



组号:	08	实验序号:	实验十二
组员 1:	22354103-邵茂荣	实验名称:	磁悬浮小球实验建模及其根轨迹校正
组员 2:	22354162-辛月峰	实验日期:	2024 年 12 月 4 号
组员 3:	223454150-吴明浩	实验地点:	工学园 2-803
组员 4:	22354134-王书言	实验报告完成日期:	2024 年 12 月 4 号

一、实验目的

- 1) 采用根轨迹法设计磁悬浮系统的控制器
- 2) 设计并验证校正环节的性能指标

二、实验任务/要求

- 1) 未校正的磁悬浮系统为振荡系统，要求设计 PID 校正环节，使系统性能指标达到调节时间 $t_s \leq 5\text{sec}$ ，超调量 $\sigma \% \leq 40\%$
- 2) 尝试不同的根轨迹参数，记录并分析各参数对系统性能的影响
- 3) 根据性能指标要求，设计根轨迹校正环节，使小球稳定悬浮于电磁铁下方 10mm 位置

三、实验仪器、设备及材料



GML2001磁悬浮系统



Matlab/Simulink平台

四、实验原理

1) 磁悬浮系统描述

磁悬浮球控制系统是研究磁悬浮技术的平台，它是一个典型的吸附式悬浮系统，系统结构如图1所示。

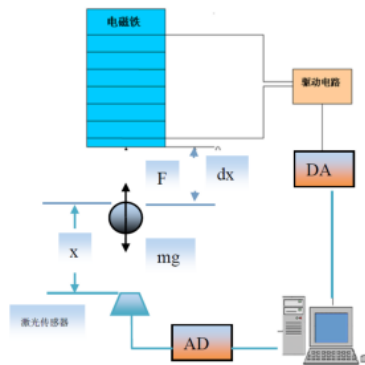


图1. 磁悬浮实验系统结构图

系统说明：

- 电磁铁绕组通电会产生磁力 F ，只要控制电磁铁绕组中的电流，使之产生的电磁力与小球重力平衡，就可以使小球处于平衡状态；
- 本实验采用光电传感器测量小球与电磁铁之间的距离 x 及其变化速率 $\frac{dx}{dt}$ ；
- 电磁铁中电流的大小为磁悬浮被控对象的输入量。

2) 磁悬浮系统数学建模

• 小球动力系统模型：

假设忽略小球收到的其他干扰里（风力、电网突变产生的力等），则小球仅受电磁吸力 F 和自身重力作用。小球在竖直方向的动力学方程可描述如下：

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

其中， x -----小球质心与电磁铁磁极之间的间隙（以磁极面为零点），单位：m
 m -----小球的质量，单位：kg
 $F(i, x)$ -----电磁吸力，单位：N
 g -----重力加速度，单位：m/s²

• 磁悬浮系统数学模型（非线性模型）：

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F(i, x) + mg & \text{动力学方程} \\ F(i, x) = K \left(\frac{i}{x} \right)^2 & \text{电学、力学关联方程} \\ mg + F(i_0, x_0) = 0 & \text{边界方程} \\ U(t) = Ri(t) + L_1 \frac{di}{dt} & \text{电学方程} \end{cases} \quad (4)$$

• 模型线性化：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{2Ki_0}{x_0^2} i - \frac{2Ki_0^2}{x_0^3} x \quad (5)$$

- 由线性化模型(5)及 $mg = -K\left(\frac{i_0^2}{x_0^2}\right)$ ，可得：

$$\frac{x(s)}{i(s)} = \frac{-1}{As^2 - B} \quad A = \frac{i_0}{2g}, B = \frac{i_0}{x_0} \quad (6)$$

- 实际系统物理参数：

参数	取值	参数	取值
m	104 g	x_0	31.4 mm
铁芯直径	22 mm	漆包直径	0.8 mm
R	13.8 Ω	浮球半径 r	21.9 mm
N	2450 匝	K	2.3142e-004Nm ² /A ²
i_0	0.54 A	K_f	0.25

- 磁悬浮系统传递函数：

$$G(s) = \frac{x(s)}{U_{in}(s)} = \frac{x(s)}{K_a i(s)} = \frac{1043.19}{s^2 - 623.956} \quad (7)$$

其中， U_{in} 为功率放大器的输入电压， x 为小球位移， $K_a = 5.8$ 为放大器系数。

由(7)可见，磁悬浮系统存在一个开环极点位于复平面的右半平面，系统不稳定。

必须引入校正装置使得系统稳定，并达到期望的性能指标。

3) PID 校正

- PID控制器是一种线性控制器，它根据给定值 $r(t)$ 与实际输出值 $y(t)$ 构成的偏差 $e(t) = r(t) - y(t)$ ，将偏差的比例、积分和微分通过线性组合构成控制量，对被控对象进行控制。
- 其控制规律为：

