

# 自动控制原理实验报告

时间：2020 年 6 月 21 日	地点：航空楼 A110
--------------------	-------------

## 1 实验名称

典型环节的模拟与仿真。

## 2 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。

## 3 实验内容

- 观察和分析比例、惯性、积分、比例-积分（PI）、比例-微分（PD）、比例-积分-微分（PID）等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，画出模拟电路图以及阶跃响应曲线，观测实验结果，填入实验报告。

### 3.1 比例环节的电路建模

典型比例环节模拟电路如图 3.1 所示。

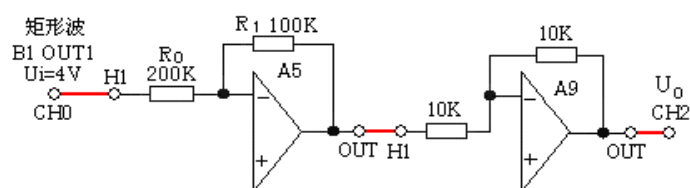


图 3.1 典型比例环节模拟电路

电路建模过程如下，由上图典型比例环节模拟电路可得

$$i = \frac{U_i}{R_0} = -\frac{U_{o1}}{R_1}, \text{ 即 } \frac{U_{o1}}{U_i} = -\frac{R_1}{R_0}$$

$$U_o = -U_{o1}, \text{ 即 } \frac{U_o}{U_i} = \frac{R_1}{R_0} = K$$

故典型比例环节的传递函数为

$$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = K$$

其中  $K = \frac{R_1}{R_0}$ 。

故阶跃输入情况下，典型比例环节响应满足

$$u_o(t) = K.$$

### 3.2 惯性环节的电路建模

典型惯性环节模拟电路如图 3.2 所示。

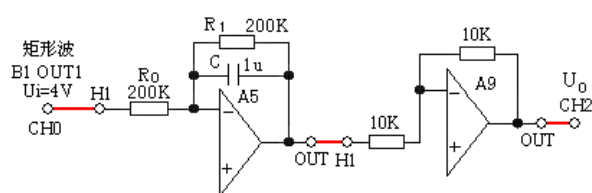


图 3.2 典型惯性环节模拟电路

电路建模过程如下，由上图典型惯性环节模拟电路可得

$$i = \frac{U_i}{R_0} = -\frac{U_{o1}}{R_1} - C \frac{dU_{o1}}{dt} = -\frac{U_{o1}}{R_1} \left( 1 + R_1 C \frac{d}{dt} \right)$$

即有

$$\frac{U_{o1}}{U_i} = -\frac{R_1}{R_0} \frac{1}{1 + R_1 C s}$$

又由

$$U_o = -U_{o1}$$

可得

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{R_1}{R_0} \frac{1}{1 + R_1 C s} = K \frac{1}{1 + Ts}$$

故典型惯性环节的传递函数为

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

其中  $K = \frac{R_1}{R_0}$ ，时间常数  $T = R_1 C$ 。

故阶跃输入情况下，典型惯性环节响应满足

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

### 3.3 积分环节的电路建模

典型积分环节模拟电路如图 3.3 所示。

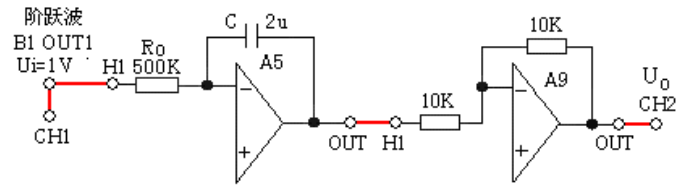


图 3.3 典型积分环节模拟电路

电路建模过程如下，由上图典型积分环节模拟电路可得

$$i = \frac{U_i}{R_0} = -C \frac{dU_{o1}}{dt}$$

即有

$$\frac{U_{o1}}{U_i} = -\frac{1}{R_0} \cdot \frac{1}{Cs}$$

又由

$$U_o = -U_{o1}$$

可得

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{R_0 Cs} = \frac{1}{T_i s}$$

故典型积分环节的传递函数为

$$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{T_i s}$$

其中时间常数  $T_i = R_0 C$ 。

故阶跃输入情况下，典型积分环节响应满足

$$u_o(t) = \frac{t}{T_i}.$$

### 3.4 比例-积分环节的电路建模

典型比例-积分环节模拟电路如图 3.4 所示。

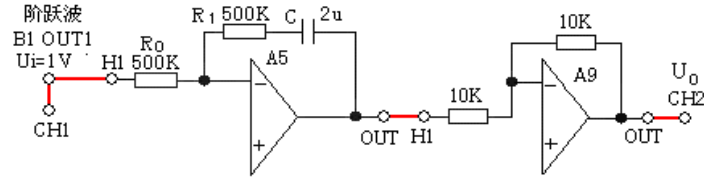


图 3.4 典型比例-积分环节模拟电路

电路建模过程如下，由上图典型比例-积分环节模拟电路可得

$$i = \frac{U_i}{R_0}, \quad -U_{o1} = i \cdot R_1 + \frac{1}{C} \int i dt = \frac{U_i}{R_0} R_1 + \frac{1}{CR_0} \int U_i dt$$

即有

$$\frac{U_{o1}}{U_i} = - \left( \frac{R_1}{R_0} + \frac{1}{CR_0 s} \right) = - \frac{R_1}{R_0} \left( 1 + \frac{1}{CR_1 s} \right)$$

又由

$$U_o = -U_{o1}$$

可得

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{R_1}{R_0} \left( 1 + \frac{1}{CR_1 s} \right) = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

故典型比例-积分环节的传递函数为

$$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = K \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

