

# 1. 实验名称及目的

## 1.1. 实验名称

系统辨识实验 (基础实验)

## 1.2. 实验目的

将已给出的传递函数模型与非线性模型进行对比;在外加控制器的情况下,用相同扫频信号对两种模型进行激励,对比仿真结果。具体有以下三个部分:

- (1)理解与熟悉建模过程;
- (2)理解与熟悉获得的多旋翼传递函数模型;
- (3)对系统辨识的传递函数模型和多旋翼非线性模型输入相同的扫频信号,对比其输出结果。

## 1.3. 关键知识点

带有半自主自驾仪的多旋翼控制结构如图 4.1所示。遥控指令能直接控制多旋翼的以下状态变量:垂直速度  $v_{z_c}$ 、姿态角速度  $\omega_{z_b}$ 、多旋翼的姿态角  $\theta$  和  $\phi$  (或者多旋翼机体坐标系下的速度  $v_{x_b}$  和  $v_{y_b}$ )。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  $\psi$ 。

真实情况下的多旋翼模型为非线性模型,为了便于理解和控制器设计,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。如图 4.1所示的系统可以分成三个通道:从油门摇杆量  $u_T$  到垂直位置  $p_{z_c}$  的高度通道、从遥控器输入  $u_{\omega_z}$  到偏航角  $\psi$  的偏航通道,以及从  $\mathbf{u}_h$  到  $\mathbf{p}_h$  的水平位置通道,其中  $\mathbf{u}_h = [u_\phi \quad u_\theta]^T, \mathbf{p}_h = [p_{x_c} \quad p_{y_c}]^T$ 。在半自主自驾仪的控制下,这些通道的模型表示如下。

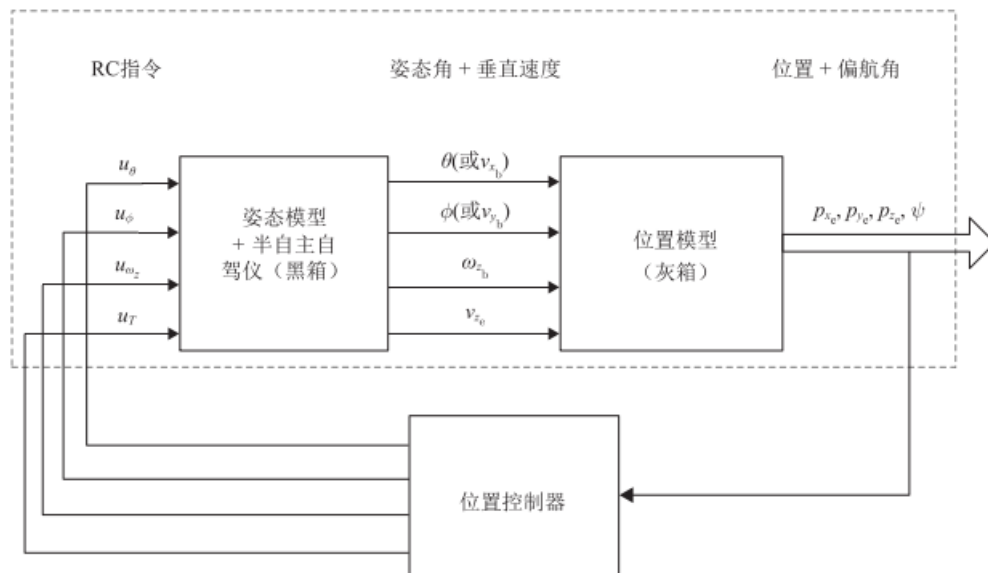


图 4.1 带有半自主自驾仪的多旋翼控制结构

假设 4.1 高度通道的模型为

$$\begin{aligned}\dot{p}_{z_c} &= v_{z_c} \\ \dot{v}_{z_c} &= -k_{v_{z_c}} v_{z_c} - k_{u_T} u_T\end{aligned}\quad (4.1)$$

其中,  $k_{v_{z_c}}, k_{u_T} > 0$  是由所选定半自主自驾仪决定的参数, 可以认为这些参数是未知的。

假设 4.2 经过半自主自驾仪的反馈, 可以认为偏航通道具有以下模型:

$$\begin{aligned}\dot{\psi} &= \omega_z \\ \dot{\omega}_z &= -k_{\omega_z} \omega_z + k_{u_{\omega_z}} u_{\omega_z}\end{aligned}\quad (4.2)$$

