

三自由度飞行器设备文档

一、三自由度飞行器的结构和工作原理

三自由度飞行器的模型系统由安装在三自由度中心环节上的四个推进器组成，如图 1 所示。该飞行器模型可以进行俯仰、滚转、偏航运动；还可以两个通道或三个通道同时转动。推进器由带有叶轮的风扇组成，由电机驱动叶轮转动，再由叶轮转动产生转矩来控制模型系统的俯仰、滚转和偏航运动。

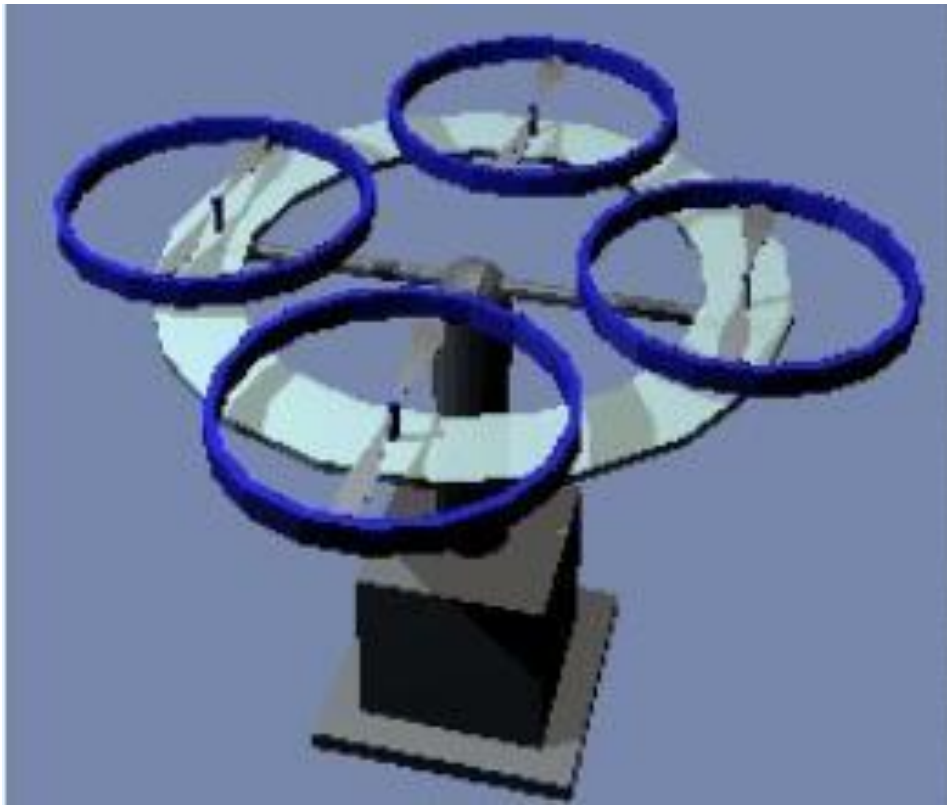


图 1 三自由度飞行器模型系统示意

在图 1 中用箭头标出了各通道的正方向，其中俯仰角为正时（定义前推进器上升时为正方向），前推进器是正转的，产生向上的动力，后推进器是反转的，产生向下的动力；当俯仰角度为负时，前推进器和后推进器与俯仰角为正时是相反的，这样就能驱动三自由度模型系统进行俯仰运动。滚转角度为正时（定义右推进器上升时为正方向），右推进器是正转的，产生向上的动力，左推进器是反转的，产生向下的动力；滚转角度为负时，右推进器和左推进器与滚转的角度为正时是相反的，这样可以驱动三自由度飞行器模型系统进行滚动转动。偏

航运动由四个推进器产生的合力来控制的，偏航角度为正时（定义逆时针方向为偏航运动正方向），前后两个推进器是反转的，左右两个推进器是正转的；当偏航角度为负时（顺时针偏航），前后两个推进器是正转的左右两个推进器是反转的，这样四个推进器产生的合力就可以控制三自由度飞行器模型系统偏航运动。

