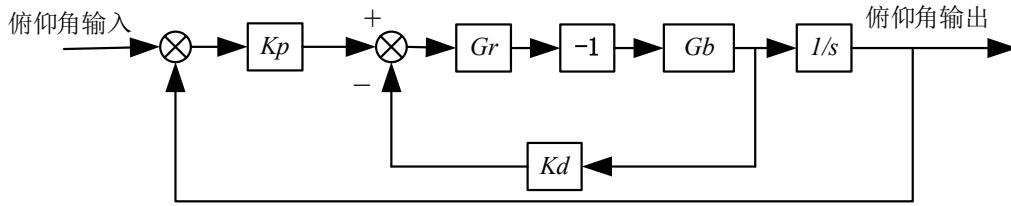


1.通过手工方式利用 PD 控制调试出一个你认为满意的俯仰姿态控制回路；
设计俯仰姿态控制回路如下图：



其中 G_r 为舵机传递函数， G_b 为舵偏到俯仰角速度传递函数，有以下等式：

$$G_r = 0.5 \times \frac{0.2743s + 124.7}{1.32 \times 10^{-5}s^3 + 0.0082s^2 + 1.549s + 62.33}$$

$$G_b = \frac{K_M (T_1 s + 1)}{T_M^2 s^2 + 2T_M \xi_M s + 1}$$

其中， $K_M = -\frac{a_{\delta_z} b_\alpha}{a_\alpha + a_{\omega_z} b_\alpha}$ ， $T_1 = \frac{1}{b_\alpha}$ ， $T_M = \frac{1}{\sqrt{-a_\alpha - a_{\omega_z} b_\alpha}}$ ， $\xi_M = \frac{b_\alpha - a_{\omega_z}}{2\sqrt{-a_\alpha - a_{\omega_z} b_\alpha}}$ ，则 G_b 可

简化为：

$$G_b = \frac{a_{\delta_z} s + a_{\delta_z} b_\alpha}{s^2 + (b_\alpha - a_{\omega_z})s + (-a_\alpha - a_{\omega_z} b_\alpha)}$$

其中各个参数的表达式为：

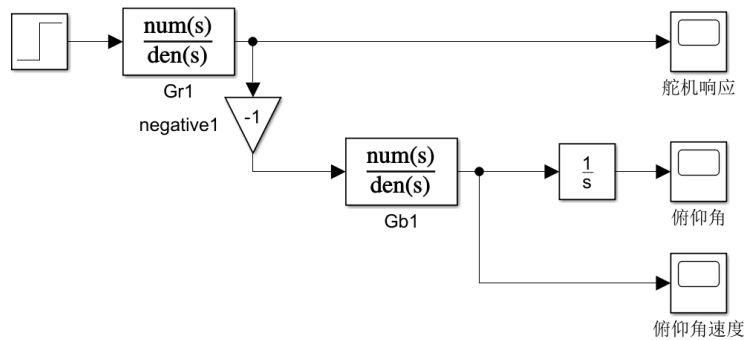
$$a_\alpha = \frac{m_z^\alpha q S_r L_r}{J_z}, \quad a_{\delta_z} = \frac{m_z^{\delta_z} q S_r L_r}{J_z}, \quad a_{\omega_z} = \frac{m_z^{\omega_z} q S_r L_r}{J_z},$$

