



---

# 多旋翼飞行器设计与控制 系列实验

## 多旋翼飞行器位置控制器设计实验

全权 副教授

qq\_buaa@buaa.edu.cn

自动化科学与电气工程学院

北京航空航天大学



北航可靠飞行控制研究组

BUAA Reliable Flight Control Group



# 大纲

---

1. 基本原理
2. 基础实验
3. 分析实验
4. 设计实验
5. 小结





# 基本原理

## □ 基本概念

### (1) 系统时域特性

对二阶系统 
$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

其中  $0 < \zeta < 1$ ，阶跃响应曲线如左图所示

1) 超调量 
$$M_p = \frac{x_o(t_p) - x_o(\infty)}{x_o(\infty)} * 100\% = e^{-\xi\pi/\sqrt{1-\xi^2}} * 100\%$$

#### 2) 调节时间

在初步分析系统时，经常采用下列公式计算调节时间  $t_s$ 。当阻尼比  $< 0.8$  时

$$t_s = \frac{3.5}{\xi\omega_n} \text{ (取5\% 误差带)}$$

$$t_s = \frac{4.5}{\xi\omega_n} \text{ (取2\% 误差带)}$$

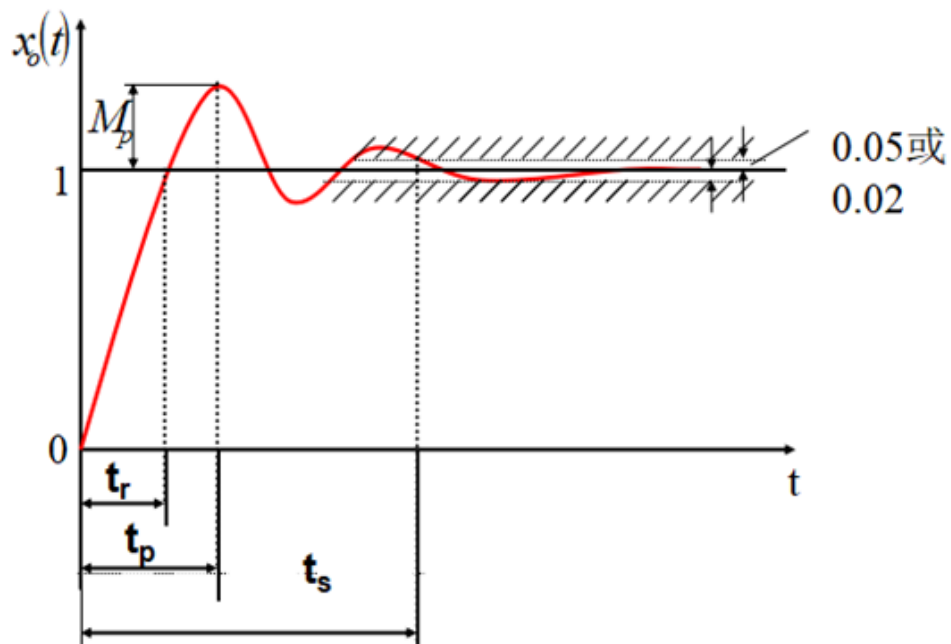


图. 二阶系统阶跃响应





# 基本原理

## □ 基本概念

### (2) Bode图 and 稳定裕度

Bode图也叫对数频率特性曲线，它将开环幅相特性画在对数坐标上。对数稳定判据根据开环对数幅频与对数相频曲线的相互关系来判别闭环系统稳定性。

相角裕度 $\gamma$ :  $L(\omega)=0\text{dB}$ 处的相频与 $-\pi$ 的差角，即：

$$\gamma = \angle G(j\omega_c)H(j\omega_c) - (-180^\circ)$$

其中： $\omega_c$ 表示截止频率， $L(\omega_c)=0\text{dB}$ 。

模稳定裕度 $h$ ： $\angle G(j\omega_1)H(j\omega_1)$ 为 $-\pi$ 时，对应的对数幅频的绝对值，即：

$$h(\text{dB}) = 20\lg \left| \frac{1}{G(j\omega_1)H(j\omega_1)} \right| = -20\lg |G(j\omega_1)H(j\omega_1)|$$

在闭环系统稳定的条件下，系统的 $\gamma$ 和 $h$ 越大，反应系统的稳定程度越高。稳定裕度也间接反映了系统动态过程的平稳性，裕度大意为着超调小，振荡弱，“阻尼”大。一般要求：

$$\gamma > 40^\circ$$

$$h > 6\text{dB}$$

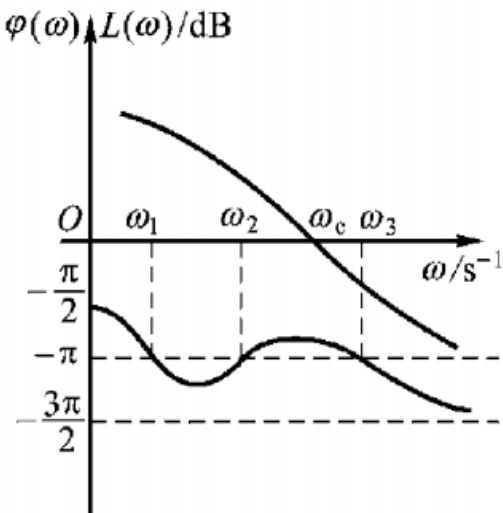


图. 稳定裕度

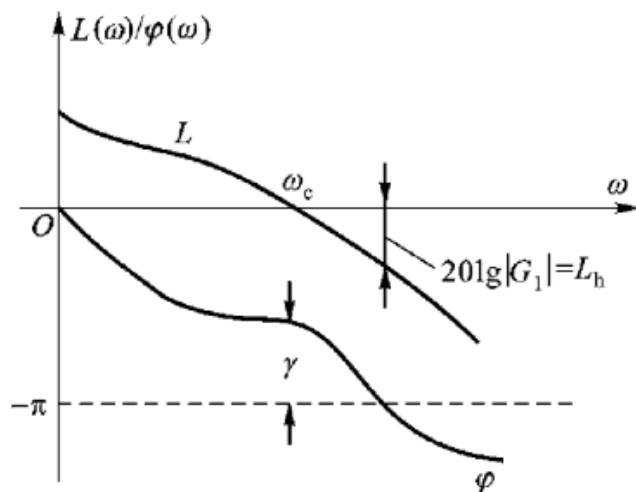


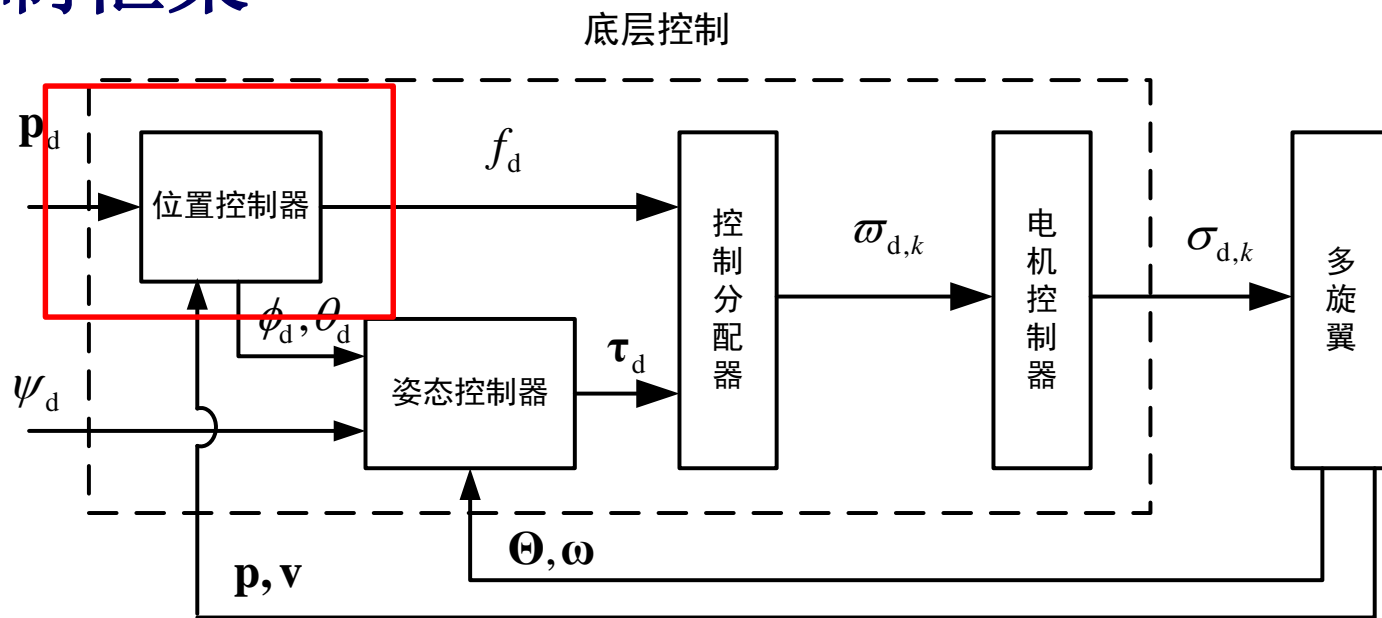
图. 对数频率特性曲线





# 基本原理

## □ 底层控制框架



欠驱动系统：4个输入（总拉力 $f$ 和三轴力矩 $\tau$ ）控制6个输出（位置 $p$ 和姿态角 $\Theta$ ）。设计多旋翼飞行控制器时，可以采用内外环的控制策略，其中内环对多旋翼飞行器姿态角进行控制，而外环对多旋翼飞行器的位置进行控制。由内外环控制实现多旋翼飞行器的升降、悬停、侧飞等飞行模态。





# 基本原理

## □ 位置控制

### (1) 传统的PID设计

#### ■ 水平通道模型

$$\dot{\mathbf{p}}_h = \mathbf{v}_h$$

$$\dot{\mathbf{v}}_h = -g\mathbf{A}_\psi \boldsymbol{\Theta}_h$$

#### ■ 期望水平位置动态

$$\ddot{\mathbf{p}}_h = \ddot{\mathbf{p}}_{hd} - \mathbf{K}_{p_{hd}} (\dot{\mathbf{p}}_h - \dot{\mathbf{p}}_{hd}) - \mathbf{K}_{p_{hp}} (\mathbf{p}_h - \mathbf{p}_{hd})$$

$$-g\mathbf{A}_\psi \boldsymbol{\Theta}_{hd} = \ddot{\mathbf{p}}_{hd} - \mathbf{K}_{p_{hd}} (\dot{\mathbf{p}}_h - \dot{\mathbf{p}}_{hd}) - \mathbf{K}_{p_{hp}} (\mathbf{p}_h - \mathbf{p}_{hd})$$

当考虑定点控制时

$$\dot{\mathbf{p}}_{hd} = \ddot{\mathbf{p}}_{hd} = \mathbf{0}_{2 \times 1}$$



$$\boldsymbol{\Theta}_{hd} = -g^{-1} \mathbf{A}_\psi^{-1} \left( \ddot{\mathbf{p}}_{hd} - \mathbf{K}_{p_{hd}} (\dot{\mathbf{p}}_h - \dot{\mathbf{p}}_{hd}) - \mathbf{K}_{p_{hp}} (\mathbf{p}_h - \mathbf{p}_{hd}) \right)$$

其中  $\mathbf{K}_{(.)}$  表示参数。





# 基本原理

## □ 位置控制

### (1) 传统的PID设计

#### ■ 高度通道模型

$$\dot{p}_z = v_z$$

$$\dot{v}_z = g - \frac{f}{m}$$

#### ■ 期望高度动态

$$\ddot{p}_z = \ddot{p}_{z_d} - k_{p_z d}(\dot{p}_z - \dot{p}_{z_d}) - k_{p_z p}(p_z - p_{z_d})$$

$$f_d = mg - m\left(\ddot{p}_{z_d} - k_{p_z d}(\dot{p}_z - \dot{p}_{z_d}) - k_{p_z p}(p_z - p_{z_d})\right)$$

当考虑定点控制时,  $\dot{p}_{z_d} = \ddot{p}_{z_d} = 0$  上式就变为

$$f_d = mg - m\left(-k_{p_z d}\dot{p}_z - k_{p_z p}(p_z - p_{z_d})\right)$$





# 基本原理

## □ 位置控制

### (2) 开源自驾仪PID设计

#### 1) 水平通道模型

为了使  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}_{\mathbf{p}_h}(t)\| = 0$ , 我们先针对

期望速度

$$\dot{\mathbf{p}}_h = \mathbf{v}_h \quad \Rightarrow \quad \mathbf{v}_{hd} = \mathbf{K}_{\mathbf{p}_h} (\mathbf{p}_{hd} - \mathbf{p}_h)$$

