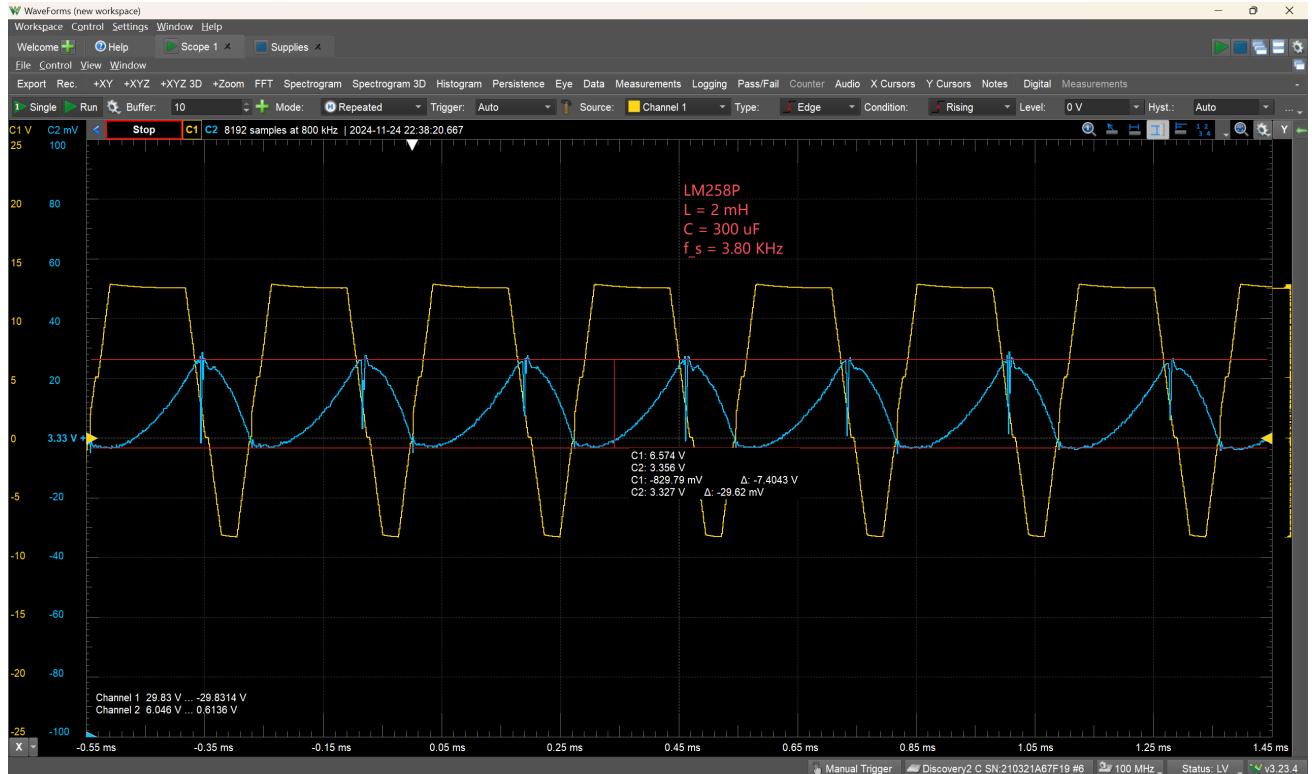
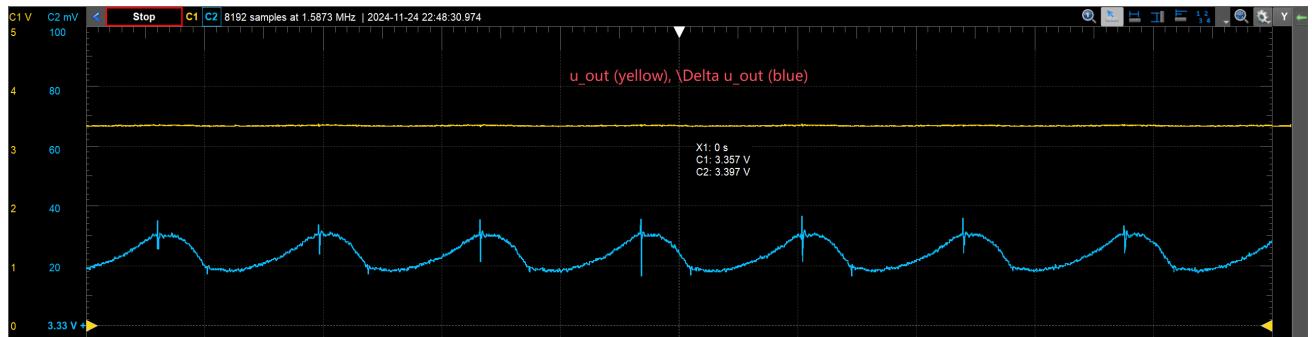
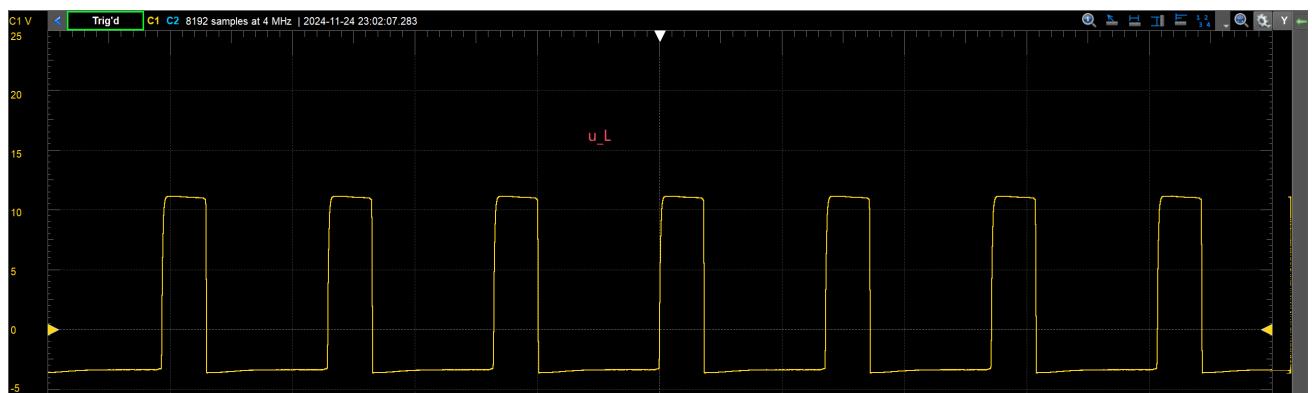
