

# 湖南工业大学

## 课程设计资料

学年学期：2023-2024-2

课程名称：功率半导体器件应用课程设计

题 目：DC-DC 变换电路的研究与设计

起止日期：2024 年 06 月 24 日 ~ 2024 年 06 月 28 日

学 院：轨道交通学院

班 级：电子技术 2101

学生姓名：彭 鹏

学 号：21419000326

指导教师：李军军

### 目 录 清 单

序号	材 料 名 称	资料数量	备 注
1	可行性报告	1	
2	课程设计任务书	1	
3	答辩 PPT	1	
4			

# 课程设计（实训）任务书

学 院： 轨道交通学院 学生姓名： 彭 鹏 专业班级： 电子技术 2101  
课程名称： 功率半导体器件应用课程设计 设计题目： DC-DC 变换电路的研究与设计  
完成期限： 自 2024 年 6 月 24 日至 2024 年 6 月 28 日 共 1 周

## 内容及任务

### 一、设计任务

设计一个 DC-DC 电源，具体参数如下：直流输入输入 30V，输出直流电压 20V，纹波系数<5%，功率约 50W，开关频率 10kHz，占空比可调。

### 二、设计的主要技术参数

1. 对 DC-DC 电源主电路拓扑进行分析与设计；
2. PWM 控制方案设计、原理分析；
3. 给出具体 L、C、R 参数计算原理及过程；
4. 设计合理的实验方案及步骤；
5. 开、闭环时参数的影响，如电感、电容、电阻的值，PI 调节器参数、开关频率观测输出波形的变化，分析仿真实验结果，验证设计方案的可行性，得出明确的结论，思考如何根据控制的动态指标优化 PI 控制器参数；
6. 熟悉 PWM 控制 IC TL494 芯片特性及应用，电路的搭建、焊接、调试；
7. 数据的测量、观察与分析，根据观测数据进行分析、评估，得出明确的结论；模型的优化与改善；
8. 结合课程达成目标，提交可行性分析报告、课程设计报告、答辩 PPT；

三、可行性报告中除有上述设计要求的 1-4 点外，必须包括以下内容，必须有专门的论述，单独评价考核（可行性报告需单独认真完成、不得抄袭，否则该考核部分计为 0 分）

目标 1：在设计/开发电子科学与技术复杂工程问题解决方案过程中，能考虑社会、健康、安全、法律、文化及环境等因素。

目标 2：能够综合运用学科原理，针对电子科学与技术领域的复杂工程问题进行研究和探讨，选择研究路线，设计实验方案。

目标 4：能够及时更新知识体系，有效地选择和获取新知识，具有自主学习的能力，适应电子科学与技术领域的发展和进步。

三、课程设计报告包括设计要求的 5-7 点，还需要有明确、有效的结论，还须包括目标 1、3 目标 4 的论述（单独考核计分）

目标 3：能够在工程实践活动中，具有团队构建、执行、协调和负责的能力，能够承担个体、团队成员以及负责人的角色。

进 度 安 排	起止日期		工作内容	
	6月24日—6月25日		仿真验证与答辩	
	6月26日		实物焊接与调试	
	6月27日		实物焊接与调试	
	6月28日		答辩	
主 要 参 考 资 料	[1] 南余荣, 电力电子技术, 电子工业出版社, 2021			
同 组 信 息	学号	姓名	分工负责的内容	备注
	21419000326	彭鹏	仿真验证, 焊接调试	组长

指导教师（签字）：\_\_\_\_\_

年 月 日

系（教研室）主任（签字）：\_\_\_\_\_

年 月 日



课程设计报告

学年学期：2023-2024-2

课程名称：功率半导体器件应用课程设计

题目：DC-DC 变换电路的研究与设计

起止日期：2024 年 06 月 24 日 ~ 2024 年 06 月 28 日

学院：轨道交通学院

班级：电子技术 2101

学生姓名：彭 鹏

学 号：21419000326

成绩评定：

课程目标	成绩	评定人签名
目标 1		
目标 2		
目标 3		
目标 4		
目标 5		

2024 年 06 月

# 目 录

1	设计任务 .....	1
1.1	目的及意义.....	1
1.2	设计的主要任务.....	1
2	建模与仿真 .....	2
2.1	开环控制.....	2
2.1.1	开环控制系统建模.....	2
2.1.2	开环系统模型仿真.....	2
2.2	单电压闭环控制.....	3
2.2.1	闭环控制系统建模.....	3
2.2.2	闭环控制系统仿真.....	4
2.3	双电压电流闭环控制.....	4
2.3.1	双电压电流闭环控制系统建模.....	4
2.3.2	双电压电流闭环控制系统仿真.....	5
2.4	两种控制的比较分析.....	6
2.4.1	动态响应比较.....	6
2.4.2	静态误差比较.....	6
3	电路的焊接与调试 .....	8
3.1	PWM 信号板的焊接及测试 .....	8
3.1.1	PWM 信号板的焊接 .....	8
3.1.2	PWM 信号板的测试 .....	9
3.2	主电路板的焊接与测试.....	10
3.2.1	主电路板的焊接.....	10
3.2.2	主电路板的测试.....	10
3.3	主电路板与 PWM 信号板的联调 .....	11
3.3.1	系统联调测试.....	11
3.3.2	系统问题分析.....	12
3.3.3	系统问题解决.....	13
4	项目数据、参数的测试及分析 .....	15
4.1	改变电路参数的仿真.....	15
4.1.1	电感 L 参数对电路的影响 .....	15
4.1.2	电容 C 参数对电路的影响 .....	15

4.1.3	电阻 R 参数对电路的影响 .....	16
4.1.4	开关频率 f 对电路的影响 .....	16
4.2	改变 PI 控制器参数的仿真 .....	17
4.2.1	比例 P 对控制指标的影响 .....	17
4.2.2	积分 I 对控制指标的影响 .....	20
4.3	结论.....	23
5	项目实施过程中个人角色或团队协作说明 .....	24
6	项目影响评价报告.....	25
7	项目实施中新知识的、新技术的应用 .....	26
7.1	TL494 芯片的应用 .....	26
7.2	PI 控制的应用 .....	27
8	总结 .....	28
	参考文献.....	29

# 1 设计任务

## 1.1 目的及意义

(1) 通过对 Buck 变换器电路的设计, 学生可以深入理解降压电路的基本工作原理, 从而提高对电力电子技术的应用能力。

(2) 课程设计不仅要求学生运用所学的电力电子技术理论知识, 还要求在实际操作中进行系统建模和仿真, 掌握使用 Matlab/Simulink 等工具分析系统的基本方法, 从而提升科学理论知识和工程实践能力。

(3) 课程设计要求学生从总体设计方案到具体参数计算, 再到主电路和控制电路的设计, 全面培养学生的综合设计能力和解决问题的能力。

(4) 通过设计 Buck 变换器, 学生可以将课堂上学到的理论知识与实际应用相结合, 进一步巩固和深化对相关知识点的理解。

(5) Buck 变换器在开关电源中的应用非常广泛, 了解其原理、工作方式和应用场景对于合理设计和使用 Buck 电路具有重要意义。

(6) Buck 变换电路课程设计不仅有助于学生掌握电力电子技术的基础知识和技能, 还能提升工程实践能力和综合素质, 为未来的职业发展打下坚实的基础。

## 1.2 设计的主要任务

### (1) 设计任务

设计一个 DC-DC 电源, 具体参数如下: 直流输入输入 30V, 输出直流电压 20V, 负载电压纹波系数 $<5\%$ , 电感电流纹波 20~40% (并要求电流连续), 功率约 50W, 开关频率 10kHz, 占空比可调。

### (2) 基本要求

1. 对 DC-DC 电源主电路进行设计;
2. PWM 控制方案设计;
3. 给出具体 L、C、R 参数计算;
4. 设计实验方案, 进行系统仿真, 分析仿真实验结果, 验证设计方案的可行性;
5. 仿真时修改参数, 如电感、电容、电阻的值, PI 调节器参数、开关频率观测输出波形的变化;
6. 熟悉 PWM 控制 IC TL494 芯片特性及应用, 电路的搭建、焊接、调试;
7. 数据的测量、观察与分析;
8. 结合课程达成目标, 提交可行性分析报告、课程设计报告;

## 2 建模与仿真

### 2.1 开环控制

#### 2.1.1 开环控制系统建模

按照 Buck 电路原理图，搭建一套开环仿真系统模型如图 2.1 所示。

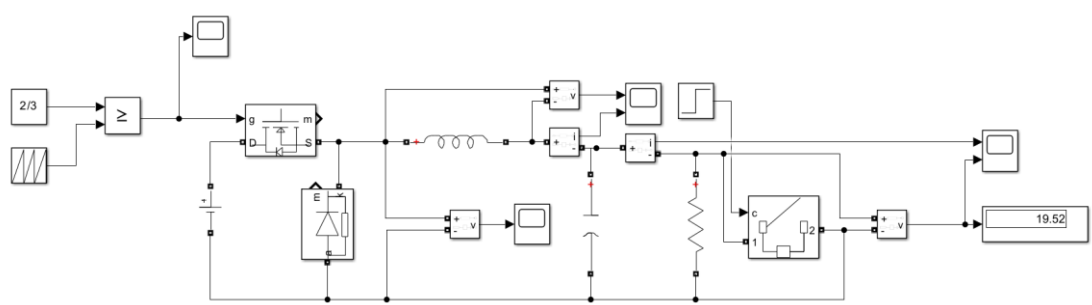


图 2.1 Buck 开环控制仿真模型

该仿真模型主要包括 Buck 主电路、PWM 波发生模块、断路器模块、数值显示模块、电压电流测量模块和示波器等调试模块。该系统电路的参数为输入电压  $U_i = 30V$ ，输出电压  $U_o = 20V$ ，负载电流  $I = 2.5A$ ，电感  $L = 150\mu H$ ，电容  $C = 100\mu F$ ，开关频率  $10kHz$ ，占空比为 66.7%。PWM 发生模块由载波发生器，基准值和比较器模块组成，基准值与  $10kHz$  的三角载波比较，基准值大于等于载波时输出高电平，小于载波时输出低电平，输出信号到 MOS 管栅极控制导通和关断，高电平时导通，低电平时关断。

#### 2.1.2 开环系统模型仿真

##### (1) 输出电压电流波形

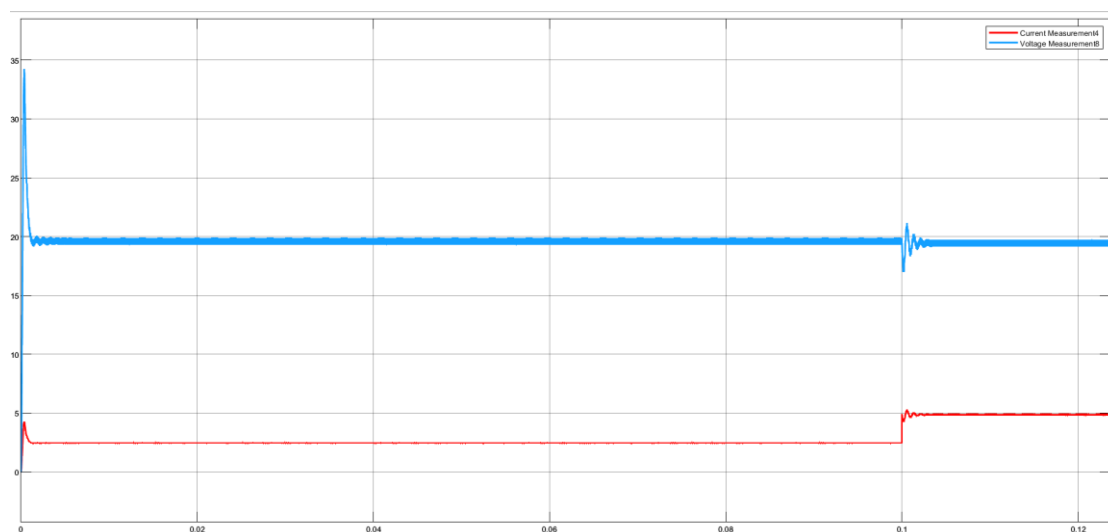


图 2.2 Buck 开环仿真输出电压电流波形



在搭建好系统模型之后运行仿真，得到如图 2.2 所示的输出电压电流波形。其中上方蓝色线条为输出电压波形，下方红色线条为输出电流波形。由仿真波形可以看出，在开环控制下，输出的电压电流波形纹波较大。并且在 0.1s 时改变负载电阻大小，系统在外界的干扰作用下变得不稳定，且恢复时间较长，并且恢复之后存在静态误差，输出电压较变化之前有所降低。

