

自动控制原理 实验指导书

李宁 闫茂德 李斌 张文革 编

长安大学电控学院
自动化与交通控制工程实验教学中心

2009年6月

目 录

第一章	LABACT 自控/计控原理实验机构成及说明.....	1
第二章	虚拟示波器.....	5
2.1	虚拟示波器的显示方式.....	5
2.2	虚拟示波器的使用.....	5
第三章	自动控制原理实验.....	8
3.1	线性系统的时域分析.....	8
3.1.1	典型环节的模拟研究.....	8
3.1.2	二阶系统瞬态响应和稳定性.....	12
3.1.3	三阶系统的稳定性和瞬态响应.....	14
3.2	线性控制系统的频域分析.....	16
3.2.1	频率特性测试.....	16
3.2.2	一阶惯性环节的频率特性曲线.....	17
3.2.3	二阶闭环系统的频率特性曲线.....	18
3.2.4	二阶开环系统的频率特性曲线.....	20
3.3	线性系统的校正与状态反馈.....	22
3.3.1	频域法串联超前校正.....	22
3.3.2	频域法串联迟后校正.....	27
3.3.3	时域法串联比例微分校正.....	32
3.3.4	时域法局部比例反馈校正.....	34
3.3.5	时域法微分反馈校正.....	37
3.3.6	线性系统的状态反馈及极点配置.....	39
3.4	非线性系统的相平面分析.....	40
3.4.1	典型非线性环节.....	40
3.4.2	二阶非线性控制系统.....	42
3.4.3	三阶非线性控制系统.....	45
3.5	采样控制系统分析.....	48
3.6	模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验.....	49
3.7	模拟温度闭环控制实验.....	52

第一章 LabACT 自控/计控原理实验机构成及说明

一. 主实验板的布置简图

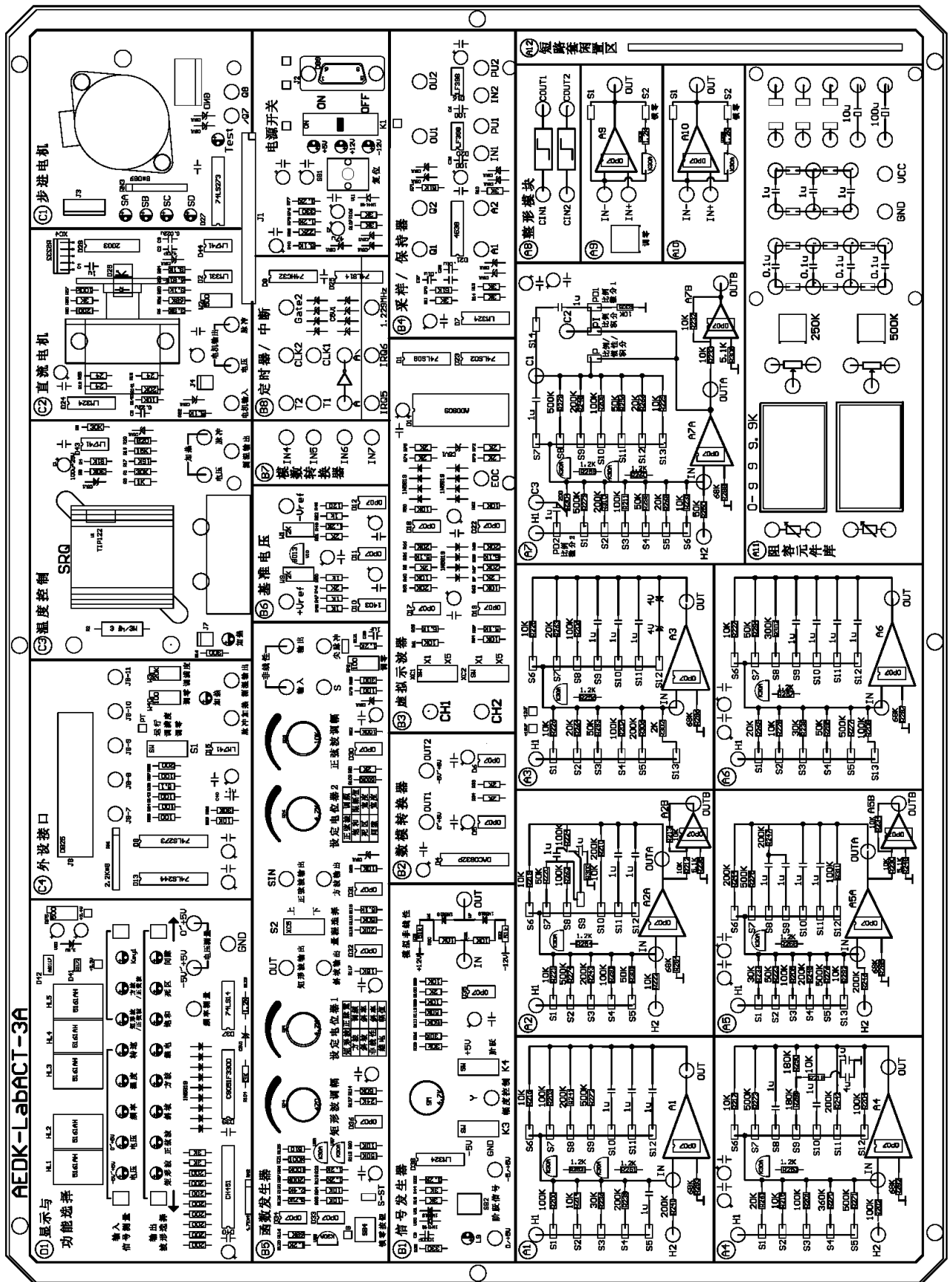


图 1-1-2 主实验板的布置简图

二. D 和 B 实验区

1. 显示与功能选择模块 (D1) 及函数发生器 (B5)

D1 实验区是一个显示与功能选择模块,它主要由 5 位 8 段数码管、四个功能选择按键和 16 个指示灯、3 个测试孔组成。D1 实验区是独立于实验机的 CPU 控制模块,提供控制对象输出显示,并实现函数发生器 (B5) 的十种 (可选择) 波形输出切换控制和显示。

(1) 输入信号测量

上排左按键循环控制输入信号的测量,包括电压 (-5V~+5V)、电压 (0~+5V)、频率、温度和直流电机转速测量。每按一次按键,指示灯向右循环切换,数码管显示相应的测量信息。信号的输入口为模块中的“电压测量”和“频率测量”3 个测试孔。指示灯和数码管的输出数据显示对应关系表见表 1-2-1。

表 1-2-1 指示灯和数码管的显示对应关系表

项目内容	指示灯	输入测试孔	数据显示	单位
(-5V~+5V) 电压测量	电压 (-5V~+5V)	电压测量 (-5V~+5V)	(-)X.XX	V
(0~+5V) 电压测量	电压 (0~+5V)	电压测量 (0~+5V)	X.XX	V
频率测量	频率	频率测量	XXX.X	Hz
C3 模块温度值	温度	电压测量 (0~+5V)	XX.X	°C
C2 模块直流电机转速	转速	频率测量	X.XXX	千转/分

(2) 函数发生器波形输出切换控制和显示选择

下排左、右按键循环切换控制输出波形,包括矩形波、正弦波、斜坡、方波、继电特性、饱和特性、死区特性和间隙特性的切换控制。每按一次下排左按键,指示灯向左循环切换,每按一次下排右按键,指示灯向右循环切换,数码管显示相应的波形信息。

上排右按键循环切换控制输出波形,包括矩形波/正弦波和方波/正弦波同时发生。

2. 函数发生器 (B5)

函数发生器 (B5) 是各函数及波形发生的控制和输出模块,它含有十种 (可选择) 波形输出,有 4 个函数波形调节电位器、1 个波形量程选择开关和各函数发生的输出口组成。各波形和函数的输出选择在 (D1) 模块中选择设置。各波形的切换控制和显示见表 1-2-2。

表 1-2-2 函数发生器取值及显示

序号	波形类型	函数发生器取值及显示						
		左显示及范围		电位器调节	右显示及范围		电位器调节	
1	矩形波	宽度	上	0.01S~1S	设定电位器 1	幅度 (0V~6V)	矩形波调幅	
	下		0.1S~10S					
2	正弦波	振幅值 (0~6V)		正弦波调幅	频率	上	0.1Hz~2Hz	设定电位器 2
					下	0.8Hz~50Hz		
3	斜坡	斜率 (0.4~8)		设定电位器 1	宽度 (0.5S~10S)			
4	方波				频率 (2.4Hz~250Hz)		设定电位器 1	
5	继电				幅值 (0V~6V)		设定电位器 1	
6	饱和	斜率 (0.1~5.1)		设定电位器 1	限幅 (0V~6V)		设定电位器 2	
7	死区	斜率 (0.1~5.1)		设定电位器 1	死区宽度 (0V~5V)		设定电位器 2	
8	间隙	斜率 (0.1~5.1)		设定电位器 1	间隙宽度 (0V~5V)		设定电位器 2	
9	矩形/正弦波	详见本节第⑨、⑩点说明						
10	方波/正弦波							

① **矩形波**: 下排按键选择“矩形波”,指示灯亮,函数发生器 (B5) 模块中的“矩形波输出”测孔输出矩形波,左边 2 个数码管显示矩形波正脉冲的宽度“X.X”或“XX”(秒),由“设定电位器 1”控制相应的正脉冲输出宽度;此外,(B5)模块中的“量程选择”开关还可控制正脉冲输出宽度量程(见表 1-2-2)。右边 3 个数码管显示矩形波的幅度“X.XX”(伏),由 (B5) 模块中的“矩形波调幅”电位器控制变化幅度。

注 1: 只有把函数发生器 (B5) 模块左下角的“S-ST”跨接座上套上短路套后,在“矩形波输出”测

孔才有矩形波输出。

注 2:“量程选择”开关置于下档时,其零输出宽度恒保持为 2 秒,与正脉冲输出宽度值无关;“量程选择”开关置于上档时,其零输出宽度与正脉冲输出宽度值相等。

② **正弦波:**下排按键选择“正弦波”,指示灯亮,函数发生器(B5)模块中的“正弦波输出”测孔输出正弦波,左边 2 个数码管显示正弦波的振幅“X.X”(V),由(B5)模块中的“正弦波调幅”电位器控制变化幅度;右边 3 个数码管显示正弦波的频率“X.XX”或“XX.X”(Hz),由“定电位器 2”控制相应的输出频率;此外,(B5)模块中的“量程选择”开关还可控制正弦波的频率输出量程(见表 1-2-2)。

③ **斜坡:**下排按键选择“斜坡”,指示灯亮,函数发生器(B5)模块中的“斜坡输出”孔输出斜坡波形。斜坡输出的幅度为 4V,左边 2 个数码管显示斜坡信号的斜率 X.X,右边 3 个数码管显示斜坡的信号宽度 X.XX,由(B5)模块中的“设定电位器 1”控制相应的斜率。

④ **方波:**下排按键选择“方波”,指示灯亮,函数发生器(B5)模块中的“方波输出”孔输出方波。数码管显示方波频率“XXX.X”(Hz),由(B5)模块中的“设定电位器 1”控制相应的输出频率,幅度为 3V。

⑤ **继电特性:**下排按键选择“继电”,指示灯亮,将信号发生器(B1)的幅度控制电位器中心 Y 测孔作为非线性-5V~+5V 输入信号接到函数发生器(B5)模块中的“非线性输入”测孔,(B1)单元的 K3 开关拨上(-5V),K4 开关也拨上(+5V),(B5)单元中的“非线性输出”测孔信号输出继电特性;数码管显示继电特性的幅值“X.XX”(V),由(B5)模块中的“设定电位器 1”控制相应的输出幅值。

⑥ **饱和特性:**下排按键选择“饱和”,指示灯亮,将信号发生器(B1)的幅度控制电位器中心 Y 测孔作为非线性-5V~+5V 输入信号接到函数发生器(B5)模块中的“非线性输入”测孔,(B1)单元的 K3 开关拨上(-5V),K4 开关也拨上(+5V),(B5)单元中的“非线性输出”测孔信号输出饱和特性;左边 2 个数码管显示饱和特性线性区的斜率“X.X”,由(B5)模块中的“设定电位器 1”设定斜率;右边 3 个数码管显示饱和输出的限幅值“X.XX”(V),由(B5)模块中的“设定电位器 2”设定输出限幅值。

⑦ **死区特性:**下排按键选择“死区”,指示灯亮,将信号发生器(B1)的幅度控制电位器中心 Y 测孔作为非线性-5V~+5V 输入信号接到函数发生器(B5)模块中的“非线性输入”测孔,(B1)单元的 K3 开关拨上(-5V),K4 开关也拨上(+5V),(B5)单元中的“非线性输出”测孔信号输出死区特性;左边 2 个数码管显示死区特性线性区的斜率“X.X”,由(B5)模块中的“设定电位器 1”设定斜率;右边 3 个数码管显示死区宽度“X.XX”(V),由(B5)模块中的“设定电位器 2”设定死区宽度。

⑧ **间隙特性:**下排按键选择“间隙”,指示灯亮,将信号发生器(B1)的幅度控制电位器中心 Y 测孔作为非线性-5V~+5V 输入信号接到函数发生器(B5)模块中的“非线性输入”测孔,(B1)单元的 K3 开关拨上(-5V),K4 开关也拨上(+5V),(B5)单元中的“非线性输出”测孔信号输出间隙特性;左边 2 个数码管显示间隙特性线性区的斜率“X.X”,由(B5)模块中的“设定电位器 1”设定斜率;右边 3 个数码管显示间隙宽度“X.XX”(V),由(B5)模块中的“设定电位器 2”设定间隙宽度。

⑨ **矩形波/正弦波:**上排右按键选择“矩形波/正弦波”,指示灯亮,(B5)模块“矩形波输出”测孔和“正弦波输出”测孔同时有输出,‘矩形波’的指示灯也亮,数码管显示矩形波的信息。若要观察正弦波的信息,再按一次上排右按键,‘正弦波’的指示灯亮,数码管显示正弦波的信息(波形的控制调节与单一波形发生控制相同)。

⑩ **方波/正弦波:**上排右按键选择“方波/正弦波”,指示灯亮,(B5)模块“方波输出”测孔和“正弦波输出”测孔同时有输出,‘方波’的指示灯也亮,数码管显示方波的信息。若要观察正弦波的信息,再按一次上排右按键,“正弦波”的指示灯亮,同时,正弦波数码管显示正弦波的信息(波形的控制调节与单一波形发生控制相同)。

注 1:显示与功能选择模块(D1)右上角的电位器‘RP5’用于调整该模块的基准电压(+2.40V)。

注 2:函数发生器(B5)右下角的‘调零’电位器用于调整正弦波输出的基准零位。上电总清或按‘复位’键总清后,把“正弦波调幅”电位器调到最大,然后调整‘调零’电位器,使“正弦波输出”测孔输出直流电压为零,即正弦波输出的基准零位调整成功。

注 3:上电总清或按“复位”键总清后,数码管显示矩形波信息,矩形波有输出 2 秒宽度的波形,其他波无输出。

3. 手控阶跃信号发生器 (B1)

