

哈尔滨理工大学

# 实 验 报 告

实验课程名称 自动控制理论 I

实验场所名称 自动控制理论与计算机控制技术实验室

实验场所代码 155104J

实验室房间号 A401

实验日期

指导教师姓名 赵阳

实验总评成绩

实 验 日 期

## 实验室安全管理个人注意事项

1. 进入实验室工作、实验和研究人员必须进行实验室安全承诺，务必遵守学校及实验室各项规章制度和仪器设备操作规程。
2. 熟悉紧急情况下的逃离路线和紧急应对措施，清楚急救箱、灭火器材、紧急洗眼装置和冲淋器的位置。
3. 进行实验操作时，在做好个人防护的同时，要根据实验风险需要选择合适的实验个体防护用品。使用前应确认其使用范围、有效期及完好性等，熟悉其使用、维护和保养方法。
4. 不得在实验室吸烟、饮食、储存食品、饮料等个人生活物品；不得做与实验、研究无关的事情。
5. 触电事故特点：
  - 5.1 被电击会导致人身伤害，甚至死亡；
  - 5.2 短路有可能导致爆炸和火灾；
  - 5.3 电弧或火花会点燃物品或者引燃具有爆炸性的物料；
  - 5.4 冒失地开启或操作仪器设备可能导致仪器设备的损坏，使身体受伤；
  - 5.5 电器过载会令其损坏、短路或燃烧。
6. 触电事故的预防：
  - 6.1 检查电线、插座和插头，一旦发现损坏要立即更换。
  - 6.2 仪器设备开机前要先熟悉该仪器设备的操作规程，确认状态完好后方可接通电源。
  - 6.3 当手、脚或身体沾湿或站在潮湿的地上时，切勿启动电源开关或接触电器用具。
7. 触电事故应急措施：
  - 7.1 使触电者脱离电源：应立即切断电源，可以采用关闭电源开关，用干燥木棍挑开电线或拉下电闸。救护人员注意穿上绝缘靴或站在干燥木板上，尽快使伤员脱离电源。
  - 7.2 检查伤员：触电者脱离电源后，应迅速将其移到通风干燥的地方仰卧，并立即检查伤员情况。
  - 7.3 急救并求医：根据受伤情况确定处理方法，对心跳、呼吸停止的，立即就地采用人工心肺复苏方法抢救，并及时拨打 120 急救电话。应坚持不懈地做心肺复苏，直到医生到达。

**上述注意事项请仔细阅读后签字确认！**

参加实验人员：\_\_\_\_\_（签名）

日 期： 年 月 日

## 一、实验过程记录

实验名称	实验二				
课程目标	通过本课程学习，使学生做到各章概念融会贯通，解题方法灵活运用，分析解决实际问题。从宏观角度把握课程的体系结构，掌握自动化及相关领域的基础理论，建立起自动控制理论的基本框架。				
分值		实验类型		实验项目编号	
实验学时		实验时间		实验地点	A401

## 二、预习内容（无预习内容不允许做本次实验）

### 1 实验目的：

①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。

②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。

③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。

④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，并与理论计算值作比对。

### 2 实验原理图：

下图 1 所示的是一个典型 I 型二阶单位反馈闭环系统。

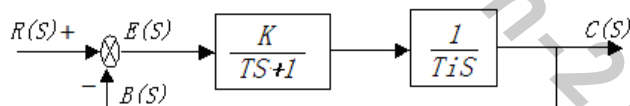


图 1 典型 I 型二阶单位反馈闭环系统

在实验中，我们通过使用实验箱上的电路结构建立了 I 型二阶闭环系统模拟电路见图 2，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，观察阻尼比  $\xi$  对该系统的过渡过程的影响。

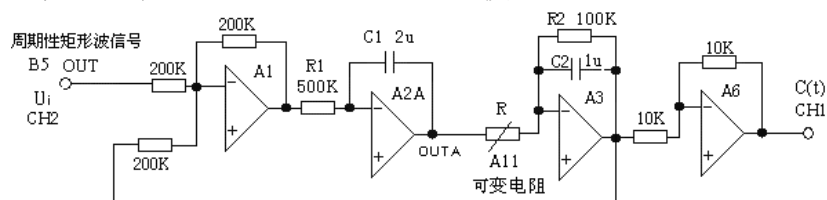


图 2 I 型二阶闭环系统模拟电路

## 三、实验内容：

### 1 实验方法及步骤：

#### ● 实验方法

1. I型二阶闭环系统模拟电路见实验指导书图 2-2，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，观察阻尼比 $\xi$ 对该系统的过渡过程的影响。

2. 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。

3. 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。

4. 实验箱连线图参考实验指导书表 1。注：‘S ST’ 用“短路套”短接！

## ● 实验步骤

(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=1V 单位阶跃信号 (D1 单元右显示)。

(2) 运行、观察、记录：

① 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。

② 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) 的系统阶跃响应实际响应曲线。

## 2 实验过程记录：

## ● 实验前系统参数和理论值的计算过程

在实验开始前需要先根据公式计算出系统参数和理论值，方便后续与测量值做对比分析，下图 3、4、5 分别为当阶跃信号输入时二阶闭环系统在欠阻尼，临界阻尼，过阻尼的情况下，系统参数和动态性能指标  $M_p$ 、 $t_p$ 、 $t_s$  值的计算过程。

① 欠阻尼 ( $R=4k\Omega$ )

$$K = \frac{R_2}{R} = \frac{100k}{4k} = 25$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{T_1 T}} = \sqrt{\frac{25}{0.1}} = 15.8 \text{ rad/s}$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_1}{K T}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{25 \times 0.1}} = 0.316$$

$$M_p = e^{\frac{-\zeta \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \times 100\% = e^{\frac{-0.316 \times \pi}{\sqrt{1-0.316^2}}} = 35.1\%$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} = \frac{\pi}{15.8 \sqrt{1-0.316^2}} = 0.210 \text{ s}$$

$$t_s = \frac{3}{\zeta \omega_n} = \frac{3}{0.316 \times 15.8} = 0.600 \text{ s}$$

图3 二阶闭环系统欠阻尼系统参数和性能指标计算过程

② 临界阻尼 ( $R=40k\Omega$ )

$$K = \frac{R_2}{R} = \frac{100k}{40k} = 2.5$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{T_1 T}} = \sqrt{\frac{2.5}{0.1}} = 5 \text{ rad/s}$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_1}{K T}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{2.5 \times 0.1}} = 1.000$$

$$t_s = \frac{3}{\zeta \omega_n} = \frac{3}{1.000 \times 5} = 0.600 \text{ s}$$

图4 二阶闭环系统临界阻尼系统参数和性能指标计算过程

③ 过阻尼 ( $R=70k\Omega$ )

$$K = \frac{R_2}{R} = \frac{100k}{70k} = 1.43$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{T_1 T}} = \sqrt{\frac{1.43}{0.1}} = 3.78 \text{ rad/s}$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_1}{K T}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{1.43 \times 0.1}} = 1.320$$

$$t_s = \frac{3}{\zeta \omega_n} = \frac{3}{1.320 \times 3.78} = 0.600 \text{ s}$$

图5 二阶闭环系统过阻尼系统参数和性能指标计算过程

- 记录实验数据和实验曲线

搭建好电路后，使用虚拟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) 的系统阶跃响应实际响应曲线。下图 6 为我们小组在实验过程中正确操作后得到的曲线图。

