

自动控制原理
实验指导书

杜庆楠 胡 伟 乔美英

河南理工大学
电气工程系

前 言

自动控制原理是自动化、自动控制、电子电气技术等专业教学中的一门重要专业基础课程。它可以处理时变、非线性以及多输入、多输出等复杂的控制系统等问题。本套 EL-AT-II 型自动控制实验系统克服了以前做自动控制理论实验时，连线复杂，接线不稳定的缺点，通过对单元电路的灵活组合，可构造出各种型式和阶次的模拟环节和控制系统。可以使学生把主要精力集中在系统电路和系统特性的研究上。

本系统采用 AD/DA 卡通过 RS232 串口与计算机连接实现信号源信号的输出和系统响应信号的采集，采集后信号通过计算机显示屏显示，省去了外接信号源和示波器测量响应信号的麻烦。EL-AT-II 型自动控制实验系统支持自动控制理论课的所有实验，通过这套仪器可使学生进一步了解和掌握自动控制理论的基本概念、控制系统的分析方法和设计方法，学习和掌握系统模拟电路的构成和测试技术，提高应用计算机的能力及水平。

本书分为两章，第一章模拟实验部分，主要介绍各个实验的电路组成，实验原理和实验步骤。第二章为仿真实验部分。

目 录

| | |
|----------------------|----|
| 第一章 模拟实验部分 | 1 |
| 实验一 典型环节及其阶跃响应 | 1 |
| 实验二 二阶系统阶跃响应 | 5 |
| 实验三 控制系统的稳定性分析 | 8 |
| 实验四 系统频率特性测量 | 10 |
| 实验五 连续系统串联校正 | 14 |
| 实验六 数字 PID 控制 | 18 |
| 第二章 仿真实验部分 | 22 |
| 实验七 典型环节及其阶跃响应 | 22 |
| 实验八 线性系统时域响应分析 | 25 |
| 实验九 线性系统的根轨迹 | 34 |
| 实验十 线性系统的频域分析 | 45 |
| 实验十一 线性系统串联校正 | 49 |
| 实验十二 数字 PID 控制 | 55 |

第一章 模拟实验部分

实验一 典型环节及其阶跃响应

一、实验目的

1. 掌握控制模拟实验的基本原理和一般方法。
2. 掌握控制系统时域性能指标的测量方法。

二、实验仪器

1. EL-AT-II 型自动控制系统实验箱一台
2. 计算机一台

三、实验原理

1. 模拟实验的基本原理

控制系统模拟实验采用复合网络法来模拟各种典型环节,即利用运算放大器不同的输入网络和反馈网络模拟各种典型环节,然后按照给定系统的结构图将这些模拟环节连接起来,便得到了相应的模拟系统。再将输入信号加到模拟系统的输入端,并利用计算机等测量仪器,测量系统的输出,便可得到系统的动态响应曲线及性能指标。若改变系统的参数,还可进一步分析研究参数对系统性能的影响。

2. 时域性能指标的测量方法:

超调量 σ_p %:

- 1) 启动计算机,在桌面双击图标[自动控制实验系统]运行软件。
- 2) 测试计算机与实验箱的通信是否正常,通信正常继续。如通信不正常查找原因使通信正常后才可以继续进行实验。
- 3) 连接被测量典型环节的模拟电路。电路的输入 U1 接 A/D、D/A 卡的 DA1 输出,电路的输出 U2 接 A/D、D/A 卡的 AD1 输入。检查无误后接通电源。
- 4) 在实验课题下拉菜单中选择实验一[典型环节及其阶跃响应]。
- 5) 鼠标单击实验课题弹出实验课题参数窗口。在参数设置窗口中设置相应的实验参数后鼠标单击确认等待屏幕的显示区显示实验结果。
- 6) 用软件上的游标测量响应曲线上的最大值和稳态值,代入下式算出超调量:

$$\sigma_p \% = \frac{y_{\max} - y_{\infty}}{y_{\infty}} \times 100\%$$

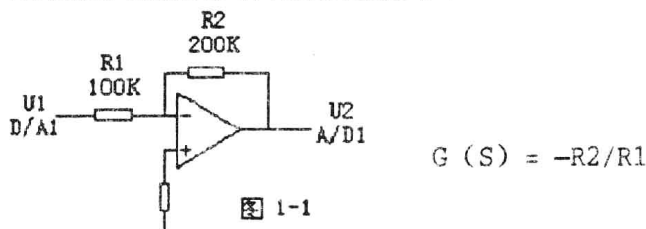
t_p 与 t_s ：

利用软件的游标测量水平方向上从零到达最大值与从零到达95%稳态值所需的时间值，便可得到 t_p 与 t_s 。

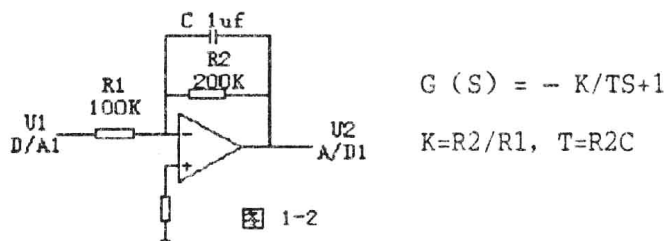
四、实验内容

构成下述典型一阶系统的模拟电路，并测量其阶跃响应：

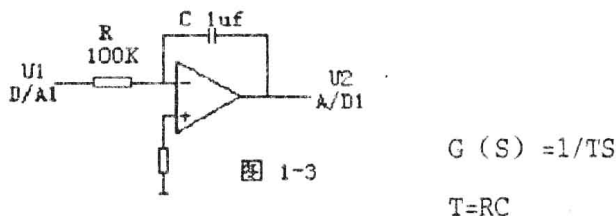
1. 比例环节的模拟电路及其传递函数如图 1-1。



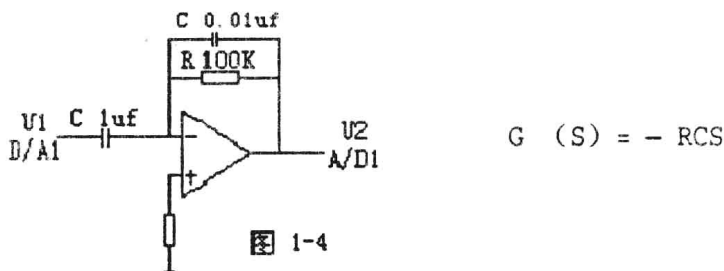
2. 惯性环节的模拟电路及其传递函数如图 1-2。



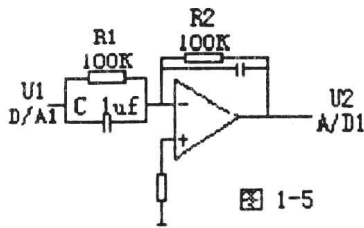
3. 积分环节的模拟电路及传递函数如图 1-3。



4. 微分环节的模拟电路及传递函数如图 1-4。



5. 比例+微分环节的模拟电路及传递函数如图 1-5。(未标明的 $C=0.01\mu\text{f}$)。

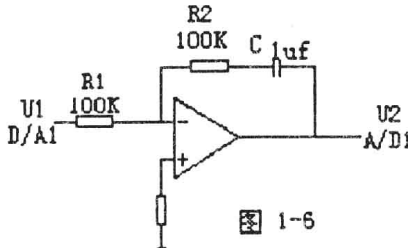


$$G(S) = -K(TS+1)$$

$$K=R2/R1, T=R2C$$

图 1-5

6. 比例+积分环节的模拟电路及传递函数如图 1-6。



$$G(S) = K(1+1/TS)$$

$$K=R2/R1, T=R2C$$

图 1-6

五、实验步骤

1. 启动计算机，在桌面双击图标〔自动控制实验系统〕运行软件。

2. 测试计算机与实验箱的通信是否正常,通信正常继续。如通信不正常查找原因使通信正常后才可以继续进行实验。

比例环节

3. 连接被测量典型环节的模拟电路(图 1-1)。电路的输入 U1 接 A/D、D/A 卡的 DA1 输出，电路的输出 U2 接 A/D、D/A 卡的 AD1 输入。检查无误后接通电源。