在  $\dot{\mathbf{p}}_{hd} = 0$  的前提下如果

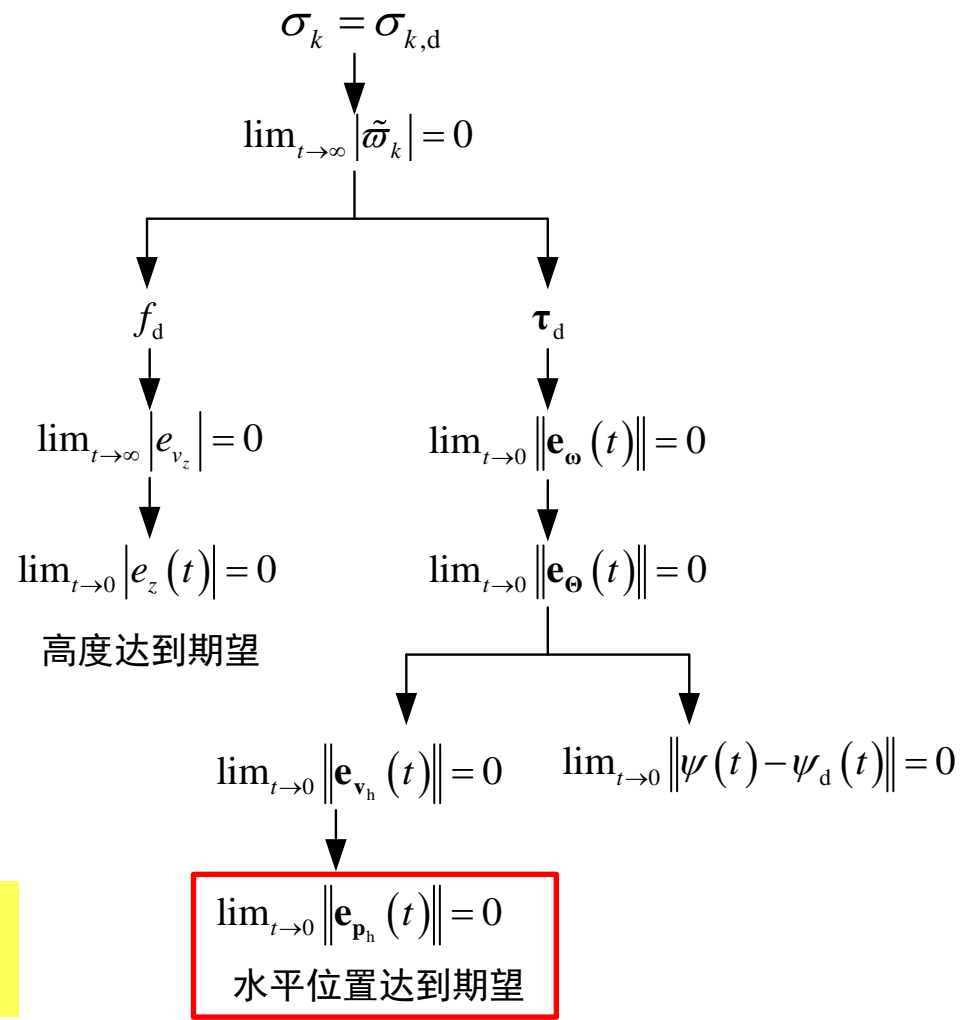
$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}_{\mathbf{v}_h}(t)\| = 0$$

那么

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}_{\mathbf{p}_h}(t)\| = 0$$

其中  $\mathbf{e}_{\mathbf{v}_h} \triangleq \mathbf{v}_h - \mathbf{v}_{hd}$

速度能达到期望, 位置也就能达到期望







# 基本原理

## □ 位置控制

### (2) 开源自驾仪PID设计

#### 1) 水平通道模型

为了使  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}_{v_h}(t)\| = 0$  , 我们先针对

$$\dot{\mathbf{v}}_h = -g \mathbf{A}_\psi \Theta_h$$

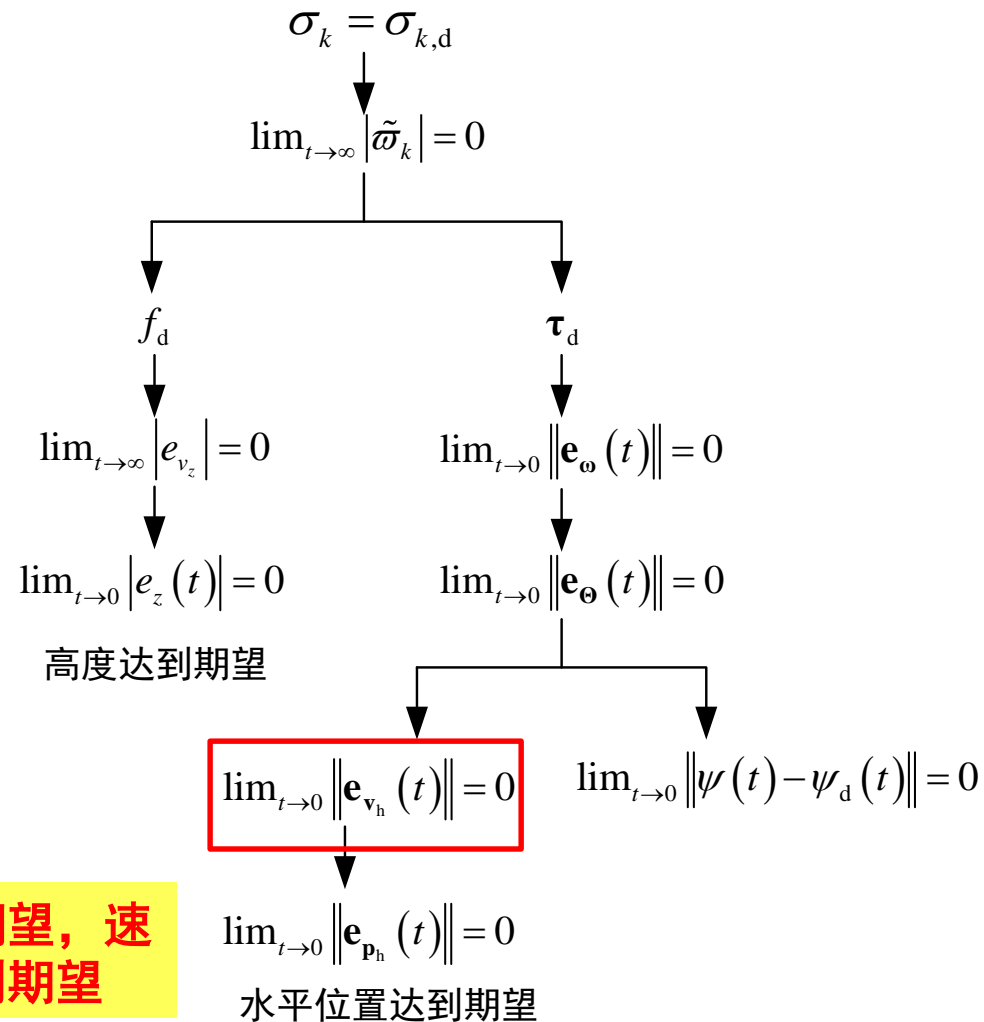
$$-g \mathbf{A}_\psi \Theta_{hd} = -\mathbf{K}_{vhp} \mathbf{e}_{v_h} - \mathbf{K}_{vhi} \int \mathbf{e}_{v_h} - \mathbf{K}_{vhd} \dot{\mathbf{e}}_{v_h}$$

$$\Theta_{hd} = g^{-1} \mathbf{A}_\psi^{-1} \left( \mathbf{K}_{vhp} \mathbf{e}_{v_h} + \mathbf{K}_{vhi} \int \mathbf{e}_{v_h} + \mathbf{K}_{vhd} \dot{\mathbf{e}}_{v_h} \right)$$

如果  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\Theta_h(t) - \Theta_{hd}(t)\| = 0$

那么  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}_{v_h}(t)\| = 0$

角度能达到期望，速度也就能达到期望





# 基本原理

## □ 位置控制

### (2) 开源自驾仪PID设计

#### 2) 高度通道模型

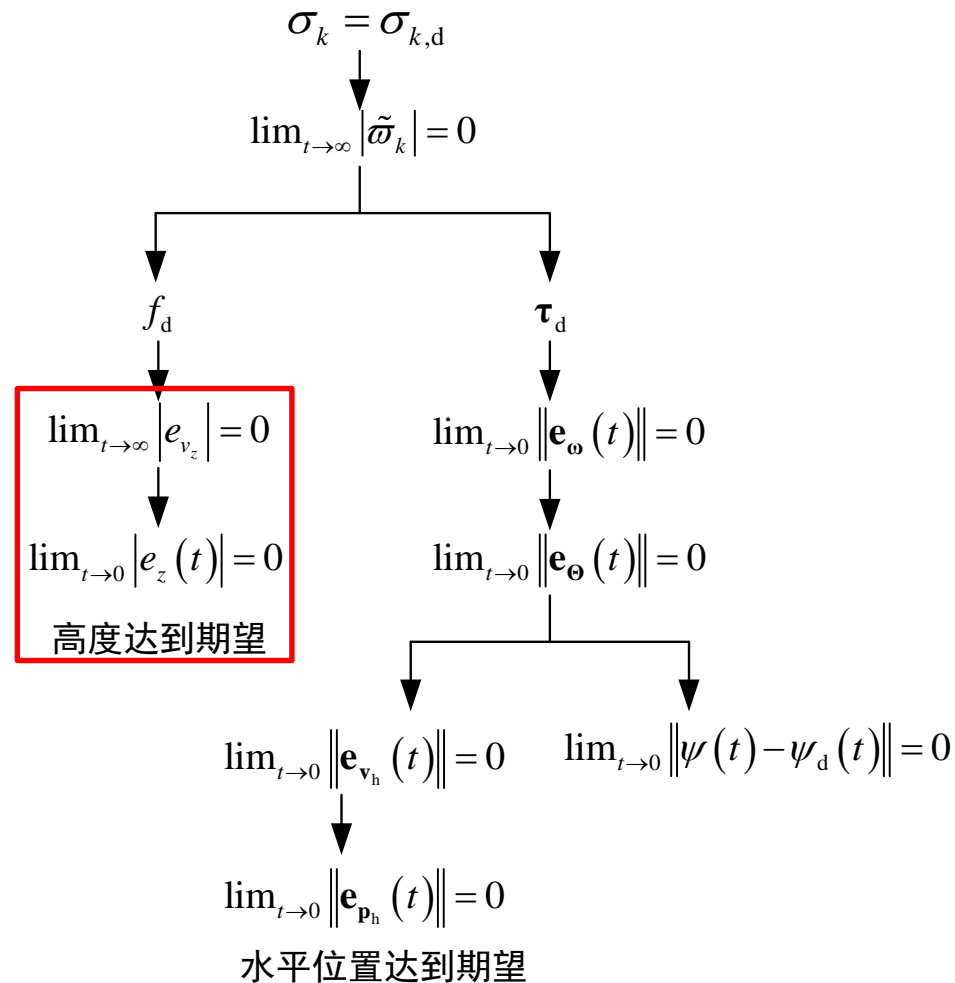
类似于水平通道设计，高度通道

控制器设计如下

$$v_{zd} = -k_{p_z} (p_z - p_{zd})$$

$$f_d = m \left( g + k_{v_zp} e_{v_z} + k_{v_zi} \int e_{v_z} + k_{v_zd} \dot{e}_{v_z} \right)$$

竖直方向速度能达到期望，高度也就能达到期望





# 基本原理

## □ 位置控制

### (3) 加饱和的PID控制

传统PID  $\Theta_{hd} = -g^{-1} A_{\psi}^{-1} \left( \ddot{\mathbf{p}}_{hd} - \mathbf{K}_{p_{hd}} (\dot{\mathbf{p}}_h - \dot{\mathbf{p}}_{hd}) - \mathbf{K}_{p_{hp}} (\mathbf{p}_h - \mathbf{p}_{hd}) \right)$

自驾仪PID  $\Theta_{hd} = g^{-1} A_{\psi}^{-1} \left( \mathbf{K}_{v_{hp}} \mathbf{e}_{v_h} + \mathbf{K}_{v_{hi}} \int \mathbf{e}_{v_h} + \mathbf{K}_{v_{hd}} \dot{\mathbf{e}}_{v_h} \right)$

控制器设计  
就没意义了

位置误差很大



角度误差很大

$$\Theta_{hd} \gg 2\pi$$

小角度假  
设被破坏!

