

自动控制原理实验指书



浙江大学海洋学院

海洋实验教学中心

目 录

目录

自动控制理论实验.....	1
实验一 典型环节的电路模拟与软件仿真研究.....	1
实验二 典型系统动态性能和稳定性分析.....	12
实验三 典型环节（或系统）的频率特性测量.....	17
实验四 线性系统串联校正.....	28
实验五 典型非线性环节的静态特性.....	35
实验六 非线性系统相平面法.....	42
自控实物对象实验.....	51
实验一 直流电机转速控制实验.....	51
实验二 温度控制实验.....	55
实验三 双容水箱液位控制实验.....	59
附录三 上位机软件功能使用说明.....	63

自动控制理论实验

实验一 典型环节的电路模拟与软件仿真研究

一. 实验目的

1. 通过实验熟悉并掌握实验装置和上位机软件的使用方法。
2. 通过实验熟悉各种典型环节的传递函数及其特性，掌握电路模拟和软件仿真研究方法。

二. 实验内容

1. 设计各种典型环节的模拟电路。
2. 完成各种典型环节模拟电路的阶跃特性测试，并研究参数变化对典型环节阶跃特性的影响。
3. 在 MATLAB 软件上，填入各个环节的实际（非理想）传递函数参数，完成典型环节阶跃特性的软件仿真研究，并与电路模拟研究的结果作比较。

三. 实验步骤

1. 熟悉实验装置，利用实验装置上的模拟电路单元，设计并连接各种典型环节（包括比例、积分、比例积分、比例微分、比例积分微分以及惯性环节）的模拟电路。接线时要注意：先断电，再接线。接线时要注意不同环节、不同测试信号对运放锁零的要求。（U3 单元的 O1 接被测对象的输入、G 接 G1、U3 单元的 I1 接被测对象的输出）。

2. 利用实验设备完成各典型环节模拟电路的阶跃特性测试，并研究参数变化对典型环节阶跃特性的影响。

首先必须在熟悉上位机界面的操作，充分利用上位机提供的虚拟示波器与信号发生器功能。为了利用上位机提供的虚拟示波器与信号发生器功能。接线完成，经检查无误，再给实验装置上电后，打开时域特性的程序，启动上位机程序，进入主界面。

软件界面上的操作步骤如下：

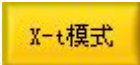


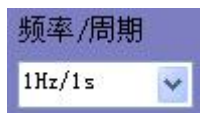
①按通道接线情况：通过上位机界面中“通道选择”选择 I1、I2 路 A/D 通道作为被测环节的检测端口，选择 D/A 通道的 O1（“测试信号 1”）作为被测



对象的信号发生端口. 不同的通道, 图形显示控件中波形的颜色将不同。

②硬件接线完毕后, 检查 USB 口通讯连线和实验装置电源后, 运行上位机软件程序, 如果有问题请求指导教师帮助。

③进入实验模式后, 先对显示模式进行设置: 选择  “X-t 模式”; 选择



“T/DIV” 为 1s/1HZ。

④完成上述实验设置, 然后设置实验参数, 在界面的右边可以设置系统测试信号参数, 选择“测试信号”为“周期阶跃信号”, 选择“占空比”为 50%, 选择“T/DIV”为“1000ms”, 选择“幅值”为“3V”, 可以根据实验需要调整幅值, 以得到较好的实验曲线, 将“偏移”设为“0”。以上除必须选择“周期阶跃信号”外, 其余的选择都不是唯一的。要特别注意, 除单个比例环节外, 对其它环节和系统都必须考虑环节或系统的时间常数, 如仍选择“输入波形占空比”为 50%, 那么“T/DIV”至少是环节或系统中最大时间常数的 6~8 倍。这样, 实验中才能观测到阶跃响应的整个过程。



⑤以上设置完成后, 按 LabVIEW 上位机软件中的  “RUN” 运行图标来运行实验

程序, 然后点击右边的  “启动/停止” 按钮来启动实验, 动态波形得到显示, 直至周期响应过程结束, 如上述参数设置合理就可以在主界面图形显示控件中间得到环节的“阶跃响应”。

⑥利用 LabVIEW 软件中的图形显示控件来观测实验结果; 改变实验装置上环节参数, 重复⑤的操作; 如发现实验参数设置不当, 看不到“阶跃响应”全过程, 可重复④、⑤的操作。

⑦按实验报告需要，将图形结果保存为位图文件。

3. 分析实验结果，完成实验报告。

四. 操作及实验说明

1. 比例(P)环节的传递函数、方块图、模拟电路和阶跃响应

比例环节的传递函数为：
$$\frac{U_O(s)}{U_i(s)} = K$$

其方块图、模拟电路和阶跃响应，分别如图 1.1.1、图 1.1.2 和图 1.1.3 所示，于是 $K = \frac{R_1}{R_0}$ 。

实验参数取 $R_0=100k$ ， $R_1=200k$ ， $R=10k$ 。

在进行实验连线之前，先将 U9 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R_0 的总值为 100K；

U8 单元为反相器单元，将 U8 单元输入端的 10K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R 的总值为 10K；

注明：所有运放单元的+端所接的 100K、10K 电阻均已经内部接好，实验时不需外接。

实验接线如下图：

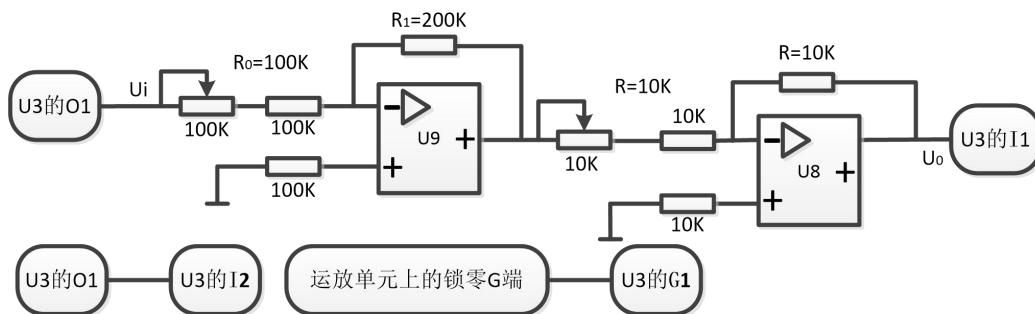


图1.1.2

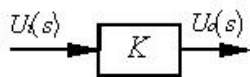


图1.1.1

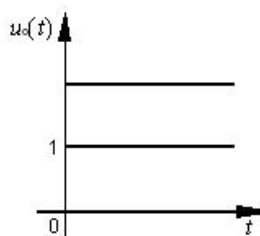


图1.1.3

打开 labview 的时域特性程序后，软件界面的参数设置如下：

测试信号 1：阶跃

幅值 1：3V（偏移 0）

频率/周期：1s（占空比 50%），运行程序，直接进行实验。

2. 积分(I)环节的传递函数、方块图、模拟电路和阶跃响应

积分环节的传递函数为：
$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{Ts}$$

其方块图、模拟电路和阶跃响应，分别如图 1.2.1、图 1.2.2 和图 1.2.3 所示，于是 $T = R_0C$ ，

实验参数取 $R_0=100k$ ， $C=1\mu F$ ， $R=10k$ 。

在进行实验连线之前，先将 U9 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R_0 的总值为 100K；

U8 单元为反相器单元，将 U8 单元输入端的 10K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R 的总值为 10K；

注明：所有运放单元的+端所接的 10K 电阻均已经内部接好，实验时不需外接。

实验接线如下图：

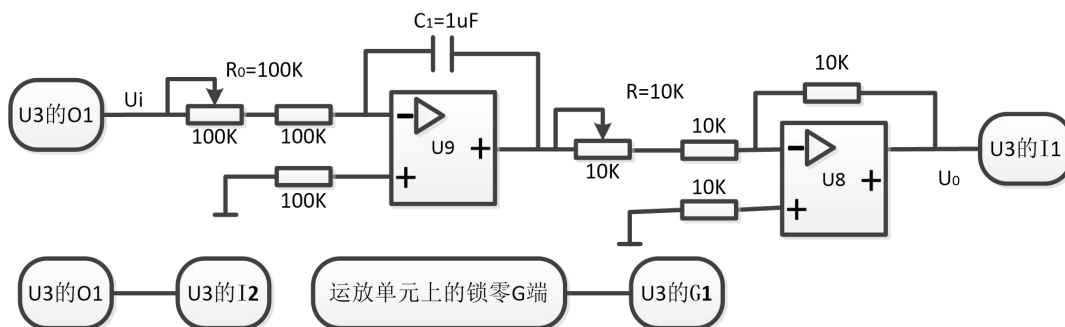


图1.2.2

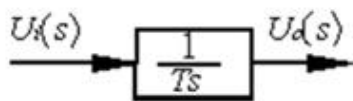


图1.2.1

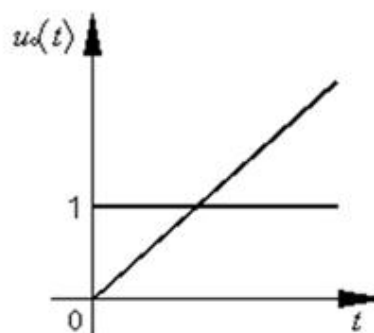


图1.2.3

打开 labview 的时域特性程序后，软件界面的参数设置如下：

测试信号 1：阶跃

幅值 1：3V（偏移 0）

频率/周期：1s（占空比 50%），运行程序，直接进行实验。

3. 比例积分(PI)环节的传递函数、方块图、模拟电路和阶跃响应

比例积分环节的传递函数为：

$$\frac{U_o}{U_i} = K + \frac{1}{Ts}$$

其方块图、模拟电路和阶跃响应，分别如图 1.3.1、图 1.3.2 和图 1.3.3 所示，于是

$$K = \frac{R_1}{R_0}, \quad T = R_0 C$$

实验参数取 $R_0 = 200k$ ， $R_1 = 200k$ ， $C = 1\mu F$ ， $R = 10k$ 。

在进行实验连线之前，先将 U9 单元输入端的 100K 可调电阻顺时针旋转到底（即调至最大），使输入电阻 R_0 的总值为 200K；

C1 取元件库 U4 单元的 1uF 电容。

U8 单元为反相器单元，将 U8 单元输入端的 10K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R 的总值为 10K；

注明：所有运放单元的+端所接的 100K、10K 电阻均已经内部接好，实验时不需外接。

实验接线如下图：

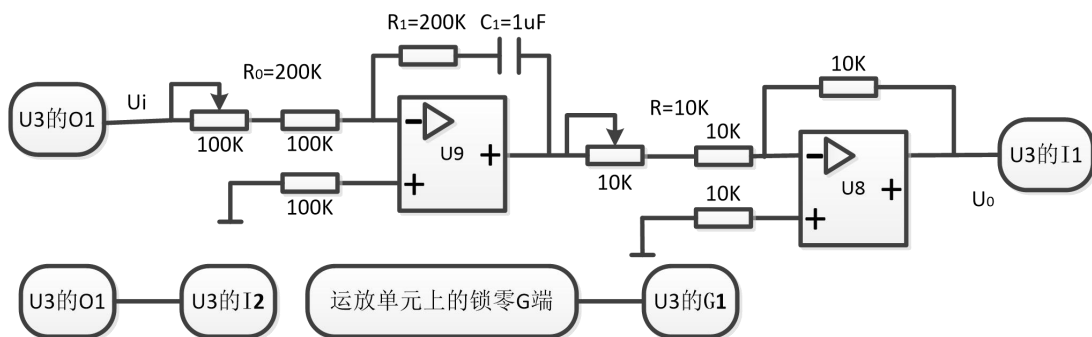


图1.3.2

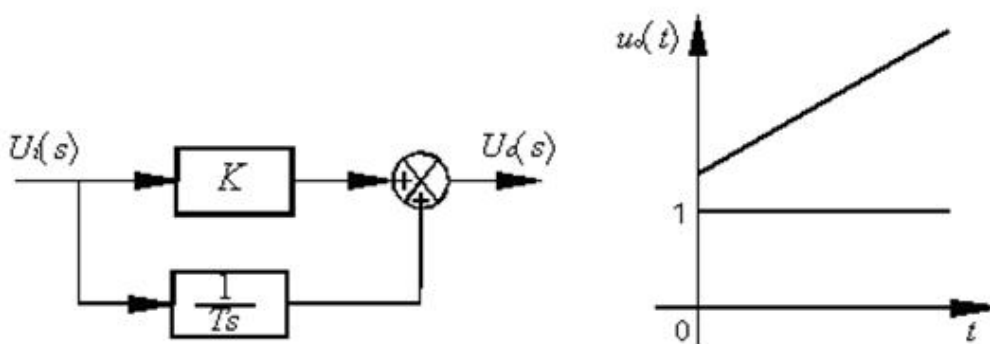


图1.3.1

图1.3.3

打开 labview 的时域特性程序后，软件界面的参数设置如下：

测试信号 1：阶跃

幅值 1：3V（偏移 0）

频率/周期：1s（占空比 50%），运行程序，直接进行实验。

4. 比例微分(PD)环节的传递函数、方块图、模拟电路和阶跃响应

比例微分环节的传递函数为： $\frac{U_o}{U_i} = K(1 + Ts)$

其方块图和模拟电路分别如图 1.4.1、图 1.4.2 所示。其模拟电路是近似的（即实际 PD 环节），取 $R_1, R_2 \gg R_3$ ，则有 $K = \frac{R_1 + R_2}{R_0}$, $T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C$ ，实验参数取 $R_0 = 10k$, $R_1 = 10k$, $R_2 = 10k$, $R_3 = 200 \Omega$, $C = 1\mu F$, $R = 10k$ 。

对应理想的和实际的比例微分(PD)环节的阶跃响应分别如图 1.4.3a、图 1.4.3b 所示。

实际 PD 环节的传递函数为：

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{R_1 + R_2}{R_0} \left[1 + \frac{R_1 R_2 C s}{(R_1 + R_2)(R_3 C s + 1)} \right] \quad (\text{供软件仿真参考})$$

$$= \frac{(R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1) C s + (R_1 + R_2)}{R_0 R_3 C s + R_0}$$

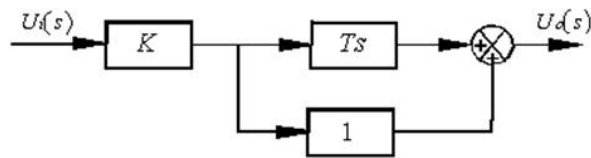


图1.4.1

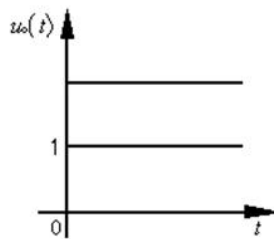


图1.4.3a

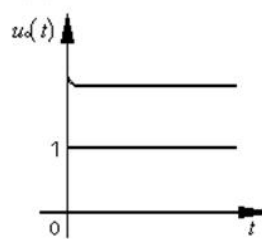


图1.4.3b

在进行实验连线之前，先将 U10 单元输入端的 10K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R₀ 的总阻值为 10K；其中，R₂、C₁ 和 R₃ 在 U10 单元模块上。

R₁ 采用元件库 U4 单元上的 10K 电阻。

U8 单元为反相器单元，将 U8 单元输入端的 10K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R 的总值为 10K；

注明：所有运放单元的+端所接的 100K、10K 电阻均已经内部接好，实验时不需外接。

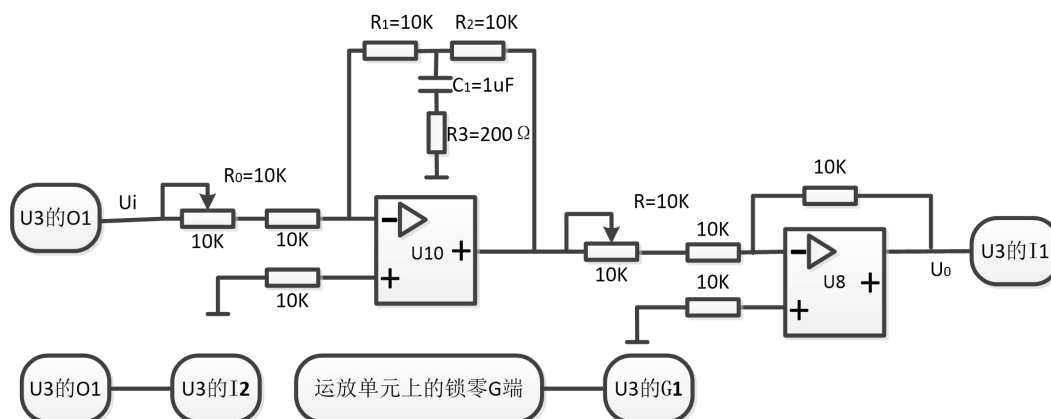


图1.4.2

打开 labview 的时域特性程序后，软件界面的参数设置如下：

测试信号 1：阶跃

幅值 1：4V（偏移 0）

频率/周期：1s（占空比 50%），运行程序，直接进行实验。

5. 惯性环节的传递函数、方块图、模拟电路和阶跃响应

惯性环节的传递函数为：
$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{K}{Ts + 1}$$

其方块图、模拟电路和阶跃响应，分别如图 1.5.1、图 1.5.2 和图 1.5.3 所示，其中 $K = \frac{R_1}{R_0}$, $T = R_1 C$ ，实验参数取 $R_0 = 200k$, $R_1 = 200k$, $C = 1uF$, $R = 10k$ 。

在进行实验连线之前，先将 U13 单元输入端的 100K 可调电阻顺时针旋转到底（即调至最大），使输入电阻 R_0 的总阻值为 200K；其中， R_1 、 C_1 在 U13 单元模块上。

U8 单元为反相器单元，将 U8 单元输入端的 10K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R 的总值为 10K。

注明：所有运放单元的+端所接的 100K、10K 电阻均已经内部接好，实验时不需外接。

实验接线如下图：

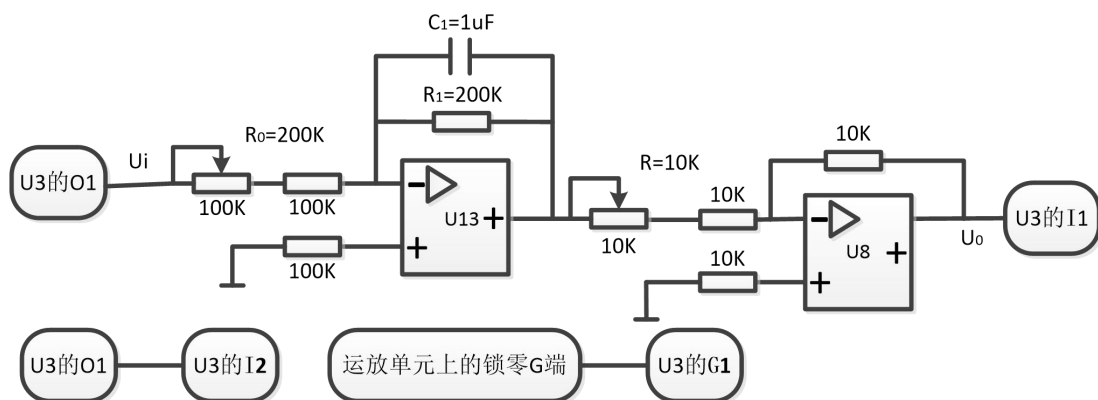


图1.5.2

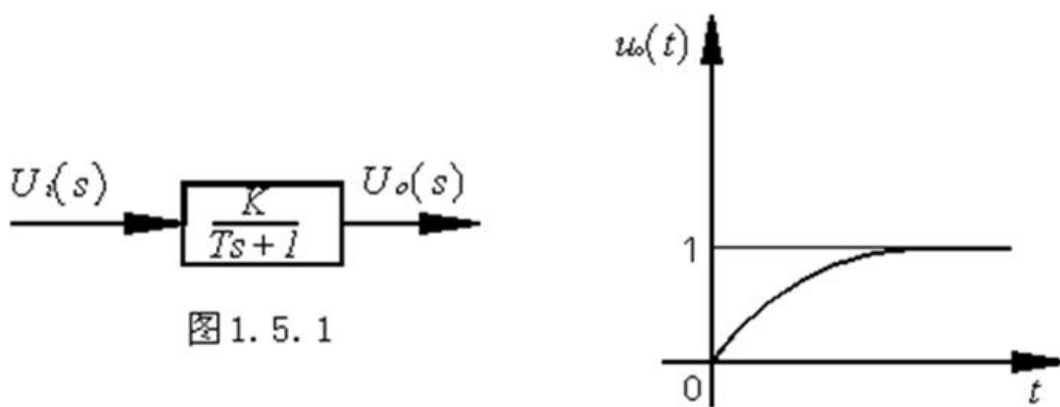


图 1.5.1

图 1.5.3

打开 labview 的时域特性程序后，软件界面的参数设置如下：

测试信号 1：阶跃

幅值 1：2V（偏移 0）

频率/周期：1s（占空比 90%），运行程序，直接进行实验。

6. 比例积分微分 (PID) 环节的传递函数、方块图、模拟电路和阶跃响应

比例积分微分环节的传递函数为：
$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = K_P + \frac{1}{T_i s} + T_d s$$