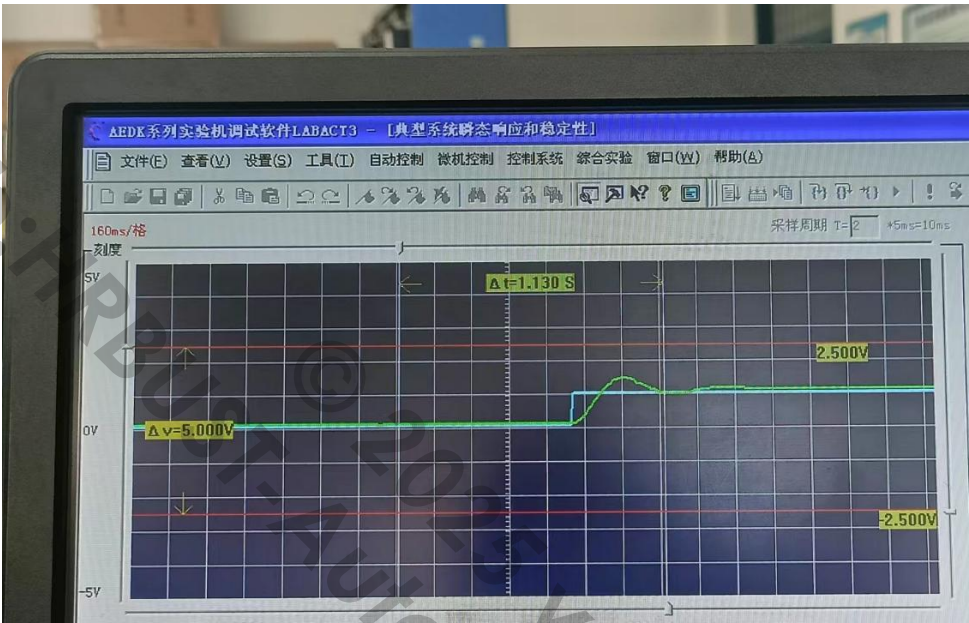
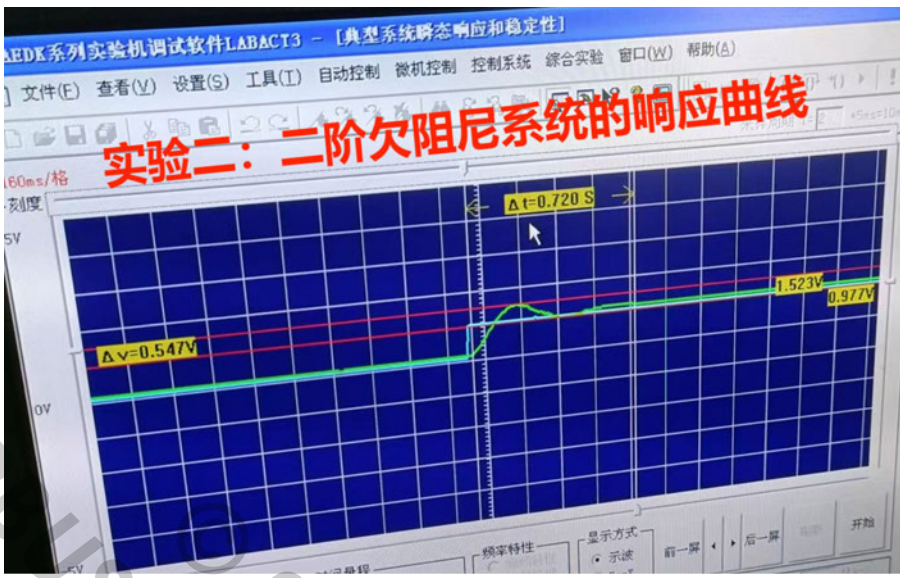
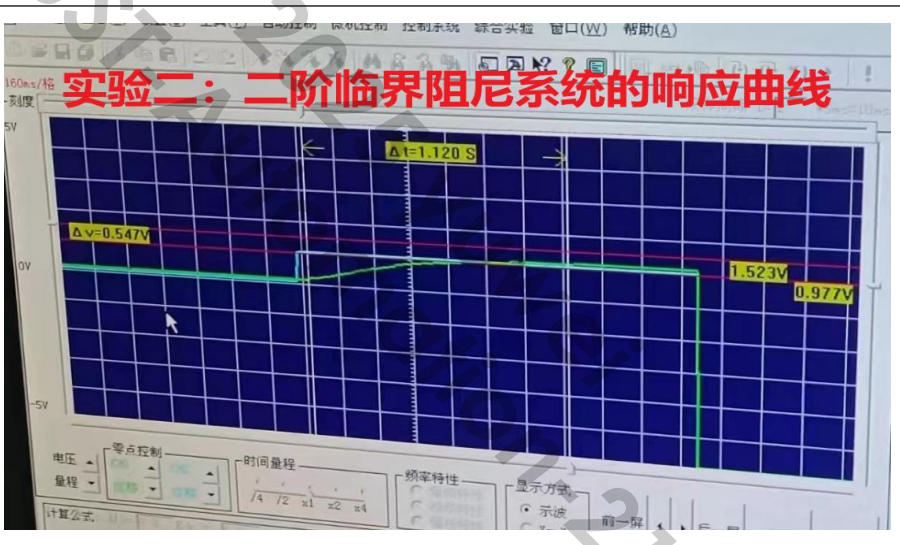
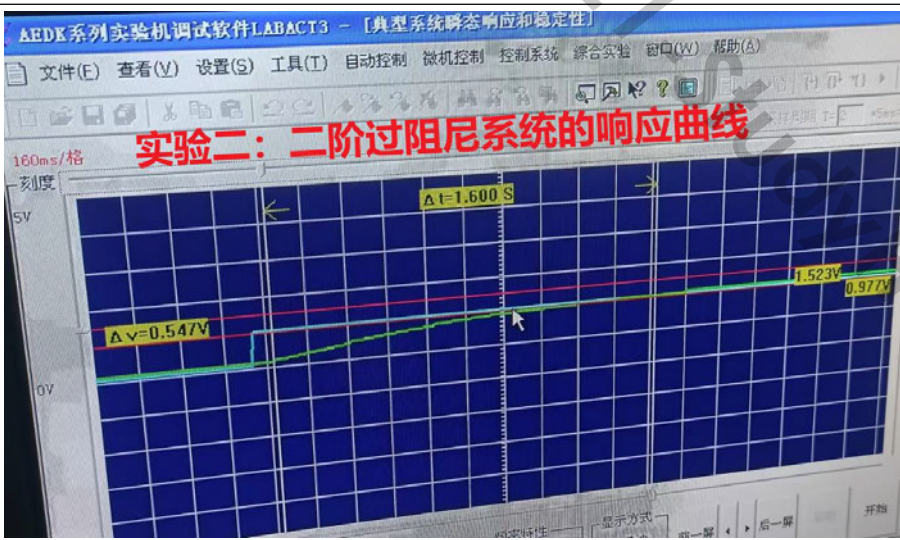


图 6 实验过程中得到的曲线

### 3 实验数据处理（数据、曲线、图表）：

参数 项目	R (KΩ)	K	$\omega_n$	$\xi$	C (tp)	C (∞)	Mp (%)		tp (s)		ts (s)		响应 曲线
							理论 值	测量 值	理论 值	测量 值	理论 值	测量 值	
$0 < \xi < 1$ 欠阻 尼	4	25	15.8	0.316	1.523	1.000	35.1	54.7	0.210	0.230	0.600	0.720	
$\xi = 1$ 临界 阻尼	40	2.5	5	1.000	1.000	1.000					0.600	0.652	
$\xi > 1$ 过阻 尼	70	1.43	3.78	1.320	1.000	1.000					0.600	1.040	



欠阻尼	<p>响应曲线</p> 
临界阻尼	
过阻尼	

#### 四、实验结果分析（实验误差、现象、分析）

当阶跃信号输入时，二阶闭环系统在欠阻尼、临界阻尼、过阻尼这三种情况下的瞬态响应曲线表现出不同的特性。以下是对每种情况的实验结果分析：

### ● 欠阻尼情况下的瞬态响应曲线

①实验现象：通过观察实验过程中拍摄的图片，可以发现欠阻尼情况下的瞬态响应曲线出现明显的振荡，瞬态响应曲线出现周期性的波动。振荡的周期相对较长，衰减缓慢。

②实验误差分析：通过对比  $M_p$ 、 $t_p$ 、 $t_s$  的理论值和测量值，可以分别计算出它们的误差， $\Delta M_p = 55.84\%$ ， $\Delta t_p = 9.52\%$ ， $\Delta t_s = 20\%$ ，实验结果可能受到环境干扰、测量误差等因素的影响，导致振荡频率和阻尼比的测量存在一定误差。

也有可能源于对系统动力学特性的理论模型分析不足，以及实际系统中存在的非理想性。如果以后有机会的话，可以进一步改善系统模型的准确性，考虑更多系统特性，以及对实验环境的更好控制，以减小这样的误差。

③结构参数影响分析：无阻尼振荡频率  $\omega_n$  对振荡的频率起主导作用， $\omega_n$  较大，导致振荡频率高，振荡周期长，对系统的动态性能影响显著。由于欠阻尼， $\xi$  较小，振荡的衰减较慢，导致振荡在系统中长时间持续。

④过渡过程的影响：在系统处于欠阻尼情况下，由于振荡的存在，系统达到稳态所需的时间相对较长，影响振荡过渡时间。同时因为振荡，超调量  $M_p$  较大，过渡时间  $t_p$  较长，稳态误差  $t_s$  较大。