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (8)$$

或写成传递函数形式：

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (9)$$

K_p ——比例系数； T_I ——积分时间常数； T_D ——微分时间常数

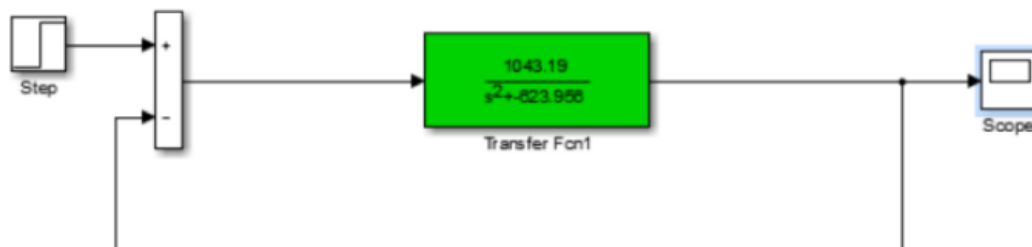
- PID各校正环节的作用总结如下：

- 比例环节：成比例地反映控制系统的偏差信号 $e(t)$ ，偏差一旦产生，控制器立即产生控制作用，以减少偏差。
- 积分环节：主要用于消除稳态误差，提高系统的型别。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_I 。 T_I 越大积分作用越弱，反之则越强。
- 微分环节：反映偏差信号的变化速率，并能在偏差信号值变得太大之前，在系统中引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，减小调节时间。

