



中山大學

SUN YAT-SEN UNIVERSITY

实 验 报 告

课程名称： 电机与拖动技术

姓 名： 方桂安

学 号： 20354027

专业班级： 2020 级智能科学与技术

任课教师： 冯国栋

2022 年 12 月 18 日

实验三 BLDC 电机控制实验

一、实验目的

1. 确定电机运行的参数，包括转速、三相电流和直流电压，并通过调整 CCS 设置的参数值来观察这些参数的变化。
2. 通过示波器观察 DAC 输出的电机转速和电流波形，并与 PMSM 电流波形进行对比。
3. 通过修改转速 PI 控制的比例和积分参数，观察其对控制性能的影响，包括响应时间、超调和稳态误差。通过 CCS 软件和示波器进行观察，并简要对比 PMSM 控制性能。

二、实验原理

首先将 BLDC 电机的三相电线与位置传感器线连接到试验箱，下载 BLDC 电机程序并运行，实现电机转动。

代码简介：

程序一直运行 for(;;)里面的代码执行条件判断

```
if ((bldcm_set.start == 1) && (bldcm_set.run == 0)) //启动电机条件判断
if (bldcm_set.start == 0) //停止电机判断
```

电机控制运行在中断中，中断是每个固定时间执行一次，执行过程中主程序暂停执行。

电机控制程序在下面中断中运行

```
interrupt void Cap_Isr(void)
Motor_Ctrl(&bldcm_set, &hall); //电机运行位置切换，每隔固定时间运行
```

电机控制程序（转速外环控制）

BLDCAPP 每隔固定时间运行（比上述位置切换要慢）

DAC 输出范围是-10V~10V,所以电压 电流 转速等需要做相应的缩放,使得能够正确的输出到 DAC 上。

```
WriteDAC(DA_ADD1,bldcm.udc*0.01);  
WriteDAC(DA_ADD2,bldcm.speed*0.0005);  
WriteDAC(DA_ADD3,bldcm.idc*100);
```

注意:

- a. 电机运行的数据存在 **bldcm** 结构里面
- b. 电机速度设置在 **bldcm_set** 结构里面
- c. 控制器参数都存在于 **pid_speed** 等结构里面

三、 实验设备

(1) 硬件: BOX28335 实验平台, 仿真器 HDSP-XDS200ISO, 相应的配套电源。

(2) 软件: 安装了 Windows7/10 和 CCS 软件的 PC。

四、 实验过程

实验正式开始之前, 我们检查了 BLDCAPP 控制程序, 发现没有采用三相电路, 所以我们将下列代码加入到 `ADC_Ctrl(); //ADC 采样` 函数的下方。

```
bldcm.iu= -(((float) Get_A_Adc(2)) * 0.00152587890625 + 12.5;  
//外部电路正负极错误  
bldcm.iv = -(((float) Get_A_Adc(3)) * 0.00152587890625 + 12.5;  
bldcm.iw = -(((float) Get_A_Adc(4)) * 0.00152587890625 + 12.5;
```

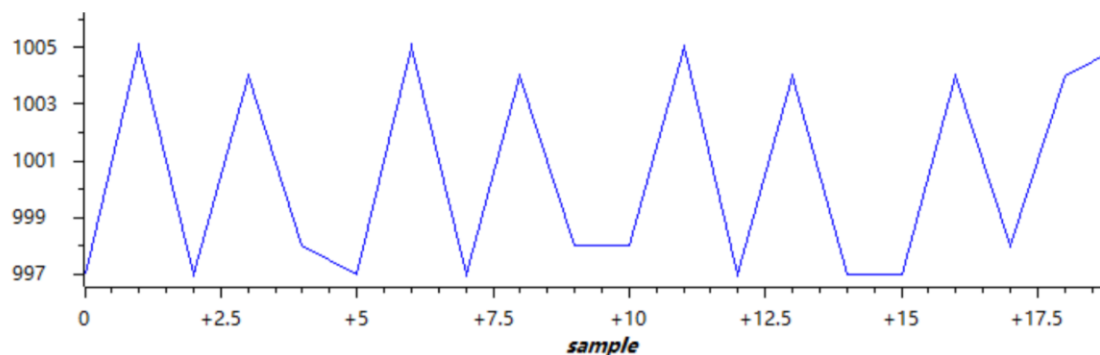
1. 启动电机, 观察电机运行, 包括电机转速, 三相电流, 直流电压等参数 (通过 CCS 设置转速等参数的值, 观察上述参数的值与波形);
正确连接实验箱与电机, 启动 CCS, 编译并运行工程, 结果如下:

Expression	Type	Value	Address
(x)= bldcm.speed	unsigned int	0	0x00009751@Data
(x)= bldcm.udc	float	22.6220703	0x00009752@Data
(x)= bldcm.iu	float	2.55444431	0x00009754@Data
(x)= bldcm.iv	float	2.49437618	0x00009756@Data
(x)= bldcm.iw	float	2.46250343	0x00009758@Data
+ Add new expression			