### ● 临界阻尼情况下的瞬态响应曲线

①实验现象：通过观察实验过程中拍摄的图片，可以发现临界阻尼情况下的瞬态响应曲线呈现快速的衰减过程，没有振荡，衰减迅速。并且达到稳态的速度比欠阻尼情况下更快。

②实验误差分析：通过对比  $t_s$  的理论值和测量值，可以计算出误差， $\Delta t_s = 8.66\%$ ，实验结果可能受到如电阻值、电容值的准确性影响。也有可能源于环境因素，如温度变化等，对实验结果产生一定的影响。

③结构参数影响分析：临界阻尼情况下，系统刚好达到最快的衰减速度，无阻尼振荡频率  $\omega_n$  和阻尼比  $\xi$  对系统的动态性能共同影响。无阻尼振荡频率  $\omega_n$  较高，但在临界阻尼情况下并未显示出其对振荡特性的影响。阻尼比  $\xi$  正好为 1，系统在过渡过程中达到最快的衰减速度。

④过渡过程的影响：在系统处于临界阻尼情况下，由于没有明显的振荡，过渡时间较短。峰值时间短，超调量小，稳态误差小，临界阻尼下系统的动态性能较为理想。

### ● 过阻尼情况下的瞬态响应曲线

①实验现象：通过观察实验过程中拍摄的图片，可以发现在过阻尼情况下，瞬态响应曲线表现为衰减较快，没有明显的振荡现象。峰值时间相对于欠阻尼情况更短，系统更快地达到稳态。

②实验误差分析：通过对比  $t_s$  的理论值和测量值，可以计算出误差， $\Delta t_s = 73.3\%$ ，发生实验误差很大，可能的误差来源是在实验中，测量电路元件的准确数值可能受到仪器精度和实际调整的困难程度的影响。我认为产生这种结果可能的原因有：在过阻尼情况下，系统的高阶动态特性可能对调整时间有较大的影响，



而理论模型可能没有充分考虑这些特性。实验中使用的测量设备可能存在一定的误差,特别是对于过阻尼系统的动态响应,测量调整时间的准确性可能受到影响。

③结构参数影响分析:临界阻尼情况下,系统刚好达到最快的衰减速度,无阻尼振荡频率  $\omega_n$  和阻尼比  $\xi$  对系统的动态性能共同影响。无阻尼振荡频率  $\omega_n$  较高,但在临界阻尼情况下并未显示出其对振荡特性的影响。阻尼比  $\xi$  正好为 1,系统在过渡过程中达到最快的衰减速度。

④过渡过程的影响:在系统处于临界阻尼情况下,由于没有明显的振荡,过渡时间较短。峰值时间短,超调量小,稳态误差小,临界阻尼下系统的动态性能较为理想。

## ● 总结

无阻尼振荡频率  $\omega_n$  和阻尼比  $\xi$  是影响系统动态性能的关键参数。 $\omega_n$  的增大导致振荡频率的提高,系统的动态响应更为迅速。阻尼比  $\xi$  对系统的动态性能有着显著影响,过阻尼时提高系统的稳定性,欠阻尼时引起振荡,而临界阻尼则使系统在最短时间内达到稳态。

而实验误差可能来自于多个方面,包括参数测量误差、理论模型偏差和实验测量精度。实际系统可能具有更为复杂的动态特性,而理论模型未能完全捕捉这些特性,导致实验结果与理论计算之间的差异。

## 一、实验过程记录

实验名称	实验三				
课程目标	通过本课程学习，使学生做到各章概念融会贯通，解题方法灵活运用，分析解决实际问题。从宏观角度把握课程的体系结构，掌握自动化及相关领域的基础理论，建立起自动控制理论的基本框架。				
分值		实验类型		实验项目编号	
实验学时		实验时间		实验地点	

## 二、预习内容（无预习内容不允许做本次实验）

### 1 实验目的：

1. 了解和掌握线性控制系统的对数幅频特性  $L(\omega)$  和相频特性  $\varphi(\omega)$ ，实频特性  $\text{Re}(\omega)$  和虚频特性  $\text{Im}(\omega)$  的计算。
2. 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。
3. 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。
4. 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。

### 2 实验原理图：

一阶惯性环节  $G(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(S)} = \frac{K}{1+TS}$  的频率特性测试电路如图 1 所示。

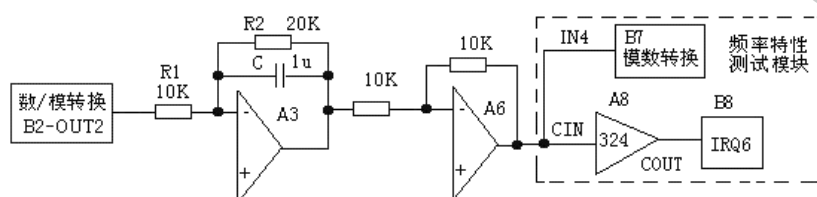


图 1 惯性环节的频率特性测试电路

二阶闭环欠阻尼系统的频率特性测试电路如图 2 所示。

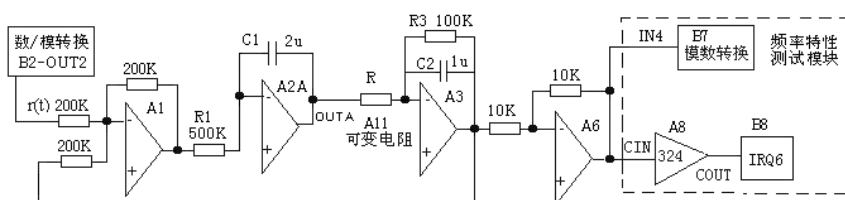


图 2 二阶闭环系统频率特性测试电路

### 三、实验内容：

#### 1 实验方法及步骤：

##### ● 实验方法

一阶惯性环节 ( $G(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(S)} = \frac{K}{1+TS}$ ) 的频率特性测试电路如图 1 所示，改变被测系统的各项电路参数，画出其频率特性曲线，并计算和测量其转折频率，填入实验表格里。二阶闭环欠阻尼系统的频率特性测试电路如图 2 所示，观测二阶闭环系统的频率特性曲线，测试其谐振频率  $\omega_r$ 、谐振峰值  $L(\omega_r)$ 。改变一阶惯性环节电路参数，即改变惯性时间常数  $T$ ，画出其系统模拟电路图，并计算和测量系统转折频率 ( $\varphi = 45^\circ$ ) 测量值和计算值，填入实验表格。

改变二阶闭环系统电路参数，画出其系统闭环频率特性曲线，并计算和测量系统的谐振频率  $\omega_r$  及谐振峰值  $L(\omega_r)$ ，填入实验表格。

##### ● 实验步骤

1. 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：分别按图 3-1、图 3-2 联线。
3. 运行、观察、记录：

① 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’表如图 3-3 所示，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  $\phi(\omega)$ ，则可在该表的扫描点上小框内点击

一下（打  $\checkmark$ ）。“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。

② 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)。

③ 显示该系统用户点取的频率点的  $\omega$ 、 $L$ 、 $\varphi$ 、 $Im$ 、 $Re$ 。

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（为了教育上的方便，本实验机选取的频率值  $f$ ，以 0.1Hz 为分辨率），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  $f$ 、 $\omega$ 、 $L$ 、 $\varphi$ 、 $Im$ 、 $Re$  相关数据，同时在曲线上打‘十字标记’。

#### 2 实验过程记录：

## ● 实验前系统参数和理论值的计算过程

在实验开始前先计算一阶惯性环节转折频率,计算过程和结果如下图1所示。  
再计算二阶闭环系统的谐振频率及谐振峰值,计算过程和结果如下图2所示。

$$\text{一阶惯性环节转折频率: } (\varphi = 45^\circ)$$

$$\omega = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.02} = 50 \text{ rad/s}$$

图1 一阶惯性环节转折频率计算过程

$$\text{I型二阶闭环系统的谐振频率和谐振峰值:}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{T_1}} = \sqrt{\frac{25}{0.1}} = 15.8 \text{ rad/s}$$

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_1}{K T_2}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{0.1 \times 25}} = 0.316$$

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2} = 15.8 \sqrt{1 - 2 \times 0.316^2} = 14.134 \text{ rad/s}$$

$$L(\omega_r) = 20 \lg \frac{1}{2\xi \sqrt{1 - \xi^2}} = 20 \lg \frac{1}{2 \times 0.316 \sqrt{1 - 0.316^2}} = 4.443 \text{ dB}$$

