

浙江大学



本科实验报告

姓名：张成鹄 林继旺

学院：机械工程学院

系：机械工程

专业：机械工程

学号：3200106092 3200104382

指导教师：李宏娟

2022 年 10 月 30 日

浙江大学实验报告

课程名称： 控制工程基础实验 实验类型： 基础实验

实验项目名称： 典型环节的电路模拟与软件仿真研究

学生姓名： 张成鹏 专业： 机械工程 学号： 3200106092

同组学生姓名： 林继旺

指导老师： 李宏娟

实验地点： 紫金港校区西四 A-424 日期： 2022 年 10 月 29 日

一、实验目的和要求（必填）

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、实验内容和原理（必填）

【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 Labview 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。

【实验原理】

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： $\frac{U_O(s)}{U_i(s)} = K$ ，其中 $K = \frac{R_1}{R_0}$ 。实验接线如下图：

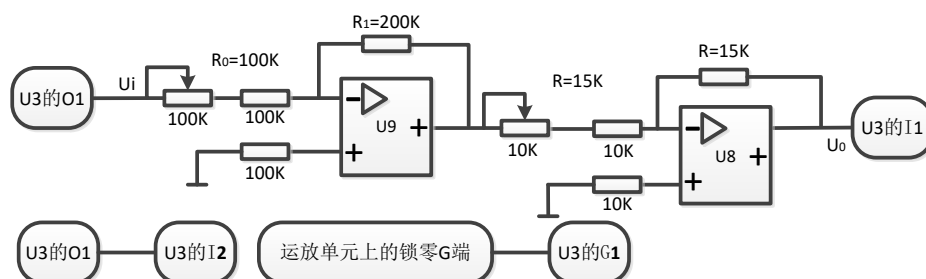


图1.1.2

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： $\frac{U_O(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{Ts}$ ，其中 $T = R_0C$ ，实验接线如下图：

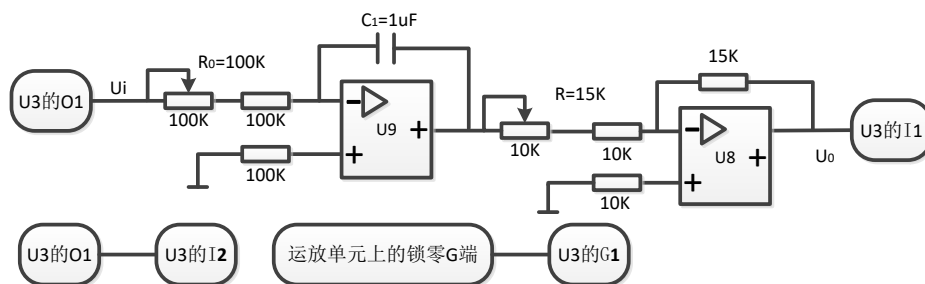


图1.2.2

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：

$\frac{U_O}{U_i} = K + \frac{1}{Ts}$ ，其中 $K = \frac{R_1}{R_0}$ ， $T = R_0C$ ，实验接线如下图：

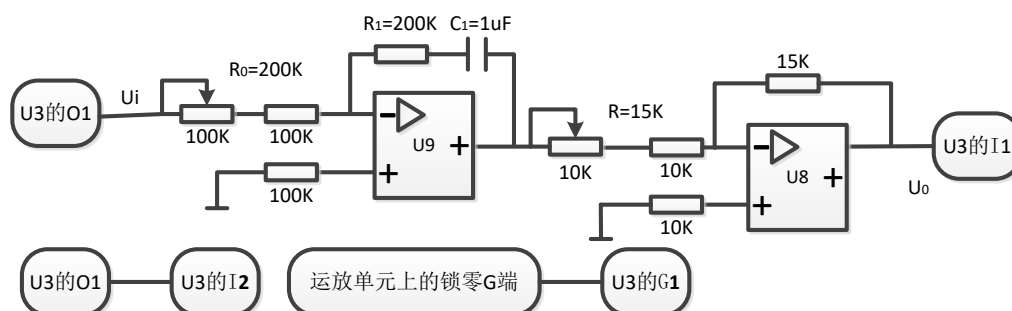


图1.3.2

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 $K = \frac{R_1 + R_2}{R_0}$ ， $T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C$ ，实验接线如下图：

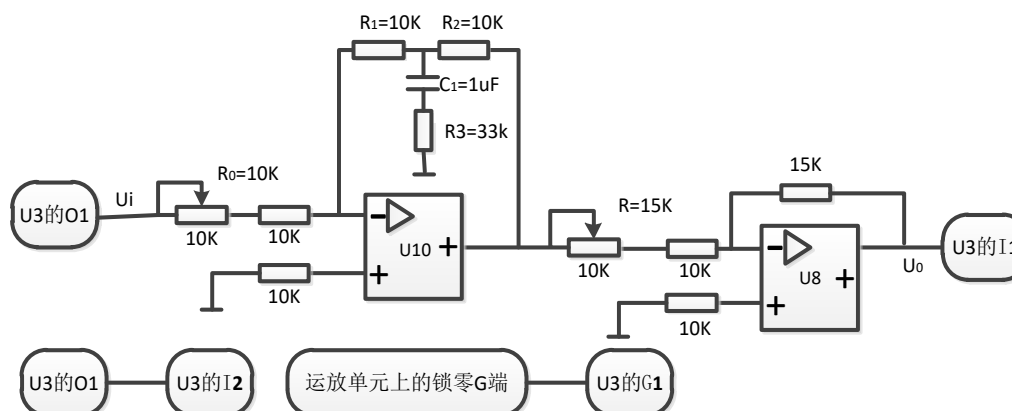


图1.4.2

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： $\frac{U_O}{U_i} = \frac{K}{Ts + 1}$ ，其中 $K = \frac{R_1}{R_0}$ ， $T = R_1C$ ，实验接线如下图：