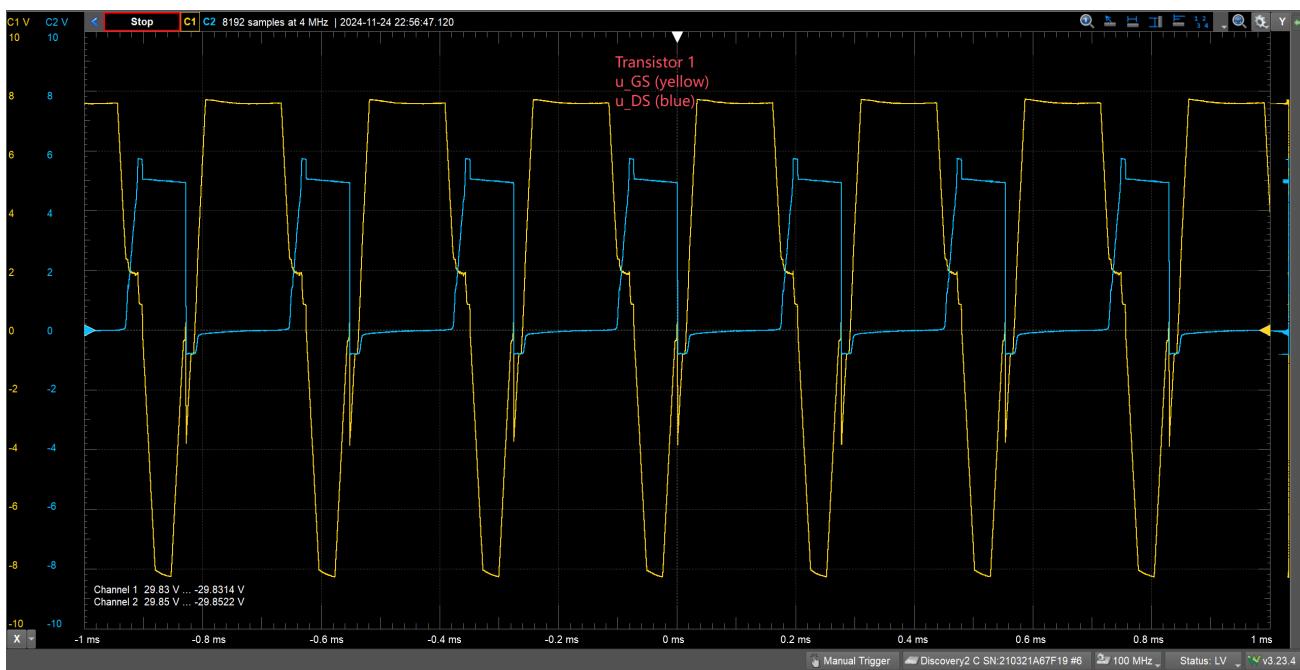
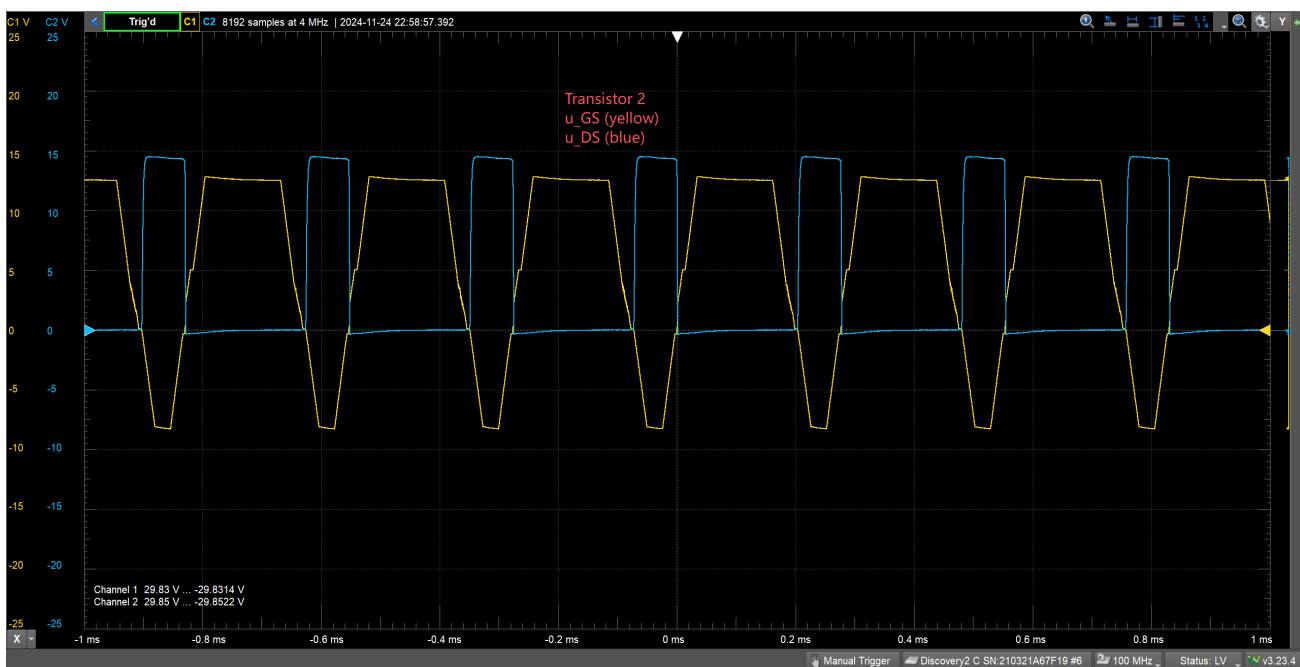
图 44: 实际电路输出电压 ($L = 2 \text{ mH}$)