图2 二阶闭环系统的谐振频率及谐振峰值计算过程

## ● 记录实验数据和实验曲线

搭建好电路后,在电脑弹出的‘频率特性扫描点设置’表中,勾选扫描点,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。等待十分钟左右,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)。下图3为我们小组在实验过程中正确操作后得到的曲线图之一。将鼠标对准谐振峰值点,可以从屏幕的左下角读取相关的数据。

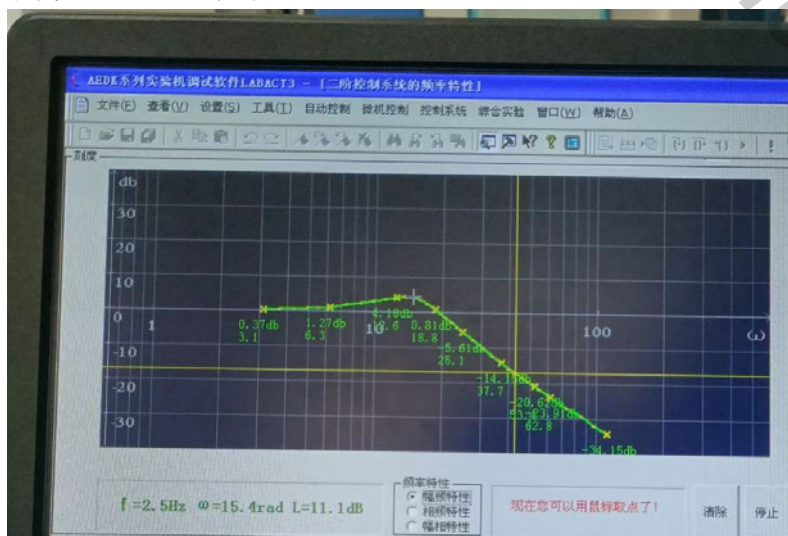


图3 实验过程中得到的曲线

### 3 实验数据处理（数据、曲线、图表）：

1).记录一阶惯性环节、I 型二阶闭环系统的波特图和极坐标图填入下表。

波特图	<p>一阶惯性环节波特图</p>	<p>二阶系统波特图</p>
	<p>一阶惯性环节波特图-相频特性</p>	<p>二阶系统波特图-相频特性</p>
极坐标图	<p>一阶惯性环节极坐标图</p>	<p>二阶系统极坐标图</p>

2).计算和测量一阶惯性环节转折频率填入下表。

惯性时间常数 T(秒)	转折频率	
	实测值	计算值
0.02	31.3	50.0

3).计算和测量 I 型二阶闭环系统的谐振频率及谐振峰值填入下表。

开环增益 K (A3)	惯性常数 T (A3)	积分常数 Ti (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	14.1	15.4	4.4	11.1

### 四、实验结果分析（实验误差、现象、分析）

#### ● 一阶惯性环节



①实验现象：通过观察实验过程中拍摄的图片，可以发现实验获得的 bode 图和奈奎斯特图与理论曲线符合地很好，说明实验操作步骤无误。

②实验误差分析：实验误差可能来自于参数调整的不准确性和测量设备的限制。转折频率的准确测量对于正确评估系统的性能至关重要。

③惯性时间常数影响分析：在本次实验中对于一阶惯性环节来说只做了一个实验，因此不能较为直观地感受到随着惯性时间常数的增加，观察到的转折频率可能呈现不同的变化趋势。但是我们可以大胆猜想增大惯性时间常数可能使系统响应变得更加缓慢。惯性时间常数  $\tau$  表征系统对输入变化的响应速度，增大  $\tau$  会导致系统的动态响应变缓慢，从而影响转折频率。这是一种妥协，即在提高系统稳定性的同时，牺牲了系统的动态性能。

## ● I 型二阶闭环系统

①实验现象：通过观察实验过程中拍摄的图片，可以发现实验获得的 bode 图和奈奎斯特图与理论曲线大致符合 I 型二阶闭环系统欠阻尼情况下的曲线。自然频率  $\omega_n$  较高，系统趋向于以高频率振荡，阻尼比  $\xi$  较小，系统振荡的幅值较大。根据实验数据可以发现，系统振荡的非常明显，这是由于振荡频率较高，且振幅较大。

②实验误差分析：实验误差可能来自于参数调整的不准确性、测量设备的限制以及系统模型与实际系统之间的差异。

③参数影响分析：在欠阻尼情况下，系统可能表现出明显的振荡现象，其特性受到自然频率和阻尼比的共同影响。自然频率的增加可能导致振荡频率的提高，系统响应更为迅速。阻尼比的减小可能导致系统振荡的幅值增加，但同时也增加了系统振荡的周期。

## ● 总结

通过实验得到的一阶惯性环节和一型二阶闭环欠阻尼系统的波特图和极坐标图为我们提供了深入理解系统动态性能的洞察。在一阶惯性环节中，我们观察到随着惯性时间常数的增加，系统的转折频率呈现出变缓慢的趋势。这反映了惯性时间常数对系统响应速度的影响，即增大惯性时间常数可能导致系统的动态响应变得更为缓慢。这种现象在实际应用中意味着在提高系统稳定性的同时，系统的动态性能可能受到一定程度的牺牲。

对于一型二阶闭环系统，在欠阻尼情况下，波特图和极坐标图展现了系统振荡的特征。观察到的振荡现象揭示了自然频率和阻尼比对系统的共同影响。欠阻尼情况下，系统可能表现出高频率、大振幅的振荡，反映了自然频率较高、阻尼比较小的特性。这样的动态行为在系统设计中需要仔细权衡，因为高频率振荡可能影响系统的稳定性。总体而言，通过波特图和极坐标图的观察和分析，我们更好地理解了系统在不同工作条件下的动态性能。这为系统设计和调优提供了重要的指导。

## 一、实验过程记录

实验名称	实验四				
课程目标	通过本课程学习，使学生做到各章概念融会贯通，解题方法灵活运用，分析解决实际问题。从宏观角度把握课程的体系结构，掌握自动化及相关领域的基础理论，建立起自动控制理论的基本框架。				
分值		实验类型		实验项目编号	
实验学时		实验时间		实验地点	

## 二、预习内容（无预习内容不允许做本次实验）

### 1 实验目的：

1. 了解和掌握串联比例微分校正的原理。
2. 了解和掌握利用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。
3. 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。

### 2 实验原理图：

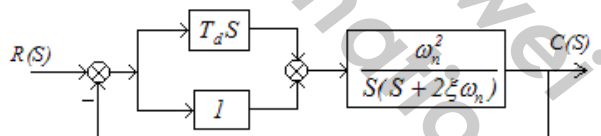


图 1 串联比例微分校正系统

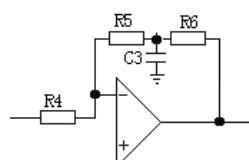


图 2 串联比例-微分校正网络

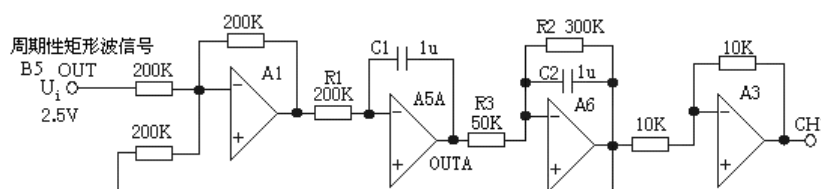


图 3 未校正系统模拟电路图

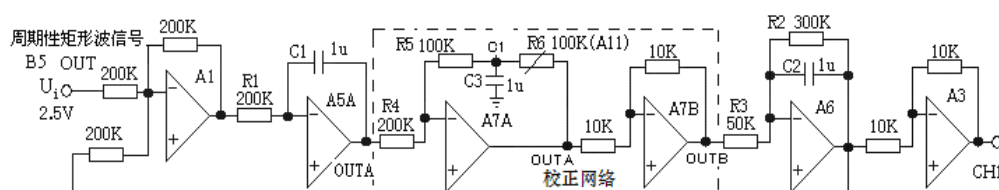


图 4 串接入比例-微分校正后系统模拟电路

### 三、实验内容：

#### 1 实验方法及步骤：

##### ● 实验方法

##### 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。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 为 1V 单位阶跃信号时被测系统的时域特性，并测量系统的超调量  $M_p$ 、峰值时间  $t_P$  及调节时间  $t_s$ 。

