

1. 实验名称及目的

跟踪控制器设计实验 (分析实验): 给定幅值为 1、响应时间为仿真第 5s 的阶跃信号, 观察仿真模型的各通道稳态误差、超调量和调节时间。根据所获得的结果, 使用频率域方法设计控制器, 满足如下性能要求。

- 1) 速度控制环, 相位裕度 $>65^\circ$, 截止频率 $> 3\text{rad/s}$;
- 2) 位置控制环, 相位裕度 $>60^\circ$, 截止频率 $> 2\text{rad/s}$ 。

系统具有较好的系统带宽, 分析系统带宽对跟踪效果的影响, 并使用设计好的校正控制器进行仿真对照。

进一步, 将设计好的控制器应用到仿真 2.0, 即非线性系统模型实验。

2. 实验原理

带有半自主自驾仪的多旋翼控制结构如图 6.1 所示。遥控指令能直接控制多旋翼的以下状态变量: 多旋翼的姿态角 θ 和 ϕ (或者多旋翼在机体坐标系下的速度 v_{x_b} 和 v_{y_b})、姿态角速度 ω_{ϕ} , 以及拉力的大小 u_T (或者垂直速度 v_{z_c})。进一步, 可以通过这些变量控制多旋翼的位置 $(p_{x_c}, p_{y_c}, p_{z_c})$ 以及偏航角 ψ 。真实情况下的多旋翼模型为非线性化的模型, 为了便于理解和设计控制器, 可以利用线性化的方法对多旋翼的非线性模型进行简化处理。也就是说, 如图 6.1 所示的系统可以分成三个通道, 分别为从 u_T 到 p_{z_c} 的高度通道、从 u_{ω_z} 到 ψ 的偏航通道以及从 \mathbf{u}_h 到 \mathbf{p}_h 的水平位置通道, 其中 $\mathbf{u}_h = [u_\phi \ u_\theta]^T$, $\mathbf{p}_h = [p_{x_c} \ p_{y_c}]^T$ 。在半自主自驾仪的控制下, 这些通道的模型表示如下。

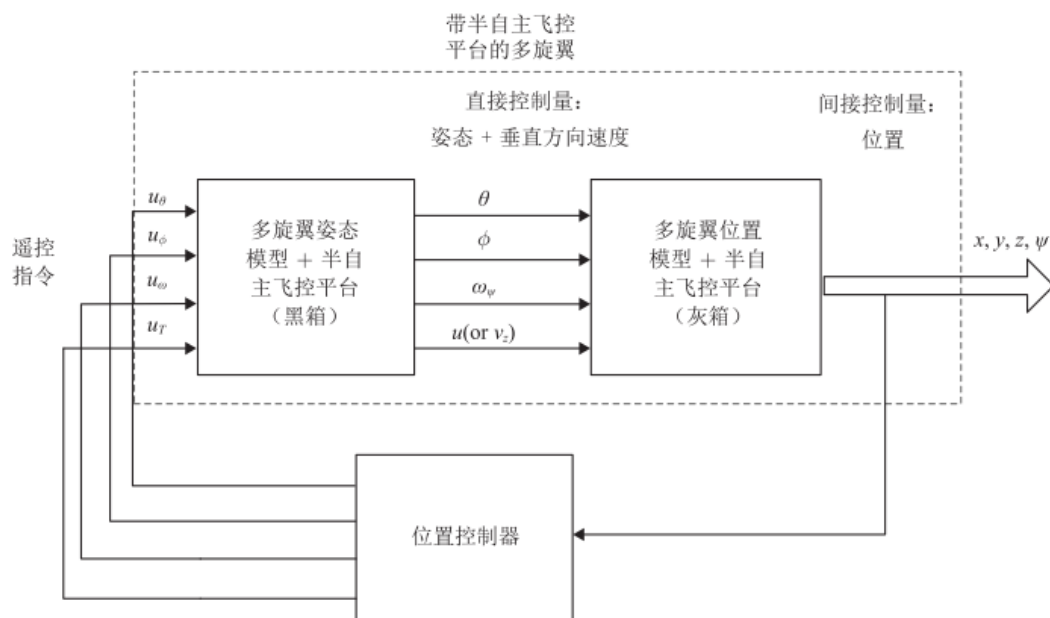


图 6.1 带有半自主自驾仪的多旋翼控制结构

当今的闭环自动控制技术都是基于反馈的概念以减少不确定性。反馈理论的要素包括三个部分: 测量、比较和执行。测量得到的是被控变量的实际值, 将其与期望值相比较, 用两者的偏差来校正系统的响应。在工程实际中, 应用最为广泛的调节器为比例、积分、微分控制,

