

实验地点：一区主楼      房间  
实验时间：      年      月      日

---

姓名：

班号：

学号：

教师签字：

成绩：

---

# 自动控制实践 I 课程设计



哈尔滨工业大学航天学院控制学科实验室

## 实验室安全与注意事项

- 一、 进入实验室后，在指定的台位前就坐，不得随意闭合实验室总电闸，不得随意运用与本次实验无关的设备。
- 二、 操作前认真听从教师的任务布置和操作要领，由教师负责发放操作使用仪器、仪表、工具、材料元器件等，其他人员不得擅自拿取。
- 三、 操作前，工具、焊料、焊剂等安全、整洁地摆放在操作台面上，工作台合闸送电后，用万用表测试电源是否通电，电烙铁及其他用电设备机体是否带电，机体带电的不得使用。
- 四、 烙铁必须插置在烙铁架中，并注意烙铁头、杆不得接触电源线及其他物品，操作中防止烫伤自己和他人，长时间不使用应切断电源。
- 五、 严格遵守“先接线后通电，先断电后拆线”的操作程序。
- 六、 **焊接操作中，注意人身安全**，严禁带电接线、拆线、改线等。
- 七、 接通电源后，如果保险丝熔断或空开跳闸，则必须检查故障原因，在排除故障后方可重新接通电源。
- 八、 任何仪表和电器，使用前必须认真阅读使用说明，不了解性能及使用方法时，不得擅自使用、接通电源。
- 九、 实验中发生事故，不得惊慌失措，应立即切断电源，保持现场并报告教师检查处理。
- 十、 操作完成后，整理物品、设备、工具及材料，整齐摆放在工作台上，教师验收登记后，方可离开。
- 十一、 仪表、设备、工具如有损坏或遗失，应报告教师并登记。
- 十二、 试验完毕，必须将工作台面清理干净，地面废物、垃圾必须清扫干净。
- 十三、 判断所有电源关闭，确保安全，经教师签字同意后方可离开。
- 十四、 不得在实验室饮食，玩手机，不得在操作台面上放水杯、饮料瓶等装有液体的器皿。

## 课程设计过程进度表

进度表与实验次数对应，每次实验结束后，填写进度情况，并由指导教师签字

序号	进度情况	教师签名	日期
1			
2			
3			

### 课程设计过程进度表

序号	进度情况	教师签名	日期
4			
5			
6			

### 课程设计过程进度表

序号	进度情况	教师签名	日期
7			
8			
9			

## 课程设计任务完成验收表

共 4 大项任务，每完成 1 大项任务，请指导教师现场验收评分

任务	完成情况	教师评分	教师签字	日期
1	5kHz 下 20%、50%、80%占空比的 PWM 波形（5 分）			
	10kHz 下 20%、50%、80%占空比的 PWM 波形（5 分）			
	15kHz 下 20%、50%、80%占空比的 PWM 波形（5 分）			
2	正转下的正交编码信号 AB 相波形（5 分）			
	反转下的正交编码信号 AB 相波形（5 分）			
	正交编码信号 AZ 相波形（5 分）			
3	调整直流发电机负载参数改变并计算直流电动机的负载转矩，通过示波器测试脉冲编码器的频率算机组的转速（5 分）			
	直流电动机在正向旋转下三种不同驱动占空比时的机械特性（5 分）			
	直流电动机在反向旋转下三种不同驱动占空比时的机械特性（5 分）			
4	直流电动机启动时的电枢电流变化情况（5 分）			
	直流电动机加载时的电枢电流变化情况（5 分）			
	直流电动机驱动占空比为 50%，开关频率为 5kHz、10kHz、15kHz 时的电流波形（5 分）			

注：

该表为实验操作评分表，总分为 60 分，教师验收后给出评分；在焊接电路板过程中，如因个人操作原因，更换 PCB 板，-5 分，如重新领取 L298、TL494、ACS712 芯片总数超过 3 个，-5 分。完成验收后，将电路板上交到 518 实验室。

# 第一部分 自动控制实践 I 课程设计指导书

## 一、课程设计的意义

自动控制实践 I 是一门应用自动控制原理搭建控制系统的实践课程。为了响应哈工大“双一流”建设的总体目标，秉承“规格严格、功夫到家”的校训，发扬航天学院以教学为本的优良传统，培养面向全球和未来、适应航天、国防及国民经济与社会发展需要，在自动化及相关领域具有引领行业、学术方向潜质的科学技术创新人才，设此课程设计。它的主要培养目的是：

1. 能够在解决自动化及相关领域的复杂工程问题时应用数学、自然科学、工程基础和专业知识。

2. 能够针对自动化领域的复杂工程问题，提出适当的解决方案，设计满足特定需求的系统、单元或操作流程，并能够在设计环节中体现创新意识，考虑社会、健康、安全、法律、文化以及环境等因素。

3. 能够基于科学原理并采用科学方法对自动化相关领域的复杂工程问题进行研究，包括设计实验、分析与解释数据、并通过信息综合得到合理有效的结论。

4. 能够针对自动化领域的复杂工程问题，开发、选择与使用恰当的技术、资源、现代工程工具和信息技术工具，包括对复杂工程问题的预测与模拟，并能够理解其局限性。

5. 能够就自动化领域的复杂工程问题与业界同行及社会公众进行有效沟通和交流，包括撰写报告和设计文稿、陈述发言、清晰表达或回应指令。并具备一定的国际视野，能够在跨文化背景下进行沟通和交流。

