

# 华中科技大学

## 人工智能与自动化学院

### 控制理论综合实验报告

实验项目：实验一

实验名称：控制系统典型环节模拟实验

实验时间：2025/3/13 星期四

实验人员 1：

专业班级：人工智能 2304 班

学 号：U202315285

姓 名：许睿廷

实验人员 2：

专业班级：人工智能 2304 班

学 号：U202315265

姓 名：杜辰宇

## 一、实验目的

- 1、熟悉教学模拟机的工作原理及组成，掌握示波器的使用方法；
- 2、掌握典型环节模拟电路的构成方法；
- 3、观察和记录典型环节的阶跃响应，分析其动态性能；
- 4、了解参数变化对典型环节动态性能的影响，并学会由阶跃响应曲线计算典型环节的传递函数。

## 二、实验设备

STAR ACT 自控、计控实验仪一套、PC 机一台

## 三、实验原理

本实验包括了比例环节、积分环节、惯性环节、比例微分环节、比例积分环节、振荡环节 6 个典型环节。

为方便起见，进行相关的变量假设：

各环节输入为  $U_R(s)$ ，输出为  $U_C(s)$ ，中间若有电压输出变量，从输入向输出方向分别设为  $U_i(s)$ ，其中  $i = 1, 2, 3, \dots$ 。

下面根据每个环节的实验原理图推导各个环节的传递函数。

### 1. 比例环节

实验原理图如图 3.1 所示。根据原理图的电路中电流的关系以及运算放大器“虚短、虚断”的特性，可以得到电路方程：

$$\frac{U_R(s)}{R_0} + \frac{U_C(s)}{R_1} = 0$$

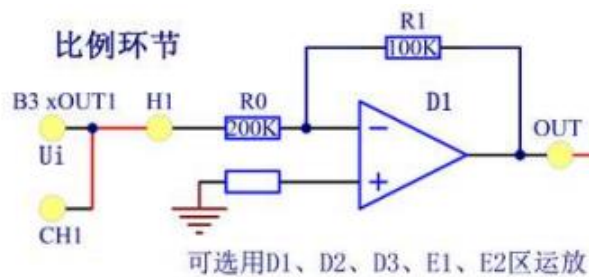


图 3.1 比例环节原理图

设  $K = R_1/R_0$ ，可以得到系统的传递函数为：

$$G(s) = \frac{U_C(s)}{U_R(s)} = -\frac{R_1}{R_0} = -K$$

再经过一个反相器的作用之后，可以得到传递函数为：

$$G(s) = K$$

### 2. 积分环节

实验原理图如图 3.2 所示。根据原理图的电路中电流的关系、运算放大器“虚短、虚断”的特性并根据电容的容抗简化计算，可以得到电路方程：

$$\frac{U_R(s)}{R_0} + Cs \cdot U_C(s) = 0$$

令  $T = R_0C$ ，则系统的传递函数为：

$$G(s) = \frac{U_C(s)}{U_R(s)} = -\frac{1}{R_0Cs} = -\frac{1}{Ts}$$

再经过一个反相器的作用之后，可以得到传递函数为：

$$G(s) = \frac{1}{Ts}$$

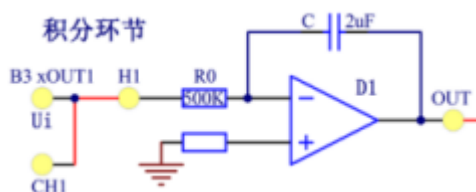


图 3.2 积分环节原理图

### 3. 惯性环节

实验原理图如图 3.3 所示。根据原理图的电路中电流的关系、运算放大器“虚短、虚断”的特性并根据电容的容抗简化计算，可以得到电路方程：

$$\frac{U_R(s)}{R_0} + \frac{U_C(s)}{R_1} + Cs \cdot U_C(s) = 0$$

令  $K = R_1/R_0$ ,  $T = R_1C$  ( $T$  为时间常数)，并经过一个反相器反向后，系统的传递函数为：

$$G(s) = -\frac{U_C(s)}{U_R(s)} = \frac{R_1}{R_0(1 + R_1Cs)} = \frac{K}{1 + Ts}$$

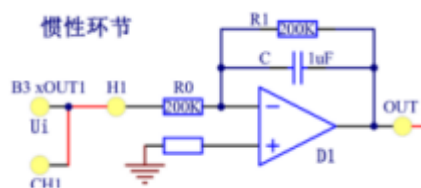


图 3.3 惯性环节原理图

**对惯性环节时间常数的讨论：**

当系统为幅值为  $A$  的阶跃输入时，由传递函数可知，系统的输出：

$$U_C(s) = G(s) \cdot U_R(s) = \frac{KA}{(1 + Ts)} \times \frac{1}{s} = KA \cdot \left( \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{T}} \right)$$

对其反拉氏变换，得到输出

$$u_c(t) = KA \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), t \geq 0$$

令  $t = T$ ，得到

$$u_c(t) = KA(1 - e^{-1}) \approx 0.632KA, t \geq 0$$

也就是说，通过测量输出波形上升为幅值 0.632 所需的时间 $t$ ，即可得到系统的时间常数  $T$ 。

#### 4. 比例微分环节

实验原理图如图 3.4 所示。根据原理图的电路中电流的关系、运算放大器“虚短、虚断”的特性并根据电容的容抗简化计算，可以得到电路方程：

$$\frac{U_1(s)}{R_1} + \frac{U_1(s) - U_C(s)}{R_2} + \frac{U_1(s)}{\frac{1}{sC} + R_3} = 0$$

$$\frac{U_R(s)}{R_0} + \frac{U_1(s)}{R_1} = 0$$

$U_1(s)$ 为 $R_1$ 右侧的电压。再经过一个反相器的作用之后，可以得到系统传递函数为：

$$G(s) = -\frac{U_C(s)}{U_R(s)} = \frac{R_1}{R_0} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{sCR_2}{1 + sCR_3}\right)$$