其中  $K = \frac{R_1}{R_0}$ ，时间常数  $T_i = R_1 C$ 。

故阶跃输入情况下，典型比例-积分环节响应满足

$$u_o(t) = K \left( 1 + \frac{t}{T_i} \right).$$

### 3.5 比例-微分环节的电路建模

典型比例-微分环节模拟电路如图 3.5 所示。为便于观察比例微分的阶跃响应曲线，本实验增加了一个小惯性环节，以防止接地电容  $C$  因支路电流过大而损坏。

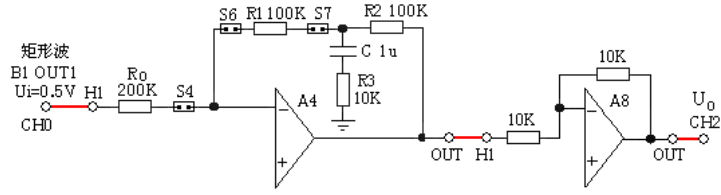


图 3.5 典型比例-微分环节模拟电路

电路建模过程如下，由上图典型比例-微分环节模拟电路可得

$$i = \frac{U_i}{R_0}, \quad -U_{o2} = i_1 R_1, \quad -U_{o2} = i_2 R_3 + \frac{1}{C} \int i_2 dt, \quad U_{o1} = U_{o2} - (i_1 + i_2) R_2$$

即有

$$-U_{o2} = i_2 \left( R_3 + \frac{1}{Cs} \right) = i_1 R_1 = \frac{R_1}{R_0} U_i$$

故有

$$i_2 = \frac{R_1}{R_0} \frac{1}{R_3 + \frac{1}{Cs}} U_i = \frac{R_1}{R_0} \frac{Cs}{R_3 Cs + 1} U_i$$

则得到  $U_{o1}$  的表达式为

$$U_{o1} = U_{o2} - (i_1 + i_2) R_2 = -\frac{R_1}{R_0} U_i - \left( \frac{U_i}{R_0} + \frac{R_1}{R_0} \frac{Cs}{R_3 Cs + 1} U_i \right) R_2$$

整理有

$$-U_{o1} = \left[ \frac{R_1}{R_0} + \left( \frac{R_2}{R_0} + \frac{R_1 R_2}{R_0} \cdot \frac{Cs}{R_3 Cs + 1} \right) \right] U_i$$

又由

$$U_o = -U_{o1}$$

可得

$$\frac{U_o}{U_i} = \left( \frac{R_1}{R_0} + \frac{R_2}{R_0} \right) + \frac{R_1 R_2}{R_0} \frac{Cs}{R_3 Cs + 1} = \frac{R_1 + R_2}{R_0} + \frac{R_1 R_2}{R_0} \frac{Cs}{R_3 Cs + 1}$$

进一步整理有

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{(R_1 + R_2)(R_3 Cs + 1) + R_1 R_2 Cs}{R_0 (R_3 Cs + 1)} = \frac{R_1 + R_2}{R_0} \left( \frac{R_3 Cs + (R_1 R_2 / (R_1 + R_2)) Cs + 1}{R_3 Cs + 1} \right)$$

故典型比例-微分环节的传递函数为

$$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{R_1 + R_2}{R_0} \left( \frac{1 + \left( R_3 + R_1 R_2 / (R_1 + R_2) \right) Cs}{R_3 Cs + 1} \right) = K \frac{1 + T_D s}{1 + \tau s}$$

其中  $K = \frac{R_1 + R_2}{R_0}$ ，惯性时间常数  $\tau = R_3 C$ ， $K_D = \frac{\left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) + R_3}{R_3} = \frac{(R_1 // R_2) + R_3}{R_3}$ ，

微分时间常数  $T_D = \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 \right) C = K_D \cdot \tau$ 。

故阶跃输入情况下，典型比例-微分环节响应满足

$$u_o(t) = K T \delta(t) + K.$$

### 3.6 比例-积分-微分（PID）环节的电路建模

典型比例-积分-微分（PID）模拟电路如图 3.6 所示。与典型比例-微分电路建模方式类似，为了便于观察比例微分的阶跃响应曲线，PID 环节电路建模过程中亦增加了一个小惯性环节，以防止接地电容  $C_2$  因支路电流过大而损坏。

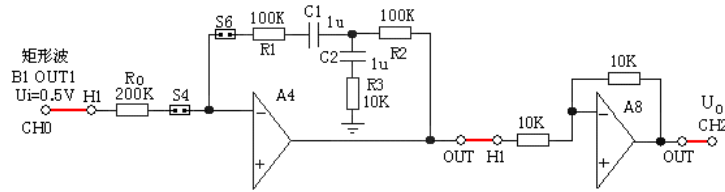


图 3.6 典型 PID 环节模拟电路

电路建模过程如下，由上图典型 PID 环节模拟电路可得

$$i = \frac{U_i}{R_0}, \quad -U_{o2} = i_1 R_1 + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt, \quad -U_{o2} = i_2 R_3 + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt, \quad U_{o1} = U_{o2} - (i_1 + i_2) R_2$$

则有

$$-U_{o2} = i_2 \left( R_3 + \frac{1}{C_2 s} \right) = i_1 \left( R_1 + \frac{1}{C_1 s} \right) = \frac{R_1}{R_0} \left( 1 + \frac{1}{R_1 C_1 s} \right) U_i$$

故得

$$i_2 = \frac{R_1}{R_0} \frac{1 + \frac{1}{R_1 C_1 s}}{R_3 + \frac{1}{C_2 s}} U_i = \frac{R_1}{R_0} \cdot \frac{C_2 (R_1 C_1 s + 1)}{R_1 C_1 (R_3 C_2 s + 1)} U_i$$

则  $U_{o1}$  可表达为

$$U_{o1} = U_{o2} - (i_1 + i_2)R_2 = -\frac{R_1}{R_0} \left( 1 + \frac{1}{R_1 C_1 s} \right) U_i - \left( \frac{U_i}{R_0} + \frac{R_1}{R_0} \cdot \frac{C_2 (R_1 C_1 s + 1)}{R_1 C_1 (R_3 C_2 s + 1)} U_i \right) R_2$$

故有

$$-U_{o1} = \left( \frac{R_1}{R_0} + \frac{R_1}{R_0} \frac{1}{R_1 C_1 s} + \frac{R_2}{R_0} + \frac{R_2}{R_0} \cdot \frac{C_2 (R_1 C_1 s + 1)}{C_1 (R_3 C_2 s + 1)} \right) U_i$$

