



院(系): 智能工程学院

学号: 22354189

姓名: 张瑞程

日期: 2024.10.17

实验名称: 基于 Matlab 的控制系统频率特性验证

一、实验目的

- 1、加深了解典型环节频率特性的物理概念。
- 2、掌握典型环节频率特性的测试验证方法。
- 3、掌握二阶控制系统频率特性的测试验证方法。
- 4、学会根据频率特性建立系统的传递函数。
- 5、了解实际频率特性与理想特性的不同，并确定近似条件。

二、实验要求

- 1、比例环节的频率特性测试验证。
- 2、惯性环节的频率特性测试验证。
- 3、二阶系统的频率特性测试验证。

三、实验仪器、设备及材料

- 1、计算机
- 2、MATLAB 软件

四、实验原理

4.1 频域法测试系统或环节的频率特性

利用频域法测试系统的频率特性，也是建立系统数学模型的一种常用方法。频域测试法是由正弦信号源提供不同频率的正弦信号，作用于被测对

象，测取在不同频率时被测对象的稳态输出信号与正弦输入信号的幅值比和相位差，从而求得被测对象的频率特性曲线。其原理如图 1 所示。

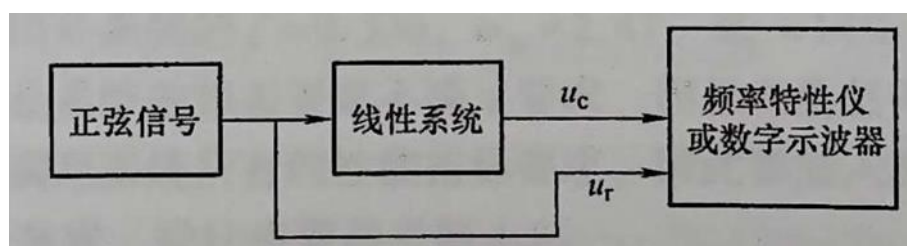


图 1 频域法原理

首先根据系统理想的对数幅频特性渐近线的转折频率和谐振峰值，确定输入正弦信号的频率变化范围和测试点，通常取转折频率 1/10 左右的频率作为开始测试的最低频率，取 10 倍转折频率左右的频率为终止测试的最高频率。在峰值频率和转折频率附近，应多测几个点。由于物理系统可能有某些非线性元件存在，测试输入正弦信号幅值的大小也应正确选取。如果输入信号的幅值过大，将使系统饱和；如果输入信号的幅值过小，假如系统中含有死区非线性特性时，就会使实验结果有误差，导致频率响应实验数据错误。因此在实验时，应认真观察输出信号的波形是否失真，保证实验过程系统工作在线性范围内。

4.2 由实验频率特性确定最小相位传递函数

最小相位系统：若系统传递函数的所有零点和极点均在 s 平面左半平面，则系统为最小相位系统。

非最小相位系统：若系统传递函数有零点或极点位于 s 平面右半平面，则该系统为非最小相位系统。

➤ 在具有相同幅值特性的系统中，最小相位系统传递函数的相角范围最小。任

何非最小相位系统传递函数的相角范围都大于最小相位系统的相角范围；

- 最小相位系统的幅值特性和相角特性之间具有唯一对应关系，即如果系统幅值曲线给定，则相角曲线被唯一确定。该结论对非最小相位系统不成立。

根据实验测试数据绘制系统开环频率特性，然后确定系统开环传递函数，

步骤如下：

1. 将用实验方法得到的伯德图近似为一条斜率为 $+20\text{vdB/dec}$ 的直线段，从而得到对数幅频特性的近似曲线。
2. 根据低频段对数幅频特性的斜率确定系统开环传递函数中含有串联积分环节的个数。如果有 v 个积分环节，则低频段渐近线的斜率为 $+20\text{vdB/dec}$ 。
3. 根据在 0dB 轴以上部分的对象幅频特性的形状、相应的分贝值和频率值，确定系统的开环增益 K 。
4. 根据对数幅频渐近特性曲线在转折频率处的斜率变化，确定系统的串联环节。惯性环节在转折频率处斜率减小 20dB/dec ，一阶微分环节在转折频率处斜率增加 20dB/dec ，振荡环节在转折频率处斜率减小 40dB/dec 。
5. 进一步根据最小相位系统对数幅频特性的斜率与相位特性之间的单值对应关系，检验系统是否串联有滞后环节，或修正渐近线。
6. 使用 MATLAB 软件根据以上步骤得到的传递函数绘制伯德图，并与实验得到的频率特性曲线进行比较。如果两者能较好地吻合，说明实验成功；否则需要分析实验误差的原因，并进行进一步的重测。

五、实验步骤

5.1、比例环节的频率特性测试验证。

最小相位系统的比例环节 $G(s) = K$ ($K > 0$) 的对数幅频特性 $L(\omega)$ 和对数相频特性 $\varphi(\omega)$ 为: $L(\omega) = 20\log(K)$, $\varphi(\omega) = 0^\circ$ 。

其中, $L(\omega)$ 是一条水平直线, 其高度为 $20\log(K)$; $\varphi(\omega)$ 是与横轴重合的水平直线。根据提供的信息, 我们有一个比例环节的模拟电路, 其中输入端连接了高频正弦发生器。我们需要观察并记录输出与输入幅值的比值和相位差。首先, 我们可以设置正弦波信号的幅值为 $0.05V$ 。然后, 我们可以从低频开始测试正弦信号, 并逐渐增加频率。根据 R 的配置 ($10M\Omega$ 、 $1M\Omega$ 、 $100k\Omega$), 我们可以选择不同的起始频率, 如 $1kHz$ 、 $10kHz$ 或 $100kHz$ 。对于每个测试频率, 我们可以测量输出响应波形的峰值和与输入波形的相位差。这些数据可以记录在表 1 中。

