



院(系): 智能工程学院

成员: 张瑞程, 孙大伟, 钟镇宇

日期: 2024. 10. 31

实验名称: 基于 NI ELVIS 的典型系统时域响应

## 一、实验目的

- 了解比例环节、积分环节、惯性环节、比例积分环节、比例微分环节和比例积分微分环节六种典型环节的模拟电路构成。
- 掌握各种典型环节的理想阶跃响应曲线和实际阶跃响应曲线, 了解各种参数变化对典型环节动态特性的影响。
- 了解二阶系统的模拟电路构成, 分析二阶系统的特征参量 ( $\xi$ 、 $\omega_n$ ) 对过渡过程的影响。
- 研究二阶系统在三种阻尼比下的响应曲线, 并计算响应的性能指标。
- 熟练掌握 Routh 判据, 用 Routh 判据对三阶系统进行稳定性分析。

## 二、小组成员

- 张瑞程: 22354189
- 钟镇宇: 22354205
- 孙大伟: 22354205

## 三、实验任务

- 针对六种典型环节, 进行模拟电路图实物连线, 选择不同电阻值, 设定不同典型环节参数, 对比分析参数取值对典型环节动态性能的影响。
- 针对二阶系统:
  - 根据方框图与模拟电路图, 计算二阶系统闭环传递函数, 并分析特征参量( $\xi$ 、 $\omega_n$ )与电阻阻值  $R$  之间的关系;
  - 根据模拟电路图, 对二阶系统进行实物连线, 更换电阻值, 观察对比不同阻尼比条件下系统阶跃信号曲线和响应曲线, 并计算动态、稳态性能指标。
- 针对三阶系统:
  - 根据方框图与模拟电路图, 计算三阶系统闭环传递函数。并通过 Routh 判据, 分析系统的稳定性及所对应的电阻取值范围;
  - 根据模拟电路图, 对三阶系统进行实物连线, 更换电阻值, 观察对比三阶系统的三种稳定状态。

## 四、实验设备

- 笔记本电脑 (Windows 11)
- ELVIS III 主机

3. CCG 实验拓展板卡
4. CCB 实验程序 (LabVIEW)

## 五、 实验原理

### 1. 典型环节

- 比例环节  
方框图：

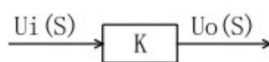


图 1-1 比例环节方框图

传递函数：

$$\frac{U_o(S)}{U_i(S)} = K$$

模拟电路：

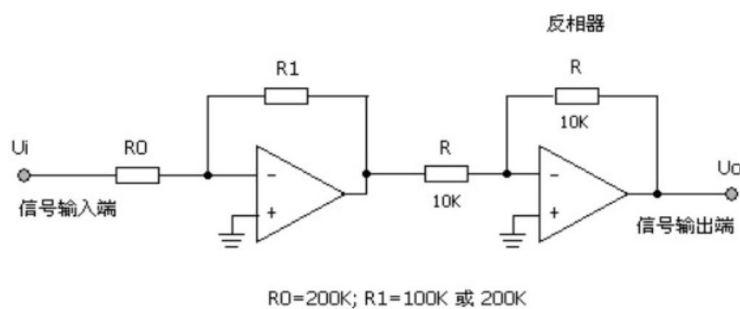


图 1-2 比例环节模拟电路图

阶跃响应：

$$U_o(t) = K (t \geq 0)$$

其中  $K = \frac{R_1}{R_0}$

- 积分环节  
方框图：

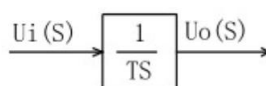


图 1-3 积分环节方框图

传递函数：

$$\frac{U_o(S)}{U_i(S)} = \frac{1}{TS}$$

模拟电路：

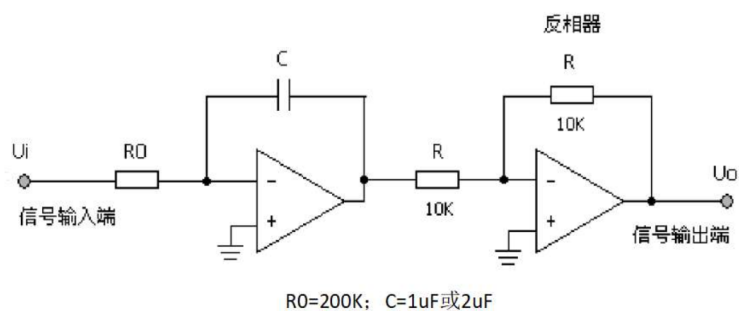


图 1-4 积分环节模拟电路图

阶跃响应:

$$U_o(t) = \frac{1}{T}t \quad (t \geq 0)$$

其中  $T = R_0C$

- 比例积分环节方框图:

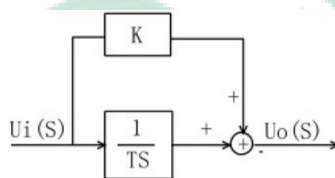


图 1-5 比例积分环节方框图

传递函数:

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = K + \frac{1}{TS}$$

模拟电路:

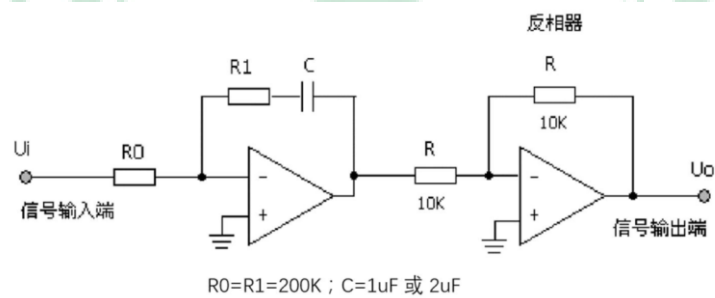


图 1-6 比例积分环节模拟电路图

阶跃响应:

$$U_o(t) = K + \frac{1}{T}t \quad (t \geq 0)$$

其中  $K = \frac{R_1}{R_0}; T = R_0C$

• 惯性环节

方框图：

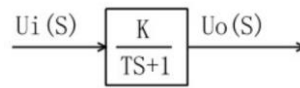
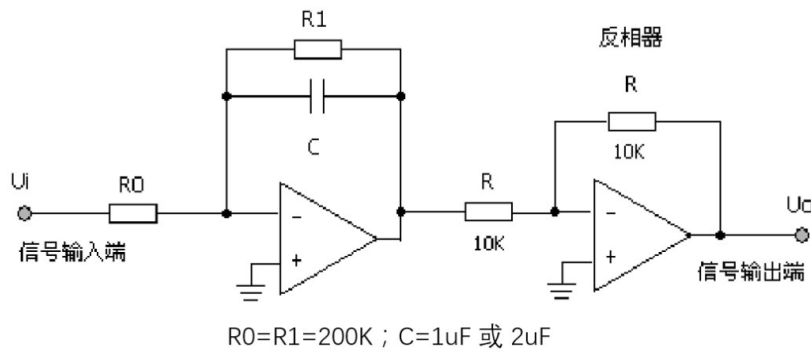


图 1-7 惯性环节方框图

传递函数：

$$\frac{U_o(S)}{U_i(S)} = \frac{K}{TS + 1}$$

模拟电路：



阶跃响应：

$$U_o(t) = K \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

其中  $K = \frac{R_1}{R_0}; T = R_1 C$

## 2. 二阶系统

方框图：

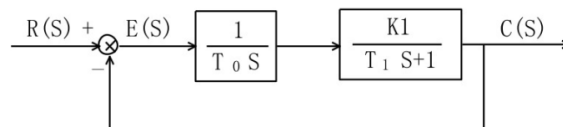


图 2-1 二阶系统方框图

开环传递函数：

$$G(s) = \frac{K_1}{T_0 S (T_1 S + 1)} = \frac{K_1 / T_0}{S (T_1 S + 1)}$$

其中，开环增益为  $K = K_1 / T_0$

闭环传递函数：

实验设定： $T_0 = 1 \text{ s}, T_1 = 0.2 \text{ s};$

闭环传递函数为  $W(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} = \frac{5K}{S^2 + 5S + 5K}$

$K_1 = 200/R \Rightarrow K = 200/R$

其中,  $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{T_1}} = 10\sqrt{\frac{10}{R}}, \zeta = \frac{5}{2\omega_n} = \frac{\sqrt{10R}}{40}$

模拟电路:

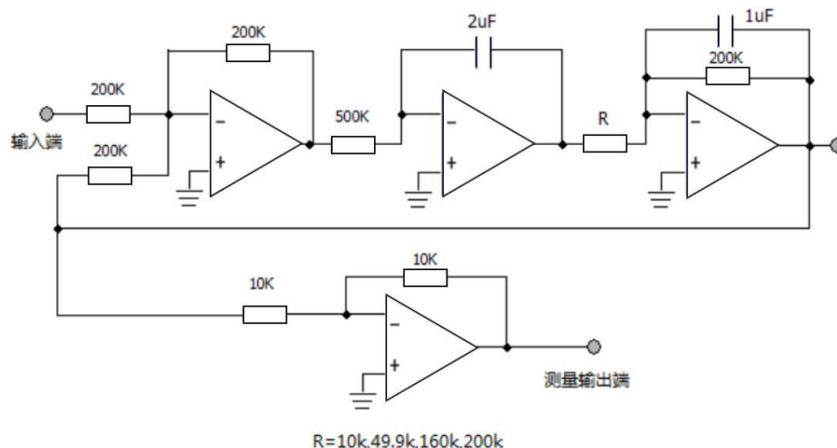


图 2-2 二阶系统模拟电路图

## 3. 三阶系统

方框图:

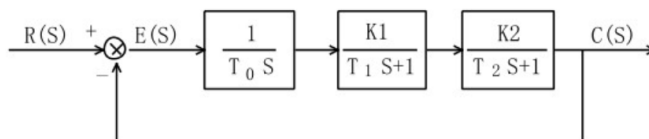
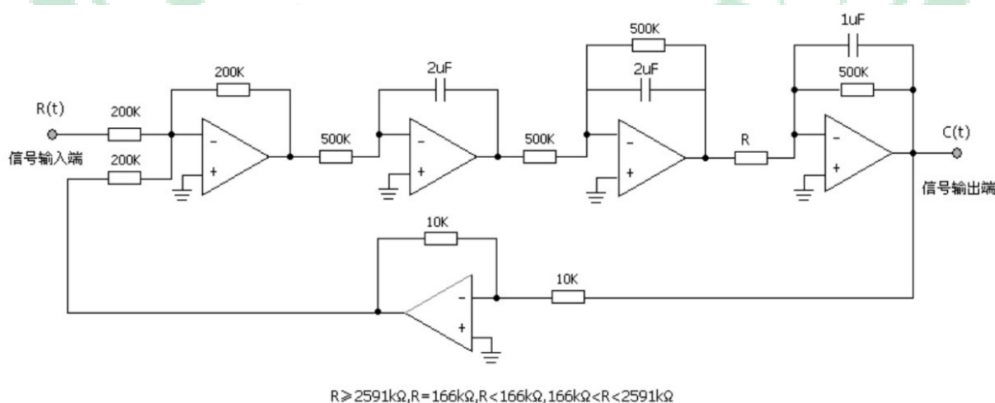


图 3-1 线性系统方框图

模拟电路:



开环传递函数:

实验设定:  $T_0 = 1s, T_1 = 0.1s$

$T_2 = 0.5s, K_1 K_2 = \frac{500}{R} \Rightarrow$

$G(S)H(S) = \frac{500/R}{S(0.1S+1)(0.5S+1)}$   
其中, 开环增益  $K = 500/R$

系统特征方程：

$$1 + G(S)H(S) = 0 \Rightarrow S^3 + 12 S^2 + 20 S + 20 K = 0$$

Routh 稳定性判据：

(1) 列 Routh 表：

$s^3$	1	20
$s^2$	12	$20K$
$s^1$	$(-5 K/3) + 20$	0
$s^0$	$20 K$	0

(2) 为保证系统稳定，Routh 表第一列各项都应该为正数，因此有

$$\begin{cases} -\frac{5}{3}K + 20 > 0 \\ 20K > 0 \end{cases}$$

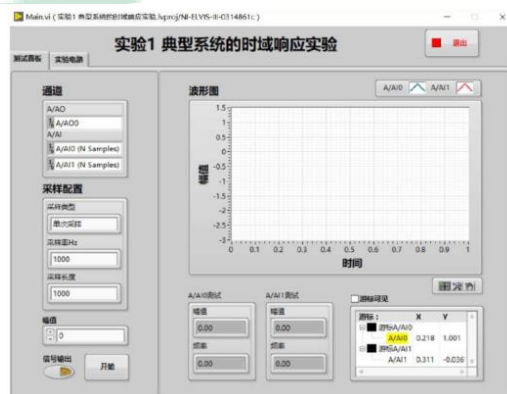
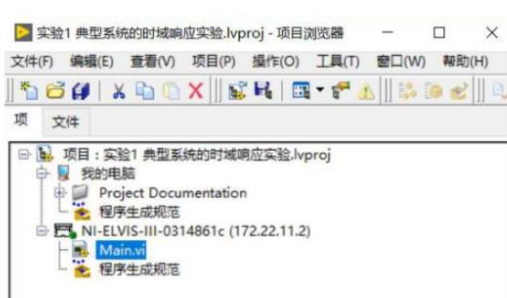
得：

K 的取值	R 的取值	系统状态
$0 < K < 12$	$R > 41.7k\Omega$	系统稳定
$K = 12$	$R = 41.7k\Omega$	系统临界稳定
$K > 12$	$R < 41.7k\Omega$	系统不稳定

## 六、 实验步骤

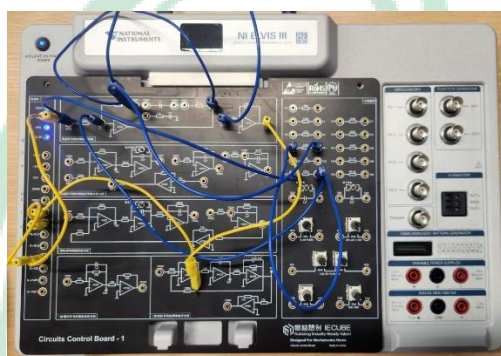
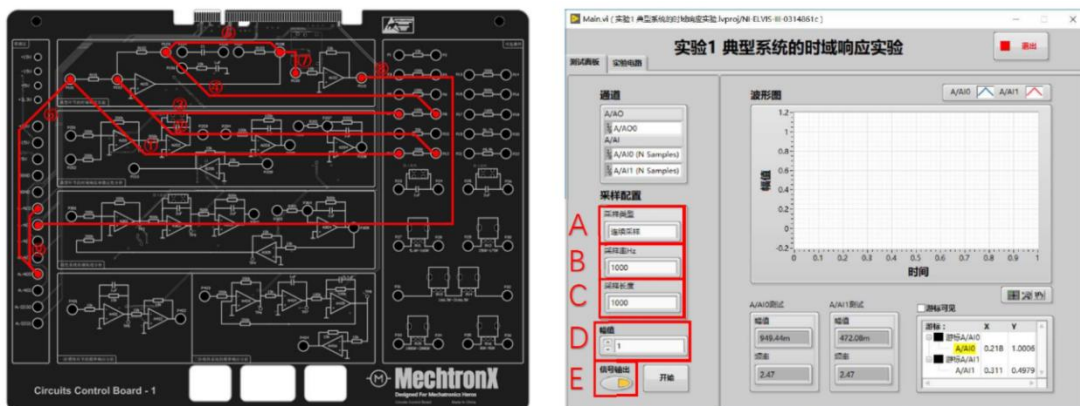
### 1. 典型环节时域响应实验步骤

(1) 打开程序“实验 1 典型系统的时域实验”（后缀为.lvproj 的程序），双击 Main.vi。

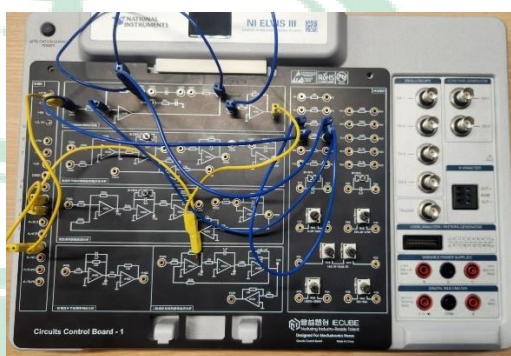




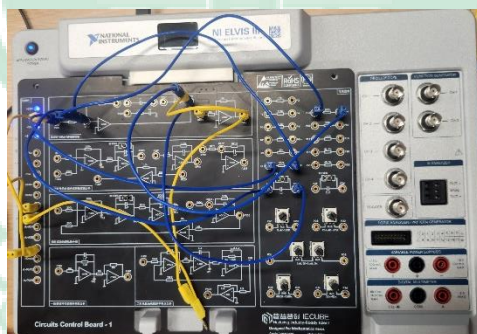
- (2) 关闭电源，根据模拟电路图或实物连线示意图进行连线，并按照图 4 进行软件设置。