## 二、课程设计目的

1. 掌握直流电动机脉冲宽度调制型功率放大器的原理与结构。

2. 掌握编码器的工作原理与输出信号处理方法。

3. 掌握直流电动机的特性及测试方法。

4. 掌握直流电动机脉冲宽度调制型功率放大器驱动时电枢电流波动的影响因素及改善方法。

5. 掌握控制系统的构成以及搭建控制系统的功能。

## 三、课程设计任务

任务一：设计并实现直流电机的脉冲宽度调制型功率放大器。

(1) 以电位器调压作为输入信号，生成双极性 PWM 波形；

(2) 记录并保留在开关频率为 5kHz 下 20%、50%、80% 占空比的 PWM 波形；

(3) 记录并保留在开关频率为 10kHz 下 20%、50%、80% 占空比的 PWM 波形；

(4) 记录并保留在开关频率为 15kHz 下 20%、50%、80% 占空比的 PWM 波形。

任务二：设计编码器正交编码信号的四细分电路。

(1) 设计正交编码信号的四细分电路；

(2) 用双通道示波器测试、记录并保留正、反转下的正交编码信号 AB 相波形；

(3) 用双通道示波器测试、记录并保留正交编码信号 AZ 相波形。

任务三：测试直流电动机的机械特性。

(1) 用所设计的功率放大器驱动直流电动机-发电机组；

(2) 通过调整直流发电机负载参数改变并计算直流电动机的负载转矩，通过示波器测试脉冲编码器的频率计算机组的转速；

(3) 测试并记录直流电动机在正向旋转下三种不同驱动占空比时的机械特性；

(4) 测试并记录直流电动机在反向旋转下三种不同驱动占空比时的机械特性。

任务四：通过电流传感器测试直流电动机电枢电流。

(1) 通过电流传感器测量直流电动机电枢电流；

(2) 测试并记录直流电动机启动时的电枢电流变化情况；

(3) 测试并记录直流电动机加载时的电枢电流变化情况；

(4) 测试并记录直流电动机驱动占空比为 50%，开关频率为 5kHz、10kHz、15kHz 时的电流波形。

#### 四、实验报告要求

1. 记录实验中应该测试的数据与波形；

2. 实验报告中的原理图设计、波形要有指导教师签字；

3. 实验报告标题用宋体 4 号加粗，正文用宋体小四。

## 第二部分 自动控制实践 I 课程设计实验报告（40 分）

### 一、实验电路板图片（2 分）：

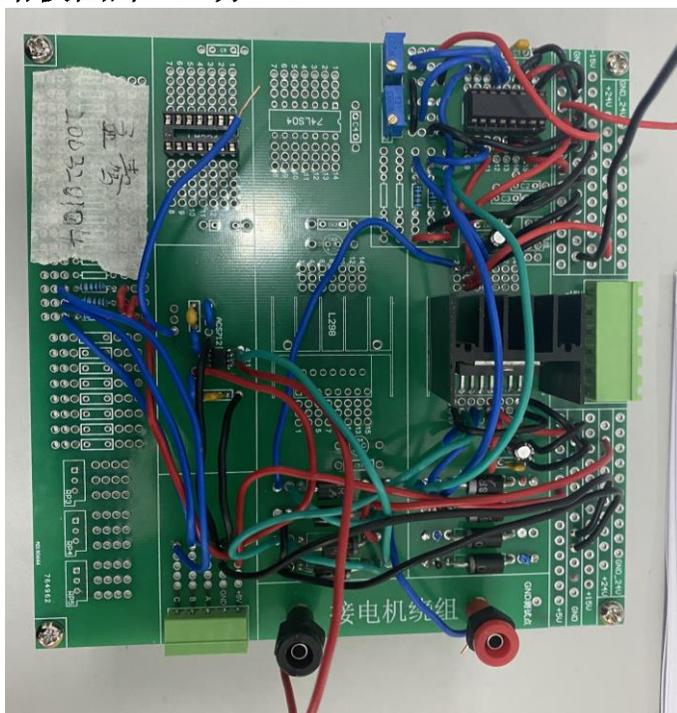


图 1 实验电路板正面图

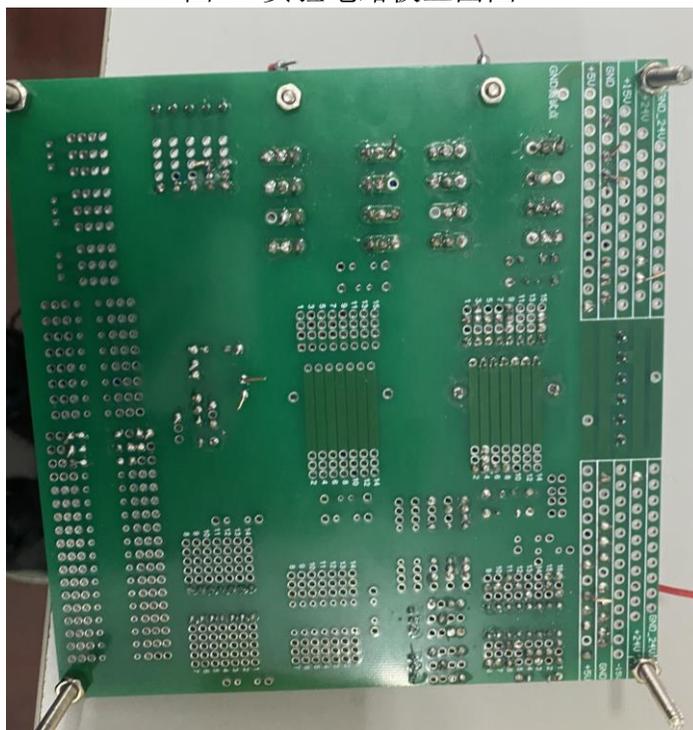
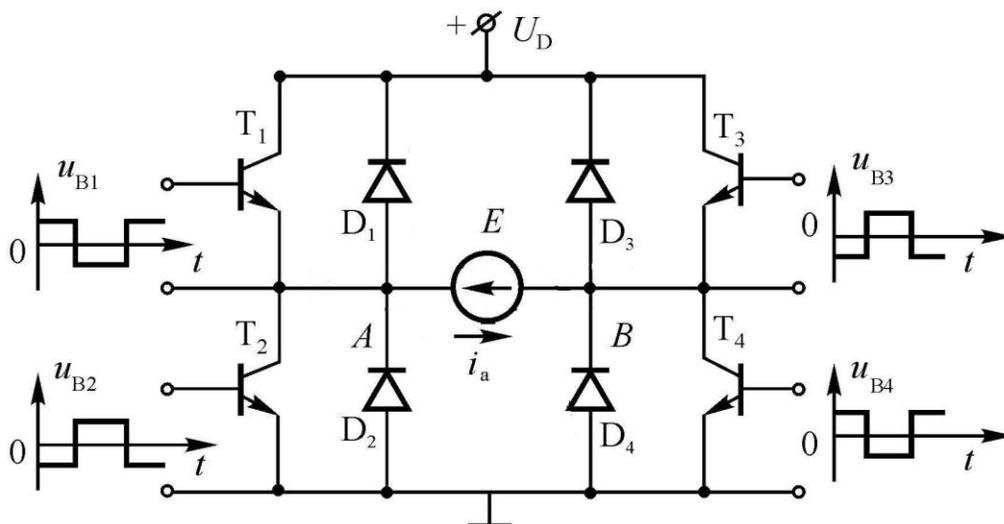


图 2 实验电路板背面图

## 二、课程设计工作原理（12分）：

### 1 直流电动机脉冲宽度调制型功率放大器工作原理（3分）

PWM技术，即脉冲宽度调制技术，通过对一系列脉冲的宽度进行调制，来等效地获得所需要的波形。PWM技术的原理为面积等效原理和香农采样定理，最常用的方法之一是用一系列窄脉冲来代替正弦半波，保证面积相等。调制出来的波形更容易实现，输出功率更高，晶体管工作在饱和区和截止区。主要的实现方法有两种：计算法和调制法，其中调制法分为单极性调制和双极性调制。此次实验使用的是双极性调制方法：

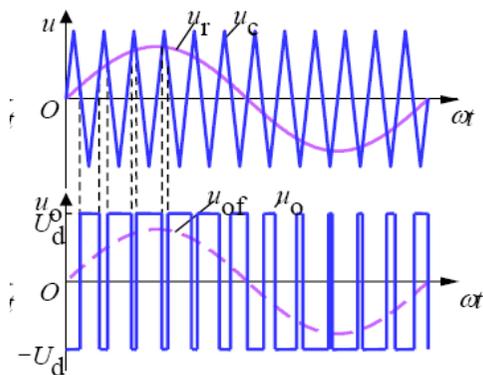


控制信号  $u_{B1}$  和  $u_{B4}$  相同， $u_{B2}$  和  $u_{B3}$  相同，且两个信号交替变换

当输入信号大于基波信号时， $u_{B1} > 0, u_{B2} < 0, u_{B3} < 0, u_{B4} > 0$ ，此时  $U_0 = U_D$ ；

当输入信号小于基波信号时， $u_{B1} < 0, u_{B2} > 0, u_{B3} > 0, u_{B4} < 0$ ，此时  $U_0 = -U_D$ ；

所以可以得到如下的脉宽调制波，以三角波为演示，本次实验使用锯齿波作为基波生成波形。其中四个二极管起续流作用，保证电流连续。



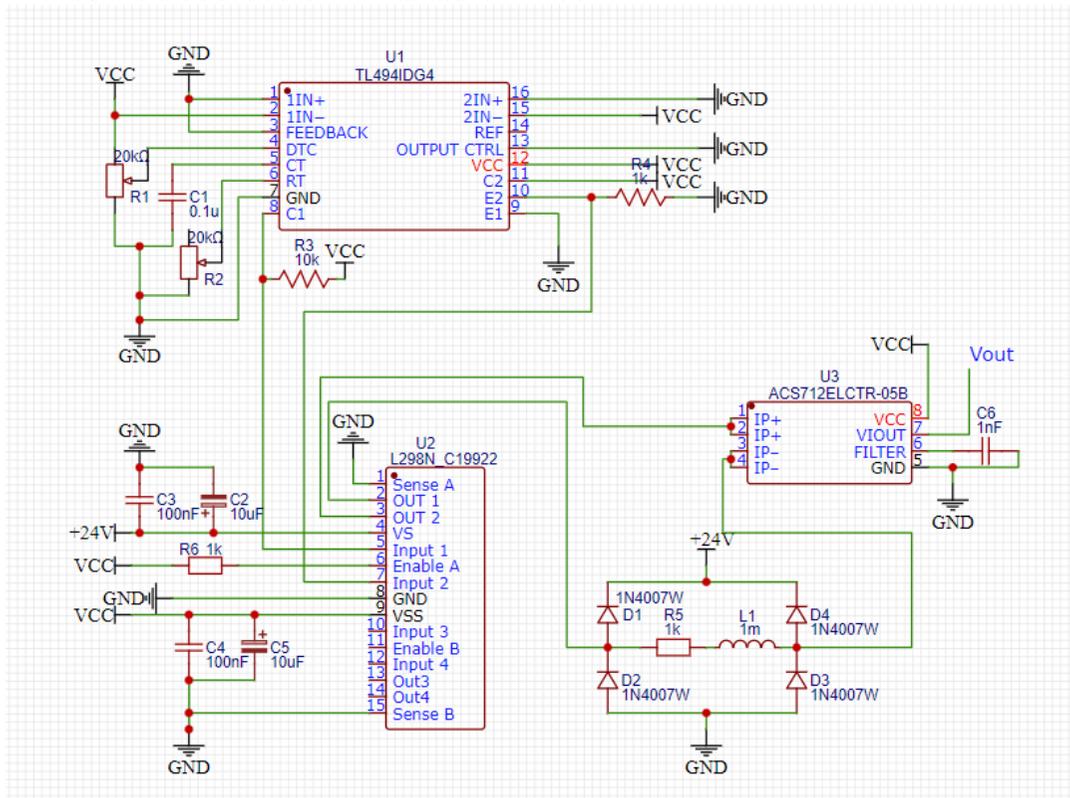
双极性PWM控制方式波形

使用双极性输出控制直流电机运动，可知加在直流电机两端的电压为：

$$U_{av} = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} U_D dt - \frac{1}{T} \int_{t_1}^T U_D dt = U_D (2 \frac{t_1}{T} - 1)$$

所以直流电机控制方法为通过调节输入电压高低，调节 PWM 功率放大器的占空比，进而调节电机两端的电压，实现电枢控制。

## 2 所设计的功率放大器电路图（3分）



设计功率放大器原理说明：

**TL494：**产生双极性控制信号。通过 5、6 脚外接电阻和电容，产生频率为

$f_{osc} \approx \frac{1.1}{R_T \cdot C_T}$  的锯齿波作为基波，4 脚接电压 CCR，可在 0-5V 间进行调节，对

输出的双极性控制信号的占空比进行调节；13 脚接地，屏蔽芯片内部的 Flip-Flop 的功能，在 Q1 和 Q2 输出端的集电极和输出级分别上拉，下拉，从而实现能够输出两路极性相反的控制信号

**L298n：**芯片内部为一个 H 桥电路，通过 5、7 输入两路极性相反的控制信号，同原理图所示的控制方法相同，实现了 PWM 控制波形输出，并外接 4 个二极管进行续流，实现电枢控制。

**ACS712：**霍尔传感器，将该芯片串联进电枢电路中，通过 7 脚的 Vout 和电流的线性关系，实现对电枢电流的测量。

### 3 光电编码器工作原理（3分）

光电编码器的主要工作原理为光电转换，是一种通过光电转换将输出轴的机械几何位移量转换为脉冲或数字量的传感器。主要分类有增量式编码器、绝对式编码器和混合式编码器。

光电编码器主要由光栅盘和光电检测装置构成，其中包括透光狭缝、码盘基片、光栅板、透镜、光源、光敏元件。在伺服系统中，光栅盘与电动机同轴致使电动机的旋转带动光栅盘的旋转，再经光电检测装置输出若干个脉冲信号，本次实验中所使用的光电编码器输出三相脉冲，其中 AB 两相对应两组检测窄缝，这两组窄缝位置相隔  $(k \pm \frac{1}{4})$  个节距，则保证两组输出信号在相位上

相差  $90^\circ$ 。Z 相是零位输出，每一圈有一个零位检测点，即电机转动一圈输出一个零位脉冲信号，也有编码器有多个零位监测点，便于运动控制校准和寻零点操作。根据 AB 相或 Z 相的每秒脉冲数便可计算当前电动机的转速。同时也可以根据双通道输出光码的状态的改变，即 AB 相相位超前滞后的关系来判断出电动机的旋转方向。