简称 PID 控制。

比例控制（P）是一种最简单的控制方式，其输出与输入误差信号呈比例关系。仅用比例控制，根据负载的变动及设备的固有特性不同，结果可能会出现不同的稳态误差。

积分控制（I），就是在出现稳态误差时自动改变控制器输出量，以消除稳态误差。当系统存在误差时，进行积分控制，根据积分时间的大小，控制器的输出会相应的变化减小误差。只要误差还存在，就会不断进行调整。

微分控制（D）的功能是通过误差的变化率预报误差信号的未来变化趋势。通过提供超前控制作用，微分控制能使被控过程趋于稳定。因此，它经常用来抵消积分控制以及比例控制产生的不稳定趋势。

1) 高度通道

高度通道的 PID 控制器可以设计为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_T(t) = & -k_{p_zp}(\mathbf{p}_{ze}(t) - p_{zed}(t)) - k_{p_zd}(\dot{\mathbf{p}}_{ze}(t) - \dot{\mathbf{p}}_{zed}(t)) \\ & - k_{p_zi} \int_0^t (\mathbf{p}_{ze}(\tau) - p_{zed}(\tau)) d\tau \end{aligned} \quad (6.4)$$

其中， $p_{zed} \in \mathbb{R}$ 为期望的高度， $k_{p_zp}, k_{p_zd}, k_{p_zi} \in \mathbb{R}$ 需要调节。

2) 偏航通道

偏航通道的 PID 控制器可以设计为

$$\mathbf{u}_{\omega_z}(t) = -k_{\psi p}(\psi(t) - \psi_d(t)) - k_{\psi d}(\dot{\omega}_z(t) - \dot{\psi}_d(t)) - k_{\psi i} \int_0^t (\psi(\tau) - \psi_d(\tau)) d\tau \quad (6.5)$$

其中， $\psi_d \in \mathbb{R}$ 为期望的偏航角， $k_{\psi p}, k_{\psi d}, k_{\psi i} \in \mathbb{R}$ 需要调节。

3) 水平通道

水平通道的 PID 控制器可以设计为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_h(t) = & -\mathbf{K}_{hp} \mathbf{R}_{\psi}^{-1}(\mathbf{p}_h(t) - \mathbf{p}_{hd}(t)) \\ & - \mathbf{K}_{hd} \mathbf{R}_{\psi}^{-1}(\dot{\mathbf{p}}_h(t) - \dot{\mathbf{p}}_{hd}(t)) - \mathbf{K}_{hi} \int_0^t \mathbf{R}_{\psi}^{-1}(\mathbf{p}_h(\tau) - \mathbf{p}_{hd}(\tau)) d\tau \end{aligned} \quad (6.6)$$

其中， $\mathbf{K}_{hp}, \mathbf{K}_{hd}, \mathbf{K}_{hi} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ 需要调节。

3. 实验效果

通过 simulink 显示位置以及速度控制换的 Bode 图。

4. 文件目录

文件夹/文件名称		说明
Sim1.0	Save_Cercle.m	保存数据文件
	N4_Step1_cercle_comparaison_T10tf.mat	圆轨迹输入输出融合数据文件
	e3_2_TF_TrajectoireFollowing_fc_2017b.sl x	多旋翼轨迹控制器仿真 1.0 文件
	startSimulation.m	初始化参数文件

sim2.0	N4_Step1_cercle_comparaison_T10.mat	圆轨迹输入输出融合数据文件
	N4_Step1_cercle_comparaison_T10tf.mat	圆轨迹输入输出融合数据文件
	Save_Cercle.m	保存数据文件
	e3_2_Model_TrajectoireFollowing_FC_2017b.slx	多旋翼轨迹控制器仿真 2.0 文件
	startSimulation.m	初始化参数文件