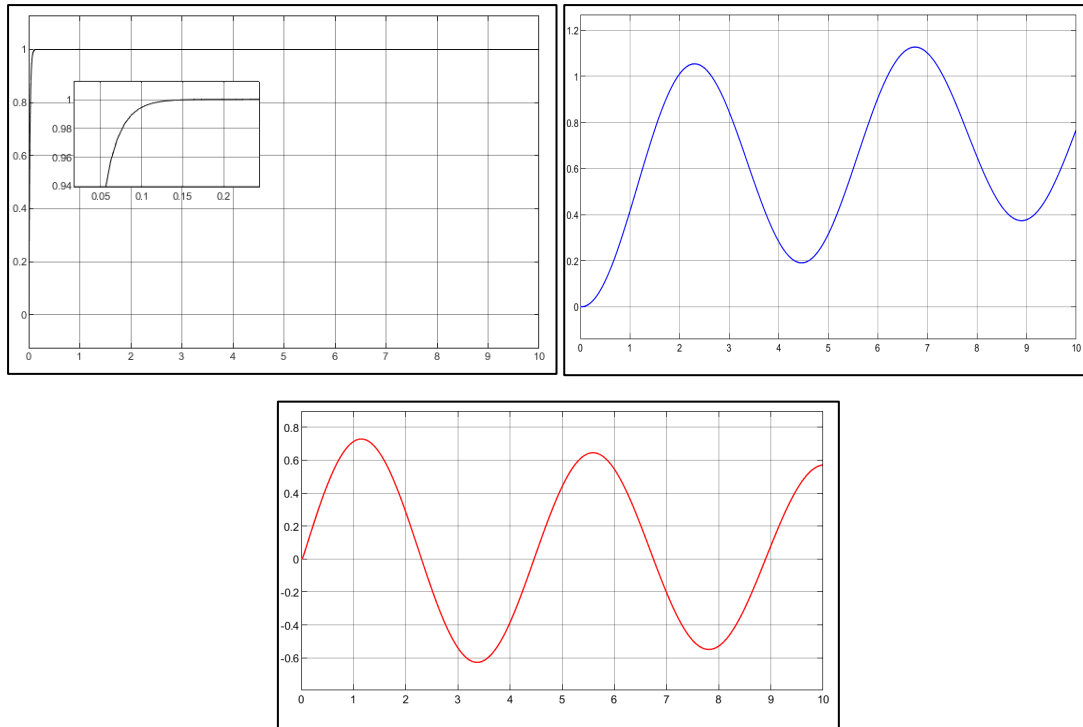
$$b_\alpha = \frac{P + c_y^\alpha q S_r}{mV}, \quad b_{\delta_z} = \frac{c_y^{\delta_z} q S_r}{mV}, \quad b_\theta = \frac{g \sin \theta}{V}$$

代入相关参数值，得到：

$$G_b = \frac{-1.0212s - 0.0584}{s^2 + 0.0571s + 2.0018}$$

使用 SIMULINK 进行模块搭建，如图所示：



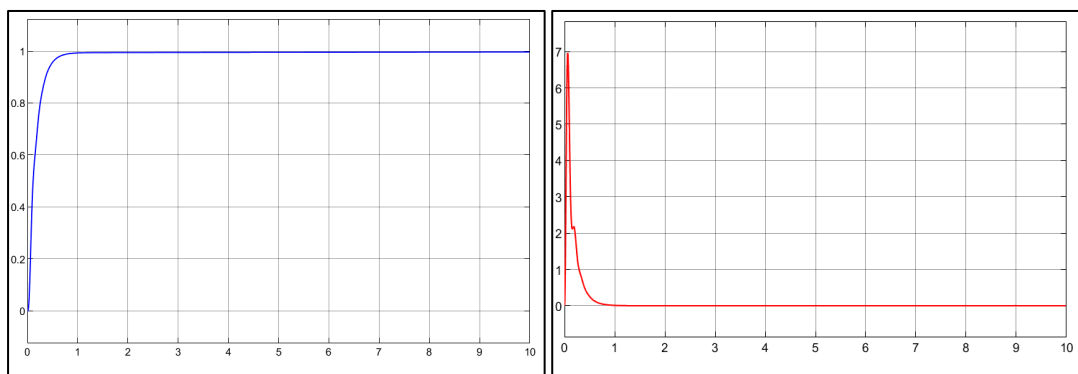
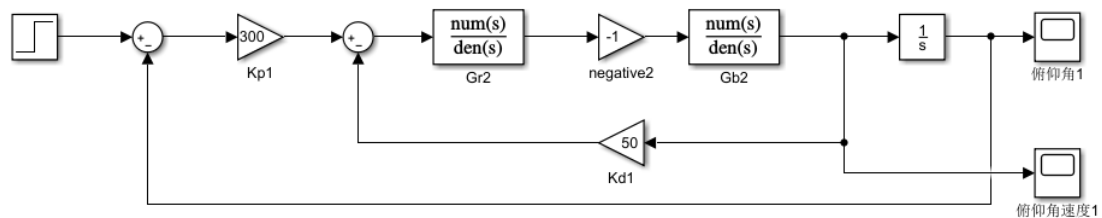