其方块图和模拟电路分别如图 1.6.1、图 1.6.2 所示。其模拟电路是近似的（即实际 PID 环节），取 $R_1 \gg R_2 \gg R_3$ ，将近似上述理想 PID 环节有 $K_P = \frac{R_1}{R_0}$, $T_i = R_0 C_1$, $T_d = \frac{R_1 R_2}{R_0} C_2$ ，实验参数取 $R_0 = 200k$, $R_1 = 100k$, $R_2 = 10k$, $R_3 = 1k$, $C_1 = 1\mu F$, $C_2 = 10\mu F$, $R = 10k$ 。

对应理想的和实际的比例积分微分 (PID) 环节的阶跃响应分别如图 1.6.3 a、图

1.6.3 b 所示。

实际 PID 环节的传递函数为：

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{R_1 + R_2}{R_0} + \frac{1}{R_0 C_1 s} + \frac{R_2 C_2 (R_1 C_1 s + 1)}{R_0 C_1 (R_3 C_2 s + 1)} \quad (\text{供软件仿真参考})$$

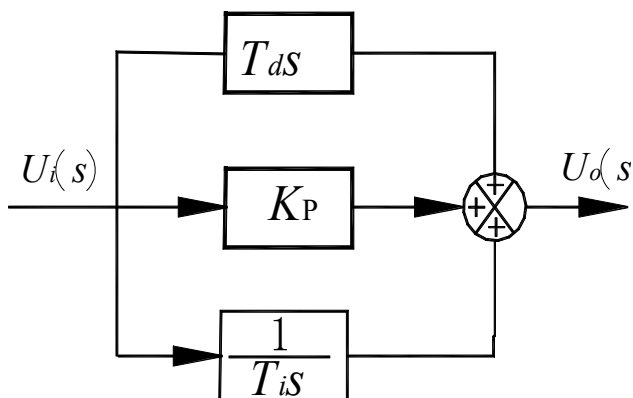


图1.6.1

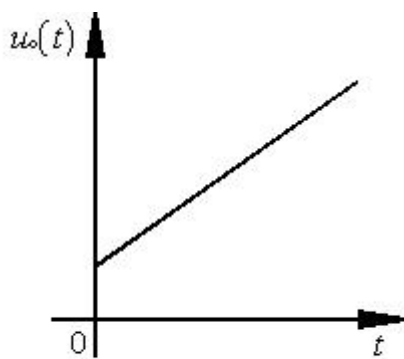


图1.6.3a

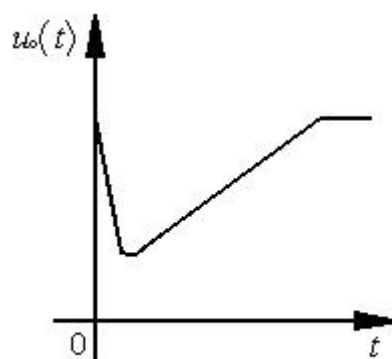


图1.6.3b

在进行实验连线之前，先将 U14 单元输入端的 100K 可调电阻顺时针旋转到底（即调至最大），使输入电阻 R₀ 的总阻值为 200K；其中，R₁、R₂、R₃、C₁、C₂ 均在 U14 单元模块上。

U8 单元为反相器单元，将 U8 单元输入端的 10K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R 的总值为 10K；

注明：所有运放单元的+端所接的 10K 电阻均已经内部接好，实验时不需外接。

实验接线如下图：

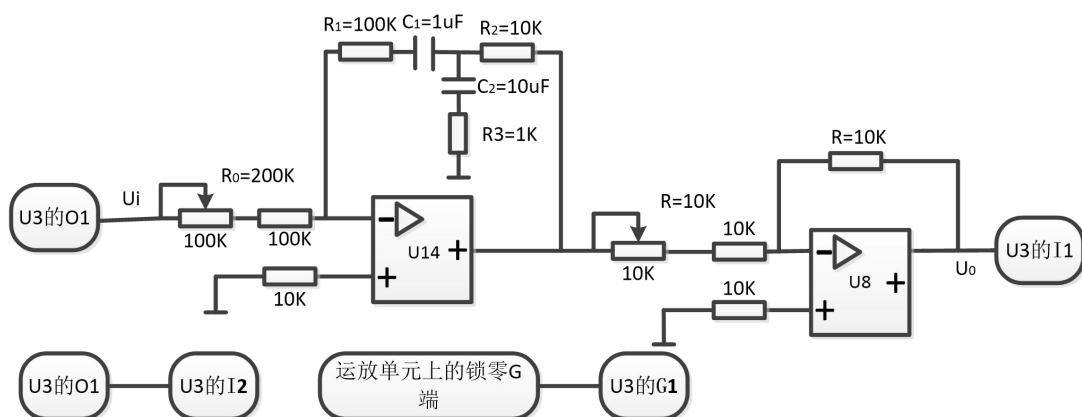


图 1.6.2

打开 labview 的时域特性程序后，软件界面的参数设置如下：

测试信号 1：阶跃

幅值 1：2V（偏移 0）

频率/周期：1s（占空比 50%），运行程序，直接进行实验。

实验二 典型系统动态性能和稳定性分析

一. 实验目的

1. 学习和掌握动态性能指标的测试方法。
2. 研究典型系统参数对系统动态性能和稳定性的影响。

二. 实验内容

1. 观测二阶系统的阶跃响应，测出其超调量和调节时间，并研究其参数变化对动态性能和稳定性的影响。
2. 观测三阶系统的阶跃响应，测出其超调量和调节时间，并研究其参数变化对动态性能和稳定性的影响。

三. 实验步骤

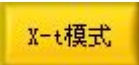
1. 熟悉实验装置，利用实验装置上的模拟电路单元，参考本实验附录中的图 2.1.1 和图 2.1.2，设计并连接由一个积分环节和一个惯性环节组成的二阶闭环系统的模拟电路（如用 U9、U15、U11 和 U8 连成）。注意实验接线前必须对运放仔细调零（出厂已调好，无需调节）。**信号输出采用 U3 单元的 O1、信号检测采用 U3 单元的 I1、运放的锁零接 U3 单元的 G1。**
2. 利用实验设备观测该二阶系统模拟电路的阶跃特性，并测出其超调量和调节时间。
3. 改变该二阶系统模拟电路的参数，观测参数对系统动态性能的影响。
4. 利用实验装置上的模拟电路单元，参考本实验附录中的图 2.2.1 和图 2.2.2，设计并连接由一个积分环节和两个惯性环节组成的三阶闭环系统的模拟电路（如用 U9、U15、U11、U10 和 U8 连成）。
5. 利用实验设备观测该三阶系统模拟电路的阶跃特性，并测出其超调量和调节时间。
6. 改变该三阶系统模拟电路的参数，观测参数对系统稳定性与动态指标的影响。
7. 分析实验结果，完成实验报告。

软件界面上的操作步骤如下：

①按通道接线情况:通过上位机界面中“通道选择”选择 I1、I2 路 A/D 通道作为被测环节的检测端口,选择 D/A 通道的 01 (“测试信号 1”)作为被测

对象的信号发生端口。不同的通道,图形显示控件中波形的颜色将不同。

②硬件接线完毕后,检查 USB 口通讯连线和实验装置电源后,运行上位机软件程序,如果有问题请求指导教师帮助。

③进入实验模式后,先对显示模式进行设置:选择“X-t 模式”;选择“T/DIV”为 1s/1Hz。

④完成上述实验设置,然后设置实验参数,在界面的右边可以设置系统测试信号参数,选择“测试信号”为“周期阶跃信号”,选择“占空比”为 50%,选择“T/DIV”为“1000ms”,选择“幅值”为“3V”,可以根据实验需要调整幅值,以得到较好的实验曲线,将“偏移”设为“0”。以上除必须选择“周期阶跃信号”外,其余的选择都不是唯一的。要特别注意,除单个比例环节外,对其它环节和系统都必须考虑环节或系统的时间常数,如仍选择“输入波形占空比”为 50%,那么“T/DIV”至少是环节或系统中最大时间常数的 6~8 倍。这样,实验中才能观测到阶跃响应的整个过程。



⑤以上设置完成后,按 LabVIEW 上位机软件中的“RUN”运行图标来运行实验

程序,然后点击右边的“启动/停止”按钮来启动实验,动态波形得到显示,直至周期响应过程结束,如上述参数设置合理就可以在主界面图形显示控件中间得到环节的“阶跃响应”。

⑥利用 LabVIEW 软件中的图形显示控件中光标“Cursor”功能观测实验结果；改变实验装置上环节参数，重复⑤的操作；如发现实验参数设置不当，看不到“阶跃响应”全过程，可重复④、⑤的操作。

⑦按实验报告需要，将图形结果保存为位图文件。

3. 分析实验结果，完成实验报告。

四. 附录

1. 典型二阶系统

典型二阶系统的方块结构图如图 2.1.1 所示：

其开环传递函数为 $G(s) = \frac{K}{s(T_1s+1)}$, $K = \frac{K_1}{T_o}$,

其闭环传递函数为 $W(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_ns + \omega_n^2}$, 其中, $\omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{T_1T_o}}$, $\xi = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{T_o}{K_1T_1}}$

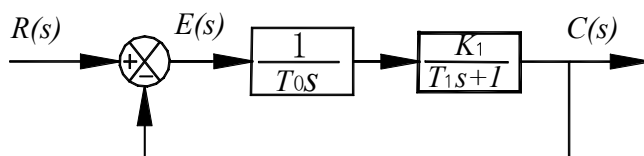


图2.1.1

取二阶系统的模拟电路如图 2.1.2 所示，实验参数取 $R_0=R_f=200k$, $R_1=200k$, $R_2=100k$, $C_1=1\mu F$, $C_2=1\mu F$, $R=10k$ 。Rx 为元件库 U4 单元（针对使用的是自控实验箱）或者 U1 单元（针对使用的是自控实验台）的 220K 可调电阻。

在进行实验连线之前，先将 U9 单元两个输入端的 100K 可调电阻均顺时针旋转到底（即调至最大），使电阻 R_0 、 R_f 均为 200K；

将 U13 单元输入端的 100K 可调电阻顺时针旋转到底（即调至最大），使输入电阻 R_1 的总阻值为 200K； C_1 在 U13 单元模块上。

将 U15 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R_2 的总阻值为 100K； C_2 位于 U15 单元上。

U8 单元为反相器单元，将 U8 单元输入端的 10K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R 的总值为 10K；

注明：所有运放单元的+端所接的 100K、10K 电阻均已经内部接好，实验时不需外

接

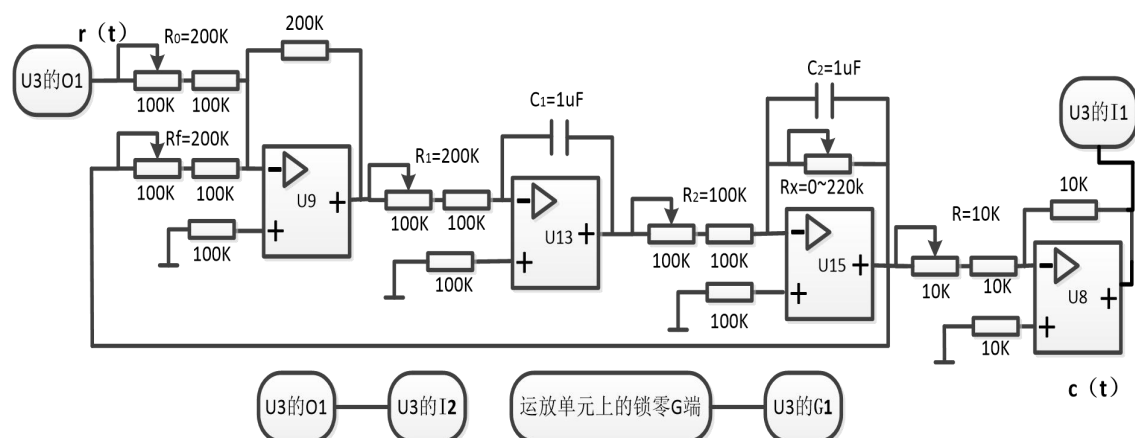


图2.1.2

调节 R_x 分析二阶系统的三种情况, 该系统的阶跃响应如图 2.1.3 所示: 2.1.3a, 2.1.3b, 2.1.3c 分别对应二阶系统在过阻尼, 临界阻尼, 欠阻尼三种情况下的阶跃响应曲线:

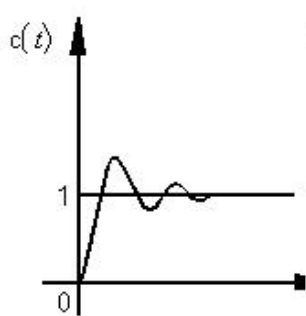


图2.1.3a

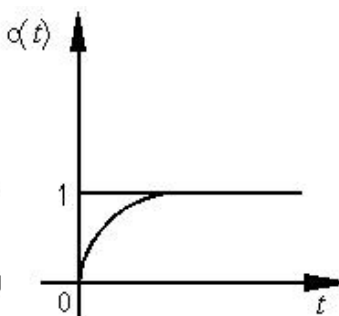


图2.1.3b

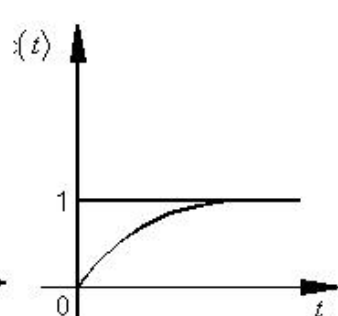


图2.1.3c

打开 labview 的时域特性程序后, 软件界面的参数设置如下:

测试信号 1: 阶跃

幅值 1: 5V (偏移 0)

频率/周期: 2.5s (占空比 90%), 运行程序, 直接进行实验。

2. 典型三阶系统

典型三阶系统的方块结构图如图 2.2.1 所示:

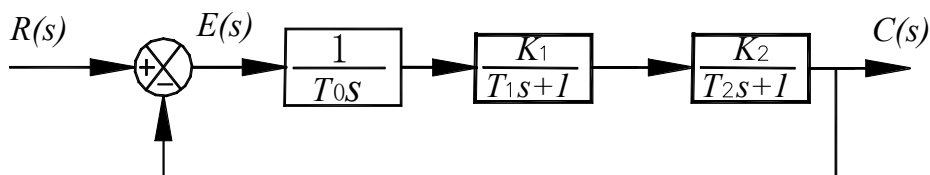


图2. 2. 1

其开环传递函数为 $G(s) = \frac{K}{s(T_1s+1)(T_2s+1)}$ ，其中 $K = \frac{K_1K_2}{T_0}$ ，取三阶系统的模拟电路如图 2. 2. 2 所示：

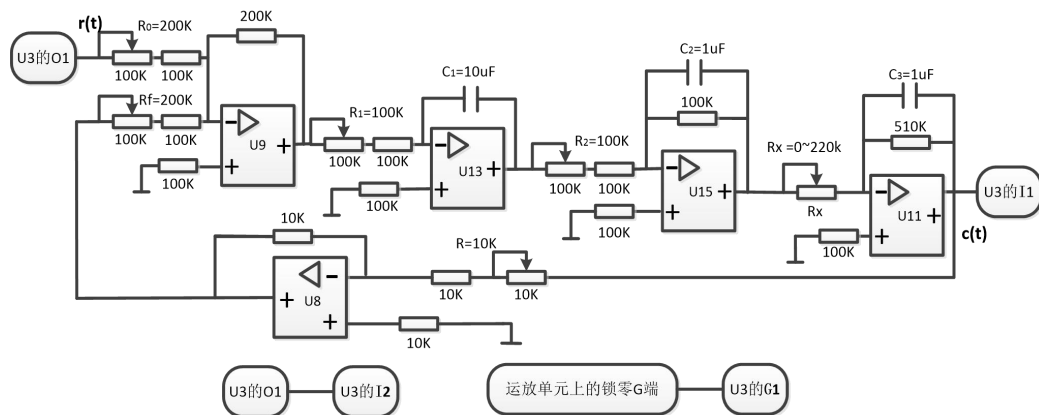


图2.2.2

取三阶系统的模拟电路如图 2. 2. 2 所示，实验参数取 $R_0=R_f=200k$ ， $R_1=100k$ ， $R_2=100k$ ， $C_1=10\mu F$ ， $C_2=C_3=1\mu F$ ， $R=10k$ 。 R_x 为元件库 U4 单元（针对使用的是自控实验箱）或者 U1 单元（针对使用的是自控实验台）的 220K 可调电阻。

在进行实验连线之前，先将 U9 单元两个输入端的 100K 可调电阻均顺时针旋转到底（即调至最大），使电阻 R_0 、 R_f 均为 200K；

将 U13 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R_1 的总阻值为 100K； C_1 取元件库 U4 单元上的 10uF 电容。

将 U15 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R_2 的总阻值为 100K； C_2 位于 U15 单元上。

R_x 为 U11 单元的输入端电阻， C_3 位于 U11 单元上。

U8 单元为反相器单元，将 U8 单元输入端的 10K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至

最小), 使输入电阻 R 的总值为 10K;

注明: 所有运放单元的+端所接的 100K、10K 电阻均已经内部接好, 实验时不需外接。

该系统开环传递函数为 $G(s)H(s) = \frac{K}{s(0.1s+1)(0.5s+1)}$, $K = 500 / R_x$, R_x 的单位为 $K\Omega$ 。

系统特征方程为 $s^3 + 12s^2 + 20s + 20K = 0$, 根据劳斯判据得到:

系统稳定 $0 < K < 12$

系统临界稳定 $K = 12$

系统不稳定 $K > 12$

根据 K 求取 R_x 。这里的 R_x 可利用模拟电路单元的 220K 电位器, 改变 R_x 即可改变 K ,

改变 K, 得到三种不同情况下的实验结果。

该系统的阶跃响应如图 2.2.3 a、2.2.3b 和 2.2.3c 所示, 它们分别对应系统处于不稳定、临界稳定和稳定的三种情况。

打开 labview 的时域特性程序后, 软件界面的参数设置如下:

测试信号 1: 阶跃

幅值 1: 3V (偏移 0)