图 3 中未校正系统的开环传递函数为： $G(S) = \frac{6}{0.2S(1+0.3S)}$ 。模拟电路的各环节参数：积分环节（A5 单元）的积分时间常数  $T_i = R_1 \cdot C_1 = 0.2S$ ，惯性环节（A6 单元）的惯性时间常数  $T = R_2 \cdot C_2 = 0.3S$ ，开环增益  $K = R_2/R_3 = 6$ 。

##### 2. 串接入比例-微分校正后系统的时域特性的测试

① 要求设计校正装置，使系统满足下述性能指标： $M_p \leq 25\%$ ， $t \leq 1s$ 。

② 按  $M_p \leq 25\%$  要求进行计算，可得到： $\xi d \geq 0.4$ ，代入式（4-1-2）可得到： $T_d \geq 0.0467$

③ 取  $T_d = 0.05$ ，再令  $K_d = 1$ ， $C_3 = 1\mu$ ， $R_5 = 100K$  代入式（4-1-5），可得到： $R_6 = 100K$ ， $R_4 = 200K$

校正后系统模拟电路见图 4。R6 用 A11 单元的直读式可变电阻。

观察 OUT 为 1V 单位阶跃信号时被测系统的时域特性，并测量系统的超调量  $M_p$ 、峰值时间  $t_P$  及调节时间  $t_s$ 。图 4 校正后系统的开环传递函数为：

$$G(S) = \frac{6}{0.2S(1+0.3S)} \times (1+0.05S)$$

##### ● 实验步骤

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 = 1V 单位阶跃信号（D1 单元右显示）。

2. 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 1V 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。（实验过程可以加一个对各个时间的测量）

#### 2 实验过程记录：

## ● 记录实验数据和实验曲线

搭建好电路后，观察校正前后单位阶跃信号时被测系统的时域特性，并测量系统的超调量  $M_p$ 、峰值时间  $t_P$  及调节时间  $t_s$ 。在图中也就是用 X 和 Y 的光标进行测量。下图 1 所示为测量校正前系统的超调量，移动 Y 轴光标，根据  $\Delta V = 0.703$  可以读出此时超调量为 70.3%。

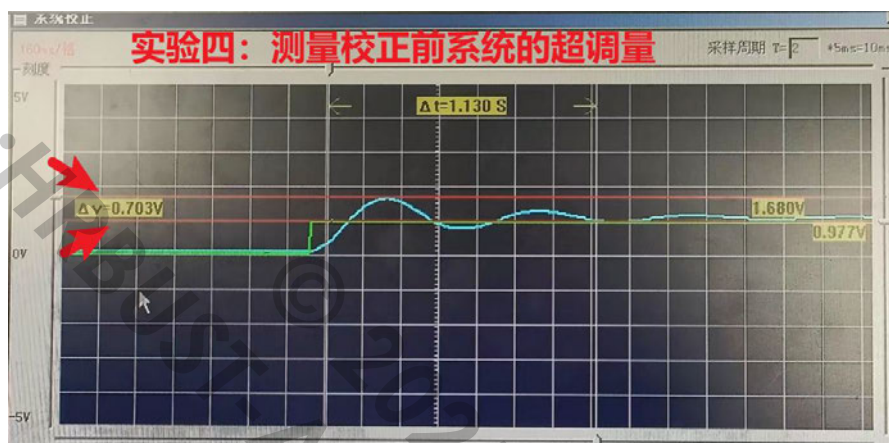


图 1 测量校正前系统的超调量曲线

测量校正前系统的调整时间。将其中一个 X 轴光标对准曲线的起始段，另一个对准当曲线进入 5% 误差带再也不出来并趋于稳定的时刻。读出  $\Delta t = 1.820$  s，如下图所示。

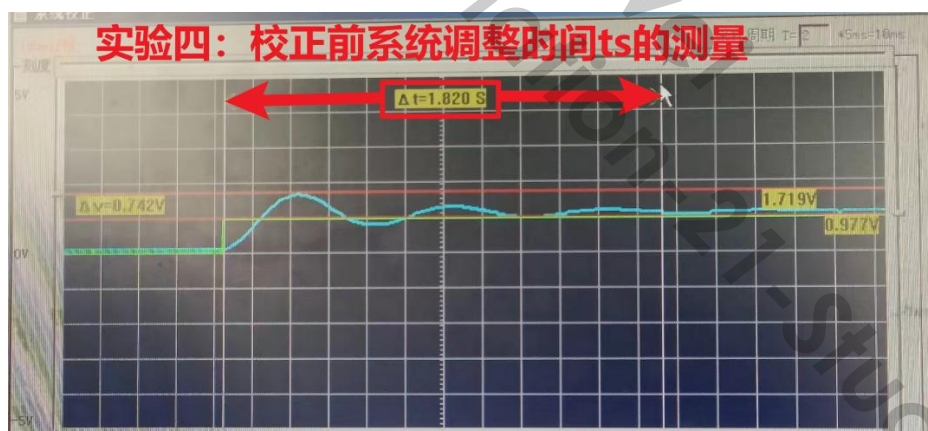


图 2 测量校正前系统的调整时间曲线

测量校正前系统的峰值时间。将其中一个 X 轴光标对准曲线的起始段，另一个对准当曲线达到峰值点的时刻，读出  $\Delta t = 0.320$  s，如下图所示。

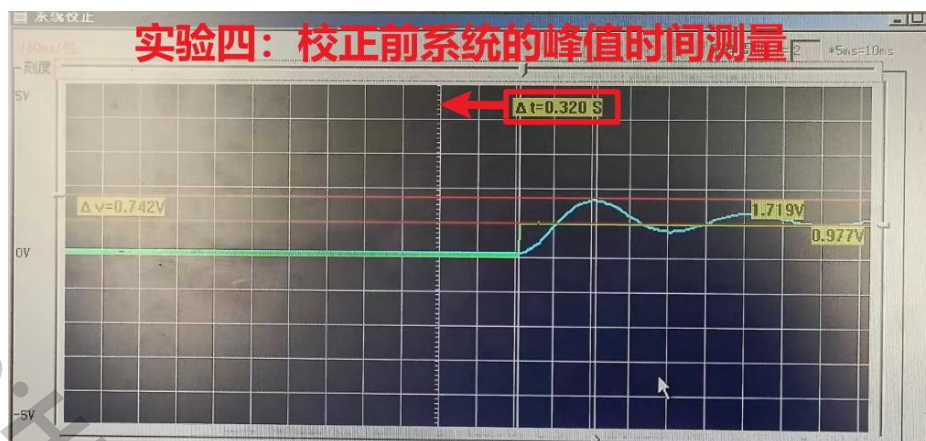


图 3 测量校正前系统的峰值时间曲线

测量校正后系统的调整时间。将其中一个 X 轴光标对准曲线的起始段，另一个对准当曲线进入 5 % 误差带再也不出来并趋于稳定的时刻。读出  $\Delta t = 0.780$  s，如下图 4 所示。

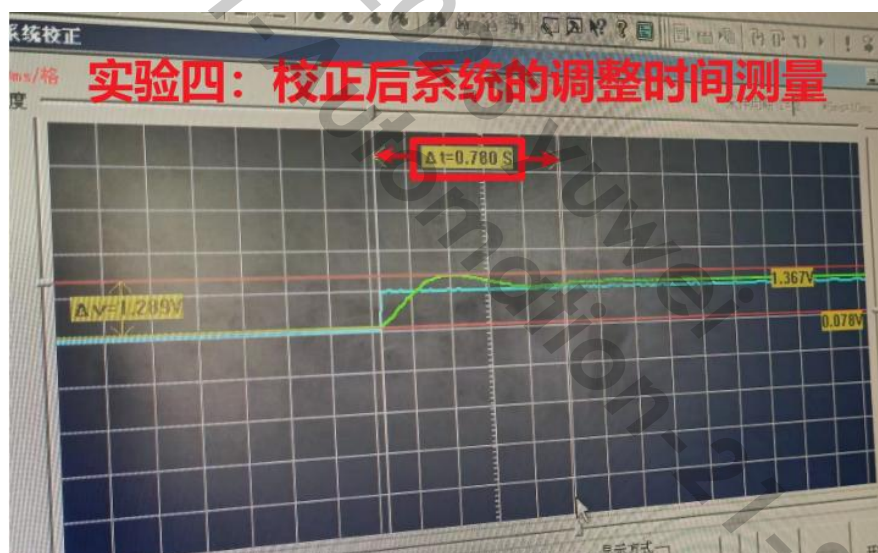


图 4 测量校正后系统的调整时间曲线

测量校正后系统的峰值时间。将其中一个 X 轴光标对准曲线的起始段，另一个对准当曲线达到峰值点的时刻，读出  $\Delta t = 0.260$  s，如下图 5 所示。

