

《自动控制原理》实验指导书

深圳大学光电工程学院

2016年12月

实验注意事项

1. 实验前U9~U16单元内的运放需要调零。

2. 运算放大器边上的锁零点G接线要正确。**不需要锁零时（运放构成环节中不含电容或输入信号为正弦波时），必须把G与-15V相连；在需要锁零时，必须与其输入信号同步的锁零信号相连。**如在采用PC产生的经D/A通道输出的信号O1作为该环节或系统的输入时，运放的锁零信号G应连U3单元中锁零信号G1；类似地，如采用PC产生的信号O2作输入，则锁零信号G应连U3单元中锁零信号G2。锁零主要用于对电容充电后需要放电的场合，一般不需要锁零。

3. 在设计和连接被控对象或系统的模拟电路时，要特别注意，实验台上的运放都是反相输入的，因此对于整个系统以及反馈的正负引出点是否正确都需要仔细考虑，必要时接入反号器。

4. 作频率特性实验和采样控制实验时，必须注意只用到其中1路A/D输入和1路D/A输出，具体采用“11~18”中哪一个通道，决定于控制箱上的实际连线。

5. U3单元的“地”应与其他单元的“地”相连。

6. 上位机软件提供线性系统软件仿真功能。在作软件仿真时，无论是一个环节、或是几个环节组成的被控对象、或是闭环系统，在利用上位机界面作实验时，都必须将开环或闭环的传递函数都转化成下面形式，以便填入参数 a_i, b_j

$$W(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

其中 $n \leq 10, m \leq n$ 。

如出现 $m > n$ 的情况，软件仿真就会出错，必须设法避免。如实验一，在作理想比例微分（PD）环节的软件仿真实验时就会遇到此问题，因为此时 $W(s) = K(1+Ts) = K + KTs$

可见该 $W(s)$ 分子中 s 的阶高于分母的，直接填入参数仿真，即出现“非法操作”的提示。具体避免方法请参阅该实验附录。

7. 受数据处理单元的数据处理速率限制，作频率特性实验和采样控制实验时，在上位机界面上操作“实验参数设置”必须注意频率点和采样控制频率的选择。对于频率特性实验，应满足 $\omega < 200/\text{sec}$ ，以免引起过大误差。类似地，对于采样控制实验，采样控制周期应不小于5 ms。

8. 本采集设备的上位机软件，A/D和D/A输出部分，需要注意的一些事项。本数据采集系统有8路A/D输入，2路D/A输出，对于8路A/D输入将其分为四组，因为一般我们用到两路同时输出或同时输入。I1、I2为一组A/D输入，I3、I4为一组A/D输入，I5、I6为一组A/D输入，I7、I8为一组A/D输入。在这四组A/D输入中，I1、I3、I5、I7为每组A/D输入中的第一路，I2、I4、I6、I8为每组A/D输入中的第二路。这个在实验三中，做频率特性实验要求比较严格，在每个实验当中，我们可以随意选择任一组A/D输入，和任一路D/A输出。

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. 掌握实验装置和“自动控制理论时域及非线性特性分析”软件的使用方法。
2. 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. 在软件界面上，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仿真研究，并与电路模拟研究的结果作比较。

三. 原理说明

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 $R_0=100k$ ， $R_1=200k$ ， $R=10k$ 。

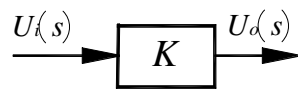


图1.1.1

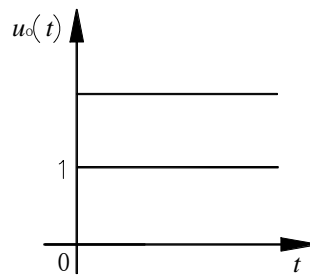


图1.1.3

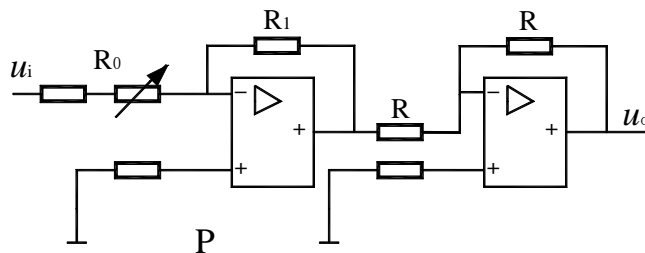


图1.1.2

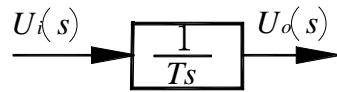


图1.2.1

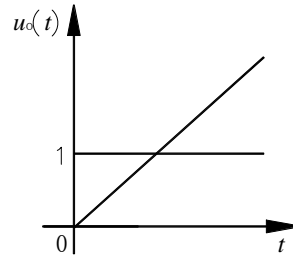


图1.2.3

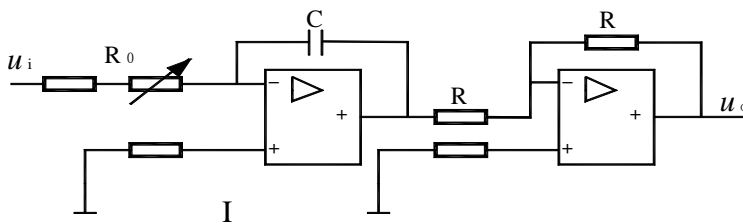


图 1.2.2

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 $R_0 = 100k$ ， $C = 1\mu F$ ， $R = 10k$ 。

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：

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

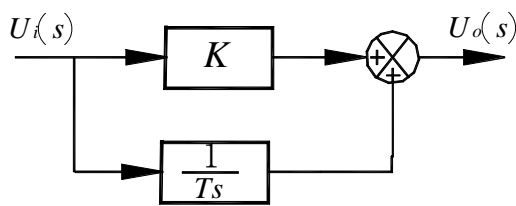


图1.3.1

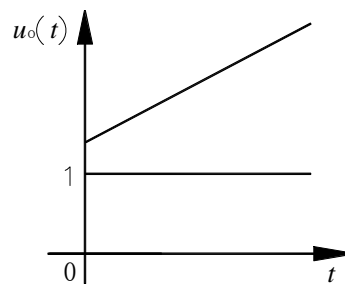


图1.3.3

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

$$K = \frac{R_1}{R_0}, \quad T = R_0C$$

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

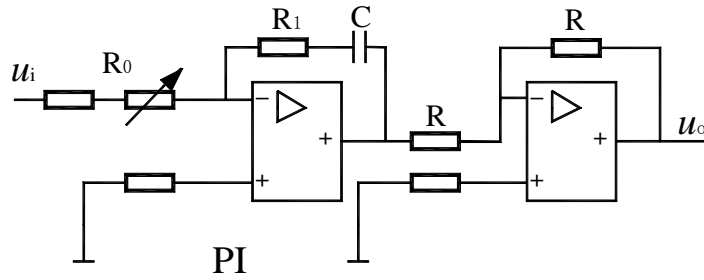


图1.3.2

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 $R_0 = 10k$, $R_1 = 10k$, $R_2 = 10k$, $R_3 = 1K$, $C = 10\mu F$, $R = 10k$ 。