也可以进行如下的信号处理，微分装置，信号由低向高跳变时输出一个脉冲。正转时输出正转脉冲，反转时输出反转脉冲。每输出 1 个脉冲，表示转过了 1 个节距。

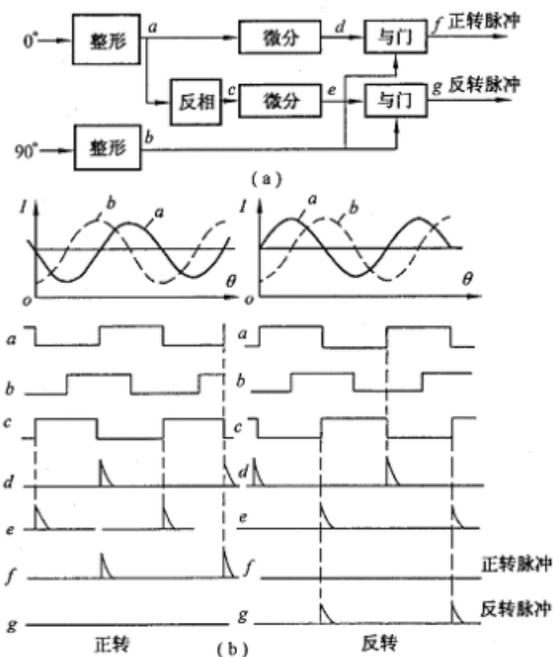
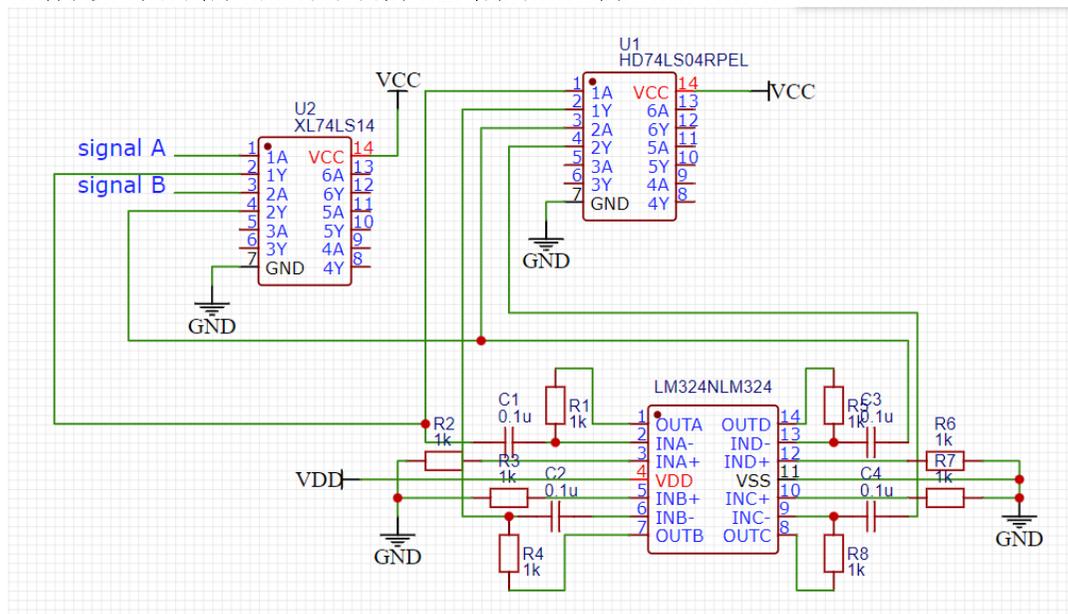


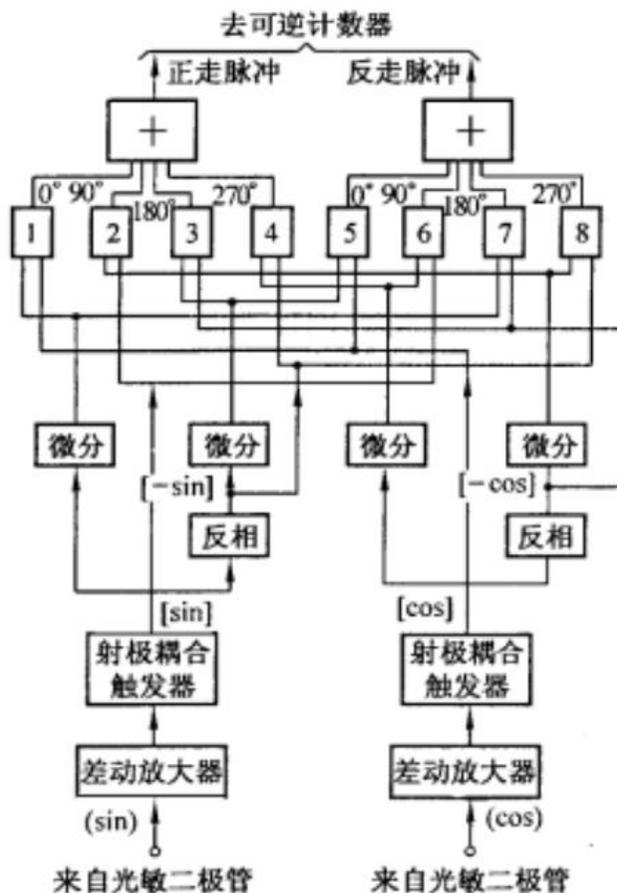
图 11-2 光电码盘信号处理线路框图和信号波形图

同时如果编码器的分辨力达不到系统所需要的要求，也可以对脉冲进行四细分以及多细分来提高分辨力。

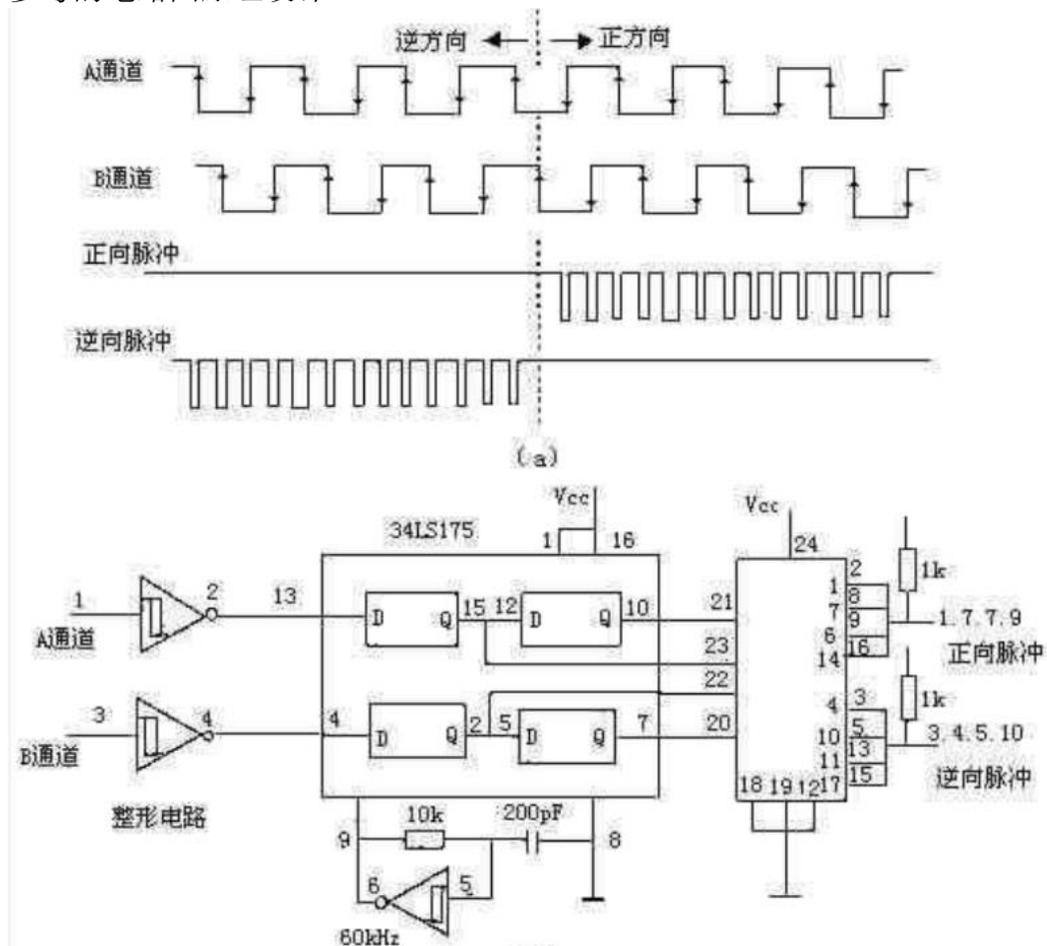
#### 4 所设计的编码器四细分电路图（3分）



设计的编码器四细分电路图原理为：



首先使用 74LS12 滞回比较器对编码器输出的正弦信号进行整形，得到方波信号，并对信号进行反向和微分处理，得到信号的上升下降沿脉冲信号。其中：74LS04 是反相器芯片、LM324 是运算放大器芯片。分别统计正走时上升边微分和反走时上升边微分脉冲信号，并计数，达到四细分的效果。参考的电路图原理设计：



