

系统辨识实验 (设计实验)

1. 实验目的

对于给定的多旋翼非线性模型，通过对模型外加控制器的方式对其进行辨识，在假设存在延时的情况下获得四个通道的模型传递函数。注意四个通道建立的均是输入到地球坐标系下位置/角度的传递函数，这里将水平通道可以分为水平前向通道和水平侧向通道，因此是四通道，具体要求如下。

- (1) 了解利用CIFER软件进行系统辨识的大致流程。
- (2) 在各通道辨识后，获得的传递函数判定标准是代价函数满足 $J \leq 50$ 。
- (3) 这里需要注意的是，为了获得位置通道的传递函数，需要设计控制器，获得的四通道非线性化传递函数模型。各通道期望输入为位置与偏航角，输出也是如此。
- (4) 在获得辨识的传递函数模型之后，将分析实验中获得的速度模型加入与设计实验中相同的位置控制器，对比设计实验和分析实验所得模型的Bode图。

2. 实验要求

- 软件要求：Windows 10及以上版本；RflySim工具链^[1]；MATLAB 2022b及以上版本。
- 硬件要求：笔记本/台式电脑1台^[2]。

3. 实验地址

例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\6.RflySimExtCtrl\1.BasicExps\e7_Idenfication\e1.3](#)

[e1_3_SystemIdentification.slx](#)：多旋翼simulink仿真文件

[startSimulation.m](#)：初始化参数文件

[e1_3_TF_Bode_Verification.slx](#)：模型验证文件

[e1_3_GetFinalData.m](#)：保存数据文件

[assets/](#)：图片资源文件夹

0.08/：0.08版本数据文件夹

0.09/：0.09版本数据文件夹

1.11/：1.11版本数据文件夹

data_x_0.08_1.18.mat：0.08版本的MATLAB数据文件

data_x_0.09_1.21.mat：0.09版本的MATLAB数据文件

data_x_0.11_1.25.mat：0.11版本的MATLAB数据文件

4. 实验内容或步骤

4.1 仿真1.0(sim1.0)实验步骤

这里的具体步骤和分析实验的具体步骤类似，同的是在"e1_3_SystemIdentification.slx"模型文件中，四通道为合理的位置控制器，如图4.15所示。在通过对多旋翼非线性模型输入扫频信号获得输入/输出的时间历程数据后，利用CIFER软件获得对应通道的传递函数模型，以水平通道结果为例，由式(4.16)可知，其传递函数模型如下。

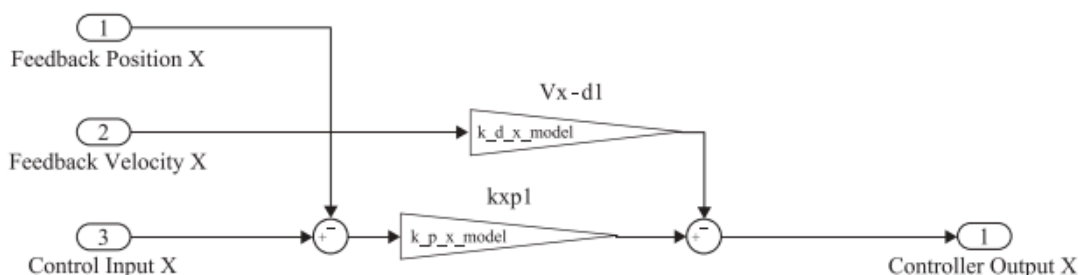


图 4.15 设计实验水平前向通道 PD 控制器，Simulink 模型详见“e1_3_SystemIdentification.slx”中“Controller/P or PD Controller X”模块

1) 水平前向通道

$$G_{p_{x_e}u_{v_x}} = \frac{6.48651}{s^3 + 3.72616s^2 + 12.6598s + 6.55711} e^{-0.0429s} \quad J = 0.099 \quad (4.29)$$

