

作业五 频域特性分析

电 02 肖锦松 2020010563

综合作业回顾与总结

综合作业 3、4 中，我们构建了 AVR 控制系统，利用 Routh 表和根轨迹法等时域工具来分析系统的稳定性、稳态误差、动态特性等。在综合作业 4 的最后，探讨了比例增益 K 对系统不同输出的动态性能影响，经过自己的仿真探究和助教的一节讨论课后，我们可以概括目前改进得到的结论，以及系统仍存在的不足与问题。

加入了 AVR 闭环系统后，系统的抗干扰性和可控性得到优化，对干扰有所抑制，对设定的控制输入也能较好跟随。

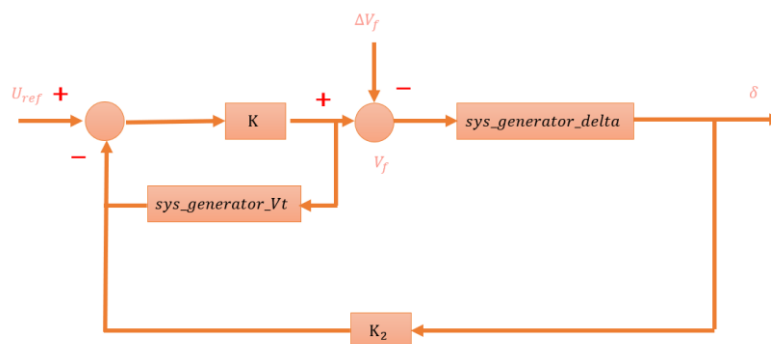
针对 K 的变化 V_t 性能： K 越大，系统输出 V_t 的稳态性能越好，动态性能变坏，但讨论课也提到 K 更大的时候，动态性能又会变好。 $K=1000$ 时，动态性能近乎完美。这是因为 K 增大的过程中，离虚轴最近的两个极点离虚轴越来越近，因此对应模态衰减速度变慢，动态性能变差；但当 K 更大时，离虚轴最近的两个极点与零点越来越接近，出现了近似相消的现象，主导极点变为 x 轴上距离虚轴较远的极点，因此 V_t 动态过程近似变为一阶响应。

针对 K 的变化 δ, ω, P_{em} 性能：取极大的 K 时，虽然 V_t 稳态和动态性能都已经达到较好水平，但 δ, ω, P_{em} 的动态性能越来越差，这是因为 δ, ω, P_{em} 在 K 增大过程中主导极点并没有相应的靠近的零点与之相消，反而越来越靠近虚轴，恶化动态性能。

将开环增益 K 设为极大，虽然获得了 V_t 极好的稳态和动态性能，但牺牲了 δ, ω, P_{em} 的动态性能。因此将 δ, ω, P_{em} 也分别作为反馈，但这也导致了系统的不稳定性。后续希望对系统进行校正、合理设计控制器。但只控制一个量必然无法让两个目标都达到最优。

在时域分析过后，本次作业将对系统进行频域分析。

由于综合作业 4 中，MATLAB 的误差导致本应产生零极点相消后形成的三阶系统没有进行零极点相消，导致错给出六阶传递方程。在本次作业中，我先对综合作业 4 中错误的地方进行修正。



系统的结构框图如上， sys_generator_Vt 为输入 V_f ，输出 V_t 的系统，对应的开环传递函数为 $G_1(s)$ ， $\text{sys_generator_delta}$ 为输入 V_f ，输出状态量的系统，对应的开环传递函数为 $G_2(s)$ 。并且设计了两个增益环节 K 和 K_2 。

因此，整体系统的开环传递函数 $G_0(s)$ 如下：

$$G_0(s) = \frac{K}{1 + KG_1(s)} \times G_2(s) \times K_2$$

其中, $G_1(s)$ 对应着代码中的 `sys_generator`, 具体为

$$G_1(s) = \frac{0.07552 s^2 + 0.00151 s + 0.009872}{s^3 + 0.572 s^2 + 0.1879 s + 0.04846} = \frac{N_1(s)}{D_1(s)}$$

$G_2(s)$ 对应着代码中的 `sys_generator_omega`、`sys_generator_delta`、`sys_generator_Pem`, 具体为

$$G_{2\omega}(s) = \frac{-0.03089 s}{s^3 + 0.572 s^2 + 0.1879 s + 0.04846} = \frac{N_{2\omega}(s)}{D_1(s)}$$

$$G_{2\delta}(s) = \frac{-0.03089}{s^3 + 0.572 s^2 + 0.1879 s + 0.04846} = \frac{N_{2\delta}(s)}{D_1(s)}$$

$$G_{2P_e}(s) = \frac{0.1544 s^2 + 0.003089 s}{s^3 + 0.572 s^2 + 0.1879 s + 0.04846} = \frac{N_{2P_e}(s)}{D_1(s)}$$

• 不同输出下系统的传递函数

$$\begin{cases} K(-0.03089) & , \text{for } \delta \\ K(-0.03089s) & , \text{for } \omega \\ K(0.1544s^2 + 0.003089s) & , \text{for } P_e \\ K(0.07552s^2 + 0.00151s + 0.009872) & , \text{for } V_i \end{cases}$$

$$\frac{\quad}{s^3 + (0.5720 + 0.07552K)s^2 + (0.1879 + 0.00151K)s + (0.08742 + 0.009872K)}$$

由于利用 MATLAB 计算会导致无法进行零极点相消, 此处手动代入公式。

$$G_0(s) = \frac{KK_2G_2(s)}{1 + KG_1(s)} = \frac{KK_2 \frac{N_2(s)}{D_1(s)}}{1 + K \frac{N_1(s)}{D_1(s)}} = \frac{KK_2N_2(s)}{D_1(s) + KN_1(s)}$$

选取开环增益: $K = 5$, $K_2 = 1$

$$G_{0\omega}(s) = \frac{-0.1544 s}{s^3 + 0.9496 s^2 + 0.1955 s + 0.09782}$$

$$G_{0\delta}(s) = \frac{-0.1544}{s^3 + 0.9496 s^2 + 0.1955 s + 0.09782}$$

$$G_{0P_e}(s) = \frac{0.7722 s^2 + 0.01544 s}{s^3 + 0.9496 s^2 + 0.1955 s + 0.09782}$$

分别对应代码中的: `sys_AVR_omega`、`sys_AVR_delta`、`sys_AVR_Pem`。

频域特性分析

在 AVR 闭环系统中, 采用作业四任务 b.1 构造的系统传递函数, 以 u_{ref} 为输入, 以 δ, ω, P_{em} 为输出, 完成下述分析:

a. Nyquist 图分析

1. 根据书本介绍的规则手动绘制 Nyquist 图。

以 u_{ref} 为输入, 以 ω, δ, P_{em} 为输出的系统传递函数如下:

以 δ, ω, P_e 为输出, 含 AVR 闭环的系统传递函数如下。(不含 δ, ω, P_e 的反馈)

$$G_{0\omega}(s) = \frac{-0.1544 s}{s^3 + 0.9496 s^2 + 0.1955 s + 0.09782}$$

$$G_{0\delta}(s) = \frac{-0.1544}{s^3 + 0.9496 s^2 + 0.1955 s + 0.09782}$$

$$G_{0P_e}(s) = \frac{0.7722 s^2 + 0.01544 s}{s^3 + 0.9496 s^2 + 0.1955 s + 0.09782}$$

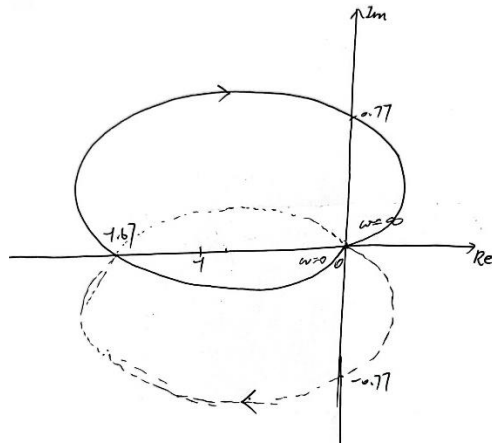
手动绘制 Nyquist 图如下:

$$G_{0\omega}(s) = \frac{-0.1544 s}{s^3 + 0.9496 s^2 + 0.1955 s + 0.09782}$$

$$G_{0\omega}(j\omega) = \frac{-0.1544 j\omega}{(0.09782 - 0.9496\omega^2) + j(0.1955\omega - \omega^3)}$$

特殊点: $\omega = 0, G_{0\omega}(j0) = 0 \angle -90^\circ$; $\omega = \infty, G_{0\omega}(j\infty) = 0 \angle 0^\circ$

变化趋势: 当 ω 较小时, $|G_{0\omega}(j\omega)|$ 增大; 当 ω 较大时, $|G_{0\omega}(j\omega)|$ 减小; 相角则是单调递减。

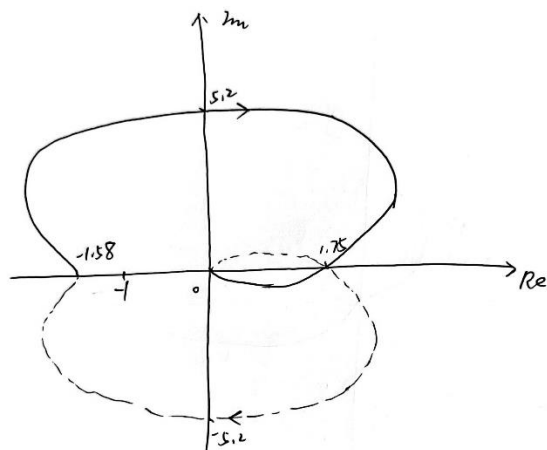


$$G_{0\delta}(s) = \frac{-0.1544}{s^3 + 0.9496 s^2 + 0.1955 s + 0.09782}$$

$$G_{0\delta}(j\omega) = \frac{-0.1544}{(0.09782 - 0.9496\omega^2) + j(0.1955\omega - \omega^3)}$$

特殊点: $\omega = 0, G_{0\delta}(j0) = 1.5784 \angle -180^\circ$; $\omega = \infty, G_{0\delta}(j\infty) = 0 \angle -90^\circ$

变化趋势: 当 ω 较小时, $|G_{0\delta}(j\omega)|$ 增大; 当 ω 较大时, $|G_{0\delta}(j\omega)|$ 减小; 相角则是单调递减。

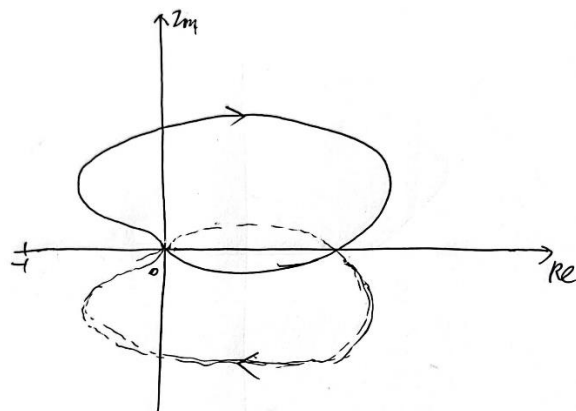


$$G_{0Pe}(s) = \frac{0.7722 s^2 + 0.01544 s}{s^3 + 0.9496 s^2 + 0.1955 s + 0.09782}$$

$$G_{0\delta}(j\omega) = \frac{-0.7722\omega^2 + j0.01544\omega}{(0.09782 - 0.9496\omega^2) + j(0.1955\omega - \omega^3)}$$

特殊点: $\omega = 0$, $G_{0Pe}(j0) = 0 \angle 90^\circ$; $\omega = \infty$, $G_{0Pe}(j\infty) = 0 \angle -90^\circ$

变化趋势: 当 ω 较小时, $|G_{0Pe}(j\omega)|$ 增大; 当 ω 较大时, $|G_{0Pe}(j\omega)|$ 减小; 相角则是单调递减。



