



北京航空航天大学
B E I H A N G U N I V E R S I T Y

自动控制原理实验 A(1) 实验报告

院(系)名称	高等理工学院
学 号	16231235
姓 名	李谨杰
指 导 教 师	崔勇

2018 年 12 月 16 日

实验三 频率特性测试与频域分析法建模实验

实验时间：2018.12.11 实验编号： 同组同学：无

一、实验目的

- 1、掌握频率特性的测试原理及方法。
- 2、学习根据所测定出的系统的频率特性，确定系统传递函数的方法。

二、实验内容

1. 测定给定环节的频率特性。

系统模拟电路图及系统结构图分别如图 2.2.1（已标出选值）及图 2.2.2。

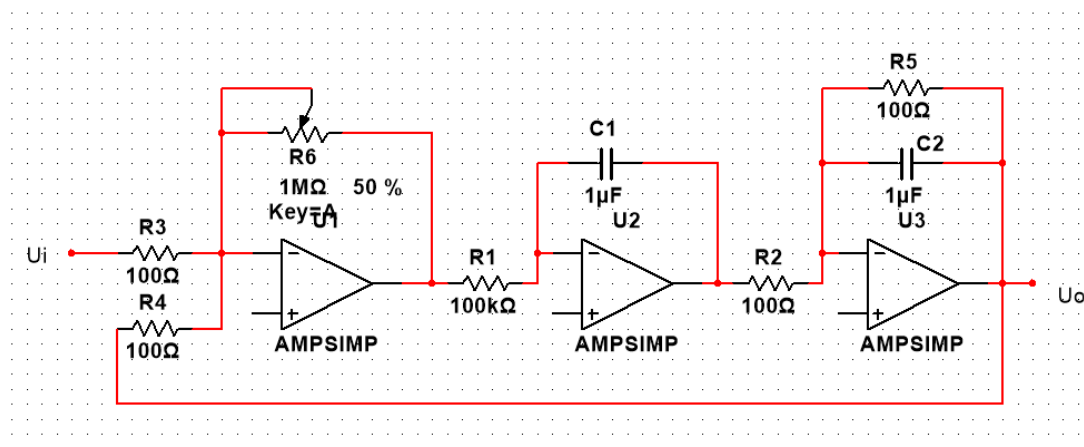


图 2.2.1 系统模拟电路图

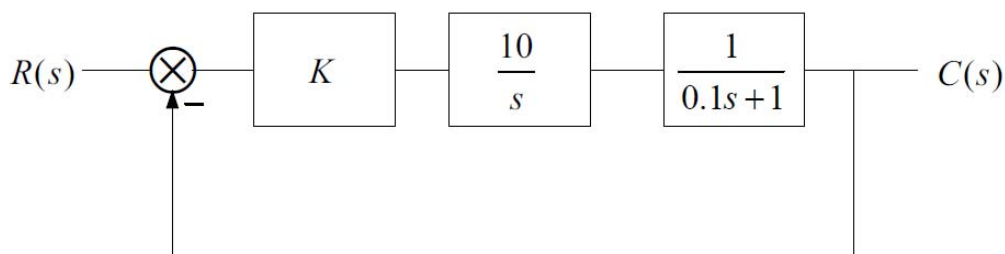


图 2.2.2 系统模拟电路图

系统传递函数为：

取 $R=200\text{K}\Omega$ ，则 $G(S)=200/(S^2+10S+200)$

取 $R=500\text{K}\Omega$ ，则 $G(S)=500/(S^2+10S+500)$

若正弦输入信号为 $U_i(t) = A_1 \sin(\omega t)$ ，则当输出达到稳态时，其输出信号为 $U_o(t) = A_2 \sin(\omega t + \psi)$ 。改变输入信号频率 $f=\omega/2\pi$ 值，便可测得二组 A_1/A_2 和 ψ 随 f (或 ω) 变化的数值，这个变化规律就是系统的幅频特性和相频特性。

2. 根据测定的系统频率特性，确定系统的传递函数。

三、实验原理

1. 幅频特性即测量输入与输出信号幅值 A_1 及 A_2 ，然后计算其比值 A_2/A_1 。

2. 实验采用“李沙育图形”法进行相频特性的测试。设有两个正弦信号： $X(\omega t)=X_m\sin(\omega t)$ ， $Y(\omega t)=Y_m\sin(\omega t+\psi)$ 若以 $X(t)$ 为横轴， $Y(t)$ 为纵轴，而以 ω 作为参变量，则随着 ωt 的变化， $X(t)$ 和 $Y(t)$ 所确定的点的轨迹，将在 X - Y 平面上描绘出一条封闭的曲线。这个图形就是物理学上成称为的“李萨如图形”。

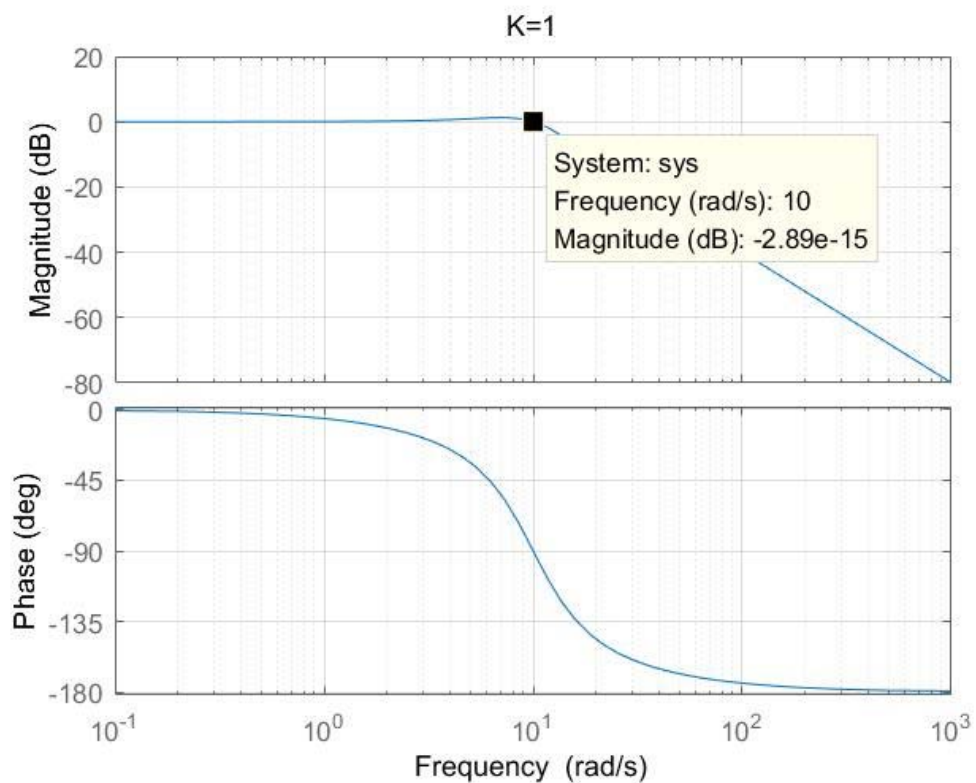
3. 相位差角 Ψ 的求法:

对于 $X(\omega t)=X_m\sin(\omega t)$ 及 $Y(\omega t)=Y_m\sin(\omega t)$

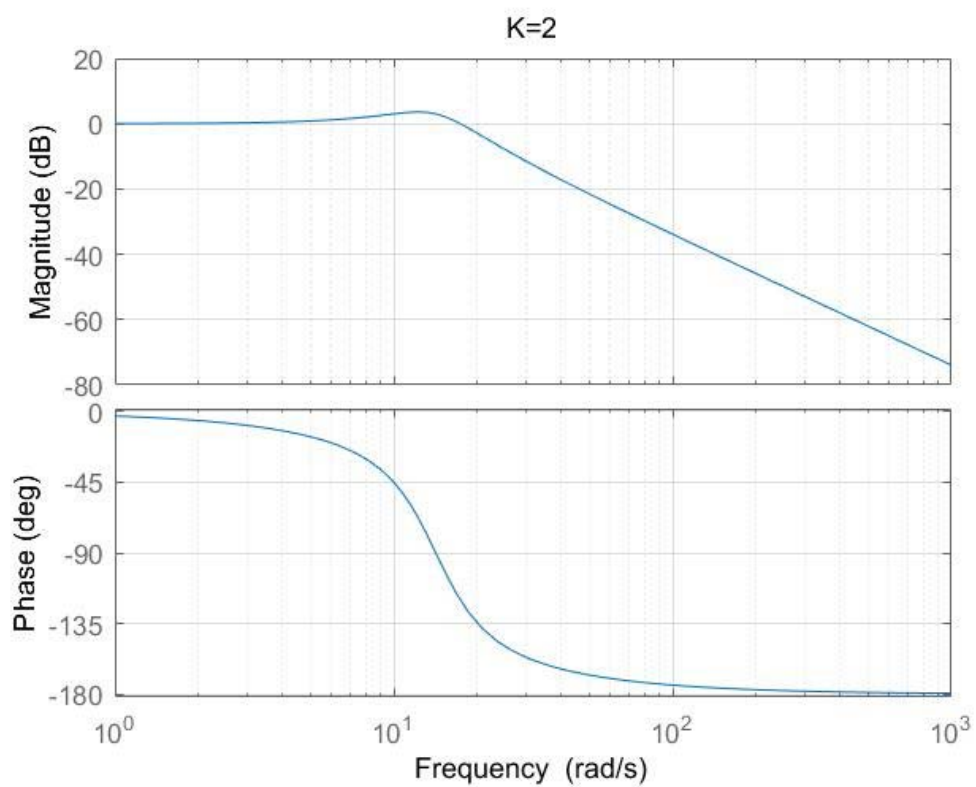
当 $\omega t=0$ 时，有 $X(0)=0$ ； $Y(0)=Y_m\sin(\psi)$