频率/周期: 10s (占空比 90%), 运行程序, 直接进行实验。

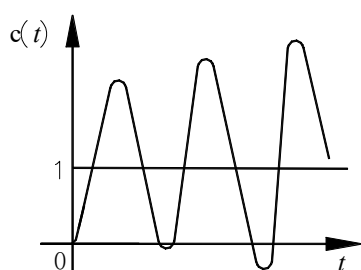


图2.2.3a

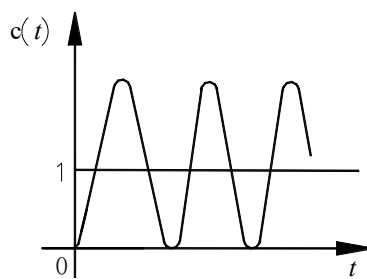


图2.2.3b

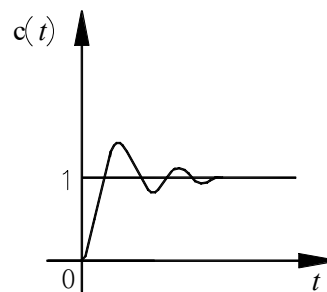


图2.2.3c

实验三 典型环节（或系统）的频率特性测量

一. 实验目的

1. 学习和掌握测量典型环节（或系统）频率特性曲线的方法和技能。
2. 学习根据实验所得频率特性曲线求取传递函数的方法。

二. 实验内容

1. 用实验方法完成一阶惯性环节的频率特性曲线测试。
2. 用实验方法完成典型二阶系统开环频率特性曲线的测试。
3. 用软件仿真方法求取一阶惯性环节频率特性和典型二阶系统开环频率特性，并与实验所得结果比较。

三、实验原理及说明

1. 实验用一阶惯性环节传递函数参数、电路设计及其幅相频率特性曲线：

对于 $G(s) = \frac{K}{Ts+1}$ 的一阶惯性环节，其幅相频率特性曲线是一个半圆，见图 3.1。

取 $s = j\omega$ 代入，得

$$G(j\omega) = \frac{K}{j\omega T + 1} = r(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \quad (3-2-1)$$

在实验所得特性曲线上，从半圆的直径 $r(0)$ ，可得到环节的放大倍数 K ， $K = r(0)$ 。

在特性曲线上取一点 ω_k ，可以确定环节的时间常数 T ， $T = -\frac{\lg \varphi(\omega_k)}{\omega_k}$ 。(3-2-2)

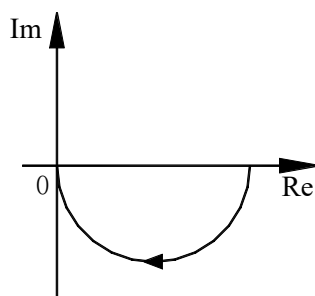


图3.1

实验用一阶惯性环节传递函数为 $G(s) = \frac{1}{0.2s+1}$ ，其中参数为 $R_0=200\text{K}\Omega$ ， $R_1=200\text{K}\Omega$ ， $C=1\mu\text{F}$ ，参数根据实验要求可以自行搭配，其模拟电路设计参阅下图 3.2。

在进行实验连线之前，先将 U13 单元输入端的 100K 可调电阻顺时针旋转到底（即调至最大），使输入电阻 R_0 的总阻值为 200K；其中， R_1 、 C_1 在 U13 单元模块上。

U8 单元为反相器单元，将 U8 单元输入端的 10K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R 的总值为 10K；

注明：所有运放单元的+端所接的 100K、10K 电阻均已经内部接好，实验时不需外接。

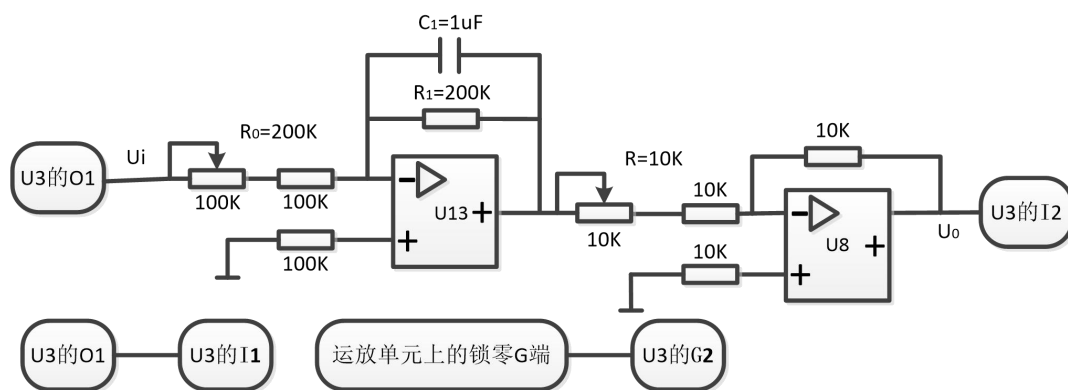


图3.2

2. 实验用典型二阶系统开环传递函数参数、电路设计及其幅相频率特性曲线：

对于由两个惯性环节组成的二阶系统，其开环传递函数为

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)} = \frac{K}{T^2s^2 + 2\xi Ts + 1} \quad (\xi \geq 1)$$

令上式中 $s = j\omega$ ，可以得到对应的频率特性

$$G(j\omega) = \frac{K}{-T^2\omega^2 + j2\xi T\omega + 1} = r(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

二阶系统开环传递函数的幅相频率特性曲线，如图 3.3 所示。

根据上述幅相频率特性表达式，有

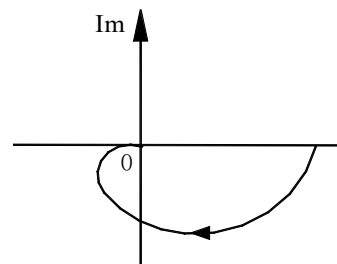


图3.3

$$K = r(0) \quad (3-1)$$

$$r(\omega_k) = \frac{r(0)}{2\xi T \omega_k \sqrt{1 + \frac{1}{tg^2 \phi_k}}}$$

$$\text{其中 } \frac{1}{tg \phi_k} = \frac{1 - T^2 \omega_k^2}{2\xi T \omega}$$

$$\text{故有 } T^2 = \frac{1}{\omega_k^2} - \frac{2\xi T}{\omega_k tg \phi_k} \quad (3-2)$$

$$2T\xi = \frac{r(0)}{\omega_k r(\omega_k) \sqrt{1 + \frac{1}{tg^2 \phi_k}}} \quad (3-3)$$

如已测得二阶环节的幅相频率特性，则 $r(0)$ 、 ω_k 、 ϕ_k 和 $r(\omega_k)$ 均可从实验曲线得到，于是可按式 (3—1)、(3—2) 和 (3—3) 计算 K 、 T 、 ξ ，并可根据计算所得 T 、 ξ 求取 T_1 和 T_2

$$T_1 = T(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})$$

$$T_2 = T(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})$$

实验用二阶惯性环节传递函数为 $G(s)H(s) = \frac{1}{(0.2s+1)(0.1s+1)} = \frac{1}{0.02s^2 + 0.3s + 1}$ ，其中参数为 $R_0=100 K\Omega$ ， $R_1=100 K\Omega$ ， $R_2=200 K\Omega$ ， $R_3=200 K\Omega$ ， $C_1=C_2=1\mu F$ ，参数根据实验要求可以自行搭配，其模拟电路设计参阅下图 3.4。

在进行实验连线之前，先将 U13 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最大），使输入电阻 R_0 的总阻值为 100K；其中， R_1 、 C_1 在 U13 单元模块上。

再将 U15 单元输入端的 100K 可调电阻顺时针旋转到底（即调至最大），使输入电阻 R_2 的总阻值为 200K；其中， R_3 、 C_2 在 U15 单元模块上。

注明：所有运放单元的+端所接的 100K 电阻均已经内部接好，实验时不需外接。

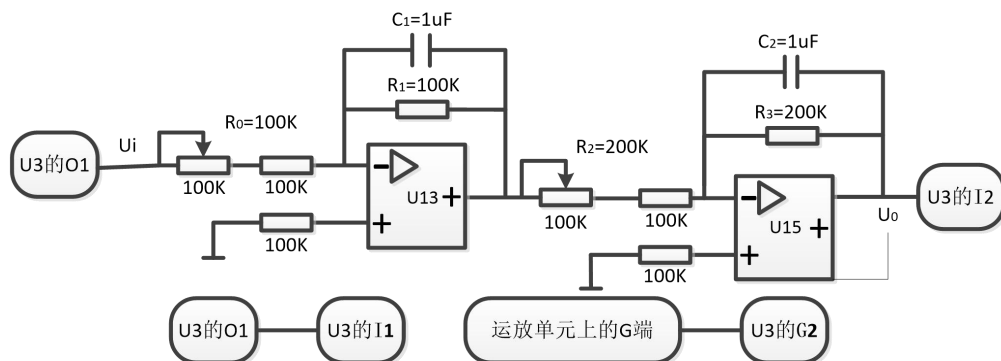


图3.4

四. 实验步骤

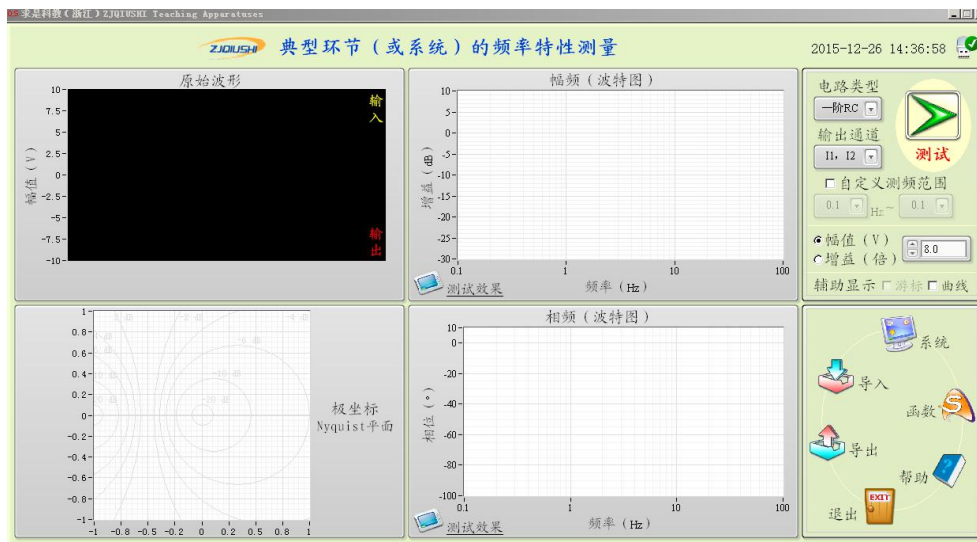
1. 熟悉频率测试软件的使用方法，了解实验的线路的连接。利用实验装置上的模拟电路单元，按照图 3.2 连接“一阶惯性环节”模拟电路。

2. 利用实验设备完成一阶惯性环节的频率特性曲线测试。

(2) 有上位机时，必须在熟悉上位机界面操作的基础上，充分利用上位机提供的虚拟示波器与信号发生器功能。



(3) 双击打开桌面频率特性图标运行求是频率特性实验。实验界面如下图所示：



(4) 做一阶特性实验，点击右上角电路类型选择“一阶电路”，系统自动将各测量窗口量程设置为适合一阶电路的大小。

输入输出通道选择默认的 I1、I2

自定义测频范围可以根据实验所能检测到的最大频率进行设置，一般一阶特性我们设置为 0-30Hz。

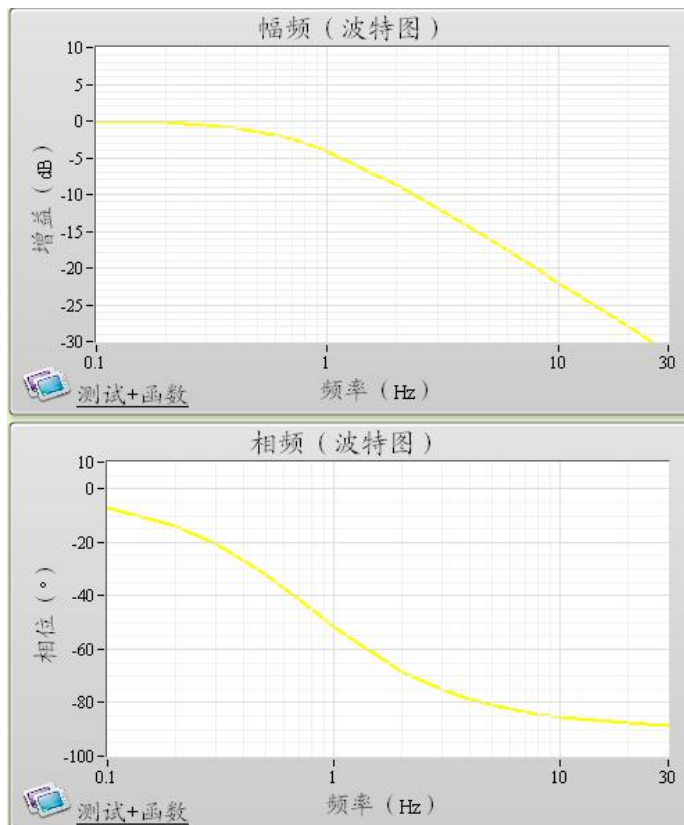
幅值可以按默认值设置；



点击函数功能，跳出函数的设置对话框，将一阶惯性环节的实际测试传递函数代入仿真函数系统中去，如下图所示：



同时点击软件界面上的测试+函数，软件界面显示的黄色波形就是一阶特性的仿真幅频和相频波形图，方便随后与真实测试的波形进行对比。

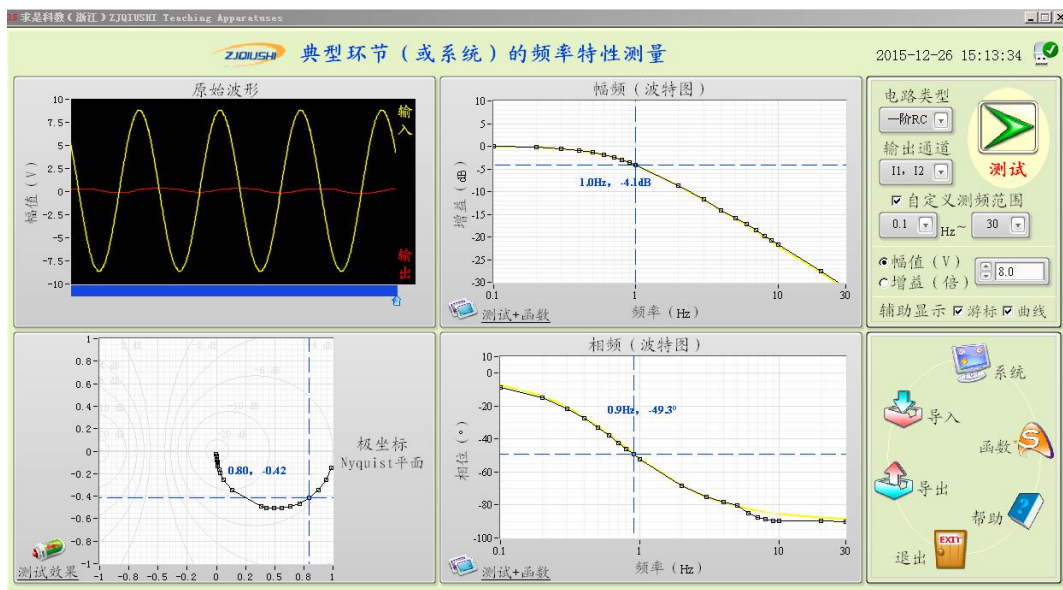


注明：采集系统检测的最低电压信号为 100mV 以上，输出信号低于 100mV 系统将自动停止运行。



(5) 点击 **测试** 按钮，期间请勿点击界面任何地方，最好是鼠标都不要晃动，请耐心等待实验的结束，开始时间比较长估计 30 秒，请耐心等待。

(6) 实验结束结果如下图所示，勾选辅助显示游标选项和曲线，则系统会产生游标的功能，同时显示当前实验各测试点的数据，并自动绘制曲线图，方便学生分析结果。



(7) 点击  导出 功能按钮，如下图所示，在导出图像文件选择前打勾，

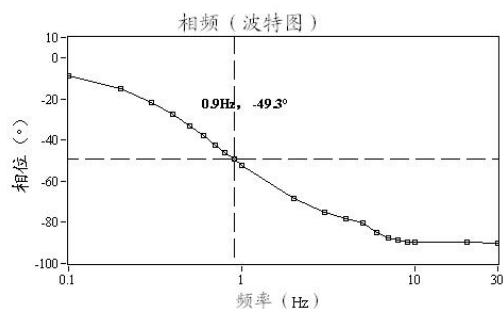
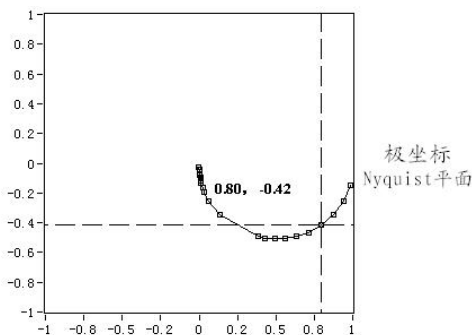
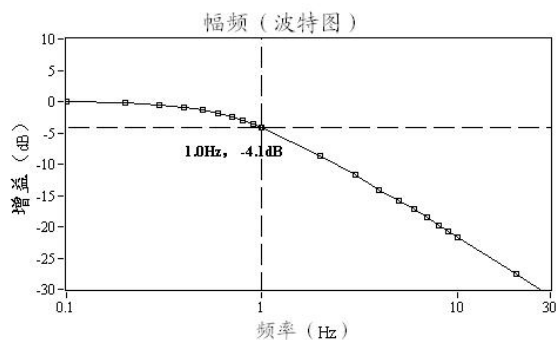
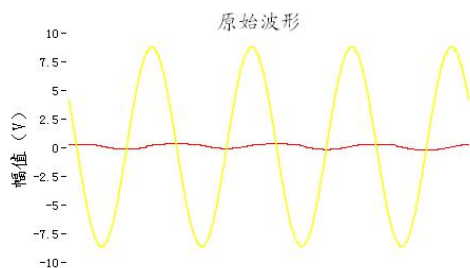


，同时点击  ，选择保存数据的文件路径，自己

在跳出的路径对话框里，新建一个 txt 格式的文档，命名为 1，然后点保存，那么初始路径会自动设定为 E:\数据\频率特性\测试数据\1.txt，这个时候再点确定，那么在 E 盘的目录下找到数据文件夹，里面将会出现如下图所示的相关文件：



4 张 bmp 格式的波形图片分别如下：



(8) 根据一阶系统传递函数，算出其转折频率 $\omega = 5$ ，则可通过 $2\pi f = \omega$ ，得出 $f = 0.796\text{Hz}$ 。

(9) 扩展实验：学生可以自行通过改变惯性环节开环增益：改变 U13 单元的输入电阻 R0；改变惯性环节时间常数：改变 U13 单元的电容 C1，重新观测结果，并将各波形的频率点等相关数据，填入实验报告。