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。

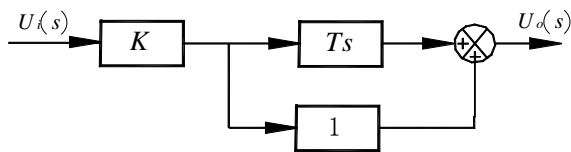


图1.4.1

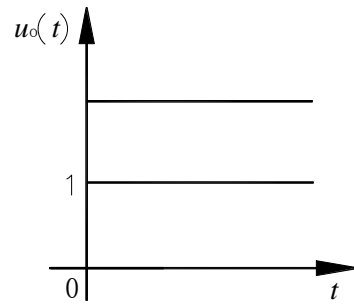


图1.4.3a

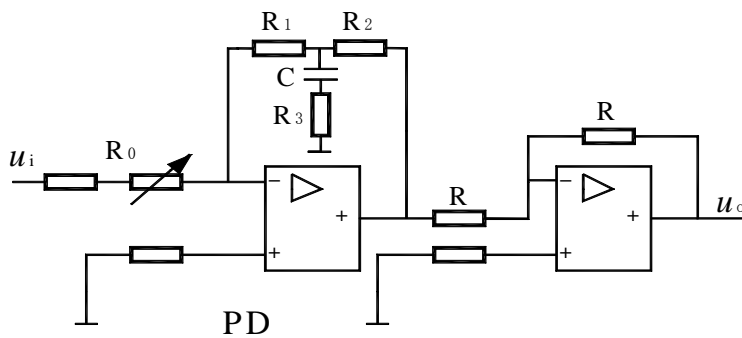


图 1.4.2

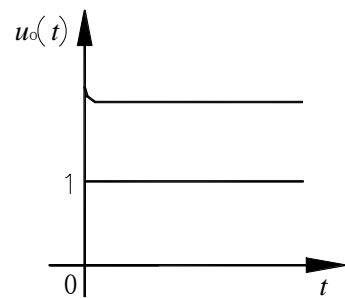


图1.4.3b

实际 PD 环节的传递函数为：

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

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

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： $\frac{U_o}{U_i} = \frac{K}{Ts+1}$

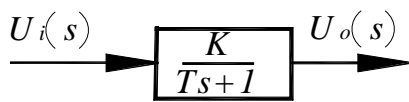


图 1.5.1

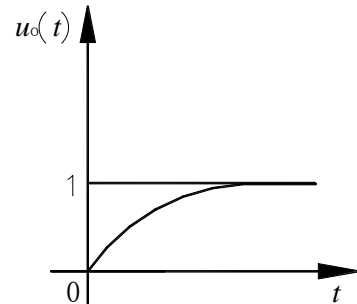


图 1.5.3

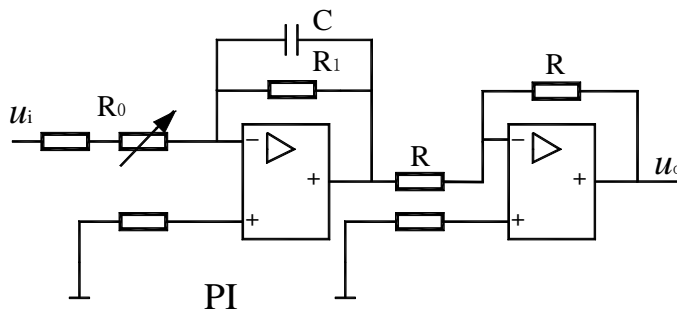


图 1.5.2

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 $R_0 = 200k$, $R_1 = 200k$, $C = 1\mu F$, $R = 10k$ 。

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。

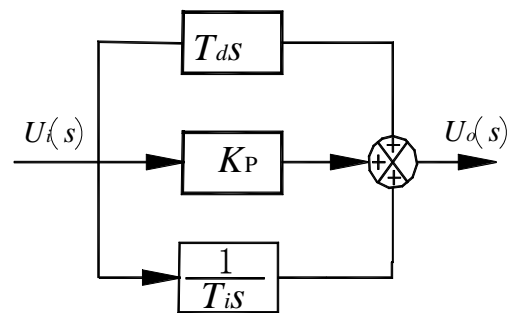


图 1.6.1

实际 PID 环节的传递函数为：

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

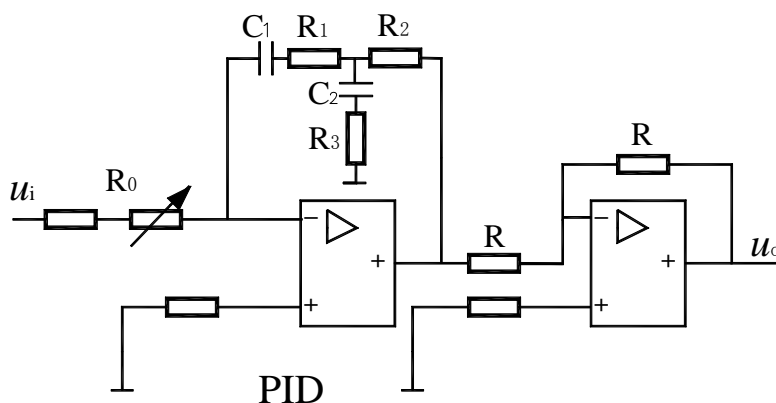


图1.6.2

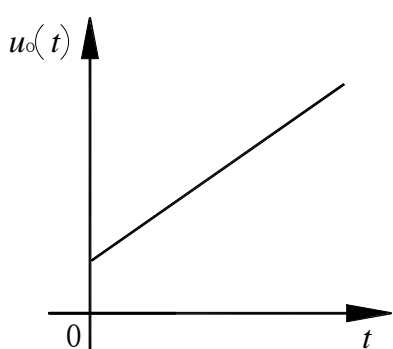


图1.6.3a

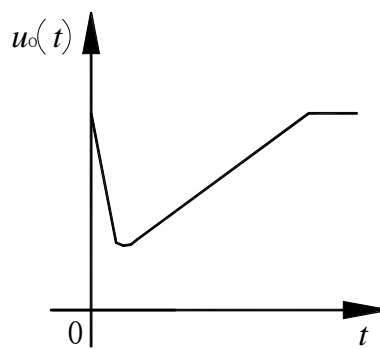


图1.6.3b

四. 实验设备

1. ACCC-I实验台
2. 软件：自动控制理论时域分析

五. 实验步骤

1. 熟悉实验设备，利用实验台上的模拟电路单元，参考本实验原理说明中的设计，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。

利用实验台U9+U8单元完成比例、积分、比例积分、比例积分微分以及惯性环节模拟电路的接线；

利用实验台U10+U8单元完成比例微分环节模拟电路的接线。

2. 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。

熟悉“自动控制理论时域及非线性特性分析”软件操作界面，充分利用虚拟示波器与信号发生器功能。

(1) 硬件连接

将所测试的典型环节模拟电路的 U_i ，连接到数据处理单元U3中的D/A输出通道O1（系统输入信号O1）；

将典型环节模拟电路的 U_o ，连到数据处理单元U3中的A/D输入通道I1（采样通道1）；

将系统输入信号O1，连到实验台数据处理单元U3中的A/D输入通道I2（采样通道2）；

将运放的锁零G，连接数据处理单元U3的锁零信号G1。

接线完成，经检查无误后，再上电。

(2) 启动“时域分析”程序，进入主界面。界面上的操作步骤如下：

①按通道接线情况完成通道设置：

“通道选择”选择A/D输入通道I1作为环节的输入，选择D/A输出通道O1作为环节的输入，再将D/A输出通道O1直接连接A/D输入通道I2（显示信号源发出信号的波形）。不同的通道，图形显示控件中波形的颜色将不同。

②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。

③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“1s”；对于比例、积分环节选择“幅值”为“3V”，对于比例积分、比例微分、比例积分微分以及惯性环节，选择“幅值”为“2V”，还可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”至少应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。

④点击“Start”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的图形显示控件中间得到该环节的“阶跃响应”。