即 $\psi=\text{ArcSin}(Y(0)/Y_m)$ ， $0\leq\psi\leq\pi/2$ 时成立

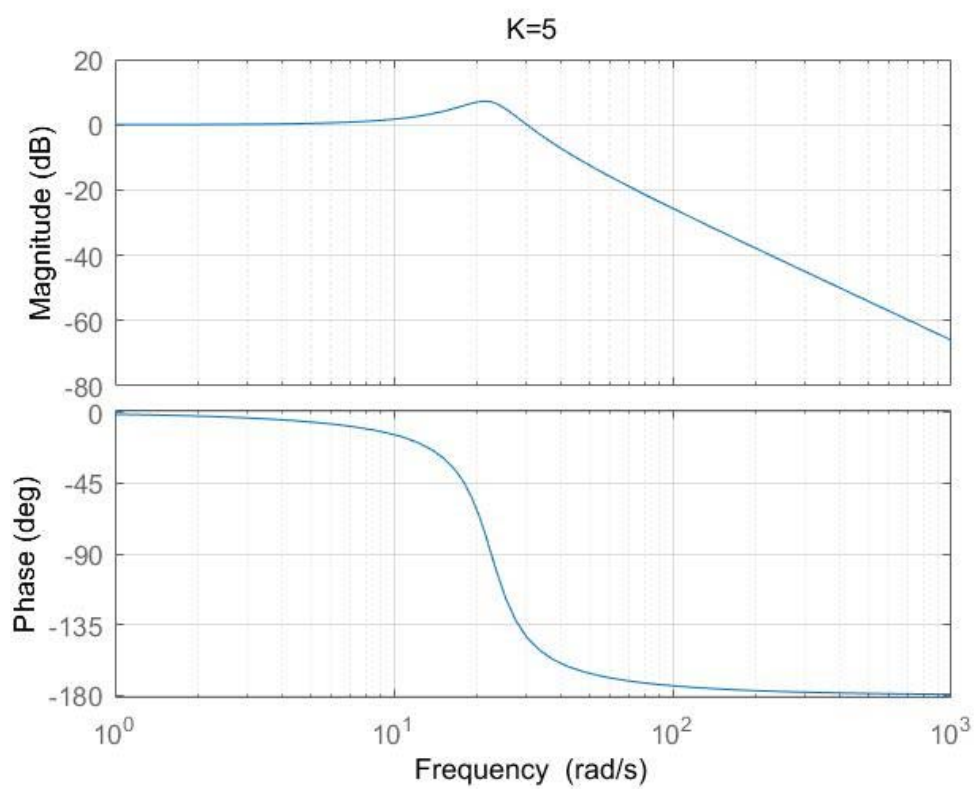
波特图仿真：



转折频率 $\omega=10\text{rad/s}$ 。



转折频率在 $\omega=14\text{rad/s}$ 左右。



转折频率在 $\omega=22.4\text{rad/s}$ 左右。

四、实验设备

1. 数字计算机
2. 电子模拟机
3. 万用表
4. 测试导线

五、实验步骤

1. 画出系统模拟运算电路图，标出电阻、电容的取值。
2. 画出 $K=2$ 和 $K=5$ 两种情况下的自动方式、示波器方式和李萨育图形。
3. 填写实验数据表格。
4. 用测量的实验数据分别计算出两种系统的传递函数的参数，并确定系统的传递函数。
5. 分析实验数据，就理论值与实测值的差异进行分析，说明误差产生的原因。

六、实验结果

选取一部分实验图像进行展示，其他实验图像类似，就不一一列出了。

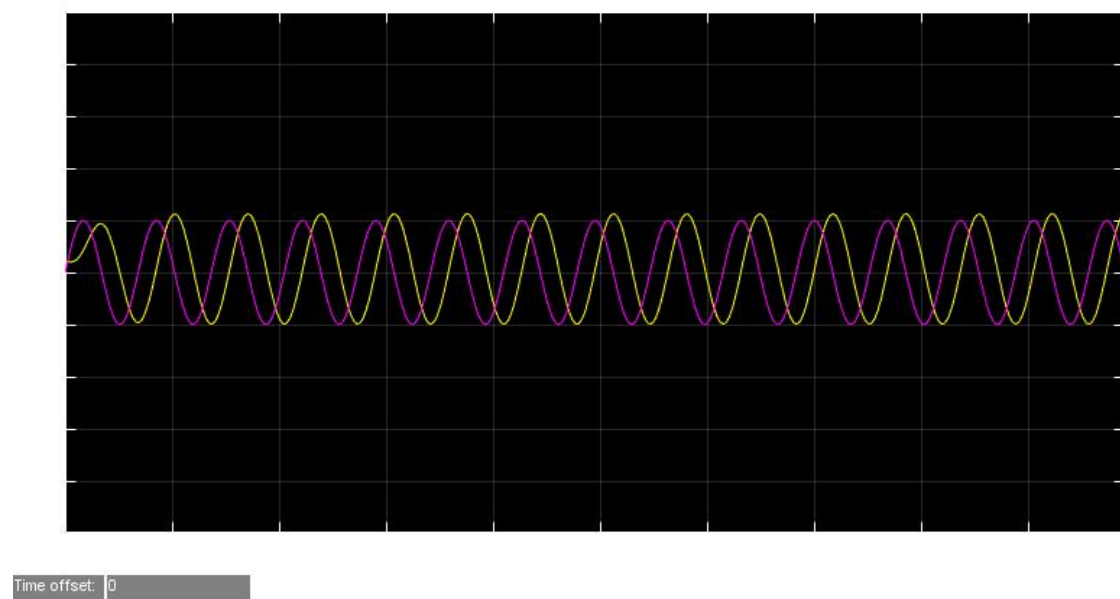


图 1. $K=1$ ， $\omega=9.2$ 时的输入与输出图像

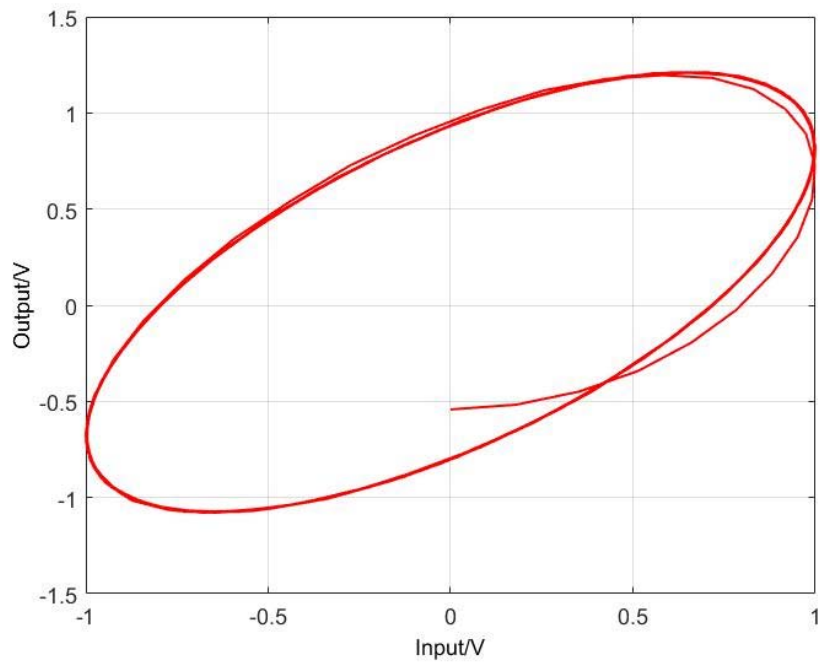


图 2. $K=1$, $w=6$ 时的李萨如图像

K=1 时的频率响应									
序号	f/Hz	ω /(rad/s)	A_r	A_c	Y_m	Y_o	A_c/A_r	Y_o/Y_m	ϕ /deg
1	0.637	4	1	1.147	1.147	0.591	1.147	0.515	-31.015
2	0.955	6	1	1.211	1.211	0.933	1.211	0.770	-50.393
3	1.273	8	1	1.206	1.206	1.167	1.206	0.968	-75.389
4	1.464	9.2	1	1.125	1.125	1.120	1.125	0.996	-84.596
5	1.910	12	1	0.820	0.820	0.698	0.820	0.851	-121.655
6	2.228	14	1	0.630	0.630	0.440	0.630	0.698	-135.700
7	2.546	16	1	0.493	0.493	0.283	0.493	0.574	-144.984

