

基于模糊控制的磁悬浮控制系统

石景元 3220103824 自动化(控制) 2202

友情提示: 推荐阅读 [HTML](#) 版本的报告, 为了批改方便, 请先阅读 [README.md](#)

1 背景介绍

磁悬浮系统是一种利用电磁力使物体悬浮的技术, 广泛应用于高科技领域。在本场景中, 一个钢球在电磁力和重力作用下悬浮, 需要通过控制控制电压 U 控制系统, 从而维持钢球在特定位置。在该控制系统中, 我们使用**模糊控制**方法。这是一种基于模糊逻辑的控制方法, 适用于处理不确定性和非线性问题, 通过模糊规则来调整控制输入, 使系统达到期望的输出。由于本次作业的代码与算法无关, 不在报告中附上代码。

2 状态空间模型求解

根据题意, 设系统状态变量为 $\hat{x} = [X, \dot{X}, I]^T$, $u = [U]^T$ 由下述系统方程:

可以得到系统的状态空间模型:

$$\begin{cases} F - G = m\ddot{X} \\ F = K(\frac{I}{X})^2 \\ U - K\frac{I}{X}\dot{X} = LI + IR \end{cases}$$

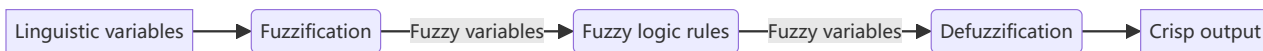
从而可以得到系统的状态空间模型

$$\begin{cases} \dot{x}(1) = x(2) \\ \dot{x}(2) = \frac{1}{m}(\frac{Kx^2(3)}{x^2(1)} - mg) \\ \dot{x}(3) = \frac{1}{L}[u(1) - K\frac{x(3)x(2)}{x(1)} - Rx(3)] \end{cases}$$

3 模糊控制系统建模

3.1 模糊控制介绍

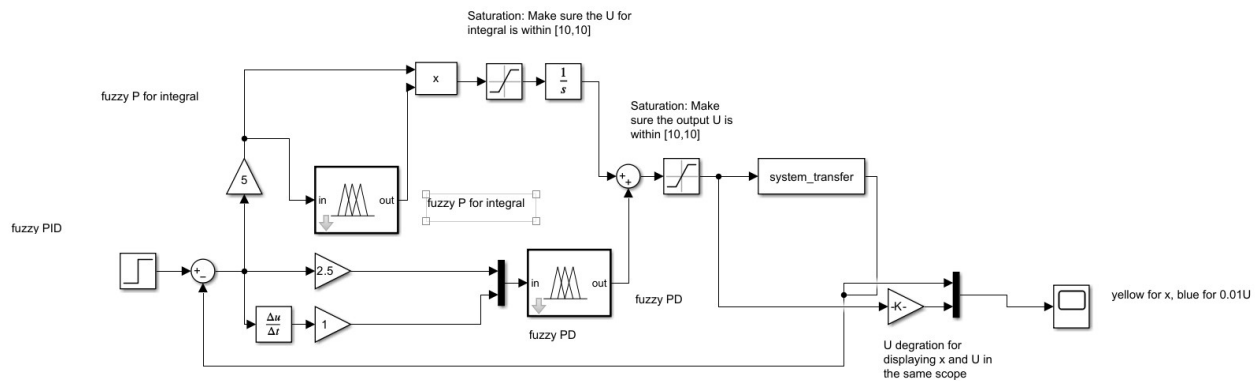
模糊控制通过将精确的输入变量(如位置误差)转换为模糊变量, 然后根据模糊逻辑规则进行推理, 最后将模糊结果转换为精确的控制输出。这一过程涉及模糊化、规则推理和解模糊化三个核心步骤, 能够有效处理不确定性和非线性问题, 使控制更加灵活和鲁棒。



简单模糊控制器是依赖误差和误差导数的简单模糊控制器, 本质上是一种非线性PD控制。简单模糊控制器由于不具有积分环节, 因而很难消除稳态误差, 尤其在变量分级不够多的情况下, 常常在平衡点附近产生小幅振荡。为此在模糊控制器中引入积分环节, 构成模糊PID控制。PID型模糊控制器的模糊规则数远大于PD型的模糊控制器, 为此引入两个模糊控制器, 分别实现模糊PD控制和模糊积分控制。