五、实验步骤

1) 未校正系统的 simulink 仿真实验

① Simulink 中建立磁悬浮闭环系统的仿真程序



② 双击 step 模块，设置 final value 值为 1

③ 点击运行按钮运行仿真程序，打开 Scope 示波器查看输出波形

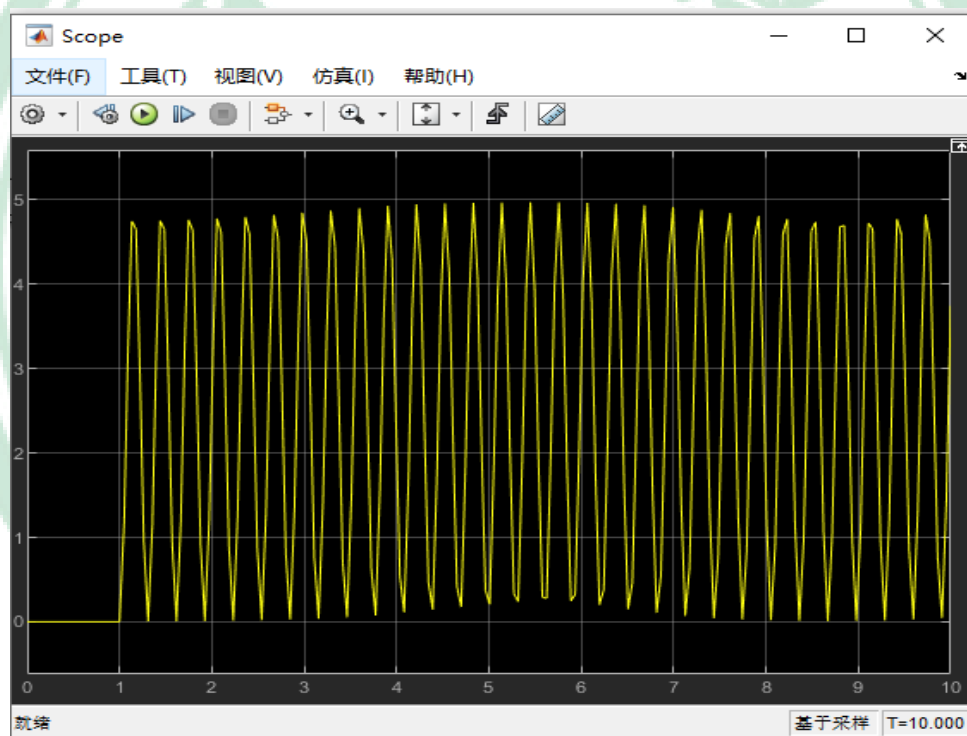


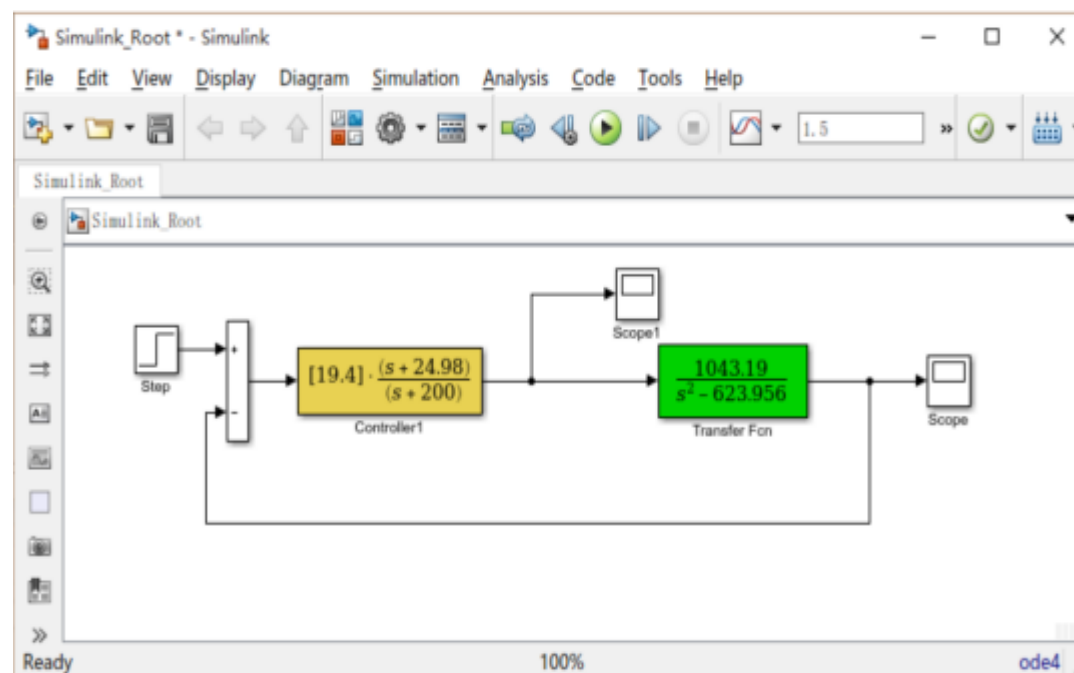
图 1 未校正系统波形

④ 分析单位负反馈系统的稳定性，并记录实验结果

分析：该系统的特征根为纯虚数，因此系统处于临界稳定状态，表现为持续振荡而不发散或者收敛，后续想要提升系统的稳定性，需要通过引入适当的补偿环节改善

2) 加根轨迹校正环节后的 simulink 仿真实验

①在 simulink 中建立磁悬浮闭环系统的仿真程序，如下图所示



②双击 Step 模块，设置 Final value 值为 1

③点击运行按钮运行仿真程序，打开 Scope 示波器查看输出波形，并记录仿真结果

④通过实时控制实验测试根轨迹校正的效果，并分析不同校正器参数(至少 6 组)对系统响应及悬浮小球位置的影响，截图保存不同参数下系统的响应曲线，并填写下表 1

校正器参数	超调量	调节时间	浮球位置
K=20	4.81%	0.0347s	图 1
K=30	13.3%	0.0232s	图 2
K=40	19.9%	0.0184s	图 3
K=50	25.1%	0.0158s	图 4
K=80	35.5%	0.0116s	图 5
K=100	40.3%	0.0105s	图 6

