

---

西安交通大学

姓名：张晓宇、白柯渊

班级：自动化 2101

日期：2023 年 12 月 7 日

# 自动控制原理实验 第二次实验报告



---

# 1 预习报告

## 1.1 预习报告——张晓宇

实验三：

$$\text{矫正环节传递函数: } G_c(s) = \frac{R_1 C_1 s + 1}{R_2 C_2 s + 1}$$

原系统：

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s G_k(s) = 20$$

$$G_k(s) = G(s) = \frac{20}{s(0.5s + 1)}, \text{ 有 } G(j\omega) = \frac{20}{j\omega(0.5j\omega + 1)}$$

$$L(\omega) = 20 \lg 20 - 20 \lg \omega - 20 \lg \sqrt{1 + 25\omega^2}$$

$$\text{令 } L(\omega) = 0, \text{ 解得 } \omega_{c1} \approx \sqrt{38} = 6.164 \text{ rad/s}, \varphi(\omega_{c1}) = -90^\circ - \tan^{-1} 0.5\omega_c \approx -162^\circ$$

$$\gamma = \pi - 162^\circ = 18^\circ$$

$$L(\omega_{c2}) = 20 \lg 20 - 20 \lg \omega \sqrt{1 + 0.25\omega^2} = -10 \lg \alpha,$$

$$\omega_c \geq 10 \text{ rad/s } 10 \lg \alpha \geq 20 \lg 10 \sqrt{26} - 20 \lg 20 \text{ 解得: } \alpha \geq 6.5$$

$$\text{又 } \alpha = \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m} \text{ 解得: } \sin \varphi_m \approx 47.17^\circ$$

$$\omega_m = \omega_{c2} = 10 \text{ rad/s} = 1/\sqrt{2}T \text{ 故: } T = 0.04s \quad \alpha T = 0.255s$$

$$\text{所以 } G_c(s) = \frac{1 + 0.225s}{6.6(1 + 0.04s)} = \frac{s + 3.92}{s + 25}$$

$$\text{又 } G(s) = G_c(s) G_k(s)$$

$$\text{故 } \gamma = 180 - 90 - \tan^{-1} 0.5\omega_{c2} - \tan^{-1} 0.04\omega_{c2} + \tan^{-1} 0.255\omega_{c2} = 58.1 \geq 45$$

满足条件

$$\text{此时 } R_1 C_1 = 0.255, R_2 C_2 = 0.04$$

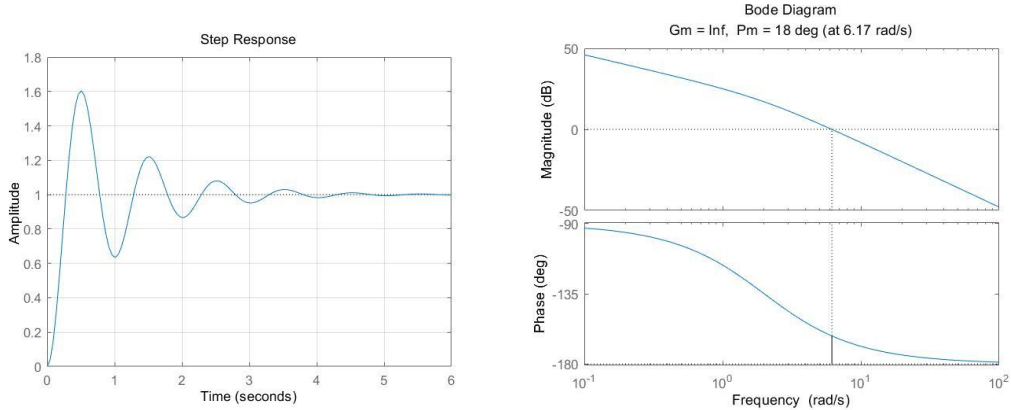
$$\text{解得: } C_1 = 1\mu F, C_2 = 2\mu F \quad R_1 = 255k\Omega, R_2 = 20k\Omega$$

滞后矫正：

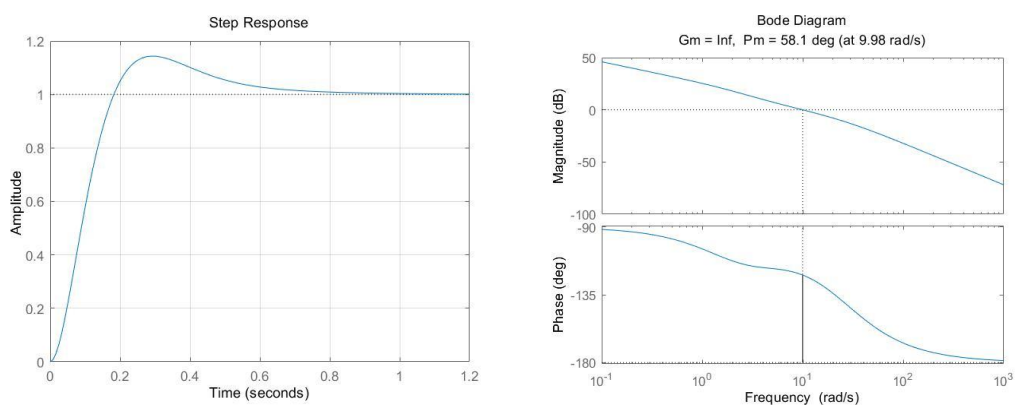
$$G_c(s) = \frac{5s + 1}{50s + 1} \text{ 解得: } C_1 = 1\mu F, C_2 = 1\mu F \quad R_1 = 5M\Omega, R_2 = 50M\Omega$$

阶跃响应与幅频曲线如图：

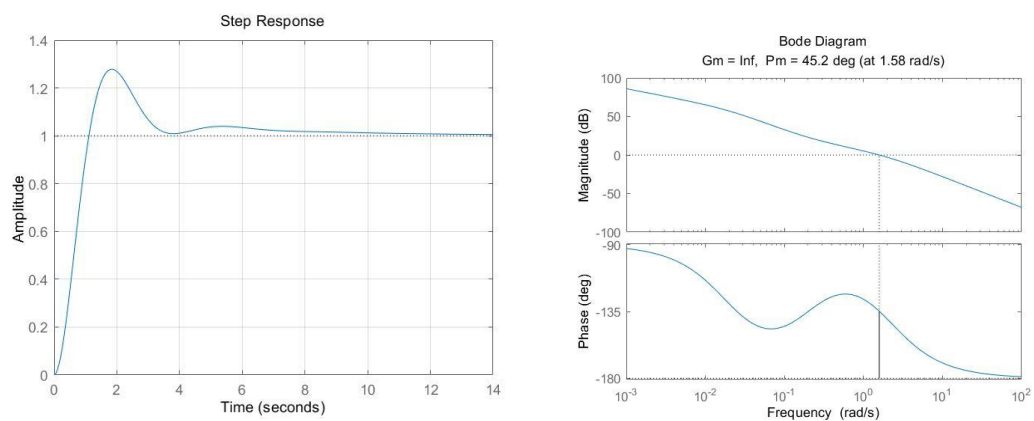
原系统：



超前校正系统:



滞后校正系统:



时频性能指标: (从左至右依次为原系统-超前校正系统-滞后校正系统)

$t_p = 0.507s$	$t_p = 0.281s$	$t_p = 1.85s$
$\delta\% = 60\%$	$\delta\% = 14\%$	$\delta\% = 28\%$
$ts = \begin{cases} 3s, \Delta = 5 \\ 3.68s, \Delta = 2 \end{cases}$	$ts = \begin{cases} 0.512s, \Delta = 5 \\ 0.646s, \Delta = 2 \end{cases}$	$ts = \begin{cases} 3.09s, \Delta = 5 \\ 7.18s, \Delta = 2 \end{cases}$
$\omega_c = 6.14rad/s$	$\omega_c = 10rad/s$	$\omega_c = 1.55rad/s$
$\gamma = 18^\circ$	$\gamma = 58^\circ$	$\gamma = 46^\circ$

---

超前校正作用：增加 $\omega_c$ ，使幅频特性在 $\omega_c$ 附近的斜率减小，曲线平坦。增大 $\gamma$ ，提高稳定性，减小了 $t_s, t_P, t_\gamma$

适用： $\omega_c$ 幅频斜率较缓慢，相频衰减较慢，需要增大带宽比

滞后校正作用：减小了 $\omega_c, \omega_b$ ， $\omega_c$ 处幅频特性斜率减小，曲线平坦；增大了 $\gamma$ 和增益裕度 $k_g$ 。减小了 $\delta\%$ ，增大了 $t_p$