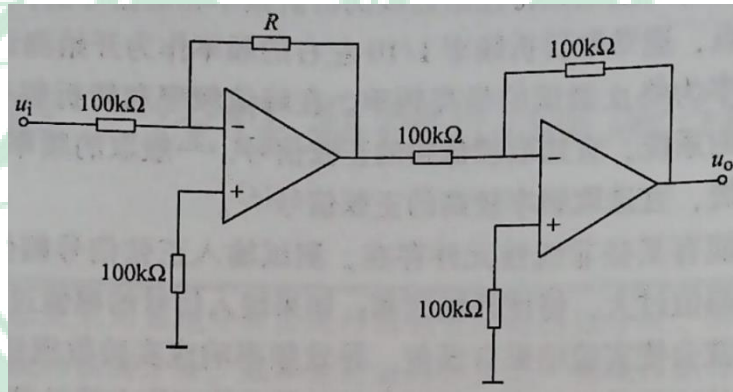


图 2: 比例环节的模拟电路

比例环节的频率特性为 $G(j\omega) = K$

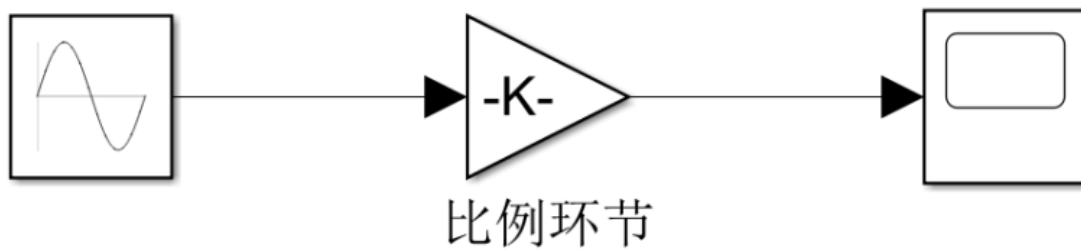
其幅频特性为 $|G(j\omega)| = \sqrt{U^2 + V^2} = \sqrt{K^2 + 0} = K$

其相频特性为 $\angle G(j\omega) = \arctg \frac{V}{U} = \arctg \frac{0}{K} = 0^\circ$

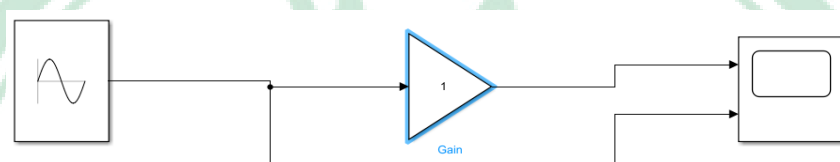
其对数幅频特性为 $L(\omega) = 20\lg |G(j\omega)| = 20\lg K$

其对数相频特性为 $\varphi(\omega) = \angle G(j\omega) = 0^\circ$

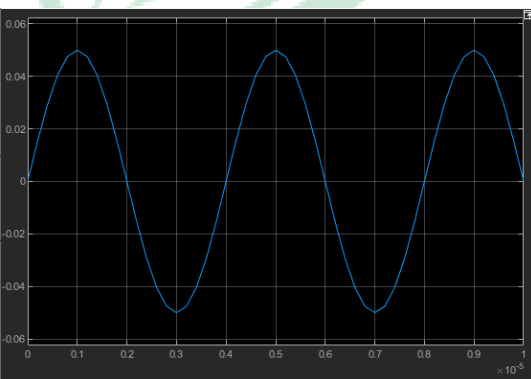
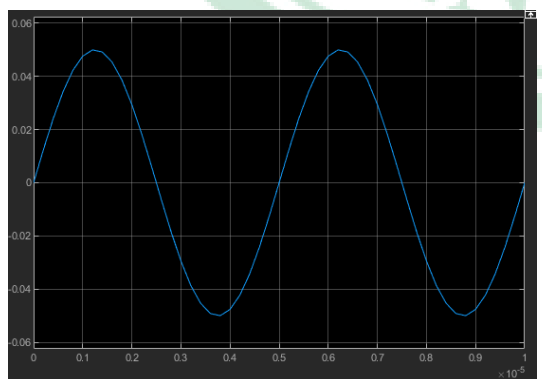
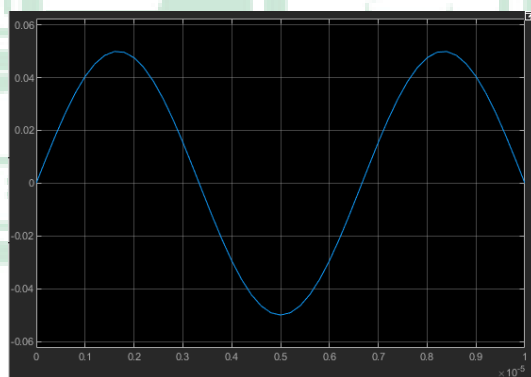
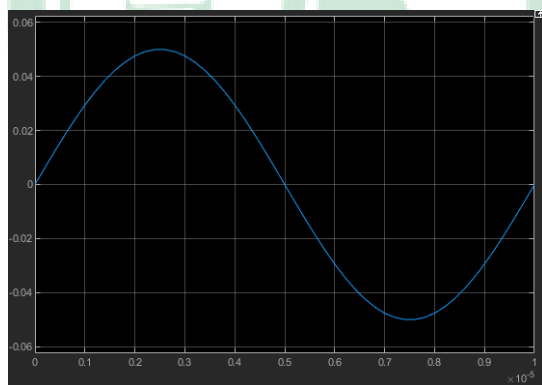
Simulink 模拟电路如下：