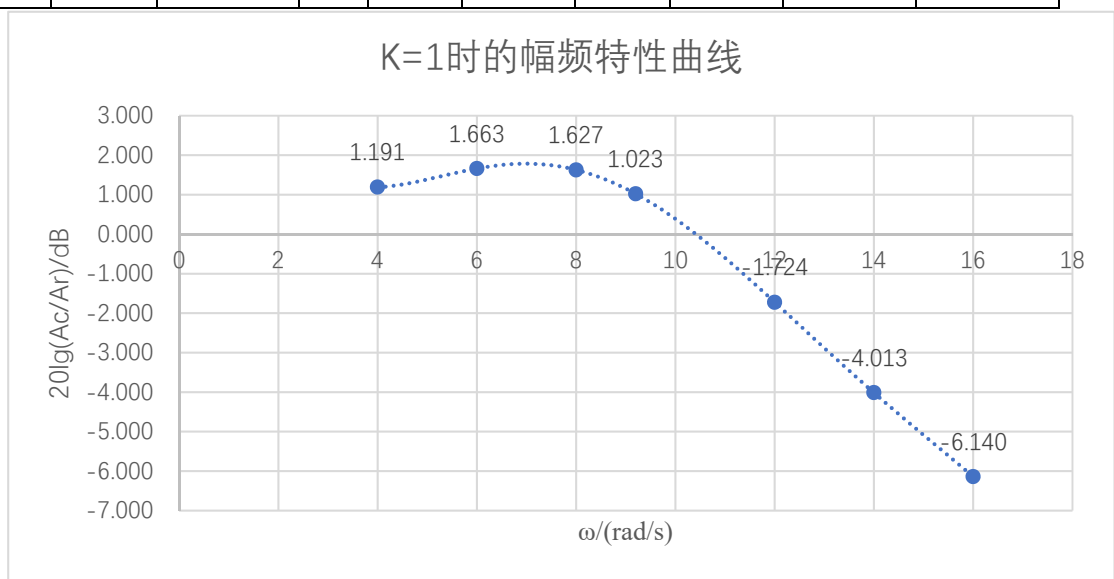


图 3. $K=1$ 时的幅频特性曲线

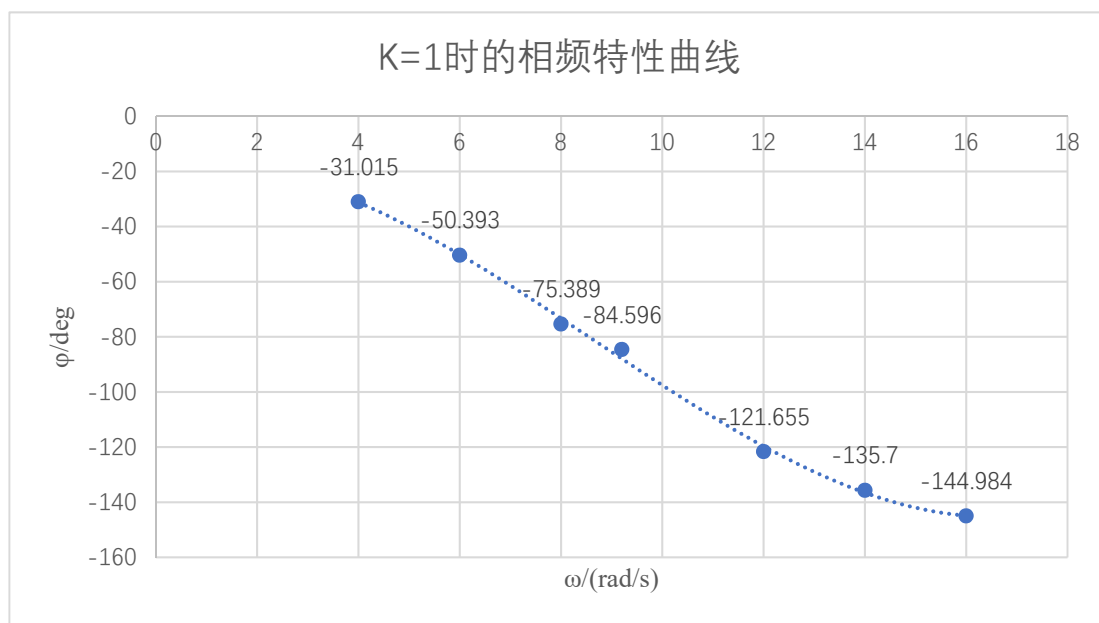


图 4. K=1 时的相频特性曲线

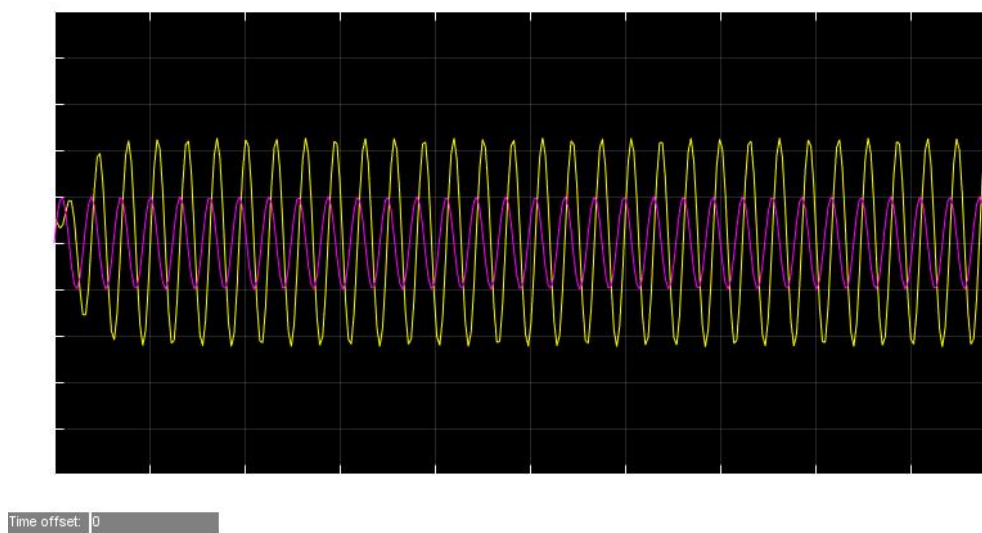


图 5. K=5, $\omega=20.2$ 时的输入与输出曲线

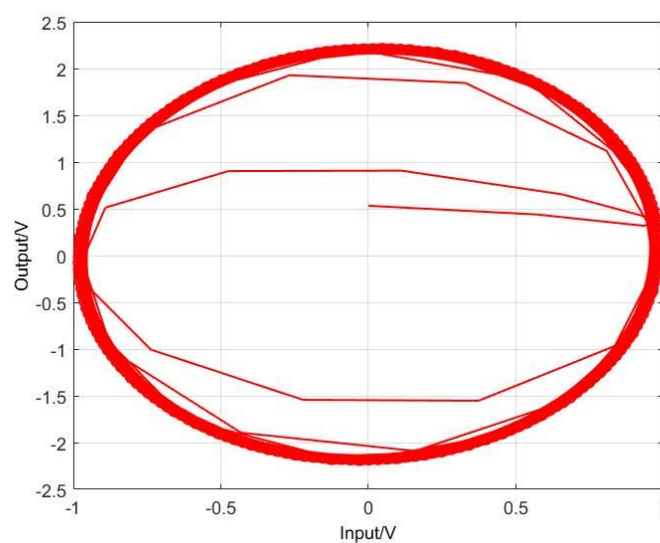


图 6. $K=5$, $\omega=20.2$ 时的李萨如曲线

K=5 时的频率响应									
序号	f/Hz	ω /(rad/s)	Ar	Ac	Ym	Yo	Ac/Ar	Yo/Ym	ϕ /deg
1	1.273	8	1	1.143	1.143	0.352	1.143	0.308	-17.936
2	1.910	12	1	1.357	1.357	0.674	1.357	0.497	-29.781
3	2.546	16	1	1.758	1.758	1.328	1.758	0.755	-49.061
4	3.215	20.2	1	2.266	2.266	2.261	2.266	0.998	-86.193
5	3.820	24	1	1.841	1.841	1.333	1.841	0.724	-133.609
6	4.456	28	1	1.133	1.133	0.337	1.133	0.297	-162.696
7	5.093	32	1	0.747	0.747	0.039	0.747	0.052	-177.007

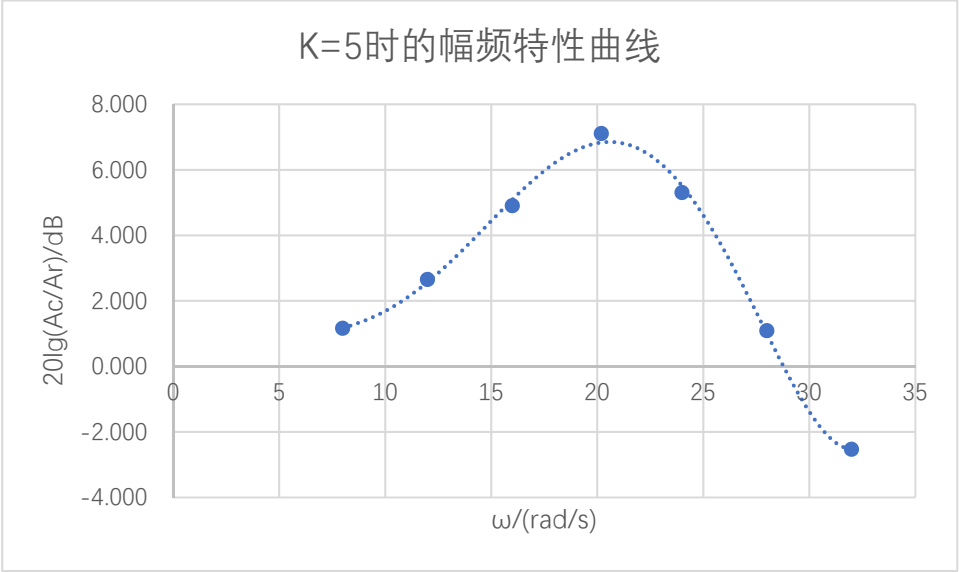


图 7. $K=5$ 时的幅频特性曲线

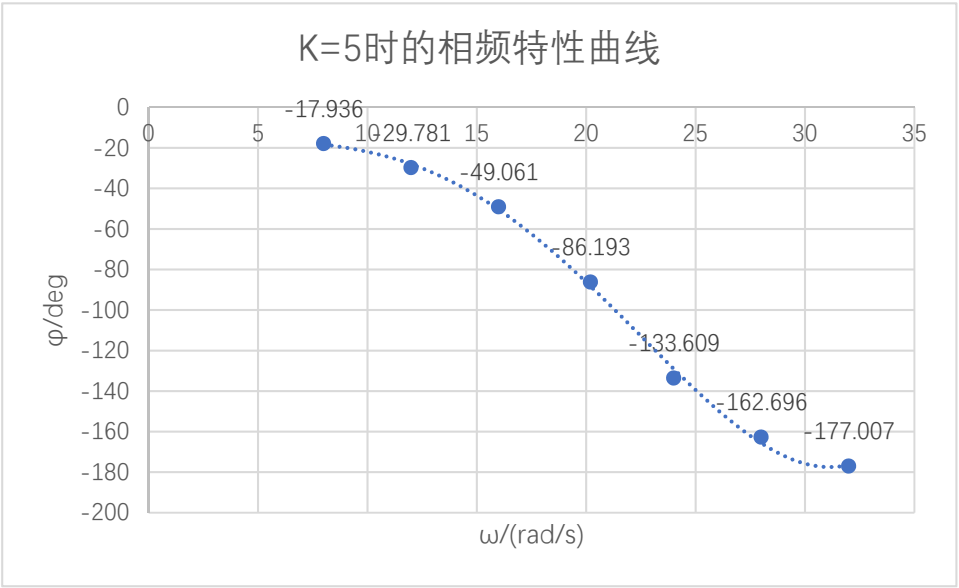


图 8. $K=5$ 时的相频特性曲线

七、结果分析

(1) 当 $k=1$ 时, 由幅频图像可知, 最高点纵坐标为 1.8dB。
由相频图像可知, 当角度为 -90° 时, 转折频率 $\omega_n=9.3\text{rad/s}$ 。
因为该系统为二阶振荡系统, 所以传递函数满足形式:

$$G(j\omega) = \frac{\omega_n^2}{(j\omega)^2 + 2\zeta\omega_n j\omega + \omega_n^2}$$