加饱和非常必要





# 基本原理

## □ 位置控制

### (3) 加饱和的PID控制

同样地，在开源自驾仪 PID 设计中，我们增加对  $\mathbf{e}_{\mathbf{v}_h}$  和控制器右端的限幅

$$\begin{aligned}\mathbf{e}_{\mathbf{v}_h} &= \text{sat}_{\text{gd}}(\mathbf{v}_h - \mathbf{v}_{\text{hd}}, a_1) \\ \Theta_{\text{hd}} &= \text{sat}_{\text{gd}}\left(\mathbf{g}^{-1}\mathbf{A}_{\psi}^{-1}\left(\mathbf{K}_{\mathbf{v}_h\text{p}}\mathbf{e}_{\mathbf{v}_h} + \mathbf{K}_{\mathbf{v}_h\text{i}}\int\mathbf{e}_{\mathbf{v}_h} + \mathbf{K}_{\mathbf{v}_h\text{d}}\dot{\mathbf{e}}_{\mathbf{v}_h}\right), a_2\right)\end{aligned}$$

其中  $a_1, a_2 \in \mathbb{R}_+$ 。保方向饱和函数  $\text{sat}_{\text{gd}}(\mathbf{x}, a)$  的定义见第 10 讲。

下面讨论保方向饱和函数  $\text{sat}_{\text{gd}}(\mathbf{x}, a)$  与传统的饱和函数  $\text{sat}(\mathbf{x}, a)$  的区别。虽然饱和函数限制  $\text{sat}(\mathbf{x}, a)$  的每个分量的绝对值不大于  $a$ ，但它与  $\mathbf{x}$  的方向可能不同。而保方向饱和函数  $\text{sat}_{\text{gd}}(\mathbf{x}, a)$ ，不仅可以限制最终向量每个分量的绝对值不大于  $a$ ，还可以保证  $\text{sat}_{\text{gd}}(\mathbf{x}, a)$  的方向与  $\mathbf{x}$  相同。



# 基本原理

## □ 位置控制

### (3) 加饱和的PID控制

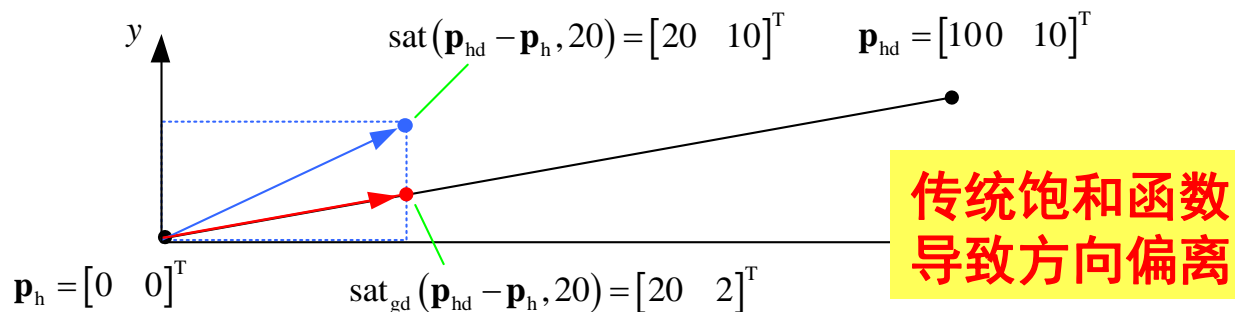


图. 两种饱和函数的作用效果对比图

传统饱和函数

$$\text{sat}(\mathbf{x}, a) \triangleq \begin{bmatrix} \text{sat}(x_1, a) \\ \vdots \\ \text{sat}(x_n, a) \end{bmatrix}, \text{sat}(x_k, a) \triangleq \begin{cases} x_k & |x_k| \leq a \\ a \cdot \text{sign}(x_k) & |x_k| > a \end{cases}$$

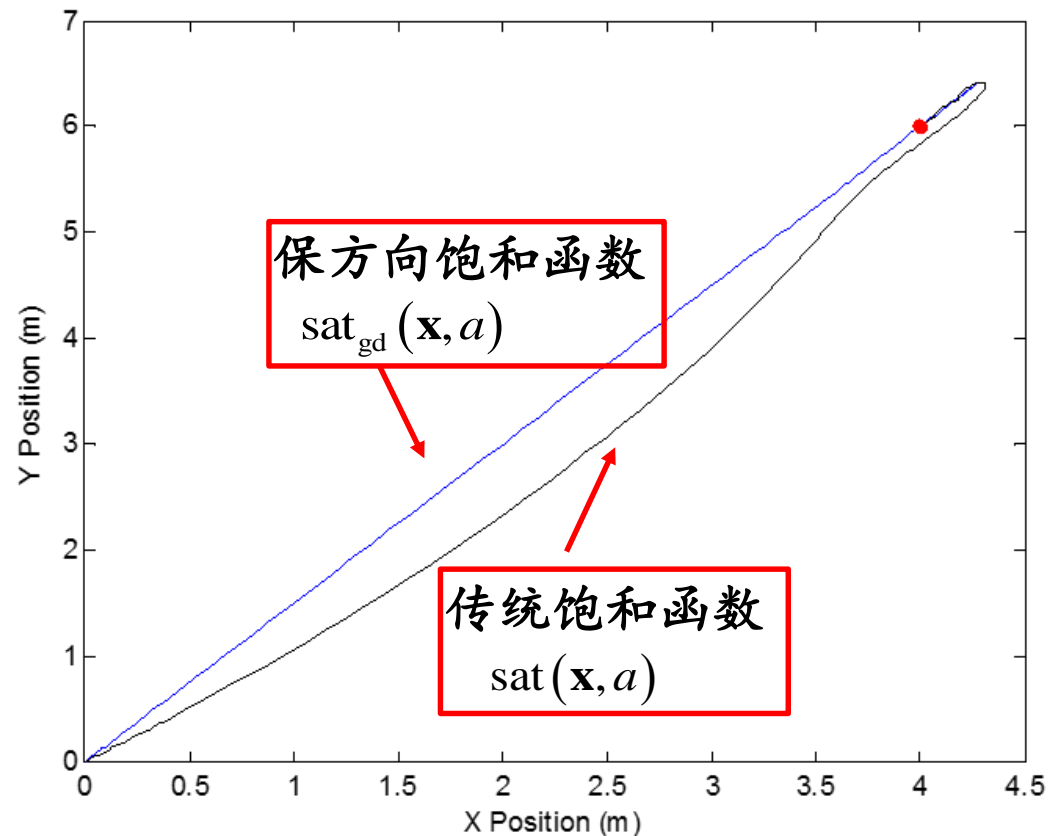


图. 饱和情况下多旋翼定点跟踪水平面运动轨迹

保方向的饱和函数可以保证多旋翼直线飞行，而传统饱和函数则不行





# 基本原理

## □ 产生期望欧拉角的位置控制

### (3) 加饱和的PID控制

为了避免油门过大，同样需要加入饱和。在传统 PID 控制器设计中，我们需要对控制器的右端进行如下限幅

$$f_d = \text{sat}_{\text{gd}} \left( m \left( g + k_{p_z d} \dot{p}_z + k_{p_z p} (p_z - p_{z_d}) \right), a_3 \right)$$

其中  $a_3 \in \mathbb{R}_+$ 。同样地，在开源自驾仪 PID 设计中，我们增加对  $e_{v_z}$  和控制器的右端的限幅

$$e_{v_z} = \text{sat}_{\text{gd}} (v_z - v_{z_d}, a_4)$$

$$f_d = \text{sat}_{\text{gd}} \left( m \left( g + k_{v_z p} e_{v_z} + k_{v_z i} \int e_{v_z} + k_{v_z d} \dot{e}_{v_z} \right), a_5 \right)$$

其中  $a_4, a_5 \in \mathbb{R}_+$ 。对于一维变量，保方向饱和函数  $\text{sat}_{\text{gd}}$  和与传统饱和函数  $\text{sat}$  的作用相同。



# 基本原理

## □ 控制系统校正

下面主要介绍串联校正。加入串联校正的系统结构图如图所示。其中 $G_c(s)$ 表示串联校正装置的传递函数， $G(s)$ 表示系统不变部分的传递函数。在工程实践中常用的串联校正有超前校正、滞后校正和滞后-超前校正。

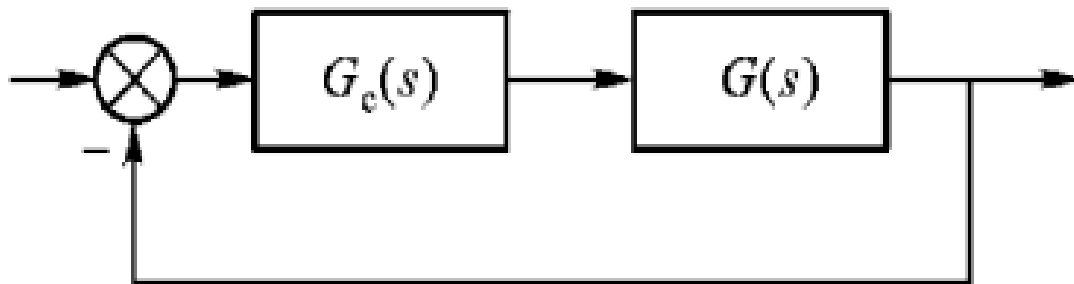


图. 系统串联校正



# 基本原理

## □ 控制系统校正

### (1) 相位超前校正

$$G_c(s) = \frac{1 + aTs}{1 + Ts} \quad (a > 1)$$

特点: 提供正的相移。

相位超前校正主要发生在频段  $\left(\frac{1}{aT}, \frac{1}{T}\right)$

而且超前的最大值为:

$$\varphi_m = \arcsin \frac{a-1}{a+1}$$

这一最大值发生在对数频率特性曲线的几何中心处, 对应的角频率为:

$$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{a}T}$$

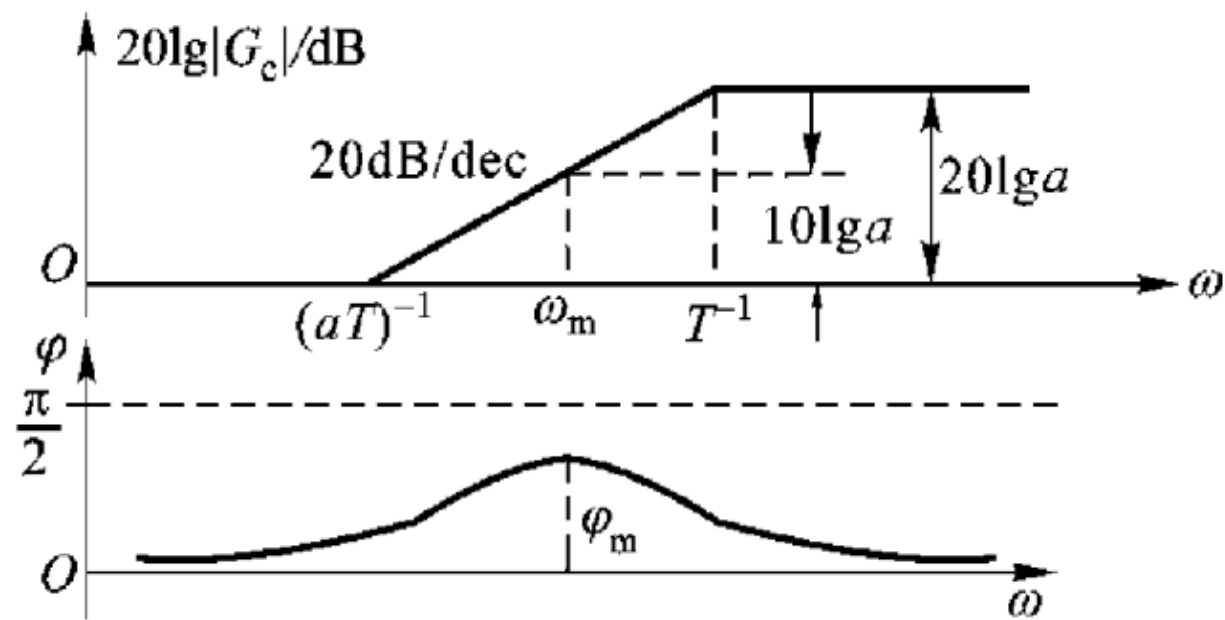


图. 超前校正幅频曲线







# 基本原理

## □ 控制系统校正

### (2) 相位滞后校正

$$G_c(s) = \frac{1 + bTs}{1 + Ts} \quad (b < 1)$$

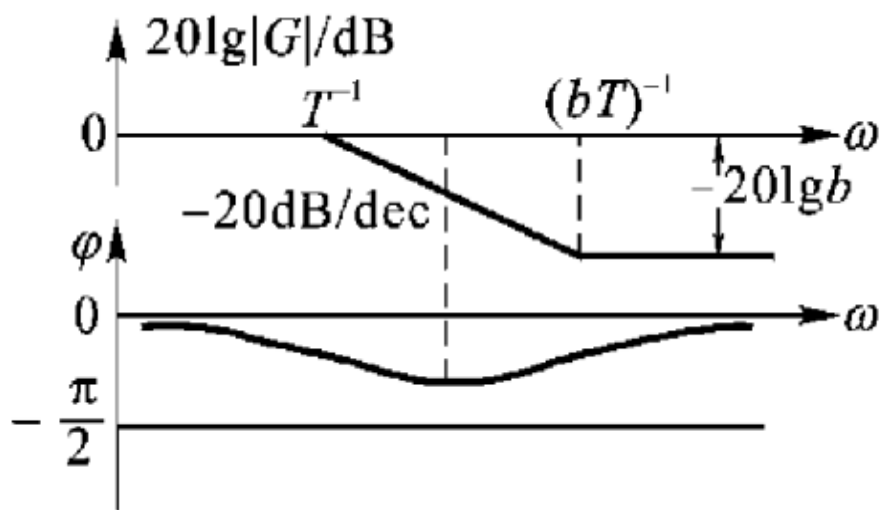


图. 滞后校正幅频曲线

### (3) 相位超前校正

$$G_c(s) = \frac{(1 + bT_1s)(1 + aT_2s)}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)}$$

