



长安大学电子与控制工程学院

# 自动控制原理 实验指导

自动化与交通控制工程实验教学中心

# 自动控制原理

- 第一章 线性系统的时域分析
- 第二章 线性控制系统的频域分析
- 第三章 线性系统的校正与状态反馈
- 第四章 非线性系统的相平面分析
- 第五章 采样控制系统分析
- 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统试验
- 第七章 模拟温度闭环控制实验

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### 实验目的:

- 了解和掌握各典型环节模拟电路的构成方法、传递函数表达式及输出时域函数表达式。
- 观察和分析各典型环节的阶跃响应曲线，了解各项电路参数对典型环节动态特性的影响。

### 实验内容及步骤:

- 观察和分析各典型环节的阶跃响应曲线，了解各项电路参数对典型环节动态特性的影响，改变被测环节的各项电路参数，画出模拟电路图，阶跃响应曲线，观测结果，填入实验报告。
- 运行LABACT程序，选择自动控制菜单下的线性系统的时域分析下的典型环节的模拟研究中的相应实验项目，就会弹出虚拟示波器的界面，点击开始即可使用本实验机配套的虚拟示波器（B3）单元的CH1测孔测量波形。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (1) 观察比例环节的阶跃响应曲线

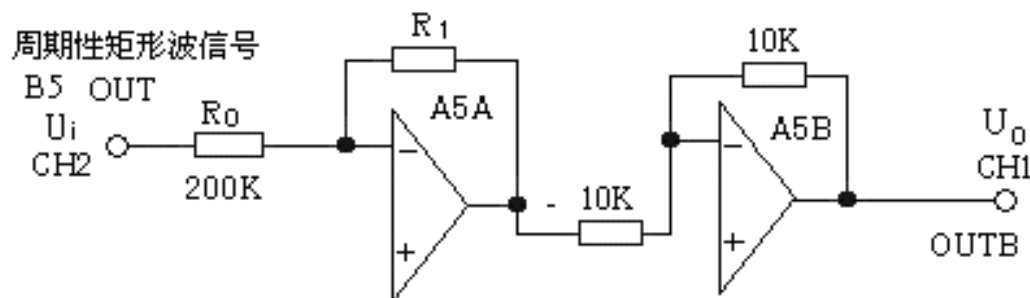


图1.1 典型比例环节模拟电路

传递函数:  $G(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(S)} = K \quad K = \frac{R_1}{R_0}$

单位阶跃响应:  $U(t) = K$

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (1) 观察比例环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第一步：将函数发生器（B5）所产生的周期性矩形波信号（OUT），作为系统的信号输入（ $U_i$ ）；该信号为零输出时，将自动对模拟电路锁零。

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中矩形波，矩形波指示灯亮。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $>1$ 秒。
- 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 4V（D1单元右显示）。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (1) 观察比例环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第二步：构造模拟电路：按图1.1安置短路套及测孔连线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A5	S4, S12
2	B5	'S-ST'

(b) 测孔连线

1	信号输入 ( $U_i$ )	B5 (OUT) $\rightarrow$ A5 (H1)
2	示波器联接 $\times 1$ 档	A5B (OUTB) $\rightarrow$ B3 (CH1)
3		B5 (OUT) $\rightarrow$ B3 (CH2)

第三步：运行、观察、记录：

打开虚拟示波器的界面，点击开始，按下信号发生器 (B1) 阶跃信号按钮 (0 $\rightarrow$ +4V阶跃)，观测A5B输出端 ( $U_o$ ) 的实际响应曲线。示波器的截图详见虚拟示波器的使用。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (1) 观察比例环节的阶跃响应曲线

#### 实验报告要求:

按下表改变图1.1所示的被测系统比例系数，观测结果，填入实验报告。

R0	R1	输入U <sub>i</sub>	比例系数K	
			计算值	测量值
200K	100K	4V	0.5	
	200K	4V	1	
50K	100K	2V	2	
	200K	1V	4	

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (2) 观察惯性环节的阶跃响应曲线

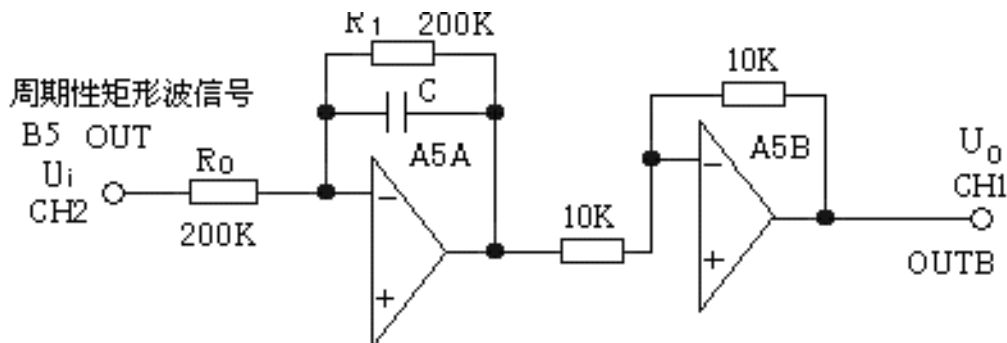


图1.2 典型惯性环节模拟电路

传递函数:  $G(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(S)} = \frac{K}{1+TS}$      $K = \frac{R_1}{R_0}$      $T = R_1 C$

单位阶跃响应:  $U_o(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T}})$



# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (2) 观察惯性环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第一步：将函数发生器（B5）所产生的周期性矩形波信号（OUT），作为系统的信号输入（ $U_i$ ）；该信号为零输出时，将自动对模拟电路锁零。

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中矩形波，矩形波指示灯亮。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $>1$ 秒。
- 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 4V（D1单元右显示）。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (2) 观察惯性环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第二步：构造模拟电路：按图1.2安置短路套及测孔连线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A5	S4, S6, S10
2	B5	'S-ST'

(b) 测孔连线

1	信号输入 ( $U_i$ )	B5 (OUT) $\rightarrow$ A5 (H1)
2	示波器联接 $\times 1$ 档	A5B (OUTB) $\rightarrow$ B3 (CH1)
3		B5 (OUT) $\rightarrow$ B3 (CH2)

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (2) 观察惯性环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第三步：运行、观察、记录：

打开虚拟示波器的界面，点击开始，按下信号发生器（B1）阶跃信号按钮（ $0 \rightarrow +4V$ 阶跃），观测A5B输出端（ $U_o$ ）响应曲线，等待完整波形出来后，移动虚拟示波器横游标到输出稳态值 $\times 0.632$ 处，得到与输出曲线的交点，再移动虚拟示波器两根纵游标，从阶跃开始到输出曲线的交点，量得惯性环节模拟电路时间常数 $T$ 。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (2) 观察惯性环节的阶跃响应曲线

#### 实验报告要求:

按下表改变图1.2所示的被测系统时间常数和比例系数，观测结果，填入实验报告。

R0	R1	C	输入 $U_i$	比例系数K		惯性常数T	
				计算值	测量值	计算值	测量值
200K	200K	1u	4V	1		0.2	
		2u		1		0.4	
50K	100K	1u	2V	2		0.1	
	200K		1V	4		0.2	

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (3) 观察积分环节的阶跃响应曲线

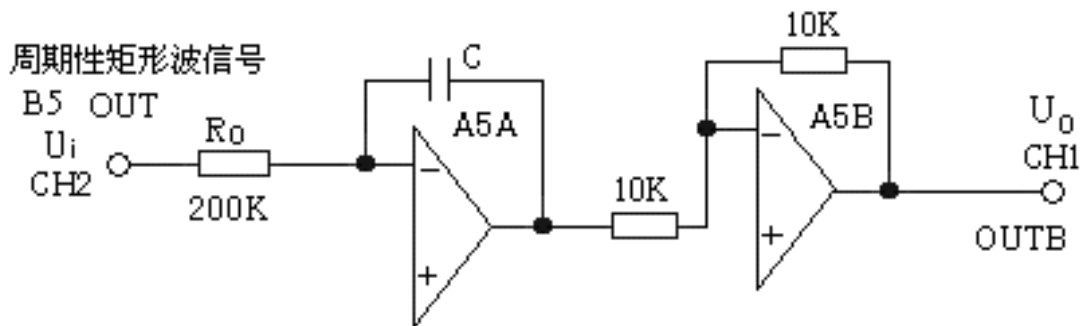


图1.3 典型积分环节模拟电路

传递函数:  $G(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(S)} = \frac{1}{TS} \quad T_i = R_0 C$

单位阶跃响应:  $U_o(t) = \frac{1}{T_i} t$

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (3) 观察积分环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第一步：为了避免积分饱和，将函数发生器（B5）所产生的周期性矩形波信号（OUT），代替信号发生器（B1）中的人工阶跃输出作为系统的信号输入（ $U_i$ ）；该信号为零输出时，将自动对模拟电路锁零。

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中矩形波，矩形波指示灯亮。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $>1$ 秒。
- 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压=4V（D1单元右显示）。

（为了使在积分电容上积分的电荷充分放掉，锁零时间应足够大，即矩形波的零输出宽度时间足够长！“量程选择”开关置于下档时，其零输出宽度恒保持为2秒！）

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (3) 观察积分环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第二步：构造模拟电路：按图1.3安置短路套及测孔连线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A5	S4, S10
2	B5	'S-ST'

(b) 测孔连线

1	信号输入 ( $U_i$ )	B5 (OUT) $\rightarrow$ A5 (H1)
2	示波器联接 $\times 1$ 档	A5B (OUTB) $\rightarrow$ B3 (CH1)
3		B5 (OUT) $\rightarrow$ B3 (CH2)

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (2) 观察惯性环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第三步：运行、观察、记录：

打开虚拟示波器的界面，点击**开始**，观测A5B输出端（ $U_o$ ）响应曲线，等待完整波形出来后，点击**停止**，移动虚拟示波器横游标到0V处，再移动另一根横游标到 $\Delta V=1V$ （与输入相等）处，得到与输出曲线的交点，再移动虚拟示波器两根纵游标，从阶跃开始到输出曲线的交点，量得积分环节模拟电路时间常数 $T_i$ 。



# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (3) 观察积分环节的阶跃响应曲线

#### 实验报告要求:

按下表改变图1.3所示的被测系统时间常数，观测结果，填入实验报告。

R0	C	输入 $U_i$	积分常数 $T_i$	
			计算值	测量值
200K	1u	1V		
	2u			
100K	1u			
	2u			

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (4) 观察比例积分环节的阶跃响应曲线

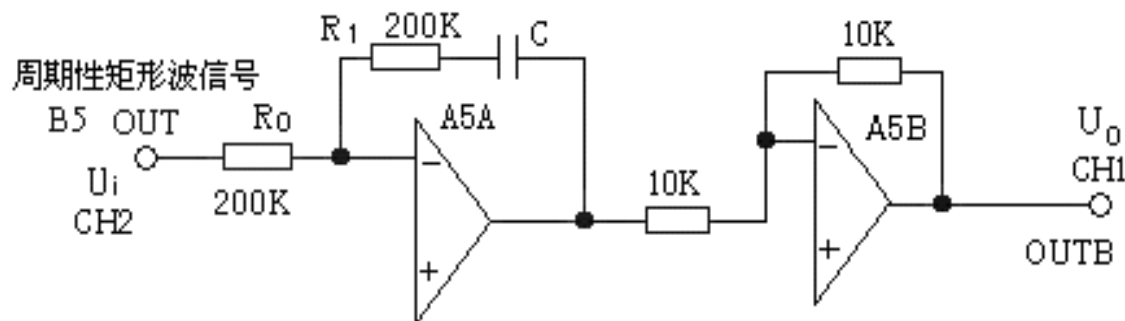


图1.4 典型比例积分环节模拟电路

传递函数:  $G(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(S)} = K(1 + \frac{1}{T_i S})$      $K = \frac{R_1}{R_0}$      $T_i = R_1 C$

单位阶跃响应:  $U_o(t) = K (1 + \frac{1}{T} t)$

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (4) 观察比例积分环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第一步：为了避免积分饱和，将函数发生器（B5）所产生的周期性矩形波信号（OUT），代替信号发生器（B1）中的人工阶跃输出作为系统的信号输入（ $U_i$ ）；该信号为零输出时，将自动对模拟电路锁零。

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中矩形波，矩形波指示灯亮。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $>1$ 秒。
- 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压=1V（D1单元右显示）。

（为了使在积分电容上积分的电荷充分放掉，锁零时间应足够大，即矩形波的零输出宽度时间足够长！“量程选择”开关置于下档时，其零输出宽度恒保持为2秒！）

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (4) 观察比例积分环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第二步：构造模拟电路：按图1.4安置短路套及测孔连线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A5	S4, S8
2	B5	'S-ST'

(b) 测孔连线

1	信号输入 (U <sub>i</sub> )	B5 (OUT) → A5 (H1)
2	示波器联接 ×1档	A5 (OUTB) → B3 (CH1)
3		B5 (OUT) → B3 (CH2)

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (4) 观察比例积分环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第三步：运行、观察、记录：

打开虚拟示波器的界面，点击**开始**，观测A5B输出端（ $U_o$ ）响应曲线，等待完整波形出来后，点击**停止**。移动虚拟示波器横游标到输入电压 $\times$ 比例系数 $K$ 处，再移动另一根横游标到（输入电压 $\times$ 比例系数 $K$ +输入电压）处，得到与积分曲线的两个交点。再分别移动示波器两根纵游标到积分曲线的两个交点，量得积分环节模拟电路时间常数 $T_i$ 。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (4) 观察比例积分环节的阶跃响应曲线

#### 实验报告要求:

按下表改变图1.4所示的被测系统时间常数及比例系数，观测结果，填入实验报告。

R0	R1	C	输入U <sub>i</sub>	比例系数K		积分常数T <sub>i</sub>	
				计算值	测量值	计算值	测量值
200K	200K	1u	1V	1			
		2u		1			
1u		2					
2u		2					
100K							

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (5) 观察比例微分环节的阶跃响应曲线

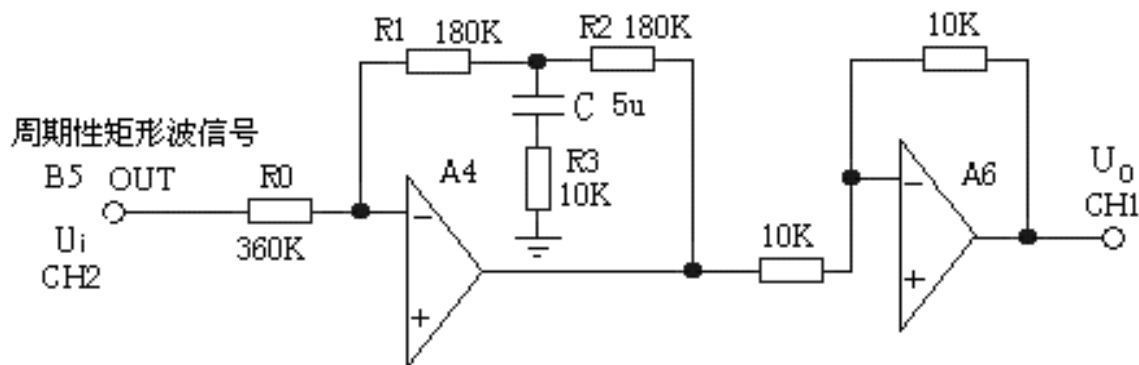


图1.5 典型比例微分环节模拟电路

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (5) 观察比例微分环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第一步：将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中矩形波，矩形波指示灯亮。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度1秒左右（D1单元左显示）。
- 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 0.5V（D1单元右显示）。



# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (5) 观察比例微分环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第二步：构造模拟电路：按图1.5安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A4	S4, S9
2	A6	S2, S6
3	B5	'S-ST'

(b) 测孔联线

1	信号输入( $U_i$ )	B5 (OUT) → A4 (H1)
2	运放级联	A4 (OUT) → A6 (H1)
3	示波器联接 ×1档	A6 (OUT) → B3 (CH1)
4		B5 (OUT) → B3 (CH2)

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (5) 观察比例微分环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第三步：运行、观察、记录：虚拟示波器的时间量程选‘ / 4’ 档。

- 打开虚拟示波器的界面，点击开始，用示波器观测系统的A6输出端（ $U_o$ ），等待完整波形出来后，把输出最高端电压减去稳态输出电压，然后乘以0.632，得到 $\Delta V$ 。
- 移动虚拟示波器两根横游标，从最高端开始到 $\Delta V$ 处为止，得到与微分的指数曲线的交点，再移动虚拟示波器两根纵游标，从阶跃开始到曲线的交点，量得 $\Delta t$ 。
- 已知 $KD=10$ ，则图3-1-5的比例微分环节模拟电路微分时间常数：

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (6) 观察PID（比例积分微分）环节的阶跃响应曲线

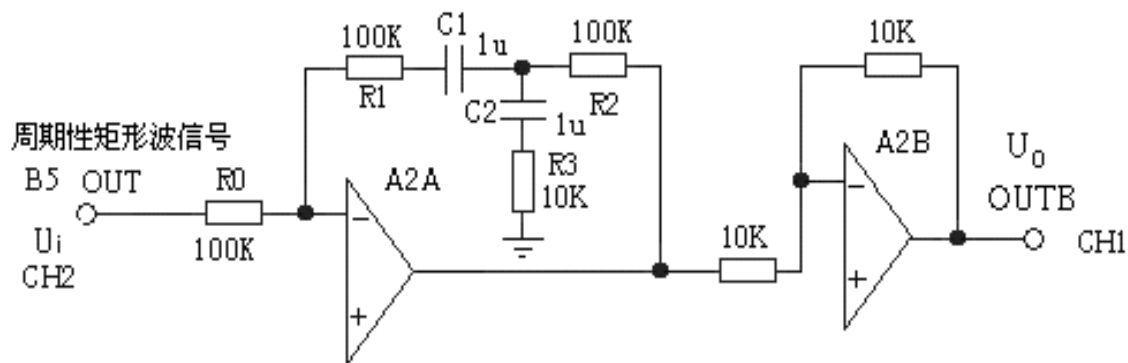


图1.6 PID（比例积分微分）环节模拟电路

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (6) 观察PID（比例积分微分）环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第一步：为了避免积分饱和，将函数发生器（B5）所产生的周期性矩形波信号（OUT），代替信号发生器（B1）中的人工阶跃输出作为系统的信号输入（ $U_i$ ）；该信号为零输出时，将自动对模拟电路锁零。

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中矩形波，矩形波指示灯亮。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度0.4秒左右（D1单元左显示）。
- 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 0.3V（D1单元右显示）。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (6) 观察PID（比例积分微分）环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

第二步：构造模拟电路：按图1.6安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A2	S4, S8
2	B5	'S-ST'

(b) 测孔联线

1	信号输入 ( $U_i$ )	B5 (OUT) $\rightarrow$ A2 (H1)
2	示波器联接 $\times 1$ 档	A2B (OUTB) $\rightarrow$ B3 (CH1)
3		B5 (OUT) $\rightarrow$ B3 (CH2)

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (6) 观察PID（比例积分微分）环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

#### 第三步：运行、观察、记录：

- 打开虚拟示波器的界面，点击开始，用示波器观测A2B输出端（ $U_o$ ）。
- 等待完整波形出来后，点击停止，移动虚拟示波器两根横游标使之 $\Delta V = K_p \times$ 输入电压，得到与积分的曲线的两个交点。
- 再分别移动示波器两根纵游标到积分的曲线的两个交点，量得积分环节模拟电路时间常数 $T_i$ 。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.1 典型环节的模拟研究

### (6) 观察PID（比例积分微分）环节的阶跃响应曲线

#### 实验步骤:

#### 第三步：运行、观察、记录：

- 将A2单元的S9短路套套上，点击开始，用示波器观测系统的A2B输出端（ $U_o$ ），等待完整波形出来后，把最高端电压减去稳态输出电压，然后乘以0.632，得到 $\Delta V$ 。
- 移动虚拟示波器两根横游标，从最高端开始到 $\Delta V$ 处为止，得到与微分的指数曲线的交点，再移动虚拟示波器两根纵游标，从阶跃开始到曲线的交点，量得 $T$ 。
- 已知 $KD$ ，则图1.6的比例微分环节模拟电路微分时间常数： 。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.2 二阶系统瞬态响应和稳定性

### 实验目的:

- 了解和掌握典型二阶系统模拟电路的构成方法及 I 型二阶闭环系统的传递函数标准式。
- 研究 I 型二阶闭环系统的结构参数--无阻尼振荡频率 $\omega_n$ 、阻尼比 $\xi$ 对过渡过程的影响。
- 掌握欠阻尼 I 型二阶闭环系统在阶跃信号输入时的动态性能指标 $M_p$ 、 $t_p$ 、 $t_s$ 的计算。
- 观察和分析 I 型二阶闭环系统在欠阻尼，临界阻尼，过阻尼的瞬态响应曲线，及在阶跃信号输入时的动态性能指标 $M_p$ 、 $t_p$ 值，并与理论计算值作对比。



# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.2 二阶系统瞬态响应和稳定性

### 实验内容及步骤:

- I型二阶闭环系统模拟电路见图1.7，观察阻尼比 $\xi$ 对该系统的过渡过程的影响。改变A3单元中输入电阻R来调整系统的开环增益K，从而改变系统的结构参数。
- 改变被测系统的各项电路参数，计算和测量被测对象的临界阻尼的增益K，填入实验报告。
- 改变被测系统的各项电路参数，计算和测量被测对象的超调量 $M_p$ ，峰值时间 $t_p$ ，填入实验报告，并画出阶跃响应曲线。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.2 二阶系统瞬态响应和稳定性

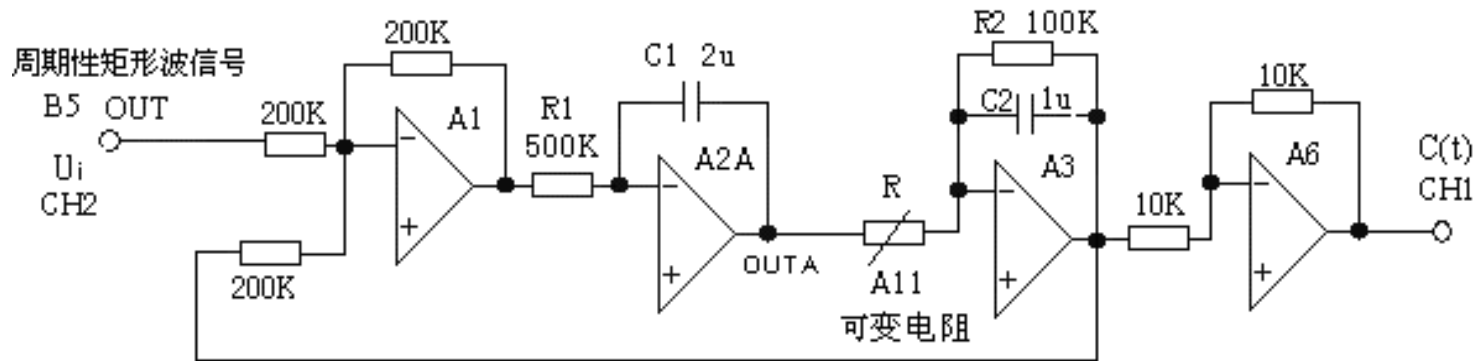


图1.7 I型二阶闭环系统模拟电路

- 积分环节（A2单元）的积分时间常数 $T_i=R_1 \cdot C_1=1\text{S}$
- 惯性环节（A3单元）的惯性时间常数 $T=R_2 \cdot C_2=0.1\text{S}$
- 阻尼比和开环增益 $K$ 的关系式为：
- 临界阻尼响应： $\xi=1$ ， $K=2.5$ ， $R=40\text{k}\Omega$
- 欠阻尼响应： $0<\xi<1$ ，设 $R=4\text{k}\Omega$ ， $K=25$   $\xi=0.316$
- 过阻尼响应： $\xi>1$ ，设 $R=70\text{k}\Omega$ ， $K=1.43\xi=1.32>1$

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.2 二阶系统瞬态响应和稳定性

### 实验步骤:

第一步：将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中矩形波，矩形波指示灯亮。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $\geq 3$ 秒（D1单元左显示）。
- 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 3V（D1单元右显示）。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.2 二阶系统瞬态响应和稳定性