⑤改变实验环节参数，重复④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③、④的操作。

⑥按实验报告需要，将图形结果保存为位图文件，操作方法可参阅软件使用说明书。

六. 注意事项

1、注意实验接线前须先将实验台上电，以对运放仔细调零（厂家已调好）。然后断电，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。在输入阶跃信号时，除比例环节运放可不锁零（G可接-15V）也可锁零外，其余环节都需要考虑运放锁零。

2、注意实验台的U3单元与其他单元需共地。

七. 实验报告

分析实验结果，完成实验报告。

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. 原理说明

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 $W(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$, 其中, $\omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{T_1 T_o}}$, $\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_o}{K_1 T_1}}$

取二阶系统的模拟电路如图 2.1.2 所示。

该系统的阶跃响应如图 2.1.3 所示: Rx 接 U4 单元的 1M 电位器, 改变元件参数 Rx 大小, 研究不同参数特征下的时域响应。

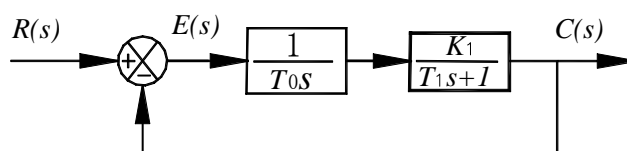


图2. 1. 1

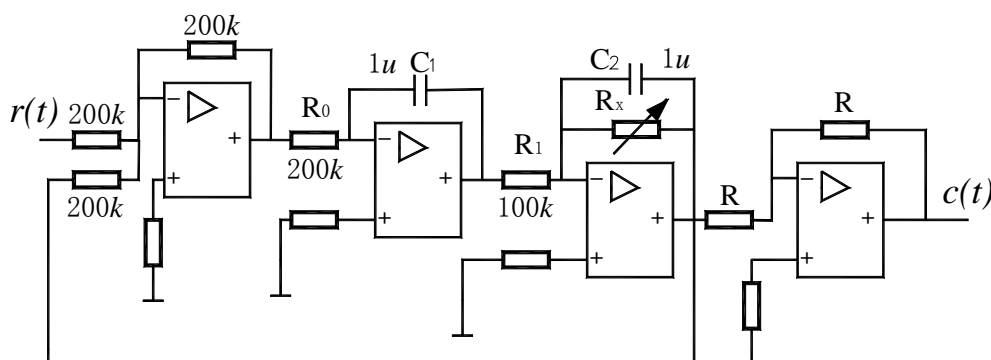


图2. 1. 2

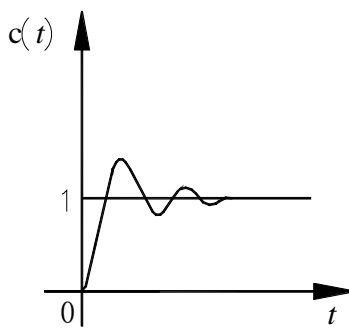


图2. 1. 3a

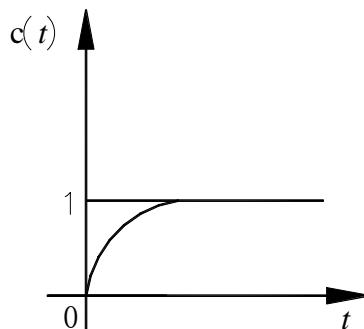


图2. 1. 3b

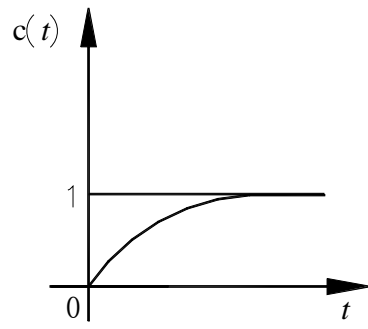


图2. 1. 3c

图 2.1.3a, 2.1.3b, 2.1.3c 分别对应二阶系统在欠阻尼, 临界阻尼, 过阻尼三种情况下的阶跃响应曲线。

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。

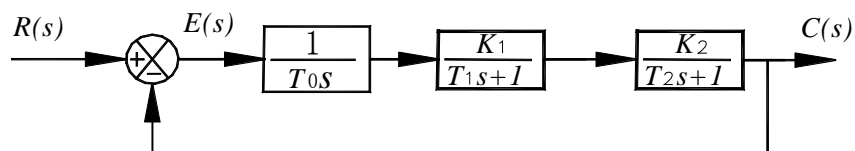


图2. 2. 1

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。

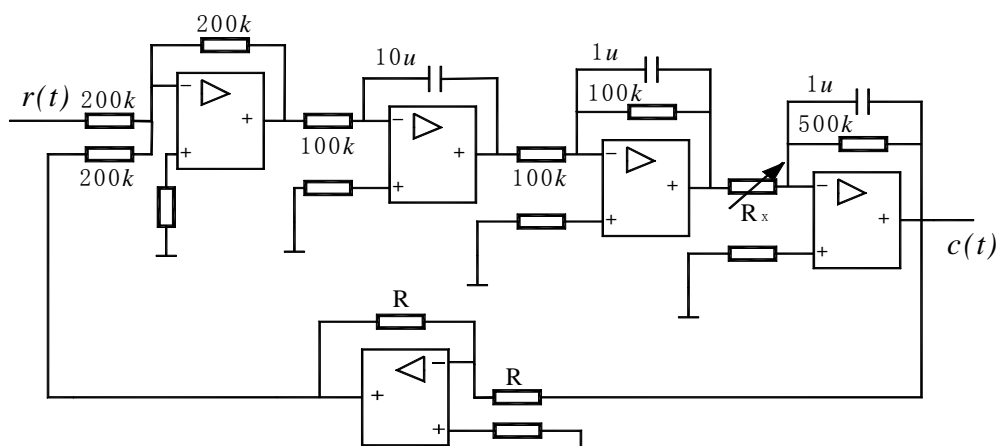


图 2. 2. 2

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 , 从而改变 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。

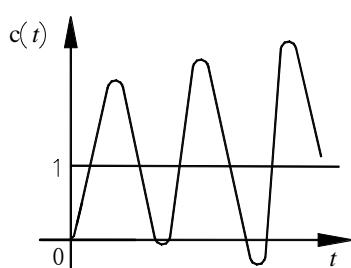


图2. 2. 3a

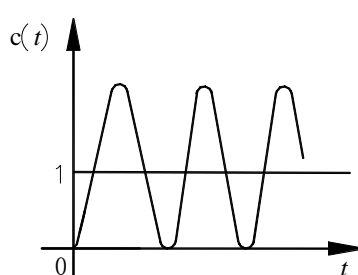


图2. 2. 3b

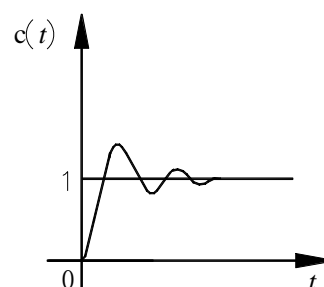


图2. 2. 3c

四. 实验设备

1. ACCC-I实验台
2. 软件: 自动控制理论时域分析

五. 实验步骤及注意事项

1. 利用实验台上的U9、U15、U11和U8模拟电路单元, 参考原理说明中的图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。

注意: 实验接线前必须对运放仔细调零(厂家已做)。接线时要注意对运放锁零的要求。

2. 利用虚拟示波器与信号发生器功能, 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。

(1) 硬件连接

将所测试系统的模拟电路的 U_i , 连接到数据处理单元U3中的D/A输出通道O1(系统输入信号O1);

将所测试系统模拟电路的 U_o , 连到数据处理单元U3中的A/D输入通道I1(采样通道1);