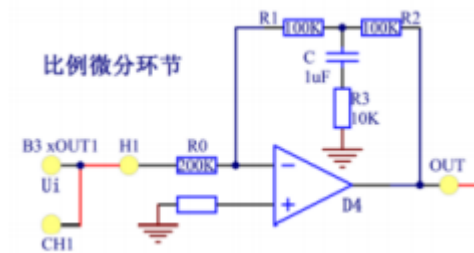


图 3.4 比例微分环节原理图

#### 5. 比例积分环节

实验原理图如图 3.5 所示。根据原理图的电路中电流的关系、运算放大器“虚短、虚断”的特性并根据电容的容抗简化计算，可以得到电路方程：

$$\frac{U_R(s)}{R_0} + \frac{U_C(s)}{R_1 + \frac{1}{Cs}} = 0$$

令 $K = R_1/R_0$ ,  $T = R_0C$ ，并经过一个反相器反向后，系统的传递函数为：

$$G(s) = -\frac{U_C(s)}{U_R(s)} = \frac{R_1Cs + 1}{R_0Cs} = K + \frac{1}{Ts}$$

为一比例环节和一阶积分环节的和。

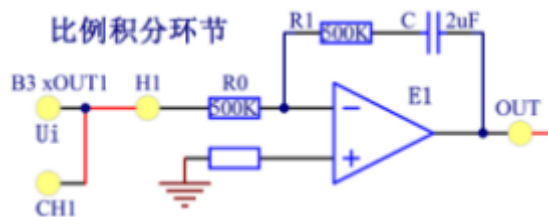


图 1.3.5 比例积分环节原理图

## 6. 振荡环节

实验原理图如图 3.6 所示。根据原理图的电路中电流的关系、运算放大器“虚短、虚断”的特性并根据电容的容抗简化计算，可以得到电路方程：

$$\frac{U_R(s)}{200k\Omega} + \frac{U_C(s)}{200k\Omega} + \frac{U_1(s)}{200k\Omega} = 0$$

$$\frac{U_1(s)}{500k\Omega} + s \cdot 2\mu F \cdot U_2(s) = 0$$

$$\frac{U_2(s)}{R} + \frac{U_C(s)}{100k\Omega} + s \cdot 1\mu F \cdot U_C(s) = 0$$

令  $\omega_n^2 = 1000k\Omega/R$ ， $2\zeta\omega_n = 10$ ，并经过一个反相器反向后，系统的传递函数为：

$$G(s) = -\frac{U_C(s)}{U_R(s)} = \frac{\frac{100k\Omega}{R}}{0.1s^2 + s + \frac{100k\Omega}{R}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

该系统为二阶系统，求得阻尼比为：

$$\zeta = \frac{5}{\omega_n} = 5 \sqrt{\frac{R}{1000k\Omega}} = \sqrt{\frac{R}{40k\Omega}}$$

- (1) 当  $0 < R < 40 k\Omega$  时， $0 < \zeta < 1$ ，系统为欠阻尼状态,有振荡；
- (2) 当  $R = 40 k\Omega$  时， $\zeta = 1$ ，系统为临界阻尼状态，无振荡；
- (3) 当  $R > 40 k\Omega$  时， $\zeta > 1$ ，系统为过阻尼状态，无振荡。

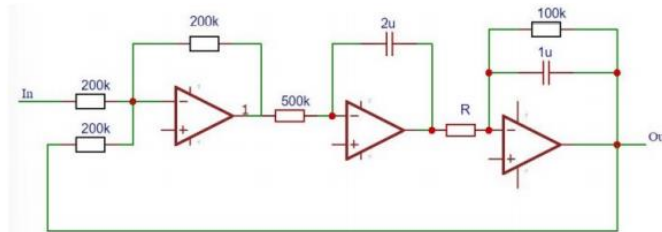


图 3.6 振荡环节原理图

## 四、实验内容

### 1. 实验步骤

- (1) 按照要求打开实验设备，并设定合适的信号源。
- (2) 按照实验原理图和实验指导书给出的列表连接各个电路。
- (3) 更换不同阻抗，在虚拟示波器上观察阻抗变化时候的输出。
- (4) 运行设备、观察、并作相应的记录：

### 2. 实验内容

改变电路中相关阻抗的值，记录下输出响应（惯性环节需要测量时间常数）。

- (1) 比例环节：改变 $R_1$ 分别为  $100\text{ k}\Omega$ ,  $500\text{ k}\Omega$ 。
- (2) 积分环节：改变 $C$  分别为  $2\text{ }\mu\text{F}$ ,  $3\text{ }\mu\text{F}$ 。
- (3) 惯性环节：改变 $(R_1, C)$ 分别为 $(200\text{ k}\Omega, 1\text{ }\mu\text{F})$ ,  $(200\text{ k}\Omega, 2\text{ }\mu\text{F})$ ,  $(100\text{ k}\Omega, 1\text{ }\mu\text{F})$ ，理论时间常数 $T$ 分别为  $200\text{ ms}$ ,  $400\text{ ms}$ ,  $100\text{ ms}$ 。
- (4) 比例微分环节：改变 $R_0$ 分别为  $200\text{ k}\Omega$ ,  $500\text{ k}\Omega$ 。
- (5) 比例积分环节：改变 $C$ 分别为  $2\text{ }\mu\text{F}$ ,  $1\text{ }\mu\text{F}$ 。
- (6) 振荡环节：改变 $R$  分别为  $4\text{ k}\Omega$ ,  $40\text{ k}\Omega$ ,  $400\text{ k}\Omega$ 。