图 45: 实际电路输出电压 ($L = 6 \text{ mH}$)

6.3.1 工作点各元件电压波形

由上面的输出性能可知, $L = 4 \text{ mH}$ 是比较合适的选择, 下面给出此时各元件的电压波形, 由图可以看出, 实际结果与仿真结果基本一致。

图 46: 输出电压 u_{out} 图 47: 电感电压 u_L

图 48: MOS T_1 电压图 49: MOS T_2 电压

7 设计总结与讨论

总的来看，改进方案 1 中 $L = 4 \text{ mH}$ 、 $C = 300 \mu\text{F}$ 、 $C_f = 100 \text{ nF}$ 是一个比较合适的选择，此时开关频率约为 3.8 KHz，输出电压纹波小，稳定性较好，启动时间也较短。

此次设计让我充分理解了电路的完整设计过程。在进行一个电路设计之前，应当首先确定整体需求，然后根据需求选择合适的元件，再进行理论上的推导。基于理论和所选元件，选择合适的参数进行仿真，最后搭建实际电路进行性能测试。在这个过程中，我们需要不断调整参数，直到满足设计要求。在实际搭建电路时，我们还需要注意元件的实际参数与仿真参数的差异，以及元件的工作范围，保证电路的正常工作。

设计进行到一半的时候，我突然疑惑起来：为了减小纹波，我们进行了这么多改进，那么为何不直接采

用最简单的电阻分压呢？如果只是为了得到稳定的输出，只需要可变电阻分压与一个电压跟随器隔离电路，便能得到可调且精确的输出电压。后来，查阅资料的过程中，我发现许多文献中的 Buck 电路负载都使用了 10Ω 或类似的小电阻，而不是我们设计中的 $K\Omega$ 级别，这才明白原因。在实际应用中，Buck 电路的功率通常很大，等效负载电阻可以很小，而简单的电阻分压带载能力极为有限，功率很小。

设计中指明负载电阻不能小于 $2 K\Omega$ ，也是出于安全考虑。因为我们使用的金属膜电阻，额定功率在 $\frac{1}{8} W$ 到 $1 W$ 不等，过大的电压会烧坏电阻，带来安全隐患。我自己在实验的过程中便发现，在 $1 K\Omega$ ($1 W$) 金属膜电阻两端加 $20 V$ 电压，电阻升温及其明显，且弥漫出一股特殊的“香味”，这显然是不安全的。未能在大功率的条件下进行本次设计，着实有些遗憾。

受理论水平限制，本次设计中我们并没有详细讨论电路的效率与损耗，这其实是任何电源的关键点之一。另外，实际的电源芯片通常都有反馈电路，可以适应不同的负载，自动维持输出电压，我认为这是电源设计的灵魂。有了反馈电路，使用者才可以摆脱繁重的参数调整，电源才能更加智能化。

参考文献

- [1] S. Shiva Kumar, A. K. Panda, and Tejavathu Ramesh. A simple passive auxiliary circuit for reduction of losses and efficiency enhancement of synchronous buck converter. In *2013 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, pages 1–6, December 2013.
- [2] Sandra Huerta-Moro, Jorge I. Trujillo-Flores, Juan C. Villegas-Hernandez, Ana Ma. Rodriguez-Dominguez, J. Fermi Guerrero-Castellanos, and Victor R. Gonzalez-Diaz. A simple sliding-mode control circuit for buck DC-DC converters. In *2019 IEEE International Fall Meeting on Communications and Computing (ROC&C)*, pages 24–27, March 2019.
- [3] Iman Talebian, Peyman Alavi, Ebrahim Babaei, and Arash Khoshkbar-Sadigh. A simple soft-switched buck converter without implementing auxiliary switch. *Electrical Engineering*, 104(5):3119–3135, October 2022.
- [4] Wei Xu, Xiaohua Wu, and Feng Hong. Soft-switching buck inverter. *Journal of Power Electronics*, 21(1):113–125, January 2021.
- [5] B.R. Lin and B.R. Hou. Analysis of a zero voltage switching DC/DC converter without output inductor. *IET Power Electronics*, 5(6):790–800, July 2012.
- [6] A.F. Bakan, H. Bodur, and I. Askoy. A novel ZVT-ZCT PWM DC-DC converter. In *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, pages 8 pp.–P.8, Dresden, Germany, 2005. IEEE.
- [7] Jumar Luís Russi, Vinícius Foletto Montagner, Mário Lúcio Da Silva Martins, and Hélio Leães Hey. A Simple Approach to Detect ZVT and Determine Its Time of Occurrence for PWM Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(7):2576–2585, July 2013.
- [8] E. Adib and H. Farzanehfard. Zero-Voltage Transition Current-Fed Full-Bridge PWM Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(4):1041–1047, April 2009.
- [9] Ying-Chun Chuang and Yu-Lung Ke. High-Efficiency and Low-Stress ZVT–PWM DC-to-DC Converter for Battery Charger. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(8):3030–3037, August 2008.
- [10] Wannian Huang and G. Moschopoulos. A new family of zero-voltage-transition PWM converters with dual active auxiliary circuits. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21(2):370–379, March 2006.
- [11] J.L. Russi, M.L. daSilvaMartins, H.A. Graundling, H. Pinheiro, J.R. Pinheiro, and H.L. Hey. A Unified Design Criterion for ZVT DC-DC PWM Converters With Constant Auxiliary Voltage Source. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(5):1261–1270, October 2005.

- [12] M.L. Martins and H.L. Hey. Self-Commutated Auxiliary Circuit ZVT PWM Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(6):1435–1445, November 2004.
- [13] 曹伊榕. 2.5A+BUCK 型 DC-DC 开关电源芯片的研究与设计. 硕士, 西安理工大学, 2015.
- [14] 黄金珏, 赵艺棚, 周意勇, and 龙顺宇. 一种同步整流 Buck 型 DC-DC 数控开关电源的研究与设计. 工业控制计算机, 36(7):135–136, 2023.
- [15] 徐志国 and 杨娟. 一种基于 LM3150 Buck 型开关电源设计. 电子设计工程, 22(12):104–107, 2014.