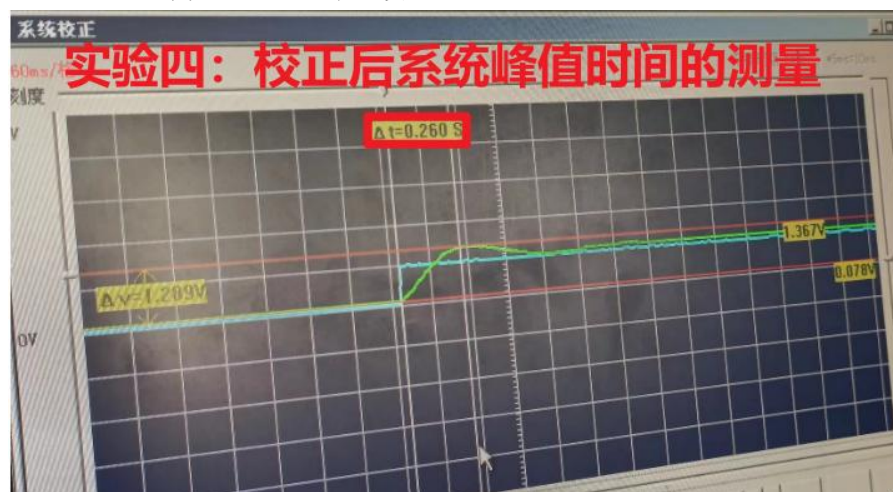




图 5 测量校正后系统的峰值时间曲线

测量校正后系统的超调量。移动 Y 轴光标，根据  $\Delta V = 1.289$  可以读出此时超调量为 28.9%，如下图 6 所示。

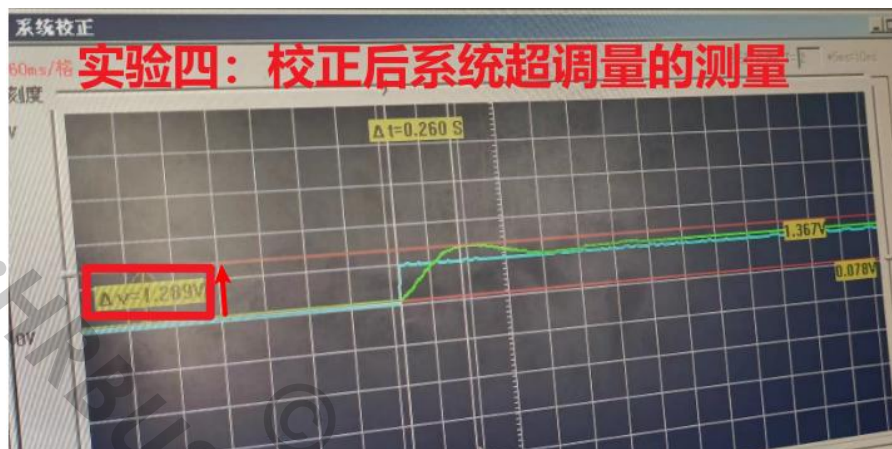


图 6 测量校正后系统的超调量曲线

### 3 实验数据处理（数据、曲线、图表）：

	超调量 Mp(%)	测 量 值		
	(设计目标)	超调量 Mp(%)	峰值时间 tp	调整时间 ts
校正后	20	28.9	0.260	0.780
校正前	20	70.3	0.320	1.820
响应曲线	校正前		校正后	

## 四、实验结果分析（实验误差、现象、分析）

### ● 系统校正前的分析

通过实验得到的曲线，我们观察到系统有明显的振荡，校正前的超调量非常高，超调量高达 70%，这导致系统在过渡过程中产生大幅度的振荡，降低了系统的稳定性。校正前系统的较长调整时间和峰值时间表明系统响应较慢，导致系统在达到稳定状态之前需要较长的时间。

### ● 系统校正后的分析

起初在开始校正时，出了一点小插曲，我们调整  $R_6 = 40K$ ，使得一开始的校正曲线如图 7 所示，超调量在 48.4%，当我们在 40K 阻值上下调整的时候，

发现超调量反而升高了,于是我们便以为这就是这个系统校正之后能达到的最好状态了。

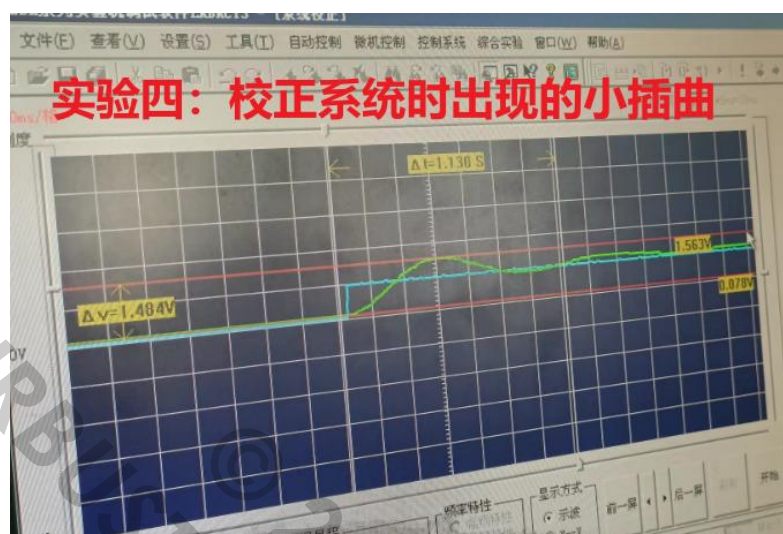


图 7 校正系统时的曲线

后来将 R 6 的值大幅度调整,又惊人地发现系统超调量可以达到 28.9%,也就是我们本次实验的最终结果,可以发现通过校正,观察到超调量显著减小,从 70%降至 28%。这表明校正后系统的动态响应更为稳定,振荡幅度减小。同时校正后的系统表现出更快的调整时间和更短的峰值时间,说明系统响应速度得到了显著提升。并且校正后的时域特性曲线变得更加平滑。这意味着系统的过渡过程更为平稳,不存在剧烈的振荡或震荡。

## ● 综合分析

接下来分析校正对系统动态性能的影响,超调量减小的原因可能是由于比例微分校正网络的引入,提高了系统的稳定性,减少了过渡过程中的振荡。时域特性曲线平滑的原因可能是因为比例微分校正网络的加入调整了系统的频率响应,减少了系统在过渡过程中的振荡和波动。调整时间和峰值时间缩短的原因可能是比例微分校正通常有助于提高系统的响应速度,因此可以解释校正后系统调整时间和峰值时间的减小。

我们小组校正前的系统超调量就高达 70%,而周围同学的校正之前的超调量平均都在 50%左右,这给我们后期调整参数到预期的超调量难度无疑增大了不少,经过我们的努力最后调整到较好的超调量表现在 28.9%,很遗憾没能达到老师要求的 20%,但是如果按照下降 30%的变化量来说,我认为我们小组的系统通过串联比例微分校正之后,表现整体来说还是比较好的,成功减小了系统的超调量,使时域特性曲线更为平滑,并显著提升了系统的调整速度。这种改善归因于校正网络对系统频率响应的调整,增强了系统的稳定性和动态性能。尽管得到了明显的改善,我们仍需要注意实验误差的可能性,确保结论的准确性和可靠性。

总体而言,校正前后的对比清晰地展示了比例微分校正对系统时域特性的显著改善。这种校正能够有效地提升系统的稳定性、减小超调量,并加速系统的动态响应。通过这次实验,我们更深入地理解了串联校正对线性系统动态特性的影响,为系统控制和调整提供了有益的经验。

## 一、实验过程记录

实验名称	实验五				
课程目标	通过本课程学习，使学生做到各章概念融会贯通，解题方法灵活运用，分析解决实际问题。从宏观角度把握课程的体系结构，掌握自动化及相关领域的基础理论，建立起自动控制理论的基本框架。				
分值		实验类型		实验项目编号	
实验学时		实验时间		实验地点	A401