适用：相位裕量点位于低频段

## 实验四

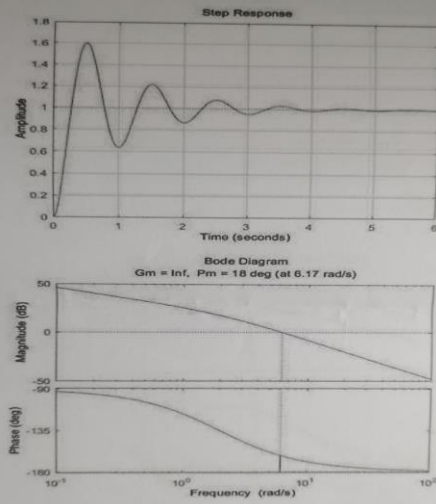
1. 一阶系统的特性：响应时间常数：系统从稳态到 63.2% 所用时间  
过渡过程：系统从初始状态过渡到稳态的过程  
超调量：一阶系统超调量一般为 0  
比例项 P：当前误差产生控制输出，减小稳态误差。可能导致超调、振荡  
积分项 I：由过去的累计误差产生控制输出，减小稳态误差，可能导致响应变慢、超调  
微分项 D：由误差变化率产生控制输出，抑制振荡，可能引入噪声、过响应。
2. PI 控制器是一种滞后校正装置，在 0 频处距有无穷大增益，大大改善了系统的稳态性能。适用：稳态误差要求较小的控制  
PD 控制器是一种超前校正装置，利用相位超前，使系统的相位裕度增大，校正后系统幅值穿越频率增大，故系统响应变快。适用：快速响应、抑制振荡
3. PI:  $2\varepsilon\omega_o = \frac{1+k_p k}{\tau}, \omega_o^2 = \frac{k_i k}{\tau}, k_i = \frac{k_p}{T_{i,min} * 60}, k_d = k_p * T_{d,min} * 60$
4. PD:  $2\varepsilon\omega_o = \frac{1+k_d K}{\tau}, \omega_o^2 = \frac{k_p K}{\tau}$

## 1.2 预习报告——白柯渊

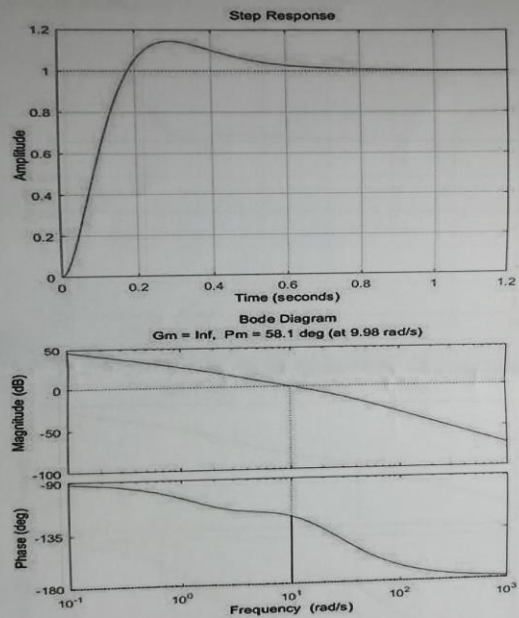
实 验 报 告				成绩
课程: <u>自动控制实验</u>		实验日期: _____		第 页(共 页) 年 月 日 年 月 日 (订正、重做)
专业班号: <u>自动化2101</u> 组别: _____		交报告日期: _____		
姓名: <u>白柯渊</u> 学号: <u>2211410814</u>		报告退发: _____		
同组者: <u>张晓宇</u>		教师审批签字: _____		
<b>实验名称</b> <u>线性系统串联校正设计</u>				
1) 超前校正环节设计过程: $G_c(s) = \frac{R_1 C_1 s + 1}{R_2 C_2 s + 1}$ 原系统的开环传递函数 $G(s) = \frac{20}{s(0.5s+1)}$ 有 $G_c(s) = \frac{20}{s(0.5s+1)}$ $\angle \omega = 20 \lg 20 - 20 \lg \omega - 20 \lg \sqrt{1+0.25\omega^2}$ $\angle \omega = 0 \quad \omega_{c1} \approx \sqrt{2} = 1.41 \text{ rad/s}$ 解得 $\varphi(\omega_{c1}) = -90^\circ - \tan^{-1} 0.5\omega_{c1} = -162^\circ$ $\gamma = 180^\circ - 162^\circ = 18^\circ$ $\angle(\omega_{c2}) = 20 \lg 20 - 20 \lg \omega_{c2} - 20 \lg \sqrt{1+0.25\omega_{c2}^2} = -10 \lg \alpha$ $20 \lg \alpha \geq 20 \lg 10 \sqrt{2} - 20 \lg 20 \Rightarrow \alpha \geq 6.5$ $\sin \gamma_m = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 1} = 0.73 \Rightarrow \gamma_m = 47.1^\circ$ 取 $\omega_m = \omega_{c2} = 12.6 \text{ rad/s}$ $T = \frac{1}{\omega_m \alpha} = 0.0215, \quad \alpha T = 0.25$ $\therefore G_c(s) = \frac{1 + 0.25s}{6.5(1 + 0.0215s)}$ $\gamma = 180^\circ - 90^\circ - \tan^{-1} 0.25\omega_{c2} - \tan^{-1} 0.0215\omega_{c2} + \tan^{-1} 0.2\omega_{c2} = 58^\circ > 45^\circ$ 满足要求 $\therefore R_1 C_1 = 0.2, \quad R_2 C_2 = 0.031$ $\therefore C_1 = 1\mu F, \quad R_1 = 200k\Omega; \quad C_2 = 1\mu F, \quad R_2 = 30k\Omega$				

实 验 报 告				成绩
课程: _____		实验日期: _____		第 页(共 页) 年 月 日 年 月 日 (订正、重做)
专业班号: _____ 组别: _____		交报告日期: _____		
姓名: _____ 学号: _____		报告退发: _____		
同组者: _____		教师审批签字: _____		
<b>实验名称</b> <u>超前校正</u>				
$G_c(s) = \frac{s+1}{50s+1}$ $\therefore C_1 = 1\mu F, \quad R_1 = 5M\Omega$ $C_2 = 1\mu F, \quad R_2 = 50M\Omega$				
2) 原系统      超前校正系统      滞后校正系统				
$t_r = 0.507s$	$t_r = 0.279s$	$t_r = 1.85s$		
$\delta\% = 60\%$	$\delta\% = 13\%$	$\delta\% = 28\%$		
$t_s = \begin{cases} 2s, \sigma=5 \\ 1.8s, \sigma=2 \end{cases}$	$t_s = \begin{cases} 0.502s, \sigma=5 \\ 0.624s, \sigma=2 \end{cases}$	$t_s = \begin{cases} 2.09s, \sigma=5 \\ 7.18s, \sigma=2 \end{cases}$		
$\omega_c = 6.14 \text{ rad/s}$	$\omega_c = 12.6 \text{ rad/s}$	$\omega_c = 1.55 \text{ rad/s}$		
$\gamma = 18^\circ$	$\gamma = 58^\circ$	$\gamma = 46^\circ$		
超前校正的作用: 增大了 $\omega_c$ , 使幅频特性在 $\omega_c$ 附近的斜率减小, 曲线平坦。 增大了 $\gamma$ , 提高了稳定性, 减小了 $t_s$ , $t_p$ , $t_r$ 。 适用于 $\omega_c$ 幅频斜率较缓慢, 相频衰减较慢, 需增大带宽比。				
滞后校正的作用: 减小了 $\omega_c$ , $\omega_c$ 处幅频特性斜率减小, 曲线平坦; 增大了 $\gamma$ 和增益裕度 $K_g$ , 减小了 $\delta\%$ , 增大了 $t_p$ 。 适用于在低频段相频特性上能找到相位裕量点。				

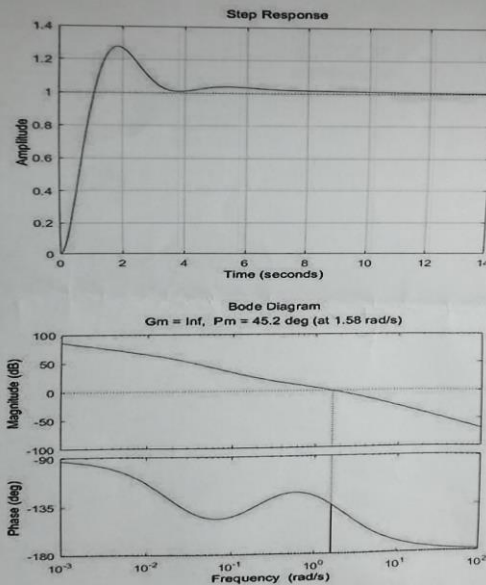
原系统:



超前校正系统:



滞后校正系统:



## 实验报告

成绩

课程: 自动控制实验  
专业班号: 自动化101 组别:  
姓名: 白柯翔 学号: 201410814  
同组者: 张晗宇

实验日期: 年 月 日  
交报告日期: 年 月 日  
报告退发: (订正、重做)  
教师审批签字:

第 页 (共 页)

年 月 日

年 月 日

年 月 日

### 实验名称

直流电机系统建模与控制

- 1) 一阶系统的特性:
  - ① 响应时间常数  $T$ : 系统从稳态到 63.2% 所需的时间,  $T$  越小, 系统响应越快。
  - ② 过渡过程: 系统从初始状态过渡到稳态的过程。
  - ③ 由于一阶系统的单位阶跃响应曲线为单调上升有上界的指数曲线, 没有振荡, 峰值时间和超调量 0% 均不存在。
- PID 算法中比例、积分、微分的作用:
  - 比例 P: 可以调整系统的开环增益, 提高系统的稳态性能, 加快响应速度, 但过大的开环增益可能会使稳定裕度变小甚至不稳定。
  - 积分 I: 有对输入信号进行积累的作用, 可用来消除稳态误差, 但会降低系统的稳定性, 也会使系统反应速度降低。
  - 微分 D: 通过测量误差变化率来控制输出, 抑制振荡, 可能引入噪声并导致过响应。
- 2) PI 控制器是种滞后校正装置, 在零频率处具有无穷大增益, 因而改善了系统稳态性能, 同时使系统基本保持原来的响应速度和稳定裕度。  
适用于需要消除稳态误差的系统。