附录 A 部分元件实测参数

A.1 通用二极管 1N4007 IV 特性

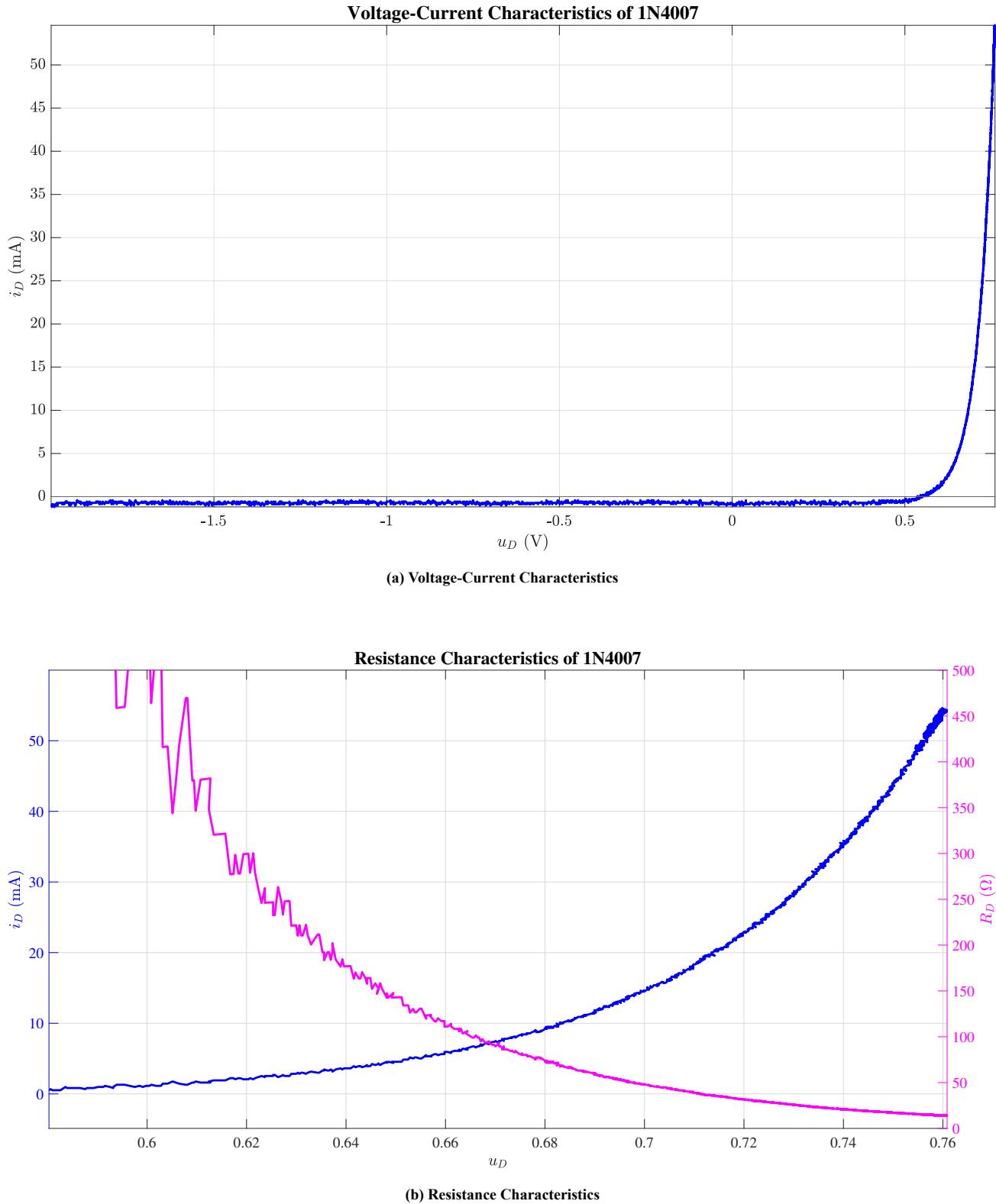


图 50: Characteristics of 1N4007

A.2 N-MOSFET 2N7000 IV 特性

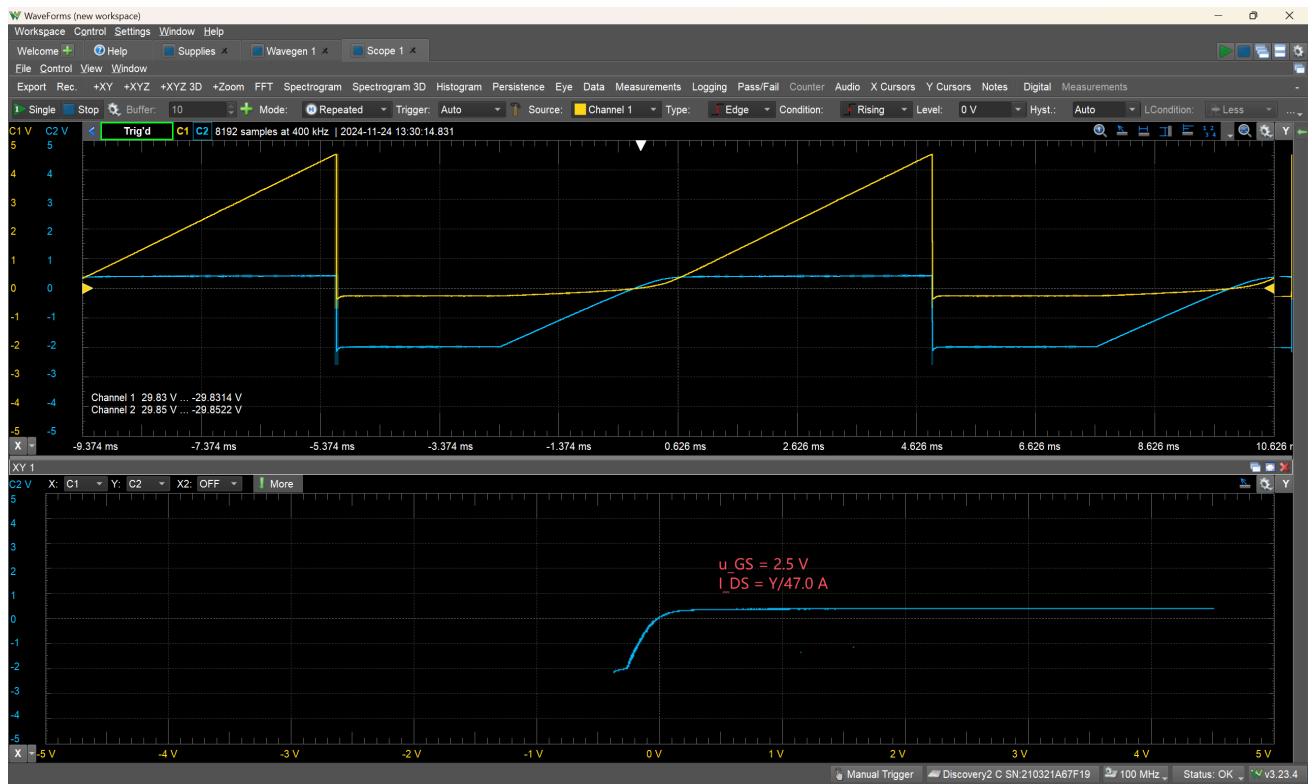


图 51: $u_{DS}-i_{DS}$ ($u_{GS} = 2.5 \text{ V}$, 2 V 时 MOS 不导通, 全输入截止)

