



哈爾濱工業大學(深圳)

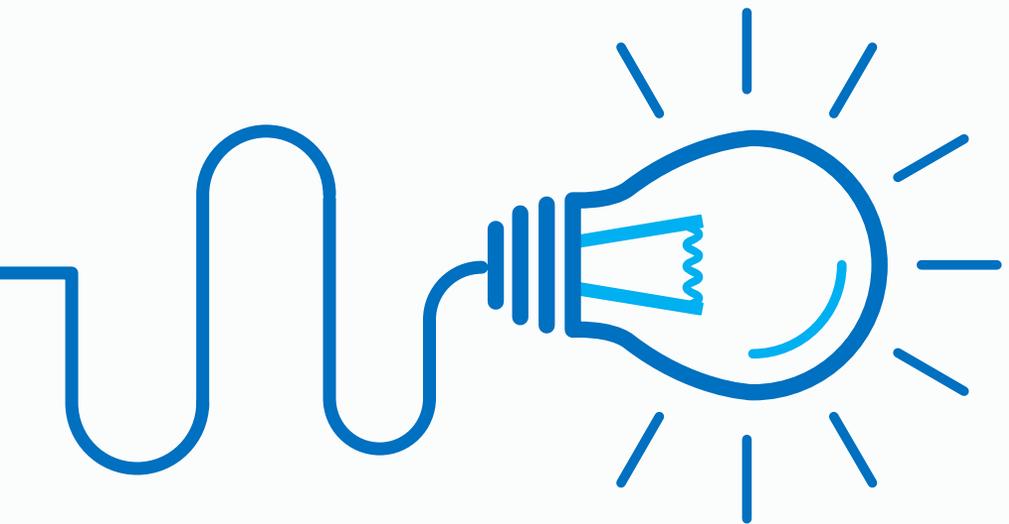
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, SHENZHEN

# 自动控制实践A课程设计 期末答辩

小组成员: \*\*\*

2023. 12. 16

规格严格 | 功夫到家



21级情况：每组答辩8分钟（含展示及提问）。

**本人制作的ppt及思路仅供参考，切勿抄袭，还没有设计电路的同学请退出本文档，一定要自行设计电路，理解电路的基本原理！！**

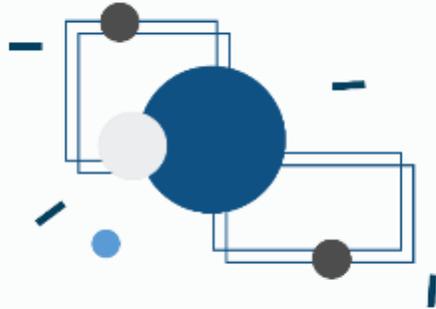
助教在上课时现场提出两个思考题。

1. 通过测量发现通过电机的平均电流为0.2A，尖峰电流也不超过L298损坏的电流3A。则为何L298还是容易烧坏？
2. 编码器输出信号有很多有规律的毛刺。此种噪声的来源？

供大家思考。



# 目 录



**一 课程设计任务、目标与要求**

**二 实验实施过程**

**三 总结与心得体会**



—

# 课程设计任务、目标与要求

# 一、课程设计任务、目标与要求

## 课程目标

进一步夯实《实践A》讲述电机工作原理与驱动原理，学以致用，**主要目标：**

- 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。
- 掌握编码器的工作原理与输出信号处理方法。
- 掌握直流电动机的特性及测试方法。
- 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。
- 掌握控制系统的构成以及搭建控制系统的能力，提高动手实践意识，为毕业设计等后续课程奠定必要的实践基础。

## 主要内容

- 1 设计并实现直流电机的**脉冲宽度调制(PWM)功率放大器**并以此驱动电机。
- 2 **采集编码器信号**，设计编码器正交编码信号的**四细分电路**。
- 3 通过电流传感器**测试直流电机电枢电流**。
- 4 测试直流电动机的**机械特性、调压调速等**。

# 一、课程设计任务、目标与要求

## 整体电路设计方案

## 框图:

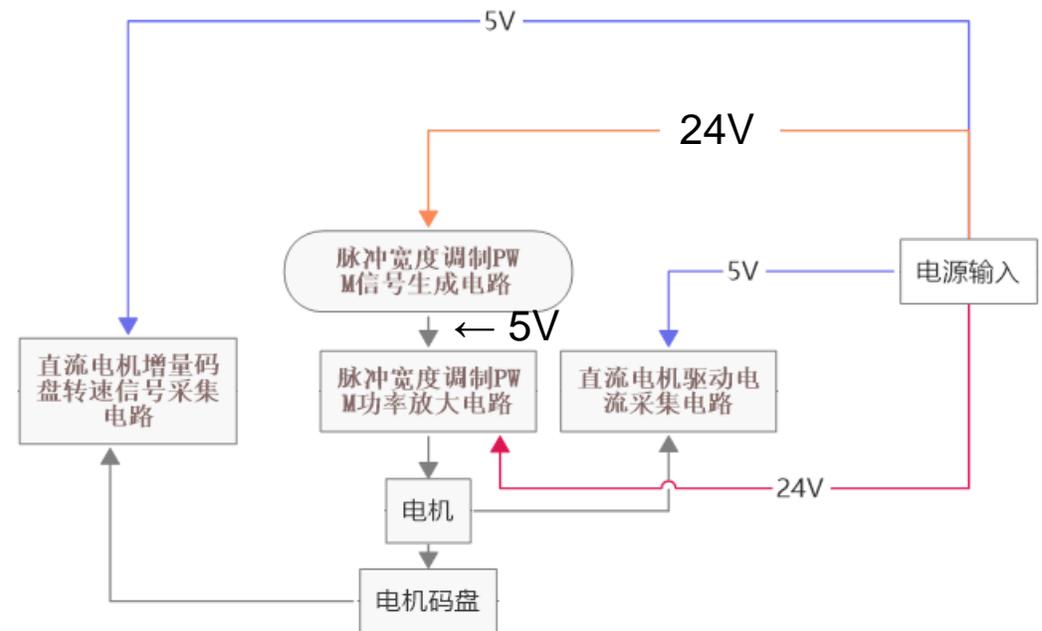
- 1

脉冲宽度调制PWM信号生成电路  
作用：生成PWM信号
- 2

脉冲宽度调制PWM功率放大电路  
作用：放大PWM信号使之能驱动电机
- 3

直流电机增量码盘转速信号采集电路  
作用：采集码盘AB相信号
- 4

直流电机驱动电流采集电路  
作用：采集电机电流信号



# 一、课程设计任务、目标与要求

## 整体电路设计方案

## 对应控制元件实物及名称

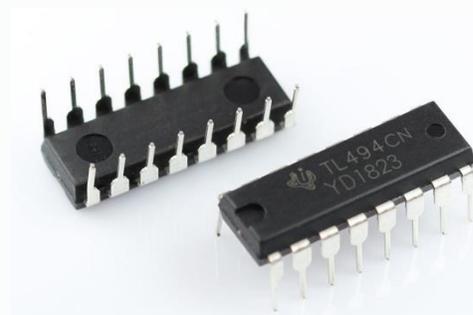
- 1** 脉冲宽度调制PWM信号生成电路  
作用：生成PWM信号
- 2** 脉冲宽度调制PWM功率放大电路  
作用：放大PWM信号使之能驱动电机
- 3** 直流电机增量码盘转速信号采集电路  
作用：采集码盘AB相信号
- 4** 直流电机驱动电流采集电路  
作用：采集电机电流信号



### TL494芯片

#### 主要功能：

在单个芯片上集成了构建脉宽调制(PWM)控制电路所需的所有功能，能生成单路/并行(parallel)或推挽(push-pull)输出的PWM信号，常用于设计电源电路（如开关电源）。  
本实验用于生成驱动电机所需的PWM信号。



封装：DIP-16

# 一、课程设计方案、目标与要求

## 整体电路设计方案

- 1 脉冲宽度调制PWM信号生成电路  
作用：生成PWM信号
- 2 脉冲宽度调制PWM功率放大电路  
作用：放大PWM信号使之能驱动电机
- 3 直流电机增量码盘转速信号采集电路  
作用：采集码盘AB相信号
- 4 直流电机驱动电流采集电路  
作用：采集电机电流信号



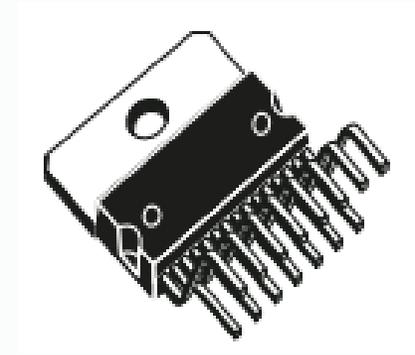
## 对应控制元件实物及名称

### L298芯片

#### 主要功能：

双路全桥电机驱动电路。

接收TL494给出的PWM信号并起到功率放大作用，生成能驱动电机的脉冲信号。



封装：Multiwatt15 V

# 一、课程设计任务、目标与要求

## 整体电路设计方案

- 1 脉冲宽度调制PWM信号生成电路  
作用：生成PWM信号
- 2 脉冲宽度调制PWM功率放大电路  
作用：放大PWM信号使之能驱动电机
- 3 直流电机增量码盘转速信号采集电路  
作用：采集码盘AB相信号
- 4 直流电机驱动电流采集电路  
作用：采集电机电流信号



## 对应控制元件实物及名称

### 霍尔编码器数据



### 编码器参数

类型	AB双相增量式磁性霍尔编码器
线速	基础脉冲17 PPR×齿轮减速比
供电电压	DC 3.3V / DC5.0
基本功能	自带上拉整形电阻，单片机直连
接口类型	PH2.0-4PIN (标配连接线)
电机电源供电接口类型	VH3.96-2PIN(标配连接线)
输出信号类型	方波 AB相
响应频率	100KHz
基础脉冲数	17 PPR
磁环触发极数	34极 (17对极)

# 一、课程设计方案、目标与要求

## 整体电路设计方案

- 1** 脉冲宽度调制PWM信号生成电路  
作用：生成PWM信号
- 2** 脉冲宽度调制PWM功率放大电路  
作用：放大PWM信号使之能驱动电机
- 3** 直流电机增量码盘转速信号采集电路  
作用：采集码盘AB相信号
- 4** 直流电机驱动电流采集电路  
作用：采集电机电流信号

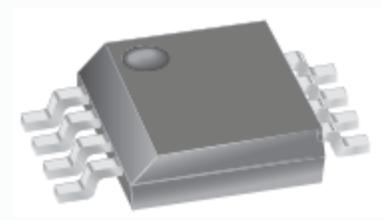


## 对应控制元件实物及名称

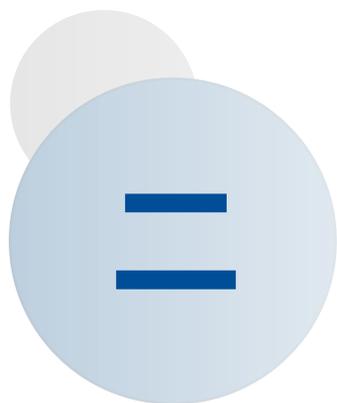
### ACS712芯片

#### 主要功能：

通过一内置的霍尔电路实现交/直流电流传感功能。流过芯片内置铜传导层的外加电流产生磁场，霍尔变换器将该磁场转换为与电流成正比的电压。



封装：SOIC-8



**二**

# **实验实施过程**

## 二、实验实施过程——(1) PWM信号生成电路

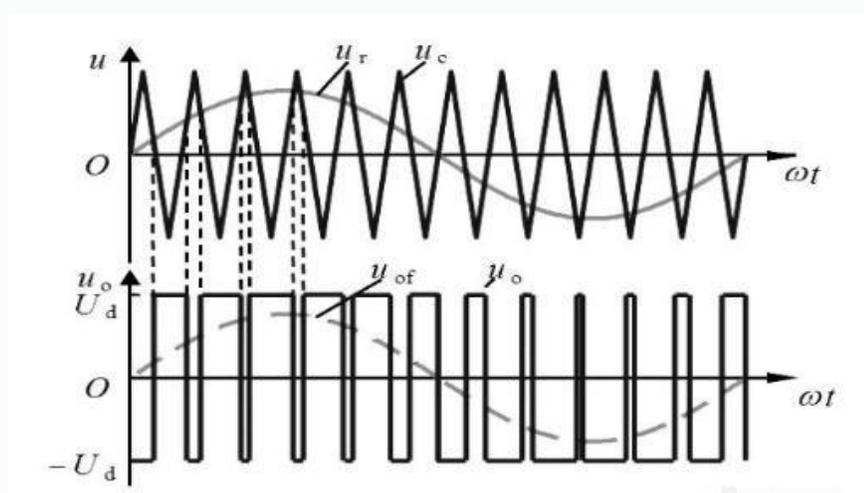
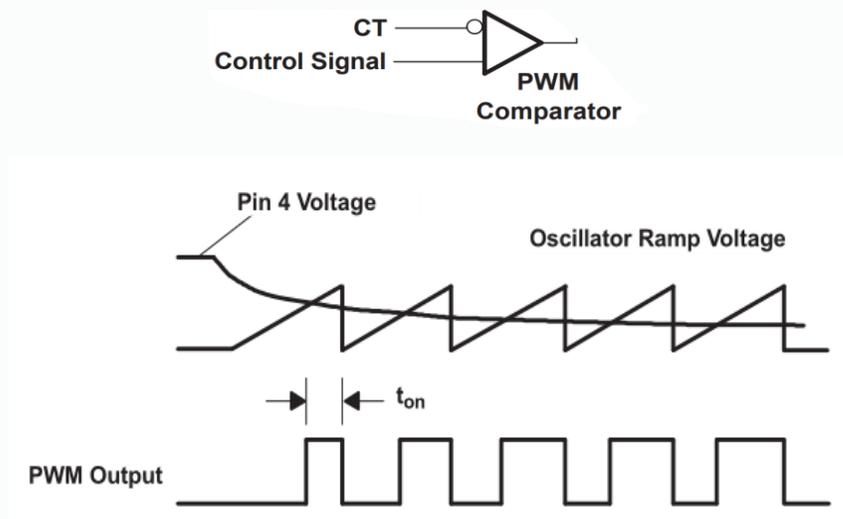
### PWM信号的生成原理

PWM生成的原理是通过将一参考锯齿波/三角波与所需要合成的波形进行比较，来确定PWM输出的极性。

例如：

**(一) 某一模拟信号的调制：**锯齿波从比较器反相端输入，当控制信号瞬时值大于它时，输出高电平；小于它时，则输出低电平。

**(二) 正弦脉宽调制 (SPWM)：**将输入的正弦电压与参考双极性三角波作比较。若输入的正弦电压瞬时值高于三角波，则输出正电平；反之则输出负电平。



## 二、实验实施过程——(1) PWM信号生成电路

### TL494芯片主要工作特性：(1) 供电

- 给定的电路板上留有的各电源接口都在TL494所需的电压范围内（见表1、2）即**供电要求可以满足**。

- TL494内置**5V 基准稳压器**，输出端为REF 引脚。除了给各比较器提供稳定的供电之外，还具有10mA 的负载电流能力，**可用于附加偏置电路（例如作用于误差放大器、死区时间比较器等）**。