4. 在实验课题下拉菜单中选择实验一〔典型环节及其阶跃响应〕。

5. 鼠标单击实验课题弹出实验课题参数窗口。在参数设置窗口中设置相应的实验参数后鼠标单击确认等待屏幕的显示区显示实验结果。

6. 观测计算机屏幕显示出的响应曲线及数据。

7. 记录波形及数据（由实验报告确定）。

惯性环节

8. 连接被测量典型环节的模拟电路(图 1-2)。电路的输入 U1 接 A/D、D/A 卡的 DA1 输出，电路的输出 U2 接 A/D、D/A 卡的 AD1 输入。检查无误后接通电源。

9. 实验步骤同 4~7。

积分环节

10. 连接被测量典型环节的模拟电路(图 1-3)。电路的输入 U1 接 A/D、D/A 卡的 DA1 输出，电路的输出 U2 接 A/D、D/A 卡的 AD1 输入。检查无误后接通电源。

11. 实验步骤同 4~7。

微分环节

12. 连接被测量典型环节的模拟电路(图 1-4)。电路的输入 U1 接 A/D、D/A 卡的 DA1 输出, 电路的输出 U2 接 A/D、D/A 卡的 AD1 输入。检查无误后接通电源。

13. 实验步骤同 4~7。

比例+积分环节

14. 连接被测量典型环节的模拟电路(图 1-6)。电路的输入 U1 接 A/D、D/A 卡的 DA1 输出, 电路的输出 U2 接 A/D、D/A 卡的 AD1 输入。检查无误后接通电源。

15. 实验步骤同 4~7。

16. 测量系统的阶跃响应曲线, 并记入表 1-1。

六、实验报告

1. 由阶跃响应曲线计算出惯性环节、积分环节的传递函数, 并与由电路计算的结果相比较。

2. 将实验中测得的曲线、数据及理论计算值, 整理列表。

七、预习要求

1. 阅读实验原理部分, 掌握时域性能指标的测量方法。

2. 分析典型一阶系统的模拟电路和基本原理。

表 1-1

| 参数 | 阶跃响应曲线 | t_s (秒) | | |
|---|--------|-----------|-----|-----|
| | | | 理论值 | 实测值 |
| $R1=R2=$ $100K$ $C=1\mu f$ $K=1$ $T=0.1S$ | | 比例环节 | | |
| | | 惯性环节 | | |
| | | 积分环节 | | |
| | | 微分环节 | | |
| | | 比例+微分环节 | | |
| | | 比例+积分环节 | | |
| $R1=100K$ $R2=200K$ $C=1\mu f$ $K=2$ $T=1S$ | | 比例环节 | | |
| | | 惯性环节 | | |
| | | 积分环节 | | |
| | | 微分环节 | | |
| | | 比例+微分环节 | | |
| | | 比例+积分环节 | | |

实验二 二阶系统阶跃响应

一、实验目的

1. 研究二阶系统的特征参数，阻尼比 ζ 和无阻尼自然频率 ω_n 对系统动态性能的影响。定量分析 ζ 和 ω_n 与最大超调量 M_p 和调节时间 t_s 之间的关系。

2. 进一步学习实验系统的使用方法

3. 学会根据系统阶跃响应曲线确定传递函数。

二、实验仪器

1. EL-AT-III 型自动控制系统实验箱一台。

2. 计算机一台。

三、实验原理

1. 模拟实验的基本原理：

控制系统模拟实验采用复合网络法来模拟各种典型环节，即利用运算放大器不同的输入网络和反馈网络模拟各种典型环节，然后按照给定系统的结构图将这些模拟环节连接起来，便得到了相应的模拟系统。再将输入信号加到模拟系统的输入端，并利用计算机等测量仪器，测量系统的输出，便可得到系统的动态响应曲线及性能指标。若改变系统的参数，还可进一步分析研究参数对系统性能的影响。

2. 域性能指标的测量方法：

超调量 $\sigma_p\%$ ：

1) 启动计算机，在桌面双击图标 [自动控制实验系统] 运行软件。

2) 测试计算机与实验箱的通信是否正常，通信正常继续。如通信不正常查找原因使通信正常后才可以继续进行实验。

3) 连接被测量典型环节的模拟电路。电路的输入 U1 接 A/D、D/A 卡的 DA1 输出，电路的输出 U2 接 A/D、D/A 卡的 AD1 输入。检查无误后接通电源。

