

---

# 控制工程基础实验 任务书



机械工程实验教学中心  
2023 年

---

## 目录

|                      |    |
|----------------------|----|
| 概述                   | 3  |
| 一、实验硬件系统构成           | 3  |
| 二、系统上位机软件的功能与使用方法    | 4  |
| 三、实验注意事项             | 4  |
| 四、计算机控制实验软件操作注意事项：   | 4  |
| 实验一 典型环节的电路模拟与软件仿真研究 | 6  |
| 一、实验目的               | 6  |
| 二、实验步骤               | 6  |
| 三、实验内容               | 7  |
| 实验二 典型系统动态性能和稳定性分析   | 16 |
| 一、实验目的               | 16 |
| 二、实验步骤               | 16 |
| 三、实验内容               | 16 |
| 实验三 典型环节（或系统）的频率特性测量 | 20 |
| 一、实验目的               | 20 |
| 二、实验原理               | 20 |
| 三、实验步骤及实验内容          | 22 |
| 实验四 线性系统串联校正         | 26 |
| 一、实验目的               | 26 |
| 二、实验步骤               | 26 |
| 三、实验内容               | 26 |

---

# 概述

## 一、实验硬件系统构成

实验系统由上位 PC 微机（含实验系统上位机软件）、实验装置、USB2.0 通讯线等组成。实验装置内装有以 C8051F060 芯片（含数据处理系统软件）为核心构成的数据处理卡，通过 USB 口与 PC 微机连接。

### 1. 实验装置简介

控制理论实验装置主要由电源部分 U1 单元、与 PC 机进行通讯的数据处理 U3 单元、元器件单元 U4、非线性单元 U5~U7 以及模拟电路单元 U9~U16 等共 14 个单元组成，详见附图。

#### （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，它们提供了实验装置所需的所有工作电源。

#### （2）信号、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。可以产生频率与幅值可调的周期方波信号、周期斜坡信号、周期抛物线信号以及正弦信号，并提供与周期阶跃、斜坡、抛物线信号相配合的周期锁零信号。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。

#### （3）元器件单元 U4

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。

#### （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（所有锁零 G 内部是互通的）和运放调零电位器（出厂已调好，无需调节）。

## 二、系统上位机软件的功能与使用方法

详见《自动控制理论实验上位机程序使用说明书》。

## 三、实验注意事项

1. 实验前 U9~U16 单元内的运放需要调零（出厂前已经调整过）。
2. 运算放大器边上的锁零点 G 接线要正确。在需要锁零时（主要是典型环节的信号观察实验），可与输入信号同步的锁零信号相连。锁零 G 与 U3 单元的锁零信号 G1 相连（同步对应 O1 信号），G2 与此类似（同步对应 O2）；**一般情况下不需要锁零信号。不需要锁零时，请把 G 与-15V 相连。**
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，实验装置上的运放都是**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 2 路 A/D 输入和 1 路 D/A 输出,具体采用“I1~I8”中哪一个通道，决定于控制箱上的实际连线和软件的设置。
5. 受数据处理单元 U3 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。
6. 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。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。这个在实验三中，做频率特性实验要求比较严格（频响信号接 I2，原信号接 I1）。

## 四、计算机控制实验软件操作注意事项：

- 1、打开已经准备好的实验项目后系统进入运行装态。
- 2、按下“启动暂停”按键程序开始运行,再次按下该按键程序暂停。按“退出”键使系统退出子 VI 运行状态。



3、测试信号设置选项框中可以设置发出的波形的种类、幅值、频率、占空比、采样开关 T、采样时间。


**测试信号设置：**

| 测试信号1：       | 测试信号2：       |
|--------------|--------------|
| 阶跃           | 阶跃           |
| 幅值1：<br>5    | 幅值2：<br>5    |
| 偏移1：<br>0    | 偏移2：<br>0    |
| 占空比1%：<br>50 | 占空比2%：<br>50 |

频率/周期：1Hz/1s      四组A/D通道选择：I1, I2通道

4、按下“退出”按键或图标，程序退出运行。



5、按下“”图标，程序关闭。

# 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. 设计各种典型环节的模拟电路，掌握各种典型环节的传递函数及其特性。
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，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。

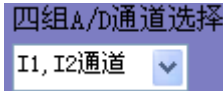
## 二、实验步骤


1. 利用实验箱上的模拟电路单元，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。

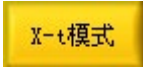
首先必须在熟悉“时域特性”上位机界面的操作，充分利用上位机提供的虚拟示波器与信号发生器功能。为了利用上位机提供的虚拟示波器与信号发生器功能。接线完成，经检查无误，再给实验装置上电后，打开时域特性的程序，启动上位机程序，进入主界面。

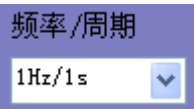
软件界面上的操作步骤如下：

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。

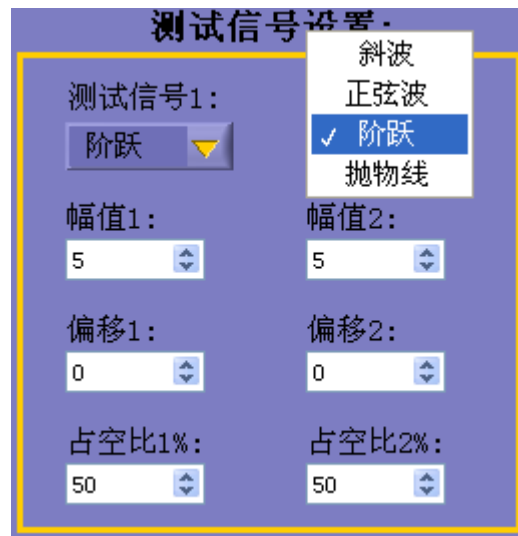
②硬件接线完毕后,检查 USB 口通讯连线和实验装置电源后，运行上位机软件程序，如果有问题请求指导教师帮助。


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，在上位机软件中点击右边的  “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，截图保存。