### 三、 实验数据记录及处理（24分）：

#### 1 直流电机的脉冲宽度调制型功率放大器实验（5分）

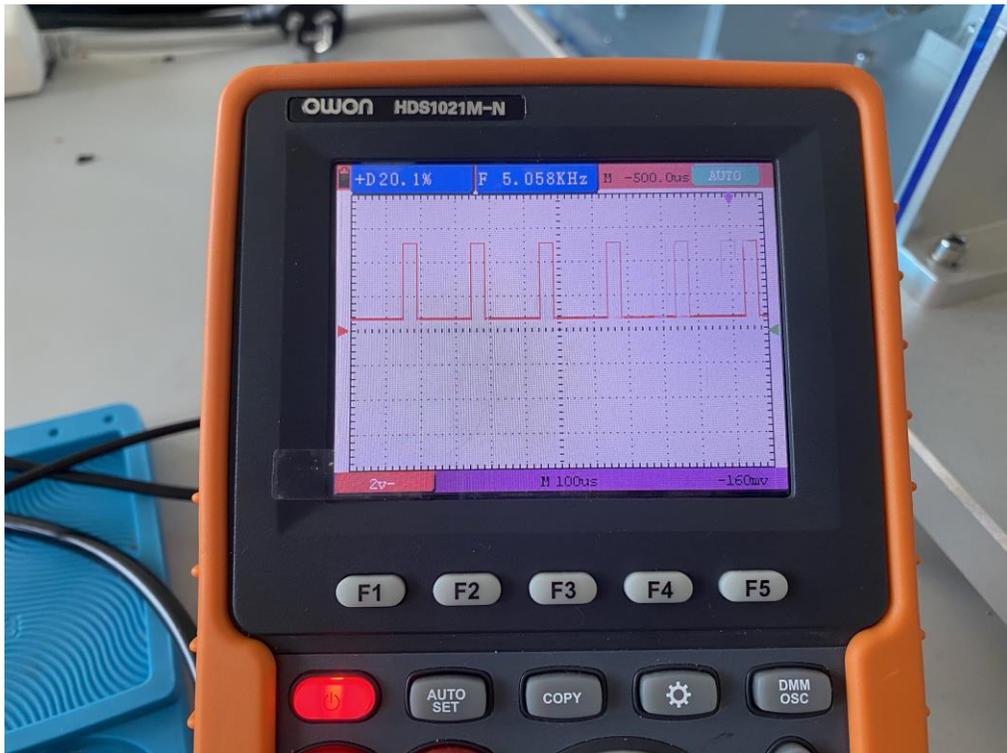


图 3 开关频率 5kHz，20%占空比

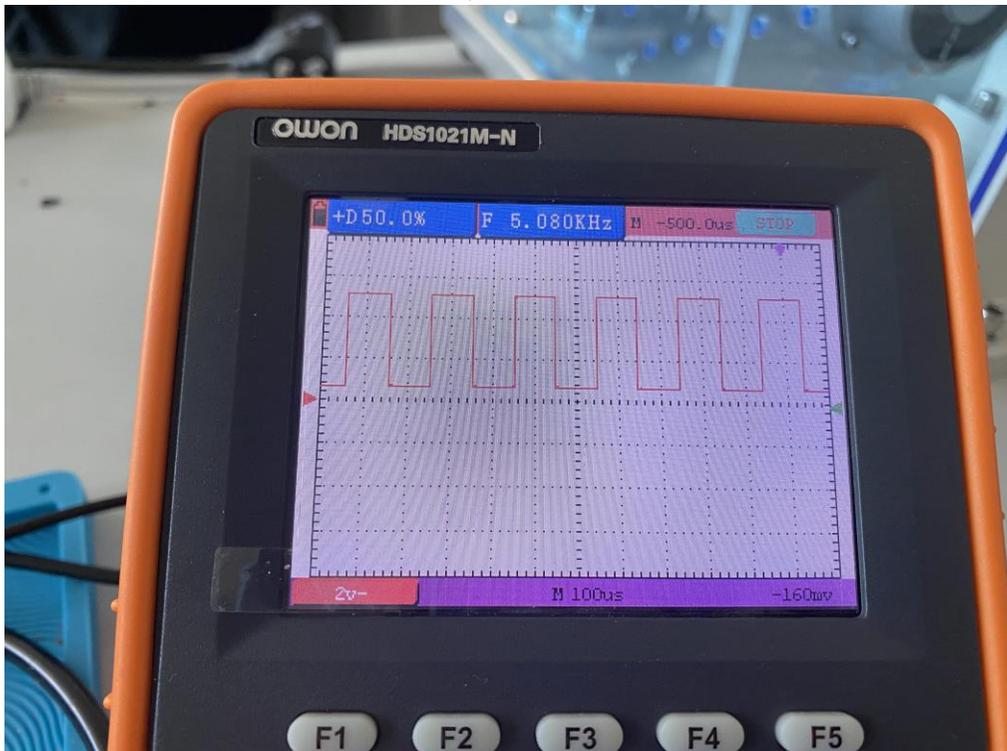


图 4 开关频率 5kHz，50%占空比

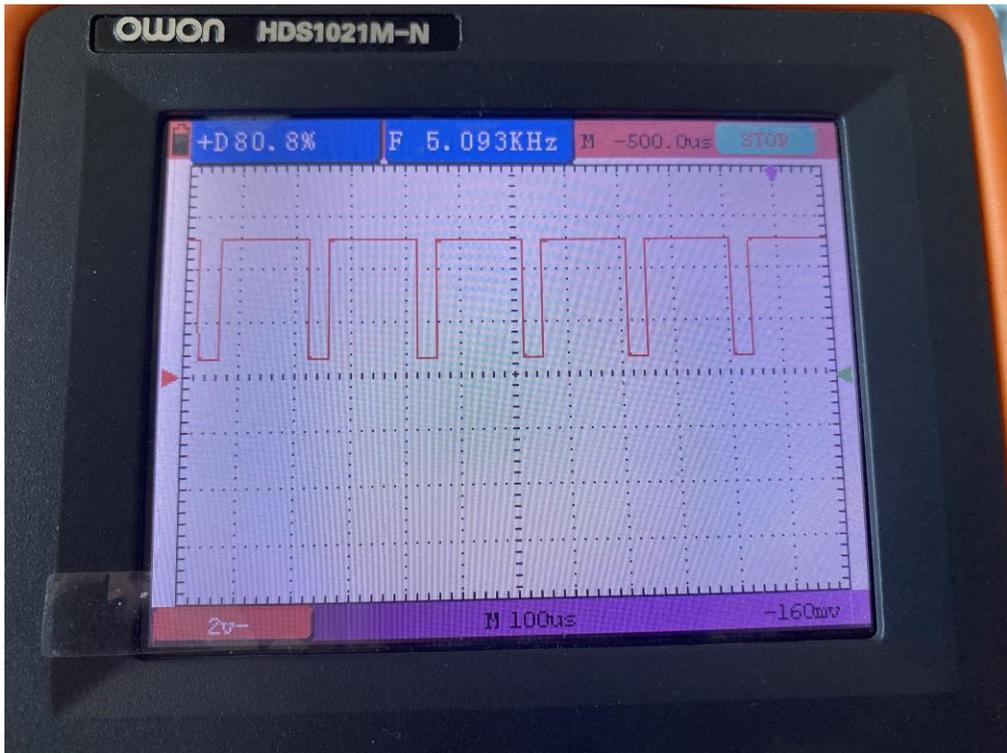


图 5 开关频率 5kHz, 80%占空比

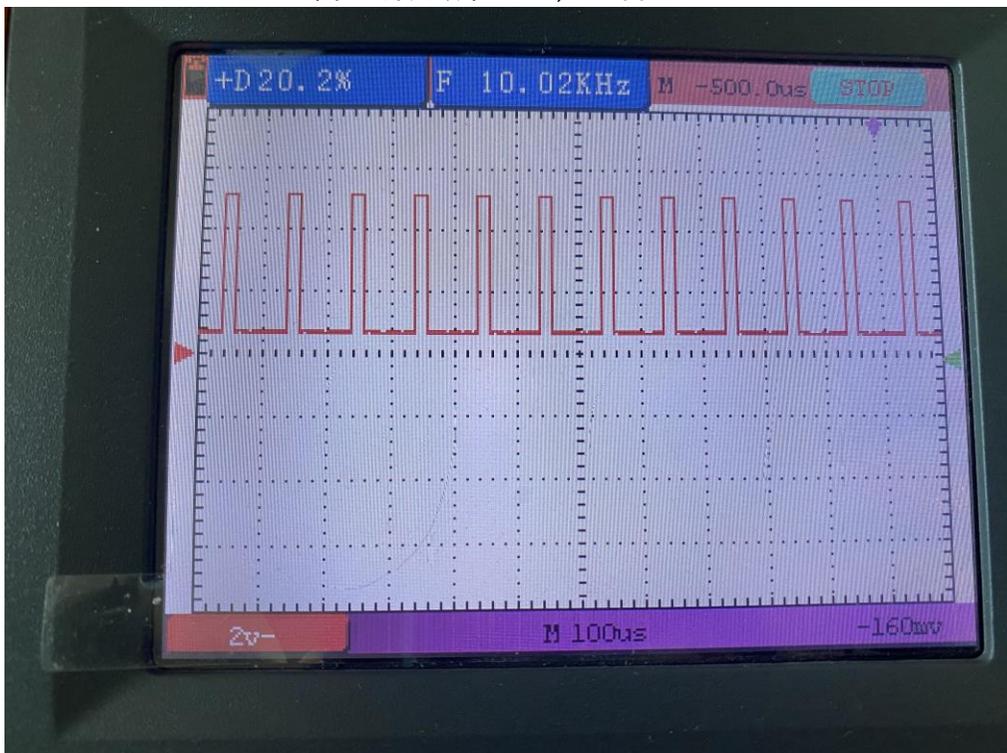


图 6 开关频率 10kHz, 20%占空比

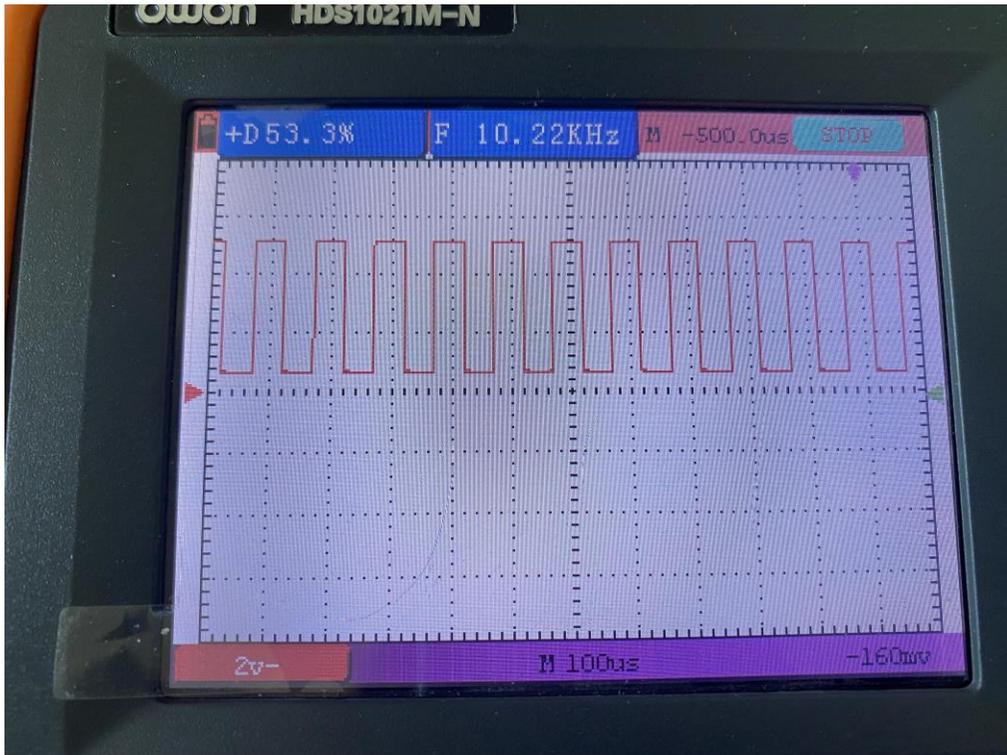


图 7 开关频率 10kHz, 50%占空比