表1 极限参数

物理量	描述	最小值	最大值	单位
V <sub>CC</sub>	供电电压		41	V
V <sub>I</sub>	放大器输入电压		V <sub>CC</sub> +0.3	V
V <sub>O</sub>	集电极输出电压		41	V
I <sub>O</sub>	集电极输出电流		250	mA

表2 运行时推荐参数

物理量	描述	最小值	最大值	单位
V <sub>CC</sub>	供电电压	7	40	V
V <sub>I</sub>	放大器输入电压	-0.3	V <sub>CC</sub> -2	V
V <sub>O</sub>	集电极输出电压		40	V
I <sub>O</sub>	集电极输出电流		200	mA

表3 参考电源部分特性

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
输出参考电压	I <sub>O</sub> =1mA	4.75	5	5.25	V
输入调节	V <sub>CC</sub> =7V 到 40V		2	25	mV
输出调节	I <sub>O</sub> =1mA 到 10mA		1	15	mV
短路电流			25		mA

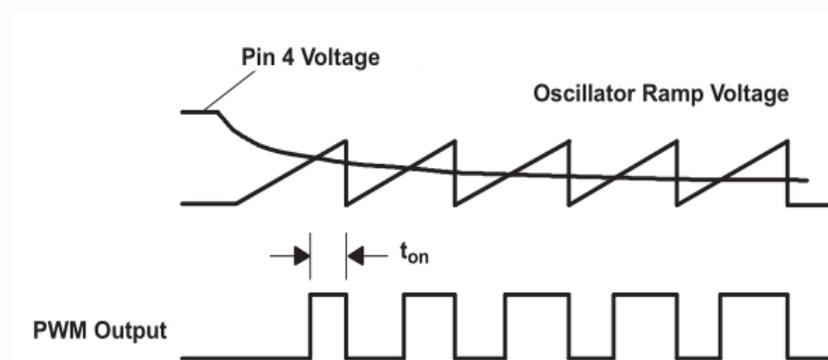
## 二、实验实施过程——(1) PWM信号生成电路

### TL494芯片主要工作特性： (2) 内置振荡器

- TL494内置了一个锯齿波振荡器。振荡器输出幅值为3V，为死区时间和PWM比较器提供正锯齿波形，以便与各种控制信号进行比较。振荡器的频率通过选择计时组件  $R_T$  和  $C_T$  进行设定。振荡器的频率可由下式计算：

$$f = \frac{1}{R_T \times C_T}$$

- L298N的换向频率典型值为25kHz，我们实验中用到的频率是5kHz、10kHz和15kHz，而TL494的振荡频率范围在1—300kHz，可以满足要求，且内部振荡器稳定性很好（见右边表格）。



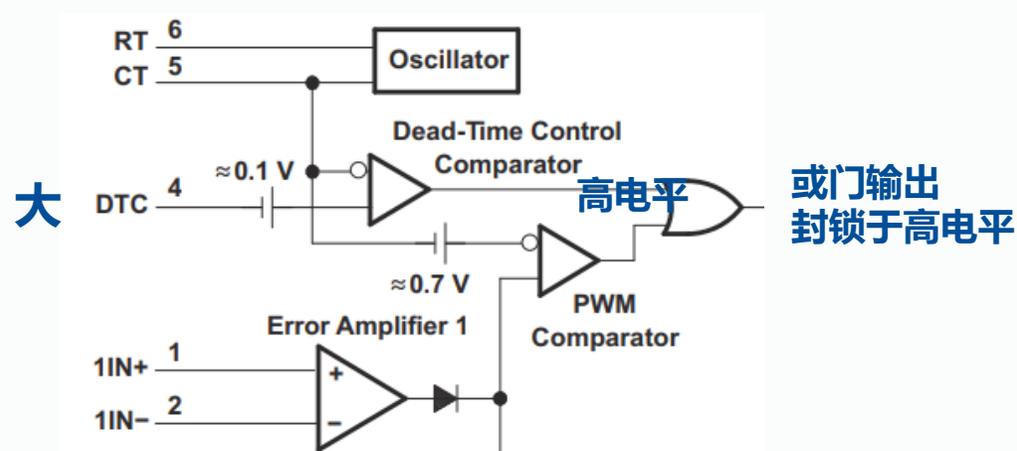
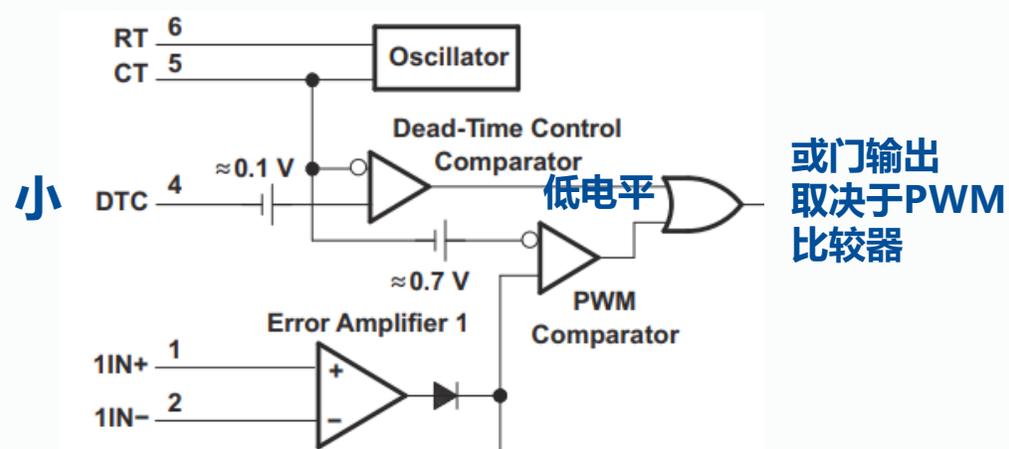
参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
F <sub>osc</sub> (振荡频率)	/	1	40 <sup>(1)</sup>	300	kHz
C <sub>T</sub> 【定时电容】	/	0.47	0.001 <sup>(1)</sup>	10000	nF
R <sub>T</sub> 【定时电阻】	/	1.8	30 <sup>(1)</sup>	500	kΩ
频率的标准差	所有 V <sub>CC</sub> 、C <sub>T</sub> 、R <sub>T</sub> 和 T <sub>A</sub> 常数值		100		Hz/kHz
频率随电压的变化	V <sub>CC</sub> = 7V 至 40V, T <sub>A</sub> = 25° C		1		Hz/kHz
频率随温度的变化	ΔT <sub>A</sub> = 最小值至最大值			10	Hz/kHz

## 二、实验实施过程——(1) PWM信号生成电路

### TL494芯片主要工作特性： (3) PWM占空比调节

TL494芯片中涉及PWM占空比调节的功能有下列这几个：

- **1. 死区时间比较器：当4脚电压大于振荡器输出时，死区时间比较器封锁输出于高电平；否则输出随振荡器变化。**当输入电压从0V变化到3.3V时，死区时间从97%到0线性变化，对应占空比最小值3%到100%。即**占空比的最大值随4脚输入电压增大而线性下降。**

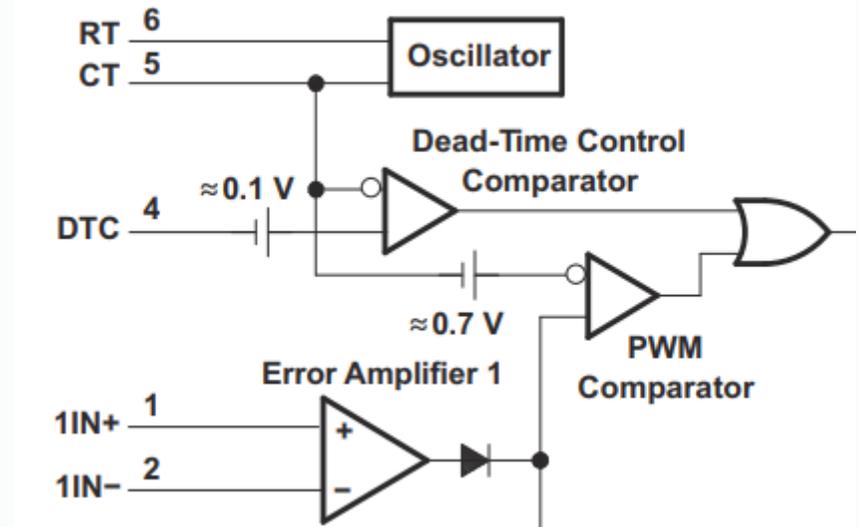


## 二、实验实施过程——(1) PWM信号生成电路

### TL494芯片主要工作特性： (3) PWM占空比调节

TL494芯片中涉及PWM占空比调节的功能有下列这几个：

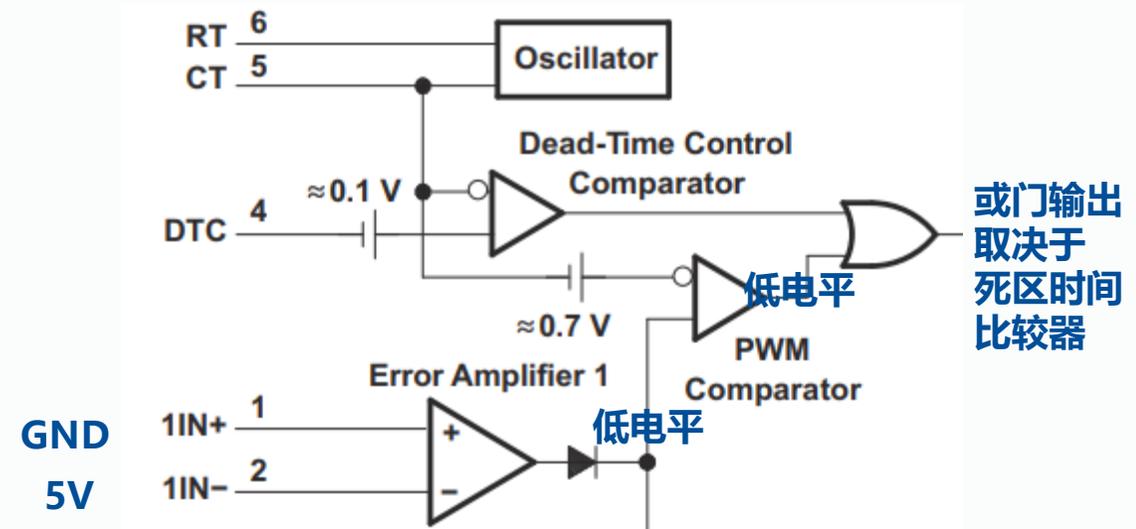
- **2. PWM比较器：**它将振荡器输出的电压与误差放大器输出端的控制信号进行比较。随着误差放大器输出端（或3脚Feedback输入端）的电压从0.5V变化到3.5V，输出占空比从97%线性变化到0。即**占空比的最大值随3脚电压增大而线性下降。**
- **两个比较器输入电压对占空比的作用：**简单说，3脚（误差放大器输出）和4脚两者哪个电压更大，就由哪个主导。



## 二、实验实施过程——(1) PWM信号生成电路

### TL494芯片主要工作特性： (3) PWM占空比调节

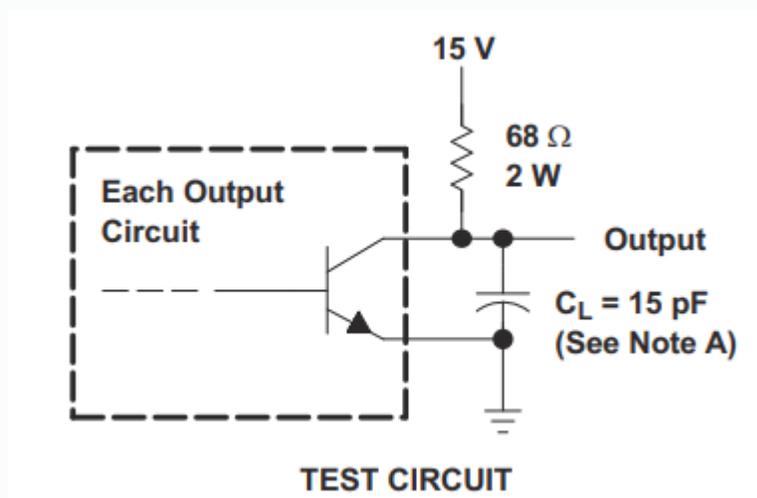
- 两个误差放大器都关断时，3脚（误差放大器输出）、PWM比较器输出均为低电平，输出波占空比仅决定于死区时间比较器。
- 因此，本实验中我们封锁误差放大器（同相输入端接地、反相输入端接之前提到的内置5V基准电压源），利用死区时间比较器，通过改变4脚电压来控制输出的占空比，4脚电压越高，占空比越低。



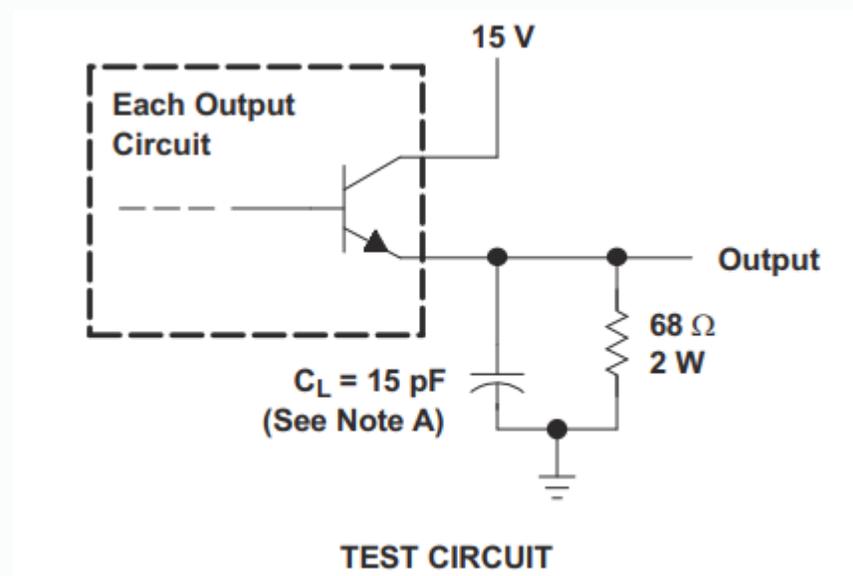
## 二、实验实施过程——(1) PWM信号生成电路

### TL494芯片主要工作特性： (4) 输出级

- L298N需要两路反相的输入来控制H桥开闭，**TL494输出级可接成共射和共集两种配置**，可以很方便地生成两路反相PWM信号。



共射配置



共集配置

## 二、实验实施过程——(1) PWM信号生成电路

### TL494芯片主要工作特性： (4) 输出级

- 如表1、2, TL494输出电压最大可达40V, 覆盖了L298N 输入逻辑高电平VSS (约5V) 的要求, 合理配置电源, 即可防止高电平被L298N误认。
- 根据L298N数据表和表5, TL494无论是共射还是共集, 输出的**低电平** (对于共射, 饱和时输出低电平; 对于共集, 截止时接地) 都不会被L298N误认为高电平。