3. 分析实验结果，完成实验报告。

### 三. 实验内容

#### 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：
$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = K$$

其方块图和模拟电路，分别如图 1.1.1、图 1.1.2 所示。

实验参数取  $R_0=100k$ ， $R_1=200k$ ， $R=15k$ 。

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，做实验之前，保证反相器的放大倍数为 1（一般 U8 单元输入端的可调电阻逆时针旋转到底（调至最小）即可），可以将实验装置上的 U3 单元上的

O1 接入到 U8 单元的输入端，上位机时域界面设置 1V 的输入，测量 U8 单元的输出电压是否为-1V，如果不是则调节 U8 单元输入端的 10K 可调电阻，使输入和输出电压大小相同，极性相反，保证反相器的放大倍数为 1，也可根据实验要求学生自己改变反相器放大倍数。

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：

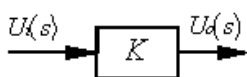


图1.1.1

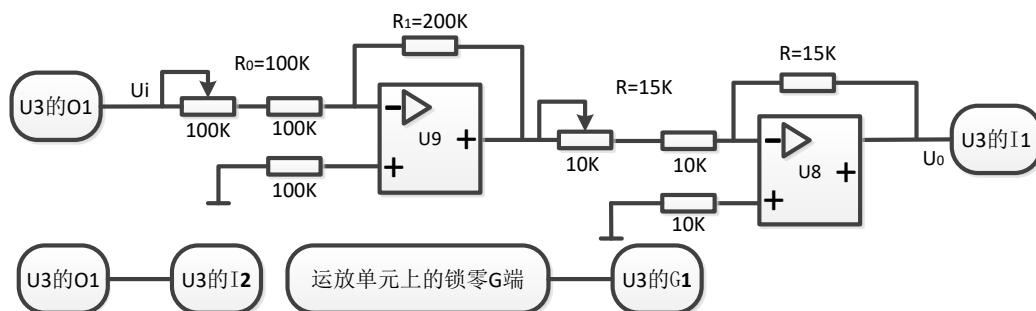


图1.1.2

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 1：1~5V（偏移 0）

频率/周期：1s，占空比不限，运行程序，直接进行实验。

**实验任务：**

|              |                         |                         |
|--------------|-------------------------|-------------------------|
|              | U9 单元输入端的可调电阻 R0 为 100K | U9 单元输入端的可调电阻 R0 为 200K |
| 比例传递函数公式     | 比例 K 与电阻 R0、R1 之间的数学公式  |                         |
| 比例系数 K 值     |                         |                         |
| 阶跃响应图        |                         |                         |
| Matlab 阶跃仿真图 |                         |                         |
| 实验分析与思考      |                         |                         |

## 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： $\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{Ts}$

其方块图和模拟电路，分别如图 1.2.1、图 1.2.2 所示，

实验参数取  $R_0=100k$ ， $C=1\mu F$ ， $R=15k$ 。

注明：接线前保证 U8 反相器放大倍数为 1，所有运放单元的+端所接的电阻均已经内部接好，实验时不需外接。

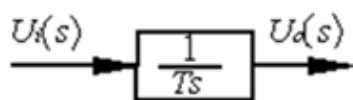


图1.2.1

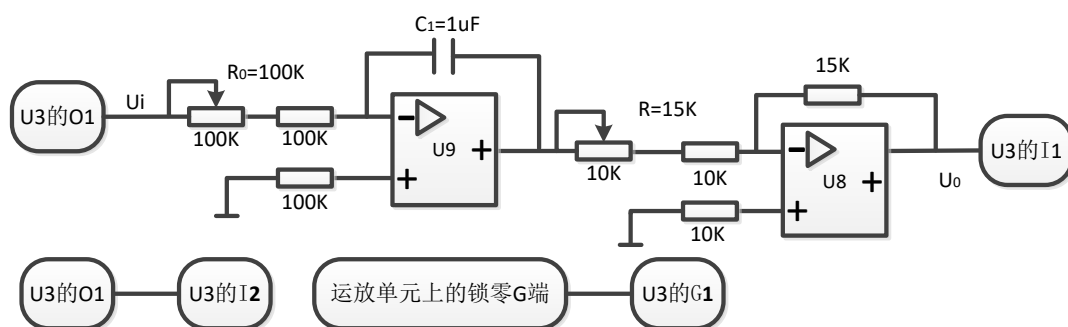


图1.2.2

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 1：1~5V

频率/周期：1s，占空比不限，运行程序，直接进行实验。

**实验任务：**

|              |                                       |                                       |   |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
|              | U9 单元输入端的可调电阻 $R_0=100K$ ， $C_1=1\mu$ | U9 单元输入端的可调电阻 $R_0=200K$ ， $C_1=1\mu$ | U9 单元输入端的可调电阻 $R_0=100K$ ， $C_1=4.7\mu$ |
| 积分传递函数公式     | 积分系数与电阻 $R_0$ 、 $C_1$ 等之间的数学公式        |                                       |   |
| 积分 T 值       |                                       |                                       |   |
| 阶跃响应图        |                                       |                                       |   |
| Matlab 阶跃仿真图 |                                       |                                       |   |
| 数据分析与思考      |                                       |                                       |   |
| 实验思考         | 调节输入信号的幅值、占空比（从小到大），观察图形变化，思考变化的原因。   |                                       |   |

### 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：

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

其方块图和模拟电路，分别如图 1.3.1、图 1.3.2 所示，

实验参数取  $R_0=200k$ ， $R_1=200k$ ， $C_1=1\mu F$ ， $R=15k$ 。

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，保证反相器 U8 的放大倍数为 1，也可根据实验要求改变反相器放大倍数。