- (1) 当 $R=100\text{k}\Omega$ 时，其增益系数 $K=1$ ，初始频率调为 100k 弧度每秒（非 HZ ）。



以下依次为上述十组数据的 10 张图片（增益为 1， U_o 和 U_i 重叠，因此示波器只有一条线）



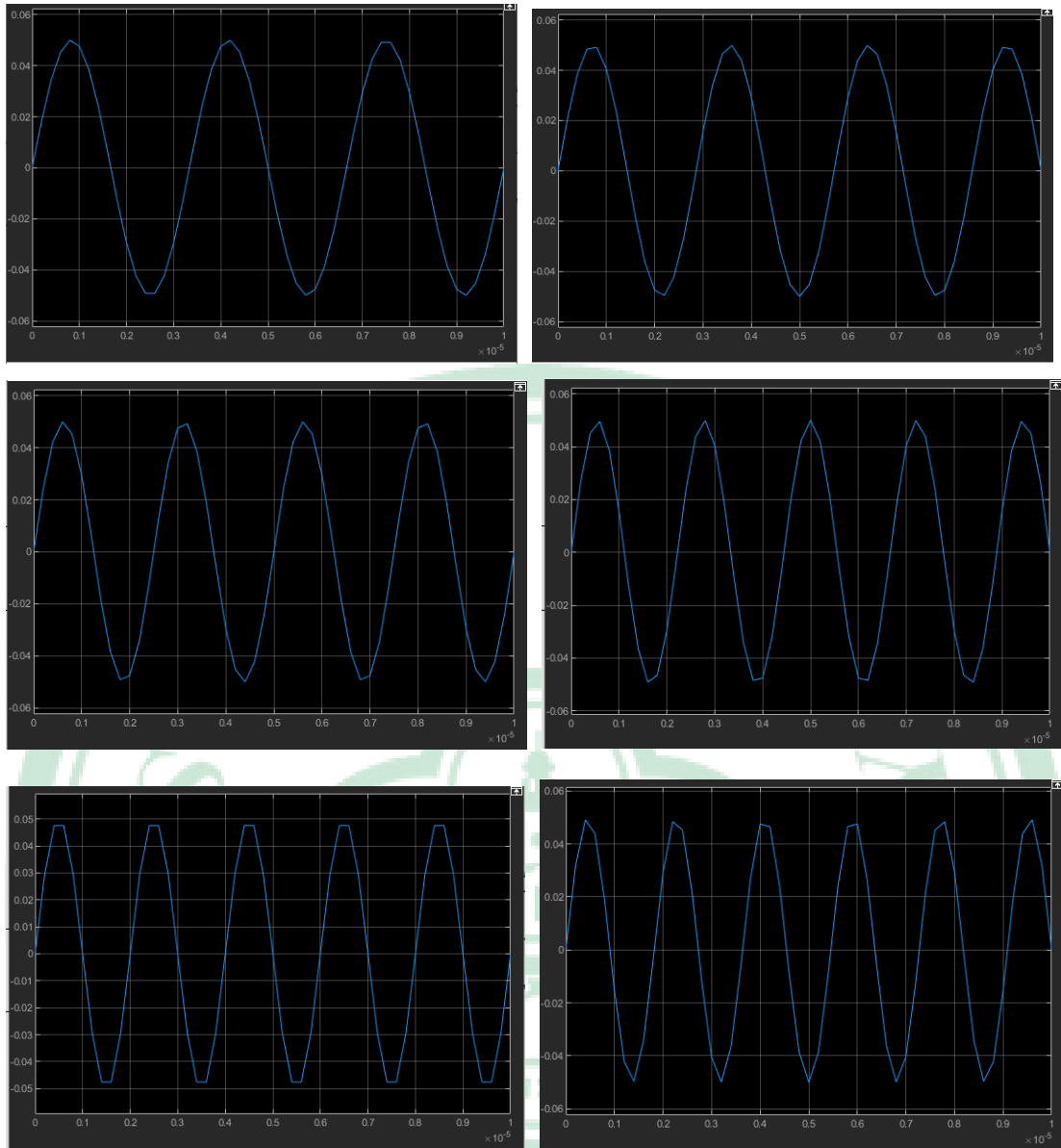
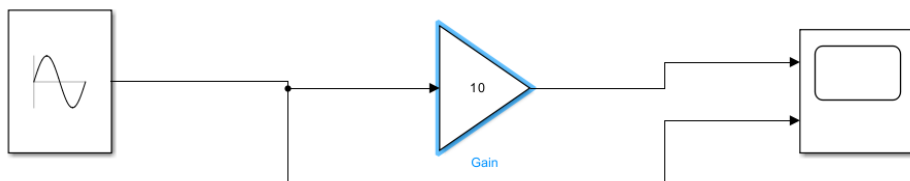


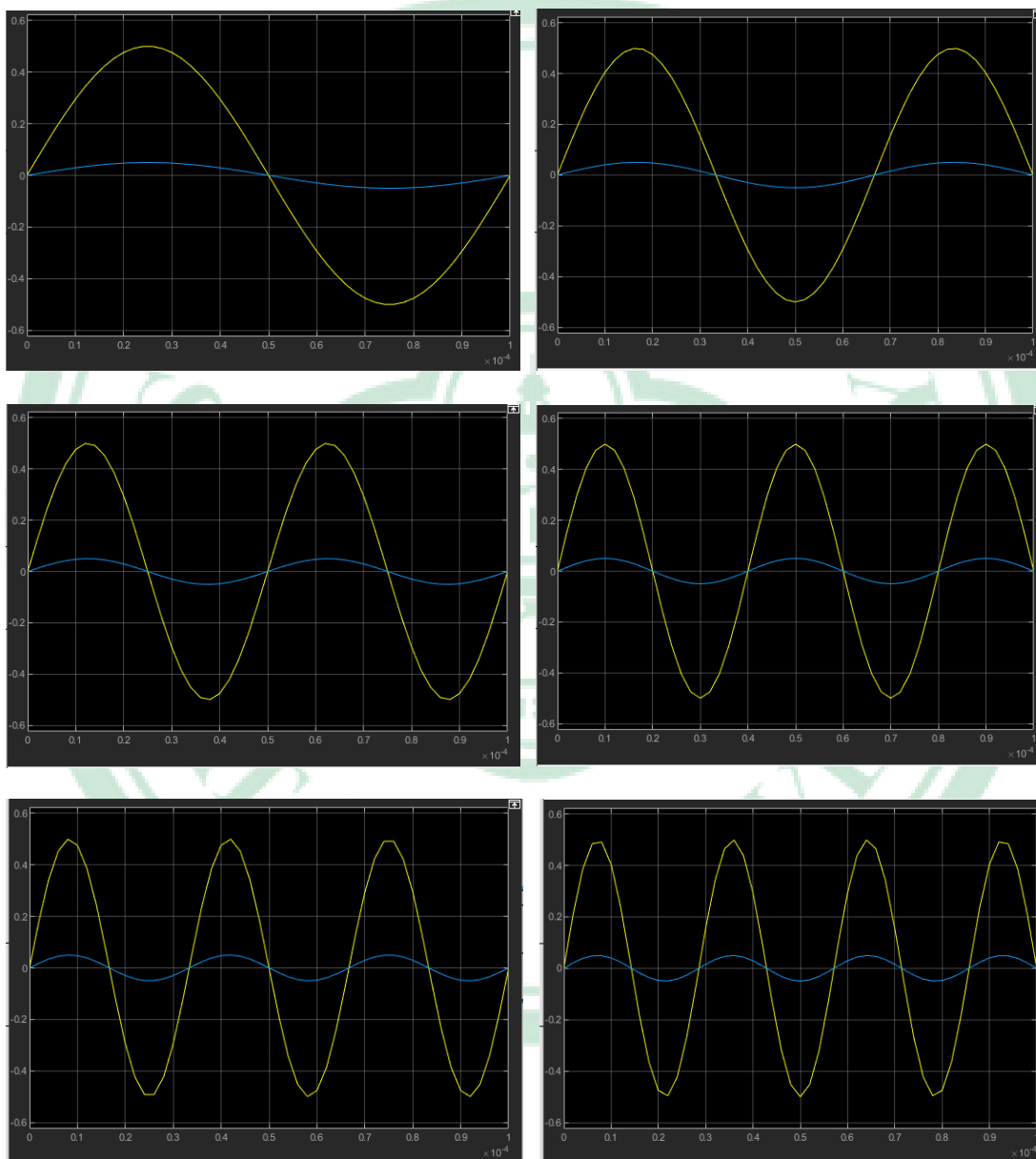
表 1: 比例环节频率特性测试 ($R=100k\Omega$)