表1 极限参数

物理量	描述	最小值	最大值	单位
V <sub>CC</sub>	供电电压		41	V
V <sub>I</sub>	放大器输入电压		V <sub>CC</sub> +0.3	V
V <sub>O</sub>	集电极输出电压		41	V
I <sub>O</sub>	集电极输出电流		250	mA

表2 运行时推荐参数

物理量	描述	最小值	最大值	单位
V <sub>CC</sub>	供电电压	7	40	V
V <sub>I</sub>	放大器输入电压	-0.3	V <sub>CC</sub> -2	V
V <sub>O</sub>	集电极输出电压		40	V
I <sub>O</sub>	集电极输出电流		200	mA

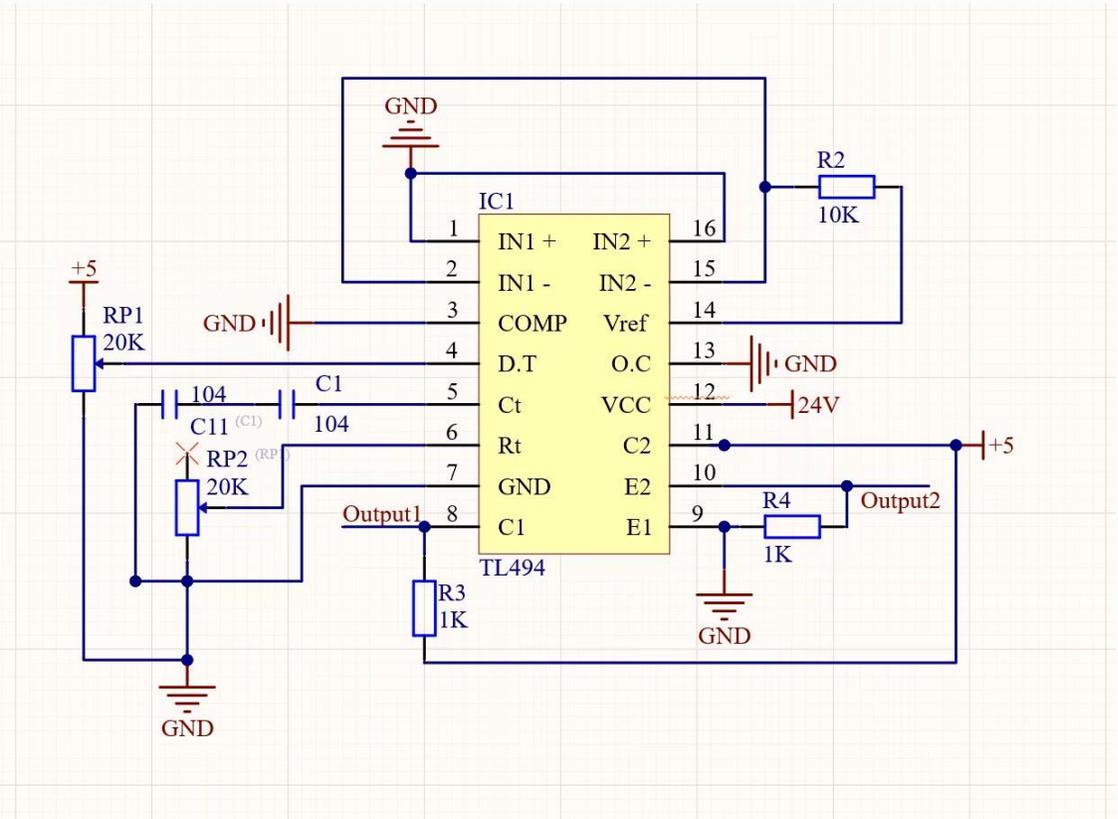
表5 输出特性

参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
集电极关断状态电流	V <sub>CE</sub> = 40V, V <sub>CC</sub> = 40V	2		100	μA
发射极关断状态电流	V <sub>CC</sub> = V <sub>C</sub> = 40V, V <sub>E</sub> = 0			-100	μA
集电极 - 发射极饱和电压 (共射接法)	V <sub>E</sub> = 0, I <sub>C</sub> = 200mA		1.1	1.3	V
集电极 - 发射极饱和电压 (共集接法)	V <sub>O</sub> (C1/C2) = 15V, I <sub>E</sub> = -200mA		1.5	2.5	V

## 二、实验实施过程——(1) PWM信号生成电路

### 电路设计思路及各引脚连接图

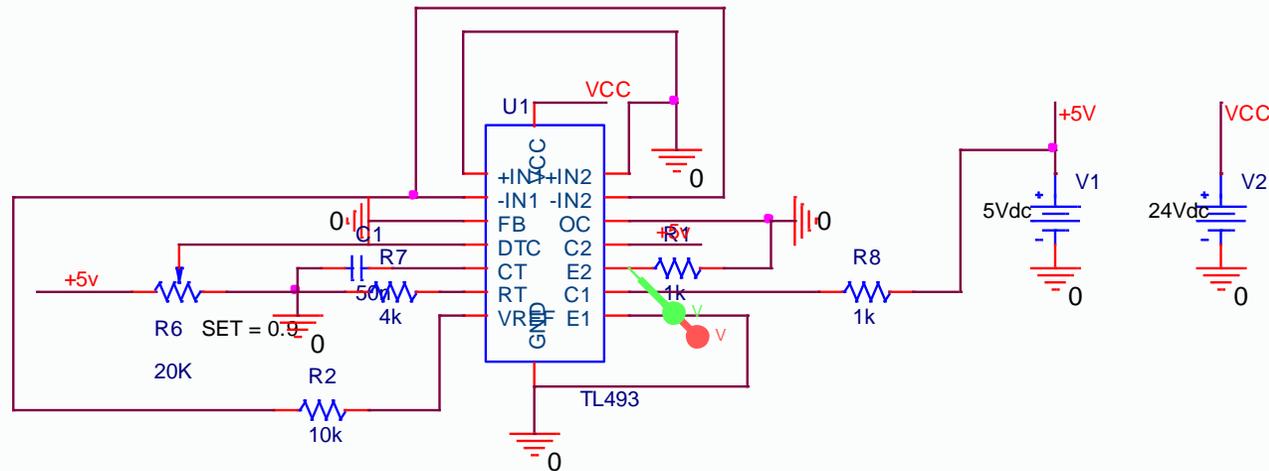
- 需要测试的频率有5kHz、10kHz和15kHz，则  $C_T$  采用两个104（100nF）电容串联， $R_T$  采用20k $\Omega$ 电位器，可调频率最低可达1kHz，符合要求。
- 利用死区时间比较器，通过改变4脚电压来控制输出的占空比，4脚电压越高，占空比越低。
- TL494的两个输出管分别接成共射和共集配置，生成两路反相PWM信号，分别输出给L298N的INA和INB。



## 二、实验实施过程——(1) PWM信号生成电路

### 仿真实验及结果

建立仿真电路图如下。SET = 0.9代表滑动变阻器滑动端左侧电阻占总阻值的0.9倍，即分到DTC引脚上的电压为0.5V，则预期占空比为 $100\% - (0.5V + 110mV) / 3V \times 100\% = 79.7\%$ 。频率通过4k电阻和50nF电容设置为5kHz。

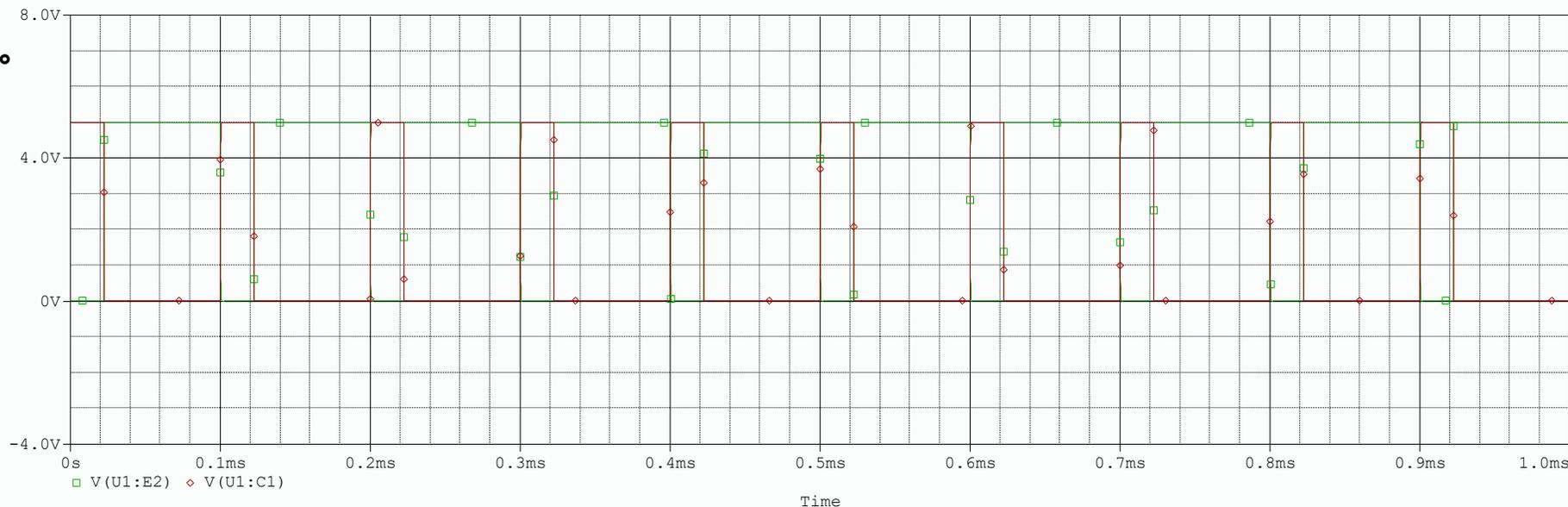


【注】使用TL493的原因：在德州仪器的官网查找SPICE模型，得到工程师的回应是 *TL494 is a legacy PWM controller, well established and well supported but unfortunately TI does not have a SPICE model for the TL494.* 意思是，无法提供TL494的SPICE模型。在Cadence OrCAD PSpice **16.6**中仅提供了TL493的模型。查阅TL493的数据手册（web archive上找到，1988年修订版，德州仪器官网已不提供），发现仅有一个误差放大器不同，而我们设计的电路封锁了误差放大器。因此可以使用TL493模型仿真。

## 二、实验实施过程——(1) PWM信号生成电路

### 仿真实验及结果

建立仿真电路图如下。SET = 0.9代表滑动变阻器滑动端左侧电阻占总阻值的0.9倍，即分到DTC引脚上的电压为0.5V，则预期占空比为 $100\% - (0.5V+110mV)/3V \times 100\% = 79.7\%$ 。频率通过4k电阻和50nF电容设置为5kHz。



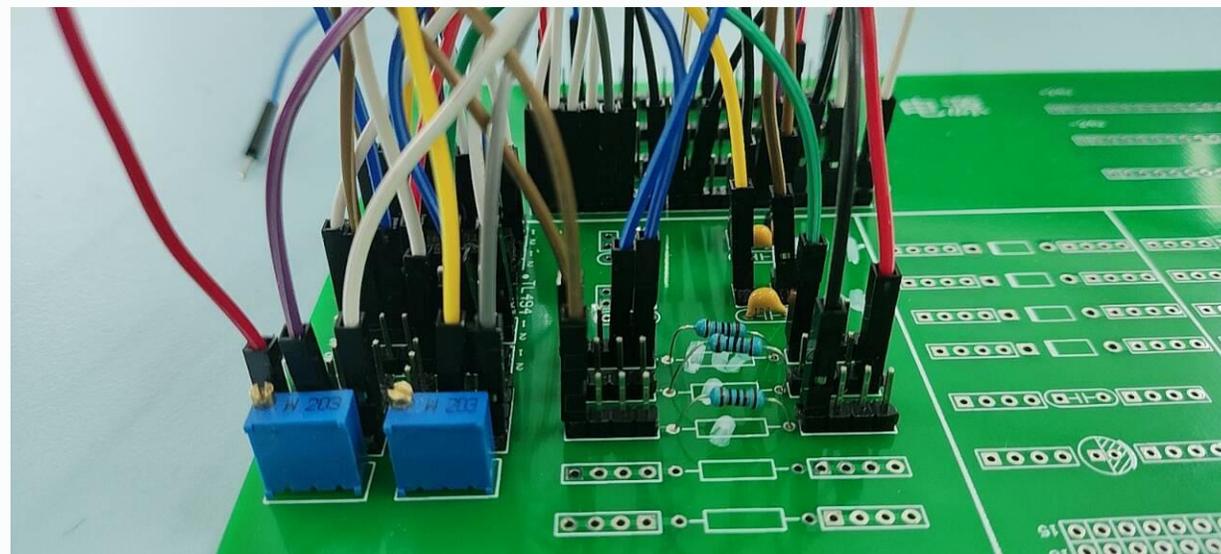
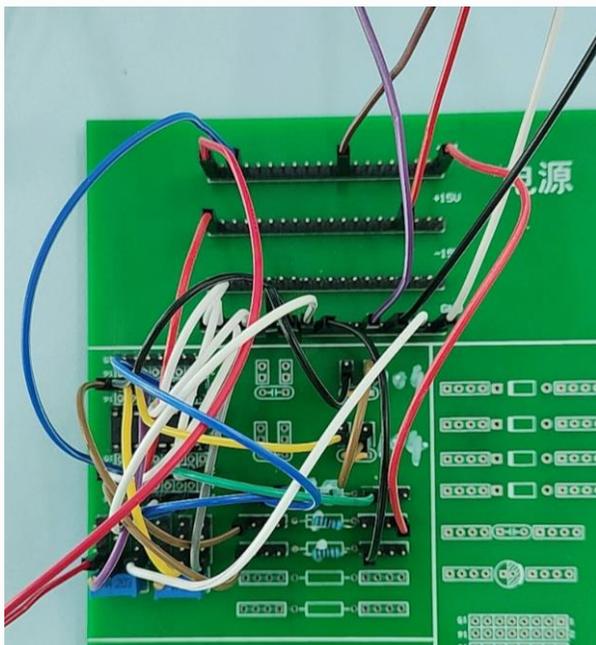
【注】使用TL493的原因：在德州仪器的官网查找SPICE模型，得到工程师的回应是 *TL494 is a legacy PWM controller, well established and well supported but unfortunately TI does not have a SPICE model for the TL494.* 意思是，无法提供TL494的SPICE模型。在Cadence OrCAD PSpice **16.6**中仅提供了TL493的模型。查阅TL493的数据手册（web archive上找到，1988年修订版，德州仪器官网已不提供），发现仅有一个误差放大器不同，而我们设计的电路封锁了误差放大器。因此可以使用TL493模型仿真。