## 五、实验结果和分析

给出不同环节的输入（白色）、输出（红色）波形。

### 1. 比例环节

$R_1$ 分别为  $100\text{ k}\Omega$ ,  $500\text{ k}\Omega$  时，波形如图 5.1 (a), (b) 所示。

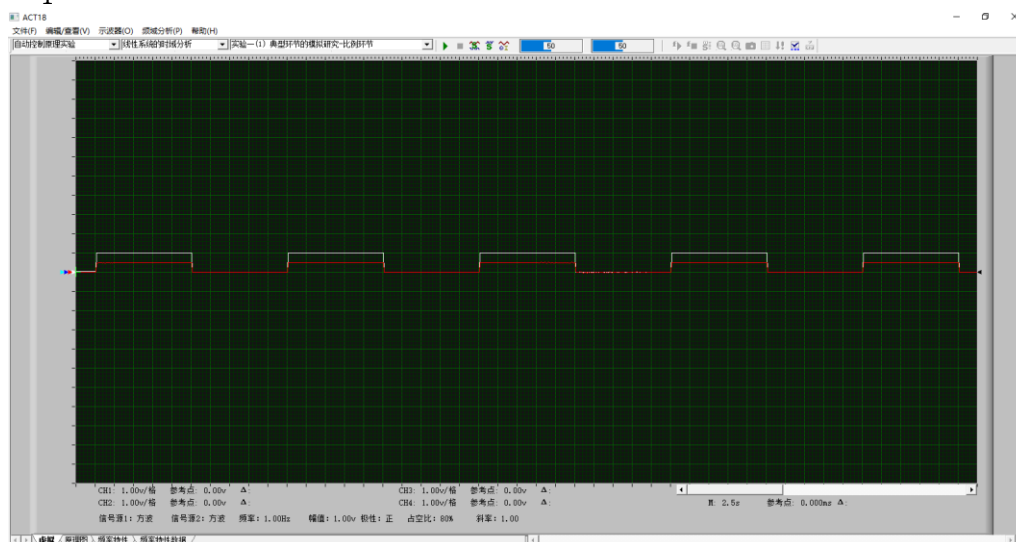


图 5.1 (a)  $R=100\text{ k}\Omega$ 下的比例环节的输入输出波形

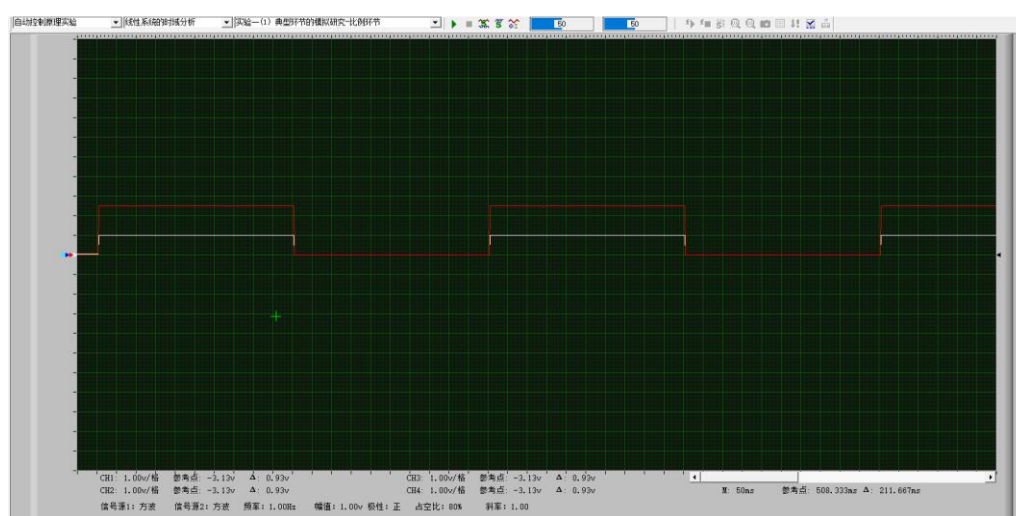


图 5.1 (b)  $R=500\text{ k}\Omega$ 下的比例环节的输入输出波形

由图可知，输入信号为低电平时，输出信号的幅值始终为 0；当输入信号处于高电平时，根据前述的传递函数关系，可知在 $R_0$ 保持不变时，输出信号的幅值与 $R_1$ 成正比。在图中可见 $R_1 = 500\text{ k}\Omega$ 时值约为 2.5v，为 0.5v 的 5 倍。

