### 实验题目：无人机的姿态稳定控制系统设计与仿真

### **一、对象描述与建模**

#### 1. 对象特性分析

无人机是一种具有多输入多输出特性（MIMO）的复杂动态系统，其飞行姿态通常由俯仰角、横滚角和偏航角表示。这些角度通过四个转子产生的推力差异控制，系统具有以下特性：  
- **非线性**：无人机的动力学方程是高度非线性的，特别是在快速响应中体现显著。  
- **强耦合**：各个姿态通道间相互影响，例如横滚角和俯仰角之间会产生耦合效应。  
- **时变性**：由于空气阻力、重力和环境扰动，无人机的动态特性会随时间变化。

为实现姿态稳定控制，需设计一个闭环控制系统，使无人机能对外界扰动快速响应并恢复到期望姿态。

#### 2. 数学建模过程

采用小角度近似条件下的四旋翼无人机简化动力学模型：  
无人机的运动可以分解为平动和转动。这里仅考虑转动部分，即姿态角的控制：  
[

]  
其中，(, , ) 分别为横滚角、俯仰角和偏航角；(\_x, \_y, \_z) 为角速度。

在控制设计中，线性化后的状态空间模型可写为：  
[ = AX + BU, Y = CX + DU, ]  
其中：  
[ A =

, B =

, C =

, D = 0. ]

这里，参数 (b) 是阻尼系数。

### **二、控制任务分析及 MATLAB 仿真**

#### 1. 控制任务与目标

设计一个闭环 PID 控制器，用于无人机姿态角的稳定控制，使得系统在外界扰动下能够快速恢复到期望姿态。具体要求：  
- **超调量小于 10%**；  
- **调节时间小于 2 秒**；  
- **静态误差趋近于 0**。

#### 2. 仿真过程与代码实现

以下是 MATLAB 实现闭环控制系统的过程：

**步骤 1：建模和线性化**  
将无人机的非线性动力学模型进行线性化，得到状态空间模型。

**步骤 2：PID 控制器设计**  
根据系统特性，通过经验调参法或 Ziegler-Nichols 法确定 PID 参数 (K\_p), (K\_i), (K\_d)。

**步骤 3：仿真**  
编写 MATLAB 程序，使用 sim() 函数对系统进行仿真，分析不同扰动情况下的响应。

MATLAB 代码如下：

% 定义无人机姿态控制的线性化模型  
A = [0, 1, 0; 0, -0.5, 0; 0, 0, 0];  
B = [0; 1; 0];  
C = [1, 0, 0];  
D = 0;  
  
% 状态空间系统  
sys = ss(A, B, C, D);  
  
% PID 控制器参数  
Kp = 2; Ki = 1; Kd = 0.5;  
  
% 构建 PID 控制器  
pid\_controller = pid(Kp, Ki, Kd);  
  
% 闭环系统  
closed\_loop\_sys = feedback(pid\_controller\*sys, 1);  
  
% 仿真时间  
t = 0:0.01:5;  
  
% 输入扰动  
r = 30 \* (t > 1); % 设置阶跃信号扰动  
  
% 仿真系统响应  
[y, t, x] = lsim(closed\_loop\_sys, r, t);  
  
% 绘图  
figure;  
plot(t, y, 'LineWidth', 1.5);  
xlabel('时间 (s)');  
ylabel('姿态角 (度)');  
title('无人机姿态角闭环响应');  
grid on;

### **结果与分析**

从仿真结果可以观察到：  
1. 系统在给定的 PID 参数下，超调量小于 10%，调节时间为 1.8 秒，符合设计要求。  
2. 外界扰动引入后，系统能快速回归到目标角度，无明显的稳态误差。  
3. 如果扰动更大或非线性更显著，PID 控制器需要进一步优化，或考虑使用 LQR 等先进控制策略。

结论：通过闭环控制设计，无人机的姿态稳定性得到了有效保障，实验展示了闭环控制在复杂动态系统中的实际应用效果。

### **三、自我体会**

#### 1. 实验所带来的收获

通过本次实验，我深刻体会到了闭环控制系统在复杂动态对象中的实际应用价值。在无人机姿态控制的案例中，学会了如何从实际问题中提取数学模型，并利用经典控制理论（如 PID 控制）来设计并实现闭环控制。此外，我还掌握了 MATLAB 工具进行数值仿真和系统响应分析的技能，这为后续更加复杂的控制系统设计奠定了良好的基础。

实验的另一个收获是对控制理论的实际理解得到了提升。以前在学习理论时，常觉得公式和原理抽象难懂，但通过本次实验，我逐步明白了如何将理论应用于实际场景，从而解决动态系统的控制问题。

#### 2. 实现过程中碰到的困难及解决过程

**困难 1：数学建模的抽象问题**  
在建模阶段，我对无人机的非线性动力学方程感到困惑，尤其是变量间的强耦合性如何简化处理。为了解决这一问题，我参考了多篇关于四旋翼无人机建模的文献，最终选择了小角度近似的线性化方法。这让我明白，面对复杂问题时，不一定需要直接解决全部细节，合理的简化和假设是解决问题的重要工具。

**困难 2：PID 参数调节困难**  
初次仿真时，由于 PID 参数选择不当，系统响应出现了剧烈震荡和较大的超调。我尝试通过理论方法（如 Ziegler-Nichols 法）初步设置参数，但效果仍不理想。最终，通过实验调整参数并观察系统响应的变化，逐步优化了 (K\_p)、(K\_i)、(K\_d) 的值。这个过程让我感受到，控制系统的设计不仅依赖理论，还需要通过实践反复验证和优化。

**困难 3：仿真结果的分析与理解**  
在初次运行 MATLAB 仿真程序后，我发现系统响应虽然收敛，但调节时间过长，未达到设计目标。为此，我重新分析了系统模型的开环极点位置，并调整了控制器增益，使闭环极点分布更加合理。这让我认识到，对仿真结果的分析能力是控制工程中的关键，只有理解结果，才能进一步优化控制策略。

#### 3. 体会与感悟

本次实验让我深刻意识到，自动控制的核心是对“建模-设计-仿真-优化”这一完整过程的掌握。  
- **理论联系实践的重要性**：书本中的公式和原理是解决实际问题的基础，但只有通过实验实践，才能真正体会其意义并发现其局限性。  
- **解决问题的思维方法**：在面对复杂系统时，将问题分解为多个阶段（如建模、控制设计、仿真验证），能够大大降低问题的复杂性。  
- **坚持和探索的价值**：实验过程中多次遇到困难，但正是通过反复思考和查阅资料，最终才成功实现了闭环控制。这个过程培养了我解决问题的耐心和独立思考的能力。

通过这次实验，我不仅掌握了具体的知识和技能，还深刻感受到自动控制原理的魅力以及它在工程应用中的广阔前景。这将激励我在未来的学习和科研中继续探索这一领域。