

《自动控制理论》实验指导书

目 录

第一章	前言	1
第二章	实验内容	3
实验一	典型环节的模拟研究	3
实验二	典型系统瞬态响应和稳定性	7
实验三	控制系统的频率特性	12
实验四	系统校正	16
实验五	非线性系统	20

第一章 前 言

自动控制理论是一门专业基础理论课，为了使学生能有较直观的认识，培养理论联系实际的基本技能，特开设了这门课的实验。实验的目的是将该课程所论述的某些基本原理、基本的分析方法，通过这些实验加以论证和检验，学生们根据实验结果，利用所学过的理论知识，通过分析找出内在的联系，从而加深对自动控制理论基本概念的理解。同时培养学生实事求是，严谨的科学作风。

一、本实验课使用的仪器为西安唐都科教仪器公司的 TDN-ACS+实验系统。

二、为了确保实验质量及人身、仪器设备的安全，在实验的过程中，要求学生必须注意以下几点：

1. 实验前必须阅读实验指导书，复习与实验有关的理论知识，对实验中所用仪器设备的基本工作原理和使用方法要有所了解。
2. 实验前必须做好实验预习，明确每次实验的目的，弄清楚实验内容、要求、方法，了解实验原理才能做实验。
3. 为了确保安全，严格按实验指导书的要求进行接线和操作，须经检查和指导教师认定合格后再通电。
4. 做实验时，要严肃认真，仔细观察实验现象，作好各种数据、图形的记录，并由指导教师复查后才能结束实验。
5. 在实验过程中，如需要变动连线，必须先将实验仪器设备断电，再进行拆、连线。以免引起短路，从而造成仪器损坏。
6. 实验必须严格按操作规程正确使用仪器设备。如发现仪器出现故障，应立即断电，并报告指导教师处理，不得擅自拆修仪器设备。

7. 实验完毕，必须经指导教师审核签字后，方可进行拆线，清理现场，将全部仪器设备复归原位，然后离开教室。
8. 要独立写出严谨、有理论分析、实事求是、文理通顺、字迹端正、图表清楚的实验报告。数据真实、准确，结论明确。
9. 爱护公共财产，损坏仪器设备必须及时报告，认真检查原因，从中吸取教训，并按校方规定的赔偿办法处理。
10. 对于不认真预习，对实验目的、方法、内容不了解以及不认真对待实验者，严重违反规章制度者，指导教师有权停止其实验。

三、实验结束后，要认真编写实验报告。报告要求：文理通顺、字迹工整、数据和图表齐全，除实验数据和实验现象同组同学可共用外，分析和计算必须由学生独立完成。报告的内容应包括：实验名称，目的和要求；使用的仪器设备、实验线路、实验内容、实验数据、实验结果和现象的分析讨论，以及实验指导书所规定的其它内容。还应写明实验日期、班级、同组同学姓名，并附有经指导教师审阅的实验数据记录。

第二章 实验内容

实验一 典型环节的模拟研究

一、实验目的

1. 学习典型线性环节的模拟方法；
2. 研究系统参数对典型线性环节阶跃响应的影响。

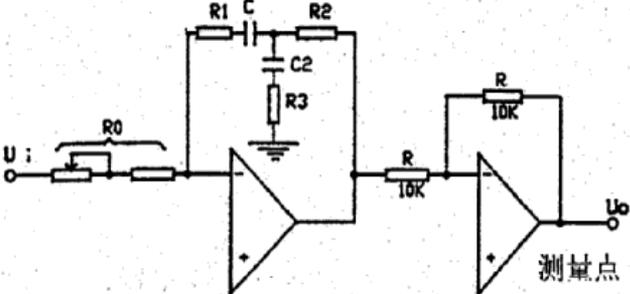
二、实验内容

1. 观测比例、积分、比例积分、比例微分和惯性环节的阶跃响应曲线。
2. 观察 PID 环节的响应曲线。（可选做）

三、实验原理

各典型环节的模拟电路图及输入响应如下表

各典型环节名称	模拟电路图	输出响应
比例 (P)		$U_o(t) = K (t \geq 0)$ 其中 $K = R_1/R_0$
积分 (I)		$U_o(t) = \frac{1}{T} t (t \geq 0)$ 其中 $T = R_0 C$
比例积分 (PI)		$U_o(t) = K + \frac{1}{T} t (t \geq 0)$ 其中 $K = R_1/R_0$, $T = R_0 C$
比例微分 (PD)		$U_o(t) = KT\delta(t) + K$ 其中 $\delta(t)$ 为单位脉冲函数 $K = \frac{R_1 + R_2}{R_0}$, $T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$
惯性环节 (T)		$U_o(t) = K(1 - e^{-t/T})$ 其中 $K = R$ $1/R_0, T = R_1 C$

各典型环节名称	模拟电路图	输出响应
比例积分微分(PID)		$U_o(t) = T_d \delta(t) + K_p + \frac{1}{T_i} t$ <p>其中 $\delta(t)$ 为单位脉冲函数 $K_p = R_1/R_0$ $T_i = R_0 C_1$ $T_d = R_1 R_2 C_2 / R_0$</p>

四、实验步骤

(注意：①准备：使运放处于工作状态。将信号源单元(U₁ SG)的ST端(插针)与5V端(插针)用“短路块”短接，使模拟电路中的场效应管(3DJ6)夹断，这时运放处于工作状态。②阶跃信号的产生：在U₁₃ SP单元中，将H₁与+5V插针用“短路块”短接，H₂插针用排线接至U₁₄ P单元的X插针；在U₁₄ P单元中，将Z插针和GND插针用“短路块”短接，最后由插座的Y端输出信号。)

1. 观测比例、积分、比例积分、比例微分和惯性环节的阶跃响应曲线。

- ①按各典型环节的电路图将线接好(先接比例)。(PID先不接)
- ②将模拟电路输入端(U₁)与阶跃信号的输出端Y相联接；模拟电路的输出端(U₀)接至示波器。
- ③用示波器观测输出端的实际响应曲线U₀(t)，且将结果记下。改变比例参数，重新观测结果。
- ④同理得出积分、比例积分、比例微分和惯性环节的实际响应曲线。