二、三自由度飞行器的数学模型

三自由度飞行器模型系统要实现三个自由度的转动，所以必须有三个不同的动力学方程来控制模型系统，我们根据系统的动力学特性，建立模型系统坐标 XYZ，坐标轴的定义和系统的简化模型示意图如图 2 所示。

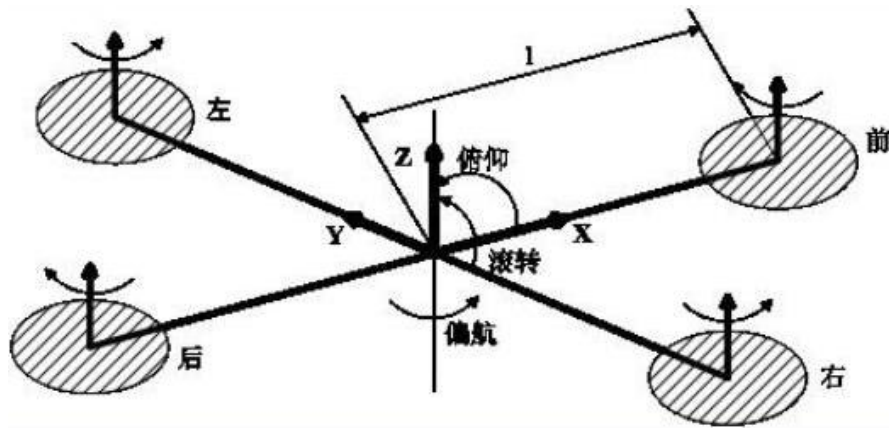


图 2 三自由度飞行器模型系统的简化模型示意图

通过动力学分析可以到俯仰通道和偏航通道的动力学方程。若设定如下状态：

$$x_1 = y, x_2 = \dot{y}, x_3 = p, x_4 = \dot{p}, x_5 = r, x_6 = \dot{r}$$

其中

- x_1 —— 三自由度飞行器偏航角
- x_2 —— 三自由度飞行器偏航角速度
- x_3 —— 三自由度飞行器俯仰角
- x_4 —— 三自由度飞行器俯仰角速度
- x_5 —— 三自由度飞行器滚转角
- x_6 —— 三自由度飞行器滚转角速度

且四个输入分别为

$$u_1 = V_f, u_2 = V_b, u_3 = V_r, u_4 = V_l$$

其中

u_1 —— 前推进器输入电压

u_2 —— 推进器输入电压

u_3 —— 推进器输入电压

u_4 —— 左推进器输入电压

则根据模型系统的动力学方程可得到如下式的状态空间方程：

$$\dot{X} = AX + Bu$$

$$Y = CX$$

其中

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = I_{6 \times 6}$$

带入参数得系统的参数矩阵为

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0978 & -0.0978 & 0.0978 & 0.0978 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2.1188 & -2.1188 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.1188 & -2.1188 \end{bmatrix}$$

三、演示算法：LQR

在 Command Window 中输入

```
A=[0 1 0 0 0 0;0 0 0 0 0 0;0 0 0 1 0 0;0 0 0 0 0 0;0 0 0 0 0 1;0 0 0 0 0 0];
```

```
B=[0 0 0 0;-0.0978 -0.0978 0.0978 0.0978;0 0 0 0;2.1188 -2.1188 0 0;0 0 0 0;0 0 2.1188 -2.1188];
```

$Q = [10000 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 100 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 20000 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 500 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 20000 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 500];$

$R = [1 \ 0 \ 0 \ 0; 0 \ 1 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 0 \ 1];$

$K = \text{lqr}(A, B, Q, R)$

得反馈矩阵

$K = \begin{bmatrix} -50.0000 & -16.7518 & 100.0000 & 17.2394 & 0 & 0 \\ -50.0000 & -16.7518 & -100.0000 & -17.2394 & 0 & 0 \\ 50.0000 & 16.7518 & 0 & 0 & 100.0000 & 17.2394 \\ 50.0000 & 16.7518 & 0 & 0 & -100.0000 & -17.2394 \end{bmatrix}$