| 比例环节 ($U_{im} = 0.05 \text{ V}, R = 100k\Omega, K = 1$) | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| $f/\text{Hz}(\times 10^3)$ | 100 | 105 | 130 | 150 | 170 | 190 | 200 | 500 | 1000 |
| U_{om}/V | 0.0474 | 0.0483 | 0.0496 | 0.0471 | 0.0430 | 0.0431 | 0.0425 | 0.0476 | 0.047 |
| $20\lg \frac{U_{om}}{U_{im}}/\text{dB}$ | -0.46 | -0.30 | -0.07 | -0.07 | -0.52 | -1.31 | -1.29 | -0.43 | -0.46 |
| 相位差 $\varphi/(\circ)$ | 0 | 0.017 | 0.029 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

(2) 当 $R=1M\Omega$ 时，其增益系数 $K=10$ ，初始频率调为 10kHz 做出实验图。



以下依次为上述十组数据的 10 张图片（增益为 10）



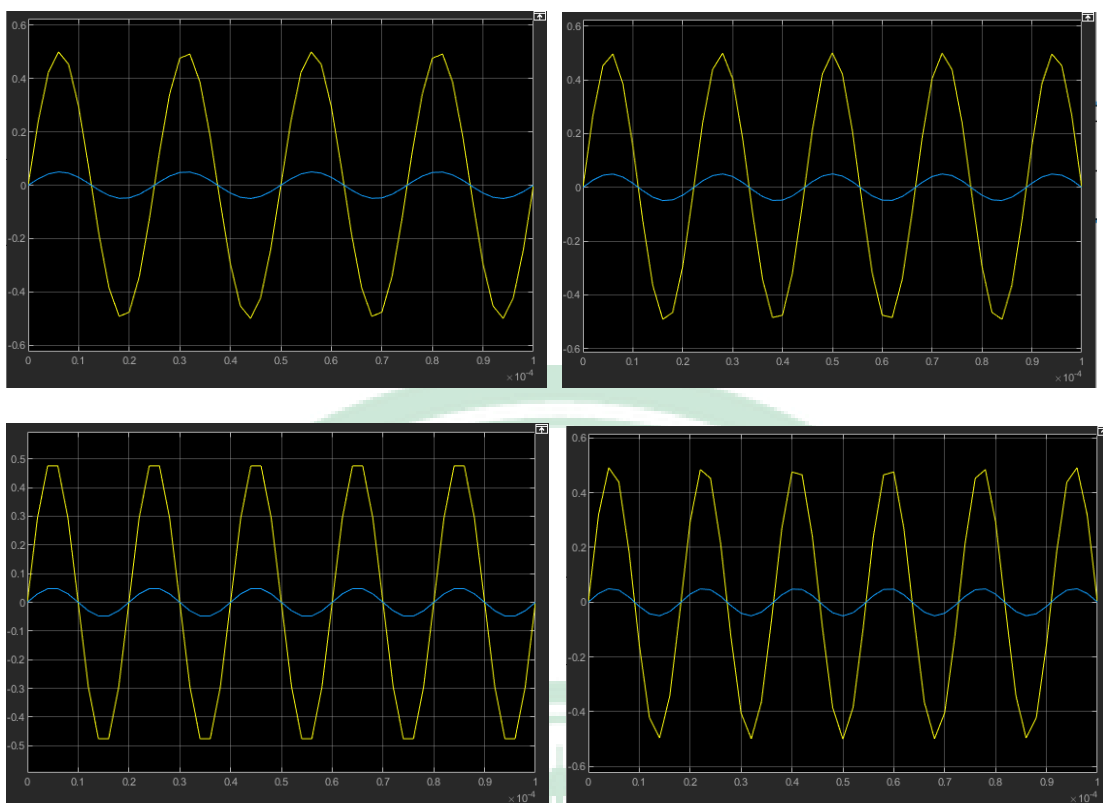
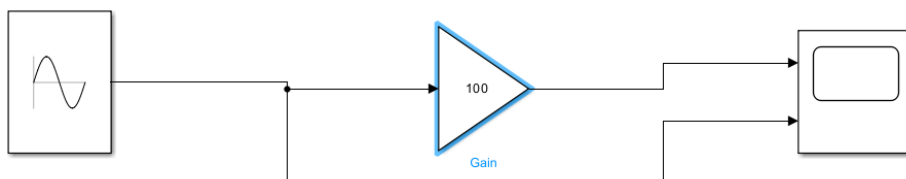


表 2: 比例环节频率特性测试 ($R=1M\Omega$)