4) 在实验课题下拉菜单中选择实验二 [二阶系统阶跃响应] 。

5) 鼠标单击实验课题弹出实验课题参数窗口。在参数设置窗口中设置相应的实验参数后鼠标单击确认等待屏幕的显示区显示实验结果。

6) 利用软件上的游标测量响应曲线上的最大值和稳态值，带入下式算出超

调量:

$$\sigma_p \% = \frac{y_{\max} - y_{\infty}}{y_{\infty}} \times 100\%$$

t_p 与 t_s :

利用软件的游标测量水平方向上从零到达最大值与从零到达 95% 稳态值所需的时间值, 便可得到 t_p 与 t_s 。

四、实验内容

典型二阶系统的闭环传递函数为:

$$\phi(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

其中 ξ 和 ω_n 对系统的动态品质有决定的影响。

构成图 2-1 典型二阶系统的模拟电路, 并测量其阶跃响应:

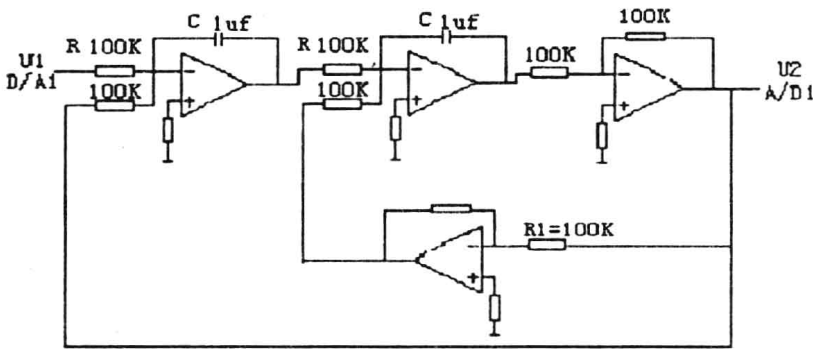


图 2-1 二阶系统模拟电路图

电路的结构图如图 2-2:

系统闭环传递函数为

$$\phi(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{1/T^2}{s^2 + (K/T)s + 1/T^2} \quad (2)$$

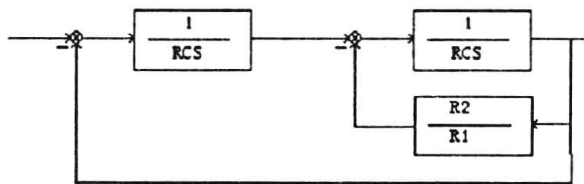


图 2-2 二阶系统结构图

式中: $T=RC$, $K=R2/R1$ 。

比较 (1)、(2) 二式, 可得

$$\omega_n = 1/T = 1/RC, \quad \xi = K/2 = R_2/2R_1 \quad (3)$$

由(3)式可知,改变比值 R_2/R_1 ,可以改变二阶系统的阻尼比。改变 RC 值可以改变无阻尼自然频率 ω_n 。

取 $R_1=200K$, $R_2=100K\Omega$ 和 $200K\Omega$,可得实验所需的阻尼比。电阻 R 取 $100K\Omega$,电容 C 分别取 $1\mu f$ 和 $0.1\mu f$,可得两个无阻尼自然频率 ω_n 。

五、实验步骤

1. 连接被测量典型环节的模拟电路。电路的输入 U_1 接 A/D、D/A 卡的 DA1 输出,电路的输出 U_2 接 A/D、D/A 卡的 AD1 输入。检查无误后接通电源。

2. 启动计算机,在桌面双击图标 [自动控制实验系统] 运行软件。

3. 测试计算机与实验箱的通信是否正常,通信正常继续。如通信不正常查找原因使通信正常后才可以继续进行实验。

4. 在实验课题下拉菜单中选择实验二[二阶系统阶跃响应],鼠标单击该项弹出实验课题参数窗口。

5. 取 $\omega_n=10\text{rad/s}$,即令 $R=100K\Omega$, $C=1\mu f$; 分别取 $\xi =0.5$ 、 1 、 2 ,即取 $R_1=100K\Omega$, R_2 分别等于 $100K\Omega$ 、 $200K\Omega$ 、 $400K\Omega$ 。输入阶跃信号,测量不同的 ξ 时系统的阶跃响应,并由显示的波形记录最大超调量 M_p 和调节时间 T_s 的数值和响应动态曲线,并与理论值比较。