信号发生器由手控阶跃发生器 (B1-1), 幅度控制 (B1-2) 和非线性输出 (B1-3) 组成。

B1-2 模块可以有三种状态输出:

- (1) K3 开关拨下, K4 开关拨上, 在电位器的 Y 测孔可得到 ‘0~+5V’ 连续可调电压输出。
- (2) K3 开关拨上, K3 开关也拨上, 在电位器的 Y 测孔可得到 ‘-5V~+5V’ 连续可调电压输出。
- (3) K3 开关拨下, K3 开关也拨下, 在电位器的 Y 测孔将得到手控连续可调 ‘0~+5V’ 阶跃信号。

非线性发生模块是利用二极管的非线性特性形成非线性输出, IN 为输入测孔, OUT 为输出测孔。

4. 数模转换器 (B2)

本实验机采用 ADC0832 作为数/模转换, 可实现 8bit 数字输入转换为模拟量。数字 0~0FFH 输入, 经数/模转换后 OUT1 测孔输出为 0~+5V 模拟量。经运放处理后, 在 OUT2 测孔输出为 -5V ~+5V。

5. 虚拟示波器 (B3)

提供两通道模拟信号输入 CH1 和 CH2 测孔, 配合上位机软件的示波器窗口, 可以实现波形的显示、存储, 可以有有效的观察实验中各点信号的波形。详见本实验指导书第二章所述。

6. 采样/保持器 (B4)

B4 模块包含两组采样/保持器。采用 LF398 实现保持, 输入、输出电平范围为 $\pm 12V$ 。“IN”测孔为输入端;“PU”测孔为采样控制端, 高电平采样, 低电平保持。单稳态电路 4538 完成脉冲整形,“A”测孔为输入端 (0/+5V 上升沿),“Q”测孔为输出端 (100 μ S 正脉冲)。

7. 模数转换器 (B7)

本实验机采用 DAC0809 作为模/数转换, 可实现 8bit 数字输出。其中 “IN4 和 IN5”测孔为 0~+5V 模拟量输入, “IN6 和 IN7”测孔为 -5V~+5V 模拟量输入。

8. 定时器、中断单元 (B8)

本单元提供 CPU 控制模块中的定时器 8253 的计数器 1 “CLK1”和 “T1”测孔 (GATE 已短接 VCC), 计数器 2 “CLK1、T2 和 GATE2”测孔; 提供 8259 中断控制器 IRQ5 和 IRQ6 测孔为 CPU 控制模块的中断输入; 固定时钟 (1.229MHz) 脉冲输出测孔; “A 和 A\”测孔分别为附加反相器 (74LS14) 的输入端和输出端, 供用户作为逻辑信号反相用。

9. 基准电压单元 (B6)

本单元可提供 +Vref (+5.00V) 和 -Vref (-5.00V) 两种基准电压。可以通过调整该单元中的 W9 和 W1 电位器来调整基准电压。(在出厂时已调整好) **注意: 该单元的测孔不可随意插线, 以免损坏基准源。**

三. C 实验区

1. 步进电机模块 (C1)

采用 74LS273 (8 位 D 触发器) 的低 4 位输出 Q1~Q4 经 U2003A 来驱动步进电机。

由于步进电机四相长时间通电流会引起电机发热, 用户在电机空闲时应注意将各相电流断开, 即对 74LS273 (8 位 D 触发器) 的低 4 位送 ‘0’。本实验采用了 35BY48 步进电机。

2. 直流电机模块 (C2)

把直流电压引入到电机输入测孔, 就能驱动直流电机转动; 直流电机测速有两种方式, 电机转速的脉冲测速及电压测速输出。本实验采用了 BY25 直流电机。

3. 温控模块 (C3)

温控模块采用装在散热器下的热敏电阻进行测温, 冷却 (COOL) 由 74LS273 输出 Q6 控制, Q6 高电平时风扇转动进行冷却。温控模块加热有两种方式, 模拟电压加热及脉宽控制加热。

① 脉宽控制加热时: 把宽度可调的脉冲加到脉冲加热测孔, (脉冲幅度 > 2.5V 时将加热, C3 单元的 ‘加热’ 灯亮; 脉冲幅度 < 0.8V 时停止加热, ‘加热’ 灯灭)。

② 模拟电压加热: 把 0~+5V 直流电压加到电压加热测孔, 加热时, C3 单元的 ‘加热’ 灯亮, 其加热功率及灯的亮度与加到电压加热测孔的电压成正比。

四. CPU 控制模块

CPU 控制模块是一个单独的电路板名称为 ACT88, 它装在实验机主板的下面, 用一个 50 芯插头座, 与主板联接。CPU 控制模块包含一个 8088 小系统及通讯、中断等外围接口电路。

用户可以对各寄存器、数据口地址编程操作。详见本实验指导书计控分册第八章《微机控制的二次开发》

第二章 虚拟示波器

2.1 虚拟示波器的显示方式

- (1) 示波器的时域显示方式
- (2) 示波器的相平面显示 (X-Y) 方式
- (3) 示波器的频率特性显示方式有对数幅频特性显示、对数相频特性显示 (伯德图), 幅相特性显示方式 (奈奎斯特图), 时域分析 (弧度) 显示方式。
- (4) 示波器的计算机控制显示方式

2.2 虚拟示波器的使用

一. 设置

用户可以根据不同的要求选择不同的示波器, 具体设置方法如下:

1. 示波器的一般用法: 运行 LABACT 程序, 选择‘工具’栏中的‘单迹示波器’项或‘双迹示波器’项, 将可直接弹出该界面。‘单迹示波器’项的频率响应要比‘双迹示波器’项高。
2. 实验使用: 运行 LABACT 程序, 选择**自动控制**、**微机控制**、**控制系统**菜单下的相应实验项目, 就会弹出相应的虚拟示波器的界面, 点击**开始**, 即可使用 CH1、CH2 测孔观察、测量波形, 击**停止**后, 将停止示波器运行, 即可进行波形分析和相关的测量 (只保存当前实验的波形)。

二. 示波器的使用

1. 示波器的时域显示

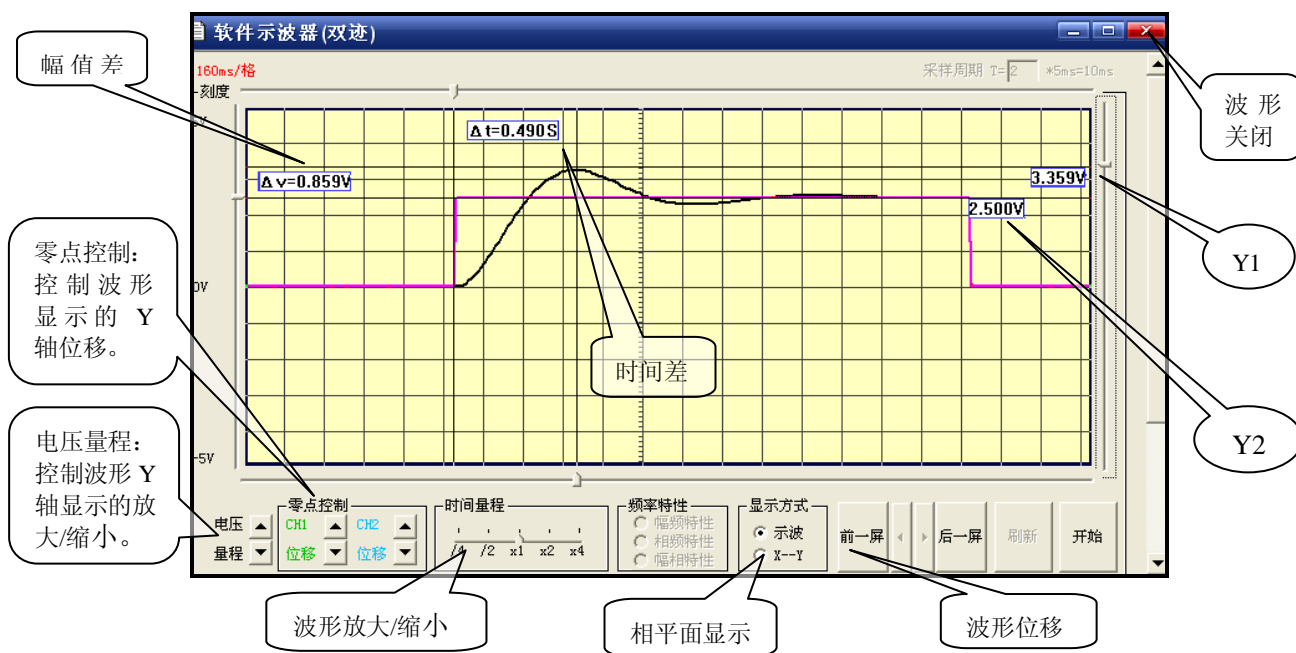


图 2-2-1 虚拟示波器时域显示运行界面 (数字 PID 控制实验曲线)

示波器的时域显示是指显示器界面中 X 轴为时间 t , Y 轴为电压 U 。见图 2-2-1 为示波器的时域显示运行界面, 只要点击**开始**, 示波器就运行了, 此时就可以用实验机上的 (CH1) 和 (CH2) 来采集、观察波形。CH1 和 CH2 各有输入范围选择开关, 当输入电压小于 -5v 大于 $+5\text{v}$ 时应选用 $\times 1$ 档, 如果大于此电压输入范围应选用 $\times 5$ 挡 (表示输入信号衰减 5 倍后进入示波器)。

该显示界面的下方有一个“显示方式”选择框, 提供了**示波**和**X-Y**两种方式。当需要是时域显示方式时, 应选择框内的**示波**方式选项 (通常在弹出示波器界面时, 默认为**示波**方式)。

(1) 信号幅值测量

①信号幅值测量：在显示界面的左右各有一条滑竿标尺，用户点住滑竿标尺上、下移动到显示界面中需标定的点，此时滑竿的最右侧的黄色方块上显示的数据为当前测量点的幅值，见图 2-2-1 的 4.34V 和 2.5V 数据显示。在 Y 轴上两条滑竿之间（在显示界面的左侧）的黄色方块中显示的数据，为两个测量点的幅值差，见图 2-2-1 上的 $\Delta v=1.84\text{V}$ 。

②电压量程：控制波形 Y 轴显示的放大/缩小。

③零点控制：控制波形显示的 Y 轴位移。

(2) 信号时间测量

① 移动波形

在运行开始到停止。示波器可能已采样了多幅波形，因此用户首先必须点击显示界面下方的‘前一屏’或‘后一屏’来获取显示所需的画面，然后再点击中间的‘微调按钮’来调节波形至最佳测量状态。

② 压缩/扩展波形

在显示界面的下方有一个‘时间量程’选择框，在框中‘ $\times 2$ ’表示波形压缩了 2 倍，‘ $\times 4$ ’表示波形压缩了 4 倍，该功能适用于观察频率低、周期长的信号，例如观察时间常数大的积分信号输出；在框中‘ $/ 2$ ’表示波形放大了 2 倍，‘ $/ 4$ ’表示波形放大了 4 倍，该功能适用于观察频率较高的信号，例如观察微分信号输出、阶跃输出的上升时间等。

③ 信号时间的测量

当信号在显示界面处于最佳测量状态后，用户可以点住显示界面上下各一条的滑竿，左、右移动到波形需标定的点的位置，在 X 轴上两条滑竿之间的黄色方块中显示的数据，为两个 X 轴上标定的时间差，见图 2-2-1 上的 $\Delta t=1.200\text{S}$ 。

2. 示波器的相平面显示 (X-Y) 使用

在示波器的时域显示界面下方的‘显示方式’选择框中，如用户选中‘**X-Y**’选项，则虚拟示波器将提供相当于真实示波器中的 X-Y 选项，即可实现自动控制原理实验中的‘相平面分析’实验。

实验使用：运行 **LABACT** 程序，选择‘**自动控制 / 非线性系统的相平面分析**’菜单下的相应实验项目，就会弹出相应的虚拟示波器界面，

在运行中，如果用户在‘显示方式’选择框中，选中‘**示波**’选项，示波器将转为时域显示方式。这样用户可以在同一界面上方便地看到系统的时域显示和相平面显示。可按**刷新**按钮进行波形更新。

3. 示波器的幅频/相频/幅相特性显示使用

该方式专为第三章自动控制原理实验第 3.2 节〈线性控制系统的频率响应分析〉设计的。

在实验中欲观测实验结果时，应运行 **LabACT** 程序，选择**自动控制 / 线性控制系统的频率响应分析**-实验项目，再分别选择**一阶系统**或**二阶系统**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 ω 、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 \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’表规定的频率值，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，将显示被测系统的闭环对数幅频、对数相频特性曲线（伯德图）和幅相曲线（奈奎斯特图），点击**停止**后，将停止示波器运行。

用户如选择了**二阶系统**，则虚拟示波器上先弹出**闭环**频率特性界面，点击**开始**，待实验机把**闭环**频率特性测试结束后，再在示波器界面左上角的红色‘**开环**’或‘**闭环**’字上双击，将在示波器界面上弹出‘**开环/闭环**’选择框，点击**确定**后，示波器界面左上角的红字，将变为‘**开环**’然后再在示波器界面下部‘频率特性’选择框点击（任一项），在示波器上将转为‘**开环**’频率特性显示界面。

在‘**开环**’频率特性界面上，亦可转为‘**闭环**’频率特性显示界面，方法同上。

在频率特性显示界面的左上角的红色‘**开环**’或‘**闭环**’字表示当前界面的显示状态。可进行以下各项**线性控制系统的频率响应分析**：

(1) 被测系统某个频率点的 L 、 φ 、 Im 、 Re 等相关数据测量：

(2) 闭环系统谐振频率 ω_r ，谐振峰值 $L(\omega_r)$ 等相关数据的测量：

(3) 开环系统的幅值穿越频率 ω_c 、相角裕度 γ 等相关数据的测量：

4. 示波器的计算机控制显示使用

示波器的计算机控制显示方式可以在示波器显示界面上进行参数的设置和修改，该界面显示方式用于 PID 算法、最少拍控制、大林算法、温度控制等实验。**注意：**分析波形必须先停止。

1) 最少拍控制系统实验

在实验中欲观测实验结果时，只要运行 **LABACT** 程序，选择**微机控制**菜单下的**最少拍控制系统---有纹波**实验项目，就会弹出虚拟示波器的界面，确保实验机处于联机状态，点击**开始**后将自动加载相应源文件，此时可选用虚拟示波器（B3）单元的 CH1、CH2 测孔测量波形。

该实验显示界面的下边“计算公式”栏中有 K_i 、 P_i ，7 个控制参数，界面上方有采样周期 T ，点击**开始**后，即可使实验机按照新的控制参数运行。

2) 数字 PID 控制实验

在实验中欲观测实验结果时，只要运行 **LABACT** 程序，选择**微机控制**菜单下的**数字 PID 控制**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，运行程序。

该实验显示界面的右边“PID 系数”栏中有 K_p 、 T_I 、 T_D 3 个控制系数，界面上方有采样周期 T ，点击‘**发送**’后，即可使实验机按照新的控制参数运行。