## 2. 积分环节

$C$ 分别为  $2\text{ }\mu\text{F}$ ， $3\text{ }\mu\text{F}$ 时，波形如图 5.2(a)，(b) 所示。

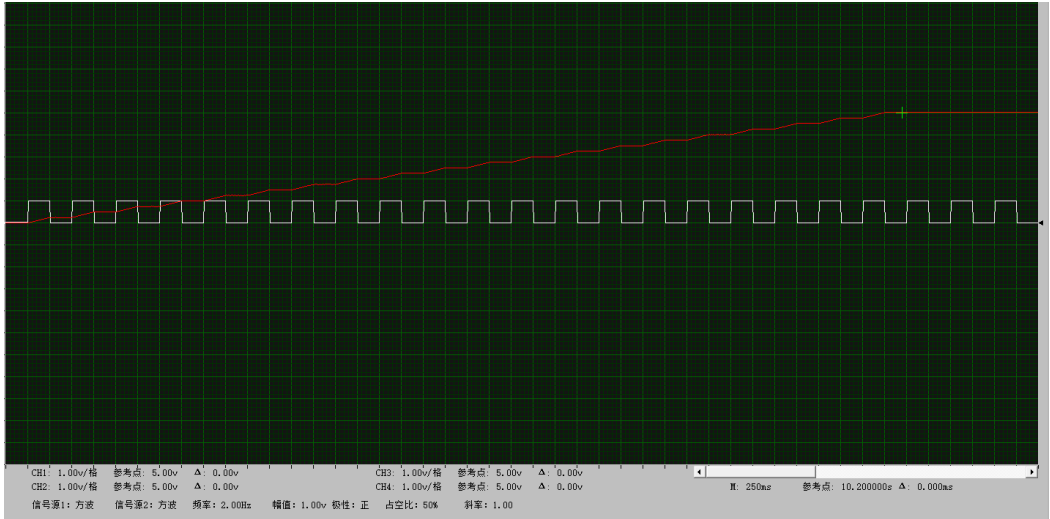


图 5.2 (a)  $C=2\text{ }\mu\text{F}$ 下的积分环节输入输出波形

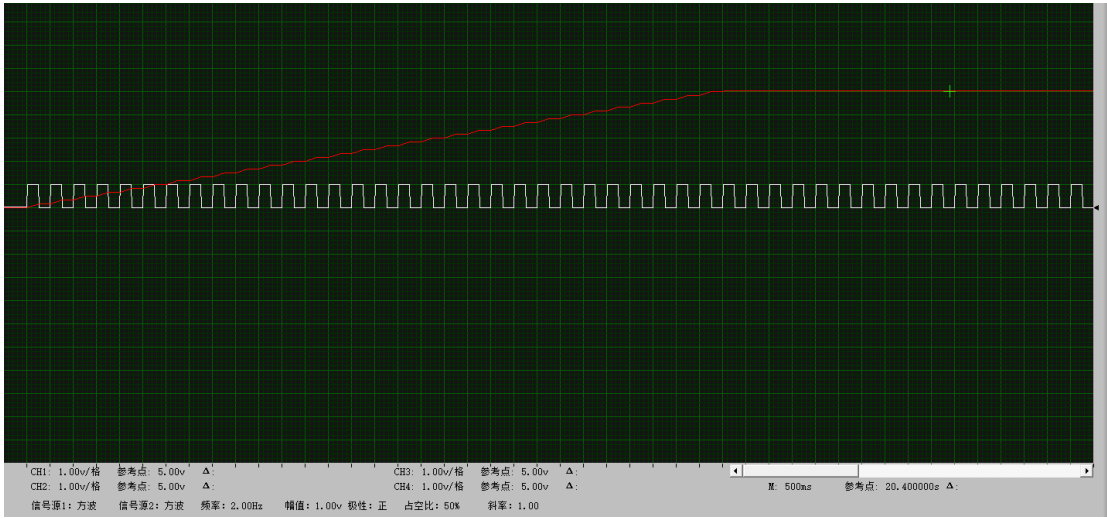


图 5.2 (b)  $C=3\text{ }\mu\text{F}$ 下的积分环节输入输出波形

由图可知，输入信号为低电平时，输出信号的幅值保持不变；当输入信号处于高电平时，根据前述的传递函数关系，输出信号的幅值增长至稳态值。该电路下稳态值为 5v，与电容的大小无关。但随电容值增大，上升时间越大。

## 3. 惯性环节

$(R_1, C)$ 分别为  $(200\text{ k}\Omega, 1\text{ }\mu\text{F})$ ， $(200\text{ k}\Omega, 2\text{ }\mu\text{F})$ ， $(100\text{ k}\Omega, 1\text{ }\mu\text{F})$  时，波形如图 5.3 (a)，(b)，(c)所示。