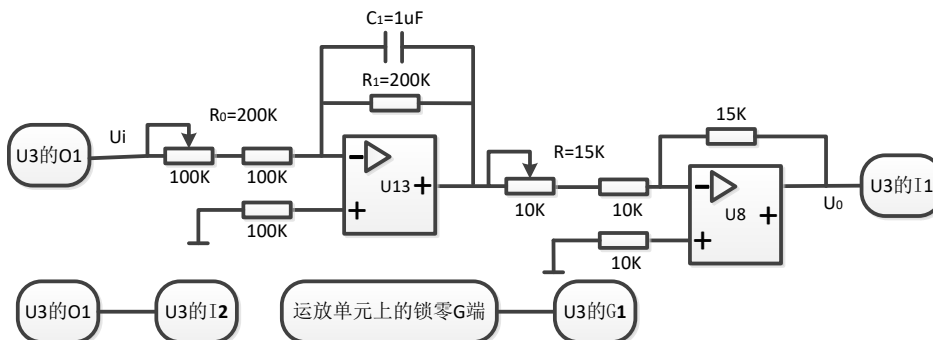


图1.5.2

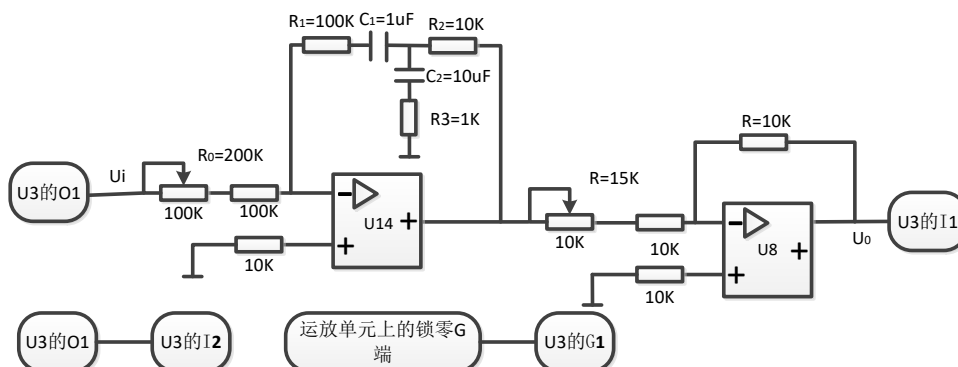
6. 比例积分微分 (PID) 环节的传递函数、方块图、模拟电路和阶跃响应

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：

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{R_1 + R_2}{R_0} + \frac{1}{R_0 C_1 s} + \frac{R_2 C_2 (R_1 C_1 s + 1)}{R_0 C_1 (R_3 C_2 s + 1)}, \text{ 实验接线如下图:}$$



三、主要仪器设备（系统、软件或平台）

【实验平台】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。

【实验软件】NI Labview

四、操作方法与实验步骤

【操作方法】

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。
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。
3. 分析实验结果，完成实验报告。

【实验步骤】

1. 比例(P)环节的传递函数、方块图、模拟电路和阶跃响应

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

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。

实验任务: 通过改变阻值来改变 T 值, 再次实验, 进行对比分析。

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

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: 通过改变阻值来改变 K、T 值, 再次实验, 进行对比分析。

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

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。

实验任务: 通过改变阻值来改变 K、T 值, 再次实验, 进行对比分析。

5. 惯性环节的传递函数、方块图、模拟电路和阶跃响应

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。

实验任务: 通过改变阻值来改变 K、T 值, 再次实验, 进行对比分析。

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

打开 labview 的时域特性程序后, 软件界面的参数设置如下:

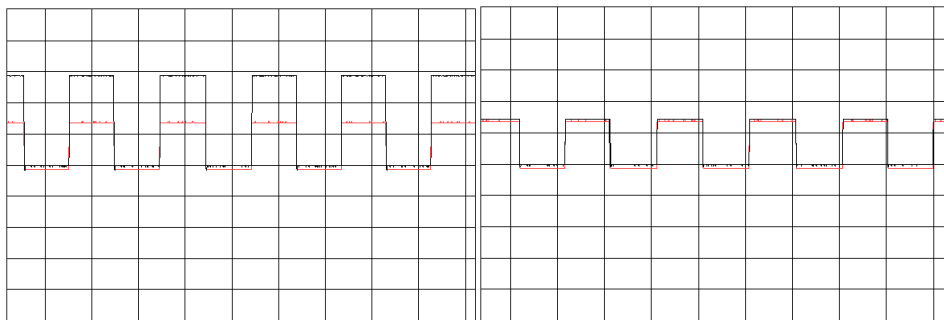
测试信号 1: 阶跃

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。

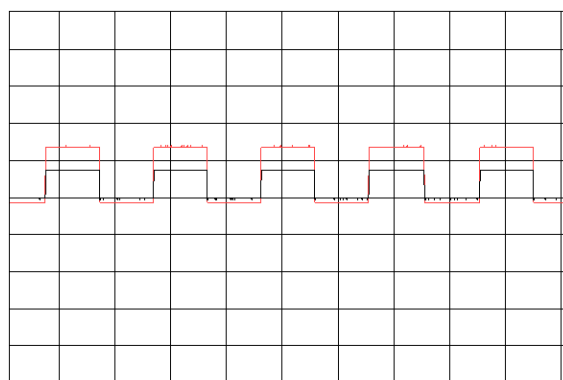
五、实验数据记录和处理

1. 比例(P)环节的传递函数、方块图、模拟电路和阶跃响应



反相器放大倍数 1, $R_1/R_0=2$

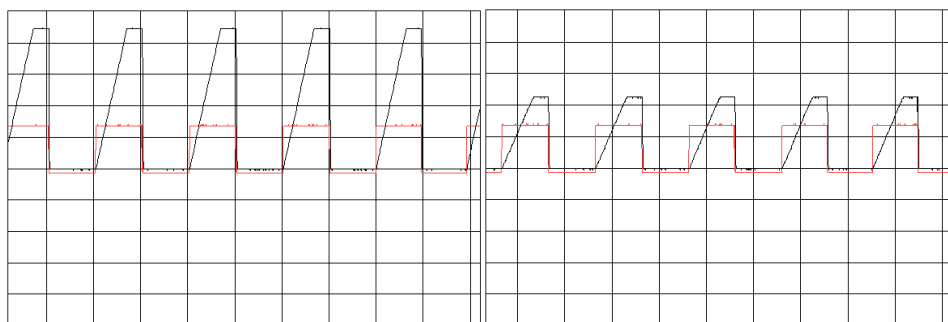
反相器放大倍数 0.5, $R_1/R_0=2$



反相器放大倍数 0.5, $R_1/R_0=1$

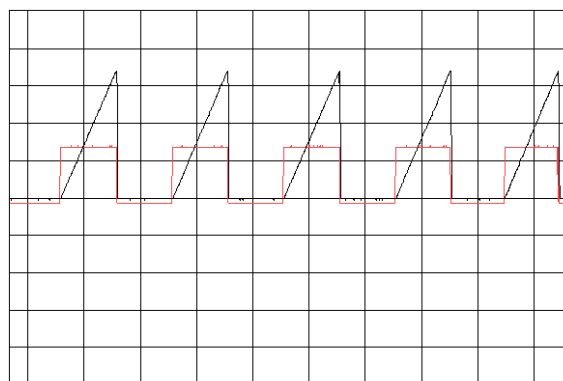
分别改变反相器放大倍数和反相输入比例放大电路的放大倍数使得输出信号的幅值成比例放大或缩小。

2. 积分(I)环节的传递函数、方块图、模拟电路和阶跃响应



$T=0.1s$, 反相器放大倍数 1

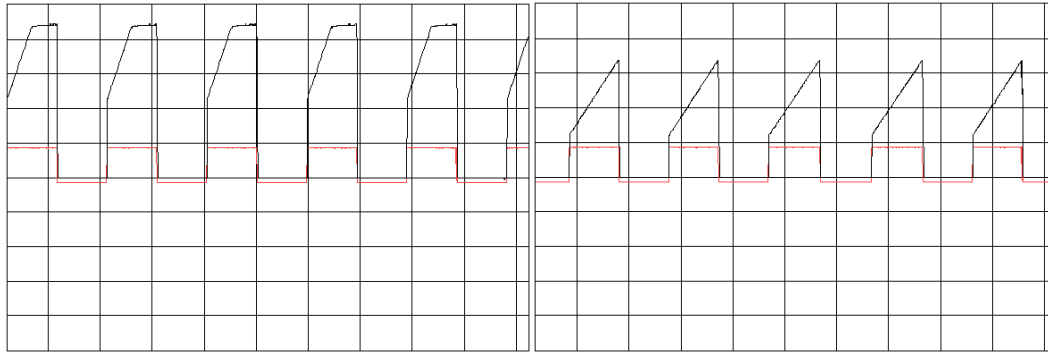
$T=0.1s$, 反相器放大倍数 0.5



$T=0.1s$, 反相器放大倍数 $0.5 (R_0=200k\ \Omega)$

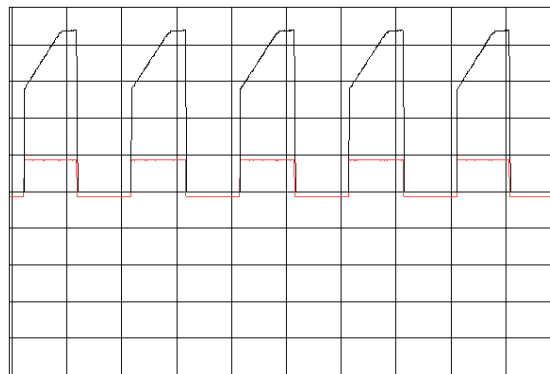
输入的阶跃信号经过积分环节变换成斜坡信号输出, $T = R_0C$ 可, 以通过改变电阻和电容的大小调整时间常数。由于实验中运算放大器存在饱和电压, 故积分环节的输出不会增长到无穷大。时间常数越大, 积分环节增益越小, 到达饱和的时间越短。