其中  $a > 1, b > 1$ , 且有  $bT_1 > aT_2$

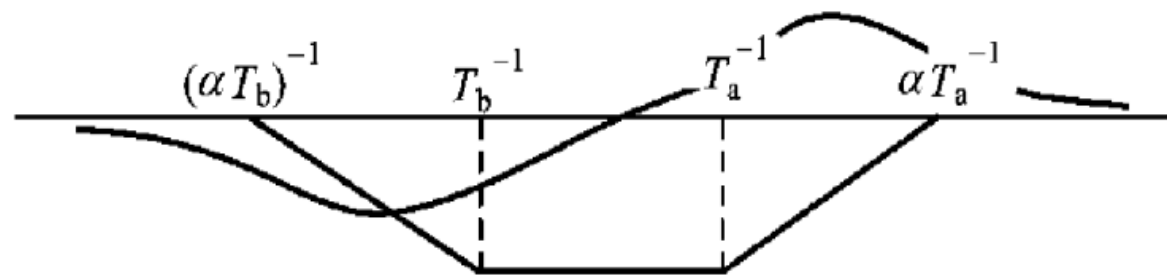


图. 滞后超前校正幅频曲线





# 基本原理

---

以上原理可以详细参考“Quan Quan. Introduction to Multicopter Design and Control. Springer, Singapore, 2017”或者“全权著. 杜光勋, 赵峙尧, 戴训华, 任锦瑞, 邓恒译. 《多旋翼飞行器设计与控制》, 电子工业出版社, 2018.”的第11章。



# 基础实验

---

## □ 实验目标

### ■ 已知

Matlab2016b, 位置控制仿真、调试Simulink模型及相关代码文件e6.1。

### ■ 目标

- (1) 了解通道解耦的作用
- (2) 对系统进行扫频以绘制bode图, 分析其稳定裕度



# 基础实验

## □ 实验步骤

### (1) Simulink仿真：通道解耦

#### 1) 打开Simulink仿真模型。

打开“e6/e6.1/PosControl\_Sim.slx” Simulink文件，如下图。运行同一文件夹下的Init\_control.m文件进行参数初始化。

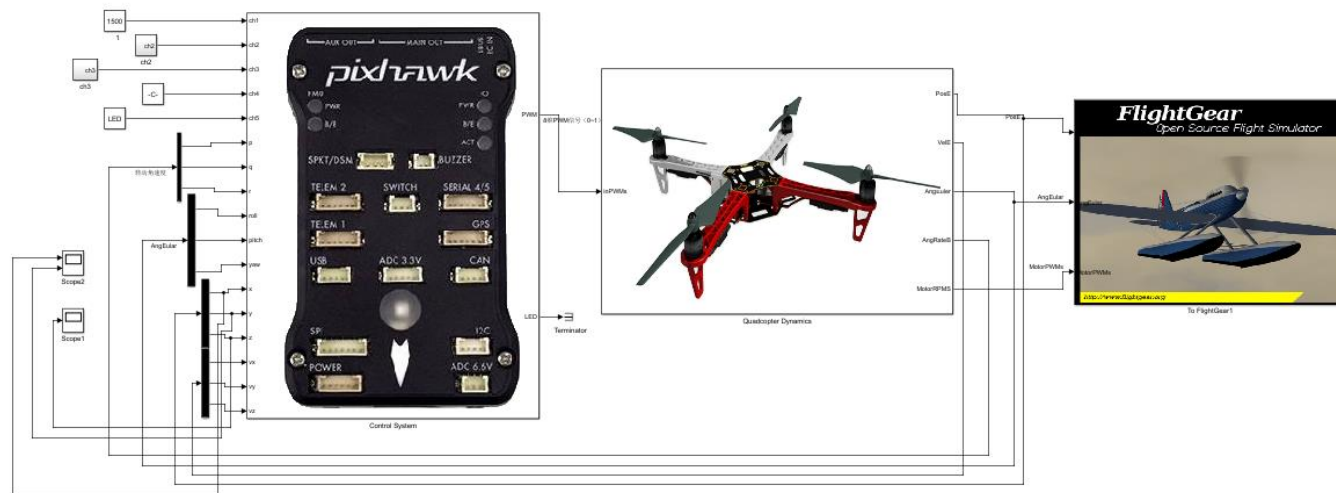


图. 位置控制仿真截图





# 基础实验

## □ 实验步骤

(1) Simulink仿真：通道解耦

2) 开始仿真。

双击文件“FlightGear-Start.bat”

打开FlightGear，然后点击

Simulink“开始仿真”按钮开始仿真。此时可以在FlightGear中观察多旋翼的状态，可以看到无人机先上升到空中，然后向Y轴方向飞行（视野中向右），最后悬停。

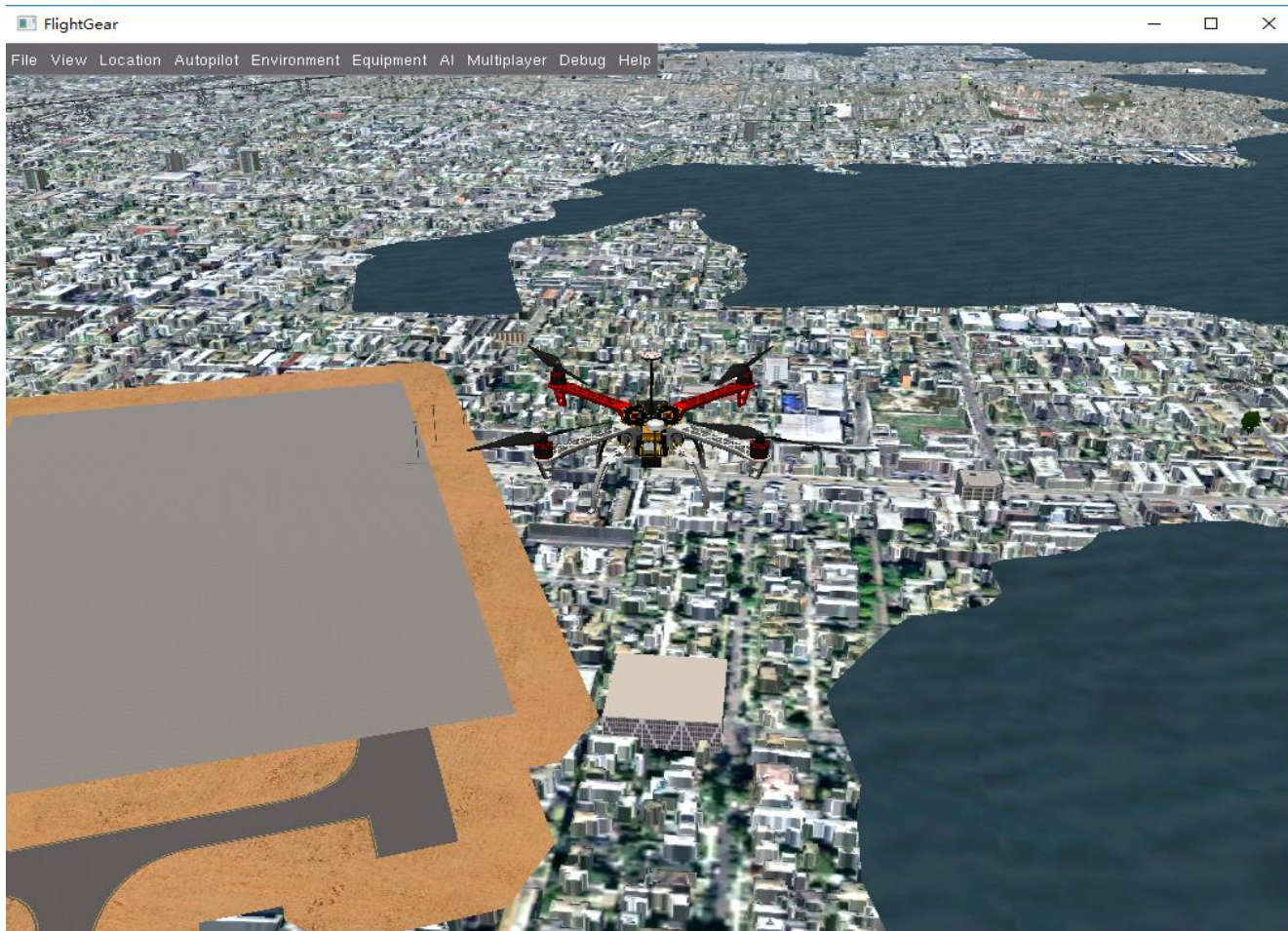


图. FlightGear中的多旋翼





# 基础实验

## □ 实验步骤

### (1) Simulink仿真

### 3) 控制效果

高度状态变化如图所示。多旋翼先上升后保持悬停状态。

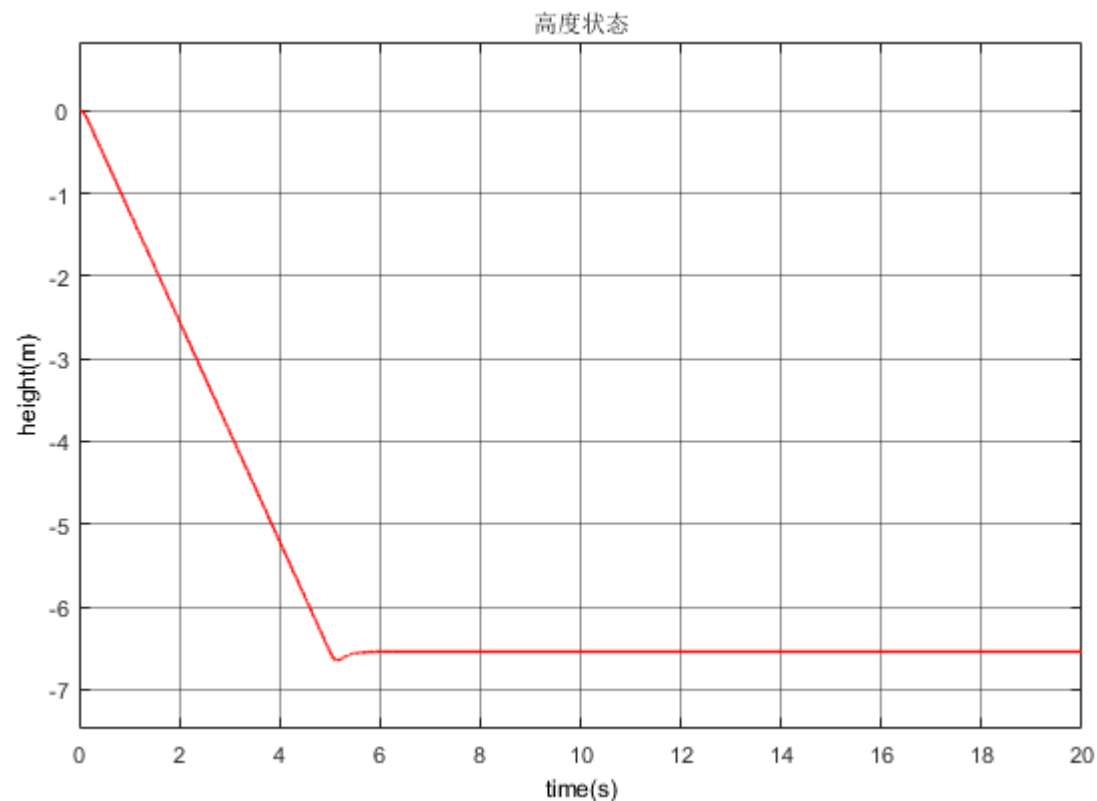


图. 高度状态







# 基础实验

## □ 实验步骤

### (1) Simulink仿真

#### 4) 通道解耦

多旋翼的水平位置如图所示。可以看到只对Y轴位置进行控制不会对X轴的状态产生影响,说明X、Y轴的控制已解耦。

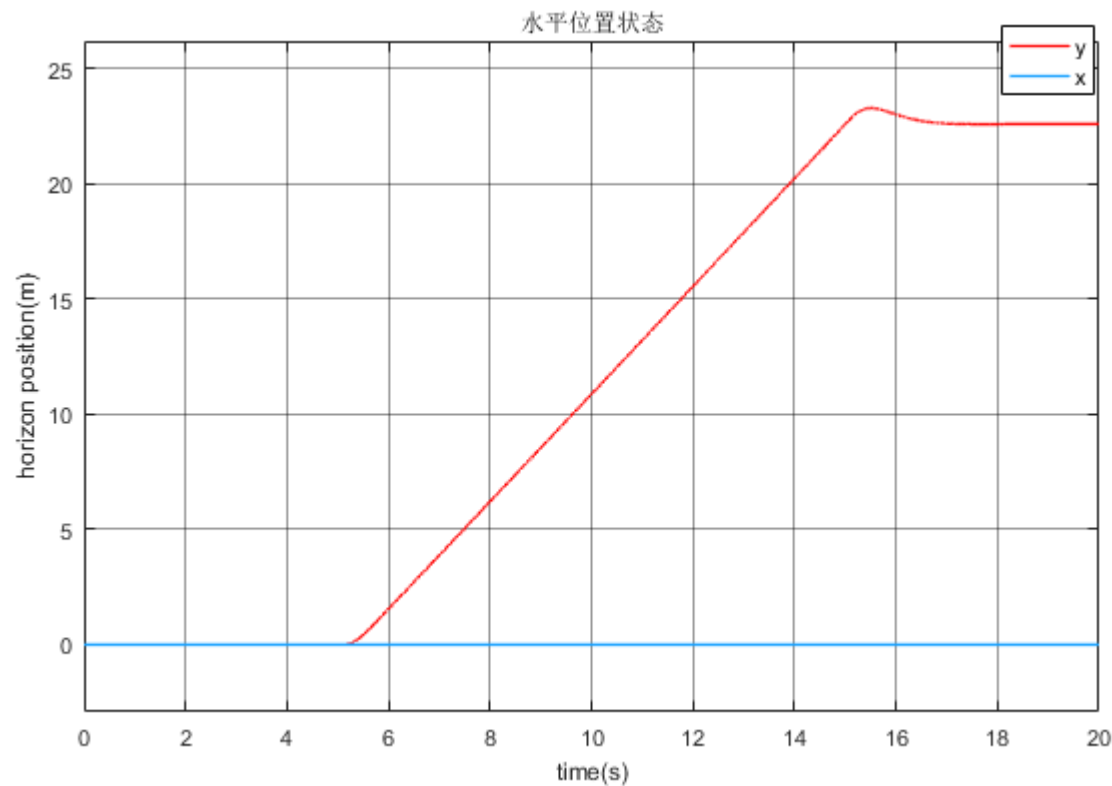


图. 水平位置状态





# 基础实验

## 实验步骤

### (2) Simulink仿真：稳定裕度

#### 1) 打开文件

“e6/e6.1/tune/PosControl\_tune.slx”，运行Init\_control.m文件初始化参数。设定信号输入输出点。打开上述文件的Control System子模块中的position\_control模块，将期望x通道输入线设为Open-loop Input，x通道的实际输出设置为Open-loop Output。