实 验 报 告				成绩
课程: _____	实验日期: _____	第 页 (共 页)		
专业班号 _____ 组别 _____	交报告日期: _____	年 月 日		
姓 名 _____ 学号 _____	报告退发: _____	(订正、重做)		
同组者 _____	教师审批签字: _____			

**实验名称**

PD控制器是一种超前校正装置, 利用PD控制器提供的相位超前, 使系统的相位裕度增大。而且用于校正后系统的幅值穿越频率 $\omega_c$ 增大, 系统的响应速度变快。  
适用于需要快速响应和抑制振荡的系统。

4) PI:  $\angle G \omega_0 = \frac{1+K_p \times K}{\tau}$  ,  $\omega_0^2 = \frac{K_I \times K}{\tau}$

PD:  $\angle G \omega_0 = \frac{1+K_d K}{\tau}$  ,  $\omega_0^2 = \frac{K_p K}{\tau}$

## 2 实验内容

### 2.1 实验三、线性系统串联校正设计

1. 已知单位反馈系统开环传递函数为 $G_k(s) = G(s) = \frac{20}{s(0.5s+1)}$ 。应用 MATLAB 绘制出原系统的伯德图与阶跃响应曲线, 并搭接模拟电路做出原系统阶跃响应曲线。
2. 设计一个超前串联校正环节, 使系统校正后满足静态速度误差系数为  $K_v=20$ ,  $\omega_c \geq 10 \text{ rad/s}$ ,  $\gamma \geq 45^\circ$ 。理论设计出超前串联校正环节, 应用 MATLAB 绘制出超前校正后的伯德图与阶跃响应曲线, 并搭建模拟电路做出校正后系统阶跃响应曲线。比较校正前后系统相位裕量、增益裕量、穿越频率 $\omega_c$ 以及阶跃响应曲线的 $\delta\%$ 与 $t_s$ 。
3. 在原系统中加入滞后校正环节  $G_c(s) = \frac{5s+1}{50s+1}$ , 要求应用 MATLAB 绘制出校正后系统的伯德图与阶跃响应曲线, 并连接模拟电路做出校正后系统阶跃响应曲线。比

较校正前后系统相位裕量、增益裕量、穿越频率 $\omega_c$ 。以及阶跃响应曲线的 $\delta\%$ 与 $t_s$ 。搭建模拟电路时，应当注意：运算放大器的 Vcc 与 Vee 分别接实验板+15V 与-15V，正输入端 IN+应接实验板的 Ground 端，实验板模拟量输入接口 AI(-)应接实验板的 Ground。

## 2.2 实验三记录图表

原系统：

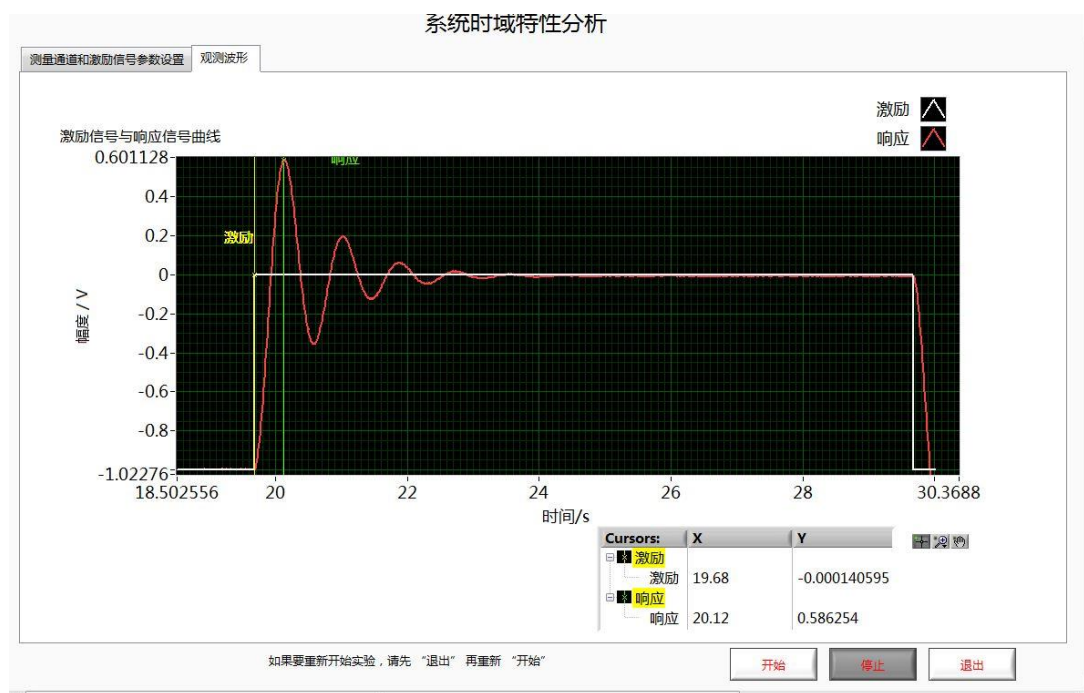


图 2-1 原系统超调量 $M_p$ 、峰值时间 $t_p$

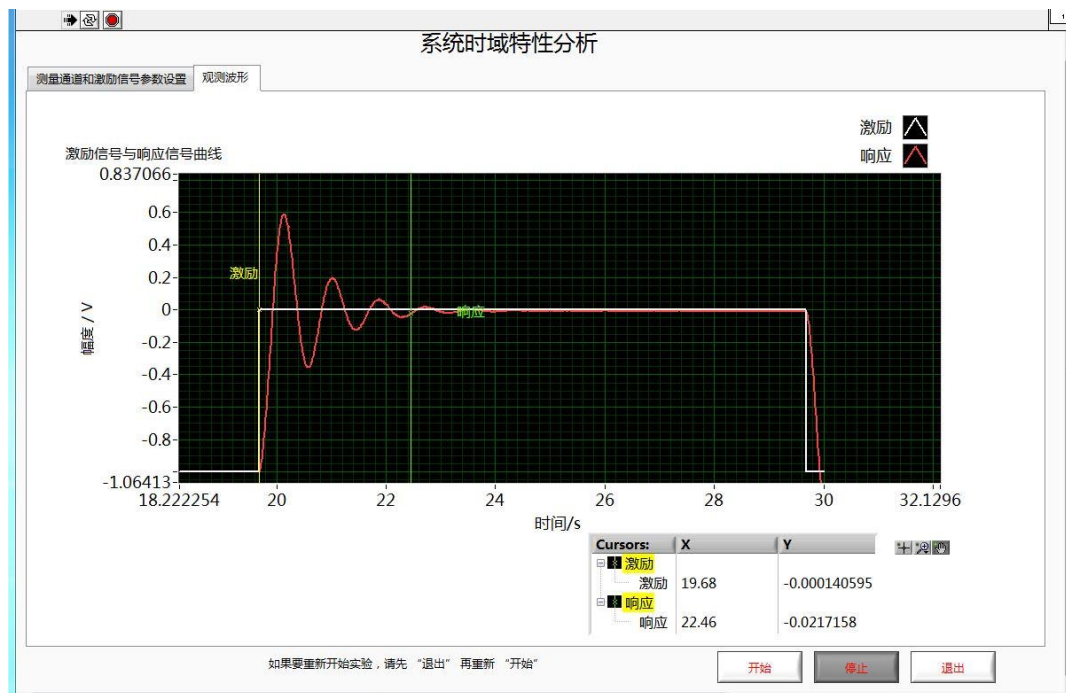


图 2-2 原系统调整时间  $t_s - \Delta = 2$

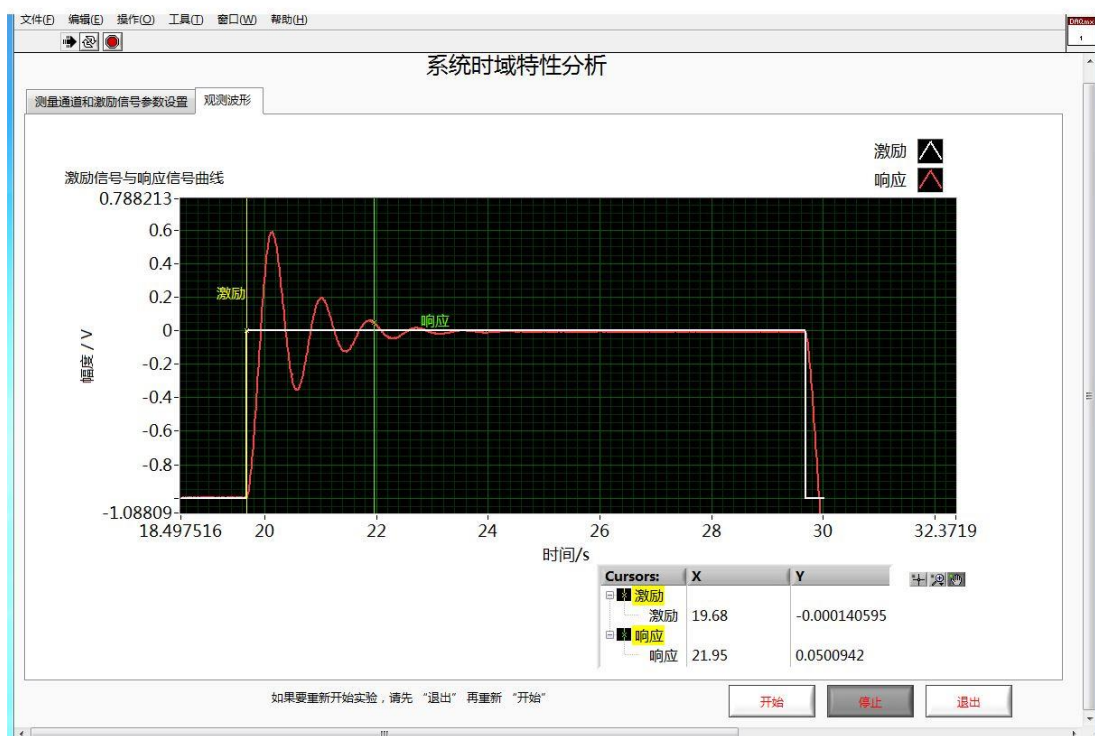


图 2-3 原系统调整时间  $t_s - \Delta = 5$

超前校正系统:

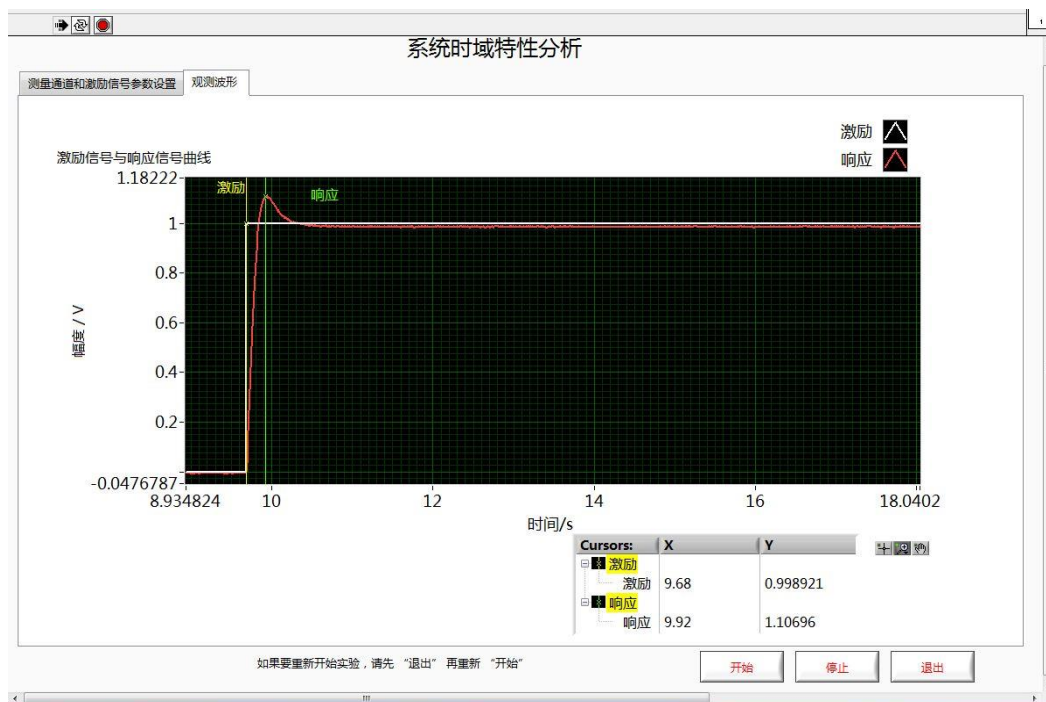


图 2-4 超前校正系统超调量  $M_p$ 、峰值时间  $t_p$

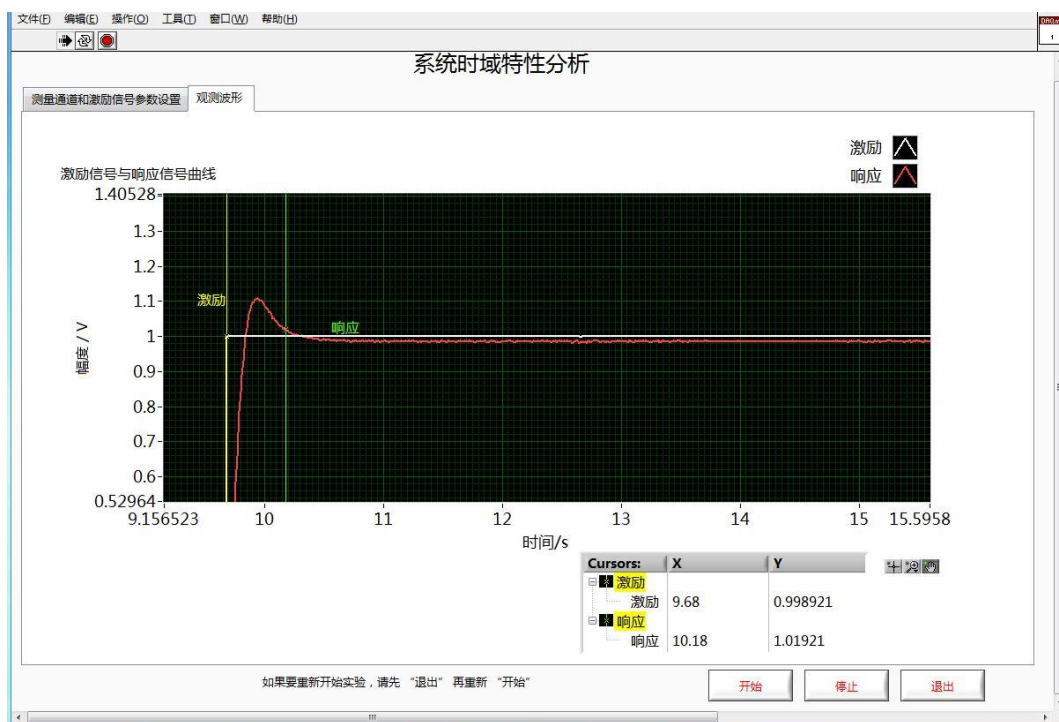


图 2-5 超前校正系统调整时间  $t_s - \Delta = 2$



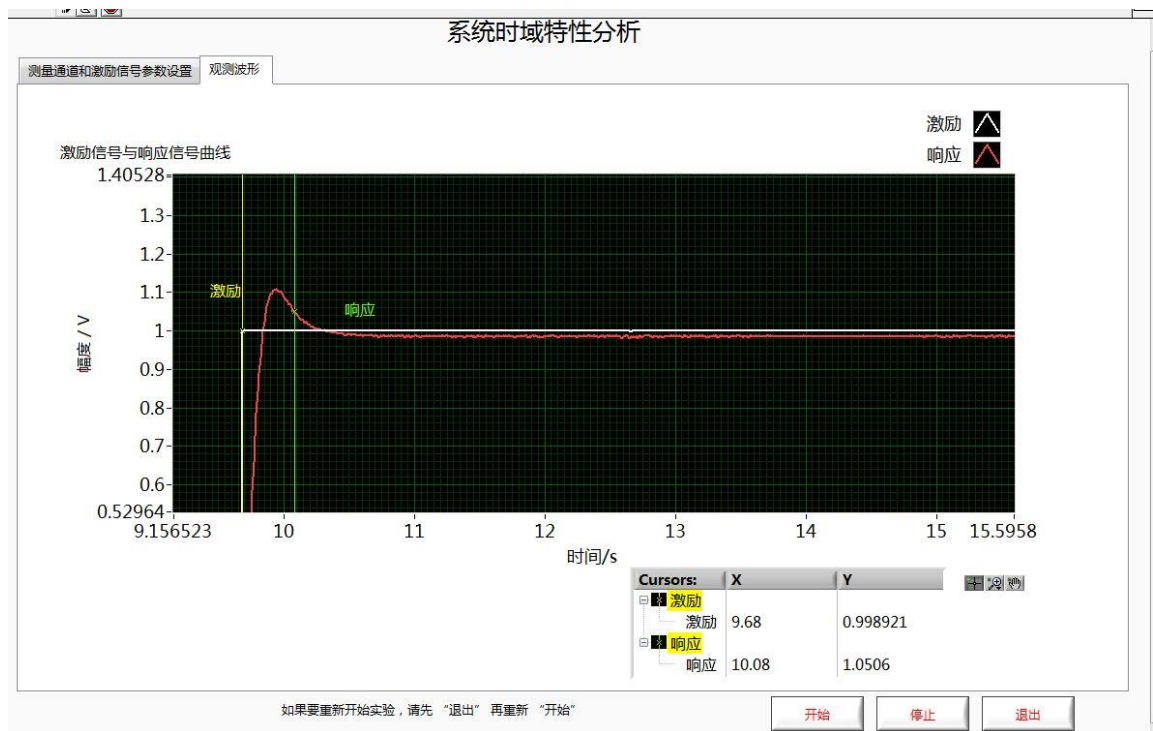


图 2-6 超前校正系统调整时间  $t_s - \Delta = 5$

滞后校正系统:

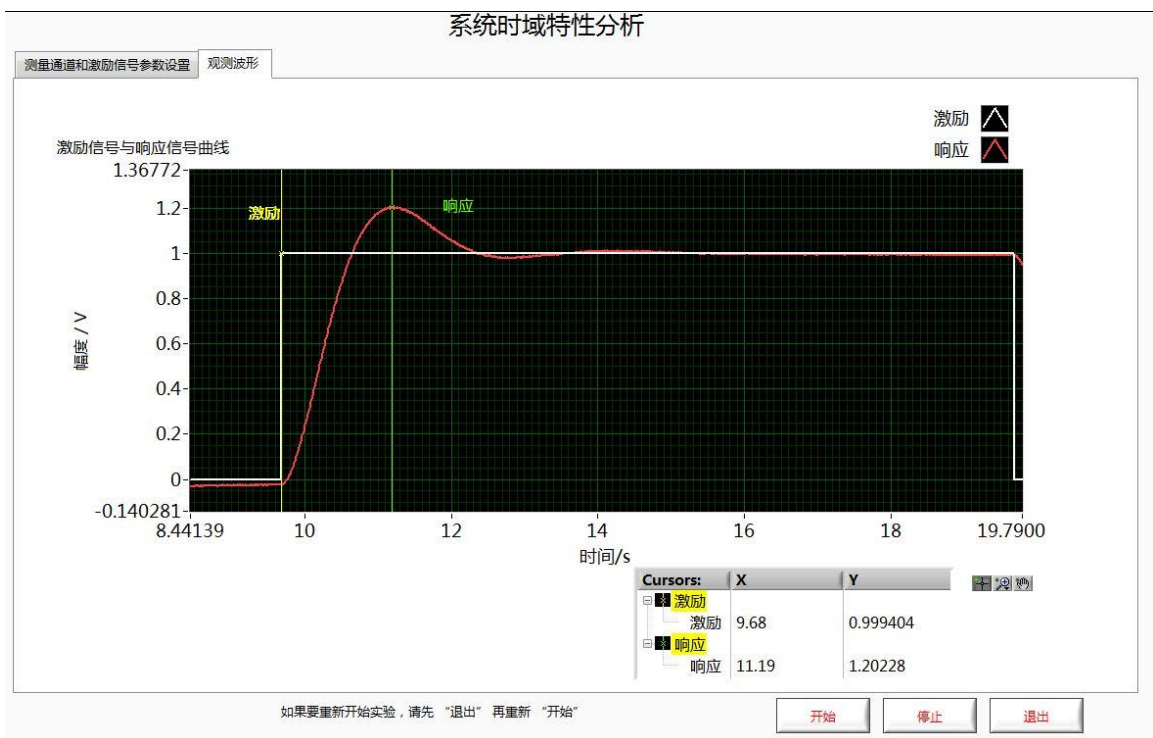


图 2-7 滞后校正系统超调量  $M_p$ 、峰值时间  $t_p$

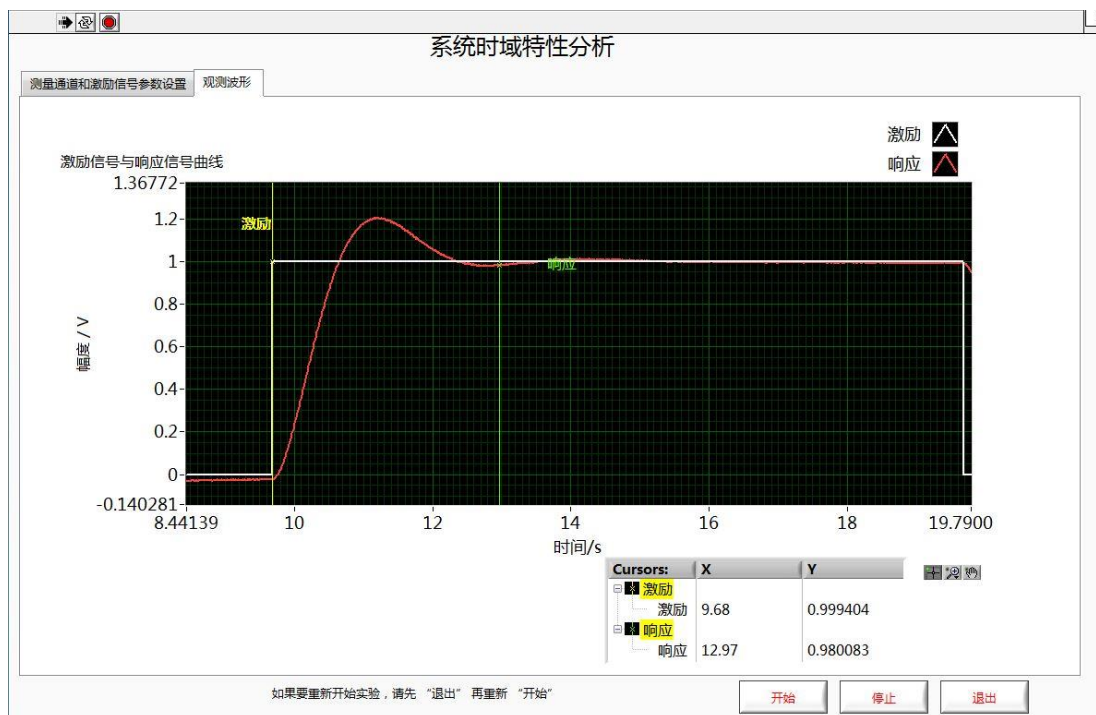


图 2-8 滞后校正系统调整时间  $t_s - \Delta = 2$

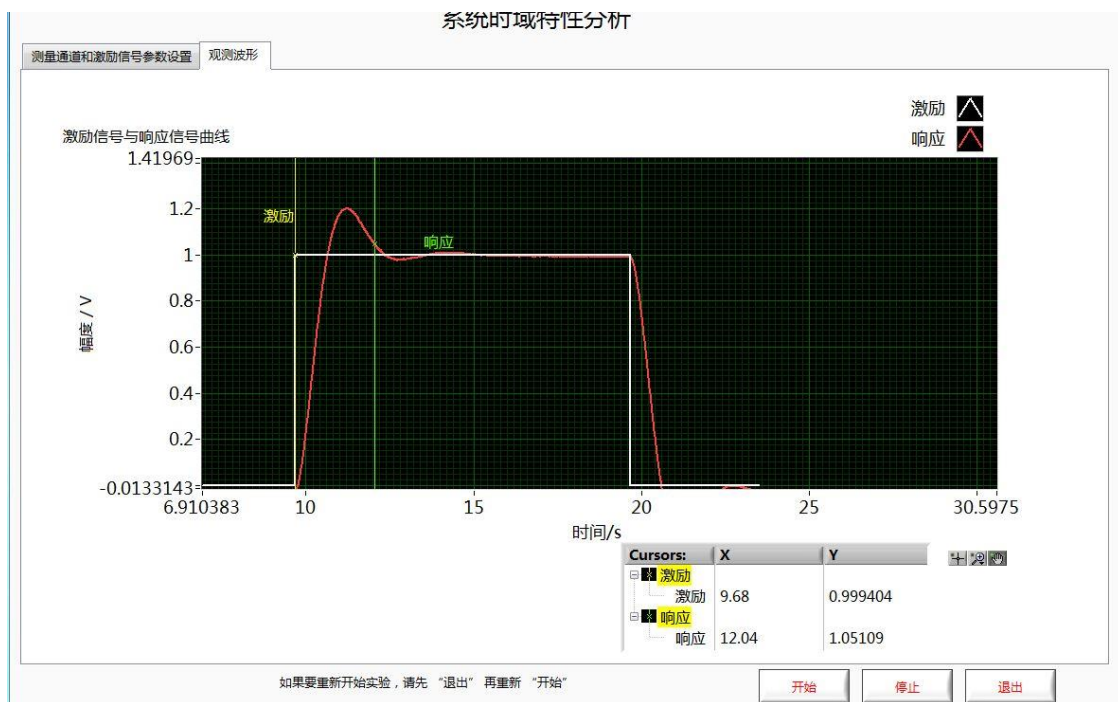


图 2-9 滞后校正系统调整时间  $t_s - \Delta = 5$

## 2.3 实验四、直流电机系统建模与控制

### 1. 直流电机系统建模

(1) 打开 ELVIS 电源, 待指示灯正常后, 打开 Quanser 直流电机实验板电源。

- 
- (2) 打开自动控制原理实验系统, 选择直流电机系统建模与控制实验, 实验前首先确认 ELVIS 的设备名称 (Device Name)、速度采集通道 (Speed Input) 与电压输出通道 (Voltage Output) 设置正确。实验中要求采用如下三种建模方法建立电机模型。
- 采样获取直流电机在给定电压作用下的电机转速响应波形, 应用实验原理中的一阶系统阶跃响应实验方法求得直流电机模型的时间常数  $\tau$  与开环增益  $K$ 。
  - 通过系统辨识方法获取直流电机模型。给电机一个方波的电压激励, 然后采集电机的速度响应, 再将电压激励与速度响应信号传递给 LabVIEW System Identification 工具包, 通过这个工具包的 SI Estimate Transfer Function Model VI 辨识出系统的数学模型。对比激励电压信号作用下辨识出的模型速度的响应与实际测得速度响应。
  - 通过手动参数调节对电机建模。根据电机电压与转速之间的传递函数关系:  $K/(1+\tau s)$ , 通过手动调节  $K$  与  $\tau$  这两个参数, 实时观察模型响应与系统实测相应的接近程度来最终确定  $K$  与  $\tau$  这两个电机模型参数。
2. 基于 PI 控制器的直流电机转速控制
- (1) 打开 ELVIS 电源, 待指示灯正常后, 打开 Quanser 直流电机实验板电源。
  - (2) 打开自动控制原理实验系统, 选择直流电机系统建模与控制实验。实验分三步进行:
    - 选择打开 PI 控制器设计, 根据电机的数学模型参数 ( Motor Parameters ), 以及设定的闭环系统性能, 在 Design Spec 中通过闭环系统的自然频率  $\omega_n$  与阻尼比  $\zeta$  来确定电机速度控制器的 PI 参数, 并获取在 PI 参数下的系统的阶跃响应曲线与性能指标: 系统上升时间、峰值与峰值时间、调节时间等。
    - 选择打开 PI 控制器仿真, 输入电机系统模型参数与 PI 控制器的参数 ( PI gains ), 观察记录波形, 验证设计的 PI 控制器是否具有良好的控制性能。
    - 选择打开直流电机速度控制, 先确认 ELVIS 的设备名称速度采集通道与电压输出通道设置正确。输入 PI 控制器的参数, 观察记录设计的 PI 控制器在控制实际电机转速时的控制效果。
3. 基于 PD 控制器的直流电机转速控制
- (1) 打开 ELVIS 电源, 待指示灯正常后, 打开 Quanser 直流电机实验板电源。
  - (2) 打开自动控制原理实验系统, 选择直流电机系统建模与控制实验。实验分三步进行:

- 打开 PD 控制器设计，根据电机的数学模型参数，以及设定的闭环系统性能，在 Design Spec 中通过闭环系统的自然频率 $\omega_n$ 。与阻尼比 $\zeta$ 来确定电机速度控制器的 PD 参数，并获取在 PD 参数下的系统的阶跃响应曲线与性能指标：系统上升时间、峰值与峰值时间、调节时间等。
- 打开 PD 控制器仿真，输入电机的数学模型参数与 PD 控制器的参数，观察记录波形，仿真验证 PD 控制器是否有良好的控制性能。
- 打开电机位置控制，先确认 ELVIS 的设备名、速度采集通道与电压输出通道设置正确。运行程序，输入 PD 控制器参数，观察记录设计的 PD 控制器在控制实际电机转动角度时的控制效果。

## 2.4 实验四记录图表

### 直流电机系统建模

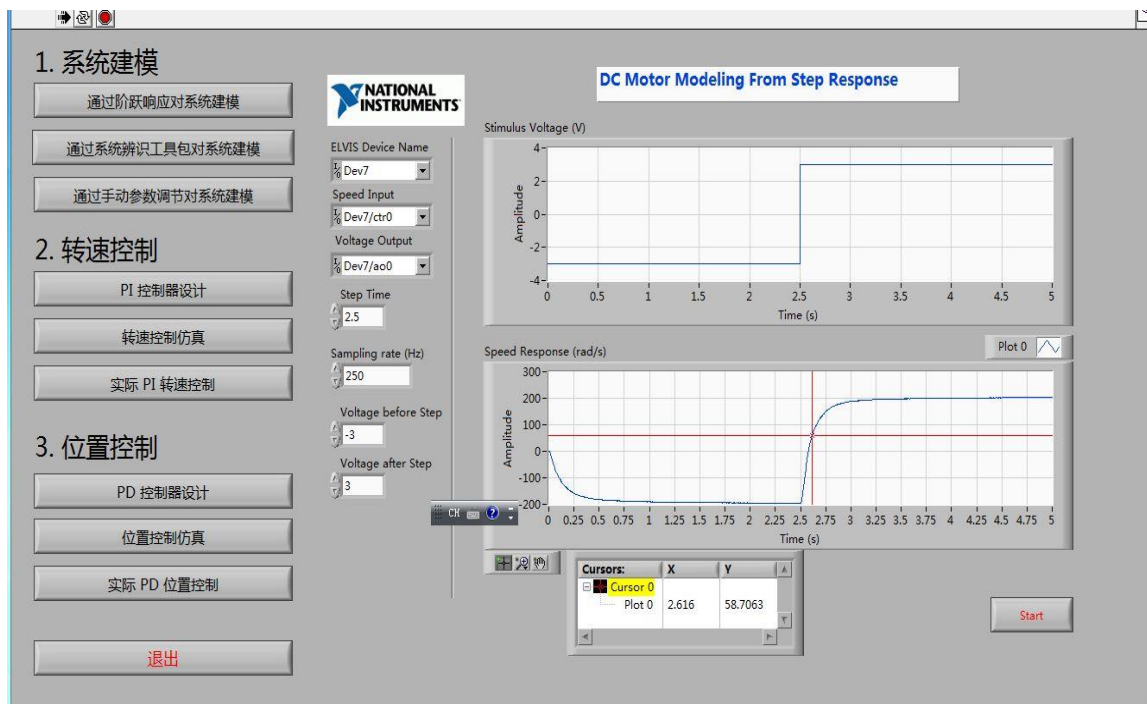


图 2-10 一阶系统阶跃响应实验方法



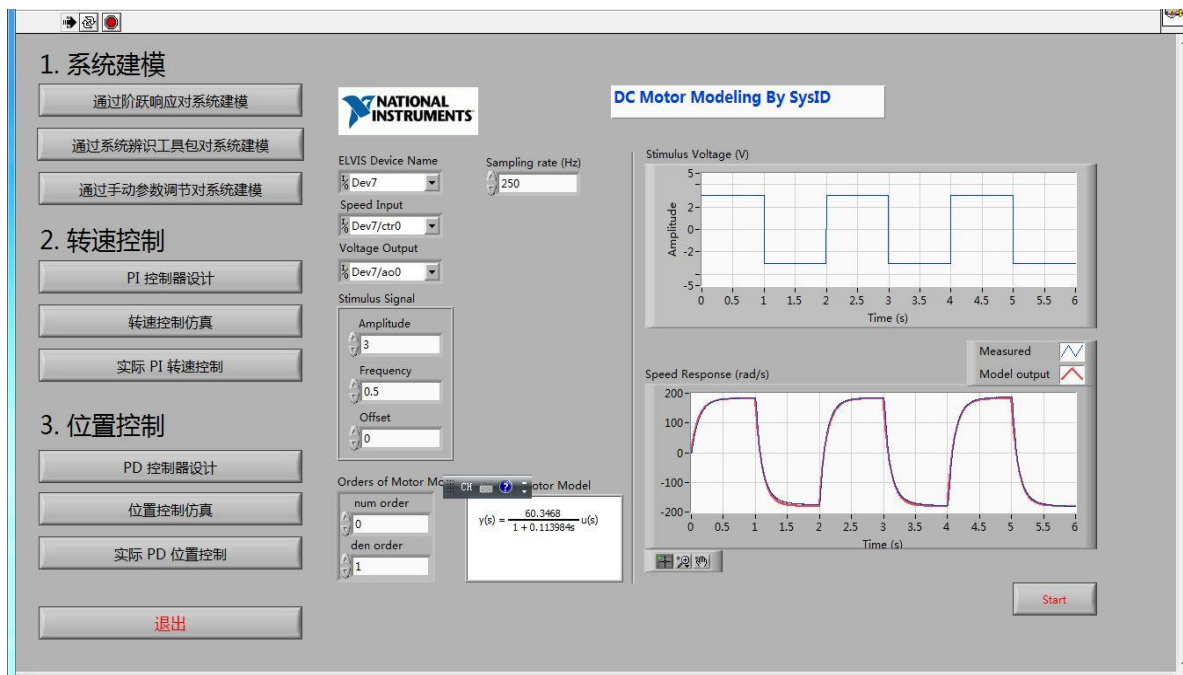


图 2-11 系统辨识方法

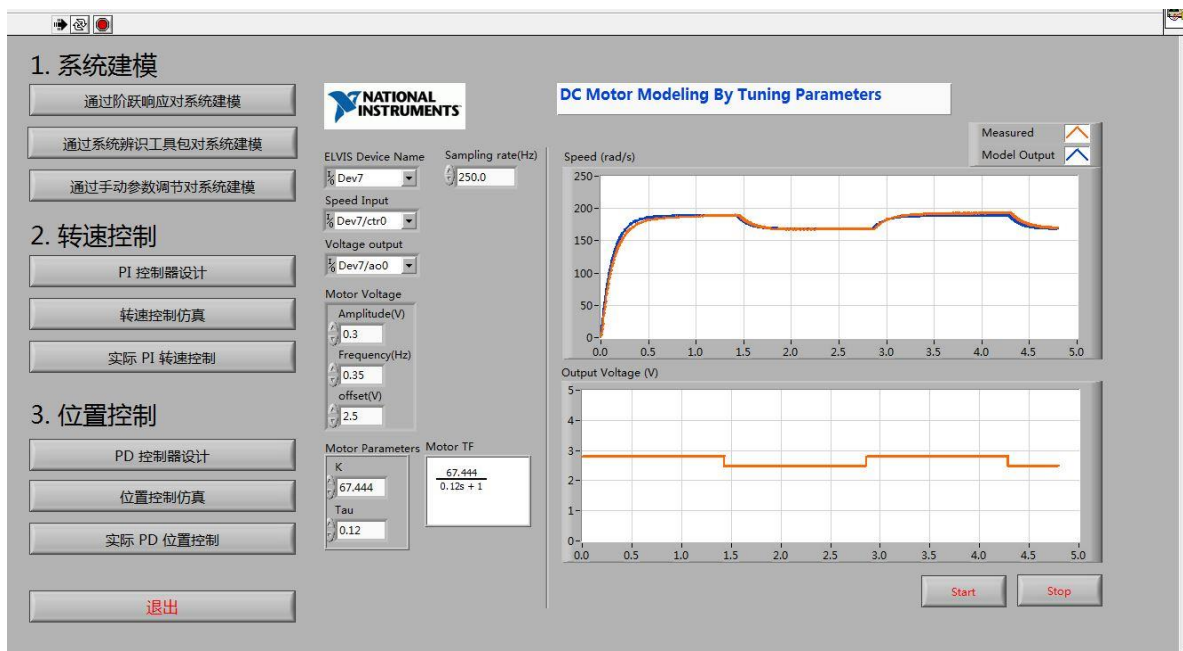


图 2-12 手动参数调节方法

## 基于 PI 控制器的直流电机转速控制

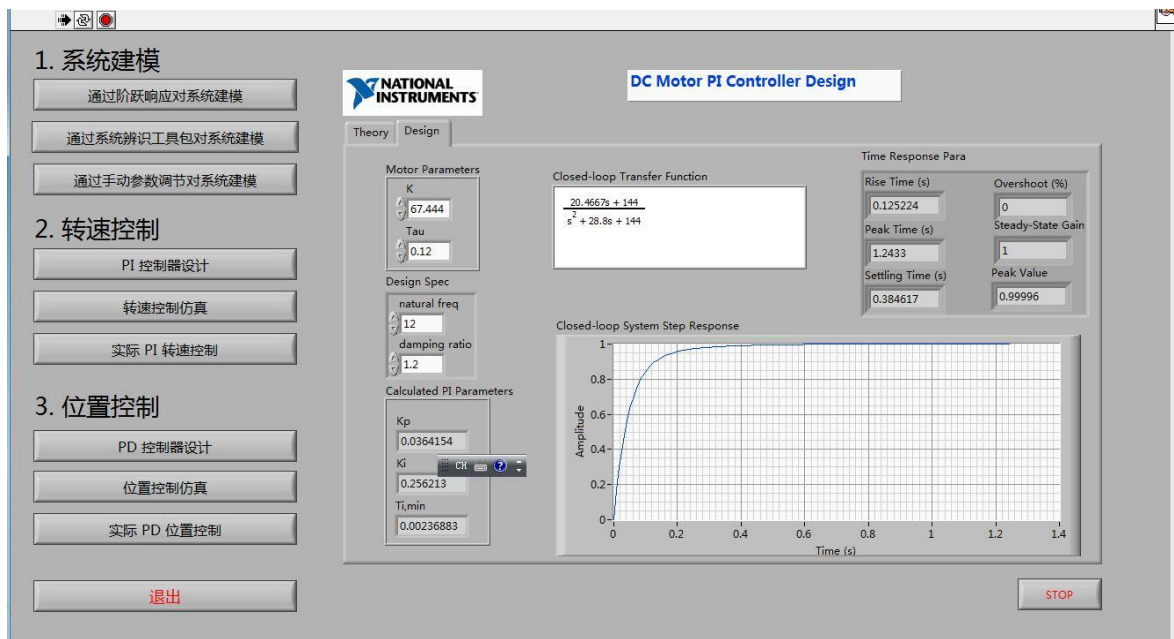


图 2-13 PI 控制器设计

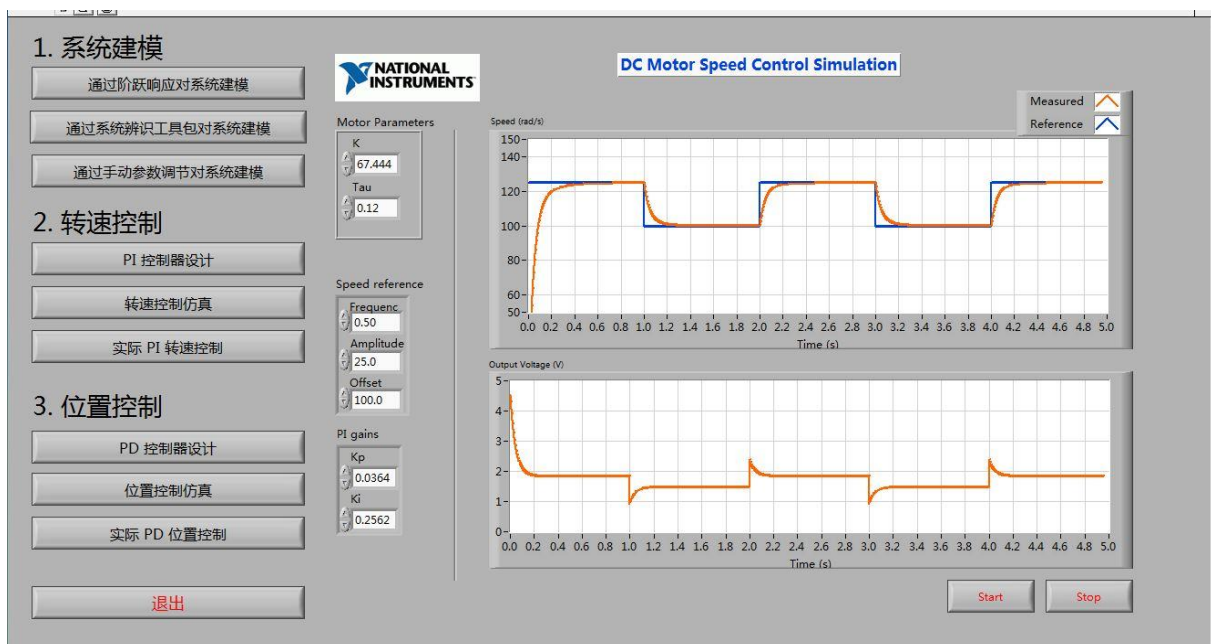


图 2-14 PI 控制器仿真

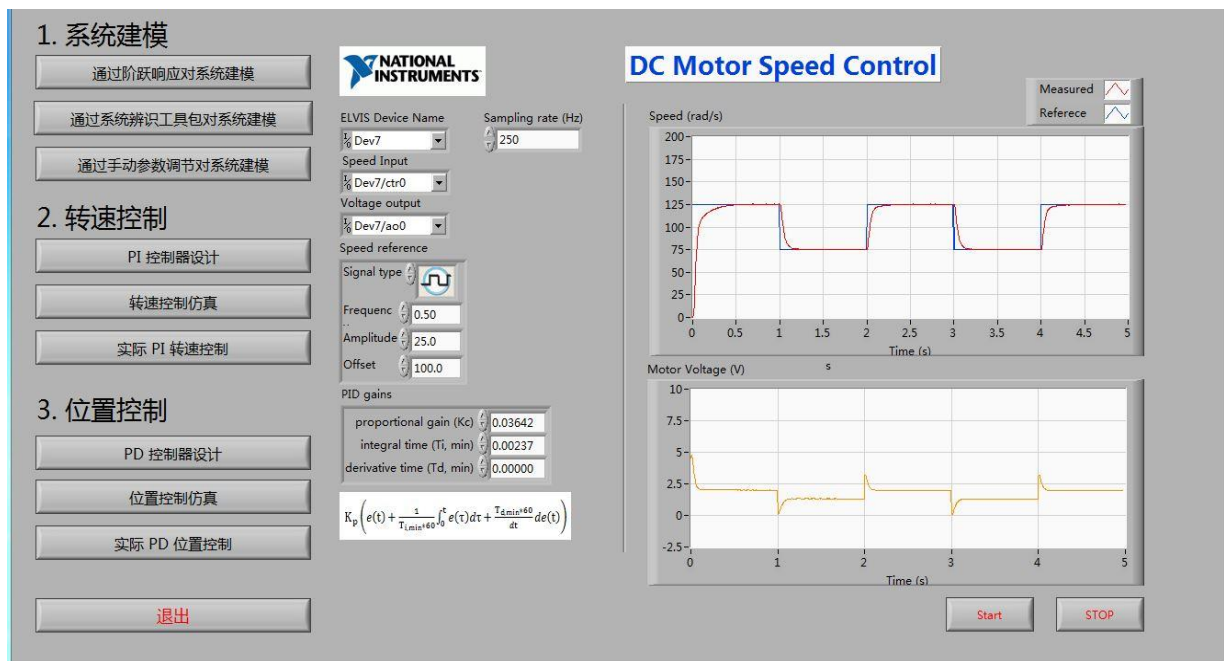


图 2-15 PI 控制器实际控制电机转速