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



$R_0=100k\ \Omega$, $T=0.1s$, $K=2$

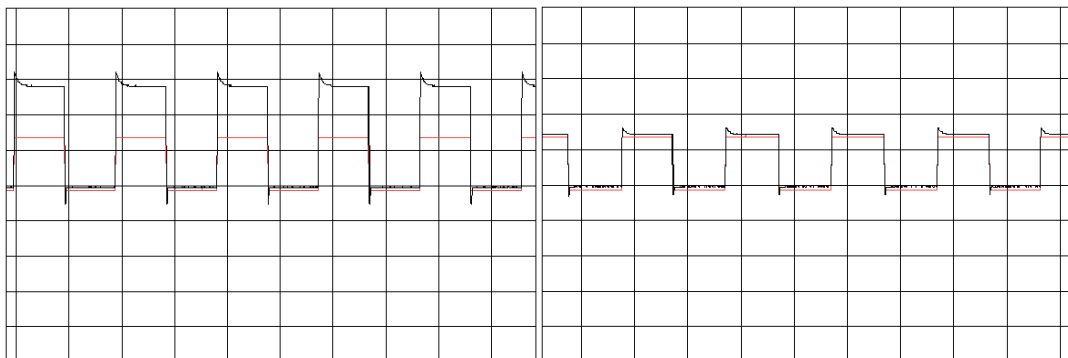
$R_0=200k\ \Omega$, $T=0.2s$, $K=1$



$R_0=100k\ \Omega$, $C=2\ \mu F$, $T=0.2s$, $K=2$

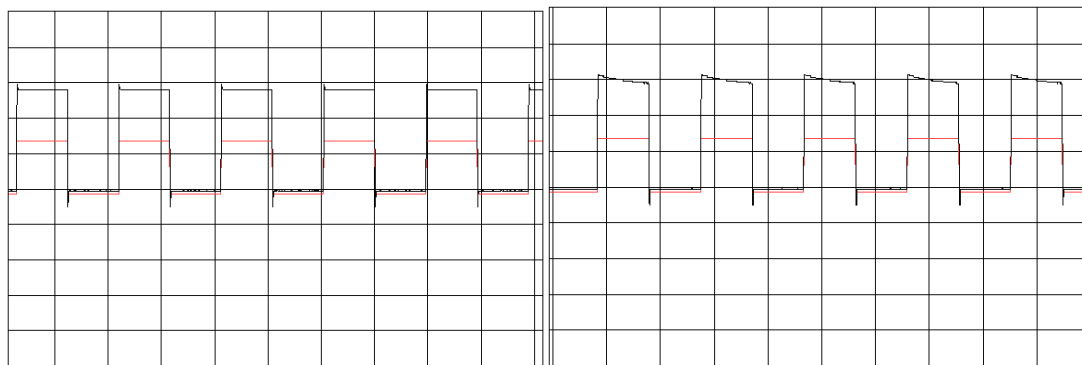
比例积分环节是比例环节和积分环节的并联。 $K = \frac{R_1}{R_0}$, $T = R_0C$, 可以调节电路中电阻和电容的大小改变比例积分环节的增益系数。由于线性电路系统的比例叠加特性, 我们可以把比例积分环节看作积分环节和比例环节效果的叠加。 T 越小, 达到饱和的时间越短; K 越大, 幅值放大的倍数越大。

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



$R_0=10k\Omega$, $T=5\mu s$, $K=2$ ($C=0.1\mu F$)

$R_0=20k\Omega$, $T=5\mu s$, $K=2$ ($C=0.1\mu F$)



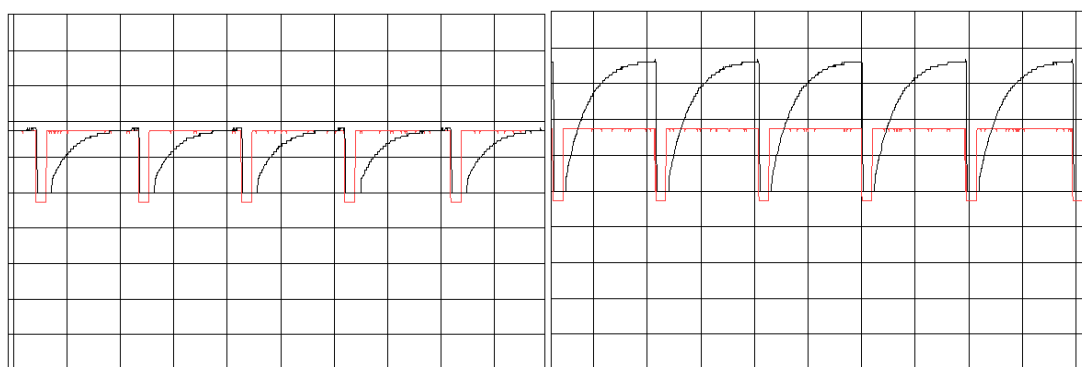
$C=0.1\mu F$, $T=0.5\mu s$, $K=2$ ($R_0=10k\Omega$)

$C=10\mu F$, $T=50\mu s$, $K=2$ ($R_0=10k\Omega$)

比例微分环节是比例环节和微分环节的并联。 $K = \frac{R_1 + R_2}{R_0}$, $T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C$, 可以调节电路中电阻和电容的大小改变比例微分环节的增益系数。由于线性电路系统的比例叠加特性, 我们可以把比例微分环节看作微分环节和比例环节效果的叠加。在阶跃信号输入的瞬间会有跃变 (此时微分为无穷大), 随后信号逐渐衰减直到 KU_i , 趋于稳定。

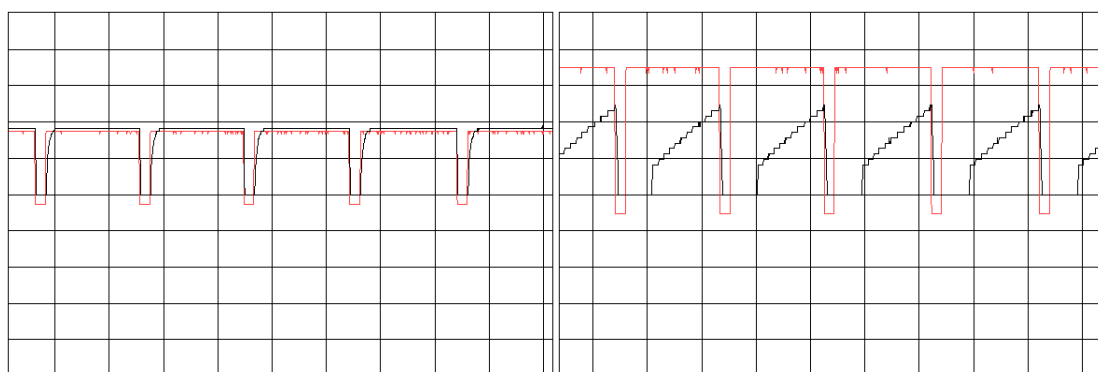
T 越大, 微分环节的增益系数越大, 可以理解成微分环节具有提前预测的调节功能, 使响应过程提前制动, 衰减到稳定的时间越长; K 越大, 幅值放大的倍数越大。