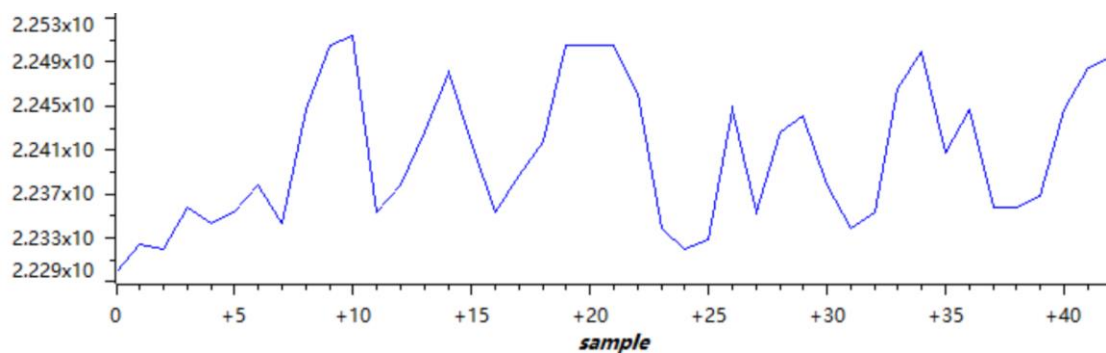
在实验箱上选择 BLDC 电机，点击启动：

Expression	Type	Value	Address
(x)= bldcm.speed	unsigned int	998	0x00009751@Data
(x)= bldcm.udc	float	22.3583984	0x00009752@Data
(x)= bldcm.iu	float	2.5274744	0x00009754@Data
(x)= bldcm.iv	float	2.81800842	0x00009756@Data
(x)= bldcm.iw	float	2.41714573	0x00009758@Data