比例环节



积分环节



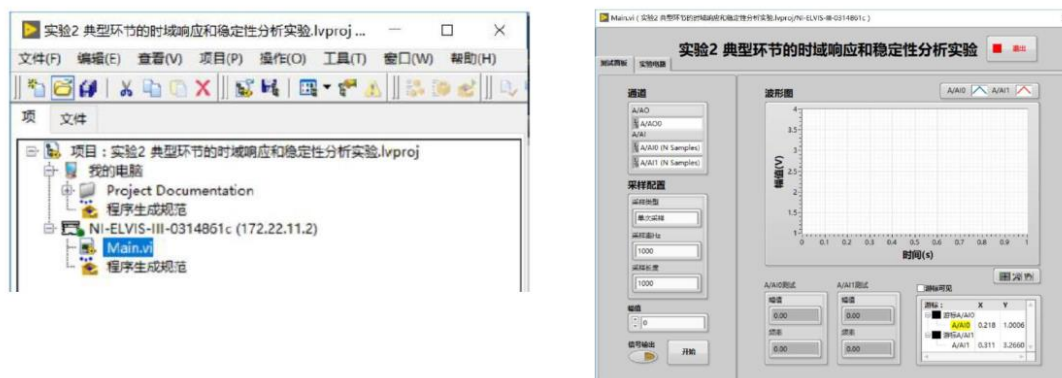
比例积分

- (3) 打开电源，点击开始按钮，运行程序并截图保存实验结果。  
(4) 点击结束按钮，结束实验。

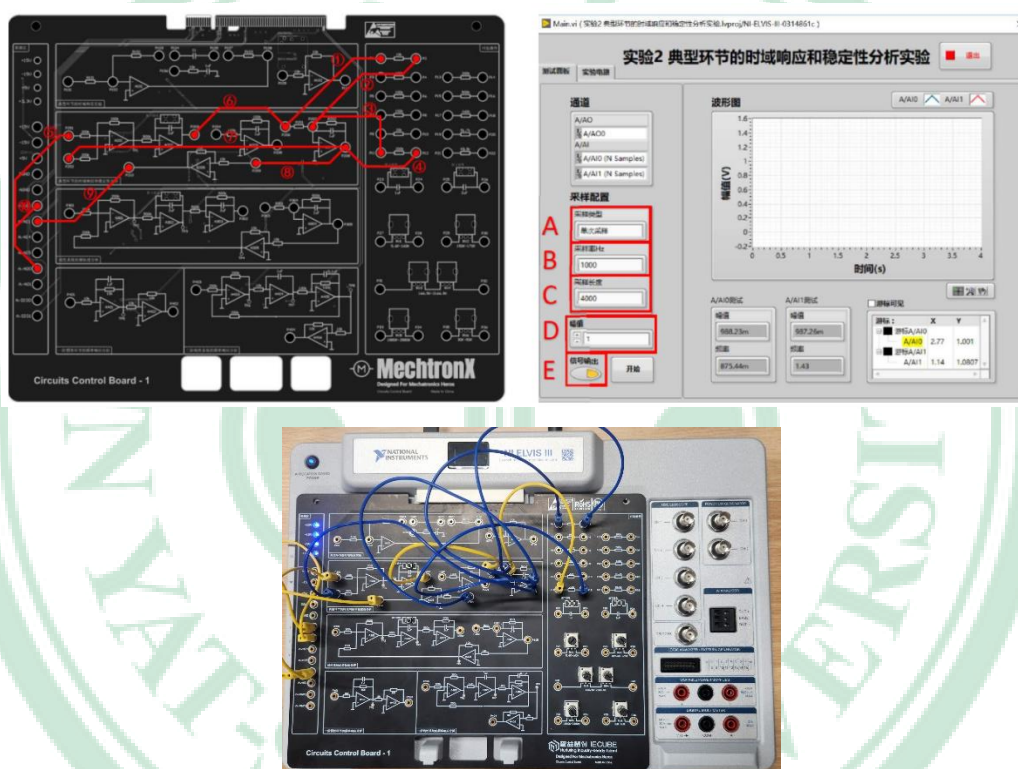
注意：为了测试不同比例系数，需更换电阻  $R_0, R_1$  的阻值，此时需要重新断电操作，并重复上述步骤(1)~(4)，并将结果记录于表格。  
待所有实验结束后，关闭 ELVIS III 试验台电源，并整理好导线。

## 2. 二阶系统时域响应实验步骤

- (1) 打开程序“实验 2 典型环节的时域响应和稳定性分析实验”（后缀为.lvproj 的程序），双击 Main.vi。



(2) 关闭电源，根据模拟电路图或实物连线示意图进行连线，并按照图 13 进行软件设置。



## 二阶系统

(3) 打开电源，点击开始按钮，运行程序并截图保存实验结果。

(4) 点击结束按钮，结束实验。

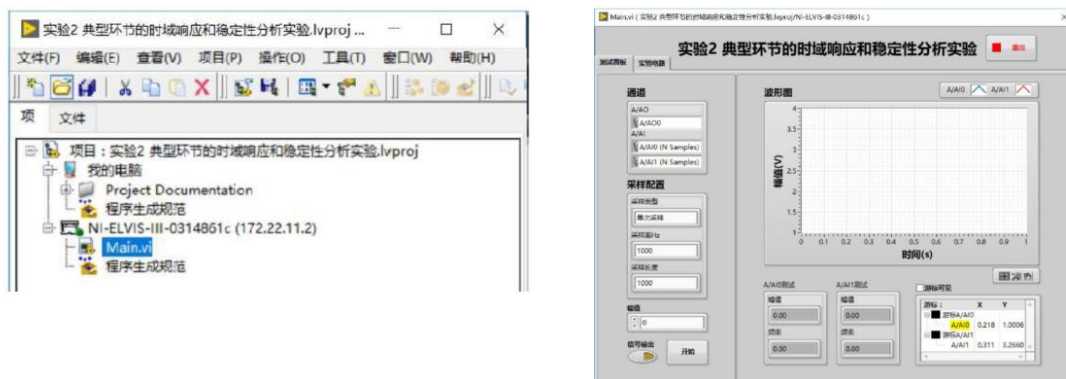
注意：为了测试不同比例系数，需更换电阻  $R$  的阻值，此时需要重新断电操作，并重复上述步骤(1)~(4)，并将结果记录于表格。

待所有实验结束后，关闭 ELVIS III 试验台电源，并整理好导线。

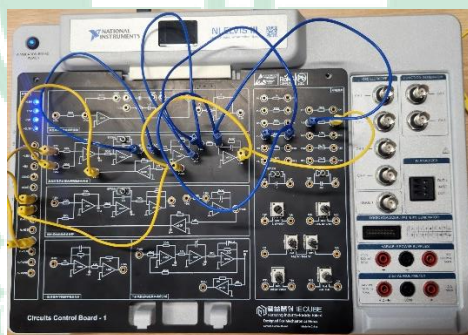
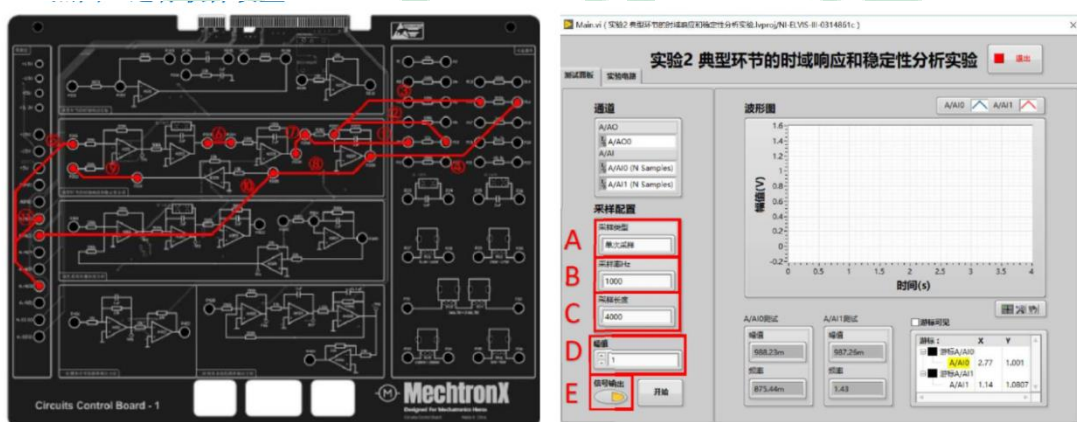
## 3. 三阶系统时域响应实验步骤