## 二、预习内容（无预习内容不允许做本次实验）

### 1 实验目的：

1. 了解和掌握各种典型非线性环节的数学表达式。
2. 用相平面法观察和分析分别由模拟电路和函数发生器产生的典型非线性环节的输出特性。
3. 了解非线性控制系统的基本概念。
4. 掌握用相平面图分析非线性控制系统。
5. 观察和分析二种二阶非线性控制系统的相平面图。

### 2 实验原理图：

图 1 理想继电特性

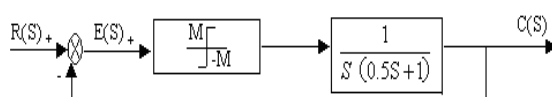


图 3 继电型非线性控制系统

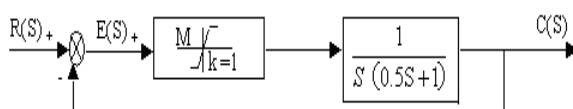


图 5 饱和型非线性控制系统

图 2 理想饱和特性

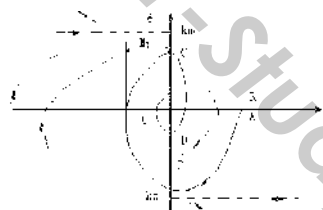


图 4 继电型非线性系统相轨迹

图 6 饱和型非线性控制系统相轨迹

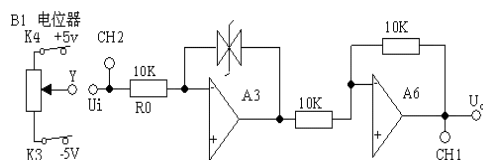


图 7 a 继电特性模拟电路

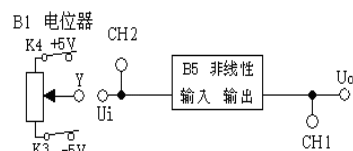


图 7 b 用函数发生器产生继电特性模拟电路

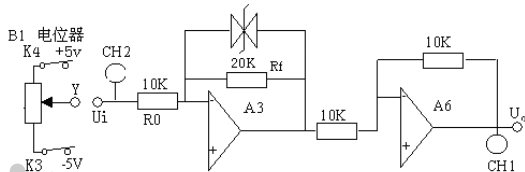


图 8 a 饱和特性模拟电路图

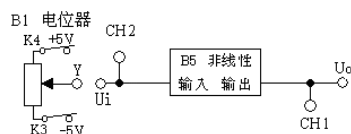


图 8 b 用函数发生器产生饱和特性模拟电路

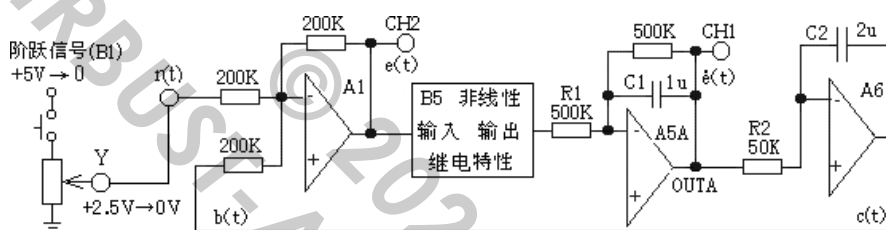


图 9 继电型非线性控制系统模拟电路

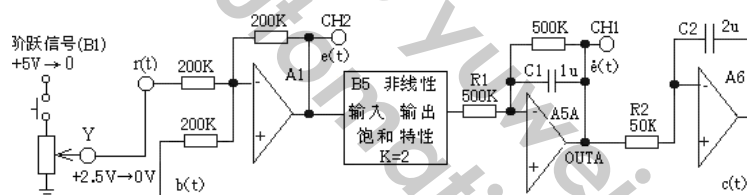


图 10 饱和型非线性控制系统模拟电路

### 三、实验内容：

#### 1 实验方法及步骤：

##### ● 实验方法

1. 用相平面法观察和分析典型继电特性的输出特性。观察参数变化对输出特性的影响，模拟电路如图 7a，图 7b 为用函数发生器产生继电特性模拟电路。

2. 用相平面法观察和分析典型继电特性的输出特性。观察参数变化对输出特性的影响，模拟电路如图 8a，图 8b 为用函数发生器产生饱和特性模拟电路。

3. 用相平面法观察和分析继电型二阶非线性控制系统的输出特性，观察参数变化对系统输出特性的影响，观测结果，填入实验报告，并画出相平面曲线。继电型二阶非线性控制系统的模拟电路如图 9，电路中所用典型继电特性模拟电路，为函数发生器（B5 单位）中提供的用 CPU 做成的典型理想非线性模块。

4. 用相平面法观察和分析饱和型二阶非线性控制系统的输出特性，观察参数变化对系统输出特性的影响，观测结果，填入实验报告，并画出相平面曲线。饱和型二阶非线性控制系统的模拟电路如图 10，电路中所用典型继电特性模拟电路，为函数发生器（B5 单位）中提供的用 CPU 做成的典型理想非线性模块。

##### ● 实验步骤

### 1. 典型继电型、饱和特性非线性环节

1) 将信号发生器 (B1) 的幅度控制电位器中心 Y 测孔, 作为系统的  $-5V \sim +5V$  输入信号 ( $U_i$ ): B1 单元中的电位器左边 K3 开关拨上 ( $-5V$ ), 右边 K4 开关也拨上 ( $+5V$ )。

2) 观察模拟电路产生的继电特性、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  $-5V \sim +5V$ ), 画出示波器上的  $U_0 \sim U_i$  图形, 实验结果填入实验报告。

3) 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。

### 2. 继电型非线性控制系统、饱和型非线性控制系统

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。

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:

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

② 调节 “设定电位器 1”, 使之幅度 =  $3.5V$  (D1 单元右显示)。

### 3) 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。

② 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较佳的观测效果。

## 2 实验过程记录:

### ● 记录实验数据和实验曲线

搭建好电路后, 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  $-5V \sim +5V$ ), 可看到电脑端示波器上显示的图形, 将实验结果拍照保存。下图 1、2 为典型继电型、饱和特性非线性环节通过实验测得的相平面曲线。



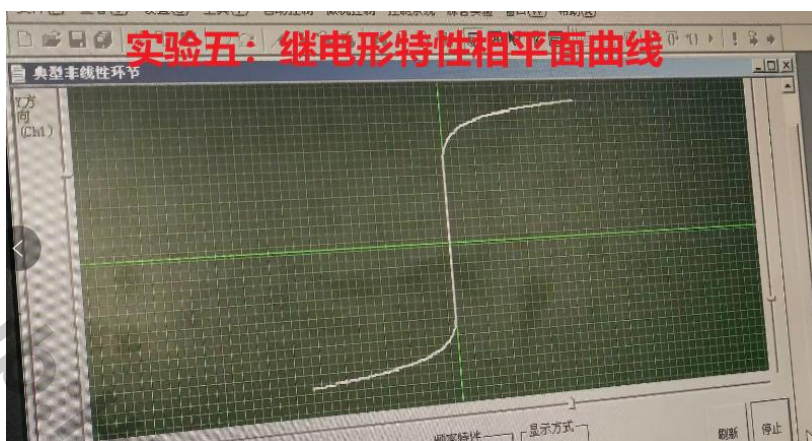


图 11 典型继电型非线性环节相平面曲线

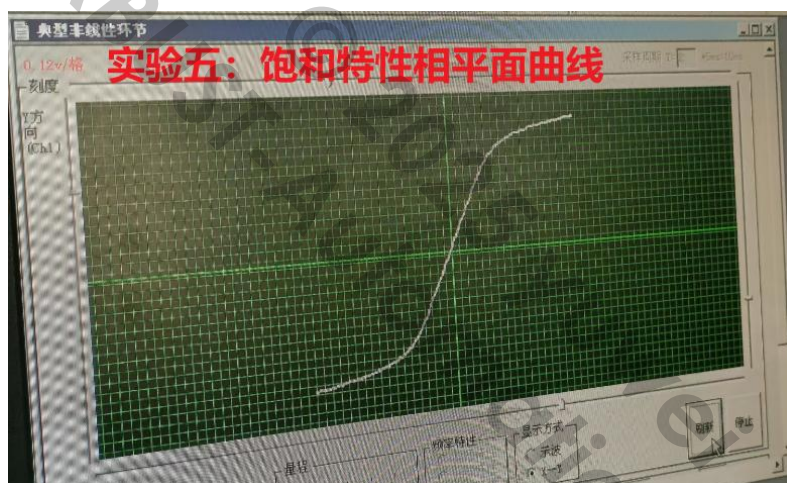
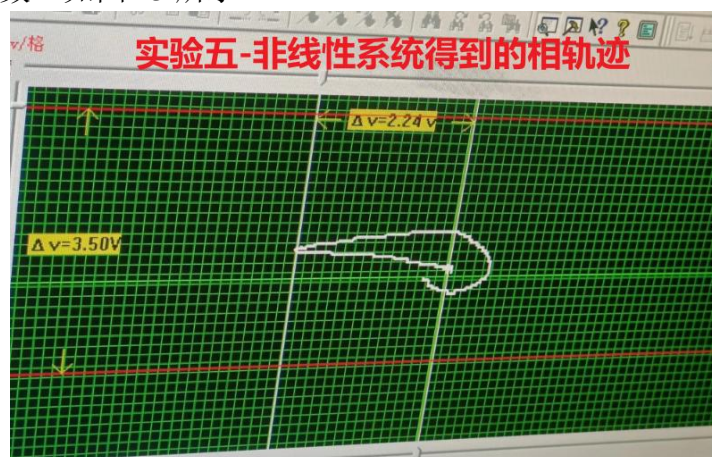