### 实验步骤:

第二步：构造模拟电路：按图1.7安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A2	S2, S11, S12
3	A3	S8, S10
4	A6	S2, S6
5	B5	'S-ST'

(b) 测孔联线

1	信号输入 $\Gamma(t)$	B5 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) $\rightarrow$ A2 (H1)
3	运放级联	A (OUTA) $\rightarrow$ A3 (H1)
4	负反馈	A3 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H2)
5	运放级联	A3 (OUT) $\rightarrow$ A6 (H1)
6	跨接元件4K、 40K、70K	元件库A11中直读式可变电阻跨 接到A3 (H1) 和 (IN) 之间
7		
8	示波器联接 $\times 1$ 档	A6 (OUT) $\rightarrow$ B3 (CH1)
9		B5 (OUT) $\rightarrow$ B3 (CH2)

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.2 二阶系统瞬态响应和稳定性

### 实验步骤:

#### 第三步：运行、观察、记录：

- 运行LABACT程序，选择自动控制菜单下的线性系统的时域分析下的二阶典型系统瞬态响应和稳定性实验项目，就会弹出虚拟示波器的界面，点击开始即可使用本实验机配套的虚拟示波器（B3）单元的CH1测孔测量波形。也可选用普通示波器观测实验结果。
- 分别将（A11）中的直读式可变电阻调整到4K、40K、70K，等待完整波形出来后，点击停止，用示波器观察在三种增益K下，A6输出端C(t)的系统阶跃响应。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.2 二阶系统瞬态响应和稳定性

实验报告要求：

按下表改变图1.7所示的实验被测系统，画出系统模拟电路图。

调整输入矩形波宽度 $\geq 3$ 秒，电压幅度 = 3V。

(1) 计算和观察被测对象的临界阻尼的增益K，填入实验报告。

积分常数 $T_i$	惯性常数T	增益K计算值
1	0.1	
	0.2	
	0.3	
0.5	0.1	
0.2		

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.2 二阶系统瞬态响应和稳定性

实验报告要求:

(1) 画出跃响应曲线，测量超调量 $M_p$ ，峰值时间 $t_p$ 填入实验报告。（计算值实验前必须计算出）。

增益 K (A3)	惯性常数 T (A3)	积分常数 Ti (A2)	自然频率 $\omega_n$ 计算值	阻尼比 $\xi$ 计算值	超调量 $M_p(\%)$		峰值时间 $t_P$	
					计算值 测量值	计算值 测量值	计算值 测量值	计算值 测量值
25	0.1	1						
	0.2							
	0.3							
20	0.1	0.5						
40		0.2						

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.3 三阶系统的稳定性和瞬态响应

### 实验目的:

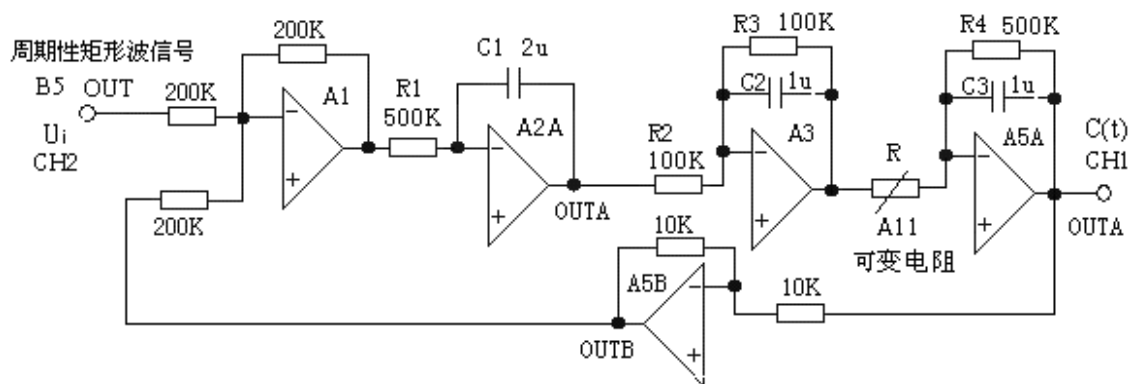
- 了解和掌握典型三阶系统模拟电路的构成方法及 I 型三阶系统的传递函数表达式。
- 了解和掌握求解高阶闭环系统临界稳定增益 $K$ 的多种方法。
- 观察和分析 I 型三阶系统在阶跃信号输入时，系统的稳定、临界稳定及不稳定三种瞬态响应。
- 了解和掌握利用MATLAB的开环根轨迹求解系统的性能指标的方法。
- 掌握利用主导极点的概念，使原三阶系统近似为标准 I 型二阶系统，估算系统的时域特性指标。



# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.3 三阶系统的稳定性和瞬态响应

### 实验内容及步骤:



1.8 I 型三阶闭环系统模拟电路图

- 积分环节（A2单元）的积分时间常数  $T_i = R_1 * C_1 = 1S$ ;
- 惯性环节（A3单元）的惯性时间常数  $T_1 = R_3 * C_2 = 0.1S$ ,  $K_1 = R_3 / R_2 = 1$ ;
- 惯性环节（A5单元）的惯性时间常数  $T_2 = R_4 * C_3 = 0.5S$ ,  $K = R_4 / R = 500K / R$
- 该系统在A5单元中改变输入电阻R来调整增益K, R分别为 30K、41.7K、225.2K

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.3 三阶系统的稳定性和瞬态响应

(1) 观察和分析 I 型三阶系统在阶跃信号输入时，系统的稳定、临界稳定及不稳定三种瞬态响应。

I 型三阶闭环系统模拟电路图见图3-1-8，分别将 (A11) 中的直读式可变电阻调整到  $30\text{K}\Omega$  ( $K=16.7$ )、 $41.7\text{K}\Omega$  ( $K=12$ )、 $225.2\text{K}\Omega$  ( $K=2.22$ )，跨接到 A5 单元 (H1) 和 (IN) 之间，改变系统开环增益进行实验。

改变被测系统的各项电路参数，运用劳斯 (Routh) 稳定判据法、MATLAB 的开环根轨迹法、代数求解法，求解高阶闭环系统临界稳定增益  $K$ ，填入实验报告。

运用 MATLAB 的开环根轨迹法，求解闭环系统超调量  $M_p$  为 30% 的稳定增益，填入实验报告，并画出其系统模拟电路图和阶跃响应曲线。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.3 三阶系统的稳定性和瞬态响应

(1) 观察和分析 I 型三阶系统在阶跃信号输入时，系统的稳定、临界稳定及不稳定三种瞬态响应。

### 实验步骤：

第一步：将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中矩形波，矩形波指示灯亮。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $\geq 6$ 秒（D1单元左显示）。
- 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 2.5V（D1单元右显示）。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.3 三阶系统的稳定性和瞬态响应

(1) 观察和分析 I 型三阶系统在阶跃信号输入时，系统的稳定、临界稳定及不稳定三种瞬态响应。

实验步骤：

第二步：构造模拟电路：按图1.8安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A2	S2, S11, S12
3	A3	S4, S8, S10
4	A5	S7, S10
5	B5	'S-ST'

(b) 测孔联线

1	信号输入 $r(t)$	B5 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) $\rightarrow$ A2 (H1)
3	运放级联	A (OUTA) $\rightarrow$ A3 (H1)
4	运放级联	A3 (OUT) $\rightarrow$ A5 (H1)
5	负反馈	A5B (OUTB) $\rightarrow$ A1 (H2)
6 7	跨接元件30K、41.7K、100K	元件库A11中直读式可变电阻跨接到A5 (H1) 和 (IN) 之间
8	示波器联接 $\times 1$ 档	A (OUTA) $\rightarrow$ B3 (CH1)
9		B5 (OUT) $\rightarrow$ B3 (CH2)

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.3 三阶系统的稳定性和瞬态响应

(1) 观察和分析 I 型三阶系统在阶跃信号输入时，系统的稳定、临界稳定及不稳定三种瞬态响应。

### 实验步骤：

第三步：运行、观察、记录：

- 运行LABACT程序，选择自动控制菜单下的线性系统的时域分析下的二阶典型系统瞬态响应和稳定性实验项目，就会弹出虚拟示波器的界面，点击开始即可使用本实验机配套的虚拟示波器（B3）单元的CH1测孔测量波形。也可选用普通示波器观测实验结果。
- 分别将（A11）中的直读式可变电阻调整到4K、40K、70K，等待完整波形出来后，点击停止，用示波器观察在三种增益K下，A6输出端C(t)的系统阶跃响应。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.3 三阶系统的稳定性和瞬态响应

### (2) 观察和验证等效于原三阶系统1.8的二阶单位反馈闭环系统

根据主导极点的概念，建立等效于原三阶系统1.8的 I 型二阶闭环系统模拟电路图，观察等效后的系统输出及原三阶系统输出，分析其响应曲线的相同点及区别，探讨其区别产生的原因。

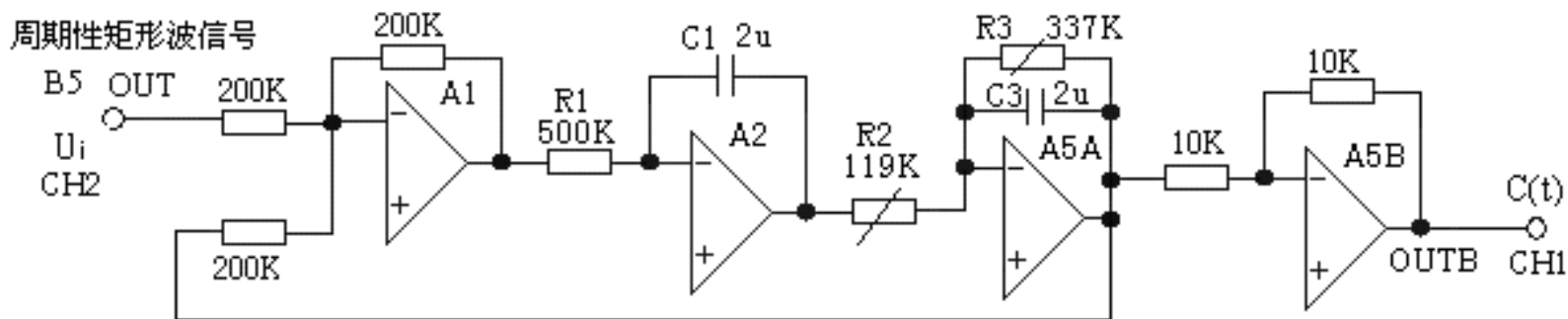


图1.9 等效于原三阶系统1.8图的二阶单位反馈闭环系统

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.3 三阶系统的稳定性和瞬态响应

### (2) 观察和验证等效于原三阶系统1.8的二阶单位反馈闭环系统

#### 实验步骤:

第一步：将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中矩形波，矩形波指示灯亮。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $\geq 6$ 秒（D1单元左显示）。
- 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 2.5V（D1单元右显示）。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.3 三阶系统的稳定性和瞬态响应

(2) 观察和验证等效于原三阶系统1.8的二阶单位反馈闭环系统

实验步骤:

第二步：构造模拟电路：按图1.9安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A2	S2, S11, S12
3	A5	S10, S11
4	B5	'S-ST'

(b) 测孔联线

1	信号输入 $r(t)$	B5 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) $\rightarrow$ A2 (H1)
3 /4	跨接元件119K	元件库A11中直读式可变电阻跨接到A (OUTA) 和A5 (IN) 之间
5 /6	跨接元件337K	元件库A11中直读式可变电阻跨接到A5 (IN) 和 (OUTA) 之间
7	负反馈	A (OUTA) $\rightarrow$ A1 (H2)
8	示波器联接 $\times 1$ 档	A5B (OUTB) $\rightarrow$ B3 (CH1)
9		B5 (OUT) $\rightarrow$ B3 (CH2)



# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.3 三阶系统的稳定性和瞬态响应

(2) 观察和验证等效于原三阶系统1.8的二阶单位反馈闭环系统

### 实验步骤:

第三步：运行、观察、记录：

- 运行LABACT程序，选择自动控制菜单下的线性系统的时域分析下的三阶典型系统瞬态响应和稳定性实验项目，就会弹出虚拟示波器的界面，点击开始即可使用本实验机配套的虚拟示波器（B3）单元的CH1测孔测量波形（时间量程放在 $\times 4$ 档）。也可选用普通示波器观测实验结果。
- 等待完整波形出来后，点击停止，用示波器观察A5B单元信号输出端C（t）的系统阶跃响应。示波器的截图详见虚拟示波器的使用。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.3 三阶系统的稳定性和瞬态响应

### (2) 观察和验证等效于原三阶系统1.8的二阶单位反馈闭环系统

#### 实验报告要求:

按下表改变图1.8所示的实验被测系统（三阶单位反馈闭环系统）的惯性时间常数  $T_1$ 、 $T_2$ （分别改变模拟单元A3和A5的反馈电容C2、C3）。（输入矩形波宽度 $\geq 6$ 秒，电压幅度 = 2.5V）

- 计算和观察被测对象临界稳定的增益K（R值），填入实验报告。
- 运用MATLAB的开环根轨迹法，求解闭环系统超调量 $M_p$ 为30%的稳定增益，并画出其系统模拟电路图和阶跃响应曲线（调整被测对象的增益K（R值）来改变增益），填入实验报告。

# 第一章 线性系统的时域分析

## 1.3 三阶系统的稳定性和瞬态响应

(2) 观察和验证等效于原三阶系统1.8的二阶单位反馈闭环系统

实验报告要求:

惯性时间常数 T1 (A3)	惯性时间常数 T1 (A5)	K		
		临界稳定 (等幅振荡)		稳定 (衰减振荡)
		计算值	测量值	$M_p \leq 30\%$
0.1	0.5			
	1			
0.2	0.5			
	1			

- 按上表的参数，规定闭环系统超调量 $M_p$ 为30%，运用MATLAB的开环根轨迹法，根据主导极点的概念，使原三阶系统近似为标准 I 型二阶系统，并画出其系统模拟电路图和阶跃响应曲线，填入实验报告。

# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.1 频率特性测试

### 实验目的:

- 了解线性系统频率特性的基本概念。
- 了解和掌握对数幅频曲线和相频曲线（波德图）的构造及绘制方法。

### 实验内容及步骤:

被测系统是一阶惯性的模拟电路图见图2.1，观测被测系统的幅频特性和相频特性，填入实验报告，并在对数坐标纸上画出幅频特性和相频特性曲线。

# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.1 频率特性测试

### 实验内容及步骤:

本实验将正弦波发生器（B4）单元的正弦波加于被测系统的输入端，用虚拟示波器观测被测系统的幅频特性和相频特性，了解各种正弦波输入频率的被测系统的幅频特性和相频特性。

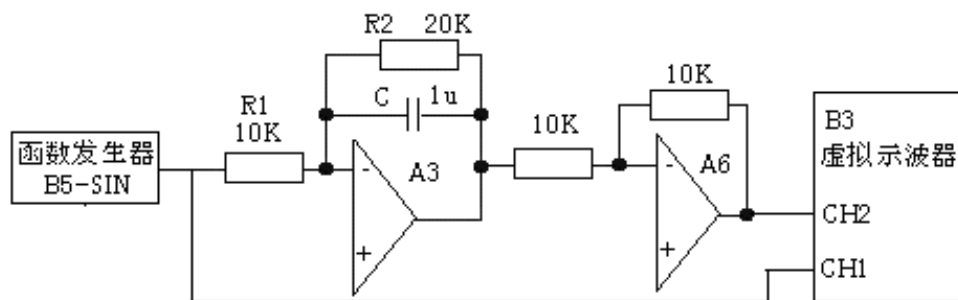


图2.1 被测系统的模拟电路图

# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.1 频率特性测试

### 实验步骤:

第一步：将函数发生器（B5）单元的正弦波输出作为系统输入。

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘正弦波’（正弦波指示灯亮）。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器2”，使之正弦波频率为8Hz（D1单元右显示）。
- 调节B5单元的“正弦波调幅”电位器，使之正弦波振幅值输出为2V左右（D1单元左显示）。

# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.1 频率特性测试

### 实验步骤:

第二步：构造模拟电路：按图2.1安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A3	S1, S7, S9
2	A6	S2, S6

(b) 测孔联线

1	信号输入	B5 (SIN) → A3 (H1)
2	运放级联	A3 (OUT) → A6 (H1)
3	示波器联接 ×1档	B5 (SIN) → B3 (CH1)
4		A6 (OUT) → B3 (CH2)

第三步：运行、观察、记录：

- 运行LABACT程序，在界面的自动控制菜单下的线性控制系统的频率响应分析实验项目，选择时域分析，就会弹出虚拟示波器的界面，点击开始，用示波器观察波形，应避免系统进入非线性状态。
- 点击停止键后，可拖动时间量程（在运行过程中，时间量程无法改变），以满足观察要求。示波器的截图详见虚拟示波器的使用。

## 第二章 线性控制系统的频域分析

### 2.1 频率特性测试

#### 实验报告要求：

按下表改变实验被测系统正弦波输入频率：（输入振幅为2V）。

观测幅频特性和相频特性，填入实验报告。並画出幅频特性、相频特性曲线

输入频率 Hz	幅频特性		相频特性	
	计算值	测量值	计算值	测量值
0.5				
1				
1.6				
3.2				
4.5				
6.4				
8				
9.6				
12.5				
16				
20				



# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.2 一阶惯性环节的频率特性曲线

### 实验目的:

- 了解和掌握一阶惯性环节的对数幅频特性和相频特性，实频特性和虚频特性的计算。
- 了解和掌握一阶惯性环节的转折频率 $\omega$ 的计算，及惯性时间常数对转折频率的影响
- 了解和掌握对数幅频曲线和相频曲线（波德图）、幅相曲线（奈奎斯特图）的构造及绘制方法。

# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.2 一阶惯性环节的频率特性曲线

### 实验内容及步骤:

- 了解和掌握对数幅频曲线和相频曲线（波德图）、幅相曲线（奈奎斯特图）的构造及绘制方法。
- 惯性环节的频率特性测试电路见图2.2，改变被测系统的各项电路参数，画出其系统模拟电路图，及频率特性曲线，并计算和测量其转折频率，填入实验报告。

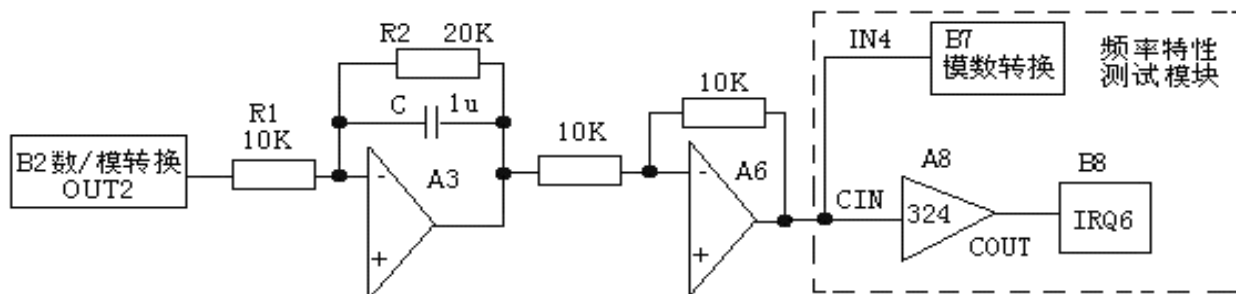


图2.2 惯性环节的频率特性测试电路

# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.2 一阶惯性环节的频率特性曲线

### 实验步骤:

第一步：将数/模转换器（B2）输出OUT2作为被测系统的输入。

第二步：构造模拟电路：按图2.2安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A3	S1, S7, S9
2	A6	S2, S6

(b) 测孔联线

1	信号输入	B2 (OUT2) → A3 (H1)
2	运放级联	A3 (OUT) → A6 (H1)
3	相位测量	A6 (OUT) → A8 (CIN1)
4		A8 (COUT1) → B8 (IRQ6)
5	幅值测量	A6 (OUT) → B7 (IN4)

# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.2 一阶惯性环节的频率特性曲线

### 实验步骤:

第三步：运行、观察、记录：

- 运行LABACT程序，选择自动控制菜单下的线性控制系统的频率响应分析实验项目，选择一阶系统，就会弹出‘频率特性扫描点设置’表，在该表中用户可根据自己的需要填入各个扫描点（本实验机选取的频率值 $f$ ，以0.1Hz为分辨率），如需在特性曲线上直接标注某个扫描点的角频率 $\omega$ 、幅频特性 $L(\omega)$ 或相频特性 $\varphi(\omega)$ ，则可在该表的扫描点上小框内点击一下（打√）。「确认」后将弹出虚拟示波器的频率特性界面，点击开始，即可按‘频率特性扫描点设置’表，实现频率特性测试。
- 测试结束后(约十分钟)，可点击界面下方的“频率特性”选择框中的任意一项进行切换，将显示被测系统的对数幅频、相频曲线(伯德图)和幅相曲线(奈奎斯特图)
- 显示该系统用户点取的频率点的 $\omega$ 、 $L$ 、 $Im$ 、 $Re$

实验机在测试频率特性结束后，将提示用户用鼠标直接在幅频或相频特性曲线的界面上点击所需增加的频率点，实验机将会把鼠标点取的频率点的频率信号送入到被测对象的输入端，然后检测该频率的频率特性。检测完成后在界面上方显示该频率点的 $f$ 、 $\omega$ 、 $L$ 、 $Im$ 、 $Re$ 相关数据，同时在曲线上打‘十字标记’。

## 第二章 线性控制系统的频域分析

### 2.2 一阶惯性环节的频率特性曲线

#### 实验报告要求：

按下表改变图2.2所示的实验被测系统：改变惯性时间常数  $T$ （改变模拟单元A3的反馈电容  $C$ ）。

在报告空白处填上转折频率（ $\varphi=45^\circ$ ）测量值和计算值。

惯性时间 常数 $T$	转折频率	
	实测值	计算值
0.1		
0.2		
0.3		

# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.3 二阶闭环系统的频率特性曲线

### 实验目的:

- 了解和掌握二阶闭环系统中的对数幅频特性和相频特性，实频特性和虚频特性的计算。
- 了解和掌握欠阻尼二阶闭环系统中的自然频率 $\omega_n$ 、阻尼比 $\xi$ 对谐振频率 $\omega_r$ 和谐振峰值 $L(\omega_r)$ 的影响及 $\omega_r$ 和 $L(\omega_r)$ 的计算。
- 观察和分析欠阻尼二阶开环系统的谐振频率 $\omega_r$ 、谐振峰值 $L(\omega_r)$ ，并与理论计算值作比对。
- 改变被测系统的电路参数，画出闭环频率特性曲线，观测谐振频率和谐振峰值，填入实验报告。

# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.3 二阶闭环系统的频率特性曲线

### 实验内容及步骤:

- 被测系统模拟电路图的构成如图2.3所示，观测二阶闭环系统的频率特性曲线，测试其谐振频率、谐振峰值。
- 改变被测系统的各项电路参数，画出其系统模拟电路图，及闭环频率特性曲线，并计算和测量系统的谐振频率及谐振峰值，填入实验报告。

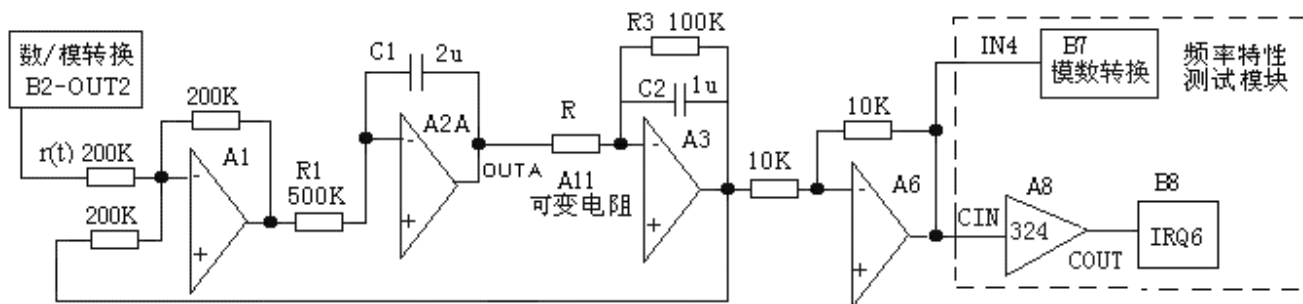


图2.3 二阶闭环系统频率特性测试电路

# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.3 二阶闭环系统的频率特性曲线

### 实验步骤:

第一步：将数/模转换器（B2）输出OUT2作为被测系统的输入。

第二步：构造模拟电路：按图2.3安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A2	S2, S11, S12
3	A3	S8, S9
5	A6	S2, S6