当 $\omega_m = \omega_n * \sqrt{1 - 2\zeta^2}$ 时, 幅值取最大值 $A_m = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} = 10^{\frac{1.8}{20}}$

解得: $\zeta=0.457$

所以原方程的系统传递函数为:

$$G(s) = \frac{9.3^2}{(s)^2 + 2 * 0.457 * 9.3 * s + 9.3^2} = \frac{86.49}{s^2 + 8.50s + 86.49}$$

转折频率理论值为 10rad/s, 所以转折频率误差为 $\frac{(10-9.3)}{10} * 100\% = 7.0\%$

阻尼比理论值为 0.5, 所以阻尼比的误差为 $\frac{(0.5-0.457)}{0.5} * 100\% = 8.6\%$

(2) 当 $k=5$ 时, 由幅频图像可知, 最高点纵坐标为 6.85dB。
由相频图像可知, 当角度为 -90° 时, 转折频率 $\omega_n=20.2\text{rad/s}$ 。
因为该系统为二阶振荡系统, 所以传递函数满足形式:

$$G(j\omega) = \frac{\omega_n^2}{(j\omega)^2 + 2\zeta\omega_n j\omega + \omega_n^2}$$

当 $\omega_m = \omega_n * \sqrt{1 - 2\zeta^2}$ 时, 幅值取最大值 $A_m = \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} = 10^{\frac{6.85}{20}}$

解得: $\zeta=0.234$

所以原方程的系统传递函数为:

$$G(s) = \frac{20.2^2}{(s)^2 + 2 * 0.234 * 20.2 * s + 20.2^2} = \frac{408.04}{s^2 + 9.45s + 408.04}$$

转折频率理论值为 22.36rad/s, 所以转折频率误差为 $\frac{(22.36-20.2)}{22.36} * 100\% =$

9.7%

阻尼比理论值为 0.22, 所以阻尼比的误差为 $\frac{(0.234-0.22)}{0.22} * 100\% = 6.4\%$

(3) 误差分析

如上, 理论值与实际值有一定误差。原因分析如下:

1. 可变电阻、固定电阻与固定电容的实际值与理想值之间具有一定误差。
2. 接线上的可能有接触不好的地方, 引入多余电阻。
3. 理想运放的放大倍率是无穷大, 而实际运放不是无穷大, 这可能会带来误差。
3. 在实验得到的李沙育图像中找 Y_0 时发现, 当 $X=0$ 时, 不一定有相应的 Y

与之对应。这是由于系统实际输出电压为连续的，而 A/D 转换是离散的，所以实验得到的 Y_o 并不是实际的 Y_o ，而是有一定偏差。

4. 画曲线所选的 ω 值太少，作图有较大误差。

八、收获、体会及建议

通过本次实验，我掌握了频率特性的测试原理和方法，对理论课上的知识有了更深入的掌握。我还学习了通过李萨如图像获得相角的方法，并通过测量的系统频率特性，确定了系统的传递函数，收获很大。

实验四 串联校正设计实验

实验时间：2018.12.18 实验编号： 同组同学：无

一、实验目的

1. 了解和掌握串联校正的分析和设计方法。
2. 研究串联校正环节对系统稳定性及过渡过程的影响。

二、实验内容

1. 为开环传递函数为 $G_0(s) = \frac{4}{s(s+1)}$ 的单位负反馈系统设计串联超前校正装置，要求相角裕度 $\gamma \geq 45^\circ$ ，并进行半实物实时仿真验证。

2. 为开环传递函数为 $G_0(s) = \frac{4}{s(s+1)}$ 的单位负反馈系统设计串联滞后校正装置，要求相角裕度 $\gamma \geq 45^\circ$ ，并进行半实物实时仿真验证。

3. PID 控制器设计。针对给定系统，设计 PID 控制器，满足指标要求。

系统传递函数为 $G(s) = \frac{s+4}{(s+3)(s+2)(s+1)(s+1)(s+1)}$ ，要求设计 PID 控制器，使控制系统的性能达到 $\sigma\% \leq 10\%$ ， $t_s < 8s$ 。

三、实验原理

1. 系统结构图如图 3.1 所示。

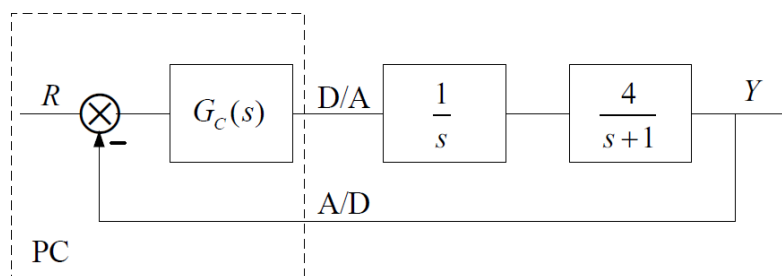


图 3.1 系统结构图

其中 $G_c(s)$ 为校正环节，可放置在系统模型中来实现，也可使用模拟电路的方式由模拟机实现。

2. 系统模拟电路如图 3.2 所示。

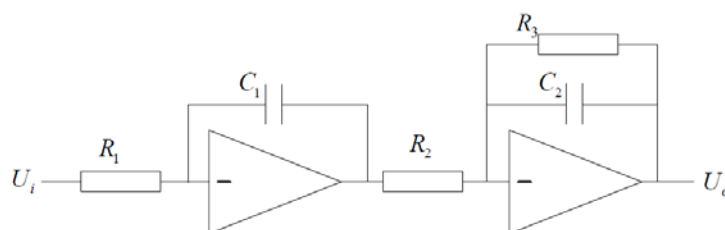


图 3.2 系统模拟电路图

3. 未加校正时， $G_c(s) = 1$ 。

4. 加串联超前校正时, $G_c(s) = \frac{aTs+1}{Ts+1}$ ($a > 1$)。可参考 $a=2.44$, $T=0.26$, 则

$$G_c(s) = \frac{0.63s+1}{0.26s+1}。$$

5. 加串联滞后校正时, $G_c(s) = \frac{bTs+1}{Ts+1}$ ($0 < b < 1$)。自行设计参数。给定 $b=0.12$, $T=83.33$, 则 $G_c(s) = \frac{10s+1}{83.33s+1}$ 。

6. 采用 Ziegler-Nichols 法或衰减曲线或实践法整定 PID 参数, 使结果达到指标要求。

四、实验设备

1. 数字计算机
2. 电子模拟机
3. 万用表
4. 测试导线

五、实验步骤

1. 熟悉 HHMN-1 型电子模拟机的使用方法。将各运算放大器接成比例器, 通电调零。断开电源, 按照系统结构图和系统传递函数计算电阻和电容的取值, 并按照模拟线路图搭接线路。

2. 谨慎连接输入、输出端口, 不可接错。线路接好后, 经教师检查后再通电。

3. 在 Windows XP 桌面用鼠标双击“MATLAB”图标后进入, 在命令行处键入“autolab”进入实验软件系统。

4. 在系统菜单中选择实验项目, 选择“实验三”, 在窗口左侧选择“实验模型”, 其它步骤察看概述 3.2 节内容。

5. 分别完成不加校正、加入超前校正、加入滞后校正的实验。在系统模型上的“Manual Switch”处可设置系统是否加入校正环节, 在“ $G_c(s)$ ”处可设置校正环节的传递函数。

6. 绘制以上三种情况时系统的波特图。

7. 采用示波器“Scope”观察阶跃响应曲线。观测试验结果, 记录实验数据, 绘制实验结果图形, 完成实验报告。

8. 研究性实验方法。

实验者可自行确定系统传递函数, 同时设计校正环节, 并建立系统的 SIMULINK 模型, 验证自动控制理论相关的理论知识。实现步骤可查看概述 3.3 节内容。

9. 根据设计指标要求, 设计 PID 控制器并进行参数整定。采用 Matlab 仿真的方式, 测试未加 PID 控制和加入 PID 控制后两种情况下的响应曲线, 并计算超调量和调节时间。