2. 观察PID环节的响应曲线。(可选做)

①参照表中的PID模拟电路图，将PID环节搭接好。

②将周期性方波信号加到PID环节的输入端 (U_1)，用示波器观测PID输出端 (U_0)，改变电路参数，重新观察并记录。

五、实验报告要求

分析各实验结果，绘出(打印)结果图像

实验二 典型系统瞬态响应和稳定性

一、 实验目的

1. 学习瞬态性能指标的测试技术及典型系统阶跃响应曲线的实验测试方法。
2. 研究系统参数对系统动态品质的影响。

二、 实验内容

1. 典型二阶系统瞬态性能指标的测试；
2. 典型三阶系统的性能。

三、 实验原理

1. 典型二阶系统

①典型二阶系统的方块图及传函

图 2-1 是典型二阶系统原理方块图，其中 $T_0=1S$ ， $T_1=0.1S$ ， K_1 分别为 10、5、2.5、1。

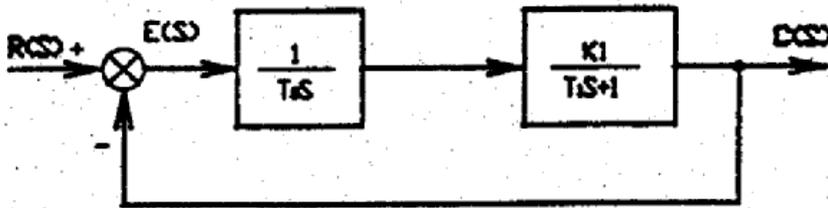


图 2-1

开环传函: $G(S) = \frac{K}{S(T_1S + 1)} = \frac{K_1}{S(0.1S + 1)}$ 其中 $K = K_1/T_0 = K_1$ = 开环增益

闭环传函: $W(S) = \frac{\omega_n^2}{S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2}$ 其中 $\omega_n = \sqrt{K_1/T_1T_0}$

$$\xi = \frac{1}{2}\sqrt{T_0/K_1T_1}$$

表 2-1 列出有关二阶系统在三种情况（欠阻尼，临界阻尼，过阻尼）下具体参数的表达式。

表 2-1

一种情况 各参数	$0 < \xi < 1$	$\xi = 1$	$\xi > 1$
K	$K = K_1/T_0 = K_1$		
ω_n	$\omega_n = \sqrt{K_1/T_1T_0} = \sqrt{10K_1}$		
ξ	$\xi = \frac{1}{2}\sqrt{T_0/K_1T_1} = \frac{\sqrt{10K_1}}{2K_1}$		
$C(t_p)$	$C(t_p) = 1 + e^{\xi\pi\sqrt{1-\xi^2}}$		
$C(\infty)$	1		

一种情况 各参数	$0 < \xi < 1$	$\xi = 1$	$\xi > 1$
$M_p(\%)$	$M_p = e^{-\xi\pi\sqrt{1-\xi^2}}$		
$t_p(S)$	$t_p = \frac{\pi}{\omega_n\sqrt{1-\xi^2}}$		

$t_2(S)$	$t_2 = \frac{4}{\xi\omega_n}$		
----------	-------------------------------	---	--

②模拟电路图：见图 2-2

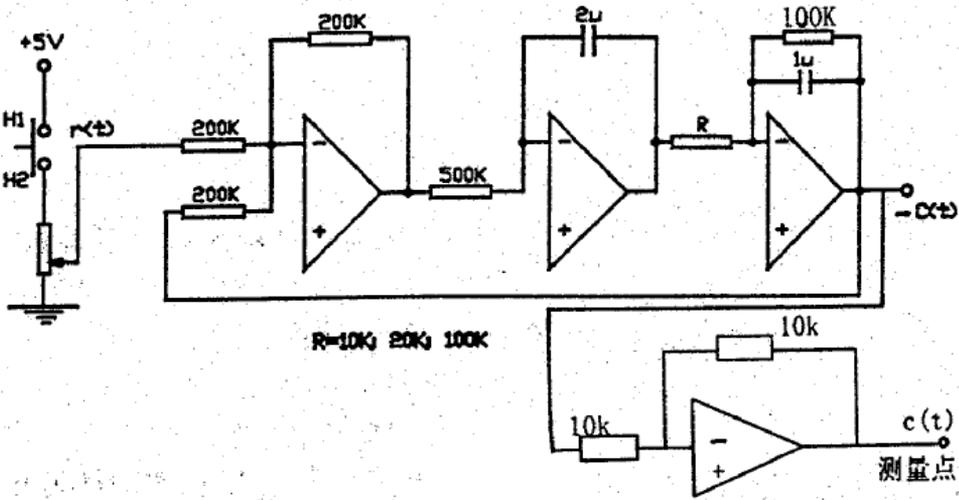


图 2-2

$$G(S) = \frac{K_1}{S(0.1S + 1)} = \frac{100/R}{S(0.1S + 1)}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} K_1 = 100/R \\ \xi = \frac{\sqrt{10K_1}}{2K_1} \\ \omega_n = \sqrt{10K_1} \end{cases}$$

2. 典型三阶系统

①典型三阶系统的方块图：见图 2-3。

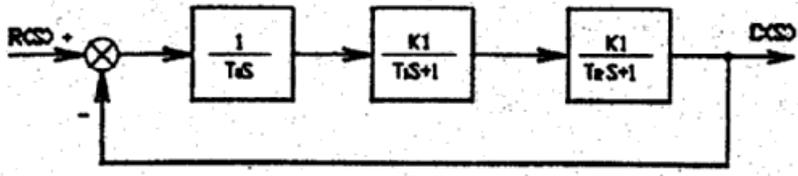


图 2-3

开环传递函数为：

$$G(S)H(S) = \frac{K}{S(T_1S + 1)(T_2S + 1)}, \text{ 其中 } K = K_1/K_2/T_0 \text{ (开环增益)}$$