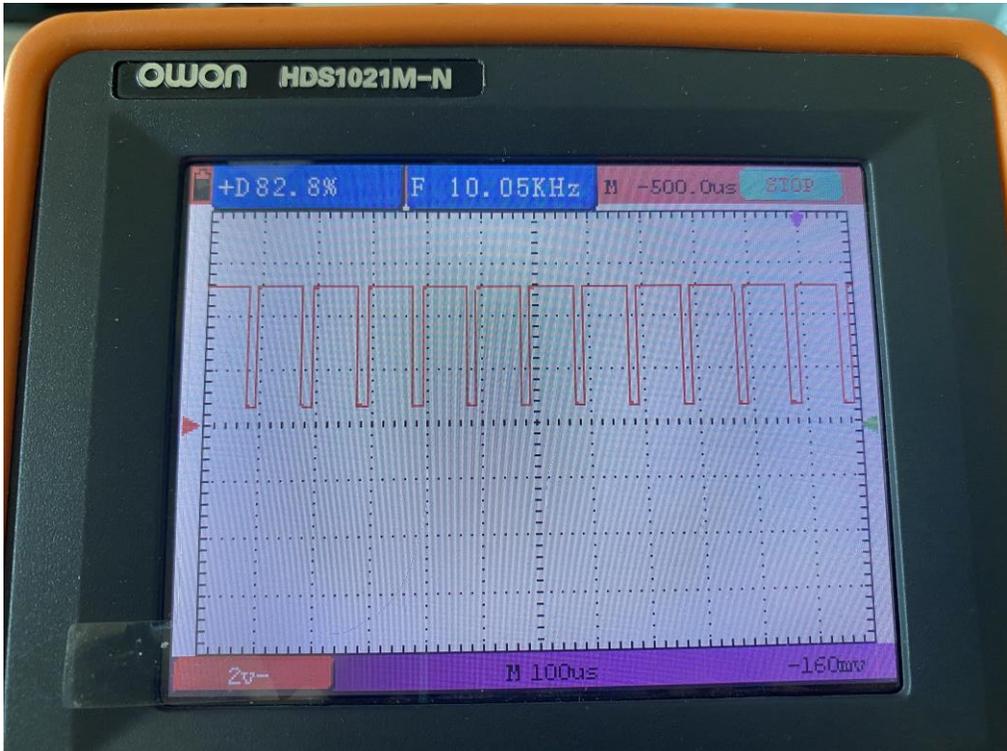


图 8 开关频率 10kHz, 80%占空比

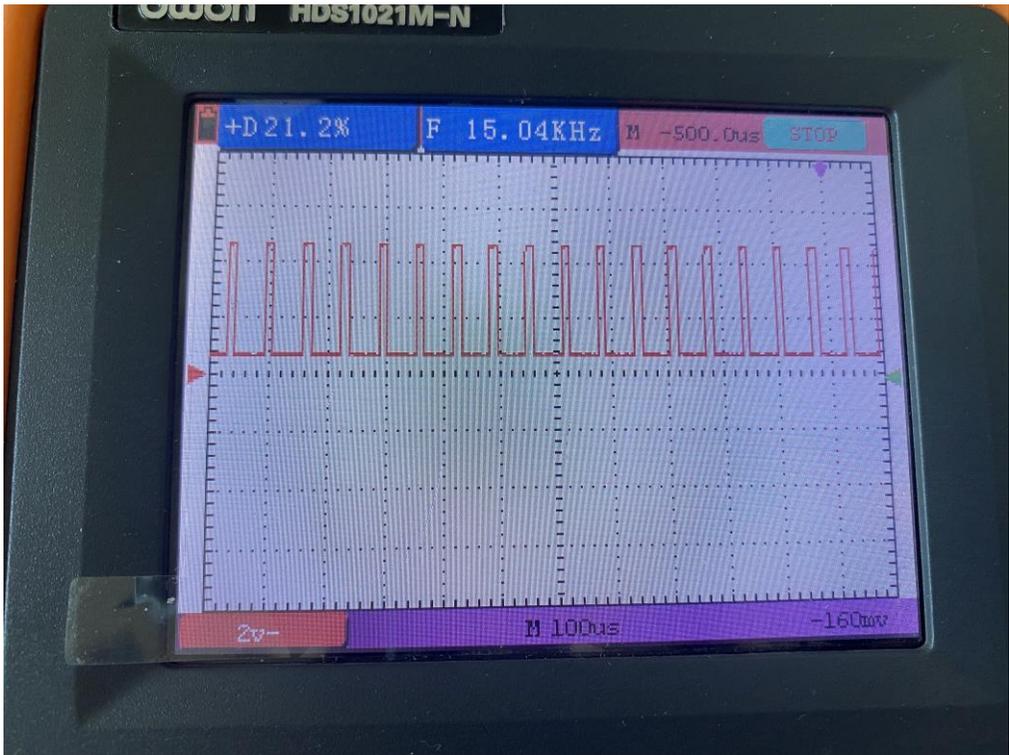


图 9 开关频率 15kHz，20%占空比

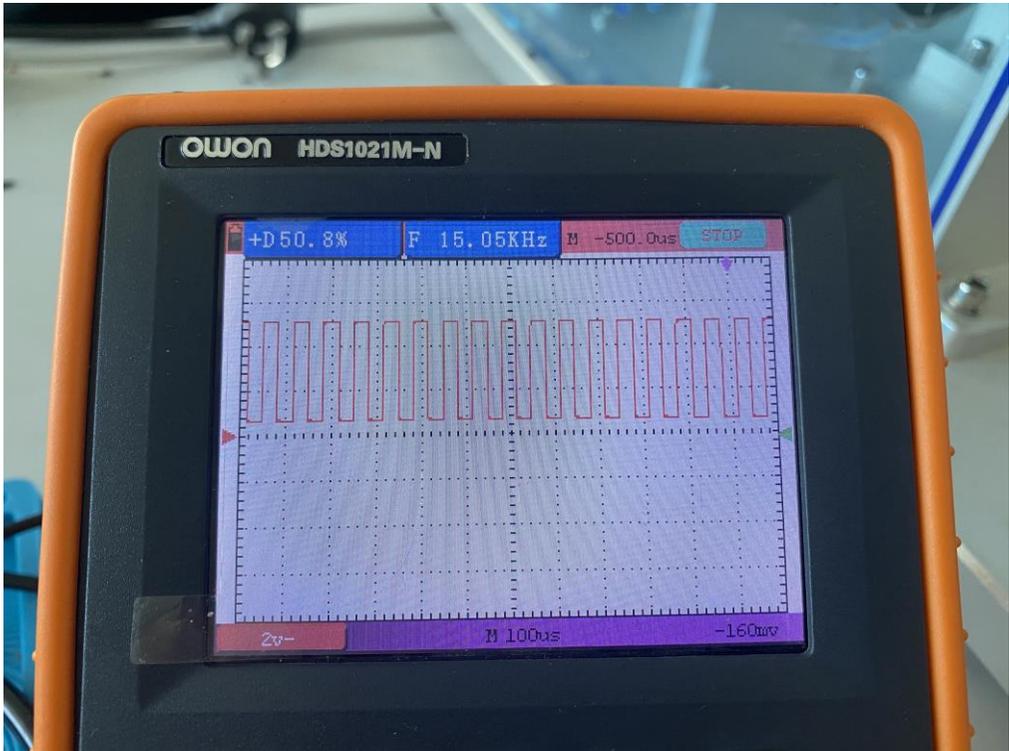


图 10 开关频率 15kHz，50%占空比

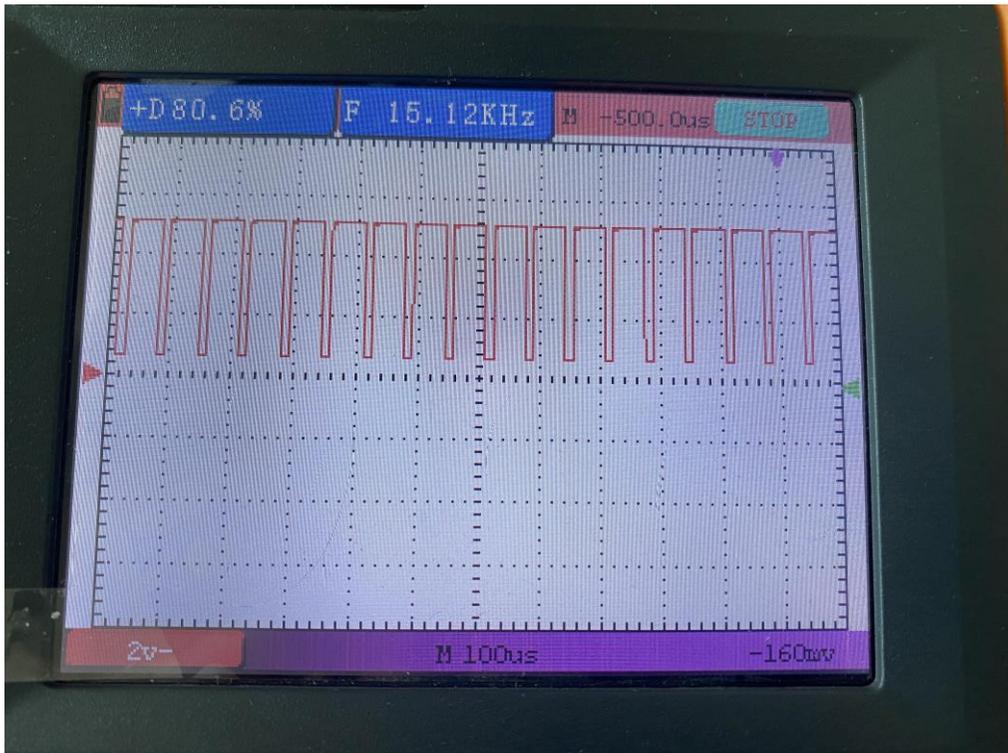


图 11 开关频率 15kHz，80%占空比

通过 TL494 生成双极性信号波形，利用单通道示波器测量其中一项波形，且通过实验可知，同一信号下的双极性信号波形互补。且通过实验结果可以看出，占空比越高，一个周期内正电压时间越长，为驱动直流电机提供了可调制信号。