由仿真结果可知，开环控制的系统稳定性较差，优点是结构简单，系统搭建容易。但是由于其稳定性差，抗干扰能力弱，因此在实际应用当中一般不采取开环控制。

### (2) 电感上电压电流波形

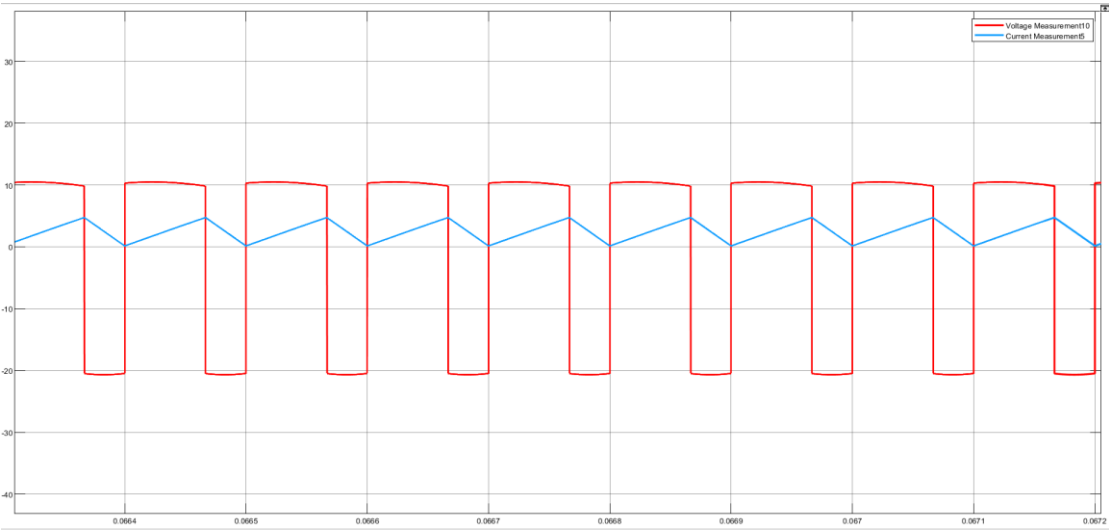


图 2.3 Buck 开环控制下的电感电压电流波形

如图 2.3 所示为仿真后的电感上的电压和电流波形。蓝色锯齿波为电感电流波形，红色矩形波为电感电压波形。由仿真波形可知，Buck 工作在 CCM 模式下，即电感电流连续，并且仿真波形和理论分析结果一致，因此仿真模型搭建成功。

## 2.2 单电压闭环控制

### 2.2.1 闭环控制系统建模

搭建的电压闭环仿真系统如图 2.4 所示。

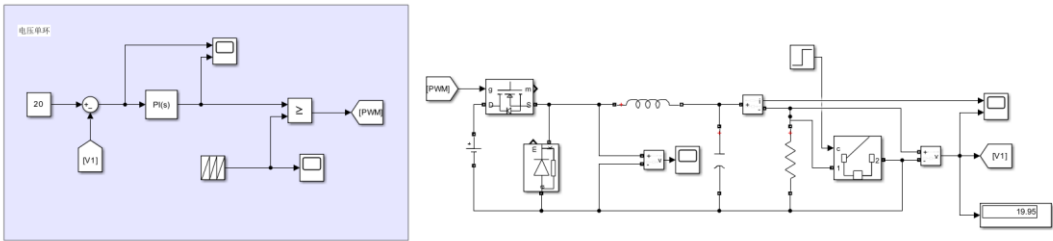


图 2.4 Buck 电压闭环控制仿真模型

如图 2.4 所示为 Buck 电压闭环控制的仿真模型，左侧方框内的为电压闭环的控制算法，右侧为 Buck 电路的主电路。所有的电路参数与开环控制下的电路参数一致，与开环控制不同的是，电压闭环控制引入了电压反馈，并且加入了 PI 算法进行对误差进行运算，再将通过 PI 运算出来的结果与载波信号进行比较，从而生成一个占空比可根据负载电压变化而变化的 PWM 信号。

## 2.2.2 闭环控制系统仿真

电压闭环控制下的输出电压电流波形如图 2.5 所示。

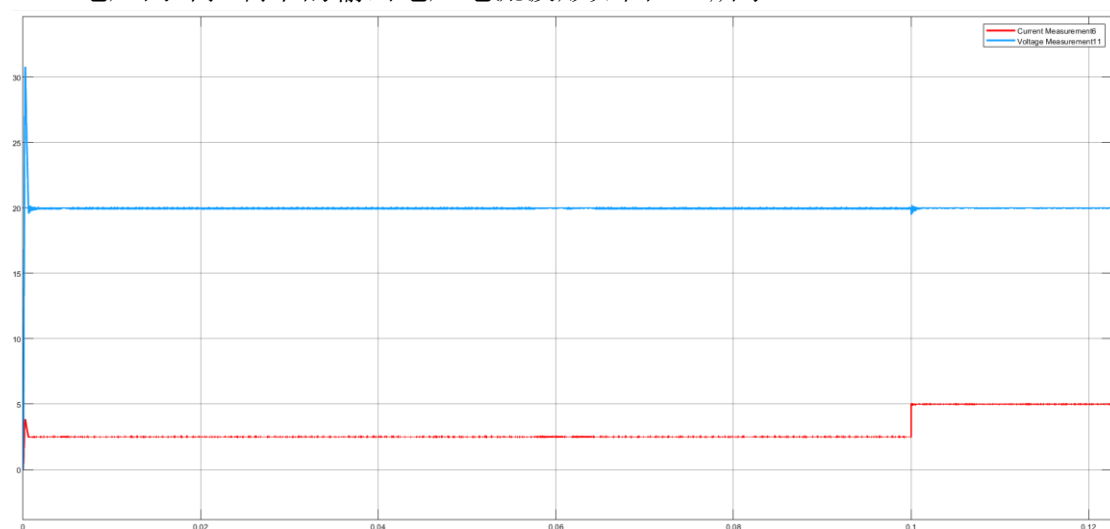


图 2.5 Buck 电压闭环控制输出电压电流波形

在该仿真结果图中，上方蓝色线条为电压闭环控制下的输出电压波形，下方红色线条为输出电流波形。由仿真结果可知，在电压闭环控制下，系统输出稳定的建立时间比开环控制下的系统要短，并且在 0.1S 改变负载大小引入外界干扰时，电压闭环控制下的系统能够对动态误差迅速做出反应，在短时间内便稳定输出，并且在恢复后的输出电压与变化前基本一致。

较开环控制而言，电压闭环控制由于引入了 PI 算法调节，在系统稳态建立的过程中容易出现超调的现象，因此我们需要合理的调节 PI 参数达到预期目标，这大大的增加了系统的复杂性。

## 2.3 双电压电流闭环控制

### 2.3.1 双电压电流闭环控制系统建模

搭建好的双电压电流闭环控制系统如图 2.6 所示。

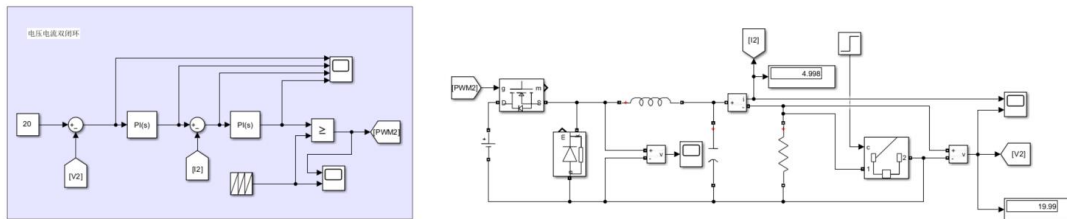


图 2.6 双电压电流闭环控制仿真模型

如图 2.6 所示为 Buck 双电压电流闭环控制系统的仿真模型，左侧方框内的为双电压电流闭环的控制算法，右侧为 Buck 电路的主电路，参数同样与开环控制系统的电路参数一致。与单电压闭环控制不同的是，该系统在电压闭环的基础上加了一个电流内环，同时对输出电流进行采样和闭环调节，能够提升系统的动态响应速度。

### 2.3.2 双电压电流闭环控制系统仿真

双电压电流闭环控制下的输出电压电流波形如图 2.7 所示。



图 2.7 Buck 双电压电流闭环控制系统输出电压电流波形

如图 2.7 所示为 Buck 双电压电流闭环控制系统仿真后的输出电压和电流波形。上方蓝色线条为输出电压波形，下方红色线条为输出电流波形。由仿真结果可知，在双闭环控制下，系统性能有了较大的提升。与电压单闭环控制一样，系统存在着超调现象，但系统的响应速度和稳态建立的效果明显更好，纹波的控制效果十分好。并且在引入外界干扰时，系统基本上不会有太大的变化，在稳定性上表现效果较好。

## 2.4 两种控制的比较分析

### 2.4.1 动态响应比较

#### (1) 系统刚运行时的稳态建立对比

分别对单电压闭环控制和双电压电流控制系统仿真，得到的动态响应现象如图 2.8 和图 2.9 所示。

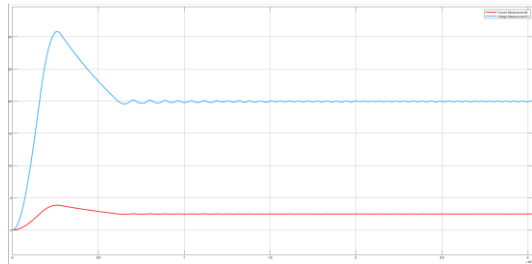


图 2.8 单电压闭环控制稳态建立时间

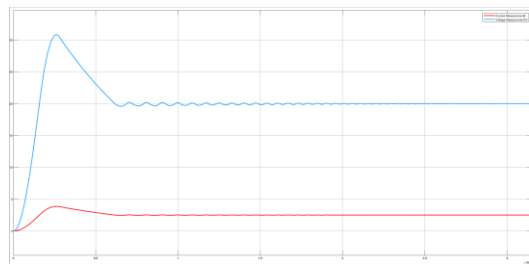


图 2.9 双电压电流闭环控制稳态建立时间

对两者的仿真波形进行对比，单电压闭环控制系统稳态的建立时间大概在  $0.6\text{ms}$  左右，而双电压电流闭环控制系统稳态的建立时间也在  $0.6\text{ms}$  左右。并且在系统稳态建立之前，都存在超调的现象。由仿真的结果可知，两者在系统稳态刚建立之前的动态响应效果差别不大。

#### (2) 引入外界干扰下的稳态恢复对比

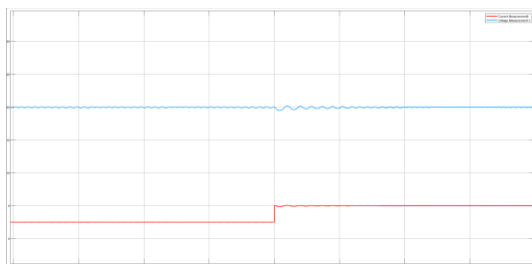


图 2.10 单电压闭环控制恢复稳定时间

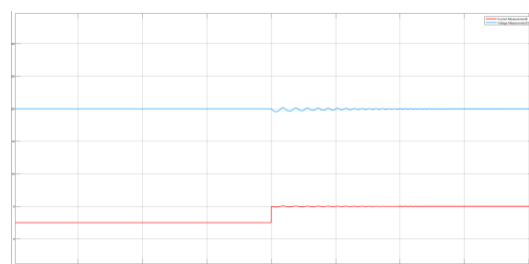


图 2.11 双电压电流闭环控制恢复稳定时间

在  $0.1\text{s}$  时同时改变两个系统的负载大小为原来的二分之一，单电压闭环和双电压电流闭环控制系统的变化趋势如图 2.10 和图 2.11 所示。从图中可以看出，两者的变化现象相差不大，但仔细对比可以看出，在受到外界干扰时，双电压电流闭环控制比单电压电流闭环控制的稳态恢复时间要短上一些，并且受到干扰时的电压电流波动也较单电压电流闭环控制系统要小一点。因此由仿真结果可知，采取双电压电流闭环控制的系统动态响应的效果要更优。