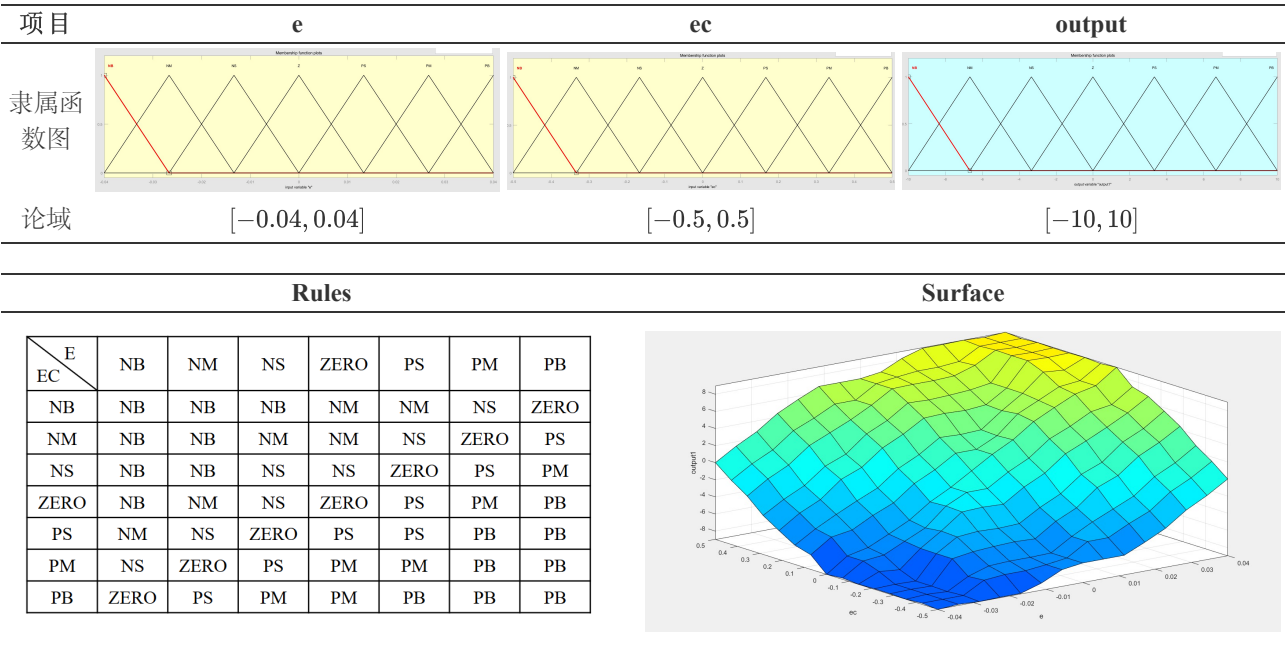
3.2 模糊PID控制

如图是利用simulink构建的**双模态PID模糊控制器**: 对I环节和PD环节的和做了进一步限幅, 使得控制器输出 U 落在 $[-10, 10]$,

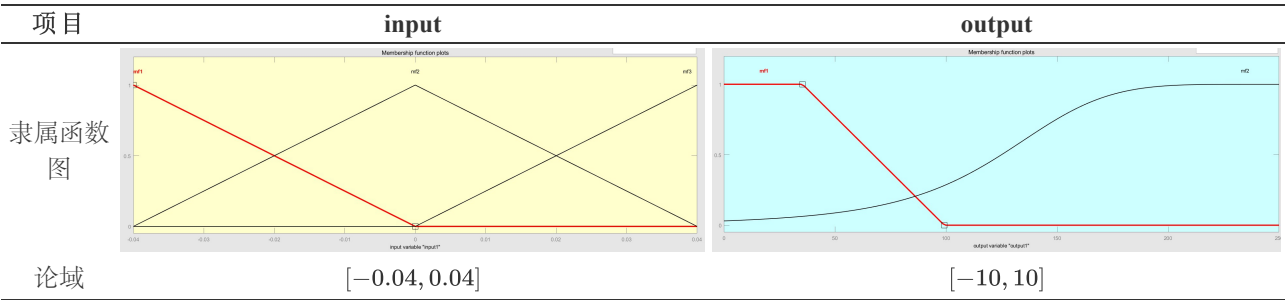