(1) 打开程序“实验 2 典型环节的时域响应和稳定性分析实验”（后缀为.lvproj 的程序），双击 Main.vi。





(2) 关闭电源，根据三阶系统模拟电路图或实物连线示意图进行连线，并按照图 16 进行软件设置。



三阶系统

(3) 打开电源，点击开始按钮，运行程序并截图保存实验结果。

(4) 点击结束按钮，结束实验。

注意：为了测试不同比例系数，需更换电阻  $R$  的阻值，此时需要重新断电操作，并重复上述步骤(1)~(4)，并将结果记录于表格。

待所有实验结束后，关闭 ELVIS III 试验台电源，并整理好导线。

## 七、 实验结果

任务 1：给出在阶跃输入  $U_i = 1V$  作用下，比例环节的时域特性及响应曲线。将测得时域特性参数记录于下表，并给出每种情况的时域特性曲线；

表 1

$R_0$	$R_1$	输入 $U_i$	比例系数 $K$	输出 $U_o$
200k	100k	1	0.5	0.5
100k	200k	1	2	2
100k	100k	1	1	1

波形图

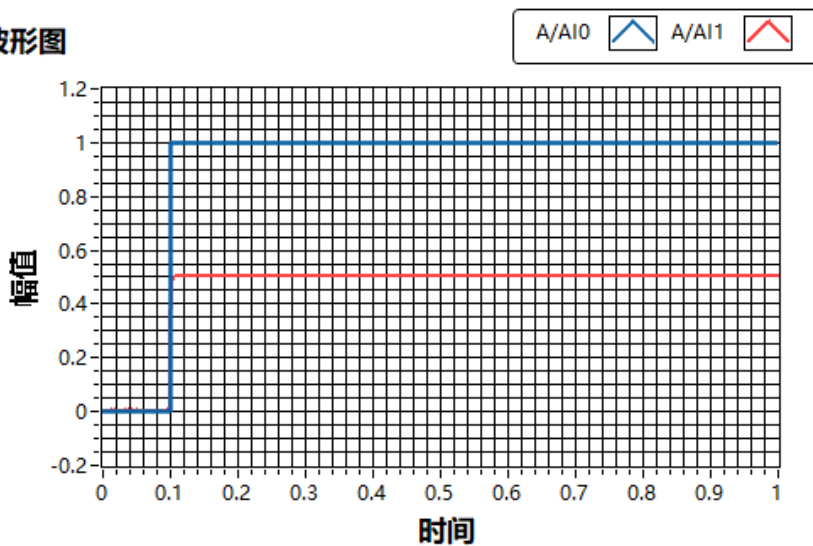


图 1:  $K=0.5$

波形图

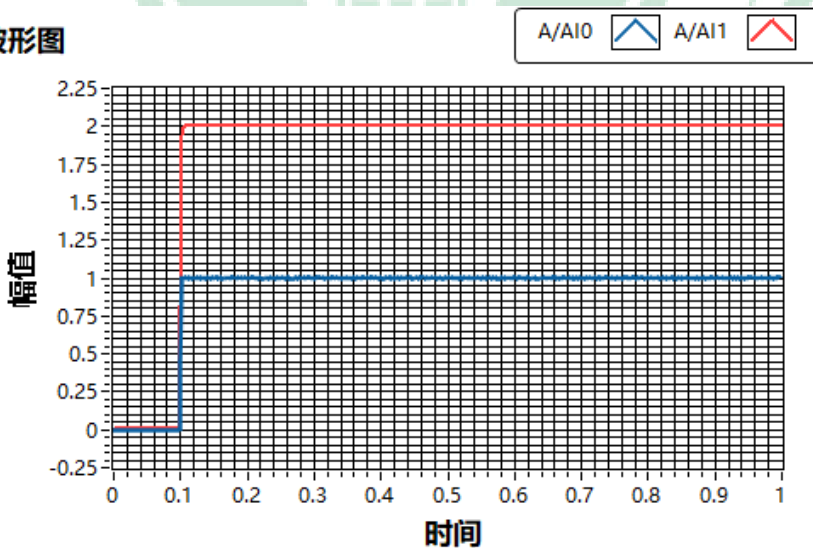
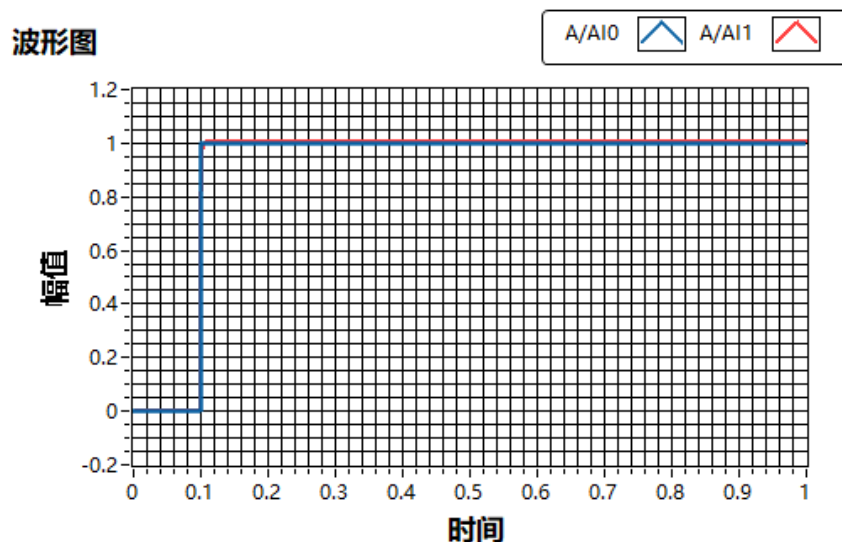


图 2:  $K=2$

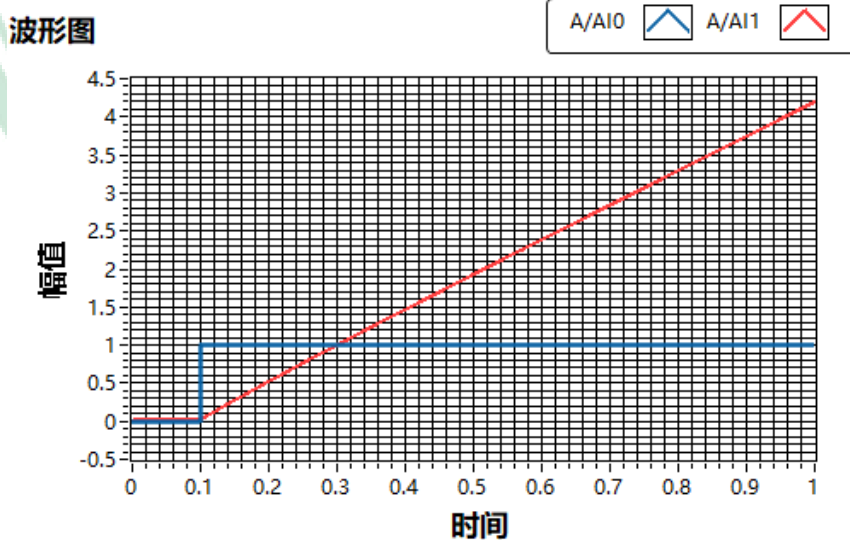


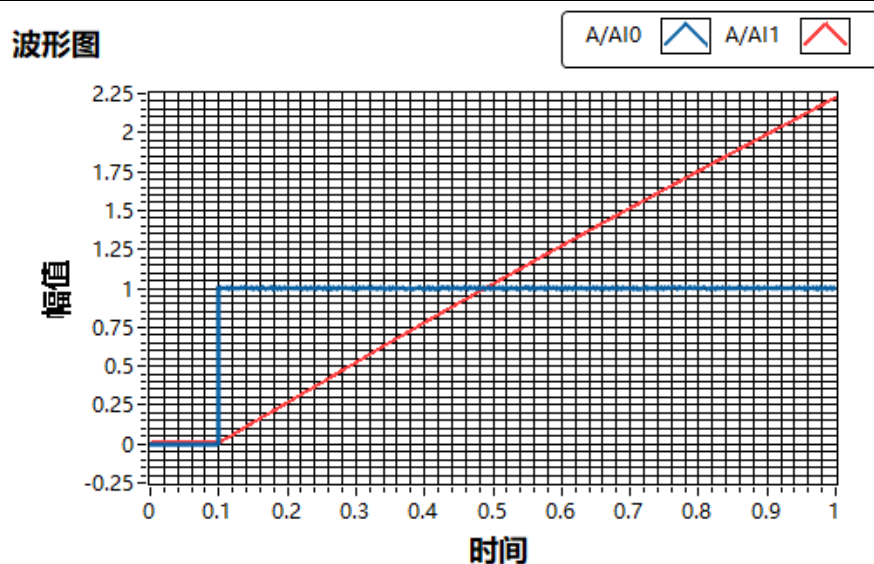
任务 2: 对于以上三种典型环节, 给出在阶跃输入  $U_i = 1V$  作用下, 系统时域特性及 响应曲线。