### 2.4.2 静态误差比较

#### (1) 系统刚建立稳态时的静态误差对比

分别对单电压闭环控制和双电压电流控制系统仿真，得到的静态误差现象如图 2.12 和图 2.13 所示。

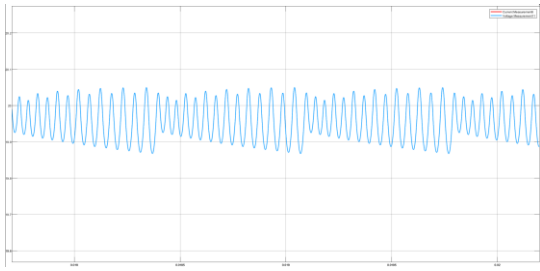


图 2.12 单电压闭环控制的静态误差

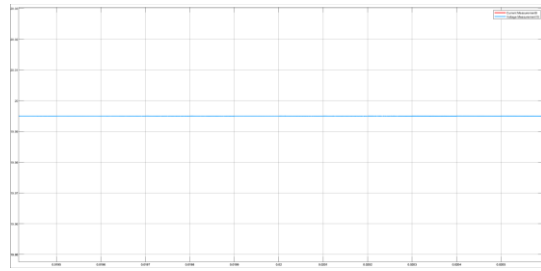


图 2.13 双电压电流闭环控制的静态误差

对两者的仿真波形图进行对比，系统的稳态刚建立时，将两者的输出电压波形放大后如图 2.12 和图 2.13 所示。从两者的波形图中我们可以看出，单电压闭环控制的系统输出电压纹波较双电压电流闭环控制系统要大，并且存在较大的静态误差。而反观双电压电流闭环控制系统的输出电压波形没有太大的变化，几乎为一条直线，并且精度较前者要高上许多。

### (2) 引入外界干扰后的静态误差对比

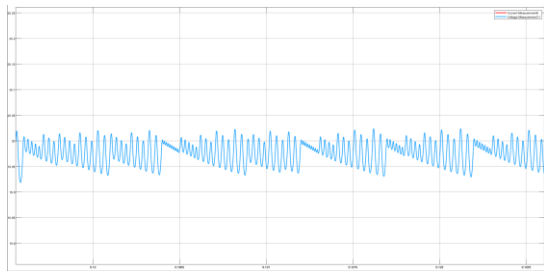


图 2.14 单电压闭环控制的静态误差

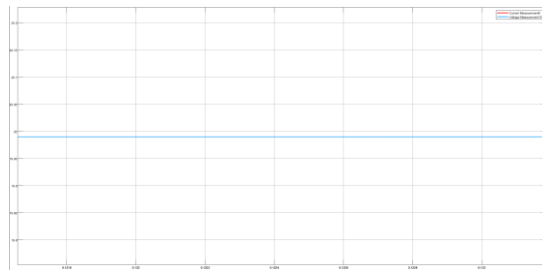


图 2.15 双电压电流闭环控制的静态误差

如图 2.14 和 2.15 所示分别为引入外界干扰后的单电压闭环控制系统和双电压电流闭环控制系统的静态误差波形图。从两者的波形图中可以看出，两者的静态误差控制的都比较好，但双电压电流闭环控制的效果依然较单电闭环控制要好，可以看出前后基本不变。

由此我们可以得出，在相同的电路参数情况下，双电压电流闭环控制的控制效果要比单电压闭环控制要好。但其同样存在着算法结构复杂，PI 参数更难调节以及实现成本高的缺陷。因此在实际的应用当中，我们要根据实际情况合理的选择控制方式。





### 3.1.2 PWM 信号板的测试

#### (1) 供电电压的测试

确认焊接电路无误后，对 PWM 信号板通电，应测得 TL494 芯片的 12 供电引脚为 15V 电压，芯片的 14 引脚为芯片的内部参考电压引脚，测得的电压应为 5V。

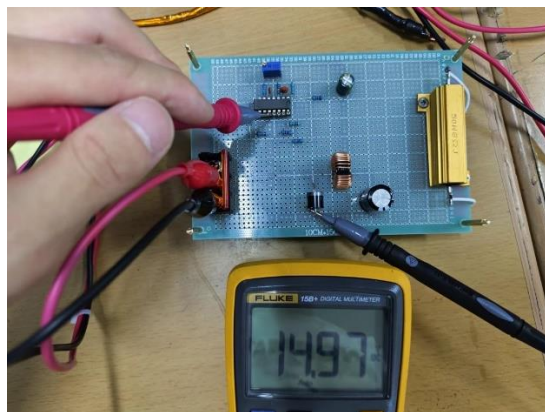


图 3.3 TL494 供电电压的测试

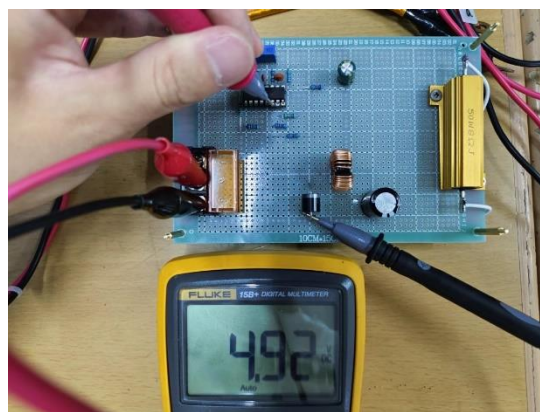


图 3.4 TL494 参考电压的测试

如图 3.3 和图 3.4 所示分别为 TL494 芯片的 12 引脚供电电压和 14 引脚参考电压的测量结果，由测量结果可知，芯片引脚电压在误差范围内，芯片供电正常。

#### (2) 输出波形的测试

对 PWM 信号板进行波形测量，理论情况下，根据所给参数，TL494 芯片 5 和 6 引脚所接阻容元件振荡产生的锯齿波的频率为 10KHz。由于在本次实验中 TL494 芯片使用的使并行模式输出，并且芯片的死区控制端具有 110mV 的内部失调电压可确保在死区时间控制输入端接地时的最小死区时间约为 3%。

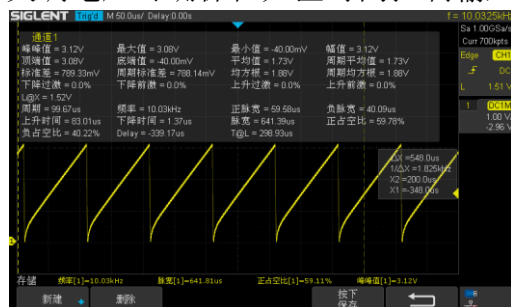


图 3.5 振荡产生的锯齿波



图 3.6 不外加死区时间的输出 PWM 波形

TL494 输出波形的测量如图 3.5 和图 3.6 所示，由测量结果可知，锯齿波的频率为 10.03KHz，PWM 波的占空比为 96%，在误差允许范围内。

## 3.2 主电路板的焊接与测试

### 3.2.1 主电路板的焊接

将剩下的 Buck 主电路焊接到洞洞板上，并与控制部分连接起来。焊接好的主电路板的正面如图 3.7 所示，背面如图 3.8 所示。

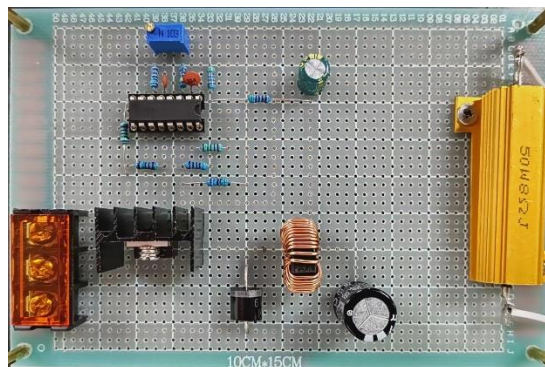


图 3.7 Buck 主电路与控制电路

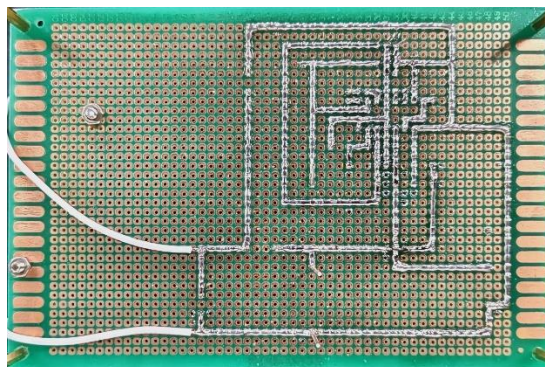


图 3.8 焊接背面图

如图所示，该电路板由上半部分的 PWM 发生模块和下半部分的 Buck 主电路模块组成，器件全部放置在洞洞板正面，并合理布局，使器件摆放美观可靠。同时将控制部分和主电路部分分开布局，减少主电路对控制电路的干扰。背面走线全部使用锡走线，减少飞线使用，提高系统和信号稳定性。

### 3.2.2 主电路板的测试

对电路板进行供电，给主电路提供 15V 的电压，测试 Buck 输出电压如图 3.9 所示。

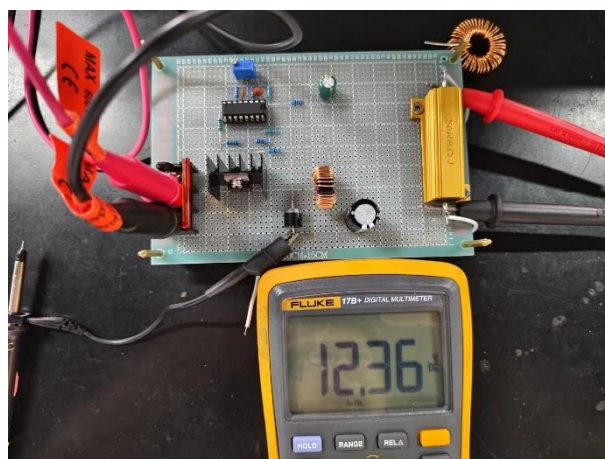


图 3.9 主电路板的测试

如图 3.9 所示为 Buck 输出的电压值，由于死区控制端 4 引脚在电路中接地，因此输出 PWM 占空比的大小应为 96%，由于电路系统中存在系统损耗，因此测量得到的输出电压有一定的误差，结果为 12.36V。



### 3.3 主电路板与 PWM 信号板的联调

#### 3.3.1 系统联调测试

将 TL494 芯片的 4 引脚接地断开，接入一个 10K 电位器，电位器中点接引脚 4，一端接引脚 14，另一端接地，调节电位器，可以观察到 PWM 波形的占空比发生变化。如图 3.10、图 3.11 和图 3.12 所示。