5. 惯性环节的传递函数、方块图、模拟电路和阶跃响应



$R_0=200k\Omega$, $C=1\mu F$, $T=0.2s$, $K=1$

$R_0=100k\Omega$, $C=1\mu F$, $T=0.2s$, $K=2$



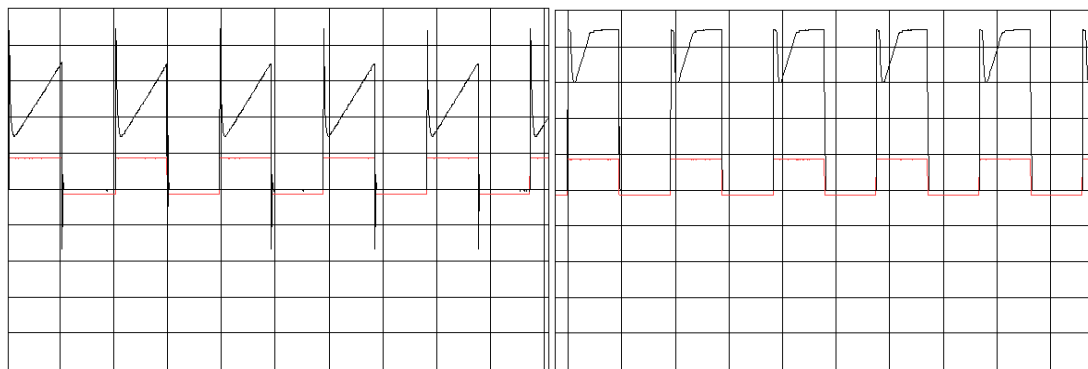
$R_0=200k\Omega$, $C=0.1\mu F$, $T=0.02s$, $K=1$

$R_0=200k\Omega$, $C=10\mu F$, $T=2s$, $K=1$

(改变了输出信号幅值的分辨率 1V-DIV1)

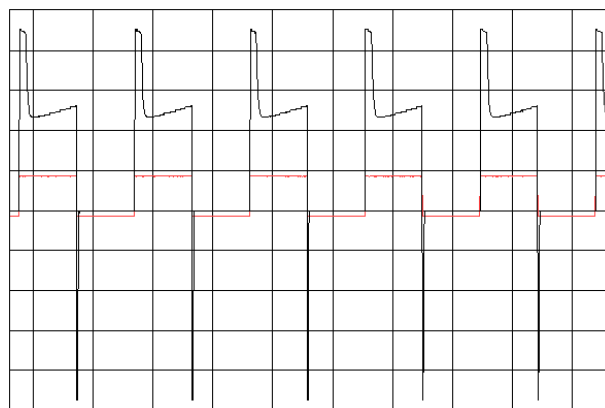
惯性环节对输入的阶跃信号不会发生突变 (可以理解成电容器是储能元件, 能量不会瞬变), $K = \frac{R_1}{R_0}$, $T = R_1 C$, 可以调节电路中电阻和电容的大小改变一阶惯性环节的时间常数。 T 越大, 系统响应的速度越慢, 达到稳定的时间越长; K 越大, 幅值放大的倍数越大。

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



$R_0=200k\Omega$, $K_p=0.5$, $T_i=0.2s$, $T_d=50\mu s$

$R_0=100k\Omega$, $K_p=1$, $T_i=0.2s$, $T_d=50\mu s$



$R_0=200k\Omega$, $K_p=0.5$, $T_i=2s$, $T_d=50\mu s$

PID 环节同时具备了比例、积分、微分三个环节的特性，输出图像其实也就是三个环节输出特性的叠加。

PID 控制环节是比例、微分和积分环节的并联。 $K_P = \frac{R_1}{R_0}$, $T_i = R_0 C_1$, $T_d = \frac{R_1 R_2}{R_0} C_2$ ，可以

调节电路中电阻和电容的大小改变 P、I、D 环节的增益系数。由于线性电路系统的比例叠加特性，我们可以把 PID 环节看作三种环节效果的叠加。比例增益越大，幅值的放大倍数越大，积分增益越大，可以减小振荡和超调，但是系统静差消除时间变长，微分增益大，也会延长系统的调节时间。

六、讨论、心得

本次实验在具体的电路中运用典型环节验证了课本中所学到的控制知识。通过调节各环节的增益系数，我们对各个环节的功能有了更深刻的认识。

浙江大学实验报告

课程名称： 控制工程基础实验 实验类型： 基础实验

实验项目名称： 典型系统动态性能和稳定性分析

学生姓名： 林继旺 专业： 机械工程 学号： 3200104382

同组学生姓名： 张成鹏

指导老师： 李宏娟

实验地点： 紫金港校区西四 A-424 日期： 2022 年 10 月 29 日

一、实验目的和要求（必填）

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、实验内容和原理（必填）

【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。

【实验原理】

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， $G(s) = \frac{K}{s(T_1s+1)_1}$, $K = \frac{K_1}{T_o}$

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， $\omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{T_1T_o}}$, $\xi = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{T_o}{K_1T_1}}$