5. 运行环境

序号	软件要求	硬件要求	
		名称	数量
1	Windows 10 及以上版本	笔记本/台式电脑 ^①	1
2	RflySim 平台免费版		
3	MATLAB 2017B 及以上版本		

①：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com>

6. 仿真 1.0(sim1.0)实验步骤

Step 1:

打开本章所附带文件夹中的“e3\3.2\sim1.0”文件夹，打开“e3\3.2\sim1.0\startSimulation.m”文件，并单击“运行”按钮，初始化参数。

Step 2:

打开 Simulink 文件“e3\3.2\sim1.0\3_2_TF_TrajectoireFollowing_fc_2017b.slx”，整体模块如图 6.18 所示。

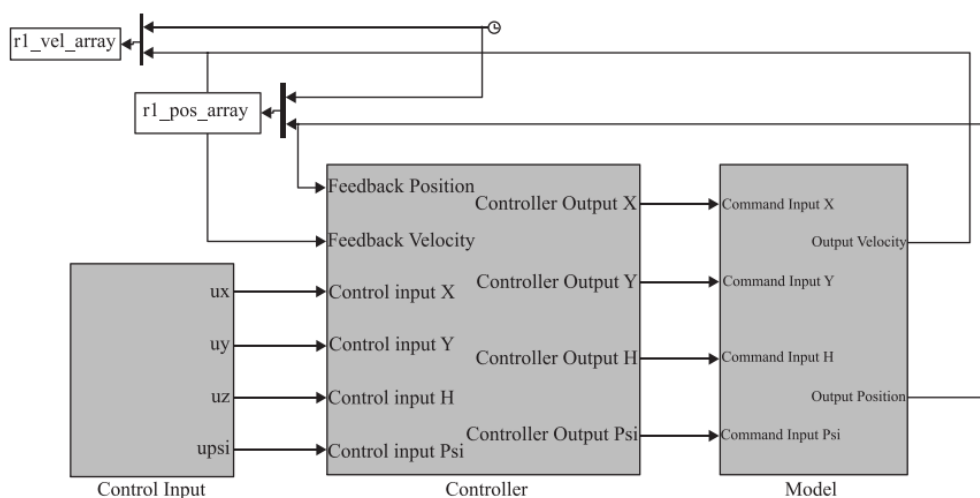


图 6.18 模块整体示意图，Simulink 模型详见“e3_2_TF_TrajectoryFollowing_Segment.slx”

