

# 《电力电子技术课程设计》

## 研究报告

学 院: 自动化学院

学 号: 2021302330

姓 名: 张晶玮

专 业: 自动化

地 点: 西北工业大学长安校区

指导教师: 梁波

西北工业大学自动化学院

2023 年 12 月

# 基于 PWM 控制 BOOST 变换器设计

## 目的

- 1) 熟悉 BOOST 变换电路工作原理，探究 PID 闭环调压系统设计方法。
- 2) 熟悉专用 PWM 控制芯片工作原理，
- 3) 探究由运放构成的 PID 闭环控制电路调节规律，并分析系统稳定性。

## 内容

设计基于 PWM 控制的 BOOST 变换器，指标参数如下：

- 输入电压：9V~16V；
- 输出电压：24V，纹波<1%；
- 输出功率：20W；
- 开关频率：40kHz；
- 具有过流、短路保护和过压保护功能，并设计报警电路；
- 具有软启动功能；
- 进行 Boost 变换电路的设计、仿真与电路调试。

## 实验仪器设备

- 1) 示波器
- 2) 稳压电源
- 3) 电烙铁
- 4) 计算机
- 5) 万用表

## 研究内容

### (一) 方案设计(含电路原理、电路参数计算、器件参数选择)

#### 1. 电路原理

整个基于 PWM 控制的 BOOST 变换器包括 PWM 发生电路、加法电路、驱动电路、主电路(BOOST)、反馈电路、保护电路六个部分。

① **PWM** 发生电路的核心是 SG3525 芯片，可以使用该芯片得到特定占空

比的 PWM 波。加法电路将 SG3525 的两个互补输出叠加而成。

- ② **MOSFET** 驱动电路采用两个晶体管连接成的推挽输出，该推挽电路将 PWM 的低电压拉低以确 **MOSFET** 的可靠关断。
  - ③ 主电路即 **BOOST** 电路。
  - ④ 反馈电路在 SG3525 的引脚 9 和引脚 1 进行 PI 调节，使该闭环系统更加稳定和迅速。
  - ⑤ **保护电路**主要实现过压保护，利用 SG3525 的外部关断信号输入端引脚 10(Shutdown)，该端接高电平时控制器输出被禁止。

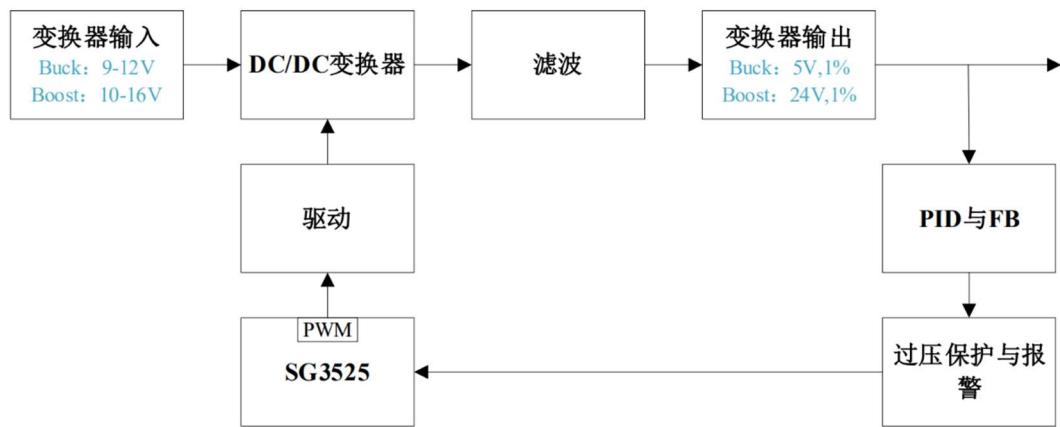


图 1 整体电路原理

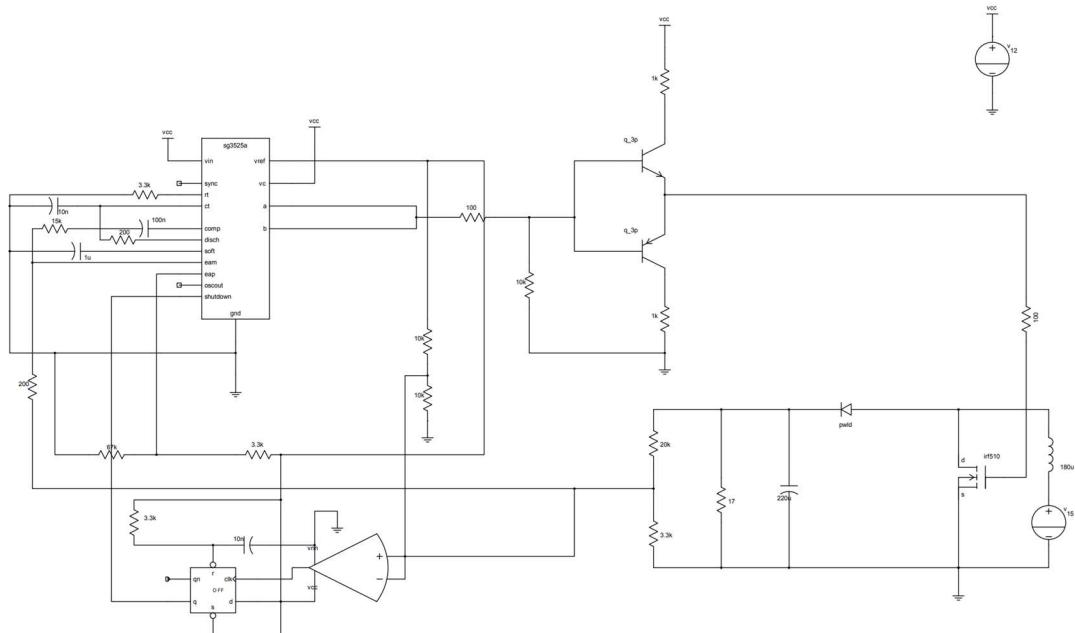


图 2 电路原理图

## 2. 电路参数计算和器件参数选择

① 电感计算：忽略电路损耗，工作在 CCM 状态，按照电路知识有

$$D = 1 - \frac{U_o}{U_d} = \begin{cases} D_{\min} = 1 - \frac{16}{24} = 0.333333 \\ D_{\max} = 1 - \frac{9}{24} = 0.625 \end{cases}$$

$$L > \frac{D(1-D)^2}{2I_o} U_o T_s = \frac{4/27}{2 \times 1.25} \times 24 \times \frac{1}{40000} = 35.56 \mu H$$

$$\text{按 } \frac{\Delta I_o}{I_o} = \frac{D(1-D)^2}{I_o} U_o T_s < 40\%$$

$$L > \frac{D(1-D)^2}{40\% I_o} U_o T_s = \frac{4/27}{0.4 \times 1.25} \times 24 \times \frac{1}{40000} = 177.78 \mu H$$