(b) 测孔联线

1	信号输入	B2 (OUT2) → A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) → A2 (H1)
3	运放级联	A3 (OUT) → A6 (H1)
4	负反馈	A3 (OUT) → A1 (H2)
6	相位测量	A6 (OUT) → A8 (CIN1)
7		A8 (COUT1) → B8 (IRQ6)
8	幅值测量	A6 (OUT) → B7 (IN4)
9	跨接元件 (4K)	元件库A11中可变电阻跨接到 A (OUTA) 和A3 (IN) 之间



# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.3 二阶闭环系统的频率特性曲线

### 实验步骤:

第三步：运行、观察、记录：

- 将数/模转换器（B2）输出OUT2作为被测系统的输入，运行LABACT程序，在界面的自动控制菜单下的线性控制系统的频率响应分析实验项目，选择二阶系统，就会弹出‘频率特性扫描点设置’表。
- 测试结束后（约十分钟），可点击界面下方的“频率特性”选择框中的任意一项进行切换，将显示被测系统的闭环对数幅频、相频特性曲线（伯德图）和幅相曲线（奈奎斯特图）。
- 显示该系统用户点取的频率点的 $\omega$ 、L、 $\angle$ 、Im、Re
- 谐振频率和共振峰值的测试：

# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.3 二阶闭环系统的频率特性曲线

### 实验报告要求:

按下表改变图2.3所示的实验被测系统

改变开环增益 $K$  (A3)、惯性时间常数 $T$  (A3)、积分常数 $T_i$  (A2)，画出其系统模拟电路图，及开环频率特性曲线，并计算和测量系统的谐振频率及谐振峰值，填入实验报告。

开环增益 $K$ (A3)	惯性常数 $T$ (A3)	积分常数 $T_i$ (A2)	谐振频率 (rad)		谐振峰值 (dB)	
			计算值	测量值	计算值	测量值
25	0.1	1				
	0.2					
	0.3					
20	0.1	0.5				
		0.2				

# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.4 二阶开环系统的频率特性曲线

### 实验目的:

- 了解和掌握二阶开环系统中的对数幅频特性和相频特性，实频特性和虚频特性的计算。
- 了解和掌握欠阻尼I型二阶闭环系统中的自然频率 $\omega_n$ 、阻尼比 $\xi$ 对谐振频率 $\omega_r$ 和谐振峰值 $L(\omega_r)$ 的影响及 $\omega_r$ 和 $L(\omega_r)$ 的计算。
- 研究表征系统稳定程度的相位裕度和幅值穿越频率对系统的影响。
- 了解和掌握I型二阶开环系统对数幅频曲线、相频曲线、和幅相曲线的构造及绘制方法

# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.4 二阶开环系统的频率特性曲线

### 实验内容及步骤:

- 被测系统模拟电路图的构成如图2.3所示（同 I 型二阶闭环系统频率特性测试构成），测试其幅值穿越频率、相位裕度。
- 改变被测系统的各项电路参数，画出其系统模拟电路图，及开环频率特性曲线，并计算和测量其幅值穿越频率、相位裕度，填入实验报告。

# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.4 二阶开环系统的频率特性曲线

### 实验步骤:

第一步：将数/模转换器（B2）输出OUT2作为被测系统的输入。

第二步：构造模拟电路：安置短路套及测孔连线表同第2.2节。

第三步：运行、观察、记录：

- 将数/模转换器（B2）输出OUT2作为被测系统的输入，运行LABACT程序，在界面的自动控制菜单下的线性控制系统的频率响应分析实验项目，选择二阶系统，就会弹出‘频率特性扫描点设置’表。
- 测试结束后（约十分钟），可点击界面下方的“频率特性”选择框中的任意一项进行切换，将显示被测系统的开环对数幅频、相频特性曲线（伯德图）和幅相曲线（奈奎斯特图）。
- 显示该系统用户点取的频率点的 $\omega$ 、 $L$ 、 $\text{Im}$ 、 $\text{Re}$
- 谐振频率和共振峰值的测试：

# 第二章 线性控制系统的频域分析

## 2.4 二阶开环系统的频率特性曲线

### 实验报告要求:

按下表改变图2.4所示的实验被测系统

改变开环增益 $K$  (A3)、惯性时间常数 $T$  (A3)、积分常数 $T_i$  (A2)，画出其系统模拟电路图，及开环频率特性曲线，并计算和测量系统的谐振频率及谐振峰值，填入实验报告。

开环增益 $K$ (A3)	惯性常数 $T$ (A3)	积分常数 $T_i$ (A2)	穿越频率		相位裕度	
			计算值	测量值	计算值	测量值
25	0.1	1				
25	0.2					
15	0.3					
20	0.1	0.2				
10		0.5				

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

频域法校正主要是通过对被控对象的开环对数幅频特性和相频特性（波特图）观察和分析实现的。

### 实验目的：

- 了解和掌握超前校正的原理。
- 了解和掌握利用闭环和开环的对数幅频特性和相频特性完成超前校正网络的参数的计算。
- 掌握在被控系统中如何串入超前校正网络，构建一个性能满足指标要求的新系统的方法。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### 实验内容及步骤:

- 观测被控系统的开环对数幅频特性和相频特性，幅值穿越频率 $\omega_c$ ，相位裕度 $\gamma$ ，按“校正后系统的相位裕度 $\gamma'$ ”要求,设计校正参数，构建校正后系统
- 观测校正前、后的时域特性曲线，並测量校正后系统的相位裕度 $\gamma'$ 、超调量 $M_p$ 、峰值时间 $t_P$ 。
- 改变“校正后系统的相位裕度 $\gamma'$ ”要求,设计校正参数，构建校正后系统，画出其系统模拟电路图和阶跃响应曲线，观测校正后相位裕度 $\gamma'$ 、超调量 $M_p$ 、峰值时间 $t_P$ 填入实验报告。



# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

未校正系统模拟电路图见图3.1。本实验将函数发生器（B5）单元作为信号发生器，OUT输出施加于被测系统的输入端 $U_i$ ，观察OUT从0V阶跃+2.5V时被测系统的时域特性。

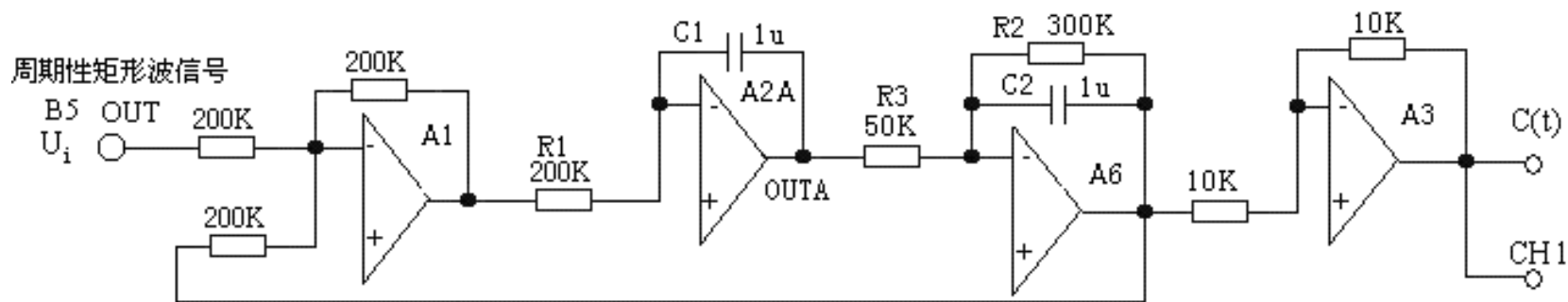


图3.1 未校正系统模拟电路图

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

#### 实验步骤:

第一步：将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）。

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘矩形波’（矩形波指示灯亮）。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $\geq 3$ 秒（D1单元左显示）。
- 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 2.5V（D1单元右显示）。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

实验步骤:

第二步：构造模拟电路：按图3.1安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A2	S3, S11
3	A3	S1, S6
4	A6	S4, S8, S9
5	B5	'S-ST'

(b) 测孔联线

1	信号输入 $r(t)$	B5 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) $\rightarrow$ A2 (H1)
3	运放级联	A (OUTA) $\rightarrow$ A6 (H1)
4	负反馈	A6 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H2)
5	运放级联	A6 (OUT) $\rightarrow$ A3 (H1)
6	示波器联接 $\times 1$ 档	A3 (OUT) $\rightarrow$ B3 (CH1)
7		B5 (OUT) $\rightarrow$ B3 (CH2)

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

#### 实验步骤:

第三步：运行、观察、记录：

- 运行LABACT程序，在界面自动控制菜单下的“线性系统的校正和状态反馈”实验项目，选中“线性系统的校正”项，弹出线性系统的校正的界面，点击开始，用虚拟示波器CH1观察系统输出信号。
- 观察OUT从0V阶跃+2.5V时被测系统的时域特性，等待一个完整的波形出来后，点击停止，然后移动游标测量其超调量、峰值时间及调节时间。

在未校正系统的时域特性特性曲线上可测得时域特性：超调量 $M_p=56.4\%$  峰值时间 $t_p=0.32S$

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (2) 未校正系统的频域特性的测试

本实验将数/模转换器（B2）单元作为信号发生器，实验开始后，将按‘频率特性扫描点设置’表规定的频率值，按序自动产生多种频率信号，OUT2输出施加于被测系统的输入端 $r(t)$ ，然后分别测量被测系统的输出信号的闭环对数幅值和相位，数据经相关运算后在虚拟示波器中显示。未校正系统频域特性测试的模拟电路图见图3.2。

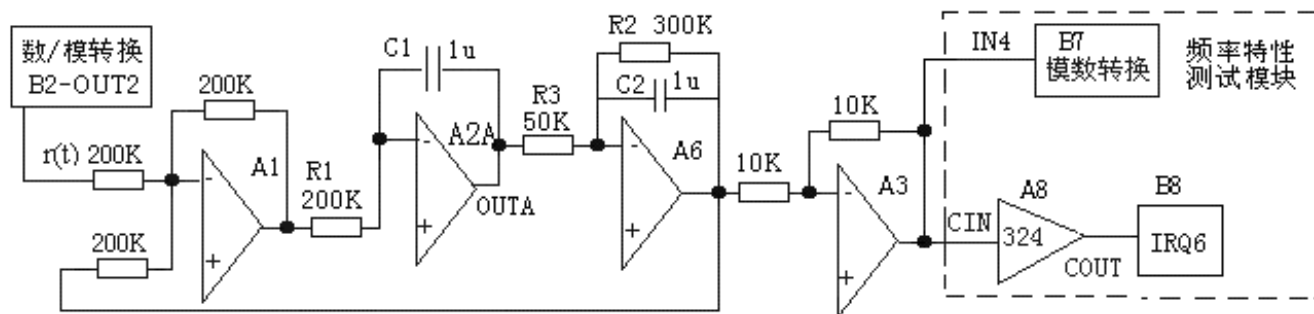


图3.2 未校正系统频域特性测试的模拟电路图

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (2) 未校正系统的频域特性的测试

#### 实验步骤:

第一步：将数/模转换器（B2）输出OUT2作为被测系统的输入。

第二步：构造模拟电路：按图3-3-2安置短路套及测孔联线表如下。

#### (a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A2	S3, S11
3	A3	S1, S6
4	A6	S4, S8, S9
5	B5	'S-ST'

#### (b) 测孔联线

1	信号输入 $r(t)$	B2 (OUT2) $\rightarrow$ A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) $\rightarrow$ A2 (H1)
3	运放级联	A (OUTA) $\rightarrow$ A6 (H1)
4	负反馈	A6 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H2)
5	运放级联	A6 (OUT) $\rightarrow$ A3 (H1)
6	幅值测量	A3 (OUT) $\rightarrow$ B7 (IN4)
7	相位测量	A3 (OUT) $\rightarrow$ A8 (CIN1)
8		A8 (COUT1) $\rightarrow$ B8 (IRQ6)

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (2) 未校正系统的频域特性的测试

实验步骤：

第三步：运行、观察、记录：

将数/模转换器（B2）输出OUT2作为被测系统的输入，运行**LABACT**程序，在界面的**自动控制**菜单下的**线性控制系统的频率响应分析**实验项目，选择**二阶系统**，就会弹出虚拟示波器的界面，点击**开始**，则进行频率特性测试。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (3) 超前校正网络的设计

- 在未校正系统模拟电路的开环相频特性曲线上测得未校正系统的相位裕度  $\gamma=18.9^\circ$ 。
- 如果设计要求校正后系统的相位裕度  $\gamma'=52^\circ$ ，则网络的最大超前相位角必须为： $\varphi_m = \gamma' - \gamma + \Delta = 52^\circ - 19^\circ + 9^\circ = 42^\circ$      $\sin \varphi_m = 0.67$

其中  $\Delta$  为考虑到  $\gamma(\omega_c < \omega_c')$  时，所需减的角度，一般取  $5^\circ \sim 10^\circ$ 。

- 可计算出网络的参数： $a = \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m} = \frac{1 + 0.67}{1 - 0.67} = 5$
- 可计算出网络的最大超前相位角处的对数幅频值为： $L_c(\varphi_m) = 10 \lg a = 10 \lg 5 = 7 \text{dB}$
- 在系统开环幅频特性曲线上，可测得时的角频率  $\omega_c = 14.4 \text{ rad/s}$ ，该角频率应是网络的最大超前角频率，这亦是串联超前校正后系统的零分贝频率。
- 可计算出计算串联超前校正网络参数： $T = \frac{1}{\omega_c \sqrt{a}} = \frac{1}{14.4 \times 2.24} = 0.031$ ，
- 令  $C=1\mu$ ，计算出： $R4=155\text{K}$ ，  $R5=38.7\text{K}$



# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (4) 串联超前校正后系统的频域特性的测试

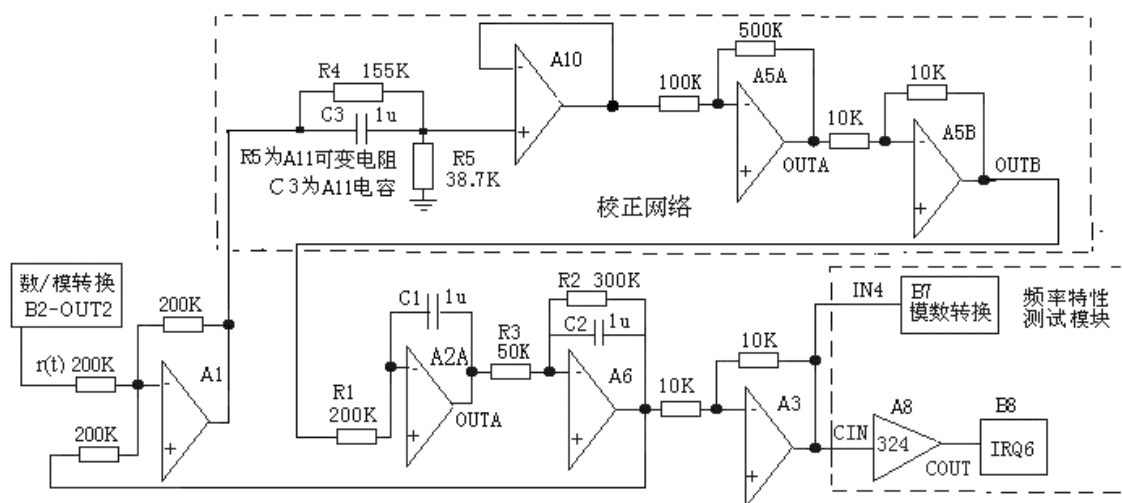


图3.5 串联超前校正后系统频域特性测试的模拟电路图

串联超前校正后系统的传递函数为：
$$G(S) = \frac{1}{5} \times \frac{1+0.155S}{1+0.031S} \times \frac{30}{0.2S(1+0.3S)}$$

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (4) 串联超前校正后系统的频域特性的测试

#### 实验步骤:

第一步：将数/模转换器（B2）输出OUT2作为被测系统的输入。

第二步：构造模拟电路：按图3-3-5、图3-3-6安置短路套及测孔联线表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A2	S3, S11
3	A3	S1, S6
4	A5	S3, S7
5	A6	S4, S8, S9
6	B5	'S-ST'
7	A10	S1

(b) 测孔联线

1	信号输入	B2 (OUT2) → A1 (H1)
2	运放级联	A2A (OUTA) → A6 (H1)
3	负反馈	A6 (OUT) → A1 (H2)
4	运放级联	A6 (OUT) → A3 (H1)
5	幅值测量	A3 (OUT) → B7 (IN4)
6	相位测量	A3 (OUT) → A8 (CIN1)
7		A8 (COUT1) → B8 (IRQ6)
8	跨接元件	元件库 A11 中可变电阻跨接到
/9	(155K)	A1 (OUT) 和 A10 (IN+) 之间

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (4) 串联超前校正后系统的频域特性的测试

实验步骤:

第三步：运行、观察、记录：

运行程序同《2. 未校正系统的频域特性的测试》。

图3-3-5的串联超前校正后系统的开环对数幅频、相频曲线见（图3-3-7）和（图3-3-8）所示。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (4) 串联超前校正后系统的频域特性的测试

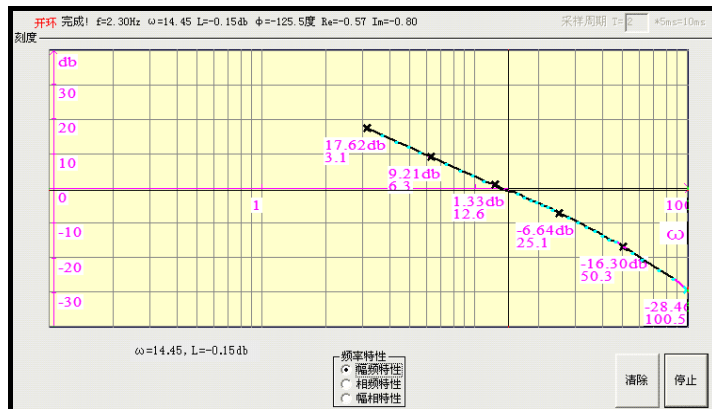


图3-3-7 串联超前校正后系统的开环对数幅频曲线

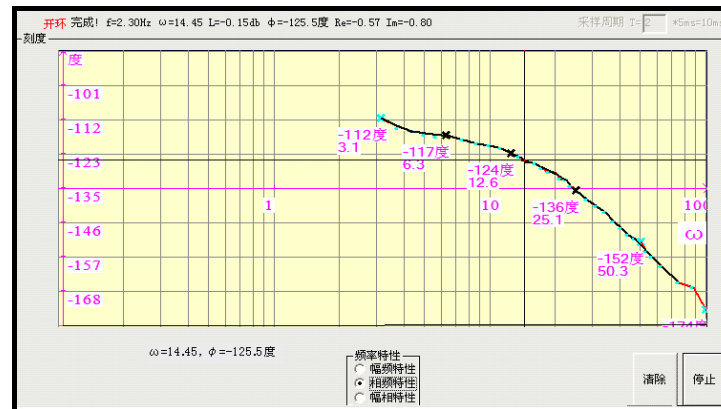


图3-3-8 串联超前校正后系统的开环对数相频曲线

串联超前校正后的相频特性曲线上可测得串联超前校正后系统的频域特性：

穿越频率  $\omega_c = 14.45$  rad/s， 相位裕度  $\gamma = 54.5^\circ$

测试结果表明符合设计要求。



# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (4) 串联超前校正后系统的时域特性的测试

实验步骤：（注：‘S ST’用“短路套”短接！）

（1）将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）

- ① 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘矩形波’（矩形波指示灯亮）。
- ② 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $\geq 3$ 秒（D1单元左显示）。
- ③ 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 2.5V（D1单元右显示）。

（2）构造模拟由路：按图3-3-10安置短路套与测孔连线按下表。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (4) 串联超前校正后系统的时域特性的测试

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A2	S3, S11
3	A3	S1, S6
4	A5	S3, S7
5	A6	S4, S8, S9
6	B5	'S-ST'
7	A10	S1

(b) 测孔联线

1	信号输入 r(t)	B5 (OUT) → A1 (H1)
2	运放级联	A10 (OUT) → A5 (H1)
3	运放级联	A5B (OUTB) → A2 (H1)
4	运放级联	A2A (OUTA) → A6 (H1)
5	负反馈	A6 (OUT) → A1 (H2)
6	运放级联	A6 (OUT) → A3 (H1)
7	跨接元件	元件库 A11 中可变电阻跨接到 A1
/8	(155K)	(OUT) 和 A10 (IN+) 之间
9	跨接元件	元件库 A11 中可变电阻跨接到 A1
/10	(1u)	(OUT) 和 A10 (IN+) 之间
11	跨接元件	元件库 A11 中可变电阻跨接到
/12	(38.7K)	A10 (IN+) 和 GND 之间
13	示波器联接	A3 (OUT) ? B3 (CH1)
14	×1 档	B5 (OUT) ? B3 (CH2)

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (4) 串联超前校正后系统的时域特性的测试

(3) 运行、观察、记录:

运行程序同《1. 未校正系统的时域特性的测试》

观察矩形波输出 (OUT) 从0V阶跃+2.5V时被测系统的时域特性, 被测系统输出的时域特性曲线见图3-3-11, 等待一个完整的波形出来后, 点击停止, 然后移动游标测量其超调量、峰值时间及调节时间。

在串联超前校正后的时域特性特性曲线上可测得时域特性:

超调量 $M_p = 18.8\%$       调节时间 $t_s = 0.38S (\Delta = 5\%)$       峰值时间 $t_p = 0.18S$



# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.1 频域法串联超前校正

### (4) 串联超前校正后系统的时域特性的测试

实验报告要求:

按下表“校正后系统的相位裕度 $\gamma'$ ”设计校正参数，构建校正后系统，画出串联超前校正后系统模拟电路图，及校正前、后的时域特性曲线，并观测校正后超调量 $M_p$ ，峰值时间 $t_P$ 填入实验报告。

相位裕度 $\gamma'$ (设计目标)	测 量 值		
	相位裕度 $\gamma'$	超调量 $M_p(\%)$	峰值时间 $t_P$
50°			
40°			
60°			
70°			

注：做完该实验请将A10单元的短路套拔掉放置在短路套闲置区，否则可能会影响矩形波输出！

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

频域法校正主要是通过对被控对象的开环对数幅频特性和相频特性（波特图）观察和分析实现的。

### 实验目的：

- 了解和掌握迟后校正的原理。
- 了解和掌握利用闭环和开环的对数幅频特性和相频特性完成迟后校正网络的参数的计算。
- 掌握在被控系统中如何串入迟后校正网络，构建一个性能满足指标要求的新系统的方法

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### 实验内容及步骤:

- 观测被控系统的开环对数幅频特性和相频特性，幅值穿越频率 $\omega_C$ ，相位裕度 $\gamma$ ，按“校正后系统的相位裕度 $\gamma'$ ”要求，设计校正参数，构建校正后系统。
- 观测校正前、后的时域特性曲线，并测量校正后系统的相位裕度 $\gamma'$ 、超调量 $M_p$ 、峰值时间 $t_P$ 。
- 改变“校正后系统的相位裕度 $\gamma'$ ”要求，设计校正参数，构建校正后系统，画出其系统模拟电路图和阶跃响应曲线，观测校正后相位裕度 $\gamma'$ 、超调量 $M_p$ 、峰值时间 $t_P$ 填入实验报告。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