②模拟电路图：见图 2-4。

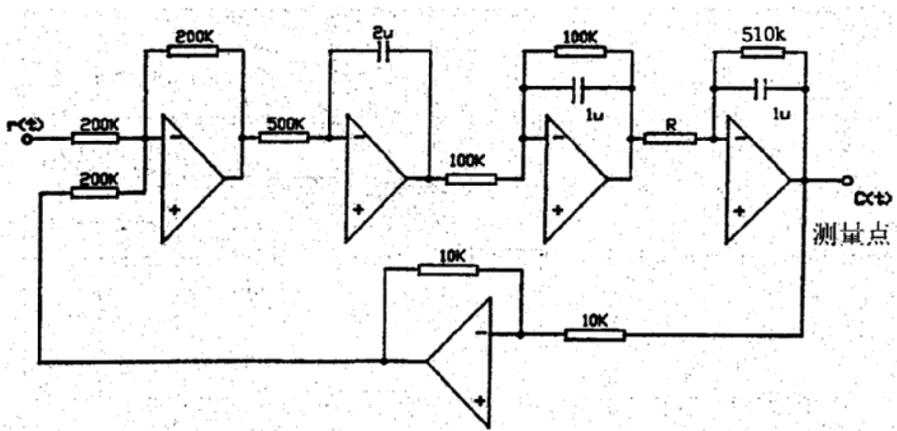


图 2-4

$$\text{开环传函为 } G(S)H(S) = \frac{510/R}{S(0.1S + 1)(0.5S + 1)} \text{ (其中 } K = 510/R)$$

系统的特征方程为

$$1 + G(S)H(S) = 0, \Rightarrow S^3 + 11.96S^2 + 19.6S + 19.6K = 0$$

$$\text{由 Routh 判据, 得} \begin{cases} 0 < K < 11.96 \Rightarrow R > 42.6K\Omega & \text{系统稳定} \\ K = 11.96 \Rightarrow R = 42.6K\Omega & \text{系统临界稳定} \\ K > 11.96 \Rightarrow R < 42.6K\Omega & \text{系统不稳定} \end{cases}$$

四、实验步骤

1. 典型二阶系统瞬态性能指标的测试

- ①按图2-2接线， $R=10K$ 。
- ②用示波器观察系统阶跃响应 $C(t)$ ，测量并记录超调量 M_p ，峰值时间 t_p 和调节时间 t_s 。
- ③分别按 $R=20K$ ； $40k$ ； $100K$ 改变系统开环增益，观察相应的阶跃响应 $C(t)$ ，测量并记录性能指标 M_p 、 t_p 和 t_s ，及系统的稳定性。并将测量值和计算值（实验前必须按公式计算出）进行比较。

2. 典型三阶系统的性能

- ①按图 2-4 接线， $R=30K$ 。
- ②观察系统的阶跃响应，并记录波形。
- ③减小开环增益（ $R=42.6K$ ； $100K$ ），观察系统的阶跃响应。

五、实验思考题

1. 实验时，若阶跃信号幅值太大，会产生什么结果。
2. 开环放大系数 K 和惯性环节的时间常数对系统的性能有何影响。

六、实验报告要求

1. 写明实验线路及原始数据。要有准确的实验记录（包括测量参数），并与理论值作比较。

2. 回答实验思考题，写出本实验的体会及建议。

实验三 控制系统的频率特性

一、实验目的

1. 根据实验室现有的设备，了解频率特性的测试方法及原理；
2. 熟悉二阶系统的频率特性；了解二阶系统的频域指标与时域指标的对应关系；
3. 熟悉模拟装置的组成及工作原理，掌握电子模拟线路的设计方法。

二、实验内容

利用 ACS+系统中的 DAC 单元将提供频率和幅值均可调的基准正弦信号源，作为被测对象的输入信号，而 ACS+系统中测量单元的 CH1 通道用来观测被测环节的输出，选择不同角频率及幅值的正弦信号源作为对象的输入，可测得相应的系统输出，并在 PC 机屏幕上显示，根据所测得的数据正确描述对象的幅频和相频特性图。

三、实验原理

1. 被测系统的方块图及原理：见图 3-1

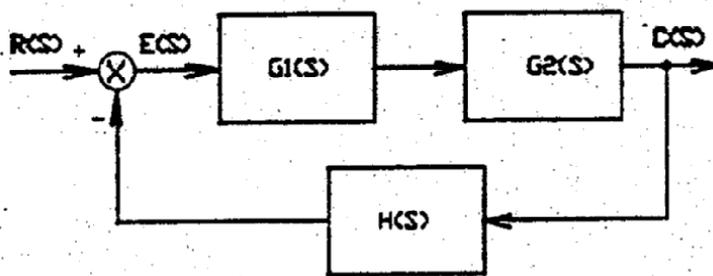


图 3-1 被测系统方块图

系统（或环节）的频率特性 $G(j\omega)$ 是一个复变量，可以表示成以角频率 ω 为参数的幅值和相角：

$$G(j\omega) = |G(j\omega)| / \underline{G(j\omega)} \quad (3-1)$$

本实验应用频率特性测试仪测量系统或环节的频率特性。

图 3-1 所示系统的开环频率特性为：

$$G_1(j\omega)G_2(j\omega)H(\omega) = \frac{B(j\omega)}{E(j\omega)} = \frac{B(j\omega)}{E(j\omega)} / \underline{\frac{B(j\omega)}{E(j\omega)}} \quad (3-2)$$