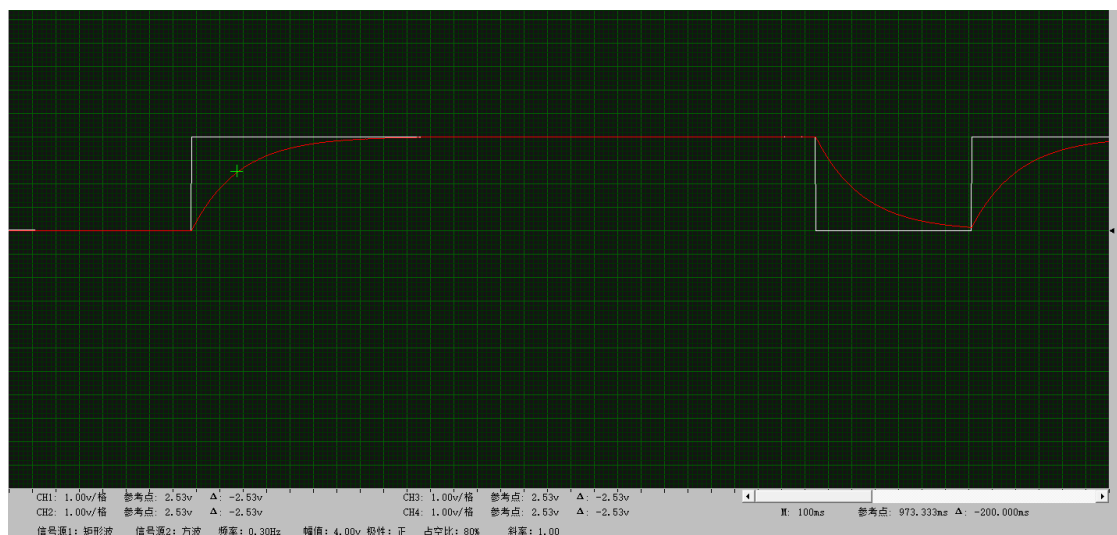


图 5.3 (a)  $(R_1, C) = (200\text{ k}\Omega, 1\text{ }\mu\text{F})$  时的惯性环节输入输出波形

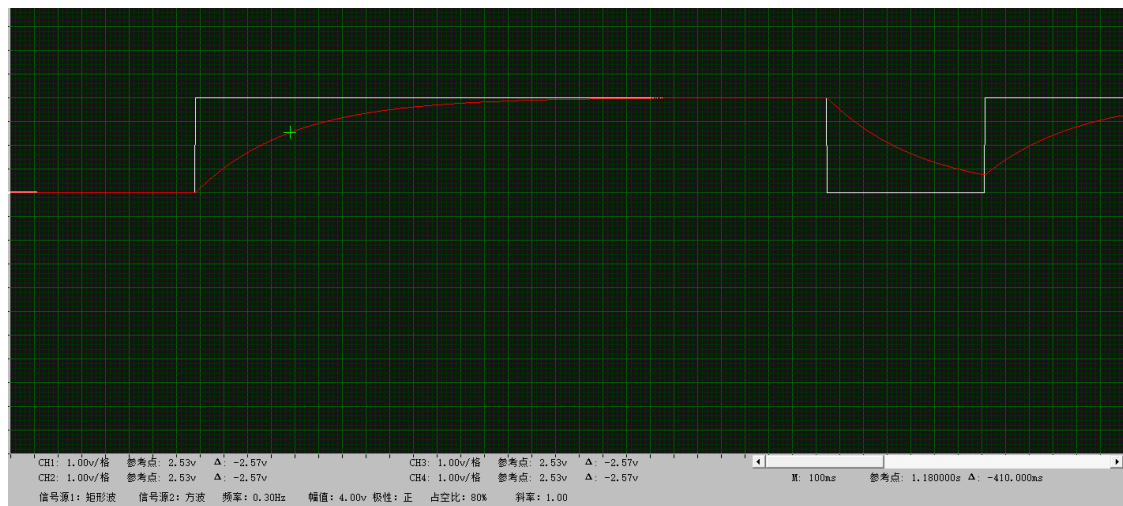


图 5.3 (b)  $(R_1, C) = (200\text{ k}\Omega, 2\text{ }\mu\text{F})$  时的惯性环节输入输出波形

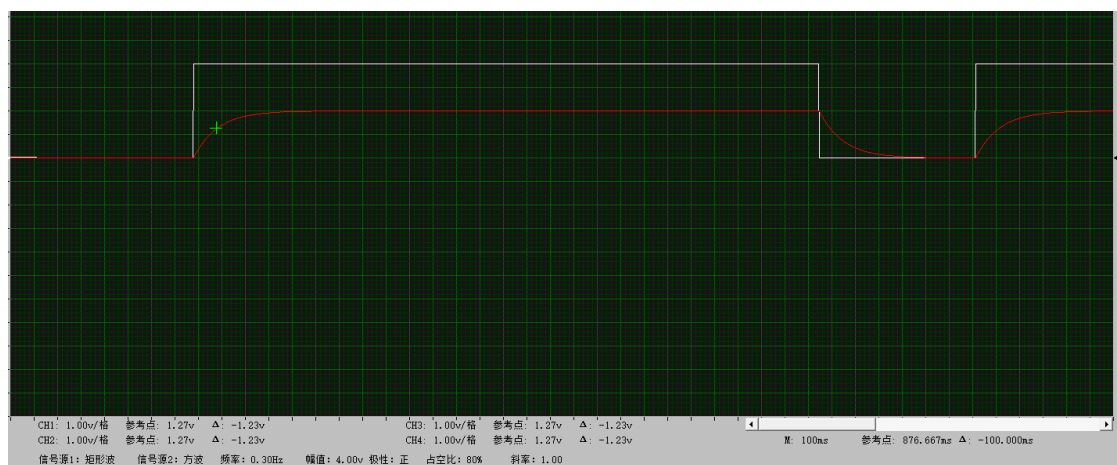


图 5.3 (c)  $(R_1, C) = (100\text{ k}\Omega, 1\text{ }\mu\text{F})$  时的惯性环节输入输出波形

由图可知，阶跃发生时间 $t_1 = 773.3\text{ ms}$ ，测量出各情况下变为幅值 0.63 的时间 $t_2$ ，根据实验原理得出时间常数 $T$ ，并和其理论值 $T_0$ 进行比较。三种情况下时间常数的测量如表 1.5 所示。



表 5.3 惯性环节时间常数测量及误差 ( 时间单位均为 ms )

$(R_1, C)$	$t_1$	$t_2$	$T = t_2 - t_1$	$T_0$	误差 $u_r = \frac{ T-T_0 }{T_0}$
$(200k\Omega, 1\ \mu F)$	773.3	973.3	200.0	200	0%
$(200k\Omega, 2\ \mu F)$	770.0	1180.0	410.0	400	2.5%
$(100k\Omega, 1\ \mu F)$	776.7	876.7	100.0	100	0%