实验结果 1 不带 PD 控制的实验结果

一排左-舵机响应曲线；一排右-俯仰角曲线；二排-俯仰角角速度曲线

舵机调节时间大约处于 0.13-0.14s 左右，俯仰角处于发散状态，输出幅值与输入正相关，下面加入 PD 控制。

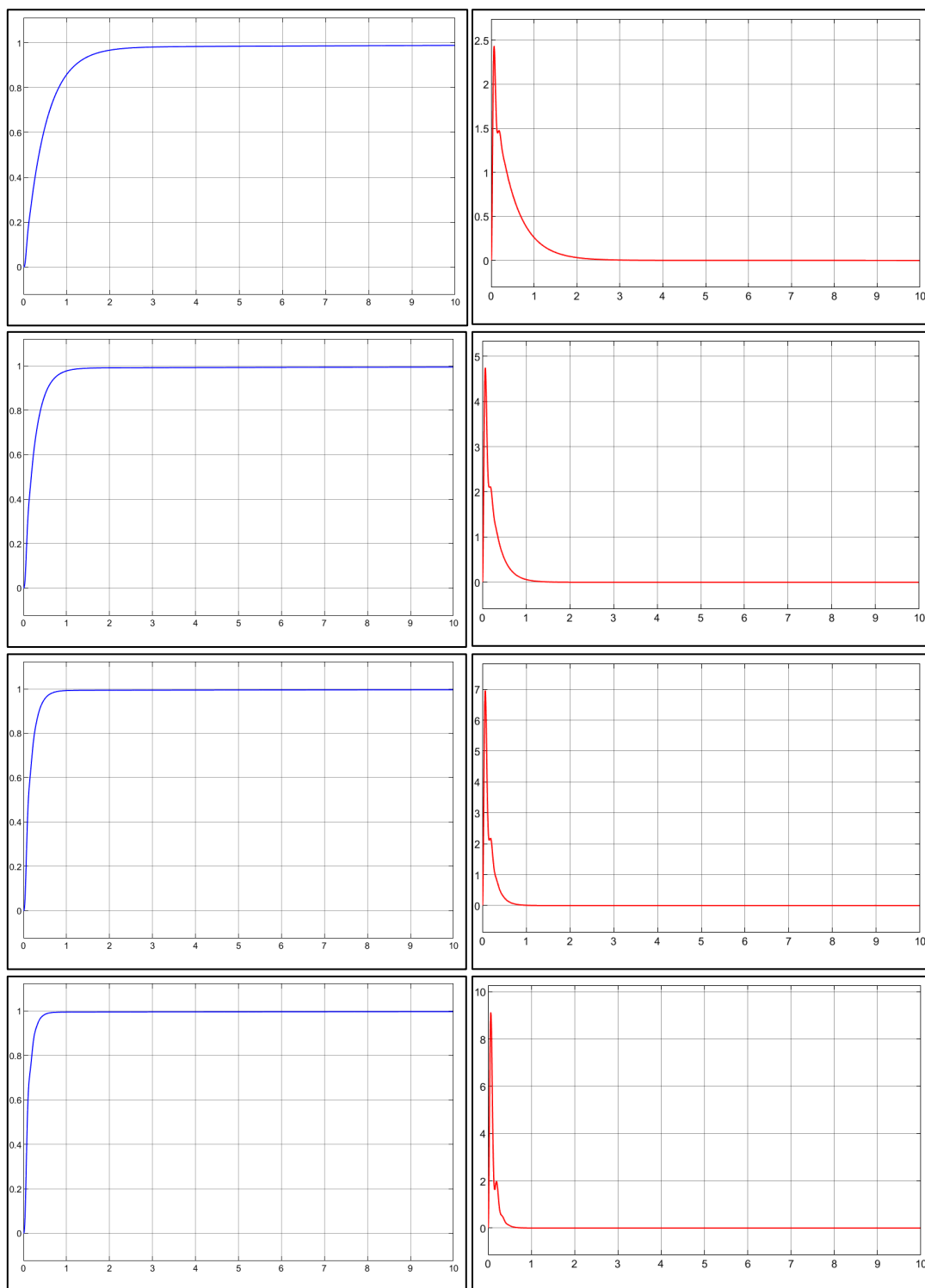
模块搭建如下图所示：



实验结果 2 $K_p=300$ $K_d=50$ 的实验结果

左-俯仰角曲线，右-俯仰角角速度曲线