(1) 输入点设置:选中信号线,单击鼠标右键,选择“Linear Analysis Points” - “Open-lo

op Input”。

(2) 输出点设置:与输入点设置步骤相同,最后选择“Open-loop Output”,如图 6.19 所示。设置好的输入点和输出点如图 6.20 所示。

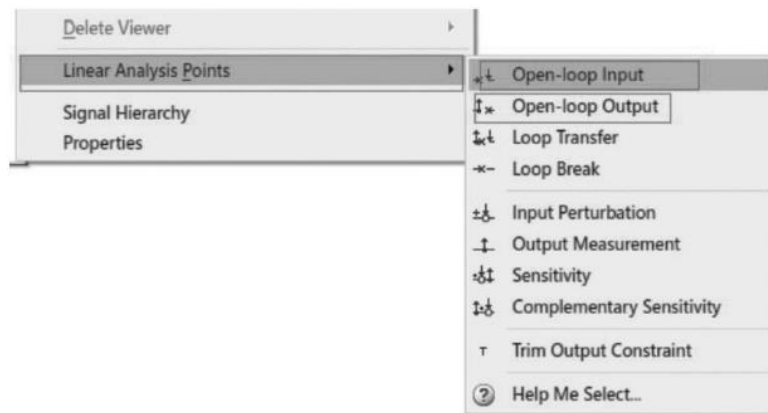


图 6.19 设计扫频输入点和输出点示意图

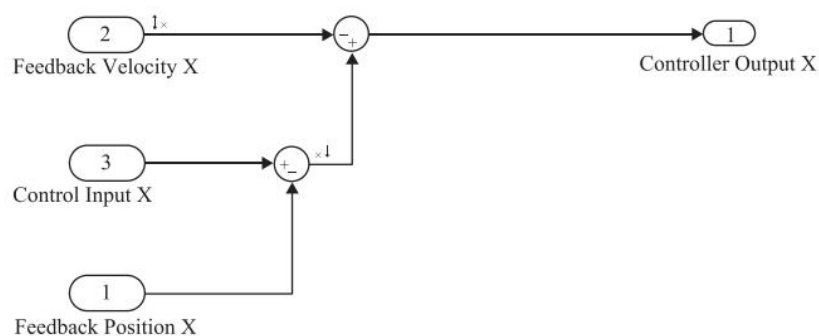


图 6.20 设置好的输入点和输出点

(3) 得到 Bode 图:选择 Simulink 上面菜单中的“Analysis”-“Control Design”-“Linear Analysis”,如图 6.21 所示。在弹出的窗口中选择“LINEAR ANALYSIS”,单击“Bode”,即可得到 Bode 图。右键单击曲线,选择“Characteristic”-“All Stability Margins”,可以看到截止频率、幅值裕度和相角裕度等。得到的速度环 Bode 图如图 6.22 所示,可以看到相角裕度为 81.6° ,截止频率为 1.33rad ,不符合要求。