采用对数幅频特性和相频特性表示，则式（3-2）表示为：

$$\begin{aligned} 20\lg |G_1(j\omega)G_2(j\omega)H(j\omega)| &= 20\lg \left| \frac{B(j\omega)}{E(j\omega)} \right| \\ &= 20\lg |B(j\omega)| - 20\lg |E(j\omega)| \quad (3-3) \end{aligned}$$

$$G_1(j\omega)G_2(j\omega)H(j\omega) = \frac{B(j\omega)}{E(j\omega)} = \underline{\frac{B(j\omega)}{E(j\omega)}} / \underline{\underline{\frac{B(j\omega)}{E(j\omega)}}} \quad (3-4)$$

将频率特性测试仪内信号发生器产生的超低频正弦信号的频率从低到高变化，并施加于被测系统的输入端[r(t)]，然后分别测量相应的反馈信号[b(t)]和误差信号[e(t)]的对数幅值和相位。根据式（3-3）和式（3-4）分别计算出各个频率下的开环对数幅值和相位，在半对数坐标纸上作出实验曲线：开环对数幅频曲线和相频曲线。

根据实验开环对数幅频曲线画出开环对数幅频曲线的渐近线，再根据渐近线的斜率和转角频确定频率特性（或传递函数）。所确定的频率特性（或传递函数）的正确性可以由测量的相频曲线来检验，对最小相位系统而言，实际测量所得的相频曲线必须与由确定的频率特性（或传递函数）所画出的理论相频曲线在一定程度上相符。如果测量所得的相位在高频（相对于转角频率）时不等于 -90° （q-p）[式中p和q分别表示传递函数分子和分母的阶次]，那么，频率特性（或传递函数）必定是一个非最小相位系统的频率特性。

2. 被测系统的模拟电路图：见图3-2

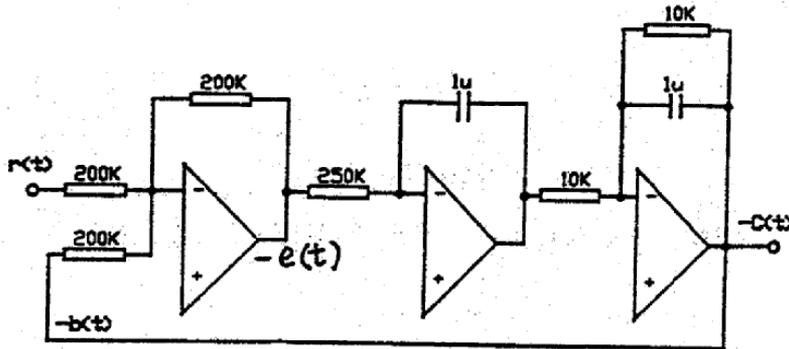


图3-2 被测系统

注意：所测点 $-c(t)$ 、 $-e(t)$ 由于倒相器的作用，输出均为负值，若要测其正的输出点，可分别在 $-c(t)$ 、 $-e(t)$ 之后串接一组 $1/1$ 的比例环节，比例环节的输出即为 $c(t)$ 、 $e(t)$ 的正输出。

四、实验步骤

1. 将DAC 单元(U10)的OUT端接到对象的输入端。
2. 将测量单元的CH1（必须拨为乘1档）接至对象的输出端。
3. 将UI SG单元的ST和S端断开，用排线将ST端接至8088CPU单元中的PB10。（由于在每次测量前，应对对象进行一次回零操作，ST即为对象锁零控制端，在这里，我们用8255的PB10口对ST进行程序控制）。
4. 在PC机上输入相应的角频率，并选择合适的幅值，确认后虚拟示波器开始闪烁，直至测量完毕时停止，屏幕即显示所测对象的输出及信号源，移动游标，可得到相应的幅值和相位。
5. 根据测得在不同频率和幅值的信号源作用下系统误差 $e(t)$ 及反馈 $c(t)$ 的幅值、相对于信号源的相角差，计算并画出闭环系统的开环幅频和相频曲线。

实验中，系统输入正弦信号的幅值不能太大，否则反馈幅值更大，不易读出，同理，太小也不易读出。

五、实验思考题

1. 理论计算不同 ω 值时的 $L(\omega)$ 和 $\Phi(\omega)$ ，并与实验结果进行比较；
2. 能否根据实验所得 Bode 图确定一个二阶系统的闭环传递函数？

六、实验报告要求

1. 被测系统或环节的传递函数、模拟线路图、计算出 ξ 、 T 的值；
2. 将实验记录数据整理列表；根据实验数据，用半对数坐标纸画出被测系统或环节的理论图及实测图，并与理论曲线相比较，分析造成误差的原因。

实验四 系统校正

一、实验目的

1. 了解串联校正装置对系统的校正作用；
2. 学习校正装置的设计和实现方法；
3. 研究校正装置对控制系统动态性能指标的影响。

二、实验内容

1. 测量未校正系统的性能指标；
2. 测量校正系统的性能指标。

三、实验原理

1. 原系统的原理方块图：见图 4-1 所示

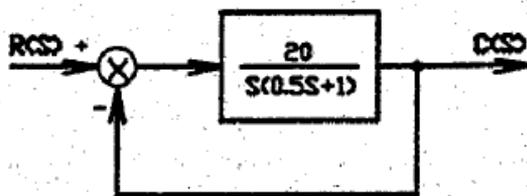


图 4-1 未校正系统的方块图

由闭环传函

$$W(S) = \frac{40}{S^2 + 2S + 40} \Rightarrow \begin{cases} \omega_n = 6.32 \\ \xi = 0.158 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} M_p = 60\% \\ t_s = 4s \\ \text{静态误差系数 } K_V = 20l/s \end{cases}$$