又有

$$U_o = -U_{o1}$$

则得

$$\begin{aligned} \frac{U_o}{U_i} &= \left( \frac{R_1}{R_0} + \frac{R_2}{R_0} \right) + \frac{1}{R_0} \cdot \frac{1}{C_1 s} + \frac{R_2}{R_0} \cdot \frac{C_2 (R_1 C_1 s + 1)}{C_1 (R_3 C_2 s + 1)} = \frac{R_1 + R_2}{R_0} + \frac{1}{R_0 C_1} \cdot \frac{1}{s} + \frac{R_2}{R_0} + \frac{R_2}{R_0} \cdot \frac{(R_1 C_1 - R_3 C_2)s}{R_3 C_2 s + 1} \\ &= L_p + \frac{1}{L_i s} + L_D \frac{s}{\tau s + 1}. \end{aligned}$$

故典型 PID 环节的传递函数为

$$G(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = K_p + \frac{K_p}{T_i s} + K_p T_D s$$

其中，微分环节时间常数为  $T_D = \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 \right) C_2$ ；

积分环节时间常数为  $T_i = (R_1 + R_2) C_1$ ；

比例放大系数为  $K_p = \frac{R_1 + R_2}{R_0}$ ，微分环节系数  $K_D = \frac{(R_1 // R_2) + R_3}{R_3}$ 。

惯性时间常数为  $\tau = R_3 C_2$ ，微分时间常数满足  $T_D = K_D \cdot \tau$ 。

故阶跃输入情况下，典型 PID 环节响应满足

$$u_o(t) = K_p T_D \delta(t) + K_p + \frac{K_p}{T} t.$$

## 4 实验步骤

### 4.1 实验操作

#### 4.1.1 比例环节实验步骤

(1) 构造比例环节模拟电路

按图 3.1 安置短路套及插孔连线，列写如表 4.1 所示。

表 4.1 比例环节安置短路套及插孔连线情况

	模块号	跨接座号	1	信号输入 ( $U_i$ )	B1 (OUT1) → A5 (H1)
			2	运放级联	A5 (OUT) → A9 (H1)
1	A5	S4, S7	3	示波器联接	A9 (OUT) → B2 (CH2)

(a) 安装短路套情况

(b) 插孔连线情况

(2) 运行、观察、记录

选择线性系统时域分析 / 典型环节 / 比例环节，确认信号参数默认值后，点击《下载》、《开始》键后，实验运行。阶跃响应曲线示意图如图 4.1 所示。

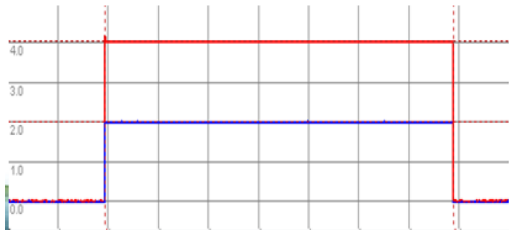


图 4.1 比例环节阶跃响应曲线示意图

首先测量输入阶跃电压值，再测量输出电压值。按表格要求改变电路图 3.1 所示的实验环节参数，观测结果。以屏幕截图的方式，将示波器显示曲线保存在自备 U 盘内，将数据填写完整。

本实验环节结束后，断电，移除短路套与短接线，进入下一实验环节连线。

4.1.2 惯性环节实验步骤

(1) 构造惯性环节模拟电路

按图 3.2 安置短路套及插孔连线，列写如表 4.2 所示。

表 4.2 惯性环节安置短路套及插孔连线情况

	模块号	跨接座号	1	信号输入 ( $U_i$ )	B1 (OUT1) → A5 (H1)
			2	运放级联	A5 (OUT) → A9 (H1)
1	A5	S4, S9, S11	3	示波器联接	A9 (OUT) → B2 (CH2)

(a) 安装短路套情况

(b) 插孔连线情况

(2) 运行、观察、记录

选择线性系统时域分析 / 典型环节 / 惯性环节，确认信号参数默认值后，点击《下载》、《开始》键后，实验运行。阶跃响应曲线示意图如图 4.2 所示。



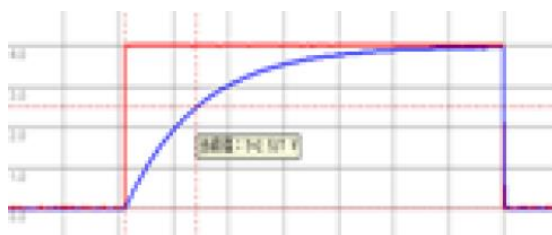


图 4.2 惯性环节阶跃响应曲线示意图

首先测量输入阶跃电压值。接着，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，再移动虚拟示波器中的两根纵游标，分别移至阶跃开始位置与上述交点，测量得惯性环节模拟电路的时间常数 $T$ 。

按表格要求改变电路图 3.2 所示的实验环节参数，观测结果。以屏幕截图的方式，将示波器显示曲线保存在自备 U 盘内，将数据填写完整。

本实验环节结束后，断电，移除短路套与短接线，进入下一实验环节连线。

### 4.1.3 积分环节实验步骤

#### (1) 构造积分环节模拟电路

按图 3.3 安置短路套及插孔连线，列写如表 4.3 所示。

表 4.3 积分环节安置短路套及插孔连线情况

	模块号	跨接座号	1	信号输入 ( $U_i$ )	B1 (OUT1) $\rightarrow$ A5 (H1)
1	A5	S5, S11, S12	2	运放级联	A5 (OUT) $\rightarrow$ A9 (H1)
			3	示波器联接	B1 (OUT1) $\rightarrow$ B2 (CH1)
			4		A9 (OUT) $\rightarrow$ B2 (CH2)

(a) 安装短路套情况

(b) 插孔连线情况

#### (2) 运行、观察、记录

选择线性系统时域分析 / 典型环节 / 积分环节。

本实验用手控阶跃信号代替矩形波作为信号输入，实验前应把“手控阶跃开关”拨下，确认手控阶跃信号幅度默认值后，点击《下载》、《开始》键后，实验运行，把“手控阶跃开关”多次拨上、拨下，观察相应实验现象，阶跃响应曲线示意图如图 4.3 所示。积分环节输入如为 0 时，输出为平线，输入如不为 0 时，输出为斜线，斜率等于积分环节时间常数 $T_i$ 的倒数。