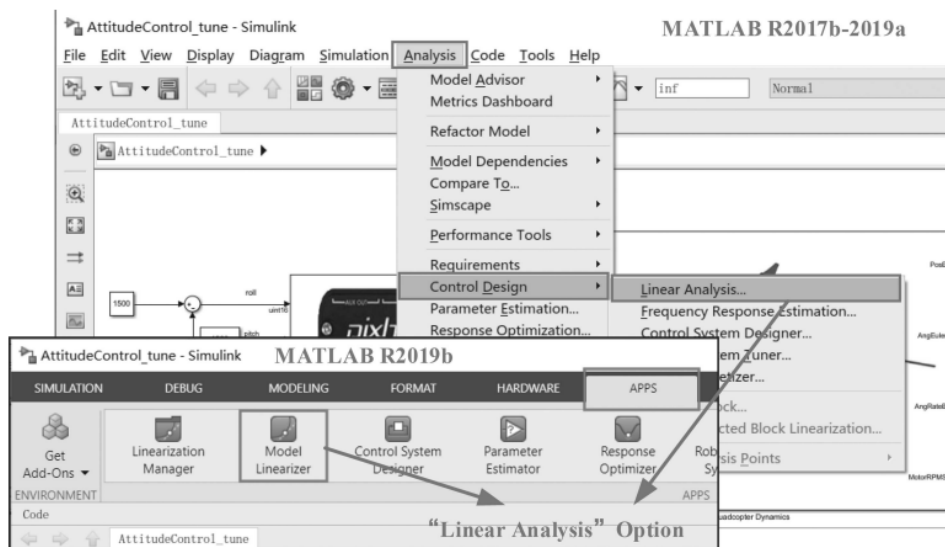


图 6.21 “Linear Analysis” 菜单路径

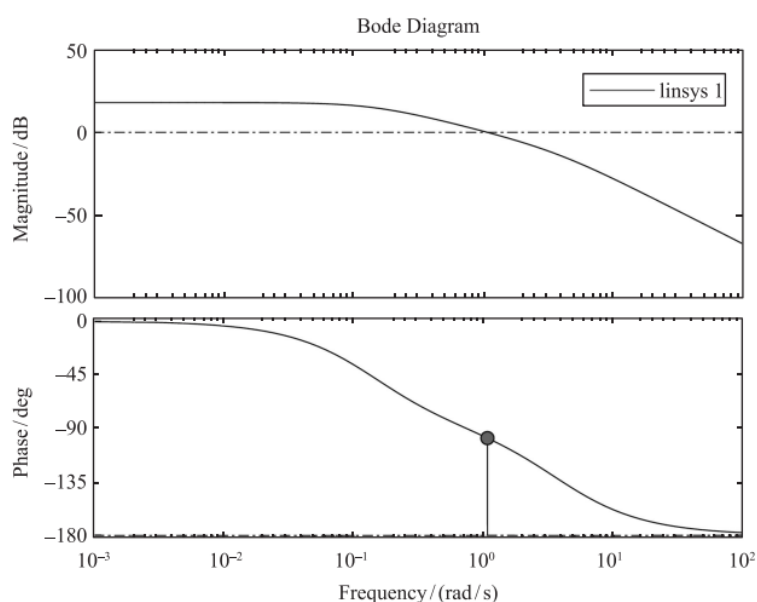


图 6.22 未加校正水平前向通道 Bode 图

Step 3:

生成 Bode 图后，在左侧 “Linear Analysis Workspace” 中会出现 “Linsys1” 变量。如图 6.23 所示，进行操作后即可得到传递函数模型：

$$G(s) = \frac{4.2003}{(s + 3.75)(s + 0.1412)}$$

整理得

$$G(s) = \frac{7.554}{(0.267s + 1)(7.082s + 1)}$$

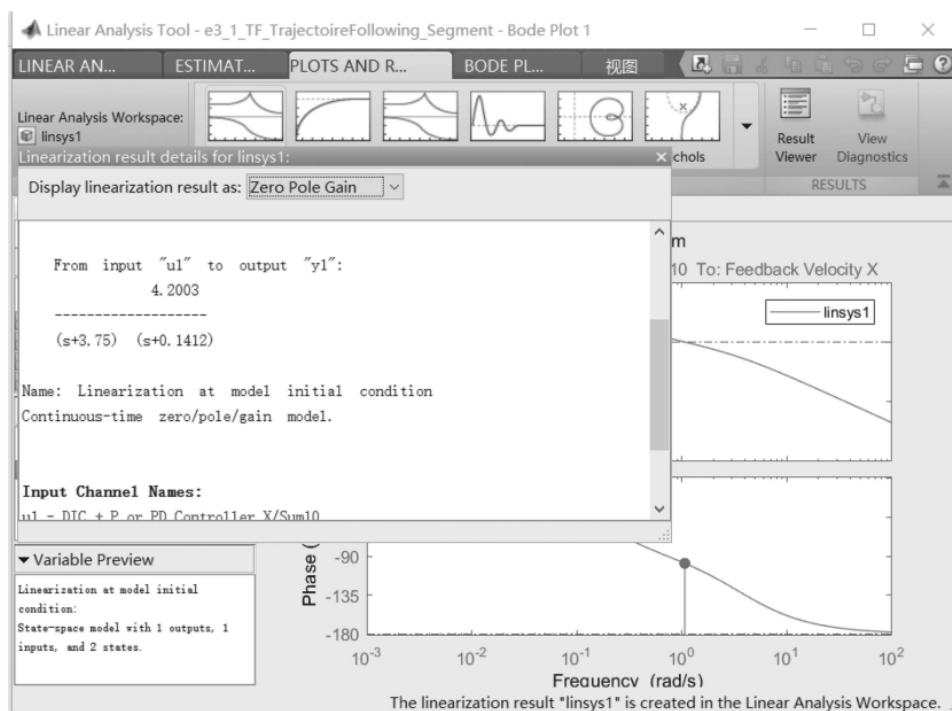


图 6.23 传递函数界面

Step 4:

首先根据稳态误差调整开环增益。由传递函数可知，未加校正时，系统在阶跃作用下无稳态误差，无须更改开环增益。

Step 5:

由前述可知，系统的相角裕度是符合要求的，但截止频率太小，动态响应的快速性不够。增大开环增益 K ，截止频率增加但相角裕度又不符合要求。考虑使用超前校正，在增加截止频率的同时使系统具有足够的相角裕度。选取截止频率 $\omega_c = 3\text{rad/s}$ ，由图 6.22 可知，此处幅值响应为 -10.8dB ，根据超前校正环节幅频特性得到

$$10\lg a + 20\lg |G(j\omega_c)| = 0$$

进而得到 $a=12.023$ 。为了使最大超前相位角 ϕ_m 落在截止频率 $\omega_c=3\text{rad/s}$ 处，令 $\omega_m = \omega_c$ ，这时有