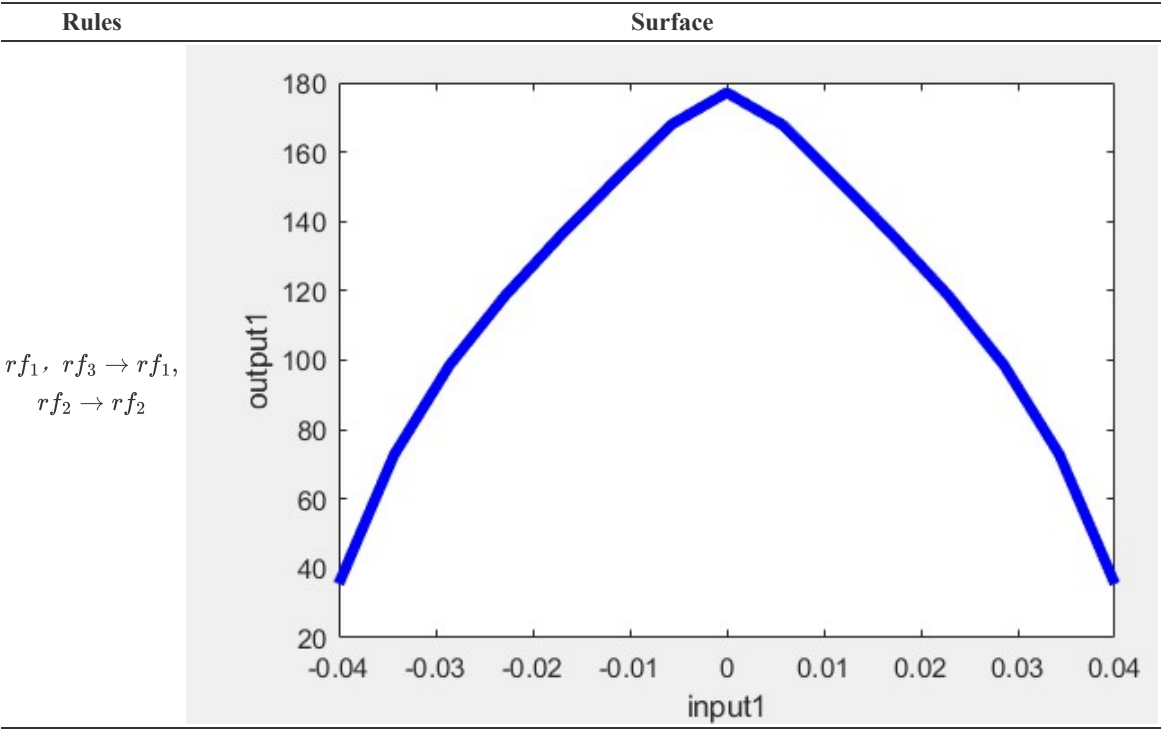
其中模糊P的比例是5，D的比例是1，I的比例是3.在上述系统中，我们对PID的输出做了限幅，这是为了保证最后系统的输出在论域范围内，从某种意义上来看，这个限幅器也是模糊控制的一部分，即根据规则将离散的规则插值为一个连续的曲面。