六、实验结果

1. 选取阻值, 设计电路图如图 6.1。

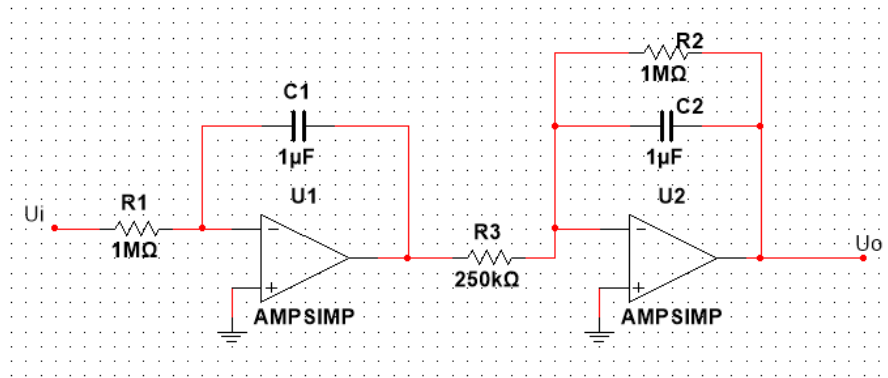


图 6.1 电路原理图

2. 系统的不加校正、加超前校正、加滞后校正、使用另一组参数的加滞后校正的阶跃响应曲线分别如图 6.2、图 6.3、图 6.4a 图 6.4b。

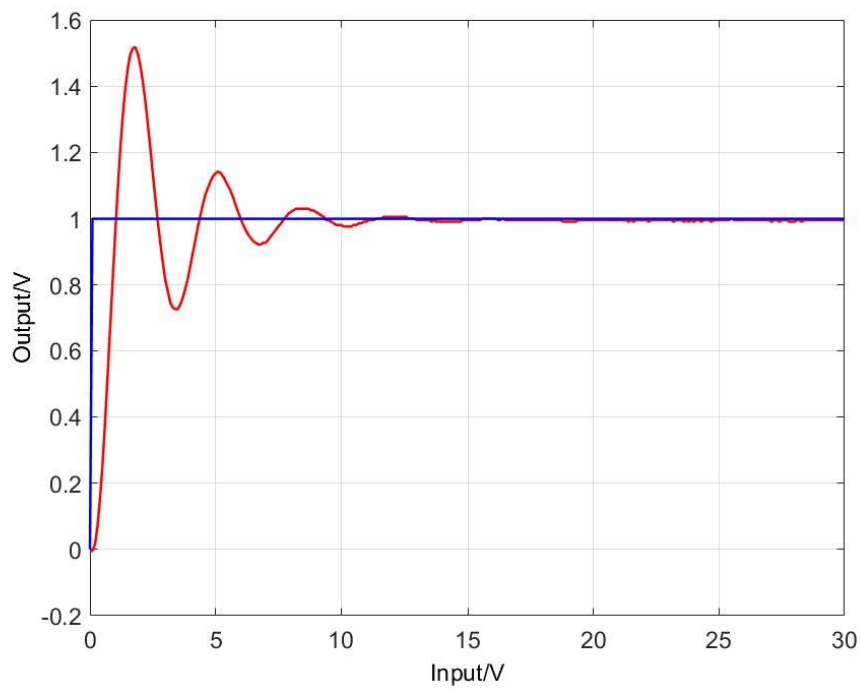


图 6.2 不加校正的阶跃曲线

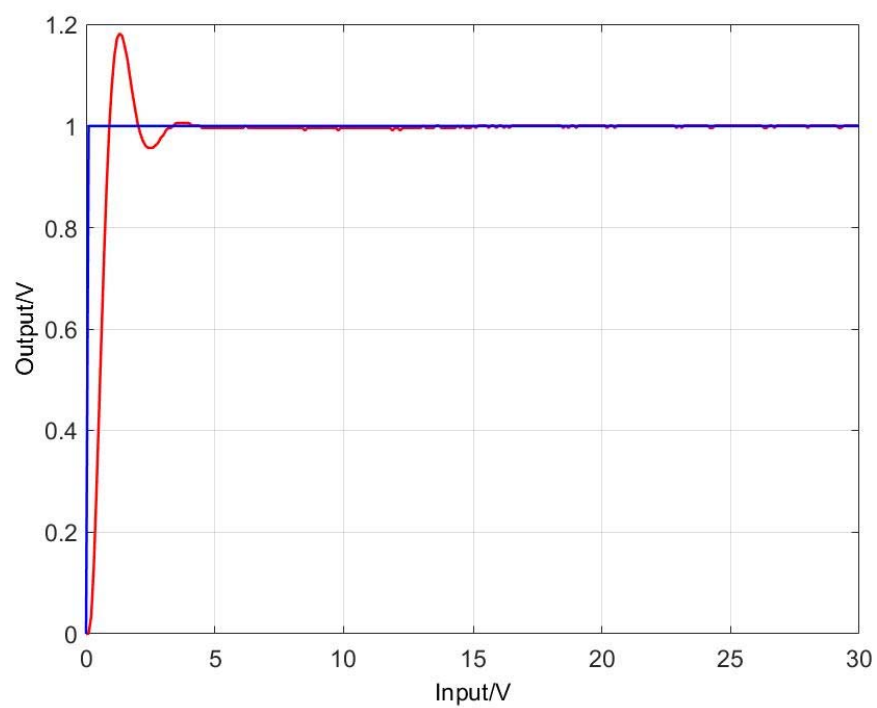


图 6.3 加超前校正的阶跃曲线

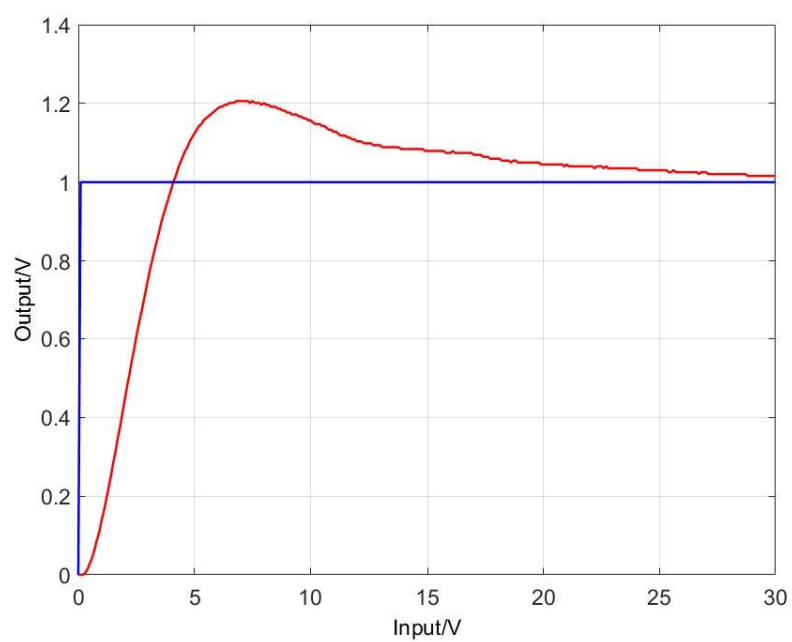


图 6.4a 加滞后校正的阶跃曲线

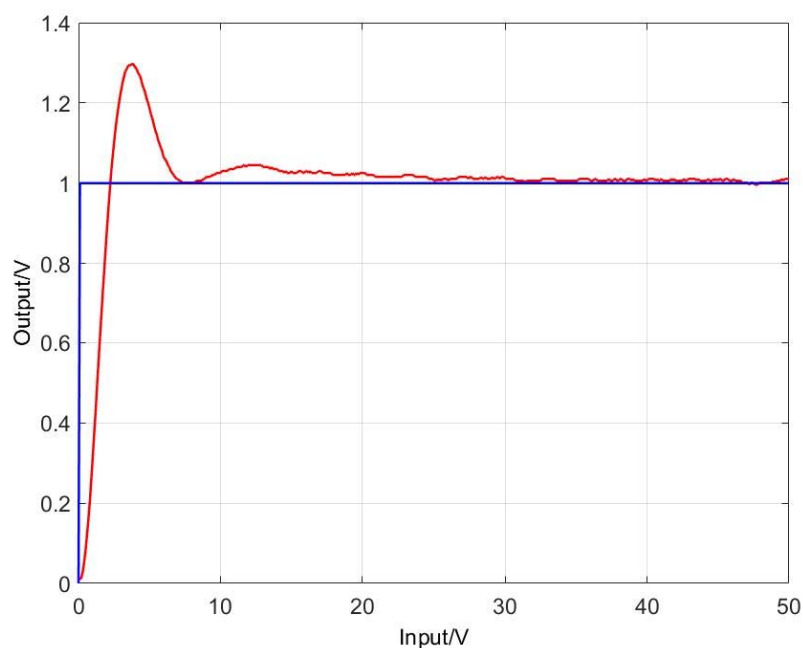


图 6.4b 自己计算得 $T=39.33$, $b=0.254$ 的阶跃响应曲线

我通过理论课所学和 MATLAB 仿真得出一组滞后校正的参数 $T=39.33$, $b=0.254$, 实验可知, 经过该参数的滞后校正, 响应的超调量略大于实验给定参数, 但调节时间小于给定参数。