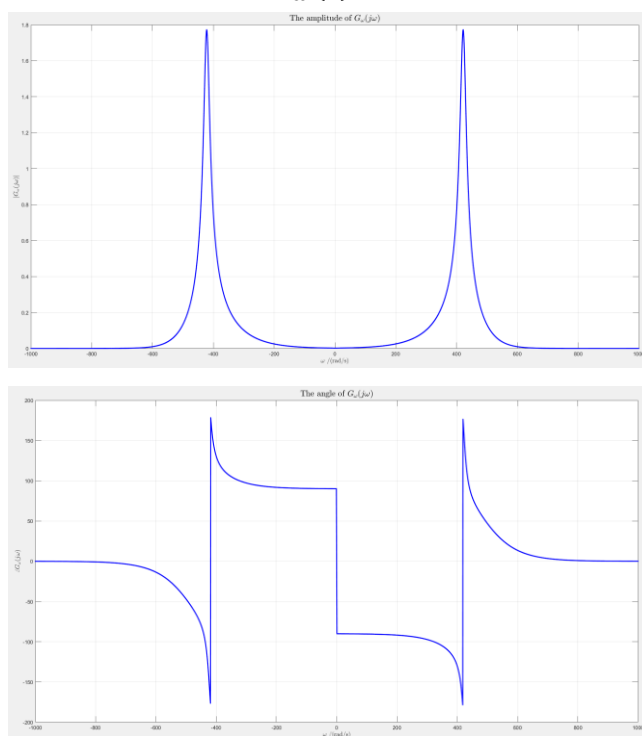
2. 使用 MATLAB 进行频率扫描, 获得幅值与相位的变化后使用 MATLAB 绘制。

频率扫描时采用对数扫描, 这样能够兼顾低频段和高频段的范围, 设置

```
w_pos=logspace(-3,3,1000);w_neg=-logspace(-3,3,1000);
```

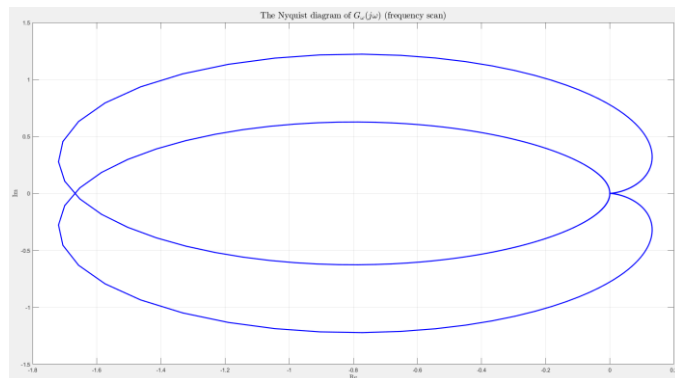
在 $10^{-3} \sim 10^3 \text{ Hz}$ 的对数空间中选取 1000 个点 (对数间距相等)。然后调用 `abs` 和 `angle` 函数分别计算 1000 个频率内开环传递函数对应的幅值和相角。绘制 Nyquist 图只需要根据其定义, 也就是直接在复平面上画出这 2000 个相量 (正负频率) 即可。

以 ω 为输出的系统开环传递函数 $G_\omega(s)$ 为基础, 获得其幅值与相位的变化如下:

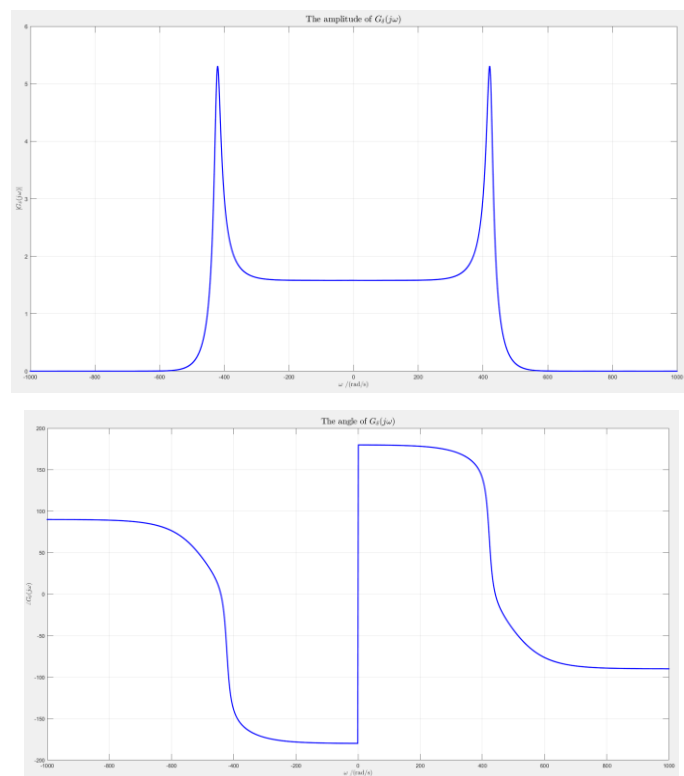


这里由于 `angle` 的范围是 $[-180^\circ, 180^\circ]$, 因此这里出现了“相角跳变”, 实际上可以忽略这段跳变, 看成相角继续减小。

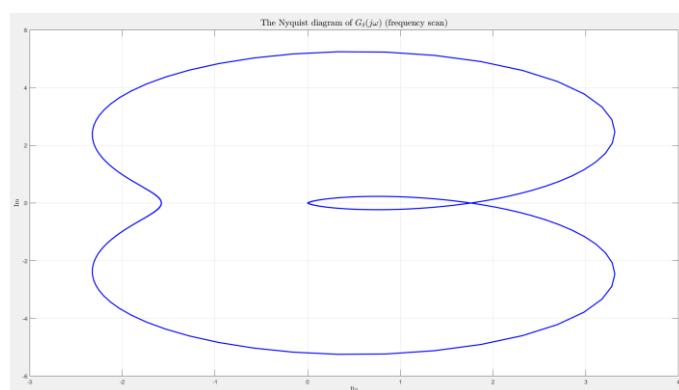
得到了 $G_\omega(j\omega)$ 幅值和相角的变化后, 利用 $G_\omega(j\omega) = |G_\omega(j\omega)| \angle G_\omega(j\omega) = A(\omega)e^{j\Phi(\omega)}$ 构造相量, 也可以看成是复数, 在平面上画出相量集合即为 Nyquist 图。



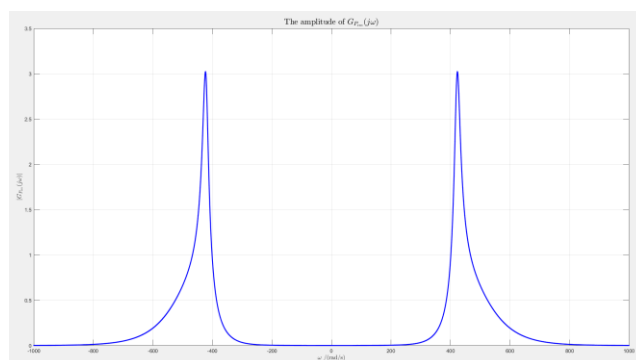
以 δ 为输出的系统开环传递函数 $G_\delta(s)$ 为基础, 获得其幅值与相位的变化如下:

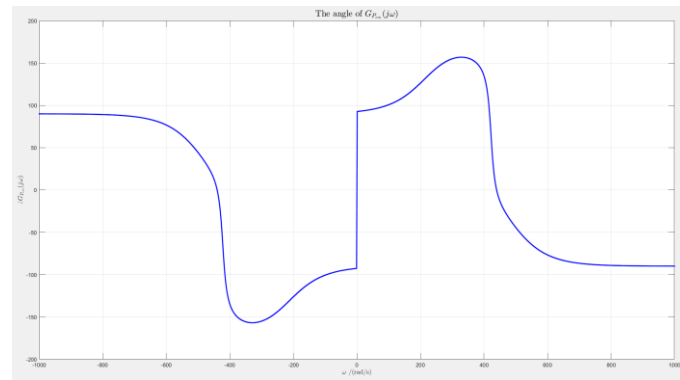


在平面上画出相量集合即为 Nyquist 图。

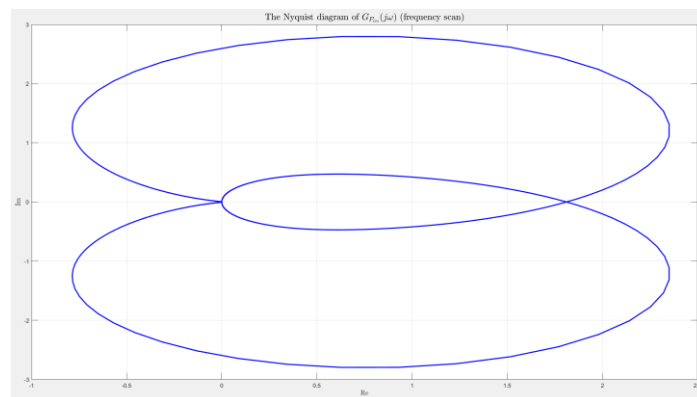


以 P_{em} 为输出的系统开环传递函数 $G_{P_{em}}(s)$ 为基础，获得其幅值与相位的变化如下：





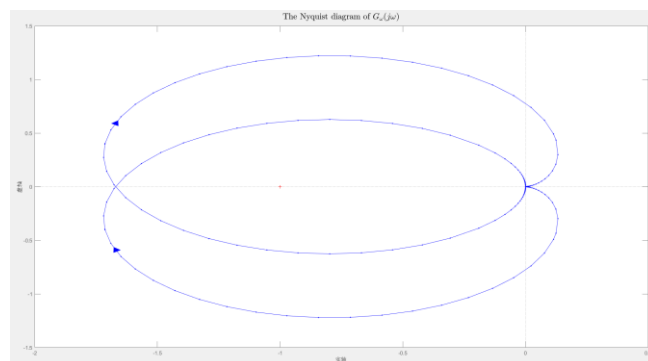
在平面上画出相量集合即为 Nyquist 图。



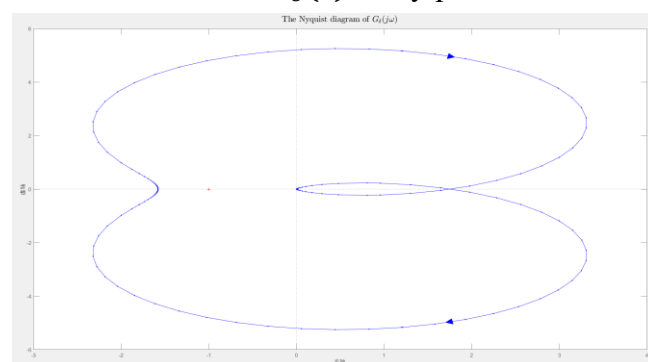
3. 调用 MATLAB 相关函数绘制。

直接调用 `nyquist` 函数，操作较为简单。

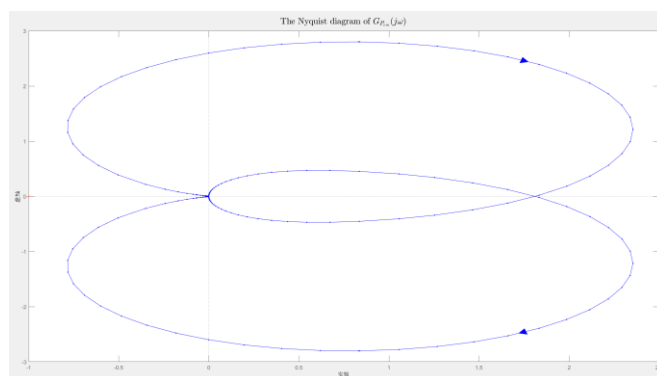
以 ω 为输出的系统开环传递函数 $G_\omega(s)$ 的 Nyquist 图：