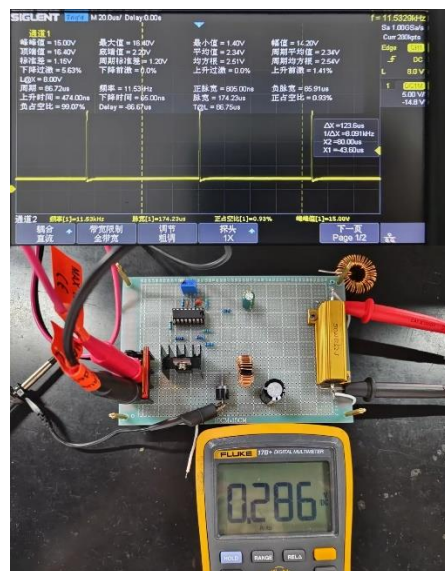


图 3.10 占空比为 0.93%时的输出电压

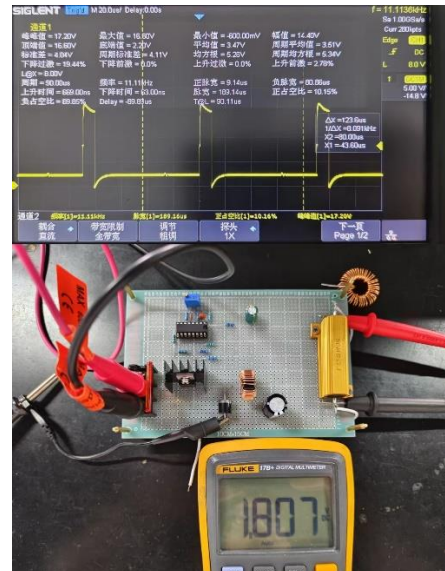


图 3.11 占空比为 10.35%时的输出电压

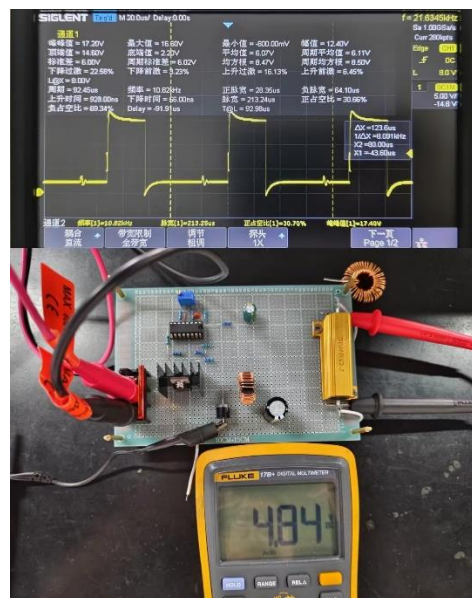


图 3.12 占空比为 30.66%时的输出电压

如图所示分别为占空比为 1%、10%和 30%左右时的输出电压测试结果，由实际测量结果发现，通过调节电位器的大小，输出 PWM 波的占空比只能从 0 增加到 30%左右，然后立刻变为高电平。而输出的电压从 0 增加到 5V 左右变立刻变为 12V。

### 3.3.2 系统问题分析

#### (1) 实验现象分析

在实验过程初期,由于缺少对电路原理的理解,我便从实验现象去分析问题。将电位器从电路中断开,然后通过直流电压源直接给 4 引脚进行供电提供一个参考电压,改变芯片内部的死区电压。通过测试发现,改变外置电压源的大小与调节电位器的实验现象一致。因此在此认为本次实验过程中使用的芯片性能存在缺陷,芯片内部死区调节比较器存在问题。

后通过仔细分析,由于 PWM 发生电路在单独运行时可正常调节占空比,接入主电路后便不可以,因此否定了芯片性能存在缺陷的猜想。

#### (2) 实验原理分析

TL494 芯片内部原理图如图 3.13 所示。

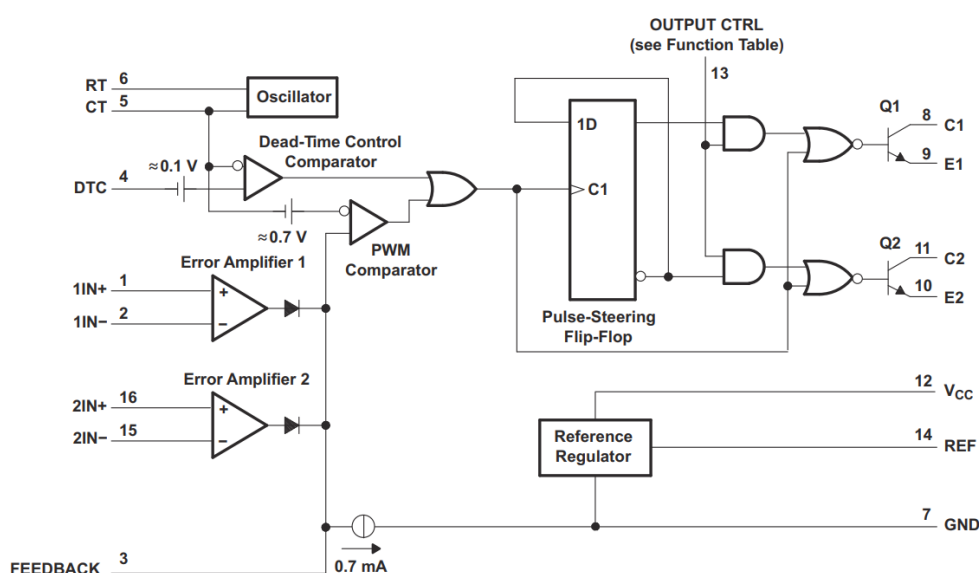


图 3.13 TL494 功能方框图

由该原理图可知, TL494 的输出脉冲的调制方法是将计时电容器 (CT) 上的内部振荡器产生的锯齿波形与两个控制信号中的任一个信号进行比较。其产生 PWM 波形有两种途径。一种是通过芯片 4 引脚的死区参考电压与锯齿波进行比较,通过调节死区来达到调节占空比的目的。另外一种是通过两个误差放大器进行或运算的结果与锯齿波进行比较产生 PWM 波形。

根据 TI 官方给的数据手册, 110mV 的内部失调电压可确保在死区时间控制输入端接地时的最小死区时间约为 3%。向死区时间控制输入端施加电压会增加死区时间。因此, 当输入电压从 0V 变化到 3.3V 时, 可对死区时间 (分别对应最小值 3%到 100%) 进行线性控制。但是, 为了进行正确控制, 必须终止输入。输出的 PWM 波形是由内部比较器提供对输出脉宽的调制控制, 为此, 要将计时电容器 CT 上的斜坡电压与误差放大器输出端的控制信号进行比较。

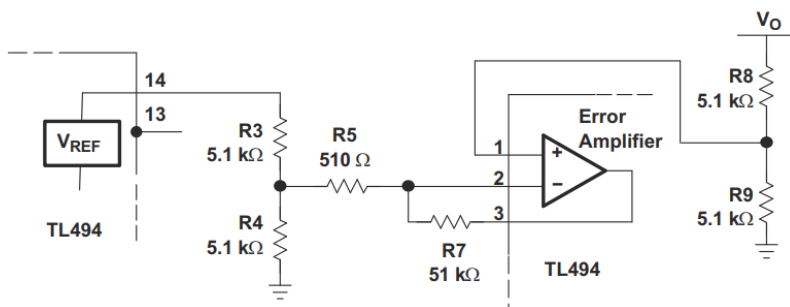


图 3.14 误差放大器部分电路图

如图 3.14 所示为误差放大器的部分电路图，TL494 内部 5V 基准电压由 R3 和 R4 分压为 2.5V。输出电压误差信号也由 R8 和 R9 分压为 2.5V。如果必须将输出电压精确调节到 5V，则可以使用 10kΩ 电位器代替 R8 进行调节。为了增加误差放大器电路的稳定性，误差放大器的输出通过 RT 反馈到反相输入端，从而将增益降低到 101。

通过对实验电路原理的分析，在调节电位器改变输出电压时，PWM 的占空比最大只能调节到 30%的原因是由于输出电压的增大，反馈回来的电压通过误差放大器后与锯齿波比较的结果占主导地位，与死区调节占空比相冲突，最终导致占空比在超出 30%以后便变化为 1。

### 3.3.3 系统问题解决

若要通过改变死区时间来调节占空比，则需将芯片 1 引脚所接的反馈电阻与输出断开，使反馈信号经误差放大器后不会与死区调节信号相冲突。因此在实验中我们将 1 引脚所接电阻下拉接地，再调节电位器，占空比可连续可调。实验现象如图 3.15~图 3.19 所示。

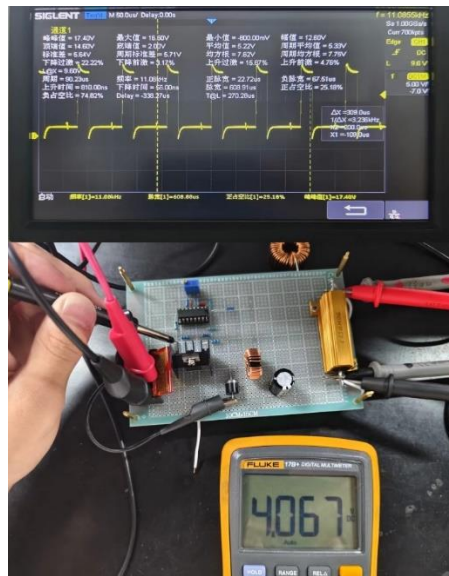
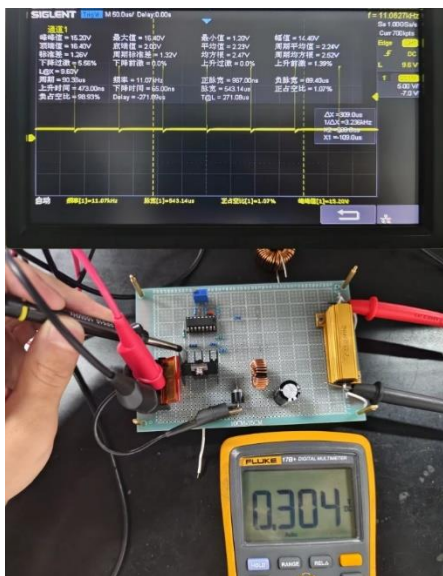


图 3.15 占空比为 1.07%时的输出电压 图 3.16 占空比为 25.18%时的输出电压



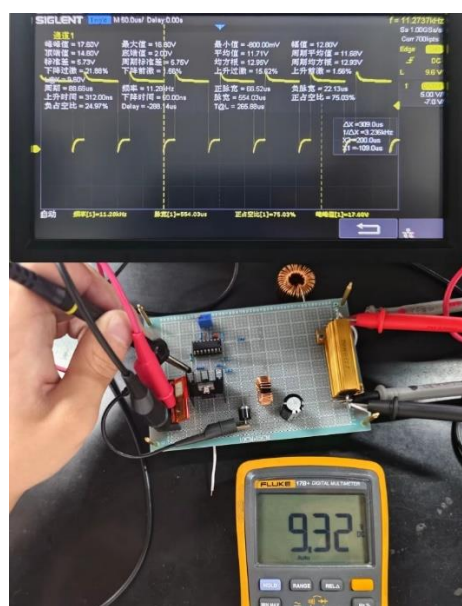
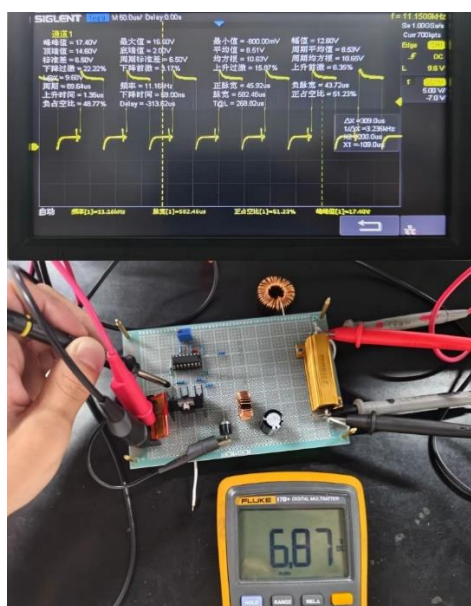