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

即 $T=0.096\text{s}$ 。从而我们得到超前校正环节为

$$G_c(s) = \frac{1 + aTs}{1 + Ts} = \frac{1.156s + 1}{0.096s + 1}$$

Step 6:

将设计好的校正器加入模型中，如图 6.24 所示。可以得到加入校正后的 Bode 图，如图 6.25 所示。从图中可以看到，截止频率为 3.06rad/s ，相角裕度为 111° ，符合要求。

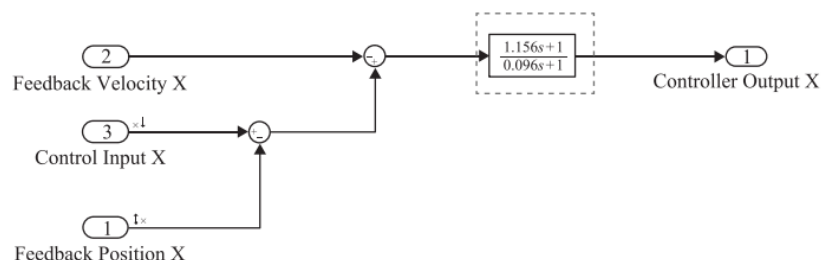


图 6.24 加入校正器

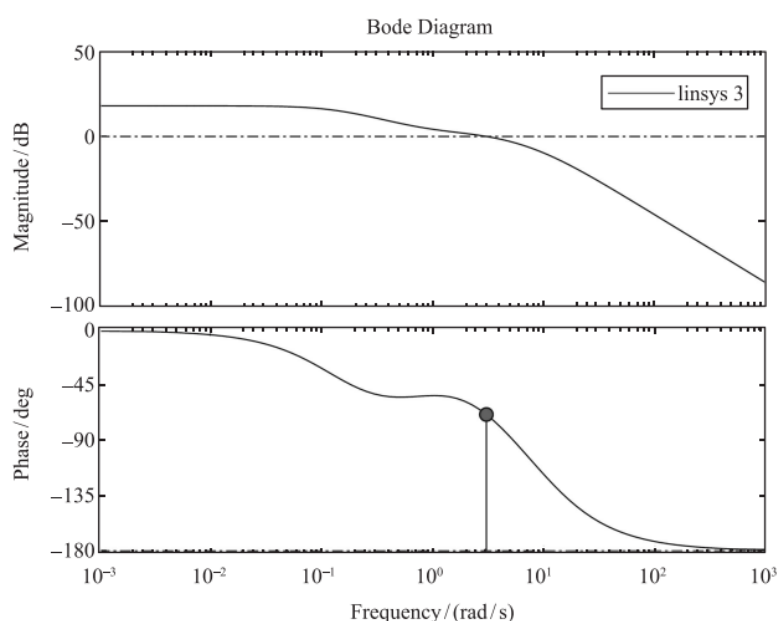


图 6.25 加入校正后的速度控制环 Bode 图

Step 7:

与速度控制环相似，首先得到未校正的位置控制环开环 Bode 图，设置输入/输出点如图 6.26 所示，得到 Bode 图如图 6.27 所示。从图中可以看到，截止频率为 0.73rad/s ，相角裕度为 72.2° 。根据位置控制环相位裕度 $>60^\circ$ ，截止频率 $>2\text{rad/s}$ 的要求，相角裕度无须调整，只需提高截止频率。为此考虑提高开环增益。从图 6.27 可以看出， $\omega = 2\text{rad/s}$ 时，幅频特性曲线的值为 -10dB ，要求加入校正环节后幅频特性曲线值为 0dB ，则有