4. 比例微分环节

$R_0$ 分别为 200  $k\Omega$ , 500  $k\Omega$ 时，波形如图 5.4(a)，(b) 所示。

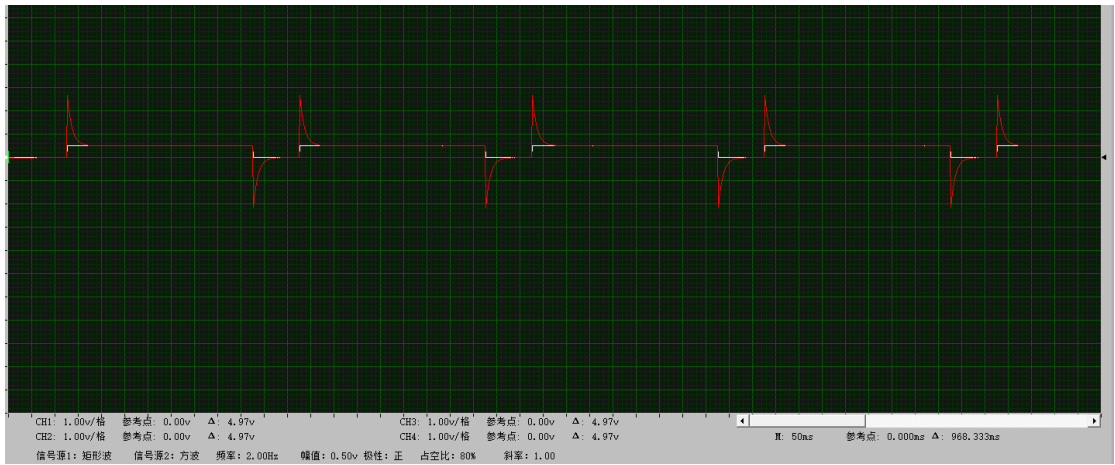


图 5.4 (a)  $R_0 = 200\ k\Omega$  时比例微分环节输入输出波形

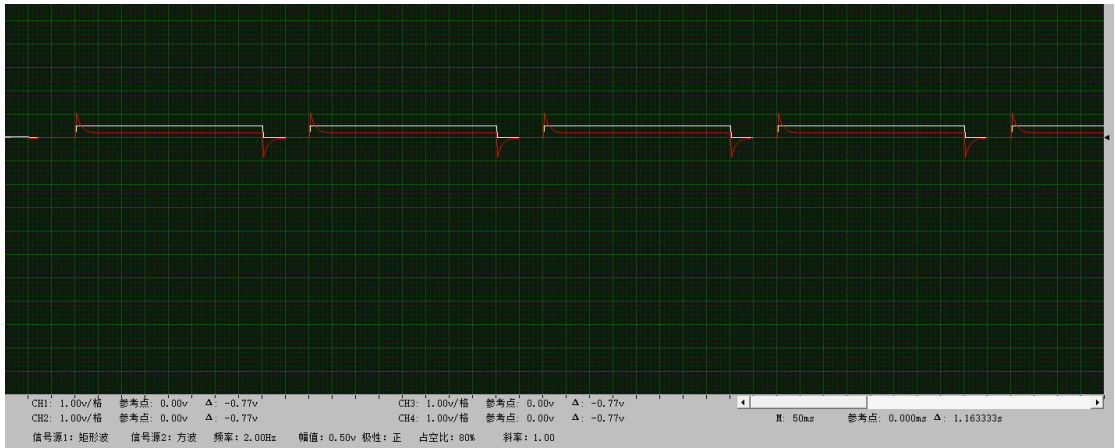


图 5.4 (b)  $R_0 = 500\ k\Omega$  时比例微分环节输入输出波形

由图可知，输入信号为低电平时，输出信号的幅值减小至 0；当输入信号处于高电平时，根据前述的传递函数关系，输出信号的幅值增长并逐渐稳定至稳态值。瞬态响应与稳态响应均和 $R_0$ 值成反比。