3) 温度闭环控制

在实验中欲观测实验结果时，只要运行 **LABACT** 程序，选择**控制系统**菜单下的**温度闭环控制**实验项目，就会弹出温度示波器的界面。点击**开始**后将自动加载相应源文件，然后再点击**发送**键，将运行；然后设定‘温度’参数、积分量阈值和控制系数 PID 后，点击**发送**，即可实现温度闭环控制。

该实验显示界面的右边“PID 系数”栏中有 K_p 、 T_I 、 T_D 3 个控制系数，积分量 $\left| \sum_{j=0}^K e(j) \right|$ 阈值 E_0 点击‘**发送**’后，即可使实验机按照新的控制系数和设定参数运行。

冷却：在运行中，改变‘温度’参数为‘1℃’后，再次点击“发送”键将启动风扇转动，进行冷却。

5. 虚拟示波器的截图

在虚拟示波器界面上第二排图标工具栏左起第 22 个（黄色问号的右边）加上了示波器的截图按钮，截图后需要命名保存，默认则保存到 C 盘 AEDK 目录下，格式为 BMP 图象文件，可以双击直接查看，方便老师学生直接将保存的图，粘贴到文档之中。

第三章 自动控制原理实验

3.1 线性系统的时域分析

3.1.1 典型环节的模拟研究

一. 实验目的

1. 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
2. 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

二. 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。具体用法参见用户手册中的示波器部分。

1). 观察比例环节的阶跃响应曲线

典型比例环节模拟电路如图 3-1-1 所示。

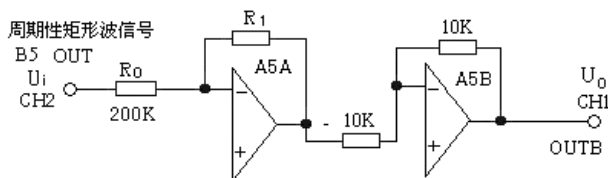


图 3-1-1 典型比例环节模拟电路

$$\text{传递函数: } G(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(S)} = K \quad K = \frac{R_1}{R_0}; \quad \text{单位阶跃响应: } U(t) = K$$

实验步骤：注：‘S ST’ 用短路套短接！

- (1) 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。
 - 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 > 1 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 = 4V（D1 单元右显示）。
- (2) 构造模拟电路：按图 3-1-1 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) → A5 (H1)
2	示波器联接	A5 (OUTB) → B3 (CH1)
3	×1 档	B5 (OUT) → B3 (CH2)

- (3) 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→+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。

实验报告要求：按下表改变图 3-1-1 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_i	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	

2). 观察惯性环节的阶跃响应曲线

典型惯性环节模拟电路如图 3-1-2 所示。

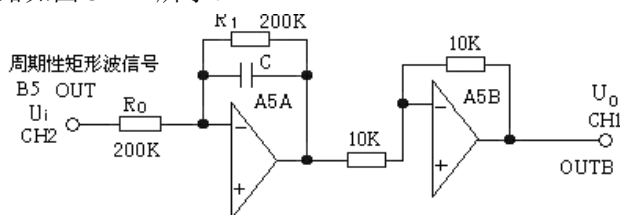


图 3-1-2 典型惯性环节模拟电路

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: $U_o(t) = K(1 - e^{-\frac{t}{T}})$

实验步骤: 注: ‘S ST’ 用短路套短接!

(1) 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 (Ui); 该信号为零输出时, 将自动对模拟电路锁零。

- 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 > 1 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 = 4V (D1 单元右显示)。

(2) 构造模拟电路: 按图 3-1-4 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, S6, S10
2	B5	‘S-ST’

(b) 测孔连线

1	信号输入 (Ui)	B5 (OUT) → A5 (H1)
2	示波器联接 ×1 档	A5 (OUTB) → B3 (CH1)
3		B5 (OUT) → B3 (CH2)

(3) 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) 阶跃信号按钮时 (0 → +4V 阶跃), 观测 A5B 输出端 (Uo) 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 × 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。

实验报告要求: 按下表改变图 3-1-2 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 Ui	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	

3). 观察积分环节的阶跃响应曲线

典型积分环节模拟电路如图 3-1-3 所示。

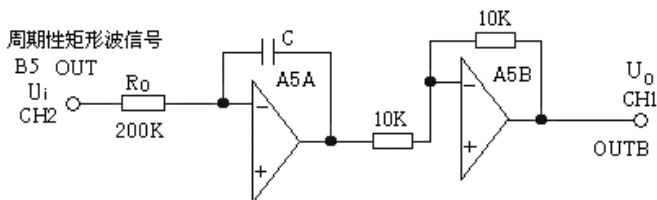


图 3-1-3 典型积分环节模拟电路

传递函数: $G(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(S)} = \frac{1}{TS}$ $T_i = R_0 C$ 单位阶跃响应: $U_o(t) = \frac{1}{Ti} t$

实验步骤: 注: ‘S ST’ 用短路套短接!

(1) 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 (Ui); 该信号为零输出时, 将自动对模拟电路锁零。

- 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 > 1 秒 (D1 单元左显示)。

(注: 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!)

- ③ 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)。

(2) 构造模拟电路: 按图 3-1-3 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) → A5 (H1)
2	示波器联接 ×1 档	A5 (OUTB) → B3 (CH1)
3		B5 (OUT) → B3 (CH2)

(3) 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 ΔV=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。

实验报告要求: 按下表改变图 3-1-3 所示的被测系统时间常数, 观测结果, 填入实验报告。

R ₀	C	输入 U _i	积分常数 T _i	
			计算值	测量值
200K	1u	1V		
	2u			
100K	1u			
	2u			

4). 观察比例积分环节的阶跃响应曲线

典型比例积分环节模拟电路如图 3-1-4 所示。

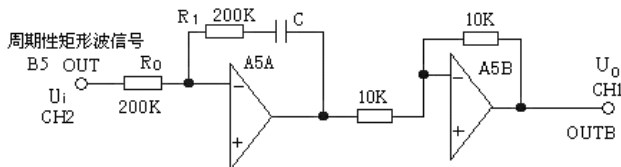


图 3-1-4 典型比例积分环节模拟电路

$$\text{传递函数: } G(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(S)} = K \left(1 + \frac{1}{T_i S} \right) \quad K = \frac{R_1}{R_0} \quad T_i = R_1 C \quad \text{单位阶跃响应: } U_o(t) = K \left(1 + \frac{t}{T} \right)$$

实验步骤: 注: ‘S ST’ 用短路套短接!

(1) 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。

- 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 > 1 秒 (D1 单元左显示)。

(注: 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!)

- ③ 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)。

(2) 构造模拟电路: 按图 3-1-4 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 _i)	B5 (OUT) → A5 (H1)
2	示波器联接 ×1 档	A5 (OUTB) → B3 (CH1)
3		B5 (OUT) → B3 (CH2)

(3) 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 。

实验报告要求：按下表改变图 3-1-4 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_i	比例系数 K		积分常数 T_i	
				计算值	测量值	计算值	测量值
200K	200K	1u	1V	1			
		2u		1			
100K		1u		2			
		2u		2			

5). 观察比例微分环节的阶跃响应曲线

典型比例微分环节模拟电路如图 3-1-5 所示。

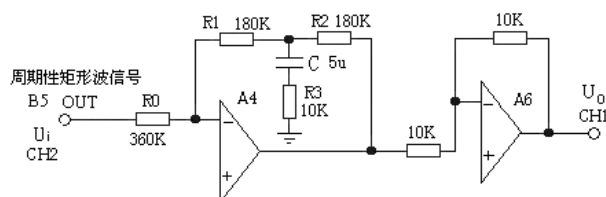


图 3-1-5 典型比例微分环节模拟电路

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 1 秒左右 (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 = 0.5V (D1 单元右显示)。

(2) 构造模拟电路：按图 3-1-5 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	A4	S4, S9
2	A6	S2, S6
3	B5	‘S-ST’

(b) 测孔连线

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

(3) 运行、观察、记录：虚拟示波器的时间量程选‘/4’档。

① 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 ΔV 。

② 移动虚拟示波器两根横游标，从最高端开始到 ΔV 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 Δt 。

③ 已知 $K_D=10$ ，则图 3-1-5 的比例微分环节模拟电路微分时间常数： $T_D = K_D \times \Delta t$

6). 观察 PID (比例积分微分) 环节的响应曲线

PID (比例积分微分) 环节模拟电路如图 3-1-6 所示。

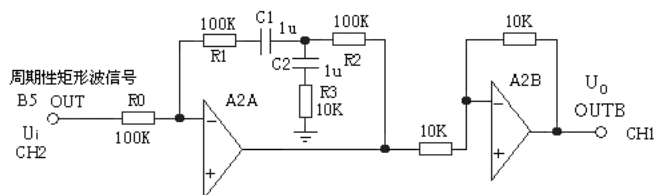


图 3-1-6 PID (比例积分微分) 环节模拟电路

实验步骤：注：‘S ST’ 用短路套短接！

(1) 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。

- 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 0.4 秒左右 (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 = 0.3V (D1 单元右显示)。
- (2) 构造模拟电路: 按图 3-1-6 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	A2	S4, S8
2	B5	‘S-ST’

(b) 测孔连线

1	信号输入 (U _i)	B5 (OUT) → A2 (H1)
2	示波器联接 ×1 档	A2B (OUTB) → B3 (CH1)
3		B5 (OUT) → B3 (CH2)

(3) 运行、观察、记录:。

- ① 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)。
- ② 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。
- ③ 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。
- ④ 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 ΔV 。
- ⑤ 移动虚拟示波器两根横游标, 从最高端开始到 ΔV 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 τ 。
- ⑥ 已知 K_D, 则图 3-1-6 的比例微分环节模拟电路微分时间常数: $T_d = K_D \times \tau$ 。

3.1.2 二阶系统瞬态响应和稳定性

一. 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 ω_n 、阻尼比 ξ 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。

二. 实验内容及步骤

1. I 型二阶闭环系统模拟电路见图 3-1-7, 观察阻尼比 ξ 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。
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。

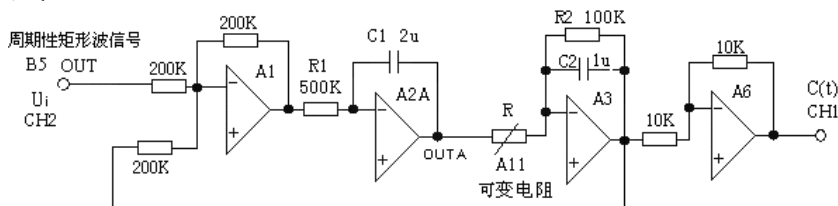


图 3-1-7 I 型二阶闭环系统模拟电路

积分环节 (A2 单元) 的积分时间常数 $T_i = R_1 * C_1 = 1S$ 惯性环节 (A3 单元) 的惯性时间常数 $T = R_2 * C_2 = 0.1S$

阻尼比和开环增益 K 的关系式为：

临界阻尼响应： $\xi = 1, K=2.5, R=40k\Omega$

欠阻尼响应： $0 < \xi < 1$ ，设 $R=4k\Omega, K=25, \xi = 0.316$

过阻尼响应： $\xi > 1$ ，设 $R=70k\Omega, K=1.43\xi = 1.32 > 1$

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 ≥ 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 = 3V (D1 单元右显示)。

(2) 构造模拟电路：按图 3-1-7 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	S2, S11, S12
3	A3	S8, S10
4	A6	S2, S6
5	B5	‘S-ST’

(b) 测孔连线

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	A2A (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	A6 (OUT) \rightarrow B3 (CH1)
9	$\times 1$ 档	B5 (OUT) \rightarrow B3 (CH2)

(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。

三. 实验报告要求：

按下表改变图 3-1-7 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 ≥ 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		

(2) 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 T_i (A2)	自然频率 ω_n 计算值	阻尼比 ξ 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
25	0.1	1				
	0.2					
	0.3					
20	0.1	0.5				

		0.2				
40						

3.1.3 三阶系统的稳定性和瞬态响应

一. 实验目的

1. 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。
2. 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。
3. 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。
4. 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。
5. 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。

二. 实验内容及步骤

I 型三阶闭环系统模拟电路如图 3-1-8 所示。

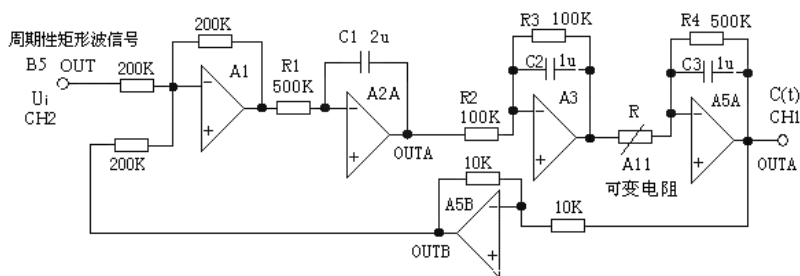


图 3-1-8 I 型三阶闭环系统模拟电路图

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。

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 30K Ω ($K=16.7$)、41.7K Ω ($K=12$)、225.2K Ω ($K=2.22$), 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。

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 ≥ 6 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) 构造模拟电路: 按图 3-1-8 安置短路套及测孔连线, 表如下。

(a) 安置短路套

(b) 测孔连线

	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’

1	信号输入 r(t)	B5 (OUT) → A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) → A2 (H1)
3	运放级联	A2A (OUTA) → A3 (H1)
4	运放级联	A3 (OUT) → A5 (H1)
5	负反馈	A5B (OUTB) → 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	A5A (OUTA) → B3 (CH1)
9	×1 档	B5 (OUT) → B3 (CH2)

(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 ×4 档)。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 30K、41.7K、225.2K, 等待完整波形出来后, 点击**停止**, 用示波器观察 A5A 单元信号输出端 C (t) 的系统阶跃响应。

2). 观察和验证等效于原三阶系统 (图 3-1-8) 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 (图 3-1-8) 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。

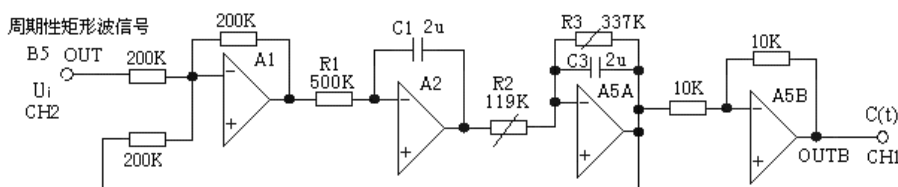


图 3-1-9 等效于原三阶系统 (图 3-1-8) 的二阶单位反馈闭环系统

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 ≥6 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) 构造模拟电路: 按图 3-1-9 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	A2	S2, S11, S12
3	A5	S10, S11
4	B5	‘S-ST’

(b) 测孔连线

1	信号输入 r(t)	B5 (OUT) → A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) → A2 (H1)
3	跨接元件	元件库 A11 中直读式可变电阻跨接到 A2A (OUTA) 和 A5 (IN) 之间
4	119K	
5	跨接元件	元件库 A11 中直读式可变电阻跨接到 A5 (IN) 和 (OUTA) 之间
6	337K	
7	负反馈	A5A (OUTA) → A1 (H2)
8	示波器联接	A5B (OUTB) → B3 (CH1)
9	×1 档	B5 (OUT) → B3 (CH2)