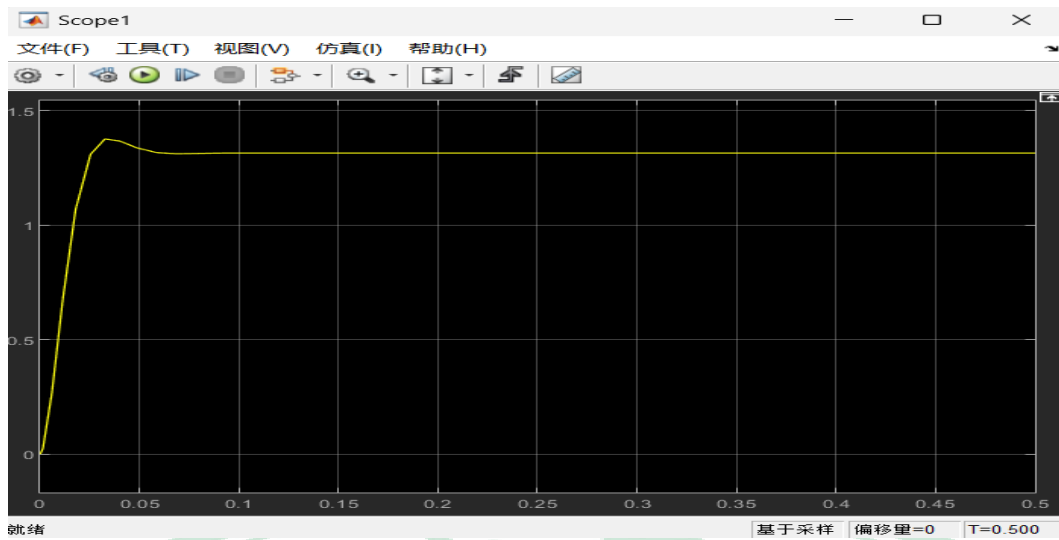


图 1: $K=20$

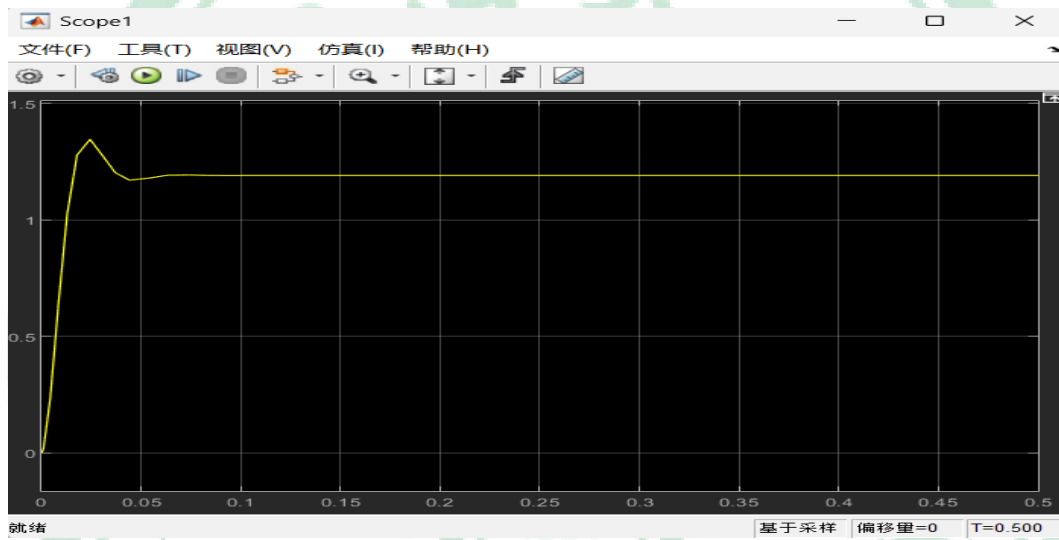


图 2: $K=30$

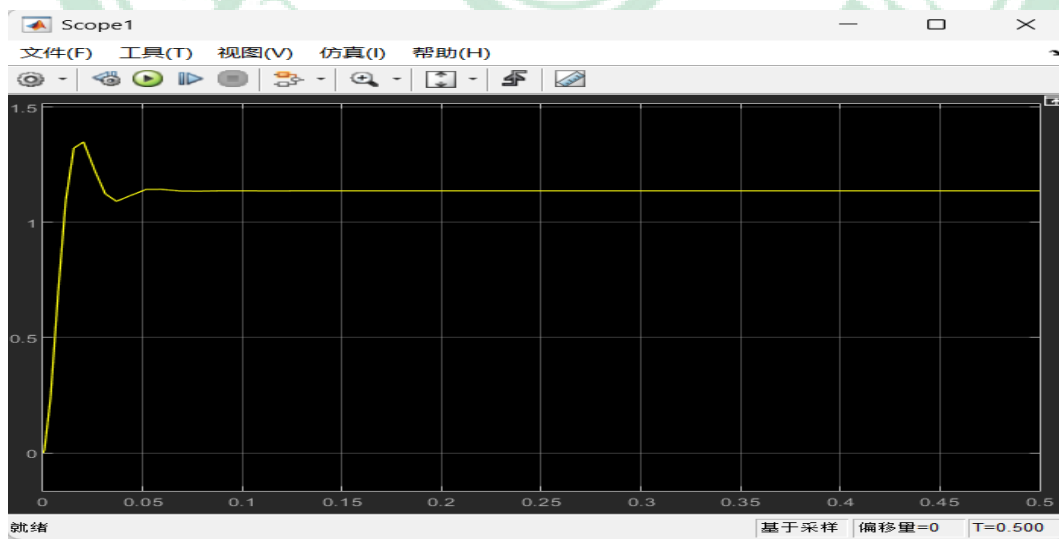


图 3: $K=40$

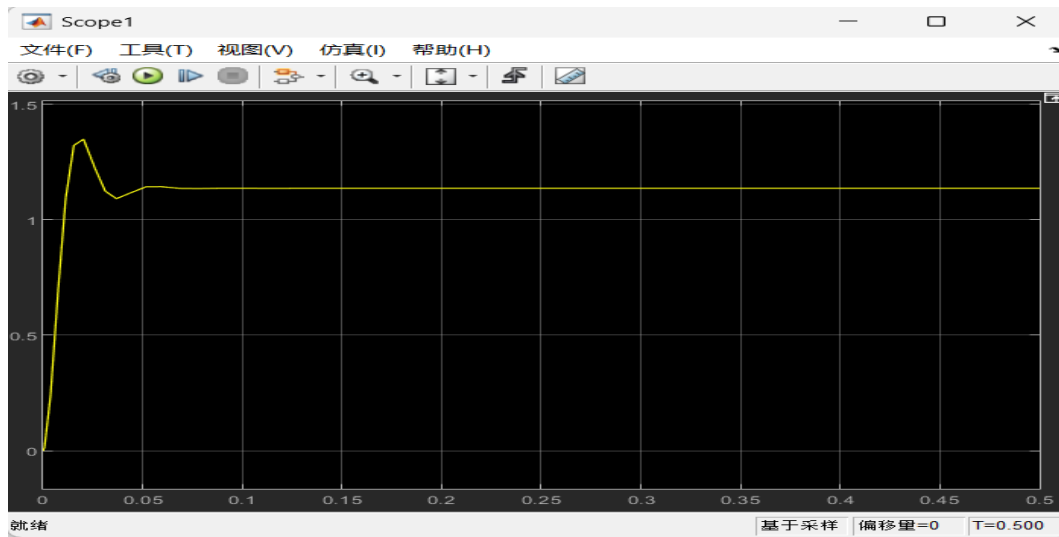


图 4: $K=50$

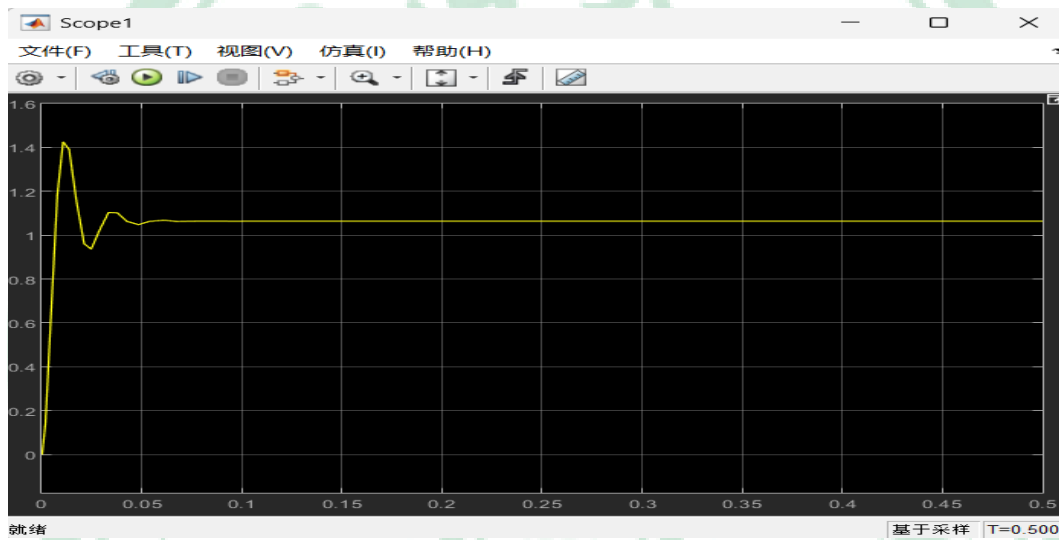