- 对于积分环节, 将测得时域特性参数记录于表 2 , 并给出每种情况的时域特性曲线;

表 2

$R_0$	$C$	输入 $U_i$	积分系数 $T_i$	
			计算值	测量值
200k	$1\mu F$	1	0.2	0.21428571429
200k	$2\mu F$	1	0.4	0.4008908686

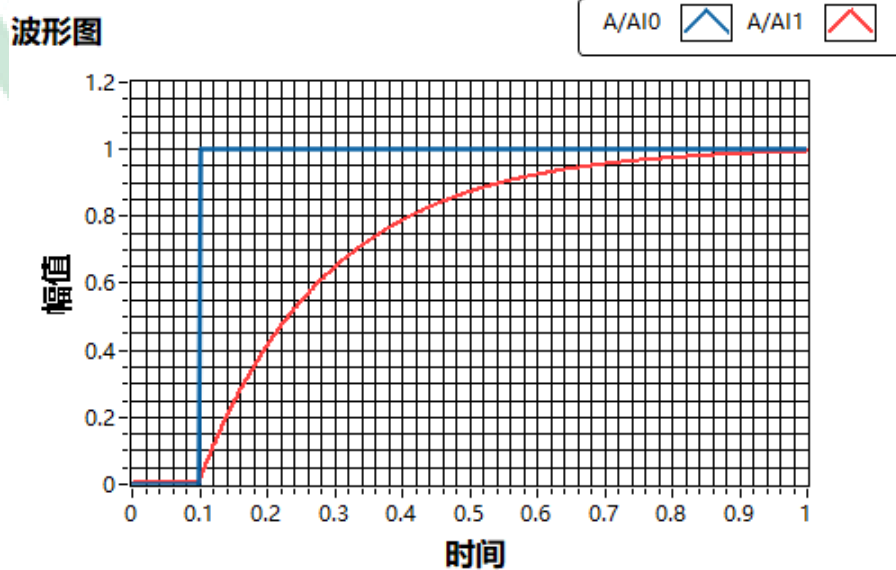


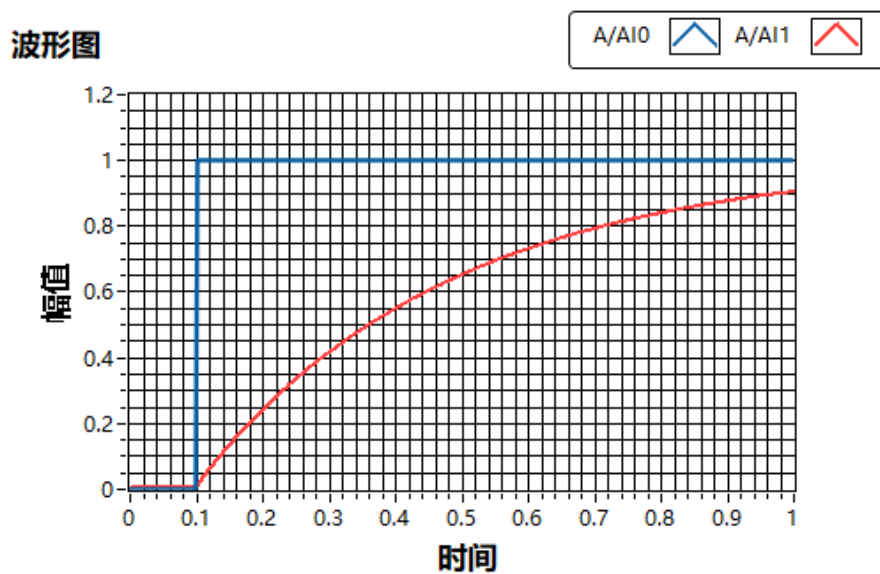


- 对于惯性环节，将测得时域特性参数记录于表 3，并给出每种情况的时域特性曲线；

表 3

$R_0$	$R_1$	$C$	输入 $U_i$	比例系数 $K$	惯性常数 $T$	
					计算值	测量值
200k	200k	$1\mu F$	1	1	0.2	0.25082111874
200k	200k	$2\mu F$	1	1	0.4	0.48473997912

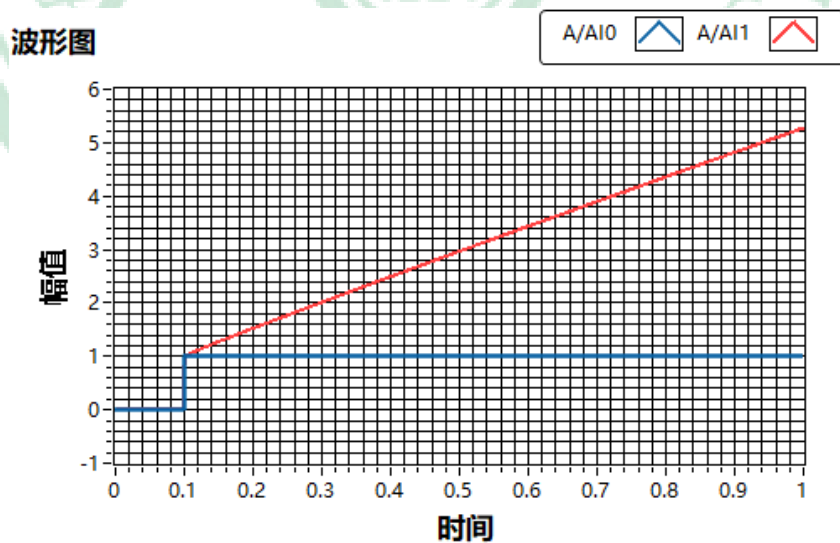




- 对于比例积分环节，将测得时域特性参数记录于表 4，并给出每种情况的时域特性曲线；

表 4

$R_0$	$R_1$	$C$	输入 $U_i$	比例系数 $K$	积分常数 $T$	
					计算值	测量值
200k	200k	$1\mu F$	1	1	0.2	0.21428571429
200k	200k	$2\mu F$	1	1	0.4	0.39268269323



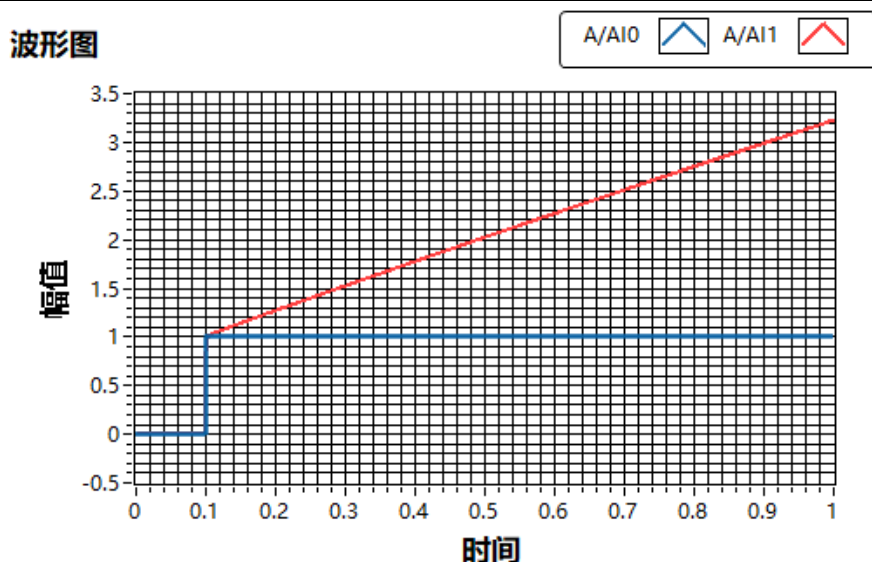


图 9:  $T=0.4$

- 根据实验结果，分析总结不同参数对典型环节动态特性的影响。

在控制系统中，比例环节的放大系数主要取决于  $R_1$  和  $R_0$  电阻的比值，这个比值越大，放大系数也就越大。对于积分环节，其时间常数受  $C$  和  $R_0$  电阻的乘积影响，乘积越大，时间常数增加，相应地放大系数减小。在比例积分环节中，时间常数同样受到  $C$  和  $R_0$  电阻乘积的影响，乘积越大，时间常数增加，导致放大倍数减小。比例系数  $K$  的大小与  $R_1$  和  $R_0$  电阻的比值成正比，比值越大， $K$  值也越大。至于惯性环节，其时间常数由  $C$  和  $R_0$  电阻的乘积决定，乘积越大，时间常数越长，这会导致输出信号相对于输入信号的延迟增加。最后，稳态放大倍数  $K$  同样受  $R_1$  和  $R_0$  电阻比值的影响，比值越大，稳态值与输入信号幅值的比值也越大。简而言之，这些参数的调整对于控制系统的响应特性有着直接的影响。