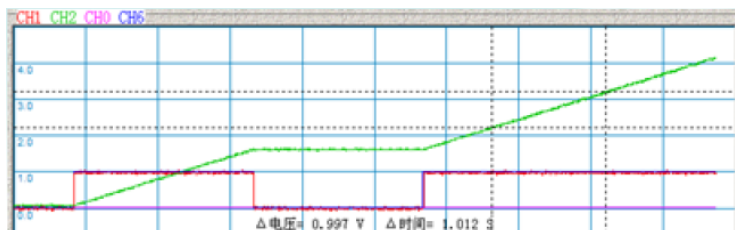


图 4.3 积分环节阶跃响应曲线示意图

首先测量输入阶跃电压值。

积分环节模拟电路时间常数 $T_i$ 的测量方法如下：移动虚拟示波器两根横游标至输出倾斜直线段（可适当加宽），得到与输出曲线的两个交点，再移动虚拟示波器两根纵游标到该两个交点，测量并计算该积分环节模拟电路的时间常数 $T_i$ 。

按表格要求改变电路图 3.3 所示的实验环节参数，观测结果。以屏幕截图的方式，将示波器显示曲线保存在自备 U 盘内，将数据填写完整。

本实验环节结束后，断电，移除短路套与短接线，进入下一实验环节连线。

#### 4.1.4 比例-积分环节实验步骤

##### (1) 构造比例-积分环节模拟电路

按图 3.4 安置短路套及插孔连线，列写如表 4.4 所示。

表 4.4 比例-积分环节安置短路套及插孔连线情况

	模块号	跨接座号		信号输入 ( $U_i$ )	B1 (OUT1) → A5 (H1)
			1	运放级联	A5 (OUT) → A9 (H1)
1	A5	S5, S6, S7	3	示波器联接	B1 (OUT1) → B2 (CH1)
			4		A9 (OUT) → B2 (CH2)

(a) 安装短路套情况

(b) 插孔连线情况

##### (2) 运行、观察、记录

选择线性系统时域分析 / 典型环节 / 比例积分环节。

本实验用手控阶跃信号代替矩形波作为信号输入，实验前应把“手控阶跃开关”拨下，确认手控阶跃信号幅度默认值后，点击《下载》；点击《开始》键后，实验运行，把“手控阶跃开关”多次拨上、拨下，观察相应实验现象，阶跃响应曲线示意图如图 4.4 所示。积分环节输入如为 0 时，输出为平线，输入如不为 0 时，输出为斜线，斜率等于积分环节时间常数 $T_i$ 的倒数。

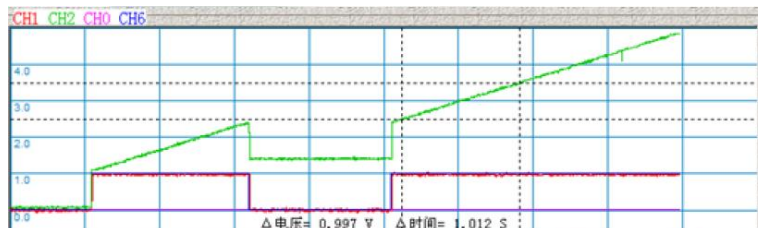


图 4.4 比例-积分环节阶跃响应曲线示意图

首先测量输入阶跃电压值。比例-积分环节模拟电路时间常数  $T_i$  的测量方法同积分环节。

按表格要求改变电路图 3.4 所示的实验环节参数，观测结果。以屏幕截图的方式，将示波器显示曲线保存在自备 U 盘内，将数据填写完整。

本实验环节结束后，断电，移除短路套与短接线，进入下一实验环节连线。

#### 4.1.5 比例-微分环节实验步骤

##### (1) 构造比例-微分环节模拟电路

按图 3.5 安置短路套及插孔连线，列写如表 4.5 所示。

表 4.5 比例-微分环节安置短路套及插孔连线情况

	模块号	跨接座号	1	信号输入 ( $U_i$ )	B1 (OUT1) → A4 (H1)
			2	运放级联	A4 (OUT) → A8 (H1)
1	A4	S4, S6, S7	3	示波器联接	A8 (OUT) → B2 (CH2)

(a) 安装短路套情况

(b) 插孔连线情况

##### (2) 运行、观察、记录

选择线性系统时域分析 / 典型环节 / 比例微分环节。确认信号参数默认值后，点击《下载》、《开始》键后，实验运行。阶跃响应曲线示意图如图 4.5 所示。

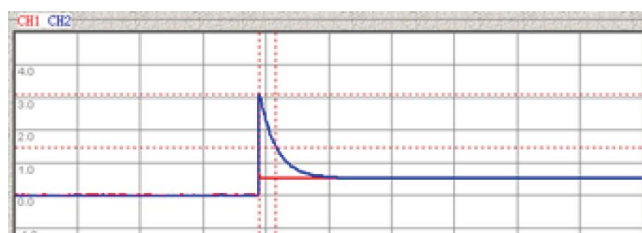


图 4.5 比例-微分环节阶跃响应曲线示意图

首先测量输入阶跃电压值。各主要环节的特性参数测量步骤叙述如下。

① 用虚拟示波器测量得到输出端 ( $U_o$ ) 的最高端电压为  $U_{o\max}$ ，减去稳态输出电压  $U_{os}$ ，然后计算得到  $\Delta U = 0.632 \times (U_{o\max} - U_{os})$ ；

② 移动虚拟示波器的两根横游标，从输出端（ $U_o$ ）的最高端电压 $U_{o\max}$ 开始向下到 $\Delta U$ 处为止，得到与微分环节的指数曲线的交点，再移动虚拟示波器的两根纵游标，分别移至阶跃开始位置与上述交点，测量得到惯性时间常数 $\tau$ ；

③ 由计算已知的 $K_D$ 值，可进一步计算得到比例-微分环节模拟电路微分时间常数为 $T_D = K_D \cdot \tau$ ，并与理论值进行比较。

本实验环节结束后，断电，移除短路套与短接线，进入下一实验环节连线。

### 4.1.6 比例-积分-微分（PID）环节实验步骤

（1）构造比例-积分-微分（PID）环节模拟电路

按图 3.6 安置短路套及插孔连线，列写如表 4.6 所示。

表 4.6 PID 环节安置短路套及插孔连线情况

	模块号	跨接座号	1	信号输入（ $U_i$ ）	B1（OUT1）→ A4（H1）
			2	运放级联	A4（OUT）→ A8（H1）
1	A4	S4, S6	3	示波器联接	A8（OUT）→ B2（CH2）