## 基于 PD 控制器的直流电机位置控制

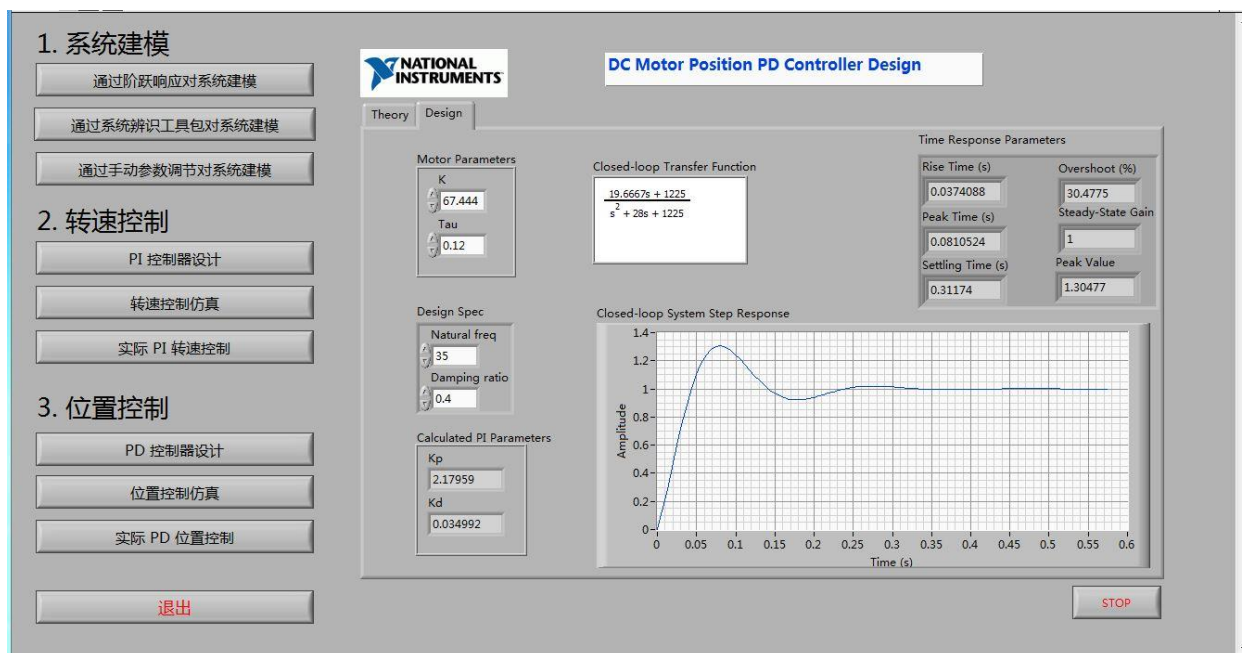


图 2-16 PD 控制器设计

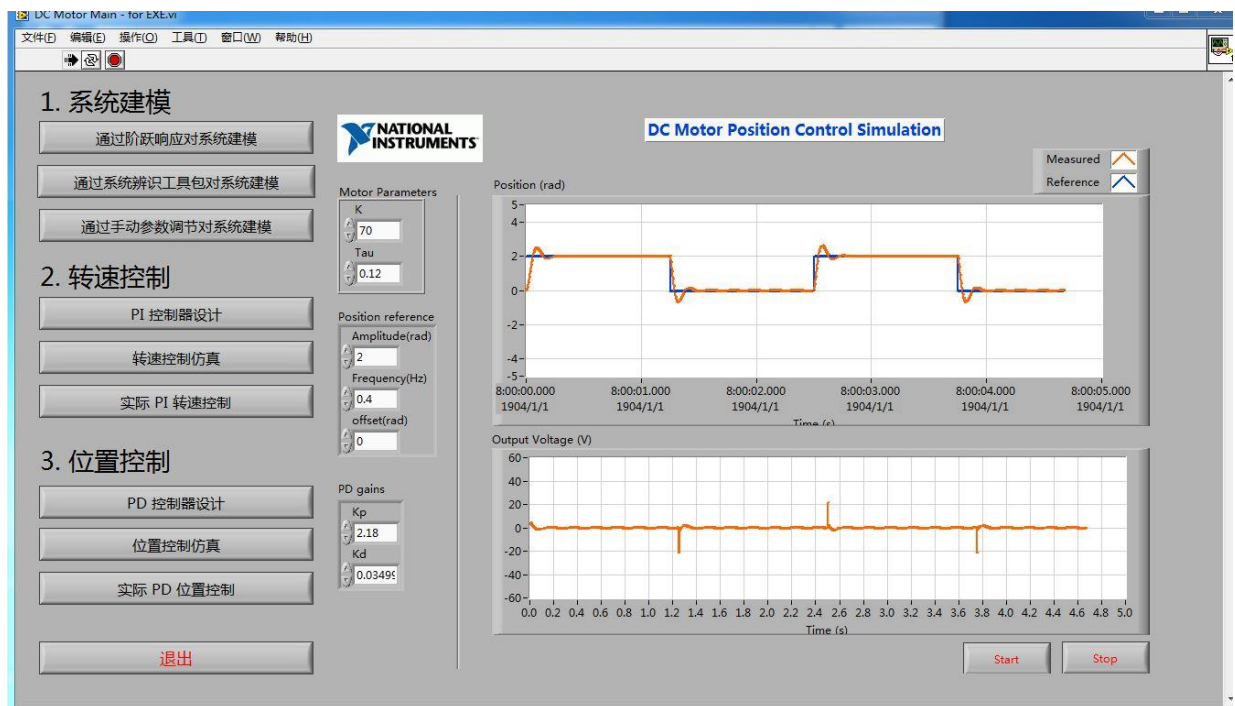


图 2-17 PD 控制器仿真

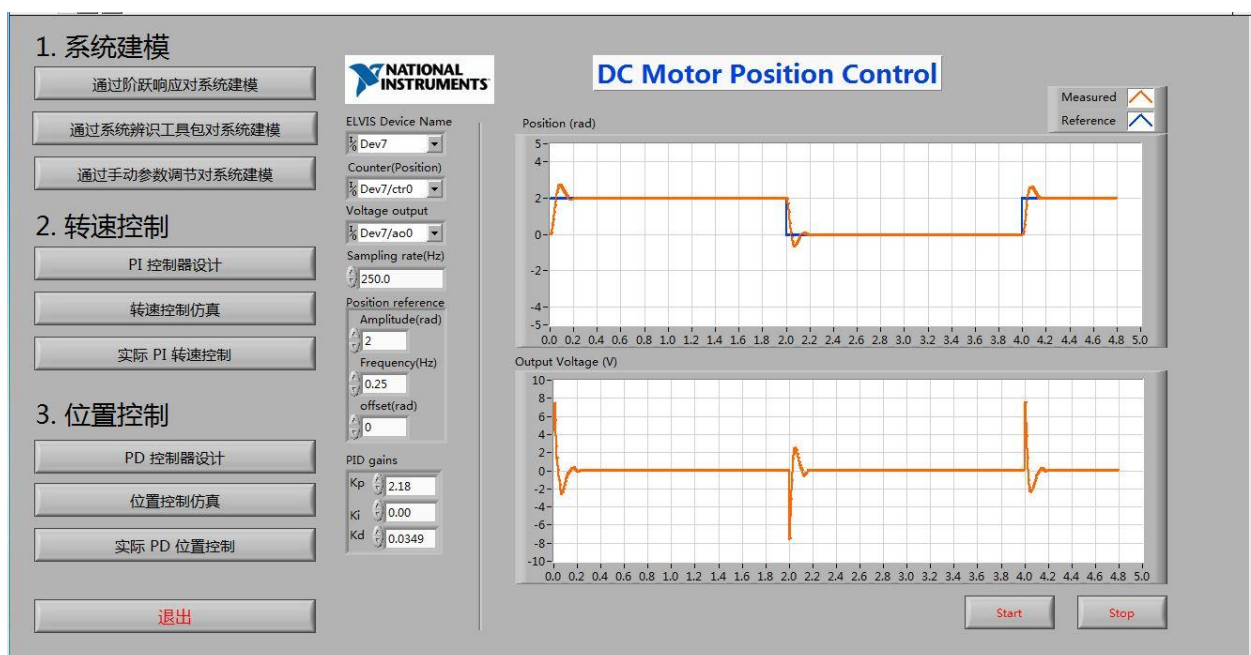


图 2-18 PD 控制器实际控制电机位置

## 3 理论与实验数据对比

### 3.1 实验三

组别	类型	理论计算	实验数据
原系统	超调量/%	60.00	58.63
	峰值时间/s	0.51	0.44
	调整时间(2/5)/s	3.68/3.00	2.78/2.27
超前校正系统	超调量/%	14.00	10.69
	峰值时间/s	0.28	0.24
	调整时间(2/5)/s	0.65/0.51	0.50/0.40
滞后校正系统	超调量/%	28.00	20.23
	峰值时间/s	1.85	1.51
	调整时间(2/5)/s	7.18/3.09	3.27/2.36

表 3-1 实验五理论计算与实验数据对比

对比分析结论:

- 1、 通过对比分析理论计算与实际数据，可以发现系统的指标理论值与实际测得的数据存在一定差距，特别是调整时间这一指标差距较大。这可能是系统建模不够准确或者实际实验时存在干扰和噪声等原因导致的。
- 2、 通过对比分析三个系统的不同指标，可以明显看出超前校正与滞后校正的作用。  