图 3.17 占空比为 51.23%时的输出电压 图 3.18 占空比为 75.03%时的输出电压

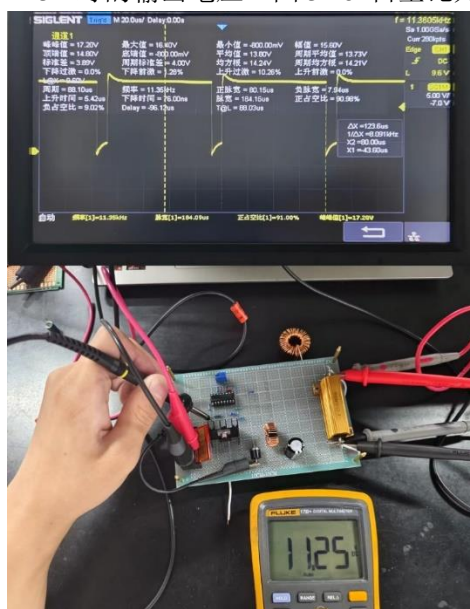


图 3.19 占空比为 90.96%时的输出电压

由实验现象显示，占空比可实现连续可调，实现输出电压的可调。因此本次实验问题成功解决，顺利完成本次课程设计任务。

## 4 项目数据、参数的测试及分析

### 4.1 改变电路参数的仿真

#### 4.1.1 电感 L 参数对电路的影响

当电路中的电感值为  $150\mu\text{H}$ ，电容容量为  $100\mu\text{F}$ ，电阻值为  $8\Omega$ ，开关频率为  $10\text{kHz}$  时，运行仿真，得到如图 4.1 的输出电感电流波形和图 4.2 的输出电容电压波形。

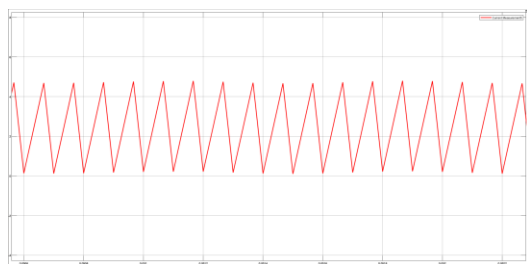


图 4.1 输出电感电流波形

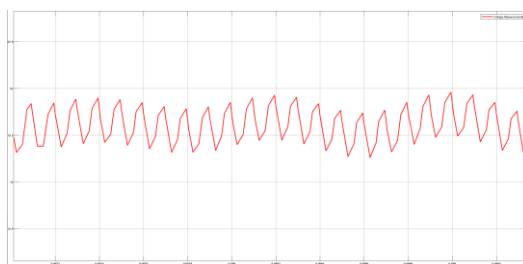


图 4.2 输出电容电压波形

从仿真波形可以得到，输出电感电流连续，且输出电感电流纹波的峰峰值大小为  $4.5\text{A}$  左右，输出电容电压的纹波峰峰值为  $0.6\text{V}$  左右。

不改变电路的其他参数，将电感值改为  $1500\mu\text{H}$  时，运行仿真，得到如图 4.3 的输出电感电流波形和图 4.4 的输出电容电压波形。

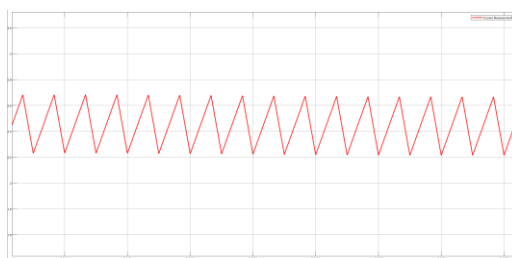


图 4.3 输出电感电流波形

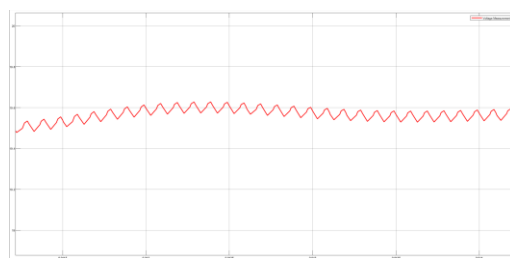


图 4.4 输出电容电压波形

从仿真波形可以看出，在电感值增大到  $1500\mu\text{H}$  时，输出电感电流的纹波峰峰值大小在  $0.5\text{A}$  左右，输出电容电压纹波峰峰值在  $0.1\text{V}$  左右。

从两者之间的仿真结果对比我们可以得知，电感值得增大使得输出电流和电压纹波显著降低，滤波效果更好。此外，增大电感还能使电路更加不容易处于电感电流断续模式。

#### 4.1.2 电容 C 参数对电路的影响

不改变电路的其他参数，将电容值由原来的  $100\mu\text{F}$  改变为  $470\mu\text{F}$ ，运行仿真，得到如图 4.5 的输出电感电流波形和图 4.6 的输出电容电压波形。

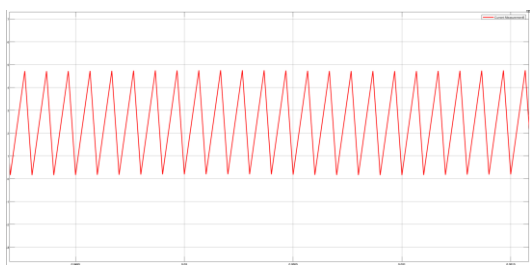


图 4.5 输出电感电流波形

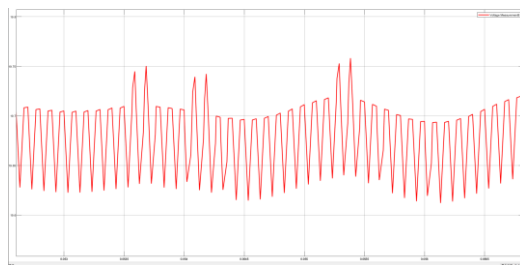


图 4.6 输出电容电压波形

从仿真波形中可以看出，在增大电容容值的情况下，电感电流的纹波没有太大的变化，但输出电容电压纹波显著降低，纹波峰峰值在 0.1V 左右。

通过对比我们可以发现，改变电容的容值对输出电流没有太大的影响，电感电流仍处于连续导通状态。输出的电压纹波显著降低，因此增大电容值可以提高滤波效果，稳定输出电压。

#### 4. 1. 3 电阻 R 参数对电路的影响

在不改变其他的参数情况下，将负载电阻大小由原来的 8 欧改为 4 欧，运行仿真，得到如图 4.7 的输出电感电流波形和图 4.8 的输出电容电压波形。

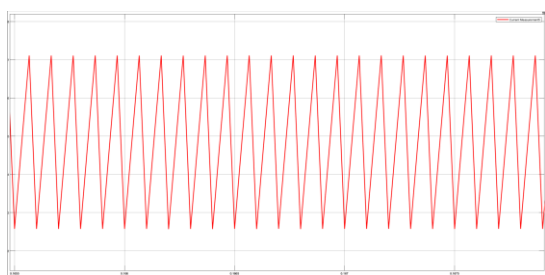


图 4.7 输出电感电流波形

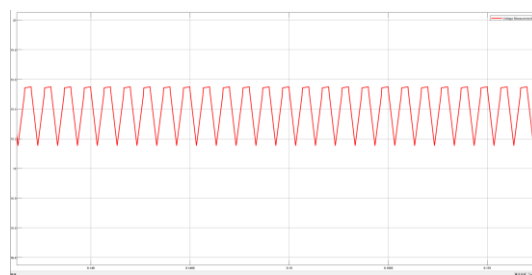


图 4.8 输出电容电压波形

从仿真波形中可以看出，由于负载大小为原来的二分之一，因此电流的大小变为原来的两倍，但输出电感电流波形没有变化。输出电容电压的纹波峰峰值大小为 0.4 左右，并且电压值较之前有所降低。

通过两者对比，改变负载电阻大小对输出电感电流无影响，却会使输出电容电压的纹波有所降低，同时输出电压的大小也会有所降低。

#### 4. 1. 4 开关频率 f 对电路的影响

在不改变其他的参数情况下，将开关频率由原来的 10kHz 改为 20kHz，运行仿真，得到如图 4.9 的输出电感电流波形和图 4.10 的输出电容电压波形。

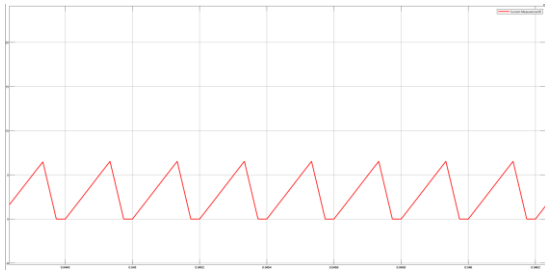


图 4.9 输出电感电流波形

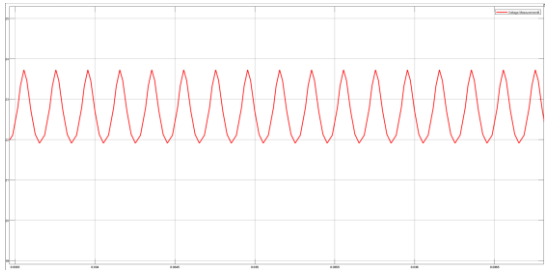


图 4.10 输出电容电压波形

从仿真波形中可以看出，将开关频率增大到原来的两倍之后，此时的电感电流出现断续的现象，并且输出电感电流纹波也有所增加。输出电容电压纹波的峰值大小为 1.8V 左右，并且输出电压值也有所增加。

通过两者对比，改变开关频率的大小会影响电感电流是否连续的条件，同时也会导致输出电流和电压的纹波改变。

## 4.2 改变 PI 控制器参数的仿真

### 4.2.1 比例 P 对控制指标的影响

#### (1) 动态影响

对电压单闭环控制系统的 PI 值进行调节，观察 PI 参数对系统指标的影响。

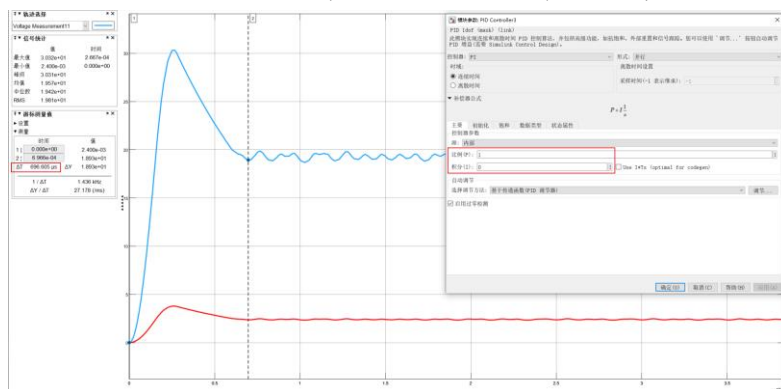


图 4.11 比例 P 为 1，积分 I 为 0 时系统建立稳态前的动态响应

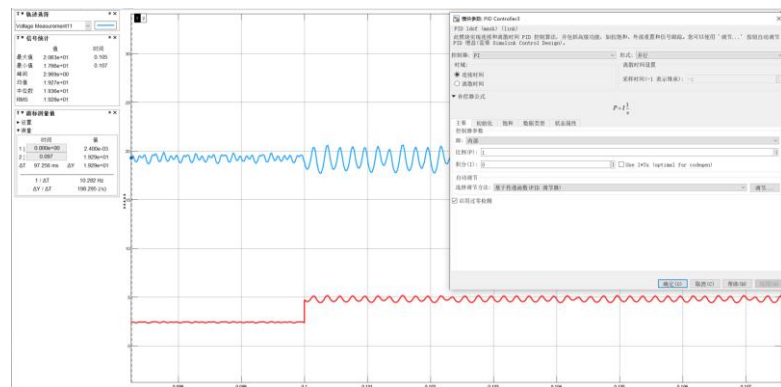


图 4.12 比例 P 为 1，积分 I 为 0 时系统受到外界干扰时的动态响应

在 PI 参数比例 P 为 1，积分 I 为 0 时，系统建立稳态前的动态响应和系统受到外界干扰时的动态响应如图 4.11 和图 4.12 所示。从仿真波形结果可以看出，在建立稳态前系统的响应时间大概需要 696us 左右才能够建立稳态，且在受到外界干扰时的系统动态响应调节能力可以忽略不计。