6. 取 $\xi =0.5$ 。即电阻 R_2 取 $R_1=R_2=100K\Omega$; $\omega_n=100\text{rad/s}$,即取 $R=100K\Omega$,改变电路中的电容 $C=0.1\mu f$ (注意:二个电容值同时改变)。输入阶跃信号测量系统阶跃响应,并由显示的波形记录最大超调量 σ_p 和调节时间 T_n 。

7. 取 $R=100K\Omega$; 改变电路中的电容 $C=1\mu f$, $R_1=100K\Omega$,调节电阻 $R_2=50K\Omega$ 。输入阶跃信号测量系统阶跃响应,记录响应曲线,特别要记录 t_p 和 σ_p 的数值。

8. 测量二阶系统的阶跃响应并记入表 2-1 中。

六、实验报告

1. 画出二阶系统的模拟电路图,讨论典型二阶系统性能指标与 ξ , ω_n 的关系。

2. 把不同 ξ 和 ω_n 条件下测量的 M_p 和 t_s 值列表,根据测量结果得出相应结论。

3. 画出系统响应曲线，再由 t_s 和 M_p 计算出传递函数，并与由模拟电路计算的传递函数相比较。

七、预习要求

1. 阅读实验原理部分，掌握时域性能指标的测量方法。
2. 按实验中二阶系统的给定参数，计算出不同 ξ 、 ω_n 下的性能指标的理論值。

表 2-1

| 参数 | 实验结果 | σ % | t_p (ms) | t_s (ms) | 阶跃响应曲线 |
|---|---------------------------------------|------------|------------|------------|--------|
| $R=100K$ $C=1\mu f$ $\omega_n=10rad/s$ | $R_1=100K$ $R_2=0K$ $\xi=0$ | | | | |
| | $R_1=100K$ $R_2=50K$ $\xi=0.25$ | | | | |
| | $R_1=100K$ $R_2=100K$ $\xi=0.5$ | | | | |
| | $R_1=50K$ $R_2=200K$ $\xi=1$ | | | | |
| $R_1=100K$ $C_1=C_2=0.1\mu f$ $\omega_n=100rad/s$ | $R_1=100K$ $R_2=100K$ $\xi=0.5$ | | | | |
| | $R_1=50K$ $R_2=200K$ $\xi=1$ | | | | |

实验三 控制系统的稳定性分析

一、实验目的

1. 观察系统的不稳定现象。
2. 研究系统开环增益和时间常数对稳定性的影响。

二、实验仪器

1. EL-AT-II 型自动控制系统实验箱一台
2. 计算机一台

三、实验内容

系统模拟电路图如图 3-1。

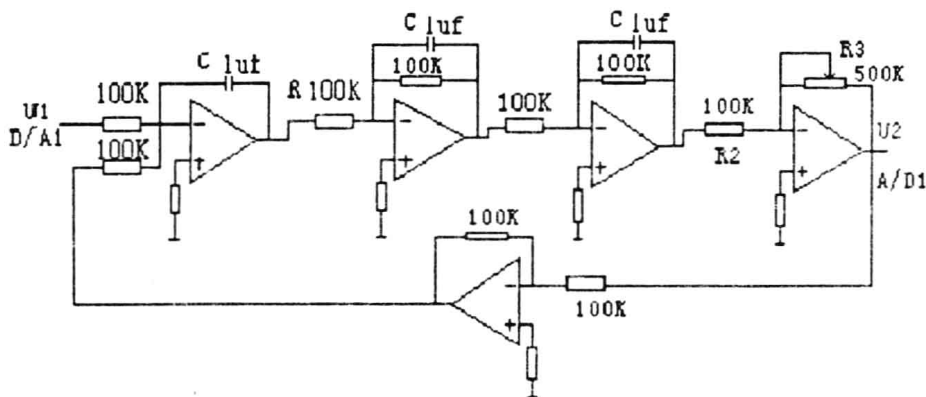


图 3-1 系统模拟电路图

其开环传递函数为：

$$G(s) = 10K/s(0.1s+1)(Ts+1)$$

式中 $K1=R3/R2$, $R2=100K\Omega$, $R3=0\sim 500K$; $T=RC$, $R=100K\Omega$, $C=1\mu f$ 或 $C=0.1\mu f$ 两种情况。