## 二、实验实施过程——(1) PWM信号生成电路

### 电路焊接图

步骤:

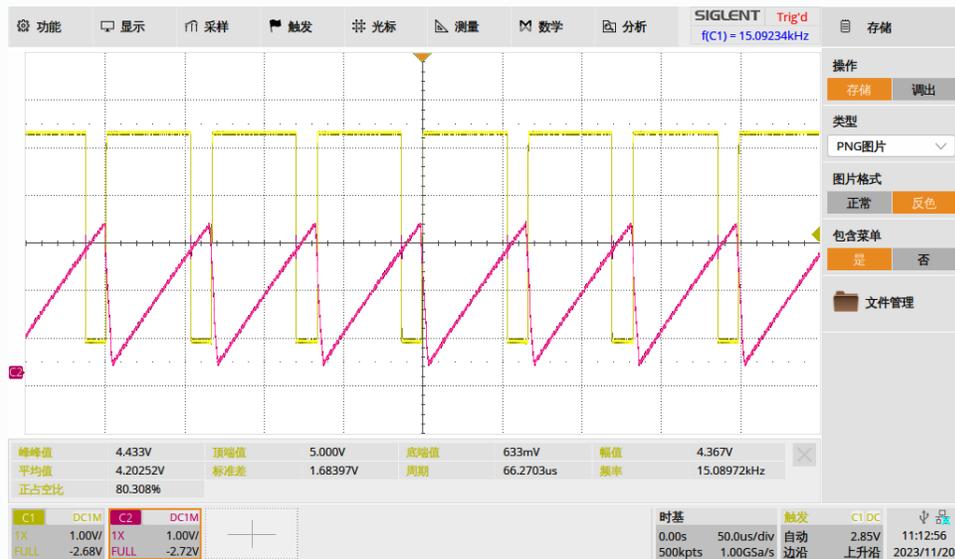
- ① 使用2.54标准间距的排针焊接到提供的PCB板上;
- ② 根据电路设计取合适的电阻电容焊接到电路板上;
- ③ 根据电路设计焊芯片座和滑动变阻器;
- ④ 最后插上芯片, 在对应位置排针接上杜邦线。



## 二、实验实施过程——(1) PWM信号生成电路

### PWM信号生成调试

- 首先检测电源部分，24V、5V供电均正常且电流很小。
- 接着检测4脚（死区时间比较器）的电压，可随变阻器阻值变化而变化。
- 接着，设置好示波器倍率，用示波器检测8脚（正向输出端）、10脚（反向输出端）和5脚（振荡器输出端）的电压，如下两张图所示。



5脚和8脚输出信号

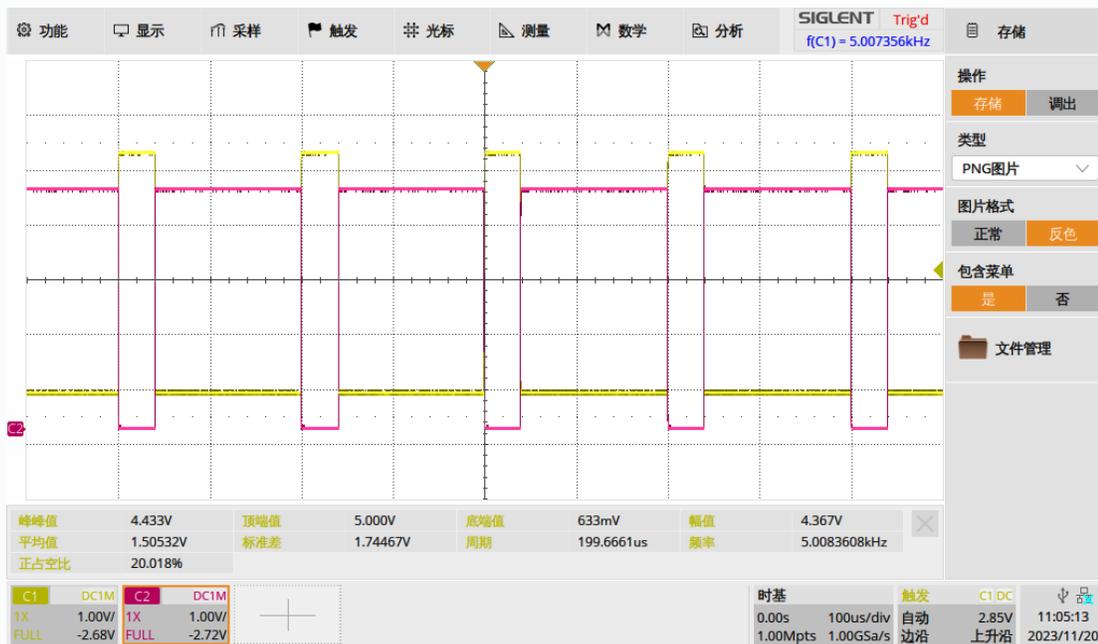


10脚和8脚输出信号

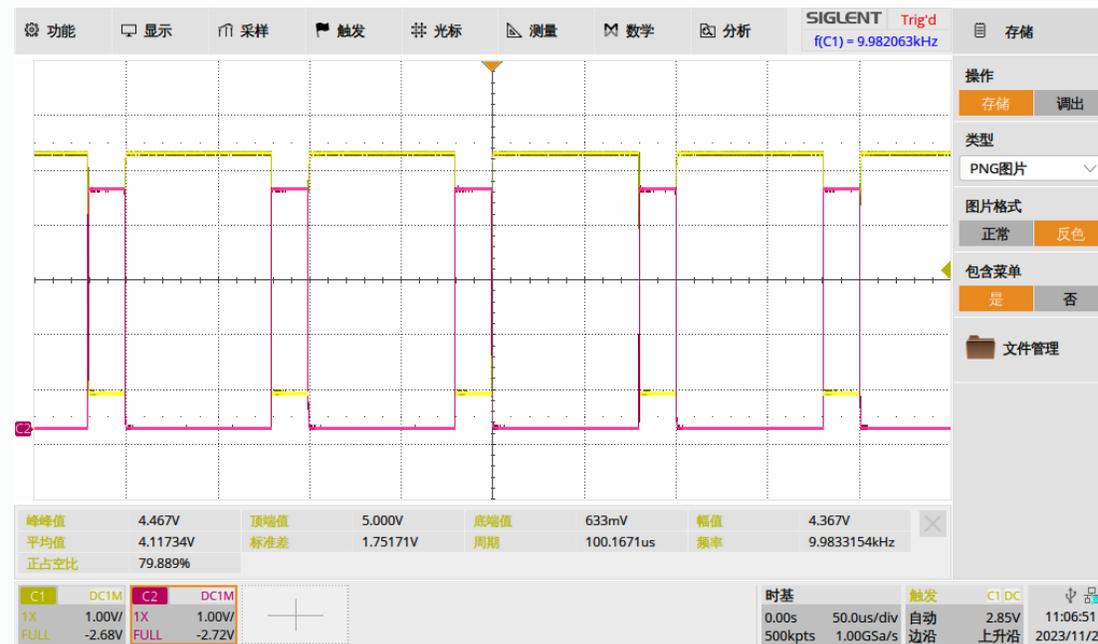
## 二、实验实施过程——(1) PWM信号生成电路

### TL494输出的PWM信号实测波形

- 改变输出的PWM频率，改变PWM占空比，记录不同开关频率下不同占空比的PWM波形



PWM频率为5kHz，占空比为20%



PWM频率为10kHz，占空比为80%

## 二、实验实施过程——(2) PWM功放电路设计

### L298芯片主要工作特性

L298集成了两个桥式功率输出级(A;B)。

每个桥通过以下输入进行配置：

(A桥) In1, In2和EnA; (B桥) In3, In4和EnB。

En输入高电平时，由In输入设置桥式电路的状态。

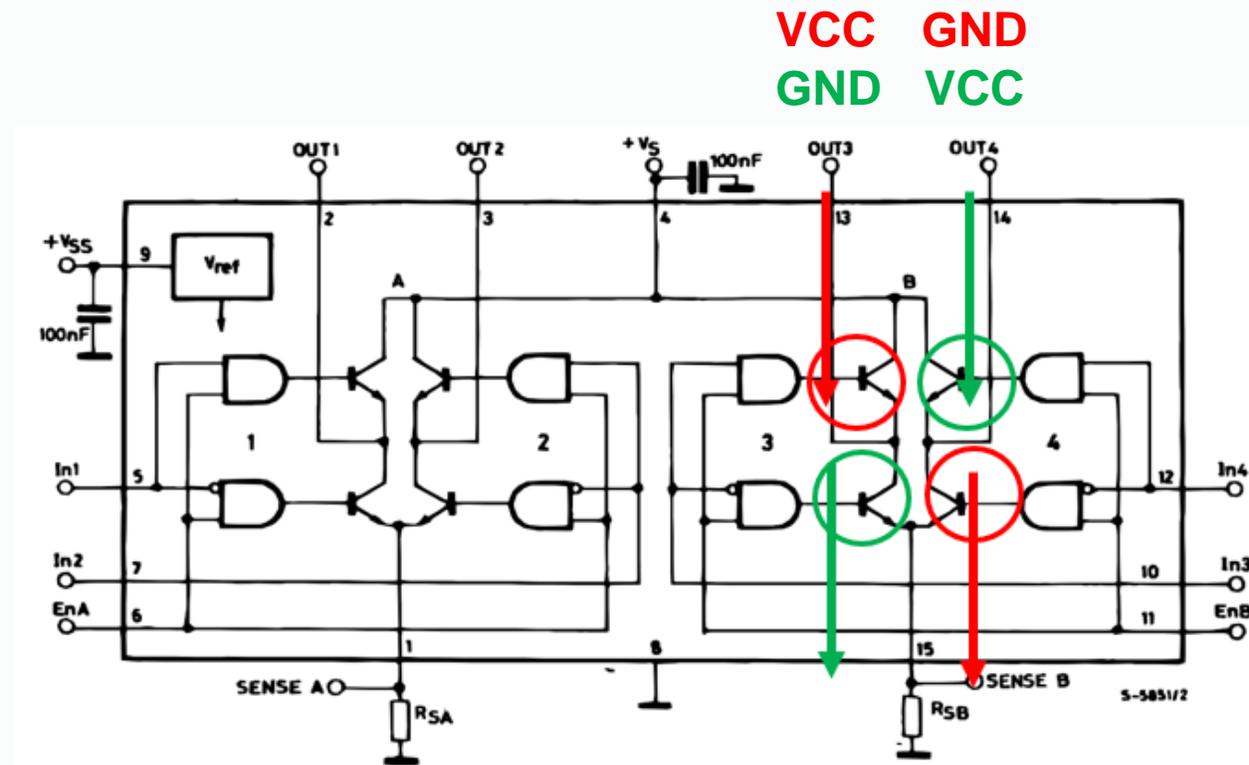
以B电桥为例，

In3为高电平、In4为低电平时，图中画红圈的两管导通；

反之，In3为低电平、In4为高电平时，图中画绿圈的两管导通。

因此，当In3、In4交替为高低电平时，桥式电路交替于两个工作状态中，OUT3和OUT4分别交替于VCC和GND、GND和VCC。

En输入低电平时，对应的桥被封锁。



## 二、实验实施过程——(2) PWM功放电路设计

### L298芯片主要工作特性

- L298N的**供电电压**（也即其最大输出电压）**可达46V**（表2）（或50V，见表1），我们所用电机的供电电压为24V，所以符合要求；
- L298N的**输出电流最高可达3A**（如果使用并行输出，则供电电流更高），而我们所用的电机电流难以达到此大小。所以**L298N可以提供电机所需的电流**。
- L298N**可提供的开关频率可达40kHz**（见表2）。我们使用TL494生成的PWM波频率为5—15kHz；
- L298N的**逻辑高电平**（典型值）**为5V**（表1），我们使用TL494生成的PWM波高电平也为5V。所以L298N可以接受TL494生成的PWM波信号。

表1 极限参数

物理量	描述	最小值	最大值	单位
V <sub>S</sub>	供电电压		50	V
V <sub>SS</sub>	逻辑输入电压	-0.1		V
V <sub>IN</sub>	输入/使能电压	-0.3	7	V
I <sub>O</sub>	峰值输出电流 (不可重复)		3	A
	(可重复)		2.5	A
	(直流运行)		2	A

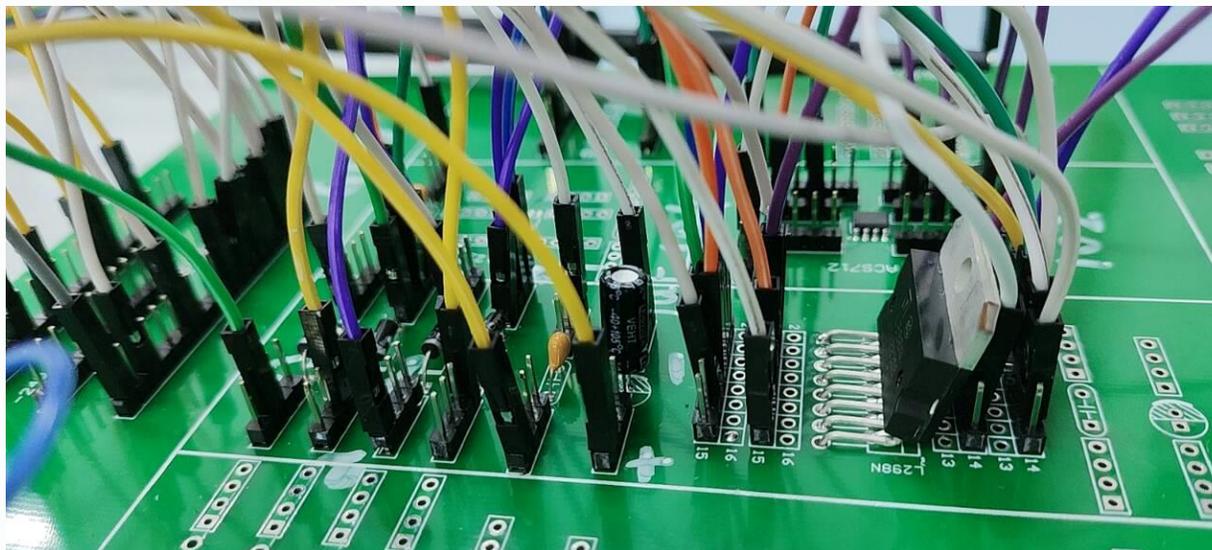
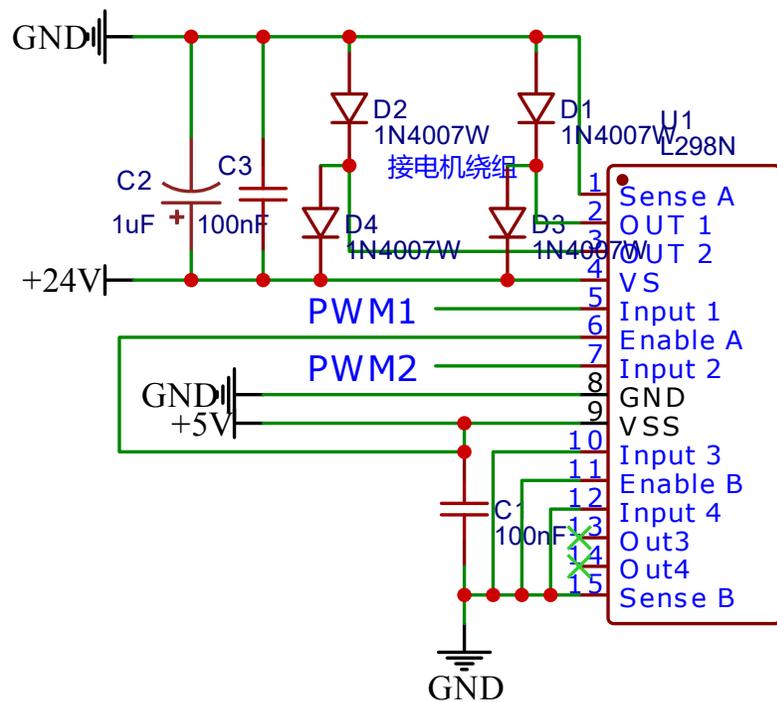
表2 电气特性