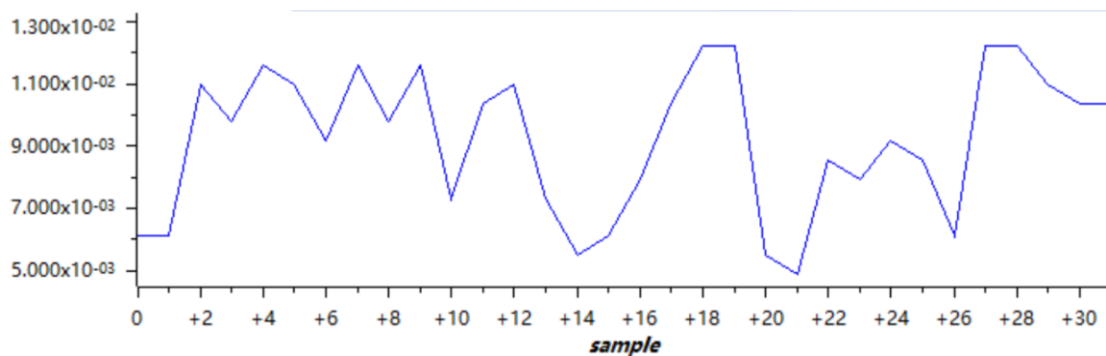
使用 CCS 的 graph 功能绘制变量波形曲线：



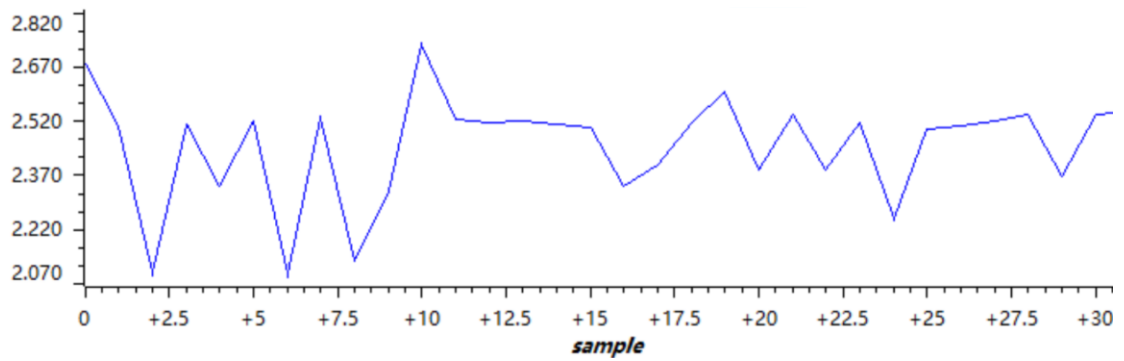
转速变化曲线



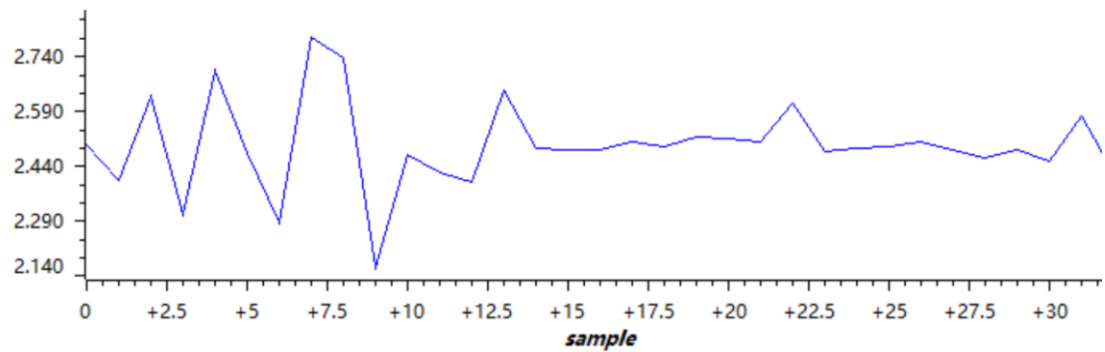
直流电压 udc



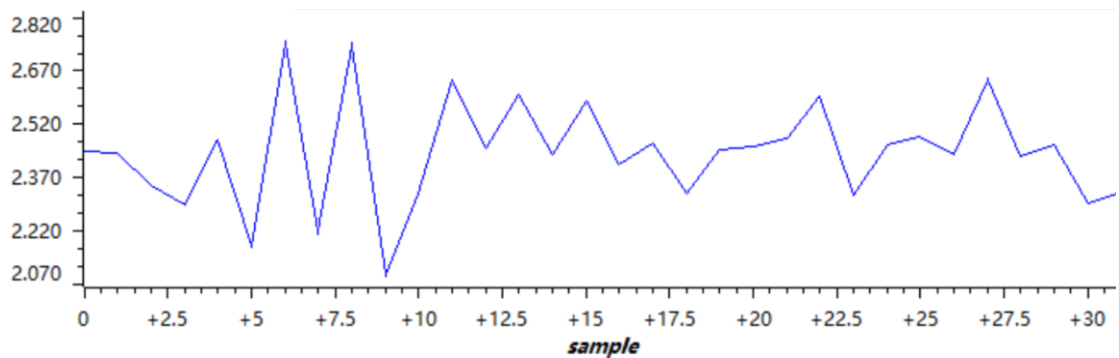
直流电流 idc



三相电流 iu



三相电流 iv



三相电流 iw

- 通过示波器观察 DAC 输出的电机的转速，电流等波形，**对比 PMSM 电流波形**。

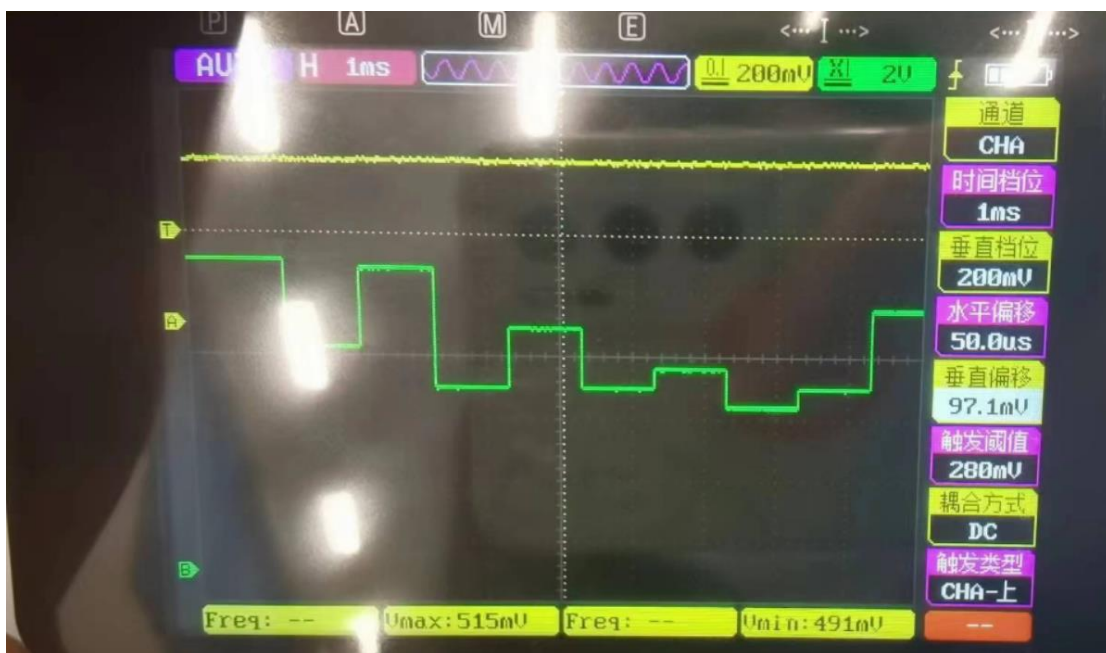
（DAC 没有输出电流等，需要添加代码 `WriteDAC(DA_ADDxx, xxxx);`