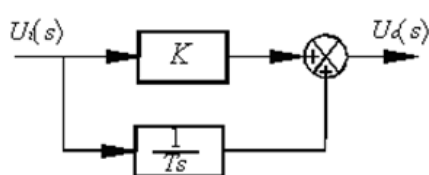


图1.3.1

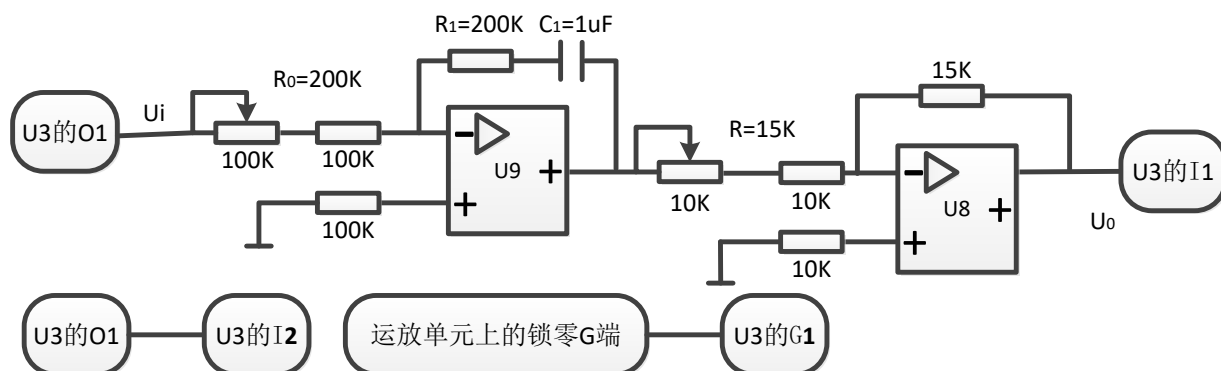


图1.3.2

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，占空比不限，运行程序，直接进行实验。

**实验任务：**

|              |                                       |                                       |   |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|
|              | U9 单元输入端的可调电阻 $R_0=100K$ ， $C_1=1\mu$ | U9 单元输入端的可调电阻 $R_0=200K$ ， $C_1=1\mu$ | U9 单元输入端的可调电阻 $R_0=200K$ ， $C_1=4.7\mu$ |
| 比例积分传递函数     | 与电阻 $R_0$ 、 $R_1$ 、 $C_1$ 等之间的数学公式    |                                       |   |
| 比例 K，积分 T 值  |                                       |                                       |   |
| 阶跃响应图        |                                       |                                       |   |
| Matlab 阶跃仿真图 |                                       |                                       |   |

|      |   |
|------|---|
| 数据分析 | K、T 值对输出波形产生了怎么样的影响。                        |
| 实验思考 | 将输入信号的周期调至最大，调节幅值、占空比（从小到大），观察图形变化，思考变化的原因。 |

#### 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： $\frac{U_o}{U_i} = K(1 + Ds)$

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  $K = \frac{R_1 + R_2}{R_0}$ ， $D = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C$ ，实验参数取  $R_0=10k$ ， $R_1=10k$ ， $R_2=10k$ ， $R_3=200\Omega$ ， $C=1\mu F$ ， $R=15k$ 。

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：

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

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

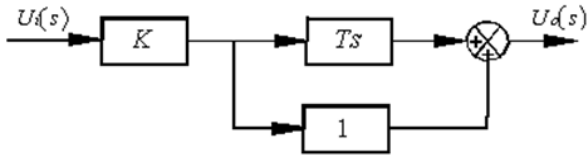


图1. 4. 1

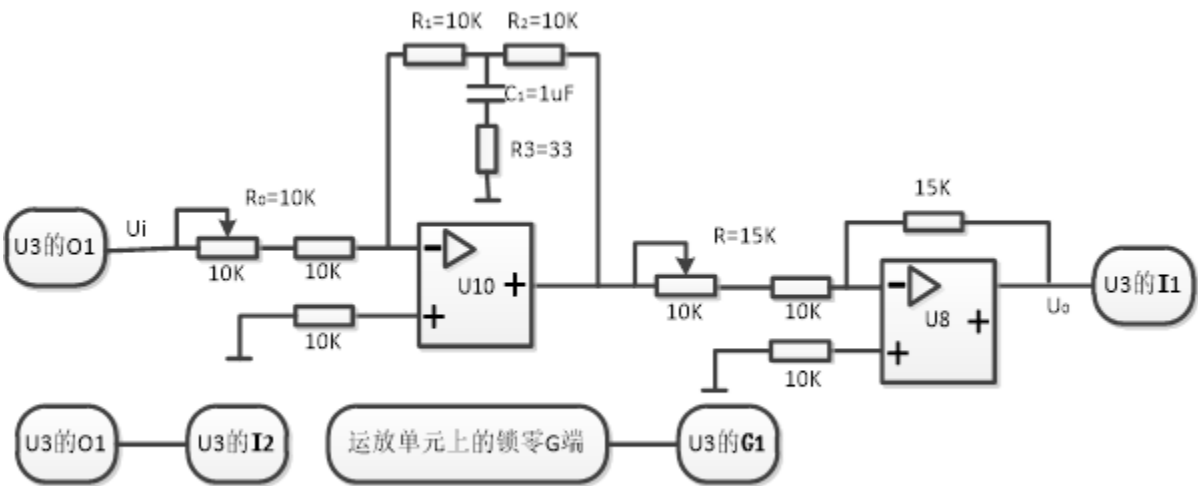


图1.4.2

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 1：1~3V（偏移 0）

频率/周期：1s，运行程序，直接进行实验。

实验任务：

|              |                                       |                                 |                                   |
|--------------|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
|              | U10 单元输入端的可调<br>电阻 R0=10K，C1=1u       | U10 单元输入端的可调<br>电阻 R0=20K，C1=1u | U10 单元输入端的可调<br>电阻 R0=10K，C1=4.7u |
| 比例微分传递函数     | 与电阻 R0、R1、R2、C1 等之间的数学公式              |                                 |                                   |
| 比例 K，微分 D 值  |                                       |                                 |                                   |
| 阶跃响应图        |                                       |                                 |                                   |
| Matlab 阶跃仿真图 |                                       |                                 |                                   |
| 数据分析         | K、D 值对输出波形产生了怎么样的影响                   |                                 |                                   |
| 实验思考         | 调节输入波形的周期、幅值、占空比（从小到大），观察图形变化，思考变化的原因 |                                 |                                   |