保持 K_d 不变，观察 K_p 变化时响应的区别：

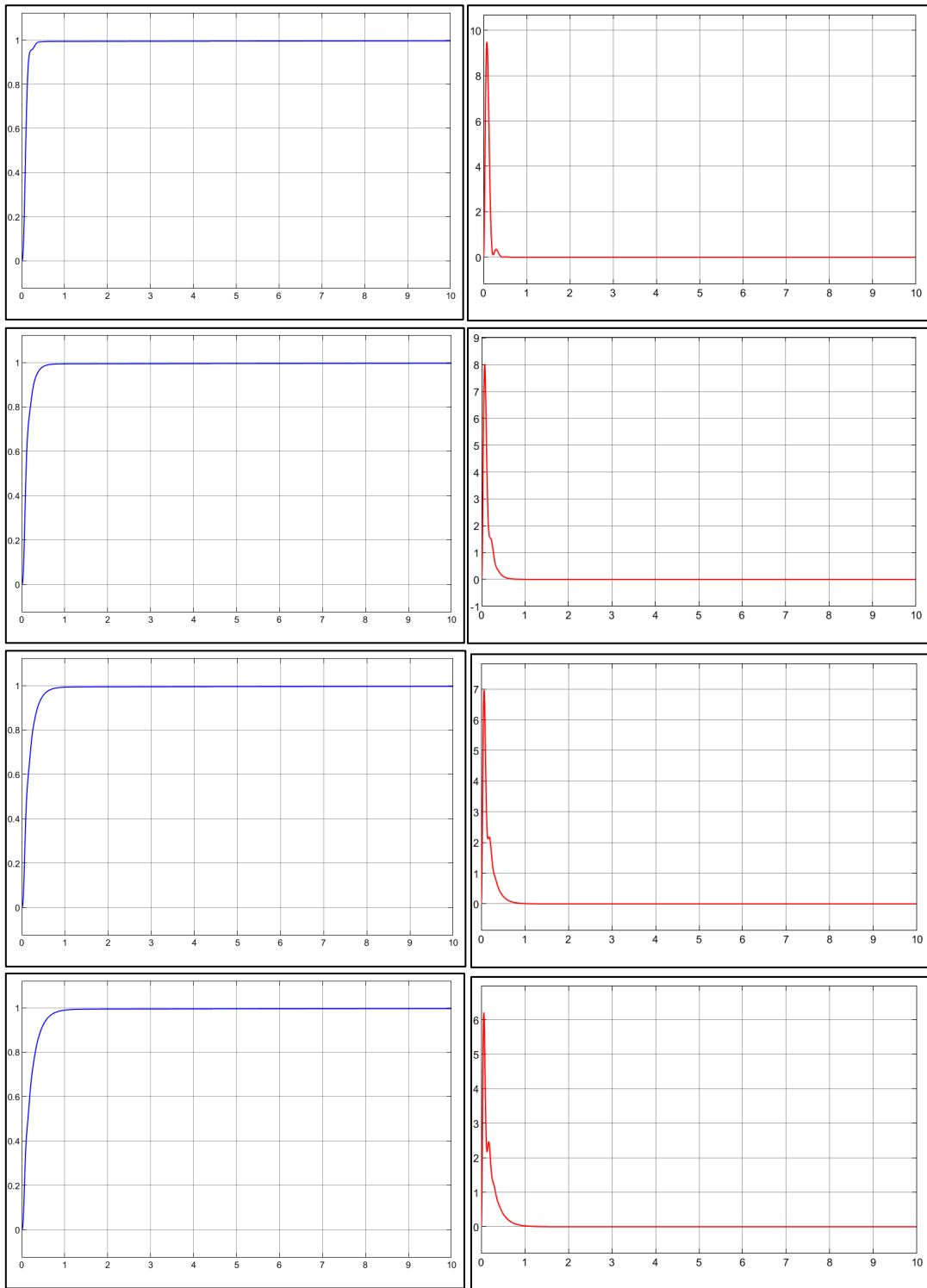


实验结果 3 不同 K_p 时的响应曲线

从上至下 $K_p=100, 200, 300, 400$

当 K_p 减小时，调节时间增加，但当 K_p 过大时，上升期间出现抖动现象，不平滑。

保持 K_p 不变，观察 K_d 变化时响应的区别：