未校正系统模拟电路图见图3-3-9。本实验将函数发生器（B5）单元作为信号发生器，OUT输出施加于被测系统的输入端 $U_i$ ，观察OUT从0V阶跃+2.5V时被测系统的时域特性。

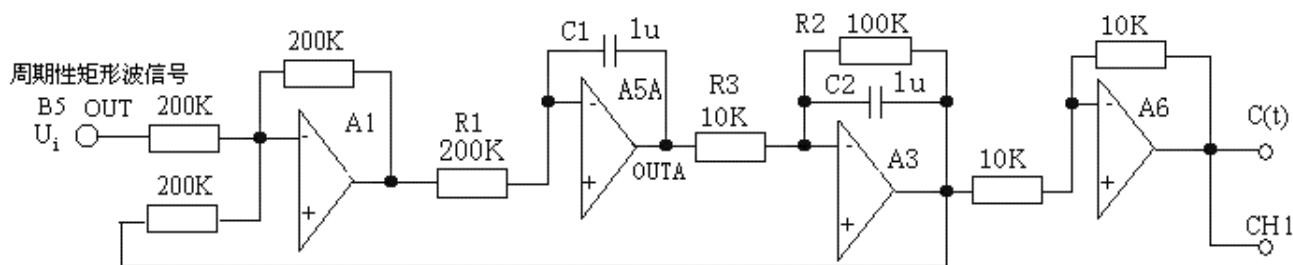


图3-3-9 未校正系统模拟电路图

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

#### 实验步骤:

将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘矩形波’（矩形波指示灯亮）。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $\geq 3$ 秒（D1单元左显示）。
- 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 2.5V（D1单元右显示）。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

实验步骤:

第二步：构造模拟电路：按图3.1安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A3	S1, S8, S9
3	A5	S4, S10
4	A6	S2, S6
5	B5	'S-ST'

(b) 测孔联线

1	信号输入 $r(t)$	B5 (OUT) → A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) → A5 (H1)
3	运放级联	A5A (OUTA) → A3 (H1)
4	负反馈	A3 (OUT) → A1 (H2)
5	运放级联	A3 (OUT) → A6 (H1)
6	示波器联接 ×1 档	A6 (OUT) ? B3 (CH1)
7		B5 (OUT) ? B3 (CH2)

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

#### 实验步骤:

第三步：运行、观察、记录：

- 将函数发生器（B5）单元作为信号发生器，OUT输出施加于被测系统的输入端 $U_i$ ，
- 运行LABACT程序，在界面自动控制菜单下的“线性系统的校正和状态反馈”-实验项目，选中“线性系统的校正”项，弹出线性系统的校正的界面，点击开始，用虚拟示波器CH1观察系统输出信号。
- 观察OUT从0V阶跃+2.5V时被测系统的时域特性，等待一个完整的波形出来后，点击停止，然后移动游标测量其超调量、峰值时间。

在时域特性特性曲线上可测得时域特性：

超调量 $M_p = 51.6\%$ ， 调节时间 $t_s = 1.05S (\Delta = 5\%)$ ， 峰值时间 $t_p = 0.13S$

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (2) 未校正系统的频域特性的测试

本实验将数/模转换器（B2）单元作为信号发生器，实验开始后，将按‘频率特性扫描点设置’表规定的频率值，按序自动产生多种频率信号，OUT2输出施加于被测系统的输入端 $r(t)$ ，然后分别测量被测系统的输出信号的闭环对数幅值和相位，数据经相关运算后在虚拟示波器中显示。

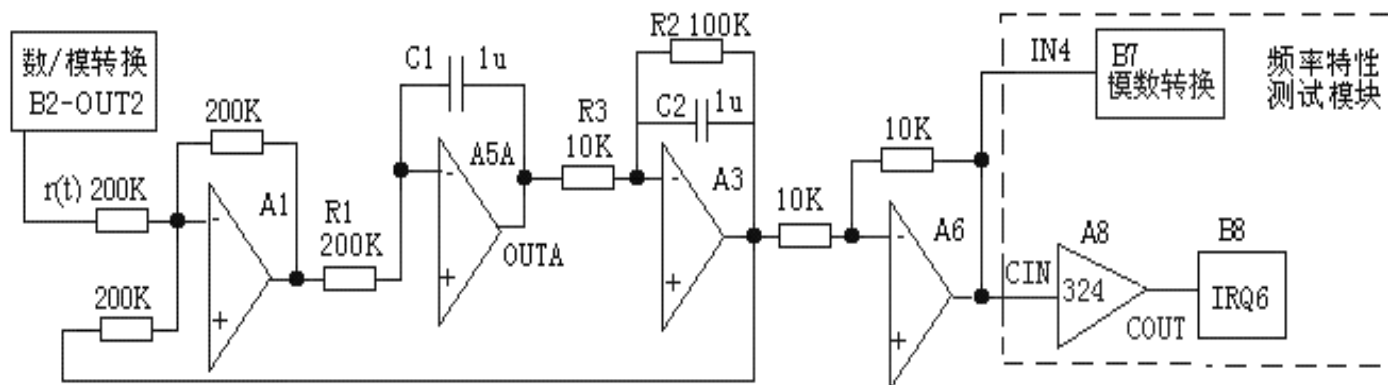


图3-3-10 未校正系统频域特性测试的模拟电路图



# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (2) 未校正系统的频域特性的测试

实验步骤:

将数/模转换器 (B2) 输出OUT2作为被测系统的输入。

(2) 构造模拟电路: 按图3-3-10安置短路套及测孔连线, 表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A3	S1, S8, S9
3	A5	S4, S10
4	A6	S2, S6
5	B5	'S-ST'

(b) 测孔连线

1	信号输入 $r(t)$	B2 (OUT2) $\rightarrow$ A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) $\rightarrow$ A5 (H1)
3	运放级联	A5A (OUTA) $\rightarrow$ A3 (H1)
4	负反馈	A3 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H2)
5	运放级联	A3 (OUT) $\rightarrow$ A6 (H1)
6	幅值测量	A6 (OUT) $\rightarrow$ B7 (IN4)
7	相位测量	A6 (OUT) $\rightarrow$ A8 (CIN1)
8		A8 (COUT1) $\rightarrow$ B8 (IRQ6)

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (2) 未校正系统的频域特性的测试

实验步骤:

第三步：运行、观察、记录：

- 将数/模转换器（B2）输出OUT2作为被测系统的输入，运行LABACT程序，在界面的自动控制菜单下的线性控制系统的频率响应分析实验项目，选择二阶系统，就会弹出虚拟示波器的界面，点击开始，则进行频率特性测试，开环对数幅频、相频曲线见图3-3-11、12所示。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (2) 未校正系统的频域特性的测试

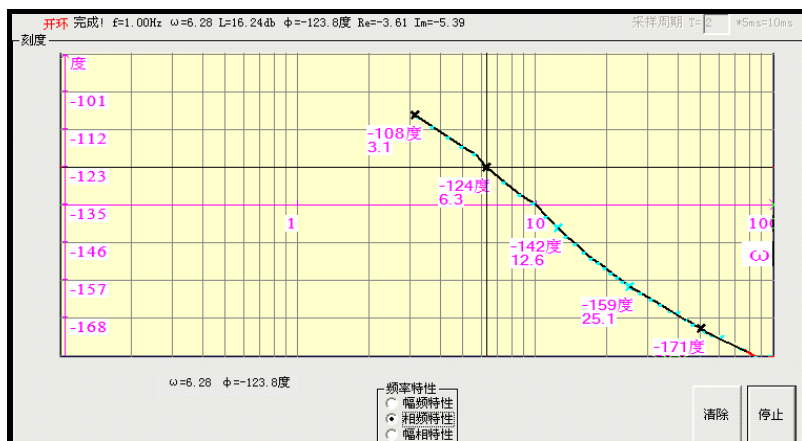


图3-3-11 未校正系统开环相频特性曲线

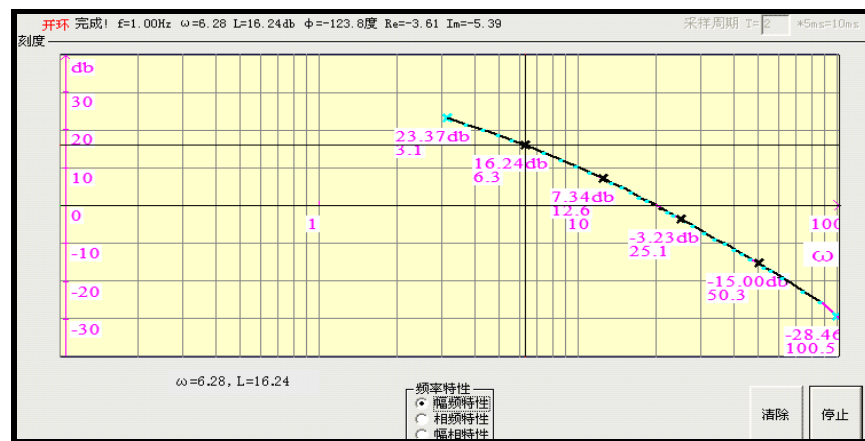


图3-3-12 未校正系统开环幅频特性曲线

在图3-3-11未校正系统模拟电路的相频特性曲线上可测得未校正系统频域特性:

穿越频率  $\omega_c = 21.36 \text{ rad/s}$  , 相位裕度  $\gamma = 26^\circ$

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (3) 迟后校正网络的设计

➤ 如果设计要求校正后系统的相位裕度 $\gamma'=50^\circ$ ，考虑到迟后校正网络在新的截止频率处会产生一定的相角迟后，因此，  
取  $\varphi(\omega_c') = -6^\circ$  则  $\gamma(\omega_c') = 50^\circ + 6^\circ = 56^\circ$   $\gamma' = \gamma(\omega_c') + \varphi(\omega_c')$

➤ 在未校正系统开环相频特性曲线（图3-3-11）中可测得 $\gamma=56^\circ$ 时的角频率 $\omega$ 为6.28 rad/s。该角频率 $\omega$ 即为校正后的穿越频率 $\omega_c'$ 。

➤ 在未校正系统开环幅频特性曲线（图3-3-12）中可测得：  
 $\omega_c' = 6.28$  rad/s处的迟后校正网络对数幅频值为： $L(\omega_c') = -16.24$ dB

据式 3-3-10 可计算出： $T = \frac{1}{0.1\omega_c' \times b} = 10.34$  令  $C=10\mu$  计算出：  
 $R_4=159K, R_5=875K$

迟后校正网络传递函数为：
$$G_C(S) = \frac{1 + 1.59S}{1 + 10.34S}$$

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (4) 串联迟后校正系统的频域特性的测试

串联迟后校正系统频域特性测试的模拟电路图见图3-3-13。

图3-3-13串联迟后超前校正后系统的传递函数为：

$$G(S) = \frac{1 + 1.59S}{1 + 10.34S} \times \frac{10}{0.2S(1 + 0.1S)}$$

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (4) 串联迟后校正系统的频域特性的测试

实验步骤:

(1) 将数/模转换器 (B2) 输出OUT2作为被测系统的输入。

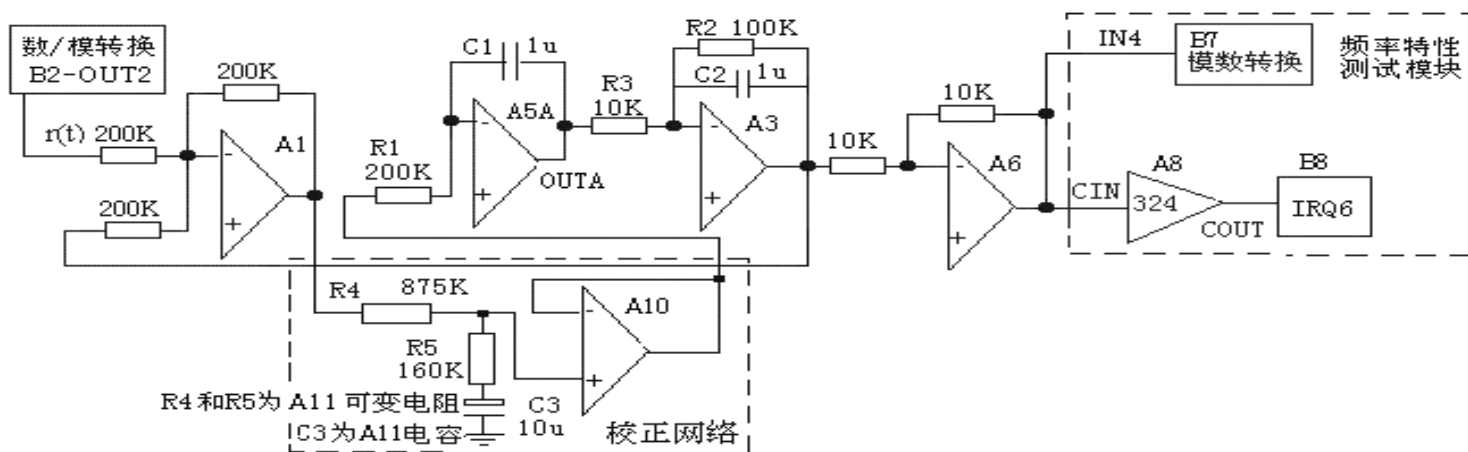


图3-3-13 (a) 串联迟后校正系统频域特性测试的模拟电路图

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (4) 串联迟后校正系统的频域特性的测试

实验步骤:

(2) 构造模拟电路: 按图3-3-13安置短路套及测孔联线, 表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A3	S1, S8, S9
3	A5	S4, S10
4	A6	S2, S6
5	B5	'S-ST'
6	A10	S1

(b) 测孔联线

1	信号输入 $r(t)$	B2 (OUT2) $\rightarrow$ A1 (H1)
2	运放级联	A5A (OUTA) $\rightarrow$ A3 (H1)
3	负反馈	A3 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H2)
4	运放级联	A3 (OUT) $\rightarrow$ A6 (H1)
5	幅值测量	A6 (OUT) $\rightarrow$ B7 (IN4)
6	相位测量	A6 (OUT) $\rightarrow$ A8 (CIN1)
7		A8 (COUT1) $\rightarrow$ B8 (IRQ6)
8 /9	跨接元件 (875K)	元件库 A11 中可变电阻跨接到 A1 (OUT) 和 A10 (IN+) 之间
10 /11 /12	跨接元件 (160K+10u)	元件库 A11 中可变电阻和 10u 电容串联后跨接到 A10 (IN+) 和 GND 之间
13	运放级联	A10 (OUT) $\rightarrow$ A5 (H1)

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (4) 串联迟后校正系统的频域特性的测试

#### 实验步骤:

第三步：运行、观察、记录：：运行程序同《2. 未校正系统的频域特性的测试》。图3-3-13的被测二阶系统的开环对数幅频、相频曲线见图3-3-14和图3-3-15所示。



# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (4) 串联迟后校正系统的频域特性的测试

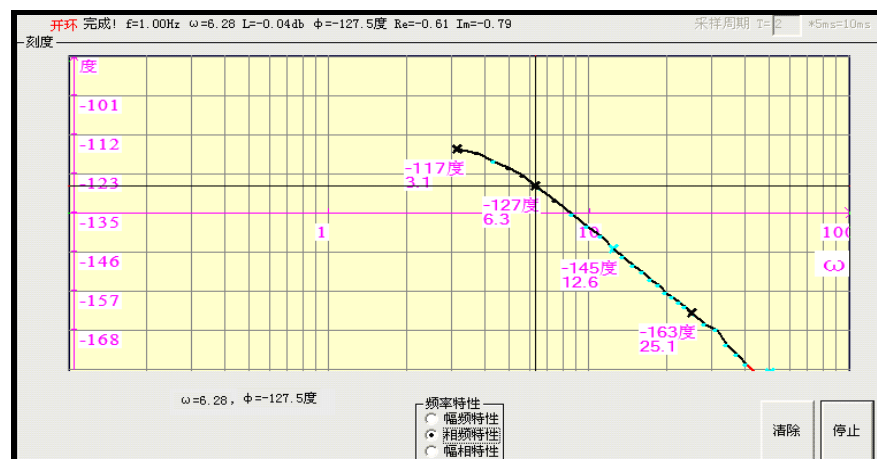
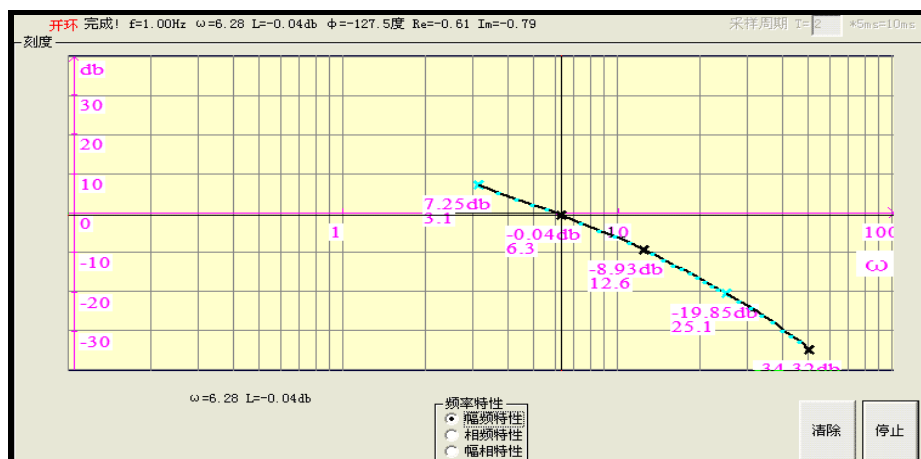


图3-3-14串联迟后校正后系统开环幅频特性曲线图3-3-15串联迟后校正后系统开环相频特性曲线

在图3-3-15串联迟后校正后的相频特性曲线上可测得串联迟后校正后系统的频域特性:

穿越频率  $\omega_c=6.28$  rad/s

相位裕度  $\gamma = 52^\circ$

测试结果表明符合设计要求。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (5) 串联迟后校正系统的时域特性的测试

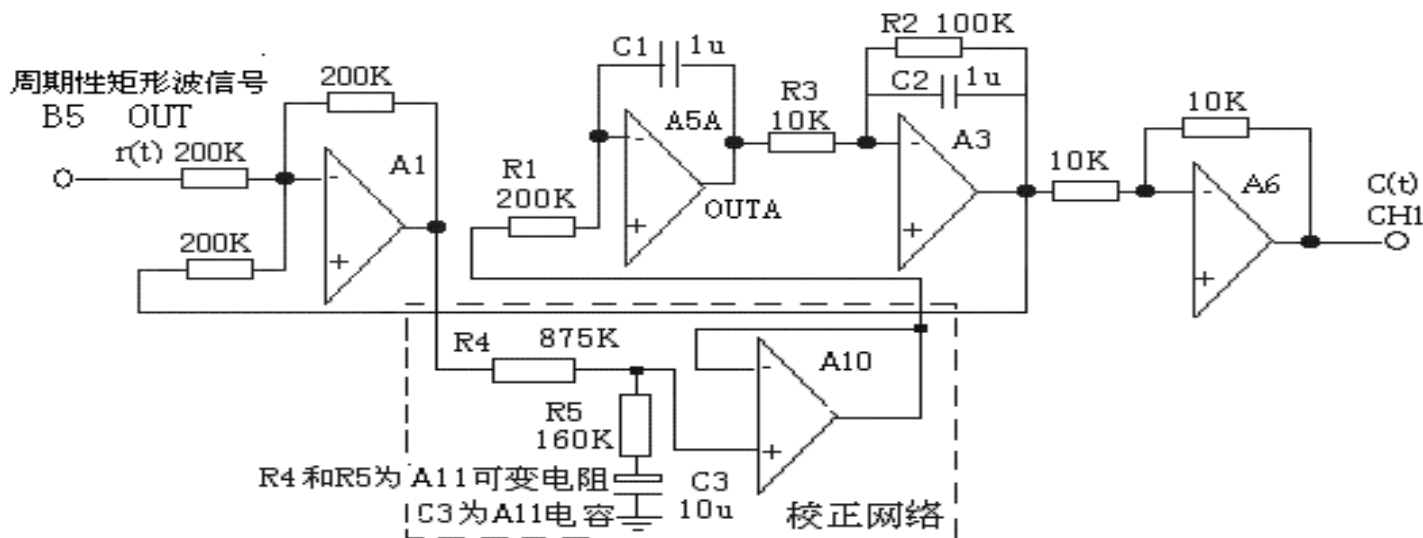


图3-3-16 串联迟后校正系统时域特性测试的模拟电路图

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (5) 串联迟后校正系统的时域特性的测试

实验步骤:

- 将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）
- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘矩形波’（矩形波指示灯亮）。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $\geq 3$ 秒（D1单元左显示）。
- 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 2.5V（D1单元右显示）。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (5) 串联迟后校正系统的时域特性的测试

实验步骤:

(2) 构造模拟电路: 按图3-3-13安置短路套及测孔连线, 表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A3	S1, S8, S9
3	A5	S4, S10
4	A6	S2, S6
5	B5	'S-ST'
6	A10	S1

(b) 测孔连线

1	信号输入 $r(t)$	B5 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H1)
2	运放级联	A5A (OUTA) $\rightarrow$ A3 (H1)
3	负反馈	A3 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H2)
4	运放级联	A3 (OUT) $\rightarrow$ A6 (H1)
5 /6	跨接元件 (875K)	元件库 A11 中可变电阻跨接到 A1 (OUT) 和 A10 (IN+) 之间
7 /8 /9	跨接元件 (160K+10u)	元件库 A11 中可变电阻和 10u 电容串联后跨接到 A10 (IN+) 和 GND 之间
10	运放级联	A10 (OUT) $\rightarrow$ A5 (H1)
11	示波器联接 $\times 1$ 档	A6 (OUT) ? B3 (CH1)
12		B5 (OUT) ? B3 (CH2)

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (5) 串联迟后校正系统的时域特性的测试

实验步骤:

第三步：运行、观察、记录：运行程序同《1. 未校正系统的时域特性的测试》。在串联迟后校正后的时域特性曲线上可测得：超调量  $M_p=22\%$  峰值时间  $t_p=0.44S$ 。

示波器的截图详见虚拟示波器的使用。

注：做完该实验请将A10单元的短路套拔掉放置在短路套闲置区，否则可能会影响矩形波输出！

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.2 频域法串联迟后校正

### (5) 串联迟后校正系统的时域特性的测试

实验报告要求:

按下表“校正后系统的相位裕度 $\gamma'$ ”设计校正参数，并构建校正后系统，画出串联迟后校正后系统模拟电路图，及校正前、后的时域特性曲线，观测校正后相位裕度 $\gamma'$ 、超调量 $M_p$ 、峰值时间 $t_P$ 填入实验报告。

相位裕度 $\gamma'$ (设计目标)	测 量 值		
	相位裕度 $\gamma'$	超调量 $M_p(\%)$	峰值时间 $t_P$
$50^\circ$			
$40^\circ$			
$60^\circ$			
$70^\circ$			

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.3 时域法串联比例微分校正

### 实验目的:

- 了解和掌握串联比例微分校正的原理。
- 了解和掌握利用 I 型二阶系统的闭环传递函数标准式完成串联比例微分校正网络参数的计算。
- 掌握在被控系统中如何串入比例微分校正网络，构建一个性能满足指标要求的新系统的方法。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.3 时域法串联比例微分校正

### 实验内容及步骤:

- 观测被控系统的时域曲线，按“校正后系统的超调量 $M_p$ ”要求,设计校正参数，构建校正后系统。观测校正前、后的时域特性曲线，并测量校正后系统的相位裕度 $\gamma'$ 、超调量 $M_p$ 、峰值时间 $t_P$ 。
- 观测校正后的时域特性曲线，并测量校正后系统的超调量 $M_p$ 、峰值时间 $t_P$ 。
- 按“校正后系统的超调量 $M_p$ ”不同要求,自行设计校正参数，构建校正后系统，观察校正前、后的时域特性曲线，并测量校正后系统的超调量 $M_p$ ，峰值时间 $t_P$ 。



# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.3 时域法串联比例微分校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

#### 实验步骤:

未校正系统模拟电路图见图3-3-17。本实验将函数发生器（B5）单元作为信号发生器，OUT输出施加于被测系统的输入端 $U_i$ ，观察OUT从0V阶跃+2.5V时被测系统的时域特性。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.3 时域法串联比例微分校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