将系统输入信号O1, 连到实验台数据处理单元U3中的A/D输入通道I2(采样通道2);

将运放的锁零G，连接数据处理单元U3的锁零信号G1。

U3单元需与其他单元共地。

接线完成，经检查无误后，再上电。

(2) 启动“时域分析”程序，进入主界面。界面上的操作步骤如下：

①按通道接线情况完成通道设置：

“通道选择”选择A/D输入通道I1作为环节的输出，选择D/A输出通道O1作为所测试系统的输入，再将D/A输出通道O1直接连接A/D输入通道I2(显示信号源发出信号的波形)。不同的通道，图形显示控件中波形的颜色将不同。

②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。

③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“周期/频率”为0.1Hz/10s；除“二阶过阻尼”情况下选择“幅值”为2V、“占空比”为50%外，其他情况下均选择“幅值”为5V，“占空比”为90%；将“偏移”设为“0”。

④点击“Start”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的图形显示控件中间得到该环节的“阶跃响应”。

⑤改变该二阶系统模拟电路的参数（可通过改变U11的Rx值进行），观测参数变化对系统动态性能的影响。观察二阶系统在过阻尼、临界阻尼、欠阻尼三种情况下的阶跃响应曲线。

⑥按实验报告需要，将图形结果保存为位图文件，操作方法可参阅软件使用说明书。

3. 利用实验台上的U9、U15、U11、U10和U8模拟电路单元，参考原理说明中的图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。

4. 利用虚拟示波器与信号发生器功能，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。具体操作方法请参阅步骤2。

5. 改变该三阶系统模拟电路的参数（可通过改变U10的Rx值进行），观测参数对系统稳定性与动态指标的影响。可观察到系统处于不稳定、临界稳定、稳定三种不同情况下的实验结果。

六. 实验报告

分析实验结果，完成实验报告。

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. 根据测得的频率特性曲线求取各自的传递函数。
4. 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. 原理说明

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 3.1.1。

取 $s = j\omega$ 代入，得

$$G(j\omega) = \frac{K}{j\omega T + 1} = r(\omega)e^{j\phi(\omega)}$$

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 ， $T = -\frac{\text{tg}\phi(\omega_k)}{\omega_k}$ 。

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 $R_0=200\text{K}\Omega$ ， $R_1=200\text{K}\Omega$ ， $C=1\mu\text{F}$ ，其模拟电路设计参阅图 3.1.2。

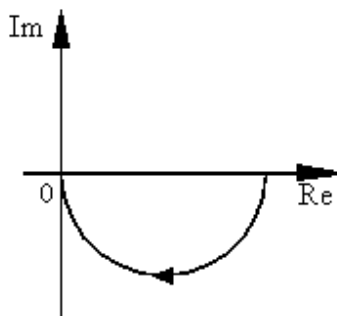


图 3.1.1

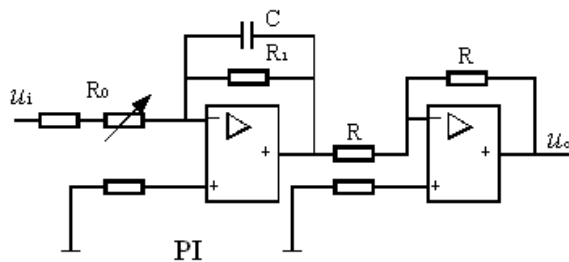


图 3.1.2

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 3.2.1 所示。

根据上述幅相频率特性表达式，有

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

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

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

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

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

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

$$T_1 = T(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}) \quad , \quad T_2 = T(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})$$

$$\text{实验用典型二阶系统开环传递函数为： } G(s)H(s) = \frac{1}{(0.2s+1)(0.1s+1)} = \frac{1}{0.02s^2 + 0.3s + 1}$$

其电路设计参阅图 3.2.2。

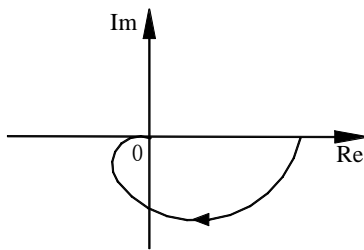


图3.2.1

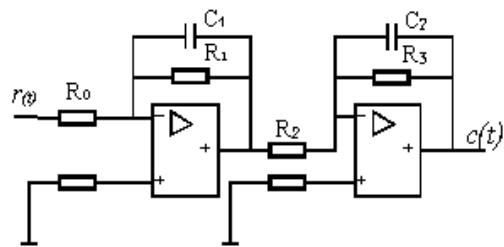


图3.2.2

3. 对数幅频特性和对数相频特性

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 3.3.1 和图 3.3.2 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。

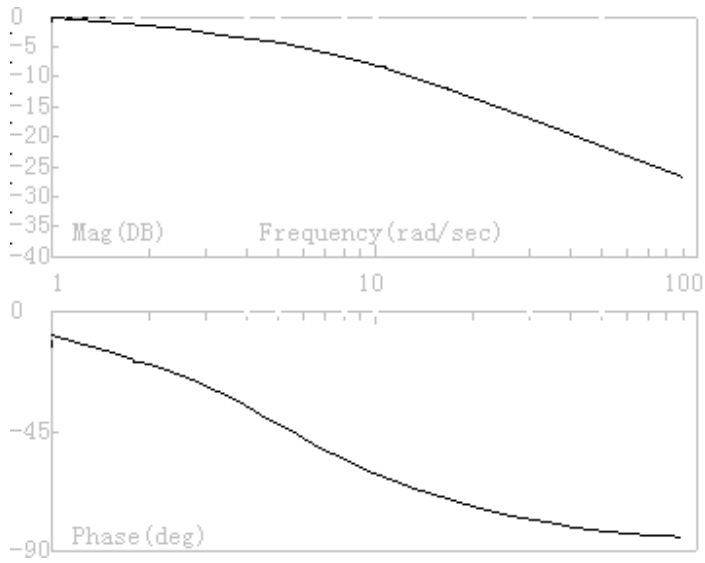


图 3.3.1

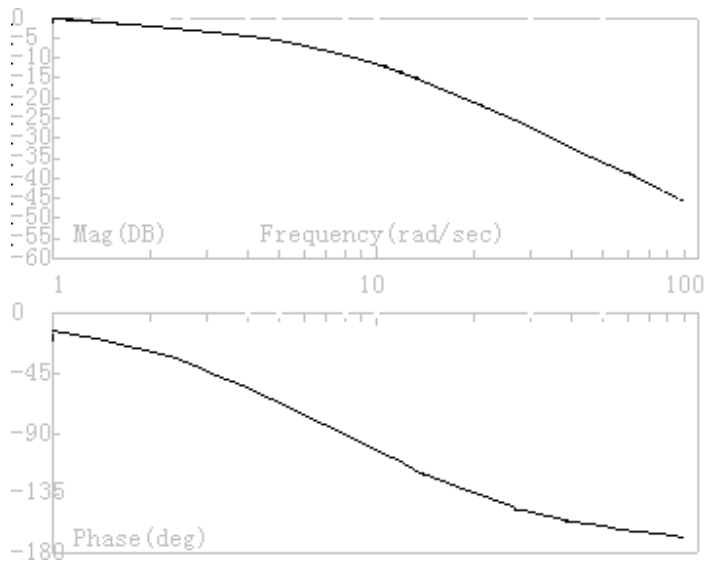


图 3.3.2

注意：(1) 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。
 (2) 比较两个系统的幅频特性斜率及相频特性范围的不同。