(a) 安装短路套情况

(b) 插孔连线情况

（2）运行、观察、记录

选择线性系统时域分析 / 典型环节 / 比例积分微分环节。确认信号参数默认值后，点击《下载》、《开始》键后，实验运行。阶跃响应曲线示意如图 4.6 所示。

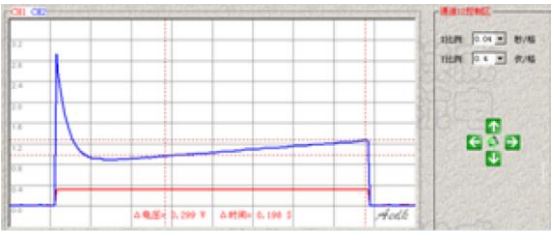


图 4.6 PID 环节阶跃响应曲线示意图

首先测量输入阶跃电压值与输出尖峰电压值。各主要环节的特性参数测量步骤叙述如下。

① 积分环节特性参数 $T_i$ ：在输出曲线后段的斜直线上，移动虚拟示波器的两根横游标与两根纵坐标，分别找到直线上的两个点，即可计算直线斜率，可进一步计算得到积分环节时间常数。

② 比例环节特性参数 $K_P$ ：关闭电源，将 A4 单元的 S7 短路套套上，开启电源，再点击《下载》、《开始》键后重新运行实验（目的是将积分环节电容短路），

观察实验输出曲线，可测量输出平直段电压值，则可计算比例环节特性参数  $K_p$ 。

③ 微分环节特性参数  $T_D$ ：首先用虚拟示波器测量得到输出端 ( $U_o$ ) 的最高端电压为  $U_{o\max}$ ，减去稳态输出电压  $U_{os}$ ，然后计算得到  $\Delta U = 0.632 \times (U_{o\max} - U_{os})$ ；移动虚拟示波器的两根横游标，从输出端 ( $U_o$ ) 的最高端电压  $U_{o\max}$  开始向下到  $\Delta U$  处为止，得到与微分环节的指数曲线的交点，再移动虚拟示波器的两根纵游标，分别移至阶跃开始位置与上述交点，测量得到惯性时间常数  $\tau$ ，故  $T_D = K_D \cdot \tau$ 。

本实验环节结束后，断电，移除短路套与短接线，进入下一实验连线。

## 4.2 实验现象

下面对各典型环节的阶跃响应曲线趋势进行实验现象描述。

当输入阶跃电压信号时（包括计算机自动输入与手工开关输入），

- **典型比例环节**输出产生一条与阶跃输入信号同区间的平直直线，即作用为将输入的阶跃信号以一特定比例进行缩放（ $R_0 < R_1$  时放大， $R_0 > R_1$  时缩小）。
- **典型惯性环节**输出电压从阶跃信号产生位置先迅速增长，再逐渐趋近于一稳定电压值，表现出滞后特性。
- **典型积分环节**的输出描述如下：当无阶跃信号输入时，输出为水平直线，保持输出电压值恒定；当有阶跃信号输入时，输出为一条倾斜直线，以一定恒值斜率向上增长，表现出累积电压的特性。
- **典型比例-积分环节**的输出描述如下：与典型积分环节部分类似，当有阶跃信号输入时，输出首先在阶跃信号输入开始位置有一上升跳跃，后保持一条倾斜直线，以一定恒值斜率向上增长，表现出比例环节缩放输入电压与积分环节累积输入电压的双重特性，可用叠加原理进行分析；当无阶跃信号输入时，由于比例环节的效应消除，故输出曲线首先突降一段，后为水平直线保持输出电压值恒定。
- **典型比例-微分环节**的输出描述如下：输出电压在阶跃信号输入开始位置形成一个较大的电压尖峰，后逐渐衰减至一稳态恒定值，表现出比例环节缩放输入电压与微分环节“感知电压未来变化”的双重特性，可用叠加原理分析。

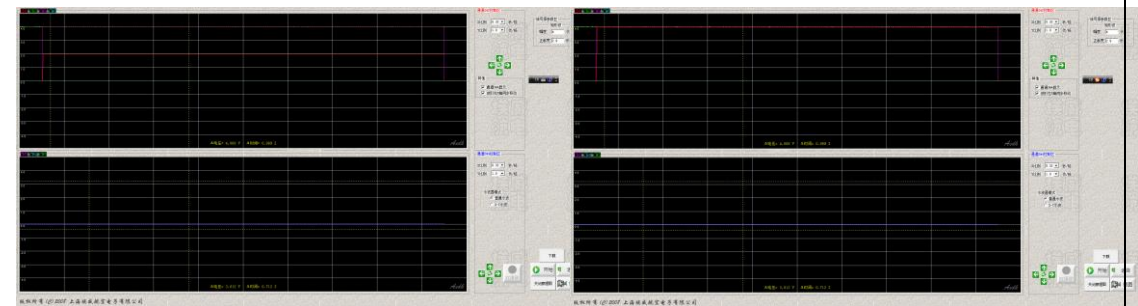
- **典型比例-积分-微分（PID）环节的输出描述如下：**综合了比例、积分、微分三种典型环节的响应特性，由于微分环节存在，在阶跃信号输入开始位置形成一个较大的电压尖峰；然后由于比例环节影响，逐渐衰减至一非零值附近，后受到相对滞后的积分环节影响，对输入电压进行累积；最后在阶跃输入消失时输出电压值降为零。

### 4.3 实验结果及其分析

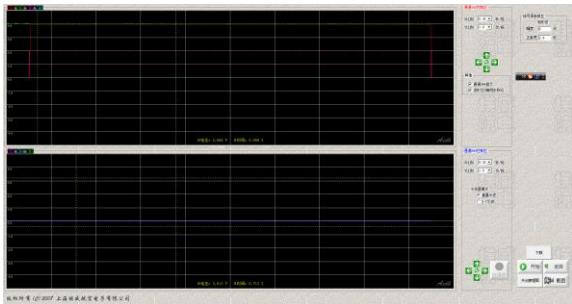
下面对实验一“典型环节的模拟与仿真”的各环节各电路参数的阶跃输入响应图线与计算结果进行说明。