相应地，在水平前向通道模型中，仿真时的扫频输入/输出对比如图 4.16 所示。可以发现，水平前向通道的输出可以较好地跟随扫频输入，特别是在低频阶段。

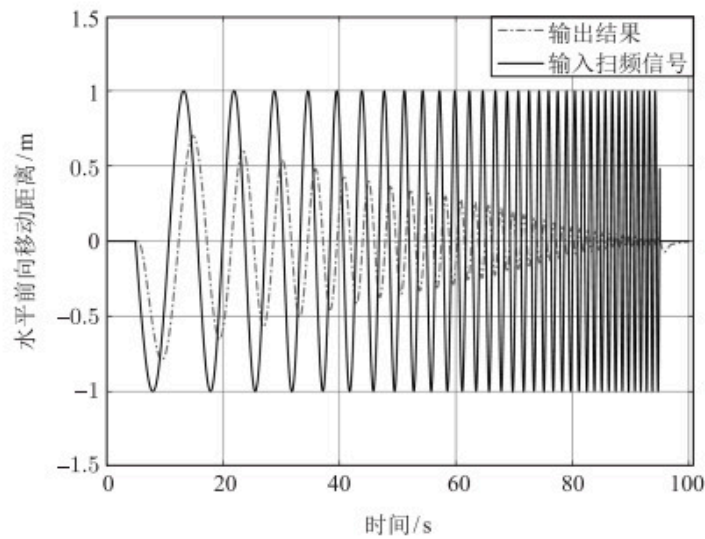


图 4.16 设计实验水平前向通道扫频输入/输出对比图

2) 水平侧向通道

$$G_{p_{1c}u_{1y}} = \frac{6.48638}{s^3 + 3.72607s^2 + 12.66s + 6.55534} e^{-0.0429s} \quad J = 0.099 \quad (4.30)$$

相应地，在水平侧向通道模型中，仿真时的扫频输入/输出对比如图 4.17 所示。从图中可以看出，水平侧向通道的输出可以较好地跟随扫频输入，特别是在低频阶段。

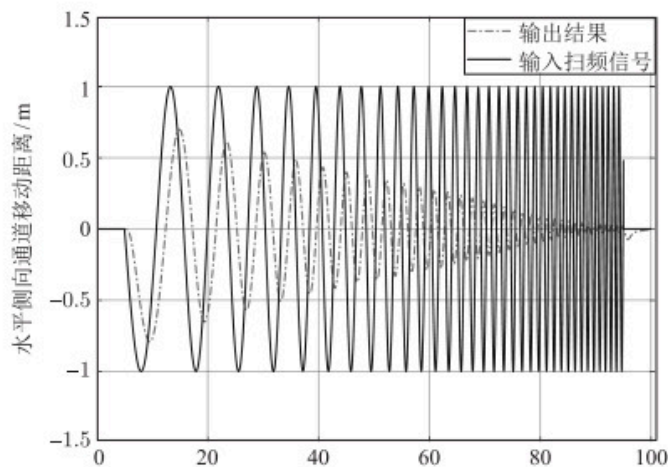


图 4.17 设计实验水平侧向通道扫频输入/输出对比图

(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。)

4.2 仿真2.0(sim2.0)实验步骤

由4.3.2.1节结果及分析可以得到机体速度环的模型。在将4.4.2.1节控制器式(4.27)和式(4.28)放入分析实验的模型之后，利用Simulink将其与本实验获得的稳定位置闭环系统模型进行频域响应对比。此处使用了MATLAB中的"Bode"函数对传递函数的幅频以及相频曲线

进行可视化显示，进行比较后的结果如图4.18和图4.19所示。从图中可以看出，对于水平通道，本实验中所获得的多旋翼模型与分析实验中的传递函数模型在稳定闭环中的幅频和相频曲线几乎一致，表明模型的准确性比较高。其他通道的频率响应读者可以自行对比。