将比例 P 的值改为 50，且积分保持为 0 不变，运行仿真，得到的系统建立稳态前的动态响应和系统受到外界干扰时的动态响应如图 4.13 和图 4.14 所示。

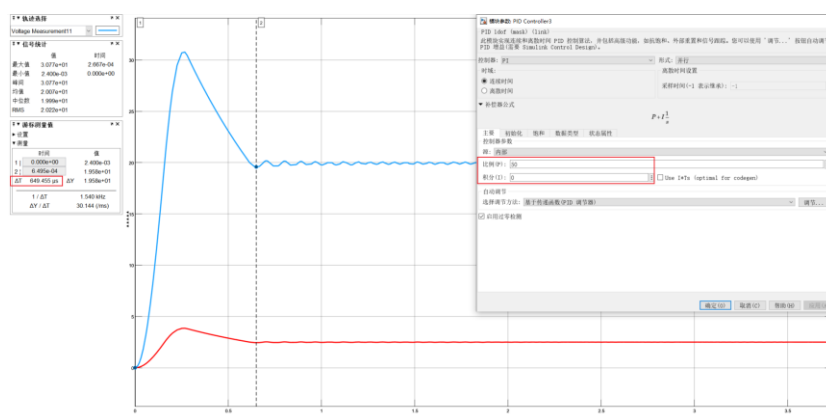


图 4.13 比例 P 为 50，积分 I 为 0 时系统建立稳态前的动态响应

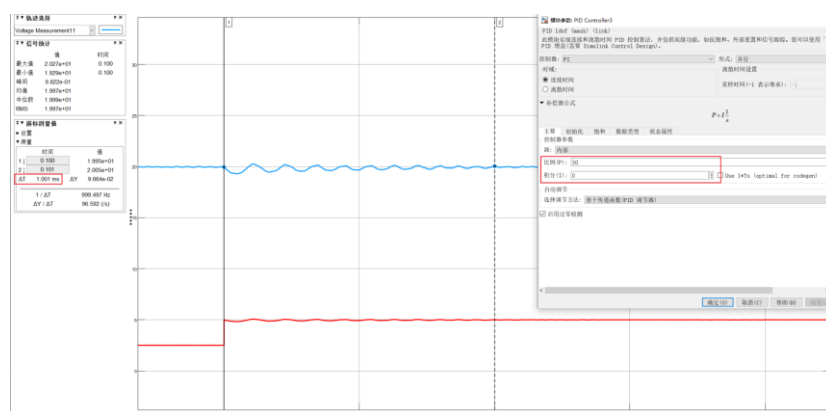


图 4.14 比例 P 为 50，积分 I 为 0 时系统受到外界干扰时的动态响应

从仿真波形结果可以看出，在建立稳态前系统的响应时间大概需要 650us 左右才能够建立稳态，且在受到外界干扰时的系统动态响应时间大概需要 1ms 左右便可恢复稳定。

通过对比可以发现，比例 P 值对系统的动态响应时间和外界看干扰能力有较大的影响，P 值越大，系统的动态响应时间越短，同时对外界的抗干扰能力越强。

## (2) 静态影响

在 PI 参数比例 P 为 1，积分 I 为 0 时，系统建立稳态后的静态误差和系统受到外界干扰后的静态误差如图 4.15 和图 4.16 所示。



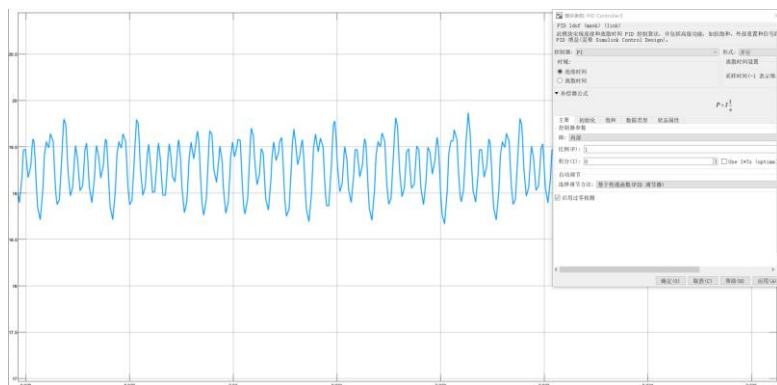


图 4.15 比例 P 为 1，积分 I 为 0 时系统建立稳态后的静态误差

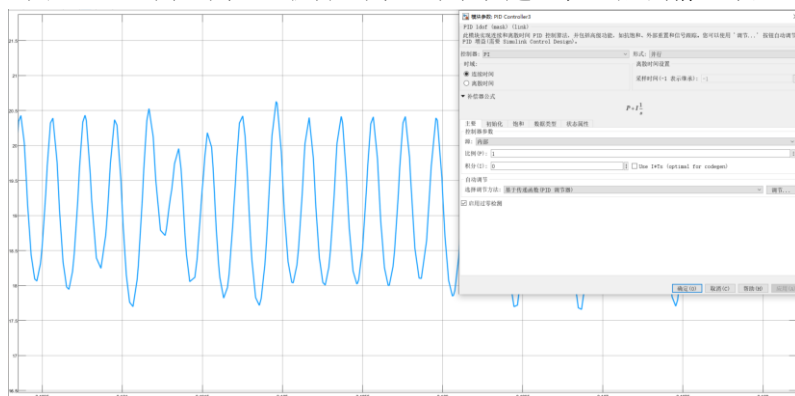


图 4.16 比例 P 为 1，积分 I 为 0 时系统受到外界干扰后的静态误差

从仿真波形结果可以看出，在比例 P 为 1 时，系统建立稳态后的输出电压纹波峰峰值大小为 0.8V 左右，系统受到外界干扰稳定后的输出电压纹波峰峰值大小为 2.5V 左右。

将比例 P 的值改为 50，且积分保持为 0 不变，运行仿真，得到的系统建立稳态后的静态误差和系统受到外界干扰后的静态误差如图 4.17 和图 4.18 所示。

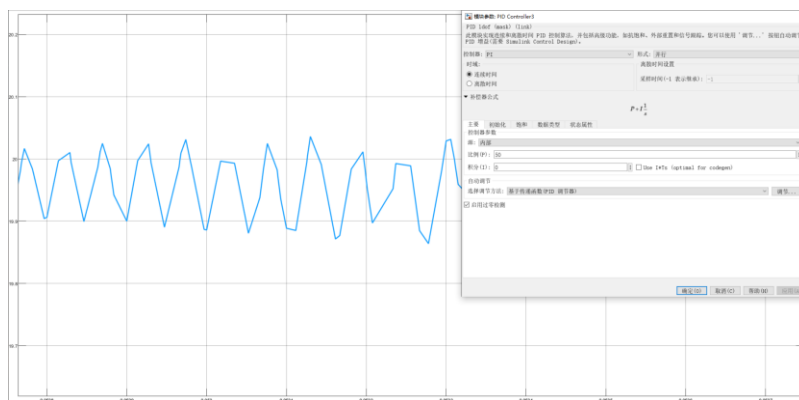


图 4.17 比例 P 为 50，积分 I 为 0 时系统建立稳态后的静态误差

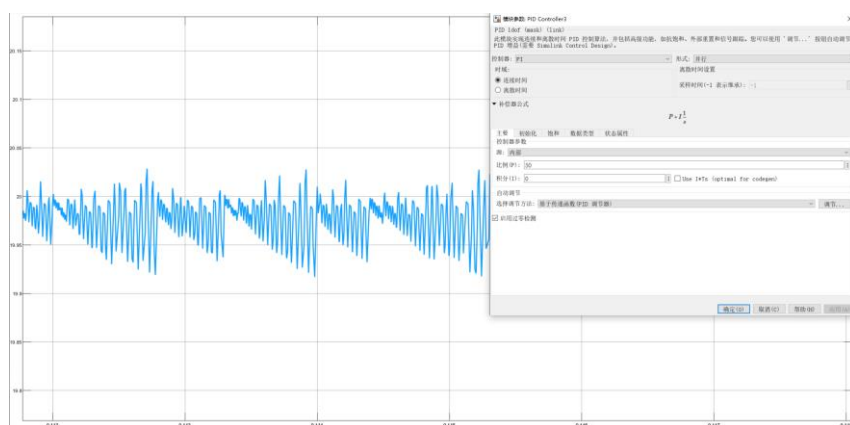


图 4.18 比例 P 为 50，积分 I 为 0 时系统受到外界干扰后的静态误差

从仿真波形结果可以看出，系统建立稳态后的输出电压纹波峰峰值大小为 0.15V 左右，系统受到外界干扰稳定后的输出电压纹波峰峰值大小为 0.1V 左右。

通过对比可以发现，比例 P 值对系统的静态误差也有着较好的调节能力，P 值越大，系统稳定后的静态误差越小。

## 4.2.2 积分 I 对控制指标的影响

### (1) 动态影响

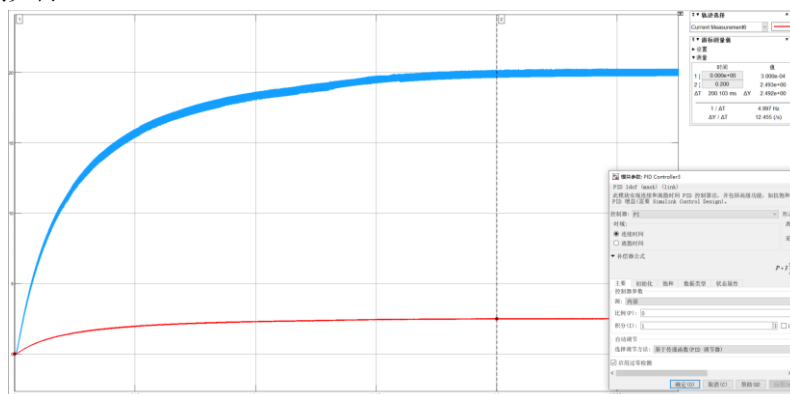


图 4.19 比例 P 为 0，积分 I 为 1 时系统建立稳态前的动态响应

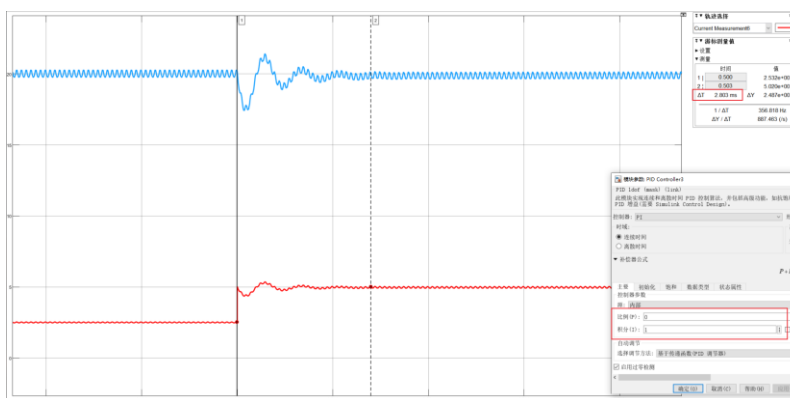


图 4.20 比例 P 为 0，积分 I 为 1 时系统受到外界干扰时的动态响应  
在 PI 参数比例 P 为 0，积分 I 为 1 时，系统建立稳态前的动态响应和系统受

到外界干扰时的动态响应如图 4.19 和图 4.20 所示。从仿真波形结果可以看出，在建立稳态前系统的响应时间大概需要 0.2S 左右才能够建立稳态，在受到外界干扰时的响应时间大概需要 2.8ms 左右才能够恢复。