#### 4.3.1 典型比例环节的输出结果（共三组）

典型比例环节的三组参数设定下阶跃输入响应图线如图 4.7 所示。



(a) 情况一：  $R_0 = 200K, R_1 = 100K, U_i = 4V$       (b) 情况二：  $R_0 = 200K, R_1 = 200K, U_i = 4V$



(c) 情况三：  $R_0 = 50K, R_1 = 100K, U_i = 2V$

图 4.7 典型比例环节的阶跃输入响应图线（共三组参数）

三种情况下特性参数计算结果如表 4.7 所示。

表 4.7 典型比例环节的特性参数计算结果（共三组参数）

$R_0$	$R_1$	$U_i$ 理论值	$U_i$ 实测值	$U_o$ 实测值	比例系数 $K$	
					理论值	实测值
200 K	100 K	4 V	4.009 V	1.982 V	0.5	0.4944
	200 K	2 V	4.009 V	4.009 V	1.0	1.0000

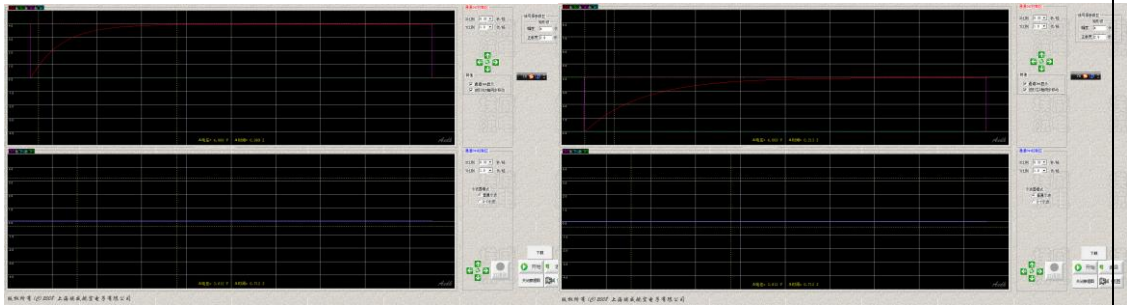


50 K	100 K	1V	2.004 V	3.965 V	2.0	1.9785
------	-------	----	---------	---------	-----	--------

由上表数据，可见比例系数  $K$  实测值与理论值吻合很好。比例环节的作用即将输入阶跃电压信号进行缩放（放大或缩小）。

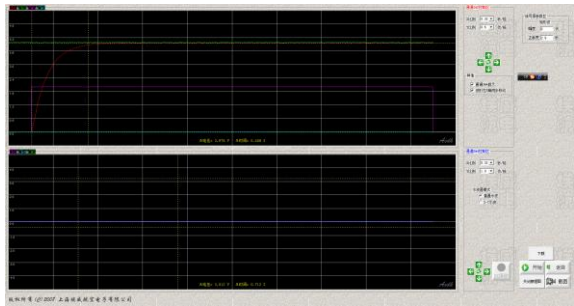
### 4.3.2 典型惯性环节的输出结果（共三组）

典型惯性环节的三组参数设定下阶跃输入响应图线如图 4.8 所示。



(a) 情况一： $R_0 = 200K, R_1 = 200K,$   
 $C = 4\mu, U_i = 4V$

(b) 情况二： $R_0 = 200K, R_1 = 200K,$   
 $C = 2\mu, U_i = 4V$



(c) 情况三： $R_0 = 200K, R_1 = 200K,$   
 $C = 4\mu, U_i = 4V$

图 4.8 典型惯性环节的阶跃输入响应图线（共三组参数）

三种情况下特性参数计算结果如表 4.8 所示。

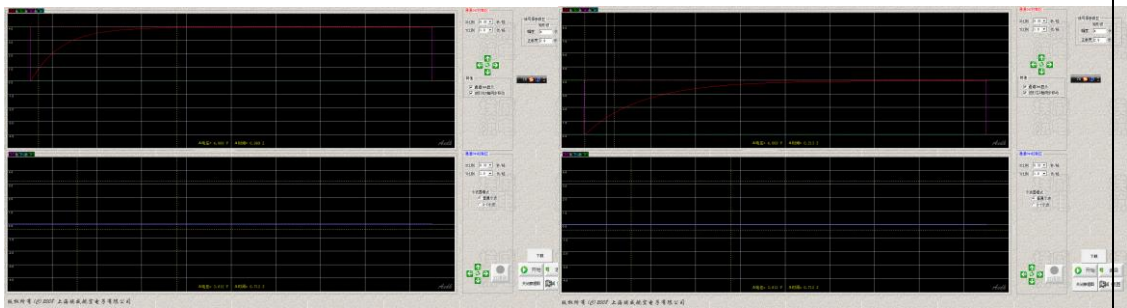
表 4.8 典型惯性环节的特性参数计算结果（共三组参数）

$R_0$	$R_1$	$C$	$U_i$ 理论值	比例系数 $K$		惯性常数 $T$	
				理论值	计算值	理论值	实测值
200 K	200 K	$1\mu$	4 V	1.0	0.9945	0.2	0.213
		$2\mu$	2 V	1.0	0.9890	0.4	0.406
50 K	100 K	$1\mu$	1 V	2.0	1.9801	0.1	0.104

由上表数据，可见比例系数  $K$  和惯性常数  $T$  实测值与理论值吻合很好，且可观察到，当  $R_1$  不变时，惯性常数  $T$  与惯性环节的电容值成正比；当  $C$  不变时，惯性常数  $T$  与  $R_1$  值成正比。

4.3.3 典型积分环节的输出结果（共两组）

典型积分环节的两组参数设定下阶跃输入响应图线如图 4.9 所示。



(a) 情况一：  $R_0 = 500K, C = 2\mu, U_i = 1V$       (b) 情况二：  $R_0 = 500K, C = 1\mu, U_i = 1V$