3. 利用实验设备完成典型二阶系统开环传递函数特性测试。

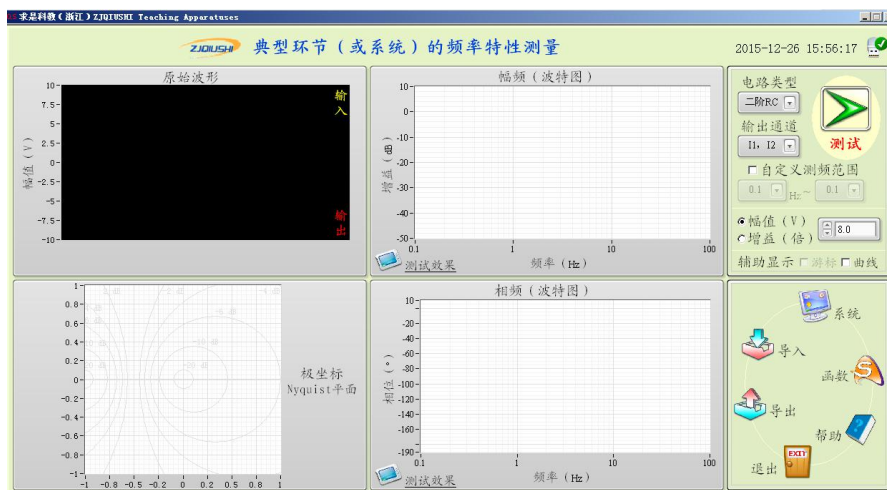
软件操作如一阶电路所描述，请勿更改。程序运行状态下对资源的要求很多，请勿做任何操作，包括鼠标的移动（否则会造成程序停止响应的结果）。

(2) 有上位机时，必须在熟悉上位机界面操作的基础上，充分利用上位机提供的

虚拟示波器与信号发生器功能。



(3) 双击打开桌面频率特性图标运行求是频率特性实验。实验界面如下图所示：



(4) 做二阶特性实验，点击右上角电路类型选择“二阶电路”，系统自动将各测量窗口量程设置为适合二阶电路的大小。

输入输出通道选择默认的 I1、I2。

自定义测频范围可以根据实验所能检测到的最大频率进行设置，一般二阶特性我们设置从 0.1Hz 到 20Hz。具体的实验操作方法可以参考一阶特性实验。

上述幅相频率特性也可表达为对数幅频特性和对数相频特性，图 3.5 和图 3.6 分别给出上述一阶惯性环节和二阶环节的对数幅频特性和对数相频特性：

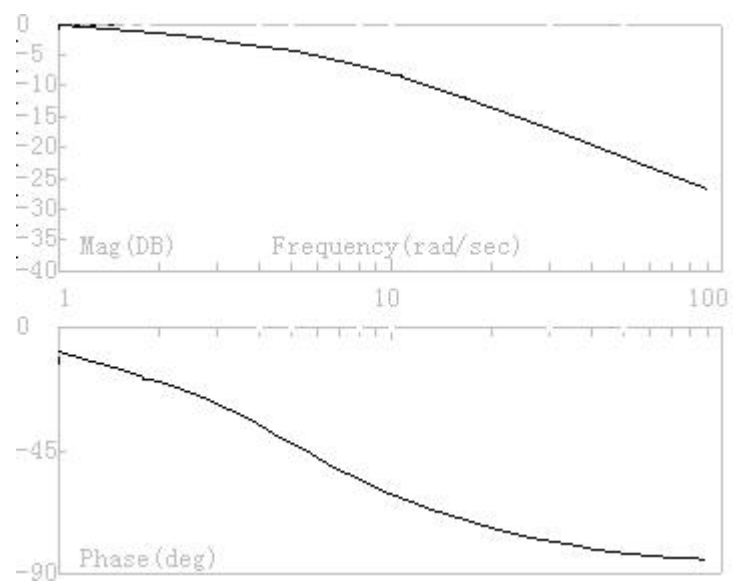


图 3.5

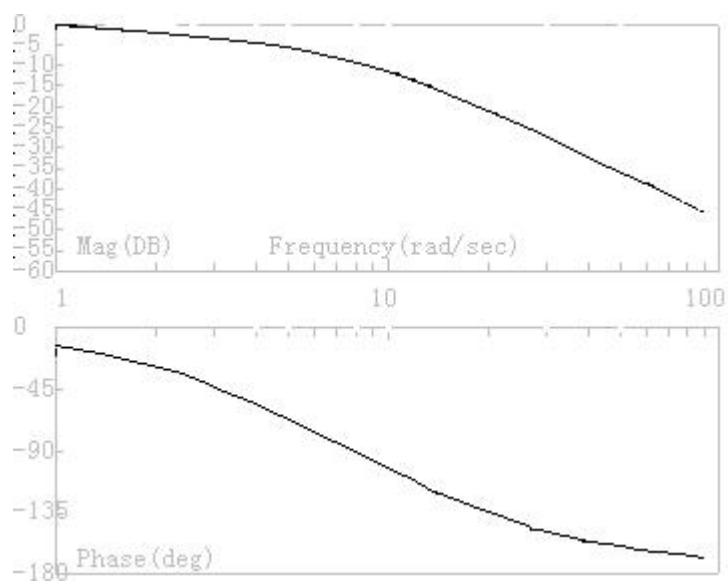


图 3.6

注意：此时横轴 ω 采用了以 10 为底的对数坐标，纵轴则分别以分贝和度为单位

实验四 线性系统串联校正

一. 实验目的

1. 熟悉串联校正装置对线性系统稳定性和动态特性的影响。
2. 掌握串联校正装置的设计方法和参数调试技术。

二. 实验内容

1. 观测未校正系统的稳定性和动态特性。
2. 按动态特性要求设计串联校正装置。
3. 观测加串联校正装置后系统的稳定性和动态特性，并观测校正装置参数改变对系统性能的影响。
4. 对线性系统串联校正进行计算机仿真研究，并对电路模拟与数字仿真结果进行比较研究。

三. 实验步骤

1. 利用实验设备，设计并连接一未加校正的二阶闭环系统的模拟电路，完成该系统的稳定性和动态特性观测。提示：

①设计并连接一未加校正的二阶闭环系统的模拟电路，可参阅本实验附录的图 4.1.1 和图 4.1.2，利用实验装置上的 U9、U13、U15 和 U8 单元连成。

②通过对该系统阶跃响应的观察，来完成对其稳定性和动态特性的研究，如何利用实验设备观测阶跃特性的具体操作方法，可参阅实验一的实验步骤 2。

2. 参阅本实验的附录，按校正目标要求设计串联校正装置传递函数和模拟电路。

3. 利用实验设备，设计并连接一加串联校正后的二阶闭环系统的模拟电路，完成该系统的稳定性和动态特性观测。提示：

①设计并连接一加串联校正后的二阶闭环系统的模拟电路，可参阅本实验附录的图 4.4.4，利用实验装置上的 U9、U13、U11、U15 和 U8 单元连成。

②通过对该系统阶跃响应的观察，来完成对其稳定性和动态特性的研究，如何利用实验设备观测阶跃特性的具体操作方法，可参阅“实验一”的实验步骤 2。

4. 改变串联校正装置的参数，对加校正后的二阶闭环系统进行调试，使其性能指标满足预定要求。提示：

5. 分析实验结果，完成实验报告。

四. 附录

1. 方块图和模拟电路

实验用未加校正二阶闭环系统的方块图和模拟电路，分别如图 4.1.1 和图 4.1.2 所示：

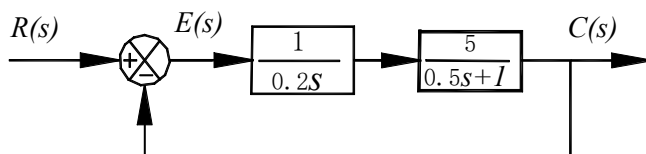


图4.1.1

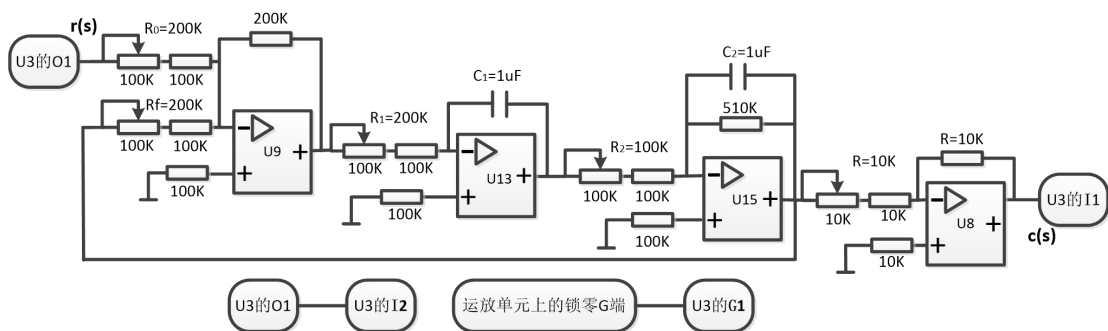


图4.1.2

取二阶系统的模拟电路如图 4.1.2 所示，实验参数取 $R_0=R_f=200k$ ， $R_1=200k$ ， $R_2=100k$ ， $C_1=1\mu F$ ， $C_2=1\mu F$ ， $R=15k$ 。

在进行实验连线之前，先将 U9 单元两个输入端的 100K 可调电阻均顺时针旋转到底（即调至最大），使电阻 R_0 、 R_f 均为 200K；

将 U13 单元输入端的 100K 可调电阻顺时针旋转到底（即调至最大），使输入电阻 R_1 的总阻值为 200K； C_1 在 U13 单元模块上。

将 U15 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R_2 的总阻值为 100K； C_2 位于 U15 单元上。

U8 单元为反相器单元，将 U8 单元输入端的 10K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R 的总值为 10K；

注明：所有运放单元的正端所接的 100K、10K 电阻均已经内部接好，实验时不需外接。

其开环传递函数为：
$$G(s) = \frac{5}{0.2s(0.5s+1)} = \frac{25}{s(0.5s+1)}$$

其闭环传递函数为：

$$W(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{50}{s^2 + 2s + 50} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

式中 $\omega_n = \sqrt{50} = 7.07$, $\xi = 1/\omega_n = 0.141$,

故未加校正时系统超调量为

$$M_p = e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}} = 0.63 = 63\% ,$$

调节时间为
$$t_s = \frac{4}{\xi\omega_n} = 4 \text{ s} ,$$

静态速度误差系数 K_v 等于该 I 型系统的开环增益 $K_v = 25 \text{ 1/s}$,

打开 labview 的时域特性程序后，软件界面的参数设置如下：

测试信号 1：阶跃

幅值 1：5V（偏移 0）

频率/周期：5s（占空比 90%）, 运行程序，直接进行实验。

2. 串联校正的目标

要求加串联校正装置后系统满足以下性能指标：

- （1）超调量 $M_p \leq 25\%$
- （2）调节时间（过渡过程时间） $t_s \leq 1 \text{ s}$
- （3）校正后系统开环增益（静态速度误差系数） $K_v \geq 25 \text{ 1/s}$

3. 串联校正装置的时域设计

从对超调量要求可以得到 $M_p = e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}} \leq 25\%$, 于是有 $\xi > 0.4$ 。

由 $t_s = \frac{4}{\xi\omega_n} \leq 1 \text{ s}$ 可以得到 $\omega_n \geq \frac{4}{\xi}$ 。

因为要求 $K_v \geq 25 \text{ 1/s}$ ，故令校正后开环传递函数仍包含一个积分环节，且放大系数为 25。

设串联校正装置的传递函数为 $D(s)$ ，则加串联校正后系统的开环传递函数为

$$D(s)G(s) = D(s) \frac{25}{s(0.5s+1)}$$

采用相消法，令 $D(s) = \frac{0.5s+1}{Ts+1}$ （其中 T 为待确定参数），可以得到加串联校正后的开环传递函数

$$D(s)G(s) = \frac{0.5s+1}{Ts+1} \cdot \frac{25}{s(0.5s+1)} = \frac{25}{s(Ts+1)}$$

这样，加校正后系统的闭环传递函数为

$$W(s) = \frac{D(s)G(s)}{1+D(s)G(s)} = \frac{25/T}{s^2 + \frac{1}{T}s + \frac{25}{T}}$$

对校正后二阶系统进行分析，可以得到

$$\omega_n^2 = 25/T$$

$$2\xi\omega_n = 1/T$$

综合考虑校正后的要求，取 $T=0.05 \text{ s}$ ，此时 $\omega_n = 22.36 \text{ 1/s}$ ， $\xi = 0.45$ ，它们都能满足校正目标要求。最后得到校正环节的传递函数为

$$D(s) = \frac{0.5s+1}{0.05s+1}$$

从串联校正装置的传递函数可以设计其模拟电路。有关电路设计与校正效果请参见后面的频域设计。

4. 串联校正装置的频域设计

根据对校正后系统的要求，可以得到期望的系统开环传递函数的对数频率特性，见图 4.4.1。

根据未加校正系统的开环传递函数，可画出其相应的对数频率特性，如图 4.4.2 所示。

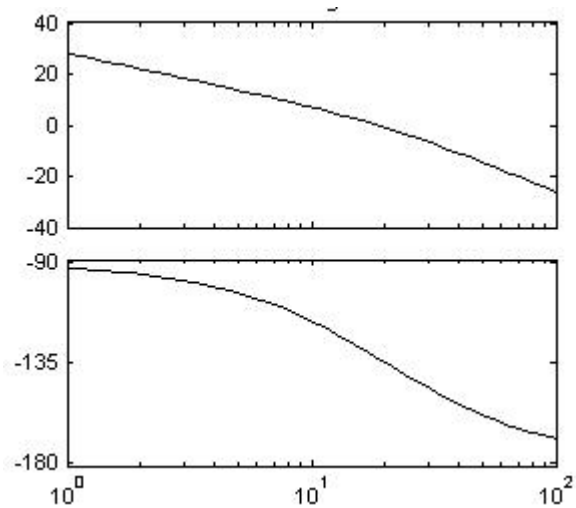


图 4.4.1

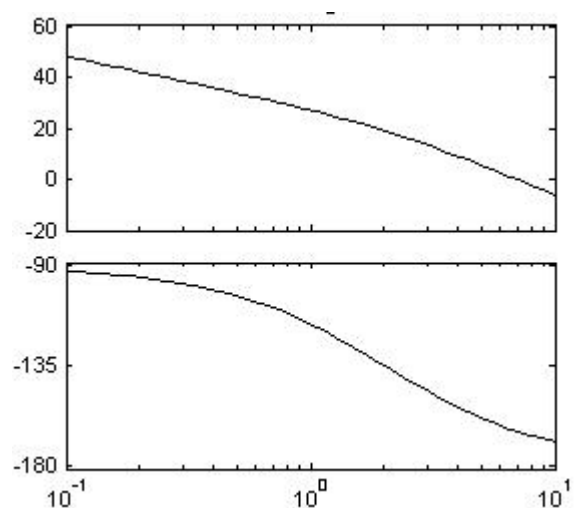


图 4.4.2

从期望的系统开环传递函数的对数幅频特性, 减去未加校正系统开环传递函数的对数幅频特性, 可以得到串联校正装置的对数幅频特性, 见图 4.4.3。

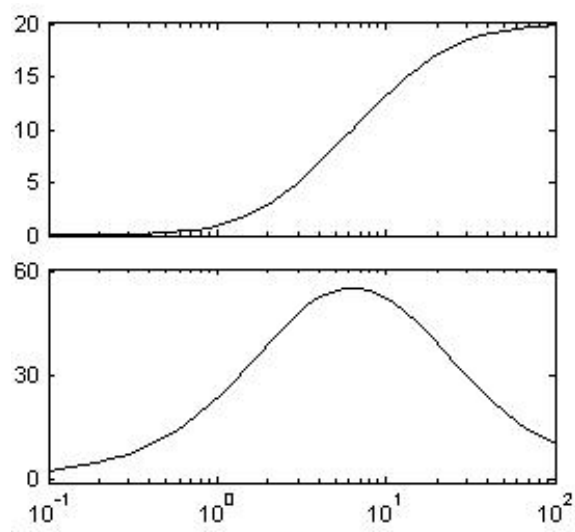


图 4.4.3

从串联校正装置的对数幅频特性, 可以得到它的传递函数:

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

从串联校正装置的传递函数可以设计其模拟电路。图 4.4.4 给出已加入串联校正装置的系统模拟电路。

从串联校正装置的传递函数可以设计其模拟电路, 串联校正装置电路的参数可取 $R_1=390K$, $R_2=R_3=200K$, $R_4=10K$, $C=4.7\mu F$ 。

图 4.4.4 给出已加入串联校正装置的系统模拟电路, 做时域特性分析时, 锁零 G 接 U3 单元的 G1, O1 接 U3 单元的 I2, 输出接 U3 单元的 I1, 如下图所示:

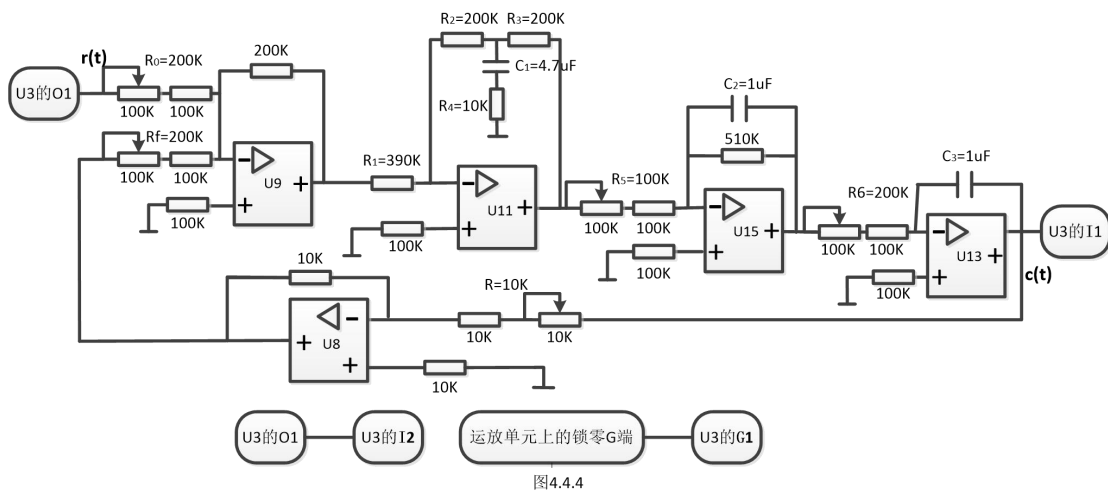


图4.4.4

校正前后系统的阶跃响应曲线如图 4.4.5、4.4.6 所示:

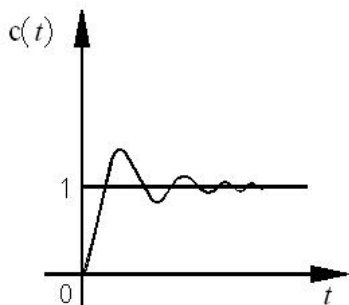


图4.4.5

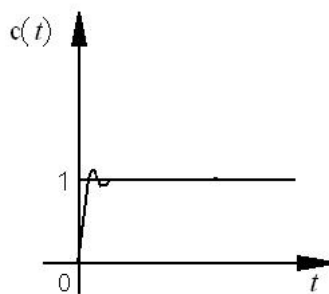


图4.4.6

在进行实验连线之前, 先将 U9 单元两个输入端的 100K 可调电阻均顺时针旋转到底 (即调至最大), 使电阻 R_0 、 R_f 均为 200K;

U11 的单元的 $R_1=390K$, 采用元件库 U4 单元上的 100K 和 91K 两个分立电阻相串联, 然后与 U11 单元自带的输入 200K 电阻相连, 其中需将 U11 单元输入端的 100K 可调电阻顺时针旋转到底 (即调至最大); R_2 采用元件库 U4 单元上的 51k 电阻和 150k 电阻相串联, R_3 采用元件库 U4 单元上的 200K 电阻, C_1 采用元件库 U4 单元上的 4.7uF 电容,

R4 采用元件库 U4 单元上的 10K 电阻。

将 U13 单元输入端的 100K 可调电阻顺时针旋转到底（即调至最大），使输入电阻 R6 的总阻值为 200K;C3 在 U13 单元模块上。

将 U15 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R5 的总阻值为 100K;C2 位于 U15 单元上。