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

其方块图和模拟电路，分别如图 1.5.1、图 1.5.2 所示，实验参数取  $R_0=200k$ ， $R_1=200k$ ， $C=1uF$ ， $R=15k$ ，保证反相器 U8 的放大倍数为 1，也可根据实验要求学生自己改变反相器放大倍数。

。

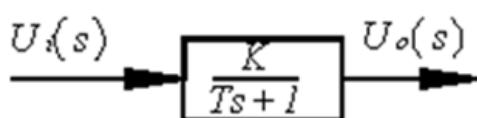


图 1.5.1

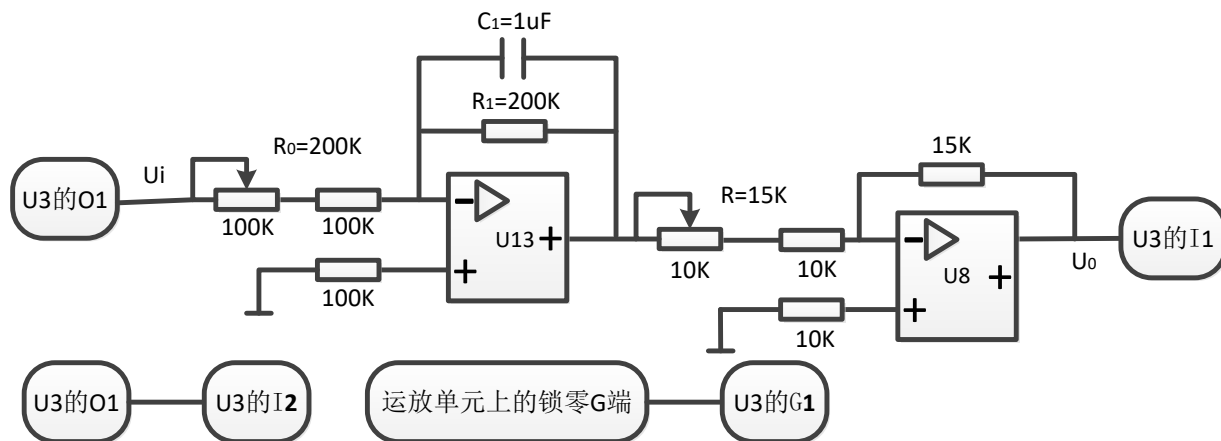


图1.5.2

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，运行程序，直接进行实验。

**实验任务：**

|              | U13 元输入端的可调电阻 R0=100K, C1=1u  | U13 元输入端的可调电阻 R0=200K, C1=1u | U133 元输入端的可调电阻 R0=100K, C1=4.7u |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 惯性环节传递函数     | 与电阻 R0、R1、C1 等之间的数学公式         |                              |                                 |
| 比例 K、积分 T 公式 |                               |                              |                                 |
| 阶跃响应图        |                               |                              |                                 |
| Matlab 阶跃仿真图 |                               |                              |                                 |
| 数据分析         |                               |                              |                                 |
| 实验思考         | 调节幅值、占空比（从小到大），观察图形变化，思考变化的原因 |                              |                                 |

## 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  $R_0=200k, R_1=100k, R_2=10k, R_3=$

$1k, C_1=1uF, C_2=10uF, R=15k$ 。

实际 PID 环节的传递函数为：

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

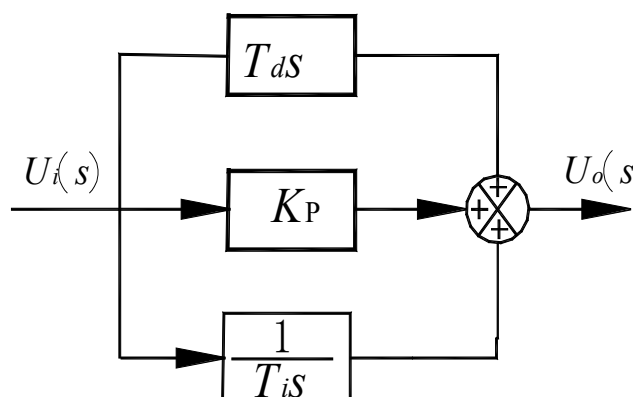


图1.6.1

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 R<sub>0</sub> 的总阻值为 200K；其中，R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub>、C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 均在 U14 单元模块上。

保证反相器 U8 的放大倍数为 1，也可根据实验要求学生自己改变反相器放大倍数。  
实验接线如下图：

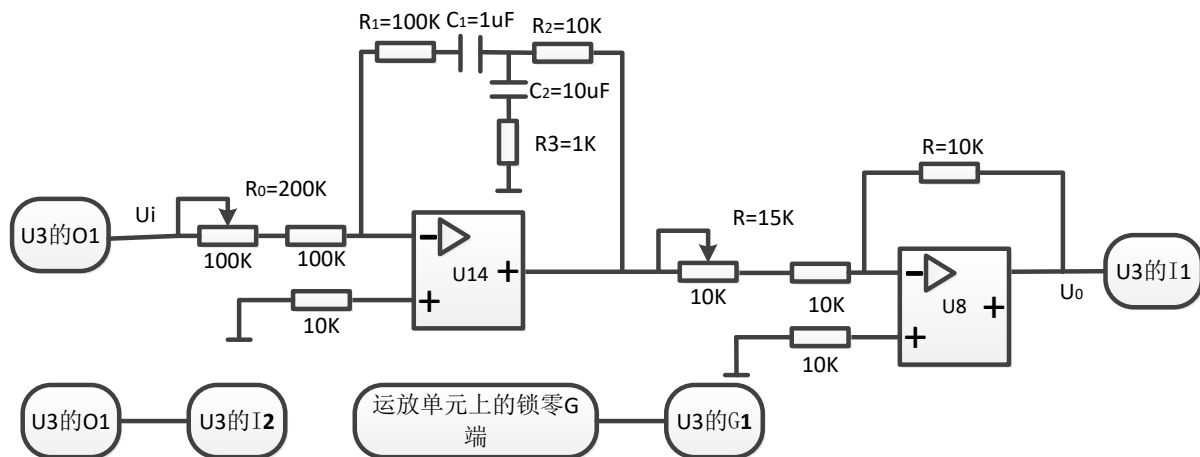


图 1.6.2

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。

**实验任务：**

|  |         |          |         |          |
|--|---------|----------|---------|----------|
|  | 按上述阻容接线 | 通过改变阻容，改 | 改变阻容，改变 | 通过改变阻容，改 |
|--|---------|----------|---------|----------|