(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 ×4 档)。也可选用普通示波器观测实验结果。

② 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。

三. 实验报告要求:

按下表改变图 3-1-8 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 ≥ 6 秒，电压幅度 = 2.5V）

1. 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。
2. 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。

惯性时间常数 T_1 (A3)	惯性时间常数 T_1 (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			

3. 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。

3.2 线性控制系统的频域分析

3.2.1 频率特性测试

一. 实验目的

1. 了解线性系统频率特性的基本概念。
2. 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。

二. 实验内容及步骤

被测系统是一阶惯性的模拟电路图见图 3-2-1，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。

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。

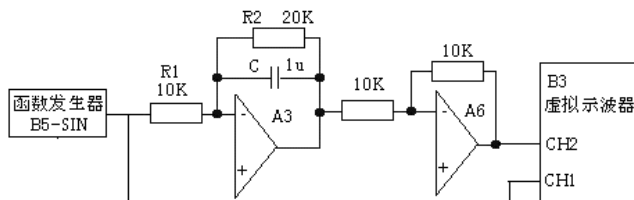


图 3-2-1 被测系统的模拟电路图

实验步骤:

- (1) 将函数发生器（B5）单元的正弦波输出作为系统输入。
 - ① 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）。
 - ② 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）。
 - ③ 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）。
- (2) 构造模拟电路：按图 3-2-1 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	A3	S1, S7, S9
2	A6	S2, S6

(b) 测孔连线

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)

- (3) 运行、观察、记录:

- ① 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。
- ② 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。

三. 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 $L(\omega)$		相频特性 $\varphi(\omega)$	
	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				

思考题: 把图 3-2-6 所示的二阶闭环系统作为被测系统, 观测系统的闭环幅频特性和相频特性, 填入实验报告。並画出系统的闭环幅频特性、相频特性曲线。

3.2.2 一阶惯性环节的频率特性曲线

一. 实验目的

1. 了解和掌握一阶惯性环节的对数幅频特性 $L(\omega)$ 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 ω 的计算, 及惯性时间常数对转折频率的影响
3. 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。

二. 实验内容及步骤

1. 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. 惯性环节的频率特性测试电路见图 3-2-2, 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, 並计算和测量其转折频率, 填入实验报告。

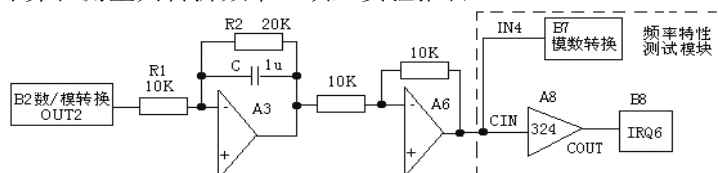


图 3-2-2 惯性环节的频率特性测试电路

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: 按图 3-2-2 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	A3	S1, S7, S9
2	A6	S2, S6

(b) 测孔连线

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)
		A8 (COUT1) → B8 (IRQ6)
5	幅值测量	A6 (OUT) → B7 (IN4)

- (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, 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 ω 、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 \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)。示波器的截图详见虚拟示波器的使用。

③ 显示该系统用户点取的频率点的 ω 、 L 、 φ 、 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 、 ω 、 L 、 φ 、 Im 、 Re 相关数据，同时在曲线上打‘十字标记’。

三. 实验报告要求:

按下表改变图 3-2-2 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		

3.2.3 二阶闭环系统的频率特性曲线

一. 实验目的

1. 了解和掌握二阶闭环系统中的对数幅频特性 $L(\omega)$ 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. 了解和掌握欠阻尼二阶闭环系统中的自然频率 ω_n 、阻尼比 ξ 对谐振频率 ω_r 和谐振峰值 $L(\omega_r)$ 的影响及 ω_r 和 $L(\omega_r)$ 的计算。
3. 观察和分析欠阻尼二阶开环系统的谐振频率 ω_r 、谐振峰值 $L(\omega_r)$ ，并与理论计算值作比对。
4. 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。

二. 实验内容及步骤

1. 被测系统模拟电路图的构成如图 3-2-3 所示，观测二阶闭环系统的频率特性曲线，测试其谐振频率 ω_r 、谐振峰值 $L(\omega_r)$ 。
2. 改变被测系统的各项电路参数，画出其系统模拟电路图，及闭环频率特性曲线，并计算和测量系统的谐振频率 ω_r 及谐振峰值 $L(\omega_r)$ ，填入实验报告。

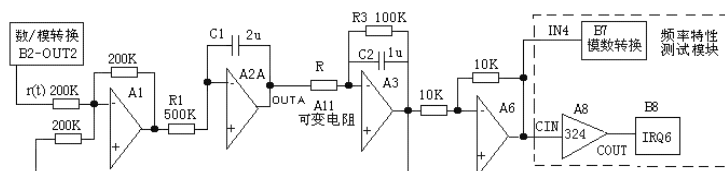


图 3-2-3 二阶闭环系统频率特性测试电路

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: 按图 3-2-3 安置短路套及测孔联线, 表如下。
 - (a) 安置短路套
 - (b) 测孔联线

模块号	跨接座号	1	信号输入	B2 (OUT2) → A1 (H1)	
1	A1	S4, S8	2	运放级联	A1 (OUT) → A2 (H1)
2	A2	S2, S11, S12	3	运放级联	A3 (OUT) → A6 (H1)
3	A3	S8, S9	4	负反馈	A3 (OUT) → A1 (H2)
5	A6	S2, S6	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 A2A (OUTA) 和 A3 (IN) 之间

(3) 运行、观察、记录:

① 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。



在该表中用户可根据自己的需要填入各个扫描点频率 (本实验机选取的频率值 f , 以 0.1Hz 为分辨率), 如需在特性曲线上标注显示某个扫描点的角频率 ω 、幅频特性 $L(\omega)$ 或相频特性 $\varphi(\omega)$, 则可在该表的扫描点上方小框内点击一下 (打 \checkmark)。设置完后, 点击**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’表规定的频率值, 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)。

③ 显示该系统用户点取的频率点的 ω 、 L 、 φ 、 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, 例如所选择的信号频率 f 值为 4.19Hz , 则被认为 4.1Hz 送入到被测对象的输入端), 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 、 ω 、 L 、 φ 、 Im 、 Re 相关数据, 同时在曲线上打‘十字标记’。如果增添的频率点足够多, 则特性曲线将成为近似光滑的曲线。

鼠标在界面上移动时, 在界面的左下角将会同步显示鼠标位置所选取的角频率 ω 值及幅值或相位值。

④ 谐振频率和共振峰值的测试:

在闭环对数幅频曲线中用鼠标在曲线峰值处点击一下, 待检测完成后就可以根据‘十字标记’测得该系统的谐振频率 ω_r , 谐振峰值 $L(\omega_r)$ 。

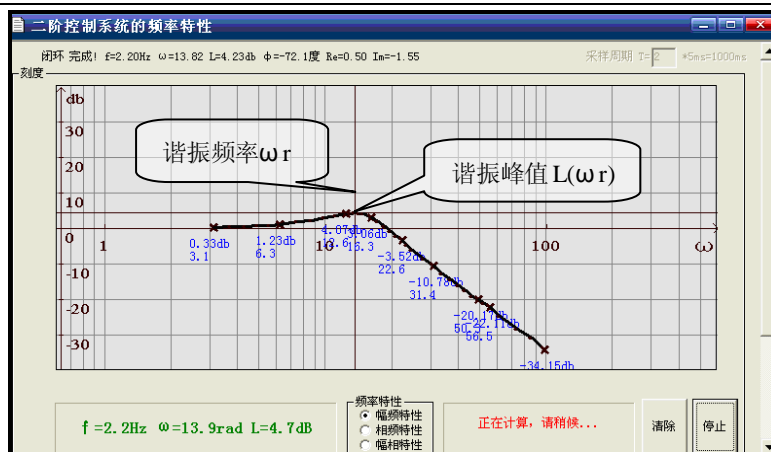


图 3-2-4 被测二阶闭环系统的对数幅频曲线

三. 实验报告要求:

按下表改变图 3-2-3 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				

3.2.4 二阶开环系统的频率特性曲线

一. 实验目的

1. 了解和掌握 I 型二阶开环系统中的对数幅频特性 $L(\omega)$ 和相频特性 $\varphi(\omega)$, 实频特性 $Re(\omega)$ 和虚频特性 $Im(\omega)$ 的计算。
2. 了解和掌握欠阻尼 I 型二阶闭环系统中的自然频率 ω_n 、阻尼比 ξ 对开环参数幅值穿越频率 ω_c 和相位裕度 γ 的影响, 及幅值穿越频率 ω_c 和相位裕度 γ 的计算。
3. 研究表征系统稳定程度的相位裕度 γ 和幅值穿越频率 ω_c 对系统的影响。
4. 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

二. 实验内容及步骤

1. 被测系统模拟电路图的构成如图 3-2-3 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 ω_c 、相位裕度 γ 。

2. 改变被测系统的各项电路参数, 画出其系统模拟电路图, 及开环频率特性曲线, 并计算和测量其幅值穿越频率 ω_c 、相位裕度 γ , 填入实验报告。

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: 安置短路套及测孔联线表同第 3.2.2 节《二阶闭环系统的频率特性曲线测试》。
- (3) 运行、观察、记录:
 - ① 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, 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

性曲线上直接标注显示某个扫描点的角频率 ω 、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 \checkmark ）。确认后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’表规定的频率值，实现频率特性测试。

② 待实验机把**闭环**频率特性测试结束后，再在示波器界面左上角的红色‘**开环**’或‘**闭环**’字上双击，将在示波器界面上弹出‘开环/闭环’选择框，点击**确定**后，示波器界面左上角的红字，将变为‘**开环**’然后再在示波器界面下部‘频率特性’选择框点击（任一项），在示波器上将转为‘**开环**’频率特性显示界面。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）。

在‘开环’频率特性界面上，亦可转为‘**闭环**’频率特性显示界面，方法同上。

在频率特性显示界面的左上角，有红色‘开环’或‘闭环’字表示当前界面的显示状态。

图 3-2-3 的被测二阶系统的**开环**对数幅频曲线的实验结果见图 3-2-5 所示。

③ 显示该系统用户点取的频率点的 ω 、 L 、 φ 、 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，例如所选择的信号频率 f 值为 4.19Hz ，则认为 4.1Hz 送入到被测对象的输入端），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 、 ω 、 L 、 φ 、 Im 、 Re 相关数据，同时在曲线上打‘十字标记’。如果增添的频率点足够多，则特性曲线将成为近似光滑的曲线。

鼠标在界面上移动时，在界面的左下角将会同步显示鼠标位置所选取的角频率 ω 值及幅值或相位值。

在软件安装目录\Aedk\LabACT\两阶频率特性数据表.txt 中将列出所有测试到的频率点的开环 L 、 φ 、 Im 、 Re 等相关数据测量。注：该数据表不能自动更新，只能用‘关闭后再打开’的办法更新。

④ 幅值穿越频率 ω_c ，相位裕度 γ 的测试：

在开环对数幅频曲线中，用鼠标在曲线 $L(\omega)=0$ 处点击一下，待检测完成后，就可以根据‘十字标记’测得系统的幅值穿越频率 ω_c ，见图 3-2-5；同时还可在开环对数相频曲线上根据‘十字标记’测得该系统的相位裕度 γ 。实验结果可与式（3-2-3）和（3-2-4）的理论计算值进行比对。

注 1：用户用鼠标只能在幅频或相频特性曲线的界面上点击所需增加的频率点，无法在幅相曲线的界面上点击所需增加的频率点。

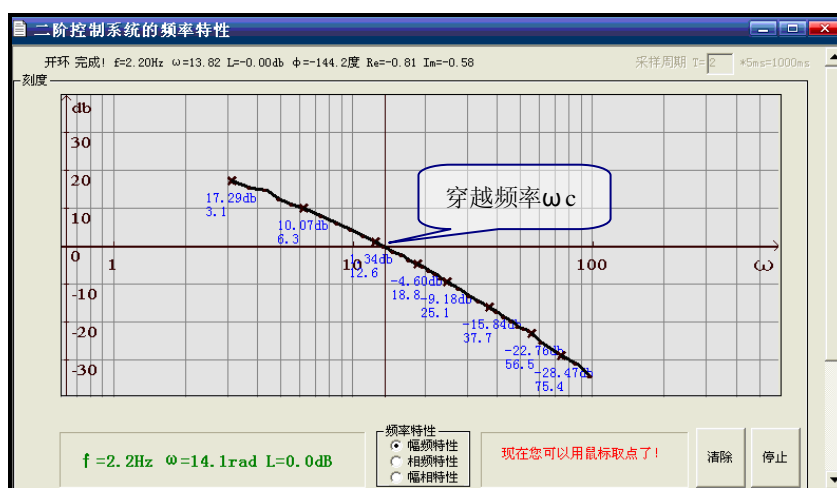


图 3-2-5 被测二阶开环系统的对数幅频曲线

三. 实验报告要求：

按下表改变图 3-2-4 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（对数幅频曲线、相频曲线和幅相曲线），并计算和测量系统的穿越频率及相位裕度，填入实验报告。

开环增益 K (A3)	惯性常数 T (A3)	积分常数 Ti (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				

3.3 线性系统的校正与状态反馈

控制系统的校正与状态反馈就是在被控对象已确定，在给定性能指标的前提下，要求设计者选择控制器（校正网络）的结构和参数，使控制器和被控对象组成一个性能满足指标要求的系统。

3.3.1 频域法串联超前校正

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

一. 实验目的

1. 了解和掌握超前校正的原理。
2. 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。
3. 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。

二. 实验内容及步骤

1. 观测被控系统的开环对数幅频特性 $L(\omega)$ 和相频特性 $\varphi(\omega)$ ，幅值穿越频率 ω_c ，相位裕度 γ ，按“校正后系统的相位裕度 γ' ”要求，设计校正参数，构建校正后系统。
2. 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 γ' 、超调量 M_p 、峰值时间 t_p 。
3. 改变“校正后系统的相位裕度 γ' ”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 γ' 、超调量 M_p 、峰值时间 t_p 填入实验报告。

注：在进行本实验前应熟练掌握使用本实验机的二阶系统开环对数幅频特性和相频特性的测试方法。

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 3-3-1。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。

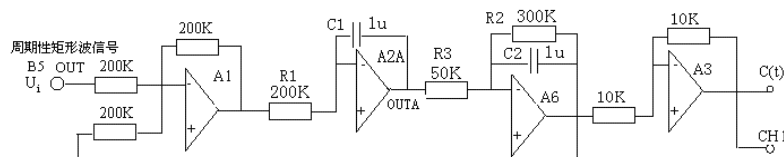


图 3-3-1 未校正系统模拟电路图

实验步骤： 注：‘SST’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 ≥ 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) 构造模拟电路：按图 3-3-1 安置短路套及测孔连线，表如下。
 - (a) 安置短路套
 - (b) 测孔连线

	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'

1	信号输入 r(t)	B5 (OUT) → A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) → A2 (H1)
3	运放级联	A2A (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)