图 5: $K=80$

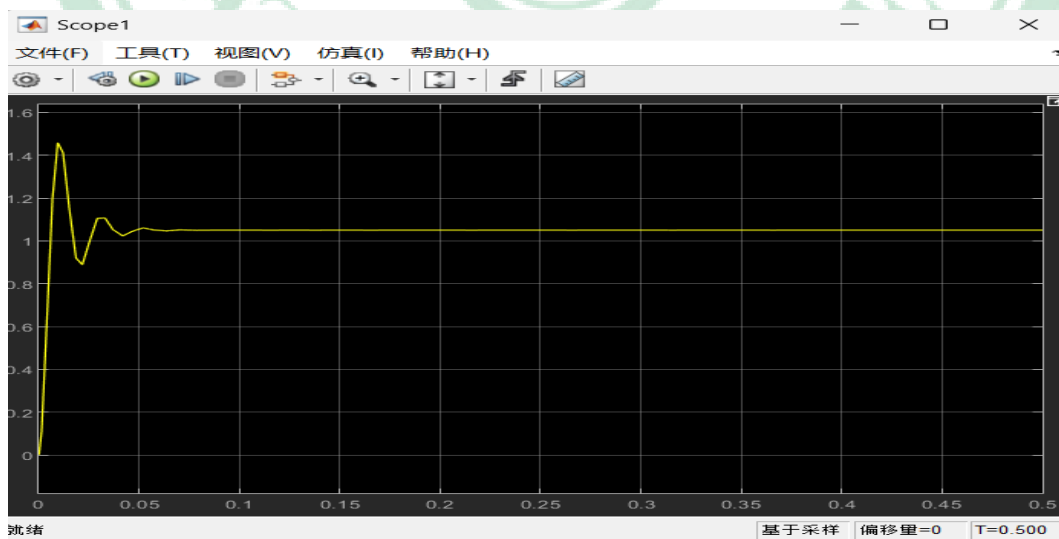
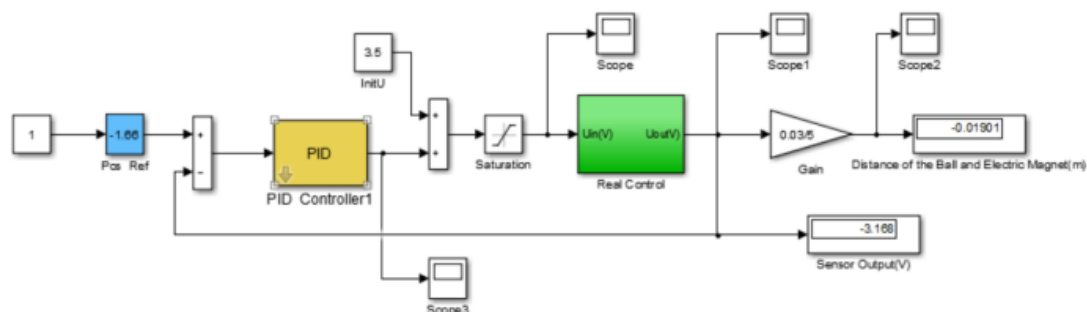


图 6: $K=100$

3) 加 PID 校正环节后实时控制环节

①电控箱上电

②在 Matlab 命令行输入 gtbox 后回车，打开 gtbox 工具箱中“MagLev”→“GML2001-1711”→“PID Control”下的“PID_Control.slx”运行界面如下图所示



