

# 《智能专业实践》

## 实验报告

学    校：  南开大学

学    院：  人工智能学院

专    业：  智能科学与技术

组    别：    13 组

实验成员：  2211292  郑皓文

              2212266  张恒硕

实验教师：  包秀娟

完成日期：  2024 年 10 月 16 日

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 目 录 .....                         | 2  |
| 摘要 .....                          | 4  |
| 第一章 实验目的 .....                    | 4  |
| 第二章 实验原理 .....                    | 4  |
| 2.1 PID 控制器基本原理 .....             | 4  |
| 2.2 模糊控制器基本原理 .....               | 5  |
| 第三章 三自由度直升机系统的仿真和控制 .....         | 7  |
| 3.1 直升机实验设备 .....                 | 7  |
| 3.2 PID 控制仿真与模拟实验：俯仰 .....        | 7  |
| 3.3 PID 控制仿真与模拟实验：横侧 .....        | 10 |
| 3.4 PID 控制仿真与模拟实验：旋转 .....        | 13 |
| 3.5 模糊控制仿真与模拟实验：俯仰 .....          | 16 |
| 第四章 磁悬浮实验设备的仿真和控制 .....           | 19 |
| 4.1 磁悬浮设备的原理 .....                | 19 |
| 4.2 磁悬浮设备的物理模型 .....              | 20 |
| 4.3 PID 控制仿真与模拟实验：10MM 定点 .....   | 21 |
| 4.4 PID 控制仿真与模拟实验：10±1MM 阶跃 ..... | 25 |
| 4.5 模糊控制仿真与模拟实验：10±1MM 阶跃 .....   | 29 |
| 第五章 总结 .....                      | 32 |
| 5.1 实验收获总结 .....                  | 32 |
| 5.2 实验中的不足 .....                  | 33 |

|              |    |
|--------------|----|
| 5.3 展望 ..... | 33 |
|--------------|----|

## 摘要

本课程就三自由度直升机系统和磁悬浮设备，对 PID 控制和模糊控制展开仿真实验和实际实验。针对三自由度无人机系统，开展了俯仰、横侧、旋转三个自由度的 PID 控制实验，并就俯仰展开模糊控制实验；针对磁悬浮设备，开展了 10mm 定点、 $10\pm 1\text{mm}$  阶跃的 PID 控制实验，并就后者展开模糊控制实验。

## 第一章 实验目的

- 掌握 PID 控制算法的基本原理和常见的 PID 整定方法。通过调整 PID 参数的过程，深刻体会这些参数对系统稳定性的影响。
- 掌握模糊控制的基本原理，熟悉模糊化和构建模糊规则库的过程，实践模糊 PID 控制，并与 PID 控制进行比较。
- 通过进行实际实验，深刻理解控制的具体作用过程。

## 第二章 实验原理

### 2.1 PID 控制器基本原理

PID 控制器（比例-积分-微分控制器）是一种在工业自动化领域广泛使用的反馈控制器，它通过设定值与实际输出值之差的比例（P）、积分（I）和微分（D）来减少系统的误差。

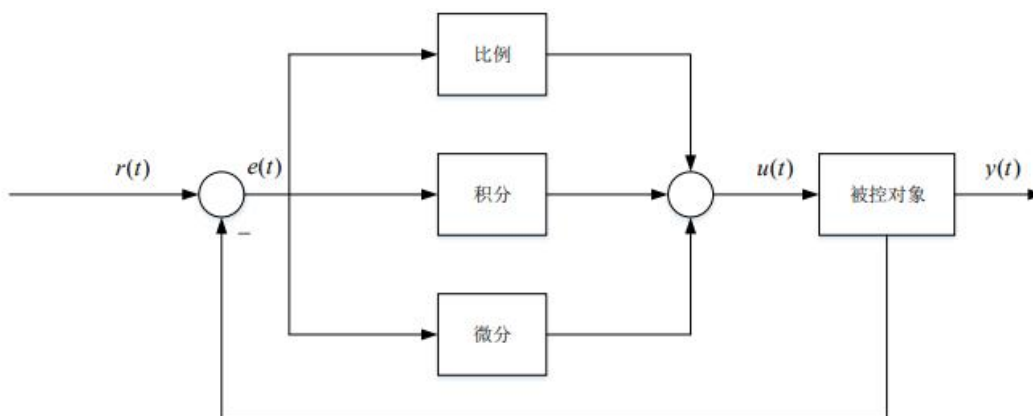


图 2.1 PID 控制器框图

- 比例控制（Proportional Control, P）：

$$P_{out} = K_p e(t)$$

$$H_p(s) = K_p$$

比例控制作为 PID 控制中最基本的部分，直接根据当前误差的大小来调整控制量，响应快， $K_p$  增大可以减小系统的静态误差，但无法完全消除； $K_p$  过大可能导致超调增加，甚至产生振荡。

- 积分控制（Integral Control, I）：

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

$$H_i(s) = sK_i$$

积分控制通过对误差进行时间上的积分来放大误差，再调整以消除之。积分控制可以增强系统的稳定性，但过强也会导致系统超调或振荡。

- 微分控制（Derivative Control, D）：

$$D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$H_d(s) = K_d/s$$

微分控制通过计算误差的微分，可以预测系统未来的变化趋势，并提前进行修正。微分控制主要针对系统的动态误差，可以减小调节时间和超调量，使系统更加稳定，但过强也会带来超调或噪声。

- PID 控制：

$$PID_{out} = P_{out} + I_{out} + D_{out} = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$H(s) = K_p + sK_i + K_d/s$$

结合了三者的 PID 控制可以从静态和动态两方面对系统进行调节，综合把控超调量、调节时间等。

## 2.2 模糊控制器基本原理

模糊控制建立在模糊推理的基础上，是一种非线性控制策略，通过模糊语言表达操作经验以及常识推理规则。模糊控制器是一种语言型控制器，基础是模糊集理论，其把人的控制经验及推理纳入自动控制策略，结构如下图：

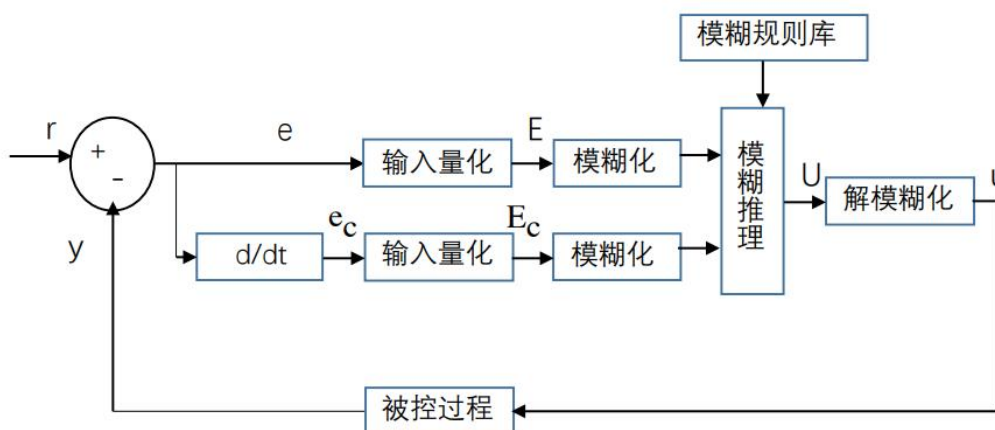


图 2.2-1 模糊控制器结构图

- 输入量化：将实际输入量映射到指定输入量。
- 模糊化：通过隶属度函数，计算输入变量在模糊论域中各模糊集合的隶属度，从而将其转化为一个模糊变量。模糊论域定义了一定量的模糊集合，实际应用中通常采用三角形或梯形隶属度函数，如下例子：

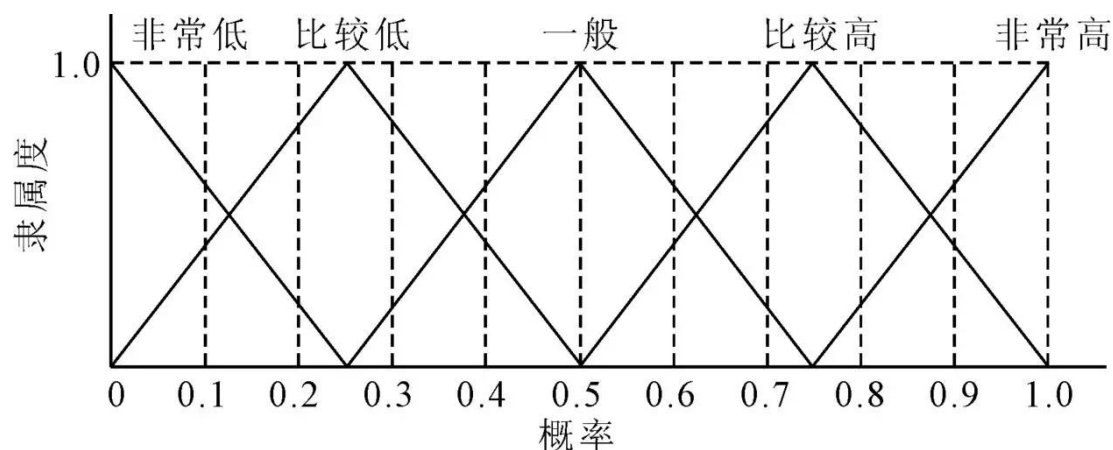


图 2.2-2 等分三角形隶属度函数

- 模糊规则库：作为模糊控制器的重要组成部分，由操作经验和专家知识总结得到，存放模糊规则。如下例子：

| $ec$ |  |    |    |    |    |    |    |    |
|------|--|----|----|----|----|----|----|----|
| $e$  |  | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB   |  | PB | PB | PM | PM | PS | ZO | ZO |
| NM   |  | PB | PB | PM | PS | PS | ZO | NS |
| NS   |  | PM | PM | PM | PS | ZO | NS | NS |
| ZO   |  | PM | PM | PS | ZO | NS | NM | NM |
| PS   |  | PS | PS | ZO | NS | NS | NM | NM |
| PM   |  | PS | ZO | NS | NM | NM | NM | NB |
| PB   |  | ZO | ZO | NM | NM | NM | NB | NB |

图 2.2-3 模糊控制规则库

- 模糊推理：根据输入模糊量，由模糊控制规则求解模糊关系方程，并获得模糊控制量的功能部分。常用的方法是最大最小推理。
- 解模糊化：从模糊控制作用空间到精确控制作用空间的映射，常用方法有最大隶属度法、取中位法、加权平均法等。
- 输入输出量化：将实际输入变量的基本论域变换为相应论域。

模糊控制不需要掌握受控对象的精确数学模型，而根据人工控制规则组织控制决策表。系统的动态性能好，稳态性能差的缺点可以加入 PID 控制器来弥补。本文后续的实验中，模糊控制指包含 PID 控制的模糊控制。以下给出了模糊 PID 控制器的结构图。

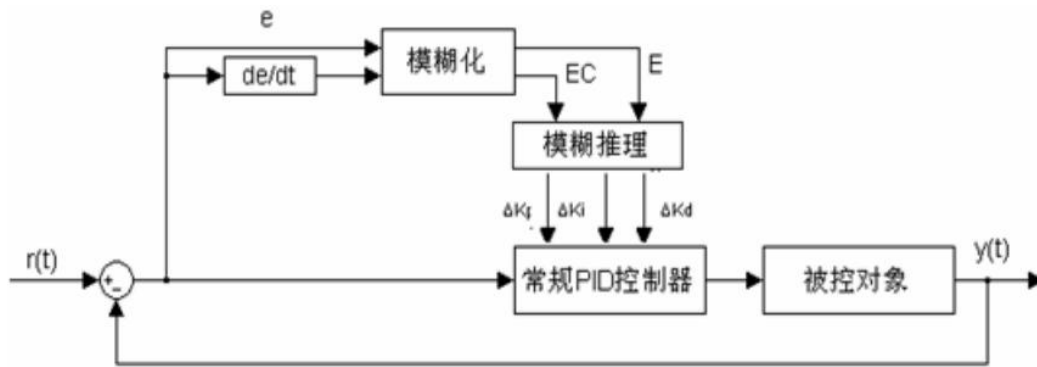


图 2.2-4 模糊 PID 控制器结构图

### 第三章 三自由度直升机系统的仿真和控制

#### 3.1 直升机实验设备

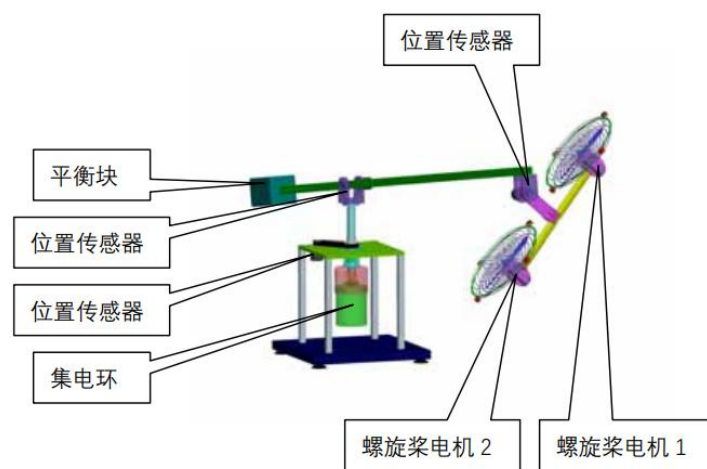


图 3.1-1 直升机实验设备示意图

三自由度直升机的示意图如上，其能进行俯仰、横测、旋转三个维度的运动。

- 俯仰：以基座为支点，螺旋桨旋转产生升力带动俯仰运动。
- 横侧：以基座为支点，两个螺旋桨的速度差带动横侧运动。
- 旋转：螺旋桨横侧轴倾斜时产生的水平方向升力带动旋转运动。