取  $L = 180 \mu H$

② 电容计算：输出电压纹波小于 1%

$$C > \frac{DT_s I_o}{1\% \times U_o} = \frac{0.625 \times 2.5 \times 10^{-5} \times 1.25}{0.01 \times 24} = 81.38 \mu F$$

按 2-3 倍裕量，取  $C = 220 \mu F$

③ 功率开关管：主要参数是功率开关管漏源电流

$$\begin{aligned} I_{DS_{\max}} &= I_L + 0.5 \Delta I_L = \frac{I_o}{1-D} + \frac{D(1-D)}{2L} U_o T_s \\ &= \frac{1.25}{0.5} + \frac{24 \times 2.5 \times 10^{-5}}{8 \times 180 \times 10^{-6}} = 2.91667 A \end{aligned}$$

按 3-8 倍裕量，取  $I_{DS_{\max}}$  为 22A， $V_{DS}$  为 100V 的 IRF540N

④ 二极管

$$\begin{cases} f = 40 kHz \\ V_{max} = 24V \\ I_{max} = 1.25A \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_D = 600V \\ I_D = 30A \end{cases} \Rightarrow MUR1560$$

⑤ 3525 开关频率计算：在 3525 的 PIN5、6、7 引脚接入  $C_T$ 、 $R_T$ 、 $R_D$ 。

$$f_{osc} = \frac{1}{(0.7R_T + R_D)C_T} = 40kHz$$

↓

$$R_T = 3.3k\Omega, R_D = 200\Omega, C_T = 10nF$$

$$\Rightarrow f_{osc} = \frac{10^9}{(0.7 \times 3300 + 200) \times 10} = 39.8kHz$$

⑥ PI 参数计算：在 3525 的 PIN1、2、9 引脚接入响应的 PI 电压调节环节。

$$\begin{cases} R_{12} = 10k\Omega \\ R_{13} = 1k\Omega \\ C_4 = 100nF \end{cases}$$

⑦ 软启动：在 3525 的 PIN8 引脚接入  $1\mu F$ 。

## (二) 系统仿真验证(含仿真模型、仿真结果与结果分析)

开环闭环仿真在 Simulink 上搭建仿真模型，开环时使用 Pulse Generator 模拟 SG3525 产生 PWM 波驱动 N 沟道 MOSFET，输入电压为 10V 时( $R=450\Omega$ ，实际为  $500\Omega$  与  $3500\Omega$  并联等效电阻约为  $450\Omega$ )，手动调节占空比为 34%，得到输出电压为  $24.39V$ 。当输入电压改变时，如不调节 PWM 波占空比，输出电压将稳定在不同的值。

测试中还发现， $R$  阻值对输出电压有较大影响， $R$  较小时，输出电压一开始跳动剧烈，最终稳定值越接近理论公式计算结果( $V_o = V_{in} \times \frac{1}{1-D}$ )， $R$  较大时，超调量和峰值减小，但最终稳定值与理论公式相差较大。

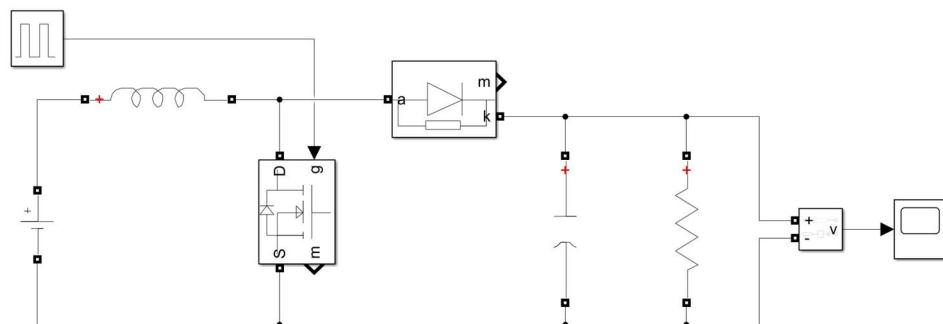


图 3 开环仿真模型

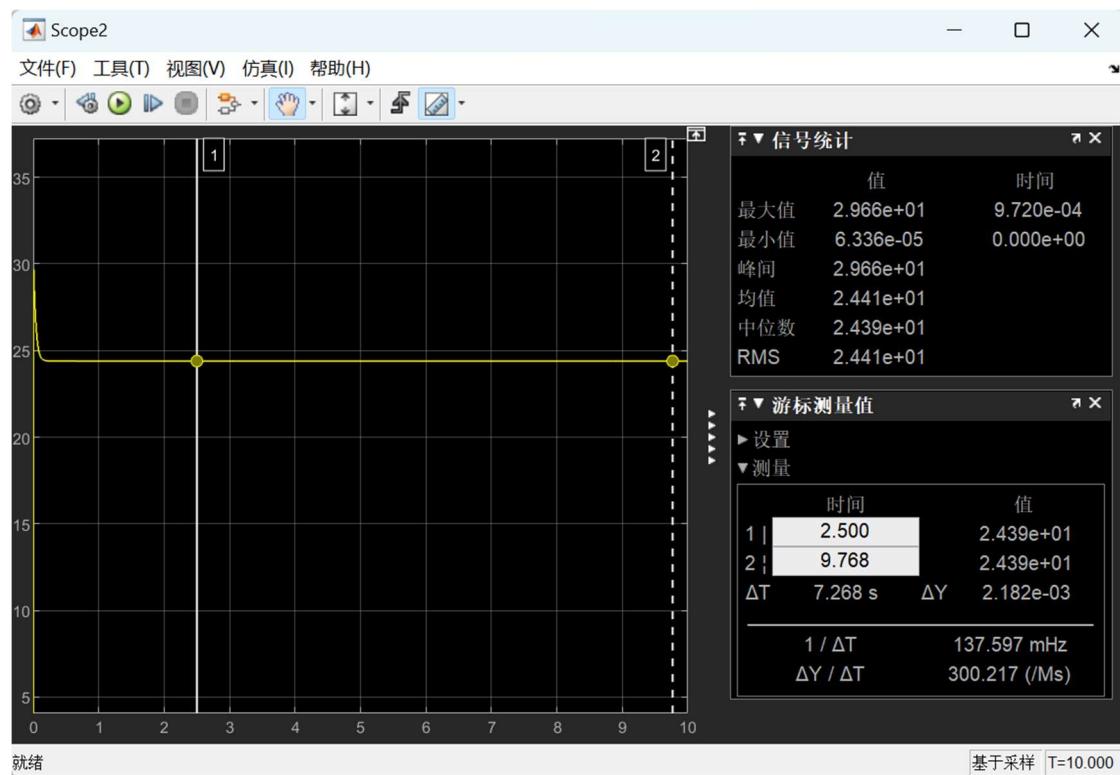


图 4 开环结果图

闭环时, 将输出电压和 24V 比较作差, 经过 PID(实际只使用 PI)控制器, 调节 PWM 波的占空比, 当误差为正数时, 占空比应调小, 当误差为负数时, 占空比应调大, 设初始占空比为 8%, 因为误差可能较大, 设置 PI 参数应尽量小, 与 0.08 的数量级相同, 用 0.2 与 PID 输出相减, 经过 0-1 的限幅得到 PWM 波的占空比, 驱动 MOSFET。输入电压为 10-16V 时, 自动调节占空比, 得到输出电压均为 24V 左右。此时最终稳定的输出电压也与 R 阻值无关。