图3-3-17未校正系统的开环传递函数为：
$$G(S) = \frac{6}{0.2S(1 + 0.3S)}$$

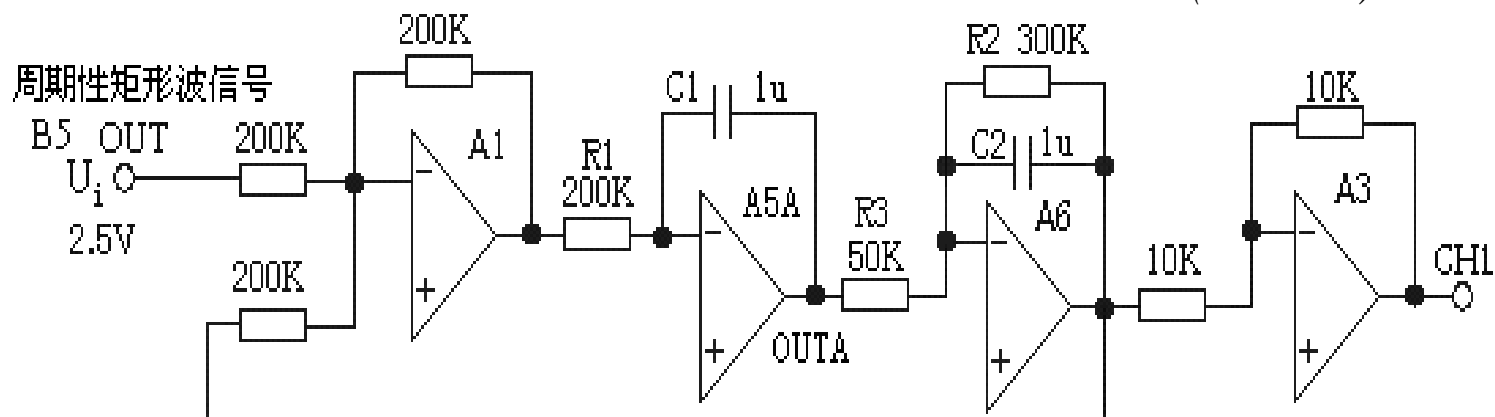


图3-3-17 未校正系统模拟电路图

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.3 时域法串联比例微分校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

**实验步骤：注：‘S ST’ 用“短路套”短接！**

将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘矩形波’（矩形波指示灯亮）。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $\geq 3$ 秒（D1单元左显示）。
- 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 2.5V（D1单元右显示）

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.3 时域法串联比例微分校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

(2) 构造模拟电路：按图3-3-17安置短路套及测孔联线，表如下：

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A3	S1, S6
3	A5	S4, S10
4	A6	S4, S8, S9
5	B5	'S-ST'

(b) 测孔联线

1	信号输入 $r(t)$	B5 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) $\rightarrow$ A5 (H1)
3	运放级联	A5A (OUTA) $\rightarrow$ A6 (H1)
4	负反馈	A6 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H2)
5	运放级联	A6 (OUT) $\rightarrow$ A3 (H1)
6	示波器联接 $\times 1$ 档	A3 (OUT) ? B3 (CH1)
7		B5 (OUT) ? B3 (CH2)

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.3 时域法串联比例微分校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

(3) 运行、观察、记录:

① 运行LABACT程序，在界面自动控制菜单下的“线性系统的校正和状态反馈”-实验项目，选中“线性系统的校正”项，弹出线性系统的校正的界面，点击开始，用虚拟示波器CH1观察系统输出信号。

② 观察OUT从0V阶跃+2.5V时被测系统的时域特性，等待一个完整的波形出来后，点击停止，然后移动游标测量其超调量、峰值时间。

在未校正系统的时域特性特性曲线上可测得时域特性:

超调量 $M_p=56.4\%$       峰值时间 $t_p=0.32S$       调节时间 $t_s=1.8S(\Delta=5\%)$

计算得       $\omega_n=10$        $\xi=0.1667$

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.3 时域法串联比例微分校正

### (2) 串接入比例微分校正后系统的时域特性的测试

设计要求校正后系统的超调量： $M_p \leq 25\%$ ,

校正后系统的开环传递函数为：
$$G(S) = \frac{6}{0.2S(1+0.3S)} \times (1+0.05S)$$

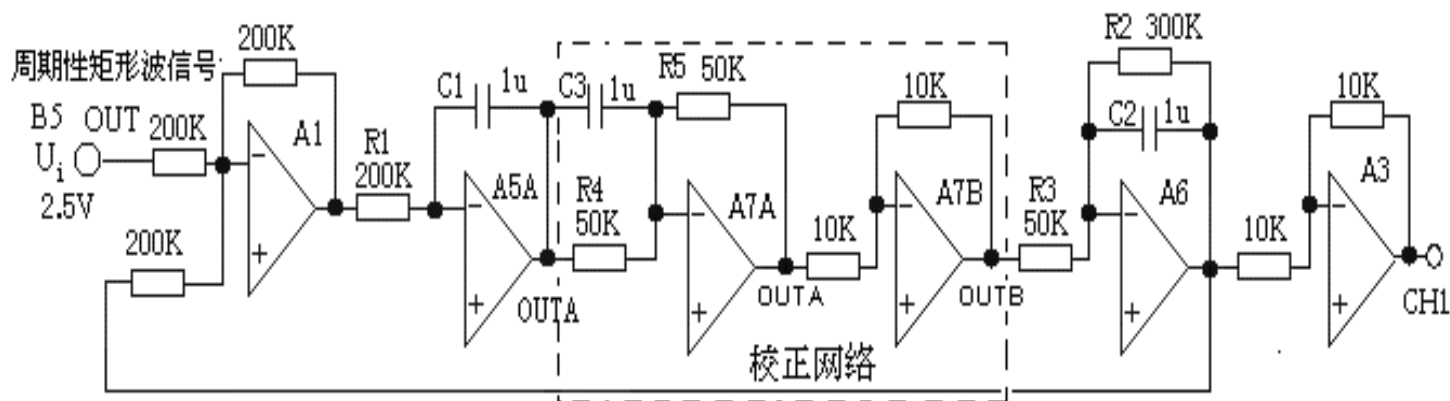


图3-3-18 串接入比例-微分校正--2后系统

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.3 时域法串联比例微分校正

### (2) 串接入比例微分校正后系统的时域特性的测试

**实验步骤：注：‘S ST’ 用“短路套”短接！**

(1) 将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）

在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘矩形波’（矩形波指示灯亮）。

量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $\geq 3$ 秒（D1单元右显示）。

调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 2.5V（D1单元左显示）。

(2) 构造模拟电路：按图3-3-18安置短路套及测孔联线，表如下：

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.3 时域法串联比例微分校正

### (2) 串接入比例微分校正后系统的时域特性的测试

(2) 构造模拟电路：按图3-3-17安置短路套及测孔联线，表如下：

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A3	S1, S6
3	A5	S4, S10
4	A6	S4, S8, S9
5	A7	S4, S11, P, PD2
6	B5	'S-ST'

(b) 测孔联线

1	信号输入 $r(t)$	B5 (OUT) → A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) → A5 (H1)
3	负反馈	A6 (OUT) → A1 (H2)
4	运放级联	A6 (OUT) → A3 (H1)
5	运放级联	A5A (OUTA) → A7A (H1)
6	运放级联	A7B (OUTB) → A6 (H1)
7	示波器联接 ×1 档	A3 (OUT) ? B3 (CH1)
8		B5 (OUT) ? B3 (CH2)



# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.3 时域法串联比例微分校正

### (2) 串接入比例微分校正后系统的时域特性的测试

#### 实验报告要求:

按下表“校正后系统的超调量 $M_p$ ”设计校正参数，并构建校正后系统，画出串联比例微分校正后系统模拟电路图，及校正前、后的时域特性曲线，观测校正后超调量 $M_p$ ，峰值时间 $t_P$ 填入实验报告。

超调量 $M_p(\%)$	测 量 值	
(设计目标)	超调量 $M_p(\%)$	峰值时间 $t_P$
25		
20		
15		
10		

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.4 时域法局部比例反馈校正

### 实验目的:

- 了解和掌握局部比例反馈校正的原理。
- 了解和掌握利用 I 型二阶系统的闭环传递函数标准式完成局部比例反馈校正参数的计算。
- 掌握在被控系统中如何利用局部比例反馈校正，构建一个性能满足指标要求的新系统的方法。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.4 时域法局部比例反馈校正

### 实验内容及步骤:

- 观测被控系统的时域曲线，按“校正后系统的超调量 $M_p$ ”要求,设计校正参数，构建校正后系统。
- 观测校正后的时域特性曲线，並测量校正后系统的超调量 $M_p$ 、峰值时间 $t_P$
- 按“校正后系统的超调量 $M_p$ ”不同要求,自行设计校正参数，构建校正后系统，观察校正前、后的时域特性曲线，並测量校正后系统的超调量 $M_p$ ，峰值时间 $t_P$ 。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.4 时域法局部比例反馈校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

未校正系统模拟电路图见图3-3-19。本实验将函数发生器（B5）单元作为信号发生器，OUT输出施加于被测系统的输入端 $U_i$ ，观察OUT从0V阶跃+2.5V时被测系统的时域特性。

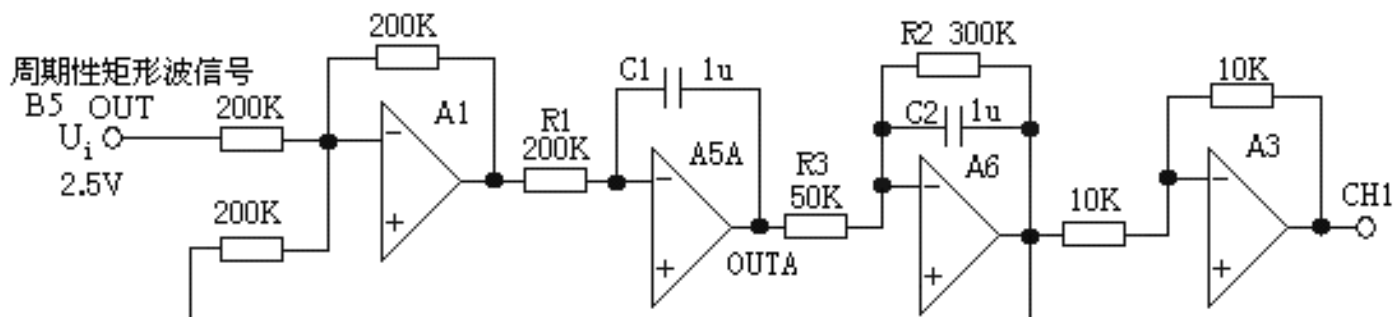


图3-3-19 未校正系统模拟电路图

图3-3-19未校正系统的开环传递函数为：
$$G(S) = \frac{6}{0.2S(1 + 0.3S)}$$

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.4 时域法局部比例反馈校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

**实验步骤：注：‘S ST’ 用“短路套”短接！**

- 将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）观测校正后的时域特性曲线，并测量校正后系统的超调量 $M_p$ 、峰值时间 $t_P$
- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘矩形波’（矩形波指示灯亮）。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $\geq 3$ 秒（D1单元左显示）。
- 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 2.5V（D1单元右显示）。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.4 时域法局部比例反馈校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

(2) 构造模拟电路：按图3-3-19安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A3	S1, S6
3	A5	S4, S10
4	A6	S4, S8, S9
5	B5	'S-ST'

(b) 测孔联线

1	信号输入 $r(t)$	B5 (OUT) → A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) → A5 (H1)
3	运放级联	A5A (OUTA) → A6 (H1)
4	负反馈	A6 (OUT) → A1 (H2)
5	运放级联	A6 (OUT) → A3 (H1)
6	示波器联接 ×1 档	A3 (OUT) ? B3 (CH1)
7		B5 (OUT) ? B3 (CH2)

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## ■ 3.4 时域法局部比例反馈校正

### ■ (1) 未校正系统的时域特性的测试

(3) 运行、观察、记录:

① 运行LABACT程序，在界面自动控制菜单下的“线性系统的校正和状态反馈”-实验项目，选中“线性系统的校正”项，弹出线性系统的校正的界面，点击开始，用虚拟示波器CH1观察系统输出信号。

② 观察OUT从0V阶跃+2.5V时被测系统的时域特性，等待一个完整的波形出来后，点击停止，然后移动游标测量其超调量、峰值时间。在未校正系统的时域特性特性曲线上可测得时域特性:

超调量 $M_p=56.4\%$       峰值时间 $t_p=0.32S$       调节时间 $t_s=1.8S (\Delta=5\%)$

计算得 $\omega_n=10$        $\xi=0.16767$

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.4 时域法局部比例反馈校正

### (2) 比例反馈包围惯性环节校正网络的设计

- 比例反馈包围惯性环节校正后的系统模拟电路见图3-3-20。
- 图中运放A2组成比例反馈网络，由它包围惯性环节， $R7/R4$ 为比例系数。
- 图中运放A7作为提高未包围部分的增益，用来补偿由于比例反馈校正后，系统的开环增益降低部分。
- 提高的增益为： $K_x = K \div K_a = R6 \div R5$



# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.4 时域法局部比例反馈校正

### (2) 比例反馈包围惯性环节校正网络的设计

- ① 要求设计校正装置，使控制系统满足下述性能指标：超调量 $M_p \leq 25\%$ 。
- ② 按超调量  $M_p \leq 25\%$  计算，可得到校正后系统的阻尼比 $\xi \geq 0.4$ 。
- ③ 按图3-3-19的被校正对象积分时间常数 $T_i = 0.2S$ ，开环增益 $K = 6$ ，新惯性环节 时间常数为 $T_a$ ，按标准二阶系统阻尼比的计算式：
$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_i}{K T_a}}$$
可得到新惯性环节 时间常数  $T_a = 0.052$
- ④ 按图3-3-19的被控对象校正前的原惯性时间常数  $T = 0.3S$ ，开环增益 $K = 6$ ，新惯性环节 时间常数为 $T_a = 0.052$ ，代入，可得到：比例反馈系数 $a = 0.795$
- 如取 $R_7 = 10K$ ，则 $R_4 = 10K \div 0.795 = 12.6K$ ， $R_4$ 用A11单元的直读式可变电阻。
- ⑤ 按原开环增益 $K = 6$ ，比例反馈系数 $a = 0.795$ ，代入式 $K_a = \frac{K}{1+aK}$ 可得到：新惯性环节的 开环增益 $K_a = 1.04$ 。
- ⑥ 为补偿由于局部比例反馈校正后，被校正系统降低了开环增益，必须增加的比例环节。增加的比例环节的增益应为： $K_x = K \div K_a = 6 \div 1.04 = 5.77$
- 如取运放A7的反馈电阻 $R_6 = 200K$ ，则输入电阻应为 $R_5 = 200K \div 5.77 = 34.7K$ 。
- 为使实验较方便进行，近似取 $R_5 = 100K // 50K = 33.3K$ 。



# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.4 时域法局部比例反馈校正

### (3) 比例反馈包围惯性环节校正后系统的时域特性的测试

**实验步骤：注：‘S ST’ 用“短路套”短接！**

- 将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）
- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘矩形波’（矩形波指示灯亮）。
- 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $\geq 3$ 秒（D1单元右显示）。
- 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 2.5V（D1单元左显示）。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.4 时域法局部比例反馈校正

### (3) 比例反馈包围惯性环节校正后系统的时域特性的测试

(2) 构造模拟电路：按图3-3-20安置短路套及测孔连线，表如下：

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A2	S6
3	A5	S4, S11
4	A6	S4, S8, S9
5	A7	S3, S4, S9, P
6	B5	'S-ST'

(b) 测孔连线

1	信号输入	B5 (OUT) → A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) → A5A (H1)
3	运放级联	A5A (OUTA) → A6 (H1)
4	校正	A6 (OUT) → A7 (H1)
5		元件库 A11 中直读式可变电阻 50K( R8)
/6		跨接到 A2B (OUTB) 和 A6 (IN) 间
7		元件库 A11 中直读式可变电阻 12.6K
/8		(R4) 跨接到 A6(OUT) 和 A2A(IN) 间
9	负反馈	A7B (OUTB) → A1 (H2)
10	示波器联接	A7A (OUTA) ? B3 (CH1)
11	×1 档	B5 (OUT) ? B3 (CH2)

(3) 运行、观察、记录：运行程序同《1、未校正系统时域特性的测试》。观察比例反馈包围惯性环节校正后系统的时域特性。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.4 时域法局部比例反馈校正

### (3) 比例反馈包围惯性环节校正后系统的时域特性的测试

#### 实验报告要求:

按下表“校正后系统的超调量 $M_p$ ”设计校正参数，并构建校正后系统，画出串联比例微分校正后系统模拟电路图，及校正前、后的时域特性曲线，观测校正后超调量 $M_p$ ，峰值时间 $t_P$ 填入实验报告。

超调量 $M_p(\%)$	测 量 值	
(设计目标)	超调量 $M_p(\%)$	峰值时间 $t_P$
25		
20		
15		
10		

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.5 时域法微分反馈校正

### 实验目的:

- 了解和掌握微分反馈校正的原理。
- 了解和掌握利用 I 型二阶系统的闭环传递函数标准式完成微分反馈校正网络参数的计算。
- 掌握在被控系统中如何利用微分反馈校正网络，构建一个性能满足指标要求的新系统的方法。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.5 时域法微分反馈校正

### 实验内容及步骤：

- 观测被控系统的时域曲线，按“校正后系统的超调量 $M_p$ ”要求,设计校正参数，构建校正后系统。
- 观测校正后的时域特性曲线，並测量校正后系统的超调量 $M_p$ 、峰值时间 $t_P$ 。
- 按“校正后系统的超调量 $M_p$ ”不同要求,自行设计校正参数，构建校正后系统，观察校正前、后的时域特性曲线，並测量校正后系统的超调量 $M_p$ ，峰值时间 $t_P$ 。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.5 时域法微分反馈校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

未校正系统模拟电路图见图3-3-21。本实验将函数发生器（B5）单元作为信号发生器，OUT输出施加于被测系统的输入端 $U_i$ ，观察OUT从0V阶跃+2.5V时被测系统的时域特性。

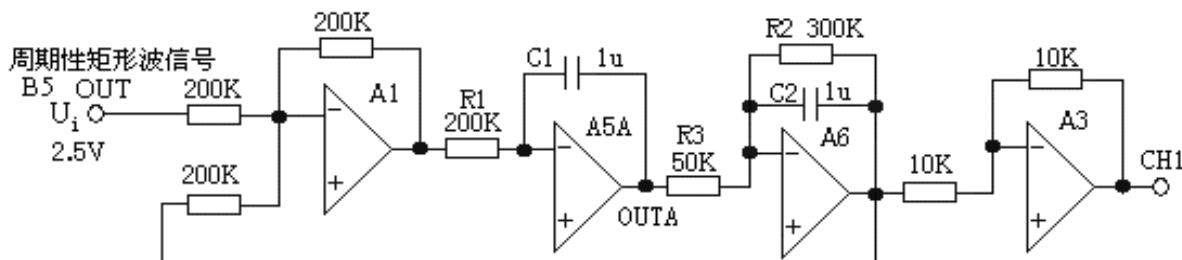


图3-3-21 未校正系统模拟电路图

➤ 图3-3-21未校正系统的闭环传递函数为：
$$\phi(S) = \frac{100}{S^2 + 3.33S + 100}$$



# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.5 时域法微分反馈校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

**实验步骤：注：‘S ST’ 用“短路套”短接！**

将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）

- ① 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘矩形波’（矩形波指示灯亮）。
- ② 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $\geq 3$ 秒（D1单元左显示）。
- ③ 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压=2.5V（D1单元右显示）。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.5 时域法微分反馈校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

构造模拟电路：按图3-3-21安置短路套及测孔联线，表如下：

#### (a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A3	S1, S6
3	A5	S4, S10
4	A6	S4, S8, S9
5	B5	'S-ST'

#### (b) 测孔联线

1	信号输入 $r(t)$	B5 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) $\rightarrow$ A5A (H1)
3	运放级联	A5A (OUTA) $\rightarrow$ A6 (H1)
4	负反馈	A6 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H2)
5	运放级联	A6 (OUT) $\rightarrow$ A3 (H1)
6	示波器联接 $\times 1$ 档	A3 (OUT) ? B3 (CH1)
7		B5 (OUT) ? B3 (CH2)

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.5 时域法微分反馈校正

### (1) 未校正系统的时域特性的测试

#### 运行、观察、记录:

- ① 将函数发生器 (B5) 单元作为信号发生器, OUT输出施加于被测系统的输入端 $U_i$ ,
- ② 运行LABACT程序, 在界面自动控制菜单下的“线性系统的校正和状态反馈”--实验项目, 选中“线性系统的校正”项, 弹出线性系统的校正的界面, 点击开始, 用虚拟示波器CH1观察系统输出信号。
- ③ 观察OUT从0V阶跃+2.5V时被测系统的时域特性, 等待一个完整的波形出来后, 点击停止, 然后移动游标测量其超调量、峰值时间。在未校正系统的时域特性特性曲线上可测得时域特性:

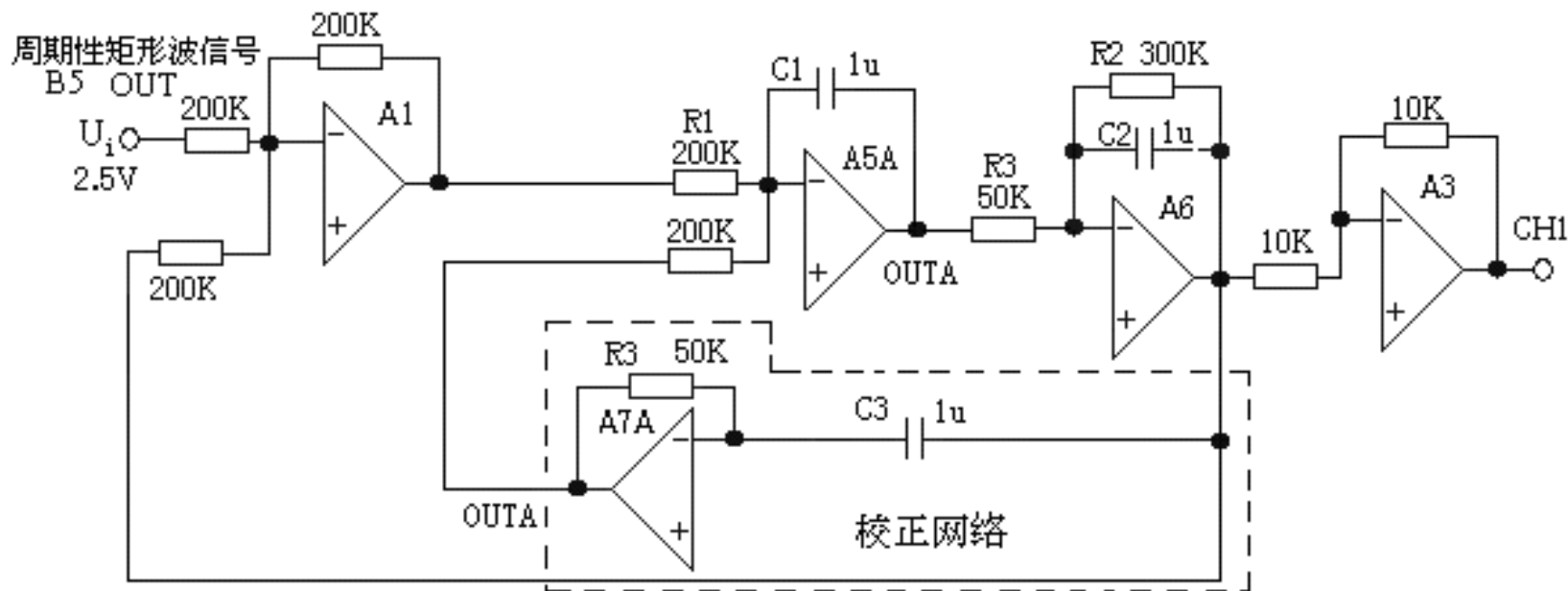
超调量 $M_p=56.4\%$       峰值时间 $t_p=0.32S$       调节时间 $t_s=1.8S$  ( $\Delta=5\%$ )