要求设计串联校正装置，使系统满足下述性能指标：

$$\begin{cases} M_p \leq 25\% \\ t_s \leq 1s \\ K_V \geq 20l/s \end{cases}$$

由理论推导（可参照有关自控原理书），校正环节的传递函数为：

$$G_c(S) = \frac{0.5S + 1}{0.05S + 1}$$

所以校正后的方块图如图 4-2 所示：

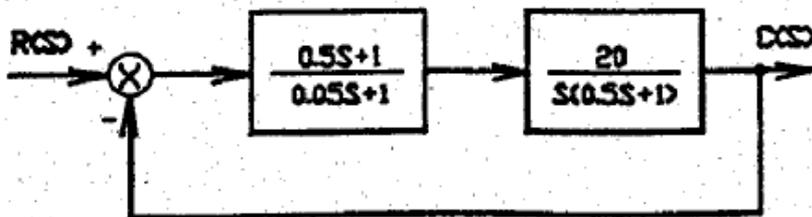


图 4-2 校正后系统的方块图

2. 原系统及校正后的模拟电路图：见图 4-3 及图 4-4。

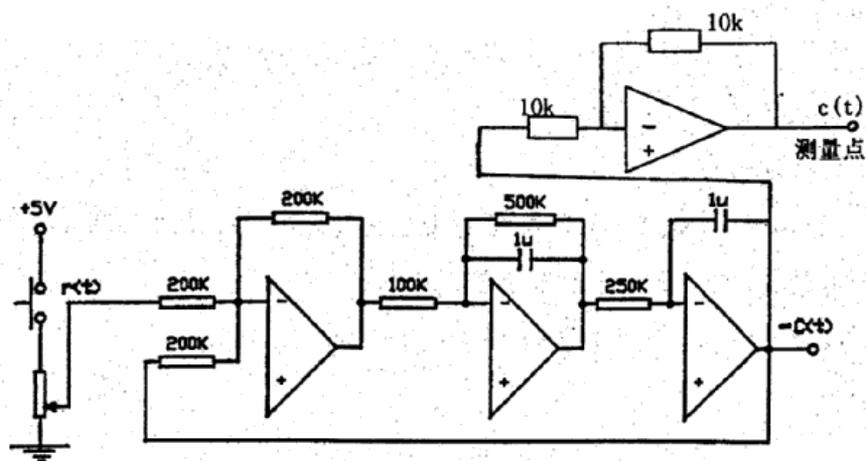


图 4-3 未校正系统的模拟电路图

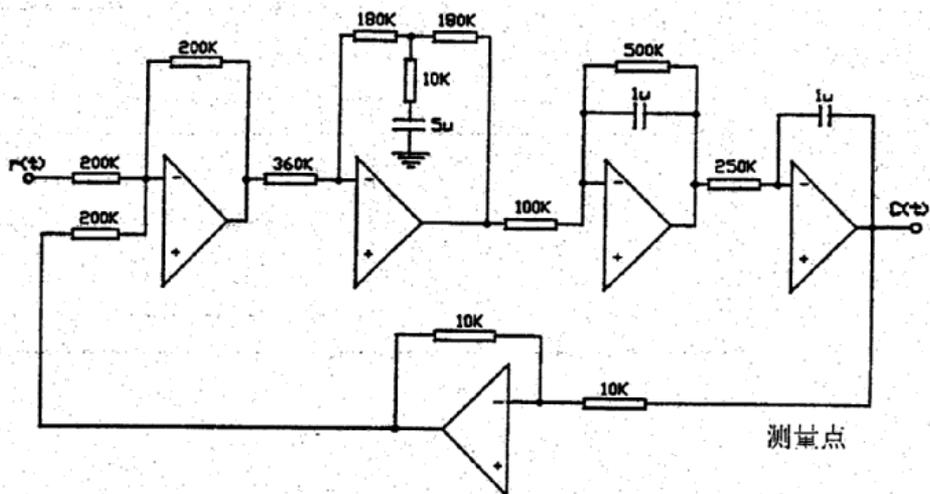


图 4-4 校正后系统模拟电路

四、实验步骤

1. 测量未校正系统的性能指标。

①按图 4-3 接线。

②加入阶跃电压，观察阶跃响应曲线，并测出超调量 M_p 和调节时间 t_s ，将曲线及参数记录下来。

2. 测量校正系统的性能指标。

- ①按图 4-4 接线。
- ②加入阶跃电压，观察阶跃响应曲线，并测出超调量 M_p 以及调节时间 t_s 。看是否达到期望值，若未达到，请仔细检查接线（包括阻容值）。

五、实验报告要求

1. 首先计算所需元件的参数，按图接系统的模拟电路及校正网络；按照实验步骤，记录实验数据，从曲线上求出 $\sigma\%$ 和 t_s ，并加以整理填入自拟表格。
2. 画出校正前后系统的波德图，并分析校正前后系统的稳定性动态指标，并与实验结果进行比较。