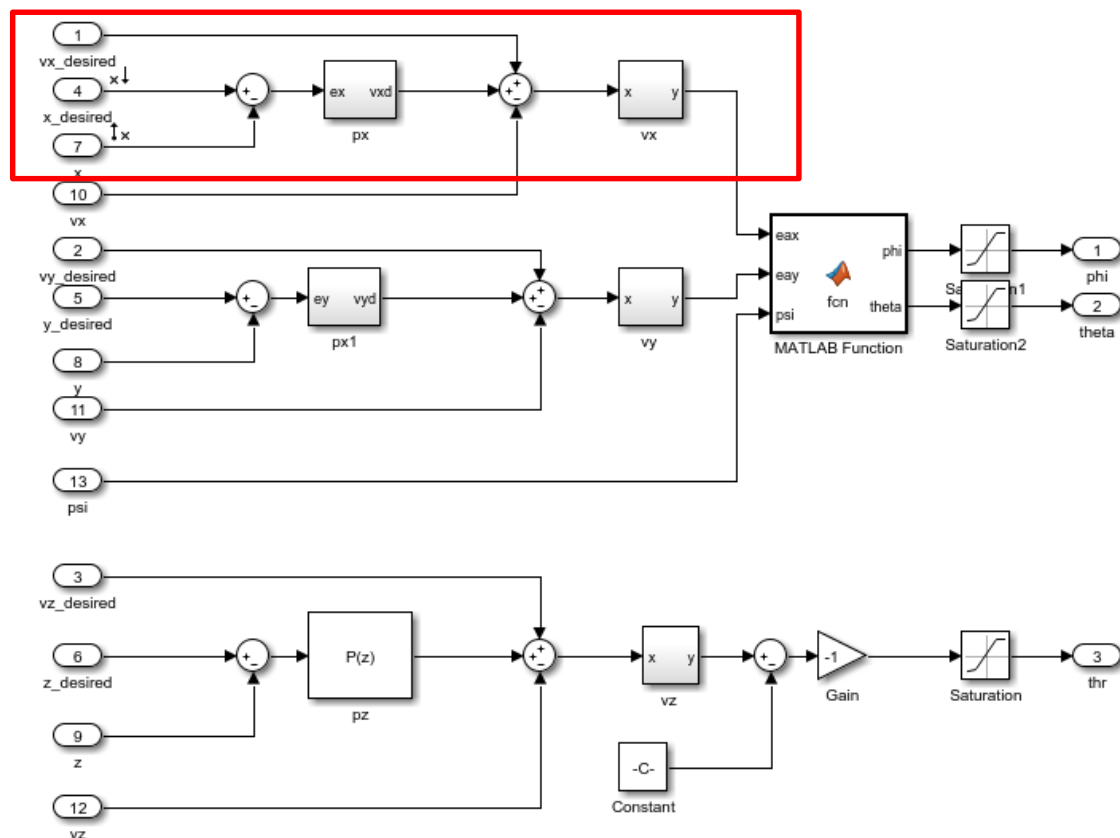


图. 输入输出点设置







# 基础实验

## □ 实验步骤

### (2) Simulink仿真：稳定裕度

2) 选择Simulink上面菜单中的analysis, 在下拉菜单中选择control design, 选择Linear Analysis.

3) 在弹出的窗口中选择LINEAR ANALYSIS, 点击Bode得到Bode图。

4) 在曲线中点击鼠标右键, 选择characteristics->All Stability Margins, 可得到幅值裕度为26dB, 此时的频率为9.17rad/s; 相位裕度为77.9°, 频率为0.994rad/s。

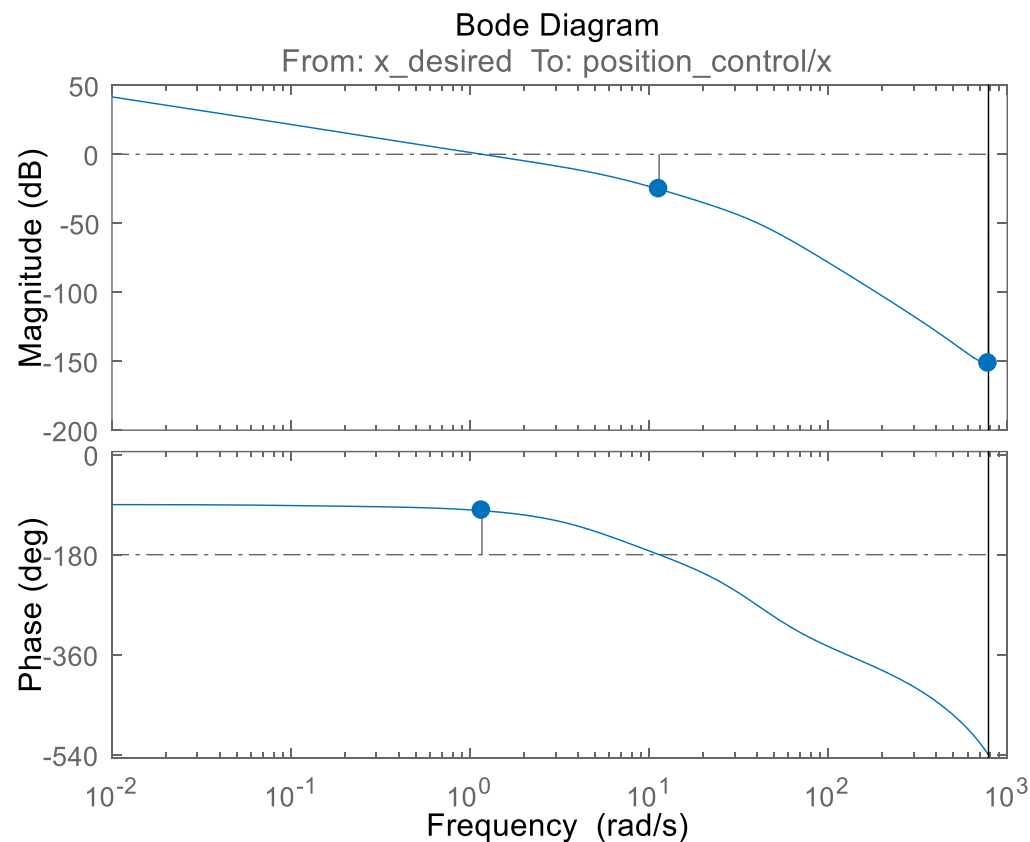


图. x通道控制系统开环Bode图





# 分析实验

---

## □ 实验目标

### ■ 已知

Matlab2016b, 位置控制调试Simulink模型及相关代码文件e6.2。

### ■ 目标

- (1) 观察系统输出曲线, 分析超调量, 调节时间
- (2) 调节PID控制器的相关参数以改善上述两个指标, 试得到一组最优参数
- (3) 对系统进行扫频以绘制bode图, 观察系统幅频响应、相频响应曲线, 分析其稳定裕度。



# 分析实验

## □ 实验步骤

### (1) 模型初始设置

PID参数步骤与姿态控制的参数调试步骤相同。先调试内环速度环，再调试外环的位置环，先调高度再调水平位置。调试文件在” e6/e6.2/tune” 文件夹中。调节参数的初始状态应是飞行器处于高空悬停状态，将初始高度设置为100m, 电机的初始转速设置为557.1420rad/s，这个初始条件对应于飞行器在空中100m处悬停。修改Init\_control.m文件中的对应参数如右：

ModelInit\_PosE=[0,0,-1000];

ModelInit\_VelB=[0,0,0];

ModelInit\_AngEuler=[0,0,0];

ModelInit\_RateB=[0,0,0];

ModelInit\_RPM=557.1420;





# 分析实验

## □ 实验步骤

### (2) 内环参数调节

首先调节内环PID参数。打开

“e6/e6.2/tune/PosControl\_tune.slx” 文件中的Control System子模块中的position\_control模块, 即为位置控制系统模型。将其中x通道的速度期望部分换成阶跃输入, 并将输入输出设置为Stream Selected Signals。

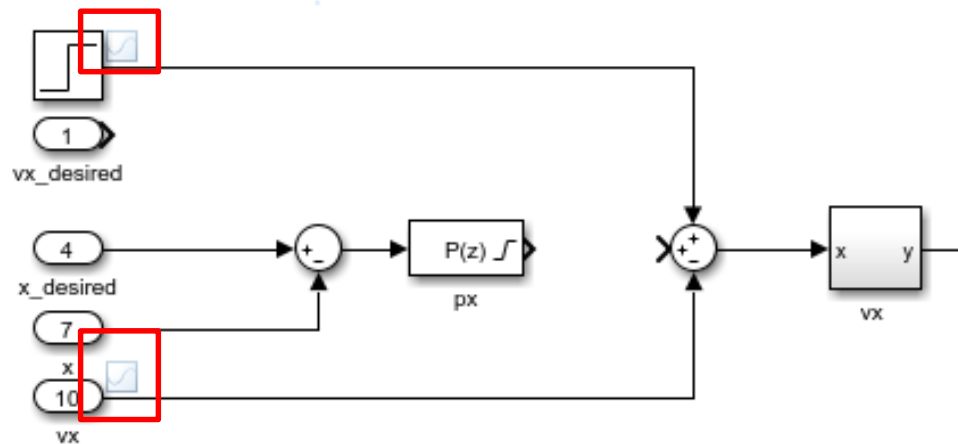


图. 速度环调试模型





# 分析实验

## □ 实验步骤

### (2) 内环参数调节

使用尝试调参法进行调参。在 `Init_control.m` 文件中修改内环PID参数的值。先设定比例项参数，积分和微分参数设为0，运行 `Init_control.m` 文件（以后每次修改文件中的参数都要运行，使参数生效）。点击Simulink的开始仿真按钮，在 `Simulation Data Inspector` 中查看输入输出波形。