#### 3.2 PID 控制仿真与模拟实验：俯仰

- 物理模型：

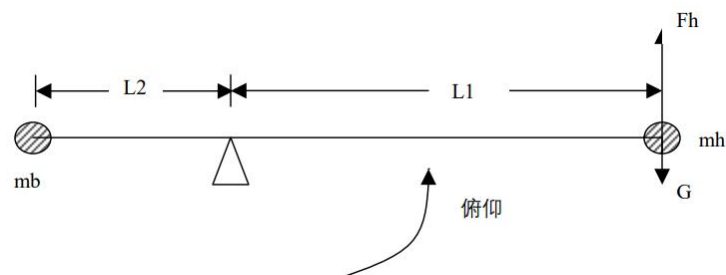


图 3.2-1 直升机俯仰运动物理模型

有：

$$J_e \ddot{\epsilon} = l_1 F_h - l_1 G = l_1 (F_1 + F_2) - l_1 G = K_c l_1 (V_1 + V_2) - T_g = K_c l_1 V_s - T_g$$

其中：

升力 $F_h = F_1 + F_2$ ;

俯仰轴的转动惯量 $J_e = m_h l_1^2 + m_b l_2^2 = 0.427 \text{Kgm}^2$ ;

电压 $V_1$ 、 $V_2$ 产生升力 $F_1$ 、 $F_2$ ， $V_s = V_1 + V_2$ ;

螺旋桨电机的升力常数 $K_c = 1.58 \text{N/V}$ ;

支点到电机、平衡块的距离 $l_1 = 0.3145 \text{m}$ 、 $l_2 = 0.2405 \text{m}$ ;

由俯仰轴 G 产生的有效重力矩 $T_g = m_h g l_1 - m_b g l_2$ ;

螺旋桨和平衡块的质量 $m_h = 2.629 \text{Kg}$ 、 $m_b = 2.48 \text{Kg}$ ;

俯仰轴的旋转加速度 $\varepsilon$ 。

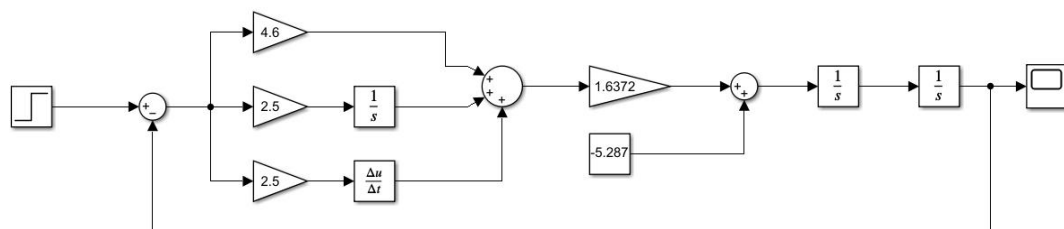
有：

$$V_s = K_{ep}(\varepsilon - \varepsilon_c) + K_{ei} \int (\varepsilon - \varepsilon_c) + K_{ed} \dot{\varepsilon}$$

闭环传函为：

$$\frac{\varepsilon(s)}{\varepsilon_c(s)} = \frac{-\frac{K_c K_{ep} l_1}{J_e}}{s^2 - \frac{K_c K_{ed} l_1}{J_e} s - \frac{K_c K_{ep} l_1}{J_e}}$$

● 仿真实验：



$$K_p = 4.6, K_i = 2.5, K_d = 2.5$$

图 3.2-2 俯仰运动仿真实验框图



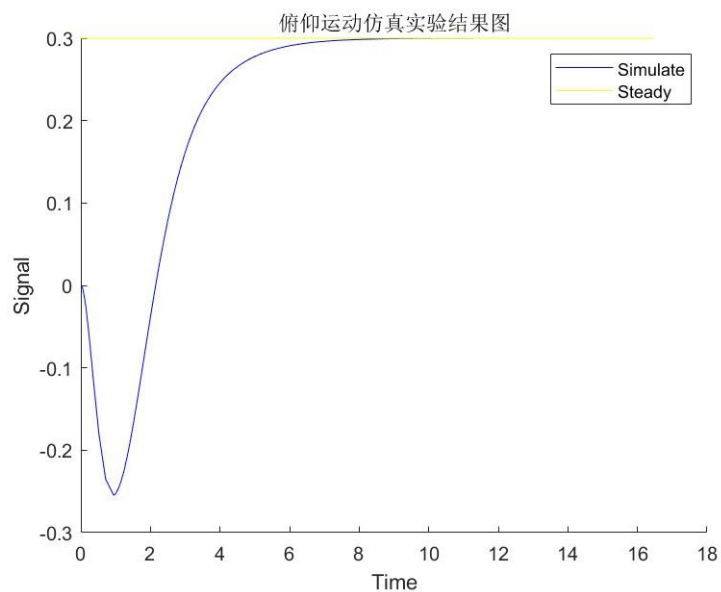
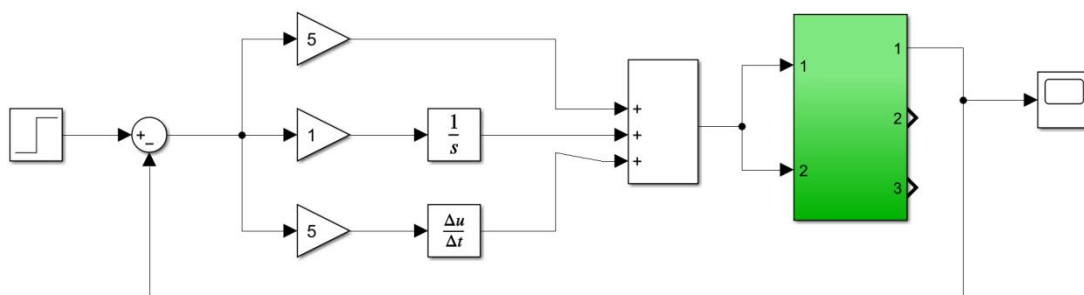


图 3.2-3 俯仰运动仿真实验结果图

由上图可知，系统的响应十分快，能快速达到稳态值附近，且超调较小。

$$\sigma = 0, t_r = 4.1s, e_{ss} = 0, t_s = 7.7s$$

● 实际实验：



$$K_p = 5, K_i = 1, K_d = 5$$

图 3.2-4 俯仰运动实际实验框图

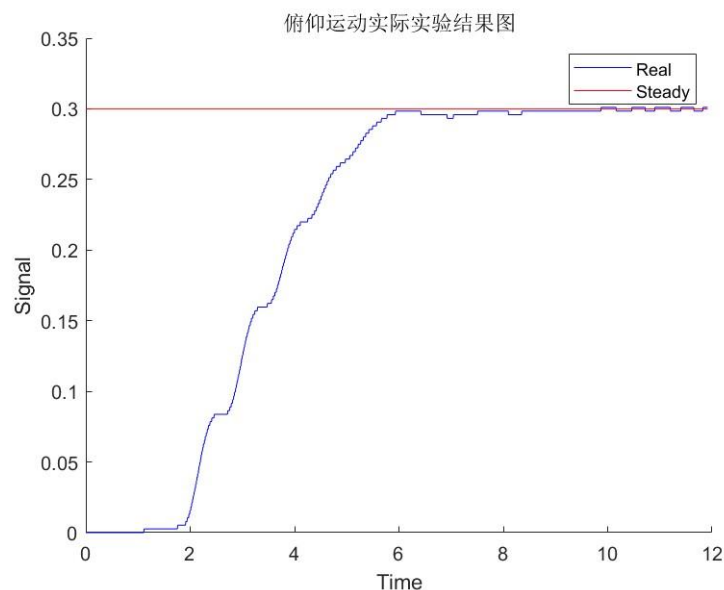


图 3.2-5 俯仰运动实际实验结果图

由上图可见，在该组 PID 控制系数的控制下，系统的工作性能良好：能够较快抵达指定俯仰角度；在到达指定角度后，只进行小幅度振动。

- 仿真与实际对比

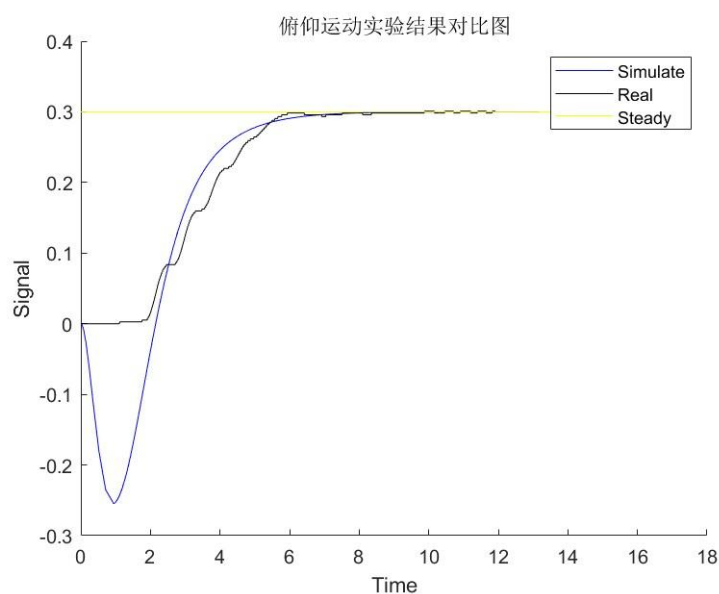


图 3.2-6 俯仰运动实验结果对比图

对比上图的仿真曲线和真实曲线可以发现，后者并没有出现前者一样多的超调。这说明仿真实验和实际实验还是存在较大差距的，这可能是由于对实验装置的物理模型进行分析时有较多的近似和简化。

### 3.3 PID 控制仿真与模拟实验：横侧

- 物理模型：

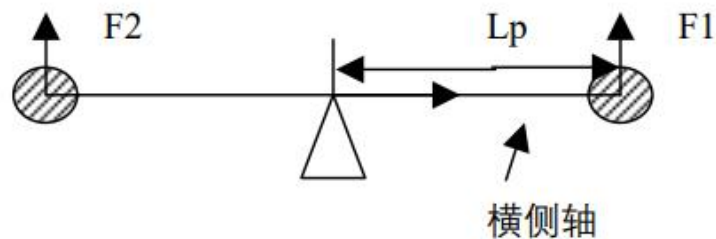


图 3.3-1 直升机横侧运动物理模型

有：

$$J_p \ddot{p} = l_p F_1 - l_p F_2 = K_c l_p (V_1 - V_2) = K_c l_p V_d$$

其中：

升力 $F_1$ 、 $F_2$ ；

横侧轴的转动惯量 $J_p = 2m_h l_p^2 = 0.0206 \text{ Kg m}^2$ ；

横侧轴到电机的距离 $l_p = 0.17 \text{ m}$ ；

横侧轴的转动加速度 $\ddot{p}$ 。

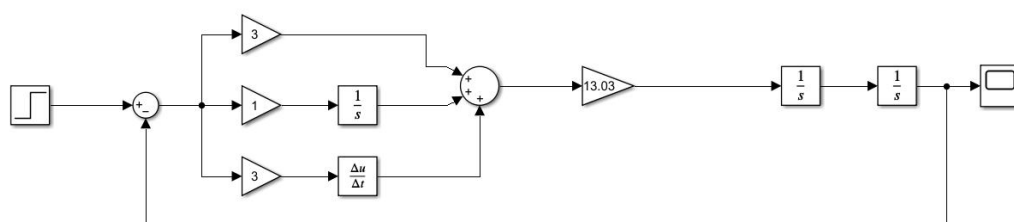
有：

$$V_d = K_{pp}(p - p_c) + K_{pi} \int (p - p_c) + K_{pd} \dot{p}$$

闭环传函为：

$$\frac{p(s)}{p_c(s)} = \frac{-\frac{K_c K_{pp} l_p}{J_p}}{s^2 - \frac{K_c K_{pd} l_p}{J_p} s - \frac{K_c K_{pp} l_p}{J_p}}$$