图 12 典型饱和非线性环节相平面曲线

搭建好继电型非线性控制系统、饱和型非线性控制系统的模拟电路后，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（ $U_i$ ），将函数发生器（B5）单元的非线性模块中的继电(饱和)特性作为系统特性控制。运行电脑程序，选择对应的实验项目，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。

选用 X-Y 方式观察相轨迹，并画出继电型非线性控制系统、饱和型非线性控制系统在  $e-e$  平面上的相轨迹，测量在  $+2.5V \rightarrow 0$  阶跃信号下系统的超调量  $M_p$  和振荡次数。如图 13 所示。



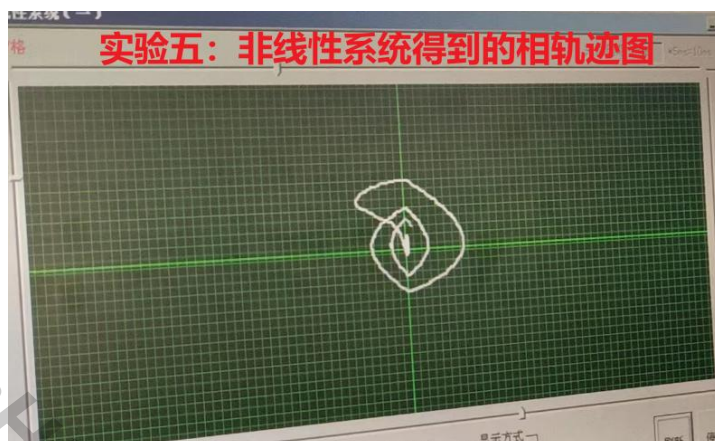


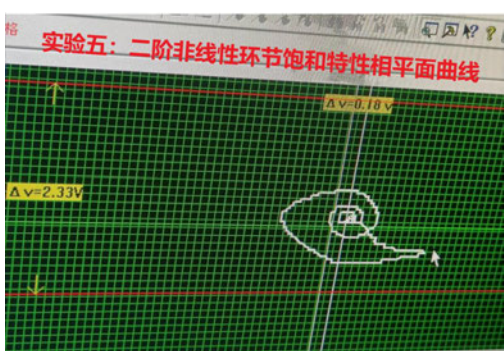
图 13 非线性控制系统相轨迹曲线

### 3 实验数据处理（数据、曲线、图表）：

典型环节	特 性 参 数	相平面曲线
继电型	限幅值 $M = \pm 3.7V$ $U_0 = \begin{cases} M & U_i > 0 \\ -M & U_i < 0 \end{cases}$	
饱和型	限幅值 $M = \pm 3.7V$ 斜率 $K = 1$ $U_0 = \begin{cases} M & U_i > a \\ KU_i &  U_i  \leq a \\ -M & U_i < -a \end{cases}$	

二阶非线性环节	超调量 $M_p$	振荡次数	相平面曲线
继电型	6.8%	7	



饱和型	6 2 . 3 %	4	
-----	-----------	---	--

## 四、实验结果分析（实验误差、现象、分析）

### ● 典型非线性环节

#### （1）典型继电型非线性环节相平面分析

①观察到的现象：实验结果的相平面图像与理论曲线基本一致，表现为稳定的极点和零点位置，没有出现异常振荡或不稳定的现象。

②实验误差分析：实验结果与实际曲线基本一致，这可能表明模拟电路对继电型非线性环节的建模相对准确。然而，由于实际系统存在一些非理想特性，仍可能存在一定误差。

③相平面分析：继电型非线性环节相平面图像可能包含一对共轭的极点和零点，其位置影响系统的动态响应。继电型环节的相平面图像在第一和第三象限内，表明系统可能是稳定的。极点的实部位置影响系统的阻尼比，零点的位置影响系统的过渡特性。

#### （2）典型饱和型非线性环节相平面分析

①观察到的现象：饱和型非线性环节的相平面图像较为接近理论曲线，未出现明显失真或偏离的情况。

②实验误差分析：实验结果接近理论曲线，说明模拟电路对饱和型非线性环节的建模相对准确。但仍需注意实际系统的复杂性可能导致一些误差。

③相平面分析：相平面图像中，饱和型环节可能表现为某些非线性特性，如饱和区域的出现。这反映了系统在输入信号较大时的非线性响应，本实验中未发生这样的情况。

### ● 二阶非线性系统

#### （1）继电型非线性控制系统相平面分析

①观察到的现象：观察到继电型系统的相平面图像表现为振荡，导致超调量较大。这与实际系统可能的震荡特性相符。振荡次数为7次，振荡次数较多可能与继电型系统的非线性特性以及相平面图像中的极点和零点位置有关。

②实验误差分析：实验结果与实际曲线有较大差别，可能是由于模拟电路对继电型非线性的建模存在一定误差。实际继电型系统的非线性特性可能比模拟电路更为复杂。

③相平面分析：相平面图像中，极点和零点的位置可能导致系统的过渡特性发生变化，振荡次数与超调量的大小可能与它们的位置有关。继电型系统的非线性

性特性可能表现为系统在输入信号变化时产生的突变,这种非线性响应可能导致相平面图像的变化。

#### (2) 饱和型非线性控制系统相平面分析

①观察到的现象:饱和型系统的相平面图像表现为相对较小的振荡,导致较小的超调量。饱和型系统的饱和效应可能在一定程度上抑制了系统的振荡。振荡次数较少(4次)可能与饱和型系统的非线性特性以及相平面图像中的极点和零点位置有关。

②实验误差分析:与实际曲线相比,模拟电路对饱和型非线性的建模精度较差。饱和型系统可能包含更复杂的非线性特性,模拟电路未能完全还原其动态行为。

③相平面分析:饱和型系统的相平面图像反映了系统在输入信号变化时的非线性响应。极点和零点的位置可能影响系统的过渡特性。饱和型系统的相平面图像中可能出现饱和区域,反映了系统在输入信号较大时的非线性响应。

### ● 总体分析

继电型非线性环节的相平面图像与理论曲线基本一致,实验结果较为准确。通过相平面分析,可以清晰地观察到系统的极点和零点位置,为系统动态性能的理解提供了有效手段。饱和型非线性环节的相平面图像与理论曲线接近,模拟电路的建模相对准确。相平面分析揭示了系统在饱和效应下的动态特性,有助于理解非线性环节对系统行为的影响。通过相平面分析,可以有效地观察到典型继电型和饱和型非线性环节的动态特性。实验结果接近理论曲线,表明模拟电路对这两类非线性环节的建模相对成功,但实际系统的复杂性仍需考虑。

两种非线性控制系统的相平面分析结果与实际曲线存在较大差别,可能是由于模拟电路对非线性特性的建模精度不足。实验误差可能与系统非线性特性的复杂性、电路元件的理论与实际特性的不同等因素相关。在分析中,应考虑到非线性环节的特殊性,可能需要更精细的建模和分析手段。

## 五、实验成绩评定

### (1) 出勤情况（缺勤 1 / 3 次无实验成绩）

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8
出勤情况								

注：√ 出勤，○ 事假，× 缺勤，▽ 其它。

### (2) 预习情况

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8
预习分值								

### (3) 实验过程情况

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8
实验分值								

### (4) 实验分析及报告情况

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8
实验分值								

### (5) 实验总成绩

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	平均
实验分值								