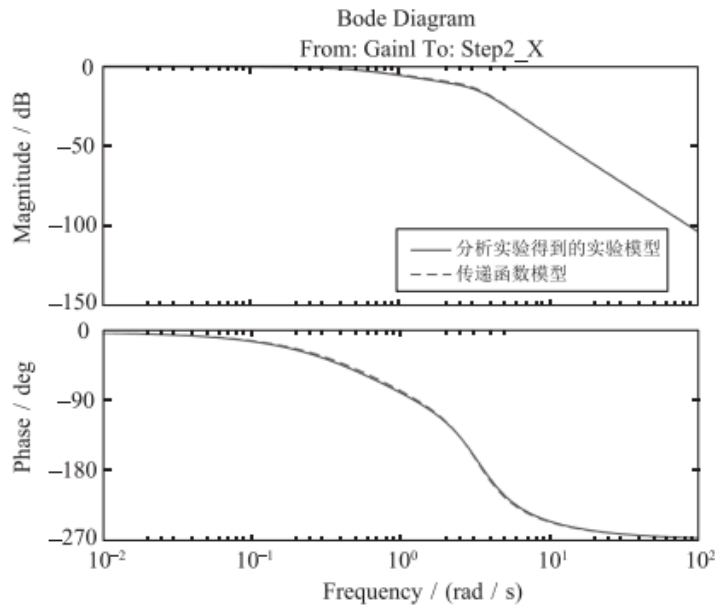


图 4.18 水平前向通道分析实验与设计实验 Bode 图对比

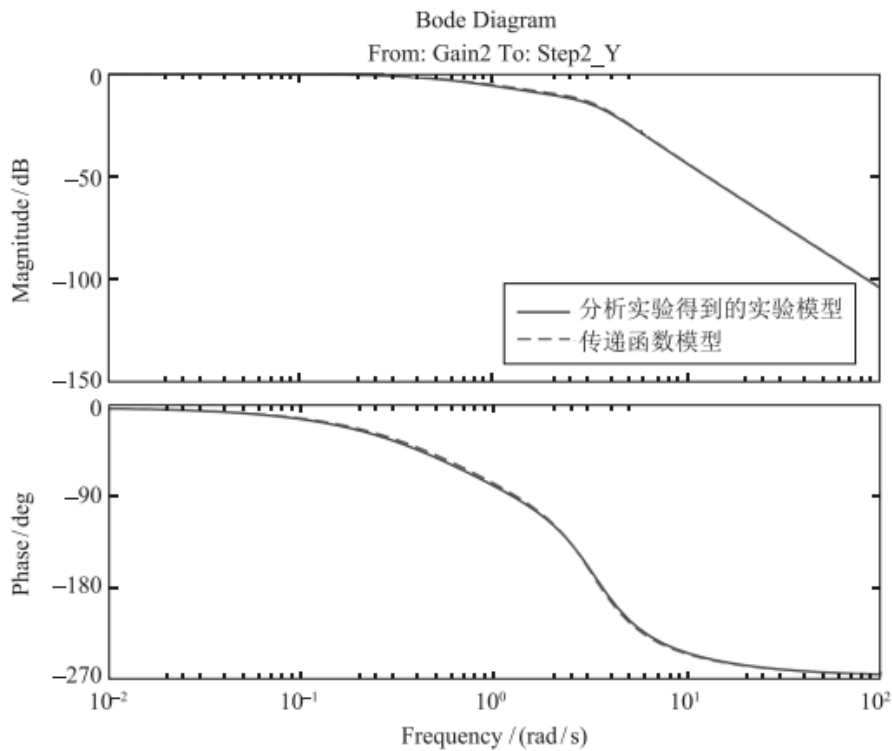


图 4.19 水平侧向通道分析实验与设计实验 Bode 图对比

(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。)

4.3 硬件在环仿真实验步骤

硬件在环仿真内容和目的与设计实验相同，只是从软件仿真变为了硬件在环仿真，其所需设备如图4.20所示。首先对硬件在环仿真Simulink模型进行简单介绍，打开文件"el_3_SystemIdentification_Vel_HITL.slx"文件，如图4.21所示。



图 4.20 硬件在环仿真所需设备

图4.21中虚线框部分是硬件在环仿真的接口模块，用于与RflySim进行信息交互，控制器将扫频信号传入硬件接口中，硬件接口返回响应信号并将记录下来的数据保存到工作区中。模型的其他部分与之前的Simulink模块相同。按照硬件在环仿真实验流程打开RflySim，连接自驾仪，并且按照之前步骤在"startSimulation.m"中对不必要的代码进行注释。接着，先后运行"startSimulation.m"文件进行参数初始化以及对"el_3_SystemIdentification_Vel_HITL.slx"文件进行系统辨识。在程序运行完成之后，运行"el_3_GetFinalData.m"文件，保存刚才采集到的数据。将采集到的数据保存到CIFER软件指定的文件夹中，按照之前所述的辨识流程分别对每个通道进行辨识。根据辨识之后输出的传递函数结果修改"el_3_SystemIdentification_Vel_Verification_HITL.slx"文件中相应的传递函数模块。单击"运行"按钮便可以对比辨识结果和硬件在环仿真结果的差别，从而验证辨识结果的准确性。下面以高度通道进行举例说明。