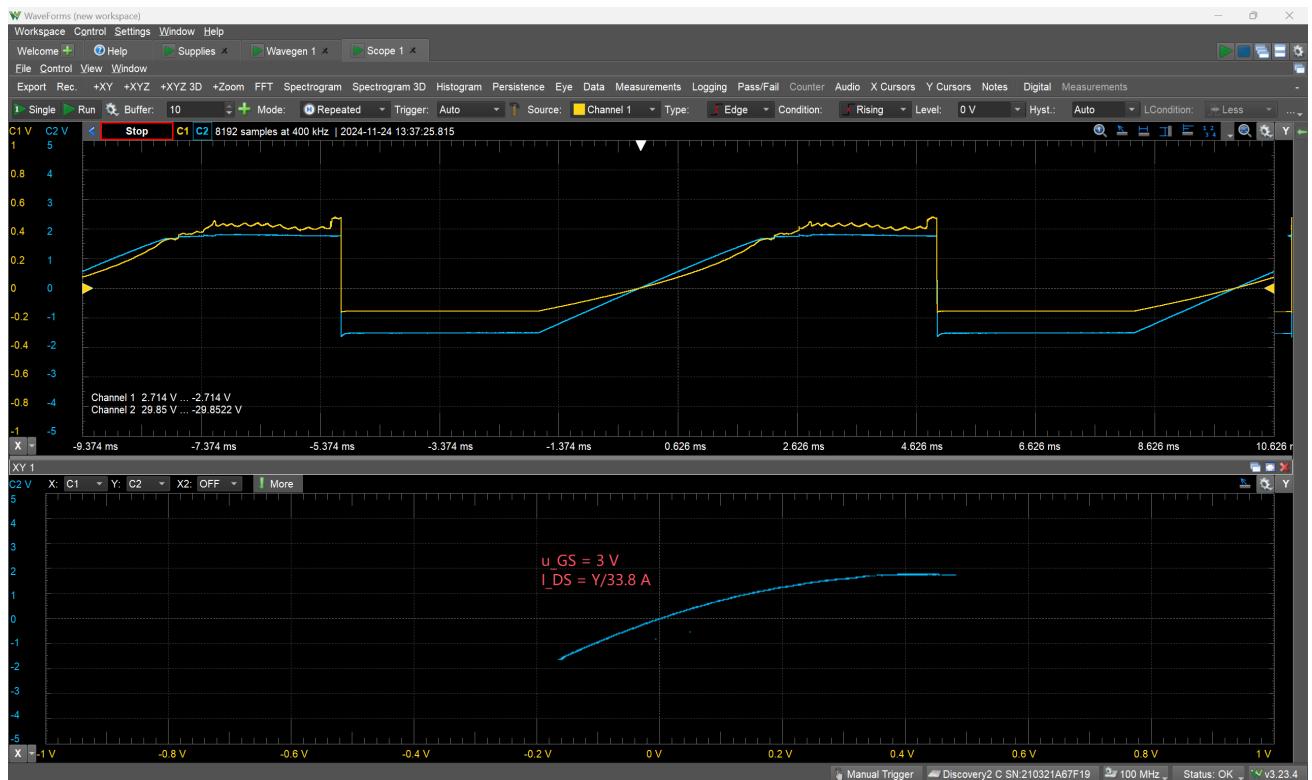


图 52: $u_{DS}-i_{DS}$ ($u_{GS} = 3 \text{ V}$)

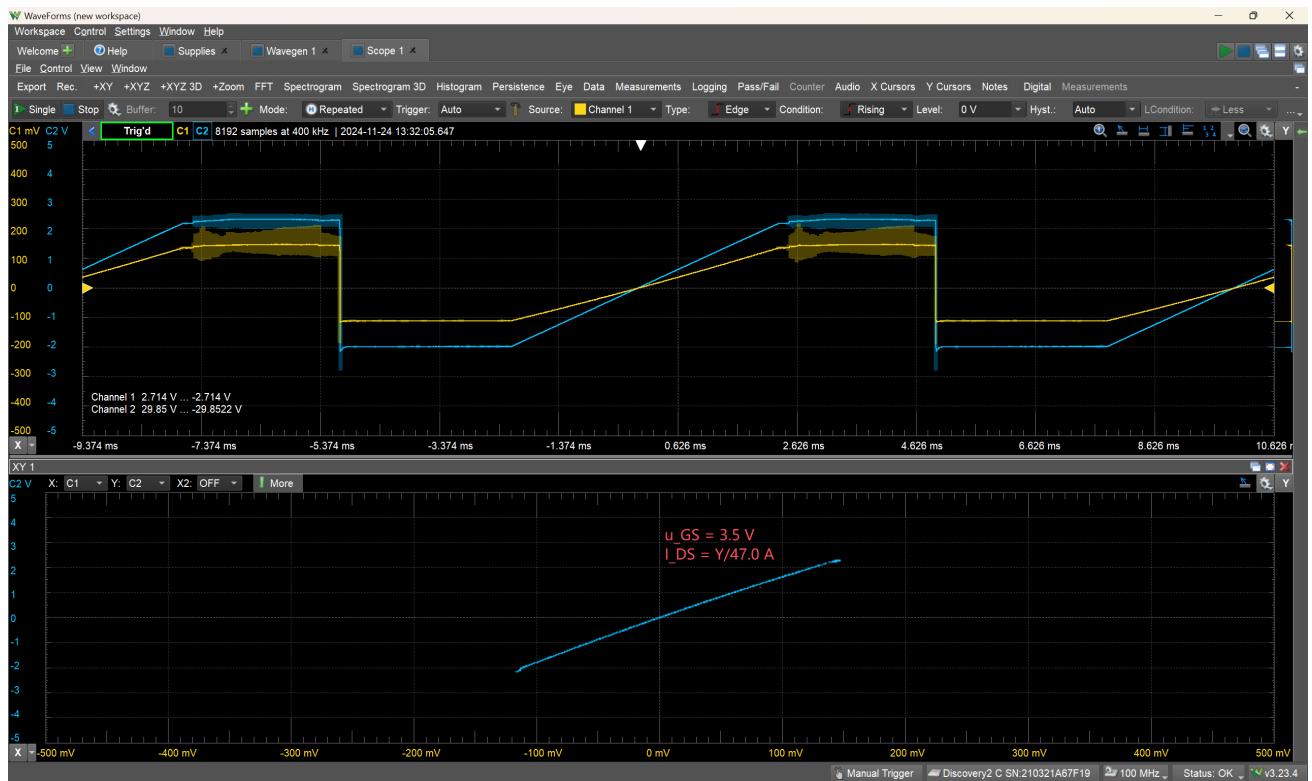


图 53: u_{DS} - i_{DS} ($u_{GS} = 3.5 \text{ V}$)