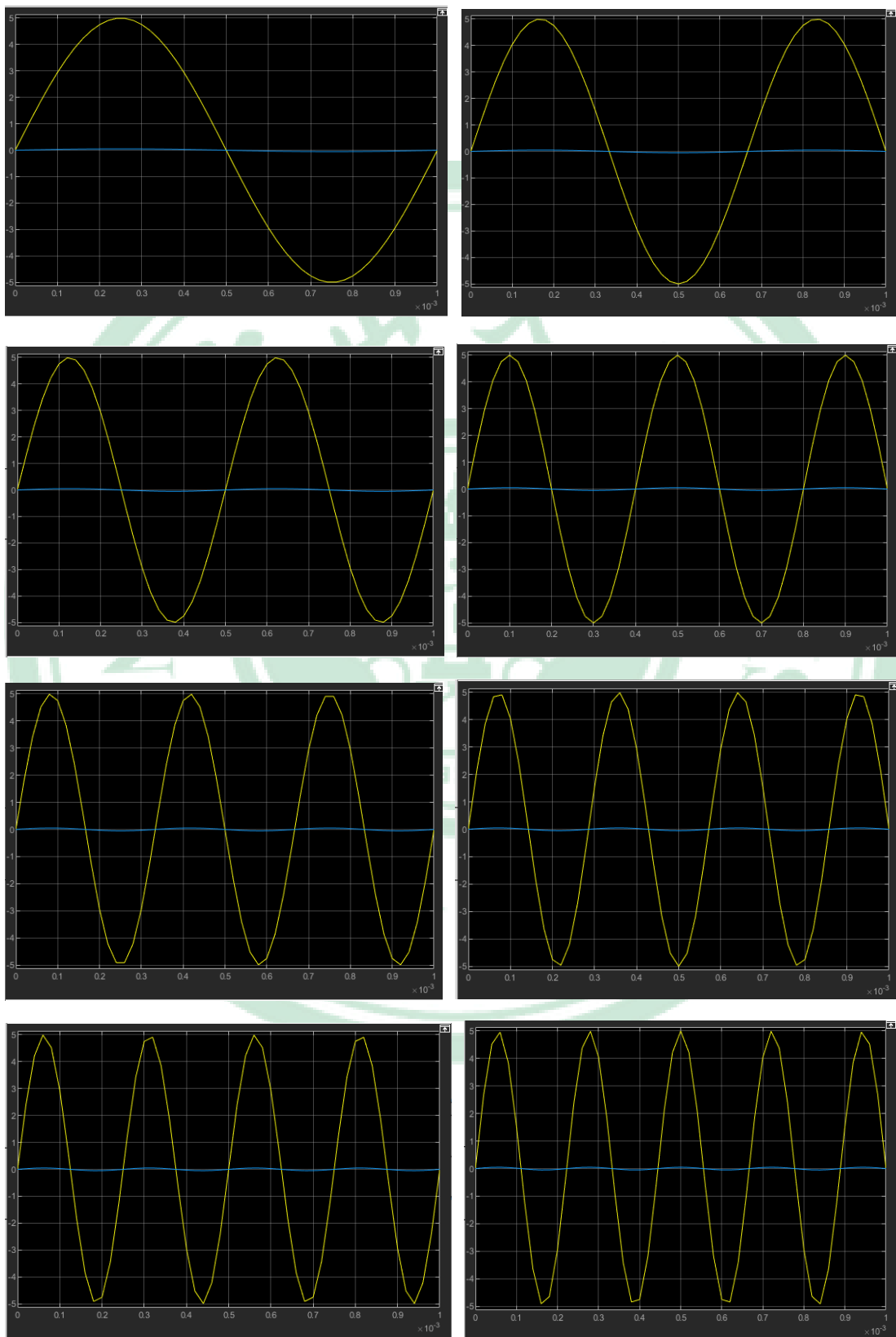
| 比例环节 ($U_{im} = 0.05 \text{ V}, R = 1M\Omega, K = 10$) | | | | | | | | | |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $f/\text{Hz}(x10^3)$ | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 |
| U_{om}/V | 0.4 69 | 0.4 27 | 0.4 75 | 0.4 30 | 0.4 76 | 0.4 75 | 0.4 30 | 0.4 69 | 0.47 5 |
| $20\lg \frac{U_{om}}{U_{im}}/\text{dB}$ | 19.45 | 18.68 | 19.55 | 18.68 | 19.56 | 19.56 | 18.68 | 19.45 | 19.56 |
| 相位差 $\varphi/(^{\circ})$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