## 2 编码器正交编码信号的四细分电路实验（5分）

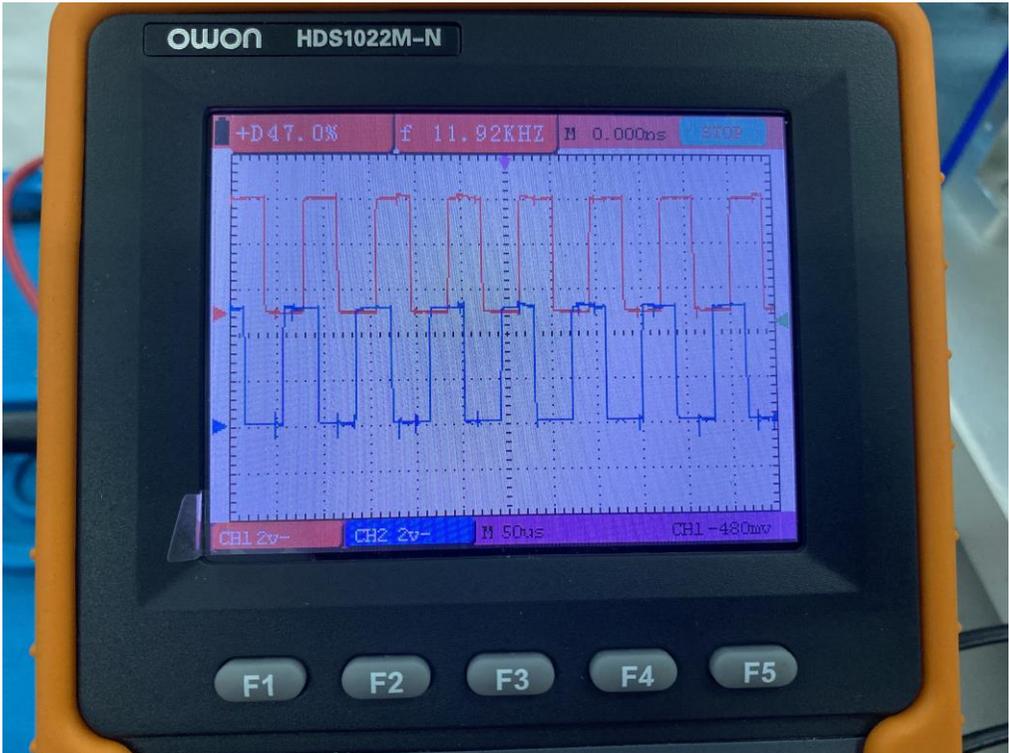


图 12 正转下正交编码信号 AB 相波形

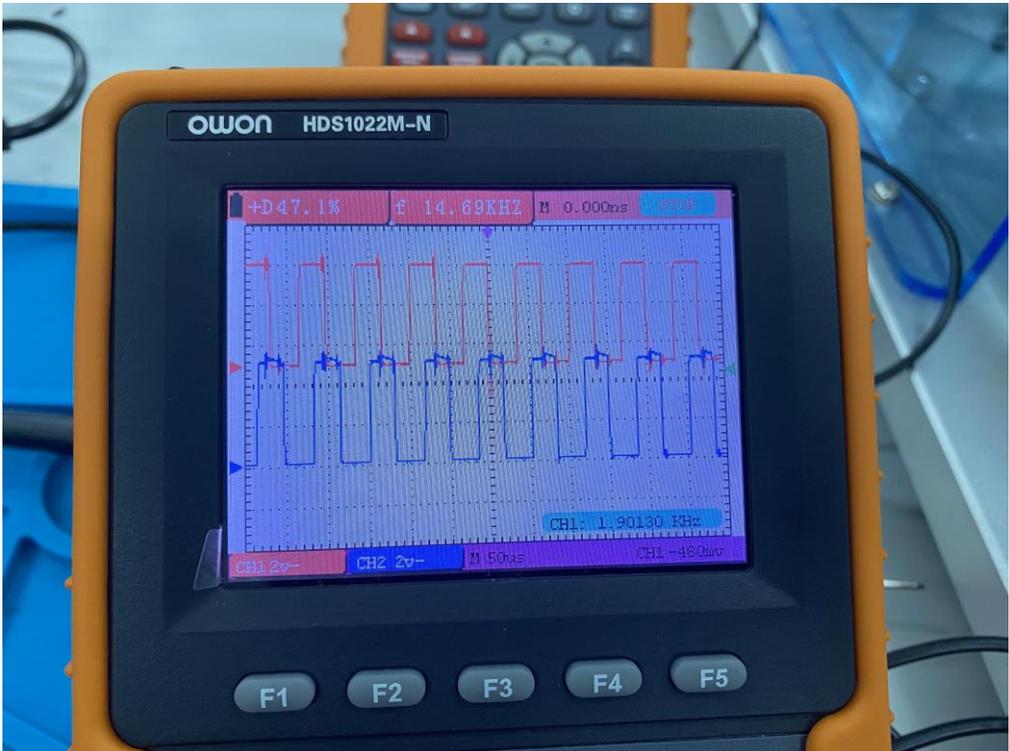


图 13 反转下正交编码信号 AB 相波形

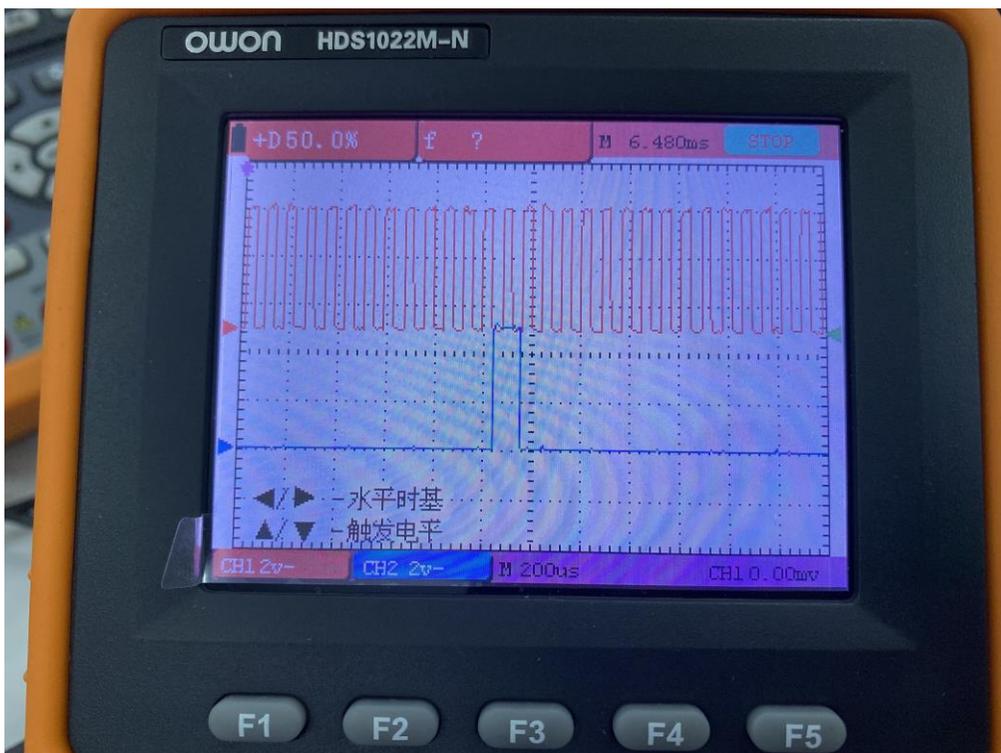


图 14 正交编码信号 AZ 相波形

本次实验中使用的光电编码器为增量式编码器，一圈有 2048 个脉冲信号，正转时 A 相超前 B 相四分之一个周期，反转时 A 相滞后 B 相四分之一个周期，可以由此判断某个时刻电机转动的方向。同时每旋转一周产生一个 Z 相零位脉冲信号，所以需要拉长检测时间，每 2048 个 A 相脉冲产生的同时产生 1 个 Z 相脉冲。

### 3 直流电动机的机械特性实验（6 分）

由直流电机静态调节特性可知，当直流电机稳定时有以下特性方程：

$$T_{em} = K_t I_a$$

$$E_a = C_e \Phi n$$

$$T_{em} - T_0 = T_L$$

$$U_a = I_a R_a + E_a$$

当  $n$  的单位取  $\text{rad/s}$  时， $K_e = C_e \Phi$ ，且所有单位均采用国际单位制（SI）时，有  $K_e = K_t$ ，因为总体数据量较少，计算出的  $K_t$  误差较大，则采取下面的方法：经过化简可得：

$$T_{em} = \frac{I_a}{n} E_a$$

电枢电流通过 ACS712 芯片串联接入电枢电路种，由  $U = 2.5 + 0.185 I_a$  可以求得。

当电机不外接发电机负载时，即可测出此时的空载阻转矩。利用公式  $T_L = T_{em} - T_0$  即可求得负载转矩。

机组转速的计算通过编码器测量频率进行计算，由于 Z 相脉冲的捕获存在困难，容易造成较大的实验误差，所以通过 A 相波形进行计算，当此时的频率为  $f$ ，则可以换算得此时的机组转速为  $n = \frac{2\pi f}{2048} rad/s$ ，则可以进行下一步计算。

实验结果记录如下：

#### 占空比 75%实验结果记录

负载情况	电枢电流 测量电压	电枢电流	电枢电压	转速对应频率	转速	电磁转矩
0	2.644	0.778378378	9.24	19.61	60.16272547	0.11954605
I 级负载	2.653	0.827027027	9.08	18.2	55.83689973	0.134488223
II 级负载	2.657	0.848648649	9.02	17.53	53.78136551	0.142332028
III 级负载	2.668	0.908108108	8.92	16.05	49.24078245	0.164504379

#### 占空比 80%实验结果记录

负载情况	电枢电 流 测量电 压	电枢电流	电枢电压	转速对应频率	转速	电磁转矩
I 级负载	2.661	0.87027027	9.08	29.4	90.19806879	0.087607796
II 级负载	2.674	0.940540541	9.02	28.39	87.09942765	0.097402198
III 级负载	2.699	1.075675676	8.92	24.6	75.47185348	0.127133846