在代码对应的位置添加 `WriteDAC`

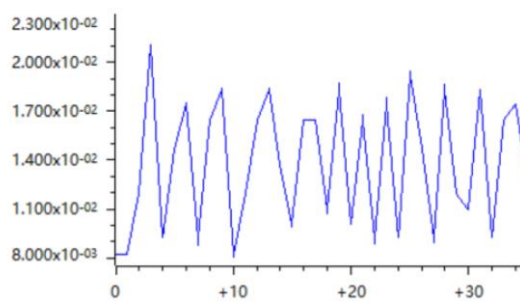
```
WriteDAC(DA_ADD1,bldcm.udc*0.01);
WriteDAC(DA_ADD2,bldcm.speed*0.0005);
WriteDAC(DA_ADD3,bldcm.idc*100);
```

可以看到，由于 `DA_ADD` 是从 0 开始的，故在实验箱的 DAC3 会显示电机的转速，DAC4 会显示电机的直流电流 `idc`。

由于二者的大小差异较大，为了在示波器中更好的展示结果，我们需要调节 A、B 两个通道的垂直档位、水平偏移和垂直偏移等，效果如下：

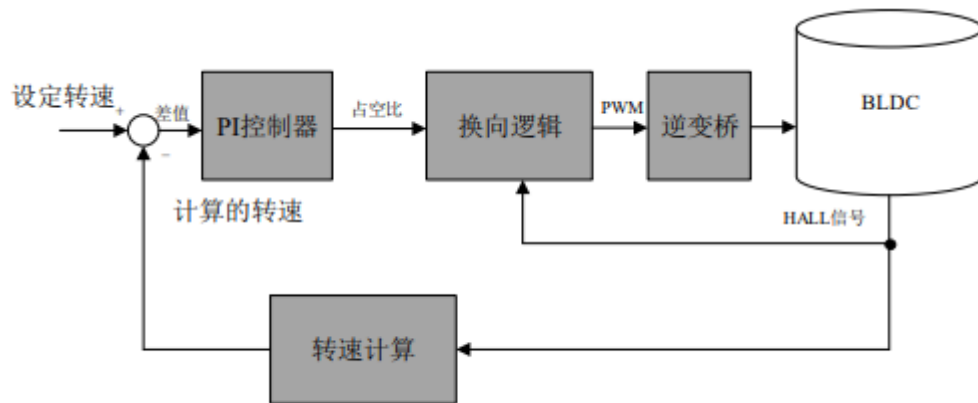


相较于 PMSM 的电流波形，BLDC 的电流呈现方波形（或梯形波），而 PMSM 的电流更像是三角波（或正弦波）。



PMSM.idc 变化曲线

3. 修改转速 PI 控制的比例与积分参数，观察对控制性能的影响（响应时间，超调，稳态误差等），（请通过 ccs 软件和示波器观察）并简要对比 PMSM 控制性能。



与上个实验类似，转速的初始值为 1000，我们会将设定值调整到 1500，研究该阶跃响应下 PI 控制的系统动态性能，使用控制变量法对比分析比例与积分参数对控制效果的影响。