物理量	描述	最小值	典型值	最大值	单位
V <sub>S</sub>	供电电压	V <sub>IH</sub> +2.5		46	
V <sub>SS</sub>	逻辑供电电压	4.5	5	7	V
V <sub>IL</sub>	输入低电平电压（input 端子）	-0.3		1.5	V
V <sub>IH</sub>	输入高电平电压（input 端子）	2.3		V <sub>SS</sub>	V
I <sub>IL</sub>	输入低电平电流（input 端子）			-10	μA
I <sub>IH</sub>	输入高电平电流（input 端子）		30	100	μA
V <sub>enL</sub>	输入低电平电压（enable 端子）	-0.3		1.5	V
V <sub>enH</sub>	输入高电平电压（enable 端子）	2.3		V <sub>SS</sub>	V
I <sub>enL</sub>	输入低电平电流（enable 端子）			-10	μA
I <sub>enH</sub>	输入高电平电流（enable 端子）		30	100	μA
f <sub>C</sub>	开关频率		25	40	kHz

## 二、实验实施过程——(2) PWM功放电路设计

### L298芯片引脚接线图

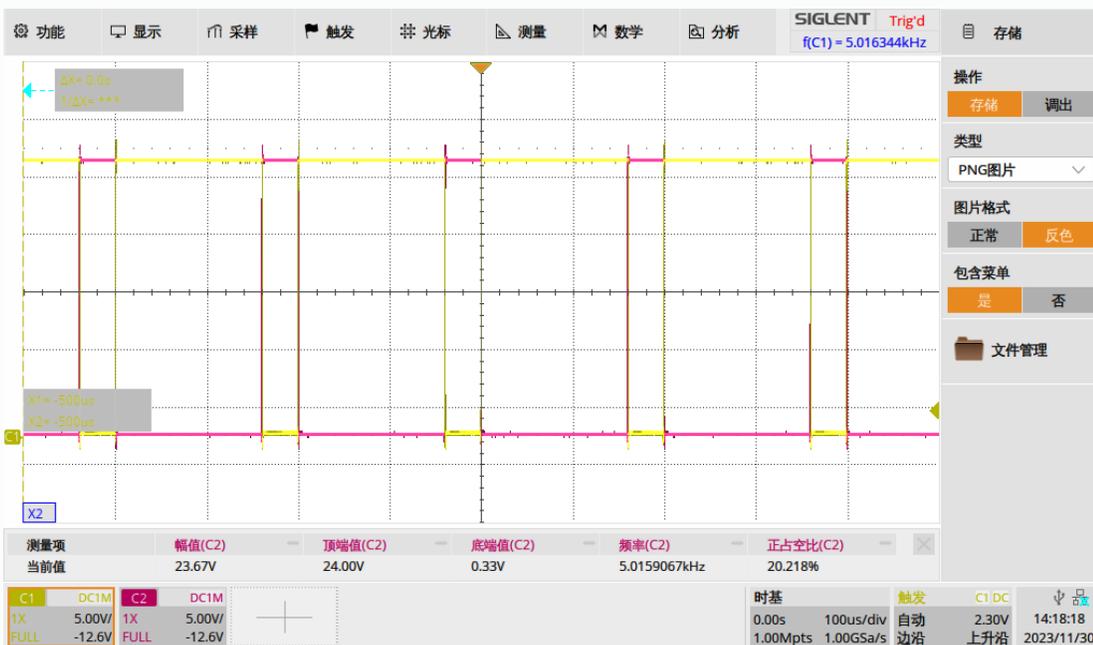
我们的实验中只驱动一个电机，所以只用到1/2片L298N。其电路设计图如下左图所示。为了防止电机减速过程中（此时所有三极管均截止）中很大的暂态电流将三极管击穿，需要接上4个续流二极管。100nF电容用于电源滤波、1 $\mu$ F电容用于稳压。下面右图是实际焊接及接线完成后的电路板。



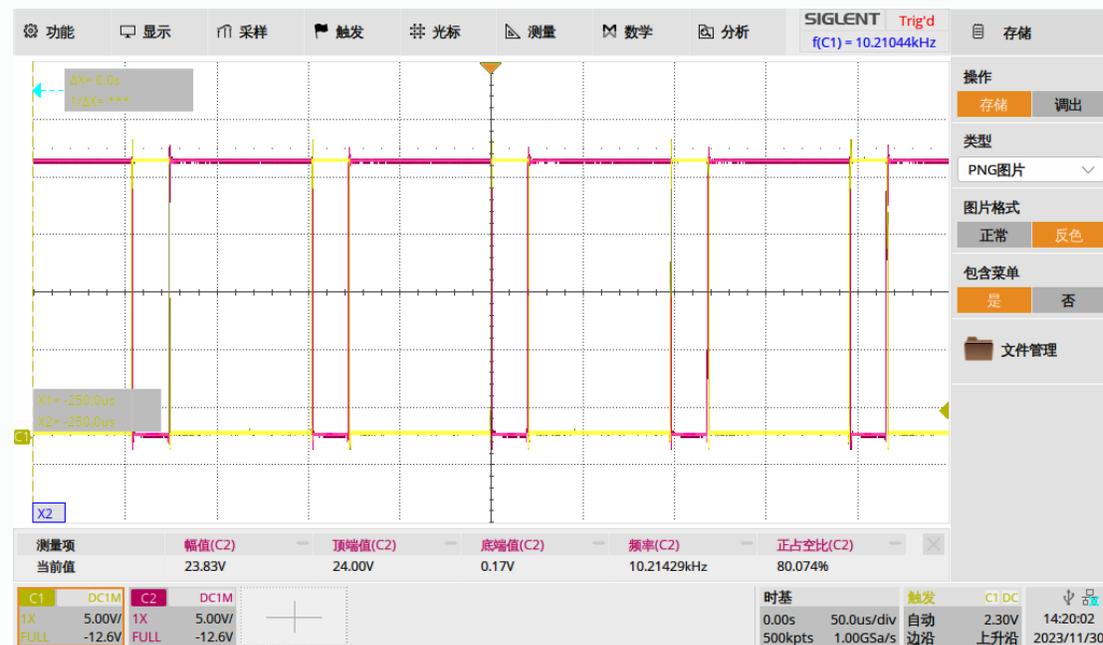
## 二、实验实施过程——(2) PWM功放电路设计

### L298芯片输出波形

- 改变输出的PWM频率，改变PWM占空比，记录不同开关频率下不同占空比的PWM波形



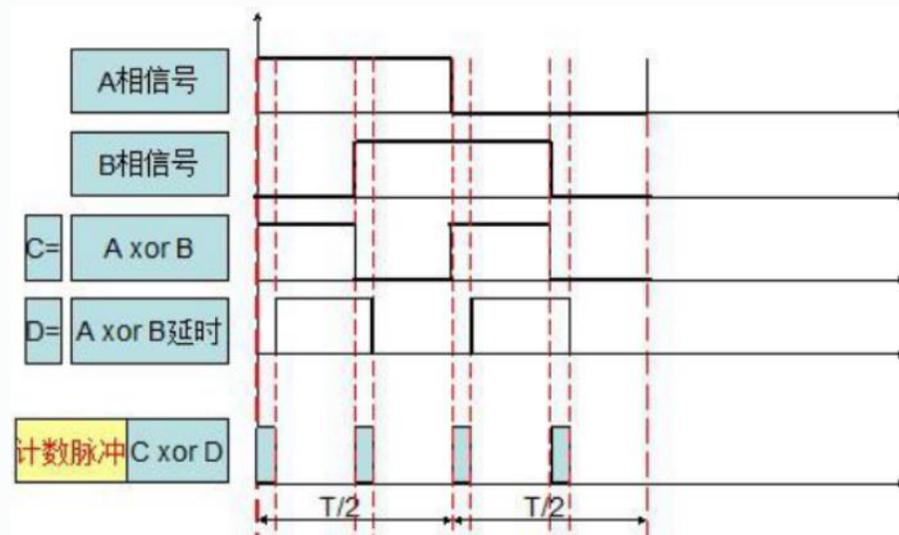
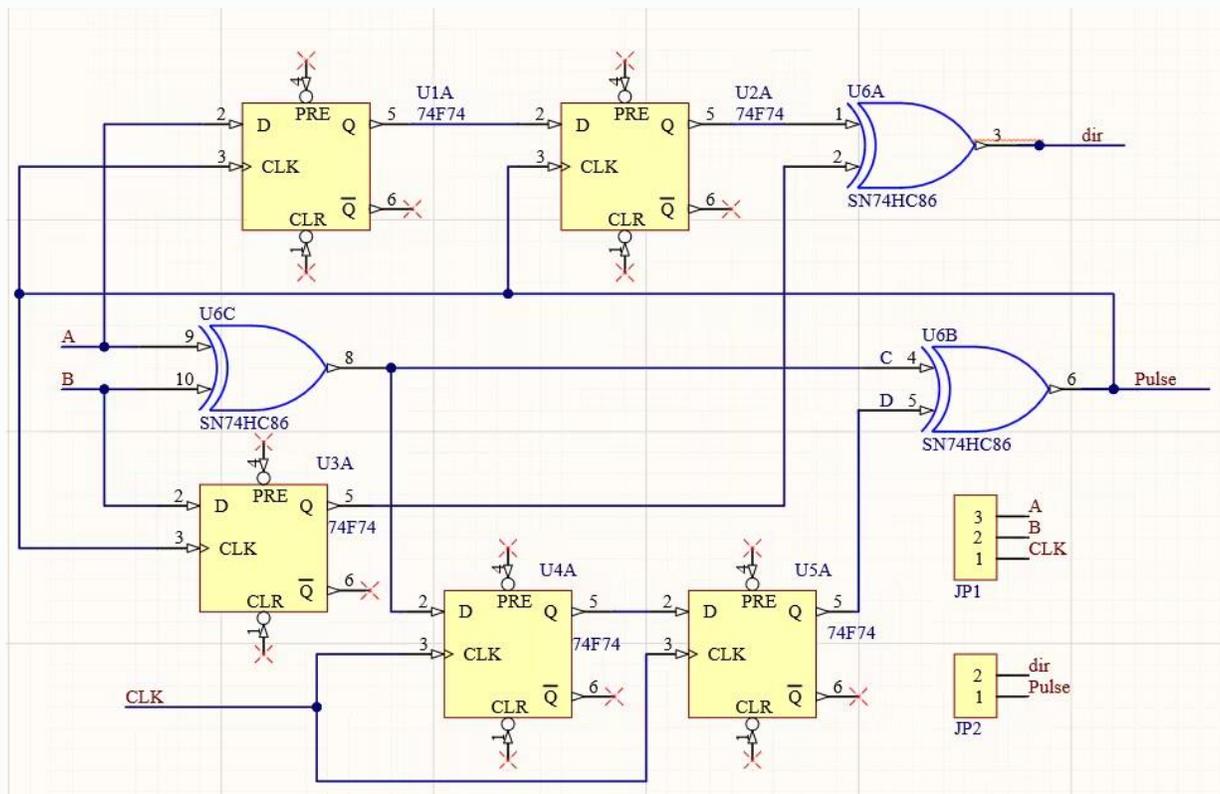
PWM频率为5kHz，占空比为20%