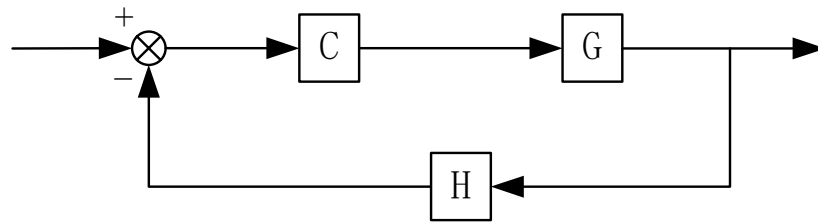
实验结果 4 不同 K_d 时的响应曲线

从上至下 $K_d=30, 40, 50, 60$

当 K_d 增加时, 调节时间缩短, 但当 K_d 过大时, 上升曲线出现抖动现象, 不平滑。

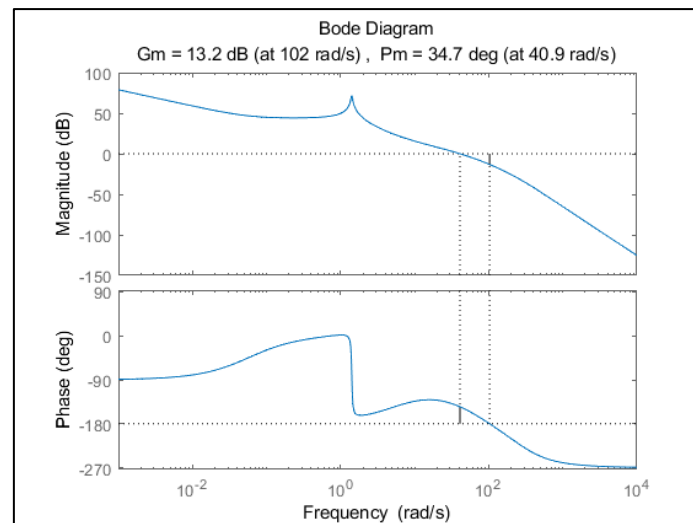
2. 计算俯仰角回路的稳定裕度，测试满足物理意义上的鲁棒性，给出对象幅值和时延的可容忍边界，并与计算值比较；