四. 实验设备

1. ACCC-I实验台
2. 软件：自动控制理论频域分析实验

五. 实验步骤

1. 熟悉实验设备上的信号源，掌握改变正弦波信号幅值和频率的方法。

利用实验台上的模拟电路单元，参考原理说明中的电路图，设计并连接“一阶惯性环节”模拟电路，如图3.1.2（可用U9+U8连成），或“两个一阶惯性环节串联”得到的二阶系统模拟电路，如图3.2.2（可用U9+U11或U15+U9连成）。

2. 利用虚拟示波器与信号发生器功能，完成一阶惯性环节的频率特性曲线测试。

(1) 硬件连接

将所测试系统模拟电路的 U_i ，连接到数据处理单元U3中的D/A输出通道01（系统输入信号01）；

将所测试系统模拟电路的 U_o ，连到数据处理单元U3中的A/D输入通道I1（采样通道1）；

将系统输入信号01，连到实验台数据处理单元U3中的A/D输入通道I2（采样通道2）；

将运放的锁零G，连接数据处理单元U3的锁零信号G1。

U3单元需与其他单元共地。

接线完成，经检查无误后，再上电。

图3.1.2中的元件参数，不同的实验台可参考以下各组数据进行试取：

U9	输入电阻 $R_0 = 39.6k$	电容 $C_1 = 1\mu$	电阻 $R_1 = 150k$
	输入电阻 $R_0 = 28k$	电容 $C_1 = 1\mu$ 串 2μ	电阻 $R_1 = 150k$
	输入电阻 $R_0 = 200k$	电容 $C_1 = 1\mu$	电阻 $R_1 = 200k$

(2) 启动“频域分析”程序，进入主界面。界面上的操作步骤如下：

①按通道接线情况完成通道设置：

根据上面的实验接线选择通道，选择I1、I2通道作为输入通道，测试信号01作为输出信号。

②测试信号01的设置：“幅值”为5（可以根据实验结果波形来调整），“测试信号”为正弦波，“偏移”为零。

③点击“下载数据”按钮（若无此按钮，则省此操作），将设置的测试信号发送到数据采集系统。点击实验界面右下角的“Start”按钮来启动频率特性测试。测试程序将会从低频率计算到高频，界面右下角有个测试进度条，它将显示测试的进度。最后测试出来频率特性的Bode Plot、Nyquist Plot将在相应的图形控件中显示出来，在同一界面中我们可以同时看到频率特性的两种显示模式：一种是伯德图“Bode Plot”，它包括幅频特性和相频特性；另一种模式就是乃奎斯特图“Nyquist Plot”，又称极坐标图。

④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

3. 利用虚拟示波器与信号发生器功能，完成典型二阶系统开环频率特性曲线的测试。

(1) 硬件电路如图3.2.2。

图3.2.2中的元件参数，不同的实验台可参考以下各组数据进行试取：

U9+U11

输入端电阻 $R_0/R_2 = 26.6k / 180\Omega$	电容 $C_1/C_2 = (1\mu/10\mu) / 1\mu$	电阻 $R_1/R_3 = 100k / 350k$
输入端电阻 $R_0/R_2 = 27.4k/300\Omega$	电容 $C_1/C_2 = (1\mu/10\mu)/1\mu$	电阻 $R_1/R_3 = 200k/ 200k$
输入端电阻 $R_0/R_2 = 28.6k/300\Omega$	电容 $C_1/C_2 = 1\mu/ 1\mu$	电阻 $R_1/R_3 = 200k/ 350k$

或U15+U9

输入端电阻 $R_0/R_2 = 5.1k/10k$	电容 $C_1/C_2 = 1\mu/1\mu$	电阻 $R_1/R_3 = 200k/ 100k$
输入端电阻 $R_0/R_2 = 30k/50k$	电容 $C_1/C_2 = 0.5\mu/ .05\mu$	电阻 $R_1/R_3 = 100k/ 100k$

- (2) 启动“频域分析”程序，进入主界面。界面上的操作步骤参阅步骤2中的(2)。
4. 参考原理说明中的提示，根据测得的频率特性曲线（或数据）求取各自的传递函数。

思考和验证

若将图3.2.2中的C1 和C2 改用0.01 μ F的电容，结果将怎样？为什么？

六. 实验报告

分析实验结果，完成实验报告。

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。

三. 原理说明

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。

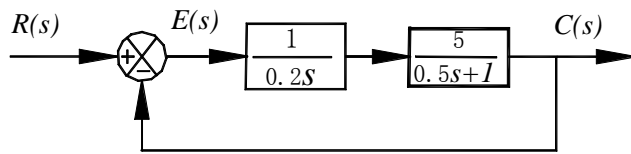


图4. 1. 1

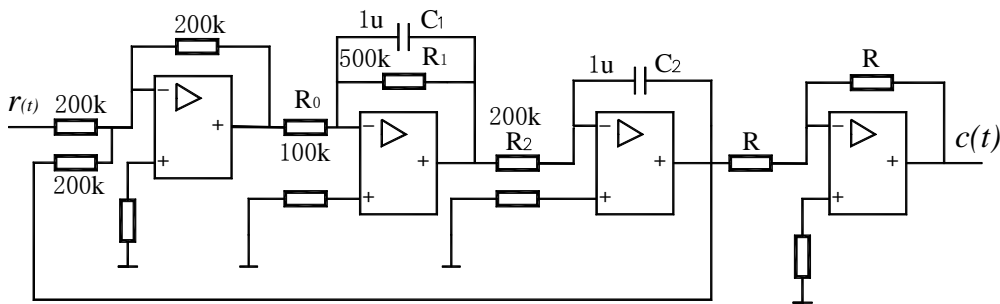


图4. 1. 2

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

$$K_v = 25 \text{ 1/s},$$

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

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

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。

根据未加校正系统的开环传递函数，可以得其相应的对数频率特性。

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。

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. 3 给出已加入串联校正装置的系统模拟电路。

在图 4. 4. 3 中，串联校正装置电路的参数可取 $R_1=390\text{ K}\Omega$, $R_2=R_3=200\text{ K}\Omega$, $R_4=10\text{ K}\Omega$, $C=4.7\mu\text{F}$ 。