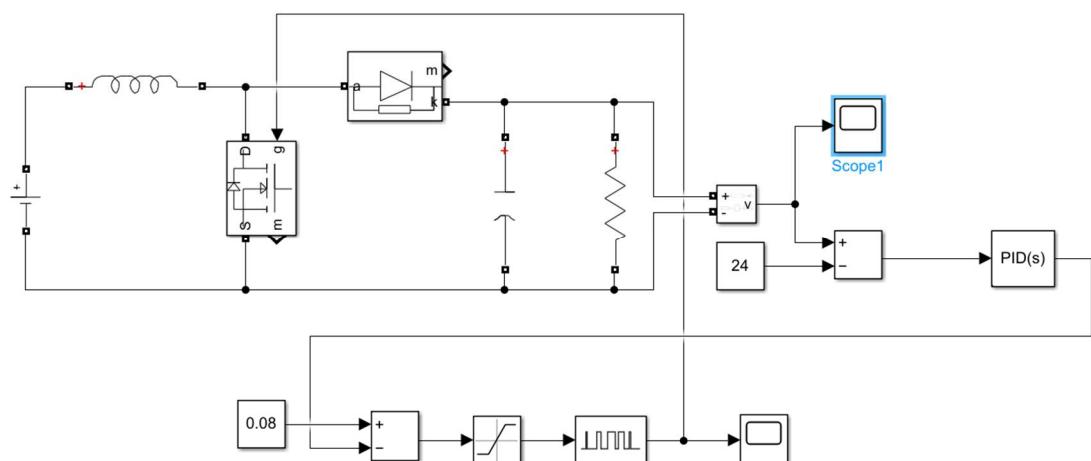


图 5 闭环仿真模型

经过参数整定，调节 PI 参数为 0.001 和 0.5，调参原则：K<sub>p</sub>较小时峰值电压不过大，K<sub>i</sub>较大时调节时间较短。下图显示在输入电压分别为 10V、12V、15V 时的输出电压。观察可见，输入电压越高，输出电压峰值、超调量越高，调节时间均小于 0.3 秒，最终稳定值都是 24V。

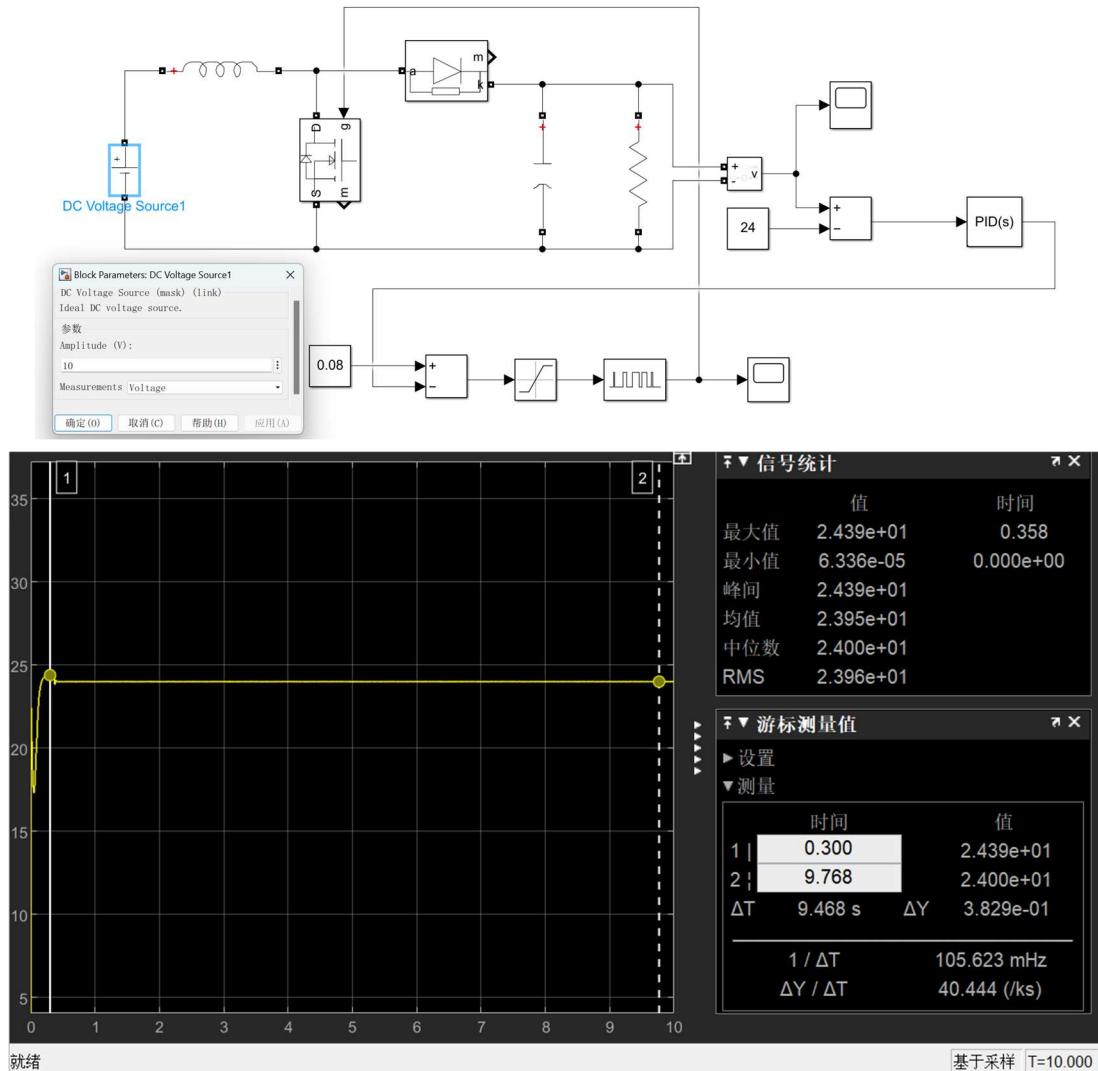
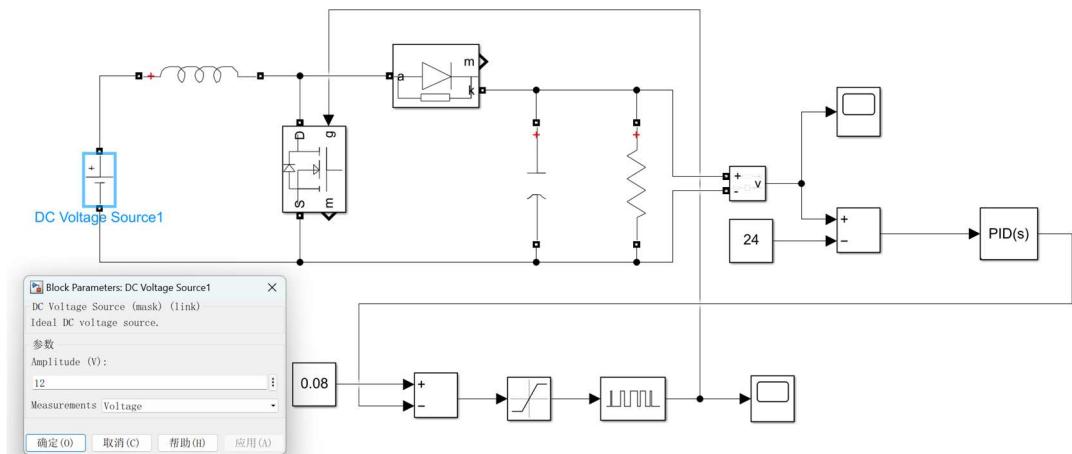