5. 比例积分环节

$C$ 分别为 1  $\mu F$ , 2  $\mu F$ 时，波形如图 5.5(a)，(b) 所示。

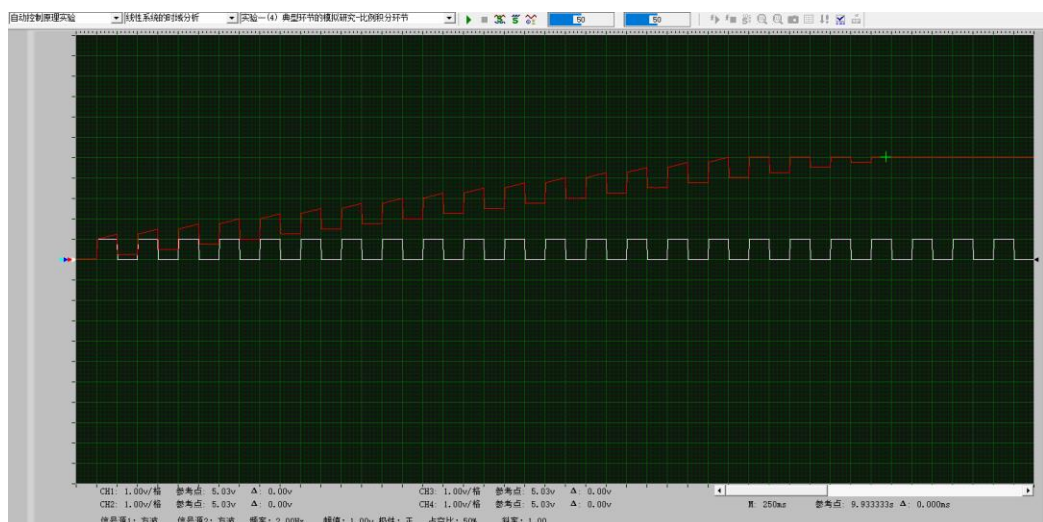


图 5.5 (a)  $C=2\ \mu F$  时的比例积分环节输入输出波形

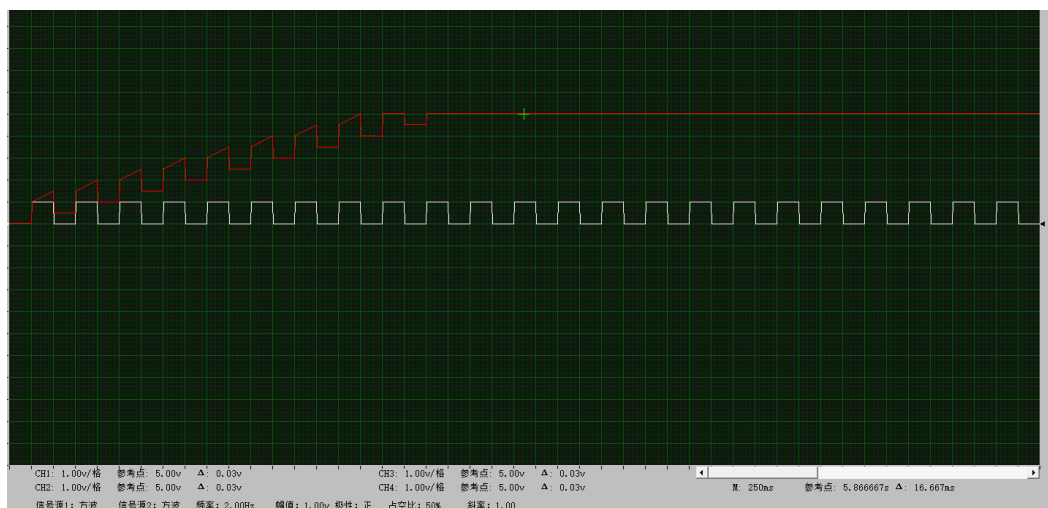


图 5.5 (b)  $C=1\ \mu F$  时的比例积分环节输入输出波形

由图可知，输入信号为低电平时，输出信号的幅值与输入同幅减小；当输入信号处于高电平时，根据前述的传递函数关系，输出信号的幅值增长并逐渐稳定至稳态值。与积分环节类似，稳态值大小（5v）与电容无关，上升时间随电容值的减小而减小。

## 6. 振荡环节

$R$  分别为  $4\ k\Omega$ ， $40\ k\Omega$ ， $400\ k\Omega$  时，波形如图 5.6(a)，(b)，(c) 所示。