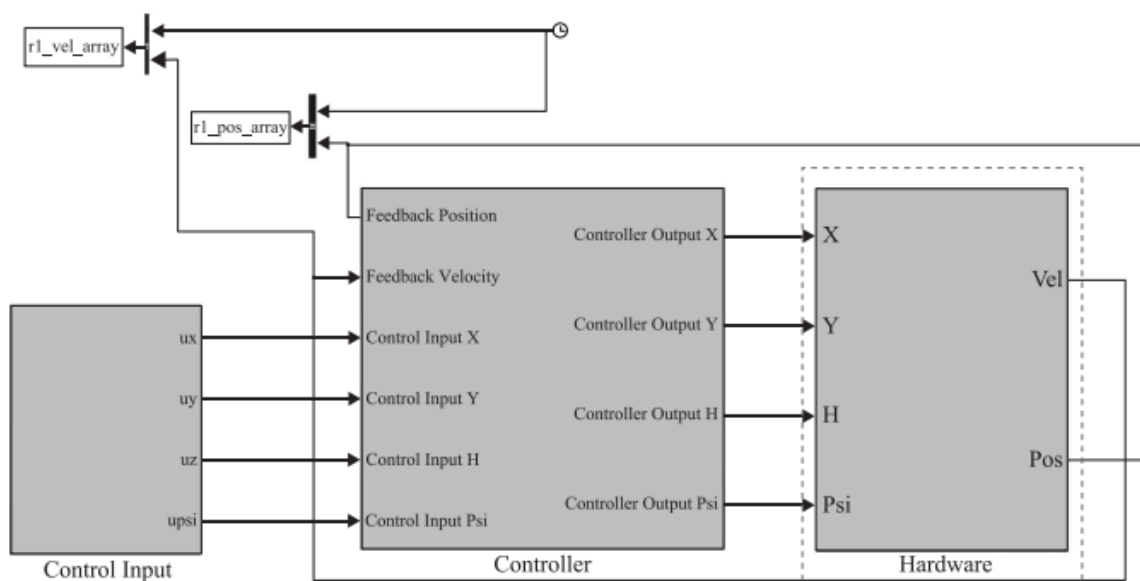


图 4.21 硬件在环仿真接口模块

图4.22为高度通道的辨识结果，可以观察到高度通道的信号在开始阶段误差有些大。这是因为在硬件在环仿真当中，需要先给四旋翼一个向上飞的速度指令，使得多旋翼起飞；在起飞之后，才能正常进行高度通道的扫频。因此，在图4.22中刚开始的阶段有一个持续10s的起飞速度指令。虚线则表示多旋翼高度方向上的速度由静止到跟随速度指令的连续变化的响应情况。因此，曲线拟合情况表明了高度通道辨识结果的正确性。实验效果如图4.23所示。