**任务 3:** 将二阶系统的各项性能指标填入下表，给出不同情况所对应的系统响应曲线。并根据实验结果，讨论二阶系统参数  $(\xi, \omega_n)$  变化对系统性能的影响。

表 5

参数	开环增益		$\omega_n$	$\xi$	峰值 $C(t_p)$	稳态值 $C(\infty)$	超调量 $\sigma\%$		峰值时间 $t_p$		稳态时间 $t_s$		阶跃响应情况
	$R(k\Omega)$	K					理论值	测量值	理论值	测量值	理论值	测量值	
欠阻尼 $0 < \xi < 1$	10	20	10	0.25	1.418	0.9892	44.4	43.3	0.324	0.413	1.4	1.11	图 10



# 自动控制原理实验报告

	50	4	$2\sqrt{5}$	$\frac{\sqrt{5}}{4}$	1.096	0.9892	12.0	10.8	0.847	0.922	1.4	1.23	图 11
临界阻尼 $\xi = 1$	160	1.25	2.5	1	/	0.9812	/	/	/	/	1.9	2.19	图 12
过阻尼 $\xi > 1$	200	1	$\sqrt{5}$	$\frac{\sqrt{5}}{2}$	/	0.9790	/	/	/	/	3.4	3.12	图 13

波形图

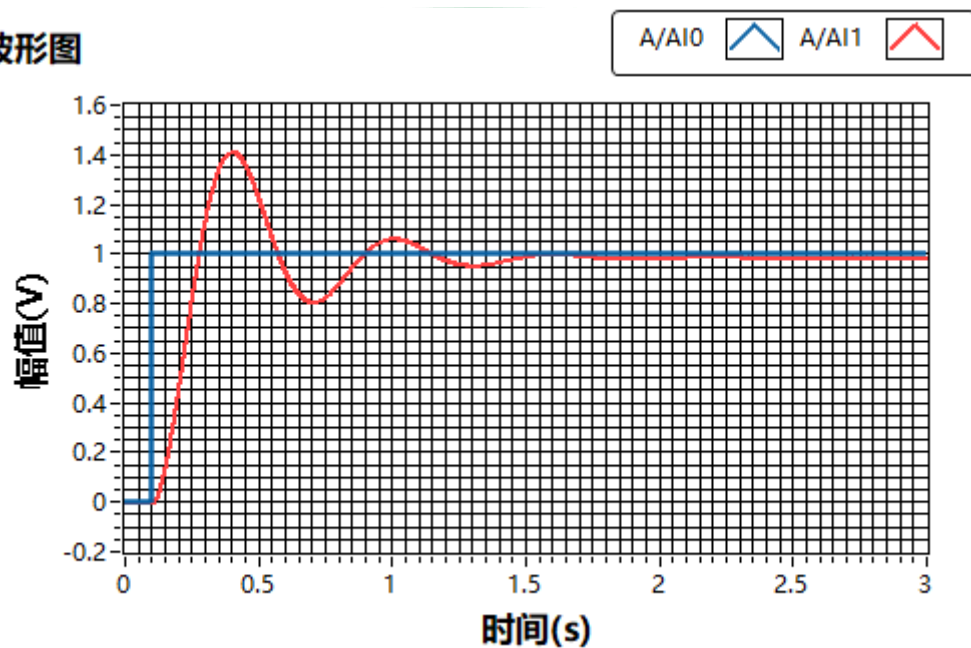


图 10  $R = 10\text{ k}\Omega$

波形图

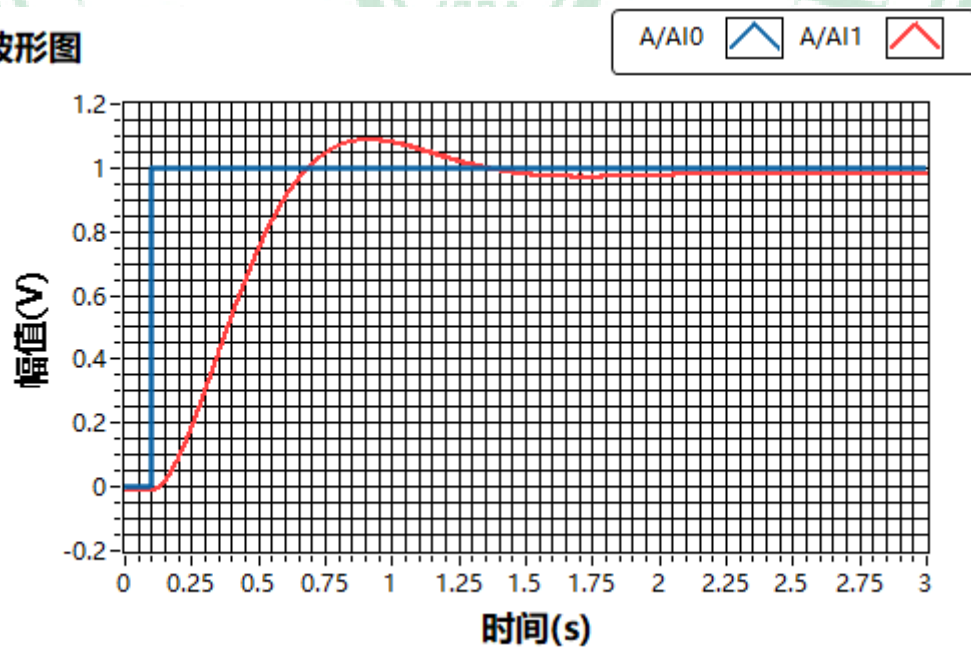
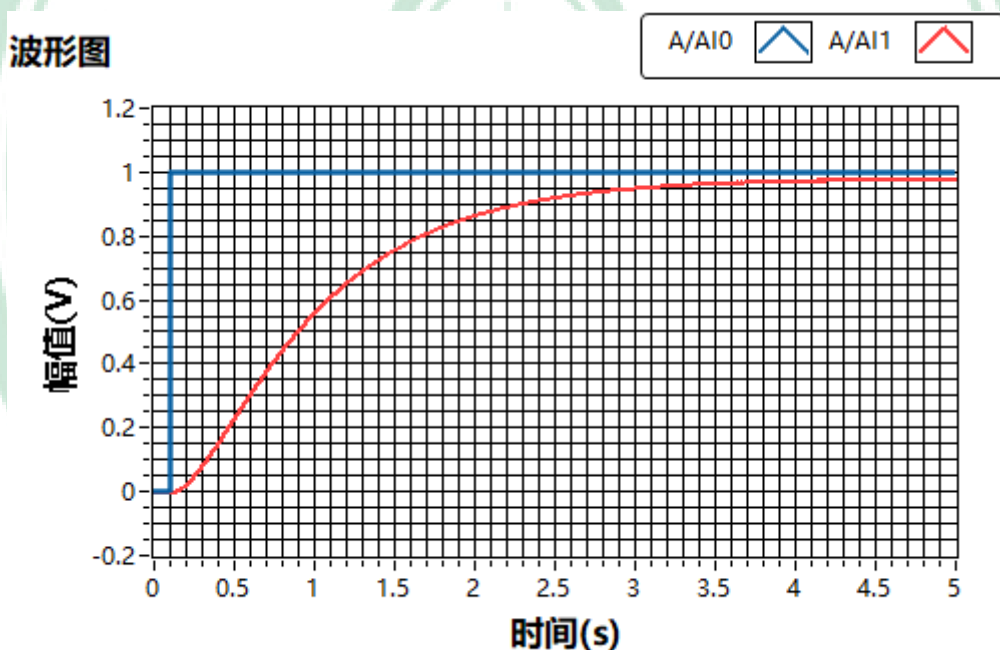
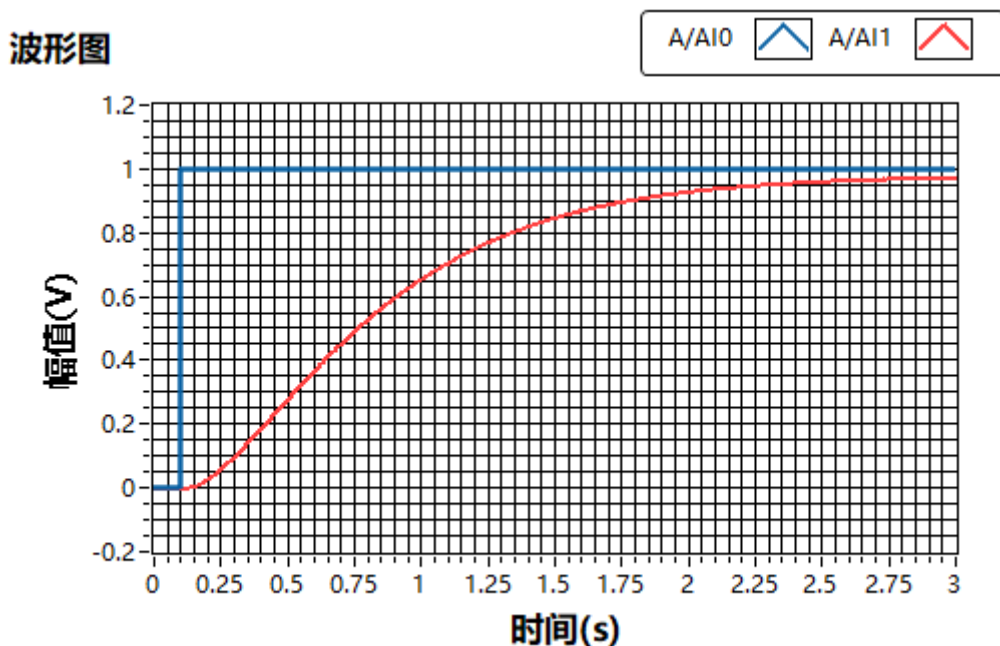