图 6 输入电压为 10V 时仿真结果图



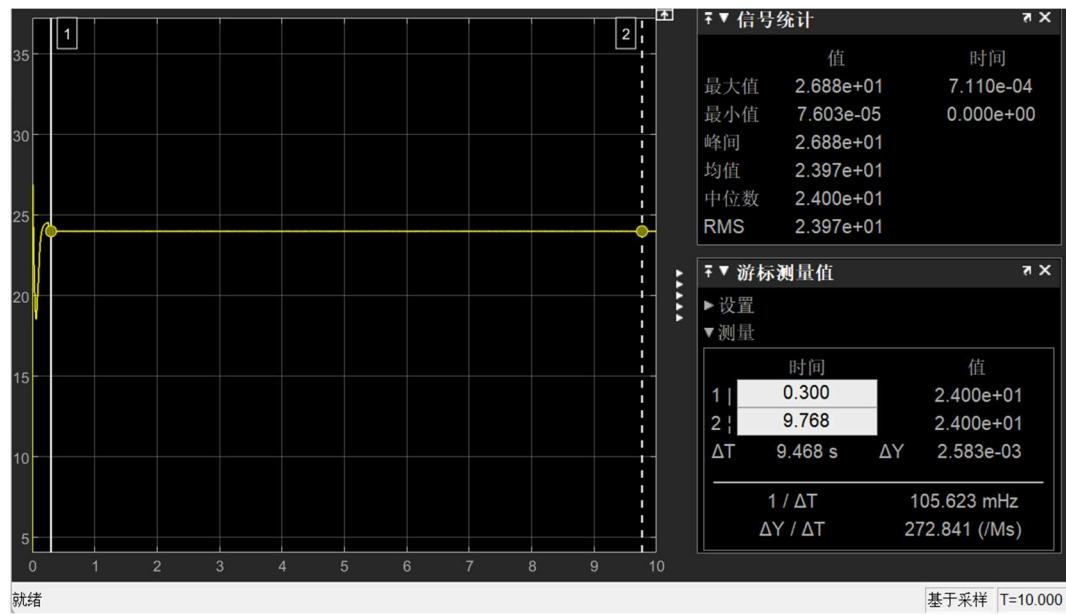


图 7 输入电压为 12V 时仿真结果图

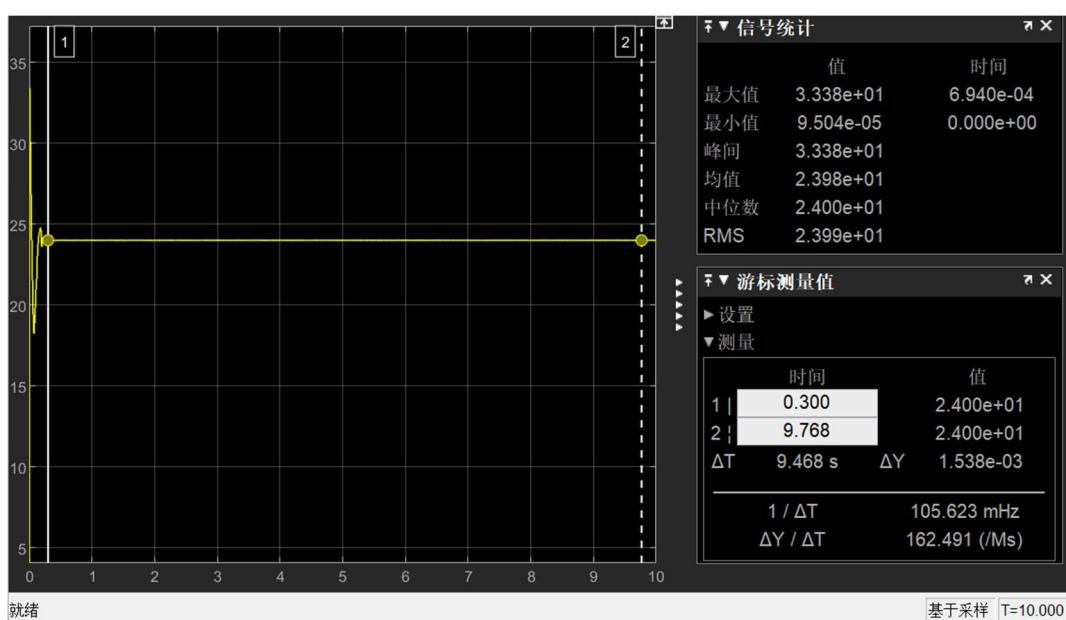
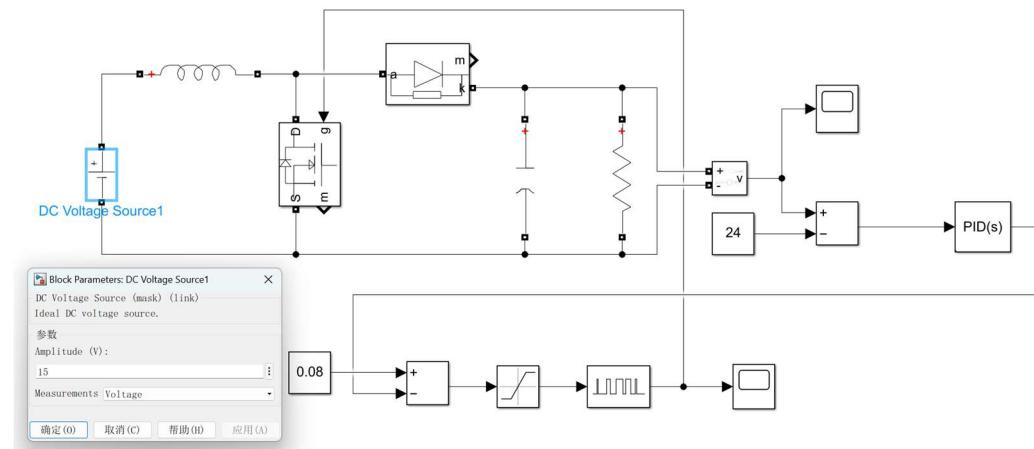