四、实验步骤

1. 连接被测量典型环节的模拟电路。电路的输入 $U1$ 接 A/D、D/A 卡的 DA1 输出，电路的输出 $U2$ 接 A/D、D/A 卡的 AD1 输入。检查无误后接通电源。
2. 启动计算机，在桌面双击图标 [自动控制实验系统] 运行软件。
3. 测试计算机与实验箱的通信是否正常，通信正常继续。如通信不正常查找原因使通信正常后才可以继续进行实验。
4. 在实验课题下拉菜单中选择实验三 [控制系统的稳定性分析]，鼠标单击该选项弹出实验课题参数窗口。其中设置输入信源电压 $U1=1V$ ，点击确认观察波形。
5. 取 $R3$ 的值为 $50K\Omega$, $100K\Omega$, $200K\Omega$ ，此时相应的 $K=10K1=5, 10, 20$ 。观察不同 $R3$ 值时显示区内的输出波形 (既 $U2$ 的波形)，找到系统输出产生增幅振荡时相应的 $R3$ 及 K 值。再把电阻 $R3$ 由大至小变化，即 $R3=200k\Omega, 100k\Omega, 50k\Omega$ ，观察不同 $R3$ 值时显示区内的输出波形，找出系统输出产生等幅振荡变化的 $R3$ 及 K 值，并观察 $U2$ 的输出波形。
6. 在步骤 5 条件下，使系统工作在不稳定状态，即工作在等幅振荡情况。改变电路中的电容 C 由 $1\mu f$ 变成 $0.1\mu f$ ，重复实验步骤 4 观察系统稳定性的变化。
7. 将实验结果添入下表中：

| 参数 | | 系统响应曲线 |
|---------|-----------------|--------|
| C=1uf | R3=50K K=5 | |
| | R3=100K K=10 | |
| | R3=200K K=20 | |
| C=0.1uf | R3=50K K=5 | |
| | R3=100K K=10 | |
| | R3=200K K=20 | |

五、实验报告

1. 画出步骤 5 的模拟电路图。
2. 画出系统增幅或减幅振荡的波形图。
3. 计算系统的临界放大系数，并与步骤 5 中测得的临界放大系数相比较。

六、预习要求

1. 分析实验系统电路，掌握其工作原理。
2. 理论计算系统产生等幅振荡、增幅振荡、减幅振荡的条件。

实验四 系统频率特性测量

一、实验目的

1. 加深了解系统及元件频率特性的物理概念。
2. 掌握系统及元件频率特性的测量方法。
3. 掌握利用“李沙育图形法”测量系统频率特性的方法。

二、实验仪器

1. EL-AT-II 型自动控制系统实验箱一台
2. 计算机一台
3. 双踪示波器一台

三、实验原理

频率特性的测量方法：

1. 将正弦信号发生器、被测系统和示波器按图 4-1 连接起来。将示波器 X 和 Y 轴的输入选择开关，均打在“DC”输入状态，并调整 X 和 Y 轴的位移，使光点处于萤光屏上的坐标原点上。

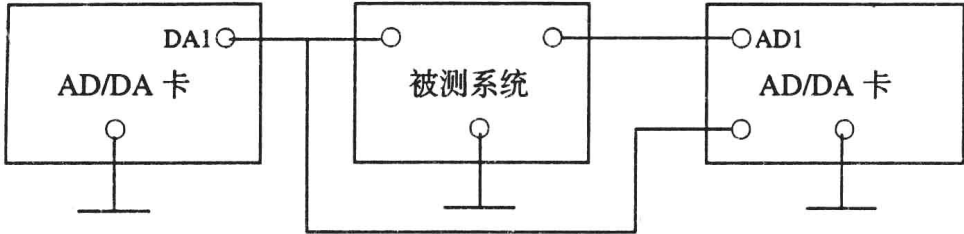


图 4-1 频率特性测量电路

2. 选定信号发生器的频率，调节其输出衰减，使被测系统在避免饱和的情况下，输出幅度尽可能大。然后调节示波器的 X 和 Y 轴输入幅值选择开关，使在所取信号幅度下，图象尽可能达到满刻度。