以 δ 为输出的系统开环传递函数 $G_\delta(s)$ 的 Nyquist 图：



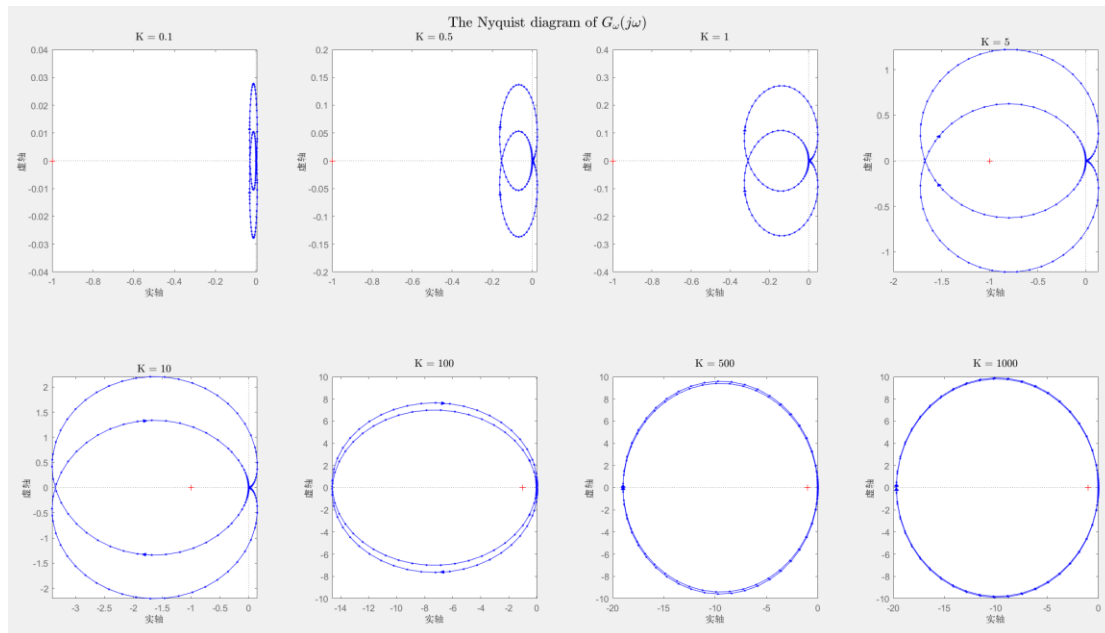
以 P_e 为输出的系统开环传递函数 $G_{P_e}(s)$ 的 Nyquist 图：



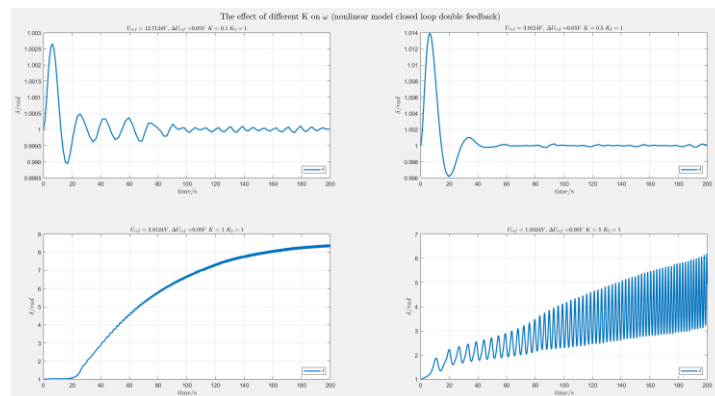
4. 选取不同比例增益 K ，利用 Nyquist 图，分析不同比例增益 K 对系统稳定性的影响，采用作业四任务 a.3 构造的非线性模型进行时域仿真加以验证。

选取 K 分别为 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 100, 500, 1000。

以 ω 为输出的系统开环传递函数 $G_\omega(s)$ 的 Nyquist 图：



增加状态量反馈后的闭环系统输出 ω 的阶跃响应曲线：

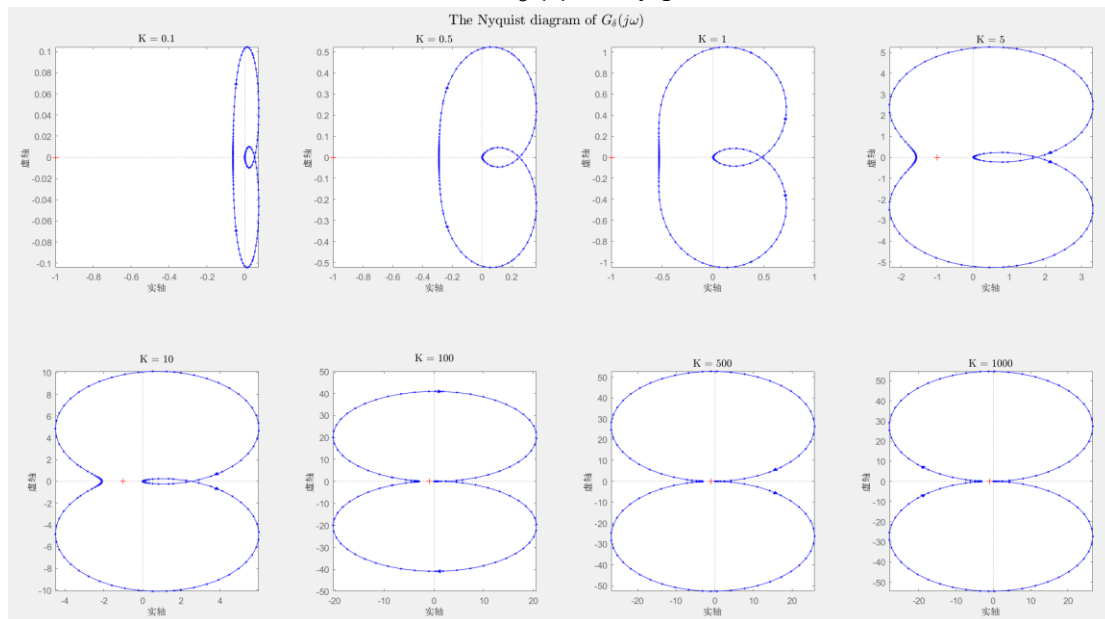


不同比例增益 K 对系统 (ω) 稳定性的影响：

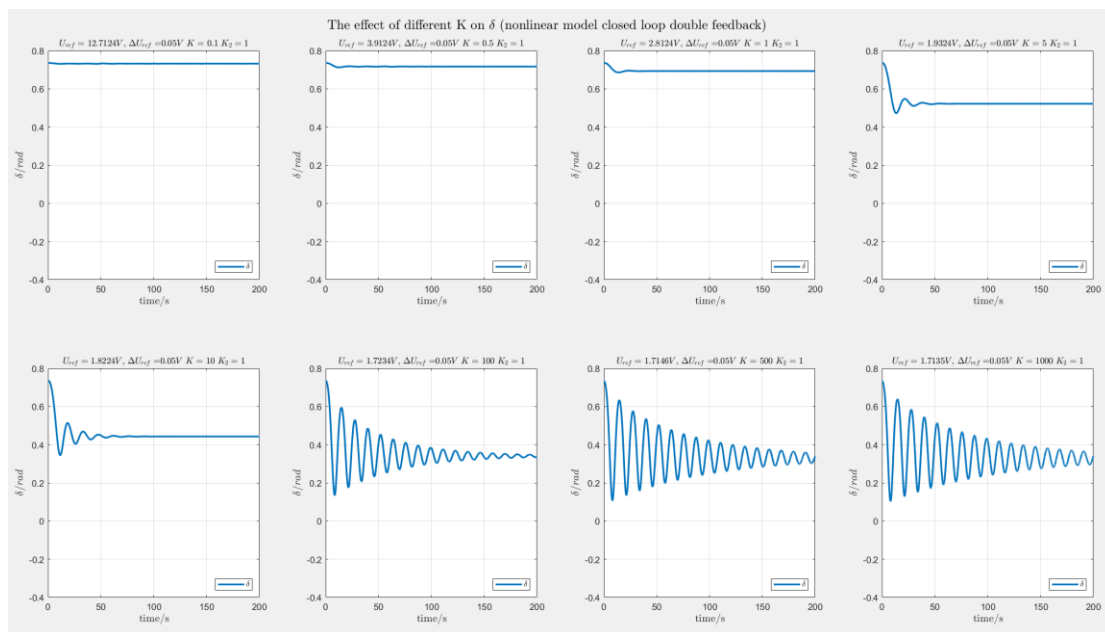
随着 K 的增大，Nyquist 图的“左半圈”逐渐向左扩大，从不包围 $(-1, j0)$ 到 $K = 5$ 时，已经顺时针包围 $(-1, j0)$ 两圈，此时 $N = m - n = 2$ ，而 $n = 0$ ，故 $m = 2$ 。因此系统 (ω) 稳定性随着 K 的增大，由稳定逐渐变成不稳定。

从非线性模型时域仿真结果来看，在 K 较小的时候， ω 仍可以保持稳定，而在 $K = 5$ 的时候， ω 确实已经不稳定， K 更大的话，失稳得更加严重了。

以 δ 为输出的系统开环传递函数 $G_\delta(s)$ 的 Nyquist 图:



增加状态量反馈后的闭环系统输出 δ 的阶跃响应曲线:

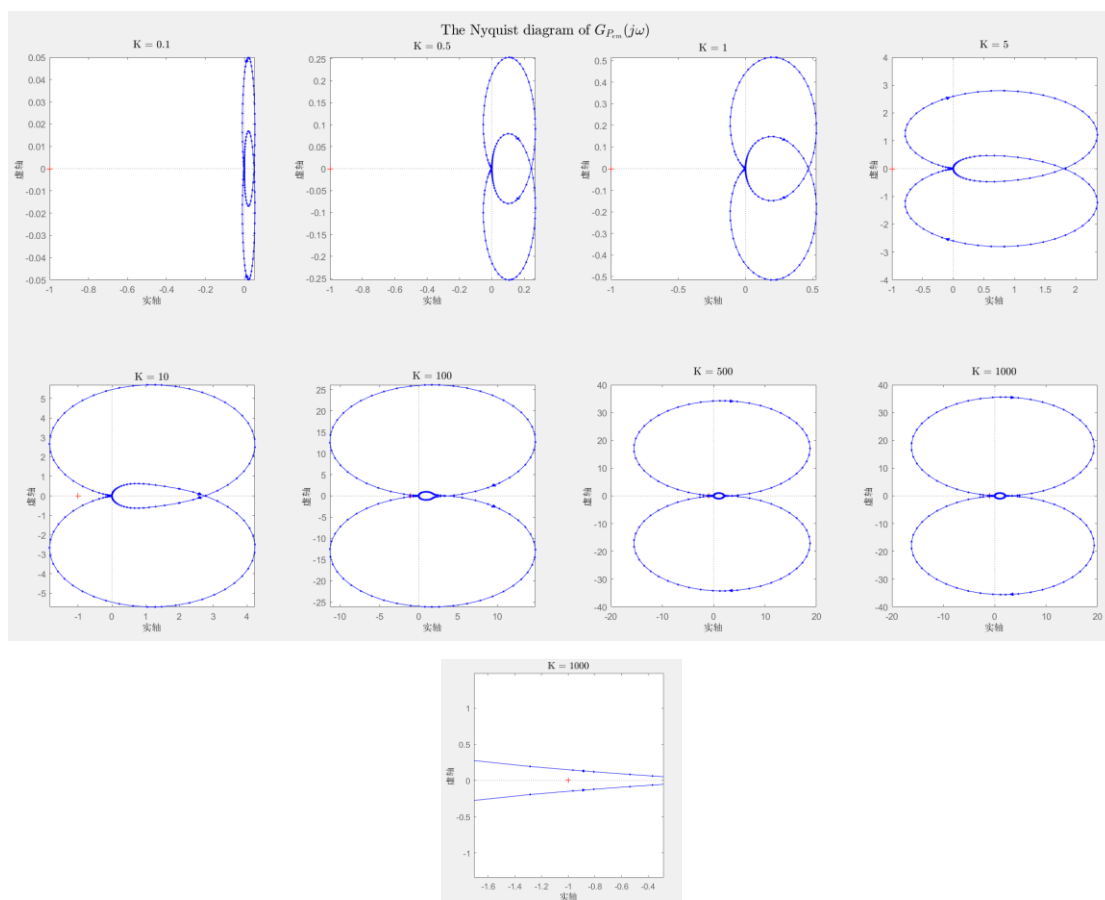


不同比例增益 K 对系统 (δ) 稳定性的影响:

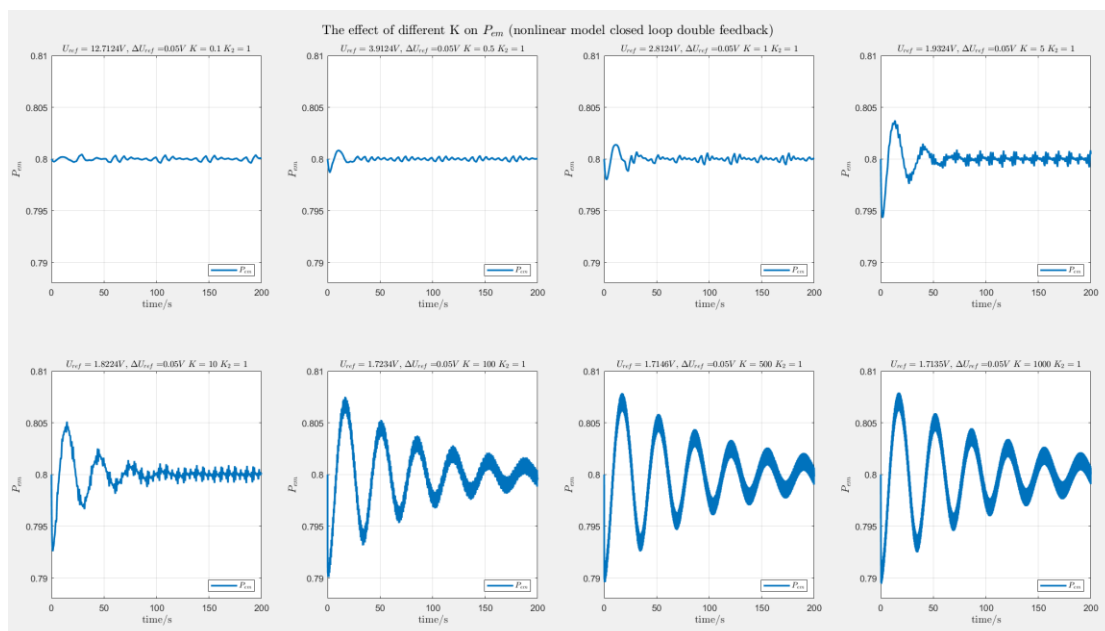
随着 K 的增大, Nyquist 图的“左半圈”逐渐向左扩大, 从不包围 $(-1, j0)$ 到顺时针包围 $(-1, j0)$ 两圈, 此时 $N = m - n = 2$, 而 $n = 0$, 故 $m = 2$ 。因此系统 (δ) 稳定性随着 K 的增大, 由稳定逐渐变成不稳定。

但从非线性模型时域仿真结果来看, 随着 K 的增大, δ 始终保持稳定。这个在时域根轨迹分析的时候也出现同样的问题。这是线性系统和非线性闭环系统时域仿真存在的差异, 此时的线性模型不能完美地替代非线性模型。

以 P_e 为输出的系统开环传递函数 $G_{P_e}(s)$ 的 Nyquist 图:



增加状态量反馈后的闭环系统输出 P_e 的阶跃响应曲线:



不同比例增益 K 对系统 (P_e) 稳定性的影响:

随着 K 的增大, Nyquist 图的始终不包围 $(-1, j0)$ 。此系统 (P_e) 稳定性随着 K 的增大, 始终保持稳定。

从非线性模型时域仿真结果来看， P_e 始终保持稳定。

b. Bode 图分析

1. 根据书本介绍的规则手动绘制 Bode 图。

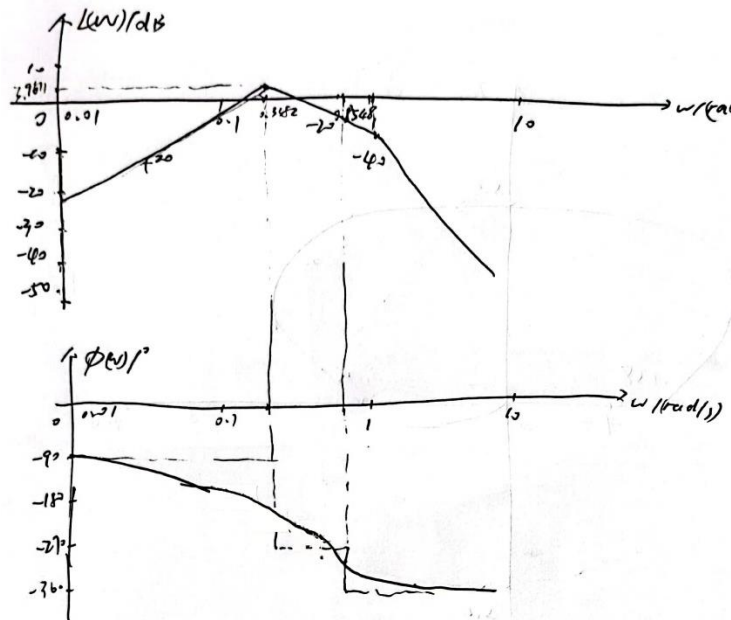
$$\begin{aligned}
 G_{0\omega}(s) &= \frac{-0.1544 s}{s^3 + 0.9496 s^2 + 0.1955 s + 0.09782} \\
 &= \frac{-0.1544 s}{(s + 0.8548)(s^2 + 0.09478s + 0.1144)} \\
 &= \frac{-1.5789 s}{\left(\frac{1}{0.8548}s + 1\right)\left(\frac{1}{0.1144}s^2 + 0.8285s + 1\right)}
 \end{aligned}$$

低频段: $\omega = 1$ 时, $L(\omega) = 20\lg 1.5789 = 3.9671\text{dB}$, 斜率为 20dB/dec ;

转折频率: $\omega_1 = 0.3382$ 时, 转折频率后斜率增加 -40dB/dec , 为 -20dB/dec

$\omega_2 = 0.8548$ 时, 转折频率后斜率增加 -20dB/dec , 为 -40dB/dec

相频特性: 低频率为 -90° , 高频段为 -360°



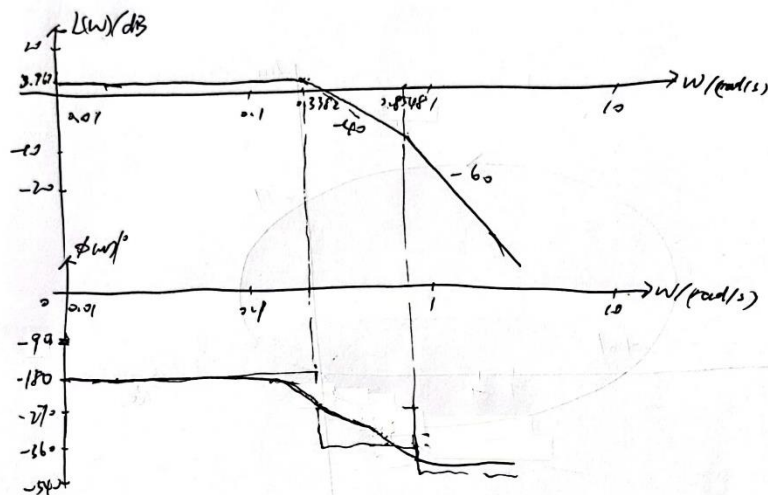
$$\begin{aligned}
 G_{0\delta}(s) &= \frac{-0.1544}{s^3 + 0.9496 s^2 + 0.1955 s + 0.09782} \\
 &= \frac{-0.1544}{(s + 0.8548)(s^2 + 0.09478s + 0.1144)} \\
 &= \frac{-1.5789}{\left(\frac{1}{0.8548}s + 1\right)\left(\frac{1}{0.1144}s^2 + 0.8285s + 1\right)}
 \end{aligned}$$

低频段: $\omega = 1$ 时, $L(\omega) = 20\lg 1.5789 = 3.9671\text{dB}$, 斜率为 0;

转折频率: $\omega_1 = 0.3382$ 时, 转折频率后斜率增加 -40dB/dec , 为 -40dB/dec

$\omega_2 = 0.8548$ 时, 转折频率后斜率增加 -20dB/dec , 为 -60dB/dec

相频特性: 低频率为 -180° , 高频段为 -540°



$$\begin{aligned}
 G_{OP_e}(s) &= \frac{0.7722 s^2 + 0.01544 s}{s^3 + 0.9496 s^2 + 0.1955 s + 0.09782} \\
 &= \frac{0.77216 s (s + 0.02)}{(s + 0.8548)(s^2 + 0.09478s + 0.1144)} \\
 &= \frac{0.1579 s \left(\frac{1}{0.02} s + 1 \right)}{\left(\frac{1}{0.8548} s + 1 \right) \left(\frac{1}{0.1144} s^2 + 0.8285s + 1 \right)}
 \end{aligned}$$

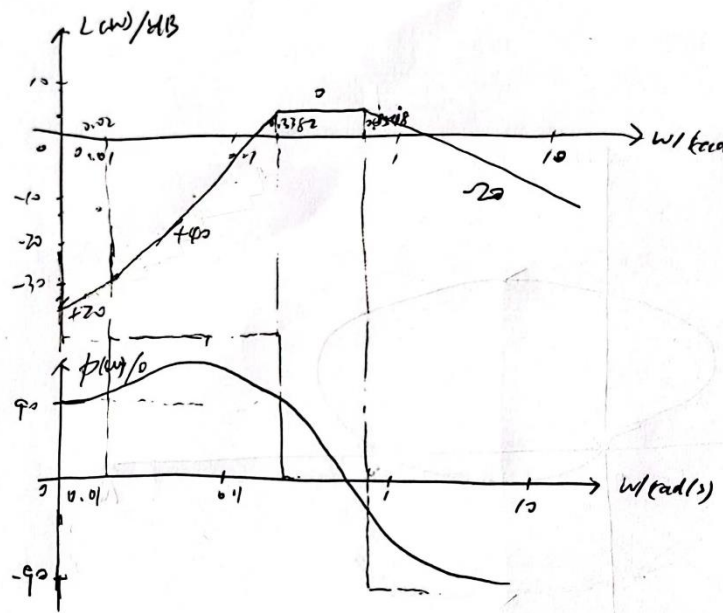
低频段: $\omega = 1$ 时, $L(\omega) = 20 \lg 1.5789 = 3.9671 \text{ dB}$, 斜率为 20 dB/dec ;

转折频率: $\omega_1 = 0.02$ 时, 转折频率后斜率增加 20 dB/dec , 为 40 dB/dec

$\omega_2 = 0.3382$ 时, 转折频率后斜率增加 -40 dB/dec , 为 0 dB/dec

$\omega_3 = 0.8548$ 时, 转折频率后斜率增加 -20 dB/dec , 为 -20 dB/dec

相频特性: 低频率为 90° , 高频段为 -90°

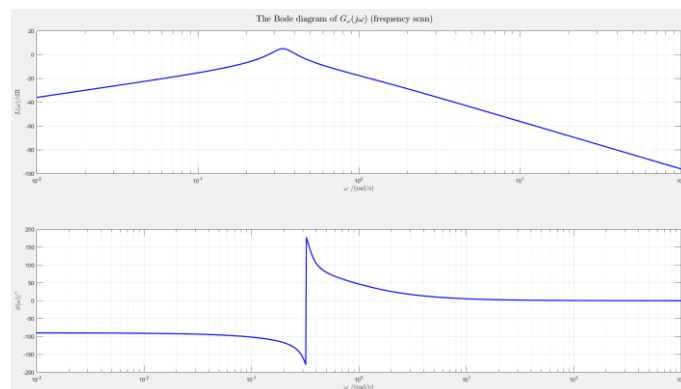


2. 使用 MATLAB 进行频率扫描, 获得幅值与相位的变化后使用 MATLAB 绘制。

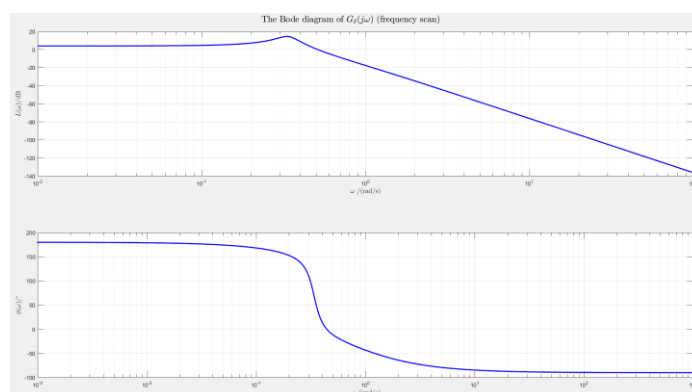
ω 、 δ 、 P_e 对应的开环传递函数的幅值与相位的变化与 a2 中完全一致, 此处不再列出。