计算得  $\omega_n = 10, \quad \xi = 0.1667$

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.5 时域法微分反馈校正

### (2) 微分反馈校正后系统的时域特性的测试



➤ 图3-3-22微分反馈校正后系统模拟电路

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.5 时域法微分反馈校正

### (2) 微分反馈校正后系统的时域特性的测试

**实验步骤：注：‘S ST’ 用“短路套”短接！**

将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）

- ① 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘矩形波’（矩形波指示灯亮）。
- ② 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $\geq 3$ 秒（D1单元左显示）。
- ③ 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压=2.5V（D1单元右显示）。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.5 时域法微分反馈校正

### (2) 微分反馈校正后系统的时域特性的测试

构造模拟电路：按图3-3-22安置短路套及测孔联线，表如下：

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A3	S1, S6
3	A5	S4, S10
4	A6	S4, S8, S9
5	A7	S11, P, PD2
6	B5	'S-ST'

1	信号输入 r(t)	B5 (OUT) → A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) → A5A (H1)
3	运放级联	A5A (OUTA) → A6 (H1)
4	负反馈	A6 (OUT) → A1 (H2)
5	运放级联	A6 (OUT) → A3 (H1)
6	校正反馈	A6 (OUT) → A7 (H1)
7		A7A (OUTA) → A5 (H2)
8	示波器联接 ×1 档	A3 (OUT) ? B3 (CH1)
9		B5 (OUT) ? B3 (CH2)

运行、观察、记录：

- 运行程序同《1. 未校正系统时域特性的测试》。观察微分反馈校正后系统的时域特性。
- 示波器的截图详见虚拟示波器的使用。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.5 时域法微分反馈校正

### (2) 微分反馈校正后系统的时域特性的测试

#### 实验报告要求:

按下表“校正后系统的超调量 $M_p$ ”设计校正参数，并构建校正后系统，画出串联比例微分校正后系统模拟电路图，及校正前、后的时域特性曲线，观测校正后超调量 $M_p$ ，峰值时间 $t_P$ 填入实验报告。

$M_p$ (%)	R3	C3
25		
20		
15		
10		

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.6 线性系统的状态反馈及极点配置

### 实验目的:

- 了解和掌握状态反馈及极点配置的原理。
- 了解和掌握利用矩阵法及传递函数法计算状态反馈及极点配置的原理与方法。
- 掌握在被控系统中如何进行状态反馈及极点配置，构建一个性能满足指标要求的新系统的方法。



# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.6 线性系统的状态反馈及极点配置

### (1) 观察极点配置前系统

#### 实验内容及步骤:

状态反馈及极点配置前系统的模拟电路见图3-3-23所示。

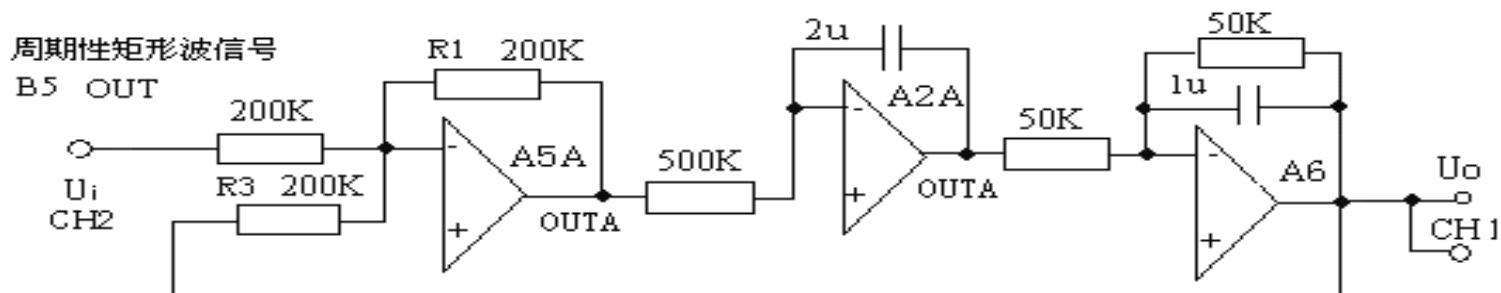


图3-3-23 极点配置前系统的模拟电路

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.6 线性系统的状态反馈及极点配置

### (1) 观察极点配置前系统

实验步骤：注：‘S ST’用“短路套”短接！

(1) 将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）

- ① 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘矩形波’（矩形波指示灯亮）。
- ② 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $\geq 5$ 秒（D1单元左显示）。
- ③ 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 3.5V（D1单元右显示）。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.6 线性系统的状态反馈及极点配置

### (1) 观察极点配置前系统

构造模拟电路：按图3-3-23安置短路套及测孔连线，表如下。

	模块号	跨接座号
1	A2	S2, S11, S12
2	A5	S4, S6
3	A6	S4, S7, S9
4	B5	'S-ST'

1	信号输入 ( $U_i$ )	B5 (OUT) ? A5 (H1)
2	运放级联	A5A (OUTA) ? A2 (H1)
3	运放级联	A2A (OUTA) ? A6 (H1)
4	负反馈	A6 (OUT) ? A5 (H2)
5	示波器联接 ×1 档	A6 (OUT) ? B3 (CH1)
6		B5 (OUT) ? B3 (CH2)

运行、观察、记录：

运行LABACT程序，在自动控制菜单下的“线性系统的校正和状态反馈”-实验项目，选中“线性系统的状态反馈及极点配置”项，就会弹出虚拟示波器的界面，点击开始即可使用本实验机配套的虚拟示波器（B3）单元的CH1测孔测量波形，时间量程调整到X2档。

等待一个完整的波形出来后，点击停止，然后移动游标测量其调节时间 $t_s$ 。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.6 线性系统的状态反馈及极点配置

### (2) 观察极点配置后系统

根据如图3-3-23所示的被控系统，若期望性能指标校正为：超调量 $MP \leq 20\%$ ，峰值时间 $t_P \leq 0.5$ 秒，设计状态反馈后系统的模拟电路见图3-3-24所示。经计算要求反馈系数 $K_1 = -10.5 = R_1/R_2$ ， $R_1 = 200K$ ，则 $R_2 = 18.5K$ ；反馈系数 $K_2 = 15.8 = R_1/R_3$ ， $R_1 = 200K$ ，则 $R_3 = 12.6K$ 。

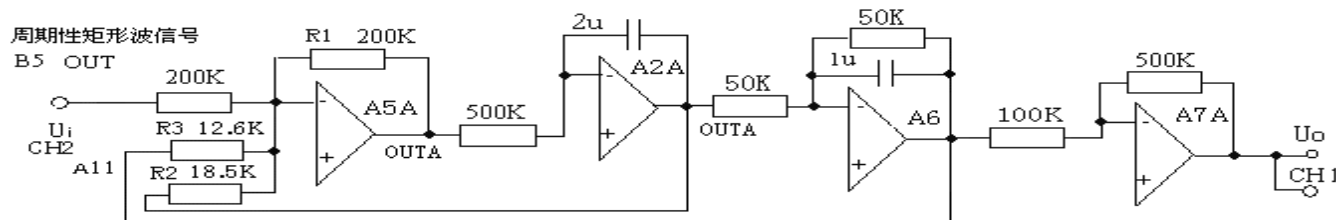


图3-3-24 极点配置后系统的模拟电路

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.6 线性系统的状态反馈及极点配置

### (2) 观察极点配置后系统

**实验步骤： 注： ‘S ST’用“短路套”短接！**

将函数发生器（B5）单元的矩形波输出作为系统输入R。（连续的正输出宽度足够大的阶跃信号）

- ① 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘矩形波’（矩形波指示灯亮）。
- ② 量程选择开关S2置下档，调节“设定电位器1”，使之矩形波宽度 $\geq 3$ 秒（D1单元左显示）。
- ③ 调节B5单元的“矩形波调幅”电位器使矩形波输出电压= 3.5V（D1单元右显示）。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.6 线性系统的状态反馈及极点配置

### (2) 观察极点配置后系统

构造模拟电路：按图3-3-24安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A2	S2, S11, S12
2	A5	S4, S6
3	A6	S4, S7, S9
4	A7	S3, S8, P
5	B5	'S-ST'

(b) 测孔联线

1	信号输入 (Ui)	B5 (OUT) ? A5 (H1)
2	运放级联	A5A (OUTA) ? A2 (H1)
3	运放级联	A2A (OUTA) ? A6 (H1)
4	运放级联	A6 (OUT) ? A7 (H1)
5	跨接反馈电阻 R2=18.5K	元件库 A11 中可变电阻跨接到
6		A2A (OUTA) 和 A5 (IN) 之间
7	跨接反馈电阻 R3=12.6K	元件库 A11 中可变电阻跨接到
8		A6 (OUT) 和 A5 (IN) 之间
9	示波器联接	A7A (OUTA) ? B3 (CH1)
10	×1 档	B5 (OUT) ? B3 (CH2)

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.6 线性系统的状态反馈及极点配置

### (2) 观察极点配置后系统

运行、观察、记录:

运行LABACT程序，在自动控制菜单下的“线性系统的校正和状态反馈”-实验项目，选中“线性系统的状态反馈及极点配置”项，就会弹出虚拟示波器的界面，点击开始即可使用本实验机配套的虚拟示波器（B3）单元的CH1测孔测量波形。

# 第三章 线性系统的校正与状态反馈

## 3.6 线性系统的状态反馈及极点配置

### (2) 观察极点配置后系统

#### 实验报告要求

按下表所示构建实验被控系统，设计状态反馈参数，并构建状态反馈后系统，画出状态反馈后系统模拟电路图，及状态反馈前、后的时域特性曲线，观测校正后超调量 $M_p$ ，峰值时间 $t_P$ 填入实验报告。

被控系统参数		超调量 $M_p(\%)$	峰值时间 $t_P$	测 量 值	
积分常数 $T_i$	惯性常数 $T$	(设计目标)	(设计目标)	超调量 $M_p(\%)$	峰值时间 $t_P$
1	0.05	<20%	<0.5		
		<5%	<0.5		
0.4		<20%	<0.5		
		<5%	<0.5		



# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.1 典型非线性环节

### 实验目的:

- 了解和掌握各种典型非线性环节的数学表达式。
- 用相平面法观察和分析分别由函数发生器产生的典型理想非线性环节的输出特性。

### 实验内容及步骤:

- 用相平面法观察和分析函数发生器产生的典型理想非线性环节的输出特性。观察各种典型非线性环节的非线性特性参数对输出特性的影响。
- 运行LABACT程序，选择自动控制菜单下的非线性系统的相平面分析下的典型非线性环节实验项目，就会弹出虚拟示波器的界面，点击开始即可使用本实验机配套的虚拟示波器（B3）的CH1、CH2测量波形。具体用法参见实验指导书第二章虚拟示波器部分。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.1 典型非线性环节

### (1) 测量继电特性

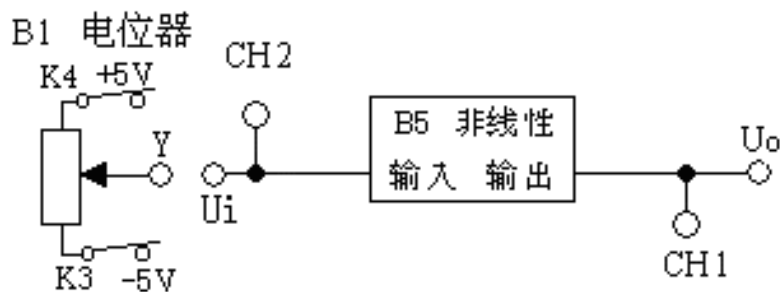


图4.1 用函数发生器产生继电特性模拟电路

# 第四章 非线性系统的相平面分析

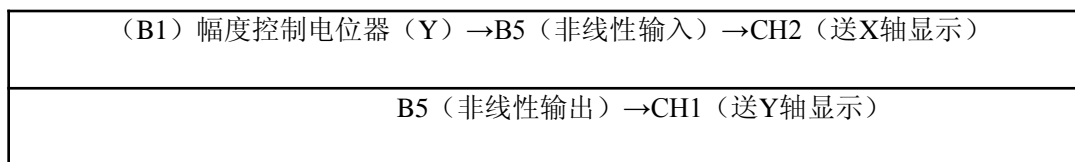
## 4.1 典型非线性环节

### (1) 测量继电特性

#### 实验步骤:

第一步：函数发生器的波形选择为‘继电’，调节“设定电位器1”，使数码管右显示继电限幅值为3.7V。

第二步：测孔连线：



第三步：观察函数发生器产生的继电特性：观察时要用虚拟示波器中的X-Y选项

慢慢调节输入电压（即调节信号发生器B1单元的电位器，调节范围-5V~+5V），观测并记录示波器上的U<sub>0</sub>~U<sub>i</sub>图形。实验结果与理想继电特性相符。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.1 典型非线性环节

### (2) 测量饱和特性

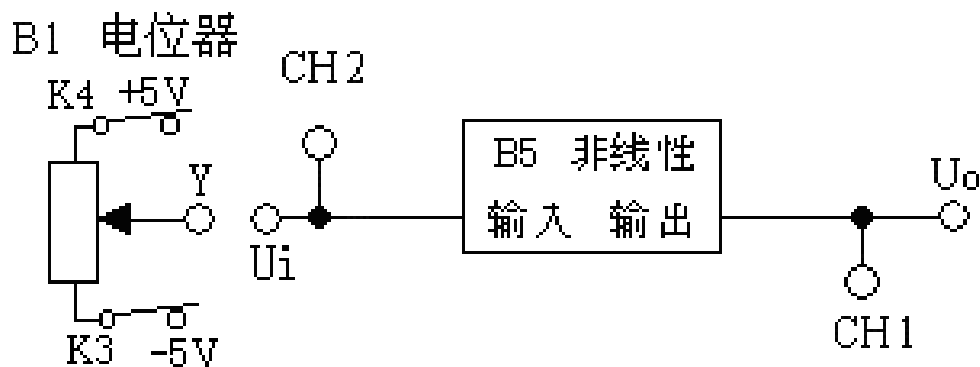


图4.2 用函数发生器产生饱和特性模拟电路

# 第四章 非线性系统的相平面分析

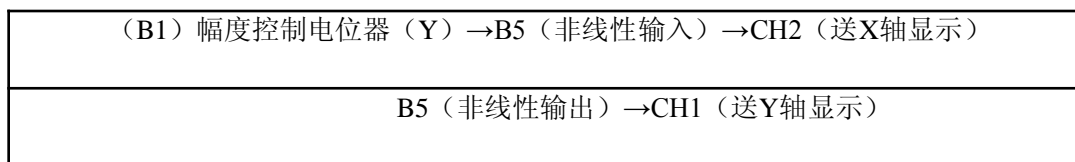
## 4.1 典型非线性环节

### (2) 测量饱和特性

#### 实验步骤:

第一步：函数发生器的波形选择为‘继电’，调节“设定电位器1”，使数码管右显示继电限幅值为3.7V。

第二步：测孔连线：



第三步：观察函数发生器产生的饱和特性：观察时要用虚拟示波器中的X-Y选项

慢慢调节输入电压（即调节信号发生器B1单元的电位器，调节范围-5V~+5V），观测并记录示波器上的U<sub>0</sub>~U<sub>i</sub>图形。实验结果与理想继电特性相符。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.1 典型非线性环节

### (3) 测量死区特性

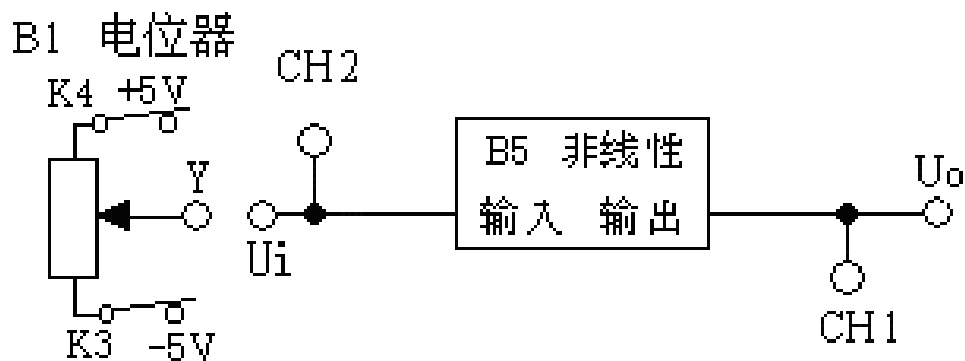


图4.3 用函数发生器产生死区特性模拟电路

# 第四章 非线性系统的相平面分析

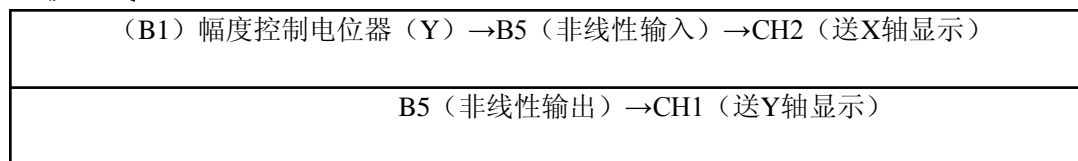
## 4.1 典型非线性环节

### (3) 测量死区特性

#### 实验步骤:

第一步：函数发生器的波形选择为‘死区’，调节“设定电位器1”，使数码管左显示斜率为1；调节“设定电位器2”，使数码管右显示死区宽度值为2.4V。

第二步：测孔连线：



第三步：观察函数发生器产生的死区特性：观察时要用虚拟示波器中的X-Y选项

慢慢调节输入电压（即调节信号发生器B1单元的电位器，调节范围-5V~+5V），观测并记录示波器上的U<sub>0</sub>~U<sub>i</sub>图形。实验结果与理想继电特性相符。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.1 典型非线性环节

### (4) 测量间隙特性

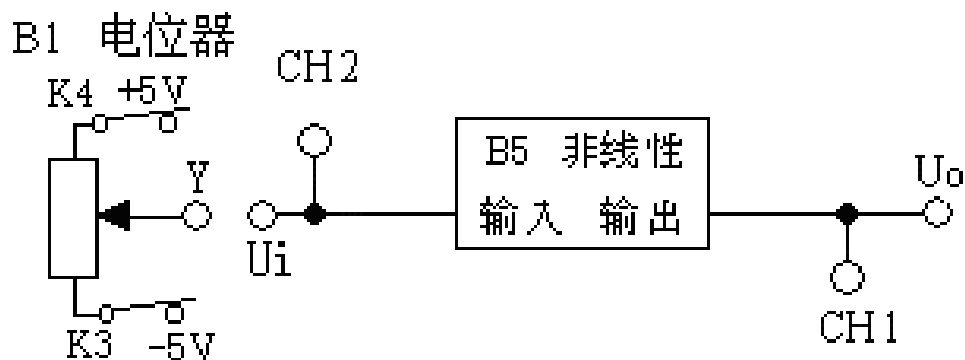


图4.4 用函数发生器产生间隙特性模拟电路



# 第四章 非线性系统的相平面分析

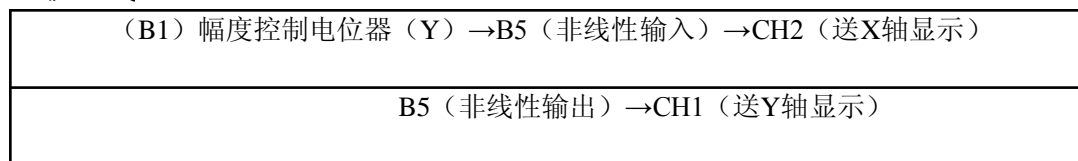
## 4.1 典型非线性环节

### (4) 测量间隙特性

#### 实验步骤:

第一步：函数发生器的波形选择为‘间隙’，调节“设定电位器1”，使数码管左显示斜率为1；调节“设定电位器2”，使数码管显示间隙宽度幅值为2.4V。

第二步：测孔连线：



第三步：观察函数发生器产生的间隙特性：观察时要用虚拟示波器中的X-Y选项

慢慢调节输入电压（即调节信号发生器B1单元的电位器，调节范围-5V~+5V），观测并记录示波器上的U<sub>0</sub>~U<sub>i</sub>图形。实验结果与理想继电特性相符。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

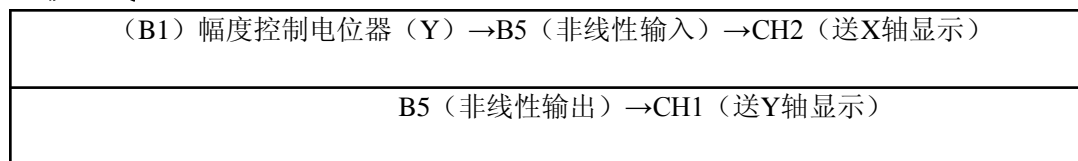
## 4.1 典型非线性环节

### (4) 测量间隙特性

#### 实验步骤:

第一步：函数发生器的波形选择为‘间隙’，调节“设定电位器1”，使数码管左显示斜率为1；调节“设定电位器2”，使数码管显示间隙宽度幅值为2.4V。

第二步：测孔连线：



第三步：观察函数发生器产生的间隙特性：观察时要用虚拟示波器中的X-Y选项

慢慢调节输入电压（即调节信号发生器B1单元的电位器，调节范围-5V~+5V），观测并记录示波器上的U<sub>0</sub>~U<sub>i</sub>图形。实验结果与理想继电特性相符。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.1 典型非线性环节

### 实验报告要求:

按下表改变被测环节的各项非线性特性参数（用“函数发生器”产生非线性特性），调节输入电压（即调节信号发生器B1单元的电位器，调节范围-5V~+5V），选用X-Y方式观察相轨迹，并画出系统在e-e平面上的相轨迹。

测量继电特性
限值幅
3.7V
3
2
1

测量饱和特性	
限值幅	斜率
3.7V	2
3	
2	1
1	

测量死区特性	
死区宽度	斜率
2.4V	1
2	
1.5	2
1	

测量间隙特性	
间隙宽度	斜率
2.4V	1
1.6	
2.4V	2
1.6	

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.2 二阶非线性控制系统

### 实验目的:

- 了解非线性控制系统的基本概念。
- 掌握用相平面图分析非线性控制系统。
- 观察和分析三种二阶非线性控制系统的相平面图。

### 实验内容及步骤:

- 用相平面法观察和分析三种二阶非线性控制系统的输出特性。观察非线性环节的非线性特性参数对二阶非线性控制系统输出特性的影响。
- 改变被测系统非线性环节的的各项电路参数，画出阶跃响应曲线，观测结果，填入实验报告。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.2 二阶非线性控制系统

### (1) 继电型非线性控制系统

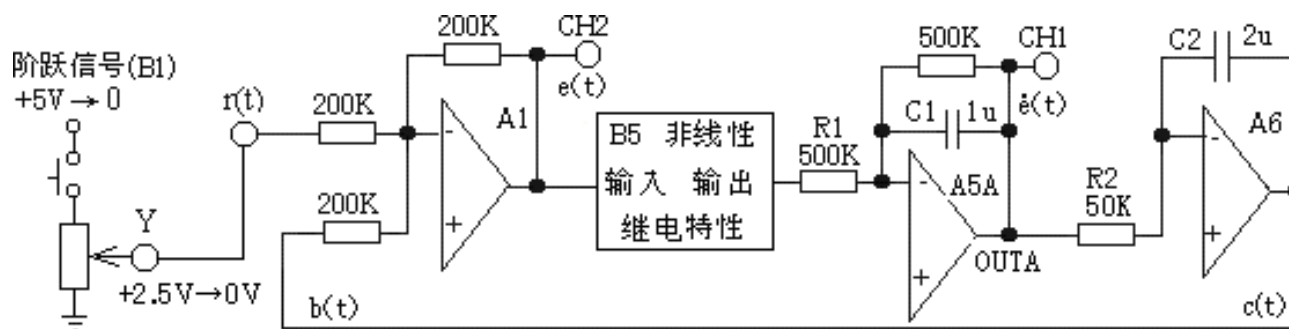


图4.5 继电型非线性控制系统模拟电路

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.2 二阶非线性控制系统

### 实验步骤:

第一步：（1）用信号发生器（B1）的‘阶跃信号输出’和‘幅度控制电位器’构造输入信号（ $U_i$ ）：B1单元中电位器的左边K3开关拨下（GND），右边K4开关拨下（0/+5V阶跃），按下信号发生器（B1）阶跃信号按钮，L9灯亮，调整‘幅度控制电位器’使之阶跃信号输出（B1-2的Y测孔）为2.5V左右。