3. 根据萤光屏上的刻度及输入幅值选择开关指示的伏/格数，算出 $2X_m$ 、 $2Y_n$ 及 $2y_m$ ，并进一步计算幅值比和相位差。

为读数方便，可将示波器 X 轴输入 X-Y 开关打在工作状态，使光点在荧光屏上只作垂直运动，此时可方便地读出 $2y_m$ 。同理，也可方便地读出 $2X_m$ 。

四、实验内容

1. 模拟电路图及系统结构图分别如图 4-2 和图 4-3。

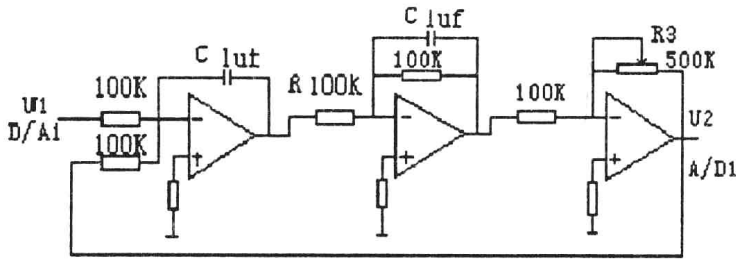


图 4-2 系统模拟电路图

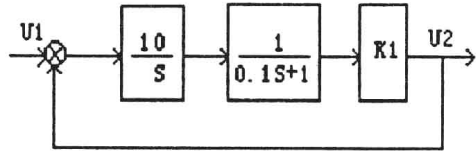


图 4-3 系统结构图

2. 系统传递函数：取 $R_3=500k\Omega$ ，则系统传递函数为

$$G(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{500}{s^2 + 10s + 500}$$

若输入信号 $U_1(t) = U_1 \sin \omega t$, 则在稳态时, 其输出信号为 $U_2(t) = U_2 \sin(\omega t + \Psi)$, 改变输入信号角频率 ω 值, 便可测得二组 U_2/U_1 和 Ψ 随 ω 变化的数值, 这个变化规律就是系统的幅频特性和相频特性。

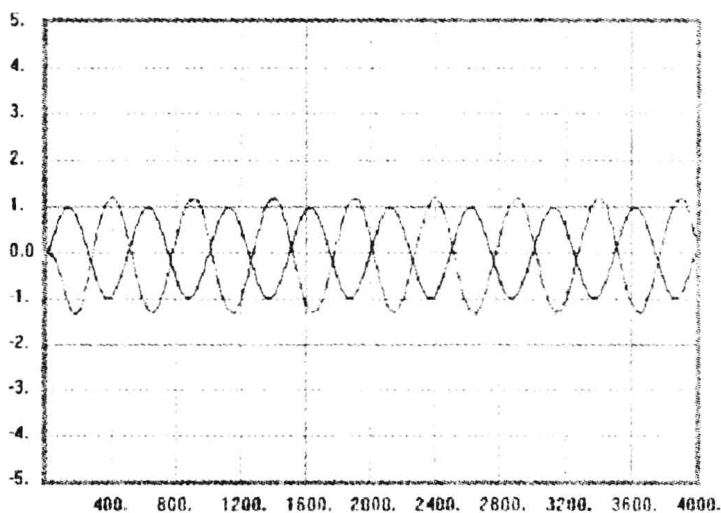
五、实验步骤

1. 连接被测量典型环节的模拟电路。电路的输入 U_1 接 A/D、D/A 卡的 DA1 输出, 电路的输出 U_2 接 A/D、D/A 卡的 AD1 输入。检查无误后接通电源。
2. 启动计算机, 在桌面双击图标 [自动控制实验系统] 运行软件。
3. 测试计算机与实验箱的通信是否正常, 通信正常继续。如通信不正常查找原因使通信正常后才可以继续进行实验。