利用 Bode 图的定义, 对数幅频特性曲线以对数分度 $\log(\omega)$ 为横轴, 以线性分度 $L(\omega)=20\log(\text{Abs})$ 为纵轴, 可以利用得到的频率扫描幅值和相位特性画出 Bode 图。

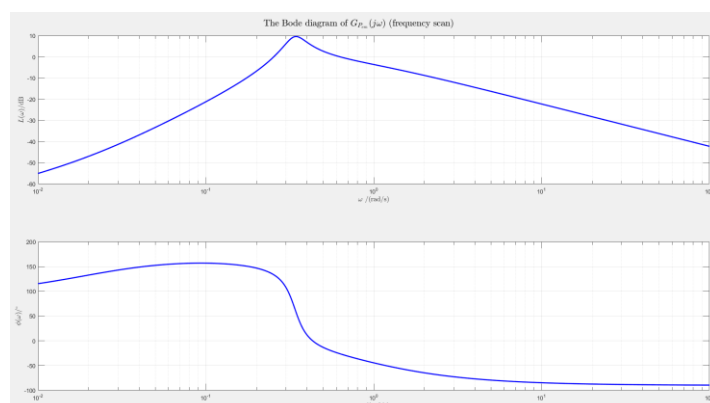
以 ω 为输出的系统开环传递函数 $G_\omega(s)$ 为基础:



以 δ 为输出的系统开环传递函数 $G_\delta(s)$ 为基础:

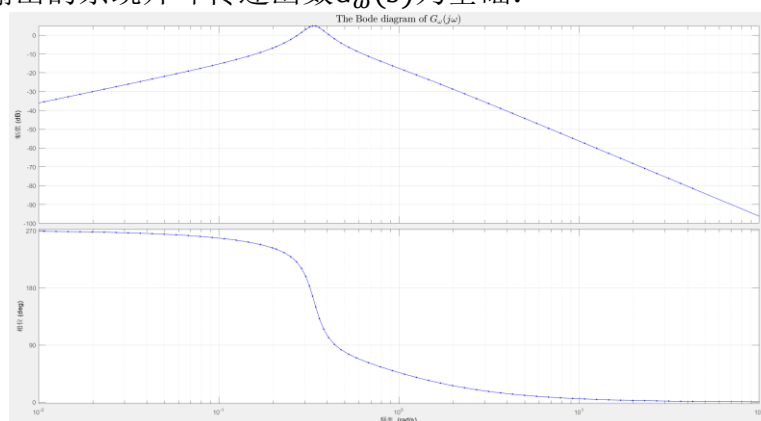


以 P_e 为输出的系统开环传递函数 $G_{P_e}(s)$ 为基础:



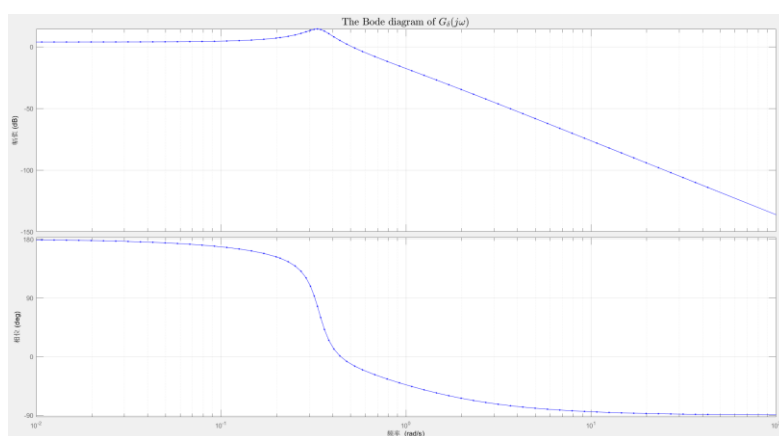
3. 调用 MATLAB 相关函数绘制。

以 ω 为输出的系统开环传递函数 $G_\omega(s)$ 为基础:



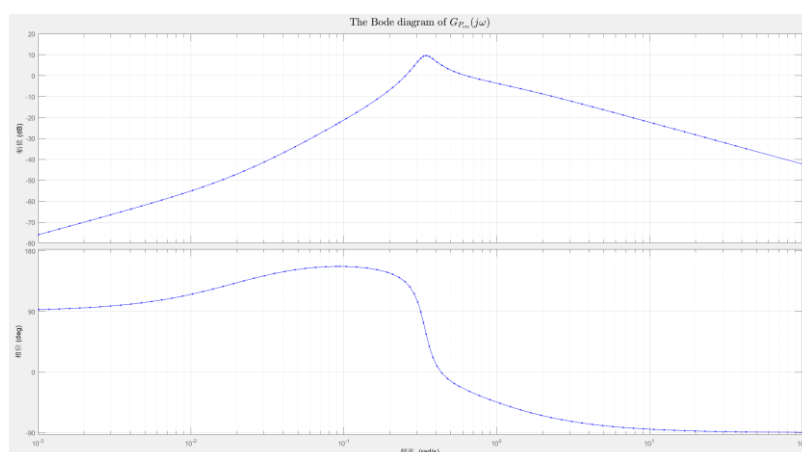
这里应该将 270° 看作是 -90° 。

以 δ 为输出的系统开环传递函数 $G_\delta(s)$ 为基础:



这里应该将 180° 看作是 -180° 。

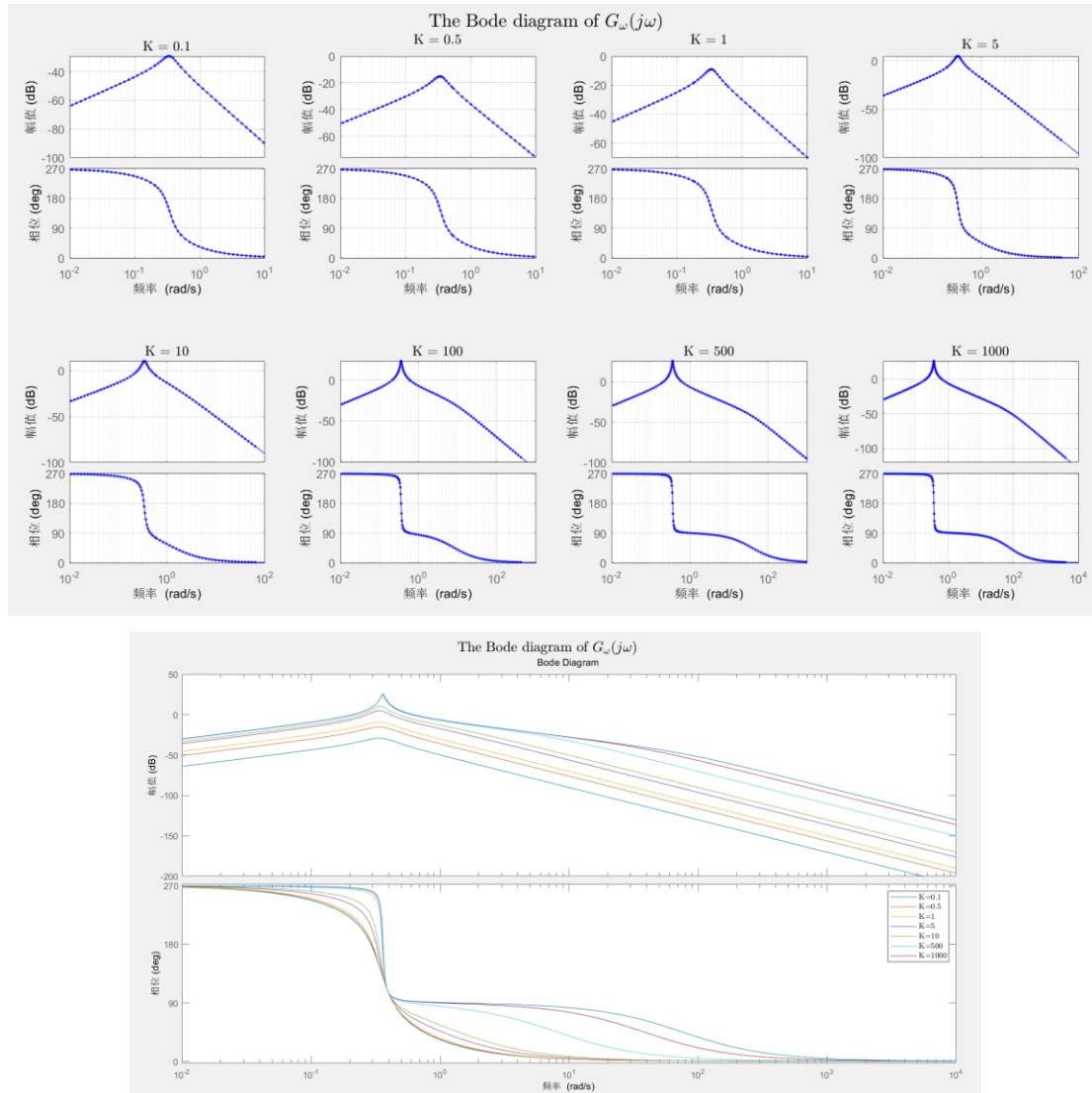
以 P_e 为输出的系统开环传递函数 $G_{P_e}(s)$ 为基础:



4. 选取不同比例增益 K ，利用 Bode 图，分析不同比例增益 K 对系统稳定性的影响，采用作业四任务 a.3 构造的非线性模型进行时域仿真加以验证。

将不同比例增益 K 对应的 Bode 图放在同一张图里，便于比较与分析。

以 ω 为输出的系统开环传递函数 $G_\omega(s)$ 为基础：



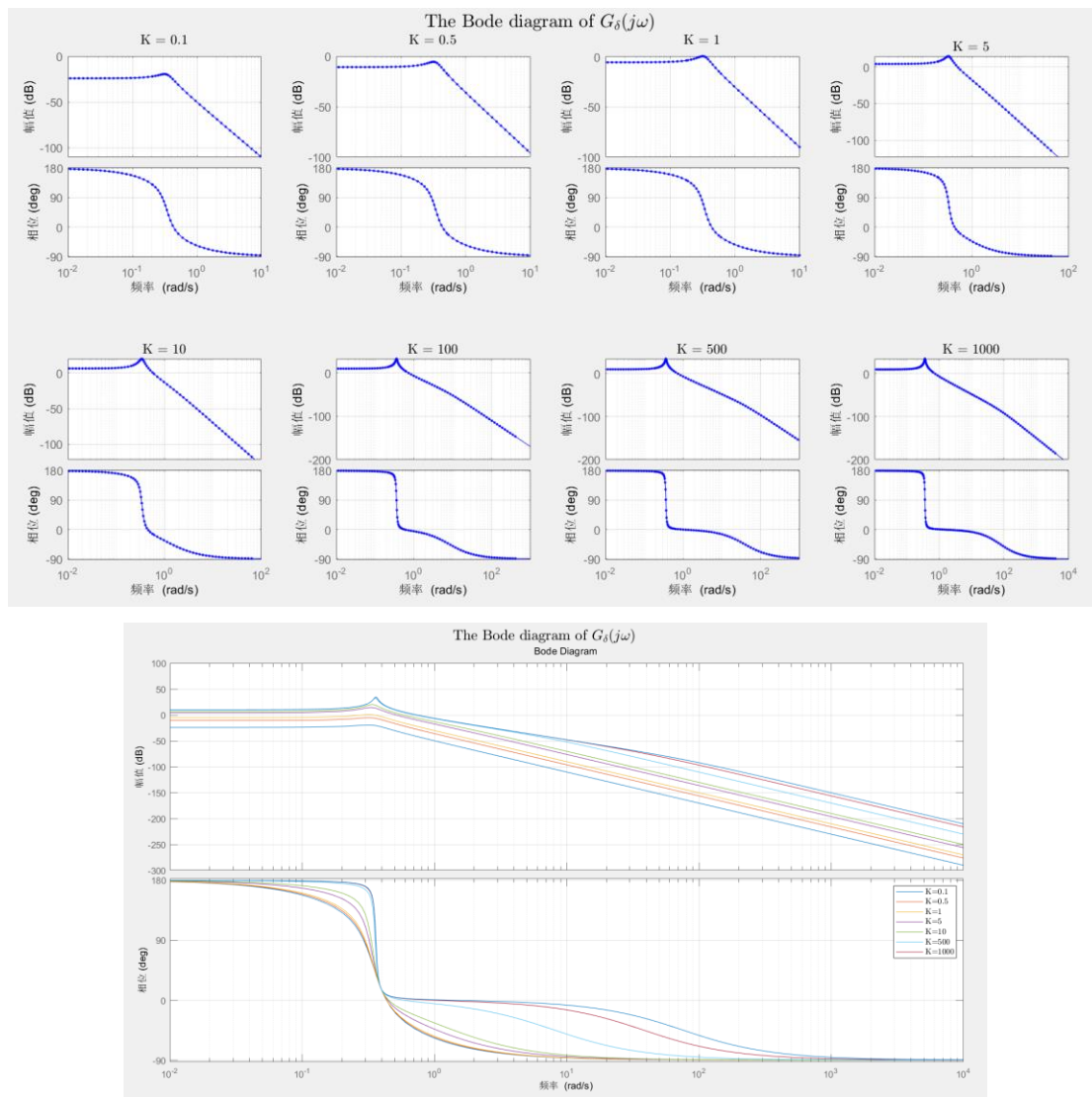
$K=0.1$, $G_{m_dB} = 30.4387578272635$; $K=0.5$, $G_{m_dB} = 16.3191383471671$; $K=1$, $G_{m_dB} = 10.1458728608683$; $K=5$, $G_{m_dB} = -4.45706032102667$; $K=10$, $G_{m_dB} = -10.5096438856386$; $K=100$, $G_{m_dB} = -23.2924366740091$; $K=500$, $G_{m_dB} = -25.5743209499091$; $K=1000$, $G_{m_dB} = -25.8910099242184$

不同比例增益 K 对系统 (ω) 稳定性的影响：

随着 K 的增大，Bode 图的幅值裕度在 $K = 1$ 及之前均为正，因此系统稳定，在 $K = 5$ 及之后均为负，因此系统不稳定。因此系统 (ω) 稳定性随着 K 的增大，由稳定逐渐变成不稳定。

从非线性模型时域仿真结果来看， ω 也是随着 K 的增大，由稳定逐渐变成不稳定。

以 δ 为输出的系统开环传递函数 $G_\delta(s)$ 为基础:



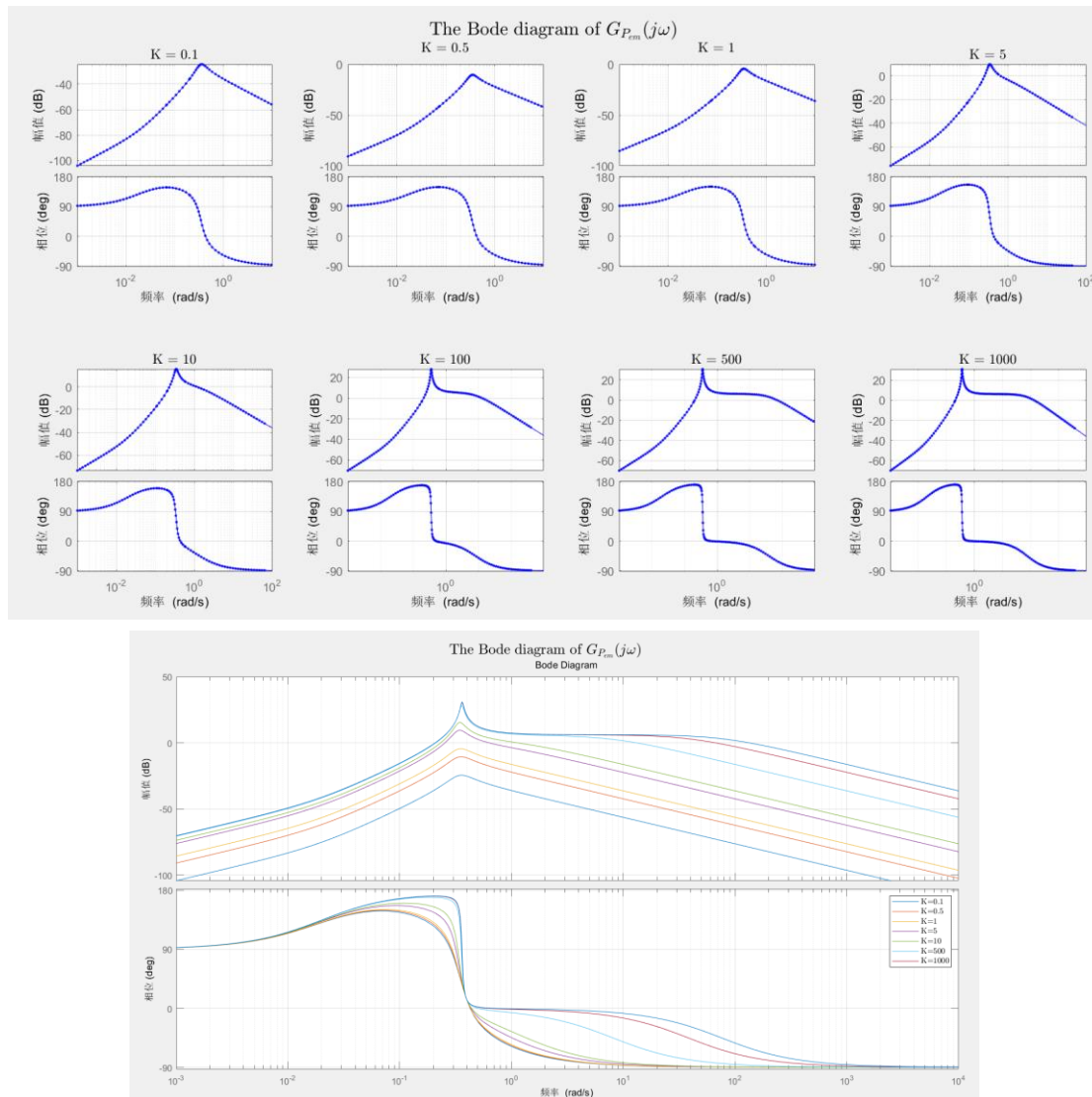
$K=0.1$, $G_{m_dB} = 24.087531713356$; $K=0.5$, $G_{m_dB} = 10.7754720294988$; $K=1$, $G_{m_dB} = 5.52283497089804$; $K=5$, $G_{m_dB} = -3.96614928856044$; $K=10$, $G_{m_dB} = -6.43832639974474$; $K=100$, $G_{m_dB} = -9.49095831276439$; $K=500$, $G_{m_dB} = -9.82234015505454$; $K=1000$, $G_{m_dB} = -9.86466616469171$ 。

不同比例增益 K 对系统 (δ) 稳定性的影响:

随着 K 的增大, Bode 图的幅值裕度在 $K = 1$ 及之前均为正, 因此系统稳定, 在 $K = 5$ 及之后均为负, 因此系统不稳定。因此系统 (δ) 稳定性随着 K 的增大, 由稳定逐渐变成不稳定。

但从非线性模型时域仿真结果来看, 随着 K 的增大, δ 始终保持稳定。这个在时域根轨迹分析的时候也出现同样的问题。这是线性系统和非线性闭环系统时域仿真存在的差异, 此时的线性模型不能完美地替代非线性模型。

以 P_e 为输出的系统开环传递函数 $G_{P_e}(s)$ 为基础:



$K=0.1$, $G_{m_dB} = \text{Inf}$; $K=0.5$, $G_{m_dB} = \text{Inf}$; $K=1$, $G_{m_dB} = \text{Inf}$; $K=5$, $G_{m_dB} = \text{Inf}$; $K=10$, $G_{m_dB} = \text{Inf}$; $K=100$, $G_{m_dB} = \text{Inf}$; $K=500$, $G_{m_dB} = \text{Inf}$; $K=1000$, $G_{m_dB} = \text{Inf}$;

不同比例增益 K 对系统 (P_e) 稳定性的影响:

随着 K 的增大, Bode 图的幅值裕度始终大于零, 且为无穷大, 因此, 此系统 (P_e) 稳定性随着 K 的增大, 始终保持稳定。

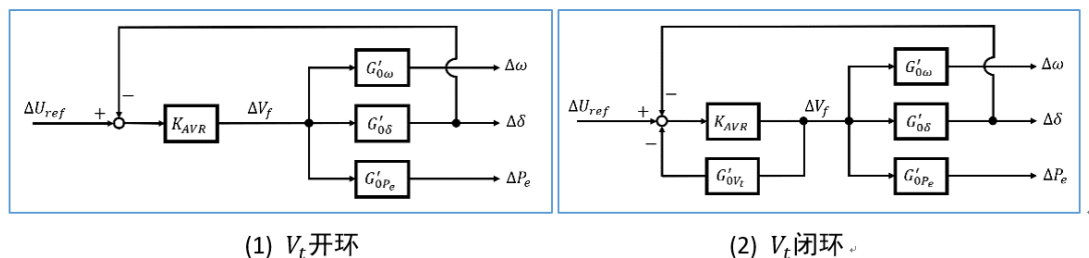
从非线性模型时域仿真结果来看, P_e 始终保持稳定。

这里不采用相角裕度的原因是因为, 大部分系统存在 2 个穿越频率, 甚至没有穿越频率, 因此相角裕度实际上是错误的。

c. 性能分析

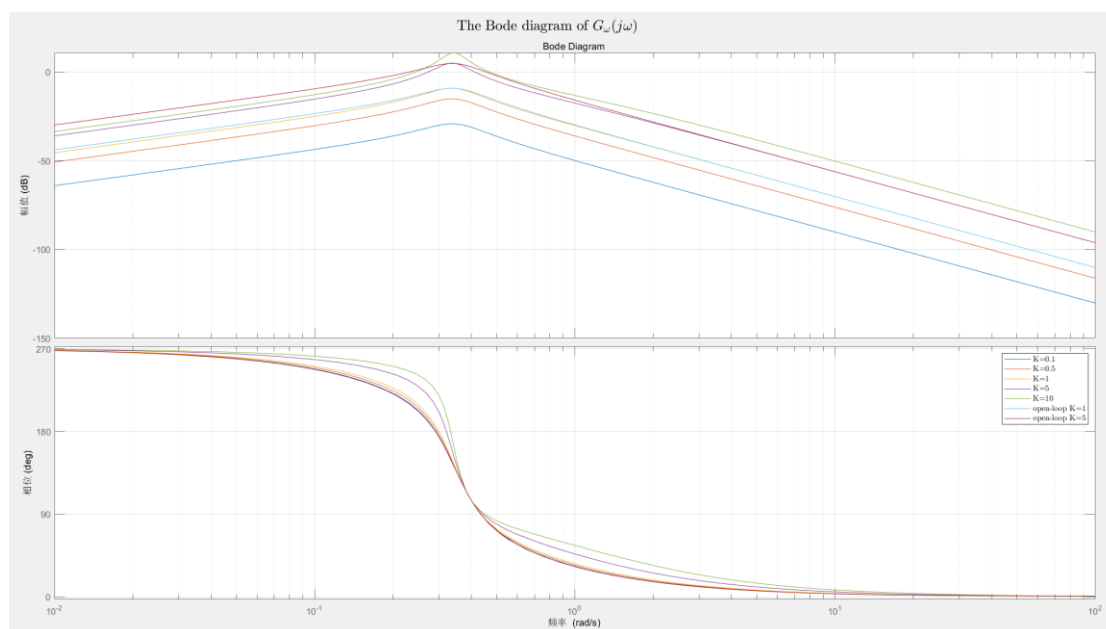
分析开环与 AVR 闭环系统的频域与时域性能，分析穿越频率、频带宽度与调整时间之间的关联，分析相角裕量、谐振峰值与超调量间的联系。