|                          |   |                                 |                               |                                 |
|--------------------------|---|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
|                          |   | 变 $K_p$ 值, $T_i$ 、 $T_d$ 尽量保持不变 | $T_i$ 值, $K_p$ 、 $T_d$ 尽量保持不变 | 变 $T_d$ 值, $K_p$ 、 $T_i$ 尽量保持不变 |
| $K_p$ , $T_i$ , $T_d$ 的值 |   |                                 |                               |                                 |
| 阶跃响应图                    |   |                                 |                               |                                 |
| Matlab 阶跃仿真图             |   |                                 |                               |                                 |
| 数据分析                     | 比例、积分、微分参数对输出波形的影响                              |                                 |                               |                                 |
| 实验思考                     | 将输入信号的周期调至最大, 调节幅值、占空比 (从小到大), 观察图形变化, 思考变化的原因。 |                                 |                               |                                 |

---

## 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. 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。
3. 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。

### 二、实验步骤

1. 利用实验装置上的模拟电路单元，参考本实验中的图 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。

### 三、实验内容

#### 1. 典型二阶系统

取二阶系统的模拟电路如图 2.1.1 所示，实验参数取  $R_0=R_f=200k$ ， $R_1=200k$ ， $R_2=100k$ ， $C_1=1\mu F$ ， $C_2=1\mu F$ ， $R=15k$ 。 $R_x$  为元件库 U4 单元的 220K 可调电阻（写传递函数时当做未知量）。

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 R1 的总阻值为 200K；C1 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 R2 的总阻值为 100K；C2 位于 U15 单元上。

U8 单元为反相器单元，做实验之前，保证反相器的放大倍数为 1，也可根据实验要求学生自己改变反相器放大倍数。

**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。

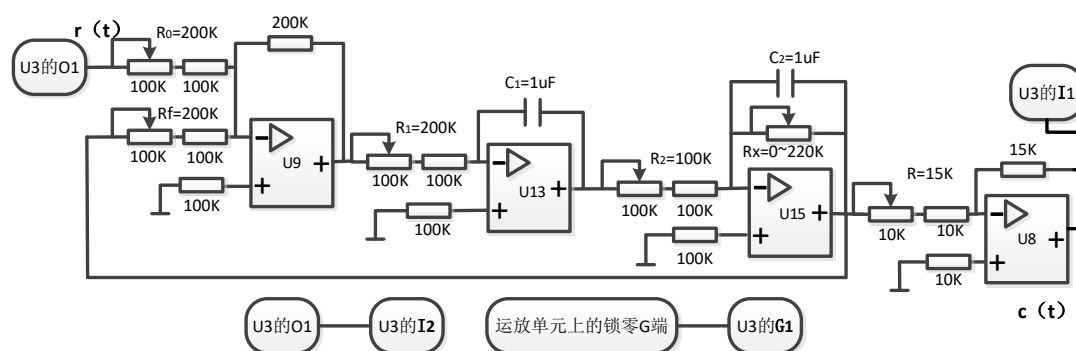


图2.1.1

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，完成下表内容：

| 记录项                      | 详细要求  |
|--------------------------|---|
| 开环传递函数                   | 根据电路图 2.1.2 写出函数表达式（提示：由积分+惯性环节组成）                                      |
| 闭环传递函数                   | 写成如下格式<br>$W(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$ |
| $\xi$ 、 $\omega_n$ 表达式   | 根据电路图 2.1.2 的取值写出函数表达式  |
| 调节 Rx 使得二阶系统在过阻尼状态       | 1、过阻尼时的阶跃响应<br>2、 $\xi$ 、 $\omega_n$ 的值                                 |
| 调节 Rx 使得二阶系统在临界阻尼状态      | 1、临界阻尼时的阶跃响应<br>2、 $\xi$ 、 $\omega_n$ 的值                                |
| 调节 Rx 使得二阶系统在欠阻尼状态       | 1、欠阻尼时的阶跃响应<br>2、 $\xi$ 、 $\omega_n$ 的值                                 |
| Matlab 仿真二阶系统过阻尼、临界阻尼、欠阻 | 1、各状态的阶跃响应  |

|      |   |
|------|---|
| 尼状态  | 2、与实验结果对比，验证实验结果的正确性  |
| 实验思考 | 1、过阻尼、临界阻尼、欠阻尼各状态的 $\xi$ 取值范围<br>2、 $\xi$ 的变化对动态性能的影响<br>3、二级系统为什么会震荡 |