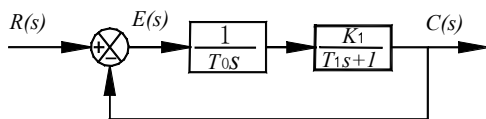
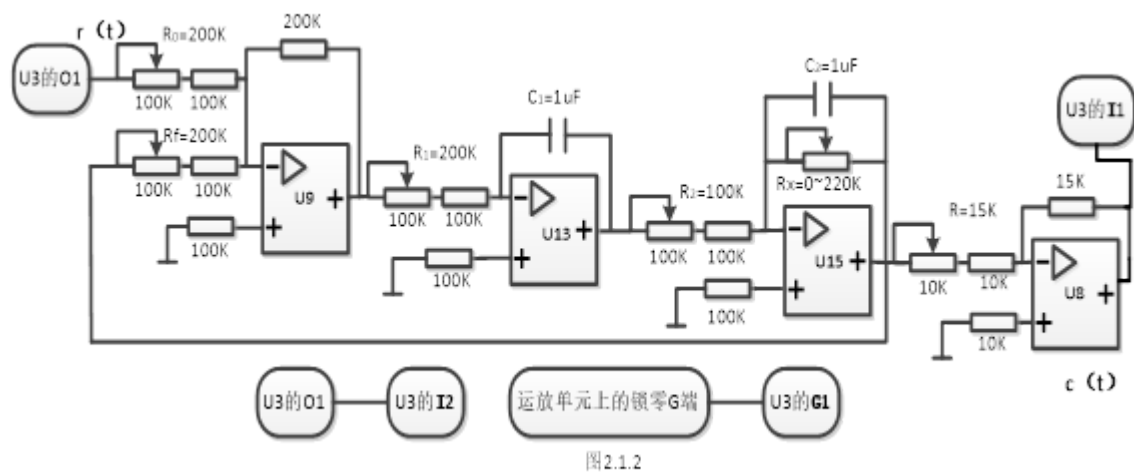


图2.1.1



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欠阻尼, 临界阻尼, 过阻尼三种情况下的阶跃响应曲线:

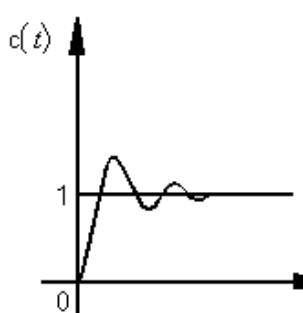


图2.1.3a

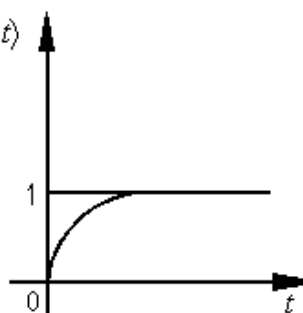


图2.1.3b

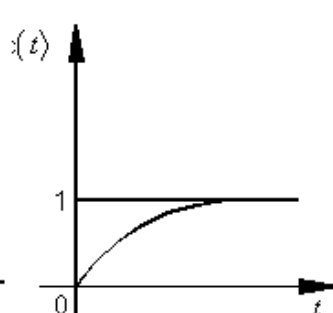


图2.1.3c

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:

其开环传递函数为 $G(s) = \frac{K}{s(T_1s+1)(T_2s+1)}$, 其中 $K = \frac{K_1K_2}{T_0}$,

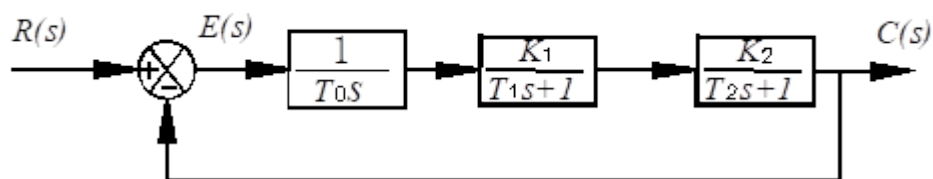


图2.2.1

取三阶系统的模拟电路如图 2.2.2 所示:

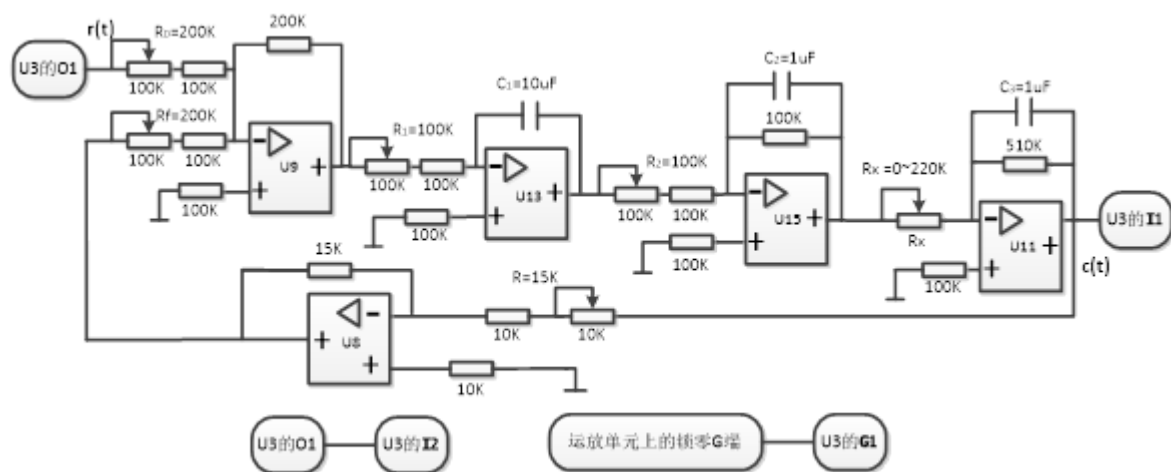


图2.2.2

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 (或 1M) 电位器, 改变 R_x 即可改变 K_2 ,