(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 $t_p = 0.32S$

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 3-3-2。

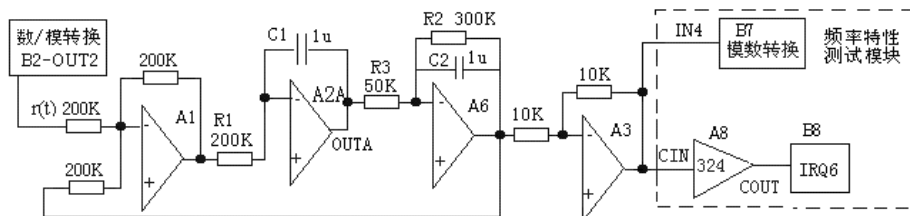


图 3-3-2 未校正系统频域特性测试的模拟电路图

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: 按图 3-3-2 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	A1	S4, S8
2	A2	S3, S11
3	A3	S1, S6
4	A6	S4, S8, S9
5	B5	'S-ST'

(b) 测孔连线

1	信号输入 r(t)	B2 (OUT2) → A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) → A2 (H1)
3	运放级联	A2A (OUTA) → A6 (H1)
4	负反馈	A6 (OUT) → A1 (H2)
5	运放级联	A6 (OUT) → A3 (H1)
6	幅值测量	A3 (OUT) → B7 (IN4)
7	相位测量	A3 (OUT) → A8 (CIN1)
8		A8 (COUT1) → B8 (IRQ6)

(3) 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。详见第 3.2 节《线性控制系统的频域分析》。

图 3-3-2 的被测二阶系统的开环对数幅频、相频曲线见图 3-3-3 和图 3-3-4 所示。

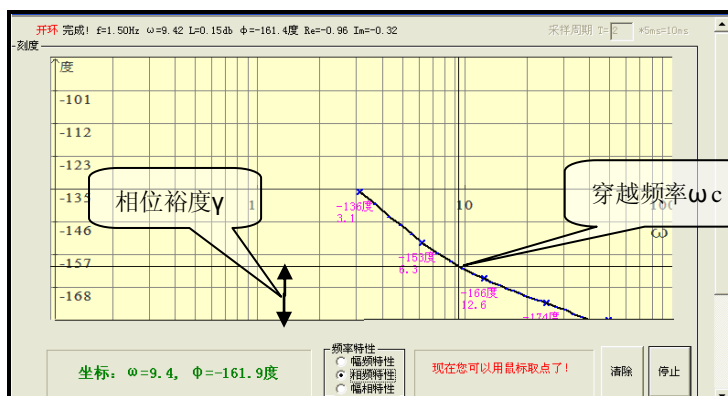


图 3-3-3 未校正系统的相频特性曲线

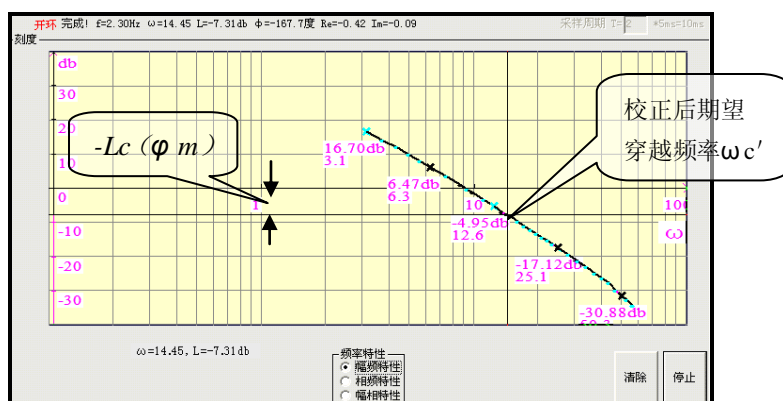


图 3-3-4 未校正系统开环幅频特性曲线

在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 $\omega_c = 9.4 \text{ rad/s}$ ， 相位裕度 $\gamma = 18.9^\circ$

3). 超前校正网络的设计

- ① 在未校正系统模拟电路的开环相频特性曲线（图 3-3-3）上测得未校正系统的相位裕度 $\gamma = 18.9^\circ$ 。
- ② 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：

$$\varphi_m = \gamma' - \gamma + \Delta = 52^\circ - 19^\circ + 9^\circ = 42^\circ, \quad \sin \varphi_m = 0.67。$$

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

- ③ 据式 3-3-3 可计算出网络的参数：
$$a = \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m} = \frac{1 + 0.67}{1 - 0.67} = 5$$

- ④ 据式 3-3-4 可计算出网络的最大超前相位角 φ_m 处的对数幅频值为：

$$L_c(\varphi_m) = 10 \lg a = 10 \lg 5 = 7 \text{ dB}$$

- ⑤ 在系统开环幅频特性曲线（图 3-3-4）上，可测得 $L(\omega) = -7 \text{ dB}$ 时的角频率 $\omega_m = 14.4 \text{ rad/s}$ ，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 ω_c' 。

- ⑥ 据式 3-3-5 可计算出计算串联超前校正网络参数：
$$T = \frac{1}{\omega_m \sqrt{a}} = \frac{1}{14.4 \times 2.24} = 0.031，$$

- ⑦ 据式 3-3-2 令 $C=1\mu$ ，计算出： $R_4=155\text{K}$ ， $R_5=38.7\text{K}$

超前校正网络传递函数为：
$$G_c(s) = \frac{1}{5} \times \frac{1 + 0.155s}{1 + 0.031s} \quad (3-3-7)$$

⑧ 为了补偿接入超前校正网络后，被校正系统的开环增益要下降 a 倍，必须另行提高系统的开环增益增益 a 倍。因为 $a=5$ ，所以校正后系统另行串入开环增益应等于 5 的运放 A5。

4)、串联超前校正后系统的频域特性的测试

串联超前校正后系统频域特性测试的模拟电路图见图 3-3-5。

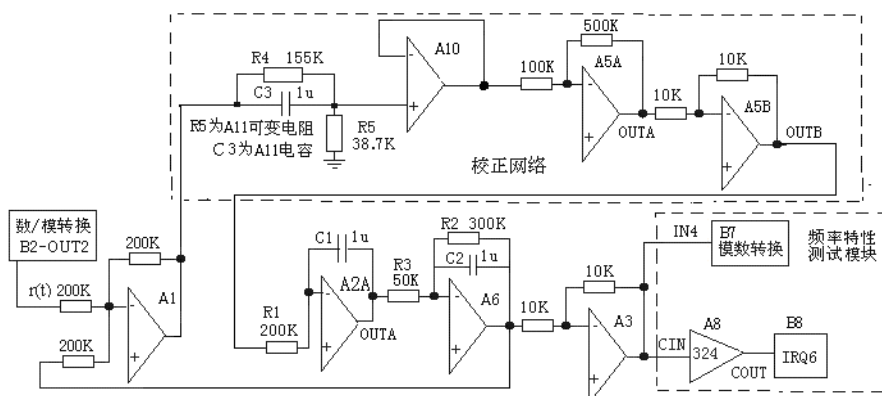


图 3-3-5 串联超前校正后系统频域特性测试的模拟电路图

图 3-3-5 串联超前校正后系统的传递函数为： $G(S) = \frac{1}{5} \times \frac{1+0.155S}{1+0.031S} \times \frac{30}{0.2S(1+0.3S)}$

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：按图 3-3-5、图 3-3-6 安置短路套与测孔连线表如下。

(a) 安置短路套

(b) 测孔连线

	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

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 /9	元件库 A11 中可变电阻跨接到 A1 (OUT) 和 A10 (IN+) 之间	校正网络：参见图 3-3-6
10	跨接元件 /11	元件库 A11 中可变电阻跨接到 A1 (OUT) 和 A10 (IN+) 之间	
12	跨接元件 /13	元件库 A11 中可变电阻跨接到 A10 (IN+) 和 GND 之间	
14	运放级联	A10 (OUT) → A5 (H1)	
15	运放级联	A5B (OUTB) → A2 (H1)	

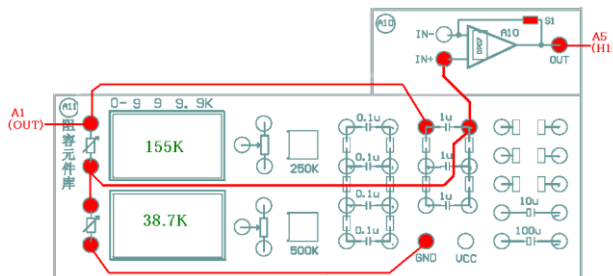


图 3-3-6 校正网络 (部分) 连线示意图

- (3) 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。

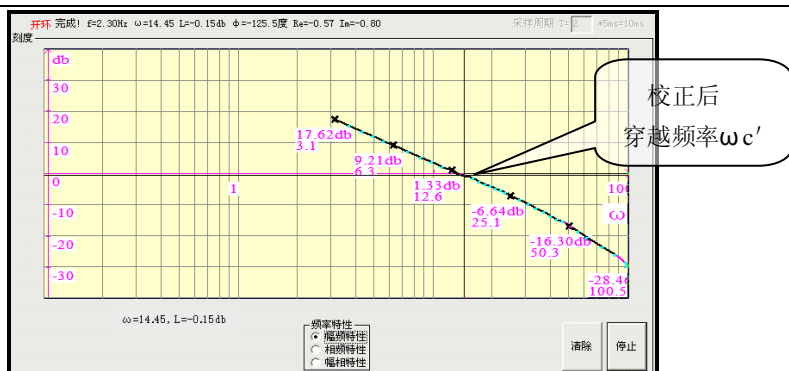


图 3-3-7 串联超前校正后系统的开环对数幅频曲线

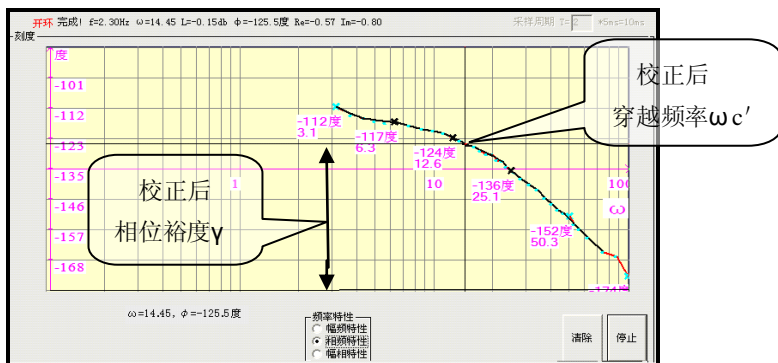


图 3-3-8 串联超前校正后系统的开环对数相频曲线

在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 $\omega_c = 14.45 \text{ rad/s}$, 相位裕度 $\gamma = 54.5^\circ$ 测试结果表明符合设计要求。

3) 串联超前校正系统的时域特性的测试

串联超前校正后系统时域特性测试的模拟电路图见图 3-3-10。

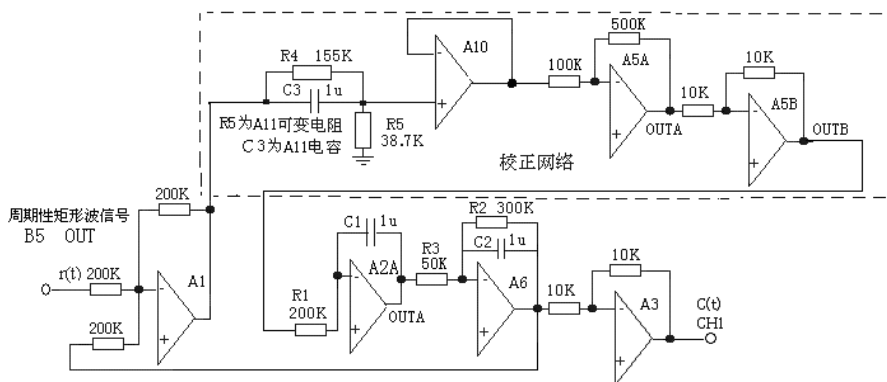


图 3-3-10 串联超前校正后系统时域特性测试的模拟电路图

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 ≥ 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) 构造模拟电路：按图 3-3-10 安置短路套与测孔连线按下表。
 - (a) 安置短路套
 - (b) 测孔连线

	模块号	跨接座号	1	信号输入 $r(t)$	B5 (OUT) → A1 (H1)
1	A1	S4, S8	2	运放级联	A10 (OUT) → A5 (H1)
2	A2	S3, S11	3	运放级联	A5B (OUTB) → A2 (H1)
3	A3	S1, S6	4	运放级联	A2A (OUTA) → A6 (H1)
4	A5	S3, S7	5	负反馈	A6 (OUT) → A1 (H2)
5	A6	S4, S8, S9	6	运放级联	A6 (OUT) → A3 (H1)
6	B5	'S-ST'	7	跨接元件	元件库 A11 中可变电阻跨接到 A1
7	A10	S1	/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)

(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 $t_p=0.18S$

三. 实验报告要求:

按下表“校正后系统的相位裕度 γ' ”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 γ' (设计目标)	测 量 值		
	相位裕度 γ'	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!

3.3.2 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 (波德图) 观察和分析实现的。

一. 实验目的

1. 了解和掌握迟后校正的原理。
2. 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。
3. 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。

二. 实验内容及步骤

1. 观测被控系统的开环对数幅频特性 $L(\omega)$ 和相频特性 $\varphi(\omega)$, 幅值穿越频率 ω_c , 相位裕度 γ , 按“校正后系统的相位裕度 γ' ”要求, 设计校正参数, 构建校正后系统。
2. 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 γ' 、超调量 M_p 、峰值时间 t_p 。
3. 改变“校正后系统的相位裕度 γ' ”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 γ' 、超调量 M_p 、峰值时间 t_p 填入实验报告。

注: 在进行本实验前应熟练掌握使用本实验机的二阶系统开环对数幅频特性和相频特性的测试方法。

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 3-3-9。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。

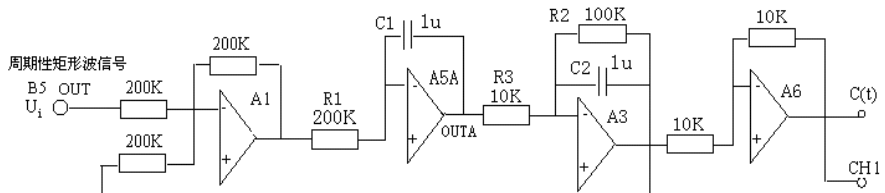


图 3-3-9 未校正系统模拟电路图

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 ≥ 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) 构造模拟电路: 按图 3-3-9 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, S8, S9
3	A5	S4, S10
4	A6	S2, S6
5	B5	‘S-ST’

(b) 测孔连线

1	信号输入 $r(t)$	B5 (OUT) \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	示波器联接 $\times 1$ 档	A6 (OUT) \rightarrow B3 (CH1)
7		B5 (OUT) \rightarrow B3 (CH2)

(3) 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。

在时域特性特性曲线上可测得时域特性:

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

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 3-3-10。

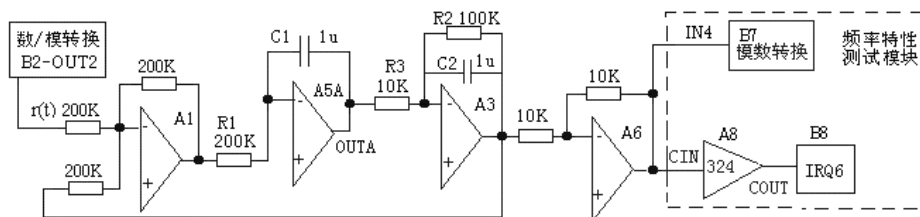


图 3-3-10 未校正系统频域特性测试的模拟电路图

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: 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) → 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	幅值测量	A6 (OUT) → B7 (IN4)
7	相位测量	A6 (OUT) → A8 (CIN1)
8		A8 (COUT1) → B8 (IRQ6)

(3) 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。

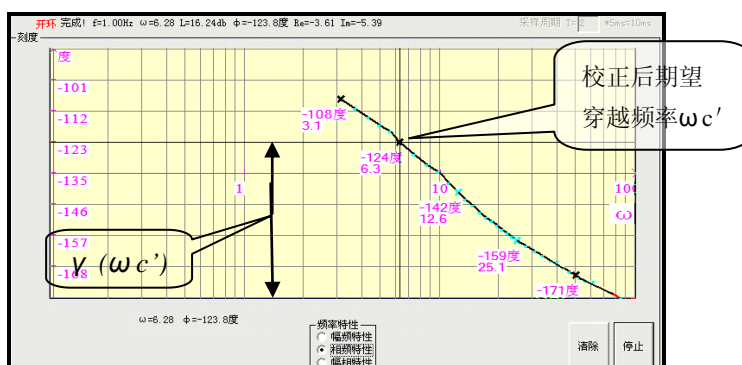


图 3-3-11 未校正系统开环相频特性曲线

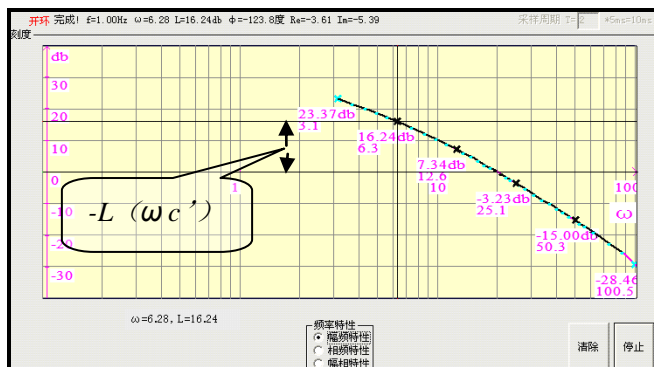


图 3-3-12 未校正系统开环幅频特性曲线

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 $\gamma = 26^\circ$

3). 迟后校正网络的设计

① 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 $\omega_{c'}$ 处会产生一定的相角迟后 $\varphi(\omega_{c'})$, 因此,

$\gamma' = \gamma(\omega_{c'}) + \varphi(\omega_{c'})$, 取 $\varphi(\omega_{c'}) = -6^\circ$, 则 $\gamma(\omega_{c'}) = 50^\circ + 6^\circ = 56^\circ$.

② 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 ω 为 6.28 rad/s .

该角频率 ω 即为校正后的穿越频率 $\omega_{c'}$.

③ 在未校正系统开环幅频特性曲线 (图 3-3-12) 中可测得:

$\omega_{c'} = 6.28 \text{ rad/s}$ 处的迟后校正网络对数幅频值为: $L(\omega_{c'}) = -16.24 \text{ dB}$

④ 据式 3-3-9 可计算出网络的参数: $-20 \lg b = L(\omega_{c'})$, $b = 0.15$,

⑤ 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: $R_4=159\text{K}$, $R_5=875\text{K}$

迟后校正网络传递函数为：
$$G_c(S) = \frac{1+1.59S}{1+10.34S} \tag{3-3-11}$$

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

实验步骤:

(1) 将数/模转换器 (B2) 输出 OUT2 作为被测系统的输入。

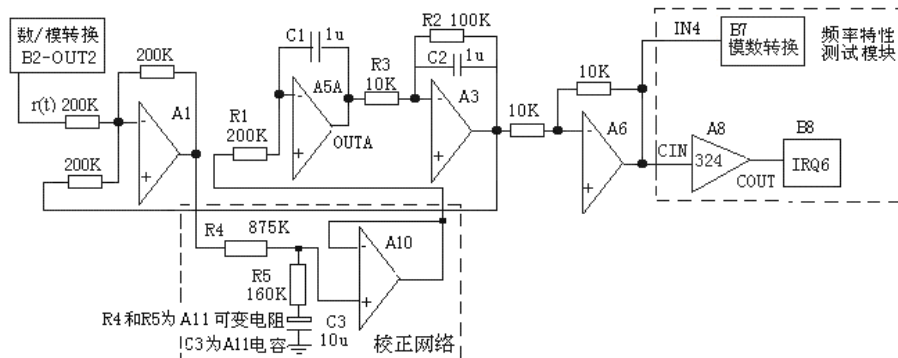


图 3-3-13 (a) 串联迟后校正系统频域特性测试的模拟电路图

(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)	B2 (OUT2) → A1 (H1)
2	运放级联	A5A (OUTA) → A3 (H1)
3	负反馈	A3 (OUT) → A1 (H2)
4	运放级联	A3 (OUT) → A6 (H1)
5	幅值测量	A6 (OUT) → B7 (IN4)
6	相位测量	A6 (OUT) → A8 (CIN1)
7		A8 (COUT1) → B8 (IRQ6)
8	跨接元件 /9	元件库 A11 中可变电阻跨接到 A1 (OUT) 和 A10 (IN+) 之间 (875K)
10 /11 /12	跨接元件	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 (160K+10u)
13	运放级联	A10 (OUT) → A5 (H1)

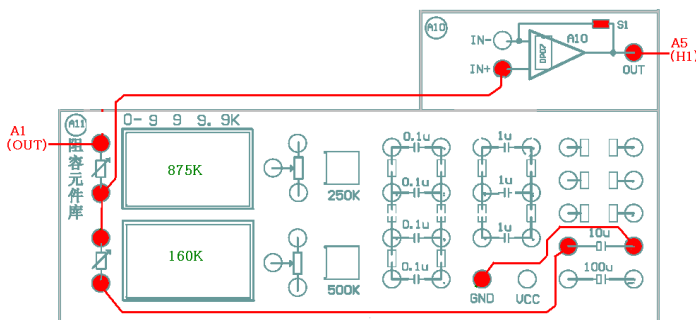


图 3-3-13 (b) 校正网络 (部分) 连线示意图

(3) 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。

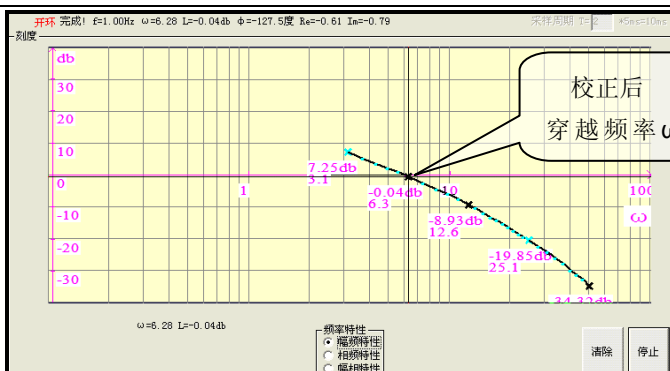


图 3-3-14 串联迟后校正后系统开环幅频特性曲线

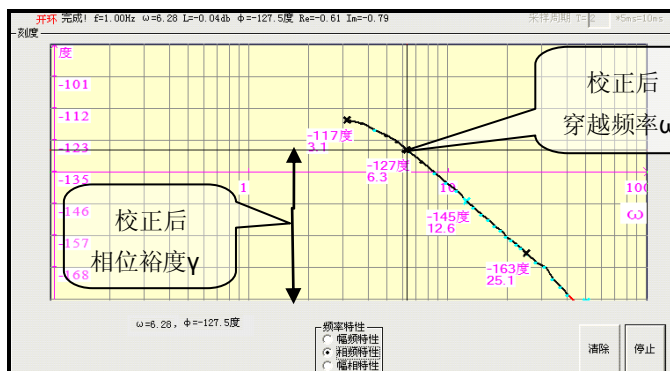


图 3-3-15 串联迟后校正后系统开环相频特性曲线

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 $\omega_c = 6.28 \text{ rad/s}$ 相位裕度 $\gamma = 52^\circ$ 测试结果表明符合设计要求。

5). 串联迟后校正系统的时域特性的测试

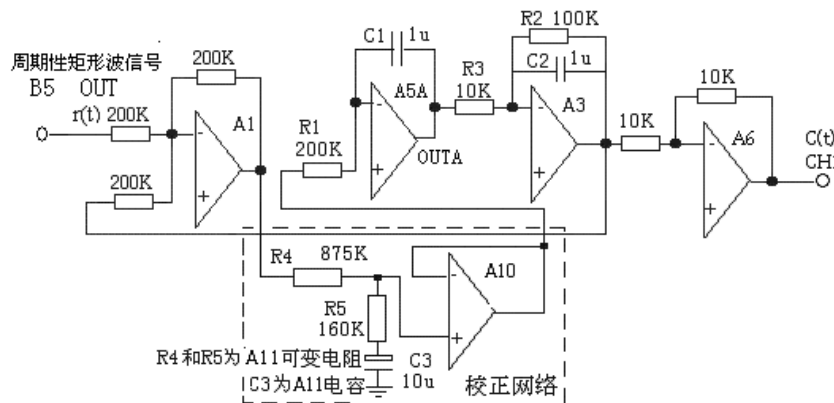


图 3-3-16 串联迟后校正系统时域特性测试的模拟电路图

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 ≥ 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) 构造模拟电路：按图 3-3-16 安置短路套与测孔连线按下表。
 - (a) 安置短路套
 - (b) 测孔连线

模块号	跨接座号		
1	A1	S4, S8	1 信号输入 r(t) B5 (OUT) → A1 (H1)
2	A3	S1, S8, S9	2 运放级联 A5A (OUTA) → A3 (H1)
3	A5	S4, S10	3 负反馈 A3 (OUT) → A1 (H2)
4	A6	S2, S6	4 运放级联 A3 (OUT) → A6 (H1)
5	B5	'S-ST'	5 跨接元件 元件库 A11 中可变电阻跨接到 A1 (OUT) 和 A10 (IN+) 之间
6	A10	S1	/6 (875K)
			7 跨接元件 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
			/8 (160K+10u)
			/9
			10 运放级联 A10 (OUT) → A5 (H1)
			11 示波器联接 A6 (OUT) → B3 (CH1)
			12 ×1 档 B5 (OUT) → B3 (CH2)

(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》。

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！

三. 实验报告要求：

按下表“校正后系统的相位裕度 γ' ”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 γ' 、超调量 M_p 、峰值时间 t_p 填入实验报告。

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

3.3.3 时域法串联比例微分校正

一. 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 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。
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。

二. 实验内容及步骤

1. 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。
2. 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 。
3. 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 。

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 3-3-17。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。

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

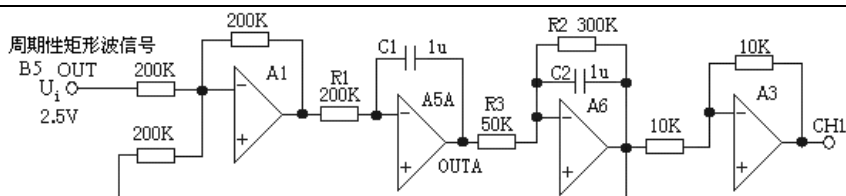


图 3-3-17 未校正系统模拟电路图

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 ≥ 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) 构造模拟电路: 按图 3-3-17 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	A5	S4, S10
4	A6	S4, S8, S9
5	B5	‘S-ST’

(b) 测孔连线

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) \rightarrow B3 (CH1)
7		B5 (OUT) \rightarrow B3 (CH2)

(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 $\omega_n = 10$ $\xi = 0.1667$

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

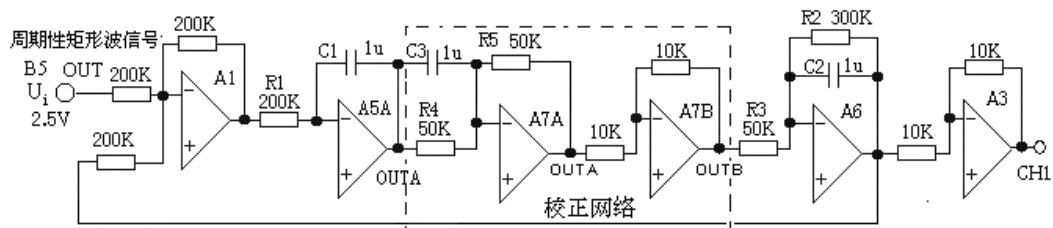


图 3-3-18 串接入比例-微分校正--2 后系统

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 ≥ 3 秒 (D1 单元右显示)。
 - 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 单元左显示)。
- (2) 构造模拟电路: 按图 3-3-18 安置短路套及测孔连线, 表如下:

(a) 安置端路套

	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) 测孔连线

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	A3 (OUT) → B3 (CH1)
8	×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》。

三. 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 $M_p(\%)$ (设计目标)	测量值	
	超调量 $M_p(\%)$	峰值时间 t_p
25		
20		
15		
10		

3.3.4 时域法局部比例反馈校正

一. 实验目的

1. 了解和掌握局部比例反馈校正的原理。
2. 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。
3. 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。

二. 实验内容及步骤

1. 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。
2. 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 。
3. 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 。

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。

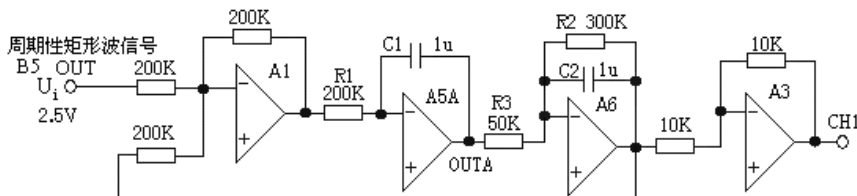


图 3-3-19 未校正系统模拟电路图

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

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 ≥ 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) 构造模拟电路：按图 3-3-19 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	A5	S4, S10
4	A6	S4, S8, S9
5	B5	'S-ST'

(b) 测孔连线

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)

(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 $t_s = 1.8s$ ($\Delta = 5$ 时)

计算得 $\omega_n = 10$ $\xi = 0.16767$

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： $K_x = K \div K_a = R6 \div R5$

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 $G_a(s)$ 时间常数为 T_a ，按标准二阶系统阻尼比的计算式：

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_i}{KT_a}} \quad \text{可得到新惯性环节 } G_a(s) \text{ 时间常数 } T_a = 0.052。$$

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 $G_a(s)$ 时间常数为 $T_a = 0.052$ ，代入 $T_a = \frac{T}{1 + aK}$ ，可得到：比例反馈系数 $a = 0.795$

如取 $R7 = 10K$ ，则 $R4 = 10K \div 0.795 = 12.6K$ ，R4 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 $G_a(s)$ 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 $K_x = K \div K_a$ 。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 $R6 = 200K$ ，则输入电阻应为 $R5 = 200K \div 5.77 = 34.7K$ 。