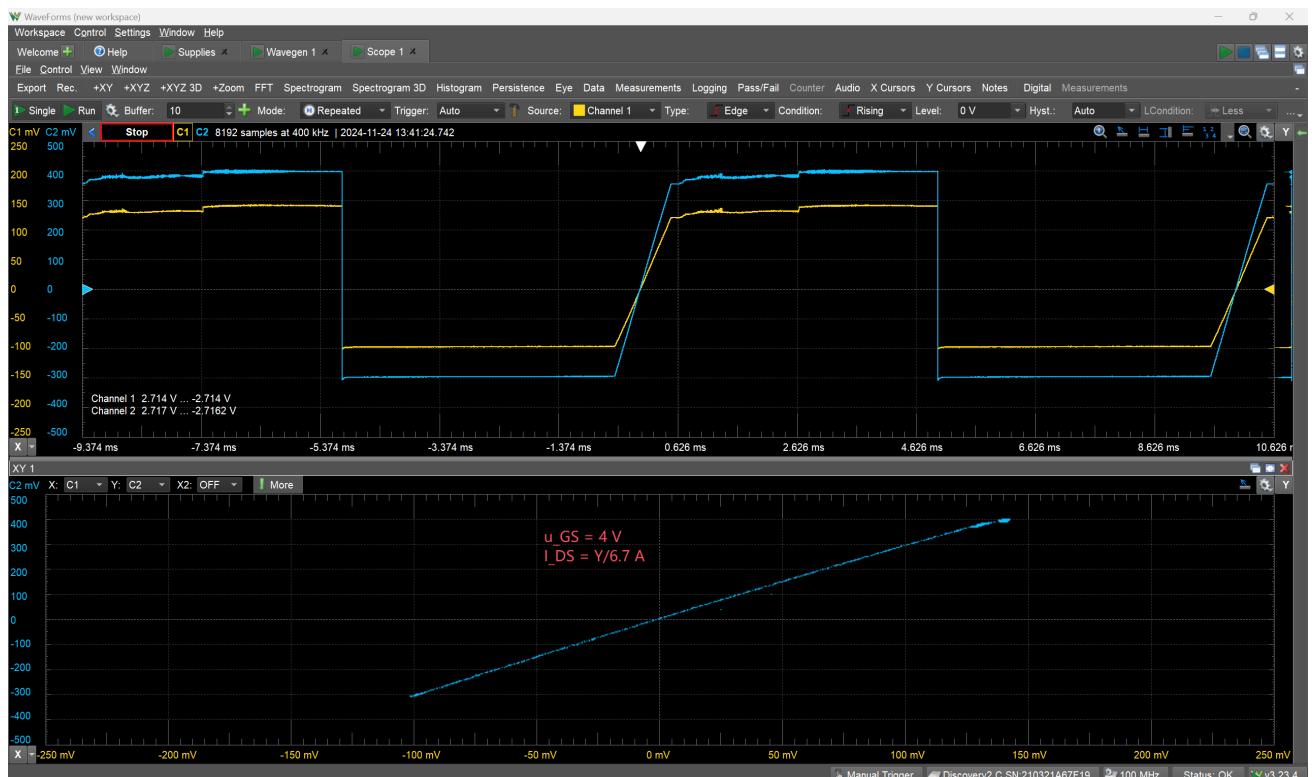
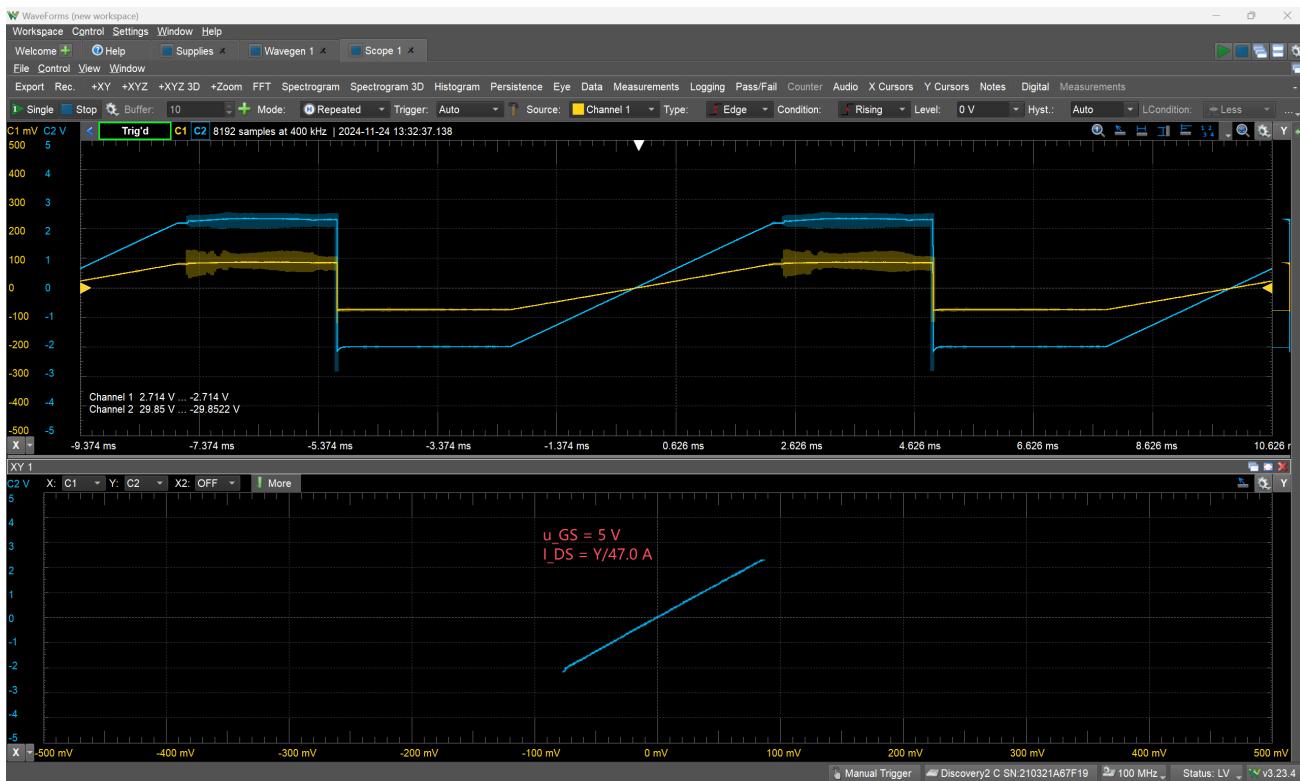


图 54: u_{DS} - i_{DS} ($u_{GS} = 4 \text{ V}$)

图 55: u_{DS} - i_{DS} ($u_{GS} = 5$ V)

附录 B Matlab 源码

```

1  %% Design: Buck Circuits
2
3  %% 脉冲序列发生器
4  % 占空比 k 关于 R_k
5  R = 1e3;
6  R_D = 10;
7
8  k = @(R_p) 1 ./ ( 1 + ( R + (R_D.*R_p./(R_D+R_p)) )./( R + R_p ) );
9  R_p_array = linspace(0, 10e3, 300);
10 stc2 = MyPlot(R_p_array, k(R_p_array));
11 stc2.labelX.String = '$R_k$';
12 stc2.labelY.String = '$k$';
13 stc2.leg.Visible = 'off';
14 %MyExport_pdf
15
16 R_f_array = linspace(1000, 10e3, 300);
17 C = 100*10^3 * 10^(-12);      % 10^3 是 10nF 即 10e-9
18 R_1 = 10e3;
19 f = @(R_k, R_f) 1 ./ ( (2*R + R_k + (R_D.*R_k./(R_D+R_k)))*C*log(1 + 2*R_f/R_1) );
20 stc2 = MyPlot(R_f_array, [f(1000, R_f_array); f(2000, R_f_array); f(5000, R_f_array)]);
21 stc2.labelX.String = '$R_f$';
22 stc2.labelY.String = '$f$';
23 stc2.leg.String = ["$R_k = 1 \ \mathbf{\Omega}$"; "$R_k = 2 \ \mathbf{\Omega}$"; "$R_k = 5 \ \mathbf{\Omega}$"];
24 MyExport_pdf
25
26 u_min = 3.312
27 u_max = 3.346
28 u = 0.5*( u_min + u_max )
29 Delta_u = u_max - u_min