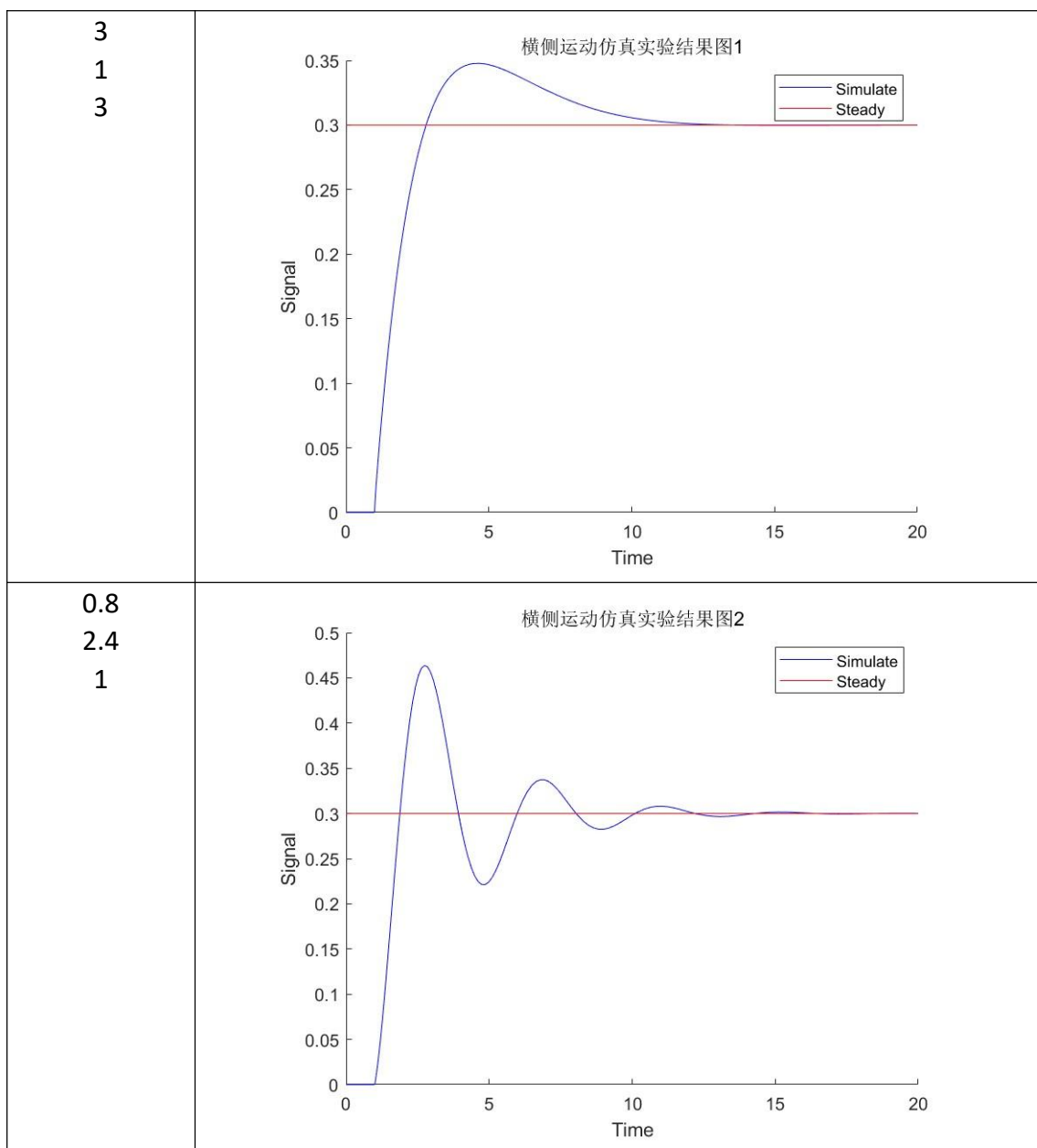
● 仿真实验：



$$K_p = 3, K_i = 1, K_d = 3$$

图 3.3-2 横侧运动仿真实验框图

|          |         |
|----------|---------|
| PID 控制系数 | 仿真实验结果图 |
|----------|---------|



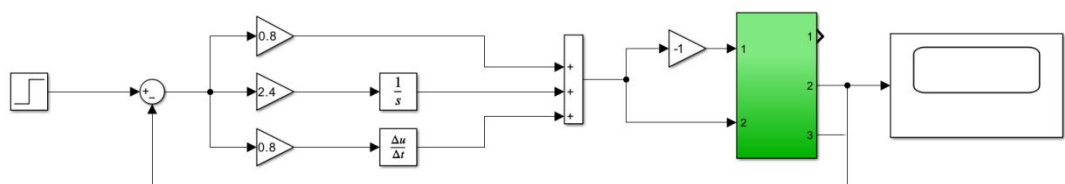
图表 3.3-3 横侧运动仿真实验结果图

对比以上两图，可以发现，第一组参数的效果明显好于第二组。其不但超调量小，且振动幅度小而数量少。

(第二组)

$$\sigma = 0.54, t_r = 2.2s, e_{ss} = 0, t_s = 10.5s, t_p = 3.8s$$

● 实际实验：



$$K_p = 0.8, K_i = 2.4, K_d = 0.8$$

图 3.3-4 横侧运动实际实验框图

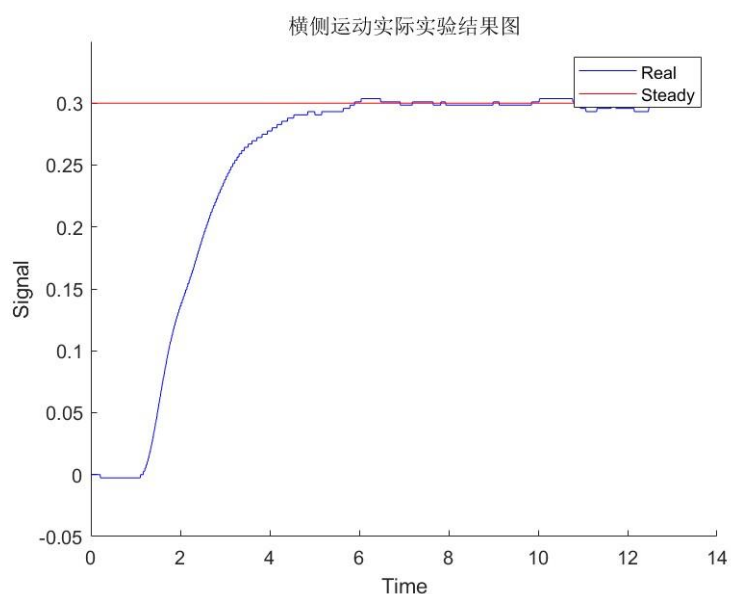


图 3.3-5 横侧运动实际实验结果图

由上图可见，在该两组 PID 控制系数的配合控制下，系统的工作性能良好：能够较快进入横侧运动状态，并且振动小。

- 仿真与实际对比

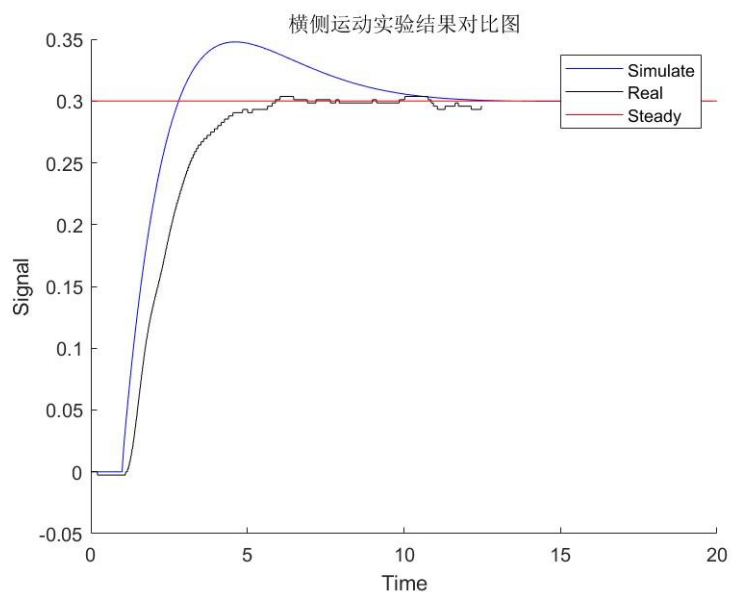


图 3.3-6 横侧运动实验结果对比图

对比上图的仿真曲线和真实曲线可以得到与俯仰运动一致的结论。

### 3.4 PID 控制仿真与模拟实验：旋转

本部分只完成旋转半周的任务。

- 物理模型：

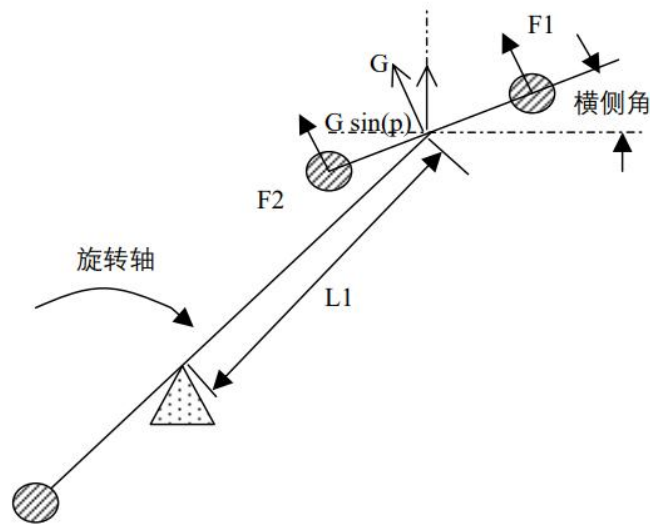


图 3.4-1 直升机旋转运动物理模型

有：

$$J_t \dot{r} = -G \sin(p) l_1$$

其中：

旋转速度  $r$ ；

旋转轴的转动惯量  $J_t = 0.427 \text{Kgm}^2$

横侧角  $p$ 。

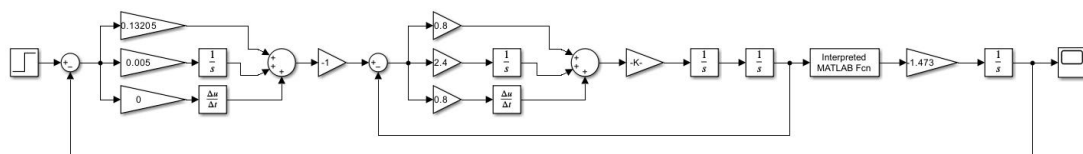
有：

$$p_c = K_{rp}(r - r_c) + K_{ri} \int (r - r_c) + K_{rd} \dot{r}$$

闭环传函为：

$$\frac{r(s)}{r_c(s)} = \frac{-\frac{K_{rp} G l_1 S + K_{ri} G l_1}{J_t}}{S^2 - \frac{K_{rp} G l_1}{J_t} S - \frac{K_{ri} G l_1}{J_t}}$$

● 仿真实验：



$K_{p1} = 0.13205$ ,  $K_{i1} = 0.005$ ,  $K_{d1} = 0$ ;  $K_{p2} = 0.8$ ,  $K_{i2} = 2.4$ ,  $K_{d2} = 0.8$  图

3.4-2 旋转运动仿真实验框图

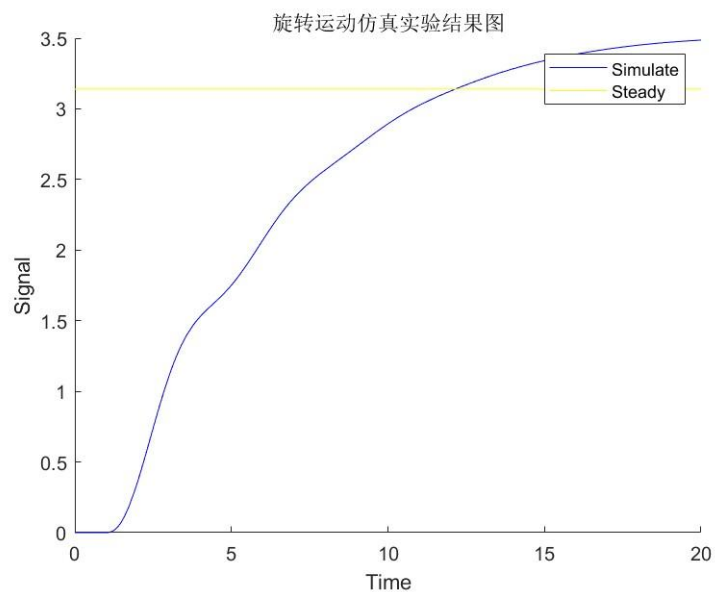
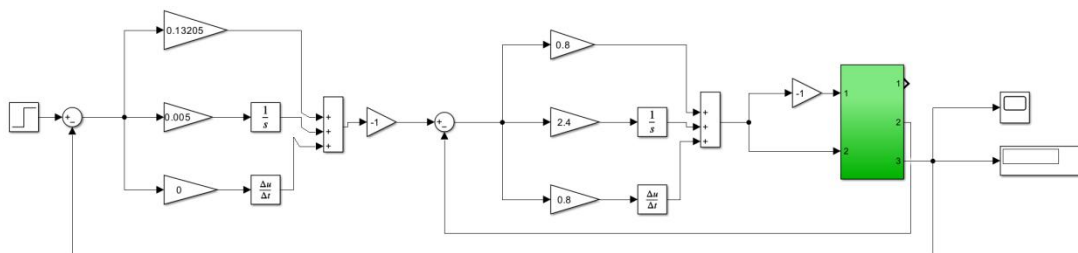