(2) 当 $R=10M\Omega$ 时, 其增益系数 $K=100$, 初始频率调为 1kHz 做出实验

图。



以下依次为上述十组数据的 10 张图片（增益为 100，因为增益过大， U_i 相比于 U_o 过小，所以显得蓝线是直线，其实是一条正弦曲线）



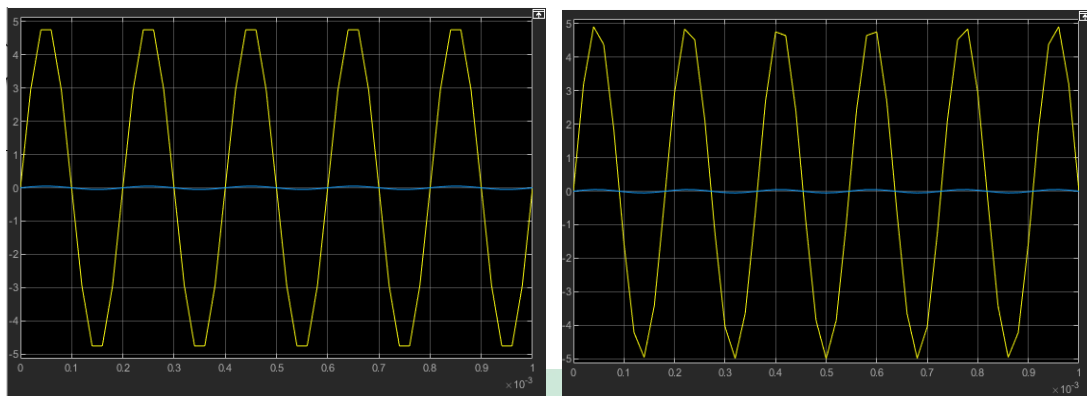
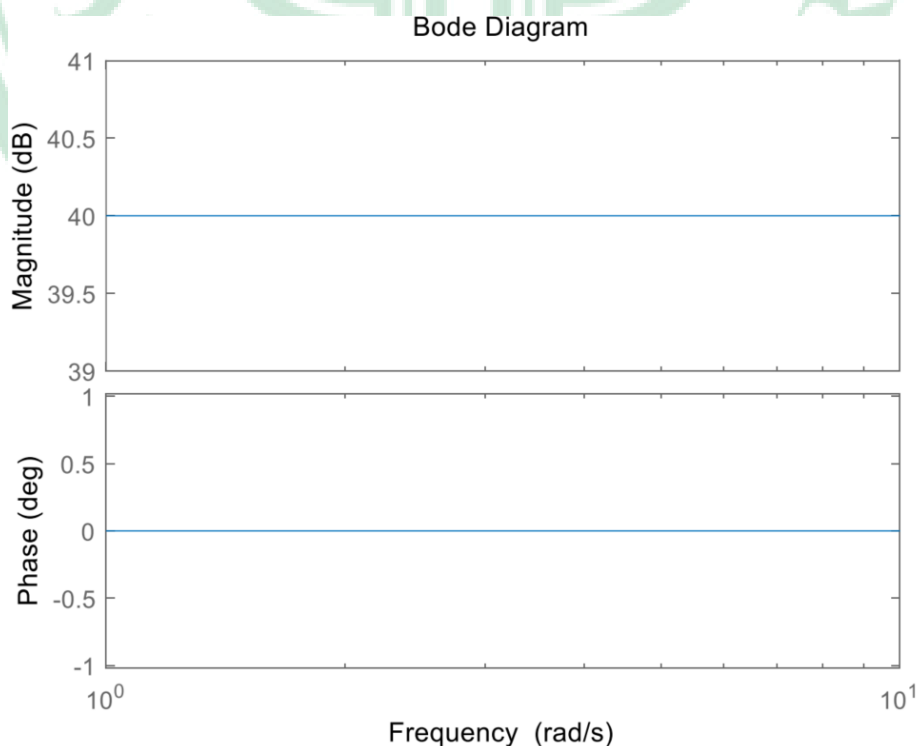


表 3: 比例环节频率特性测试 ($R=10M\Omega$)

| 比例环节 ($U_{im} = 0.05 \text{ V}, R = 10M\Omega, K = 100$) | | | | | | | | | |
|--|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $f/\text{Hz}(\times 10^3)$ | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 |
| U_{om}/V | 4.7 5.4 | 4.2 9.6 | 4.7 2.4 | 4.7 2.4 | 4.7 2.4 | 4.7 0.8 | 4.7 2.4 | 4.7 0.8 | 4.7 0.8 |
| $20\lg \frac{U_{om}}{U_{im}}/\text{dB}$ | 39. 56 | 38. 68 | 39. 51 | 39. 51 | 39. 51 | 39. 48 | 39. 51 | 39. 48 | 39. 48 |
| 相位差 $\varphi/(\circ)$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

可以画出比例环节的伯德图，可以看出与实验数据是相符的：



5.2、惯性环节的频率特性测试验证

惯性环节的频率特性为

$$G(j\omega) = \frac{1}{1+jT\omega} = \frac{1}{1+(T\omega)^2} - j \frac{T\omega}{1+(T\omega)^2}$$

其实频特性为

$$U = \frac{1}{1+(T\omega)^2}$$

其虚频特性为

$$V = \frac{-T\omega}{1+(T\omega)^2}$$

其幅频特性为

$$|G(j\omega)| = \sqrt{U^2 + V^2} = \sqrt{\left[\frac{1}{1+(T\omega)^2}\right]^2 + \left[\frac{-T\omega}{1+(T\omega)^2}\right]^2} = \frac{1}{\sqrt{1+(T\omega)^2}}$$

其相频特性为

$$\angle G(j\omega) = \arctg \frac{V}{U} = \arctg (-T\omega) = -\arctg T\omega$$

其对数幅频特性为

$$L(\omega) = 20\lg |G(j\omega)| = 20\lg \frac{1}{\sqrt{1+(T\omega)^2}} = -20\lg \sqrt{1+(T\omega)^2}$$

其对数相频特性为

$$\varphi(\omega) = \angle G(j\omega) = -\arctg T\omega$$

根据提供的信息，我们有一个惯性环节的模拟电路，其中增益 $K=1$ ，惯性时间常数 $T=1\text{ms}$ 。我们需要设置正弦输入信号的幅值为 1V ，并逐步增加频率进行测试。测试频率从 1Hz 开始，逐步提高，直到约 300Hz 或难以检测到输出信号为止。对于每个测试频率，我们需要测量输出响应波形的峰值和与输入波形的相位差。这些数据可以记录在表 2 中。惯性环节的对数幅频特性 $L(\omega)$ 是一条曲线。在控制工程中，为了简化对数幅频曲线的绘制，常常使用低频和高频的渐

近线来近似表示对数幅频曲线。对于惯性环节，其对数幅频渐近特性曲线的低频部分是 0 dB 线，高频部分是斜率为-20 dB/dec 的直线。转折频率为 $\omega=1/T$ 。