第二步：将函数发生器（B5）单元的非线性模块中的继电特性作为系统特性控制。调节非线性模块：

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘继电特性’（继电特性指示灯亮）。
- 调节“设定电位器1”，使之幅度 = 3.5V（D1单元右显示）。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.2 二阶非线性控制系统

### 实验步骤:

第三步：构造模拟电路：按图4.5安置短路套及测孔连线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A5	S5, S7, S10
3	A6	S4, S11, S12

(b) 测孔连线

1	信号输入r(t)	B1 (Y) →A1 (H1)
2	联接非线性模块	A1 (OUT) →B5(非线性输入)
3		B5(非线性输出)→A5 (H1)
4	运放级联	A (OUTA) →A6 (H1)
5	负反馈	A6 (OUT) →A1 (H2)
6	示波器联接 ×1档	A (OUTA) →B3 (CH1) (送Y轴显示)
7		A1 (OUT) →B3 (CH2) (送X轴显示)

第四步：运行、观察、记录：

- 运行LABACT程序，选择自动控制菜单下的非线性系统的相平面分析下的二阶非线性系统实验项目，就会弹出虚拟示波器的界面，点击开始即可使用本实验机配套的虚拟示波器（B3）单元的CH1、CH2测孔测量波形。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.2 二阶非线性控制系统

### 实验步骤:

- 按下信号发生器（B1）阶跃信号按钮时（+2.5V→0阶跃），先选用虚拟示波器（B3）普通示波方式观察CH1、CH2两个通道所输出的波形，尽量使之不要产生限幅现象。
- 然后再选用X-Y方式（这样在示波器屏上可获得e-e相平面上的相轨迹曲线）观察相轨迹，并记录系统在e-e平面上的相轨迹；测量在+2.5V→0阶跃信号下系统的超调量 $M_p$ 及振荡次数。点击停止后，可调整量程大小以获得最佳的观测效果。

### 实验报告要求:

按下表改变图4.5所示的实验被控系统的继电限值幅，选用X-Y方式观察相轨迹，并画出系统在e-e平面上的相轨迹；测量在+2.5V→0阶跃信号下系统的超调量 $M_p$ 和峰值时间 $t_P$ 。



# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.2 二阶非线性控制系统

### (2) 带速度负反馈的继电型非线性控制系统

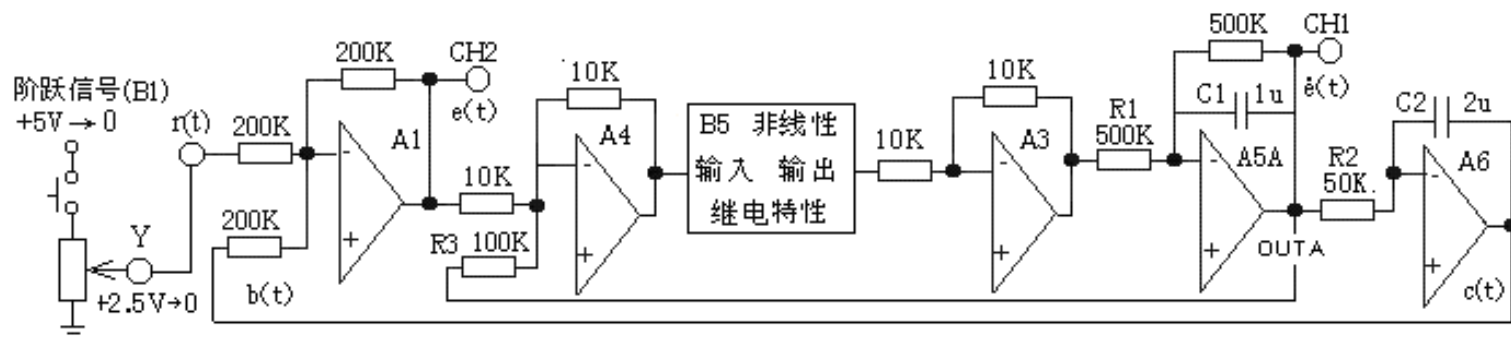


图4.6 带速度负反馈的继电型非线性控制系统模拟电路

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.2 二阶非线性控制系统

### 实验步骤:

第一步：用信号发生器（B1）的‘阶跃信号输出’和‘幅度控制电位器’构造输入信号（ $U_i$ ）：B1单元中电位器的左边K3开关拨下（GND），右边K4开关拨下（0/+5V阶跃），按下信号发生器（B1）阶跃信号按钮，L9灯亮，调整‘幅度控制电位器’使之阶跃信号输出（B1-2的Y测孔）为2.5V左右。

第二步：将函数发生器（B5）单元的非线性模块中的继电器特性作为系统特性控制。调节非线性模块：

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘继电器特性’（继电器特性指示灯亮）。
- 调节“设定电位器1”，使之幅度 = 3.5V（D1单元右显示）。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.2 二阶非线性控制系统

### 实验步骤:

第三步：构造模拟电路：按图4.6安置短路套及测孔连线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A3	S1, S6
3	A4	S2, S6
4	A5	S5, S7, S10
5	A6	S4, S11, S12

(b) 测孔连线

1	信号输入r(t)	B1 (Y) →A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) →A4 (H1)
3	联接非线性 模块	A4 (OUT)→B5(非线性输入)
4		B5(非线性输出)→A3 (H1)
5	运放级联	A3 (OUT) →A5 (H1)
6	运放级联	A (OUTA) →A6 (H1)
7	负反馈	A (OUTA) →A4 (H2)
8	负反馈	A6 (OUT) →A1 (H2)
9	示波器联接 ×1档	A (OUTA) →B3 (CH1) (送Y轴显示)
10		A1 (OUT) →B3 (CH2) (送X轴显示)

第四步：运行、观察、记录：

- 运行、观察、记录：运行程序同《1. 继电器非线性控制系统》。观察带速度负反馈的继电器非线性控制系统的振荡次数、超调量MP(%)。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.2 二阶非线性控制系统

### (3) 饱和型非线性控制系统

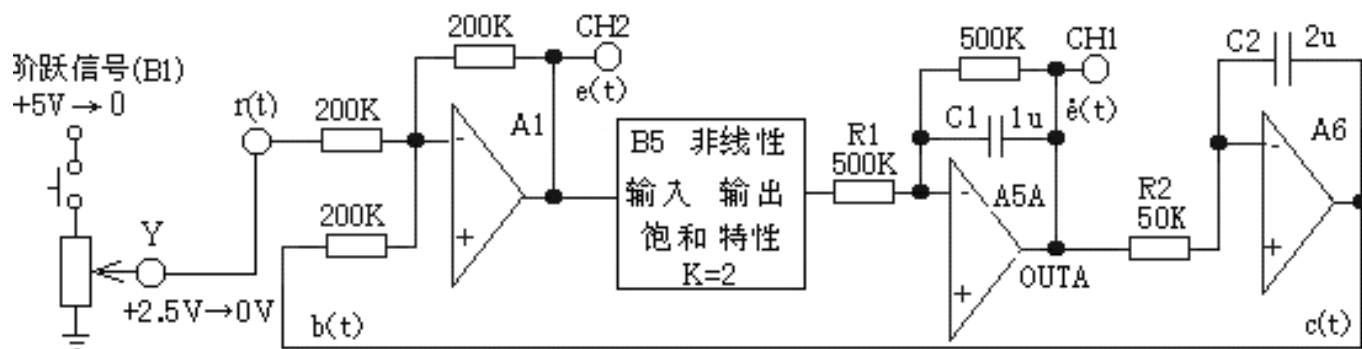


图4.7 饱和型非线性控制系统模拟电路

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.2 二阶非线性控制系统

### 实验步骤:

第一步：同《1. 继电型非线性控制系统》连线表。

第二步：将函数发生器（B5）单元的非线性模块中的继电特性作为系统特性控制。调节非线性模块：

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘饱和特性’（饱和特性指示灯亮）。
- 调节“设定电位器2”，使之幅度 = 3.5V（D1单元右显示）。
- 调节“设定电位器1”，使之斜率 = 2（D1单元左显示）。

第三步：运行、观察、记录：观察时要用虚拟示波器中的X-Y选项。

运行程序同《1. 继电型非线性控制系统》。观察饱和型非线性控制系统的振荡次数、超调量MP(%)。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.2 二阶非线性控制系统

### 实验报告要求：

按下表改变图4.7所示的实验被控系统的继电限值幅，选用X-Y方式观察相轨迹，并画出系统在e-e平面上的相轨迹；测量在+2.5V→0阶跃信号下系统的超调量 $M_p$ 和峰值时间 $t_P$ 。

饱和限值幅	3.7V	3V	2V	1V
饱和斜率	2		1	
超调量 $M_p$				
峰值时间 $t_P$				

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.2 二阶非线性控制系统

### (4) 间隙型非线性控制系统

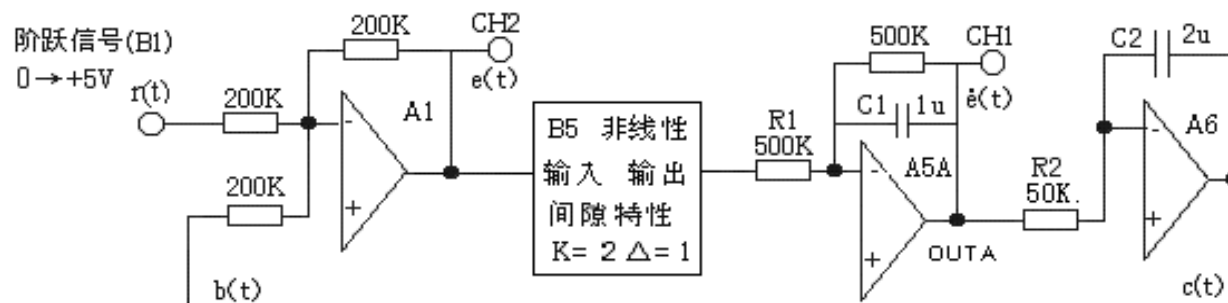


图4.8 间隙型非线性控制系统模拟电路

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.2 二阶非线性控制系统

### 实验步骤:

第一步：将信号发生器（B1）中的阶跃输出0/+5V作为系统的信号输入 $r(t)$ 。

第二步：将函数发生器（B5）单元的非线性模块中的继电特性作为系统特性控制。调节非线性模块：

- 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘间隙特性’（间隙特性指示灯亮）。
- 调节“设定电位器2”，使之间隙宽度 = 1V（D1单元右显示）。
- 调节“设定电位器1”，使之斜率 = 2（D1单元左显示）。



# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.2 二阶非线性控制系统

### 实验步骤:

第三步：构造模拟电路：按图4.8安置短路套及测孔连线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A5	S5, S7, S10
3	A6	S4, S11, S12

(b) 测孔连线

1	信号输入r(t)	B1 (Y) → A1 (H1)
2	联接非线性 模块	A1 (OUT) → B5(非线性输入)
3		B5(非线性输出) → A5 (H1)
4	运放级联	A (OUTA) → A6 (H1)
5	负反馈	A6 (OUT) → A1 (H2)
6	示波器联接 ×1档	A (OUTA) → B3 (CH1) (送Y轴显示)
7		A1 (OUT) → B3 (CH2) (送X轴显示)

第四步：运行、观察、记录：

运行程序同《1. 继电型非线性控制系统》。用虚拟示波器（B3）观察并记录系统在e-e平面上的相轨迹。

间隙型非线性控制系统相轨迹是一个极限环。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.2 二阶非线性控制系统

### 实验报告要求：

按下表改变图3-4-8所示的实验被控系统的饱和间隙特性间隙宽度和斜率，选用X-Y方式观察相轨迹，并画出系统在 $e-e$ 平面上的相轨迹；测量在 $+2.5V \rightarrow 0$ 阶跃信号下系统的振荡振幅和振荡周期。

间隙宽度	2.4V	1.6V	2.4V	1.6V
斜率	2		1	
振荡振幅				
振荡周期				

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.3 三阶非线性控制系统

### 实验目的:

- 了解和掌握非线性控制系统重要特征——自激振荡，极限环的产生及性质。
- 了解和掌握用描述函数法分析非线性控制系统的稳定性和自振荡的原理，求出极限环的振幅和频率（或周期）。
- 用描述函数法分析饱和型非线性三阶控制系统的稳定性，及控制系统的线性部分增益和非线性环节起点对控制系统的稳定性的影响。
- 分别观察继电型和饱和型三阶非线性控制系统的相平面图，并验证极限环的振幅和频率计算值。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.3 三阶非线性控制系统

### 实验内容及步骤:

- 本实验把系统的误差  $e$  送入虚拟示波器的CH2（水平轴），它的导数送入示波器的CH1（垂直轴），在该示波器显示界面中提供了时域显示（示波）和相平面显示（X-Y）两种方式，皆可观测继电型、饱和型三阶非线性控制系统的自激振荡（极限环），读出其自激振荡角频率 $\omega_A$ 或周期 $T$ 和振荡振幅值 $A$ 。
- 改变被控系统的继电限值幅，选用X-Y方式观察相轨迹，计算和测量自激振荡（极限环）的振幅和周期填入实验报告，并画出系统在 $e$ - $e$ 平面上的相轨迹。
- 改变饱和型被控实验系统线性部分各参数，应用描述函数法求取被控系统在临界稳定时的饱和型非线性环节斜率 $k$ ；计算和测量自激振荡（极限环）的振幅和频率，填入实验报告，并画出系统在 $e$ - $e$ 平面上的相轨迹。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.3 三阶非线性控制系统

### (1) 继电器型非线性三阶控制系统

继电器型非线性三阶控制系统模拟电路见图3-4-9所示。

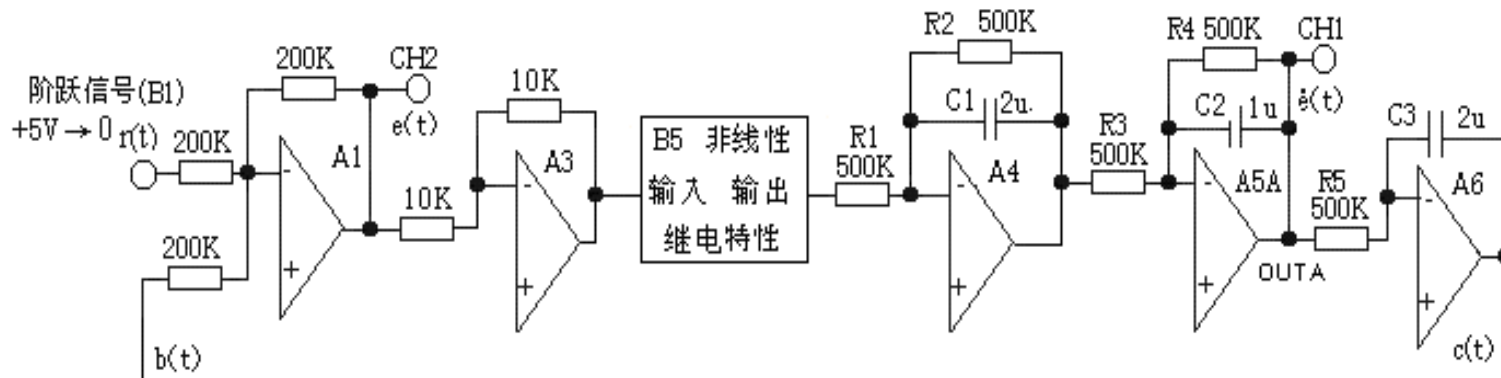


图3-4-9 继电器型非线性三阶控制系统模拟电路

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.3 三阶非线性控制系统

### (1) 继电器非线性三阶控制系统

**实验步骤：** CH1、CH2选‘X1’档！

(1) 将信号发生器 (B1) 中的阶跃输出0/+5V作为系统的信号输入 $r(t)$ 。

(2) 将函数发生器 (B5) 单元的非线性模块中的继电器特性作为系统特性控制。

调节非线性模块：

① 在显示与功能选择 (D1) 单元中，通过波形选择按键选中‘继电器特性’（继电器特性指示灯亮）。

② 调节“设定电位器1”，使之继电器特性限幅值 $M= 3.6V$  (D1单元右显示)。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.3 三阶非线性控制系统

### (1) 继电器非线性三阶控制系统

构造模拟电路：按图3-4-9安置短路套及测孔连线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A3	S1, S6
3	A4	S5, S7, S8, S10
4	A5	S5, S7, S10
5	A6	S5, S11, S12

(b) 测孔连线

1	信号输入 (r(t))	B1 (0/+5V) → A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) → A3 (H1)
3	联接非线性 模块	A3 (OUT) → B5(非线性输入)
4		B5(非线性输出) → A4 (H1)
5	运放级联	A4 (OUT) → A5 (H1)
6	运放级联	A5A (OUTA) → A6 (H1)
7	负反馈	A6 (OUT) → A1 (H2)
8	示波器联接 ×1 档	A5A (OUTA) ? B3 (CH1) (送 Y 轴显示)
9		A1 (OUT) ? B3 (CH2) (送 X 轴显示)

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.3 三阶非线性控制系统

### (1) 继电器非线性三阶控制系统

运行、观察、记录：

- ① 运行LABACT程序，选择自动控制菜单下的非线性系统的相平面分析下的三阶非线性系统实验项目，弹出虚拟示波器界面，点击开始，即可使用虚拟示波器（B3）单元的观测波形。
- ② 按下信号发生器（B1）阶跃信号按钮时（+5V→0阶跃），先选用虚拟示波器（B3）普通示波方式观察CH1、CH2两个通道所输出的波形。
- ③ 然后再选用X-Y方式（这样在示波器屏上可获得e-e相平面上的相轨迹曲线）观察相轨迹，并记录系统在e-e平面上的相轨迹；测量自激振荡（极限环）的振幅和周期。点击停止后，可调整量程大小以获得较佳的观测效果。



# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.3 三阶非线性控制系统

### (1) 继电型非线性三阶控制系统

#### 实验报告要求：

按下表改变图3-4-9所示的实验被控系统的继电限值幅，选用X-Y方式观察相轨迹，并记录系统在e-e平面上的相轨迹；测量自激振荡（极限环）的振幅和周期。（M=3.6V、+5V→0阶跃）

继电限值幅	3.7V		3V		2V		1V	
	计算值	测量值	计算值	测量值	计算值	测量值	计算值	测量值
振荡振幅								
振荡周期								

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.3 三阶非线性控制系统

### (2) 饱和型非线性三阶控制系统

饱和型非线性三阶控制系统模拟电路图3-4-10所示。

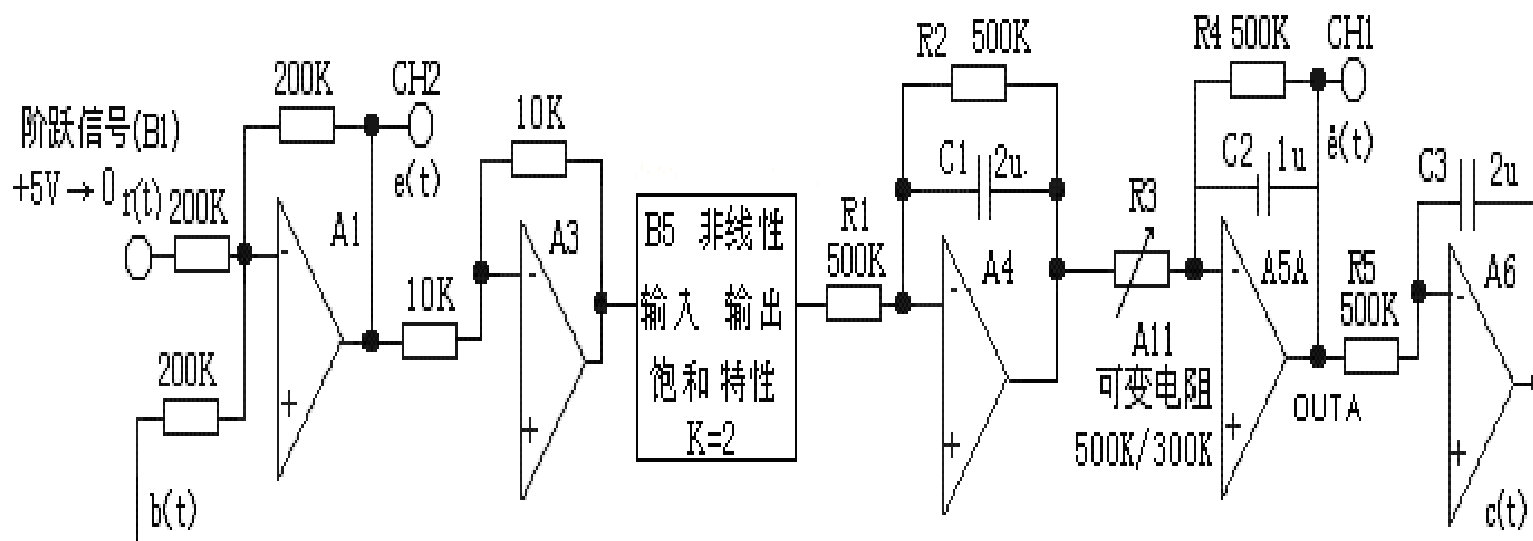


图3-4-10 饱和型非线性三阶控制系统模拟电路图

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.3 三阶非线性控制系统

### (2) 饱和型非线性三阶控制系统

**实验步骤：** CH1、CH2选‘X1’档！

将信号发生器（B1）中的阶跃输出0/+5V作为系统的信号输入 $r(t)$ 。

将函数发生器（B5）单元的非线性模块中的饱和特性作为系统特性控制。调节非线性模块：

- ① 在显示与功能选择（D1）单元中，通过波形选择按键选中‘饱和特性’（饱和特性指示灯亮）。
- ② 调节“设定电位器2”，使之饱和特性限幅值 $M=3.6V$ （D1单元右显示）。
- ③ 调节“设定电位器1”，使之饱和特性斜率  $k=2$ （D1单元左显示）。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.3 三阶非线性控制系统

### (2) 饱和型非线性三阶控制系统

构造模拟电路：按图3-4-10安置短路套及测孔连线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A3	S1, S6,
3	A4	S5, S7, S8, S10
4	A5	S7, S10
5	A6	S5, S11, S12

(b) 测孔连线

1	信号输入 $r(t)$	B1 (0/+5V) $\rightarrow$ A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) $\rightarrow$ A3 (H1)
3	联接非线性 模块	A3 (OUT) $\rightarrow$ B5(非线性输入)
4		B5(非线性输出) $\rightarrow$ A4 (H1)
5	运放级联	A4 (OUT) $\rightarrow$ A5 (H1)
6	运放级联	A5A (OUTA) $\rightarrow$ A6 (H1)
7	负反馈	A6 (OUT) $\rightarrow$ A1 (H2)
8	跨接元件	A11 单元的中直读式可变电阻
9	500K/300K	跨接到 A5 (H1) 和 (IN) 之间
10	示波器联接 $\times 1$ 档	A5A (OUTA) ? B3 (CH1) (送 Y 轴显示)
11		A1 (OUT) ? B3 (CH2) (送 X 轴显示)