由小到大逐渐增大P值，得到阶跃响应曲线如图。

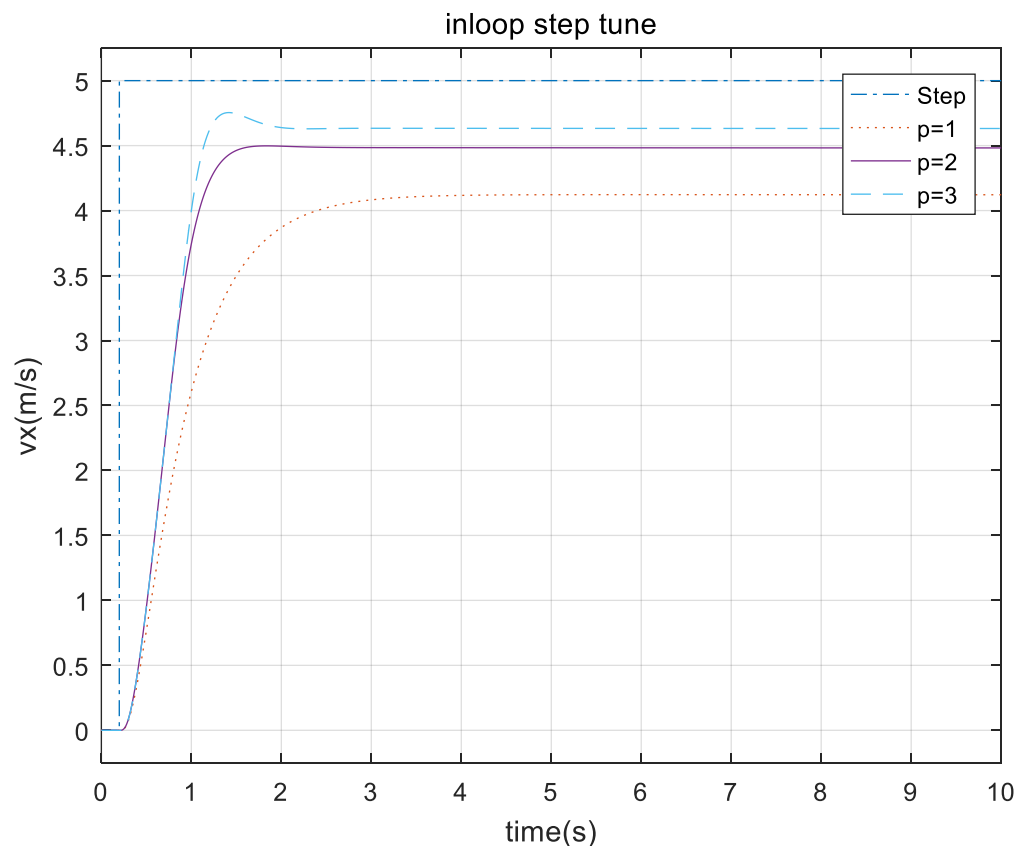


图.  $v_x$ 阶跃响应





# 分析实验

## □ 实验步骤

### (2) 内环参数调节

加入I和D，并且微调P，最终得到的响应曲线如图

$K_{vxp}=2.5;$

$K_{vxi}=0.4;$

$K_{vxd}=0.01;$

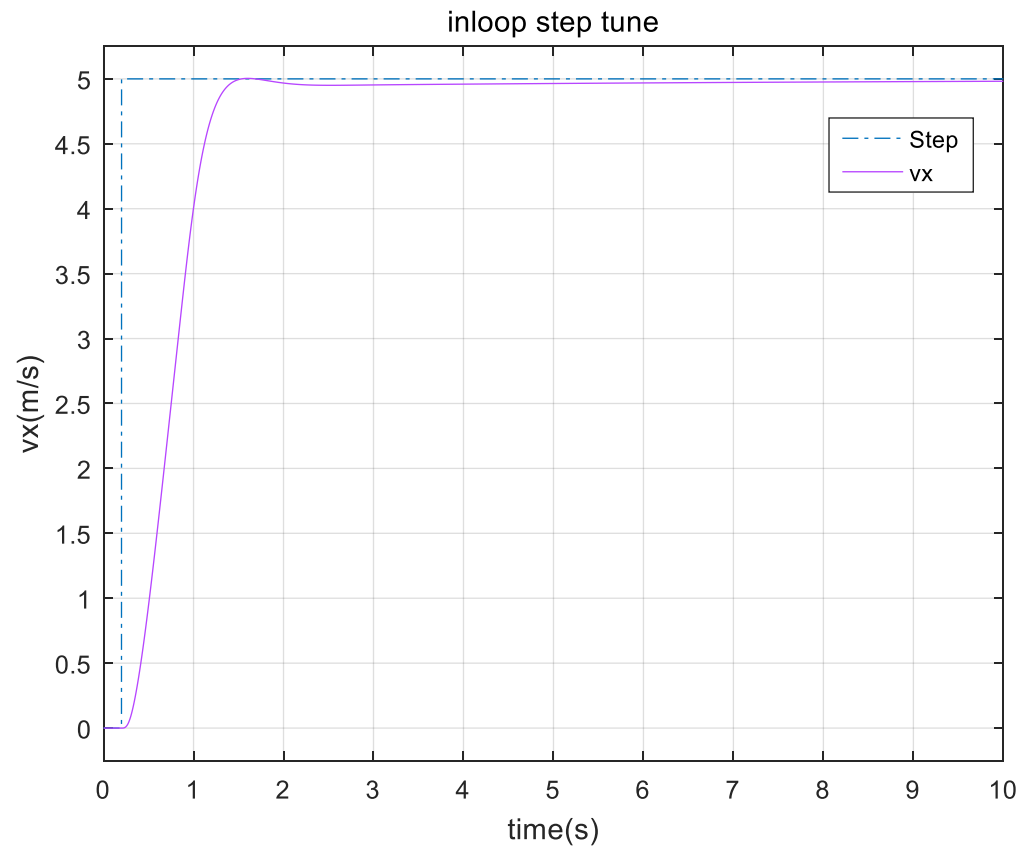


图. vx阶跃响应





# 分析实验

## □ 实验步骤

### (3) 外环参数调节

调节外环参数P。还原对控制系统的修改，在PosControl\_tune.slx文件中，给期望位置加阶跃输入，并将实际位置的输出连到示波器上。

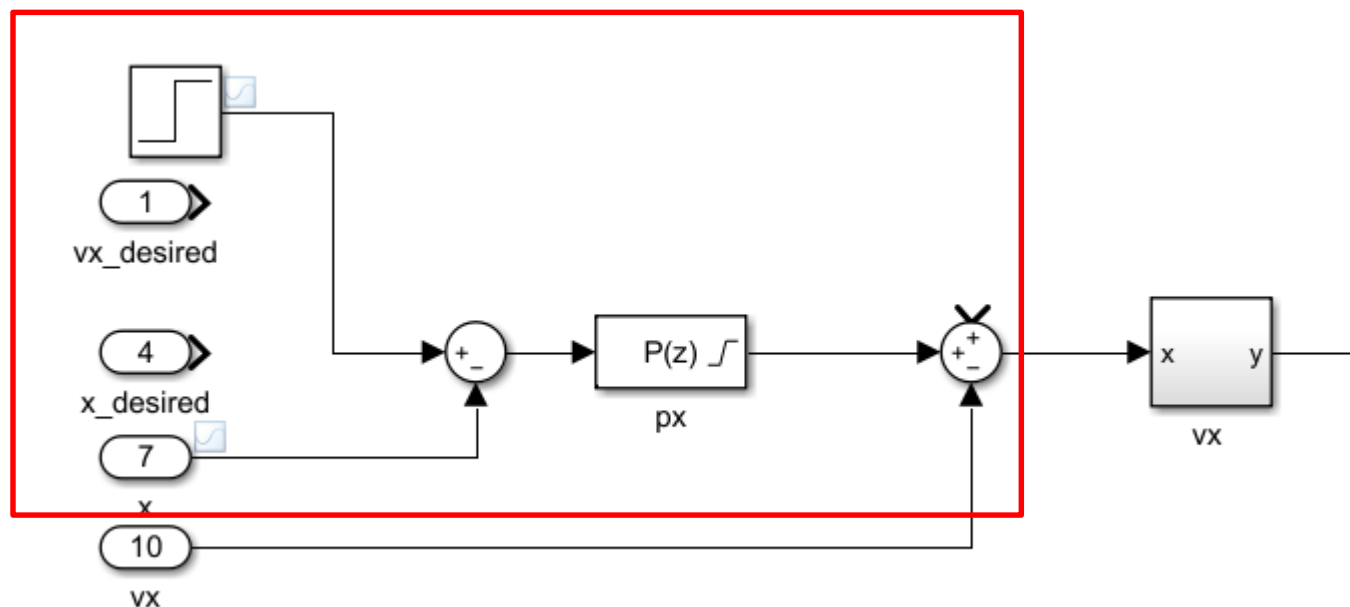


图 位置环调试模型

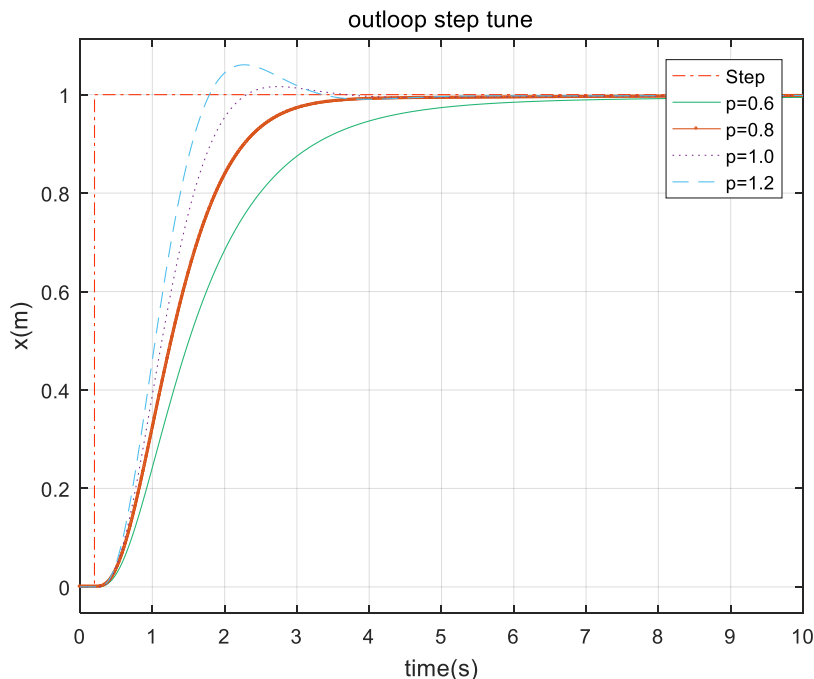


# 分析实验

## □ 实验步骤

### (3) 外环参数调节。

由小增大外环P值，在示波器中观察阶跃响应。得到如下波形如图，再进一步微调P得到最终的响应曲线。



$K_{pxp}=1.0;$   
 $K_{vxp}=2.5;$   
 $K_{vxi}=0.4;$   
 $K_{vxd}=0.01;$

图 x阶跃响应调试

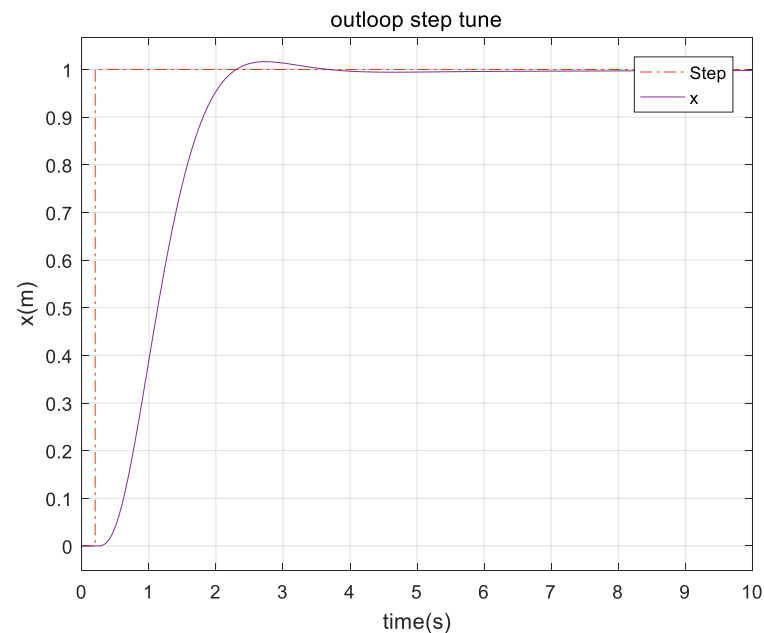


图 x阶跃响应







# 分析实验

## □ 实验步骤

### (4) 扫频得到Bode图

设定信号输入输出点。将期望 $x$ 输入线设为 Open-loop Input,  $x$ 的实际输出设置为 Open-loop Output. 得到Bode图如图。

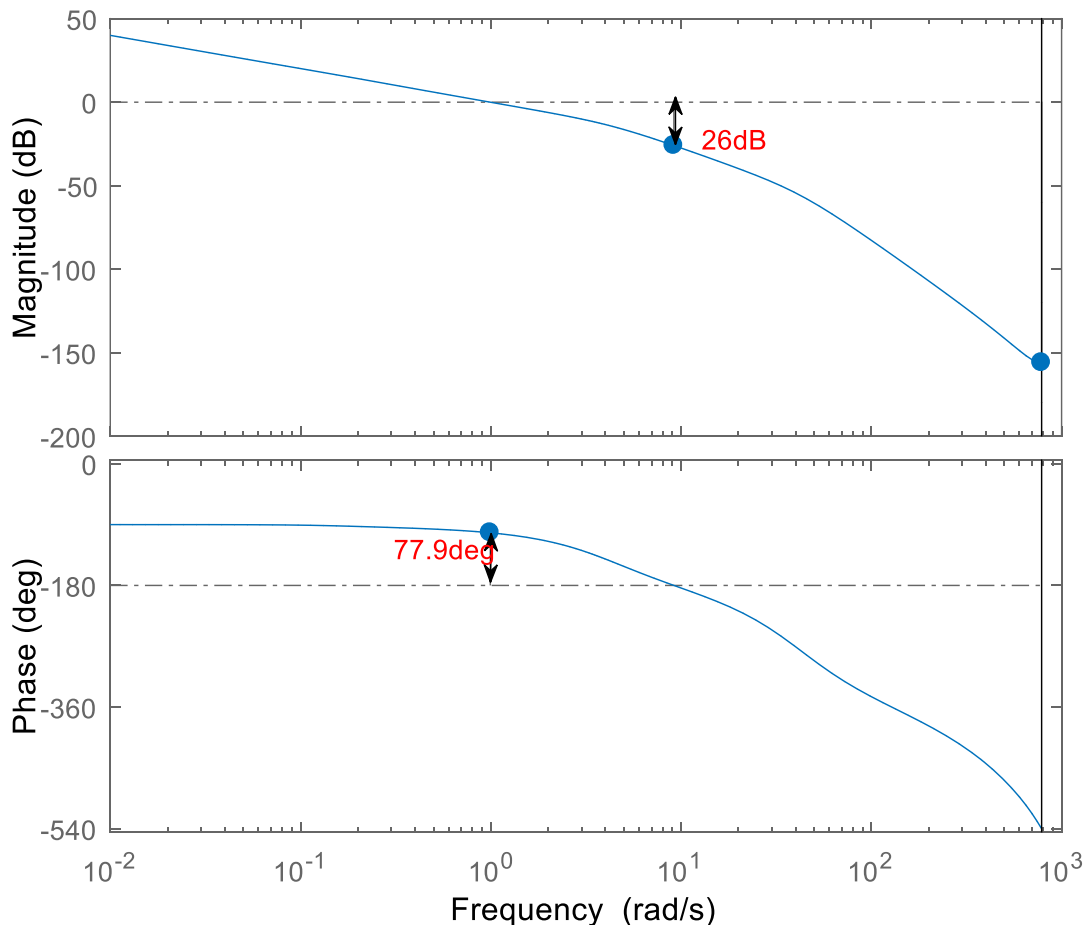


图. X轴位置控制系统开环Bode图





# 分析实验

---

## □ 注意事项

(1) 要正确选取初始条件，不然会导致系统无法线性化，响应为0，也无法得到正确的结果。

(2) 理清系统的输入输出，正确选择输入输出点，测试开环系统时选择输出点类型为Open-loop output，测试闭环时使用Output Measurement，具体介绍可以参考官方文档<https://ww2.mathworks.cn/help/slcontrol/ug/specify-portion-of-model-to-linearize-in-simulink-model.html>。