超前校正作用：增加 $\omega_c$ ，使幅频特性在 $\omega_c$ 附近的斜率减小，曲线平坦。增大 $\gamma$ ，提高稳定性，减小了 $t_s, t_P, t_\gamma$ 。滞后校正作用：减小了 $\omega_c, \omega_b$ ， $\omega_c$ 处幅频特性斜率减小，曲线平坦；增大了 $\gamma$ 和增益裕度 $k_g$ 。减小了 $\delta\%$ ，增大了 $t_p$ 。

### 3.2 实验四

组别	参数类型	实验数据
一阶系统阶跃响应方法	时间常数	0.110
	开环增益	60.444
系统辨识方法	时间常数	0.114
	开环增益	60.347
手动参数调节方法	时间常数	0.120
	开环增益	67.444

表 3-2 实验六直流电机模型参数记录

## 4 实验总结

### 4.1 实验三

- 1、通过本次实验，我们掌握了伯德图的绘制方法，学会用伯德图分析系统性能。学会使用 MATLAB 编写 m 文件绘制伯德图并实现各种功能。

---

2. 通过研究分析串联校正网络对系统的作用及性能指标的影响，我们得出了超前校正与滞后校正的特点与适用情况。超前校正适用于： $\omega_c$ 幅频斜率较缓慢，相频衰减较慢，需要增大带宽比；滞后校正适用于相位裕量点位于低频段。

3. 掌握了串联校正网络设计法，能根据期望指标推导出系统的串联校正环节。

## 4.2 实验四

- 1、通过本次实验，我们掌握了利用阶跃响应对直流电机建模的实验方法和理论依据。通过手动调整模型参数，拟合实际测量电机转速波形，比较成功地获取了最佳电机电压与转速之间的模型。
- 2、掌握了 PI 控制器的作用与原理，并利用所设计的 PI 控制器实际控制直流电机转速。
- 3、掌握了 PD 控制器的作用与原理，并利用所设计的 PD 控制器实际控制直流电机位置。