③双击打开“Real Control”，把硬件检测的零点电压填入 Zero 模块中，如下图所示

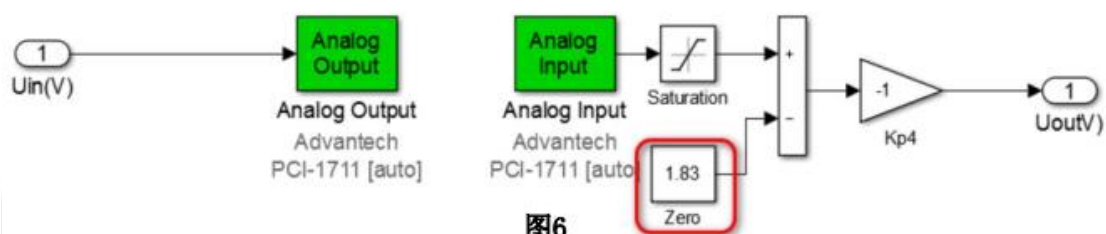


图6

④点击运行按钮运行程序，用手扶起小球，调整输入电压值 Pos Ref，可以把小球稳定悬浮于距离电磁铁约 10mm 的位置（运行结果如下图）



⑤通过实时控制实验测试根轨迹校正的效果，并分析不同校正器参数(至少 6 组)对系统响应的影响，截图保存不同参数下系统的响应曲线，并填写下表

校正器参数	超调量	调节时间	浮球位置
K=20	4.81%	0.0347s	图 7
K=30	13.3%	0.0232s	图 8
K=40	19.9%	0.0184s	图 9
K=50	25.1%	0.0158s	图 10
K=80	35.5%	0.0116s	图 11
K=100	40.3%	0.0105s	图 12