图 3.4-3 旋转运动仿真实验结果图  
由上图可知，仿真曲线最后收敛在指定值以上不远处。

$$\sigma = 0, t_r = 8.1s, e_{ss} = 0.114, t_s = 12.5s$$

● 实际实验：



$$K_{p1} = 0.13205, K_{i1} = 0.005, K_{d1} = 0; K_{p2} = 0.8, K_{i2} = 2.4, K_{d2} = 0.8$$

图 3.4-4 旋转运动实际实验框图

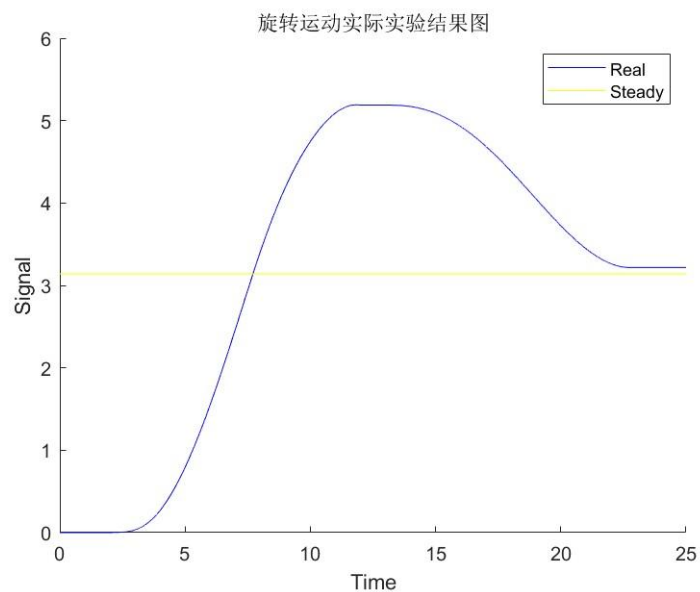


图 3.4-5 旋转运动实际实验结果图

由上图可知，在实际实验中，直升机很好地完成了旋转半周的运动任务，其先超出指定值一定范围，其后回到指定值附近。在重复多次实验中，最终收敛的位置并不稳定，在指定值附近较大范围波动。