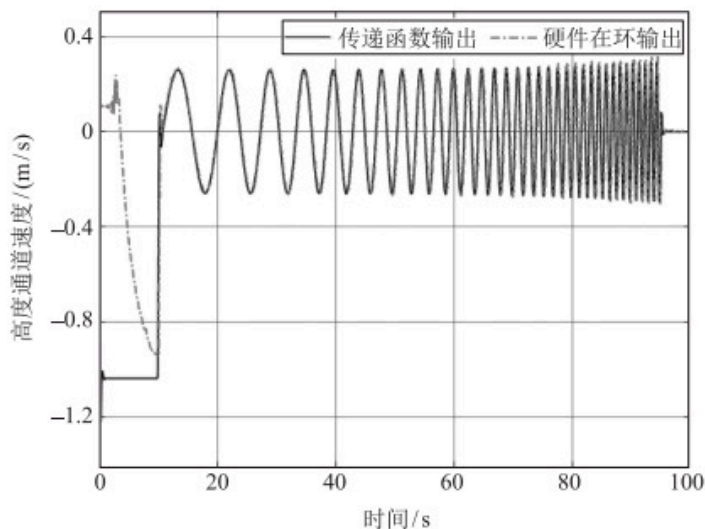


图 4.22 高度通道辨识结果



图 4.23 高度通道硬件在环仿真效果图

5. 关键知识点

水平通道的两通道模型是解耦的（解耦条件是偏航角 $\psi = 0$ ，参考实验原理中的内容）。这一点在对模型进行线性化时可以看出，水平通道模型的位置与速度分别为 $\mathbf{p}_{hb} = \mathbf{R}_{\psi}^T \mathbf{p}_h$ ， $\mathbf{v}_{hb} = \mathbf{R}_{\psi}^T \mathbf{v}_h$ ，而 $\mathbf{p}_h = [p_{x_e} \ p_{y_e}]^T$ ， $\mathbf{v}_h = [v_{x_e} \ v_{y_e}]^T$ 为多旋翼在地球坐标系下的位置和速度。因此，水平两通道解耦的条件即为 $\mathbf{R}_{\psi}^T = \mathbf{I}$ ，即 $\psi = 0$ 。需要注意的是，水平前向通道和水平侧向通道的输出量是两个方向的位置，而输入量则为加入控制器之后新的控制变量。

输入到机体位置/角度的传递函数是不稳定的，因此我们采取如图4.4所示的外加PD控制器的方式进行辨识（这里我们以水平前向通道为例，水平侧向通道与此类似），设计的控制器

如图4.14所示。在获得各通道传递函数模型后，通过Bode图的方式将分析实验和设计实验获得的传递函数在频域中进行对比。在本实验中，水平侧向通道和水平前向通道控制器形式一致，均为PD控制器，分别如式(4.27)和式(4.28)所示。

$$G_{ex}(s) = \frac{\frac{1}{g}k_p G_{p_x u_x}}{1 + \frac{1}{g}sk_d G_{p_x u_x} + \frac{1}{g}k_d k_p G_{p_x u_x}} \quad (4.27)$$

$$G_{ey}(s) = \frac{\frac{1}{g}k_p G_{p_y u_y}}{1 + \frac{1}{g}sk_d G_{p_y u_y} + \frac{1}{g}k_d k_p G_{p_y u_y}} \quad (4.28)$$

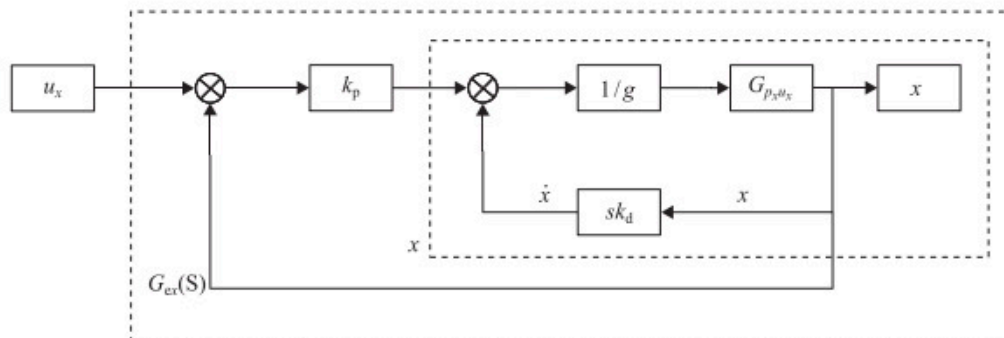


图 4.14 水平前向通道 PD 控制器

6. 参考资料

1. RflySim官方文档
2. 系统辨识理论与应用
3. CIPHER软件用户手册
4. 多旋翼飞行器系统辨识方法

7. 常见问题

Q1: 在使用CIPHER软件进行系统辨识时，如何判断辨识结果是否满足要求？

A1: 辨识结果的判定标准是代价函数满足 $J \leq 50$ ，当代价函数值越小时，表示辨识出的传递函数模型与实际系统的拟合度越高。此外，还可以通过对比实际输出和辨识模型输出的Bode图来直观判断辨识精度。

Q2: 在硬件在环仿真过程中，为什么初始阶段会出现较大的误差？

A2: 在硬件在环仿真中，由于需要先给四旋翼一个向上飞的速度指令使其起飞，在起飞过程中多旋翼状态不稳定，导致初始阶段误差较大。通常在起飞后10秒左右进入稳定状态，此时才开始正常的扫频辨识过程。

Q3: 如何验证辨识得到的传递函数模型的准确性？

A3: 可以通过将辨识得到的传递函数模型与分析实验中的模型在频域中进行对比，使用MATLAB中的"Bode"函数绘制两者的幅频和相频特性曲线。如果两条曲线在稳定闭环中的幅频和相频曲线几乎一致，则说明模型的准确性较高。

1. <https://rflysim.com/> ↩

2. 推荐配置请见: <https://rflysim.com/doc/zh/HowToInstall.pdf> ↩