实验五 非线性系统

一、实验目的

1. 学习实现典型非线性环节的方法；掌握非线性环节特性的测量方法；
2. 学习绘制非线性二阶系统的相轨迹；

二、实验内容

1. 以运算放大器为基本元件，在输入端和反馈网络中设置相应元件（稳压管、二极管、电阻和电容）构成典型非线性的模拟电路。
2. 用相轨迹分析继电型非线性系统。

三、实验原理

1. 典型非线性环节模拟

以运算放大器为基本元件，在输入端和反馈网络中设置相应元件（稳压管、二极管、电阻和电容）可构成各种典型非线性的模拟电路。

（1）继电特性：见图 5-1

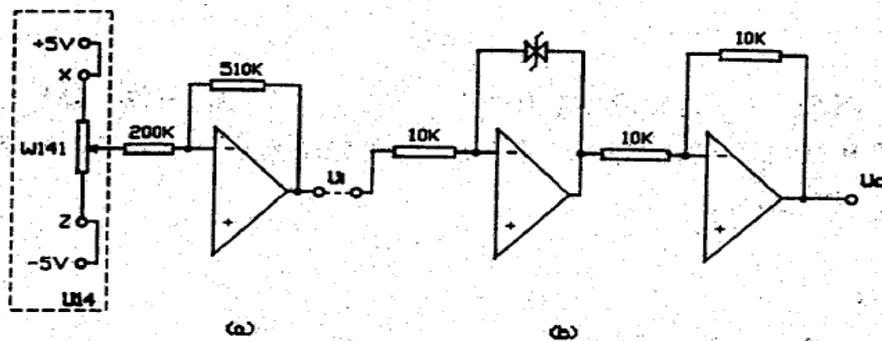


图 5-1 继电特性模拟电路

理想继电特性如图 5-1C 所示。图中 M 值等于双向稳压管的稳压值。

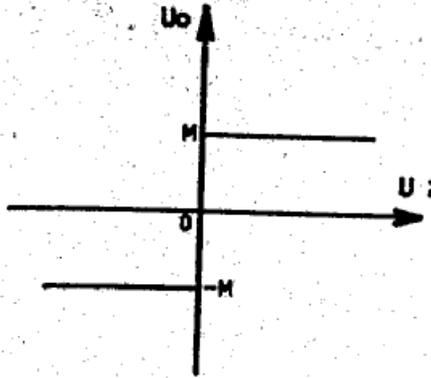


图 5-1C 理想继电特性

(2) 饱和特性：见图 5-2A 及图 5-2B

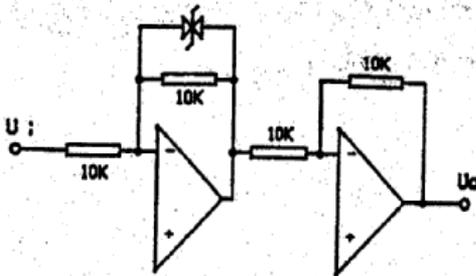


图 5-2A 饱和特性模拟电路

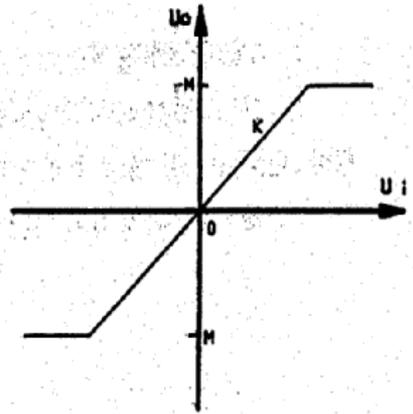


图 5-2B 理想饱和特性

理想饱和特性图中特性饱和值等于稳压管的稳压值，斜率 k 等于前一级反馈电阻值与输入电阻值之比，即：

$$k=R_f/R$$

(3) 死区特性

死区特性模拟电路图：见图 5-3A

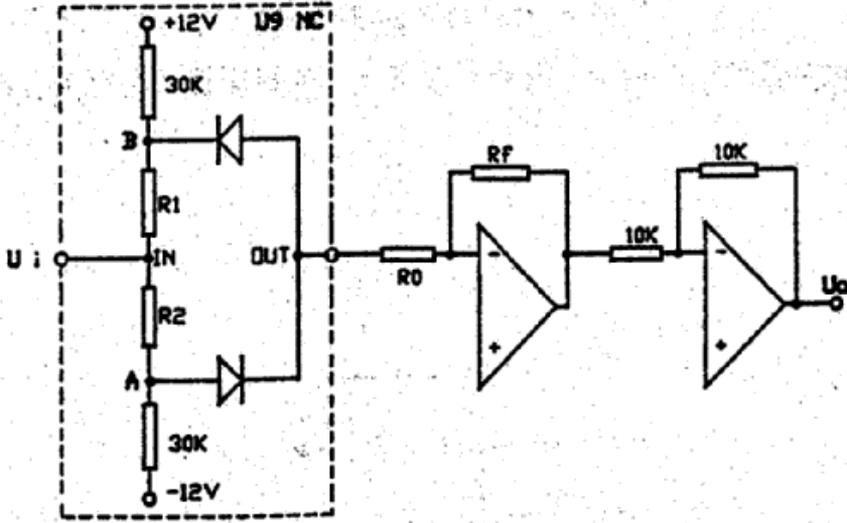


图 5-3A 死区特性模拟电路

死区特性如图 5-3B 所示。

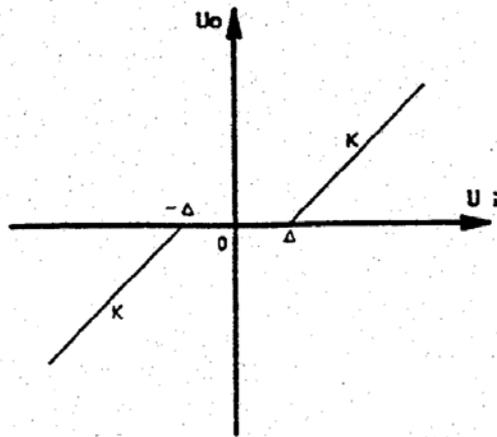


图 5-3B 死区特性

D 图中特性的斜率 k 为：

$$k = \frac{R_f}{R_0}$$

$$\text{死区 } \Delta = \frac{R_2}{30} \times 12(V) = 0.4R_2(V)$$

式中 R_2 的单位 $k\Omega$ ，且 $R_2=R_1$ 。（实际 Δ 还应考虑二极管的压降值）

(4) 间隙特性

间隙特性的模拟电路图：见图 5-4A

间隙特性如图 5-4B 所示，图中空间特性的宽度 $\Delta(OA)$ 为：

$$\Delta = \frac{R_2}{30} \times 12(V) = 0.4R_2(V) \quad (5-4)$$