- 仿真与实际对比

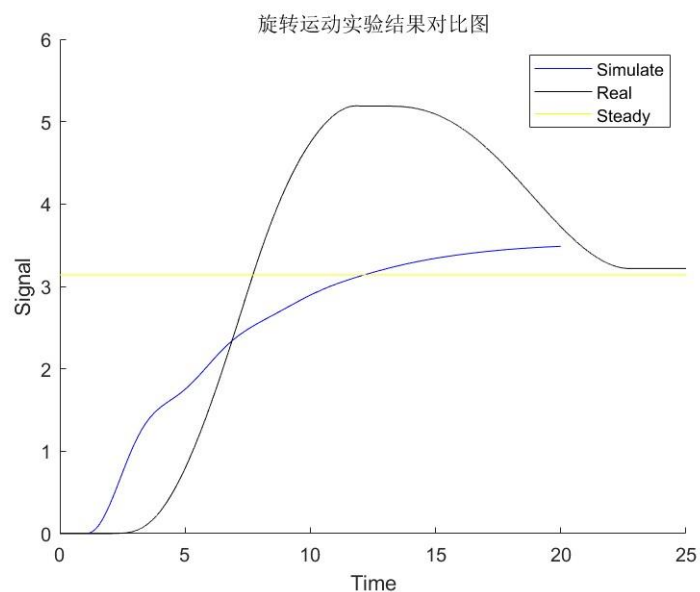


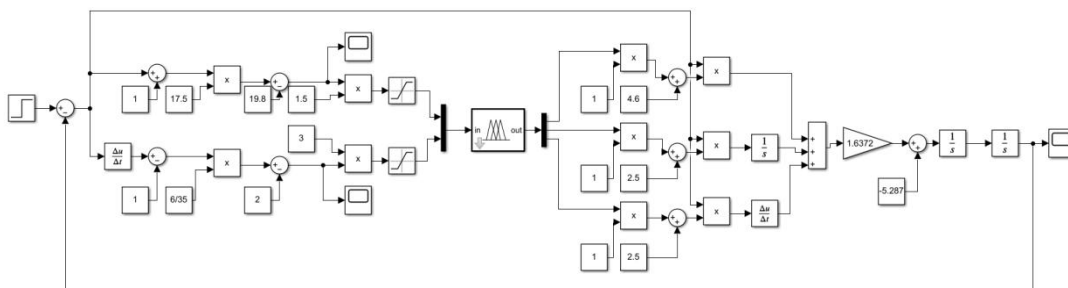
图 3.4-6 旋转运动实验结果对比图

实验中，直升机平稳地旋转了接近整周，又回到大概半周的位置，很好地完成了任务。

### 3.5 模糊控制仿真与模拟实验：俯仰

- 仿真实验





$$K_p = 4.6, K_i = 2.5, K_d = 2.5$$

图 3.5-1 俯仰运动模糊控制仿真实验框图

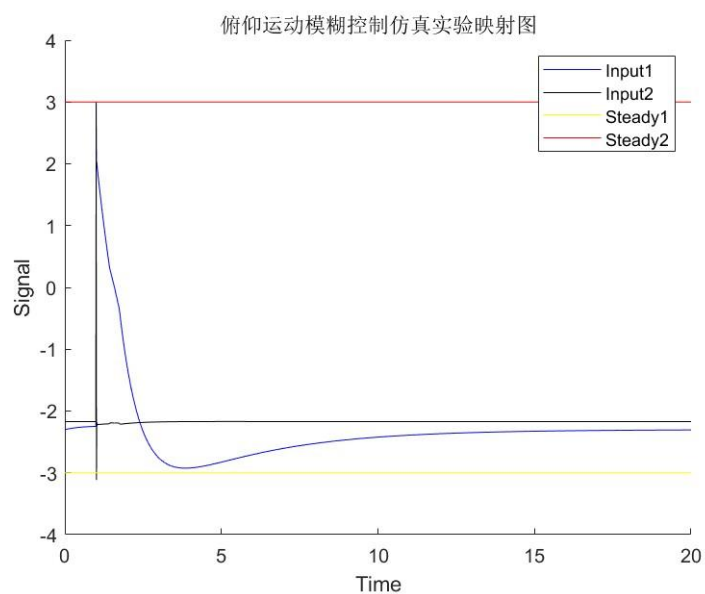


图 3.5-2 俯仰运动模糊控制仿真实验映射图

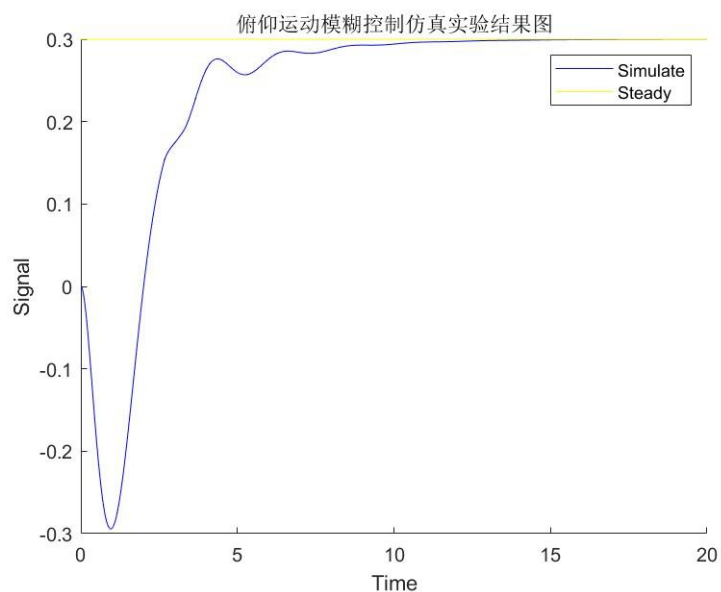


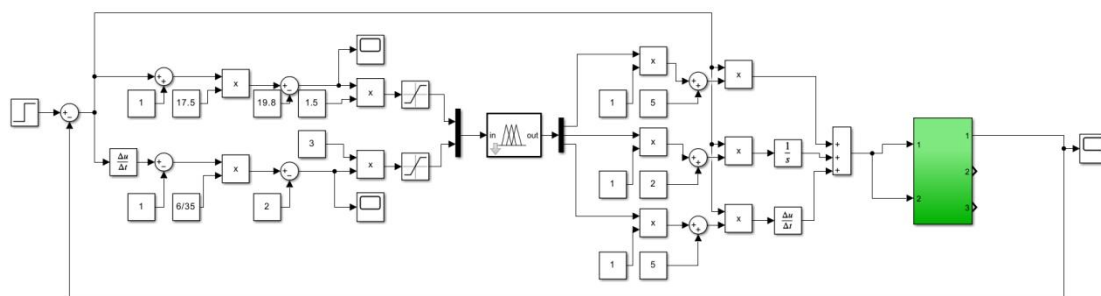
图 3.5-3 俯仰运动模糊控制仿真实验结果图

由上图可见，输入很好地映射到了[-3,3]的范围，仿真实验曲线的响应较快，

超调也较小。

$$\sigma = 0, t_r = 3.7s, e_{ss} = 0, t_s = 4.6s$$

# ● 实际实验



$$K_p = 5, K_i = 2, K_d = 5$$

图 3.5-4 俯仰运动模糊控制实际实验框图

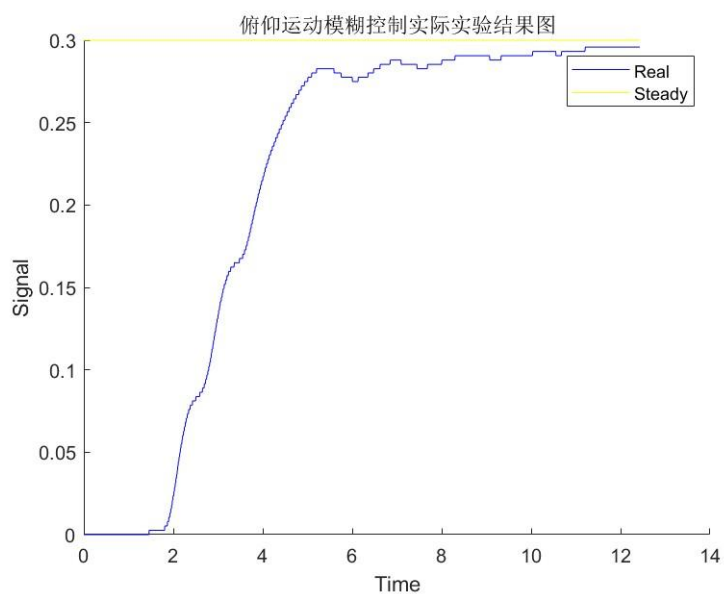


图 3.5-5 俯仰运动模糊控制实际实验结果图

由上图可知，在模糊控制下，直升机很快地接近指定的俯仰角，并以极小的振动继续逼近，效果较好。

# ● 仿真与实际对比

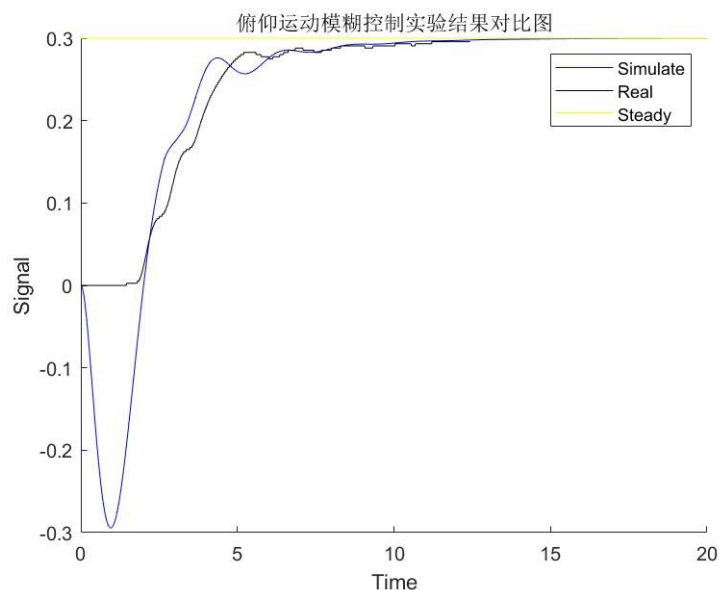


图 3.5-6 俯仰运动模糊控制实验结果对比图

由上图可知，两曲线的变化基本保持一致。

#### ● PID 控制与模糊控制对比

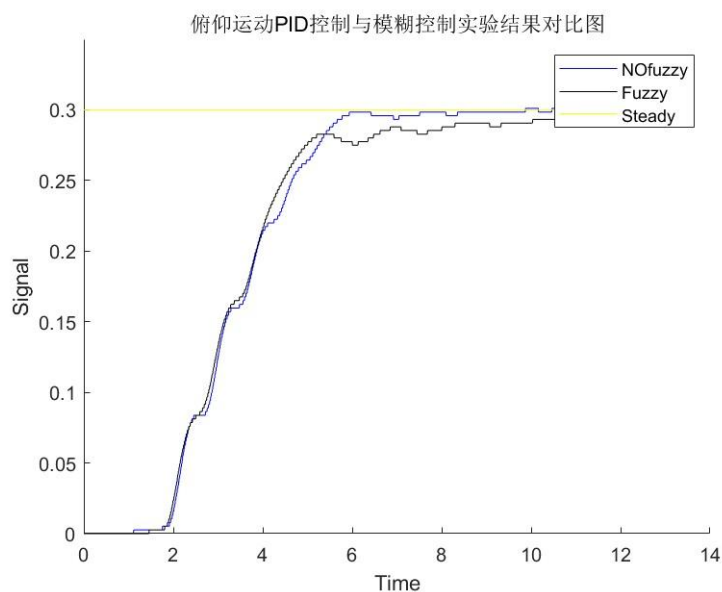


图 3.5-7 俯仰运动 PID 控制与模糊控制实验结果对比图

对比上图的 PID 控制实际曲线和模糊控制实际曲线，可以发现，后者的调节时间更短，但是最终位置没有前者准确，这说明模糊控制的加入可以改善系统的稳定性，主要的改进在动态部分。

## 第四章 磁悬浮实验设备的仿真和控制

### 4.1 磁悬浮设备的原理

磁悬浮技术利用磁铁“同名相斥，异性相吸”的性质，通过控制磁场力的大小和方向，使物体悬浮在空中，具有广泛的应用。如下给出了实验设备的结构图，当电磁铁绕组中通电时，会对小球产生电磁力，控制电流的大小，即可操控小球的悬浮状态。

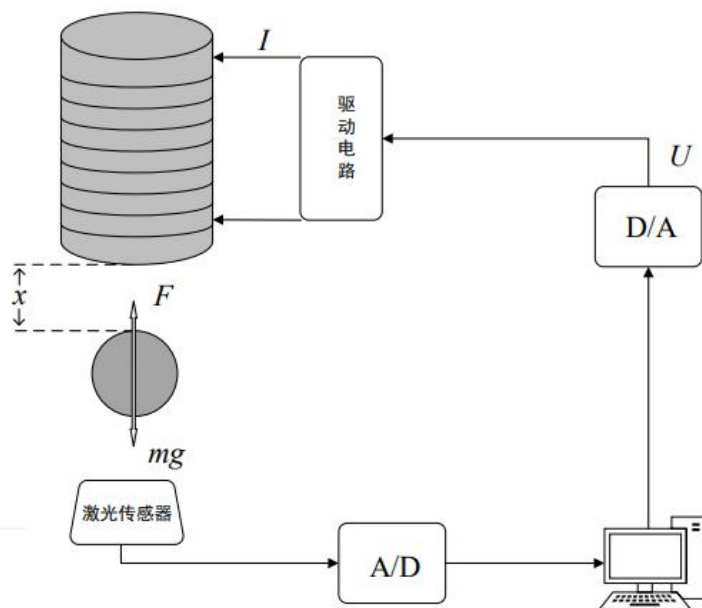


图 4.1-1 磁悬浮设备示意图

磁悬浮系统是一个典型的非线性复杂系统，受电磁干扰、温度、风力（主要指同时操作的三自由度直升机的风力）等因素的影响。由于系统只有电磁力和小球重力平衡这一个闭环稳态，其具有开环不稳定性。

实验中用激光传感器来测量小球的悬空高度（计挨着电磁铁绕组为 0，向下为负方向），通过高度数据的变化情况来衡量系统的稳定性。

#### 4.2 磁悬浮设备的物理模型

##### ● 动力学方程：

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F(i, x) + mg \quad (1)$$

其中：

小球质心与电磁铁磁极间气隙（以磁极面为零点） $x$ ；

小球质量  $m = 94g$ ；

电磁吸力  $F(i, x)$ ；

重力加速度  $g$ 。

线性化处理：

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = k_i(i - i_0) + k_x(x - x_0) = \frac{2Ki_0}{x_0^2}i - \frac{2Ki_0^2}{x_0^3}x \quad (1)'$$

其中：

平衡电流  $i_0 = 0.3943A$ ；

平衡位移  $x_0 = 0.01m$ ；

平衡点处电磁力对电流的刚度系数  $k_i = F_i(i_0, x_0) = \frac{2Ki_0}{x_0^2}$ ；

平衡点处电磁力对气隙的刚度系数  $k_x = F_x(i_0, x_0) = -\frac{2Ki_0^2}{x_0^3}$ 。

拉普拉斯变换后，得：

$$X(s)s^2 = \frac{2Ki_0}{mx_0^2}I(s) - \frac{2Ki_0^2}{mx_0^3}X(s)$$

- 电磁力模型：

$$R(x) = \frac{2x}{\mu_0 A} + \frac{1}{\mu A_0} \text{ (后项可忽略)}$$

$$\psi(i, x) = N\phi(i, x) = N \frac{Ni}{R(x)} = \mu_0 AN^2 \frac{i}{2x}$$

$$W_m(i, x) = \frac{1}{2}L(i, x)i^2 = \frac{1}{2} \frac{\psi(i, x)}{i} i^2 = \frac{\mu_0 AN^2 i^2}{4x}$$

$$F(i, x) = \frac{dW_m(i, x)}{dx} = -\frac{\mu_0 AN^2}{4} \left(\frac{i}{x}\right)^2 \quad (2)$$

其中：

空气磁导率 $\mu_0$ ；

铁芯的导磁截面积 A；

电磁铁线圈匝数 N = 2450 匝；

小球质心与电磁铁磁极间瞬时气隙 x；

电磁铁绕组中瞬时电流 i。

- 电磁铁的电流模型：

$$L(x) = L_1 + \frac{L_0}{1 + \frac{x}{a}} \approx L_1$$

$$U(t) = Ri(t) + \frac{d\psi(x, t)}{dt} = Ri(t) + \frac{d[L(x)i(t)]}{dt} = Ri(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

其中：

电阻 R = 13.8Ω；

小球没处于电磁场中时的静态电感 $L_1 = 135\text{mH}$ ；

小球处于电磁场中时线圈中增加的电感 $L_0$ ；

磁极附近一点到磁极表面的气隙 a。

- 功率放大器模型：

$$G_0(s) = \frac{U_{in}(s)}{I(s)} = \frac{K_a}{1 + T_a s}$$

其中：

功率放大器的增益 $K_a = 6.508$ ；

功率放大器的滞后时间常数 $T_a$ 。

- 系统平衡边界条件：

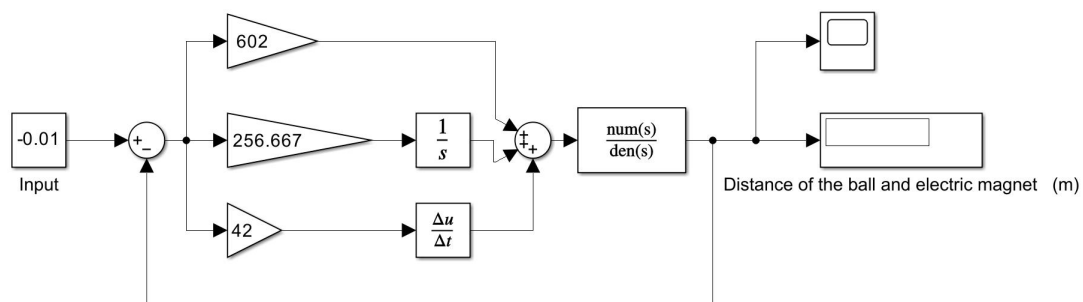
$$mg + F(i_0, x_0) = 0 \quad (4)$$

- 开环传函：

$$G_0(s) = \frac{7.6367}{s^2 - 1960}$$

#### 4.3 PID 控制仿真与模拟实验：10mm 定点

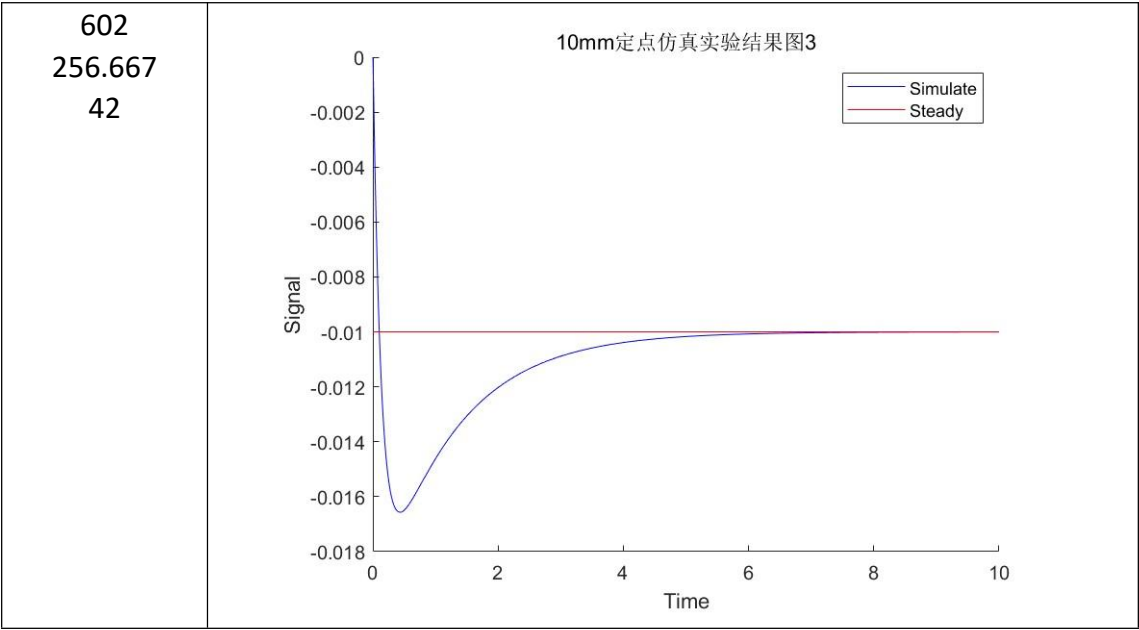
- 仿真实验



$$K_p = 602, K_i = 256.667, K_d = 42$$

图 4.3-1 10mm 定点仿真实验框图

| PID 控制系数         | 仿真实验结果图               |
|------------------|-----------------------|
| 520<br>120<br>40 | <p>10mm定点仿真实验结果图1</p> |
| 510<br>120<br>40 | <p>10mm定点仿真实验结果图2</p> |



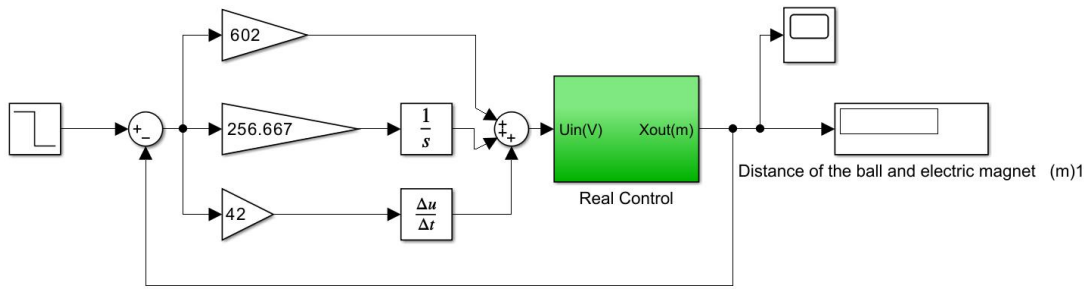
图表 4.3-2 10mm 定点仿真实验结果图

对比上图可以发现，在同时增大 $K_p$ 、 $K_i$ 和 $K_d$ 的时候，当前参数可以减小超调和调节时间，前者主要由于 $K_d$ 的增大，后者主要由于 $K_p$ 的增大。