5. 校正前与校正后系统的阶跃响应分别如图 4. 4. 4 和图 4. 4. 5 所示。

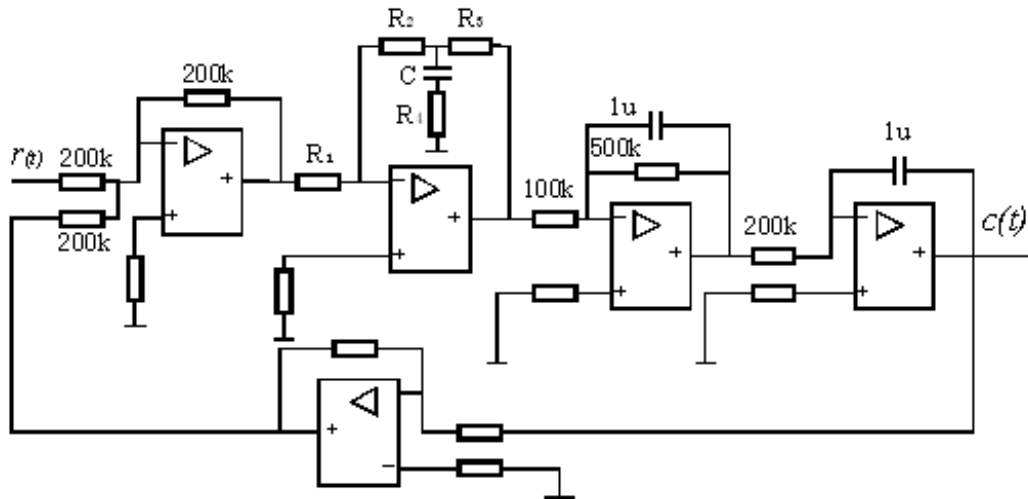


图 4. 4. 3

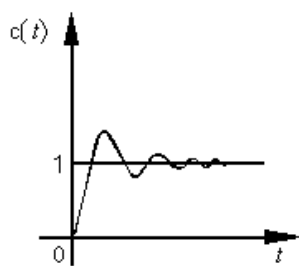


图 4. 4. 4

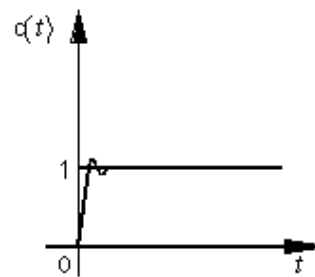


图 4. 4. 5

* 传递函数法

期望的系统开环传递函数除以未加校正二阶闭环系统开环传递函数，可以得到串联校正装置的传递函数。

同样地，可从串联校正装置的传递函数设计其模拟电路，如图4.4.3所示。

四. 实验设备

1. ACCC-I实验台
2. 软件：自动控制理论时域分析实验

五. 实验步骤

1. 利用实验台上的模拟电路单元，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利用实验台上的U9、U11、U15和U8单元，参考原理说明中的电路图4.1.1和图4.1.2，设计并连接一未加校正的二阶闭环系统的模拟电路。

②利用虚拟示波器与信号发生器功能，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。具体操作方法，可参阅“实验一”的实验步骤2。

2. 参阅本实验的原理说明，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. 利用实验台上的模拟电路单元，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利用实验台上的U9、U14、U11、U15和U8单元，参阅原理说明中的图4.4.4，设计并连接一加串联校正后的二阶闭环系统的模拟电路。

②利用虚拟示波器与信号发生器功能，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。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。

六. 实验报告

分析实验结果，完成实验报告。

实验十一 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. ACCT-I 型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。

三. 实验原理

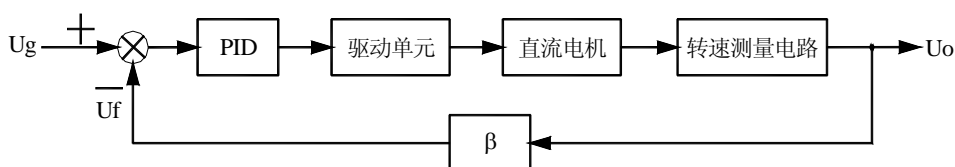


图 11.1 直流电机调速系统框图

图 11.1 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 ACCT-01A 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。

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 11.2 所示，除了实际的模拟对象和转速计表外，其中的模拟电路由 ACCT-01A 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：

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

具体的实验步骤如下：

1. 先将 ACCT-01A 自动控制理论及计算机控制技术和 ACCT-02 电机转速控制的面板上的电源船形开关均放在“OFF”状态。
2. 利用 ACCT-01A 实验板上的单元电路 U9、U15 和 U11，设计并连接如图 11.2 所示的闭环系统。需要注意的是，运放的锁零信号 G 接到-15V。

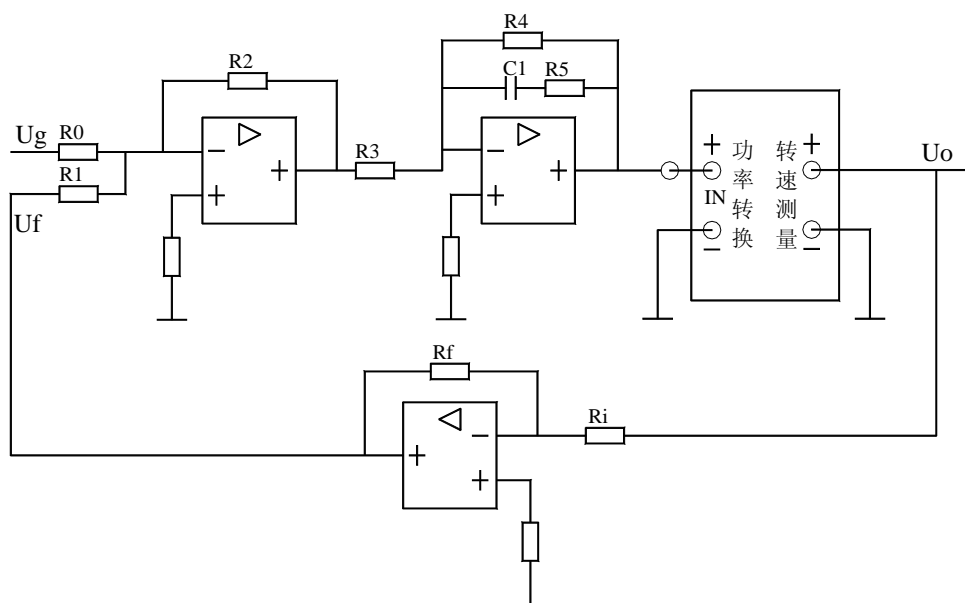


图 11.2 直流电机调速系统接线图

- (1) 将 ACCT-01A 面板上 U1 单元的可调电压接到 U_g ；
 - (2) 给定输出接 PID 调节器的输入，这里参考电路中 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 ACCT-02 电机转速控制面板上的功率转换电路的正极输入端 (IN+)，负极端 (IN-) 接地；
 - (4) 功率转换的输出接到直流电机的电枢两端 (内部已经连接)；
 - (5) 转速测量的输出同时接到电压反馈输入端，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 $\beta=R_f/R_i$ ，从而调节输出的电压 U_o 。
3. 连接好上述线路，全面检查线路后，先合上 ACCT-02 电机转速控制面板的电源船形开关，再合上 ACCT-01A 面板上的船形开关，调整 PID 参数，使系统稳定，同时观测输出电压变化情况。
 4. 在闭环系统稳定的情况下，外加干扰信号，系统达到无静差。如达不到，则根据 PID 参数对系统性能的影响重新调节 PID 参数。
 5. 改变给定信号，观察系统动态特性。

实验十二 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. ACCC-I 型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。

三. 实验原理

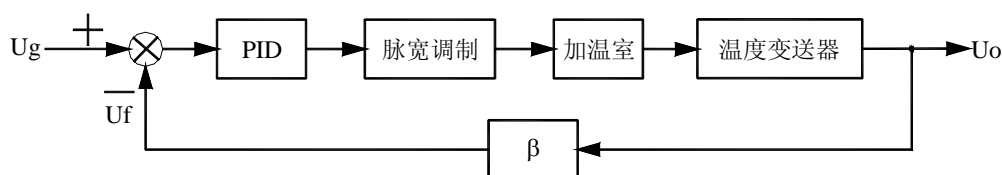


图 12.1 温度控制系统框图

温度控制系统框图如图 12.1 所示, 由给定、PID 调节器、脉宽调制电路、加温室、温度变送器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 ACCT-01A 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 $1.3V \sim 15V$ 。

PID 调节器的输出作为脉宽调制的输入信号, 经脉宽调制电路产生占空比可调 $0 \sim 100\%$ 的脉冲信号, 作为对加温室里电热丝的加热信号。

温度测量采用 Cu50 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 $0 \sim 200^\circ C$, 温度变送器的输出电压范围为 $DC0 \sim 10V$ 。

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 12.2 所示, 除了实际的模拟对象外, 其中的模拟电路由 ACCT-01A 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:

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

具体的实验步骤如下:

1. 先将 ACCT-01A 自动控制理论及计算机控制技术和 ACCT-02 温度的检测和控制面板电

源船形开关均放在“OFF”状态

2. 利用 ACCT-01A 实验板上的单元电路 U9、U15 和 U10，设计并连接如图 12.2 所示的闭环系统。需注意的是运放的锁零信号 G 接-15V。

(1) 将 ACCT-01A B 面板上 U1 单元的可调电压接到 U_g ；

(2) 给定输出接 PID 调节器的输入，这里参考电路中 R4 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 ACT-WKA 面板上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 Cu50 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_0 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. 连接好上述电路，全面检查线路后，先合上 ACCT-02 实验面板上的电源船形开关，再合上 ACCT-01A 面板上的船形开关，调整 PID 参数，使系统稳定，同时观测输出电压变化情况。

4. 在闭环系统稳定的情况下，外加干扰信号，系统达到无静差。如达不到，则根据 PID 参数对系统性能的影响重新调节 PID 参数。

5. 改变给定信号，观察系统动态特性。

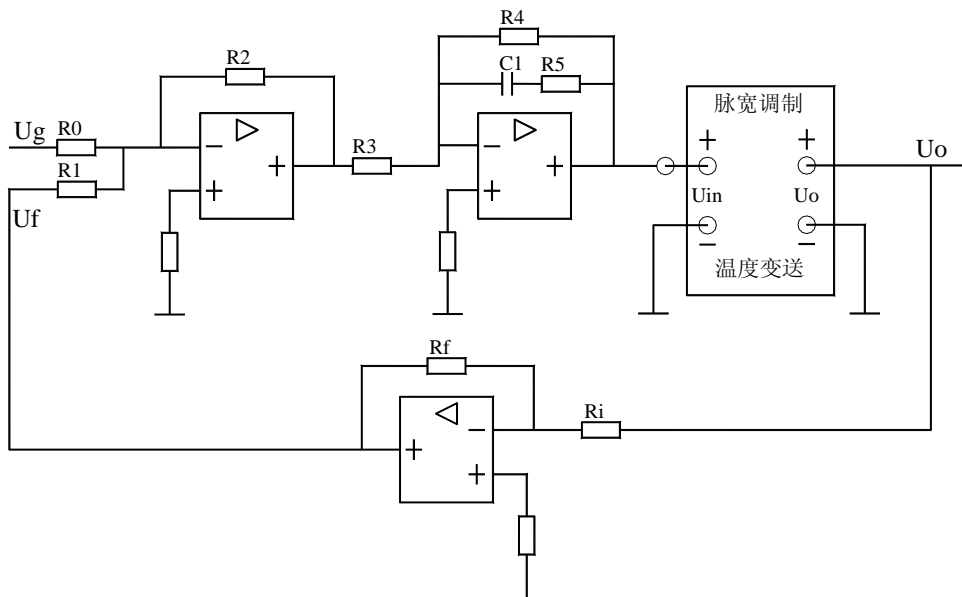


图 12.2 温度控制系统接线图

附录：

一、ACCC-I 实验台简介

ACCC-I控制理论实验台主要由ACCT-01A自动控制理论和计算机控制技术、ACCT-02物理对象——电机转速与温度控制、ACCT-03物理对象——液位控制等3个部分组成。

其中ACCT-01A自动控制理论和计算机控制技术由电源部分U1单元、元器件单元U2、数据处理单元U3、非线性单元U5~U7以及模拟电路单元U8~U16等共15个单元组成。

(1) 电源单元U1

包括电源开关、保险丝、+5V、-5V、+15V、-15V、0V以及1.3V~15V可调电压的输出，它们提供了实验设备所需的所有工作电源。

(2) 元器件单元U2

单元提供了实验所需的电容、电阻与电位器，另提供插接电路供放置自己选定大小的元器件。

(3) 数据处理单元U3

内含以C8051F060为核心组成的数据处理卡（含软件），通过USB口与上位PC进行通讯。内部包含八路A/D采集输入通道和两路D/A输出通道。与上位机一起使用时，可同时使用其中两个输入和两个输出通道。结合上位机软件，用以实现虚拟示波器、测试信号发生器以及数字控制器功能。

(4) 非线性环节单元U5、U6和U7

U5，U6，U7分别用于构成不同的典型非线性环节。

单元U5可通过拨键S4选择具有死区特性或间隙特性的非线性环节模拟电路。

单元U6为具有继电特性的非线性环节模拟电路。

单元U7为具有饱和特性的非线性环节模拟电路。

(5) 模拟电路单元U8~U16

U8~U16为由运算放大器与电阻，电容等器件组成的模拟电路单元。其中U8为倒相电路，实验时通常用作反号器。U9~U16的每个单元内，都有用场效应管组成的锁零电路和运放调零电位器。

二、自动控制理论软件概述

控制理论实验上位机程序，是为求是公司生产的自动控制理论实验装置配套的上位机控制程序。本软件必须与自动控制理论实验设备(实验装置)配套使用，实验设备上配备有USB2.0接口，使用本软件前，计算机必须与实验设备通过USB口进行连接，并合上实验设备电源。脱离实验设备，本软件将无法正常使用。

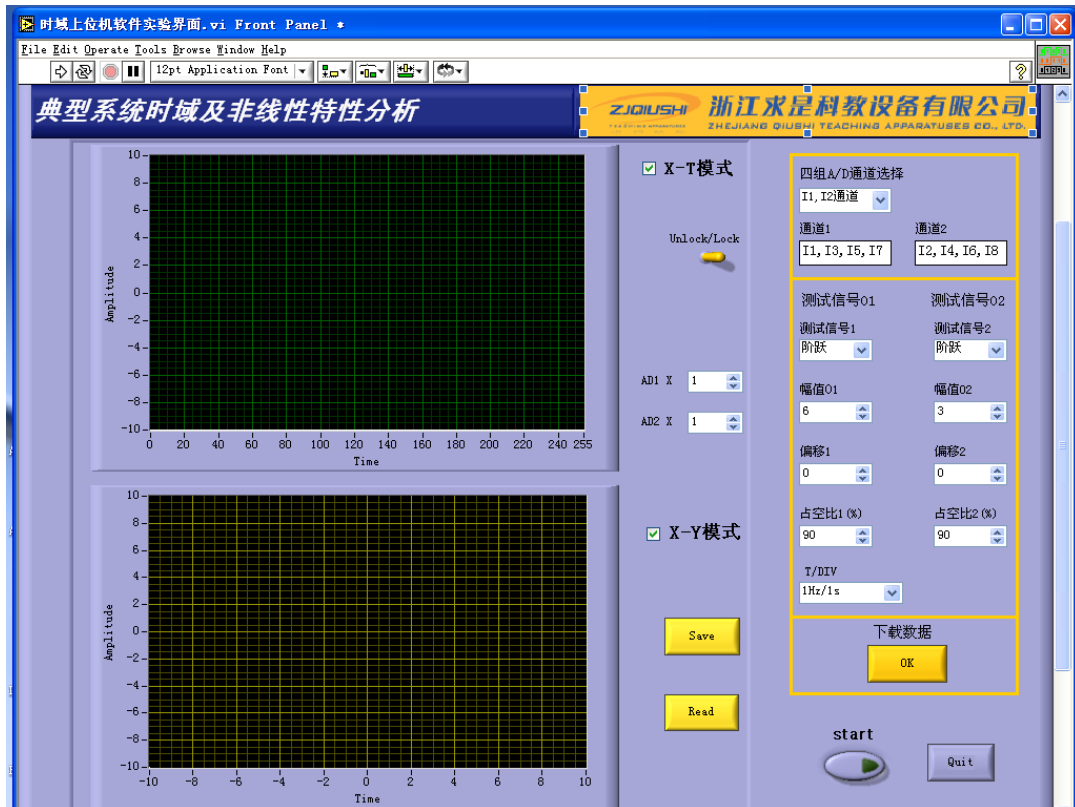


图 1.1 自动控制理论时域及非线性特性分析主界面

自动控制理论实验上位机程序主界面 (LabVIEW 上位机界面) 如图 1.1 所示, 另外实验三 (频域特性分析) 有独立 LabVIEW 上位机界面, 如图 1.2 所示, 实验九和实验十 (采样控制) 也有独立 LabVIEW 上位机界面, 如图 1.3 所示。