根据状态空间方程式(1)建立如图 3 的三自由度飞行器模型系统

Simulink 框图，其中模型部分由 S 函数编写。

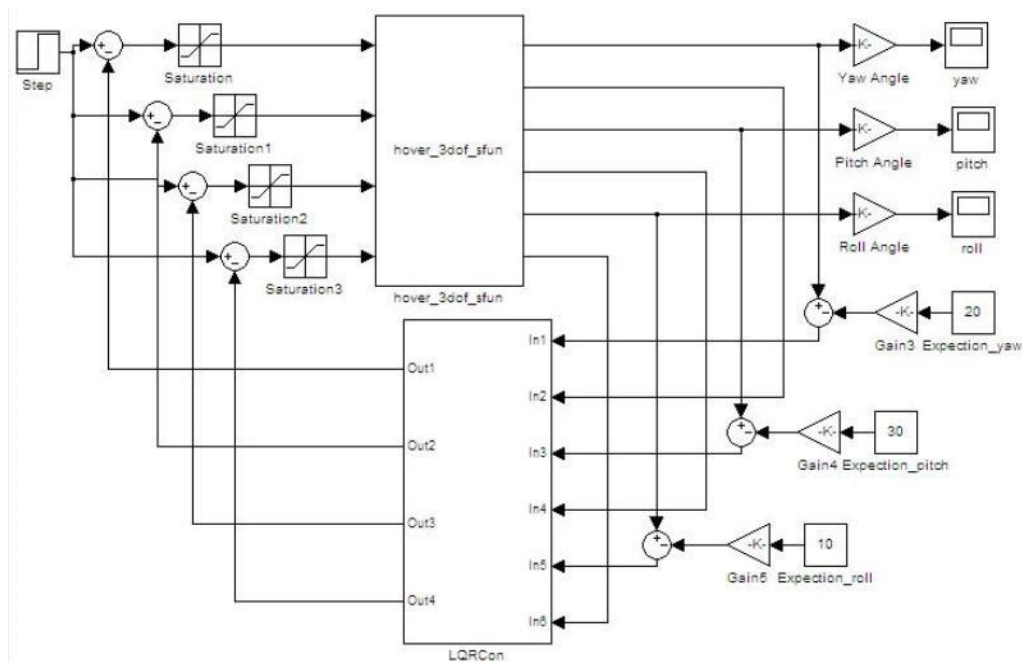


图 3 三自由度飞行器模型系统 Simulink 框图

设定俯仰角、滚转角和偏航角的期望值分别为 30° 、 10° 和 20° ，根据 K 矩阵设计三自由度飞行器模型的 LQR 控制器，对其进行控制，由于三自由度飞行器模型系统的驱动电机额定电压为 12V，故对控制器输出的电压经过饱和模块限制后再输入三自由度飞行器模型系统模块。得到俯仰角、滚转角和偏航角的变化曲线分别如图 4、图 5 和图 6 所示。