# 设计实验

---

## □ 实验目标

### ■ 已知

Matlab2016b, 位置控制仿真、调试Simulink模型及相关代码文件e6.3。

### ■ 目标

建立位置控制通道的传递函数模型, 使用Matlab ControlSystemDesigner设计校正控制器, 使得加入校正环节后系统速度控制环阶跃响应稳态误差  $e_{r_{ss}} \leq 0.01$ , 相位裕度  $> 75^\circ$ , 截止频率  $> 2.0 \text{ rad/s}$ 。位置控制环截止频率  $> 1 \text{ rad/s}$ , 相位裕度  $> 60^\circ$ 。





# 设计实验

## □ 实验步骤

### (1) 校正器设计

1) 首先对整体结构进行简化。首先只对一个通道进行分析，这里选择x通道。

简化后的模型如下图。

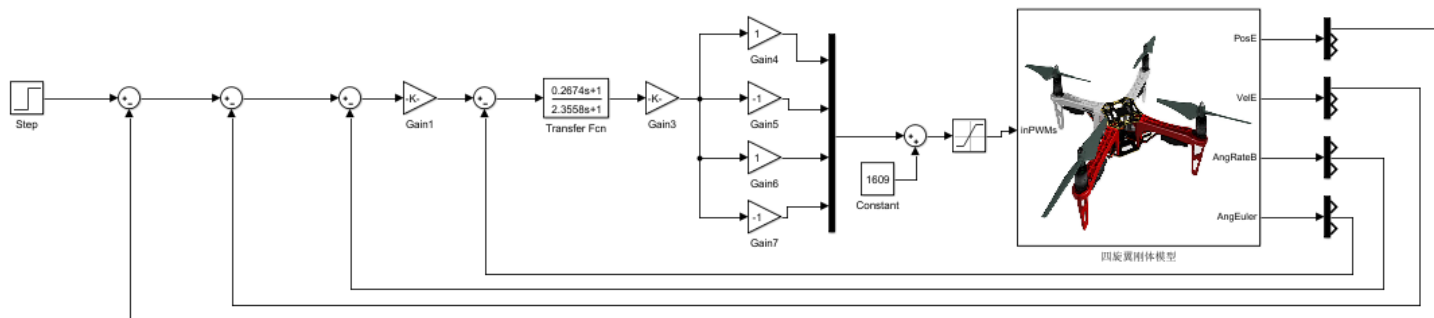


图. X轴位置控制系统简化模型





# 设计实验

## □ 实验步骤

### (1) 校正器设计

2) 速度环分析。输入为期望速度，输出为实际速度。使用Matlab工具箱对模型进行线性化。步骤与生成Bode图相同。设置输入输出点如图所示。

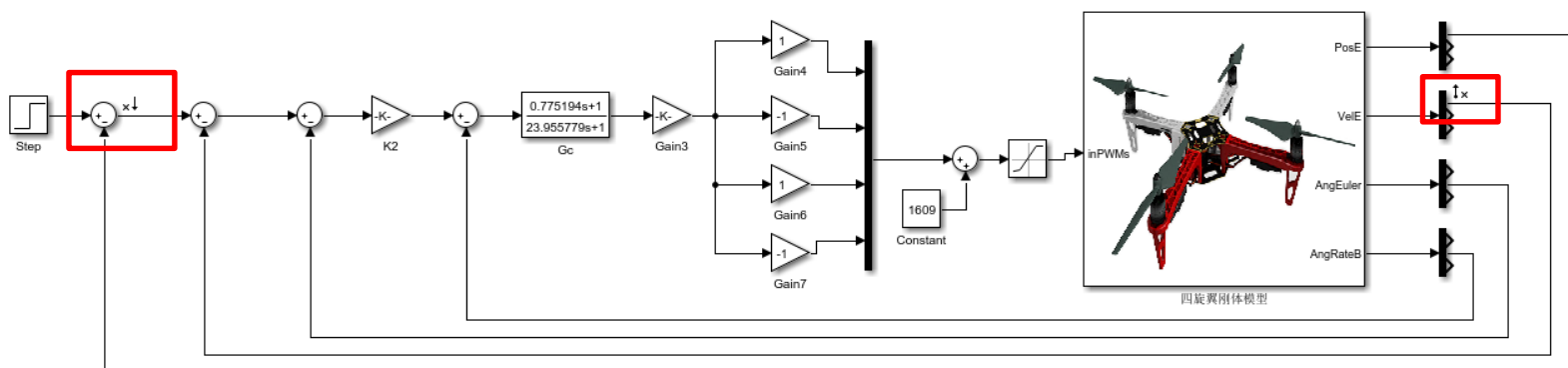


图. 设置输入输出点



# 设计实验

## □ 实验步骤

### (1) 校正器设计

3) 得到X通道的传递函数。生成Bode图后，在左侧Linear Analysis Workspace中会出现linsys1变量，按图示操作即可得到传递函数模型。

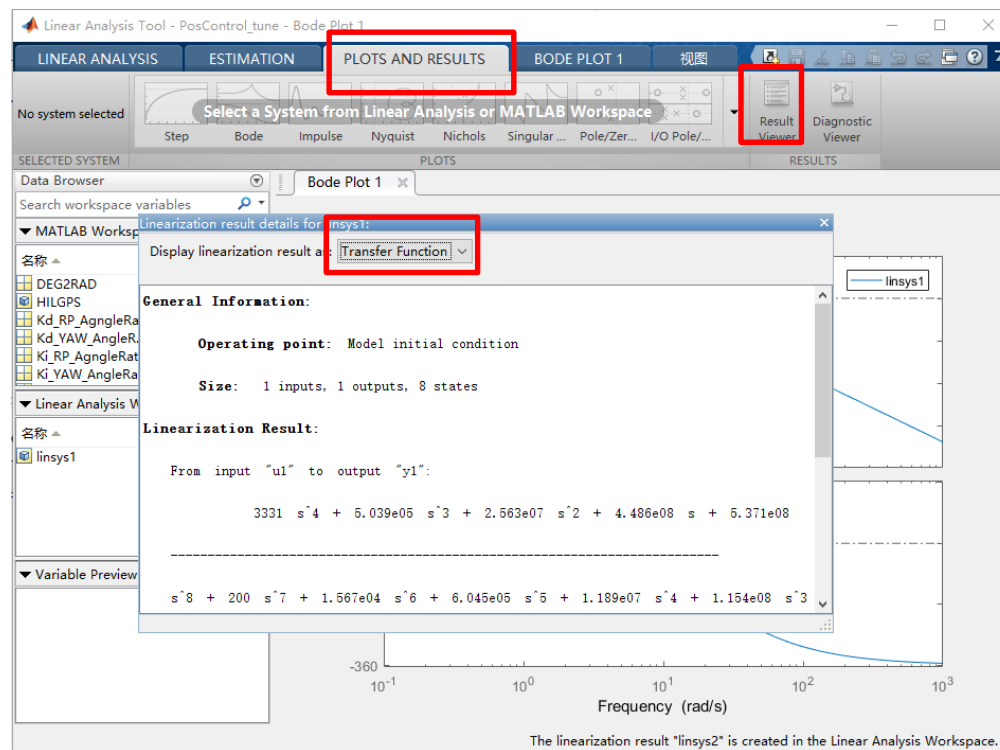


图. 得到传递函数

$$\frac{3330.9(s+1.29)}{(s+5.214e-07)(s+1.253)(s+33.92)(s^2+14.87s+101.1)}$$



$$\frac{3331s^4 + 5.039e05s^3 + 2.563e07s^2 + 4.486e08s + 5.371e08}{s^8 + 200s^7 + 1.567e04s^6 + 6.045e05s^5 + 1.189e07s^4 + 1.154e08s^3 + 5.557e08s^2 + 5.371e08s + 280.1}$$





# 设计实验

## (1) 校正器设计

### 4) 建立环境。

由传递函数建立如下m文件，运行即可使用Matlab 基于Bode图的控制系统设计。

```
1 num=[3331 5.039e05 2.563e07 4.486e08 5.371e08];%分子
2 den=[1 200 1.567e04 6.045e05 1.189e07 ...
3 1.154e08 5.557e08 5.371e08 280.1];%分母
4 G=tf(num,den);%传递函数
5 controlSystemDesigner('bode',G);
```