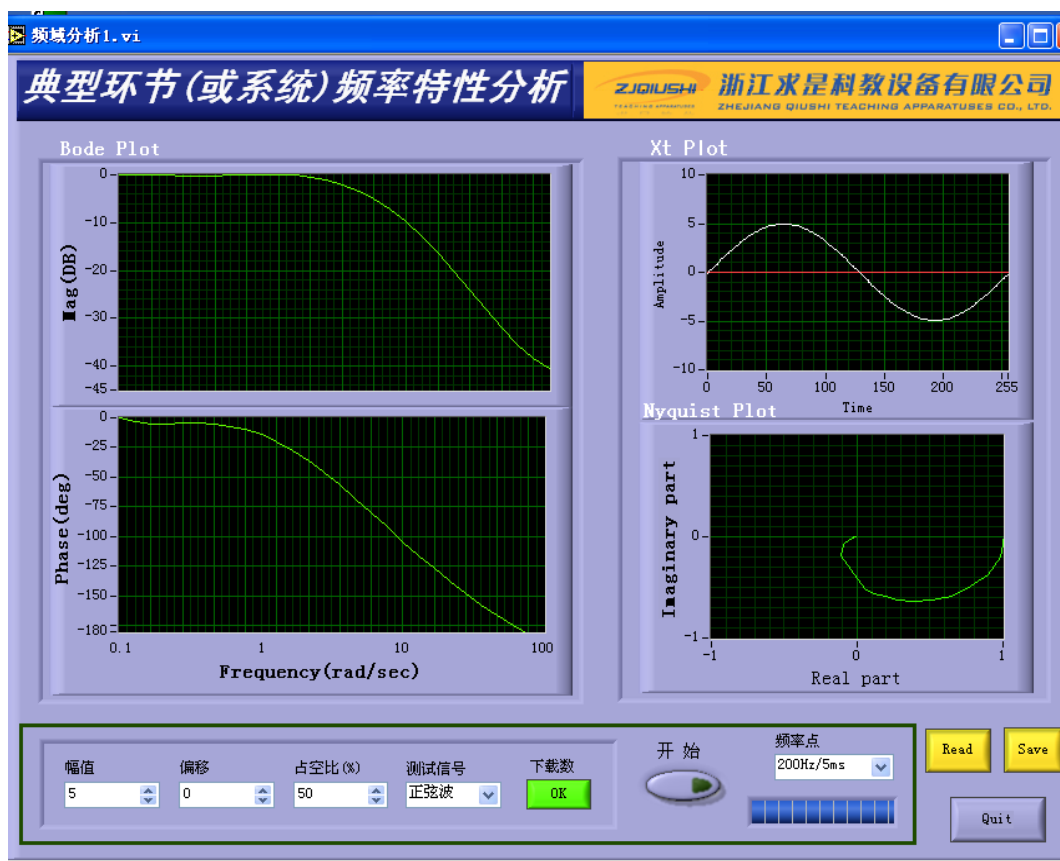


图 1.2 自动控制理论频域分析实验界面

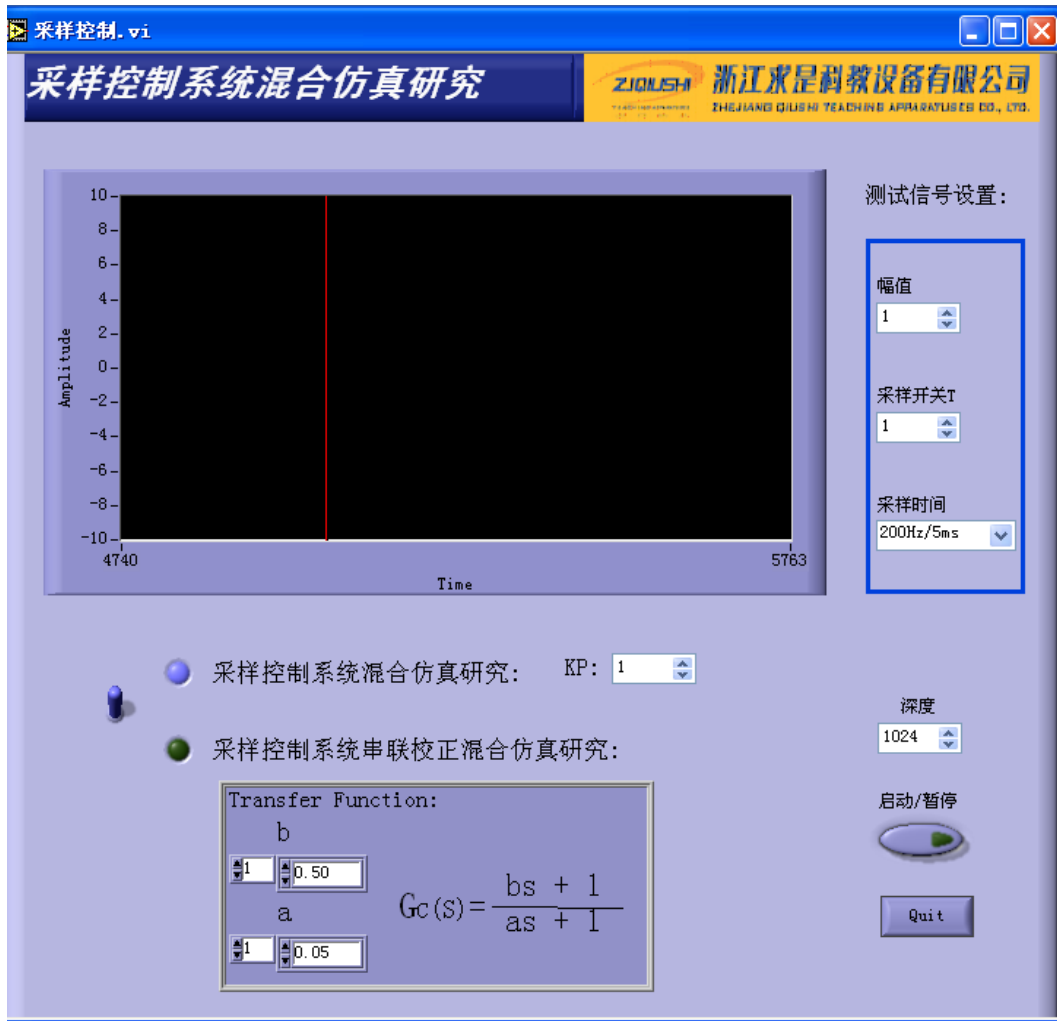


图 1.3 自动控制理论采样控制实验界面

自动控制理论实验设备，内部包含有以 C8051F060 为核心的数据处理系统。上位机控制程序可以通过该采集系统完成 8 通道数据采集输入（同时采集最多 2 通道）和 2 通道检测波形输出（同时输出最多 2 通道），可以完成包括控制理论实验所需的检测信号发生、数据采集和控制任务，并支持多种波形显示方式和后期图像数据处理。