PD环节的隶属函数图及规则如下：



I环节的模糊P控制隶属函数及规则如下：

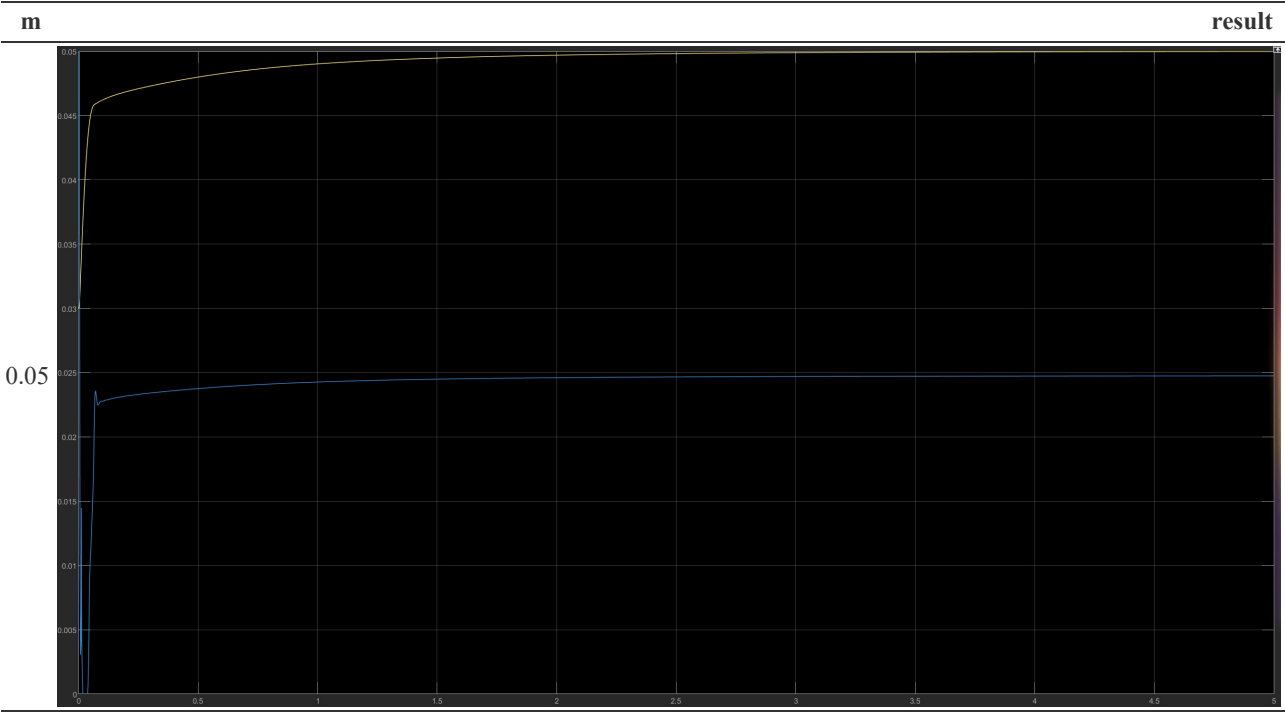


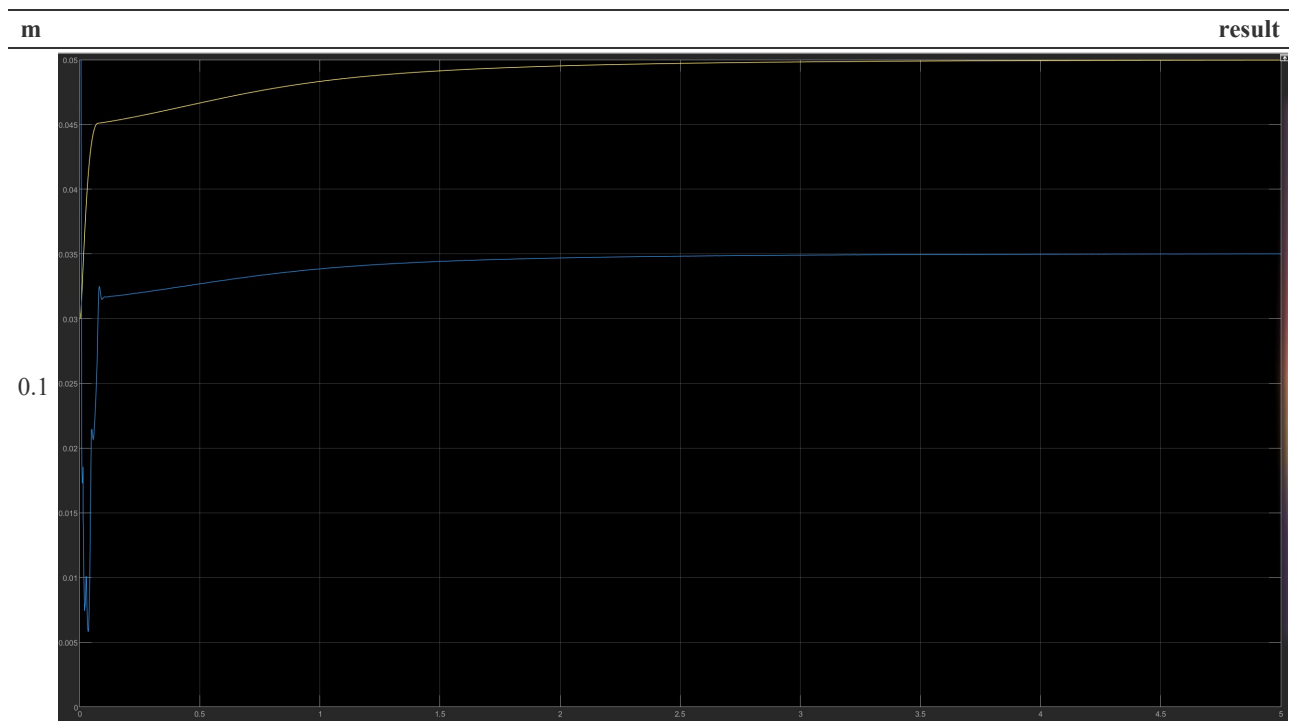


设置该规则的原因是特殊的PID控制器往往在接近真值时才开始积分。

限幅器：将I环节和PD环节的输出相加，然后做限幅，以满足输出范围为论域范围的要求

4 仿真结果



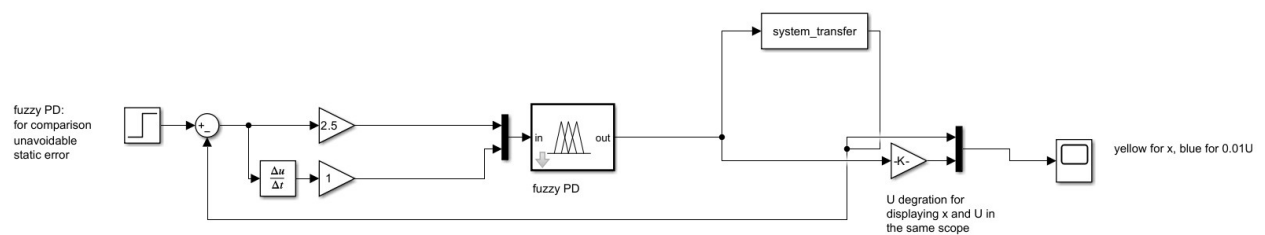