## 2. 典型三阶系统

取三阶系统的模拟电路如图 2.2.1 所示：

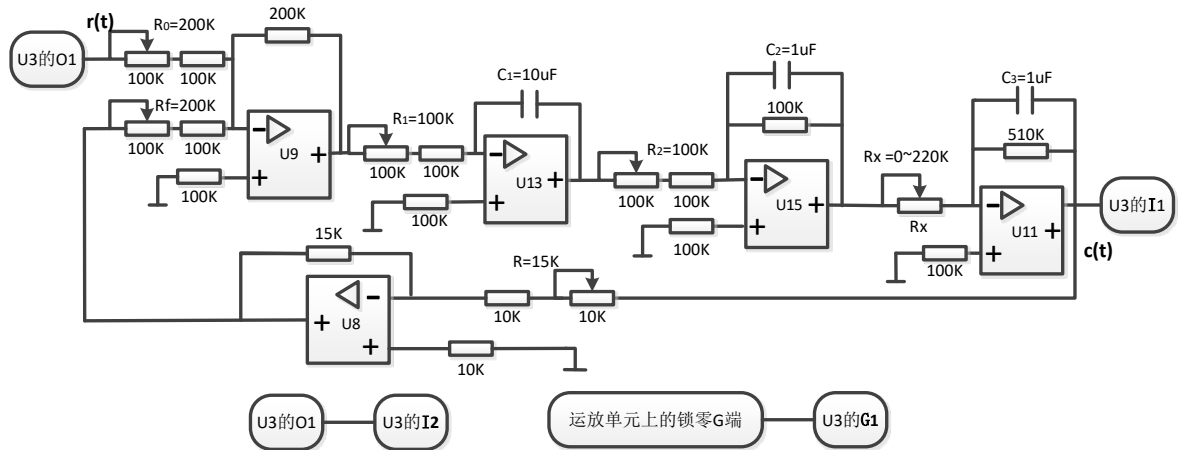


图2.2.1

实验参数取  $R_0 = R_f = 200k$ ,  $R_1 = 100k$ ,  $R_2 = 100k$ ,  $C_1 = 10\mu F$ ,  $C_2 = C_3 = 1\mu F$ ,  $R = 15k$ 。  
 $R_x$  为元件库 U4 单元的 220K（或 1M）可调电阻（写传递函数时当做未知量）。

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，做实验之前，保证反相器的放大倍数为 1，也可根据实验要求学生自己改变反相器放大倍数。

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：9.1s（占空比 90%），运行程序，直接进行实验，完成下表内容：

| 记录项 | 详细要求 |
|-----|------|
|-----|------|

|   |                                       |
|---|---------------------------------------|
| 开环传递函数                                    | 根据电路图 2.2.2 写出函数表达式（提示：由积分+惯性+惯性环节组成） |
| 系统特征方程                                    |                                       |
| 系统不稳定时 $R_x$ 的取值范围                        | 根据劳斯判据计算 $R_x$                        |
| 系统临界稳定时 $R_x$ 的取值范围                       | 根据劳斯判据计算 $R_x$                        |
| 系统稳定时 $R_x$ 的取值                           | 根据劳斯判据计算 $R_x$                        |
| $R_x$ 可利用模拟电路单元的 220K（或 1M）电位器，改变 $R_x$ 值 | 测试系统分别处于不稳定、临界稳定和稳定时的阶跃响应             |
| Matlab 仿真三阶系统的不稳定、临界稳定、稳定状态               | 1、各状态的阶跃响应<br>2、与实验结果对比，验证实验结果的正确性    |
| 实验思考                                      |                                       |

# 实验三 典型环节（或系统）的频率特性测量

## 一、实验目的

1. 学习和掌握用实验方法完成一阶惯性环节的频率特性曲线测试。
2. 学习和掌握用实验方法完成典型二阶系统频率特性曲线的测试。
3. 学习根据实验测得的频率特性曲线求取各自的传递函数。
5. 用软件仿真方法求取一阶惯性环节和典型二阶系统的频率特性并与实验所得结果比较。

## 二、实验原理

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  $\omega_k$ ，可以确定环节的时间常数  $T$ ， $T = -\frac{\text{tg}\varphi(\omega_k)}{\omega_k}$ 。(3-2-2)

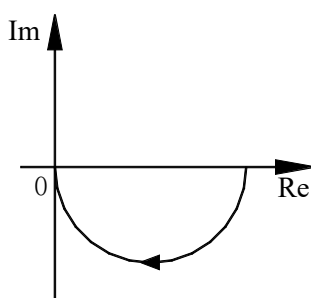


图3.1

实验用一阶惯性环节的模拟电路设计参阅下图 3.2，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。

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。

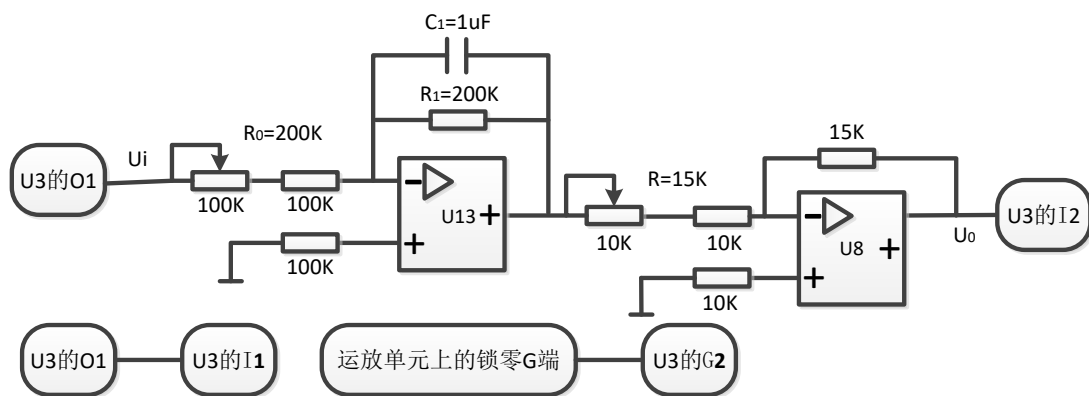


图3.2

## 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。

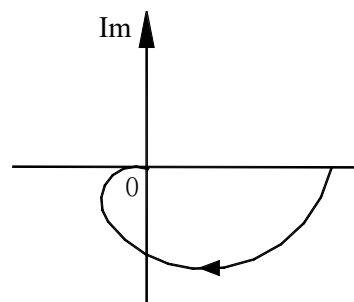


图3.3

根据上述幅相频率特性表达式，有

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

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

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

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

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

如已测得二阶环节的幅相频率特性，则  $r(0)$ 、 $\omega_k$ 、 $\phi_k$  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  $K$ 、 $T$ 、 $\xi$ ，并可根据计算所得  $T$ 、 $\xi$  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的模拟电路设计参阅下图 3.4，其中参数为  $R_0=100\text{K}\Omega$ ， $R_1=100\text{K}\Omega$ ， $R_2=200\text{K}\Omega$ ， $R_3=200\text{K}\Omega$ ， $C_1=C_2=1\mu\text{F}$ ，参数根据实验要求可以自行搭配。