其中,  $k_{\omega_z}, k_{u_{\omega_z}} > 0$  是由所选定半自主自驾仪决定的参数, 可以认为这些参数是未知的。

假设 4.3 半自主自驾仪平台会通过自身的角度传感器对姿态角  $\theta$  和  $\phi$  进行反馈, 假设  $u_\phi$  和  $u_\theta$  到  $\phi$  和  $\theta$  的通道是稳定的, 模型可以描述如下

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{p}}_h &= \mathbf{R}_\psi \mathbf{v}_{hb} \\ \dot{\mathbf{v}}_{hb} &= -\mathbf{K}_{v_{hb}} \mathbf{v}_{hb} - g \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \Theta_h \\ \dot{\Theta}_h &= \omega_{hb} \\ \dot{\omega}_{hb} &= -\mathbf{K}_{\Theta_h} \Theta_h - \mathbf{K}_{\omega_{hb}} \omega_{hb} + \mathbf{K}_{u_h} \mathbf{u}_h\end{aligned}\quad (4.3)$$

其中,  $\mathbf{v}_{hb} = [v_{x_b} \ v_{y_b}]^T$ ,  $\Theta_h = [\theta \ \phi]^T$ ,  $\omega_{hb} = [\omega_{x_b} \ \omega_{y_b}]^T$ 。  $\mathbf{K}_{v_{hb}}$ ,  $\mathbf{K}_{\Theta_h}$ ,  $\mathbf{K}_{\omega_{hb}}$ ,  $\mathbf{K}_{u_h} \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$  是由所选半自主自驾仪决定的参数, 可以认为这些参数是未知的。注意, 如果半自主自驾仪没有考虑水平方向的速度反馈, 则该通道仅含有空气阻尼, 这也就是说, 此时  $\mathbf{K}_{v_{hb}} \approx \mathbf{0}_{2 \times 2}$ , 否则  $\mathbf{K}_{v_{hb}}$  应该为一个合理的阻尼系数。  $\mathbf{R}_\psi$  为机体坐标系到地球坐标系下的

旋转矩阵, 定义为  $\mathbf{R}_\psi = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix}$ 。

## 2. 实验效果

通过对各个通道进行扫频信号激励之后, 通过示波器显示出各个通道的对比图。

## 3. 文件目录

例程目录: [\[安装目录\]\RflySimAPIs\6.RflySimExtCtrl\1.BasicExps\7\\_MutUAVRemoteCtrl\1.System identification experiment\el.1\](#)

文件夹/文件名称	说明
e1_1_ModelUnderstanding_2017b.slx	多旋翼 simulink 仿真文件
startSimulation.m	初始化参数文件

## 4. 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 <sup>①</sup>	1

2	RflySim 工具链		
3	MATLAB 2022b 及以上版本		

①：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com>

## 5. 实验步骤

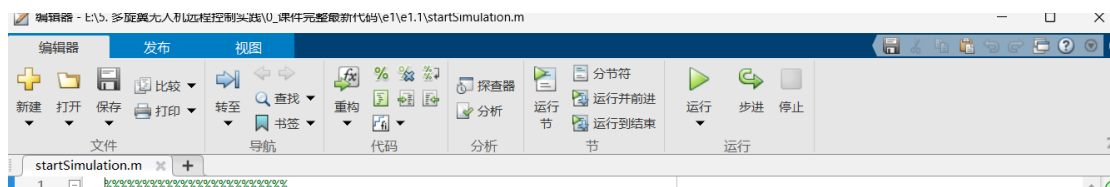
### 5.1. 仿真 1.0(sim1.0)实验步骤：

#### Step 1:

学习本书第 2 章的内容，对于 simulink 模型有一个初步的了解。

#### Step 2:

打开本章所附带文件夹中的“e1\e1.1”文件夹，打开“e1\e1.1\startSimulation.m”文件，并单击“运行”按钮，初始化参数。



#### Step 3:

打开“e1\e1.1\e1\_1\_ModelUnderstanding\_2017b.slx”模型文件，将看到多旋翼 Simulink 仿真平台，详细内容请参考第 2 章 2.2.1 节，如图 4.5 所示，共有四个组成部分。

- a) 虚线框①为第 2 章 2.2 节所提到的各通道位置期望输入模块。
- b) 虚线框②中是传递函数模型，该模型是对虚线框③里面多旋翼非线性模型辨识的结果，里面添加“比例-微分”控制器，详细获得过程请参考 4.4 节。这里，传递函数如式(4.20)~式(4.23)所示。
- c) 虚线框③中的多旋翼模型则是多旋翼的非线性模型。
- d) 虚线框④为显示模块，可以显示虚线框②与虚线框③两种模型中相同通道反馈的实时多旋翼位置信息的对比。