#### 占空比 90%实验结果记录

负载情况	电枢 电流 测量 电压	电枢电流	电枢电压	转速对应频率	转速	电磁转矩
0	2.656	0.843243243	16.72	43.4	133.1495301	0.105888673
I 级负载	2.708	1.124324324	14.43	41.49	127.2897236	0.127457265
II 级负载	2.712	1.145945946	15.14	41.3	126.7068109	0.136927301
III 级负载	2.76	1.405405405	17.87	38.3	117.5029263	0.213735907

### 占空比 25%实验结果记录

负载情况	电枢 电流 测量 电压	电枢电流	电枢电压	转速对应频率	转速	电磁转矩
0	2.628	0.691891892	10.93	12.76	39.14718904	0.193178069
I 级负载	2.655	0.837837838	10.55	12.64	38.77903366	0.227937325
II 级负载	2.66	0.864864865	10.44	12.46	38.22680058	0.236200494
III 级负载	2.67	0.918918919	10.39	12.4	38.04272289	0.250969616

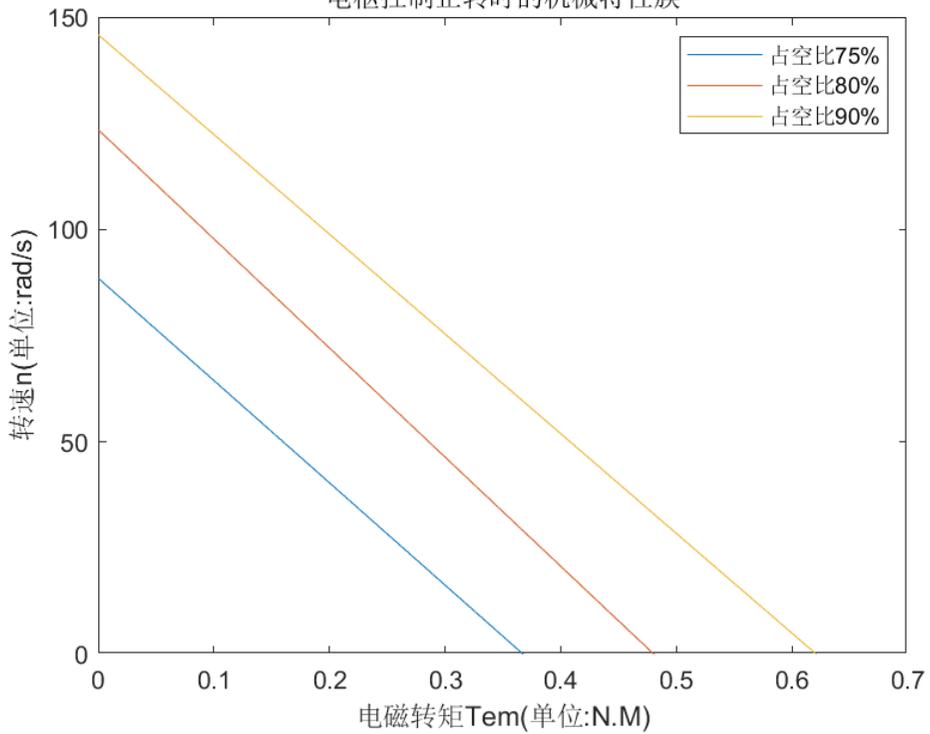
### 占空比 20%实验结果记录

负载情况	电枢 电流 测量 电压	电枢电流	电枢电压	转速对应频率	转速	电磁转矩
I 级负载	2.394	0.572972973	12.5	28	85.90292266	0.08337507
II 级负载	2.381	0.643243243	12.47	26.45	81.14758229	0.098847594
III 级负载	2.349	0.816216216	12.43	23.89	73.29360079	0.138423648

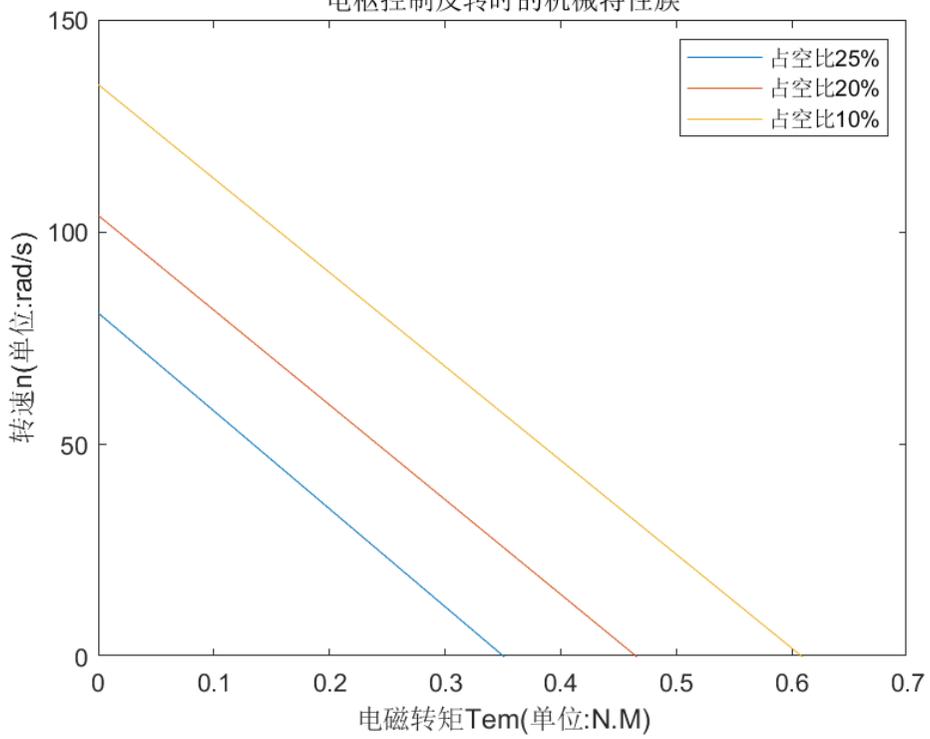
### 占空比 10%实验结果记录

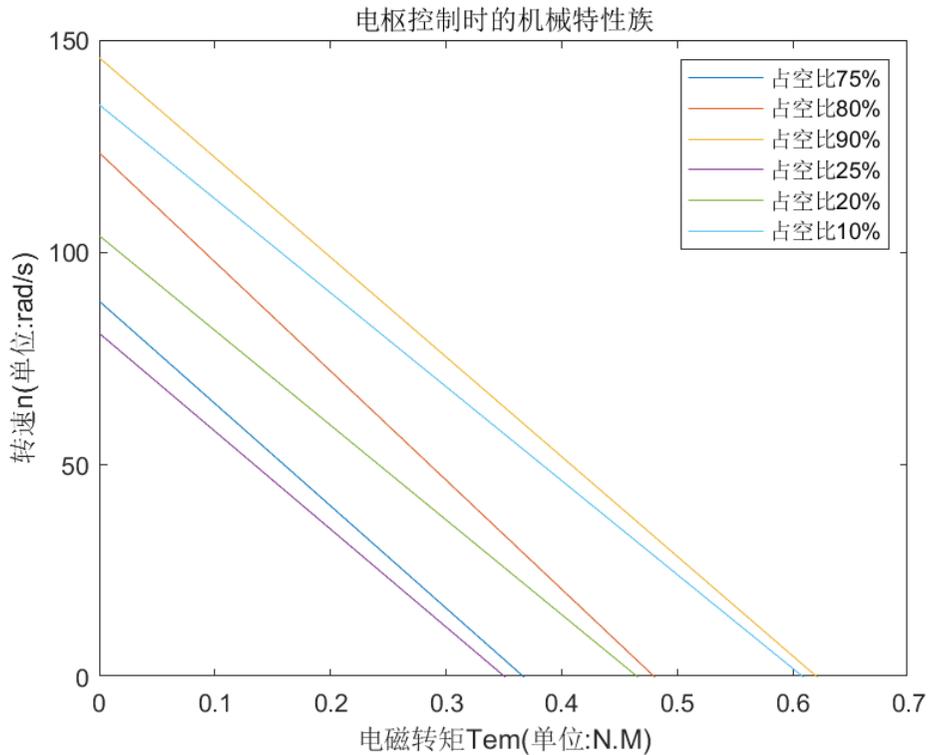
负载情况	电枢 电流 测量 电压	电枢电流	电枢电压	转速对应频率	转速	电磁转矩
I 级负载	2.391	0.589189189	15.14	41.49	127.2897236	0.070078904
II 级负载	2.309	1.032432432	14.43	40.2	123.3320532	0.120795848
III 级负载	2.24	1.405405405	13.91	38.3	117.5029263	0.166371935