为使实验较方便进行，近似取 $R5 = 100K // 50K = 33.3K$ 。

3). 比例反馈包围惯性环节校正后系统的时域特性的测试

比例反馈包围惯性环节校正后系统模拟电路见图 3-3-20。

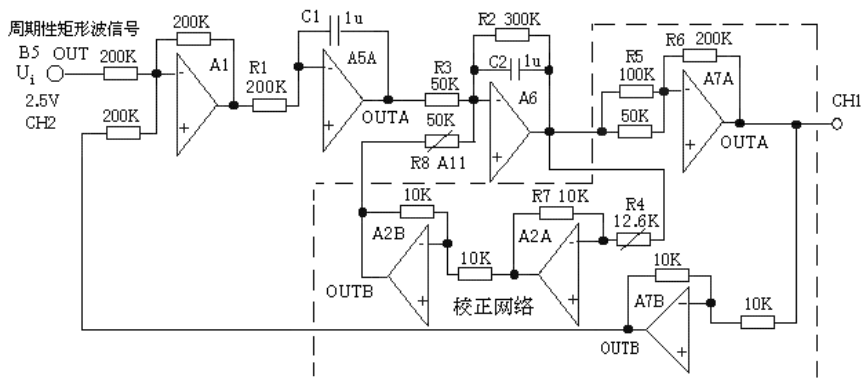


图 3-3-20 比例反馈包围惯性环节校正后系统模拟电路

实验步骤：注：‘SST’ 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 ≥ 3 秒 (D1 单元右显示)。
 - 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 单元左显示)。
- (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) \rightarrow A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) \rightarrow A5A (H1)
3	运放级联	A5A (OUTA) \rightarrow A6 (H1)
4	校正	A6 (OUT) \rightarrow 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 (R4)
/8	跨接到 A6(OUT) 和 A2A(IN) 间	
9	负反馈	A7B (OUTB) \rightarrow A1 (H2)
10	示波器联接	A7A (OUTA) \rightarrow B3 (CH1)
11	$\times 1$ 档	B5 (OUT) \rightarrow 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。

三. 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		

3.3.5 时域法微分反馈校正

一. 实验目的

1. 了解和掌握微分反馈校正的原理。
2. 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。
3. 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。

二. 实验内容及步骤

1. 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。
2. 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 。
3. 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 。

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。

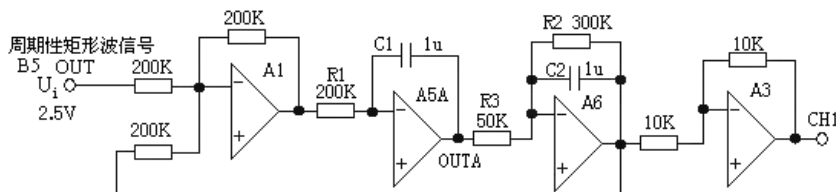


图 3-3-21 未校正系统模拟电路图

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

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 ≥ 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) 构造模拟电路: 按图 3-3-21 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	A5	S4, S10
4	A6	S4, S8, S9
5	B5	‘S-ST’

(b) 测孔连线

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) \rightarrow B3 (CH1)
7		B5 (OUT) \rightarrow B3 (CH2)

(3) 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:

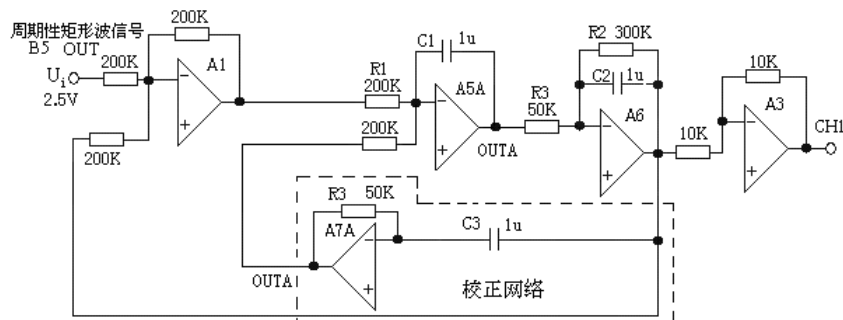
超调量 $M_p = 56.4\%$ 峰值时间 $t_p = 0.32S$ 调节时间 $t_s = 1.8S$ ($\Delta = 5$ 时)

计算得 $\omega_n = 10$, $\xi = 0.1667$

2). 微分校正网络的设计:

- ① 要求设计校正装置，使系统满足下述性能指标： $M_p \leq 25\%$ 。
- ② 按超调量 $M_p \leq 25\%$ 计算，可得到校正后系统的阻尼比 $\xi_t \geq 0.4$ 。
- ③ 按图 3-3-21 的被校正对象积分时间常数 $T_i = 0.2S$ ，自然频率： $\omega_n = 10$ ，阻尼比： $\xi = 0.1665$ 代入式 $\xi_t = \xi + 0.5\omega_n K_f$ ，可得到校正后的 $K_f = 0.0467$ 。为使实验较方便进行，近似取 $R_3 = 50K$ 。
- ④ 按图 3-3-21 被校正对象的开环增益 $K = 6$ ，校正后的 $K_f = 0.0467$ ，再令 $C_3 = 1\mu$ ，代入式 $K_f = R_3 \times C_3$ ，可得到： $R_3 = 46.7K$ 。为使实验较方便进行，近似取 $R_3 = 50K$ 。

3). 微分反馈校正后系统的时域特性的测试



实验步骤：注：‘SST’用“短路套”短接！ 图 3-3-22 微分反馈校正后系统模拟电路

- (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 ≥ 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) 构造模拟电路：按图 3-3-22 安置短路套及测孔连线，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)

(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。

三. 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		

3.3.6 线性系统的状态反馈及极点配置

一. 实验目的

1. 了解和掌握状态反馈及极点配置的原理。
2. 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。
3. 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。

二. 实验内容及步骤

1). 观察极点配置前系统

状态反馈及极点配置前系统的模拟电路见图 3-3-23 所示。

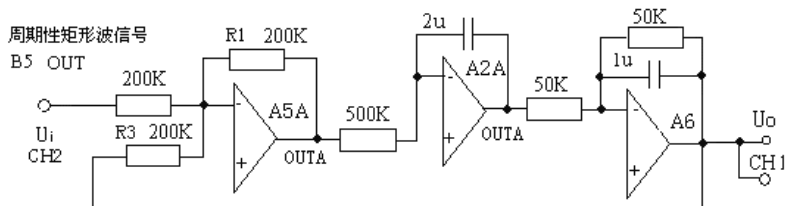


图 3-3-23 极点配置前系统的模拟电路

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 ≥ 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)。

(2) 构造模拟电路：按图 3-3-23 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	A2	S2, S11, S12
2	A5	S4, S6
3	A6	S4, S7, S9
4	B5	‘S-ST’

(b) 测孔连线

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

(3) 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 。

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 $M_p \leq 20\%$ ，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 $R_3 = 12.6K$ 。

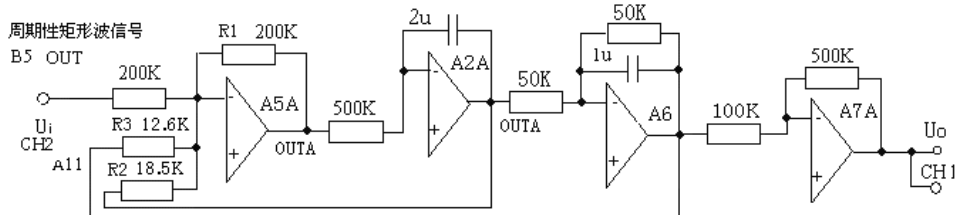


图 3-3-24 极点配置后系统的模拟电路

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 ≥ 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)。
- (2) 构造模拟电路: 按图 3-3-24 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	A2	S2, S11, S12
2	A5	S4, S6
3	A6	S4, S7, S9
4	A7	S3, S8, P
5	B5	‘S-ST’

(b) 测孔连线

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 A2A (OUTA) 和 A5 (IN) 之间
6		
7	跨接反馈电阻 R3=12.6K	元件库 A11 中可变电阻跨接到 A6 (OUT) 和 A5 (IN) 之间
8		
9	示波器联接	A7A (OUTA) → B3 (CH1)
10	×1 档	B5 (OUT) → B3 (CH2)

(3) 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。

三. 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		

3.4 非线性系统的相平面分析

3.4.1 典型非线性环节

一. 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函数发生器产生的典型理想非线性环节的输出特性。

二. 实验步骤及内容

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。

1). 测量继电特性

实验步骤： CH1、CH2 选 ‘X1’ 档！用函数发生器产生继电特性模拟电路见图 3-4-1。

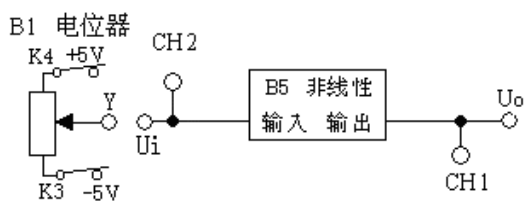


图 3-4-1 用函数发生器产生继电特性模拟电路

- ① 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。
- ② 测孔连线：

(B1) 幅度控制电位器 (Y) → B5 (非线性输入) → CH2 (送 X 轴显示)
B5 (非线性输出) → CH1 (送 Y 轴显示)

注：(D1) 单元的电压测量 (-5V~+5V) 测孔不能接任何信号！

- ③ 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 $U_0 \sim U_i$ 图形。实验结果与理想继电特性相符。

2). 测量饱和特性

实验步骤： CH1、CH2 选 ‘X1’ 档！用函数发生器产生饱和特性模拟电路见图 3-4-2。

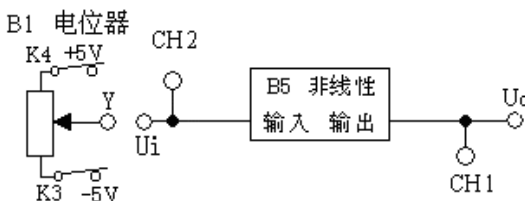


图 3-4-2 用函数发生器产生饱和特性模拟电路

- ① 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。
- ② 测孔连线：

(B1) 幅度控制电位器 (Y) → B5 (非线性输入) → CH2 (送 X 轴显示)
B5 (非线性输出) → CH1 (送 Y 轴显示)

注：(D1) 单元的电压测量 (-5V~+5V) 测孔不能接任何信号！

- ③ 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 $U_0 \sim U_i$ 图形。实验结果与理想继电特性相符。

3). 测量死区特性

实验步骤： CH1、CH2 选 ‘X1’ 档！用函数发生器产生死区特性模拟电路见图 3-4-3。

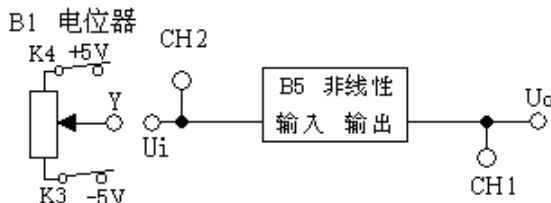


图 3-4-3 用函数发生器产生死区特性模拟电路

- ① 函数发生器的波形选择为 ‘死区’ 特性；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。
- ② 测孔连线：

(B1) 幅度控制电位器 (Y) → B5 (非线性输入) → CH2 (送 X 轴显示)
B5 (非线性输出) → CH1 (送 Y 轴显示)

注：(D1) 单元的电压测量 (-5V~+5V) 测孔不能接任何信号！

③ 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 $U_0 \sim U_i$ 图形。实验结果与理想继电特性相符。

4). 测量间隙特性

实验步骤： CH1、CH2 选 ‘X1’ 档！用函数发生器产生间隙特性模拟电路见图 3-4-4。

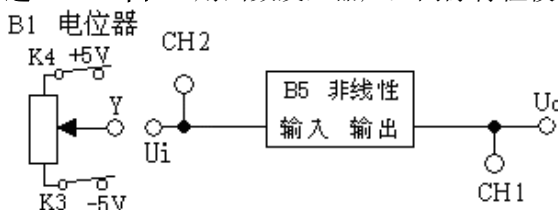


图 3-4-4 用函数发生器产生间隙特性模拟电路

① 函数发生器的波形选择为 ‘间隙’ 特性；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。

② 测孔连线：

(B1) 幅度控制电位器 (Y) → B5 (非线性输入) → CH2 (送 X 轴显示)
B5 (非线性输出) → CH1 (送 Y 轴显示)

注：(D1) 单元的电压测量 (-5V~+5V) 测孔不能接任何信号！

③ 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 $U_0 \sim U_i$ 图形。实验结果与理想继电特性相符。

三. 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	

3.4.2 二阶非线性控制系统

一. 实验目的

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

二. 实验步骤及内容

1. 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。
2. 改变被测系统非线性环节的各项电路参数，画出阶跃响应曲线，观测结果，填入实验报告。

1). 继电型非线性控制系统

继电型非线性控制系统模拟电路见图 3-4-5 所示，

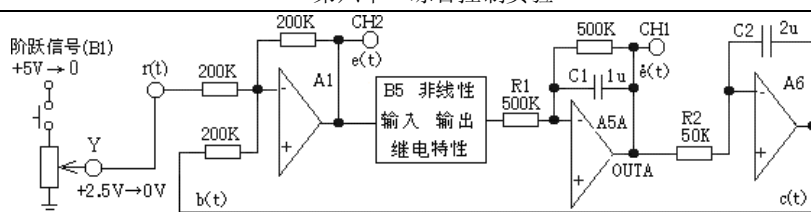


图 3-4-5 继电型非线性控制系统模拟电路

实验步骤： CH1、CH2 选 ‘X1’ 档！

(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 (Ui)：

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。

(2) 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) 构造模拟电路：按图 3-4-5 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	A5A (OUTA) → A6 (H1)
5	负反馈	A6 (OUT) → A1 (H2)
6	示波器联接 ×1 档	A5A (OUTA) → B3 (CH1) (送 Y 轴显示)
7		A1 (OUT) → B3 (CH2) (送 X 轴显示)

注：(D1) 单元的电压测量 (-5V~+5V)

测孔不能接任何信号！

(4) 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 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。

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较佳的观测效果。

实验报告要求：

按下表改变图 3-4-5 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 。

继电限值幅	3.7V	3V	2V	1V
超调量 M_p				
峰值时间 t_p				

2). 带速度负反馈的继电型非线性控制系统

带速度负反馈的继电型非线性控制系统的模拟电路见图 3-4-6。

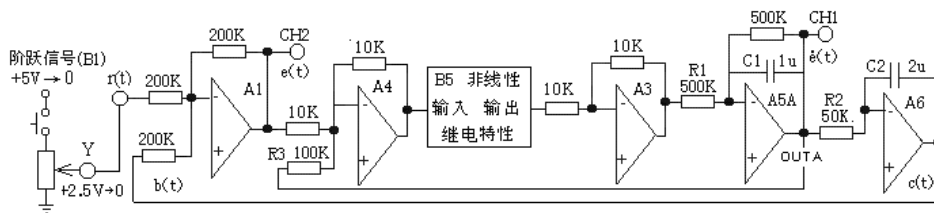


图 3-4-6 带速度负反馈的继电型非线性控制系统模拟电路

实验步骤：CH1、CH2 选 ‘X1’ 档！

(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。

(2) 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) 构造模拟电路: 按图 3-4-6 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	A5A (OUTA) → A6 (H1)
7	负反馈	A5A (OUTA) → A4 (H2)
8	负反馈	A6 (OUT) → A1 (H2)
9	示波器联接	A5A (OUTA) → B3 (CH1) (送 Y 轴显示)
10	×1 档	A1 (OUT) → B3 (CH2) (送 X 轴显示)

注: (D1) 单元的电压测量 (-5V~+5V) 测孔不能接任何信号!