将俯仰回路转化为如下框图：



其中 $G = G_r G_b$, $C = \frac{K_p}{s}$, $H = \frac{K_d s + K_p}{K_p}$

取 $K_d=50$, $K_p=300$, 则

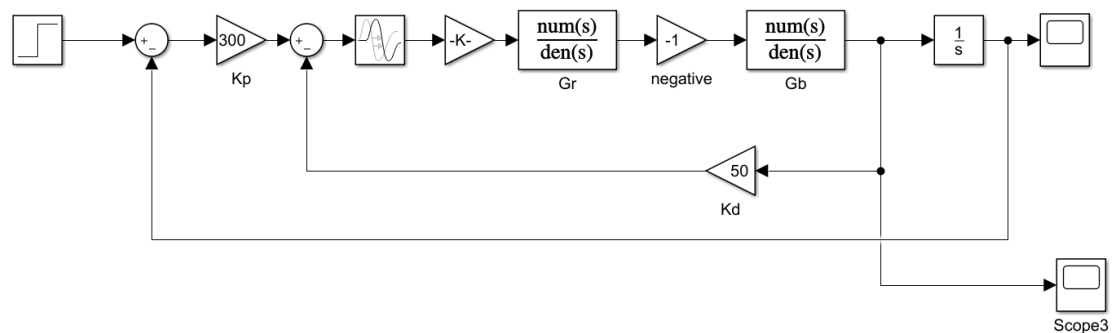


实验结果 5 $K_d=50$, $K_p=300$ 的伯德图

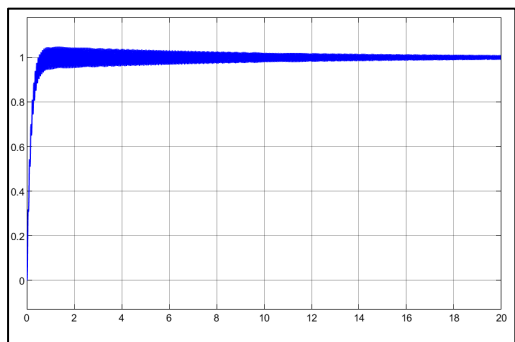
根据 $20\log A = 13.2$ 得 $A = 4.57$, 即被控对象幅值容忍边界为 4.57 倍, 由 $t = \frac{B \times \pi}{180 \times C}$