图 11  $R = 50\text{ k}\Omega$



二阶系统参数 ( $\xi, \omega_n$ ) 变化对系统性能有着很大的影响。实验中我们将  $\xi \omega_n$  的乘积设为固定值 2.5, 随着  $\omega_n$  的减小, 相应的  $\xi$  值增大。

当系统处于欠阻尼状态时,  $\omega_n$  的减小会使得系统的超调量  $\sigma\%$  逐渐减小, 峰值时间  $t_p$  变大, 但稳态值和调节时间  $t_s$  不会有太大的变化, 意味着系统对于阶跃输入函数的敏感性逐渐降低, 系统的平稳性逐渐变好, 有利于实际工程

问题对于系统的控制与调节。

当系统处于临界阻尼状态或过阻尼状态时，系统不会出现峰值，即没有超调量 $\sigma\%$ 与峰值时间 $t_p$ ，但此时随着 $\omega_n$ 的减小，系统的调节时间 $t_s$ 逐渐变大，系统难达到稳态值所需时间加长。

**任务 4：** 将三阶系统在不同开环增益下的响应情况填入下表， 给出不同情况所对应的系统响应曲线。

表 6

$R(k\Omega)$	开环增益 K	稳定性
20	25	不稳定(图 14)
30	16.67	不稳定(图 15)
41.67	12	临界稳定(图 16)
50	10	稳定(图 18)
100	5	稳定(图 18)

波形图

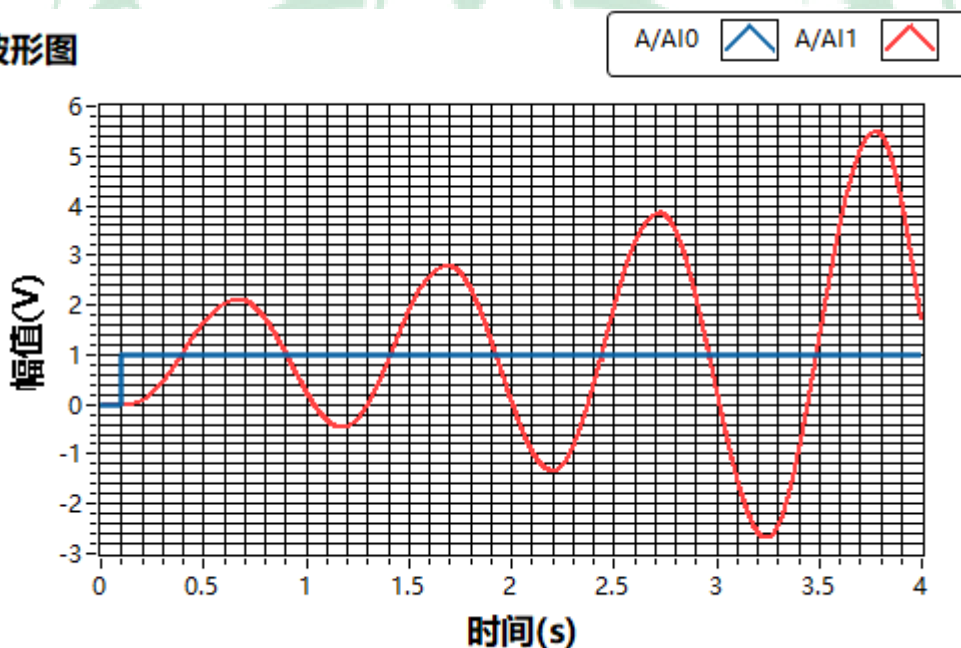
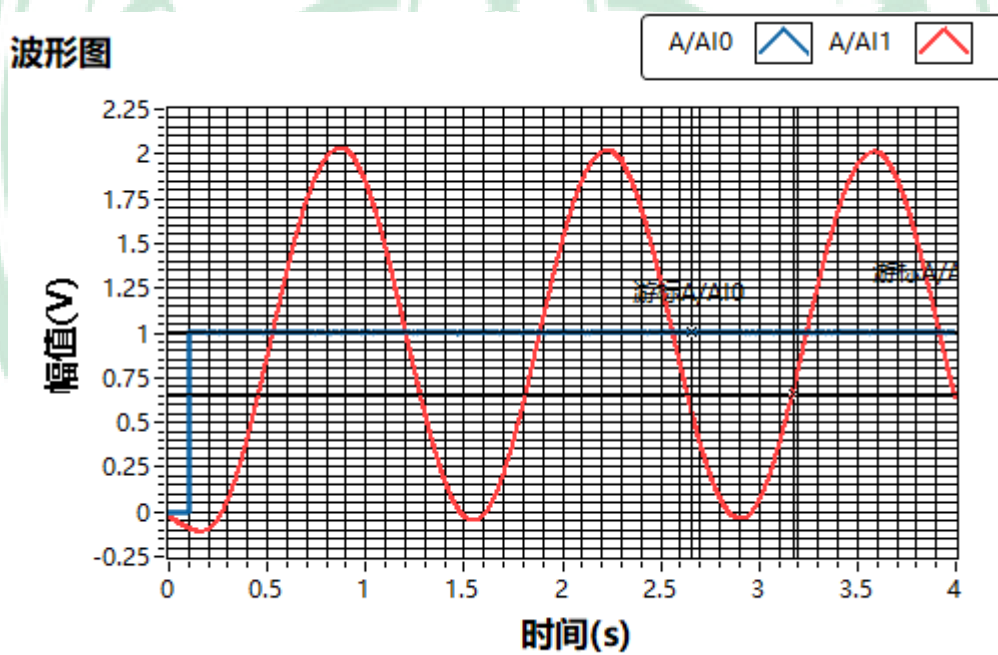
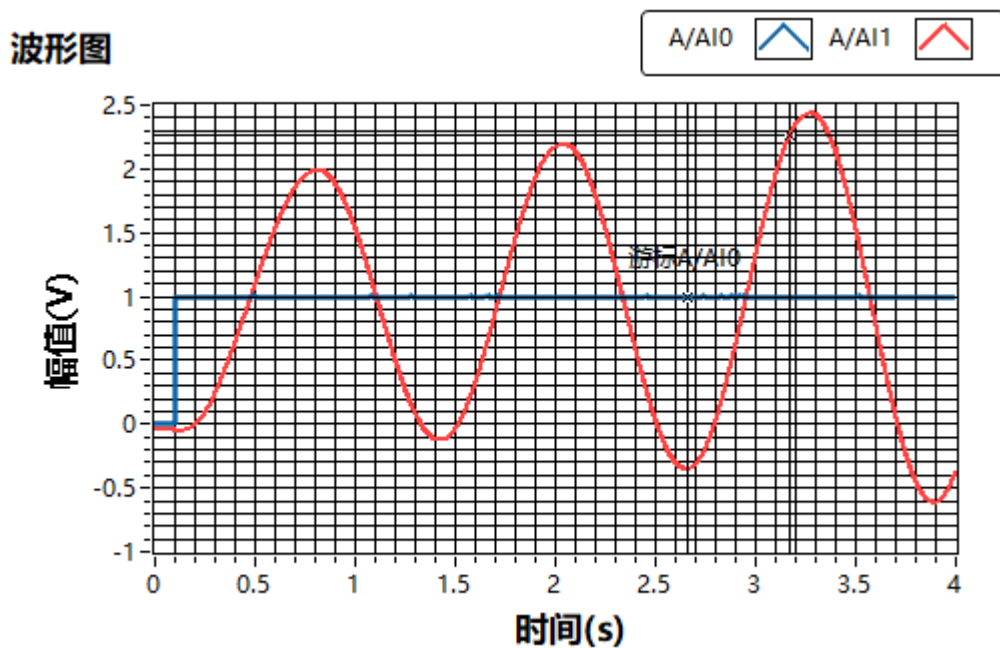