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。

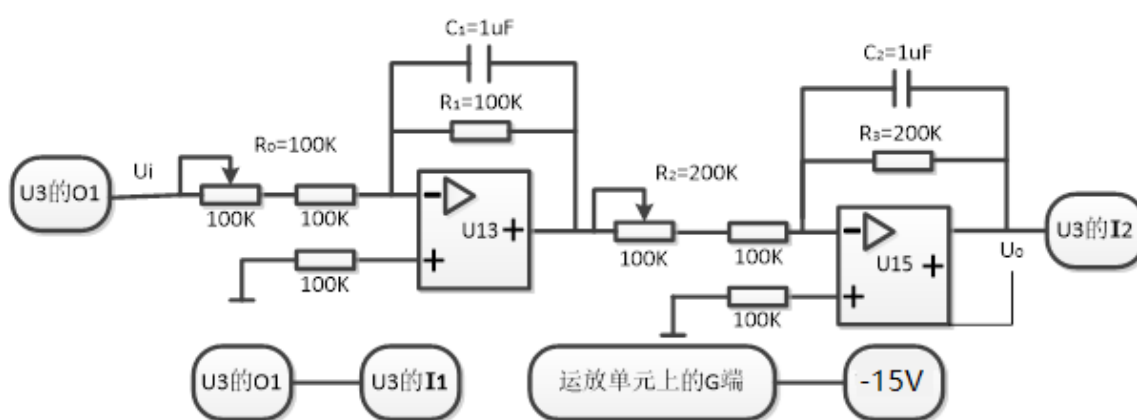


图3.4

### 三、实验步骤及实验内容

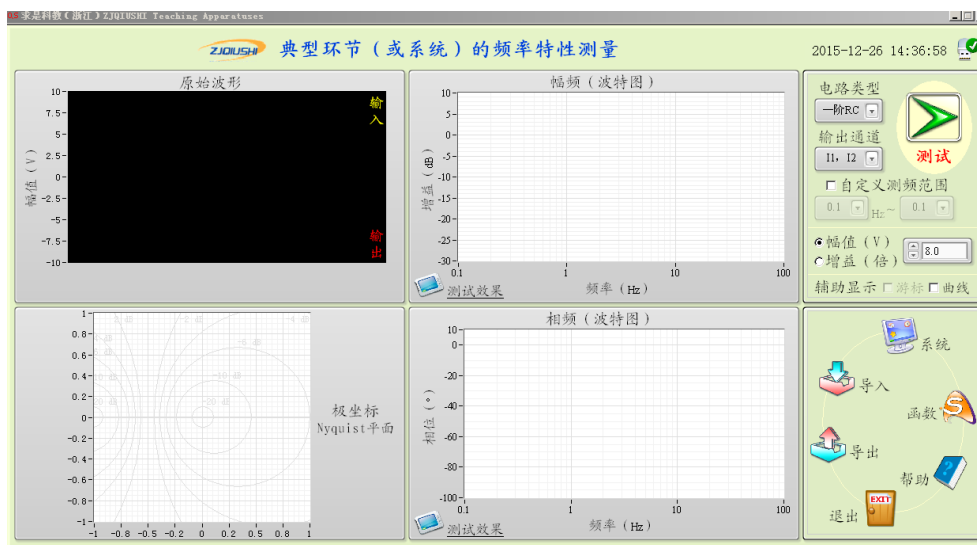
1. 熟悉频率测试软件的使用方法，了解实验的线路的连接。利用实验装置上的模拟电路单元，按照图 3.2 连接“一阶惯性环节”模拟电路。

2. 利用实验设备完成一阶惯性环节的频率特性曲线测试。

(1) 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。



(2) 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：



(3)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。

对输入幅值的大小进行调节，调节至输出幅值小于 10 的大小。

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。




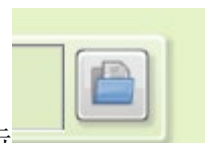
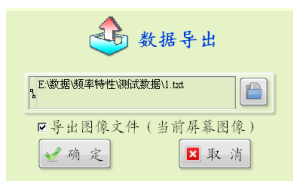
(4) 点击  按钮，期间请勿点击界面任何地方，最好是鼠标都不要晃动，请等待实验的结束。

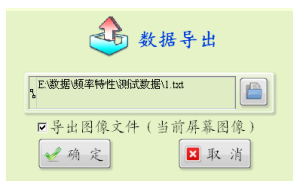
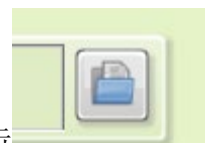
(5)实验结束结果如下图所示，勾选辅助显示游标选项和曲线，则系统会产生游标的功能，同时显示当前实验各测试点的数据，并自动绘制曲线图，方便学生分析结果。

(6)截屏的方式保存波形。



(如果点击  功能按钮，保存路径不可更改，否则软件出错：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)



(7) 完成下表，并填入实验报告。

|                    | 按图 3.2 接线  | 改变开环增益 (R0 或 R2)        | 改变时间常数 (改变电容 C1)        |
|--------------------|--|-------------------------|-------------------------|
| 实验测得奈氏图            |  |                         |                         |
| 实验测得伯德图            |  |                         |                         |
| 传递函数 (根据电路图计算)     |  |                         |                         |
| Matlab 仿真得到伯德图、奈氏图 |  |                         |                         |
| 实验分析               |  | 放大系数对 bode 图和奈氏图哪部分产生影响 | 积分系数对 bode 图和奈氏图哪部分产生影响 |
| 实验思考               | 1、K 与乃氏图的关系，如何根据一阶惯性环节的传递函数直接画乃氏图<br>2、如何根据一阶惯性环节的传递函数直接画 bode 图<br>3、如何根据奈氏图、伯德图判断系统稳定性 |                         |                         |