PWM频率为10kHz，占空比为80%

# 二、实验实施过程——(3) 编码器信号读取

## 编码器四细分电路设计

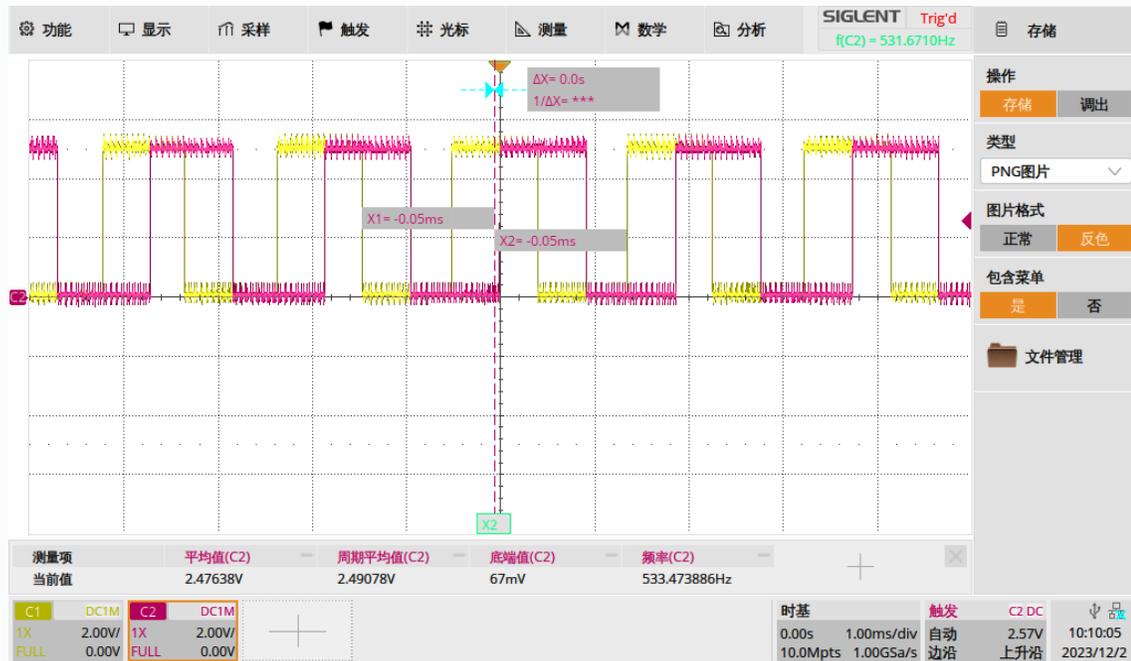


A、B相信号通过异或运算得到信号C，再通过两级D触发器延时得到信号D。再将C与D做异或运算，即得到计数脉冲。

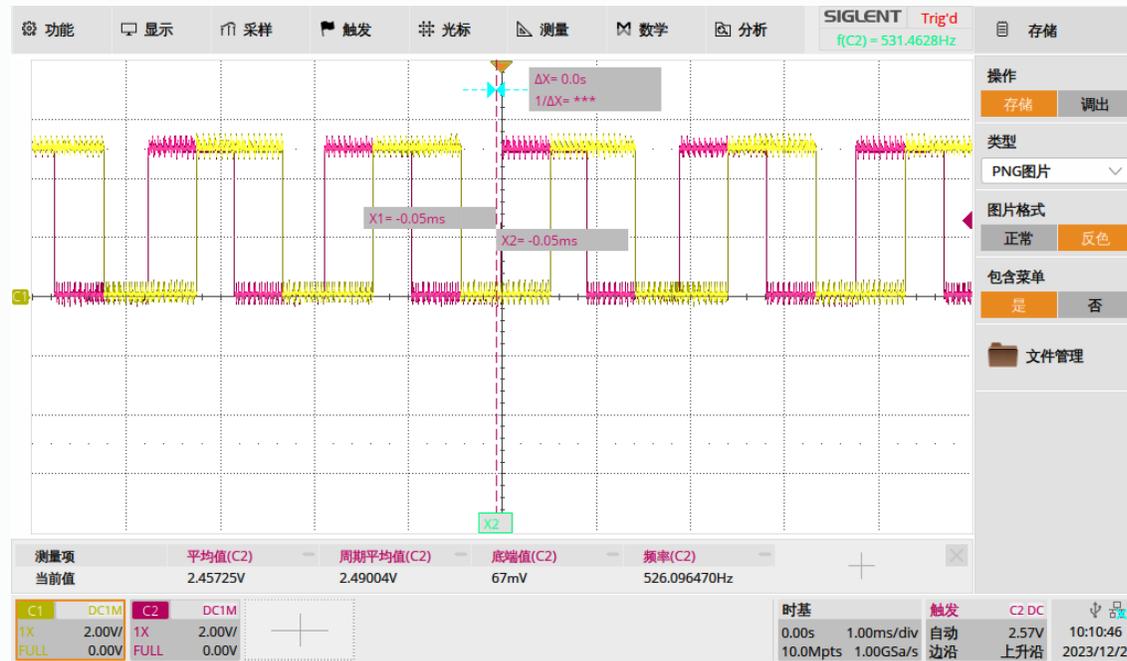
# 二、实验实施过程——(3) 编码器信号读取

## 电机正、反转下的正交编码信号A、B相波形

黄线表示A相，紫线表示B相。



正转时 (A相超前)



反转时 (B相超前)

## 二、实验实施过程——(4) 电枢电流信号采集电路

### ACS712芯片工作特性

- 根据ACS712芯片手册，其主要参数如下所示。
- ACS712的工作电压范围在4.5-5.5V之间，它的7管脚能输出与测量电流成正比的输出电压，通过检测电压大小能得到电流大小，适合本实验的要求。

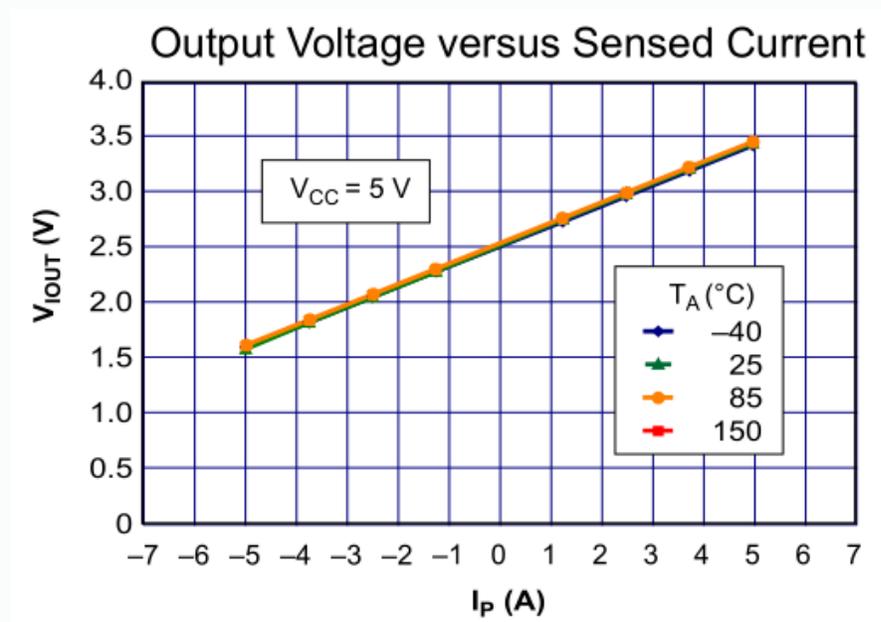
表 1 极限参数

物理量	描述	最小值	最大值	单位
V <sub>CC</sub>	供电电压		8	V
V <sub>RCC</sub>	反向输入电压	-0.1		V
V <sub>IOUT</sub>	输出电压		8	V
V <sub>RIOUT</sub>	反向输出电压	-0.1		V

表 2 运行时推荐参数及电气特性

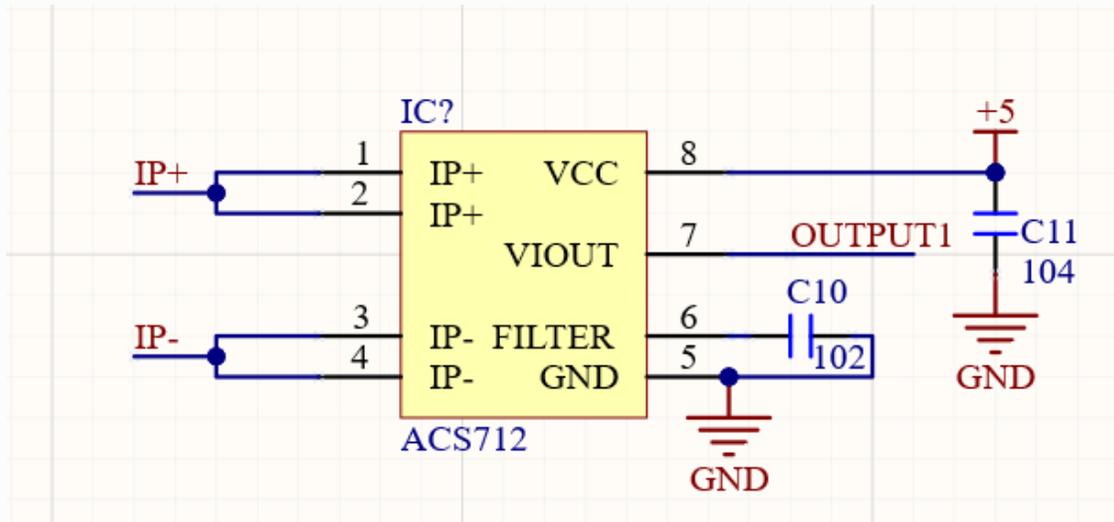
物理量	描述	最小值	典型值	最大值	单位
V <sub>CC</sub>	供电电压	4.5	5	5.5	V
I <sub>CC</sub>	供电电流		10	13	mA
T <sub>R</sub>	上升时间		3.5		Ms

另：测量电流范围为-5至5A时，灵敏度（典型值）为185mV/A。



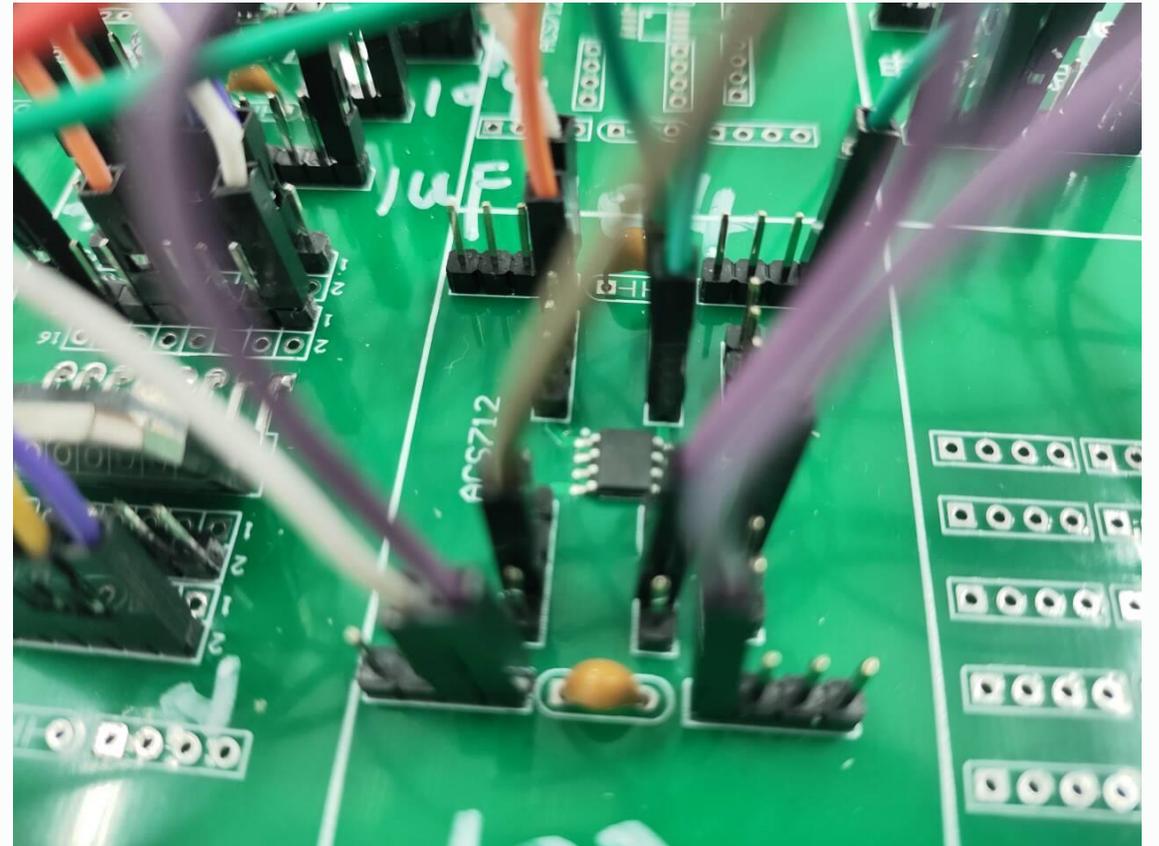
## 二、实验实施过程——(4) 电枢电流信号采集电路

### 直流电机驱动电流信号采集电路设计



电路设计图

注意，ACS712需串联在电路中。



焊接及接线后的电路板

## 二、实验实施过程——(5) 直流电机机械特性的测试

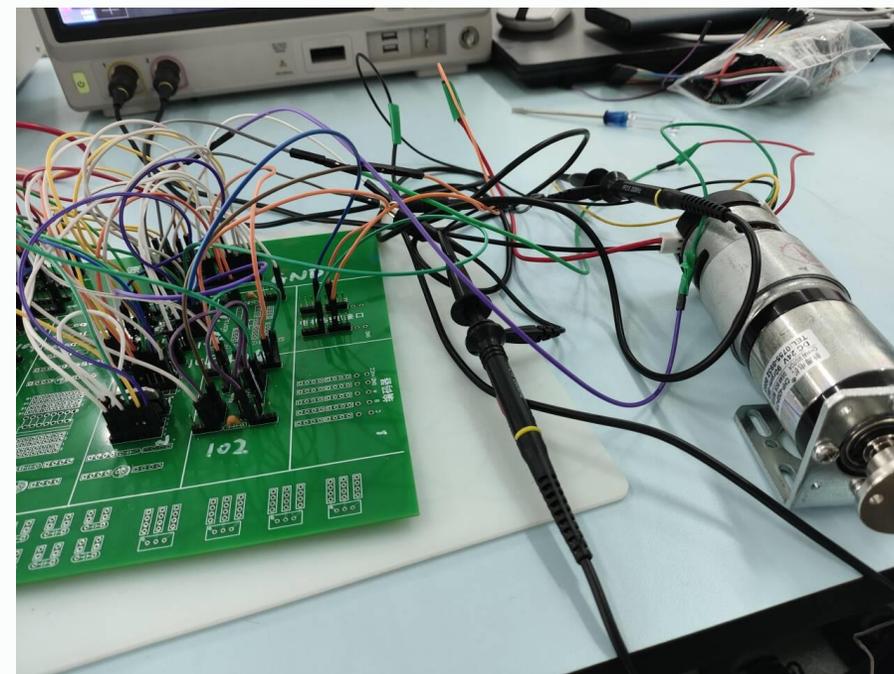
使用设计的功率放大器驱动直流电动机-砝码负载组。

机械特性即**转速-转矩**关系。

**转矩**：改变负载的质量 $m$ ，通过下式计算负载转矩 $T$

$$T = mgR$$

其中 $R$ 为法兰连接件的外半径。



## 二、实验实施过程——(5) 直流电机机械特性的测试

使用设计的功率放大器驱动直流电动机-砝码负载组。

机械特性即**转速-转矩**关系。

**转矩**：改变负载的质量 $m$ ，通过下式计算负载转矩 $T$

$$T = mgR$$

其中 $R$ 为法兰连接件的外半径。

**转速**：通过示波器测试脉冲编码器的频率。例如右图，测得频率为1150Hz。

由编码器数据表知，电机旋转一圈编码器输出17个脉冲，则电机（减速箱前）每秒转过1150/17圈，根据减速比为1:92，可算得电机的转速为： **$1150/17*60/92=44.12$  rpm。**