$$20\lg K = 10$$

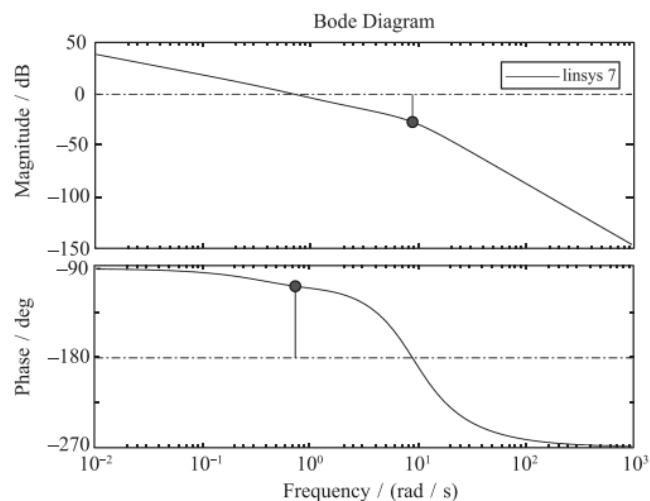


图 6.27 未校正位置控制环开环 Bode 图

可得 $K = 3.2$ 。加入校正环节后的 Bode 图如图 6.28 所示，截止频率为 2.01rad/s ，相角裕度为 63.9° ，符合要求。校正前后的阶跃响应对比如图 6.29 所示，从图中可以看到性能有明显改善。针对其他通道校正器设计，读者可留做练习。

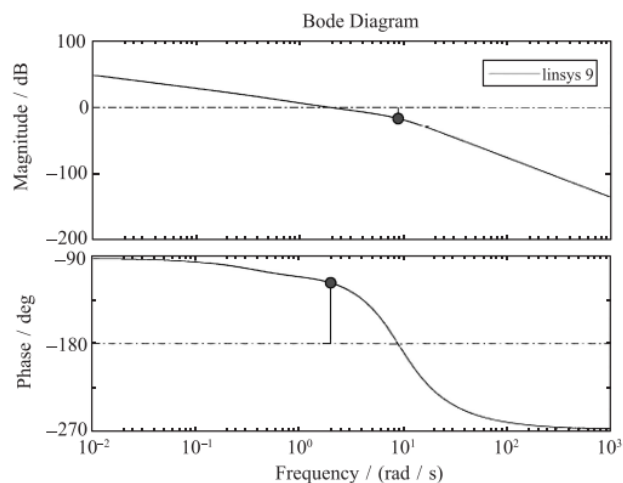


图 6.28 校正后位置控制环开环 Bode 图

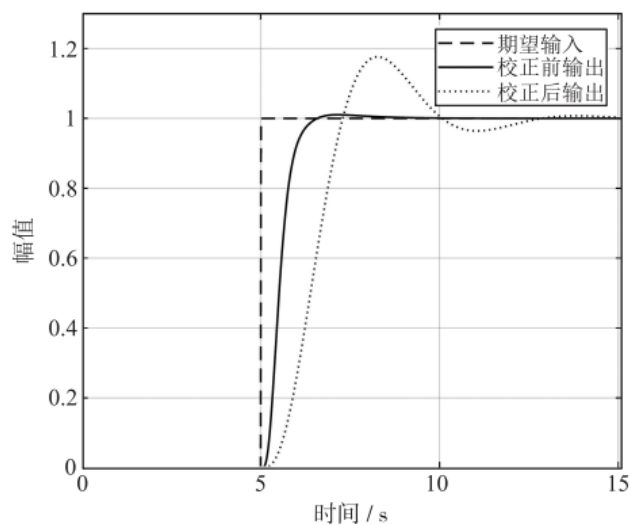


图 6.29 校正前后阶跃响应对比图

Step 8:

对于实验目标中给定周期 $T = 5\text{s}$ 的圆轨迹信号，加入控制器后的响应结果如图 6.30 所示。从图中可以看到，此时的跟踪效果在加入校正环节后有了较大的改善。具体步骤可参考基础实验步骤。