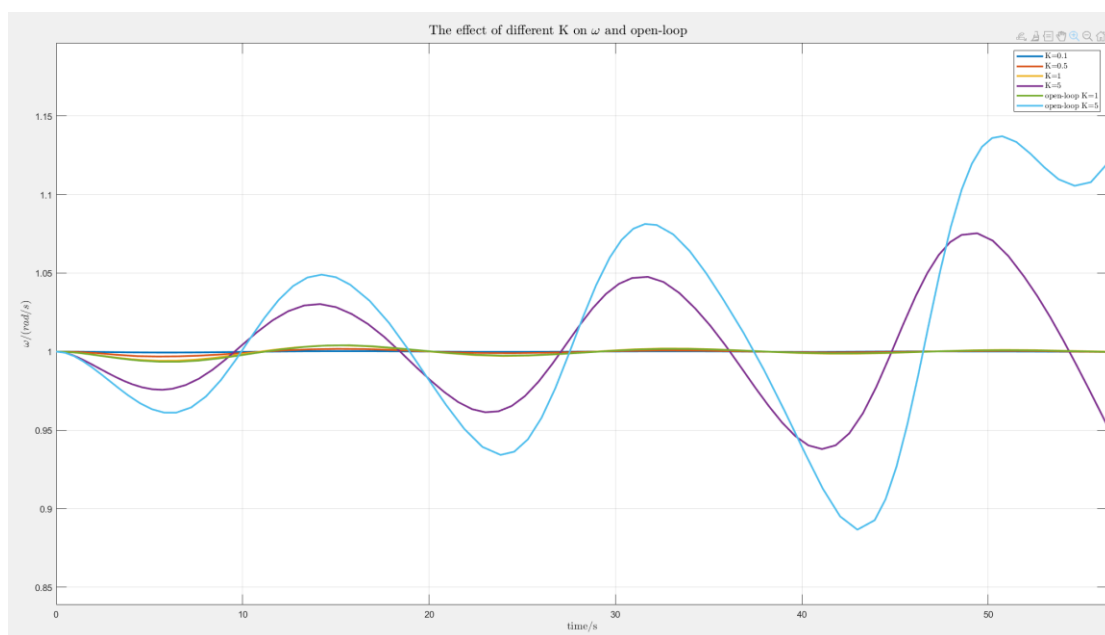
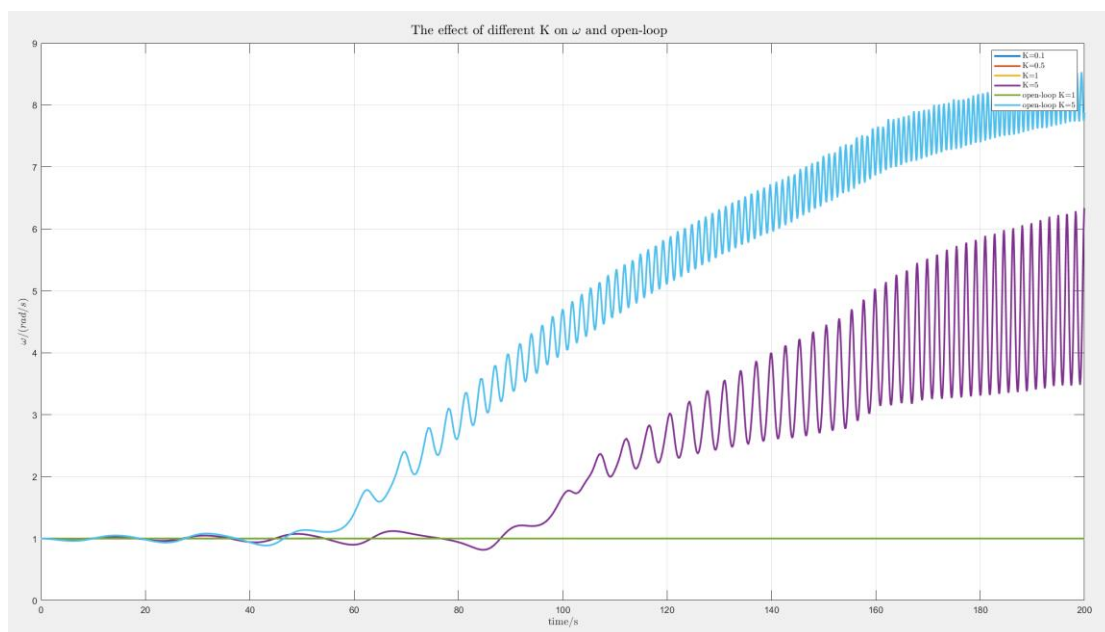
这里说的开环与闭环其实针对的是 V_t ，因此是比较以下两个系统的性能。



频域性能分析

以 ω 为输出的系统：

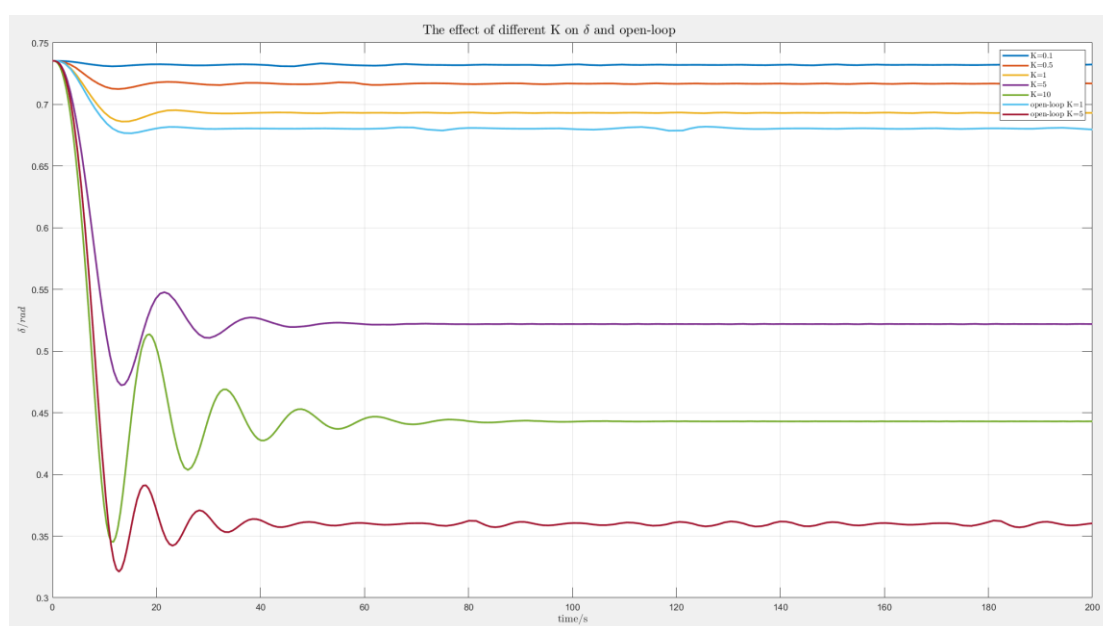
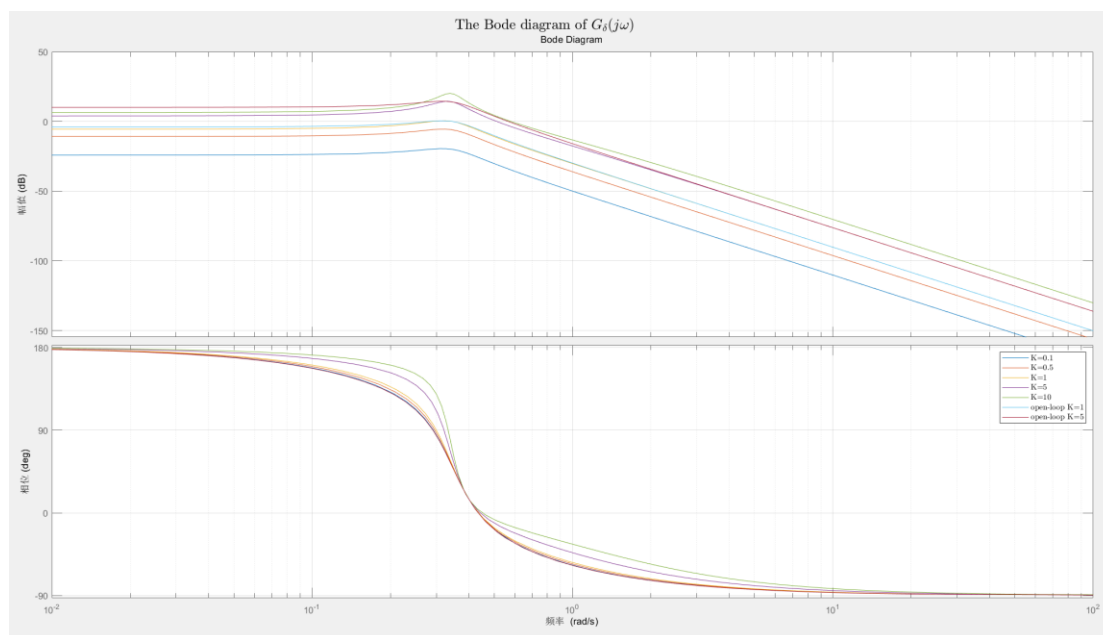




对于 ω , Bode 图, 开环系统的相频特性与加入 AVR 闭环后并没有太大变化, 而开环系统的幅频特性与加入 AVR 闭环且开环增益为 $K = 1$ 时最相似, 当 K 增大时, 幅频特性曲线近似向上平移, 而一旦当幅频特性曲线穿过 0dB 时, 其相角往往已经小于 -180° (至少在 $K = 5$ 时是如此)。因此, 从 Bode 图的视角可以将该系统中 K 增大, 系统从稳定到不稳定简单理解为幅值穿越频率从不存在到存在。

而从非线性系统的时域仿真中可以看出, $K = 1$ 及其之前的输出稳定性均很好, 动态性能相近, 到了 $K = 5$ 时变为不平衡, 发生失稳。而对于开环系统的 $K = 1$, 稳定性和动态性能与闭环相似, 但是 K 增大到 $K = 5$ 的话也会形成振荡。