电枢控制正转时的机械特性族



电枢控制反转时的机械特性族





通过最小二乘法进行直线拟合，得到上述点击机械特性族，与理论结果可以相互印证：

在一定的输入条件下，静态时电机的转速和电磁转矩呈线性关系  
 当占空比增大（正转时），直线截距上升，斜率在误差范围内保持不变。

#### 4 直流电动机电枢电流实验（6分）

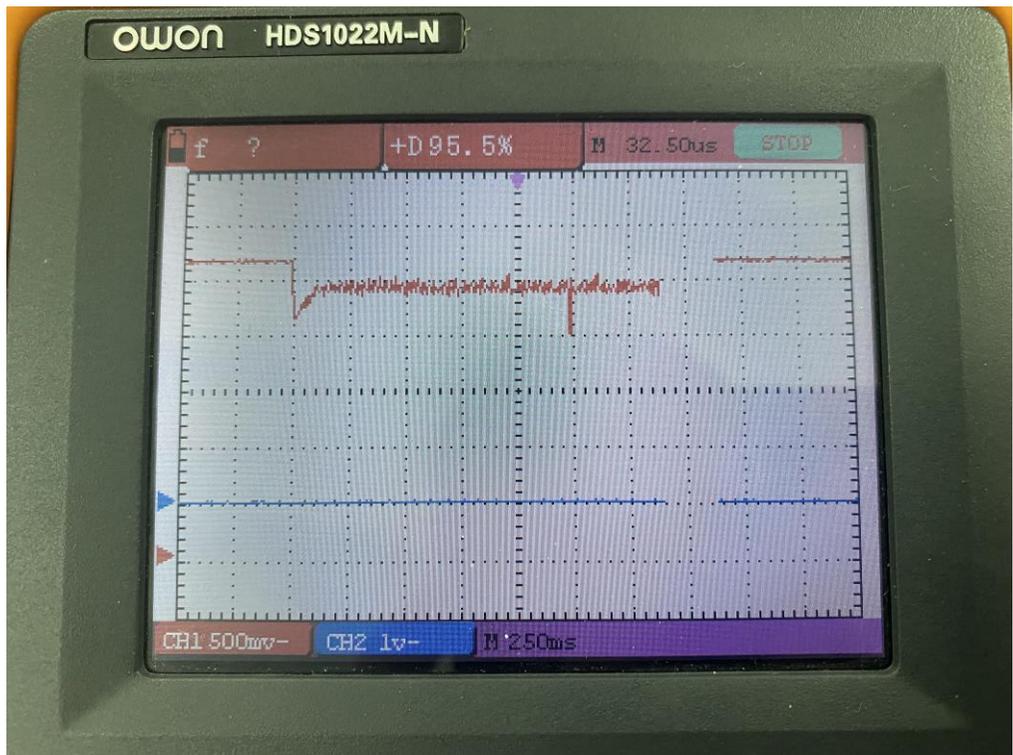


图 15 直流电动机启动时的电枢电流变化情况

当直流电机接入电路中时，会先出现一个瞬时的脉冲电流，随后趋于平稳。原因是当接入电路中时，各种频谱的信号较多，经过傅里叶变换分析可知会出现一个尖峰电流。

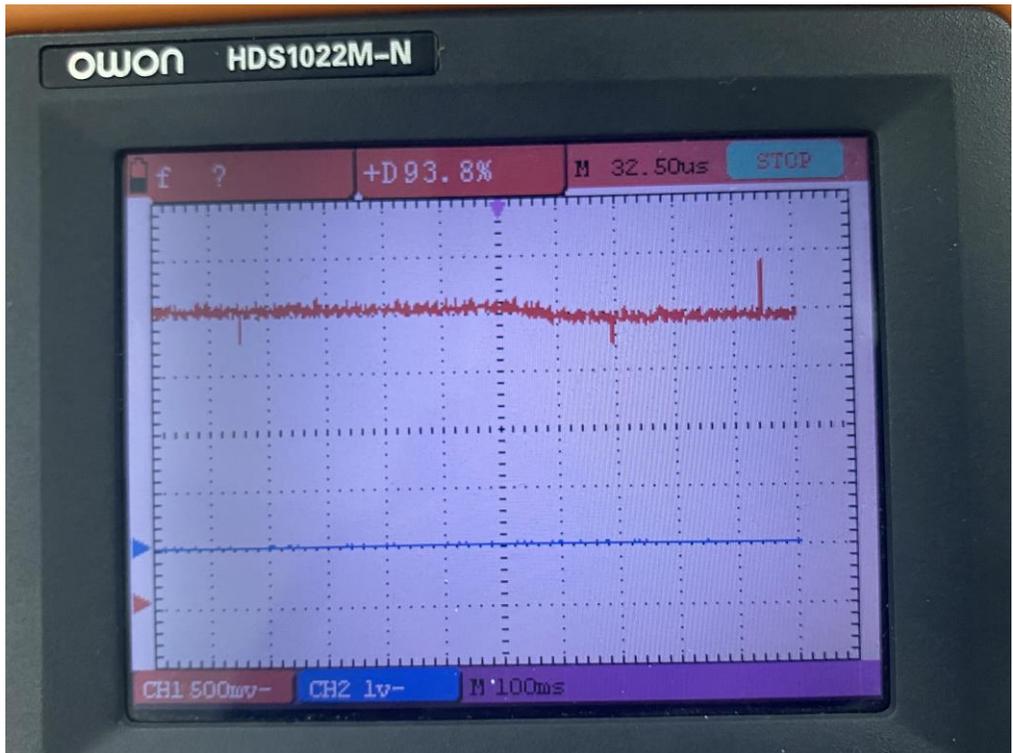


图 16 加载时电枢电流的变化情况

说明：电压小于 2.5，此时电机反向旋转，加载后电流增大，说明电磁转矩增大，即负载转矩增大，也因为带载增加，转速随之下降，符合直流电机的机械特性曲线。

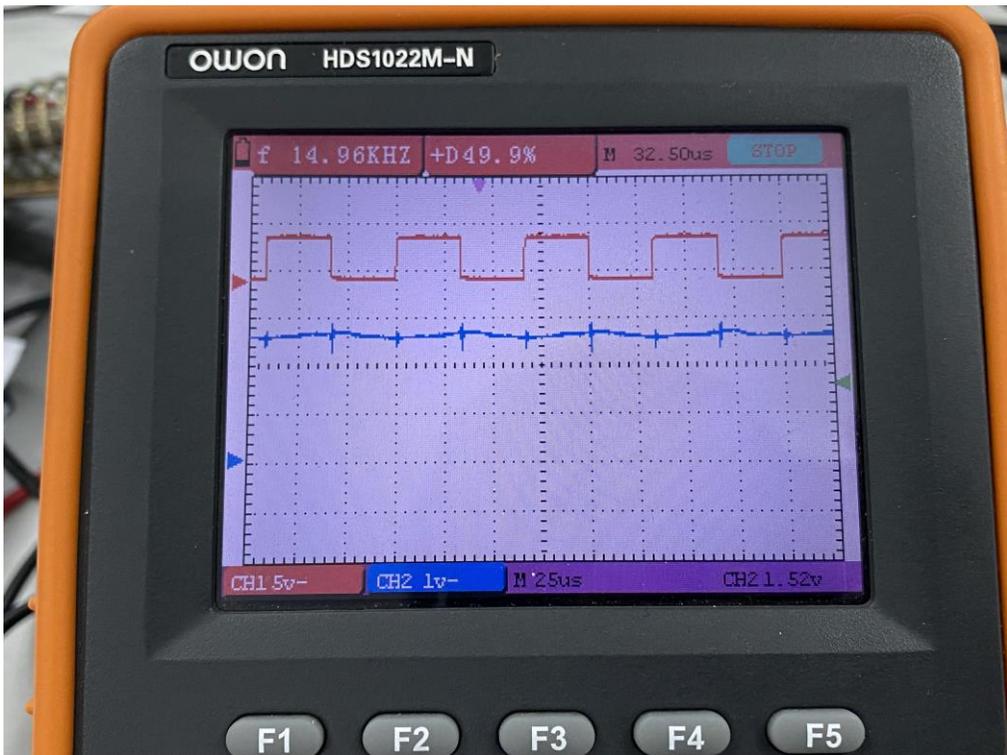


图 17 15KHZ 下电流波形



图 18 10KHZ 下电流波形

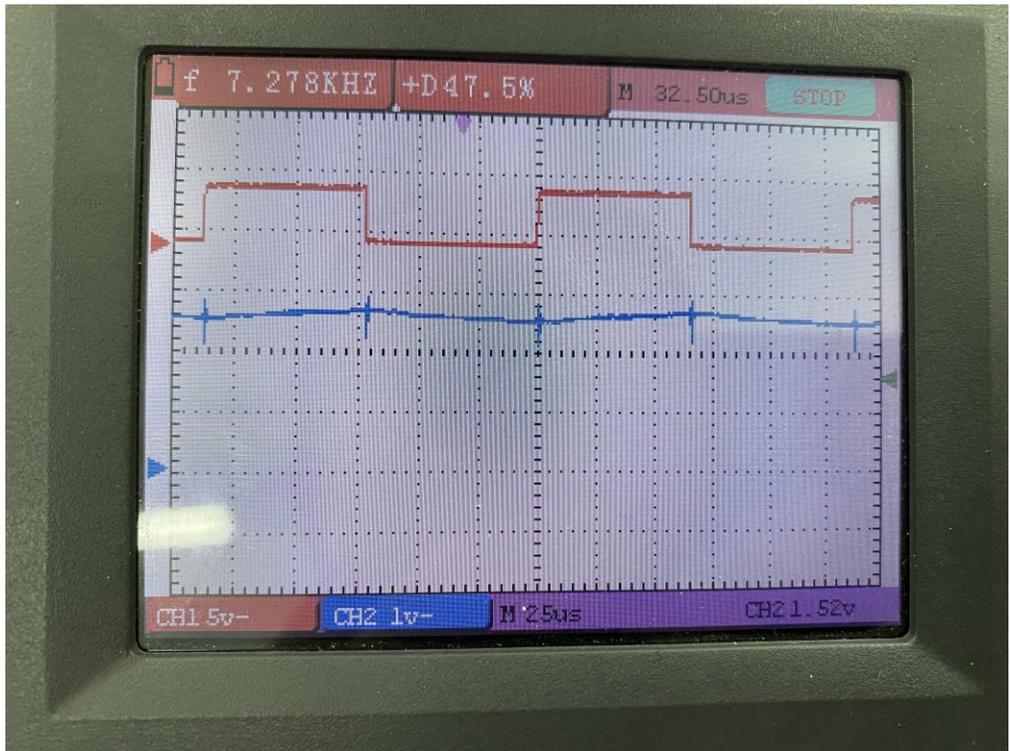


图 19 5KHZ 下电流波形

经过分析可知:双极性信号卡关频率变化时,电流波形的变化频率也随之改变,经过计算可知,二者频率保持一致,且当信号处于边沿状态时,此时存在死区信号,此时三极管处于开启-关闭状态,二极管开启进行续流,所以电流存在尖峰脉冲,进行状态的过渡。

#### 四、 遇到的问题及解决方法（1分）

第一次完成焊接,进行调试的时候电机无法旋转。

解决方法:

排查问题来源:发现 t1494 输出波形不对,无法生成目标方波,只有高电平输出或者低电平输出。检查 5 脚锯齿波输出,发现无法生成正确的锯齿波。于是进行了芯片更换,解决了双极性信号的输出问题。其余实验步骤均较为顺利。

#### 五、 结论与心得（1分）

大一时接触了 H 桥电路,但没能带动电机旋转,限于专业课水平,也无法进行调试。上完自控实践之后,对原理性知识有了全面的了解,能够通过自己的设计焊接出能够使用的电路,对知识的综合运用能力得到了锻炼和提升。