和 $B = 34.7^\circ$ 、 $C = 40.9 \text{ rad/s}$ 得 $t = 0.0148 \text{ s}$ 。

为此设计一个测试系统，其模块搭建如图：

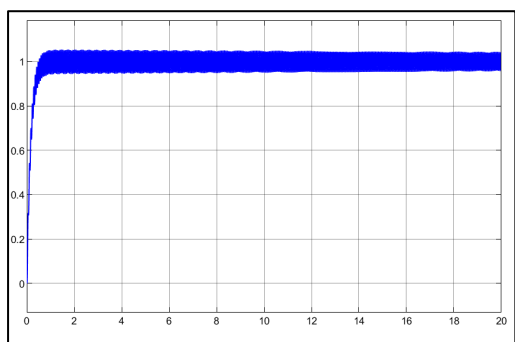


幅值设定为 4.57 时，



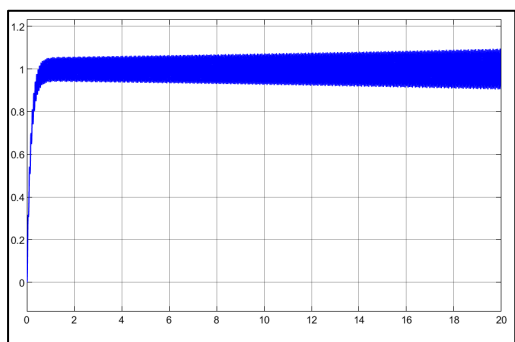
→ 衰减振荡

幅值设定为 4.59,



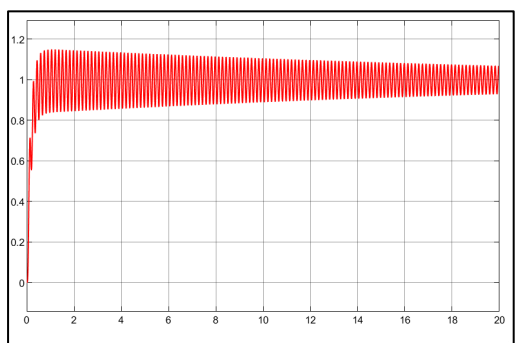
→ 等幅振荡

幅值设定为 4.6,



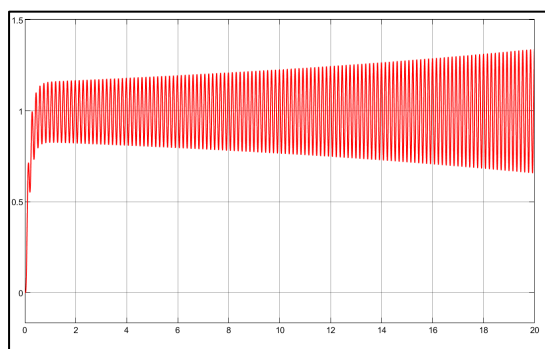
→ 振荡发散

延时设定为 0.0148s,



→ 衰减振荡

延时设定为 0.0149s,



振荡发散

3. 画出一个定点满足 6dB 和 45deg 稳定裕度的可行控制参数区域；

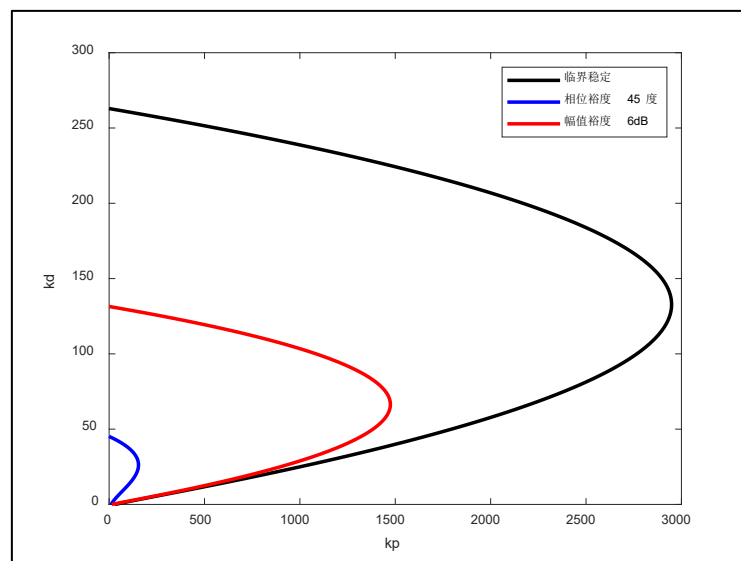
使用稳定裕度测试子思想，事先确定好一组幅值与相角，即条件要求的幅值裕度和相位裕度，观察随 w 变化， K_p ， K_d 等参数的变化，推导过程如下：

$$G(j\omega) = |G(j\omega)|e^{j\phi} \Rightarrow 1 + Ae^{-j\theta}G(j\omega) = 0$$

其中 $A = \frac{1}{|G(j\omega)|}$, $\phi + 180^\circ = \theta$ ，当 $\theta = 0$ 时，A 为幅值裕度，当 $A = 1$ 时， θ 为

相角裕度， $G(j\omega)$ 为开环传递函数。

由 $20\log A = 6$ 得 $A = 2$ ，故需放大 2 倍，相位裕度设置为 45° 。



实验结果 6 稳定裕度测试子

蓝色曲线与纵轴包围区域为可行控制参数区域。