（第三组）

$$\sigma = 0.67, t_r = 0.2s, e_{ss} = 0, t_s = 10.5s, t_p = 3.7s$$

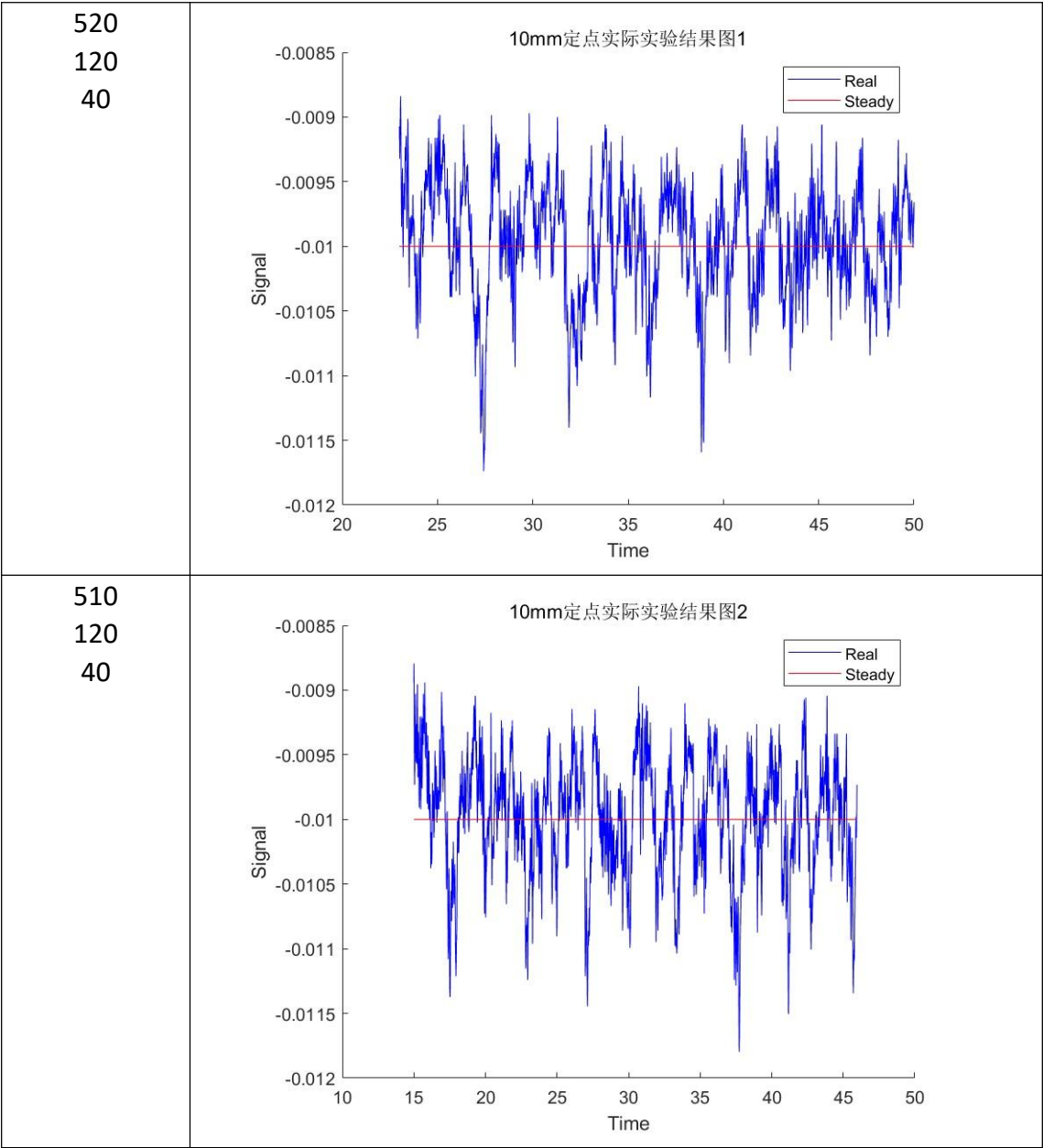
● 实际实验



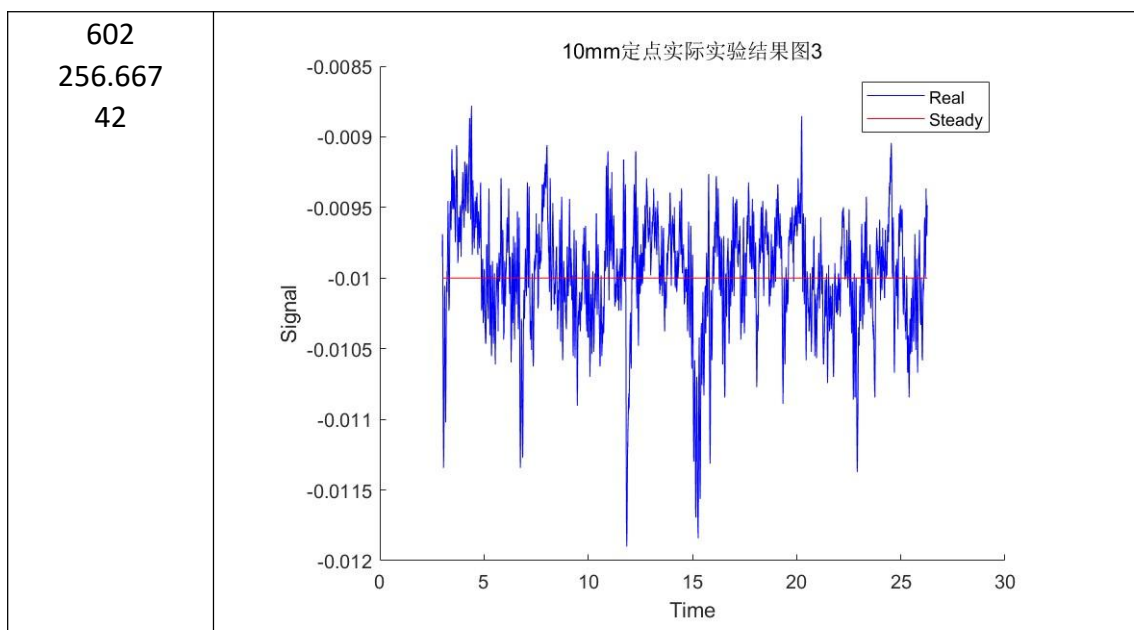
$$K_p = 602, K_i = 256.667, K_d = 42$$

图 4.3-3 10mm 定点实际实验框图

|          |         |
|----------|---------|
| PID 控制系数 | 实际实验结果图 |
|----------|---------|







图表 4.3-4 10mm 定点实际实验结果图

可以发现，在这三组参数的控制下，小球都能在 10mm 附近保持稳定，偏差范围主要在 5%以内，最大的偏差在 15%左右。三组参数都需要在系统运行 2 秒左右后才能释放小球找到稳态，其中第三组对释放位置的要求最小，自行进入稳态的能力较强。