图 4.9 典型积分环节的阶跃输入响应图线（共两组参数）

两种情况下特性参数计算结果如表 4.9 所示。

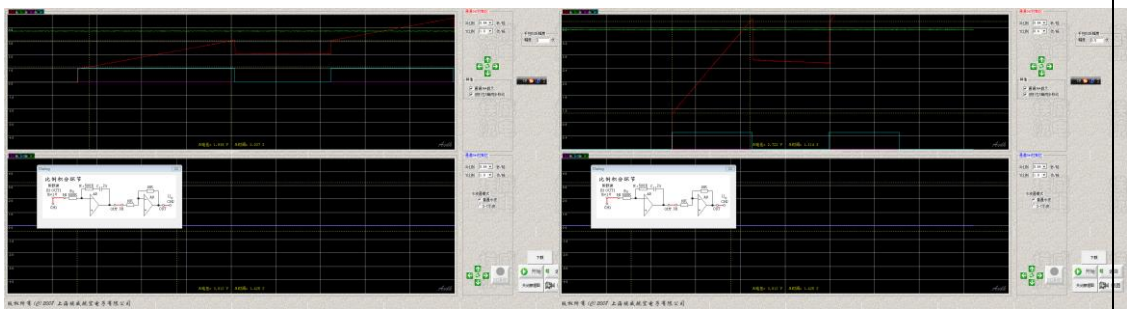
表 4.9 典型积分环节的特性参数计算结果（共两组参数）

$R_0$	$C$	$U_i$ 理论值	选取两点 $\Delta U$	选取两点 $\Delta t$	积分常数 $T_i$	
					理论值	实测值
500 K	$2\mu$	1 V	2.577	2.726	1.0	1.0578
	$1\mu$		3.568	1.829	0.5	0.5126

由上表数据，可见积分常数  $T$  实测值与理论值吻合很好。且可观察到，当  $R_0$  不变时，积分常数  $T$  与积分环节的电容值  $C$  成正比。

4.3.4 典型比例-积分环节的输出结果（共两组）

典型比例-积分环节的两组参数设定下阶跃输入响应图线如图 4.10 所示。



(a) 情况一：  $R_0 = 200K, R_1 = 100K, U_i = 4V$       (b) 情况二：  $R_0 = 200K, R_1 = 200K, U_i = 4V$

图 4.10 典型比例-积分环节的阶跃输入响应图线（共两组参数）

两种情况下特性参数计算结果如表 4.10 所示。

表 4.10 典型比例-积分环节的特性参数计算结果（共两组参数）

$R_0$	$C$	$U_i$ 理论值	选取两点 $\Delta U$	选取两点 $\Delta t$	积分常数 $T_i$	
					理论值	实测值



500 K	$2\mu$	1 V	2.577	2.726	1.0	1.0578
	$1\mu$		3.568	1.829	0.5	0.5126

由上表数据，可见积分常数  $T$  实测值与理论值吻合很好。且可观察到，当  $R_0$  不变时，积分常数  $T$  与积分环节的电容值  $C$  成正比。

#### 4.3.5 典型比例-微分环节的输出结果（共一组）

典型比例-微分环节的一组参数设定下阶跃输入响应图线如图 4.11 所示。

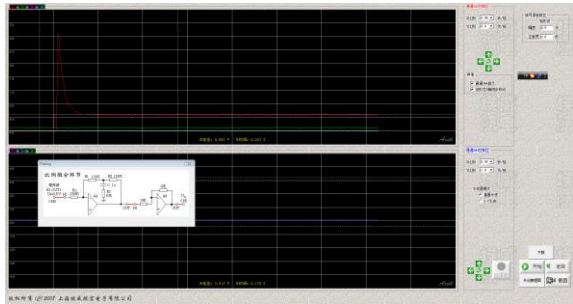


图 4.11 典型比例-微分环节的阶跃输入响应图线（共一组参数）

该情况对应  $R_0 = 200K, R_1 = 100K, R_2 = 100K, R_3 = 10K, C = 1\mu, U_i = 0.5V$ ，则可计算得到  $(R_1 // R_2) = 50K$ 。比例环节常数  $K$  理论值为  $K = \frac{R_1 + R_2}{R_0} = 1.0$ ，实测  $K = 0.9482$ 。其他特性参数计算结果如表 4.11 所示。

表 4.11 典型比例-微分环节的特性参数计算结果（共一组参数）

$U_i$ 实测	峰值电压 $U_{o\max}$	稳态输出电压 $U_{os}$	微分时间常数 $K_D$		惯性时间常数 $\tau$		微分时间常数 $T_D$	
			理论值	实测值	理论值	实测值	理论值	实测值
0.502 V	2.881 V	0.476 V	6.0	5.7390	0.01	0.0110	0.06	0.06313

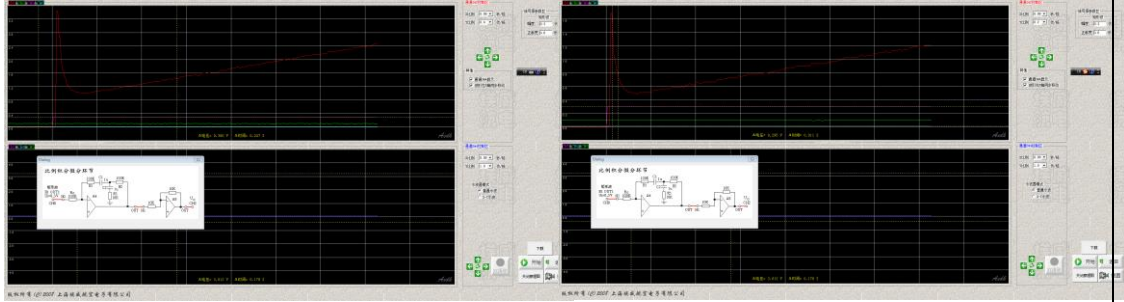
综合上表数据，可见比例环节系数  $K$ 、微分时间常数  $K_D$ 、惯性时间常数  $\tau$  以及微分时间常数  $T_D$  的实测值均与理论值吻合较好，系统建模理论得到验证。

分析电路中的串联电阻  $R_3$  的作用如下。理论上，纯微分环节的阶跃输入响应的峰值应趋向于无穷大，而实际物理世界中这种情况较为少见，也容易导致测量电路中的微分单元接地电容因电流过大而损坏，因此本实验装置为微分单元的电容串联一个较大电阻，实际上即串联了一个惯性环节，这样的系统一方面阶跃响应的脉冲幅值不会太高，另一方面提供了一种间接的方式来测量微分环节时间常