3. PID 控制器的设计。图 6.5、图 6.6、图 6.7、图 6.8、图 6.9 分别是无 PID、只引入比例环节、引入比例积分环节、衰减振荡法调节 PID、实验法调节 PID 参数的阶跃响应曲线。

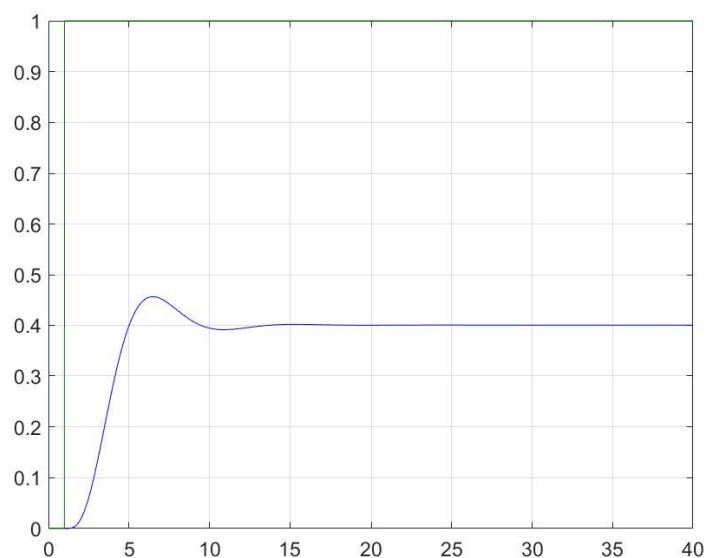


图 6.5 无 PID 阶跃曲线。

可以看出此时实际值与理想值之间有非常大的稳态误差。

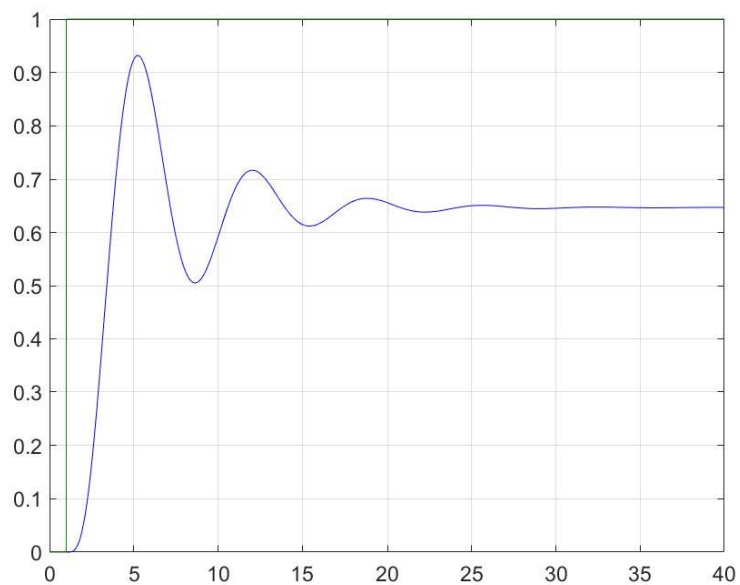


图 6.6 只引入比例环节

可以看出引入比例环节以后，系统的稳态误差减小，但仍存在。实际工程中，加入比例环节之后的稳态误差，来自于摩擦、散热等因素。

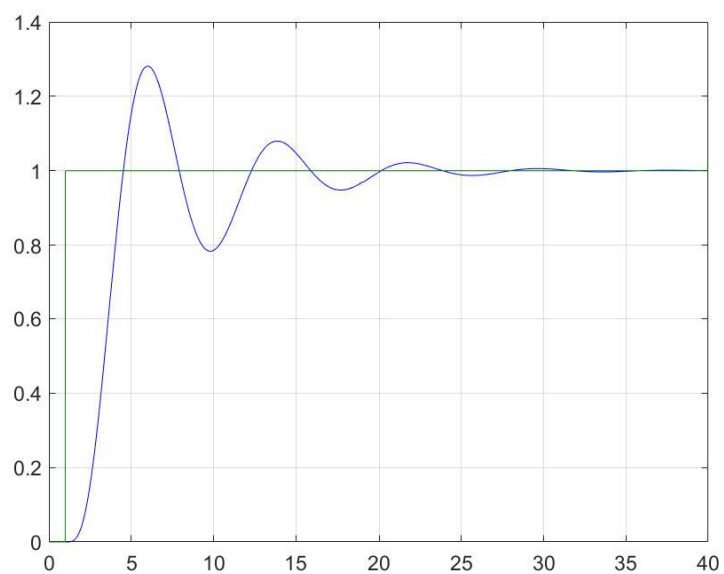


图 6.7 引入比例 P，积分 I 环节。 $\sigma\%=28.0\%$ ， $t_s(2\%)=22.05s$

由图可以看出，加入积分环节以后，稳态误差消除为 0，但系统的超调量较大，振荡较多，调节时间较长。

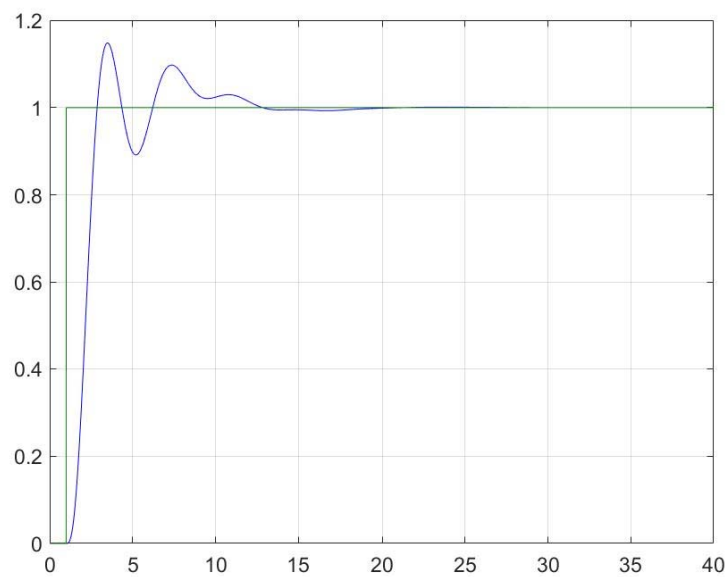


图 6.8 引入 PID 环节，衰减振荡法取值。 $\sigma\%=14.8\%$ ， $t_s(2\%)=11.71s$

由图可以看出，加入微分环节后，超调量减小，调节时间也减少，但还不能满足设计要求。这次 PID 参数由衰减振荡法得出 ($P=3.44$ ， $I=1.679$ ， $D=5.78$)，但效果一般，因此衰减振荡法也仅仅是一种经验方法，最终结果还是需要进一步调试。

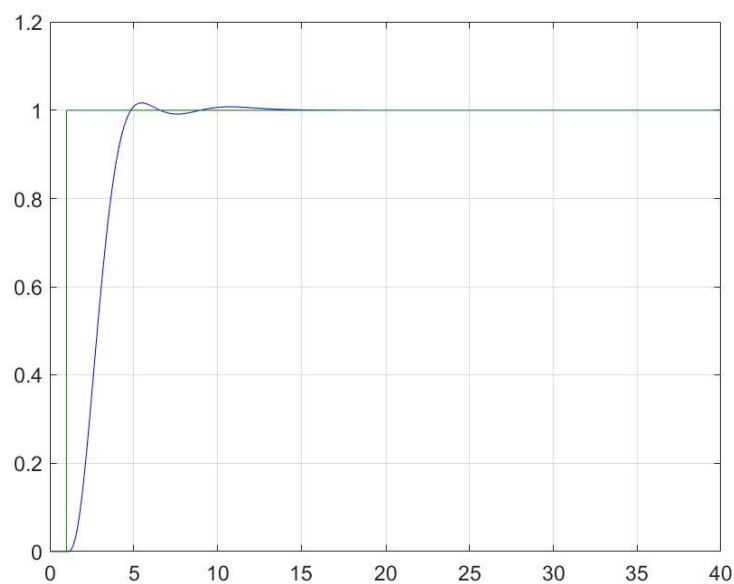


图 6.9 PID 最终调试结果， $\sigma\%=1.7\%$ ， $t_s(2\%)=4.58s$

对于线性系统，经过反复调节，PID 调节可以达到非常理想的结果，超调量很小，快速性很好，没有稳态误差。

七、结果分析

1. 对校正环节时域特性的分析：

由图 6.2、图 6.3、图 6.4a、图 6.4b 可知，相同变化下，加入超前校正可以减

少系统超调量，缩短系统调节时间，提升快速性，显著改善性能。

加入滞后校正，可以减少超调量，但调节时间较长，一定程度上降低了快速性。用我计算得出的数据，超调量减少较少，调节时间少量延长。可见，滞后校正越显著，系统时域特性越差。

2. 对校正环节频域特性的分析：

在 matlab 中使用 margin 函数进行波特图绘制并求解截止频率，相角裕度。

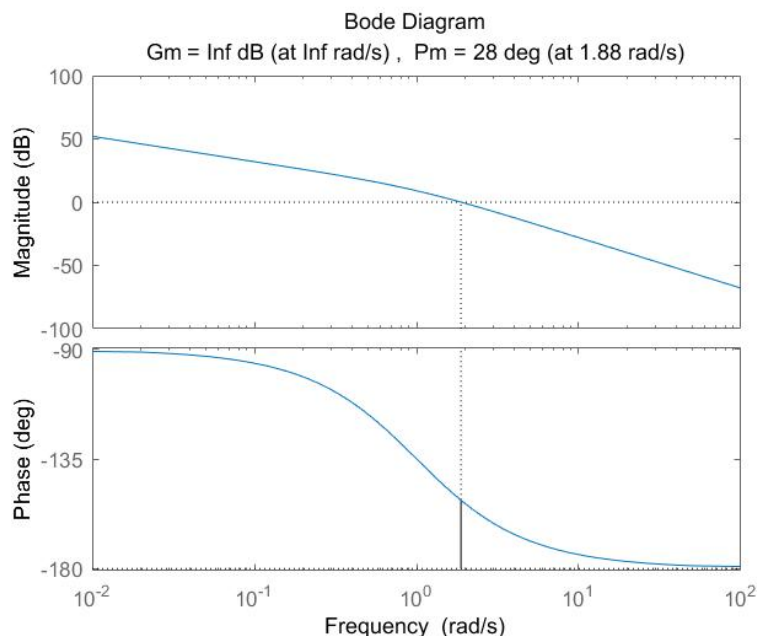


图 7.1 无校正时的频域曲线

如图 7.1，截止频率为 1.88rad/s ，相角裕度 $\gamma=28^\circ$ ，不能满足设计要求。

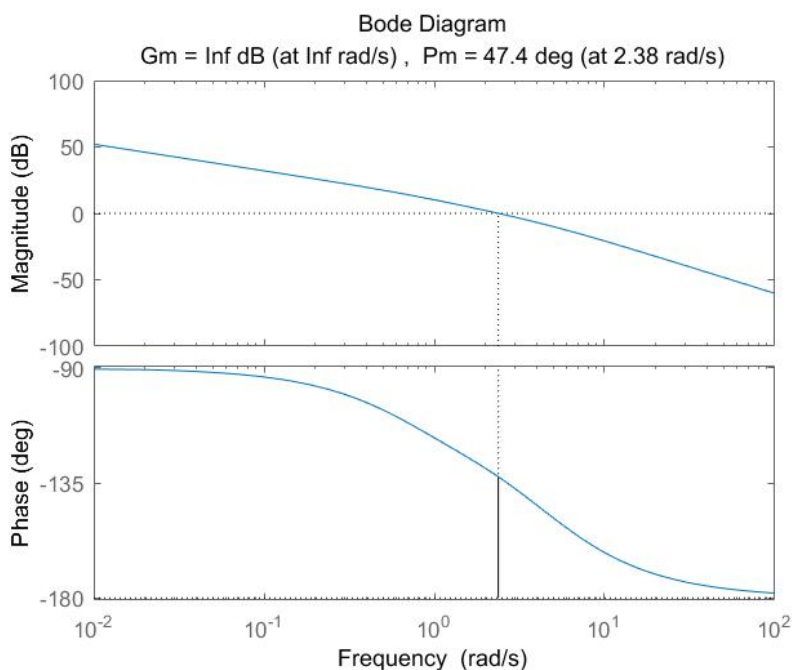


图 7.2 加入超前校正后的频域曲线

如图 7.2，截止频率为 2.38rad/s ，相角裕度 $\gamma=47.4^\circ$ ，满足设计需求。但是超前校正会将整个曲线往上抬，增大截止频率，减弱系统的抗干扰能力。