式中 R_2 的单位为 $k\Omega$ ，($R_2=R_1$)。特性斜率 $tg\alpha$ 为：

$$tg\alpha = \frac{C_1}{C_f} \cdot \frac{R_f}{R_0} \quad (5-5)$$

根据式 (5-4) 和 (5-5) 可知道，改变 R_2 和 R_1 可改变空回特性的宽度；

改变 $\frac{R_1}{R_0}$ 或 $(\frac{C_1}{C_f})$ 的比值可调节特性斜率 ($tg\alpha$)。

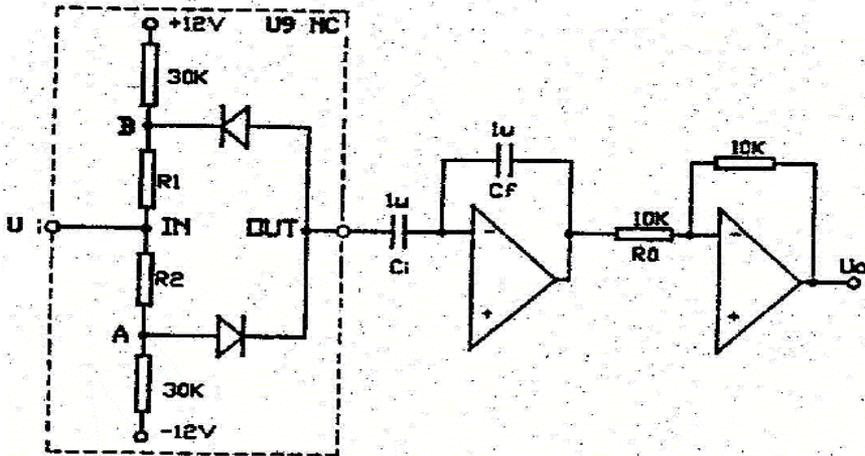


图 5-4A 间隙特性模拟电路

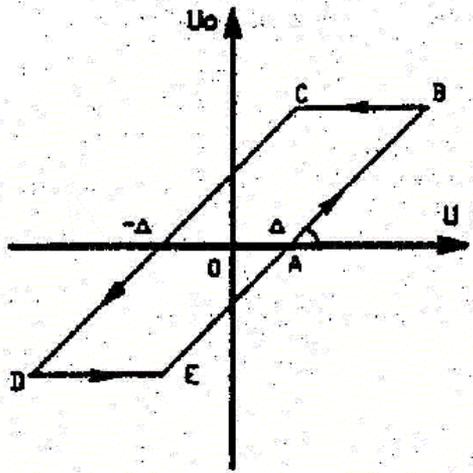


图 5-4B 间隙特性

2. 相轨迹法分析

相平面图表征系统在各种初始条件下的运动过程，相轨迹则表征系统在某个初始条件下的运动过程，相轨迹可用图解法求得，也可用实验法直接获得。当改变阶跃信号的幅值，即改变系统的初始条件时，便获得一系列相轨迹。根据相轨迹的形状和位置就能分析系统的瞬态响应和稳态误差。

(1) 继电型非线性系统原理方块图如图 5-5 所示，图 5-6 是它的模拟电路图。

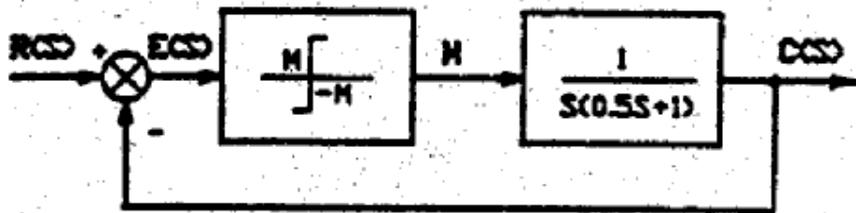


图 5-5

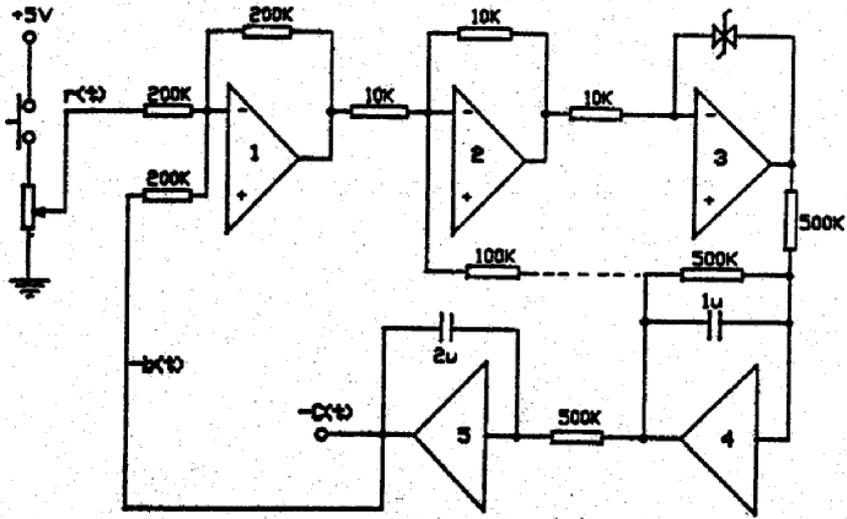


图 5-6 继电型非线性系统模拟电路

图 5-5 所示非线性系统用下述方法表示

$$\begin{cases} T\ddot{c} + \dot{c} - KM = 0 & (e > 0) \\ T\ddot{c} + \dot{c} + KM = 0 & (e < 0) \end{cases} \quad (5-6)$$

式中 T 为时间常数 ($T=0.5$), K 为线性部分开环增益 ($K=1$), M 为稳压管稳压值。采用 e 和 c 为相平面坐标, 以及考虑

$$e = r - c \quad (5-7)$$

$$r = R \cdot 1(t) \quad e = -c \quad (5-8)$$

则式 (5-6) 变为

$$\begin{cases} T\ddot{e} + \dot{e} + KM = 0 & (e > 0) \\ T\ddot{e} + \dot{e} - KM = 0 & (e < 0) \end{cases} \quad (5-9)$$