测频率图

4. 选中 [实验课题→系统频率特性测量→手动方式] 菜单项, 鼠标单击将弹出参数设置窗口。参数设置完成后点确认等待观察波形, 如图 4-4 所示。

图 4-4 手动方式测量波特图



测波特图

5. 在测量波特图的过程中首先应选择 [实验课题→系统频率特性测量→自动方式→数据采集] 采集信息。如图 4-5 所示。

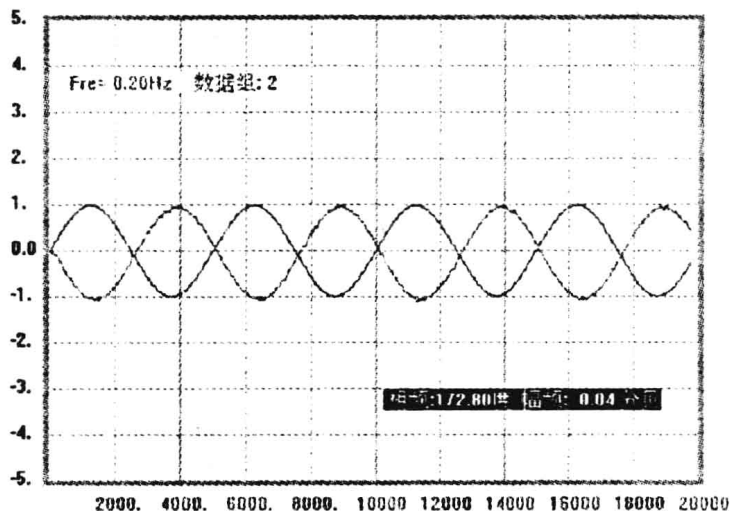


图 4-5 数据采集

6. 待数据采样结束后点击 [实验课题→系统频率特性测量→自动方式→波特图观测] 即可以在显示区内显示出所测量的波特图。

测奈氏图

7. 在测量波特图的过程中首先应选择 [实验课题→系统频率特性测量→自动方式→数据采集] 采集信息。

8. 待数据采样结束后点击 [实验课题→系统频率特性测量→自动方式→奈氏图观测] 即可以在显示区内显示出所测量的奈氏图。

9. 按表 4-1 所列频率，测量各点频率特性的实测值并计算相应的理论值。

表 4-1

| F (Hz) | ω (rad/s) | 理论值 | | 实测值 | | | | | |
|-----------|---------------------|-------------------|------------------------|-----|-----|-----|---------------|------------------------|-------|
| | | L (ω) | ϕ (ω) | 2Xm | 2yo | 2ym | L(ω) | ϕ (ω) | 李沙育图形 |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

六、实验报告

1. 画出被测系统的结构和模拟电路图。
2. 画出被测系统的开环 $L(\omega)$ 曲线与 $\phi(\omega)$ 曲线。

3. 整理表中的实验数据，并算出理论值和实测值。
4. 讨论李沙育图形法测量频率特性的精度。

七、预习要求

1. 阅读实验原理部分，掌握李沙育图形法的基本原理及频率特性的测量方法。
2. 画出被测系统的开环 $L(\omega)$ 曲线与 $\phi(\omega)$ 曲线。
3. 按表中给出格式选择几个频率点，算出各点频率特性的理论值。

实验五 连续系统串联校正

一、实验目的

1. 加深理解串联校正装置对系统动态性能的校正作用。
2. 对给定系统进行串联校正设计，并通过模拟实验检验设计的正确性。

二、实验仪器

1. EL-AT-II 型自动控制系统实验箱一台
2. 计算机一台

三、实验内容

1. 串联超前校正

(1) 系统模拟电路图如图 5-1 所示，图中开关 S 断开对应未校情况，接通对应超前校正。

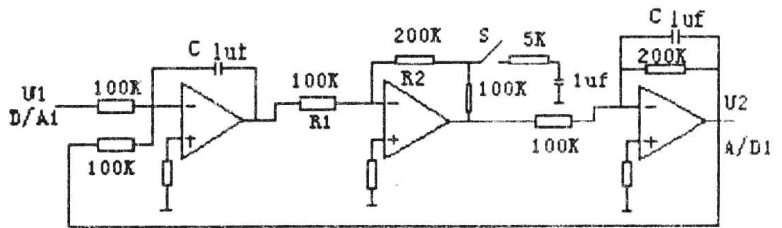


图 5-1 超前校正电路图

(2) 系统结构图如图 5-2 所示。

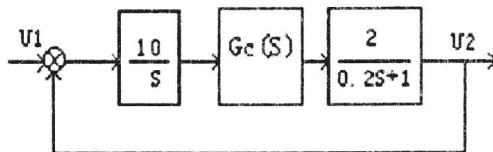


图 5-2 超前校正系统结构图

图中

$$G_{c1}(s) = 2$$

$$G_{c2}(s) = \frac{2(0.055s+1)}{0.005s+1}$$

2. 串联滞后校正