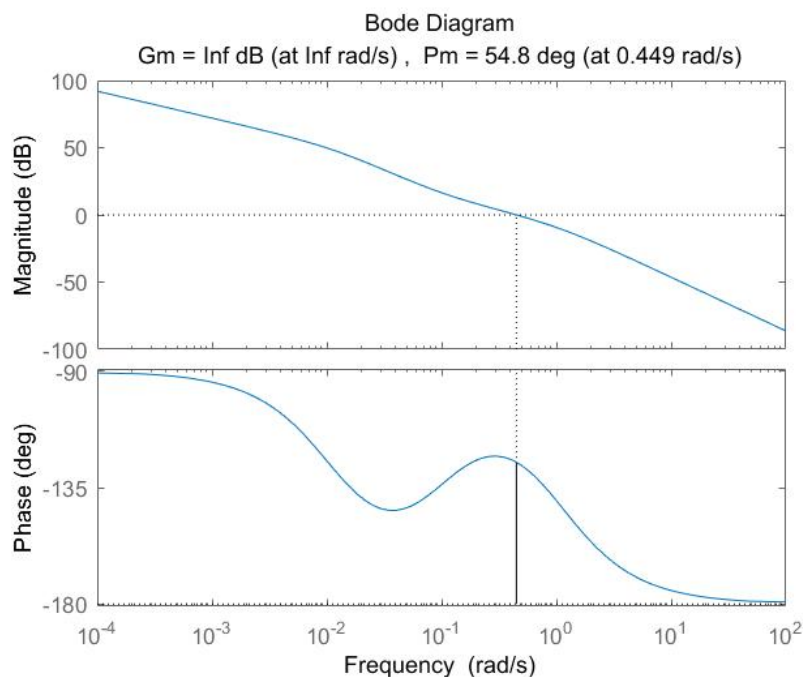


图 7.3 加入滞后校正的频域曲线

如图 7.3 可知，转折频率为 0.449rad/s ，相角裕度 $\gamma=54.8^\circ$ ，满足设计需求。同时加入滞后校正，可以增加低频信号的放大倍率，加速高频信号衰减。

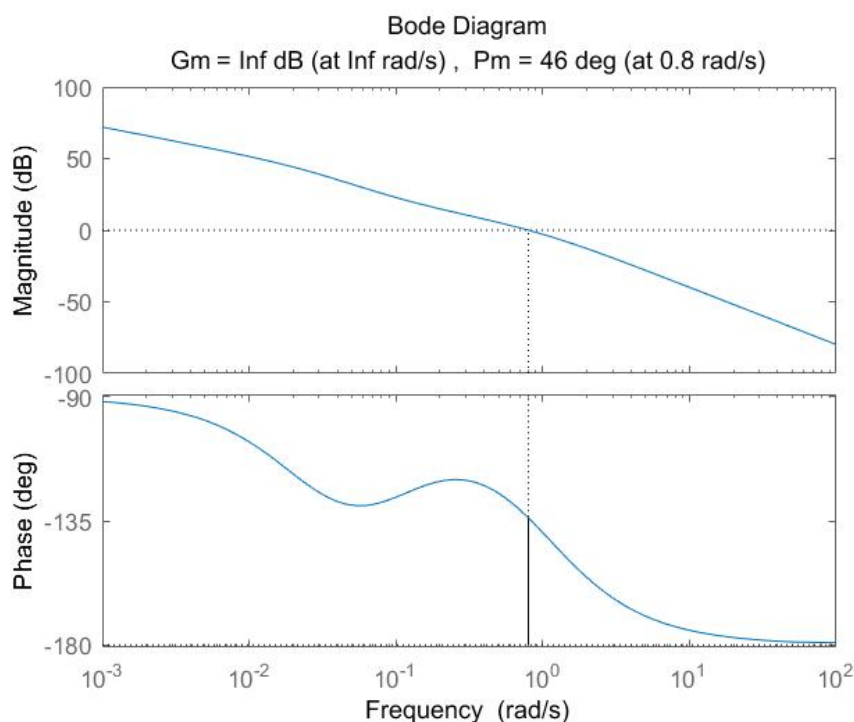


图 7.4 加入我的参数滞后校正的频域曲线

如图 7.4，我选定的参数也可以满足设计需求。

简述参数选取过程如下：

由原波特图，可知频率 $\omega=1.0\text{rad/s}$ 时，相角约为 45° ，满足需求。所以引入的滞后校正需要将截止频率控制在 1.0rad/s 。又因为加入滞后校正会抬高相频曲线，故要取的过一些，这里取 0.8rad/s 。由赋值方程：

$$|G_c(s) * G(s)| = \left| \frac{bTs + 1}{Ts + 1} * \frac{4}{s(s + 1)} \right| = \frac{\sqrt{(bT * 0.8)^2 + 1}}{\sqrt{(T * 0.8)^2 + 1}} * \frac{4}{0.8 * \sqrt{0.8^2 + 1}} = 1$$

为了表达方便，令 $bT=10$ 。联立上述两式，可知 $T=39.33$ ， $b=0.254$ 。经仿真验证，设计满足要求。

3. PID 调试经验记录

很容易可以把 PID 调节成一个波峰，一个波谷的状态，之后需要做的是精细调整 PID 参数，使得在满足：第一个波峰上升的值大于第一个波谷下降的值，的前提下，整体超调量尽可能小，调节时间尽可能长。

经过试验，发现第一个波峰主要由比例、积分决定，第一个波谷主要由微分、积分决定，因此需要对这些参数联合进行微调。

八、收获、体会及建议

1. 在第一次实验中，我进行 PID 仿真，由于我将仿真步长改成固定，但不够小（0.05s），加入微分环节后，只要运行仿真就报错。之后，当我把仿真步长改为 0.01s，就可以正常仿真了。

2. PID 调节需要反复调试，最终可以非常非常大的改善系统的特性。

实验五 控制系统测试、设计综合实验

实验时间：2018.12.25 实验编号： 同组同学：无

一、实验目的

1. 了解丝杠系统的组成及原理。
2. 熟悉控制系统设计的方法。
3. 掌握 PID 参数整定的方法。
4. 掌握控制系统建模方法及仿真分析。

二、实验内容

1. 通过对丝杠系统的理论分析，建立数学模型。
通过对丝杠系统的分析，建立系统的数学模型。为便于分析和设计，在建模过程中可对模型进行化简。
2. 根据建模结果采用 PID 控制对丝杠的位置进行控制，用 Matlab 进行仿真。
对 PID 参数进行整定，对丝杠的位置进行控制，要求位置精度不超过 1mm，响应尽量快，超调小或没有。采用 Matlab 进行仿真。
3. 采用 PLC、变频器等硬件设备对丝杠实物进行控制。
使用 PLC、变频器等硬件设备对丝杠实物进行位置控制，要求位置精度不超过 1mm。

三、实验原理

1. 丝杠的结构与组成

滚珠丝杠系统机械传动机构由伺服电机、联轴器、滚珠丝杠副、两端支撑轴承、直线导轨副等部件组成，如图 3.1 所示。

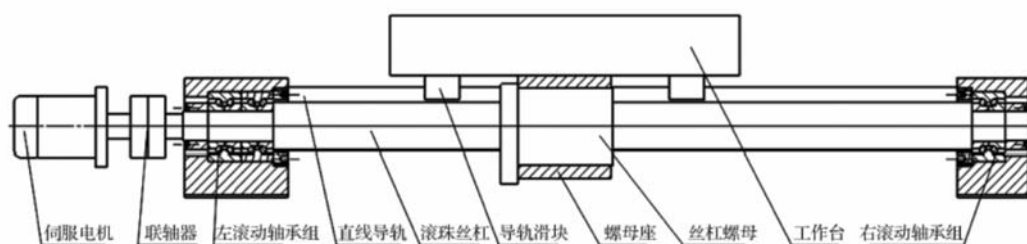


图 3.1 丝杠机械传动机构

2. 数学模型建立

由于系统联轴器连接部分、丝杠运动部分与轴承连接部分以及直线导轨部分的摩擦对丝杠整体运动的影响较大，建立的模型非常复杂。因此，为了简化模型复杂程度，方便对模型的分析，建模过程只考虑粘性摩擦，而电机与丝杠端的连接视作刚性连接，丝杠各部分的转动惯量全部包含进电机的负载惯量中。

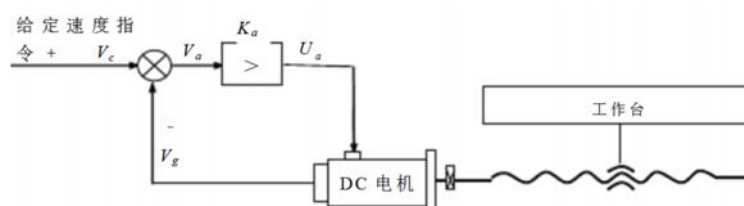


图 3.2 速度闭环系统

电枢控制直流电动机的工作是将电能转换为机械能，由电枢电压 U_a 在电枢回路中产生电枢电流 i_a ，该电流与激磁磁通相互作用产生电磁转矩 M_m ，拖动负载运动。直流伺服电机系统如图 3.3 所示。

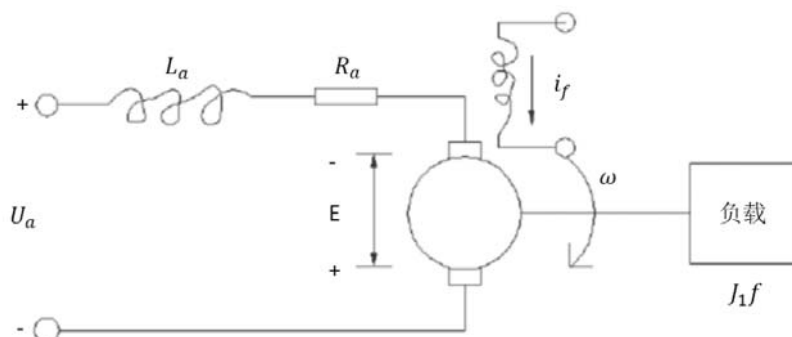


图 3.3 伺服电机系统

根据克希霍夫电压定律，电枢绕组中的电压平衡方程为

$$u_a(t) = i_a(t)R_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a(t)$$

其中， L_a 和 R_a 分别为电枢绕组的电感和电阻。

当直流电动机的电枢转动时，在电枢绕组中有反电动势产生，一般与电动机的转速成正比。

$$E_a(t) = C_e \frac{d\theta_m}{dt} = C_e \omega_m(t)$$

其中， $E_a(t)$ 为反电势， C_e 为反电动势常数， $\omega_m(t)$ 为电动机转速。

电枢电流和磁场相互作用产生电磁转矩，一般电磁转矩与电枢电流成正比。

$$M_m(t) = C_m i_a(t)$$

$M_m(t)$ 为电磁转矩， $i_a(t)$ 为电枢电流， C_m 为转矩常数。

电磁转矩用以驱动负载并克服摩擦力矩，只考虑与速度成正比的粘性摩擦，在无负载情况下，直流电动机转矩平衡方程为

$$M_m(t) = \frac{J_m d^2\theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} = J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B_m \omega_m(t)$$

J_m 为电机等效转动惯量， B_m 为等效阻尼系数。

这样可以建立无负载情况下，伺服直流环节的控制模型

$$\frac{\omega_m(s)}{U_a(s)} = \frac{C_m}{L_a J_m s^2 + (L_a B_m + J_m R_a) s + R_a B_m + C_e C_m}$$

所需参数如下：

电机电阻 $R_a = 21.8\Omega$;

电机电感 $L_a = 1.37mH$;

反电动势常数 $C_e = 0.0307V \cdot s/rad$;

转矩常数 $C_m = 0.0307Nm/A$;

电机转子转动惯量 $J = 5.68 \times 10^{-7}kg \cdot m^2$;

等效阻尼系数 $B_m = 0.0005$;

传动比 $i=29$;

电机轴等效转动惯量 $J_m = 5.71 \times 10^{-7}kg \cdot m^2$.