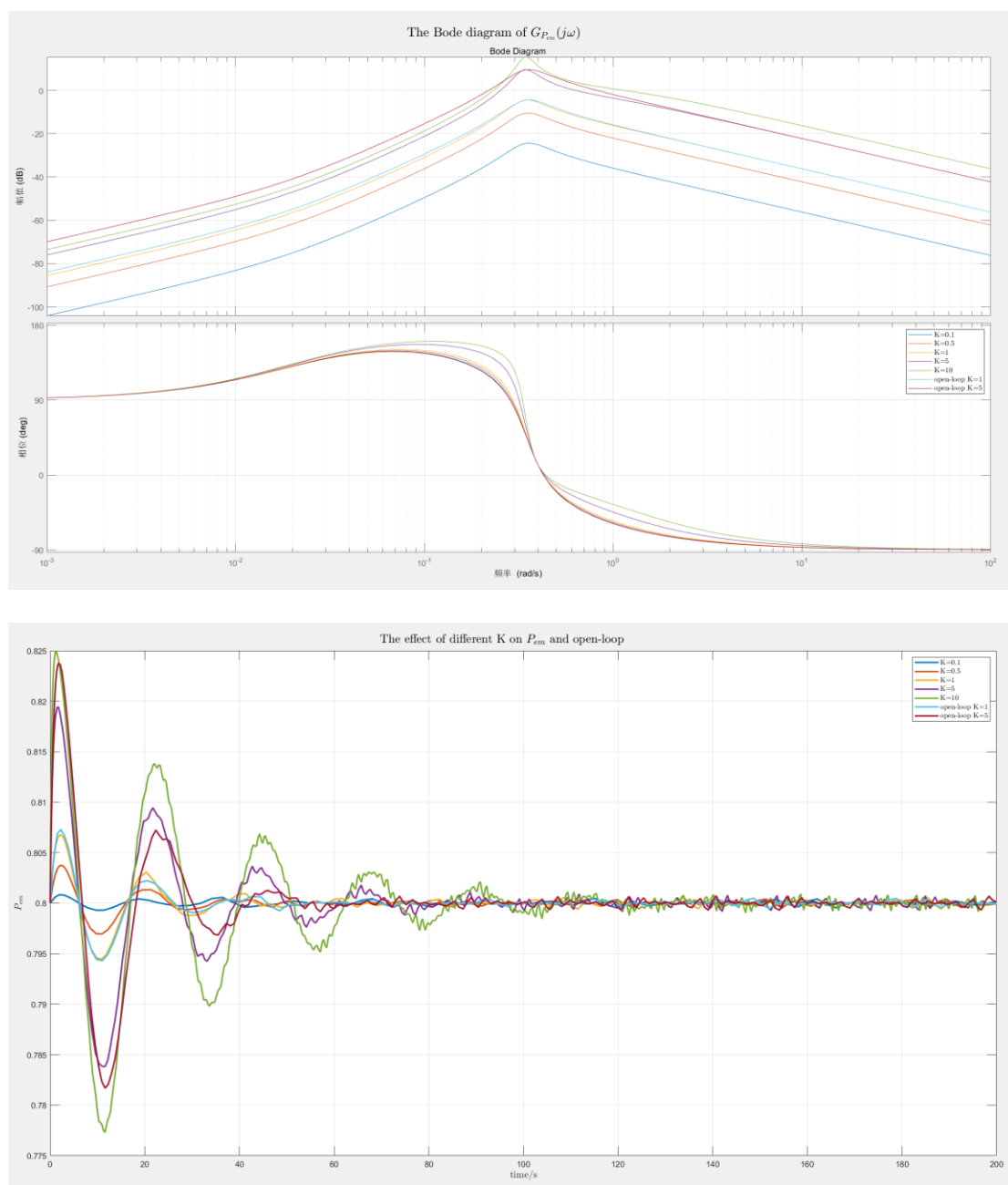
以 δ 为输出的系统:



对于 δ , Bode 图, 开环系统的相频特性与加入 AVR 闭环后并没有太大变化, 而开环系统的幅频特性与加入 AVR 闭环且开环增益为 $K = 1$ 时最相似, 当 K 增大时, 幅频特性曲线近似向上平移, 而一旦当幅频特性曲线穿过 0dB 时, 其相角往往已经小于 -180° (至少在 $K = 5$ 时是如此)。因此, 从 Bode 图的视角可以将该系统中 K 增大, 系统从稳定到不稳定简单理解为幅值穿越频率从不存在到存在。

而从非线性系统的时域仿真中可以看出, 输出量 δ 在所选的开环增益 K 中均保持稳定, 但是超调量、调整时间随 K 增大, 动态性能变差。开环系统比相同开环增益的闭环系统动态性能略好, 因为其超调量明显小于闭环系统, 且调整时间也更快。

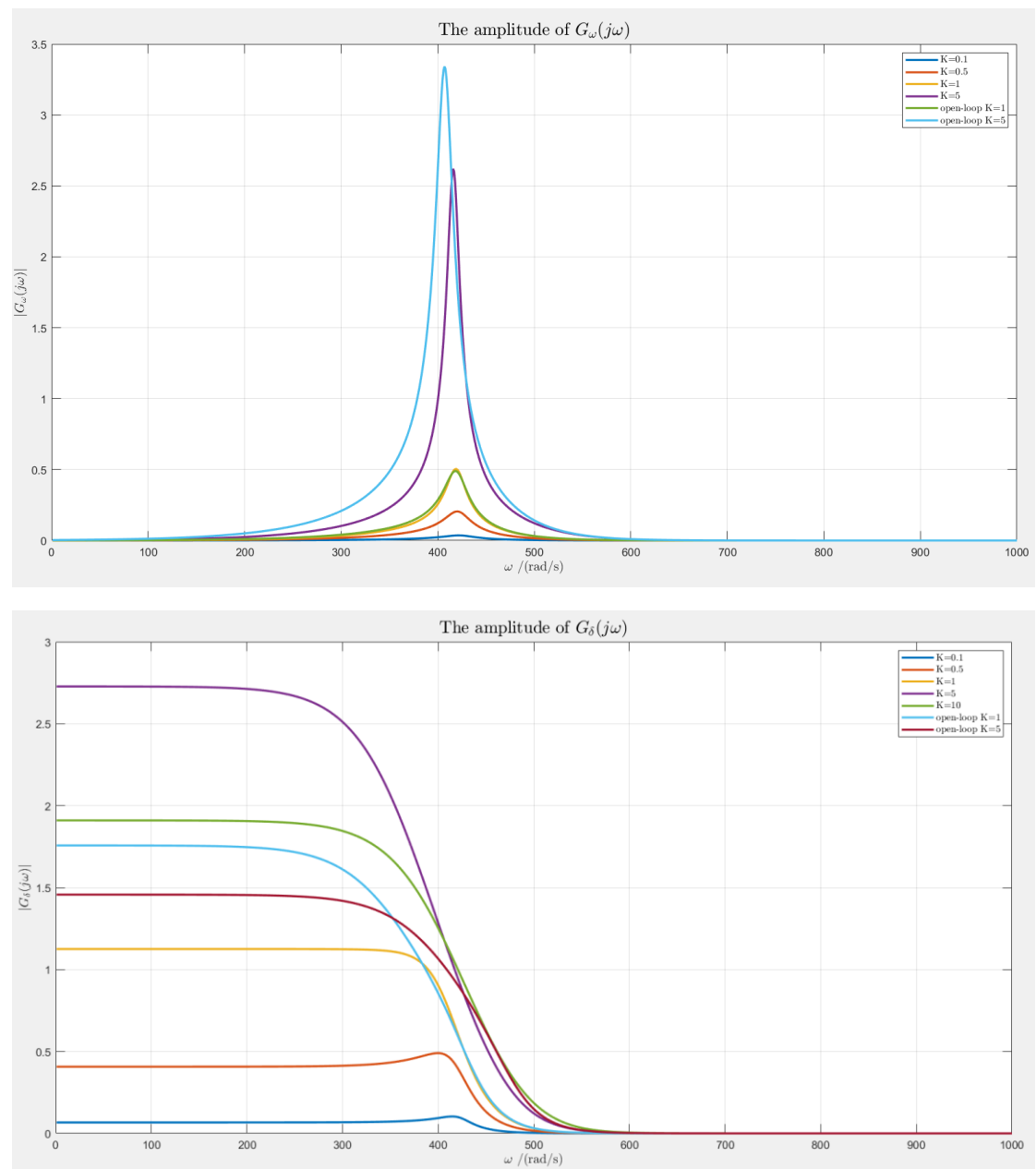
以 P_e 为输出的系统:

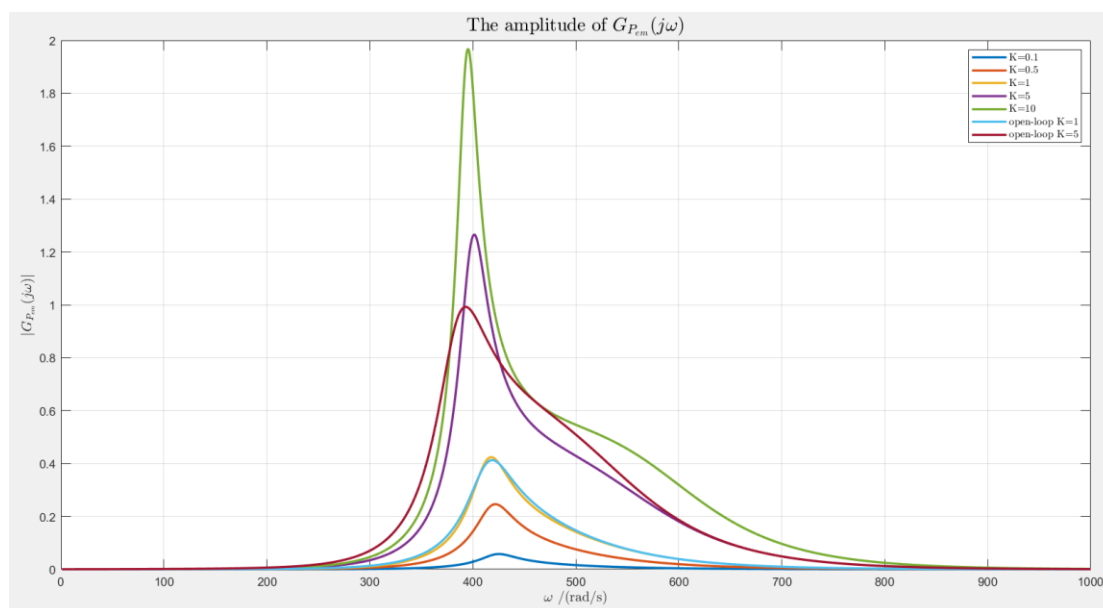


对于 P_e , Bode 图, 开环系统的相频特性与加入 AVR 闭环后并没有太大变化, 而开环系统的幅频特性与加入 AVR 闭环且开环增益为 $K = 1$ 时最相似, 当 K 增大时, 幅频特性曲线近似向上平移, 当幅频特性曲线穿过 0dB 时, 其相角始终大于 -180° 。因此, 从 Bode 图的视角可以将该系统中 K 增大, 系统始终保持稳定理解为相角裕度始终大于 0。

从非线性系统的时域仿真中可以看出, 输出量 P_e 在所选的开环增益 K 中均保持稳定, 但是超调量、调整时间随 K 增大, 动态性能变差。开环系统比相同开环增益的闭环系统动态性能几乎相同。

三者的闭环（AVR+PSS）幅频特性如下：





以 δ 为输出的系统较为典型，以其为案例分析。

随着开环增益 K 的减小，幅频特性整体向下平移，因此开环系统的穿越频率 ω_c 越大，闭环幅频特性的频带宽度 ω_B 越宽，调整时间 t_s 越短，很容易直接从幅频特性看出来。

随着开环增益 K 的增大，幅频特性整体向上平移，因此开环系统的穿越频率 ω_c 越大，相角裕度 γ 也就越小，闭环幅频特性的谐振峰值 M_r 越大，很容易直接从幅频特性看出来。

从仿真结果得到的结果与课本 103 页的结论一致：

开环系统的穿越频率 ω_c 越高，或闭环幅频特性的频带宽度 ω_B 越宽，则调整时间 t_s 越短。

开环系统的相角裕度 γ 越小，或闭环幅频特性的谐振峰值 M_r 越大，则超调量 $\sigma\%$ 越大。

d. 总结

Nyquist 图与 Bode 图的绘制方法

对比手绘、频率扫描、直接调用函数三种方法：

手绘 Nyquist 图较为粗糙，对于高阶系统很难准确分析其变化趋势，而且计算复杂，绘图准确性低；而频率扫描和直接调用函数两种方法画出来的图像一致，只是库函数 `nyquist()` 的精度似乎是固定的，倘若对某个局部的精度有更高的要求，可以自己设置更密的频率，然后再利用频率扫描方法或许可以得到更精准的图像。

Bode 图同理。

理解 Nyquist 图与 Bode 图的联系

Nyquist 图上的单位圆对应 Bode 图幅频特性上的 0dB 线： $L(\omega)$ 大于 0 的频段内相当于 nyquist 单位圆外， $L(\omega)$ 小于 0 的频段内相当于 nyquist 单位圆内

Nyquist 图上的负实轴对应 Bode 图相频特性上的 -180° 线。

编程时间：约 5 小时。

撰写报告时间：6 小时。

总结与反馈：😊