U8 单元为反相器单元，将 U8 单元输入端的 10K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R 的总值为 10K;

注明：所有运放单元的+端所接的 100K、10K 电阻均已经内部接好，实验时不需外接。

打开 labview 的时域特性程序后，软件界面的参数设置如下：

测试信号 1：阶跃

幅值 1：5V（偏移 0）

频率/周期：5s（占空比 90%），运行程序，直接进行实验。

实验五 典型非线性环节的静态特性

一. 实验目的

1. 了解并掌握典型非线性环节的静态特性。
2. 了解并掌握典型非线性环节的电路模拟研究方法。

二. 实验内容

1. 完成继电型非线性环节静特性的电路模拟研究。
2. 完成饱和型非线性环节静特性的电路模拟研究。
3. 完成具有死区特性的非线性环节静特性的电路模拟研究。
4. 完成具有间隙特性的非线性环节静特性的电路模拟研究。

三. 实验步骤

1. 利用实验设备, 设计并连接继电型非线性环节的模拟电路, 完成该环节的静态特性测试; 并改变参数, 观测参数对静态特性的影响。

参阅本实验附录 1, 从图 5.1.1 和图 5.1.2 可知, 利用实验装置上的单元 U6 即可获得实验所需继电型非线性环节的模拟电路。单元电路中双向稳压管的稳压值为 5.1V, 改变 U6 中的电位器的电阻接入值, 即可改变继电特性参数 M , M 随阻值减小而减小。

可利用周期斜坡或正弦信号测试非线性环节的静态特性, 下面说明测试方法。

将 U_i 连到实验装置 U3 单元的 O1 (D/A 通道的输出端) 和 I1 (A/D 通道的输入端), 将 U_o 连到实验装置 U3 单元的 I2 (A/D 通道的输入端), 并连好 U3 单元至上位机的 USB2.0 通信线。接线完成, 经检查无误, 再给实验装置上电后, 启动上位机程序, 进入主界面。界面上的操作步骤如下:

①按通道接线情况: 选择任一路 A/D 输入作为环节的输出, 选择任一路 D/A 作为环节的输入。不同的通道, 图形显示控件中波形的颜色将不同; 将另一输出通道直接送倒输入通道 (显示示波器信号源发出的输入波形)。

②硬件接线完毕后, 检查 USB 口通讯连线 and 实验装置电源后, 运行上位机软件程序, 如果有问题请求指导教师帮助。

③进入 LabVIEW 实验界面后, 先对显示进行设置: 选择显示模式 (在 LabVIEW 图形控件的右边), 可先选择 “X-t 模式”, 或选择 “X-Y 模式”。在两种不同显示方式下都

观察一下非线性的特性；选择“T/DIV 量程”（在实验界面的右边框里）为 1HZ/1S。在选择显示模式为“X-t 模式”时。

④进行实验设置，先选择“测试信号”为正弦波，然后设置信号的幅值 5（不是唯一的，可根据实验曲线调整大小），“测试信号”也可以为周期斜坡信号，显示模式可以同时用两种显示模式显示非线性静特性，也可以按照需要选择任一种显示模式，如“X-T 模式”或者是“X-Y 模式”。

对“正弦波”：选择“幅值”为“5V”，选择“偏移”为 0V，选择“T/DIV”为“1HZ/1S”。

对“周期斜坡信号”：选择“幅值”为“10V”，选择“偏移”为-5V，选择“T/DIV”为“1HZ/1S”。

⑤以上设置完成后，按照上面的步骤④设置好信号后，点击“下载数据”按钮，将设置的测试信号发送到数据采集系统。按“开始”按钮启动实验，动态波形得到显示，直至周期反应过程结束，实验也自动结束，如设置合理就可以在主界面中间得到反映该非线性环节静态特性的波形。注意，采用不同测试信号看到的波形或曲线是不同的。

⑥改变环节参数，按“开始”启动实验，动态波形得到显示，直至周期反应过程结束，实验也自动结束，如设置合理就可以在主界面中间得到反映参数改变对该非线性环节静态特性影响的波形。

⑦按实验报告需要，将图形结果保存为位图文件，操作方法参阅软件使用说明书。

2. 利用实验设备，设计并连接饱和型非线性环节的模拟电路，完成该环节的静态特性测试；并改变参数，观测参数对静态特性的影响。

参阅本实验附录 2，从图 5.2.1 和图 5.2.2 可知，利用实验装置上的单元 U7 即可获得实验所需饱和型非线性环节的模拟电路。单元电路中双向稳压管的稳压值为 2.4V，改变 U7 中的电位器的电阻接入值，即可改变饱和特性参数 K 与 M，K 与 M 随阻值减小而减小。

可利用周期斜坡或正弦信号测试非线性环节的静态特性，具体操作方法请参阅本实验步骤 1，这里不再赘述。

3. 利用实验设备，设计并连接具有死区特性的非线性环节的模拟电路，完成该环节的静态特性测试；并改变参数，观测参数对静态特性的影响。

参阅本实验附录 3，从图 5.3.1 和图 5.3.2 可知，利用实验装置上的单元 U5，将该单元中的拨键 S4 拨向上方即可获得实验所需具有死区特性的非线性环节的模拟电路。改变 U5 中的电阻 Rf 的阻值，即可改变死区特性线性部分斜率 K，K 随 Rf 增大而增大。改变 U5 中的电阻 R1（=R2）的阻值，即可改变死区特性死区的宽度 Δ ， Δ 随 R1 增大而增大。

可利用周期斜坡或正弦信号测试非线性环节的静态特性，具体操作方法请参阅本实验步骤 1，这里不再赘述。

4. 利用实验设备，设计并连接具有间隙特性的非线性环节的模拟电路，完成该环节的静态特性测试；并改变参数，观测参数对静态特性的影响。

参阅本实验附录 4，从图 5.4.1 和图 5.4.2 可知，利用实验装置上的单元 U5，将该单元中的拨键 S4 拨向下方即可获得实验所需具有间隙特性的非线性环节的模拟电路。改变 U5 中的电容 C_f 的阻值，即可改变间隙特性线性部分斜率 K ， K 随 C_f 增大而减小。改变 U5 中的电阻 R_1 ($=R_2$) 的阻值，即可改变死区特性死区的宽度 Δ ， Δ 随 R_1 增大而增大。

可利用周期斜坡或正弦信号测试非线性环节的静态特性，具体操作方法请参阅本实验步骤 1，这里不再赘述。

请注意，单元 U5 不含运放锁零电路，为避免电容上电荷累积影响实验结果，在每次实验启动前，务必对电容进行短接放电。

5. 分析实验结果，完成实验报告。

四. 附录

1. 具有继电特性的非线性环节

具有继电特性非线性环节的静态特性，即理想继电特性如图 5.1.1 所示。该环节的模拟电路如图 5.1.2 所示。

(1) 采用实验面板上的 U6 单元，其中输入信号 U_i 与 U3 单元的 O1 相连，U0 与 U3 单元的 I1 采集通道相连，O1 与 U3 单元的 I2 采集通道相连。

(2) 打开时域特性 Vi 程序，选择在 X-t 显示模式下观测，测试波形类型为正弦波或周期斜坡

(3) 根据不同的测试波形参数设置如下：

- 类型：正弦波；幅值：5V；频率：1s。
- 类型：周期斜坡；幅值：10V；零位偏移：-5V；频率：1s。

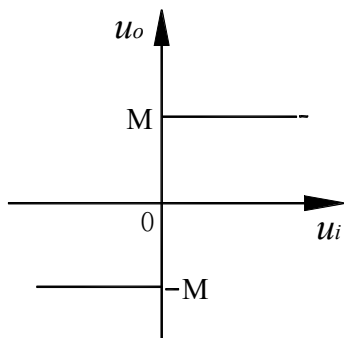


图5.1.1

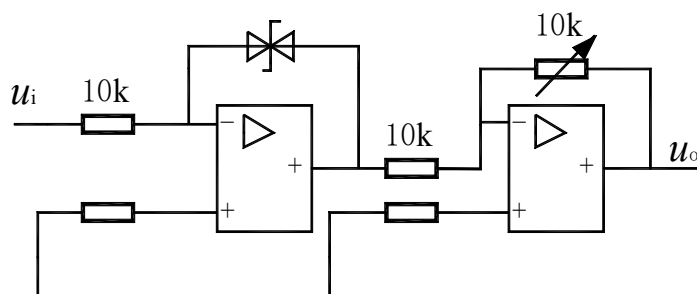


图5.1.2

继电特性参数 M ，由双向稳压管的稳压值与后一级运放放大倍数之积决定。故改变图 5.1.2 中电位器接入电阻的数值即可改变 M 。当阻值减小时， M 也随之减小。

2. 具有饱和特性的非线性环节

具有饱和特性非线性环节的静态特性，即理想饱和特性如图 5.2.1 所示：

该环节的模拟电路如图 5.2.2 所示：

特性饱和部分的饱和值 M 等于稳压管的稳压值与后一级放大倍数的积，特性线性部分的斜率 K 等于两级运放放大倍数之积。故改变图 5.2.2 中的电位器接入电阻值时将同时改变 M 和 K ，它们随阻值增大而增大。

(1) 采用实验面板上的 U7 单元，其中输入信号 U_i 与 U3 单元的 O1 相连， U_0 与 U3 单元的 I1 采集通道相连，O1 与 U3 单元的 I2 采集通道相连。

(2) 打开时域特性 Vi 程序，选择在 X-t 显示模式下观测，测试波形类型为正弦波或周期斜坡

(3) 根据不同的测试波形参数设置如下：

- 类型：正弦波；幅值：5V；频率：1s。
- 类型：周期斜坡；幅值：10V；零位偏移：-5V；频率：1s。

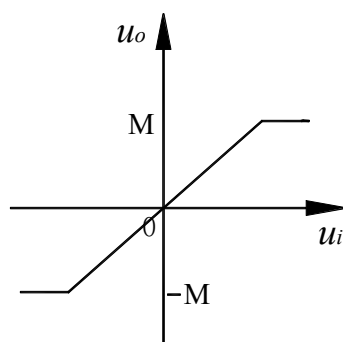


图5.2.1

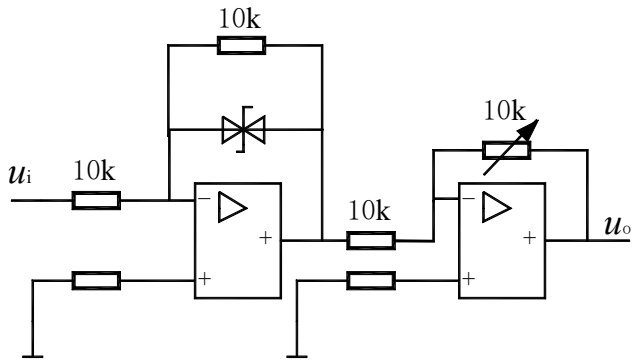


图5.2.2

3. 具有死区特性的非线性环节

具有死区特性非线性环节的静态特性，即理想死区特性如图 5.3.1 所示：

该环节的模拟电路如图 5.3.2 所示：

(1) 采用实验面板上的 U5 单元，其中输入信号 U_i 与 U3 单元的 O1 相连， U_0 与 U3 单元的 I1 采集通道相连，O1 与 U3 单元的 I2 采集通道相连。硬件电路中将开关 S4 拨向上，完成死区特性的实验。

(2) 打开时域特性 Vi 程序，选择在 X-Y 显示模式下观测，测试波形类型为正弦波或周期斜坡

(3) 根据不同的测试波形参数设置如下：

- 类型：正弦波；幅值：5V；频率：1s。
- 类型：周期斜坡；幅值：10V；零位偏移：-5V；频率：1s。

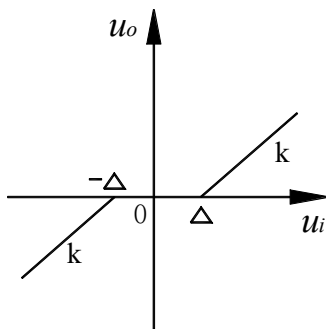


图5.3.1

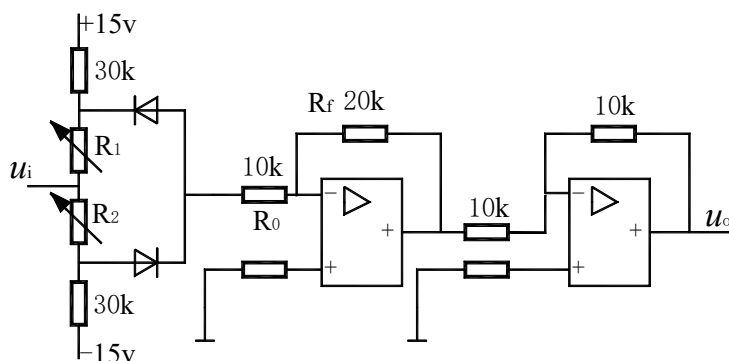


图5.3.2

斜率 K 为: $k = R_f / R_0$

死区 $\Delta = \frac{R_2}{30} \times 15(\text{V}) = 0.5R_2(\text{V})$, 式中 R_2 的单位为 $k\Omega$, 且实验时选取 $R_2 = R_1 = 5.1\text{k}$

(实际死区还要考虑二极管的压降值)。

实验时, 可以用周期斜坡或正弦信号作为测试信号进行静态特性观测。注意信号频率的选择应足够低, 如 1Hz。选用周期斜坡信号作为测试信号时, 可在 X-Y 显示模式下观测; 选用正弦信号作为测试信号时, 可在 X-t 显示模式下观测。

4. 具有间隙特性的非线性环节

具有间隙特性非线性环节的静态特性, 即理想间隙特性如图 5.4.1 所示:

该环节的模拟电路如图 5.4.2 所示:

(1) 采用实验面板上的 U5 单元, 其中输入信号 U_i 与 U3 单元的 O1 相连, U0 与 U3 单元的 I1 采集通道相连, O1 与 U3 单元的 I2 采集通道相连。硬件电路中将开关 S4 拨向下, 完成间隙特性的实验。

(2) 打开时域特性 Vi 程序, 选择在 X-t 显示模式下观测, 测试波形类型为正弦波或周期斜坡

(3) 根据不同的测试波形参数设置如下:

●类型: 正弦波; 幅值: 5V; 频率: 1Hz。

●类型: 周期斜坡; 幅值: 10V; 零位偏移: -5V; 频率: 1Hz。

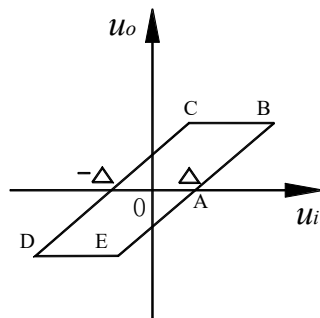


图5. 4. 1

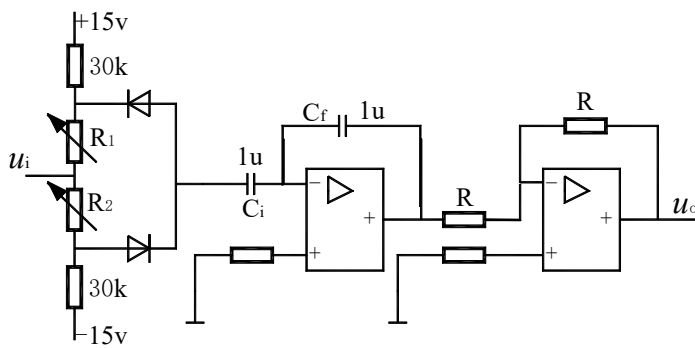


图5. 4. 2

图中间隙特性的宽度 $\Delta = \frac{R_2}{30} \times 15(v) = 0.5R_2(v)$ ，（实际死区还要考虑二极管的压降值），特性斜率 $tg\alpha = \frac{C_i}{C_f}$ ，因此改变 R_1 与 R_2 可改变间隙特性的宽度，改变 $\frac{C_i}{C_f}$ 可以调节特性斜率。实验时，可以用正弦信号作为测试信号进行静态特性观测，且实验时选取 $R_2=R_1=5.1K$ 。

注意由于元件（二极管、电阻等）参数数值的分散性，造成电路不对称，因而引起电容上电荷累积，影响实验结果，故每次实验启动前，需对电容进行短接放电。

实验六 非线性系统相平面法

一. 实验目的

1. 学习用相平面法分析非线性系统。
2. 熟悉研究非线性系统的电路模拟研究方法。

二. 实验内容

1. 用相平面法分析继电型非线性系统的阶跃响应和稳态误差。
2. 用相平面法分析带速度负反馈的继电型非线性系统的阶跃响应和稳态误差。
3. 用相平面法分析饱和型非线性系统的阶跃响应和稳态误差。

三. 实验步骤

1. 利用实验设备, 设计并连接一未加校正的继电型非线性闭环系统的模拟电路, 利用阶跃输入作测试信号, 观测和记录系统在 $(e, \dot{e})$ 相平面上的相轨迹, 利用该相轨迹分析系统的阶跃响应和稳态误差, 并与测得的系统偏差的阶跃响应作比较。

参阅本实验附录 1, 从图 6.1.1 和图 6.1.2 可知, 利用实验装置上的单元 U9、U6、U13、U15 和 U8 可连成实验所需未加校正的继电型非线性闭环系统的模拟电路。可利用周期阶跃信号测试该非线性系统的相轨迹和阶跃响应, 下面说明测试方法。

将系统输入端 $r(t)$ 连到实验装置 U3 单元的 01 (D/A 通道的输出端), 将运放的锁零 G 连到实验装置 U3 单元的 G1 (与 01 同步), 将 X1 (即 $-e$) 连到实验装置 U3 单元的 I1 (A/D 通道的输入端), 将 X2 (即 $-\dot{e}$) 连到实验装置 U3 单元的 I2 (A/D 通道的输入端), 并连好 U3 单元至上位机的 USB2.0 通信线。接线完成, 经检查无误, 再给实验装置上电后, 启动上位机程序, 进入主界面。界面上的操作步骤如下:

①按通道接线情况: 选择第 1 路 A/D 输入 I1 作为环节中的采样信号 X 的输入端, 选择第 2 路 A/D 输入 I2 作为环节中的采样信号 Y 的输入端, 选择第 1 路 D/A 输出 01 作为环节的输入端。不同的通道, 图形显示控件中波形的颜色将不同。

②按上述说明硬件接线完成后, 检查 USB 口通讯连线是否接好和实验装置电源后运行上位机程序, 如有问题则请求指导教师帮助。

③进入实验界面后, 先对显示进行设置: 选择“X-Y 模式”和“X-t 模式”同时显

示, X-t 模式主要为了观测系统误差 $e(t)$ 的阶跃响应。选择“T/DIV”为 0.1HZ/10s; 并在界面右方对采样通道 X(AD1) 选择“-1”(即反相), 对采样通道 Y(AD2) 也选择“-1”(即反相)。

④进入实验设置: 首先对实验参数进行设置, 选择“测试信号”为“周期阶跃信号”, 选择“占空比”为 50%, 选择“T/DIV”为“0.4HZ/2.5S”, 选择“幅值”为“6V”(根据实验曲线调整大小), 设置“偏移”为“0”。以上除必须选择“周期阶跃信号”外, 其余的选择都不是唯一的。要特别注意, 除单个比例环节外, 对其它环节或系统都必须考虑环节和系统的时间常数, 如仍选择“输入波形占空比”为 50%, 那么“输入波形周期”至少是环节或系统的最大时间常数的 6~8 倍。