进一步归纳可得，根据脉冲频率计算转速的公式为：

$$n = f/17*60*i = f/17*60/92 = 0.03836f$$



频率(C2)  
1.1505525kHz

## 二、实验实施过程——(5) 直流电机机械特性的测试

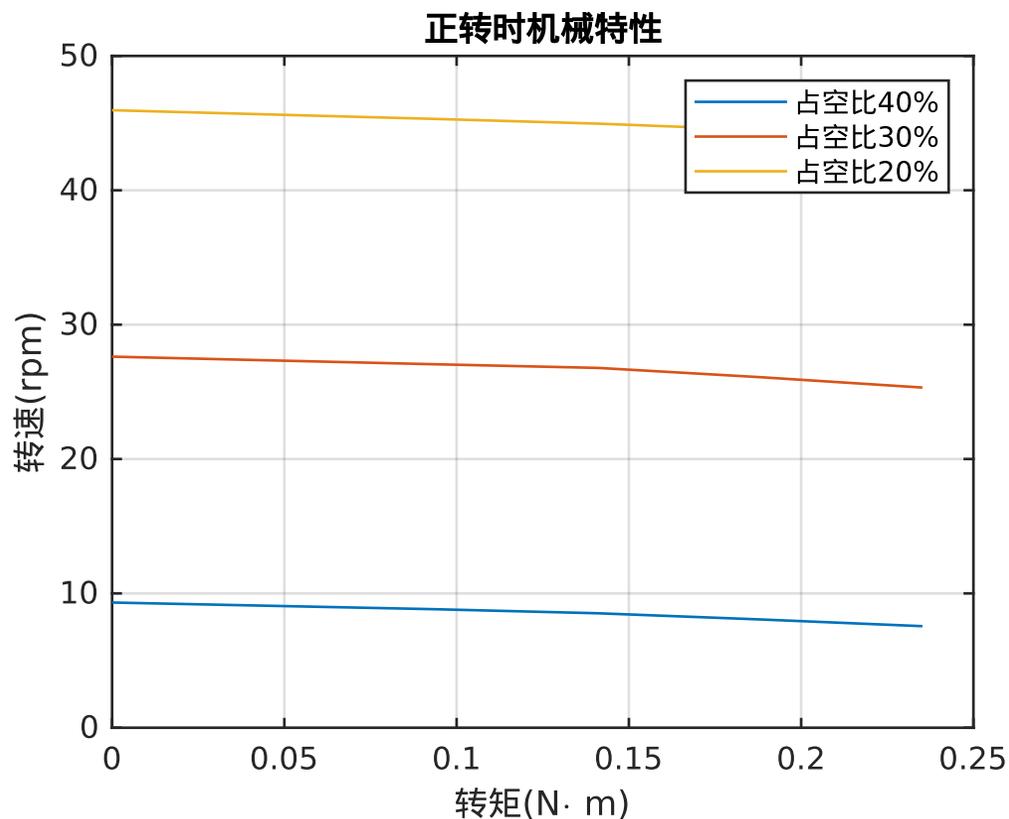


### 正转时机械特性

表 1

	占空比 (%)	编码器脉冲频率 (Hz)	转速 (rpm)	转矩 $T$ (N·m)
1	40	243	9.32	0
2		230	8.82	0.0941
3		222	8.52	0.1411
4		210	8.06	0.1882
5		197	7.56	0.2352
6	30	720	27.62	0
7		705	27.05	0.0941
8		698	26.78	0.1411
9		680	26.09	0.1882
10		660	25.32	0.2352
11	20	1.198k	45.96	0
12		1.181k	45.31	0.0941
13		1.172k	44.96	0.1411
14		1.160k	44.50	0.1882
15		1.153k	44.23	0.2352

原始数据



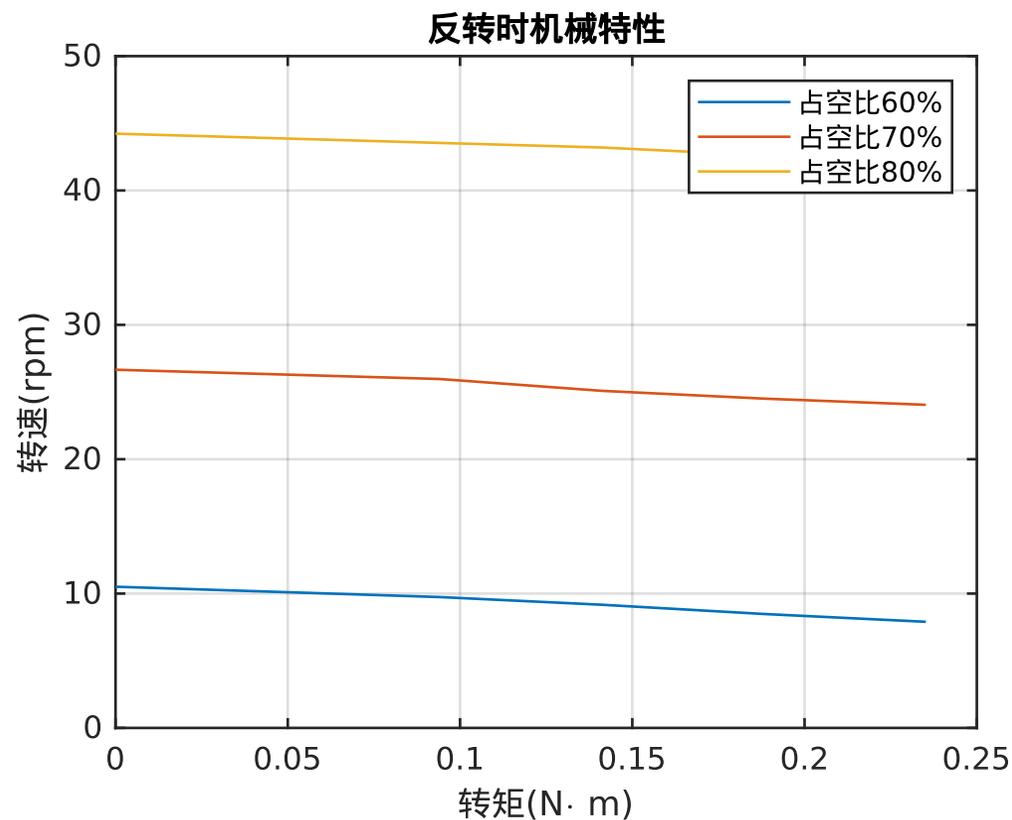
曲线

## 反转时机械特性

表 2

	占空比 (%)	编码器脉冲频率 (Hz)	转速 (rpm)	转矩 $T$ (N·m)
1	60	274	10.51	0
2		254	9.74	0.0941
3		239	9.17	0.1411
4		221	8.48	0.1882
5		206	7.90	0.2352
6	70	695	26.66	0
7		677	25.97	0.0941
8		654	25.09	0.1411
9		639	24.51	0.1882
10		627	24.05	0.2352
11	80	1.153k	44.23	0
12		1.135k	43.54	0.0941
13		1.126k	43.20	0.1411
14		1.111k	42.62	0.1882
15		1.103k	42.31	0.2352

原始数据

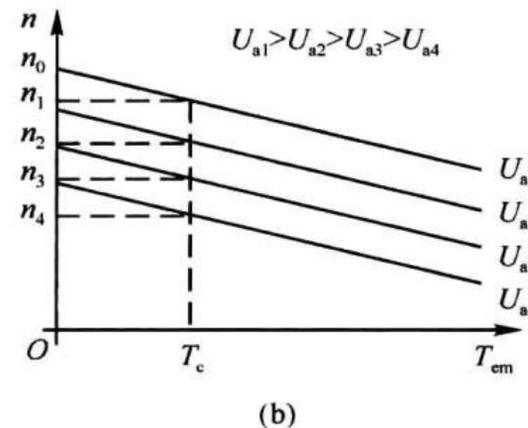
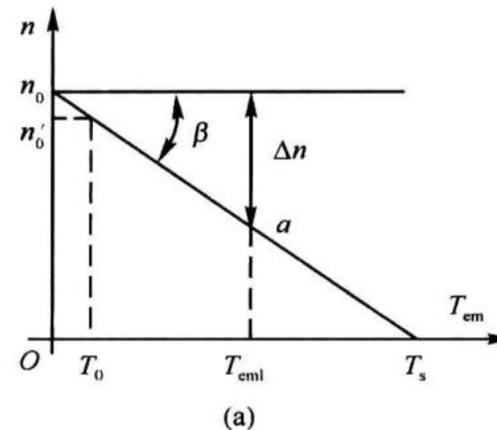
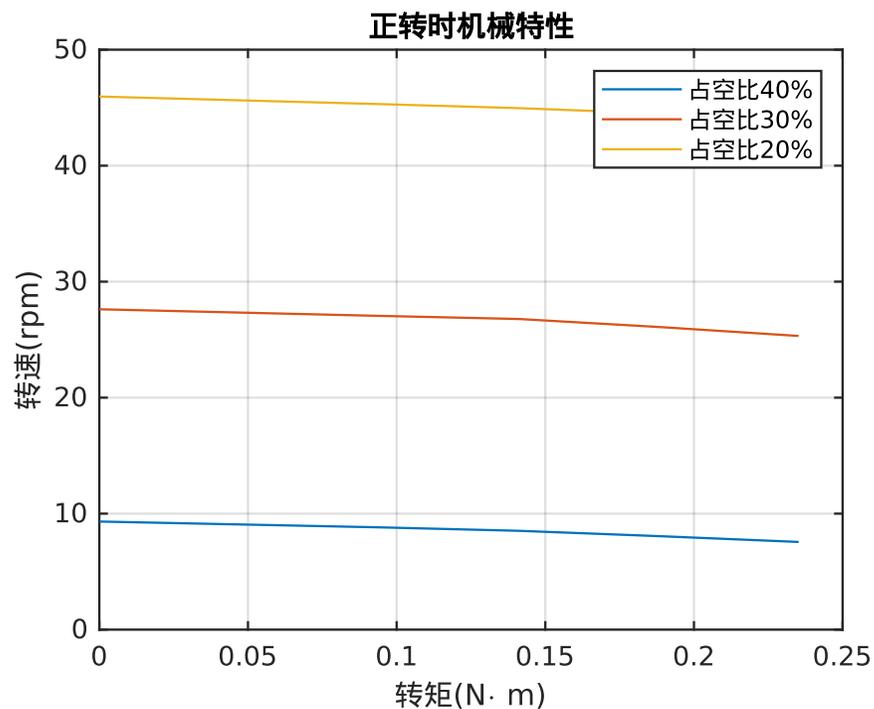