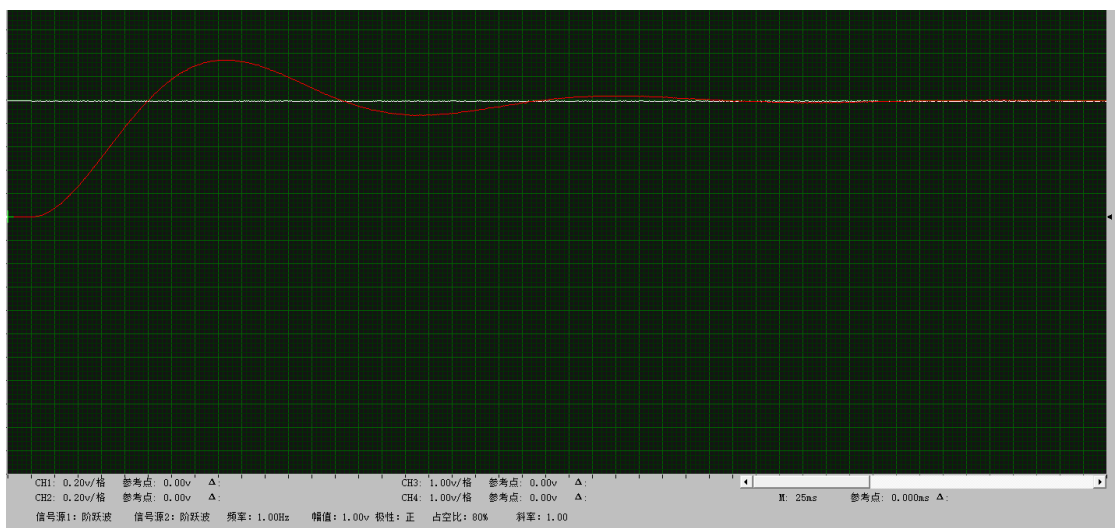


图 5.6 (a)  $R=4\text{ k}\Omega$

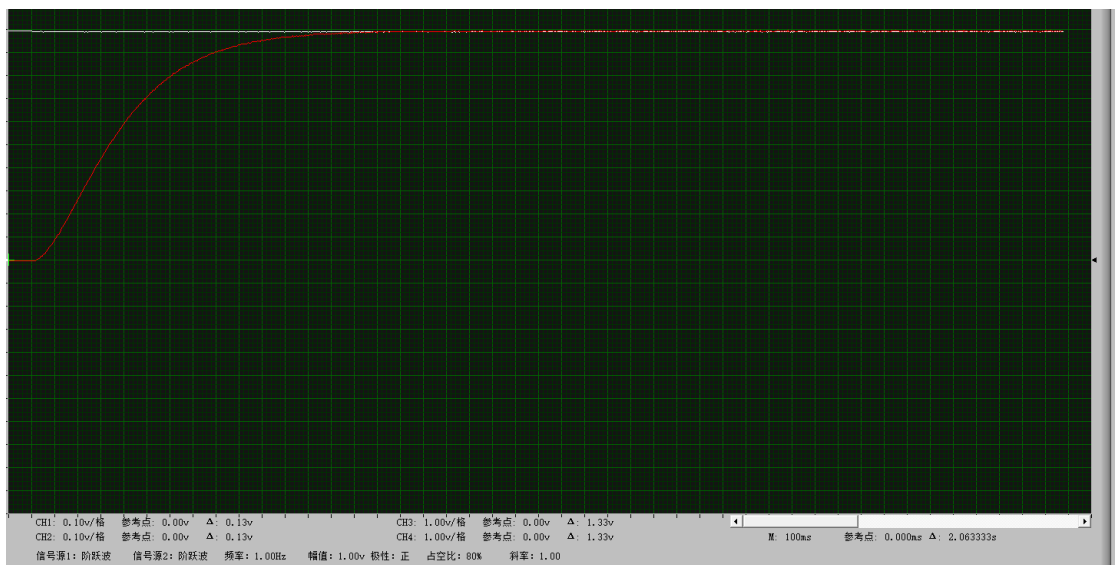


图 5.6 (b)  $R=40\text{ k}\Omega$

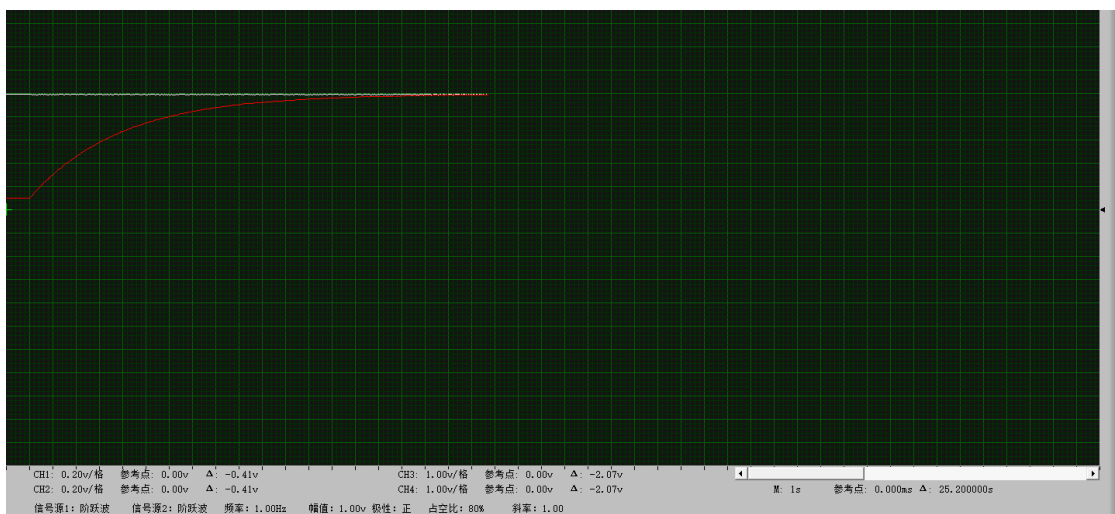


图 5.6 (b)  $R=400\text{ k}\Omega$

根据前述的传递函数关系与产生振荡的范围可得波形如上所示。

## 六、思考题

1、实验中阶跃信号的幅值和宽度（高电平）应如何考虑为宜？

（1）幅值：研究系统的稳定性和动态性能时，通常使用一个固定的幅值来保证实验条件的一致性。运算放大器的输出电压的有大小限制，因此应计算出输出电压幅值的最大值，并使其不超过电源电压，使运算放大器工作在放大区，避免失真。

（2）宽度：需要满足观察和记录系统响应的要求。如果宽度太短，可能无法清晰地观察到系统的瞬态过程和稳态行为；而过长的宽度则可能导致实验时间过长，影响实验效率。

2、积分环节和惯性环节的主要差别是什么？在什么条件下惯性环节可视为积分环节？能否通过实验来验证？

（1）主要差别：积分环节主要用于消除系统的稳态误差，它能够对输入信号进行积分运算，使输出随着时间的积累而不断增长，直到系统误差为零；而惯性环节主要用于模拟具有惯性特性的物理系统，会使系统的输出逐渐趋近于一个稳态值，而不会无限制地增长。

（2）当 $T = R_1C \gg 1$ 时，惯性环节可认为是积分环节。

（3）将 $R_1$ 阻值设为很大。

3、如何通过实验测定惯性环节的时间常数？将测定的结果与理论值进行比较。

测定原理见 [五、实验结果和分析——3. 惯性环节——对惯性环节时间常数的讨论](#)；

具体计算及比较见[表 5.3。](#)

## 七、实验小结

本次实验是第一次控制原理实验。这次实验的任务相对简单，是对一些典型环节的电路实现。初次实验略显局促，尽管老师细致讲解，但动手操作波形示意时仍遇到困难，我们花了些时间认识实验设备和软件。这次实验我们主要熟悉了硬件设备和软件的操作与使用，学会如何使用短路套接入电阻，调节电源的输出，利用电脑使用数字示波器观测波形。在撰写报告过程中，我们也复习了控制原理的相关知识，如系统传递函数的求法、系统的上升时间等。同时，在实验电路中加入反相器的环节使分析更严谨与准确。