利用 CSS 自带的 graph 功能我们可以绘制出对应的阶跃响应曲线，然后在图像上右键选择 data，可以把数据以 csv 格式导出，我在 matlab 中编写了一个函数利用导出的 csv 数据来计算此时系统的动态性能指标，代码如下：

```
function [ys,tr,ts,tm,ov] = Fun_Step_Performance(t,y,drawflag)
% [ys,tr,ts,ov] = Fun_Step_Performance(t,y) 标准阶跃响应的性能指标求解
% 本程序适用于标准阶跃响应曲线，末尾时间必须已经接近稳态值
% t-y 为阶跃响应的时间-输出配对序列，可由[y,t] = step(sys)求得
% drawflag 为时候作图标志，不输入或输入非 0 值时，默认作图，输入 0 时不做图
% ys 稳态值
% tr 上升时间，默认为 0-90%的上升时间
% ts 调整时间，默认为 2%的调整时间
% tm 为峰值时间
% ov 超调量 %
% e.g.
% sys = tf(1,[1 2*0.5*1 1]);
% [y,t] = step(sys,15);
% [ys,tr,ts,tm,ov] = Fun_Step_Performance(t,y,1);

if nargin == 2
    drawflag = 1; % 默认绘图
```

```

end

ys = y(end);           % 稳态增益
[ym, ind] = max(y);    % 最大输出
ov = 100*(ym-ys)/ys;   % 超调量
tm = t(ind);           % 峰值时间
ind2 = length(t);
delta = 0.02;          % 调整时间默认范围 2%
while t(ind2) > 0
    if abs(y(ind2)-ys) >= delta*ys
        break
    end
    ind2 = ind2-1;
end
ts = t(ind2);          % 调整时间
ind3 = 1;
while y(ind3) < 0.9*ys
    ind3 = ind3 + 1;
end
tr = t(ind3);          % 上升时间

if drawflag ~= 0
    figure
    plot(t,y,'r',LineWidth=2)
    hold on
    plot([tr tr],[0 0.9*ys],'k:')
    plot([tm tm],[0 ym],'k:')
    plot([ts ts],[0 (1-delta)*ys],'k:')
    plot([t(1) t(end)],[ys ys],'k-.')
    xlabel('时间/s')
    ylabel('输出')
    title('阶跃响应曲线')
    ylim([900,1600])
    text(1.1*tr,0.8*ys,['上升时间: ' num2str(tr) 's'])
    text(1.1*ts,0.75*ys,['调整时间: ' num2str(ts) 's'])
    if abs(tm-t(end)) > 0.1*tm
        text(1.1*tm,1*ym,['峰值时间: ' num2str(tm) 's, 超调量: '
num2str(ov) '%'])
    else
        text(0.55*tm,0.8*ym,['峰值时间: ' num2str(tm) 's, 超调量: '
num2str(ov) '%'])
    end
    text(0.7*t(end),0.95*ys,['稳态值: ' num2str(ys)])
    disp('%% 阶跃响应指标结果: ')

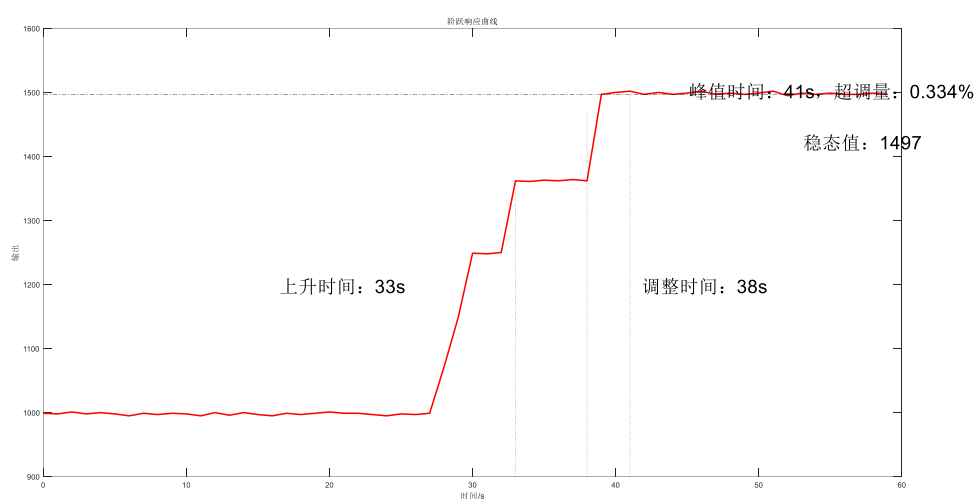
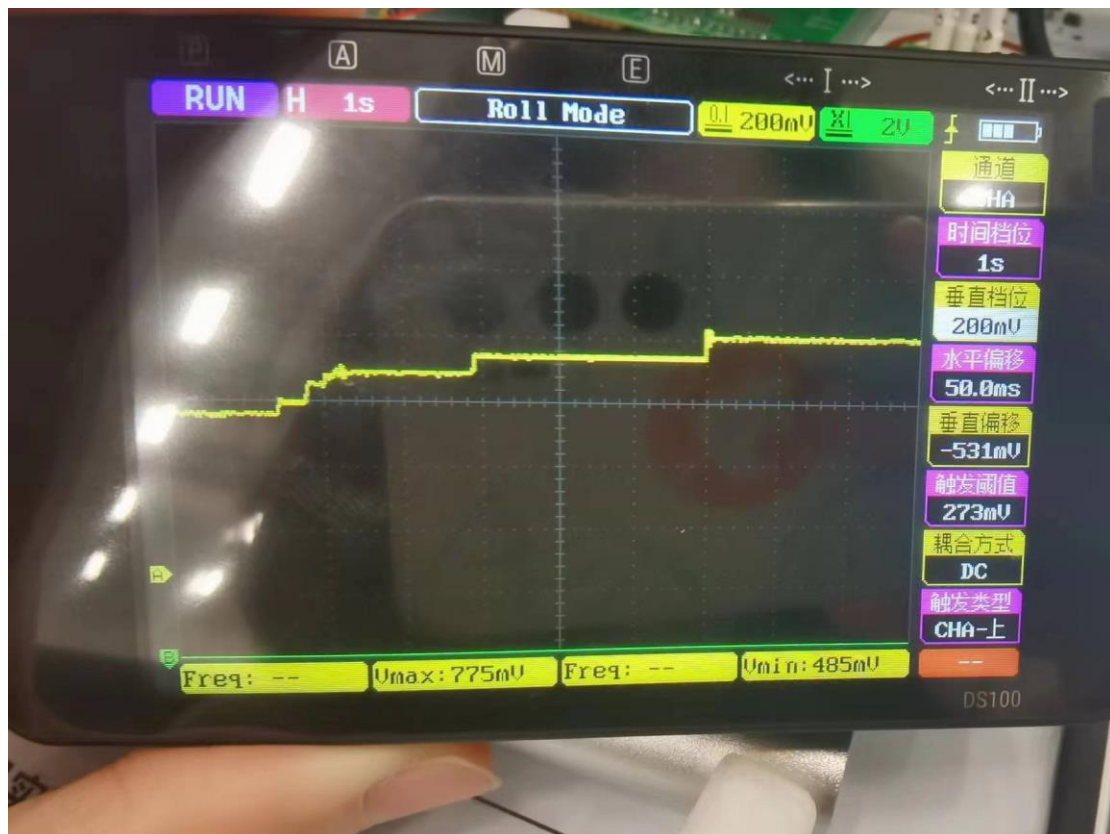
```