### 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。

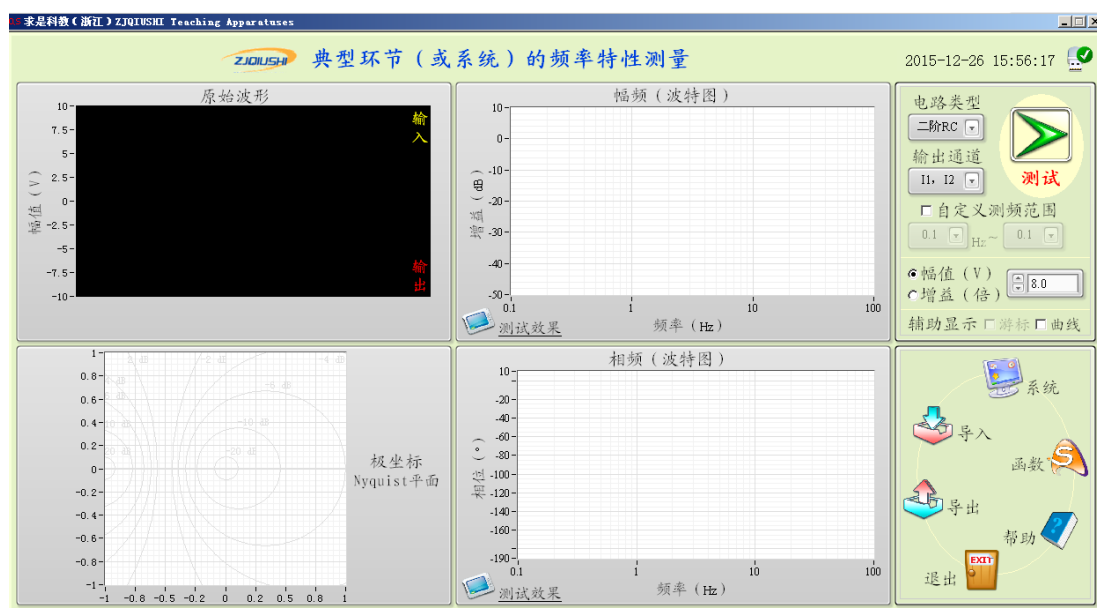
软件操作如一阶电路所描述，请勿更改。程序运行状态下对资源的要求很多，请勿做任何操作，包括鼠标的移动（否则会造成程序停止响应的结果）。

(1) 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。



(2) 双击打开桌面 **求是频率特性** 图标运行求是频率特性实验。实验界面如下图所示：





(3)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。

|                   |   |                            |                             |
|-------------------|---|----------------------------|-----------------------------|
|                   | 按图 3.4 接线， $R_0=100\text{ K}\Omega$ ， $R_1=100\text{ K}\Omega$ ， $R_2=200\text{ K}\Omega$ ， $R_3=200\text{ K}\Omega$ ， $C_1=C_2=1\mu\text{F}$ ， | 改变开环增益，（改变 $R_0$ 或 $R_2$ ） | 改变时间常数（改变电容 $C_1$ 或 $C_2$ ） |
| 实验测得乃氏图           |   |                            |                             |
| 实验测得伯德图           |   |                            |                             |
| 二阶系统传递函数（根据电路图计算） |   |                            |                             |
| matlab 仿真         |   |                            |                             |
| 实验分析              |   | 放大系数对 bode 图和奈氏图哪部分产生影响    | 积分系数对 bode 图和奈氏图哪部分产生影响     |
| 实验思考              | 1、如何根据二阶系统的传递函数直接画乃氏图<br>2、如何根据二阶系统的传递函数直接画 bode 图<br>3、如何根据奈氏图、伯德图判断系统稳定性  |                            |                             |

## 实验四 线性系统串联校正

### 一、实验目的

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。

### 二、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。
2. 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，通过对该系统阶跃响应的观察，完成该系统的稳定性和动态特性观测。提示：
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。
5. 分析实验结果，完成实验报告。

### 三、实验内容

#### 1. 未校正系统

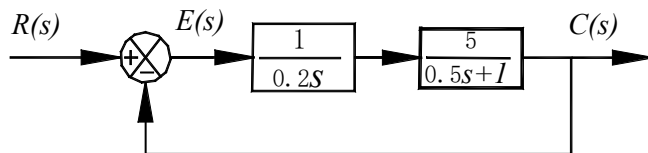


图4. 1. 1

实验用未加校正二阶闭环系统的方块图如图 4.1.1 所示：

请完成如下内容：

- 1) 根据方块图画出模拟电路图，并在实验装置上按模拟电路图接线。
- 2) 写出系统的开环传递函数、闭环传递函数

- 
- 3) 计算出未加校正时系统超调量、调节时间、开环增益
  - 4) 测试系统的时域特性、频域特性，完成对其稳定性和动态特性的研究。

时域特性、频域特性的测试方法参考实验二、实验三。

**注意：**

- 1) 在做时域特性分析时，锁零 G 接 U3 单元的 G1。在做频率特性分析时，锁零 G 改为接 U1 单元的-15V，O1 必须接 U3 单元的 I1,输出接 U3 单元的 I2。
- 2) 为避免接线错误带来的问题，优先做时域特性测试，判断波形正确后再近些频域特性测试。

## 2. 校正目标

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）  $t_s \leq 1s$  ,
- 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. 串联校正装置设计——相消法

从超调量、调整时间要求判断，系统必须进行校正，请完成校正装置的设计：

- 1) 根据校正目标，计算  $\omega_n$  和阻尼比取值范围，
- 2) 利用相消法设计出校正控制器，记录计算、设计过程，
- 3) 在 Matlab/Simulink 中对比校正前后的根轨迹、阶跃响应，
- 4) 根据校正后的传递函数设计其模拟电路，并完成实验连线，
- 5) 测试校正后的时域波形和频域波形。
- 6) 对比校正前后特性、频域特性，研究极点位置对二阶系统的稳定性和动态特性的影响。

在做时域特性分析时，锁零 G 接 U3 单元的 G1。在做频率特性分析时，锁零 G 改为接 U1 单元的-15V，O1 必须接 U3 单元的 I1,输出接 U3 单元的 I2。