这样系统的开环传递函数为

$$G(s) = \frac{\omega_m(s)}{U_a(s)} = \frac{0.1932}{1.51 \times 10^{-7} s^2 + 1.32 \times 10^{-4} s + 0.0082}$$

若系统输入为给定滑块速度 V_c ，系统输出为电机转轴角速度 V_g ，则系统的闭环传递函数为：

$$\frac{V_g(s)}{V_c(s)} = \frac{3.8640}{1.51 \times 10^{-7} s^2 + 1.32 \times 10^{-4} s + 3.8722}$$

而力矩与丝杠位移之间的传递函数更为复杂，一般是一个 4 阶系统，经简化后可以用 2 阶系统近似。

$$\frac{x(s)}{T(s)} = \frac{0.00011167(s + 33006)}{s^2 + 1.245s}$$

四、实验设备

1. 数字计算机
2. 丝杠本体
3. PLC 控制系统
4. 路由器及网线

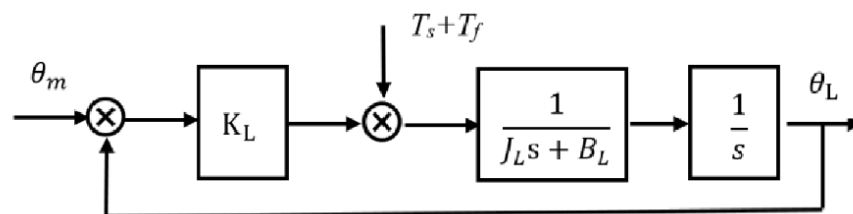
五、实验步骤

1. 熟悉丝杠系统的组成及电机调速系统的原理。
2. 通过对系统的分析，建立系统的数学模型。
3. 通过 Matlab 仿真，分别对丝杠系统的速度、滑块位置进行控制，要求响应速度快，无超调。
4. 使用 PLC 相关软件，将控制率参数进行设置，通过实际系统控制丝杠的位置，要求精度不大于 1mm。
5. 观测实验结果，记录实验数据，及时绘制实验结果图形，填写实验数据表格，完成实验报告。

六、实验结果

1. 数学模型的建立过程：

丝杠机械部分模型为：

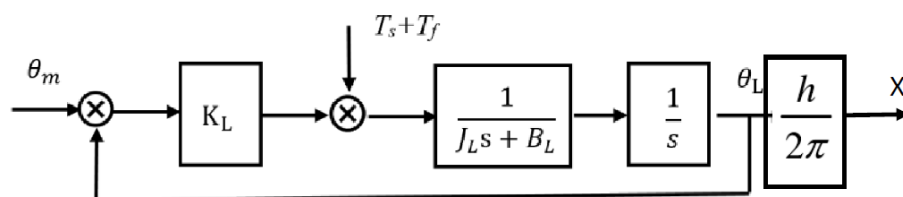


θ_m 为伺服电机转角位移， θ_L 为丝杠转角

其中， K_L 为折算到丝杠轴上的机械部分等效扭转刚度， J_L 为机械部分的等效转动惯量， B_L 为机械部分的等效阻尼系数， T_s 为负载转矩， T_f 为摩擦转矩。

丝杠直线位移量 X 与转角关系为： $X = \frac{h}{2\pi} \theta_L$

其中 h 为丝杠导程。

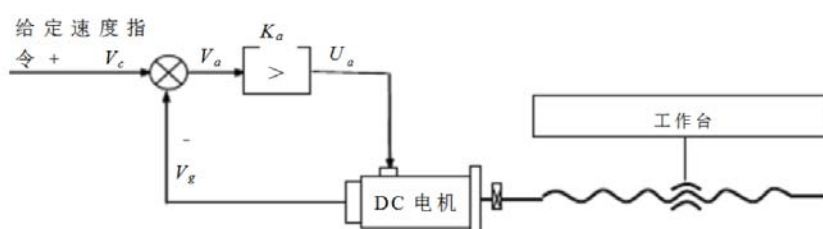


$K_L=3.0517 \times 10^4$, $J_L=0.0029 \text{ Kg/m}^2$, $B_L=0.09 \text{ Nms/rad}$, $h=0.016 \text{ m}$.

这样伺服电机转角与丝杠线位移的传递函数为

$$G(s) = \frac{2.6305 \times 10^4}{s^2 + 31.1627s + 1.0522 \times 10^7}$$

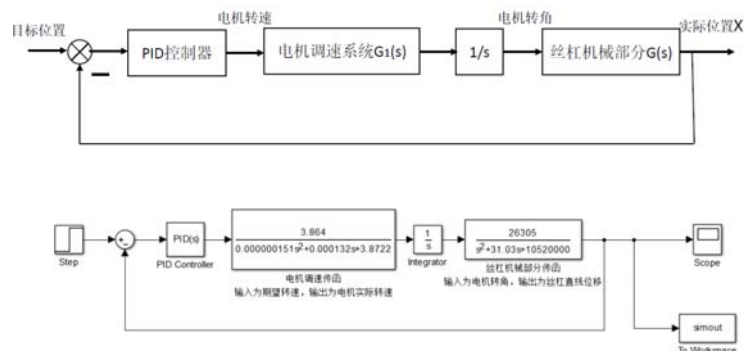
伺服电机调速部分模型:



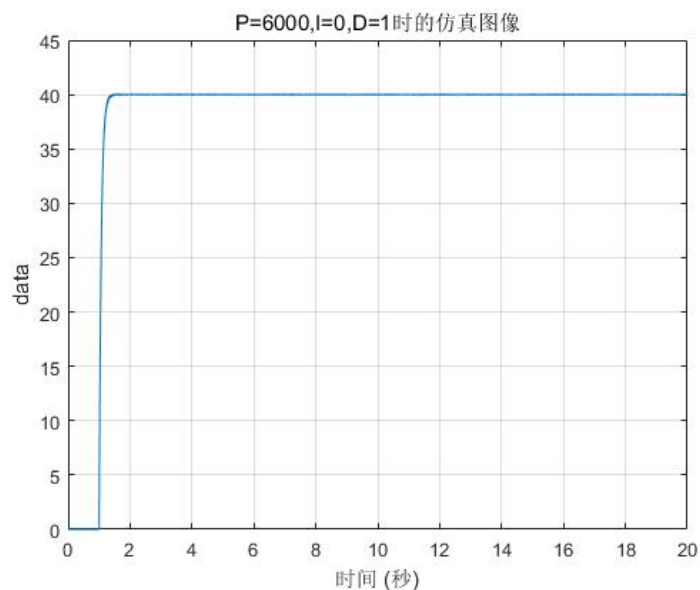
若系统输入为给定速度 V_c ，系统输出为电机转轴角速度 V_g ，则系统的闭环传递函数为：

$$G_1(s) = \frac{V_g(s)}{V_c(s)} = \frac{3.8640}{1.51 \times 10^{-7} s^2 + 1.32 \times 10^{-4} s + 3.8722}$$

整个系统的传递函数框图为：



2. MATLAB 仿真结果为：



取 $P=6000$, $I=0$, $D=1$ 。

3. 丝杠 P 参数整定的实验结果为：

	初始位置 /cm	P 参 数	调节时间 t_s	超调量 $\sigma\%$	稳定距离 /cm	稳态误差 e_{ss}/cm
40cm	4.51	25	5.7	0.375%	40.15	0.13
	4.52	35	5.6	0.575%	40.23	0.32
	4.51	45	10.7	2.375%	40.95	0.41
20cm	4.51	25	3.1	3.65%	20.73	0.21
	4.51	35	4.3	3.4%	20.68	0.05
	4.51	45	7.2	0.85%	20.87	0.10

七、结果分析

1. 对仿真图像的分析：

可以看出，仿真结果与实际情况差异非常大。仿真中一直增大比例参数，直到 6000 以上才会出现振荡，而实际调节中比例参数的范围在 10 到 60 之间。产生这样结果的原因在于，对电机进行建立模型时，偏离实际情况，模型过于简单。因此，仿真误差的一个主要来源就是建模不准。

2. 对丝杠 P 值调节过程与结果的分析：

丝杠 P 值整定的流程为：

- 1) 调零。按下黄色按钮，同时拨动开关给予触发信号，滑块自动回到第一个光电门处，记录初始距离，并在软件中修改初值。
- 2) 改变目标位置，按下绿色按钮，丝杠带动滑块停在目标位置。
- 3) 记录调节时间，最大偏移位置和稳定位置。
- 4) 改变 P 值，重复上述过程。
- 5) 改变设定位置值，重复上述过程。

从实验数据可以看出，设定距离为 40cm： $P=35$ 时，调节时间最短；而 $P=25$ 时，超调量最小，稳态误差也最小。比例参数过小，调节时间过长；比例参数过大，结果会出现震荡现象。

设定距离为 20cm 时，若 $P=35$ ，稳态误差最小，但 $P=25$ 时，调节时间最短。

3. 误差分析：

丝杠校正实验由于器材精度、实验方法的问题，有非常大的误差。分析如下：

- 1) 用手机计时，导致开始与结束时间均有较大误差。
- 2) 通过目测记录游标卡尺的数据，尤其是最大偏移量，一定会造成误差。
- 3) 实验次数太少，结果不具有一般性。

八、收获、体会及建议

通过本次自控原理实验，我接触了 PLC 器件，也接触了丝杠，理解了 PID 控制在实际工程中的重要作用。希望今后可以继续完善实验，让我们可以 P、I、D 三个参数联调，而不是只调节比例 P 一个参数，这样理解会更深入一些。