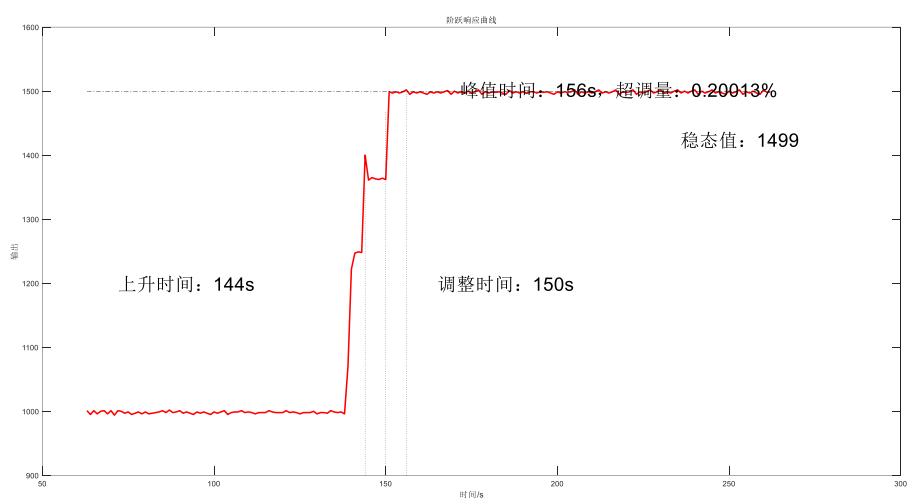
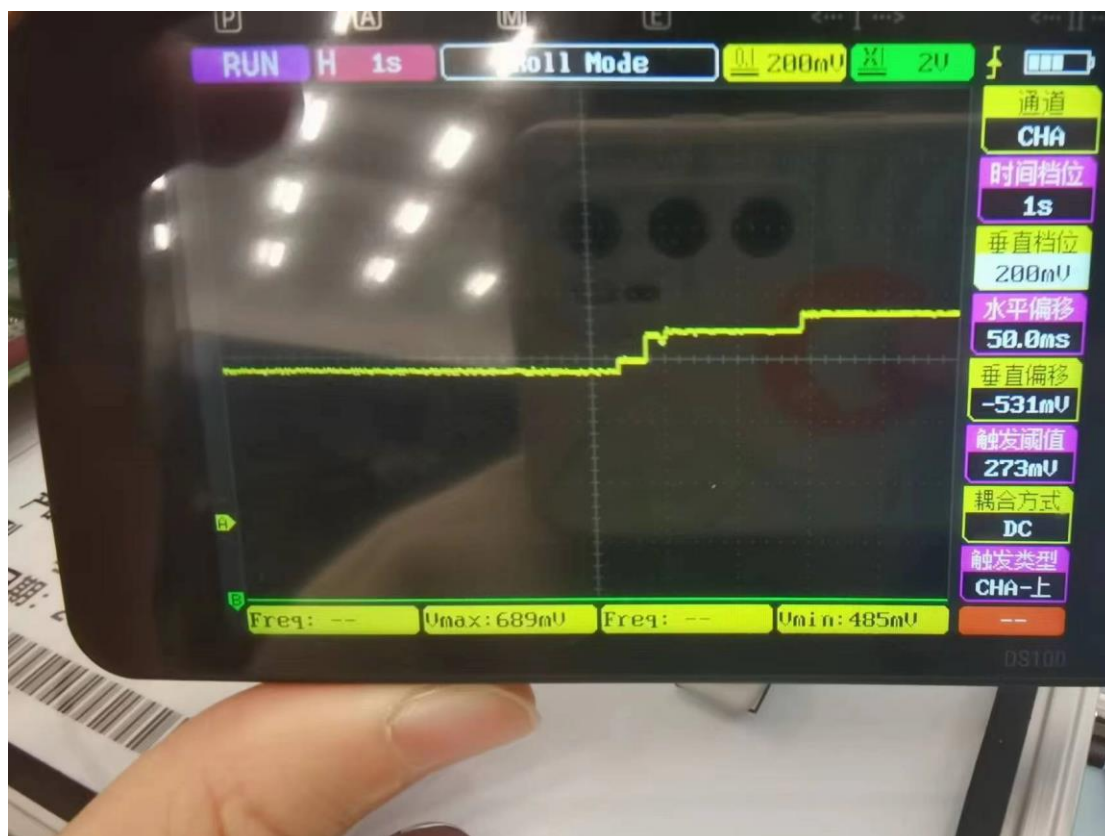
```

disp(['上升时间: ' num2str(tr) 's'])
disp(['调整时间: ' num2str(ts) 's'])