⑤所有必要的设置完成后, 按照上面的步骤④设置好信号后, 点击“下载数据”按钮, 将设置的测试信号发送到数据采集系统。按界面右下角的“Start”启动实验, 相平面上的相轨迹得到显示, 直至周期过程反应结束, 实验也自动结束, 如设置合理就可以在主界面中间得到系统 $(e, \dot{e})$ 的相轨迹。

⑥按实验报告需要, 将图形结果保存为位图文件, 操作方法参阅软件使用说明书。

2. 利用实验设备, 设计并连接一带速度负反馈的继电型非线性闭环系统的模拟电路, 利用阶跃输入作测试信号, 观测和记录系统在 $(e, \dot{e})$ 相平面上的相轨迹, 利用该相轨迹分析系统的阶跃响应和稳态误差, 并与测得的系统偏差的阶跃响应作比较。再将此实验结果与未加校正的继电型非线性闭环系统的相比较。

参阅本实验附录 2, 从图 6.2.1 和图 6.2.2 可知, 利用实验装置上的单元 U9、U12、U6、U13、U16、U15 和 U8 可连成实验所需带速度负反馈的继电型非线性闭环系统的模拟电路。可利用周期阶跃信号测试该非线性系统 $(e, \dot{e})$ 的相轨迹和阶跃响应, 具体测试方法请参阅本实验步骤 1, 这里不再赘述。

3. 利用实验设备, 设计并连接一饱和型非线性闭环系统的模拟电路, 利用阶跃输入作测试信号, 观测和记录系统在 $(e, \dot{e})$ 相平面上的相轨迹, 利用该相轨迹分析系统的阶跃响应和稳态误差, 并与测得的系统偏差的阶跃响应作比较。

参阅本实验附录 3, 从图 6.3.1 和图 6.3.2 可知, 利用实验装置上的单元 U9、U7、U13、U15 和 U8 可连成实验所需饱和型非线性闭环系统的模拟电路。可利用周期阶跃信号测试该非线性系统的 $(e, \dot{e})$ 相轨迹和阶跃响应, 具体测试方法请参阅本实验步骤 1, 这里不再赘述。

4. 分析实验结果, 完成实验报告。

四. 附录

1. 未加校正的继电型非线性闭环系统

未加校正的继电型非线性闭环系统的原理方块图如图 6.1.1 所示：

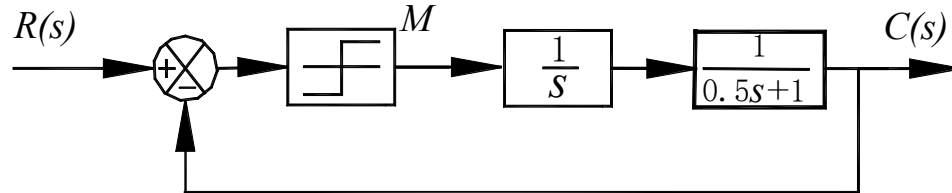


图6.1.1

其模拟电路图如图 6.1.2 所示：实验参数取 $R_0=R_f=200k$ ， $R_1=100k$ ， $R_2=510k$ ， $C_1=1\mu F$ ， $C_2=1\mu F$ ， $R_3=100K$ ， $R=10k$ 。

在进行实验连线之前，先将 U9 单元两个输入端的 100K 可调电阻均顺时针旋转到底（即调至最大），使电阻 R_0 、 R_f 均为 200K；

将 U13 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R_3 的总阻值为 100K； C_2 在 U13 单元模块上。

将 U15 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R_1 的总阻值为 100K； R_2 、 C_1 位于 U15 单元上。

U8 单元为反相器单元，将 U8 单元输入端的 10K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R 的总值为 10K；

注明：所有运放单元的+端所接的 100K 、10K 电阻均已经内部接好，实验时不需外接。

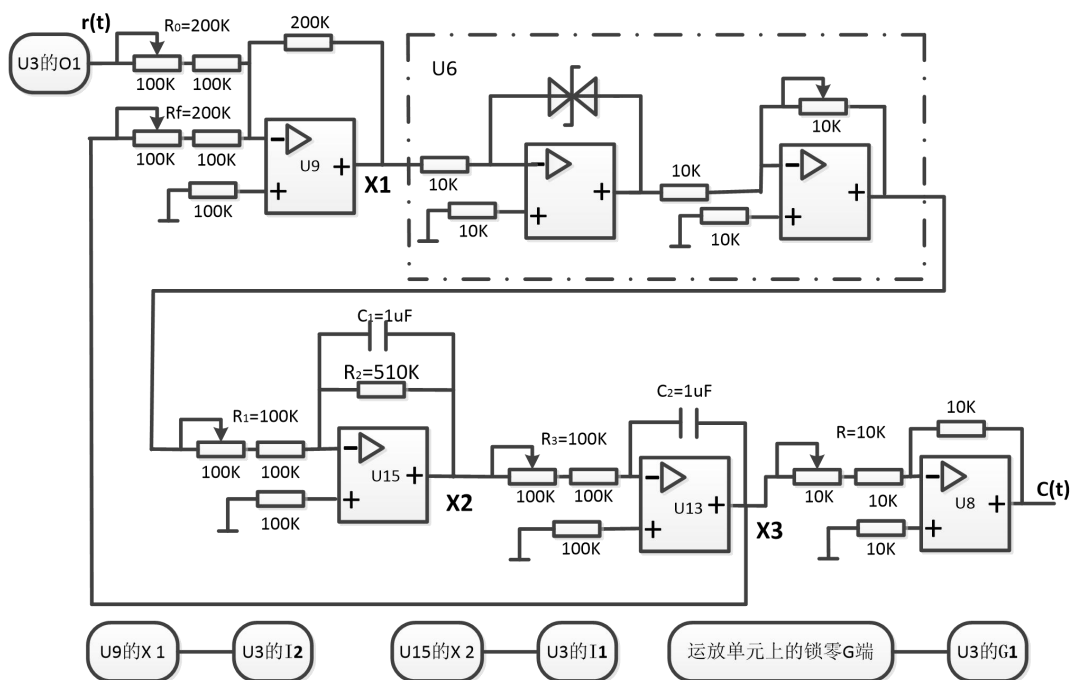


图6.1.2

图 6.1.1 所示系统可用以下方程描述：

$$\begin{aligned} T\ddot{e} + \dot{e} - KM &= 0 & e > 0 \\ T\ddot{e} + \dot{e} + KM &= 0 & e < 0 \end{aligned} \quad (6-1)$$

式中 T 为时间常数 ($T=0.5$), K 为线性部分开环增益, M 为继电器特性幅值, 采用

e

与 $\dot{e}$ 为相平面坐标, 以及考虑

$$e = r - c \quad (6-2)$$

$$r = R \cdot 1(t) \quad \dot{e} = -\dot{c} \quad (6-3)$$

则 (6-1) 变为

$$\begin{aligned} T\ddot{e} + \dot{e} + KM &= 0 & e > 0 \\ T\ddot{e} + \dot{e} - KM &= 0 & e < 0 \end{aligned} \quad (6-4)$$

该系统的相轨迹曲线如图 6.1.3 所示：

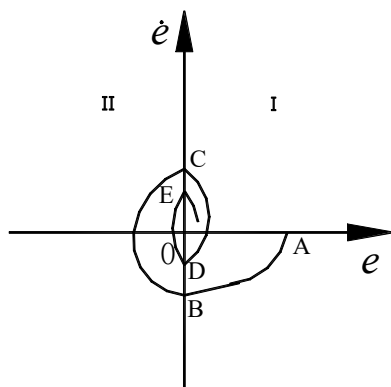


图6.1.3

观察 X1 即为 $-e$ ，X2 即为 $-\dot{e}$ ，取 X1-X2 坐标下，即为相轨迹 $(-e, -\dot{e})$ ，进行坐标倒相变换可得 $(e, \dot{e})$ 坐标。

打开 labview 的时域特性程序后，软件界面的参数设置如下：

测试信号 1：阶跃

幅值 1：6V（偏移 0）

频率/周期：2.5s（占空比 90%）

X2-I1-采样通道 1（取反相）

X1-I2-采样通道 2（取反相）

显示模式：X-Y(X-t)，运行程序，直接进行实验。

2. 带速度负反馈的继电型非线性闭环系统

带速度负反馈的继电型非线性闭环系统的原理方块图如图 6.2.1 所示：

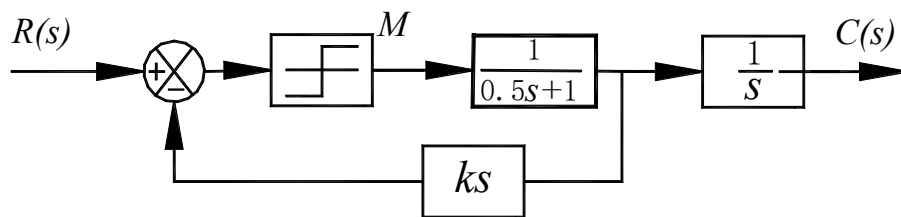


图6.2.1

其模拟电路图如图 6.2.2 所示：实验参数取 $R_0=R_{f1}=R_{f2}=200k$ ， $R_1=R_2=10k$ ， R_3

$=100k$, $C1=1\mu F$, $C2=1\mu F$, $R4=510K$, $R5=200K$, $R=10k$ 。

在进行实验连线之前,先将 U9 单元两个输入端的 100K 可调电阻均顺时针旋转到底 (即调至最大;

将 U12 单元输入端的 47K 可调电阻逆时针旋转到底 (即调至最小),使输入电阻 R1 的总阻值为 10K; R_{f2} 取元件库 U4 单元上的 200K 电阻

将 U16 单元输入端的 47K 可调电阻逆时针旋转到底 (即调至最小),使输入电阻 R2 的总阻值为 10K;

将 U13 单元输入端的 100K 可调电阻顺时针旋转到底 (即调至最大),使输入电阻 R5 的总阻值为 100K; $C2$ 在 U13 单元模块上。

将 U15 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底 (即调至最小),使输入电阻 R3 的总阻值为 100K; $R4$ 、 $C1$ 位于 U15 单元上。

U8 单元为反相器单元,将 U8 单元输入端的 10K 可调电阻逆时针旋转到底 (即调至最小),使输入电阻 R 的总阻值为 10K;

注明: 所有运放单元的+端所接的 100K、10K 电阻均已经内部接好,实验时不需外接。

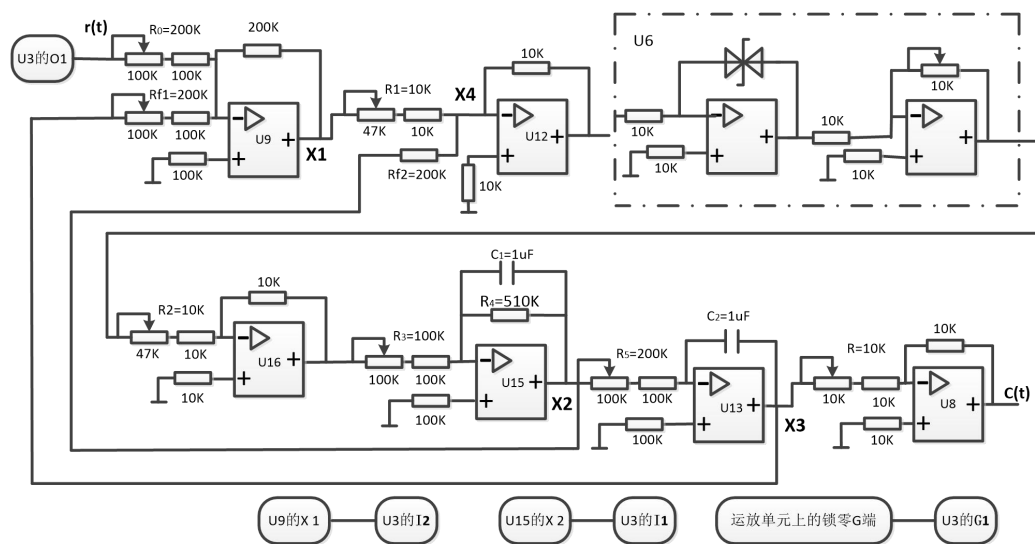


图6.2.2

设计此图时,为了满足负反馈的相位的要求,增加了一些倒相环节。观察图 6.2.2,可见 X1 即为 $-e$, X2 即为 $-\dot{e}$ 。取 $-X1$ 和 $-X2$ 为 X-Y 坐标,以阶跃输入为测试信号,即可获得系统在 $(e, \dot{e})$ 相平面上的相轨迹。该系统在 $(e, \dot{e})$ 相平面上的相轨迹曲线如图 6.2.3 所示:

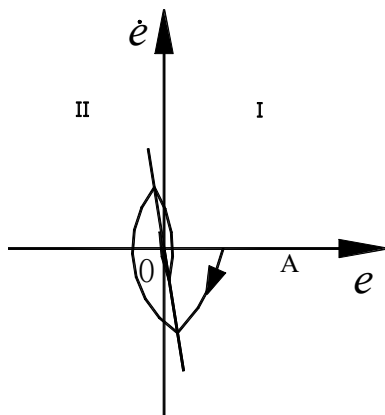


图6. 2. 3

图中分界线方程为：

$$e - k_s \dot{e} = 0 \quad (6-5)$$

式中 k_s 为反馈系数，（图 6. 2. 1 中 $k_s = 0.1$ ），增加反馈电阻现象更明显。

打开 labview 的时域特性程序后，软件界面的参数设置如下：

测试信号 1：阶跃

幅值 1：6V（偏移 0）

频率/周期：2.5s（占空比 90%）

X2-I1-采样通道 1（取反相）

X1-I2-采样通道 2（取反相）

显示模式：X-Y(X-t)，运行程序，直接进行实验。

3. 饱和型非线性闭环系统

饱和型非线性闭环系统的原理方块图如图 6. 3. 1 所示：

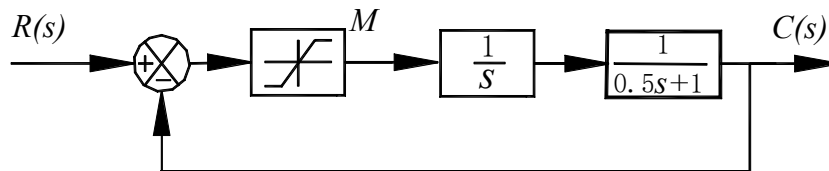


图6. 3. 1

其模拟电路图如图 6. 3. 2 所示：实验参数取 $R_0 = R_f = 200k$ ， $R_1 = 100k$ ， $R_2 = 510k$ ， $C_1 = 1\mu F$ ， $C_2 = 1\mu F$ ， $R_3 = 100K$ ， $R = 10k$ 。

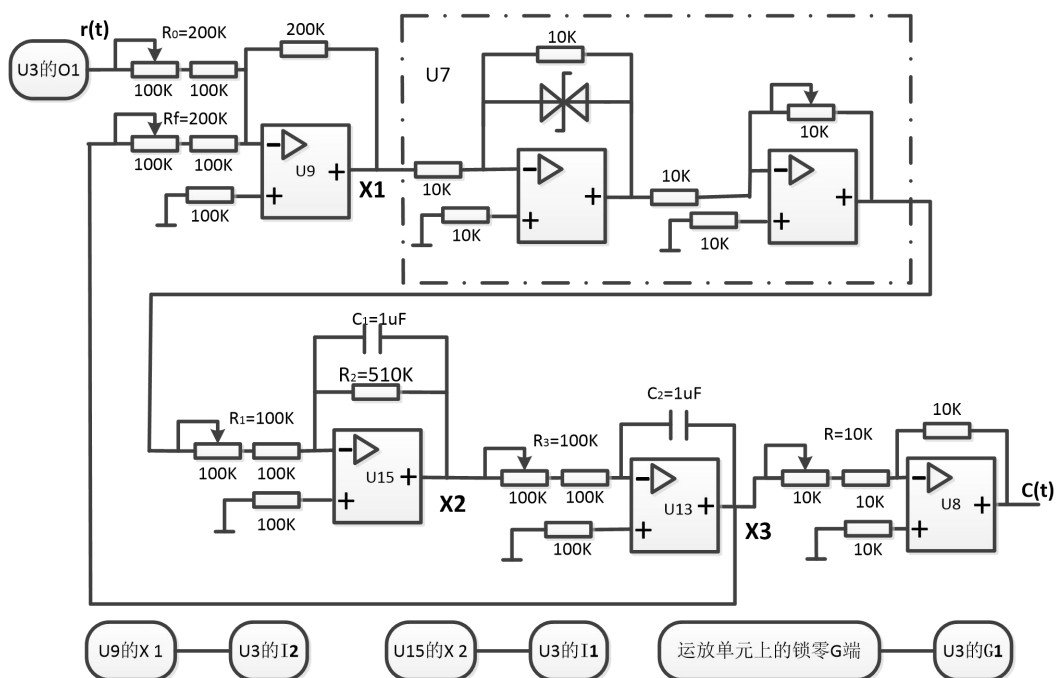


图6.3.2

在进行实验连线之前,先将 U9 单元两个输入端的 100K 可调电阻均顺时针旋转到底 (即调至最大),使电阻 R_0 、 R_f 均为 200K;

将 U13 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底 (即调至最小),使输入电阻 R_3 的总阻值为 100K; C_2 在 U13 单元模块上。

将 U15 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底 (即调至最小),使输入电阻 R_1 的总阻值为 100K; R_2 、 C_1 位于 U15 单元上。

U8 单元为反相器单元,将 U8 单元输入端的 10K 可调电阻逆时针旋转到底 (即调至最小),使输入电阻 R 的总值为 10K;

注明: 所有运放单元的+端所接的 100K、10K 电阻均已经内部接好,实验时不需外接。

图 6.3.1 所示系统可用以下方程描述:

$$\begin{aligned} T\ddot{e} + \dot{e} + e &= 0 & |e| < M \\ T\ddot{e} + \dot{e} + M &= 0 & e > M \\ T\ddot{e} + \dot{e} - M &= 0 & e < -M \end{aligned} \quad (6-6)$$

同理观察相轨迹与时域响应曲线,该系统的相轨迹曲线如图 6.3.3 所示:

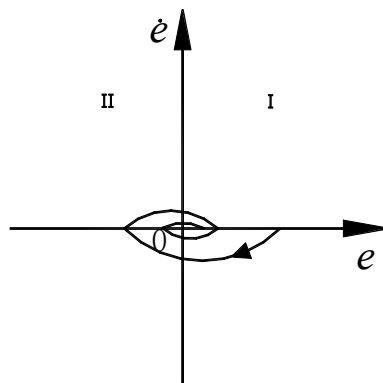


图6.3.3

打开 labview 的时域特性程序后，软件界面的参数设置如下：

测试信号 1：阶跃

幅值 1：6V（偏移 0）

频率/周期：2.5s（占空比 90%）

X2-I1-采样通道 1（取反相）

X1-I2-采样通道 2（取反相）

显示模式：X-Y(X-t)，运行程序，直接进行实验。

自控实物对象实验

实验一 直流电机转速控制实验

一. 实验目的:

1. 在自动控制理论实验基础上, 控制实际的模拟对象, 加深对理论的理解;
2. 掌握闭环控制系统的参数调节对系统动态性能的影响。

二. 实验设备:

1. 自动控制理论及计算机控制技术实验装置;
2. 数字式万用表。
3. ACT-DT1A 直流电机转速控制模型或者 ACT-DTA 直流电机转速控制模型

三. 实验原理:

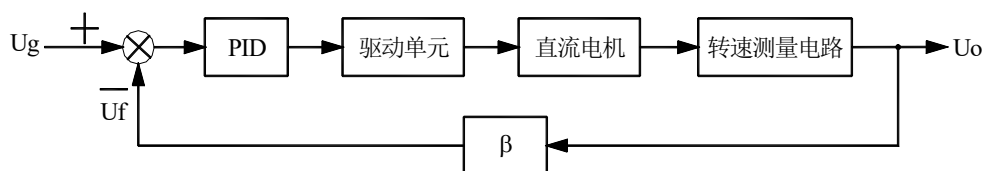


图 1.1 直流电机调速系统框图

图 1.1 为直流电机调速系统的结构框图, 它由给定、PID 调节器、电机驱动单元、转速测量电路和输出电压反馈等几个部分组成。在参数给定的情况下, 在 PID 调节器的补偿作用下, 直流电机可以按给定的转速闭环稳定运转。

给定 U_g 由 I 自动控制理论及计算机控制技术的实验面板上的 U3 单元中的 O1 提供, 电压变化范围为 $1V \sim 10V$ 。

经 PID 运算后的控制量作为驱动单元输入信号, 经过功率放大后驱动电机运转。

转速测量电路单元将转速转换成电压信号, 作为反馈信号, 构成闭环系统。它由转盘、光电转换和频率/电压 (F/V) 转换电路组成。由于转速测量的转盘为 60 齿, 电机旋转一周, 光电变换后输出 60 个脉冲信号, 对于转速为 n 的电机来说, 输出的脉冲频率为 $60n/\text{min}$, 我们用这个信号接入以秒作为计数单位的频率计时, 频率计的读数即为

电机的转速，所以转速测量输出的电压即为频率/电压转换电路的输出，这里的 F/V 转换率为 150Hz/V。

根据设计要求改变输出电压反馈系数 β 可以得到预设的输出电压。

四. 实验内容及步骤:

实验的接线图如图 1.2 所示，除了实际的模拟对象、电压表和转速计表外，其中的模拟电路由 I 自动控制理论及计算机控制技术实验板上的运放单元和备用元器件搭建而成。这里给出一组参考的实验参数，仅供参考，在实际的实验中需联系实际的控制对象进行参数的试凑，以达到预定的效果。参考的试验参数为：

$R_0=R_1=R_2=100\text{K}\Omega$, $R_3=100\text{K}\Omega$, $R_4=2\text{M}\Omega$, $R_5=10\text{K}\Omega$, $C_1=1\mu\text{F}$, $R_f/R_i=1$ 。

具体的实验步骤如下：

1. 先将实验装置的电源船形开关均放在“OFF”状态。
2. 利用实验板上的单元电路 U9、U13、U15，设计并连接如图 1.2 所示的闭环系统。

需要注意的是，运放的锁零信号 G 接到 U3 单元的 G1 端。

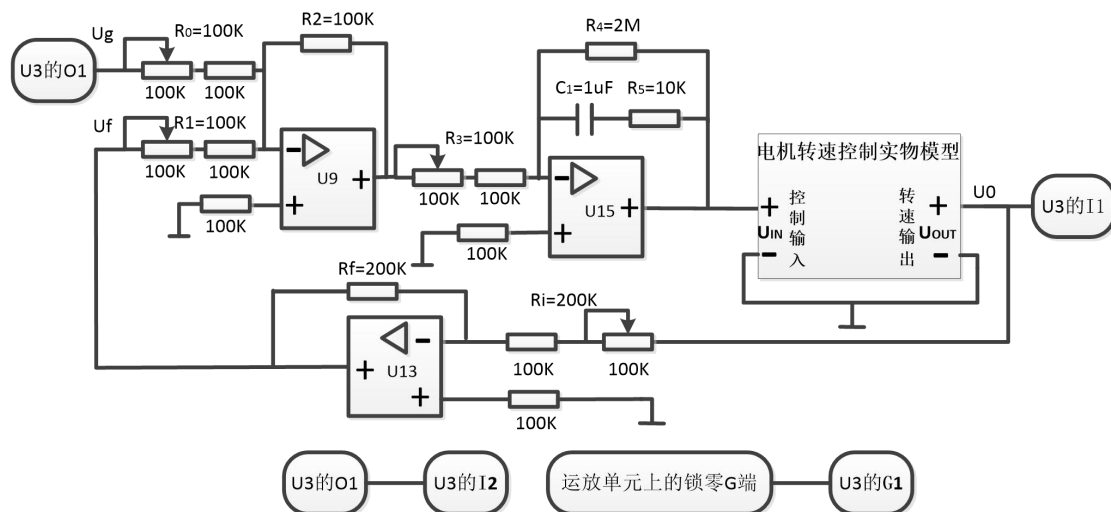


图 1.2

在进行实验连线之前，先将 U9 单元两个输入端的 100K 可调电阻均逆时针旋转到底（即调至最小），使电阻 R0、R1 均为 100K；

将 U15 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R3 的总阻值为 100K；C1 在 U15 单元模块上。R4 取元件库 U4 单元上的 2M 电阻。R5 取元件库 U4 单元上的 10K 电阻；

U13 单元作为反相器单元，将 U13 单元输入端的 100K 可调电阻均顺时针旋转到底（即调至最大），使电阻 R_i 为 200K；保证反馈系数为 1。

注明：所有运放单元的+端所接的 100K 电阻均已经内部接好，实验时不需外接。

（1）将数据采集系统 U3 单元的 O1 接到 U_g ；

（2）U9 的输出接 PID 调节器的输入，这里参考电路中 $K_d=0$ ， R_4 的作用是提高 PI 调节器的动态特性。

（3）经 PID 运算后给电机驱动电路提供输入信号，即将调节器电路单元的输出接到低压直流电动机调速中的功率转换电路的正极输入端（IN+），负极端（IN-）接地；

（4）功率转换的输出 OUT 接到直流电机的电枢两端（注明：内部已经接好，实验时不需外接）；

（5）转速测量的输出同时接到电压反馈单元 U13 的输入端和电压表头的输入端，由于转速测量输出的电压为正值，所以反馈回路中接一个反馈系数可调节的反相器。调节反馈系数 $\beta=R_f/R_i$ ，从而调节输出的反馈电压 U_f 。

3. 连接好上述线路，全面检查线路后，先合上实验面板上的电源船形开关，打开

计控程序文件夹的  ，运行程序界面如图 1.3 所示：

双击软件界面的运行按钮 ，然后再将 PID 模式选为模拟 PID 控制，对象选择电机实物对象控制，点击界面的启动按钮，运行程序，测试信号设置默认，直接进行实验，记录电机的运行动态波形。



4. 改变电阻 R5 的阻值，重新运行程序，观测电机的运行动态波形，学习并掌握 P 参数对系统性能的影响。

改变电容 C1 的容值，重新运行程序，观测电机的运行动态波形，学习并掌握 I 参数对系统性能的影响。

5. 在不同的 PI 参数下改变给定信号，观察并记录系统的动态特性。

实验二 温度控制实验

一. 实验目的:

1. 在自动控制理论实验基础上, 控制实际的模拟对象, 加深对理论的理解;
2. 掌握闭环控制系统的参数调节对系统动态性能的影响。

二. 实验设备:

1. 自动控制理论及计算机控制技术实验装置;
2. 数字式万用表、示波器(自备);
3. 温度对象、控制对象。

三. 实验原理:

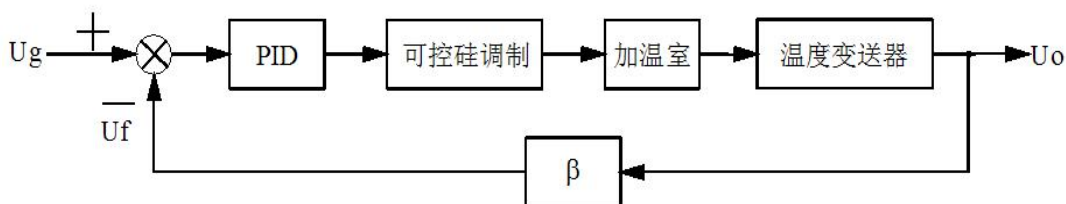


图 1

温度控制系统框图如图 1 所示, 由给定、PID 调节器、可控硅调制(使用全隔离单相交流调压模块)、加温室(采用经高速风扇吹出热风)、温度变送器(PT100 输入 0-100° 输出 2-10V 电压)和输出电压反馈等部分组成。在参数给定的情况下, 经过 PID 运算产生相应的控制量, 使加温室里的温度稳定在给定值。

给定 U_g 由自动控制理论及计算机控制技术的实验面板单元 U3 的 01 提供, 电压变化范围为 1.3V~10V。

PID 调节器的输出作为可控硅调制的输入信号, 经控制电压改变可控硅导通角从而

改变输出电压的大小，作为对加温室里电热丝的加热信号。

温度测量采用 PT100 热敏电阻，经温度变送器转换成电压反馈量，温度输入范围为 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ ，温度变送器的输出电压范围为 $\text{DC}2\sim 10\text{V}$ 。

根据实际的设计要求，调节反馈系数 β ，从而调节输出电压。

四、实验电路原理图：

实验电路由自动控制理论及计算机控制技术实验板上的运放和备用元件搭建而成，实验参考参数如下： $R_0=R_1=R_2=100\text{K}\Omega$ ， $R_3=100\text{K}\Omega$ ， $R_4=2\text{M}$ ， $C_1=1\mu\text{F}$ ， $R_5=10\text{K}$ 。 $R_f/R_i=1$ ；

具体的实验步骤如下：

1. 先将自动控制理论及计算机控制技术面板上的电源船形开关均放在“OFF”状态。
2. 利用实验板上的单元电路 U9、U13 和 U15，设计并连接如图 2 所示的闭环系统。

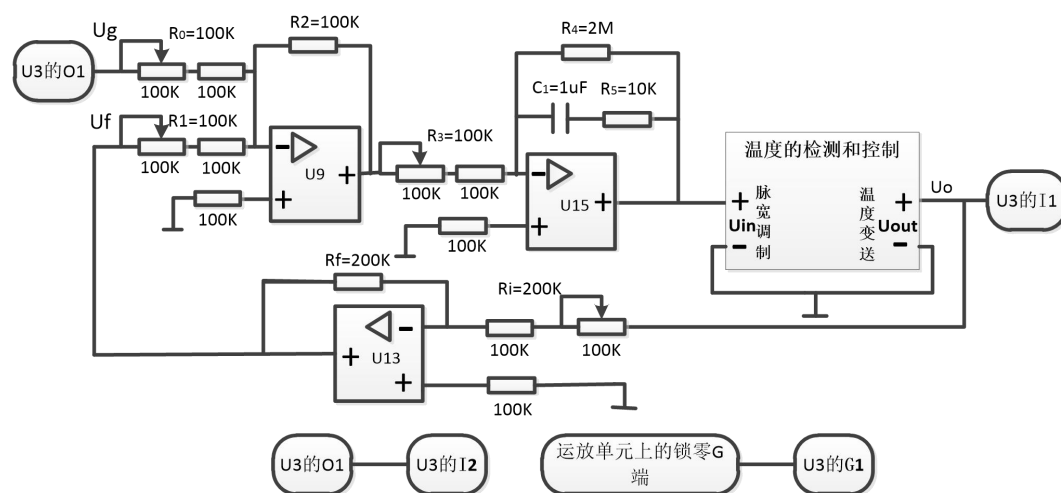


图 2

在进行实验连线之前，先将 U9 单元两个输入端的 100K 可调电阻均逆时针旋转到底（即调至最小），使电阻 R_0 、 R_1 均为 100K；

将 U15 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底（即调至最小），使输入电阻 R_3 的总阻值为 100K； C_1 在 U15 单元模块上。 R_4 取元件库 U4 单元上的 2M 电阻。 R_5 取元件库 U4 单元上的 10K 电阻；

U13 单元作为反相器单元，将 U13 单元输入端的 100K 可调电阻均顺时针旋转到底

(即调至最大), 使电阻 R_i 为 200K; 保证反馈系数为 1。

注明: 所有运放单元的+端所接的 100K 电阻均已经内部接好, 实验时不需外接。

(1) 将数据采集系统 U3 单元的 O1 接到 U_g ;

(2) 给定输出接 PID 调节器的输入, 这里参考电路中 $K_d=0$, R_4 的作用是提高 PI 调节器的动态特性。

(3) 经过 PID 运算调节器输出 ($0\sim 10V$) 接到温度的检测和控制单元的脉宽调制的输入端 U_{in} 两端, 脉宽调制后输出的电压作为加温室里电热丝加热的输入电压。

(4) 温度变送器通过检测 PT100 热敏电阻的温度, 然后转换成电压信号, 作为反馈信号。温度变送器的输出 U_{out} 接到电压反馈输入端, 同时接到电压表的输入端, 通过电压表来观测相应的温度的变化。

(5) 由于温度变送器的输出的电压为正值, 所以反馈回路中接一个反馈系数可调节的反相器。调节反馈系数 $\beta=R_f/R_i$, 从而调节输出的电压 U_o 。

3. 连接好上述线路, 全面检查线路后, 先合上实验面板上的电源船形开关, 打开

计控程序文件夹的   , 运行程序界面如图 3 所示:

双击软件界面的运行按钮  , 然后再将 PID 模式选为模拟 PID 控制, 对象选择温度实物对象控制, 点击界面的启动按钮, 运行程序, 测试信号设置默认, 直接进行实验, 记录温度的上升动态波形。

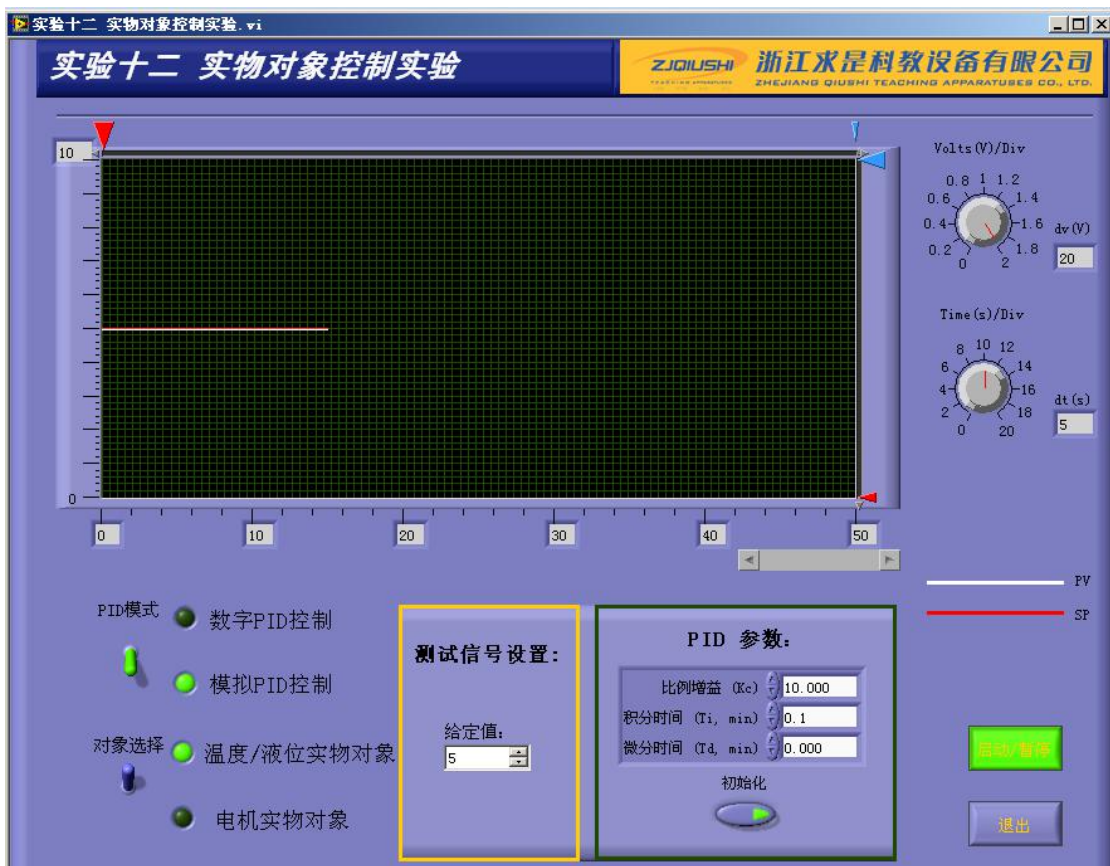


图 3

4. 改变电阻 R5 的阻值，重新运行程序，观测并记录温度的变化动态波形，学习并掌握 P 参数对系统性能的影响。

改变电容 C1 的容值，重新运行程序，观测并记录电温度的变化动态波形，学习并掌握 I 参数对系统性能的影响。

5. 在不同的 PI 参数下改变给定信号，观察并记录系统的动态特性。

七、思考与练习

改变给定电压的大小调节各个参数，观察系统在不同给定电压下稳定后的曲线的异同点。

实验三 双容水箱液位控制实验

一. 实验目的:

1. 在自动控制理论实验基础上, 控制实际的模拟对象, 加深对理论的理解;
2. 学习和掌握闭环反馈系统的控制方法。

二. 实验设备:

1. 自动控制理论及计算机控制技术实验装置;
2. 数字式万用表。
3. ACT-YK1 容水箱液位实物对象

三. 实验原理:

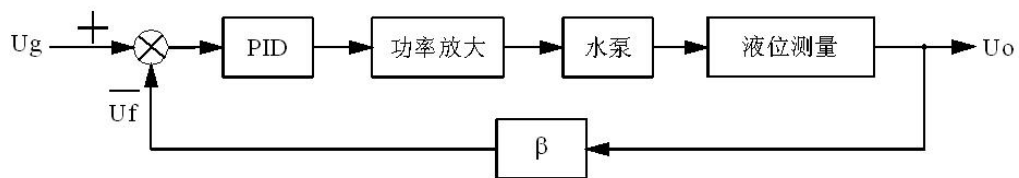


图 3.1 水箱液位控制系统框图。

水箱液位控制系统框图如图 3.1 所示, 由给定、PID 调节器、功率放大、水泵、液位测量和输出电压反馈电路组成。在参数给定的情况下, 经过 PID 运算产生相应的控制量, 使水箱里的水位稳定在给定值。

给定 U_g 由 I 自动控制理论及计算机控制技术的实验面板上的电源单元 U1 提供, 电压变化范围为 1.3V~15V。

PID 调节器的输出作为水泵的输入信号, 经过功率放大后作为水泵的工作电源, 从而控制水的流量。

液位测量通过检测有机玻璃水箱的水压, 转换成电压信号作为电压反馈信号, 水泵的水压为 0~6Kpa, 输出电压为 0~10V, 这里由于水箱的高度受实验台的限制, 所以调节压力变送器的量程使得水位达到 250mm 时压力变送器的输出电压为 5V。

根据实际的设计要求, 调节反馈系数 β , 从而调节输出电压。

四. 实验内容及步骤:

实验的接线图如图 3.2 所示, 除了实际的模拟对象外, 其中的模拟电路由自动控制理论及计算机控制技术实验板上的运放单元和备用元器件搭建而成。参考的试验参数(仅供参考)为:

$R_0=R_1=R_2=200\text{K}\Omega$, $R_3=100\text{K}\Omega$, $R_4=2\text{M}\Omega$, $R_5=10\text{K}\Omega$, $C_1=1\mu\text{F}$, $R_f/R_i=1$ 。