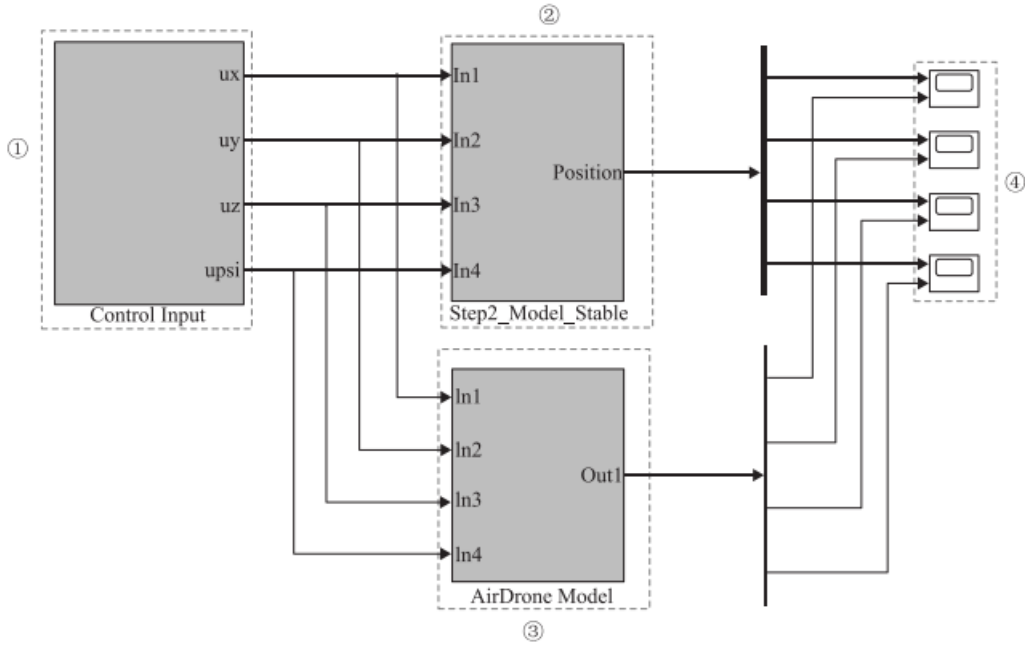


图 4.5 模块整体示意图, Simulink 模型详见 “e1\_1\_ModelUnderstanding.slx”

水平前向通道:

$$G_{p_{x_c} u_{v_x}} = \frac{6.48651}{s^3 + 3.72616s^2 + 12.6598s + 6.55711} e^{-0.0429s} \quad (4.20)$$

水平侧向通道:

$$G_{p_{y_c} u_{v_y}} = \frac{6.48638}{s^3 + 3.72607s^2 + 12.66s + 6.55534} e^{-0.0429s} \quad (4.21)$$

高度通道:

$$G_{p_{z_c} u_r} = \frac{12.275}{s^2 + 13.0573s + 12.3932} e^{-0.0271s} \quad (4.22)$$

偏航通道:

$$G_{\psi u_{\omega_z}} = \frac{5.28369}{s^2 + 5.07814s + 5.37552} e^{-0.0281s} \quad (4.23)$$

## Step 4:

了解该模型文件之后, 打开期望输入模块(虚线框①), 如图 4.6 所示。在该模块中, 如果需要修改相应的各通道期望扫频输入, 则需要打开上图 4.6 中左边的虚线框①所示模块。从上到下四个模块依次为四个通道的扫频输入, 以最上边的水平前向通道“X Swept”模块为例, 打开后如图 4.7 所示。这里需要注意的是, 进行扫频时不可以同时进行多通道扫频, 需要单个通道依次扫频。这时, 需要相应调节图 4.6 中虚线框②所示的转换开关, 并且除需要扫频的通道外, 其他通道均设置为稳定值, 即多旋翼在该通道的“平衡点”附近。单机 Simulink 中“Run”按钮运行该模型, 并通过多旋翼非线性模型观察仿真结果。