disp(['峰值时间: ' num2str(tm) 's, 超调量: ' num2str(ov) '%'])
disp(['稳态值: ' num2str(ys)])
disp('%% 阶跃响应指标结果显示结束')
end

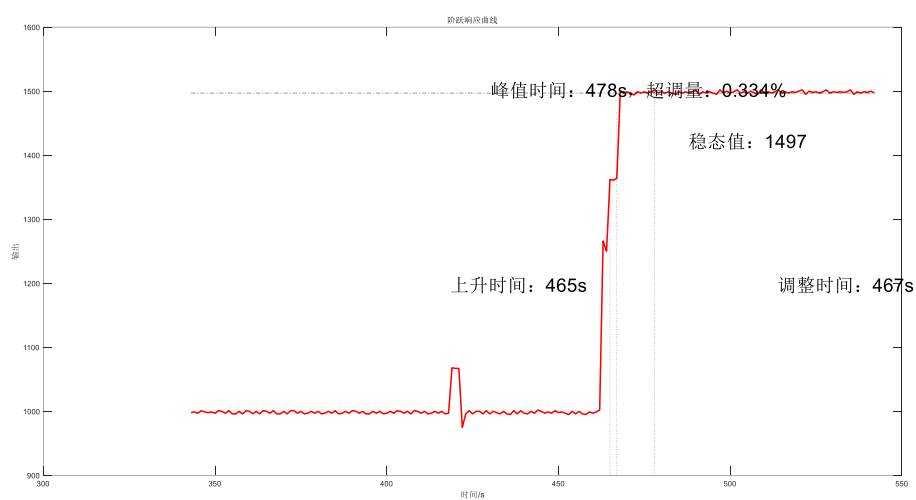
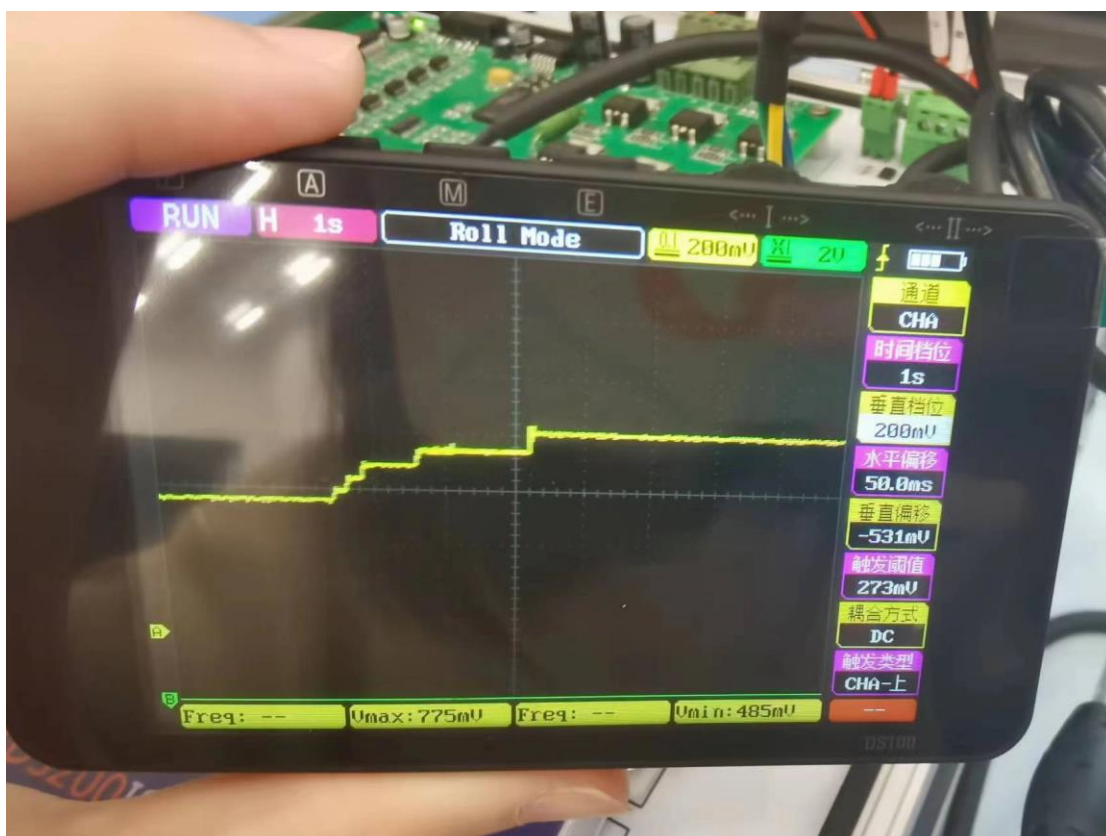
```