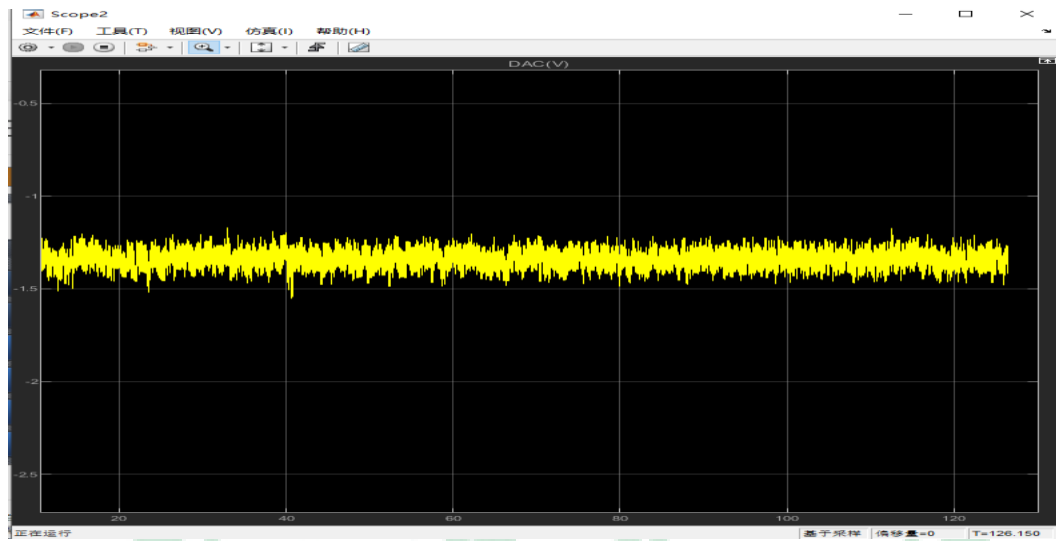


图 1: $K=20$

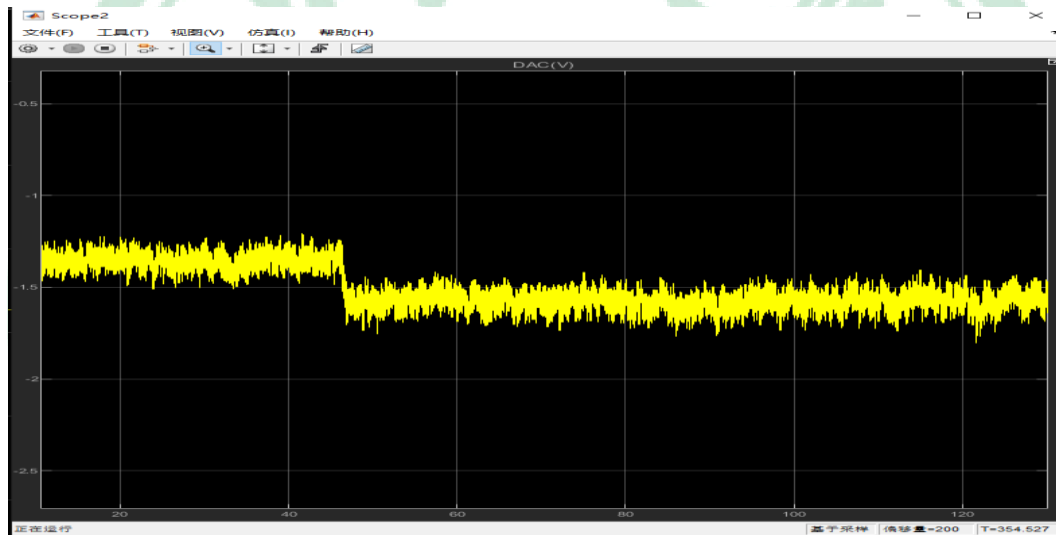


图 2: $K=30$

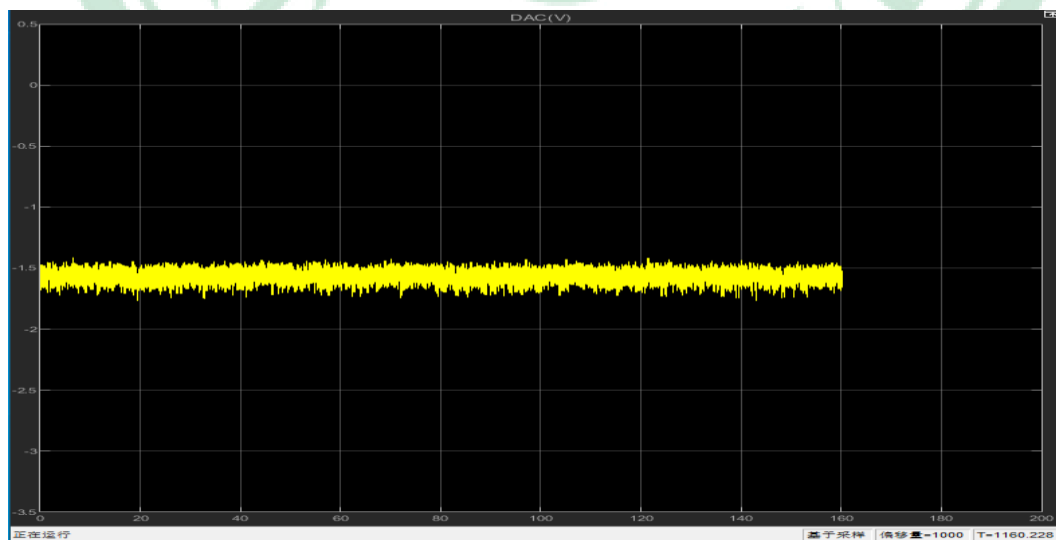


图 3: $K=40$

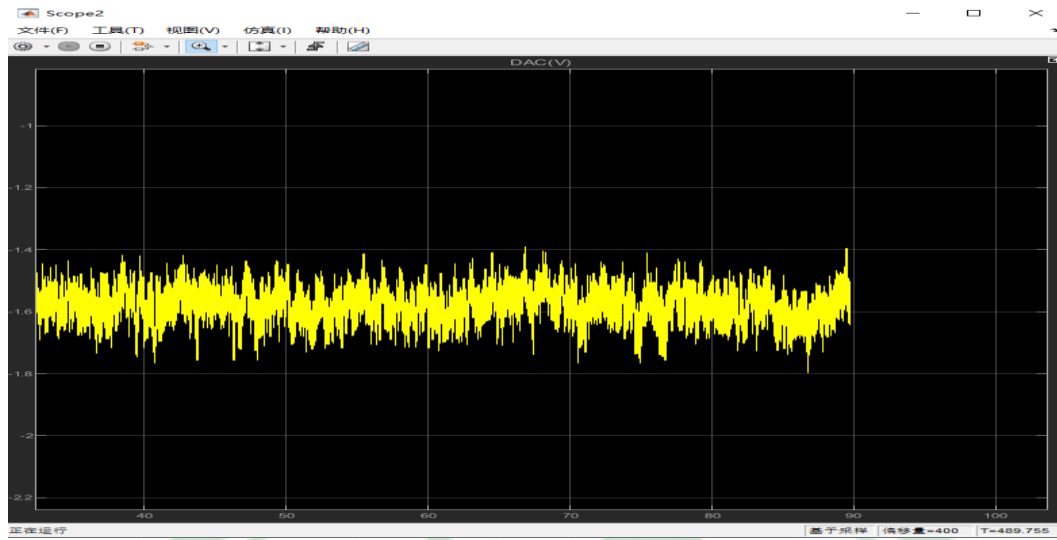


图 4: $K=50$

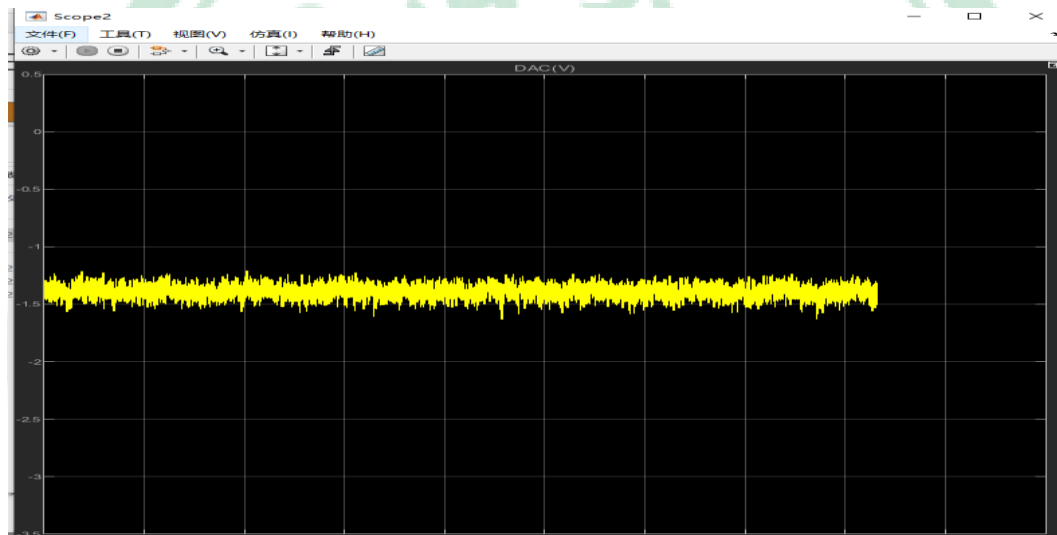


图 5: $K=80$

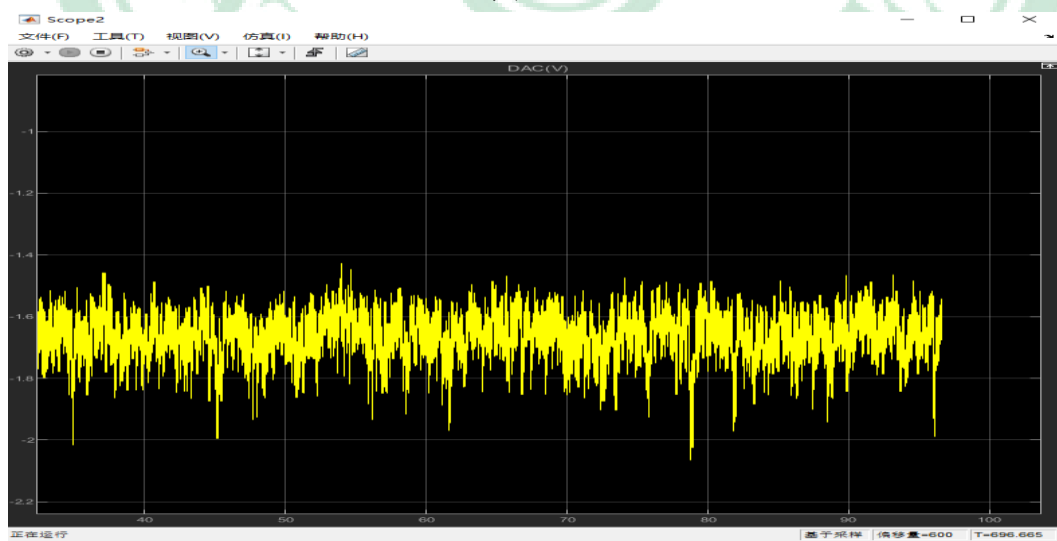


图 6: $K=100$

4) 对比分析仿真系统与实时控制系统的性能差异

仿真系统与实时控制系统在性能上存在显著差异，主要体现在以下几个方面：

1. 系统模型的精确性：

仿真系统通常基于理想化的数学模型，忽略了一些实际系统中的非线性、噪声和不确定性。例如，在磁悬浮系统中，摩擦力、空气阻力以及传感器和执行器的非理想特性通常不会被纳入仿真模型，而这些因素在实时控制中可能显著影响系统性能。

2. 计算能力与响应时间：

仿真系统通常运行在高性能计算机上，可以以固定的时间步长精确求解系统方程；而实时控制系统受到硬件性能的限制，计算能力有限，控制算法的执行可能存在时延，从而影响系统的动态响应。

3. 环境干扰：