图 8 输入电压为 15V 时仿真结果图

保护电路使用 Multisim 仿真, SG3525 产生 5V 的 Vref, 经过 10k 欧的电位器和 3.3k 欧电阻分压, 输入 LM358 比较器反向端, 输出电压经过 20k 和 3.3k 电阻分压输入比较器同向端, 若同向端电压高于反向端, LM358 比较器输出高电压, 否则输出低电压, 比较器输出电压输入 74LS74 的 CLK 时钟信号, 由于 D 触发器的 D 端已经置高, 每当时钟脉冲来临(即同向端电压高于反向端), Q 端就会跟随 D 端输出高电压 5V, 经过限流电阻(根据 LED 的工作电流确定), 使报警电路的 LED 灯亮。

同时, PIN5 的 Q 端输出还直接连至 SG3525 的 10 脚 Shutdown, 使其关闭 PWM 输出, 启动过压保护, 输出电压不会超过阈值。

通过调节 10k 欧电位器, 可以设置报警电压, 电位器阻值越高, 反向端电压越小, 更易于同向端电压高于反向端, 报警电压越低。如下图, 设置电位器阻值为 1k 欧(10%), 报警电压为 28V。

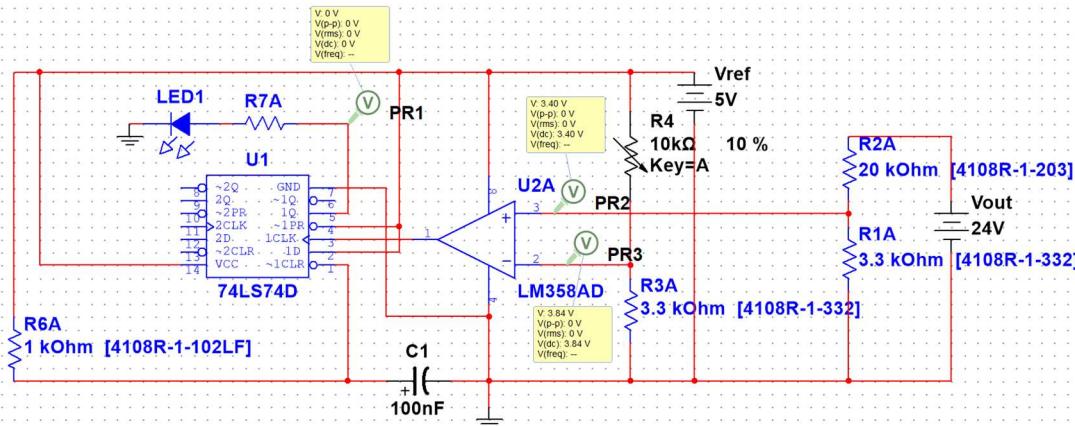


图 9 输出电压为 24V 时仿真结果图(LED 灭)

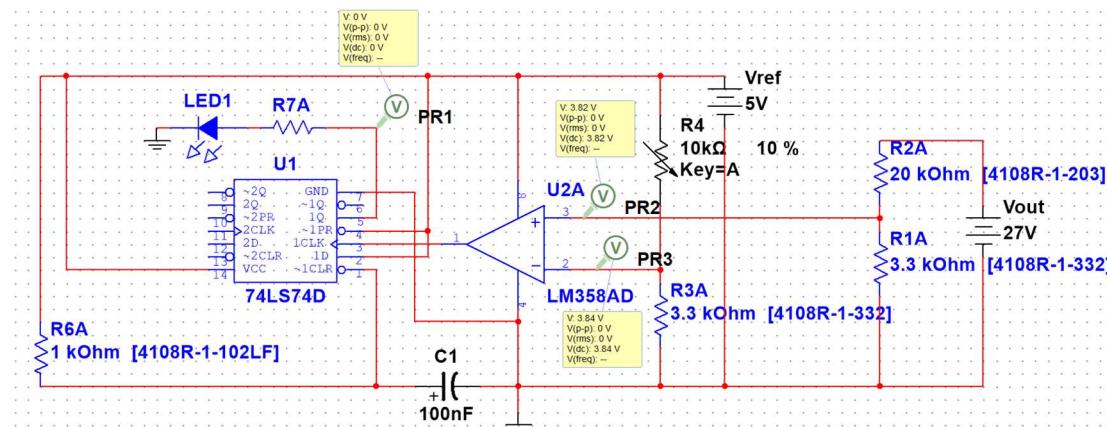


图 10 输出电压为 27V 时仿真结果图(LED 灭)

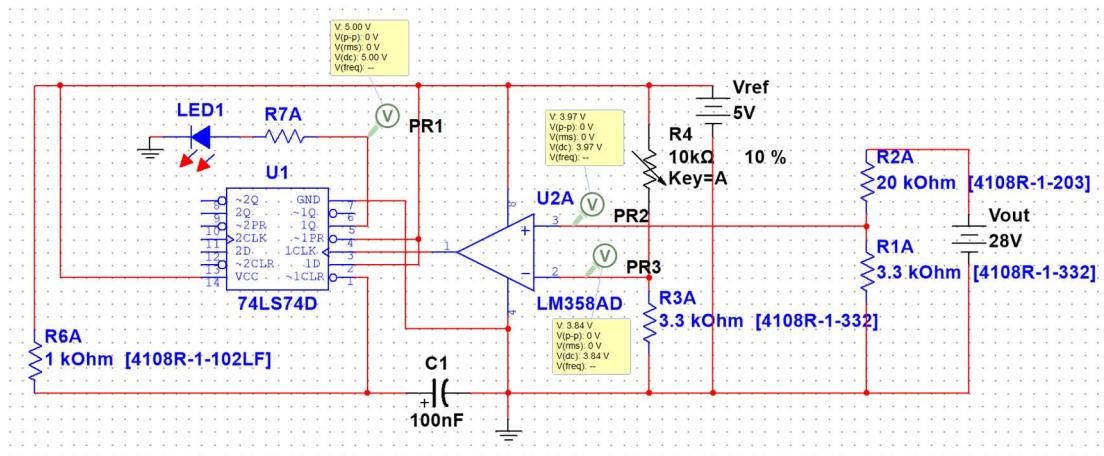


图 11 输出电压为 28V 时仿真结果图(LED 亮)