将积分 I 的值改为 10，且比例保持为 0 不变，运行仿真，得到的系统建立稳态前的动态响应和系统受到外界干扰时的动态响应如图 4.21 和图 4.22 所示。

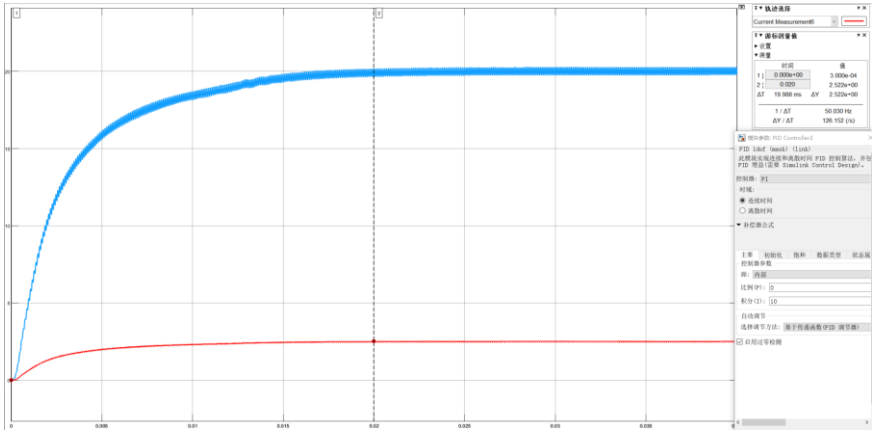


图 4.21 比例 P 为 0，积分 I 为 10 时系统建立稳态前的动态响应

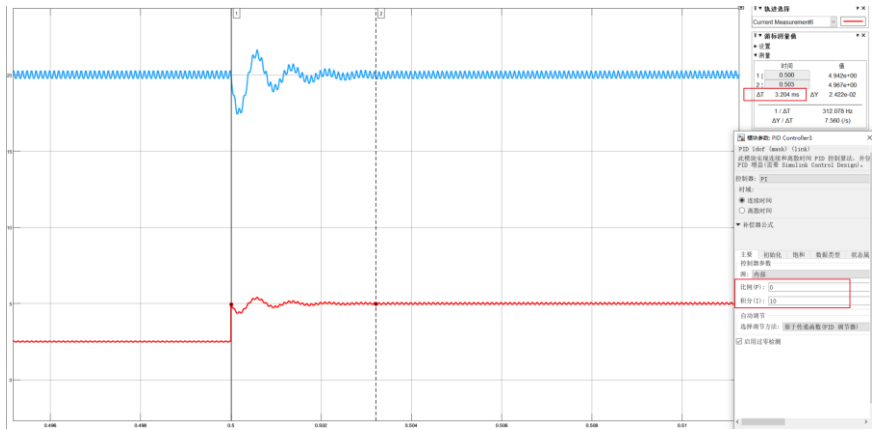


图 4.22 比例 P 为 0，积分 I 为 10 时系统受到外界干扰时的动态响应

从仿真波形结果可以看出，在建立稳态前系统的响应时间大概需要 20ms 左右才能够建立稳态，且在受到外界干扰时的系统动态响应时间大概需要 3.2ms 左右便可恢复稳定。

通过对比我们可以发现，积分环节对系统的动态响应也有一定的影响。在一定程度上，积分 I 值的增大也可以提升系统得动态响应速度。但同时积分作用也会使系统的动态响应变慢，在受到外界干扰影响时，恢复稳定的时间变长，因为积分环节需要一定的时间来累积误差并产生校正输出。

## (2) 静态影响

在 PI 参数比例 P 为 0，积分 I 为 1 时，系统建立稳态后的静态误差和系统受

到外界干扰后的静态误差如图 4.23 和图 4.24 所示。

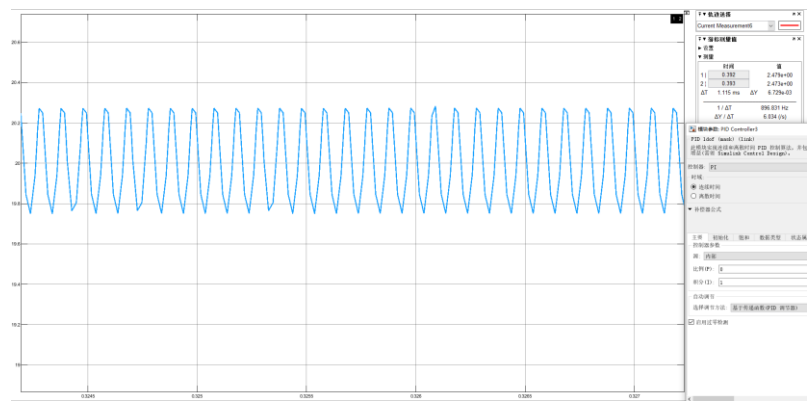


图 4.23 比例 P 为 0，积分 I 为 1 时系统建立稳态后的静态误差

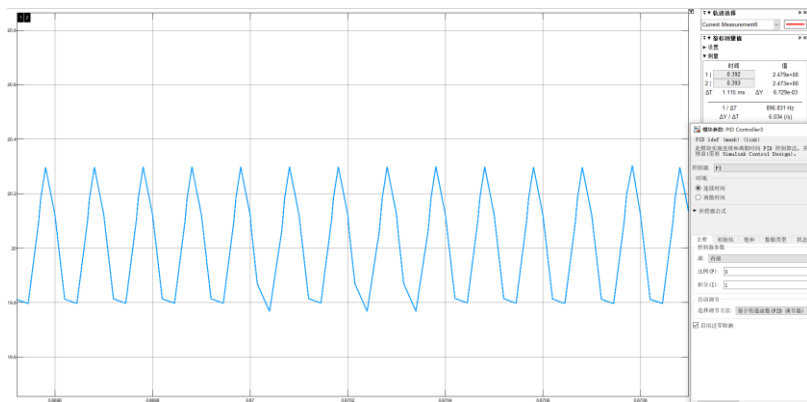


图 4.24 比例 P 为 0，积分 I 为 1 时系统受到外界干扰后的静态误差

从仿真波形结果可以看出，在积分 I 为 1 时，系统建立稳态后的输出电压纹波峰峰值大小为 0.8V 左右，系统受到外界干扰稳定后的输出电压纹波峰峰值大小为 0.6V 左右。

将积分 I 的值改为 10，且比例保持为 0 不变，运行仿真，得到的系统建立稳态后的静态误差和系统受到外界干扰后的静态误差如图 4.25 和图 4.26 所示。

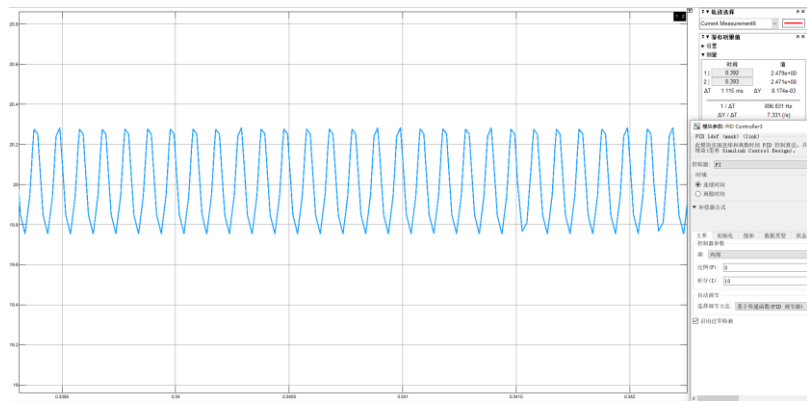


图 4.25 比例 P 为 0，积分 I 为 10 时系统建立稳态后的静态误差

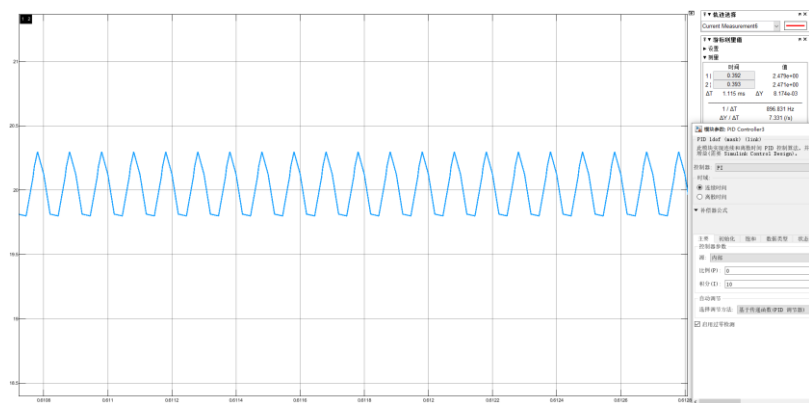


图 4.26 比例  $P$  为 0，积分  $I$  为 10 时系统受到外界干扰后的静态误差

从仿真波形结果可以看出，系统建立稳态后的输出电压纹波峰峰值大小为 0.5V 左右，系统受到外界干扰稳定后的输出电压纹波峰峰值大小为 0.4V 左右。

通过对比可以发现，积分  $I$  值对系统的静态误差有着较好的调节能力， $I$  值越大，系统稳定后的静态误差越小。

### 4.3 结论

本章节通过改变电路中器件的参数和  $PI$  算法的参数，并对其仿真输出波形进行比较，观察不同参数的变换对电路工作特性的影响。

通过改变电路中元件的参数，我们可以得知电感的变化会影响电路中的阻抗，进而影响输出电压的稳定性。在一定范围内，增加电感值可以提高输出电压的稳定性，减小输出电流的纹波大小；电容的主要作用是稳定输出电压，减小因电感电流脉动引起的电压波动。电容越大，对电压波动的抑制能力越强；负载电阻的变化会直接影响 **Buck** 电路的输出电压和电流。电阻越小，电路中通过的电流也就越大；较高的开关频率可以提高输出电压的稳定性，因为高频下电感元件的阻抗更小，对输出电压的影响也更小。同时较高的开关频率可以减小输出电流纹波，提高电路对负载变化的响应速度。

通过改变单电压闭环的  $PI$  参数，在不同的参数条件下进行对比，我们可以得知比例  $P$  值得大小能够影响电路的动态响应速度， $P$  值越大，系统的响应速度越快，能更快地达到目标值。比例  $P$  能够成比例地反应控制系统的偏差信号，一定程度上能够减小系统的误差，但无法完全消除静态误差。为了消除静态误差，通常需要引入积分  $I$  控制；积分  $I$  通过减小稳态误差和防止振荡来影响动态响应，但其对短期变化的响应较小。通过调整积分时间常数，可以平衡稳态误差和响应速度。同时积分  $I$  的主要作用是减小系统的稳态误差，确保系统最终能够达到期望值。它通过不断累积误差，产生一个与时间成正比的输出，这个输出用于校正系统，以逐渐消除误差。

## 5 项目实施过程中个人角色或团队协作说明

由于我很早前便已接触过电力电子，并且有过许多项目经历。因此在本项目实施过程中，在保证独立完成项目的同时，我也帮助同学们利用 Simulink 完成 Buck 电路仿真模型的搭建，向有问题的同学讲解 Buck 电路原理并进行参数计算，也向同学分享了调节 PI 控制器参数的经验，并对向我寻求帮助的同学热心解答。在制作 Buck 电路实物时，由于我本身的项目进度比较快，并且有着一定的焊接技术，因此我在短时间内便完成了 Buck 控制电路与主电路的制作，给其他的同学提供了一个参考，帮助其他同学顺利完成器件布局与焊接。同时在实物制作的过程中，我也不断和其他同学分享焊接时的注意事项，帮助其他同学检查电路，在帮助其他人完成项目进度的同时，我本身也对项目原理有了更深刻的认识，解决问题的能力也有了很大的提升。

在团队的协作中，由于我有着较多的项目经验，因此负责整个项目的计划、组织、协调和控制，确保项目按照预定的计划进行。同组成员遇到问题时，及时出面帮他解决，并对他讲解原理，保证他的项目进度和知识理解。最终与同伴对电路进行测试和调试，一起解决重大难题，完成验证电路的性能和稳定性。在此次的团队协作中，我的沟通协调以及团队合作能力有了较大的提升。