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

3). 饱和型非线性控制系统

饱和型非线性控制系统模拟电路见图 3-4-7 所示。

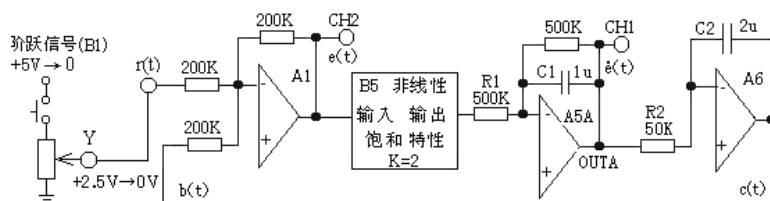


图 3-4-7 饱和型非线性控制系统模拟电路

实验步骤：CH1、CH2 选 ‘X1’ 档！

(1) 同《1. 继电型非线性控制系统》连线表。

(2) 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”, 使之幅度 = 3.5V (D1 单元右显示)。
- ③ 调节 “设定电位器 1”, 使之斜率 = 2 (D1 单元左显示)。

(3) 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(%)。

实验报告要求:

按下表改变图 3-4-7 所示的实验被控系统的饱和特性限值幅和斜率, 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 → 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				

4). 间隙型非线性控制系统

间隙型非线性控制系统模拟电路见图 3-4-8 所示。

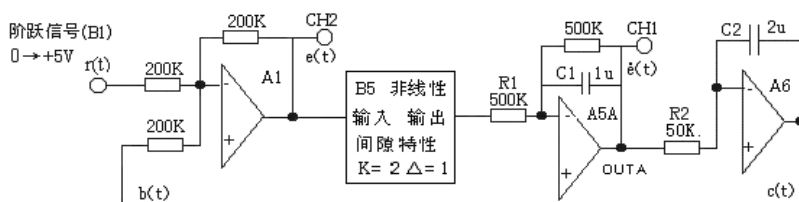


图 3-4-8 间隙型非线性控制系统模拟电路

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间隙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 ‘间隙特性’ (间隙特性指示灯亮)。
 - ② 调节 “设定电位器 2”，使之间隙宽度 = 1V (D1 单元右显示)。
 - ③ 调节 “设定电位器 1”，使之斜率 = 2 (D1 单元左显示)。
- (3) 构造模拟电路：按图 3-4-8 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	A5A (OUTA) → A6 (H1)
5	负反馈	A6 (OUT) → A1 (H2)
6	示波器联接 ×1 档	A5A (OUTA) → B3 (CH1) (送 Y 轴显示)
7		A1 (OUT) → B3 (CH2) (送 X 轴显示)

注：(D1) 单元的电压测量 (-5V~+5V)

测孔不能接任何信号！

- (4) 运行、观察、记录：

运行程序同《1. 继电器非线性控制系统》。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。

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 → 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				

3.4.3 三阶非线性控制系统

一. 实验目的

1. 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。
2. 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)。
3. 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。
4. 分别观察继电器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。

二. 实验内容及步骤

1. 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 \dot{e} 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、饱和型和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 ω_A 或周期 T 和振荡振幅值 A 。

2. 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 - \dot{e} 平面上的相轨迹。

3. 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 - \dot{e} 平面上的相轨迹。

1). 继电型非线性三阶控制系统

继电型非线性三阶控制系统模拟电路见图 3-4-9 所示。

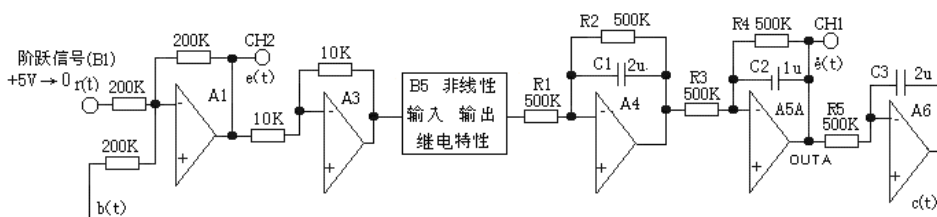


图 3-4-9 继电型非线性三阶控制系统模拟电路

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”, 使之继电特性限幅值 $M=3.6V$ (D1 单元右显示)。
- (3) 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 ($0/+5V$) \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	示波器联接 $\times 1$ 档	A5A (OUTA) \rightarrow B3 (CH1) (送 Y 轴显示)
9		A1 (OUT) \rightarrow B3 (CH2) (送 X 轴显示)

注: (D1) 单元的电压测量 ($-5V \sim +5V$) 测

孔不能接任何信号!

- (4) 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 ($+5V \rightarrow 0$ 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 - \dot{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。

三、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器限值幅，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。（ $M=3.6V$ 、 $+5V \rightarrow 0$ 阶跃）

继电器限值幅	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								

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。

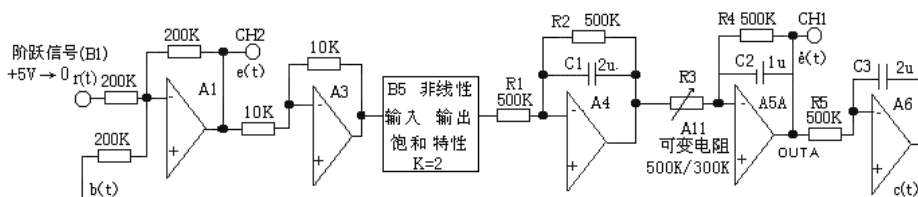


图 3-4-10 饱和型非线性三阶控制系统模拟电路图

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 $r(t)$ 。

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）。

(2) 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 500K/300K	A11 单元的中直读式可变电阻
9		跨接到 A5 (H1) 和 (IN) 之间
10	示波器联接 $\times 1$ 档	A5A (OUTA) \rightarrow B3 (CH1) (送 Y 轴显示)
11		A1 (OUT) \rightarrow B3 (CH2) (送 X 轴显示)

注：(D1) 单元的电压测量 ($-5V \sim +5V$) 测孔不能接任何信号！

(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**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（ $+5V \rightarrow 0$ 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 ($R_3=500K$)，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 $MP(\%)$ 。

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 $k=5.1$ (D_1 单元左显示)。

三. 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 R_3 ，A4 的 C_1 和 A6 的 C_3 。

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						

3.5 采样控制系统分析

一. 实验目的

1. 了解判断采样控制系统稳定性的充要条件。
2. 了解采样周期 T 对系统的稳定性的影响及临界值的计算。
3. 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。

三、实验内容及步骤

1. 闭环采样系统构成电路如图 3-5-1 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。

2. 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。

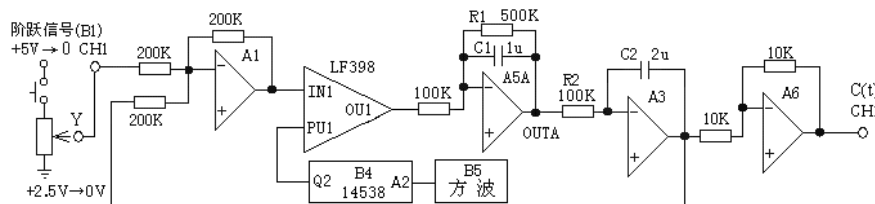


图 3-5-1 闭环采样系统构成电路

闭环采样系统实验构成电路如图 3-5-1 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 $K=R_1/R_3=5$ 。

实验步骤：注：‘SST’不能用‘短路套’短接！

(1) 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。

(2) 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)。

(3) 构造模拟电路：按图 3-5-1 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	A1	S4, S8
2	A5	S3, S7, S10
3	A3	S4, S10, S11
4	A6	S2, S6

(b) 测孔连线

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	A5A (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	示波器联接 ×1 档	B1 (Y) → B3 (CH1)
10		A6 (OUT) → B3 (CH2)

(4) 运行、观察、记录：

① 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。

② 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 3-5-1。

表 3-5-1

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

三. 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		

3.6 模拟直流电机速度闭环控制随动系统实验**一、实验目的和要求**

1. 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。
2. 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。

二. 实验内容及步骤

1. 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。
2. 观察无调节器的直流电机闭环控制系统的输出特性
3. 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。
4. 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。

1). 调整频率/电压 (F/V) 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 测孔连线到 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

无调节器的直流电机闭环控制系统模拟电路见图 3-6-1

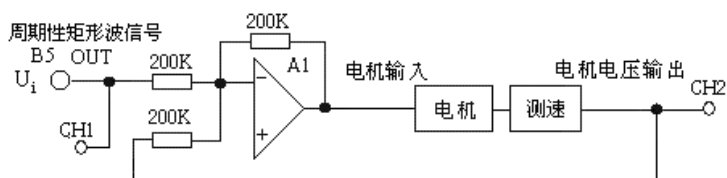


图 3-6-1 无调节器的直流电机闭环控制系统模拟电路

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 ≥ 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)。
- (2) 构造模拟电路：按图 3-6-1 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	A1	S4, S8
2	A6	S2, S6
3	B5	S-ST

(b) 测孔连线

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

(3) 运行、观察、记录：

- ① 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 ，
- ② 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。
- ③ 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。

3). 采用积分调节器与直流电机构成的闭环调速系统

积分调节器与直流电机构成的闭环调速系统模拟电路见图 3-6-2

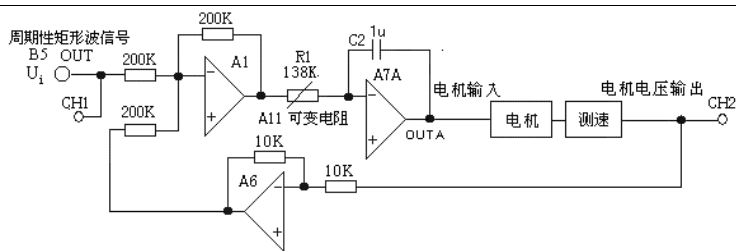


图 3-6-2 积分调节器与直流电机构成的闭环调速系统模拟电路

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 ≥ 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)。

(2) 构造模拟电路：按图 3-6-2 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	A1	S4, S8
4	A6	S2, S6
5	A7	S7, P
6	B5	S-ST

(b) 测孔连线

1	信号输入	B5 (OUT) \rightarrow A1 (H1)
2	跨接电阻	A11 直读式可变电阻接到
3	(138K)	A1 (OUT) 和 A7 (IN) 之间。
4	电机驱动	A7A (OUTA) \rightarrow C2 (电机输入)
5	测速输出	C2 (电压输出) \rightarrow A6 (H1)
6	负反馈	A6 (OUT) \rightarrow A1 (H2)
7	示波器联接	B5 (OUT) \rightarrow B3 (CH1)
8	$\times 1$ 档	C2 (电压输出) \rightarrow B3 (CH2)

(3) 运行、观察、记录：

- ① 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 ，
- ② 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。
- ③ 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。

分析：图中实际测量得： $M_p = 30\%$ 峰值时间： $t_p = 0.48$ 。

实验报告要求：

按下表改变图 3-6-2 所示的积分调节器的积分常数 T_i (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。

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			

4). 采用比例积分调节器与直流电机构成的闭环调速系统

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见图 3-6-3。

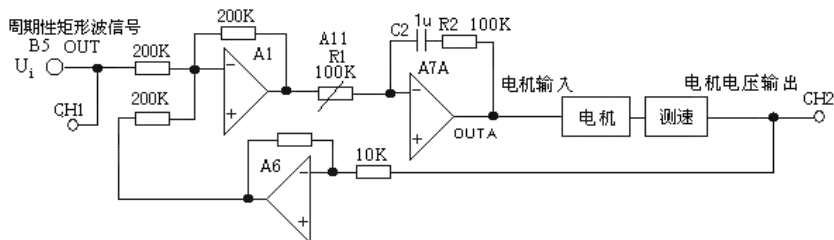


图 3-6-3 比例积分调节器与直流电机构成的闭环调速系统模拟电路

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 ≥ 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)。

(2) 构造模拟电路: 按图 3-6-3 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	A1	S4, S8
2	A6	S2, S6
3	A7	S3, S10, S14, PI
4	B5	S-ST

(b) 测孔连线

1	信号输入	B5 (OUT) \rightarrow A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) \rightarrow A7 (H1)
3	电机驱动	A7A (OUTA) \rightarrow C2 (电机输入)
4	测速输出	C2 (电压输出) \rightarrow A6 (H1)
5	负反馈	A6 (OUT) \rightarrow A1 (H2)
6	示波器联接 $\times 1$ 档	B5 (OUT) \rightarrow B3 (CH1)
7		C2 (电压输出) \rightarrow B3 (CH2)

(3) 运行、观察、记录:

① 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 ,

② 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。

③ 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**, 然后移动光标测量其超调量、峰值时间及调节时间。

分析: 图中实际测量得: $M_p = 14\%$ 峰值时间: $t_p = 0.33$ 。

实验报告要求:

按下表改变图 3-6-3 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。

3.7 模拟温度闭环控制实验

一、实验目的

1. 巩固闭环控制系统的基本概念。
2. 掌握系统的串联比例、积分、微分调节器原理及方法。
3. 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。

二、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 3-7-1。

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。

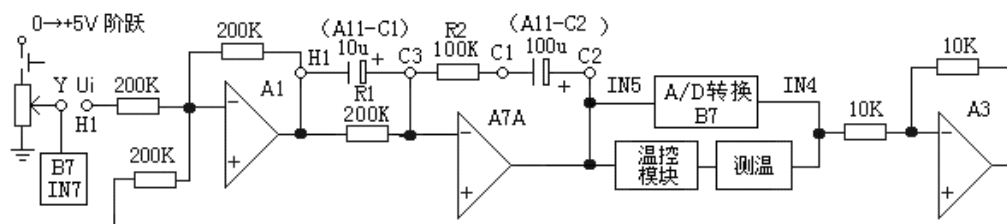


图 3-7-1 采用串联比例积分微分调节器构成的模拟温度闭环控制系统

实验步骤:

(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。

(2) 构造模拟电路: 按图 3-7-2 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	A1	S4, S8
2	A3	S1, S6
3	A7	S2, S10, PI

(b) 测孔连线

1	信号输入	B (Y) → A1 (H1)
2	运放级联	A1 (OUT) → A7A (H1)
3	跨接电容	A11 电容 10u (一端) 接到 A7 (H1)
4	(10u)	(+端) 接到 A7 (C3)
5	跨接电容	A11 电容 100u (一端) 接到 A7 (C1)
6	(100u)	(+端) 接到 A7 (C2)
7	温控加热	A7A (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)

(3) 运行、观察、记录:

① 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 ,

② 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。

③ 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。

④ 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。