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。

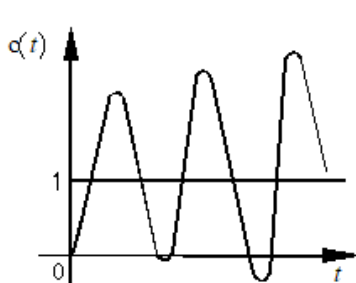


图2.2.3a

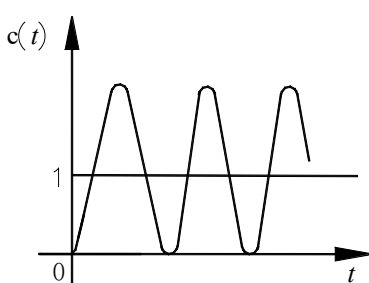


图2.2.3b

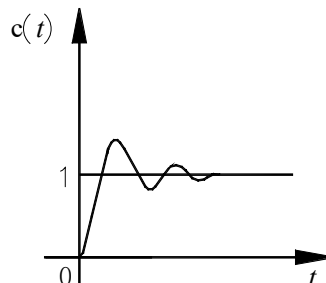


图2.2.3c

三、主要仪器设备 (系统、软件或平台)

【实验平台】 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。

【实验软件】 NI Labview

四、操作方法与实验步骤

【操作方法】

1. 熟悉实验装置, 利用实验装置上的模拟电路单元, 设计并连接典型二阶系统和典型三阶系统的模拟电路。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。

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

3. 分析实验结果，完成实验报告。

【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。

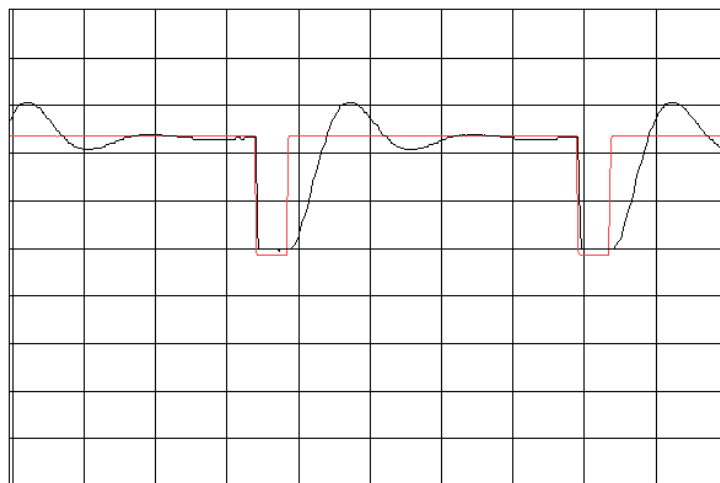
6. 改变该三阶系统模拟电路的参数，观测参数对系统稳定性与动态指标的影响。

7. 分析实验结果，完成实验报告。

五、实验数据记录和处理

1. 典型二阶系统

（1）欠阻尼



2V-DIV1 2V-DIV2 500ms-DIV

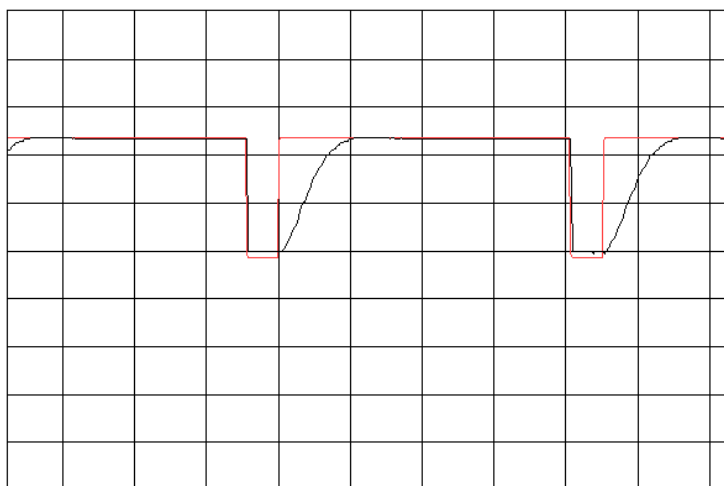
计算超调量：峰值：8.07198 格 稳定值：7.35219 格 零值：4.88432 格