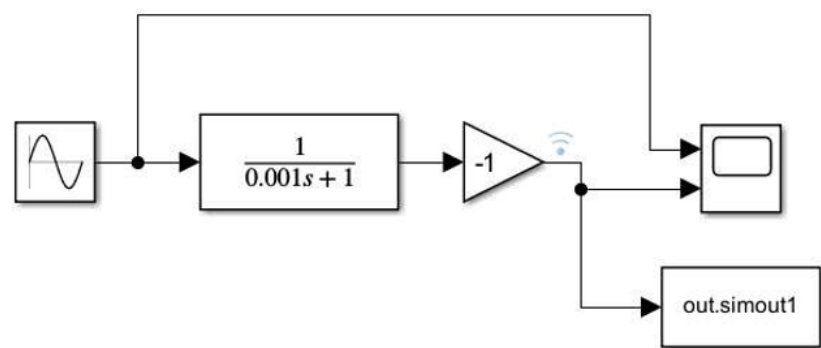


图 3：惯性环节的模拟电路

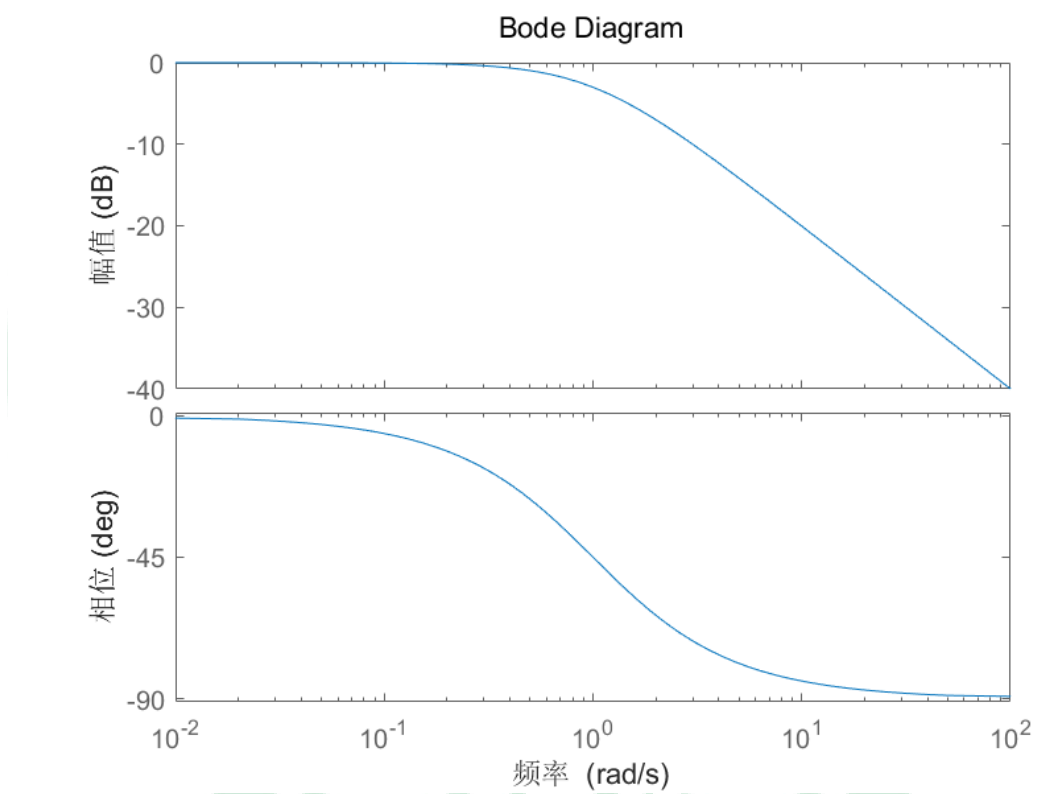


表 2：惯性环节频率特性测试数据记录表

($U_{im} = 1V$, $K = 1$, $T = 1ms$)

| | | | | | | | | | | |
|--------|---|---|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| f/Hz | 1 | 8 | 10 | 12 | 16 | 18 | 40 | 100 | 200 | 300 |
|--------|---|---|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|

| | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| U_{om}/V | 0.16 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 0 | 0 | 6 | 3 | 0 | 9 | 4 | 16 | 08 | 05 |
| $20\lg \frac{U_{om}}{U_{im}}/\text{dB}$ | -6 | -18 | -21 | -23 | -25 | -29 | -36 | -40 | -61 | -65 |
| 相位差 $\varphi/(^{\circ})$ | 81 | 88 | 89 | 89.2 | 89.4 | 89.5 | 89.7 | 89.9 | 89.9 | 89.9 |
| | | | | | | | | | 5 | 7 |



观察与结论:

- (1) **振幅下降:** 随着频率的增加, 振幅明显减小, 这表明系统对高频信号的响应能力较弱。这是典型的一阶低通滤波器特性。
- (2) **对数衰减增加:** 增益的值随频率的增加而减小, 这也反映了信号的衰减。
- (3) **相位滞后增加:** 相位差随频率增加而趋近于 90 度。对于一阶系统, 这意味

着输出信号相对于输入信号大约滞后了 90 度。

5.3、二阶控制系统的频率特性测试验证

二阶控制系统的模拟电路、及系统结构分别如图所示。若取 $R3=500k\Omega$ ，则系统的传递函数是：

$$\Phi(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{50}{s(0.1s+1)+50} = \frac{500}{s^2+10s+500}$$

我们使用正弦波输入测试信号，幅值为 1.0V，并从低频开始逐步提高频率。观察输出信号幅值和相位的变化，并记录输出幅值与输入幅值的比值和相位差。我们可以选择以下频率进行测试：0.1 Hz，1 Hz，5 Hz，8 Hz，10 Hz，15 Hz，20 Hz，25 Hz，30 Hz，40 Hz，50 Hz，80 Hz，100 Hz，150 Hz。在这些频率下，记录输出幅值与输入幅值的比值和相位差，并将数据记录在表中。在频率变化较大的频段，特别是当输出信号滞后输入信号的相位达到 180 度时，应该进行更多的测试，并仔细测定。根据收集到的数据，我们可以绘制系统的幅频特性曲线和相频特性曲线。幅频特性曲线显示输出信号的幅值随频率变化的情况，而相频特性曲线显示输出信号的相位随频率变化的情况。其 Simulink 仿真架构如图 所示。