数，比较适合实验操作与分析。

#### 4.3.6 典型比例-积分-微分（PID）环节的输出结果（共两组）

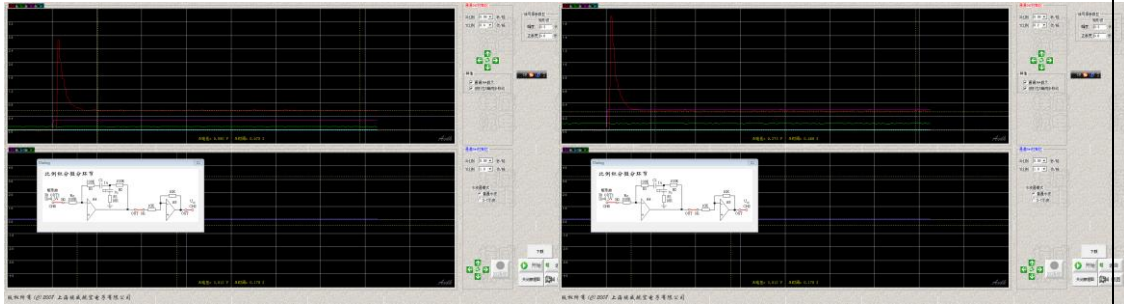
典型比例-积分-微分（PID）环节的两组参数设定下原系统阶跃输入响应图线如图 4.12 所示。



- (a) 情况一:  $R_0 = 200K, R_1 = 100K, R_2 = 100K, R_3 = 10K, C_1 = C_2 = 1\mu, U_i = 0.3V$       (b) 情况二:  $R_0 = 500K, R_1 = 100K, R_2 = 100K, R_3 = 10K, C_1 = C_2 = 1\mu, U_i = 0.3V$

图 4.12 典型 PID 环节原系统的阶跃输入响应图线（共两组参数）

两组参数设定下短接（去除）积分环节后的阶跃输入响应图线如图 4.13 所示。可观察到输出电压出现稳态平直电压段，体现比例环节特性，可计算常数  $K_p$ 。



- (a) 情况一:  $R_0 = 100K, R_1 = 100K, R_2 = 100K, R_3 = 10K, C_1 = C_2 = 1\mu, U_i = 0.3V$       (b) 情况二:  $R_0 = 200K, R_1 = 100K, R_2 = 100K, R_3 = 10K, C_1 = C_2 = 1\mu, U_i = 0.3V$

图 4.13 典型 PID 环节短接（去除）积分环节后的阶跃输入响应图线（共两组参数）

情况一中，输入电压实测值  $U_o = 0.300V$ ，峰值电压  $U_{o\max} = 3.480V$ ，在斜直线段选取两点电压之差  $\Delta u = 1.313V$ ，时间之差  $\Delta t = 0.470s$ ，短接（去除）积分环节后的输出稳态电压  $U_{os} = 0.590V$ ，峰值电压与稳态电压之差  $(U_{o\max} - U_{os}) = 2.106V$ ，目标电压下降为  $\Delta U = 0.632 \times (U_{o\max} - U_{os}) = 1.3310V$ ，从阶跃开始至目标交点处  $\tau = \Delta t = 0.011s$ 。

情况二中，输入电压实测值  $U_o = 0.295V$ ，峰值电压  $U_{o\max} = 1.705V$ ，在斜直线段选取两点电压之差  $\Delta u = 0.656V$ ，时间之差  $\Delta t = 0.466s$ ，短接（去除）积分环节后的输出稳态电压  $U_{os} = 0.273V$ ，峰值电压与稳态电压之差  $(U_{o\max} - U_{os}) = 1.432V$ ，目标电压下降为  $\Delta U = 0.632 \times (U_{o\max} - U_{os}) = 0.9050V$ ，从阶跃开始至目标交点处  $\tau = \Delta t = 0.009s$ 。

两组设定参数情况下的特性参数计算结果如表 4.12 所示。

表 4.12 典型比例-积分-微分（PID）环节的特性参数计算结果（共两组参数）

情形 编号	比例系数 $K_p$		积分时间常数 $T_i$		微分时间常数 $T_d$	
	理论值	实测值	理论值	实测值	理论值	实测值
1	2.0	1.9667	0.2	0.3580	0.06	0.011
2	1.0	0.9254	0.2	0.7104	0.06	0.009

综合上表数据，可见比例环节系数  $K_p$  的实测值均与理论值吻合较好，而积分时间常数  $T_i$  以及微分时间常数  $T_d$  的实测值与理论值有较大偏差，分析主要原因有以下两方面：① 一方面，由于屏幕分辨率不够精细，可能导致在移动横纵游标的过程产生较大误差，进而造成积分时间常数  $T_i$  出现较大偏差；② 另一方面，由于实验设备老化，电容、电阻、导线等元件的参数可能已经发生较大变化，导致实验各主要环节的特性参数测量出现较大误差。

分析电路中的串联电阻  $R_3$  的作用同比例-微分环节叙述。本实验装置为微分单元的电容串联一个较大电阻，实际上即串联了一个惯性环节，这样的系统一方面阶跃响应的脉冲幅值不会太高，另一方面提供了一种间接的方式来测量微分环节时间常数，比较适合实验操作与分析。

对实验进一步思考：本实验中，采用短接（去除）积分环节以得到稳态输出电压的方式来测量比例环节系数  $K_p$ ，实际上还可以在不短接（去除）积分环节的情况下，将原 PID 控制输出的斜线电压部分进行线性反向延长，得到与初始时刻垂涎的交点，该点的电压值即为： $K_p \times U_i$ ，据此可计算得到  $K_p$  值。但是，由于较第一种方法多串联了积分环节，同时又有屏幕测量分辨率和元件老化的影

响，因此这种方法可能带来的误差会更大，需要进一步实验验证。

**实验一总结：**本部分实验对比例、惯性、积分、比例-积分（PI）、比例-微分（PD）、比例-积分-微分（PID）等环节的阶跃响应曲线进行了理论建模与实验分析，加深了对各项电路参数及其对典型环节动态特性影响的定性、定量认识。

实验设备名称	LabACTn 自控 / 计控原理实验机	实验设备编号	
同组实验人（签名）	冯铮浩	实验报告人（签名）	冯铮浩
实验结果确认及设备验收（签名）			
实验报告完成时间		2020 年 6 月 21 日	