### (三) 系统实验验证(含实物图片、结果与结果分析)

#### 1. 电路实物图: 分模块焊接测试

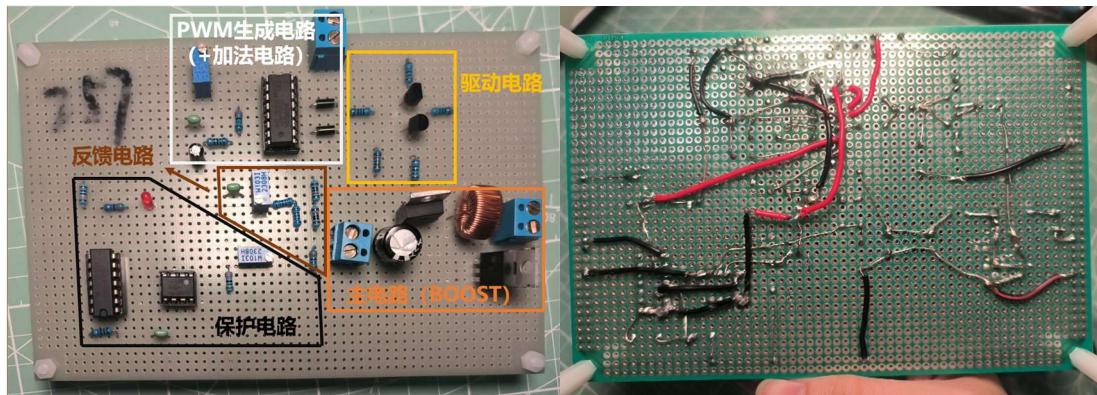


图 12 电路实物图(正面 背面)