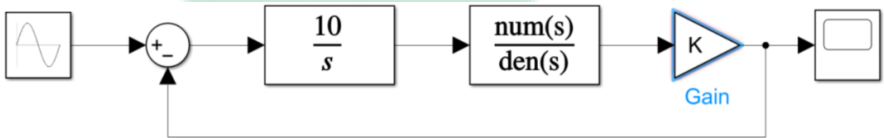
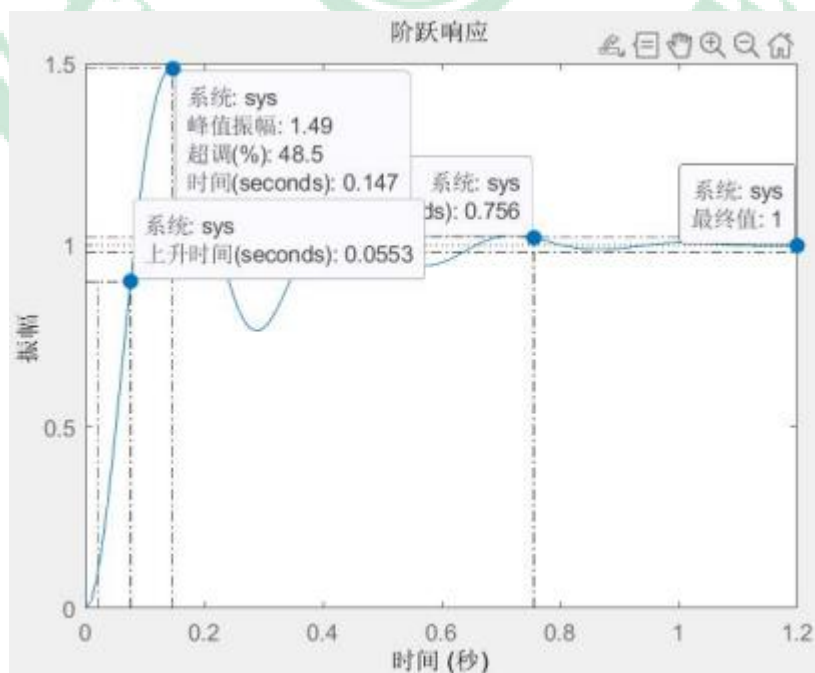
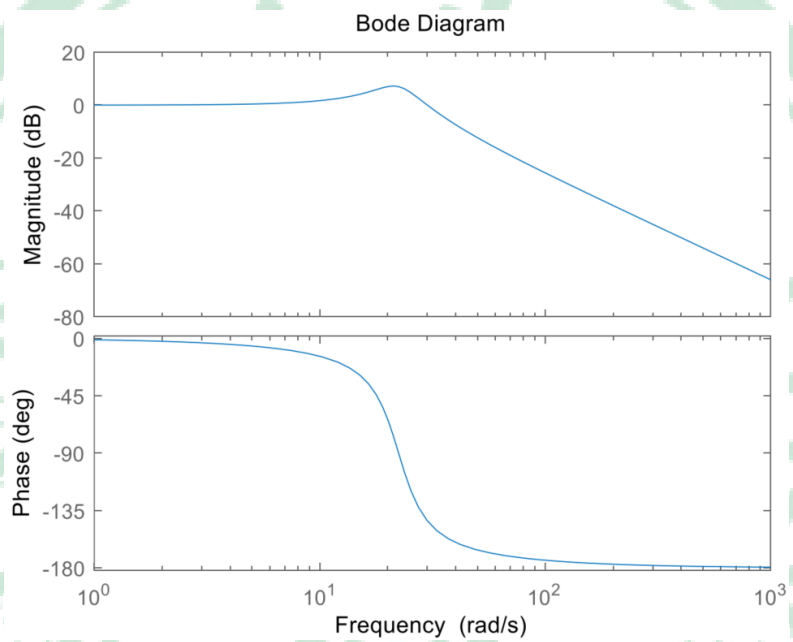


表 3：二阶控制系统频率特性测试数据记录表

($U_{im} = 1\text{ V}$)

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|-----|
| f/Hz | 0.1 | 1 | 5 | 8 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 50 | 80 |
| U _{om} /V | 0.4 | 1.0 | 1.04 | 1.2 | 1.3 | 1.6 | 2.2 | 1.8 | 1.2 | 0.8 | 0.7 | 0.5 | 0.3 |
| $20\lg \frac{U_{om}}{U_{im}}/\text{dB}$ | -6.4 | 0.0 | 0.39 | 1.9 | 2.4 | 4.4 | 6.9 | 5.3 | 1.9 | -1.5 | -2.6 | -4.7 | -10 |
| 相位差 $\varphi/(^{\circ})$ | 0 | - | -6.1 | -10 | -14 | -29 | -63 | 244 | 217 | 206 | 200 | 194 | 187 |



观察与结论:

对二阶系统而言,谐振峰值 M_{pw} 出现在谐振频率 ω_r 处,它与阻尼比 ζ 有关;谐振频率 ω_r 和-3dB 带宽 ω_B 与瞬态时间响应的速度有关。当 ω_g 增大时,系统的上升时间将随之减小;谐振峰值 M_{pw} 则通过阻尼比 ζ 与超调量有关。通常情况下,谐振峰值 M_{pw} 增大时,阶跃输入的超调量将随之增大,此外,谐振峰值还反映了系统的相对稳定性。频率响应的系统带宽与固有频率之间近似存在着线性回归的关系。

六、实验结论

通过本次实验研究系统对正弦输入信号的稳定性。线性定常系统对正弦输入信号的响应,是具有相同频率、不同幅值和相角的正弦信号。引入伯德图的方法,讨论频率特性的极坐标图和对数幅相图。

- (1)由于可以方便地得到各种频率和幅值的正弦输入信号,因此我们能够用试验的手段精确地得到系统的频率响应,这是一种既可靠又不复杂的控制系统试验分析方法;
- (2)当系统传递函数未知时,可以用试验的方法,通过测量频率响应来推导系统的传递函数;
- (3)频率响应方便得到,只要用 $j\omega$ 替换复变量 s ,就能够由传递函数 $T(s)$ 直接得到系统的频率特性函数 $T(j\omega)$,它包含了幅值和相角两个因素,通常用图形或曲线来表示 $T(j\omega)$ 的幅值和相角随频率变化的情况,它们能深刻地揭示控制系统分析和设计的内涵。

七、实验心得

通过这次实验，我学会了使用 matlab 还有 simulink 进行系统或环节的频率特性测试，先通过 simulink 搭建系统传递函数，然后利用正弦波信号模块进行输入，scope 模块输出波形图，通过输出波形图就可以读出输出波形峰值以及与输入波形的相位差，然后我可以通过调节输入的正弦波参数，例如本次实验中是调节频率，逐渐增大频率，我们可以得到不同的输出波形，进而得知系统的频率特性，随着频率增大，可以得知输出正弦波的幅值偏离输入正弦波越来越多，并且相位差也越来越大，对于二阶控制系统的影响尤为明显。