#### ● 仿真与实际对比

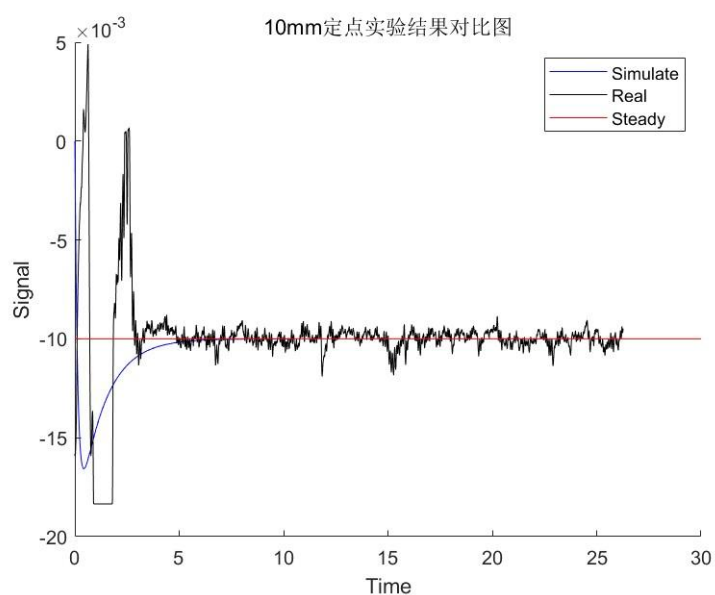


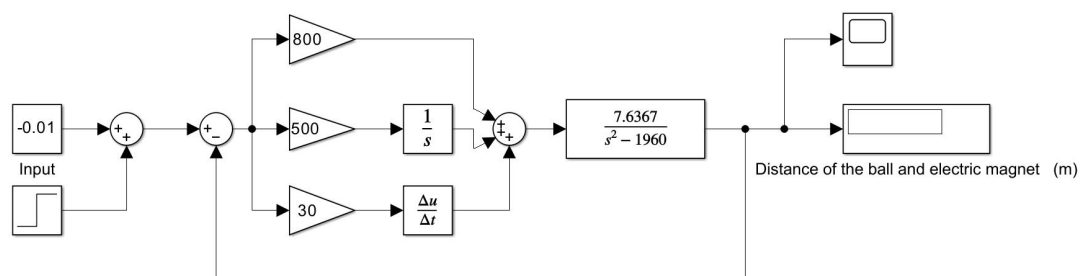
图 4.3-5 10mm 定点实验结果对比图（以上述第三组控制系数为例）

由上图可见，该组参数的实际实验效果极好。

经过其他多组参数的实验，可以发现，仿真实验和实际实验有着很大的差别，仿真实验结果良好的参数（超调量小、调节时间短）可能在实际实验中无法得到相应的良好结果。

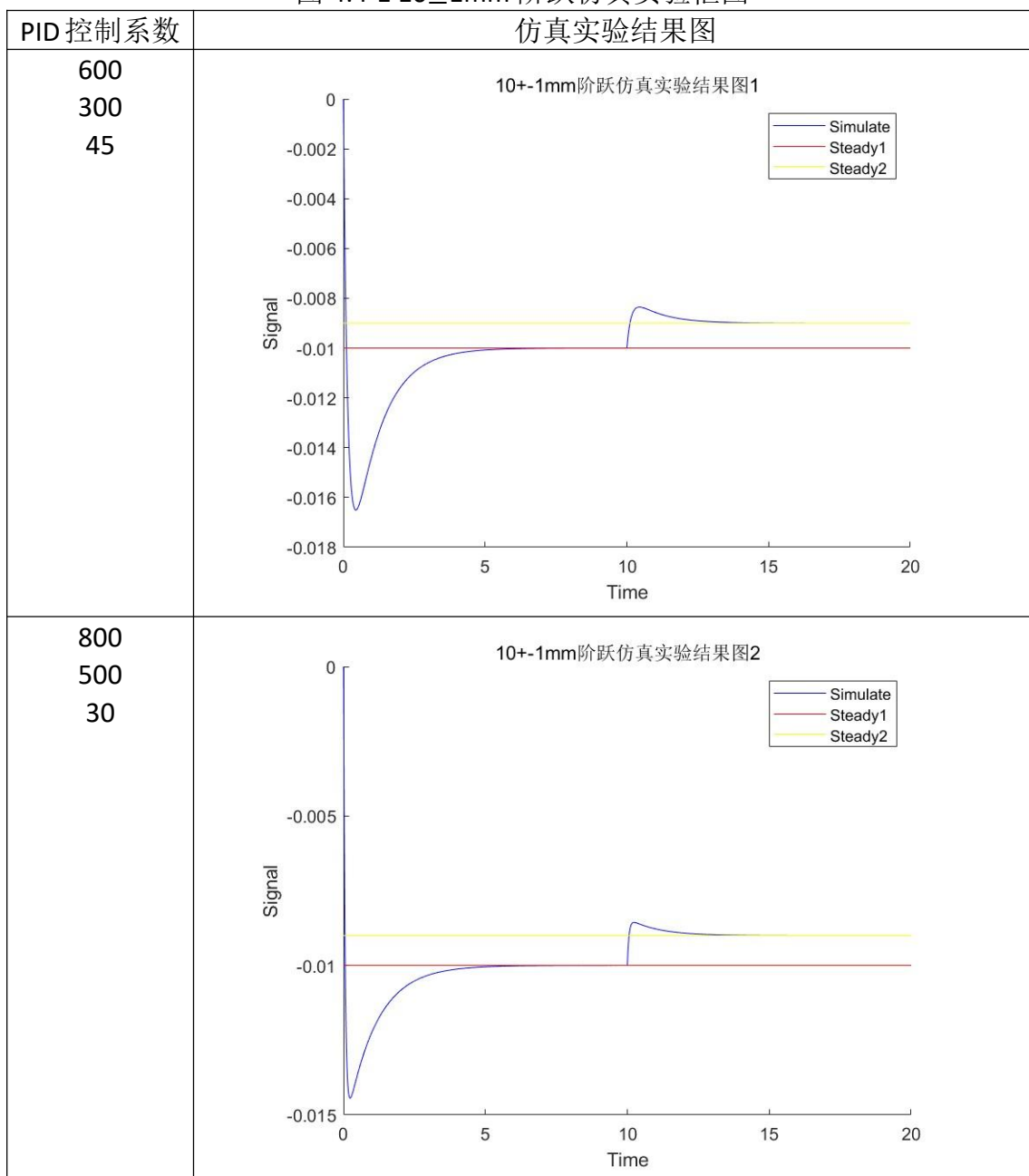
#### 4.4 PID 控制仿真与模拟实验：10±1mm 阶跃

##### ● 仿真实验



$$K_p = 800, K_i = 500, K_d = 30, t_{\text{阶跃}} = 10\text{s}$$

图 4.4-1 10±1mm 阶跃仿真实验框图



图表 4.4-2 10±1mm 阶跃仿真实验结果图

对比以上两组参数的响应曲线，可以发现第二组的更优。第二组的超调量较

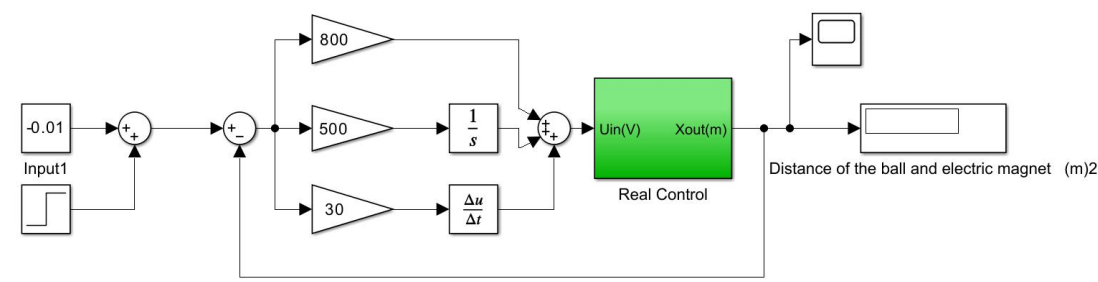
小，而且调节时间较短。

(第二组)

初响应 (0s) :  $\sigma = 0.46$ ,  $t_r = 0.3s$ ,  $e_{ss} = 0$ ,  $t_s = 3.7s$ ,  $t_p = 0.4s$

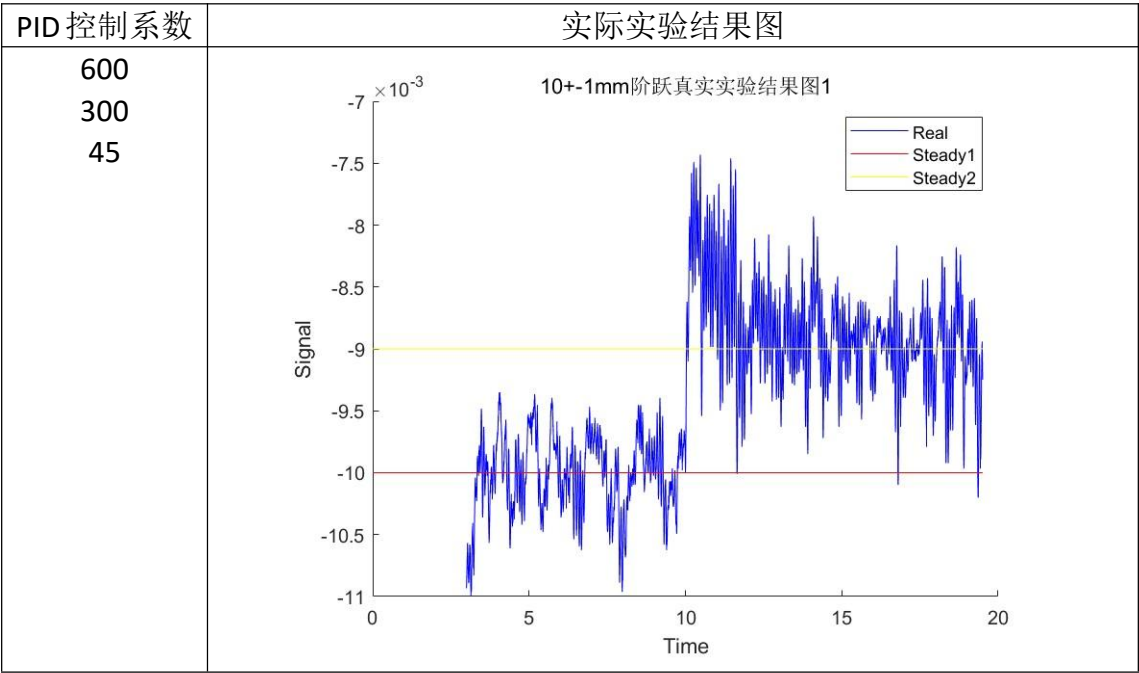
次响应 (10s) :  $\sigma = 0.45$ ,  $t_r = 10.2s$ ,  $e_{ss} = 0$ ,  $t_s = 11.2s$ ,  $t_p = 10.3s$

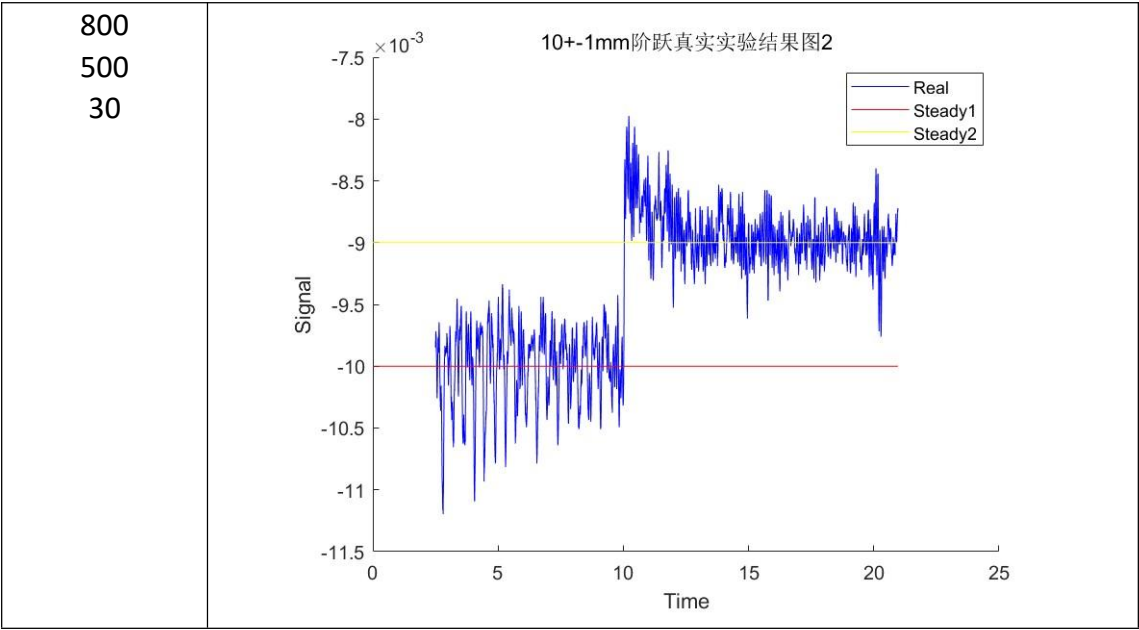
● 实际实验



$K_p = 800$ ,  $K_i = 500$ ,  $K_d = 30$ ,  $t_{\text{阶跃}} = 10s$

图 4.4-3 10±1mm 阶跃实际实验框图

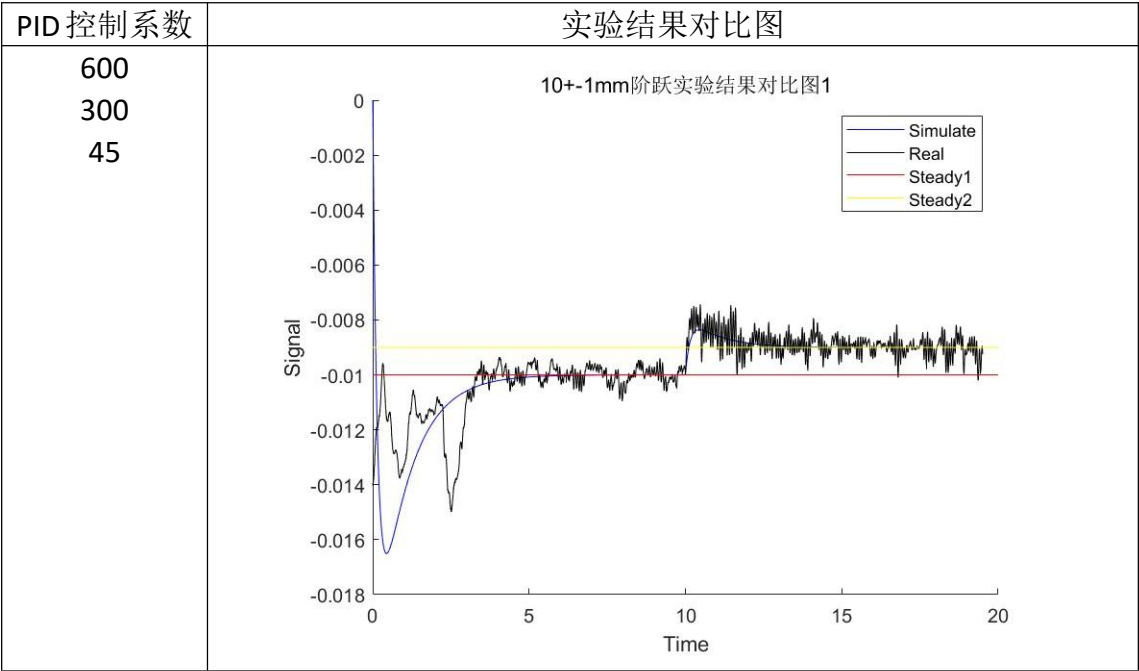


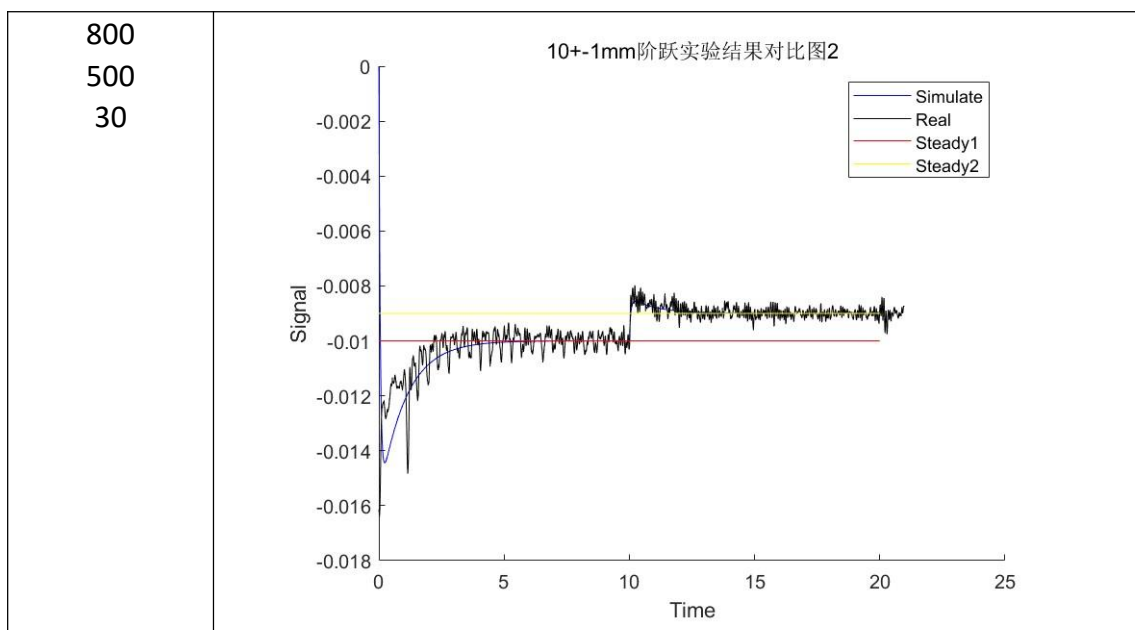


图表 4.4-4 10±1mm 阶跃实际实验结果图

两组参数都在实际实验中表现较好的效果，在 10 秒阶跃信号到来时，能自动稳定在新的位置，不会产生较大误差进而失控。偏差范围主要在 5%以内，最大的偏差在 10%左右。