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.3 三阶非线性控制系统

### (2) 饱和型非线性三阶控制系统

运行、观察、记录：

- ① 运行LABACT程序，选择自动控制菜单下的非线性系统的相平面分析下的三阶非线性系统实验项目，就会弹出虚拟示波器的界面，点击开始即可使用本实验机配套的虚拟示波器（B3）单元的CH1、CH2测孔测量波形。
- ② 按下信号发生器（B1）阶跃信号按钮时（+5V→0阶跃），先选用虚拟示波器（B3）普通示波方式观察CH1、CH2两个通道所输出的波形。
- ③ 然后再选用X-Y方式（这样在示波器屏上可获得e-e相平面上的相轨迹曲线）观察相轨迹，并记录系统在e-e平面上的相轨迹，点击停止后，可调整量程大小以获得较佳的观测效果。从图中可以看出，因为 $G(j\omega)$ 与负倒特性曲线不相交（R3=500K），则系统为稳定系统，系统极限环不存在。可观察系统的振荡次数、超调量MP(%)。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.3 三阶非线性控制系统

### (2) 饱和型非线性三阶控制系统

运行、观察、记录：

- ④ 保持饱和型非线性环节线性部分的斜率  $k=2$ ，如增大线性部分增益  $K_2$ ，调整  $R_3$  ( $A_{11}$ 的可变电阻) 为  $300K$ ， $K=1.67$ ，将使  $G(j\omega)$  的曲线包围负倒特性曲线 (相交)，则系统产生极限环。可测量系统的自激振荡 (极限环) 的振幅和周期。
- ⑤ 在  $R_3$  仍为  $500K$ ， $K=1$ ，如改变非线性环节的起点，即斜率  $k$ ，将使  $G(j\omega)$  的曲线包围负倒特性曲线 (相交)，则系统产生极限环。

改变方法：调节设定电位器1，使之斜率  $k=5.1$  (D1单元左显示)。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.3 三阶非线性控制系统

### (2) 饱和型非线性三阶控制系统

#### 实验报告要求:

按下表改变图3-4-10所示的实验被控系统线性部分各参数，应用描述函数法求取被控系统在临界稳定时的饱和型非线性环节斜率 $k$ ，并计算自激振荡（极限环）的振幅和频率。

选用X-Y方式观察，画出系统在 $e$ - $e$ 平面上的相轨迹，用虚拟示波器（B3）普通示波方式观察，并画出CH1、CH2两个通道所输出的时域图。

测量自激振荡（极限环）的振幅和频率，填入实验报告。

设饱和型非线性环节的限幅值  $M= 3.6V$ ，输入都是 $+5V \rightarrow 0$ 阶跃。

分别改变模拟单元A5的R3，A4的C1和A6的C3。

# 第四章 非线性系统的相平面分析

## 4.3 三阶非线性控制系统

### (2) 饱和型非线性三阶控制系统

线性增益 K (A5)	惯性常数 T (A4)	积分常数 Ti (A6)	非线性 环节 斜率 k	极限环			
				振幅		频率	
				计算值	测量值	计算值	测量值
1	1	1					
	0.5						
1.5	1	1					
	0.5						



# 第五章 采样控制系统分析

## ■ 实验目的:

- 了解判断采样控制系统稳定性的充要条件。
- 了解采样周期 $T$ 对系统的稳定性的影响及临界值的计算。
- 观察和分析采样控制系统在不同采样周期 $T$ 时的瞬态响应曲线。

## 实验内容及步骤:

- 闭环采样系统构成电路如图5.1所示。了解采样周期 $T$ 对系统的稳定性的影响及临界值的计算，观察和分析采样控制系统在不同采样周期 $T$ 时的瞬态响应曲线。

# 第五章 采样控制系统分析

## 实验内容及步骤:

- 改变采样控制系统的被控对象，计算和测量系统的临界稳定采样周期 $T$ ，填入实验报告。

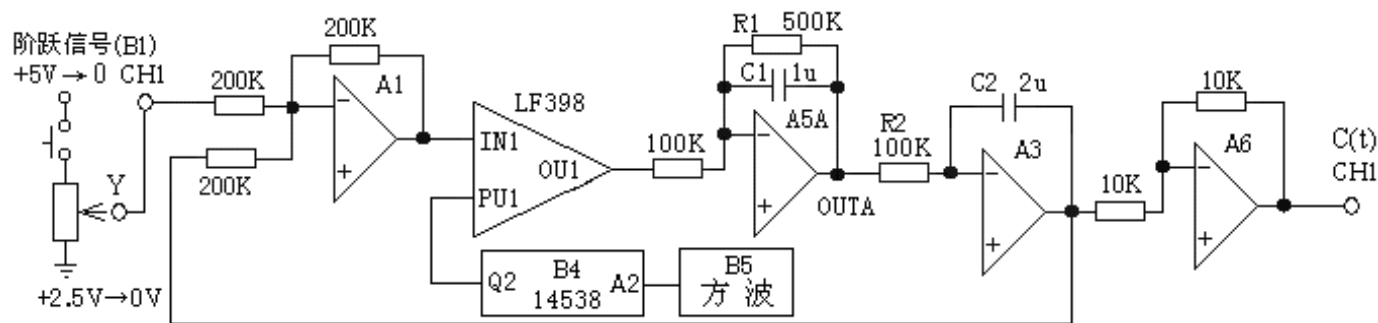


图5.1 闭环采样系统构成电路

- 闭环采样系统实验构成电路如图5.1所示，其中被控对象的各环节参数：
- 积分环节（A3单元）的积分时间常数 $T_i=R_2 \cdot C_2=0.2S$ ，
- 惯性环节（A5单元）的惯性时间常数  $T=R_1 \cdot C_1=0.5S$ ，增益 $K=R_1/R_3=5$ 。

# 第五章 采样控制系统分析

## 实验步骤:

第一步：用函数发生器（B5）单元的方波输出作为系统振荡器的采样周期信号。（D1）单元选择“方波”，（B5）“方波输出”孔输出方波。调节“设定电位器1”控制相应的输出频率。

第二步：用信号发生器（B1）的‘阶跃信号输出’和‘幅度控制电位器’构造输入信号 $R(t)$ ： B1单元中电位器的左边K3开关拨下（GND），右边K4开关拨下（0/+5V阶跃）。阶跃信号输出（B1-2的Y测孔）调整为2.5V（调节方法：调节电位器，用万用表测量Y测孔）。

# 第五章 采样控制系统分析

## 实验步骤:

第三步：用构造模拟电路：按图5.1安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A5	S3, S7, S10
3	A3	S4, S10, S11
4	A6	S2, S6

(b) 测孔联线

1	输入信号R	B1 (Y) →A1 (H1)
2	信号连接	A1 (OUT) →B4 (IN1)
3	信号连接	B4 (OU1) →A5 (H1)
4	运放级联	A (OUTA) →A3 (H1)
5	运放级联	A3 (OUT) →A6 (H1)
6	负反馈	A3 (OUT) →A1 (H2)
7	采样信号输入	B5 (方波输出) →B4 (A2)
8	单稳输出	B4 (Q2) →B4 (PU1)
9 1 0	示波器联接 ×1档	B1 (Y) →B3 (CH1) A6 (OUT) →B3 (CH2)

# 第五章 采样控制系统分析

## 实验步骤:

### 第四步：运行、观察、记录：

- 运行LABACT程序，选择自动自动控制菜单下的采样系统分析实验项目，就会弹出虚拟示波器的界面，点击开始后将自动加载相应源文件，即可使用本实验机配套的虚拟示波器（B3）单元的CH1测孔测量波形。
- 调节“设定电位器1”，D1单元显示方波频率，将采样周期T（B5方波输出）依次调整为15ms(66.6Hz)、30ms(33.3Hz)和90ms(11.1Hz)，按下信号发生器（B1）阶跃信号按钮（0→+2.5V阶跃），使用虚拟示波器CH1观察A6单元输出点OUT（C）的波形。观察相应实验现象，记录波形，并判断其稳定性，填入表5.1。

采样周期T (ms)	Mp (%)	稳定性	输出波形
15		衰减振荡	
30		衰减振荡	
90		发散振荡	

# 第五章 采样控制系统分析

## 实验报告要求:

改变采样控制系统的被控对象，计算和测量系统的临界稳定采样周期 $T$ ，填入实验报告。

	积性时间 常数 $T_i(A3)$	开环增益 $K(A3)$	惯性时间 常数 $T(A3)$	临界稳定的采样 周期 $T$	
				计 算 值	测 量 值
1	0.2	5	0.5		
2		3			
3	0.1	2	0.2		

# 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验

## 实验目的:

- 了解直流电动机速度闭环控制随动系统的组成和工作原理。
- 观察和分析加入积分、比例积分调节器后直流电机闭环调速系统的响应曲线。
- **实验内容及步骤:**
- 本实验系统由实验箱上的电机和功率放大器、调节器、电机转速检测传感器、F/V转换器等组成。
- 观察无调节器的直流电机闭环控制系统的输出特性
- 观察和分析有积分调节器与直流电机构成的闭环调速系统的输出特性，改变积分调节器的积分常数 $T_i$ （改变电阻 $R_1$ ），观察输出特性填入实验报告
- 观察和分析有比例积分调节器与直流电机构成的闭环调速系统的输出特性，改变的比例积分调节器的比例系数 $P$ （改变电阻 $R_1$ ），观察输出特性填入实验报告。

# 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验

## (1) 调整频率/电压转换静态工作点

B1单元中电位器的左边K3开关拨下（GND），右边K4开关拨上（+5V），信号输出（B1的Y测孔）调整为+3.5V（调节方法：调节电位器，用万用表测量Y测孔）。

Y测孔联线到C2模块电机输入测孔，调整C2模块中的电位器W2，使电机输出电压测孔上的直流电压也等于+3.5V。

## (2) 无调节器的直流电机闭环控制系统

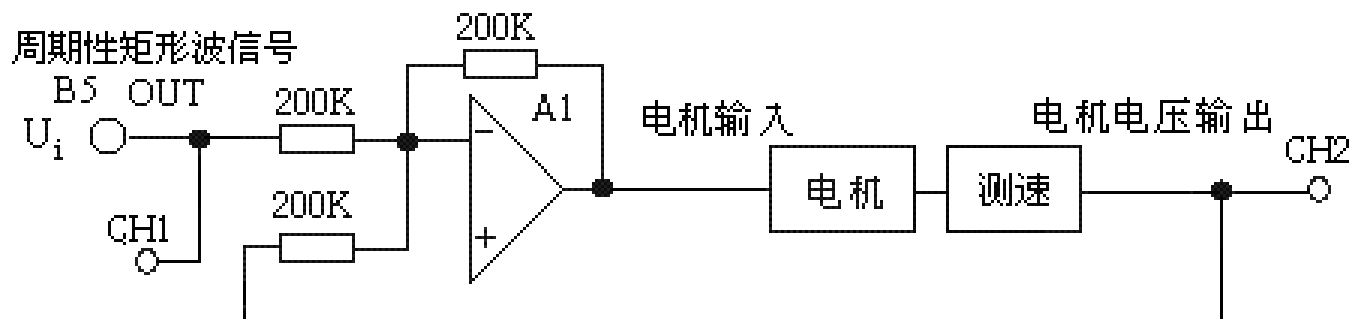


图6.1 无调节器的直流电机闭环控制系统模拟电路



# 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验

## 实验步骤:

**第一步:** 将函数发生器 (B5) 单元的矩形波输出作为系统输入R。(连续的正输出宽度足够大的阶跃信号)

- 在显示与功能选择 (D1) 单元中, 通过波形选择按键选中 ‘矩形波’ (矩形波指示灯亮)。
- 量程选择开关S2置下档, 调节 “设定电位器1”, 使之矩形波宽度 $\geq 3$ 秒 (D1单元左显示)。
- 调节B5单元的 “矩形波调幅” 电位器使矩形波输出电压= 3.5V (D1单元右显示)。

# 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验

## 实验步骤:

第二步：用构造模拟电路：按图6.1安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A6	S2, S6
3	B5	S-ST

(b) 测孔联线

1	信号输入	B5 (OUT) → A1 (H1)
3	电机驱动	A1 (OUT) → C2 (电机输入)
4	测速输出	C2 (电压输出) → A6 (H1)
5	负反馈	A6 (OUT) → A1 (H2)
6	示波器联接 ×1档	B5 (OUT) → B3 (CH1)
7		C2 (电压输出) → B3 (CH2)

# 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验

## 实验步骤:

### 第三步：运行、观察、记录：

- 将函数发生器（B5）单元‘矩形波’输出（OUT）作为信号发生器，施加于被测系统的输入端 $U_i$ ，
- 运行LABACT程序，选择自动控制菜单下的模拟直流电机闭环控制实验项目，点击开始将运行。虚拟示波器显示系统的输出时域特性曲线。
- 观察B5（OUT）从0V阶跃+3.5V时被测系统的时域特性等待一个完整的波形出来后，点击停止。然后移动游标测量其调节时间及稳态值。

## 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验

### (3) 采用积分调节器与直流电机构成的闭环调速系统

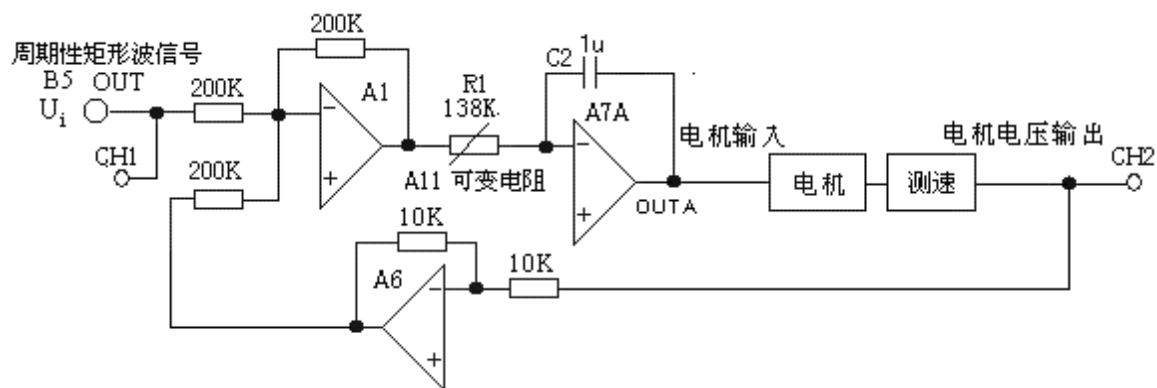


图6.2 积分调节器与直流电机构成的闭环调速系统模拟电路

# 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验

## 实验步骤:

**第一步:** 将函数发生器 (B5) 单元的矩形波输出作为系统输入R。(连续的正输出宽度足够大的阶跃信号)

- 在显示与功能选择 (D1) 单元中, 通过波形选择按键选中 ‘矩形波’ (矩形波指示灯亮)。
- 量程选择开关S2置下档, 调节 “设定电位器1”, 使之矩形波宽度 $\geq 3$ 秒 (D1单元左显示)。
- 调节B5单元的 “矩形波调幅” 电位器使矩形波输出电压= 3.5V (D1单元右显示)。

# 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验

## 实验步骤:

第二步：用构造模拟电路：按图6.2安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
4	A6	S2, S6
5	A7	S7, P
6	B5	S-ST

(b) 测孔联线

1	信号输入	B5 (OUT) → A1 (H1)
2	跨接电阻 (138K)	A11直读式可变电阻接到
3		A1 (OUT) 和A7 (IN) 之间。
4	电机驱动	A (OUTA) → C2 (电机输入)
5	测速输出	C2 (电压输出) → A6 (H1)
6	负反馈	A6 (OUT) → A1 (H2)
7	示波器联接 ×1档	B5 (OUT) → B3 (CH1)
8		C2 (电压输出) → B3 (CH2)

# 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验

## 实验步骤:

### 第三步：运行、观察、记录：

- 将函数发生器（B5）单元‘矩形波’输出（OUT）作为信号发生器，施加于被测系统的输入端 $U_i$ ，
- 运行LABACT程序，选择自动控制菜单下的模拟直流电机闭环控制实验项目，点击开始将运行。虚拟示波器显示系统的输出时域特性曲线。
- 观察B5（OUT）从0V阶跃+3.5V时被测系统的时域特性等待一个完整的波形出来后，点击停止，然后移动游标测量其超调量、峰值时间及调节时间。

# 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验

## 实验报告要求:

按下表改变图6.2所示的积分调节器的积分常数 $T_i$ （改变电阻 $R_1$ ），观察输出特性填入实验报告，并画出输出时域图。

积分常数 $T_i$	超调量 $M_p(\%)$	峰值时间 $t_p$	调节时间 $t_s$
0.05			
0.1			
0.2			
0.3			



# 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验

## (4) 采用比例积分调节器与直流电机构成的闭环调速系统

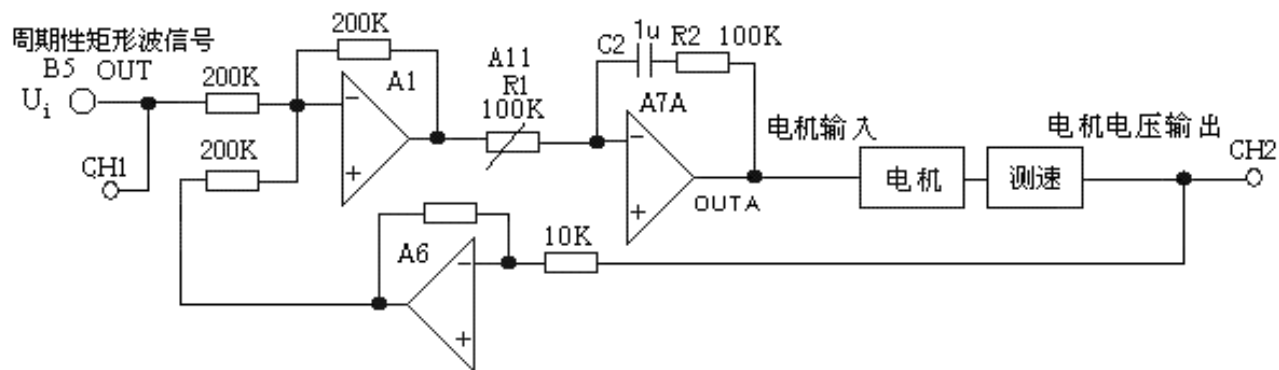


图6.3 比例积分调节器与直流电机构成的闭环调速系统模拟电路

# 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验

## 实验步骤:

**第一步:** 将函数发生器 (B5) 单元的矩形波输出作为系统输入R。(连续的正输出宽度足够大的阶跃信号)

- 在显示与功能选择 (D1) 单元中, 通过波形选择按键选中 ‘矩形波’ (矩形波指示灯亮)。
- 量程选择开关S2置下档, 调节 “设定电位器1”, 使之矩形波宽度 $\geq 3$ 秒 (D1单元左显示)。
- 调节B5单元的 “矩形波调幅” 电位器使矩形波输出电压= 3.5V (D1单元右显示)。

# 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验

## 实验步骤:

第二步：用构造模拟电路：按图6.3安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A6	S2, S6
3	A7	S3, S10, S14, PI
4	B5	S-ST

(b) 测孔联线

1	信号输入	B5 (OUT) → A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) → A7 (H1)
3	电机驱动	A (OUTA) → C2 (电机输入)
4	测速输出	C2 (电压输出) → A6 (H1)
5	负反馈	A6 (OUT) → A1 (H2)
6	示波器联接 ×1档	B5 (OUT) → B3 (CH1)
7		C2 (电压输出) → B3 (CH2)

# 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验

## 实验步骤:

### 第三步：运行、观察、记录：

- 将函数发生器（B5）单元‘矩形波’输出（OUT）作为信号发生器，施加于被测系统的输入端 $U_i$ ，
- 运行LABACT程序，选择自动控制菜单下的模拟直流电机闭环控制实验项目，点击开始将运行。虚拟示波器显示系统的输出时域特性曲线。
- 观察B5（OUT）从0V阶跃+3.5V时被测系统的时域特性等待一个完整的波形出来后，点击停止，然后移动游标测量其超调量、峰值时间及调节时间。

# 第六章 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验

## 实验报告要求：

按下表改变图6.3所示的比例积分调节器的比例系数P（改变电阻R1），观察输出特性填入实验报告，并画出输出时域图。

比例系数P	超调量 $M_p(\%)$	峰值时间 $t_p$	调节时间 $t_s$
0.5			
1			
1.5			
2			

注：完成本实验后应立即把直流电机输入线拔掉，以免长期使用造成直流电机损坏。

如在实验过程中发现直流电机失控了，应立即断开电源开关，检查安置短路套及测孔连线，重新开始。

# 第七章 模拟温度闭环控制实验

## 实验目的:

- 巩固闭环控制系统的基本概念。
- 掌握系统的串联比例、积分、微分调节器原理及方法。
- 观察和分析加入串联比例、积分、微分调节器后模拟温度闭环控制系统的响应曲线。

## 实验内容及步骤:

采用串联比例、积分、微分调节器构成的模拟温度闭环控制系统见图7.1。

观察和分析加入串联比例、积分、微分调节器后模拟温度闭环控制系统的响应曲线。

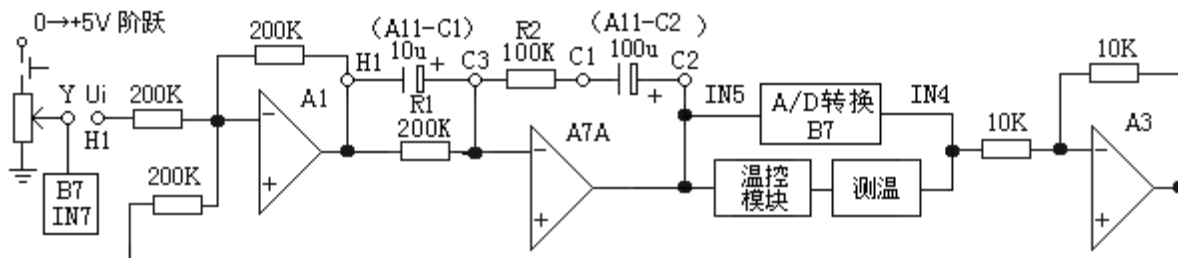


图7.1 采用串联比例积分微分调节器构成的模拟温度闭环控制系统

## 第七章 模拟温度闭环控制实验

### 实验步骤:

**第一步:** (1) 用信号发生器 (B1) 的 ‘阶跃信号输出’ 和 ‘幅度控制电位器’ 构造输入信号 ( $U_i$ ): B1单元中电位器的左边K3开关拨下 (GND), 右边K4开关拨下 (0/+5V阶跃)。阶跃信号输出 (B1-2的Y测孔) 调整为4V。调节方法: 按下信号发生器 (B1) 阶跃信号按钮, L9灯亮, 调节电位器, 用万用表测量Y测孔。

# 第七章 模拟温度闭环控制实验

## 实验步骤:

第二步：用构造模拟电路：按图7.1安置短路套及测孔联线，表如下。

(a) 安置短路套

	模块号	跨接座号
1	A1	S4, S8
2	A3	S1, S6
3	A7	S2, S10, PI

(b) 测孔联线

1	信号输入	B (Y) → A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) → A (H1)
3	跨接电容 (10u)	A11电容10u (一端) 接到A7 (H1)
4		(+端) 接到A7 (C3)
5	跨接电容 (100u)	A11电容100u (一端) 接到 A7 (C1)
6		(+端) 接到A7 (C2)
7	温控加热	A (OUT) → C3单元 (电压加热)
8	测温输出	C3单元 (测温输出) → A3 (H1)
9	测温采样	C3单元 (测温输出) → B7 (IN4)
10	目标采样	B (Y) → B7 (IN7)
11	负反馈	A3 (OUT) → A1 (H2)
12	保护温控	C3单元 (电压加热) → B7 (IN5)



# 第七章 模拟温度闭环控制实验

## 实验步骤:

### 第三步：运行、观察、记录：

- 用信号发生器（B1）的‘阶跃信号输出’作为信号发生器，施加于被测系统的输入端 $U_i$ ，
- 运行LABACT程序，选择自动控制菜单下的模拟温度闭环控制实验项目，点击开始将运行。虚拟示波器显示系统的输出时域特性曲线。
- 将信号发生器（B1）的阶跃信号按钮SB2按下，观察OUT从0V阶跃+4V时被测系统的时域特性，等待一个完整的波形出来后，点击停止，然后移动游标测量其超调量、峰值时间及调节时间。
- 冷却：在运行中，改变系统输入值（Y） $< 0.5V$ （ $3^{\circ}C$ ）时，将启动风扇转动，进行冷却。