## 6 项目影响评价报告

项目名称	DC-DC 变换电路的研究与设计	项目组成员	彭鹏
项目概况	对 DC-DC 变换器的电路和工作原理进行分析，利用 Matlab 搭建一套 Buck 变换器系统进行仿真分析，同时制作出实物进行测试研究。		
社会影响	随着物联网时代的到来，对低功耗、小尺寸、高效率的 DC-DC 变换器芯片的需求日益增加。这些技术的进步直接推动了智能家居、智慧城市等领域的快速发展，提高了人们的生活质量和工作效率。同时 DC-DC 变换器的研究与设计不断推动电源管理技术的进步，满足日益增长的电子设备对电源管理的需求。		
健康影响	DC-DC 变换器在运行过程中会产生电磁干扰（EMI），这种干扰可能会影响周围的电子设备，甚至对人体健康造成潜在威胁。但随着电子产品的快速发展，系统设备对电源系统的性能以及可靠性提出了更高的要求。DC-DC 变换器可以广泛应用在这些领域，基于健康管理的智能维护技术可以帮助实现模块电源的健康状态评估，从而提高电源的可靠性和安全性。这对于保障使用这些设备的人员的安全和健康具有重要意义。		
安全影响	不合规的 DC-DC 变换器的设计可能会引发安全隐患，寄生参数是引发 DC-DC 变换器潜在电路的根本原因，可能导致变换器出现无法预期的工作状态，影响其工作特性。因此在进行 DC-DC 变换器的设计过程中我们还需设计一些保护电路，通过采用先进的控制策略和保护措施，如环流抑制策略和故障时的保护措施，可以显著提高系统的可靠性。		
法律影响	随着电力电子技术的发展，特别是 DC-DC 变换器技术的进步，相关的研究成果和技术专利成为了企业竞争的重要资源，这类创新性的研究成果可能涉及专利申请。并且随着 DC-DC 变换器技术的应用越来越广泛，相关的行业标准也在不断完善。在 DC-DC 变换器的研究过程中，需要遵循相关的法律法规，否则违反这些法规可能会导致产品被禁止销售或出口，甚至面临罚款等法律后果。		
文化及环境影响	<p>在全球化的背景下，DC-DC 变换器技术的研究与设计不仅是国内科研机构和企业任务，也需要国际间的合作与交流。通过参与国际学术会议、期刊发表研究成果等方式，可以促进不同国家和地区在电力电子领域的技术交流和融合。</p> <p>随着传统化石能源的日益枯竭和环境污染问题的加剧，开发清洁、可再生的新能源变得尤为重要。DC-DC 变换器作为新能源发电系统中的关键组件，其研究与设计对于提高新能源发电效率、促进能源的可持续利用具有重要意义。DC-DC 变换器技术的进步不仅促进了相关产业的技术升级和产品创新，也为社会经济的发展提供了新的动力。</p>		

## 7 项目实施中新知识的、新技术的应用

### 7.1 TL494 芯片的应用

在本项目的设计过程中，使用了 TL494 芯片产生 PWM 波，控制 MOS 管的通断。TL494 芯片是一种电压驱动型脉宽调制（PWM）控制集成电路，广泛应用于各种电子设备中。它通过调节脉冲宽度来控制输出电压或电流，从而实现对负载的精确控制。TL494 芯片具有结构简单、体积小、成本低、输出电压范围宽、过压、过流保护功能易实现等特点。其内部原理图如图 7.1 所示。

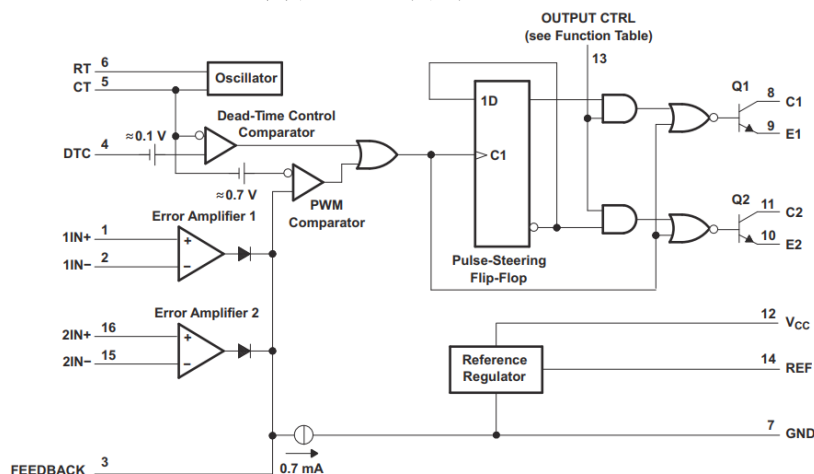


图 7.1 TL494 芯片基本原理框图

TL494 通过 VREF 引脚输入一个参考电压，该电压可以通过外部分压电阻网络进行调节。参考电压是 TL494 内部误差放大器的参考电平，用于控制开关管的开关时间。

TL494 内部集成了两个比较器，用于比较误差放大器输出的误差电压和三角波信号的幅值，从而产生 PWM 信号。其中一个比较器的非反相输入端接收误差放大器输出的误差电压，另一个比较器的非反相输入端接收一个由三角波发生器产生的三角波信号。当误差电压小于三角波信号幅值时，比较器输出高电平；当误差电压大于三角波信号幅值时，比较器输出低电平。两个比较器的输出经过逻辑门电路处理，产生 PWM 信号。同时还集成了一个三角波发生器，其输出的波形是一个周期为  $1/3f_o$  的三角波， $f_o$  为 TL494 的振荡频率，实验中取得是 10kHz。三角波发生器由一个电流源和一个电容器组成，电流源通过一个电阻将电容器充放电，从而产生一个三角波信号。

TL494 通过将参考电压和反馈信号进行比较，产生误差电压，再将误差电压与三角波信号进行比较，产生 PWM 信号，控制开关管的开关时间，从而实现开关电源、逆变电源、DC-DC 变换电路等电路的控制。



## 7.2 PI 控制的应用

DC-DC 变换器中的 PI 控制原理主要基于比例和积分两个基本环节的组合，用于调节输出电压或电流，以实现 DC-DC 变换器性能的优化。PI 控制器通过调整比例增益 ( $K_p$ ) 和积分增益 ( $K_i$ ) 来平衡系统的动态响应和稳态误差，从而达到预期的控制目标。

PI 控制器使用比例项来响应系统输出与参考输入之间的差异，即误差。比例项的系数被称为比例增益，它控制了响应速度和稳定性之间的权衡关系。如果比例增益较大，系统的响应速度将更快，但可能会引起振荡；如果比例增益较小，则系统将更加稳定，但响应速度可能会受到影响。

PI 控制器还使用积分项来响应系统输出与参考输入之间的持续误差。积分项的系数被称为积分时间常数，它控制了系统的稳态误差和响应速度之间的权衡关系。如果积分时间常数较大，系统的稳态误差将更小，但响应速度可能会变慢；如果积分时间常数较小，则系统的响应速度将更快，但稳态误差可能会增加。

在 DC-DC 变换器中，PI 控制器通常用于电压闭环控制方式。例如，在 Buck 型 DC-DC 变换器中，PI 控制器可以根据输出电压误差决定是否调整占空比，以维持期望的输出电压。此外，PI 控制器还可以应用于 Buck-Boost 变换器和全桥隔离型 DC-DC 变换器等不同类型的变换器中，通过建模和仿真验证其控制效果。

在 DC-DC 变换器的应用中，PI 控制器的设计和优化是一个重要的研究领域。PI 控制器的设计和参数整定是确保变换器稳定性和性能的关键。通过对变换器参数的合理调整，可以优化控制效果，提高系统的动态响应时间和减小输出纹波值。

## 8 总结

在本次课程设计中，我们首先对 Buck 电路模型进行了仿真，分别在开环和闭环控制下进行了仿真测试。接着通过实物焊接，进行 Buck 电路的实物现象观察和分析。从理论分析到实物验证，从虚拟仿真到实际操作，期间过程巩固了课程学习成果，同时也锻炼了学生的动手能力，培养了学生分析和解决问题的能力。

实验过程中也伴随着种种困难，并不断地给学生的能力带来挑战。仿真过程中遇到的难点是闭环控制系统的搭建及 PI 参数的调节，通过网上查阅资料 and 不断地尝试，最终在成功的将 Buck 的仿真模型搭建出来。接着便是实物制作中的困难，电路的焊接过程并不难，我们在很短的时间内便成功将电路板制作出来并进行测试。但在系统电路的联调过程中，通过不断调节电位器却不能改变输出的电压，同时 TL494 芯片的输出 PWM 波也一直保持高电平，因此我认为可能是 MOS 管的上拉电阻太小了，导致输出 PWM 的低电平检测不到。在换了更大的上拉电阻后再调节电位器，发现能够顺利的调节输出电压，在此我便进入了一个误区，误认为是上拉电阻的影响。后通过仔细分析我很快否定了这个想法，并将电阻更换了回来也能正常调节。

由于我们得到的实验现象表明，PWM 波形的占空比只能够从 0% 变化至 30%，之后再调节电位器便会占空比变为 1，并且输出一直保持为 12V 左右的电压。后面我将 TL494 芯片的 4 引脚单独接至直流恒定电压源，通过直接调节电源电压来改变 4 引脚的参考电压，得到了同样的实验现象，到此我认为本次实验中我们使用的芯片存在性能上的缺陷。但通过不断地思考分析和参考 TI 官方的数据手册，我再次改变了我的想法。由于 PWM 发生模块在单独运行时可正常调节占空比，但接入 Buck 后却只能调节至 30%，通过对此现象的分析，我逐渐将问题矛头转向 MOS 管的性能及电路参数的对控制影响。通过深入分析 TI 官方数据手册及芯片原理，我认为是反馈回来的电压调节和死区调节两部分冲突，便将芯片 1 引脚接地，之后便能正常通过调节死区改变占空比，验证了我的猜想，最终得出本次实验的电路图存在一定问题的结论。

本次课程设计过程中的收获很多，学习是一个不断探索的过程，在本次课程设计的实物制作中，我不断一次次提出自己的猜想，然后不断一次次的否定自己的结论，通过不断实验验证最终得到正确的结果。科学理论研究的过程也是如此，不断的提出问题，不断的解决问题，通过反复的实验验证，推翻前面的错误理论，最终得到正确的结果。

最后，感谢实验过程中老师的耐心解答和不吝赐教，在老师的帮助和解答下，我的实验才能够顺利进行。

## 参考文献

- [1] 宋受俊,刘景林,张智慧.BUCK 变换器建模及其先进控制方法仿真[J].计算机仿真,2006(03):294-300.
- [2] 曹霞,关振宏,黄栋杰,邓平.Buck 变换器在 Matlab/Simulink 下的仿真研究[J].电气开关,2009,47(06):23-25.
- [3] 吕庆永,黄世震,林伟.Buck 变换器在 SIMULINK 下的建模仿真[J].通信电源技术,2008(06):1-3.DOI:10.19399/j.cnki.tpt.2008.06.001.
- [4] 许万有,刘金桂.由 IGBT 组成的降压 BUCK 电路的建模及应用仿真[J].科技信息,2009(13):476-477.
- [5] 桑绘绘,杨奕,沈彩琳.基于 PID 控制的 Buck 变换器仿真系统设计[J].南通大学学报(自然科学版),2011,10(01):24-28.
- [6] 张微. TL494 及其在开关稳压电源中的应用[J]. 仪表技术, 2000(4):2.
- [7] 邓国扬, 盛义发. 基于 Matlab/Simulink 的电力电子系统的建模与仿真[J]. 南华大学学报(理工版), 2003, 17(1):1-6.
- [8] 吕庆永, 黄世震, 林伟. Buck 变换器在 SIMULINK 下的建模仿真[J]. 通信电源技术, 2008, 25(6):3.
- [9] 冯子健. PWM 降压型 DC-DC 开关变换器的设计[D]. 哈尔滨工业大学, 2009.
- [10] 张微. TL494 及其在开关稳压电源中的应用[J]. 仪表技术, 2000(4):2.
- [11] 陈元娣 . 基于集成控制器的同步 Buck 变换器研究[J]. 空军预警学院学报, 2018, 32 (1): 75-78.
- [12] Hu, Q., Xu, D., Gao, X., & Li, Y. (2020). Design and implementation of a high-voltage gain DC-DC converter for photovoltaic systems. *Energies*, 13(7), 1-18.
- [13] Yang, L., Lee, F. C., & Lee, Y. (2019). Design and implementation of a high-efficiency DC-DC converter for portable devices. *Journal of Power Electronics*, 19(1), 63-70.