#### 2. PWM 波形调试: 调节 PIN2、16 电位器, 得到不同占空比的 PWM 波形。

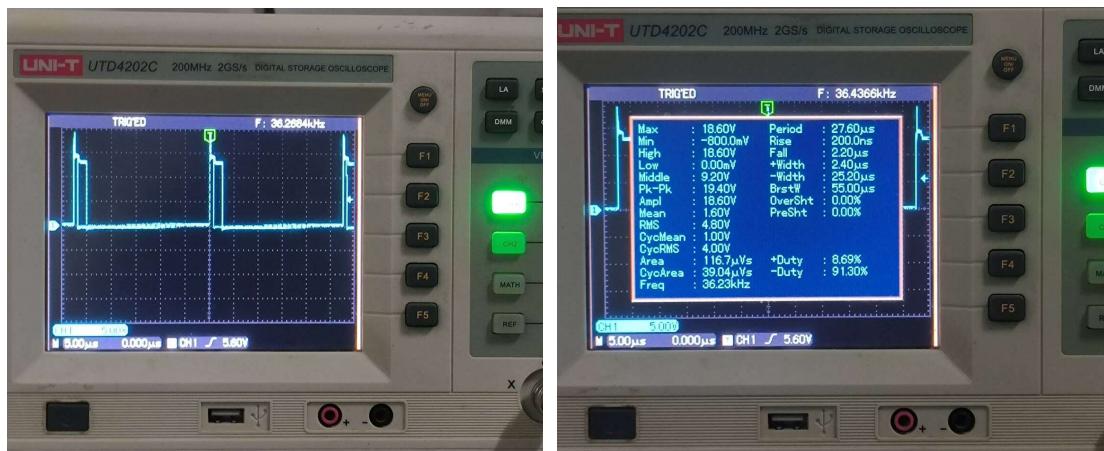


图 13 占空比 8.69% PWM 波形

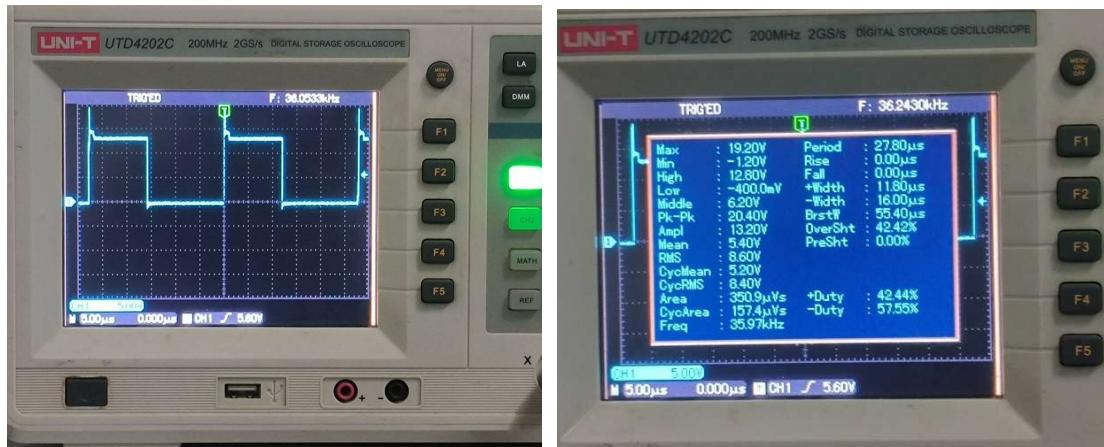


图 14 占空比 42.44% PWM 波形

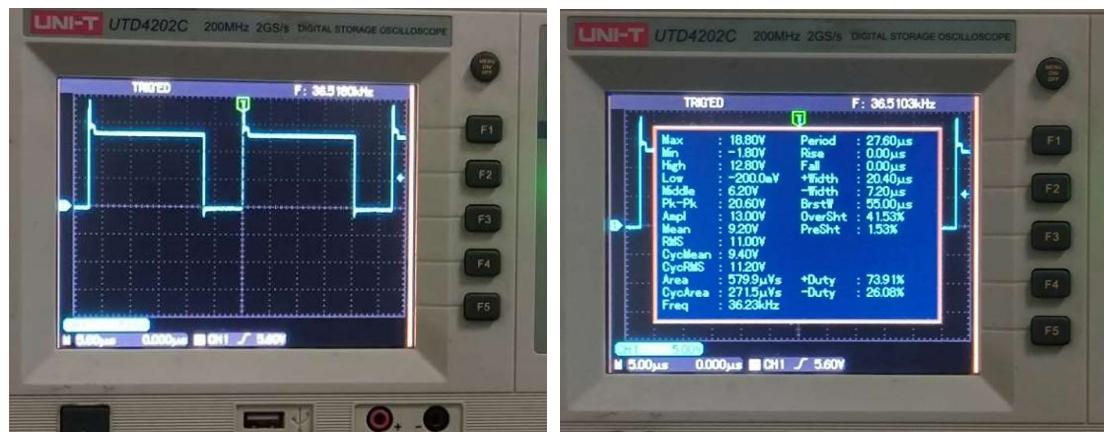


图 15 占空比 73.91% PWM 波形

3. 开环测试: 1、9 脚短接, 10 脚直接接地, 调节连接在 PIN2、16 的电位器, 使在特定输入电压下的输出端电压为 24V。此时改变输入电压, 输出电压会随之改变, 需要重新调节电位器, 由于闭环建立在开环的基础上, 只展示闭环的结果。
4. 闭环测试: 1、9 脚加入电容电阻反馈电路, 调节 PIN2、16 电位器, 使在特定输入电压下的输出端电压为 24V, 此时改变输入电压, 输出电压基本不变, 稳定在 24V 左右, 纹波小于 1%, 即输出电压在 23.76V~24.24V 之间。如下图, 在输入电压为 9V 或 11V 时, 示波器上 PWM 波形占空比自动改变, 使输出电压始终保持在 24V 左右。

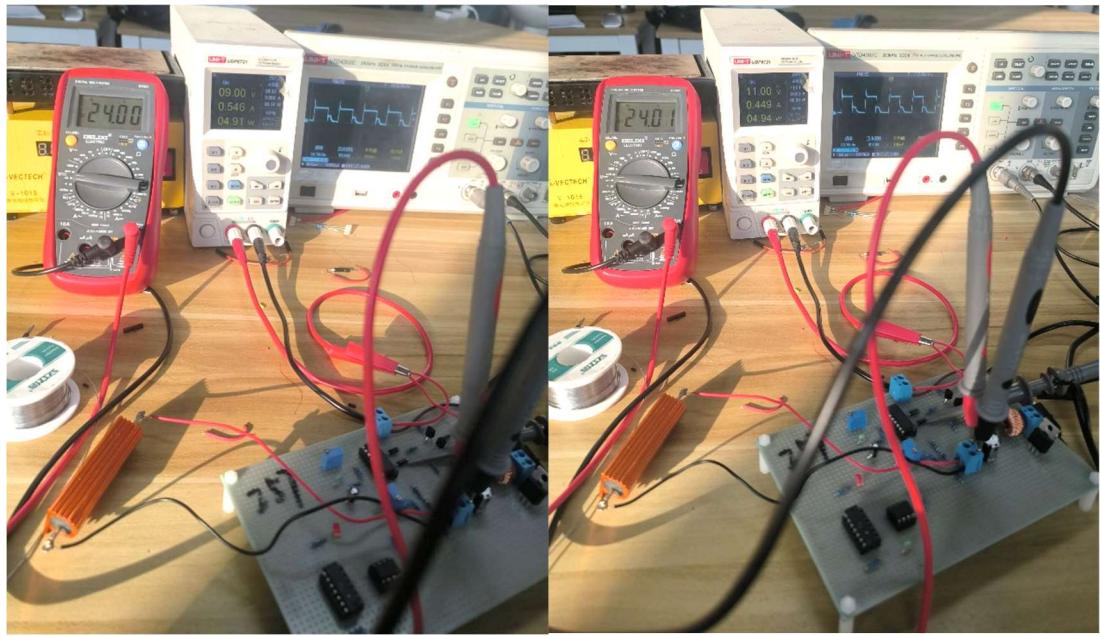


图 16 闭环测试(左图为 9V, 右图为 11V)

#### (四) 分析与讨论

**1. SG3525 的工作原理:** 上述比较详细地描述了主电路、开环闭环、保护电路的原理, 保护电路由于时间原因未能做出实物, 但由于缺少 SG3525 的仿真模型, 在电路出现问题的时候花费了很多时间去读手册和调试, 才在过程中慢慢理解了它的工作原理。

#### 引脚功能:

- ① Inv.input(引脚 1): 误差放大器反向输入端。在闭环系统中, 该引脚接反馈信号。在开环系统中, 该端与补偿信号输入端(引脚 9)相连, 可构成跟随器。
- ② Noninv.input(引脚 2): 误差放大器同向输入端。在闭环系统和开环系统中, 该端接给定信号。根据需要, 在该端与补偿信号输入端(引脚 9)之间接入不同类型的反馈网络, 可以构成比例、比例积分和积分等类型的调节器。
- ③ Sync(引脚 3): 振荡器外接同步信号输入端。该端接外部同步脉冲信号可实现与外电路同步。
- ④ OSC.Output(引脚 4): 振荡器输出端。
- ⑤ CT(引脚 5): 振荡器定时电容接入端。

- ⑥ RT(引脚 6): 振荡器定时电阻接入端。
- ⑦ Discharge(引脚 7): 振荡器放电端。该端与引脚 5 之间外接一只放电电阻，构成放电回路。
- ⑧ Soft-Start(引脚 8): 软启动电容接入端。该端通常接一只 5 的软启动电容。
- ⑨ Compensation(引脚 9): PWM 比较器补偿信号输入端。在该端与引脚 2 之间接入不同类型的反馈网络，可以构成比例、比例积分和积分等类型调节器。
- ⑩ Shutdown(引脚 10): 外部关断信号输入端。该端接高电平时控制器输出被禁止。该端可与**保护电路**相连，以实现故障保护。
- ⑪ Output A(引脚 11): 输出端 A。引脚 11 和引脚 14 是两路互补输出端。
- ⑫ Ground(引脚 12): 信号地。
- ⑬ Vc(引脚 13): 输出级偏置电压接入端。
- ⑭ Output B(引脚 14): 输出端 B。引脚 14 和引脚 11 是两路互补输出端。
- ⑮ Vcc(引脚 15): 偏置电源接入端。
- ⑯ Vref(引脚 16): 基准电源输出端。该端可输出一温度稳定性极好的基准电压。

#### 工作原理:

5、6、7 脚电容电阻确定锯齿波的频率，也为 PWM 波的频率，输入电压为基准电压经过电阻分压后的一条直线，将该直线与锯齿波比较，若锯齿波较小输出低电平，反之输出高电平，如下图。