图 14  $R = 20\text{ k}\Omega$



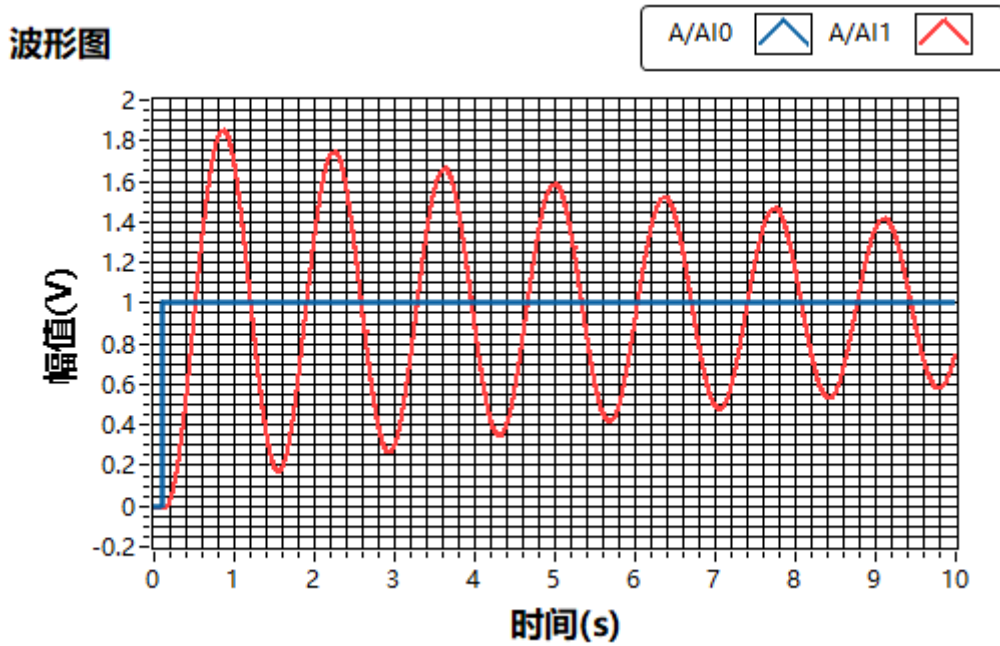


图 17  $R = 50\text{ k}\Omega$

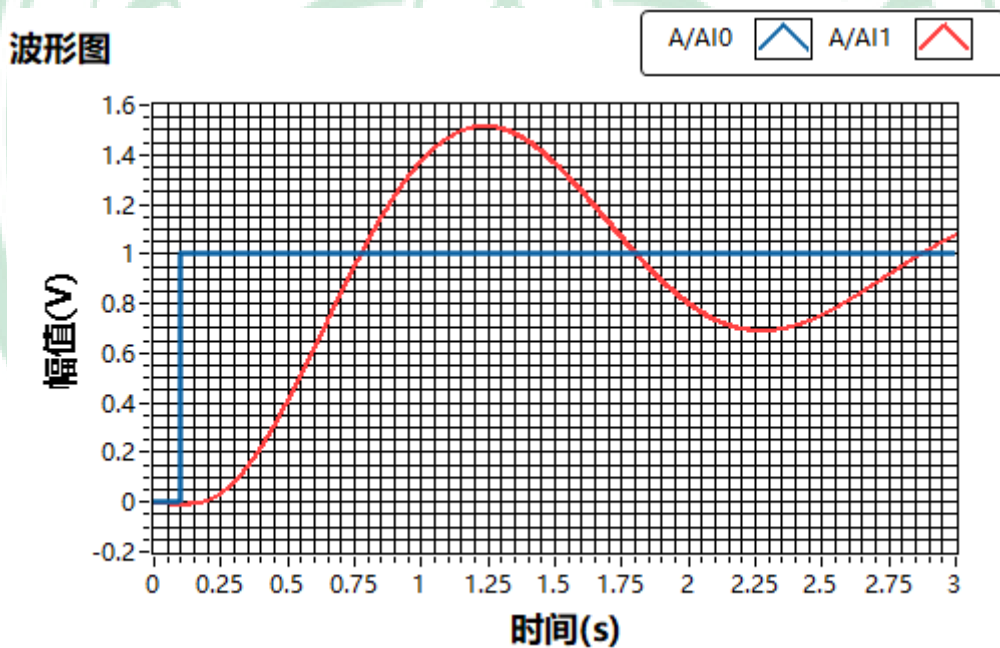


图 18  $R = 100\text{ k}\Omega$

### 三种状态分析:

#### 1. 欠阻尼状态:

在欠阻尼状态下, 系统的关键电阻值较低。这种较小的电阻值导致系统的阻尼系数较低, 系统在响应过程中会产生过冲和衰减振荡, 使输出信号出现振荡行为。虽然欠阻尼状态下系统的响应速度较快, 但振荡会影响输出的平稳性。

#### 2. 临界阻尼状态:

临界阻尼状态下，电阻值适中。此时，系统的阻尼刚好达到临界值，此时系统保持几乎无能量损失的等幅震荡，但由于阻尼的增大，震荡频率比欠阻尼有所降低。

### 3. 过阻尼状态：

在过阻尼状态下，关键电阻值较高。高阻值增加了系统的等效阻尼，使系统更加稳定，但限制了响应速度，导致输出信号缓慢上升，逐步接近稳态值。

综上所述，随着关键电阻的增大，开环增益  $K$  不断减小，系统的稳定性增强，但调节时间增长。所以，我们可以得出结论：开环增益  $K$  与系统稳定性成反比，和系统调节速度成正比。

## 八、 实验心得

在完成本次实验后，我们深刻体会到了理论与实践相结合的重要性。通过亲手搭建和测试六种典型环节的模拟电路，我们对比例环节、积分环节、惯性环节、比例积分环节、比例微分环节和比例积分微分环节有了更加直观和深刻的理解。实验不仅加深了我们对这些环节动态特性的认识，也让我们掌握了如何通过改变电路参数来影响系统响应的方法。

在实验过程中，我们学会了如何使用 ELVIS III 主机和 CCG 实验拓展板卡，以及如何操作 CCB 实验程序 (LabVIEW)。这些技能对于我们的工程实践能力提升大有裨益。通过对比理想阶跃响应和实际阶跃响应，我们意识到了实际应用中不可避免的误差和非线性因素对系统性能的影响。

特别是在二阶系统的实验中，我们学习到了如何分析特征参量对过渡过程的影响，并实际观察了不同阻尼比下系统响应曲线的变化。这些实验结果让我对系统稳定性和性能指标有了更深入的认识，也让我们明白了在设计控制系统时需要考虑的各种因素。

三阶系统的稳定性分析进一步锻炼了我们的 Routh 判据应用能力，通过实际操作，我们能够更加熟练地对系统进行稳定性分析，并理解不同电阻取值对系统稳定性的影响。

这次实验不仅增强了我们的实验技能和理论知识，也让我们深刻认识到，每一个参数的调整都可能对系统性能产生重大影响。