① 不同通道加入扫频信号

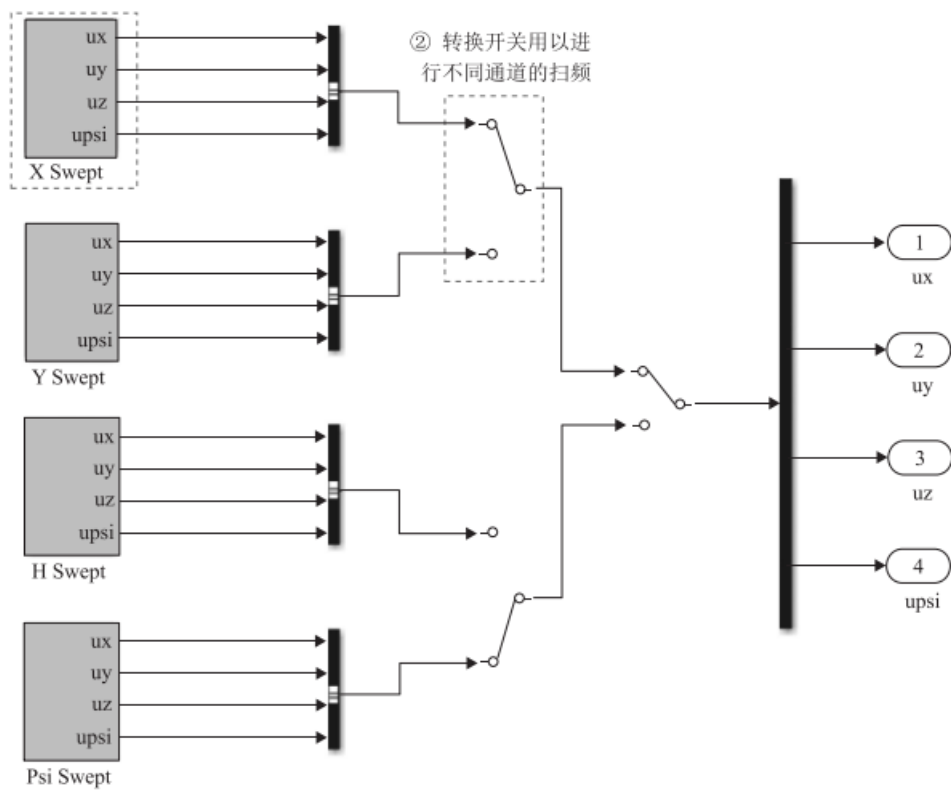


图 4.6 期望输入模块“Control Input”，Simulink 模型详见“e1\_1\_ModelUnderstanding.slx”

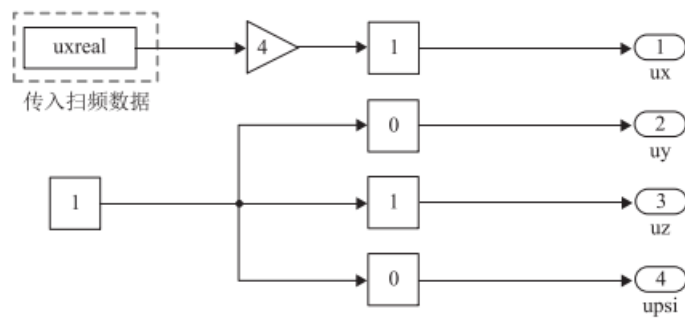


图 4.7 基础实验水平前向通道扫频输入示意图

(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。)

## 5.2. 仿真 2.0(sim2.0)实验步骤:

在对各个通道进行扫频信号激励之后，这里以水平通道为例，其结果如图 4.8 所示。其通道扫频响应的峰值均为 1，激励时间长度为 100s。由此可以看出，利用传递函数获得的输出与多旋翼非线性模型获得的输出几乎是一致的。当给定的扫频信号的扫频频率范围在 0.1~1Hz，即低频时，两者的输出近似程度更高;而在高频时，扫频输出的幅值出现了差异，但是仍然可以吻合。因此，该传递函数模型可以较为完整地反映系统的真实性能。对于其他通道，读者可以自己实验操作验证。

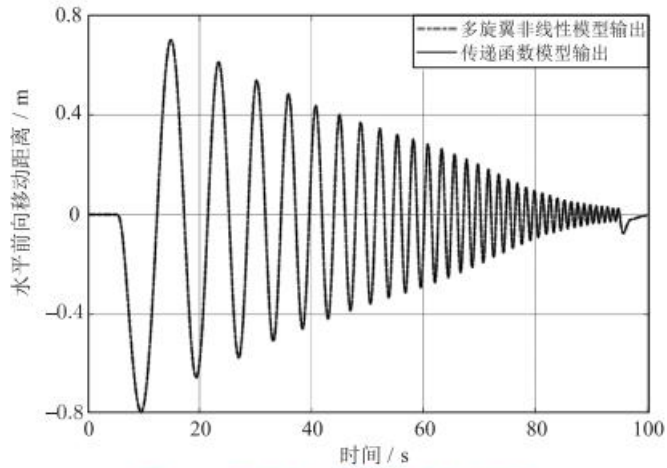


图 4.8 基础实验水平前向通道对比图

(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。)

## 6. 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.

## 7. 常见问题

Q1: \*\*\*\*

A1: \*\*\*\*