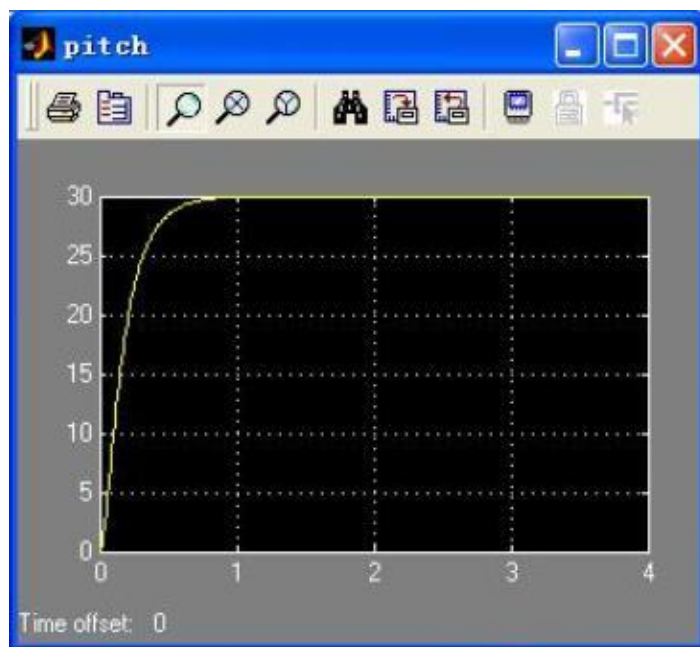


图 4 俯仰角变化图

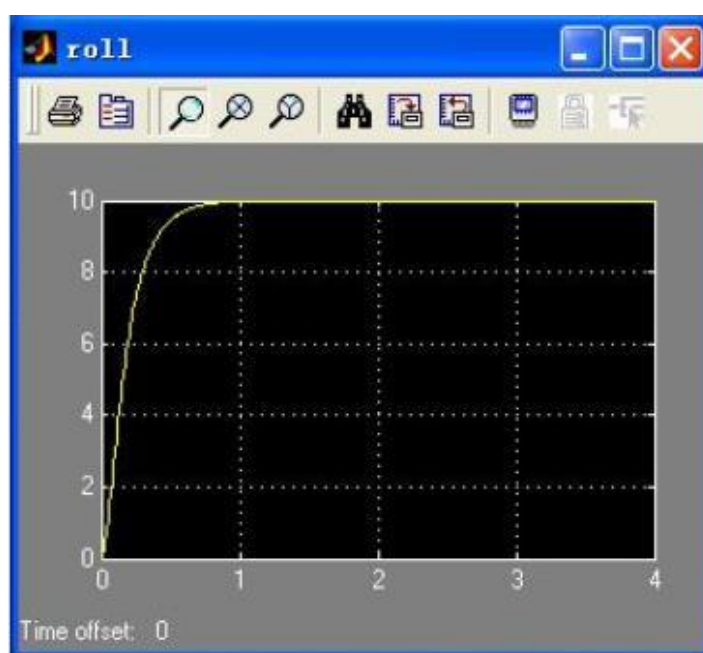


图 5 滚转角变化图

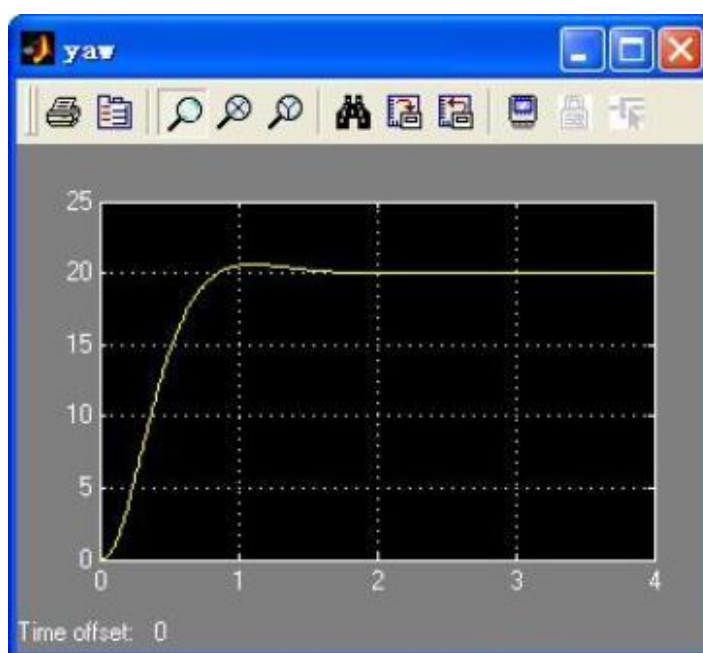


图 6 偏航角变化图