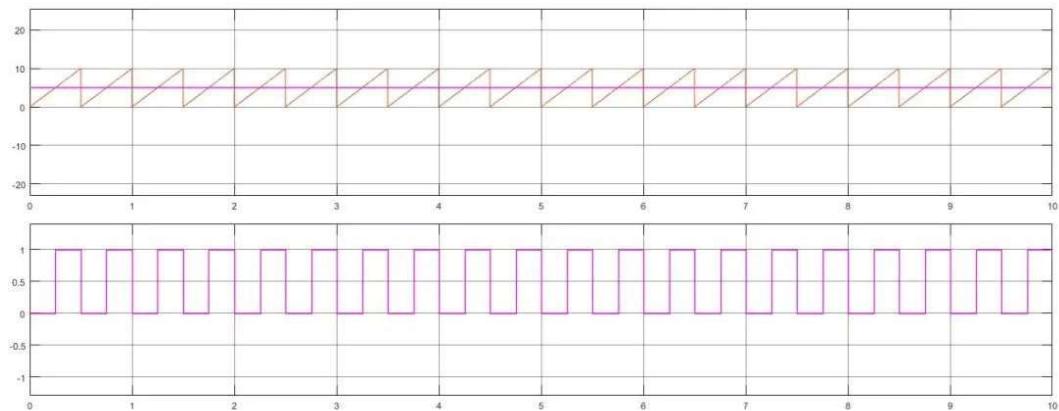


图 17 PWM 波生成原理

只有软启动电容充电至其上的电压使引脚 8 处于高电平时，SG3525 才开始

工作。当 Shutdown(引脚 10)上的信号为高电平时，PWM 锁存器将立即动作，禁止 SG3525 的输出。

故在测试时，若 PWM 波输出不正常，先用万用表测量 PIN8 是否为高电平，PIN10 是否为低电平，即 SG3525 是否工作。在 SG3525 工作状态下，用示波器测量 PIN5 锯齿波输出是否正常，若不正常，检查焊接是否完好，SG3525 可能损坏，若正常，再逐一向后排查问题。

**2. 闭环 PI 参数：**参考比例积分环节的电路实现如下，查阅 SG3525 手册得知 PIN1、9 之间确实存在一个运算放大器。

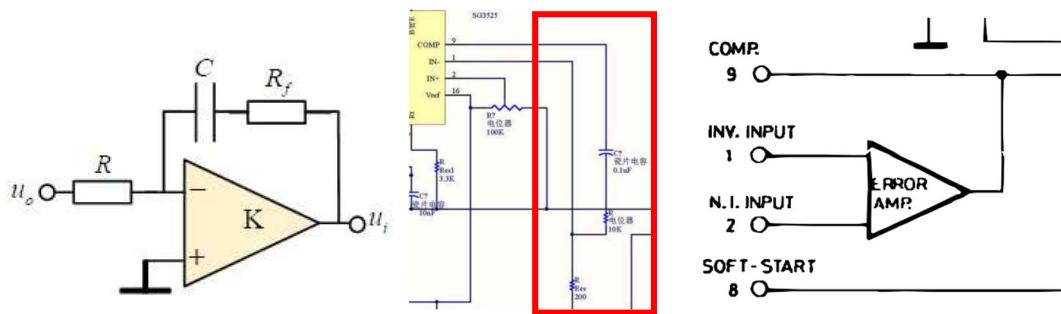


图 18 PI 环节电路图

$$\text{其传递函数为 } G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) = \frac{R_f C}{R} \left(1 + \frac{1}{R_f C^2 s}\right)$$

$$\text{代入实际电路参数 } G(s) = \frac{10k \times 0.1\mu}{200} \left(1 + \frac{1}{10k \times (0.1\mu)^2 s}\right)$$

$$\text{其中, } K_p = 5 \times 10^{-6}, K_i = \frac{K_p}{T_i} = 5 \times 10^4$$

与前面所述闭环 PI 参数有所区别原因是，Simulink 仿真中 PID 输出参数直接用于控制 PWM 波占空比，而在 SG3525 中 PID 输出为与锯齿波比较的直线电压，但两者都是 Kp 较小、Ki 较大，符合前述分析的规律。

## (五) 感想与体会

在电力电子领域中，BOOST 变换器作为一种常用的电源调节装置，其重要性不言而喻。而 PWM 控制技术作为现代电力电子的核心控制方法，对于提高电源的稳定性和效率具有关键作用。

在学习过程中，我首先对 PWM 控制和 BOOST 变换器的基本原理进行了深

深入了解。PWM，即脉宽调制，通过调节脉冲宽度实现对电能的精确控制。而 BOOST 变换器则是通过改变开关管的占空比，实现对输出电压的调节。随着学习的深入，我逐渐认识到这两者结合的必要性和优势。

在实验环节，我亲手搭建了基于 PWM 控制的 BOOST 电路，并对其进行了详细的测试。实验过程中，我遇到了许多预料之外的问题，如电路稳定性问题、PWM 控制的精确度问题、闭环 PID 调节问题等。但正是这些挑战，让我更深入地理解了理论与实践之间的差距，例如 BOOST 的升压范围、负载对电路的影响。

在课程报告的准备过程中，我对所学的知识进行了全面的梳理，为了完善报告，我查阅了大量的文献资料，与同学进行了讨论交流。在这个过程中，我不仅提高了自己的学术能力，更培养了团队协作和沟通能力。

回顾整个过程，我收获颇丰，不仅对 PWM 控制和 BOOST 电路有更深的理解，更在实际操作中锻炼了自己的综合能力。我明白了理论与实践的结合是学习的关键，只有将理论知识应用到实际中，才能真正掌握一门技术。同时，我也认识到了持续学习的重要性，电力电子技术日新月异，只有不断学习、不断进步，才能跟上时代的步伐。

## 参考文献

- [1] 王兆安,刘进军.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社,2009(5).
- [2] 李桂丹, 高晗璎, 张春喜. 基于 SG3525 的 DC/DC 直流变换器的研究[J]. 电源技术应用, 2009, 12(1): 11-14.
- [3] Kumar C P, Mahesh M. Development of interleaved boost dc-dc converter with closed loop control[C]//2016 IEEE Annual India Conference (INDICON). IEEE, 2016: 1-5.
- [4] 李勇, 张代润, 白平, 等. SG3524 与 SG3525 的功能特点及软起动功能的比较[J]. 电源技术应用, 2005, 8(2): 45-47.
- [5] Hasaneen BM, Mohammed AA E. DC/DC 升压转换器的设计与仿真[C]//2008 第 12 届国际中东电力系统会议。IEEE, 2008: 335-340.
- [6] 陈杰, 张进峰. 基于 Boost 结构的开关电源设计[J]. 苏州市职业大学学报, 2008, 19(3): 23-25.