代入 $T=0.5$ 、 $K=1$ 、以及所选用稳压值 M , 应用等倾线法作出当初条件为

$$e(0) = r(0) - c(0) = r(0) = R$$

时的相轨迹，改变 $r(0)$ 值就可得到一簇相轨迹。

图 5-5 所示系统的相轨迹曲线如图 5-7 所示。

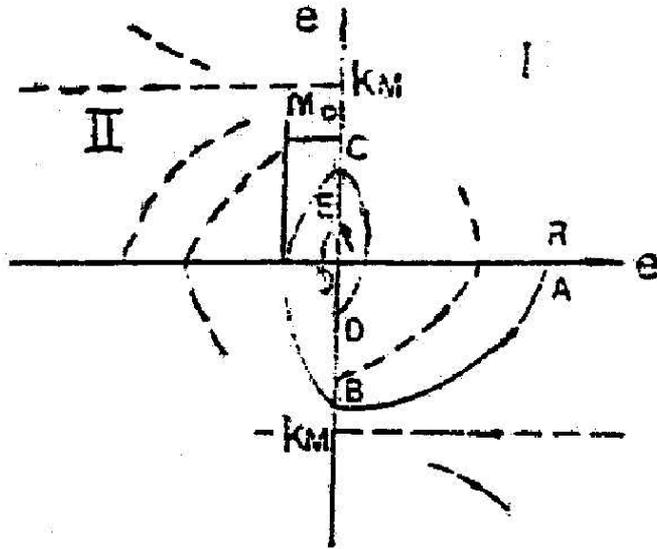


图 5-7 图 5-5 所示系统相轨迹

图 5-7 中的纵坐标轴将相平面分成两个区域，(I 和 II) e 轴是两组相轨迹的分界线，系统在阶跃信号下，在区域 I 内，例如在初始点 A 开始沿相轨迹运动到分界是线上的点 B，从 B 点开始在区域 II 内，沿区域 II 内的相轨迹运动到点 C 再进入区域 I，经过几次往返运动，若是理想继电特性，则系统逐渐收敛于原点。

(2) 带速度负反馈的继电型非线性系统原理方块图如图 5-8 所示。图 5-6 中的虚线用导线连接，则图 5-6 就是图 5-8 的模拟电路。

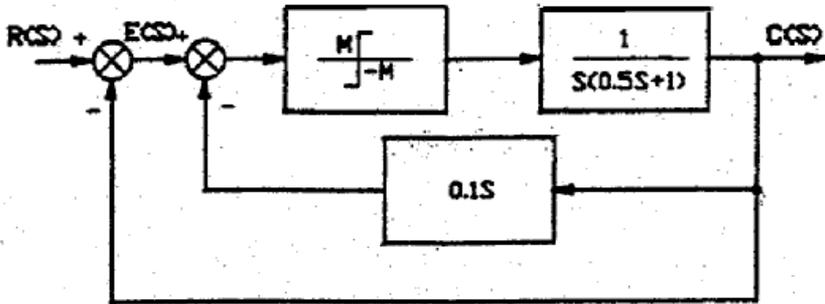


图 5-8 带速度负反馈续电型非线性系统

相轨迹示于图 5-9，显然，继电型非线性系统采用速度反馈可以减小超调量 M_p 、缩短调节时间 t 、减小振荡次数。

图中分界线由方程

$$e - k_s \dot{e} = 0 \quad (5-10)$$

确定，式中 k_s 为反馈系数（图 6-4 中 $k_s=0.1$ ）。

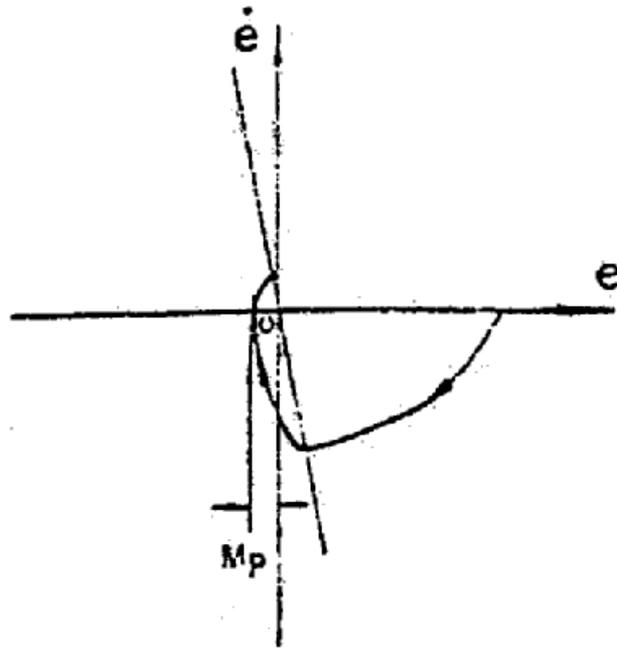


图 5-9 图 5-8 的相轨迹

四、实验步骤

1. 典型非线性环节

- (1) 按图 5-1 接线，图 5-1 中的 (a) 和 (b) 之间的虚线处用导线连接好；（图 5-1(a)中，+5V 与 X 之间，以及-5V 与 Z 之间用短路块短接）。
- (2) 模拟电路中的输入端 (U_1) 和输出端 (U_0) 分别接至示波器的 X 轴和 Y 轴的输入端。
- (3) 调节输入电压，观测并记录示波器上的 $U_0 \sim U_1$ 图形。

2. 用相轨迹分析继电型非线性系统。

①按图5-6接线。

②在系统输入端分别施加及撤去幅值为 5V、4V、3V、2V 和 1V 电压时，用示波器观察并记录系统在 $e-e$ 平面上的相轨迹。

3. 用相轨迹分析带速度负反馈继电型非线性系统在阶跃信号下的瞬态响应和稳态误差。

①将图5-6中的虚线用导线连接好。

②在系统输入端加入阶跃信号 (5V、4V、3V、2V 和 1V)，用示波器观察并记录系统在 $e-e$ 平面的相轨迹。

五、实验报告要求

1. 根据实验线路分析系统的动态特性；

2. 绘出无速度反馈和带速度反馈时，二阶继电型控制系统的相轨迹曲线。