● 仿真与实际对比



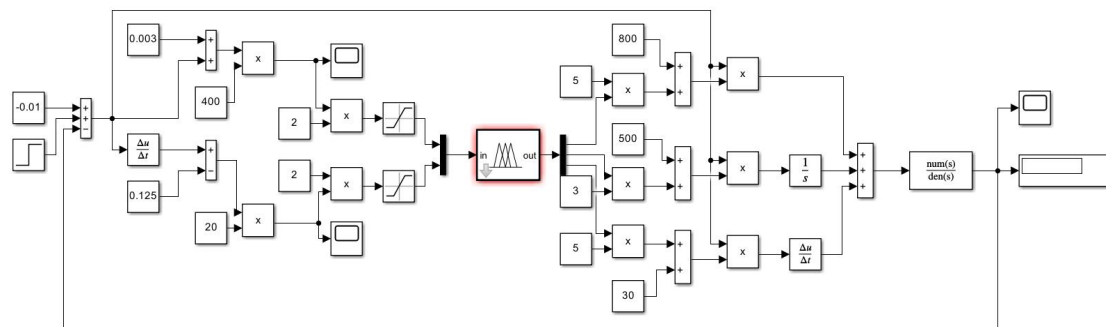


图表 4.4-5 10±1mm 阶跃实验结果对比图

对比两组参数可知，实际实验的结果与仿真实验的结果一致，第二组的效果更优。实际实验的曲线与仿真实验曲线重合良好，且偏差较小。

#### 4.5 模糊控制仿真与模拟实验：10±1mm 阶跃

##### ● 仿真实验



$$K_p = 800, K_i = 500, K_d = 30, t_{\text{阶跃}} = 10s$$

图 4.5-1 10±1mm 阶跃模糊控制仿真实验框图

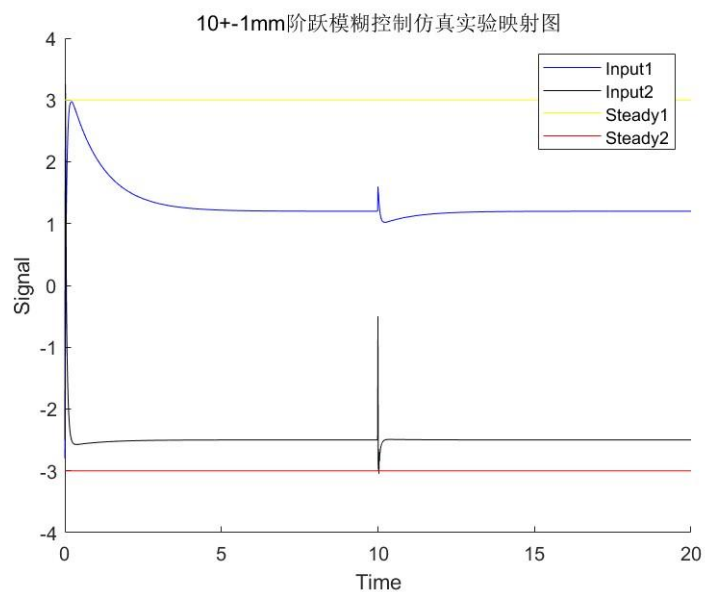


图 4.5-2 10±1mm 阶跃模糊控制仿真实验映射图

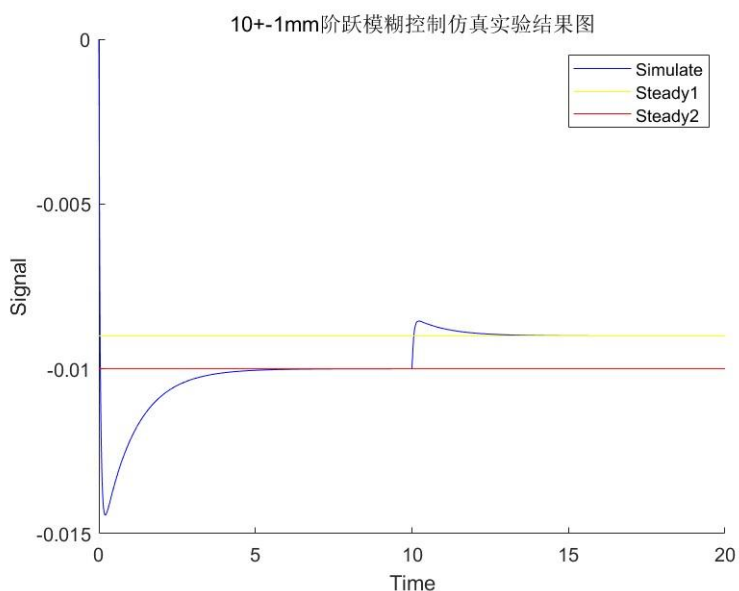


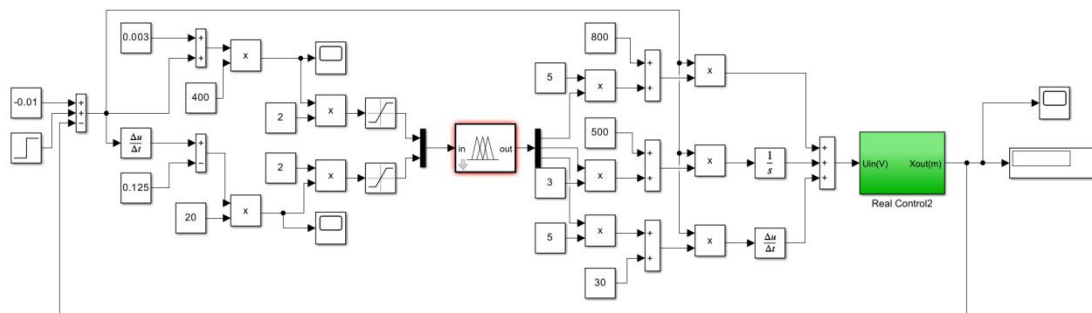
图 4.5-3 10±1mm 阶跃模糊控制仿真实验结果图

初响应（0s）： $\sigma = 0.45$ ,  $t_r = 0.3s$ ,  $e_{ss} = 0$ ,  $t_s = 3.7s$ ,  $t_p = 0.4s$

次响应（10s）： $\sigma = 0.44$ ,  $t_r = 10.2s$ ,  $e_{ss} = 0$ ,  $t_s = 11.2s$ ,  $t_p = 10.3s$

由上图可知，输入很好地映射到了[-3,3]的范围。与前文相同 PID 控制参数下的仿真实验结果相对比，可以发现，在模糊控制下，动态效应表现更好，响应时间短，超调量也较小。

#### ● 实际实验



$$K_p = 800, K_i = 500, K_d = 30, t_{\text{阶跃}} = 10\text{s}$$

图 4.5-4 10±1mm 阶跃模糊控制实际实验框图

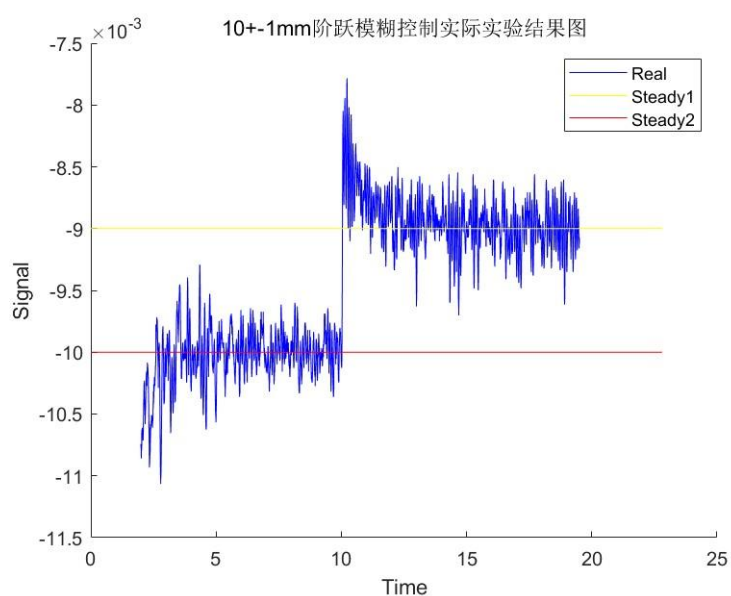


图 4.5-5 10±1mm 阶跃模糊控制实际实验结果图

在实际实验中，小球的稳定性较好，抖动比不加模糊控制时要小，但也有较小可能出现失控的情况。

- 仿真与实际对比

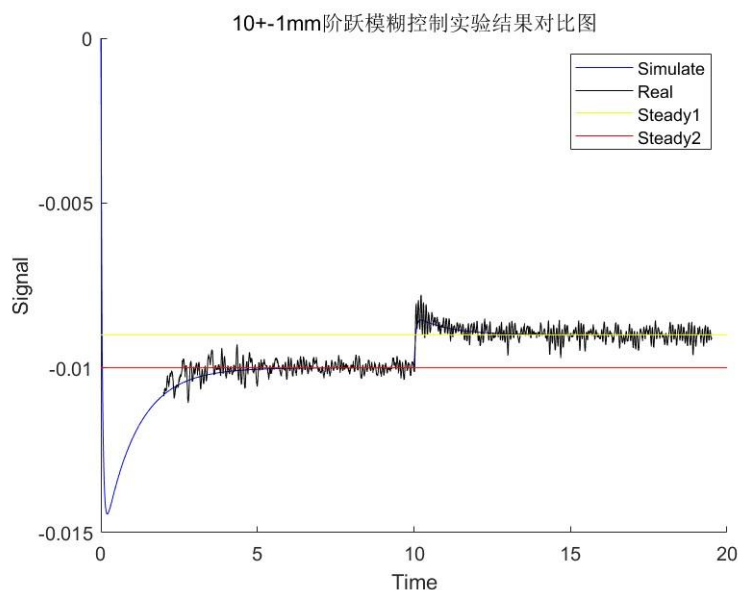


图 4.5-6 10±1mm 阶跃模糊控制实验结果对比图

由上图可以发现,实验结果与仿真结果的重合性较好,实验中的振动也较小。

#### ● PID 控制与模糊控制对比

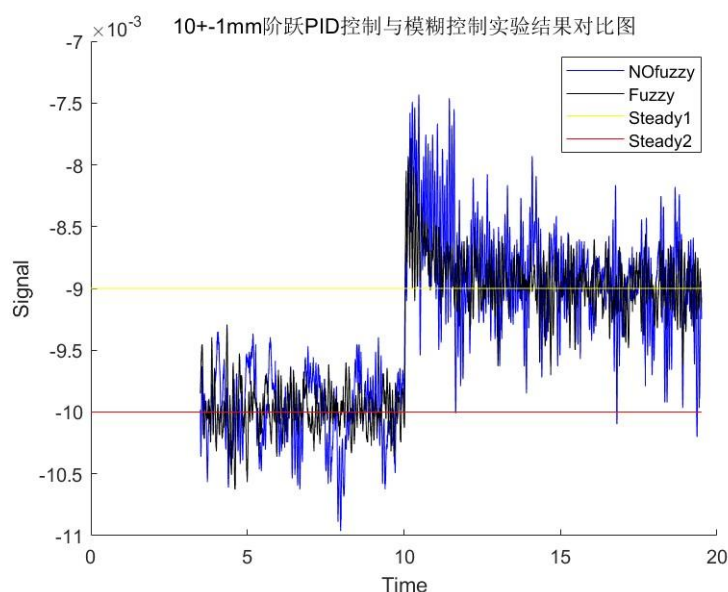


图 4.5-7 10±1mm 阶跃 PID 控制与模糊控制实验结果对比图

对比上图两条实际实验曲线,可以发现,相比于蓝色的 PID 控制,黑色的模糊控制的振动更小,说明模糊控制的加入可以增强系统的稳定性。动态部分小球还没有释放到位,不太方便观察。

## 第五章 总结

### 5.1 实验收获总结

在本课程的实验中,学习了 matlab 中 simulink 可视化仿真软件的使用方法,并结合具体的实验内容,实践了多组多情况的 PID 参数调整任务,体会了 PID 参数对系统稳定性的具体影响。还学习了模糊控制的相关内容,掌握了建立模糊化模型和构建模糊规则库的方法,并就模糊控制与 PID 控制对模型稳定性的改善能力进行了实验和分析。另外,结合实验情况和仿真结果,进一步理解了控制的具



体作用过程。

## 5.2 实验中的不足

没有掌握具体的整定方法，在调整参数时只能定性分析，没有方向性，也没有对各实验都寻找多组可行数据进行比较，具有一定的盲目性。

## 5.3 展望

在未来的学习中，掌握更多控制工程的相关知识，并学习具体的控制器设计方法。