仿真系统运行在理想环境中，通常不会受到外界干扰的影响；实时控制系统则需要面对多种外部干扰，例如噪声、振动和电磁干扰，这些都会对系统的稳定性和控制精度产生影响。

4. 参数偏差与校准：

仿真系统中的参数通常是已知且理想的，而实时控制系统中传感器和执行器可能存在标定误差，系统参数可能与仿真模型不完全一致，导致控制性能下降。

5. 控制精度与稳定性：

仿真系统的控制结果通常较为理想，振荡幅度和稳态误差小；实时控制系统由于实际硬件的非线性效应、量化误差和时间延迟，可能表现出更大的波动性和偏差。

六、实验结论

通过本次实验，成功实现了基于根轨迹法设计磁悬浮系统控制器，并验证了校正环节对系统性能的改善效果。以下是实验的主要结论：

1. 系统性能改进

未校正的磁悬浮系统存在明显的振荡现象，调节时间较长且无法稳定。通过根轨迹法设计的校正环节，系统性能指标得到了显著提升。调节时间 t_s 被控制在 5 秒以内，且超调量 $\sigma\%$ 小于 40%，满足实验任务要求。

2. 参数分析与优化

在实验中尝试了不同的根轨迹参数组合，记录并分析了系统性能的变化。发现零极点位置的调整对系统的响应速度、稳定性和超调量影响显著。合理配置零极点能够有效改善系统动态性能，同时保证稳定性和快速性之间的平衡。

3. 系统稳定性验证

通过设计符合性能指标的根轨迹校正环节，小球能够稳定悬浮于电磁铁下方 10mm 位置，无明显漂移或振荡现象，进一步验证了校正设计的有效性。