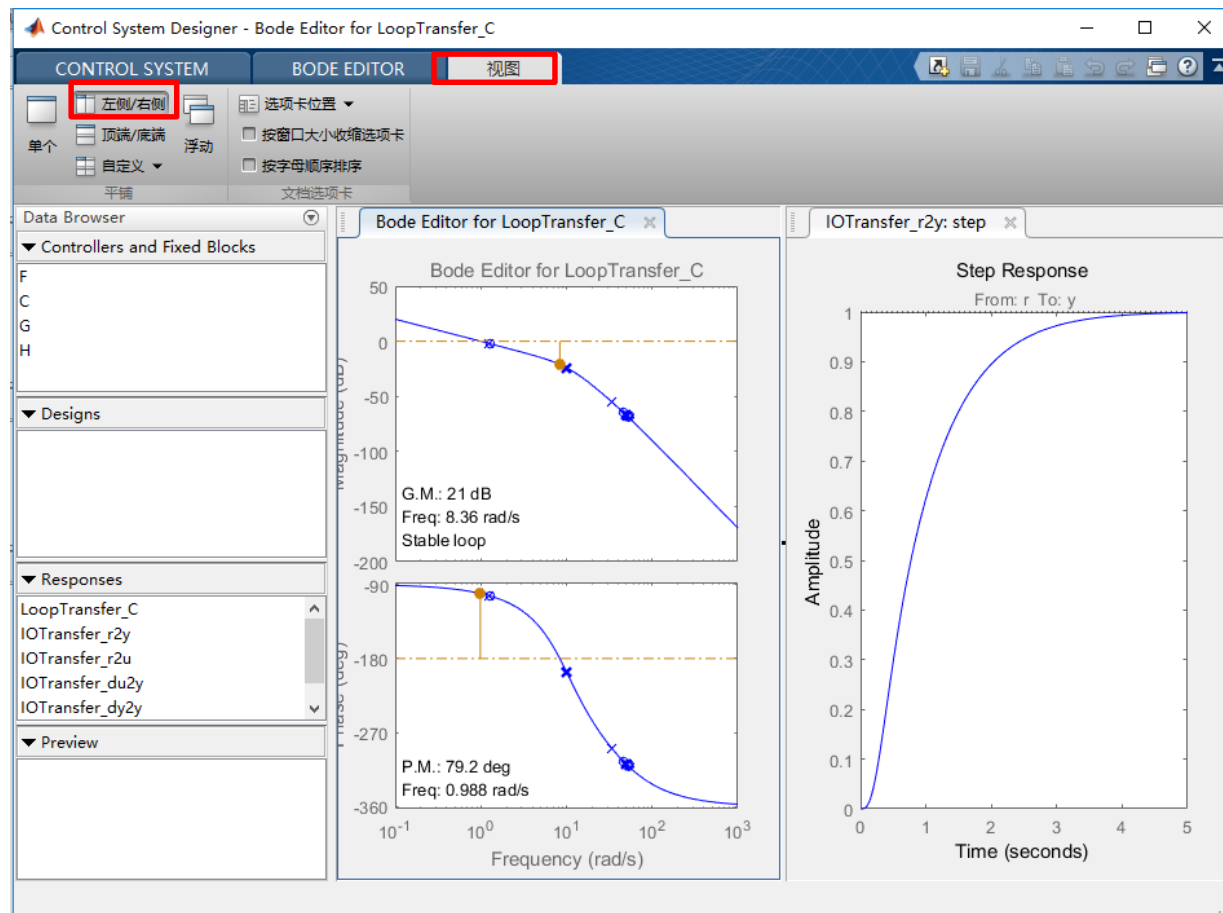


图. 基于Bode图的控制系统设计





# 设计实验

## (1) 校正器设计

### 5) 使用工具箱校正。

响应较慢，向上拖动Bode图曲线增大开环增益。

增益增大，从阶跃响应曲线上看，响应时间变短，但是带来了超调。从Bode图上看，相位裕度为 $50.1^\circ$ ，较小。

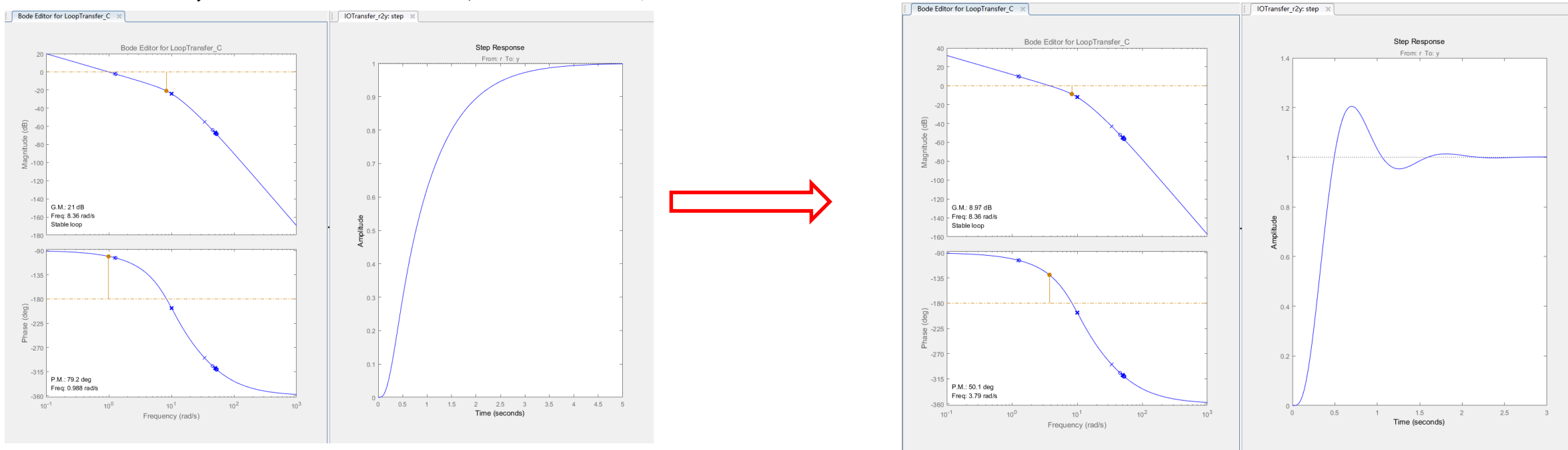


图. 加大增益对Bode图和阶跃响应的影响







# 设计实验

## (1) 校正器设计

### 5) 使用工具箱校正。

增加一个超前校正环节，提高相位裕度，还能进一步提高截止频率，增加响应速度。

在Bode图中右键->add Pole/Zero->Lead

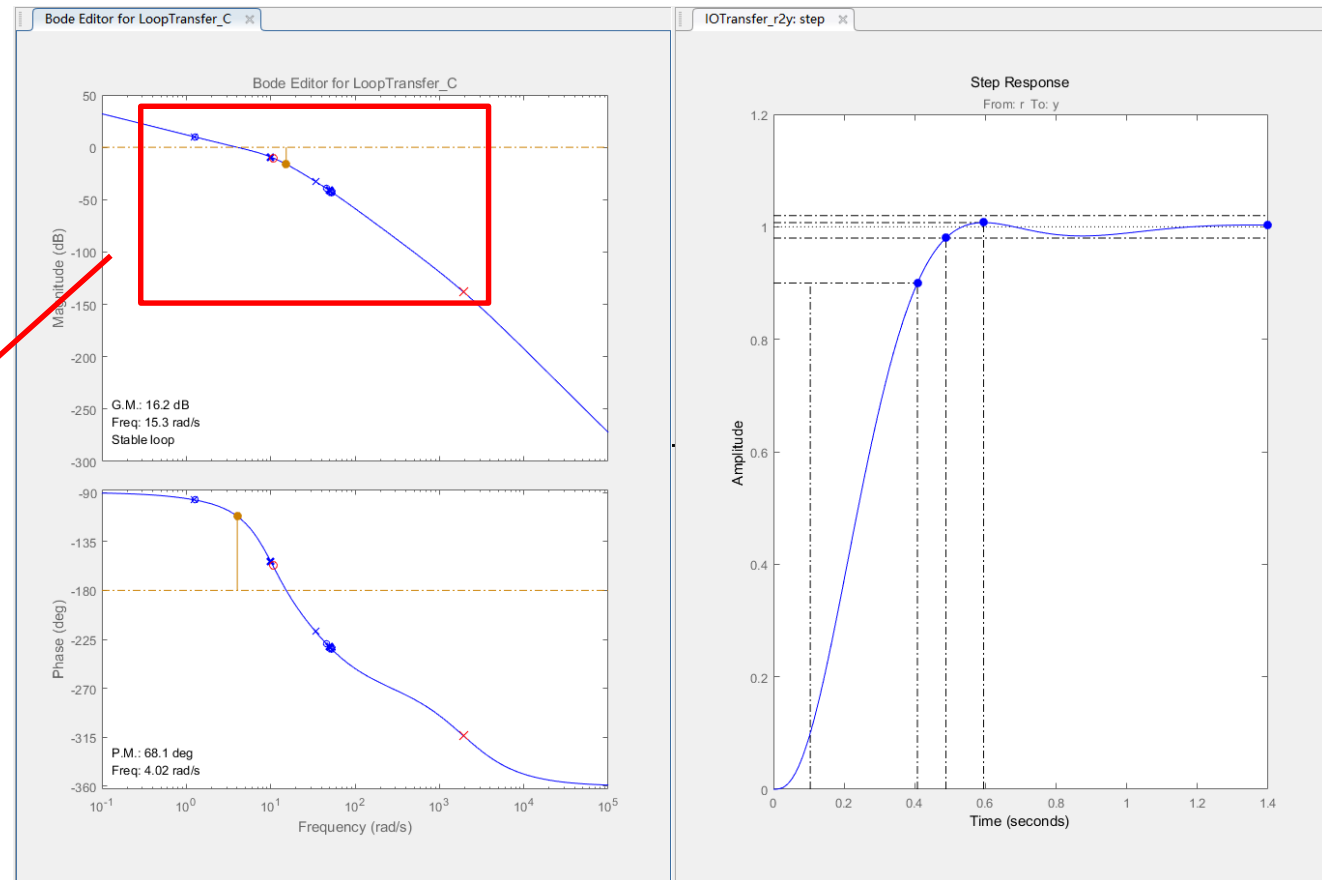
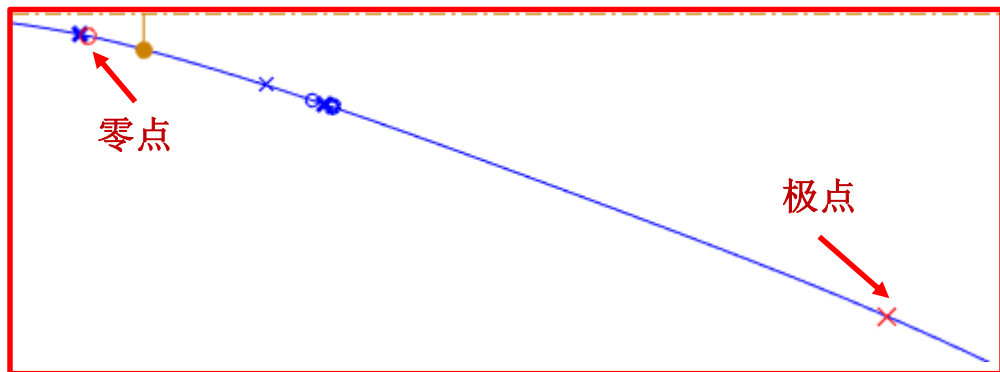


图. 加入超前环节





# 设计实验

## (1) 校正器设计

### 5) 使用工具箱校正。

增加一个超前校正环节，提高相位裕度，还能进一步提高截止频率，增加响应速度。在Bode图中右键->Edit

Compensator 查看最终的得到的校正器

$$G_c = \frac{4.0741(1 + 0.094s)}{1 + 0.01s}$$

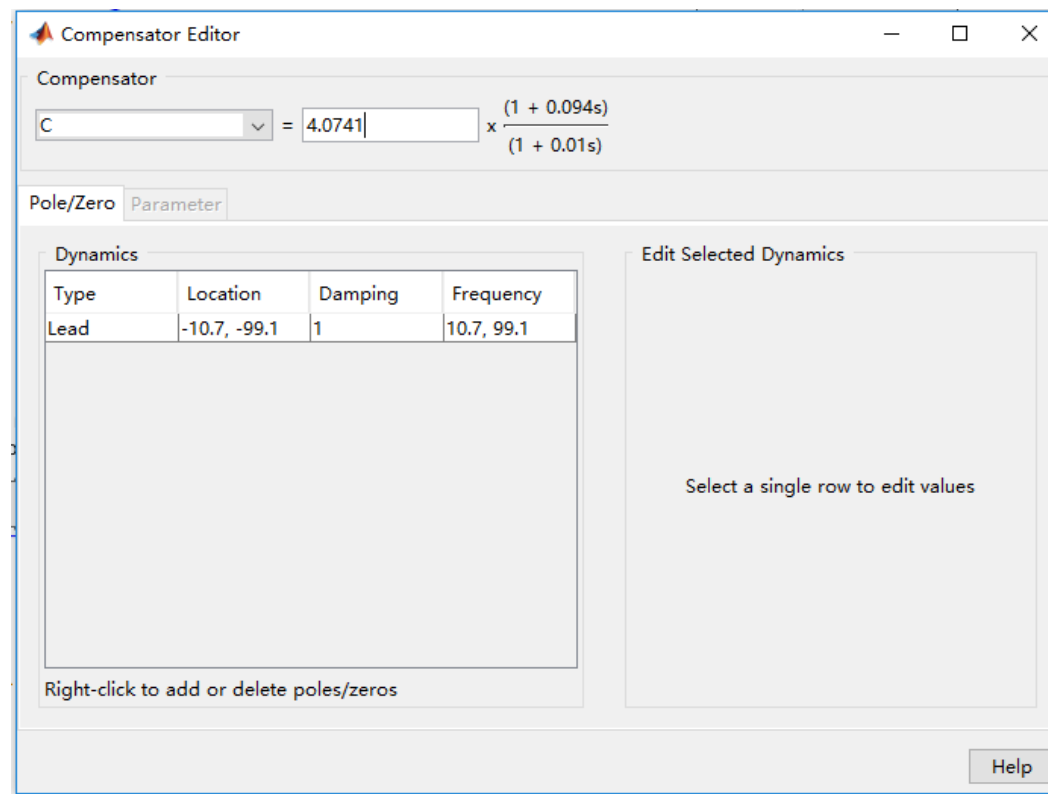


图. 得到校正传递函数



# 设计实验

## (1) 校正器设计

6) 对X通道位置环进行校正。

加入速度的校正器，得到位置环的Bode图：

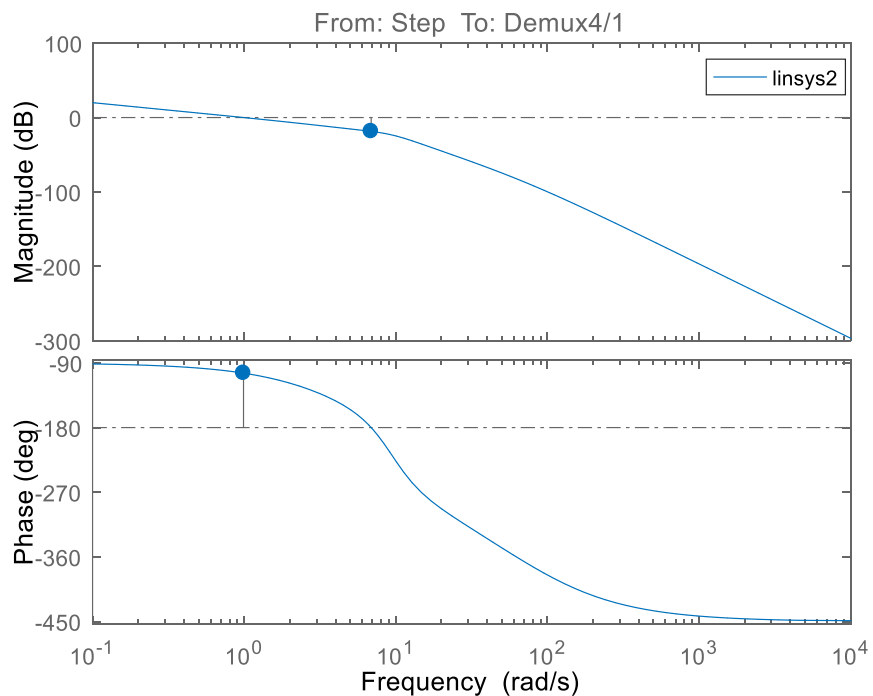


图. 位置环Bode图

相位裕度 $75.8^\circ$ ，截止频率0.99. 基本满足要求。

可略微增加增益



## 5. 总结

---

- (1) 以多旋翼的位置模型为依据，建立了常见的PID控制方法，并在Matlab的Simulink中完成位置控制器的设计，并在FlightGear中显示仿真效果。
- (2) 使用Simulink生成嵌入式代码下载到Pixhawk飞控中，配合3D Display软件模拟真实的飞行效果。
- (3) 调节PID控制器的参数，尝试得到最优的参数，并使用Matlab系统分析工具得到整个开环系统的Bode图，查看系统的稳定裕度和幅值裕度。
- (4) 使用自动控制原理中的系统校正方法对多旋翼系统进行校正，设计了超前和滞后超前环节分别对位置环和速度环实施控制，并达到设计指标。完成设计后，连接硬件进行在环仿真验证了设计的效果。





---

# 谢谢！



北航可靠飞行控制研究组  
BUAA Reliable Flight Control Group