曲线

## 二、实验实施过程——(5) 直流电机机械特性的测试

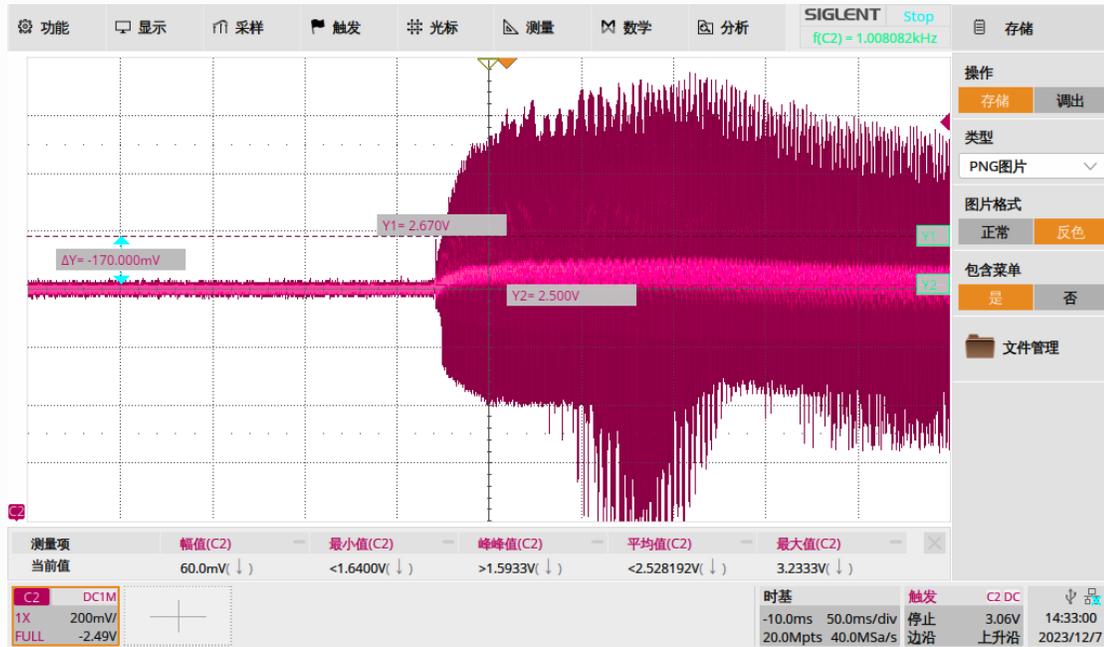
### 理论与实验对比

通过对比分析实验和理论结果，电机的机械特性近似呈线性，理论与实际相符合。

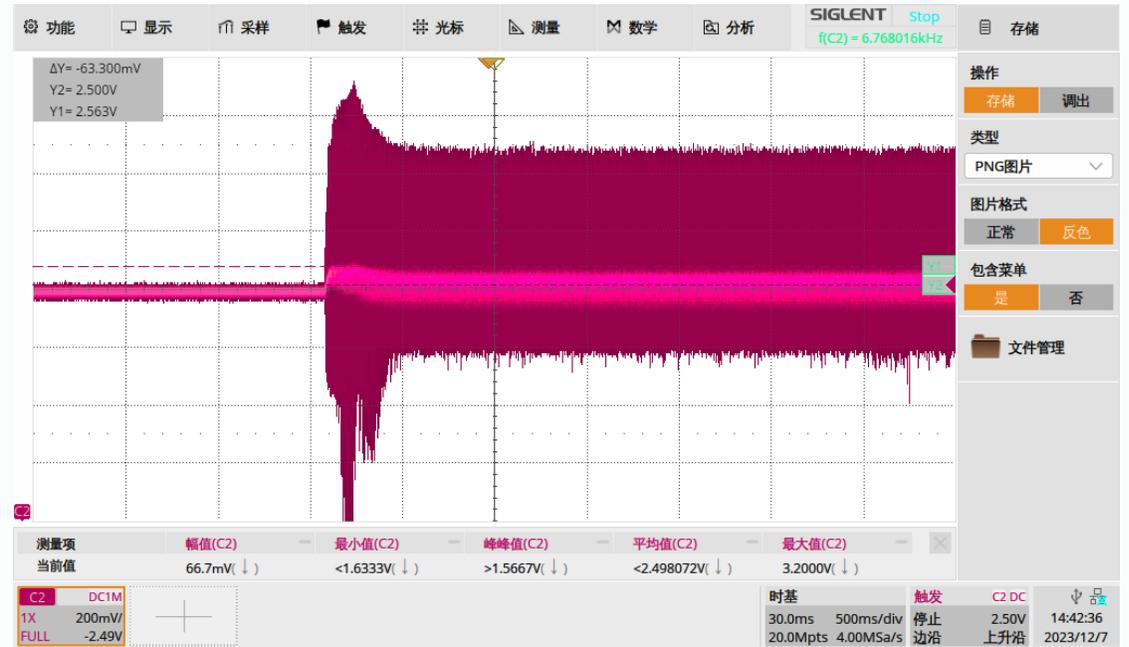


机械特性理论曲线

# 二、实验实施过程——(6) 直流电动机的启动与负载电流



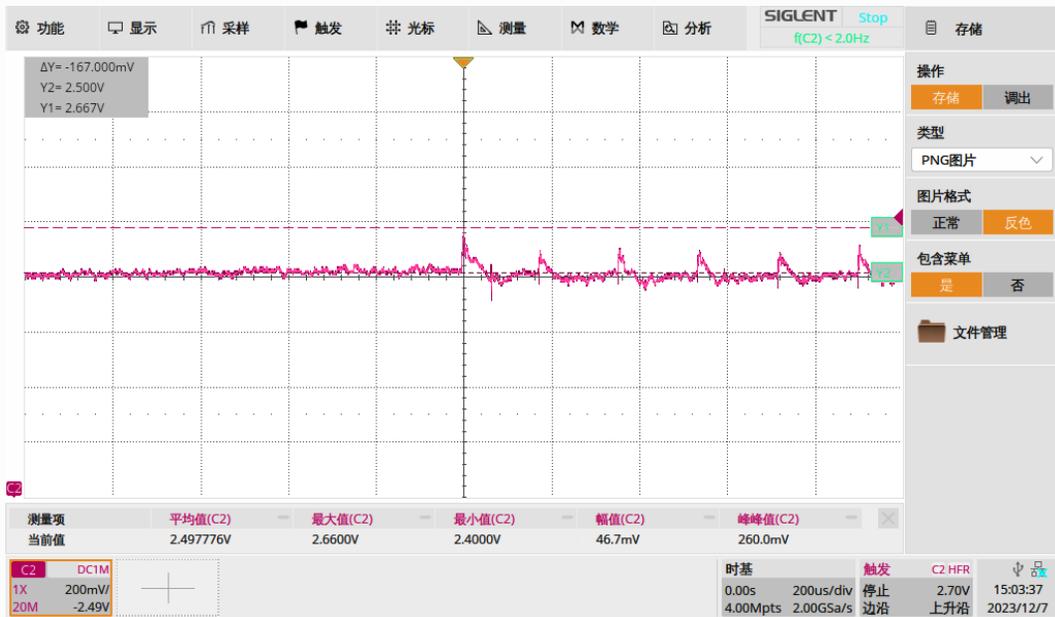
直流电动机启动时的电枢电流变化



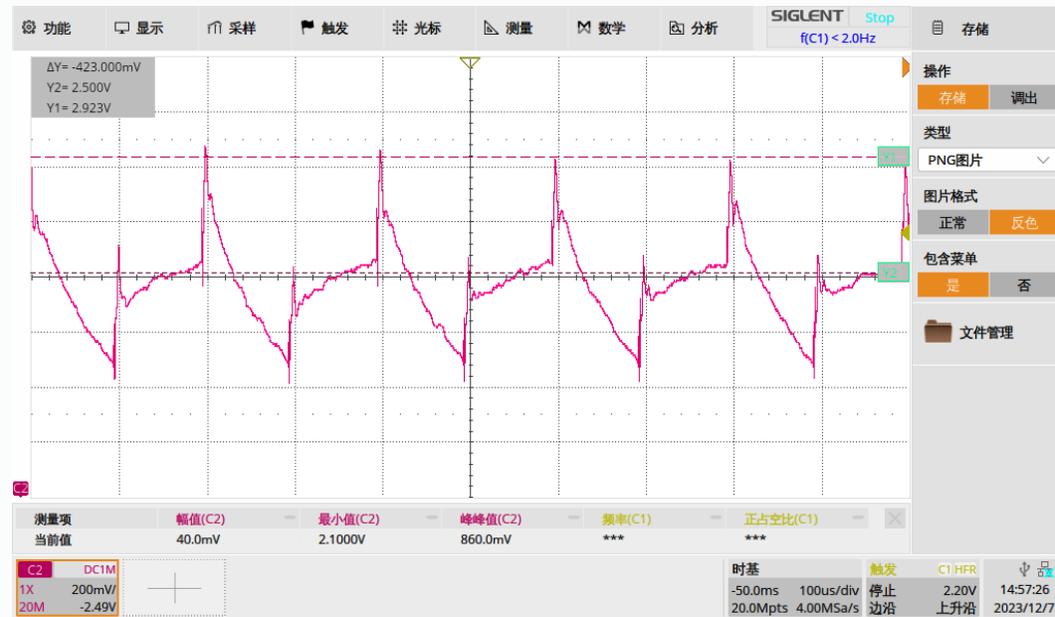
直流电动机加载后的电枢电流变化

# 二、实验实施过程——(6) 直流电动机的启动与负载电流

## 占空比为50%，开关频率为5kHz时的电流波形

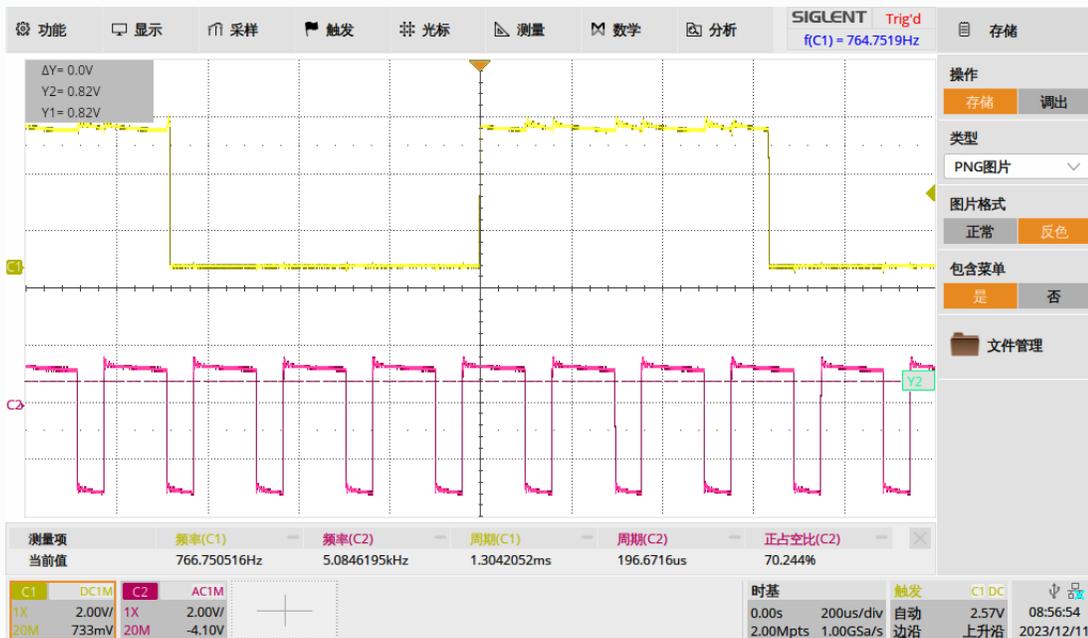


总图



放大图

## 二、实验实施过程——(7) 直流电动机的调压调速



占空比70.244%

编码器A相输出频率为766.75Hz

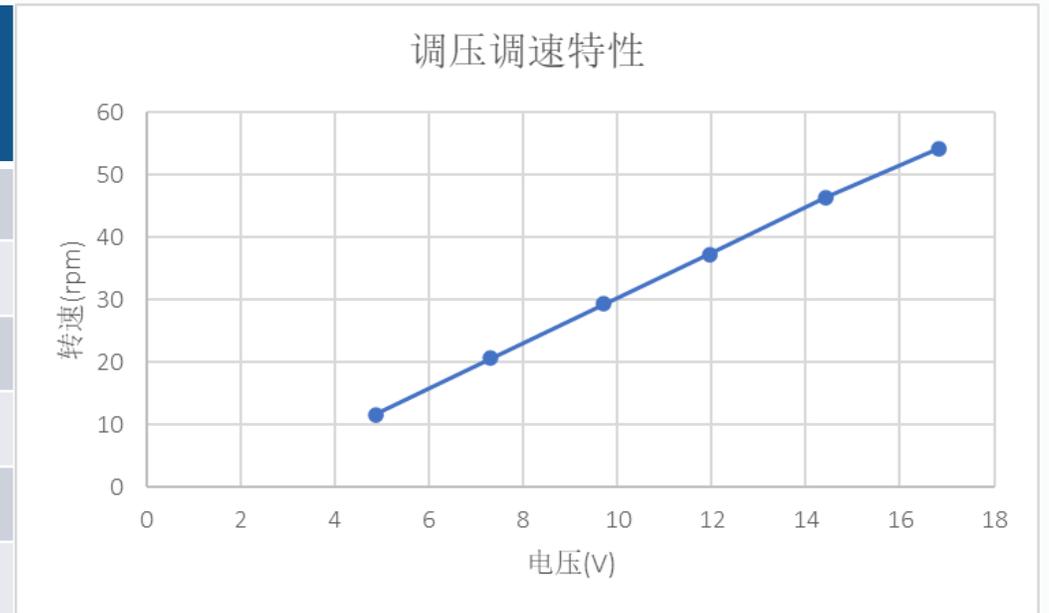


占空比74.915%

编码器A相输出频率为971.87Hz

## 二、实验实施过程——(7) 直流电动机的调压调速

序号	占空比(%)	等效电压(V)	编码器脉冲频率 (Hz)	转速 (rpm)
1	60.143	4.86864	303.98	11.66067
2	65.232	7.31136	540.11	20.71862
3	70.244	9.71712	766.75	29.41253
4	74.915	11.9592	971.87	37.28093
5	80.067	14.4322	1209.59	46.39987
6	85.073	16.835	1414.63	54.26521



可见，电机的转速与其上等效电压近似呈线性关系，与理论上调压调速的特性相符合。

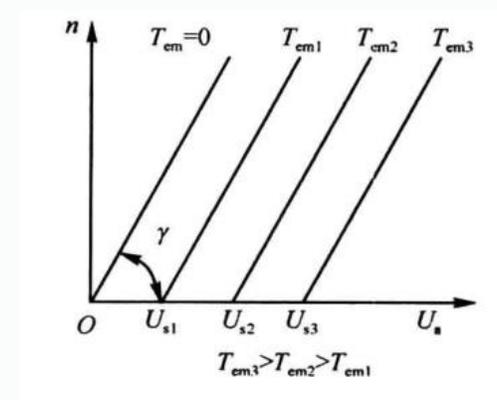


图 1-33 电枢控制时的调节特性



**三**

# 总结与心得体会

# 三、总结与心得体会

## 问题及解决方法

1

将ACS712芯片接入电路时，上电，发现直流电源输出电压很低，且电流达到最大限流值。

**解决方法：**发现ACS712芯片并联在了电路中。ACS712内阻很小（类似理想电流表），应该串联在电路中。

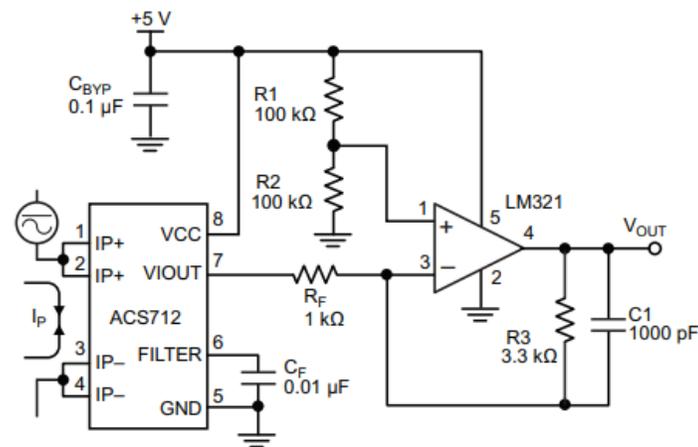
2

ACS712的输出电压改变一直不大，电机启动时难以观察到电流的变化。

**解决方法（由于没有器件而未实现）：**采用如图所示电路，提高电流分辨率。

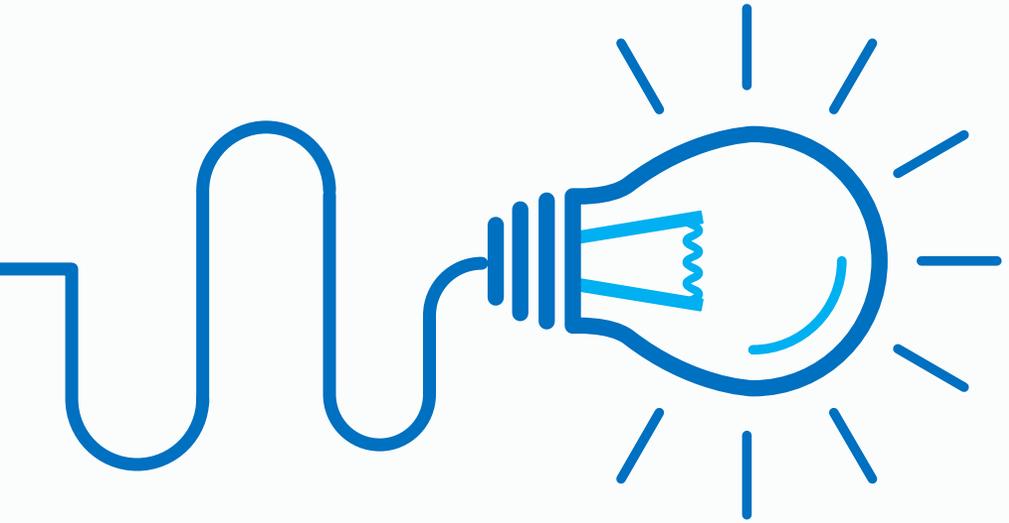
※ 答辩后补充：

本实验中的电流总在上下、正负变化过程中，如果冲得很高，用此电路可能不合适（单电源供电无法输出负电压。可以自己推导输入输出表达式）。如用双电源供电的LM324，可能更好。滤波电容的取值也值得考虑，到底多大的电容合适。



Application 3. This configuration increases gain to 610 mV/A (tested using the ACS712ELC-05A).

## 三、总结与心得体会



收获:

1. 设计电路前要进行充分调研, 根据需求选择合适的器件 (例如, 本实验中, 电阻、电容的选取);
2. 设计各模块时, 不能只顾本模块设计而忽视前级和后级对于信号的要求 (例如, TL494的输出给到L298的输入);
3. 提高阅读英文文献和数据手册的能力。  
只有善于发现, 勤于思考, 保持细心、耐心、恒心, 才能做出成功的项目。

## 三、总结与心得体会——建议与展望



### 拓宽思考题目

例如，引导学生思考减小开关过程中电流上、下冲的问题，有兴趣的学生可以做调研，完成此项内容并**收到实际效果**，可予以加分；等等。



### 合理采购器件

例如，可以增加几种电容的选择。今年计算PWM开关频率时发现103的电容最合适（算出电阻取值范围刚刚好），但是提供的电容仅有102和104。



### 增加实验项目

希望明年可以在有刷电机驱动之外，增加无刷电机或交流伺服电机的硬件电路设计性实验（如**FOC硬件电路设计**），进一步提升学生的综合能力。**40学时可以做更多有意义的事。**



哈爾濱工業大學(深圳)

HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, SHENZHEN

**谢谢!**  
**希望本课程与时俱进，越办越好!**

小组成员: \*\*\*

2023. 12. 16