超调量 $M_p = (8.07198 - 7.35219) / (7.35219 - 4.88432) * 100\% = 29.17\%$

计算调节时间：起始点：3.85935 格 调节时间终止点：6.22642 格

调节时间 $t_s = (6.22642 - 3.85935) * 500\text{ms} = 1.184\text{s}$

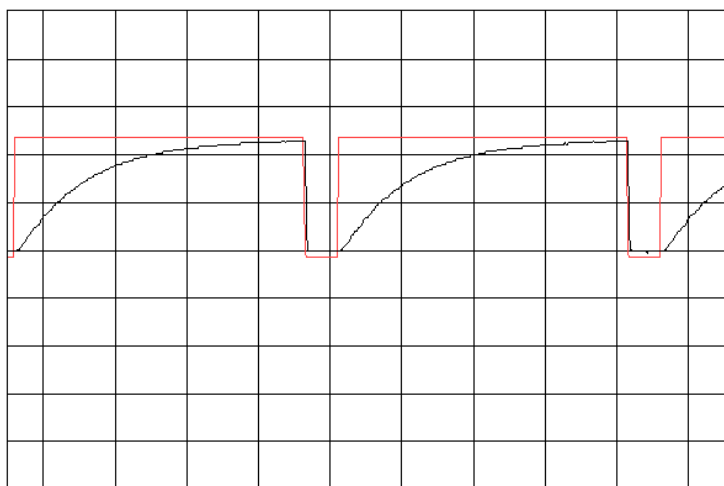
(2) 临界阻尼



2V-DIV1 2V-DIV2 500ms-DIV

计算调节时间：起始点：3.77358 格 调节时间终止点：4.75129 格

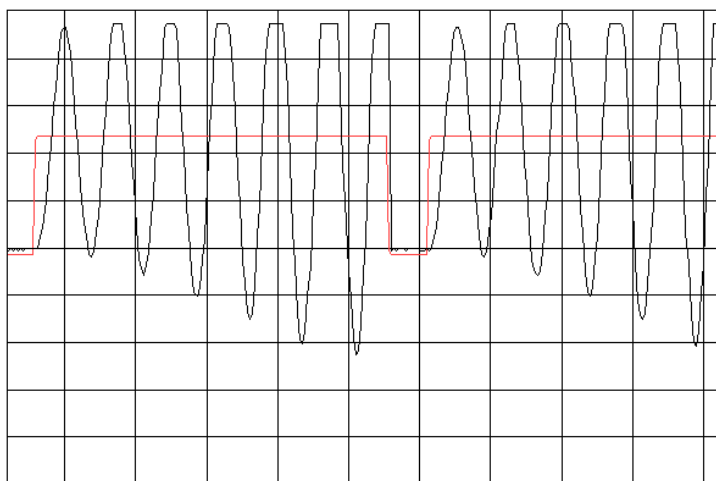
调节时间 $t_s = (4.75129 - 3.77358) * 500\text{ms} = 0.489\text{s}$



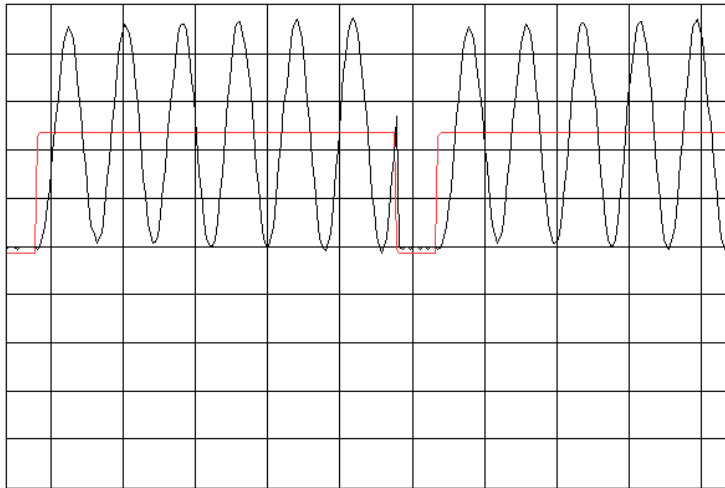
(3) 过阻尼

2. 典型三阶系统

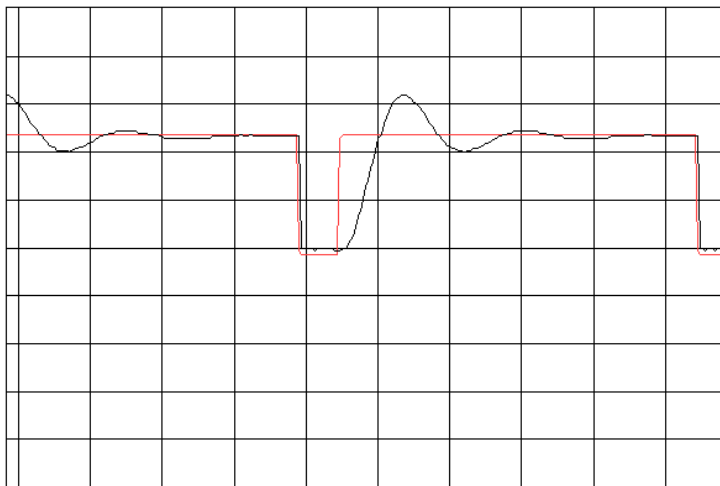
(1) 不稳定



(2) 临界稳定



(3) 稳定



2V-DIV1 2V-DIV2 500ms-DIV

计算超调量：峰值：8.25193 格 稳定值：7.35219 格 零值：4.88432 格

超调量 $M_p = (8.25193 - 7.35219) / (7.35219 - 4.88432) * 100\% = 36.46\%$

计算调节时间：起始点：4.63122 格 调节时间终止点：6.86106 格

调节时间 $t_s = (6.86106 - 4.63122) * 500\text{ms} = 1.115\text{s}$

六、实验结果与分析

1. 典型二阶系统

调节 R_x 可以改变系统的阻尼比 ζ ，处于欠阻尼情形下， ζ 增大，超调量 M_p 减小，调节时间 t_s 减小。系统处于临界阻尼或者过阻尼状态时，无超调。

2. 典型三阶系统

R_x 从零开始增大到最大值， K 逐渐减小，系统从不稳定，再到临界稳定，最后稳定。在稳定情形下， R_x 越大，超调量 M_p 越大，调节时间 t_s 越大。

七、讨论、心得

本次实验中，我们小组通过对典型二阶系统以及典型三阶系统的参数调节，观察到了系统的不同状态，并对不同状态的动态性能，稳定性（典型三阶系统）进行分析，从而巩固我们在理论课上所学习到的知识，可谓受益匪浅。