图中黄线为 x , 蓝线为 $U/100$, 可以看到两图中系统在3秒就已经收敛, 没有超调, 非常稳定。相比之下, m 增大后系统收敛变慢, U 的振荡增多, 系统相对不稳定。

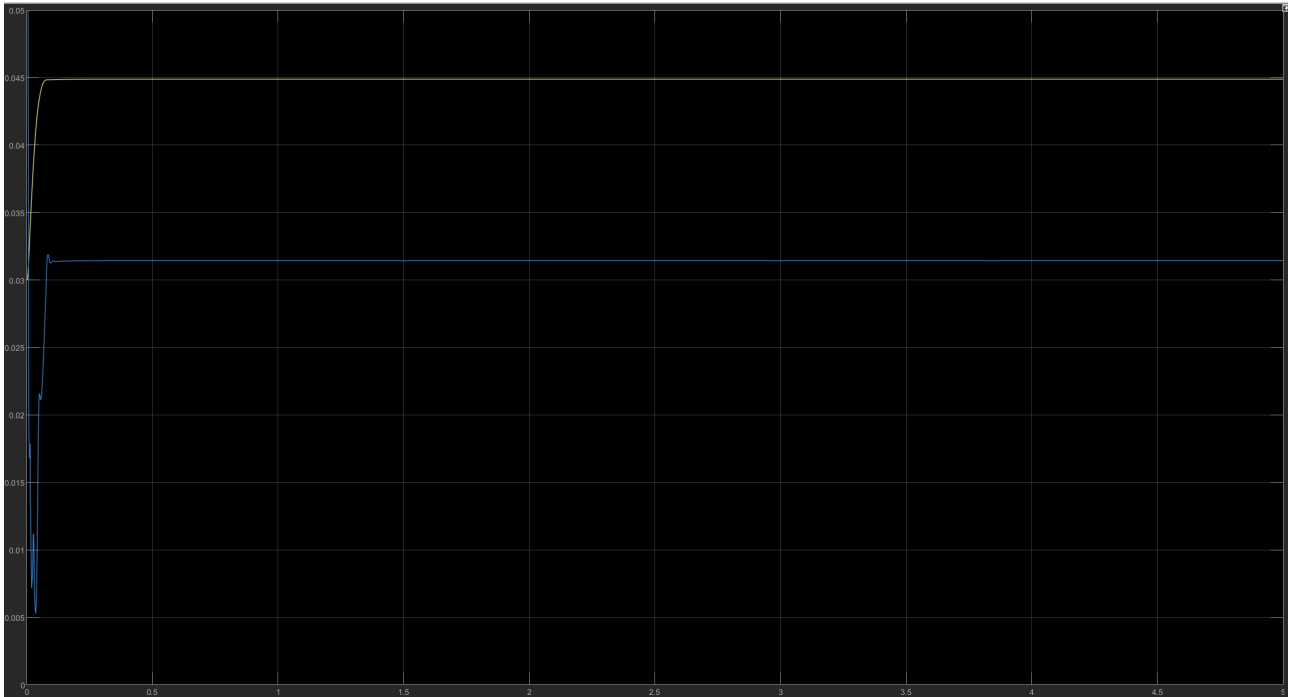
5 对比实验与系统参数设定

5.1 PD控制

事实上, 在使用PID控制前, 我们已经尝试了PD控制, 论域和PID一致, 框图如下:



我们发现, 尽管系统收敛很快, 但是系统存在静差:



我们考虑普通PID控制，对于 K_p, K_d ，系统的闭环传递函数为 $G(s) = \frac{K_p + sK_d}{1 + K_p + sK_d}$ ，对于阶跃输入，有 $y(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} sG(s) = \frac{K_p}{1 + K_p}$ 显然存在静差。

我们对原系统进行分析，发现当系统误差为0时，模糊控制的输出即为确数（输入输出论域隶属函数均对称，则为0），而在静态下，若要达到目标值，模糊控制输出必须非0且为确数。

我们考虑过修改论域，但经过分析发现，如果单纯修改论域，则需要保证模糊控制对于0输入的输出必须是系统静态时的模糊控制系统的期望输出，如果改变期望值，则论域也需要改变，即最后控制系统不具有可扩展性。因此我们综合考虑，不采用修改论域的方法，只采用增加积分环节的方法。

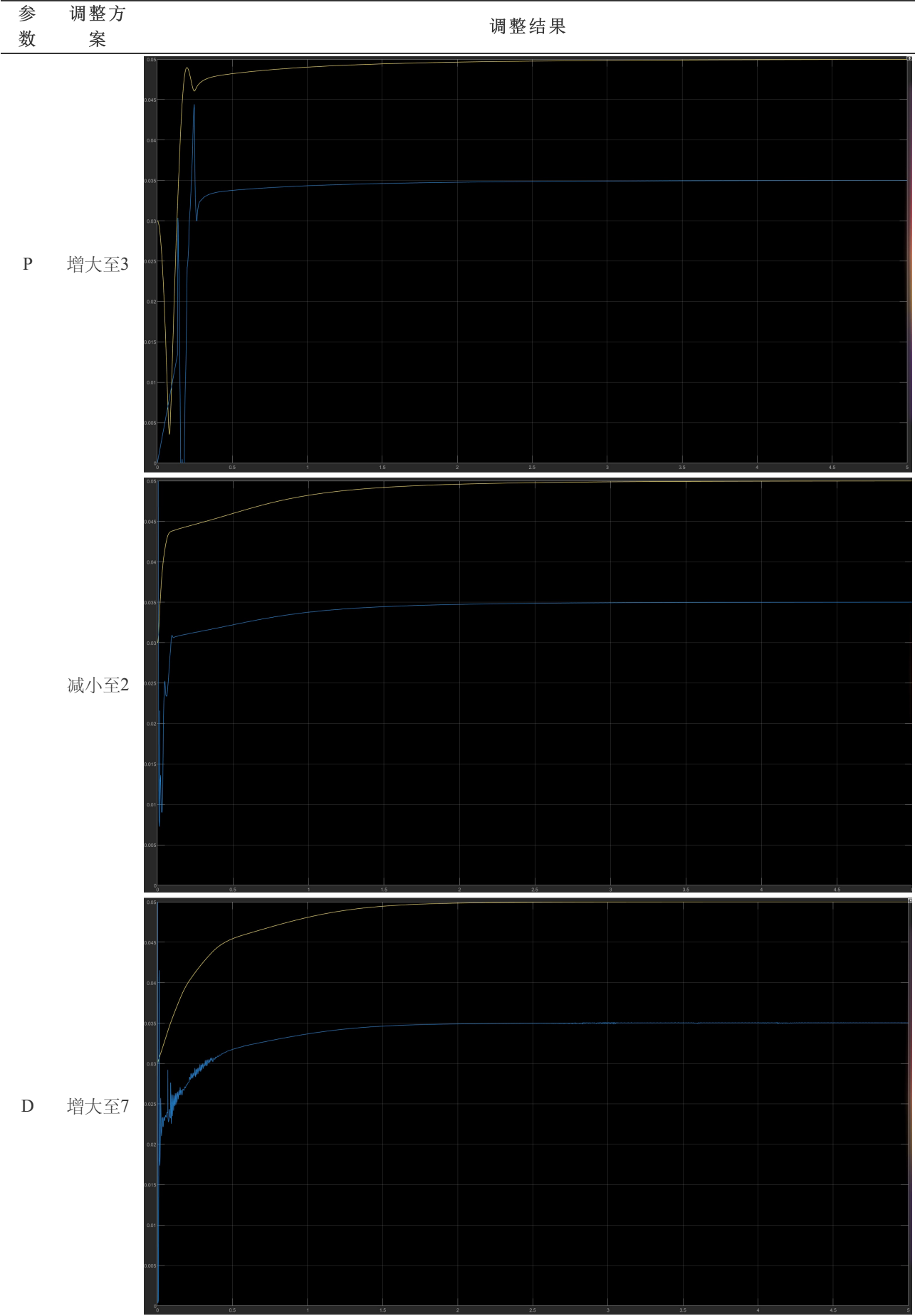
5.2 模糊控制PID参数设定分析

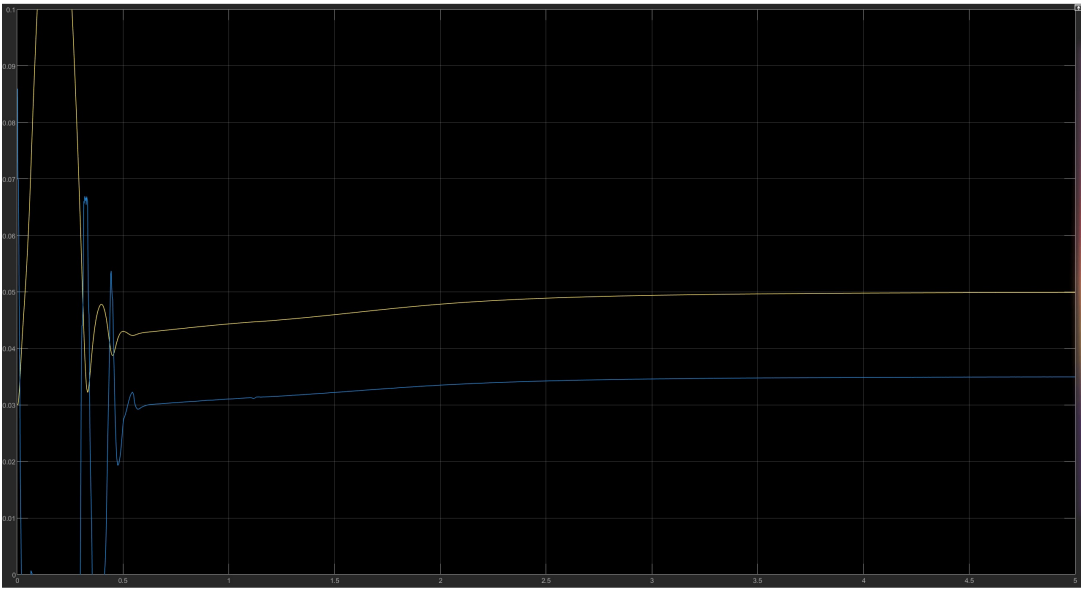
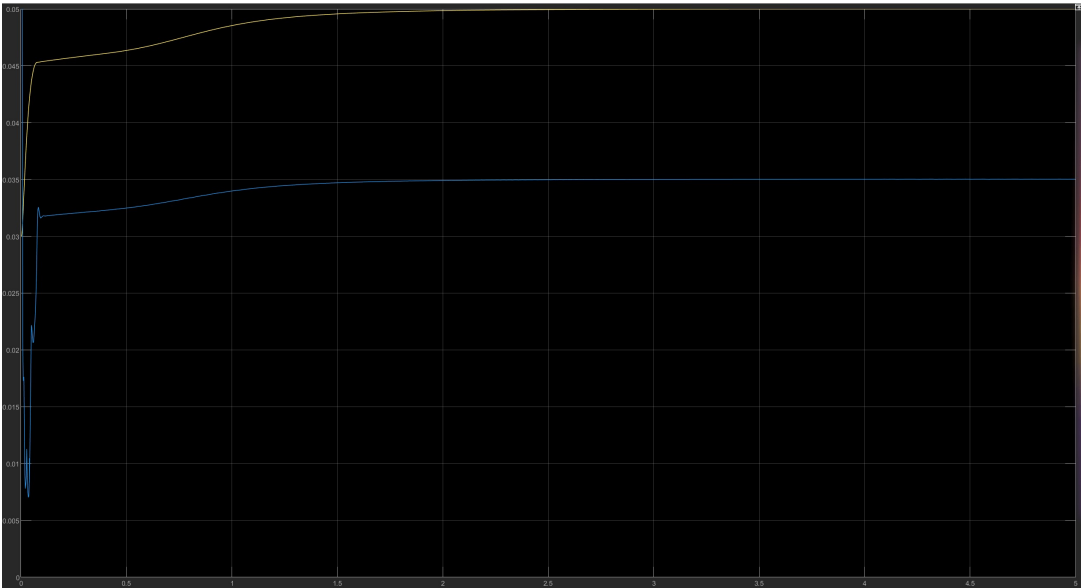
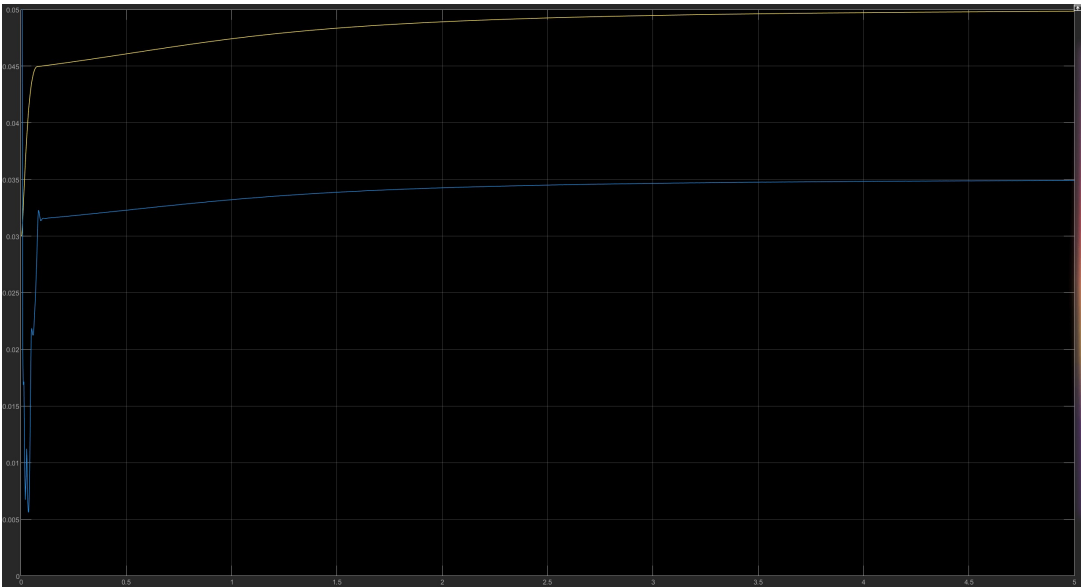
经过实验，我们发现，系统总能在期望时间内达到稳定。给定参数似乎是较优的参数。另外我们给出调整参数后系统变得不稳定的案例。我们取 $m=0.1$