```

```

30 disp(['r = ', num2str(Delta_u/u * 100), ' %'])
31 disp(['+- ', num2str(0.5*Delta_u*1000), ' mV'])
32
33
34
35 Idt = (9.866 + 92.896)*131.771/2 - 78.729*144.677/2 % 单位 mA*us
36 W_S = 5*Idt % 单位 V*mA*s
37 W_out = u*(u/5)*256.906
38 u/5e3*1000
39
40 17e-3/3.32*100
41 5.0e-3/2.117*100
42 62.4e-3/4.26*100
43
44 0.678e-3/3.308*100
45 0.252e-3/1.895*100
46
47 12/(12 + 30 + 30)*15
48
49 T = 274e-6;
50 f = 1/T
51
52 T = 500e-6;
53 f = 1/T
54
55 3.3*0.05*1000
56
57 5e-3/3.3*100
58 disp('-----')
59 disp(['500 uV 百分比: ', num2str(500e-6/3.3*100), ' %'])
60 disp(['1 mV 百分比: ', num2str(1e-3/3.3*100), ' %'])
61 disp(['10 mV 百分比: ', num2str(10e-3/3.3*100), ' %'])
62 disp(['50 mV 百分比: ', num2str(50e-3/3.3*100), ' %'])
63 disp(['100 mV 百分比: ', num2str(100e-3/3.3*100), ' %'])
64 disp('-----')
65
66 2.12/5
67 4.35/5
68 [2.5/5, 4/5]
69 5*0.43
70
71 1.895/5
72 2.115/5
73 4.42/5
74 [2.5/5, 4/5]
75 5*0.43
76
77 0.27e-3/1.895*100
78 8.87e-3/4.252*100
79 0.766e-3/3.308*100
80
81 1/320e-6
82
83 %% 双 MOS Buck 电路理论值计算
84 U_p = 15; % 脉冲高电压 V
85 f = 200e3; % 开关频率 Hz
86 k = 0.661; % 占空比
87
88 L = 100e-3; % 电感 H
89 U_S = 5; % 电源电压
90 R = 5e3; % 负载电阻
91

```

```

92 % MOS 管参数:
93 R_On = 2;
94
95 % 参数准备
96 tau = L/(R + R_On);
97 T = 1./f;
98 T_On = T*k;
99 T_Off = T*(1-k);
100 e_On = exp(-T_On/tau);
101 e_Off = exp(-T_Off/tau);
102 I_S = U_S/(R+R_On);
103
104 % 理论结果
105 I_o_max = I_S*(1 - e_On)/(1-e_On*e_Off);
106 I_o_min = I_S*(1 - e_On)/(1-e_On*e_Off)*e_Off;
107 Delta_I_o = I_S* (1 + e_On^2 - 2*e_On)/(1-e_On^2);
108 I_o_average = 0.5*(I_o_max + I_o_min);
109
110 U_o_max = I_o_max*R;
111 U_o_min = I_o_min*R;
112 Delta_U_o = Delta_I_o*R;
113 U_o_average = I_o_average*R;
114
115 U_persent = Delta_U_o/U_o_average;
116
117 % 输出结果
118 %disp(['I_o_average = ', num2str(I_o_average*1000), ' mA']);
119 %disp(['Delta_I_o = ', num2str(Delta_I_o*1000), ' mA']);
120 disp(['U_o_average = ', num2str(U_o_average), ' V']);
121 disp(['Delta_U_o = ', num2str(Delta_U_o*1000), ' mV']);
122 disp(['U_persent = ', num2str(U_persent*100), ' %']);
123
124 %% 反相器 2N7000 171 导通电阻 (U_DS = 5V 固定, U_GS 0 to 5V)
125 clc, clear, close all
126 U_o = readmatrix("C:\Users\13081\Downloads\U_DS = 5V, U_GS 0 to 5V.txt");
127 U_o = U_o';
128 U_GS = linspace(0, 5, size(U_o, 2));
129 %MyPlot(U_GS, U_o);
130 % 计算导通电阻
131 U_S = 5;
132 R_limit = 993;
133 R_T = R_limit./(U_S./U_o - 1);
134 stc2 = MyYYPlot([U_GS; U_GS], [U_o; R_T]);
135 yyaxis(stc2.axes, "right")
136 ylim([0 100])
137 xline(1.9)
138 yline(10)
139
140 xline(1.73)
141 yline(40)
142 ylim([0 50])
143
144 stc2.label.x.String = "$u_{\mathsf{GS}}$";
145 stc2.label.y_left.String = "$u_{\mathsf{DS}}$";
146 stc2.label.y_right.String = "$R_{\mathsf{T}}$";
147 stc2.leg.String = ["$u_{\mathsf{DS}}$"; "$R_{\mathsf{T}}$"];
148 stc2.axes.Title.String = "Resistance of 2N7000 (U_S = 5V, U_GS form 0 to 5V)";
149
150
151
152 % 10 欧姆时 u_GS = 1.8, 40 欧姆时 u_GS = 1.73
153