具体的实验步骤如下：

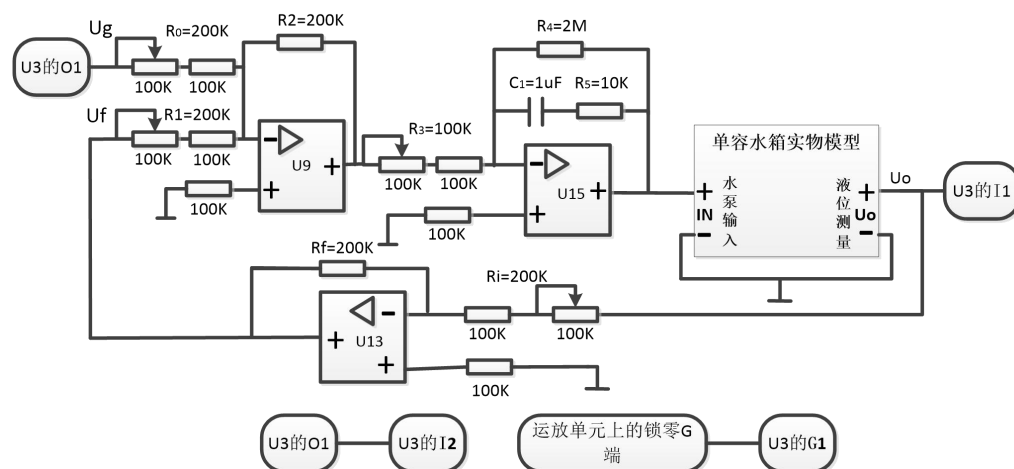


图 3.2

在进行实验连线之前,先将 U9 单元两个输入端的 100K 可调电阻均顺时针旋转到底 (即调至最大),使电阻 R_0 、 R_1 均为 200K;

将 U15 单元输入端的 100K 可调电阻逆时针旋转到底 (即调至最小),使输入电阻 R_3 的总阻值为 100K; C_1 在 U15 单元模块上。 R_4 取元件库 U4 单元上的 2M 电阻。 R_5 取元件库 U4 单元上的 10K 电阻;

U13 单元作为反相器单元,将 U13 单元输入端的 100K 可调电阻均顺时针旋转到底 (即调至最大),使电阻 R_i 为 200K;保证反馈系数为 1。

注明：所有运放单元的+端所接的 100K、10K 电阻均已经内部接好，实验时不需外接。

1. 先将自动控制理论及计算机控制技术面板上的电源船形开关均放在“OFF”状态。
2. 利用实验板上的单元电路 U9、U13 和 U15,设计并连接如图 3.2 所示的闭环系统。需注意的是运放的锁零信号 G 接 U3 的 G1。

(1) 将数据采集系统 U3 单元的 O1 接到 U_g ;

(2) 给定输出接 PID 调节器的输入,这里参考电路中 $K_d=0$, R_4 的作用是提高 PI 调节器的动态特性。

(3) 经过 PID 运算调节器输出 (0~10V) 接到面板上水泵的输入两端, 经过功率放大电压作为水泵的电源信号。

(4) 液位测量经压力变送器检测水箱里的水压即水位转换成电压输出信号, 作为电压反馈信号, 将液位测量的输出接到电压反馈电路的输入端。

(5) 由于压力变送器输出的电压为正值, 所以反馈回路中接一个反馈系数可调节的反相器。调节反馈系数 $\beta=R_f/R_i$, 从而调节输出的电压 U_o 。

3. 连接好上述线路, 全面检查线路后, 先合上实验面板上的电源船形开关, 打开

计控程序文件夹的  **实验十二 实物对象控制实验.vi** , 运行程序界面如图 1.3 所示:

双击软件界面的运行按钮 , 然后再将 PID 模式选为模拟 PID 控制, 对象选择液位实物对象控制, 点击界面的启动按钮, 运行程序, 测试信号设置默认, 直接进行实验, 记录液位的动态波形。

4. 改变电阻 R_5 的阻值, 重新运行程序, 观测并记录温度的变化动态波形, 学习并掌握 P 参数对系统性能的影响。

5. 改变电容 C_1 的容值, 重新运行程序, 观测并记录电温度的变化动态波形, 学习并掌握 I 参数对系统性能的影响。

6. 在不同的 PI 参数下改变给定信号, 通过水箱内水位的变化很直观地观察并记录系统动态特性。



图 1.3

附录 上位机软件功能使用说明

1. 1 实验主界面

实验主界面如图（1.1、1.2、1.3）所示。在实验主界面可以完成数据采集、信号发生、波形显示和处理等多种功能（将在接下来的章节具体介绍）。



图 1. 1

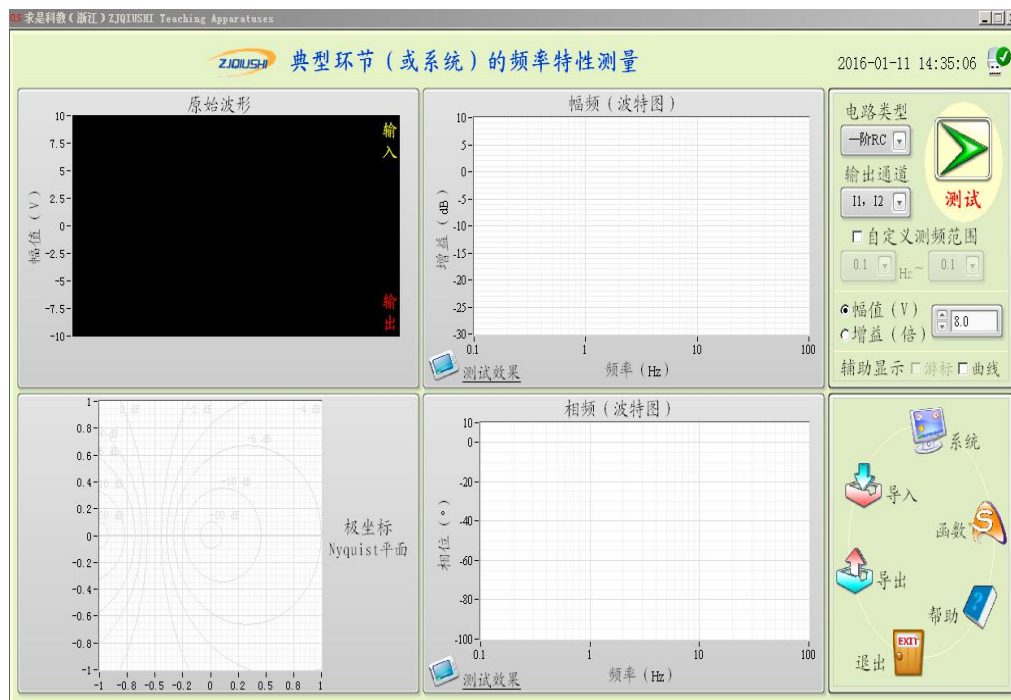


图 1.2



图 1.3

1. 2 系统硬件连接与删除



图 3.4 安全删除硬件

PC 机与实验装置 USB 采集设备是否能够连接上, 我们可以查看, PC 上位机是否可以检测到实验装置中的 USB 硬件, 如果第一次连接 USB 线, PC 上位机将会提示检测到新硬件, 也可以双击 Windows 系统界面右下图的状态栏中检测到新 USB 设备的图标, 打开如下界面, 如图 3.4 所示, 检测到实验装置下位机的 USB 设备 (PHILIPS isp1581 Scanner KIT), 可以删除掉系统硬件。

1. 3 显示模式

显示模式模块如图 (3.3.1\3.3.2\3.3.3) 所示, 模块支持四种显示模式, 分别为:

1. X-t 模式: 横坐标为时间轴, 纵坐标为通道数据值。选择 X-t 显示模式, 所示显示界面, 横坐标时间轴的量程设置, 纵坐标幅值范围为-10V~10V。X-t 模式可以用于显示系统的测试信号、暂态或稳态的时域响应等。

2. X-Y 模式: 横坐标为采样通道 X 值, 纵坐标为采样通道 Y 值。选择 X-Y 显示模式, 所示显示界面。横、纵坐标幅值范围为-10V~10V, X-Y 模式主要用于显示李沙育图形等。

3. Bode 模式: 横坐标为频率, 用对数表示。选择 Bode 显示模式, 显示模块如图 (3.3.1) 所示显示界面。界面的上半部分为对数幅频特性, 其纵坐标为幅值的分贝数; 下半部分为对数相频特性, 此时纵坐标为相角的度数。Bode 模式用于系统的频域特性

测量中的对数幅频与相频特性（即波特图）显示。

4. Polar 模式：选择 Polar 显示模式，显示模块显示如图（3.3.2）所示显示界面。Polar 模式可用于系统幅相特性与相平面轨迹显示等。在用于系统幅相特性显示时，横轴为实部，纵轴为虚部。用于相平面轨迹显示时，横轴为系统偏差，纵轴为该偏差的微分。

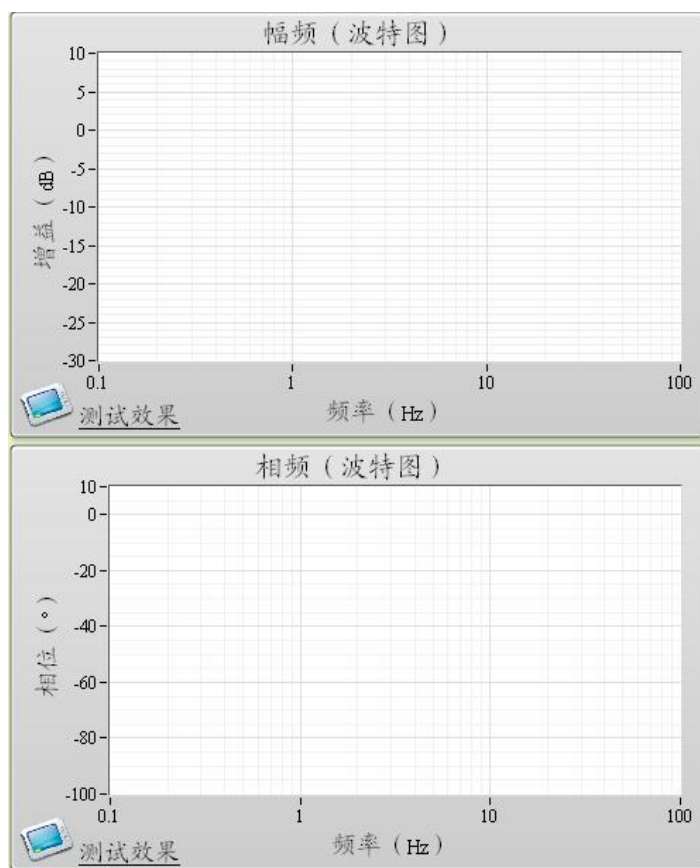


图 3.3.1 对数幅频特性(Bode)

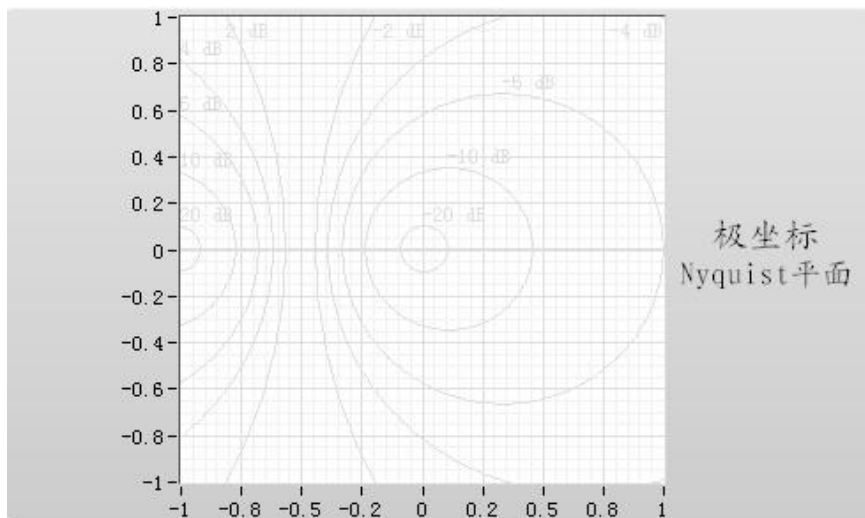


图 3.3.2 极坐标图(Nyquist)

1.4 量程设置(T/DIV)



图 3.3.3

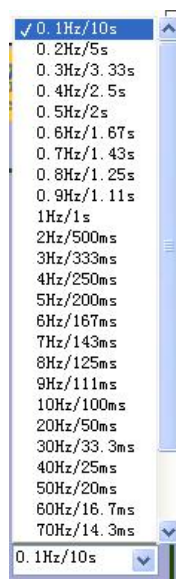


图 3.3.4

量程设置模块如图(3.3.3)所示,本设置模块只有在显示模式为X-t、X-Y和采样控制时有效,打开T/DIV下位列表,如它右图所示:

1. 0.1Hz/10s,画满一屏的时间为10 S。
2. 0.2Hz/5s,画满一屏的时间为5 S。
3. 100Hz/10ms,画满一屏的时间为10ms。
4. 200Hz/5ms,画满一屏的时间为5ms。

T/DIV 的量程范围是 0.1Hz/10s~ 200Hz/5ms,中间有很多档位,如右图下拉列表(图 3.3.4)所示:

1.5 实验类别

实验类别选择模块如图(1.1、1.2、1.3)所示,模块支持四种实验类别:

1. 时域实验: 需测取系统的暂态或稳态时域响应的实验。

-
- 2. 频域实验：需测取系统的频率特性的实验。
 - 3. 采样控制实验：需要有数字控制器功能的实验，如有关采样控制系统的实验。
- 通过选择不同的实验类别，并设置不同的参数，可以完成不同类型的实验。

1. 6 实验参数设置

实验参数设置模块如图（1. 6. 1）所示，根据不同的实验类别，设置不同的实验参数。

1. 系统测试信号设置：时域实验时，按实验需要选择测试信号的类型和参数。这里测试信号由信号发生器输出，加于被测控制系统或环节的输入端。

(1) 测试信号类别：（如图 1. 6. 1）

- a. 0/外接：不使用通过计算机产生的信号，采用实验装置上信号发生器产生的信号。
- b. 正弦波：使用通过计算机产生正弦波信号。
- c. 周期阶跃信号：使用通过计算机产生周期阶跃信号。
- d. 周期斜坡信号：使用通过计算机产生的周期斜坡信号。

(2) 输入波形幅值： $-10\text{ V} \sim 10\text{ V}$ 。默认设置为 2.0 V 。

(3) 输入波形占空比： $0\% \sim 100\%$ ，此项设置除阶跃信号外对其他周期信号均无效，默认设置为 100% 。

(4) 输入信号周期： $10\text{ s} \sim 5\text{ ms}$ ，默认 1 s 。

(5) 零电位偏移：允许设置 -10 到 $+10$ 的零位偏移。

2. 采样控制参数设置：采样控制实验参数设置分为两部分。如图（3. 6. 1）所示。

(1) 测试信号设定：在界面右边得到如图（3. 6. 2）所示图框，详细设置参见上面介绍。

(2) 采样控制系统研究：采样控制系统的参数设置包括：

- (a) 采样控制系统采样周期设置。
- (b) 采样控制系统混合仿真实验（详见控制理论指导书实验九）中比例控制器 K_p 的设置。
- (c) 采样控制系统串联校正的混合仿真实验（详见控制理论实验指导书实验十）的校正环节 $G_c(s)$ 的参数设置。

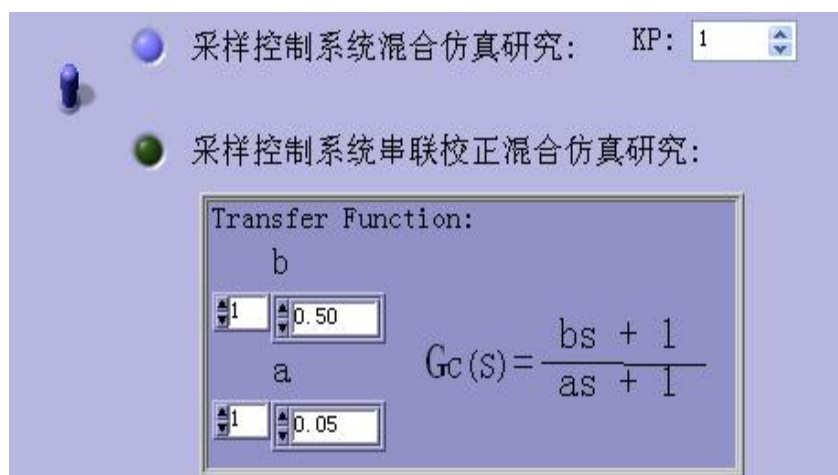


图 1.6.1 采样控制参数设置

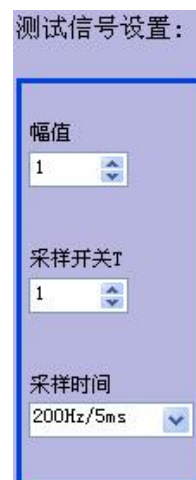


图 3.6.2

1. 频域特性测试参数设置：见图（1.6.3），根据具体实验要求先选择电路的类型为一阶还是二阶电路，然后选择输出通道为 I1 和 I2，，频率点测量范围为范围为 0.1~300Hz，根据电路自行选择不同的范围，一般选择 0 到 30Hz，幅值可以选择默认，辅助显示可将曲线选取，然后再按“测试”按钮启动频域特性实验。



图 3.6.3 频域参数设置

时域示波器.vi

典型系统时域及非线性特性分析

测试信号设置:

测试信号1: 测试信号2:

阶跃 阶跃

幅值1: 幅值2:

1 5

偏移1: 偏移2:

0 0

占空比1%: 占空比2%:

70 50

频率/周期: 四组A/D通道选择

1Hz/1s 1,1,2通道

1 2 1 2

0 3 0 3

通道1放大 通道2放大

通道1零位 通道2零位

0.5V 0.2V 0.5V 0.2V

1V 0.1V 1V 0.1V

2V 50mV 2V 50mV

5V 20mV 5V 20mV

S 1 500 mS

2 200

X-Y模式 启动/暂停

滑片3旁边指示的是当前的横向格数, 最左端为y1

选择激励信号的频率(周期)

滑片1的当前位置的数值与当前选择通道的v/DIV的选择刻度值的乘积

选择当前要读数的通道(左瓣或右瓣)

对输入通道1的波形进行纵向缩放(主要通过改变纵向每个大格的刻度值来改变, 比如将旋钮选在2伏, 表示纵向每个大格的刻度值为2伏, 如果通道1原来的信号为4伏, 它将占2个格的高度; 再次将旋钮选在1伏, 表示纵向每个大格的刻度值为1伏, 原来通道1的信号将占4个格的高度)

对输入通道2的波形进行纵向缩放(主要通过改变纵向每个大格的刻度值来改变, 比如将旋钮选在2伏, 表示纵向每个大格的刻度值为2伏, 如果通道2原来的信号为1伏, 它将占1/2个格的高度; 再次将旋钮选在1伏, 表示纵向每个大格的刻度值为1伏, 原来通道2的信号将占1个格的高度)

滑片4旁边指示的是当前的横向格数, 最左端为y2

对输出通道1或通道2的信号本身实施放大(比如当输出信号为1v时, 如果此时将标识打到0, 就是输出信号本身的大小; 将标识打到1, 就是对输出信号放大一倍; 将标识打到2, 就是对输出信号放大2倍; 相当于在输出信号本身的基础上进行倍数的放大。

(x2-x1)乘以当前选择通道的当前纵向选择刻度值

(y2-y1)乘以当前选择通道的当前横向选择刻度值

滑片2旁边指示的是当前的纵向格数, 最低端为x2

滑片1旁边指示的是当前的纵向格数, 最低端为x1

激励信号设置窗口

对系统输出信号进行采样的通道设置(必须与真实连接的通道一致)

对横向坐标进行缩放(主要通过改变横向每个大格的刻度值来改变, 比如将旋钮选在1, 表示横向每个大格的刻度值为1s, 如果信号周期为1是, 则一个周期的信号将占据一个格的大小; 如将旋钮选在2, 表示横向每个大格的刻度值为2s, 如果信号周期为1是, 则一个周期的信号将占据半个格的大小;)