$K_p=0.1$, $K_i=0.01$ 的阶跃响应曲线



$K_p=0.2$, $K_i=0.01$ 的阶跃响应曲线



$K_p=0.1$, $K_i=0.02$ 的阶跃响应曲线

动态性能指标表格如下：

参数	稳态 值 $C(\infty)$	超调 量 $\sigma\%$	峰值 时间 t_p	调节 时间 t_s	上升 时间 t_r
$K_p=0.1$ $K_i=0.01$	1497	0.3%	41s	38s	33s
$K_p=0.2$ $K_i=0.01$	1499	0.2%	156s	150s	144s
$K_p=0.1$ $K_i=0.02$	1497	0.3%	478s	467s	465s

比例调节作用：按比例反应系统的偏差,系统一旦出现了偏差,比例调节立即产生调节作用用以减少偏差。比例作用大,可以加快调节,能迅速反应误差,从而减小稳态误差。但是,比例控制不能消除稳态误差。过大的比例,使系统的稳定性下降,甚至造成系统的不稳定

积分调节作用：使系统消除稳态误差,提高无差度。积分控制的作用是,只要系统有误差存在,积分调节就进行,积分控制器就不断地积累,输出控制量,直至无差,积分调节停止,积分调节输出一常值。因而,只要有足够的时间,积分控制将能完全消除误差,使系统误差为零,从而消除稳态误差。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_i , T_i 越小,积分作用就越强,积分作用太强会使系统超调加大,甚至使系统出现振荡,反之 T_i 大则积分作用弱。加入积分调节可使系统稳定性下降,动态响应变慢。

不难看出三组参数中 $K_p=0.1$, $K_i=0.01$ 的效果是最好的,增加 K_p 虽然可以使得超调量减少,但是调节时间等性能指标也跟着大幅提升;增加 K_i 同样使得系统稳定性下降,动态响应变慢。

相较于 PMSM 效果最好的 $K_p=0.04$, $K_i=0.5$, BLDC 具有更大的比例增益和较小

的积分增益。比例增益是指系统的输出反馈到输入的变化比率。积分增益是指系统对所有时间的输出反馈到输入的积分。

通常来说，系统的稳定性越高，其比例增益就越小，积分增益就越大。这是因为当比例增益较大时，系统很容易受到输入的影响而产生剧烈的变化，这会导致系统不稳定。而当积分增益较大时，系统会对所有时间的输入做出反应，从而使得系统变得稳定。

故我认为 PMSM 相较于 BLDC 会稳定一些。

五、 实验心得与感受

本次实验中我们完成了对 BLDC 电机控制系统的研究和测试。在实验中，我首先检查了 BLDCAPP 控制程序，并在其中添加了代码来采集三相电流的值。然后，我使用 CCS 软件启动电机并观察了电机的运行情况，包括转速、三相电流和直流电压等参数。此外，我还通过示波器观察了 DAC 输出的电机转速和电流等波形，并与 PMSM 电机的电流波形进行了比较。最后，我还修改了转速 PI 控制系统的参数，并观察了电机转速的变化情况。

从实验结果来看，BLDC 电机具有较高的效率和较小的噪声，而且在转速调节方面具有较好的精度和快速响应能力。另外，在观察电机的电流波形时，可以发现 BLDC 电机的电流呈现方波形或梯形波，而 PMSM 电机的电流更像是三角波或正弦波。这可能是由于 BLDC 电机的工作原理不同导致的。

在调整控制系统的参数时，可以改变电机的转速和响应能力。这启示我们，在设计和应用 BLDC 电机控制系统时，需要根据具体应用场景，合理地设定控制系统的参数，以获得更好的性能。