```

```

154 %% 反相器 2N7000 171 导通电阻 (U_DS = 15V 固定, U_GS 0 to 5V)
155 clc, clear, close all
156 U_o = readmatrix("C:\Users\13081\Downloads\U_DS = 15V, U_GS 0 to 5V.txt");
157 U_o = U_o';
158 U_o(U_o >= 15) = 14.999
159 U_GS = linspace(0, 5, size(U_o, 2));
160 %MyPlot(U_GS, U_o);
161 % 计算导通电阻
162 U_S = 15;
163 R_limit = 993;
164 R_T = R_limit./(U_S./U_o - 1);
165 stc2 = MyYYPlot([U_GS; U_GS], [U_o; R_T]);
166 yyaxis(stc2.axes, "right");
167 ylim([0 100])
168 xline(2.05)
169 yline(10)
170
171 xline(1.89)
172 yline(40)
173 ylim([0 50])
174
175 stc2.label.x.String = "$u_{\mathrm{GS}}$";
176 stc2.label.y_left.String = "$u_{\mathrm{DS}}$";
177 stc2.label.y_right.String = "$R_{\mathrm{T}}$";
178 stc2.leg.String = ["$u_{\mathrm{DS}}$"; "$R_{\mathrm{T}}$"];
179 stc2.axes.Title.String = "Resistance of 2N7000 (U_S = 15V, U_GS form 0 to 5V)";
180
181
182 % 10 欧姆时 u_GS = 2.05, 40 欧姆时 u_GS = 1.89
183
184 %% 电感感值测量 (L, 100 mH)
185 U_o = readmatrix("C:\Users\13081\Downloads\电感感值测量 (L_1, 第一次).txt");
186 U_o = U_o';
187 % 计算等效电阻
188 U_o_max = U_o(2, 1)
189 R_limit = 993;
190 U_S = 5;
191 R_L = R_limit*(U_S./U_o_max(1) - 1) % 直流等效电阻
192 % 计算感值
193 R_e = R_limit + R_L;
194 MyPlot(U_o(1, :), U_o(2, :));
195 yline(U_o_max/exp(1))
196 tau = (-0.000185126) - (-0.000271056) % 人工读数得到 tau
197 L = tau*R_e;
198 disp(['L = ', num2str(L*1000), ' mH']);
199 disp(['DCR = ', num2str(R_L), ' Ohm']);
200
201 %% 电感感值测量 (L, 2 mH)
202 U_o = readmatrix("C:\Users\13081\Downloads\电感测量 (2 mH, U_s = 2V).txt");
203 U_o = U_o';
204 % 计算等效电阻
205 U_o_max = U_o(2, 1)
206 R_limit = 46.9;
207 U_S = 2;
208 R_L = R_limit*(U_S./U_o_max(1) - 1) % 直流等效电阻
209 % 计算感值
210 R_e = R_limit + R_L;
211 MyPlot(U_o(1, :), U_o(2, :));
212 yline(U_o_max/exp(1))
213 tau = (0.04015908) - (0.0401179) % 人工读数得到 tau
214 L = tau*R_e;
215

```

```

216 disp(['L = ', num2str(L*1000), ' mH']);
217 disp(['DCR = ', num2str(R_L), ' Ohm']);
218
219 %% 电容测量 (JH, 214 uF)
220 U_o = readmatrix("C:\Users\13081\Downloads\电容测量 (JH, 214 uF).txt");
221 U_o = U_o';
222 % 计算等效电阻
223 U_o_max = U_o(2, 1);
224 R_limit = 993;
225 U_S = 5;
226 R_L = R_limit*(U_S./U_o_max(1) - 1) % 直流等效电阻
227 % 计算感值
228 R_e = R_limit + R_L;
229 MyPlot(U_o(1, :), U_o(2, :));
230 yline(U_o_max/exp(1));
231 tau = (-0.000185126) - (-0.000271056) % 人工读数得到 tau
232 L = tau*R_e;
233 %disp(['L = ', num2str(L*1000), ' mH']);
234
235
236 %% 1N4007 IV Characteristics
237 Data = readmatrix("C:\Users\13081\Downloads\1N7007 IV Characteristics (23.5 欧电阻作电流表).txt");
238 %Data = ProcessData(Data);
239 Data = Data(830:6236, :);
240 R_L = parallel(47.1, 47.0); % 用作电流表的电阻 (Channel 2)
241
242 u_D = Data(1, :);
243 i_D = Data(2, :)/R_L*1000;
244
245 stc1 = MyPlot(u_D, i_D);
246 stc1.axes.TickLabelInterpreter = 'latex';
247 stc1.axes.Title.String = "Voltage-Current Characteristics of 1N4007";
248 stc1.label.x.String = '$u_D$ (V)';
249 stc1.label.y.String = '$i_D$ (mA)';
250 stc1.leg.Visible = 'off';
251 c = GetMyColors;
252 stc1.plot_1.Color = c{2};
253 yline(0)
254 %xlim([0.4 max(Data(1, :))])
255 MyExport_pdf_docked
256
257 yyp = MyYYPlot([u_D(u_D > 0.58); u_D(u_D > 0.58)], [i_D(u_D > 0.58); R_D(u_D > 0.58)]);
258 yyaxis(yyp.axes, "right");
259 ylim([0 500])
260 yyp.leg.Visible = 'off';
261 yyp.axes.Title.String = "Resistance Characteristics of 1N4007";
262 yyp.label.x.String = '$u_D$';
263 yyp.label.y_right.String = '$R_D$ (\Omega)';
264 yyp.label.y_left.String = '$i_D$ (mA)';
265 MyExport_pdf_docked
266
267 syms x
268 eq = (200-x)*(100-x) == 10000;
269 re = solve(eq)
270 vpa(re)
271
272 TtoF(297e-6)
273 ShowOutput(3.323523, 3.323)
274
275 %% 4 mH
276
277

```

```

278 ShowOutput(3.301, 3.315)
279 ShowOutput(0.820, 0.8246)
280 ShowOutput(4.211, 4.235)
281
282 % 6 mH
283 ShowOutput(3.311, 3.301)
284 % 2 mH
285 ShowOutput(3.327, 3.356)
286
287 function R = parallel(R_1, R_2)
288     R = 1./(1./R_1 + 1./R_2);
289 end
290
291 function R = parallel_n(R_array)
292     R = 1./sum(1./R_array);
293 end
294
295 function f = TtoF(T)
296     f = 1./T;
297 end
298
299 function ShowOutput(u_min, u_max)
300     u = 0.5*( u_min + u_max);
301     Delta_u = u_max - u_min;
302     disp(['u = ', num2str(u, '%.4f'), ' V (+- ', num2str(0.5*Delta_u*1000, '%.2f'), ' mV']]);
303     disp(['r = ', num2str(Delta_u/u * 100, '%.4f'), ' %']);
304 end
305
306 function GetOutput(u_min, Delta_u)
307     u = u_min + 0.5*Delta_u;
308     Delta_u = u_max - u_min;
309     disp(['u = ', num2str(u, '%.4f'), ' V (+- ', num2str(0.5*Delta_u*1000, '%.2f'), ' mV']]);
310     disp(['r = ', num2str(Delta_u/u * 100, '%.4f'), ' %']);
311 end
312
313 function Data = ProcessData(Data)
314     % 转为行向量或行矩阵
315     if size(Data, 1) > size(Data, 2)
316         Data = Data';
317     end
318     i = 1;
319     % 获取一个周期的起始点
320     while sum(Data(1, i) < Data(1, i+ (1:8))) > 0
321         i = i+1;
322     end
323     begin = i+1;
324     i = begin;
325     % 获取一个周期的结束点
326     while sum(Data(1, i) < Data(1, i+ (1:8))) > 0
327         i = i+1;
328     end
329     End = i;
330     Data = Data(:, begin:1:End);
331 end

```