模糊控制器相当于非线性的PID，在一定参数范围内，

参数	变化情况	系统收敛情况
P	增大	系统振荡增加
	减小	系统收敛变慢
D	增大	系统收敛加快
	减小	系统超调明显
I	增大	系统有振荡趋势
	减小	系统减慢收敛

以下是我们分别增大减小PID的比例系数得到的结果，可以看出系统的收敛情况发生了变化，这个和线性PID控制器的性质基本相近。



参数	调整方案	调整结果
	减小至0.5	
I	增大至10	
	减小至3	

线性PID控制器描述如下:

1 比例调节作用：

是按比例反应系统的偏差，系统一旦出现了偏差，比例调节立即产生调节作用用以减少偏差。比例作用大，可以加快调节，减少误差，但是过大的比例，使系统的稳定性下降，甚至造成系统的不稳定。

2 积分调节作用：

是使系统消除稳态误差，提高无差度。因为有误差，积分调节就进行，直至无差，积分调节停止，积分调节输出一常值。积分作用的强弱取决与积分时间常数 T_i ， T_i 越小，积分作用就越强。反之 T_i 大则积分作用弱，加入积分调节可使系统稳定性下降，动态响应变慢。积分作用常与另两种调节规律结合，组成PI调节器或PID调节器。

3 微分调节作用：

微分作用反映系统偏差信号的变化率，具有预见性，能预见偏差变化的趋势，因此能产生超前的控制作用，在偏差还没有形成之前，已被微分调节作用消除。所以可以改善系统的动态性能。在微分时间选择合适情况下，可以减少超调，减少调节时间。微分作用对噪声干扰有放大作用，因此过强的加微分调节，对系统抗干扰不利。此外，微分反应的是变化率，而当输入没有变化时，微分作用输出为零。微分作用不能单独使用，需要与另外两种调节规律相结合，组成PD或PID控制器。

根据上述表格的分析，和线性PID控制器的特性相互比较,可以发现模糊控制器的特性和线性PID控制器的基本相近,则可以按照PID调参的原则对系统进行调参,也可以参考线性PID系统的稳定性分析进行对模糊控制系统的稳定性分析.

6 总结

本实验报告展示了基于模糊控制的磁悬浮控制系统设计和效果。通过优化P、I、D参数，实现了对钢球位置的精确控制，系统表现出良好的稳定性和快速收敛性。实验结果验证了模糊控制策略的有效性，为未来控制技术的发展提供了新思路。