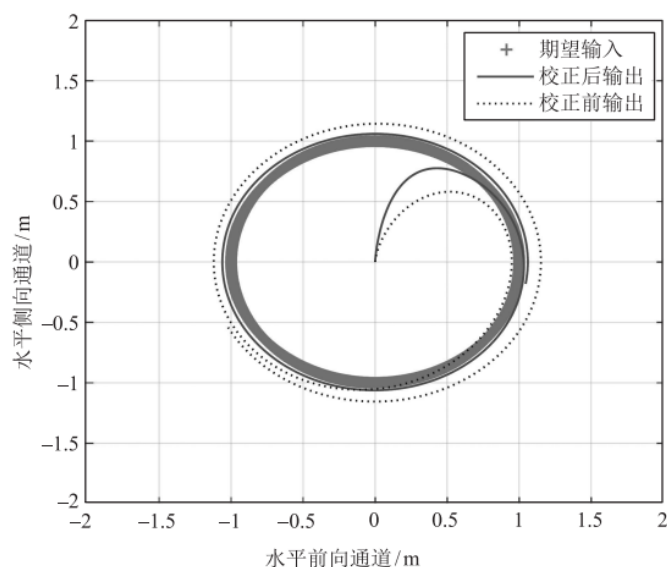


图 6.30 圆轨迹校正前后对比

（具体操作步骤可以观看每章相对应的 PPT，其中有各个实验相对应的演示视频。）

7. 仿真 2.0(sim2.0)实验步骤

打开 Simulink 文件 “e3\3.2\sim2.0”，其中的闭环系统结构与 “e3\3.2\sim1.0” 相同，区别在于其中的模型为非线性模型。采用与传递函数模型实验中完全相同的实验步骤，将两种模型的关键结果进行对比。对比结果图。

Step 1:

打开本章所附带文件夹中的 “e3\3.2\sim2.0” 文件夹，打开 “e3\3.2\sim2.0\startSimulation.m” 文件，并单击 “运行” 按钮，初始化参数。

Step 2:

按照仿真 1.0 中的步骤完成实验。

Step 3:

从对比结果可以看出，我们基于系统辨识获得模型设计的跟随控制器，可以产生与基于非线性模型设计非常接近的效果。因此，在接下来的实验中将利用传递函数模型进行跟踪控制器设计。同时也可以 在 FlightGear 中查看仿真飞行效果。

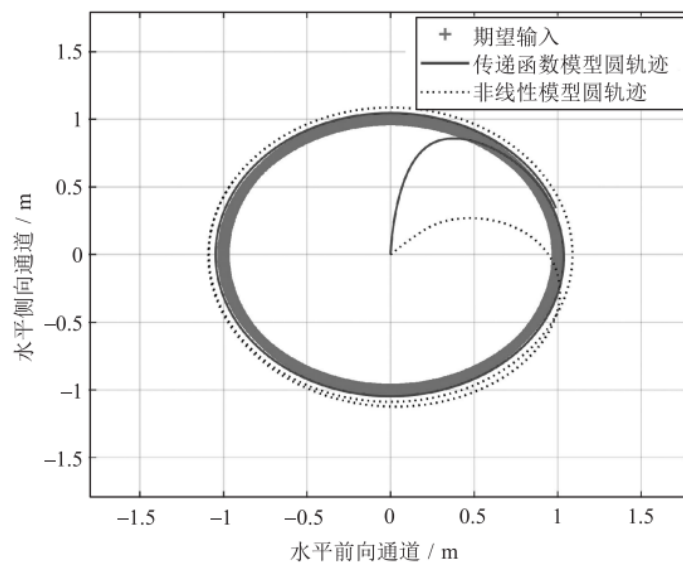


图 6.31 不同模型 $T = 5s$ 时圆轨迹跟踪对比图

（具体操作步骤可以观看每章相对应的 PPT，其中由各个实验相对应的演示视频。）

8. 参考资料

- [1]. Quan Quan. Introduction to Multicopter Design and Control. Springer, Singapore, 2017
- [2]. 全权 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 [M] 电子工业出版社 2018.
- [3]. 全权 戴训华 王帅 多旋翼飞行器设计与控制 实践 [M] 电子工业出版社 2020.
- [4]. 全权 等.多旋翼无人机远程控制实践[M].电子工业出版社,2022.

9. 常见问题

Q1: ****

A1: ****