



院(系):智能工程学院

组号:第1组

组长:方桂安

日期:2022.11.12

实验名称:磁悬浮小球实验建模及其PID校正

一、实验目的

1. 了解用机理法建立磁悬浮系统数学模型的基本方法;
2. 掌握控制系统稳定性分析的基本方法;
3. 掌握用PID法设计磁悬浮系统控制器;
4. 掌握设计并验证校正环节的方法。

二、小组成员

1. 方桂安: 20354027, 负责任务一, 二, 三, 四
2. 刘梦莎: 20354091, 负责任务一, 二, 三, 四
3. 刘 玥: 20354229, 负责任务一, 二, 三, 四
4. 陈石翰: 20354019, 负责任务一, 二, 三, 四
5. 刘恩骐: 20354086, 负责全部任务及报告撰写

三、实验要求

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 $t_s \leq 5s$, 超调量 $\sigma\% \leq 40\%$;
2. 尝试不同的PID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PID校正环节, 使小球稳定悬浮于电磁铁下方10mm位置。

四、实验仪器、设备及材料

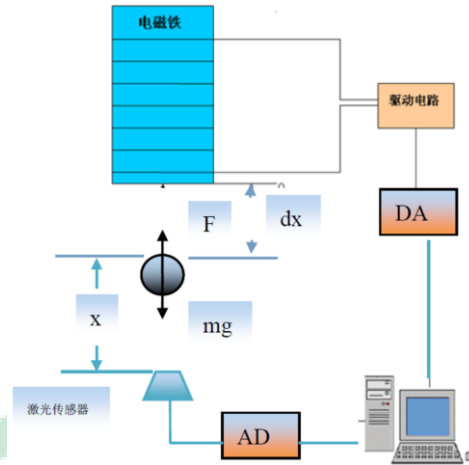
MATLAB/Simulink 平台

GML2001 磁悬浮系统

五、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, 系统结构如下图所示。



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 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：

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

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

3. 电磁铁线圈模型：

- 为简化模型，将电磁铁线圈用一个电阻 R 和一个电感线圈 L 串联来代替，电磁铁线圈模型：

$$U(t) = Ri(t) + \frac{d[L(x)i(t)]}{dt}$$

其中， $U(t)$ ---电磁铁的电压， $i(t)$ ---电磁铁中的电流， $L(x)$ ---电磁铁绕组中的瞬时电感。

瞬时电感是 x 的函数

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

且通过实验可知 $L_1 \gg L_0$ ，则 $L(x) \approx L_1$ 。其中 L_1 为小球处于电磁场中时的静态电感， L_0 是小球处于电磁场中时线圈增加的电感， a 为磁极附近一点到磁极表面的间隙。

- 电磁铁线圈数学模型可化为：

$$U(t) = Ri(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt}$$

磁悬浮系统数学模型（非线性模型）：

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

模型线性化：

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

可得

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

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-004 Nm ² /A ²
i_0	0.54 A	K_f	0.25

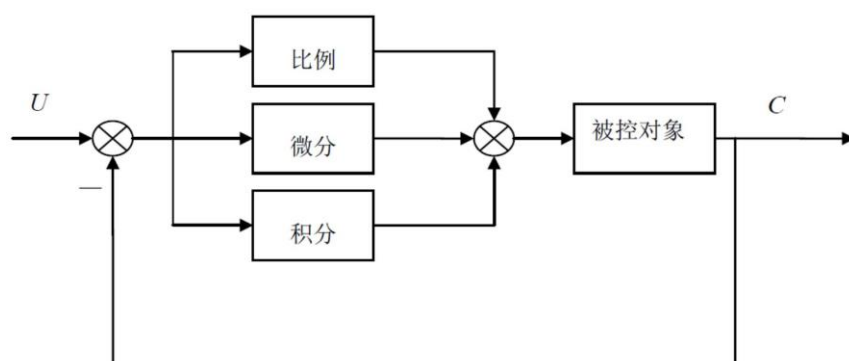
综上可得磁悬浮系统传递函数：

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

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。

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。

4. PID 校正



其控制规律为：

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

传递函数形式：

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

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

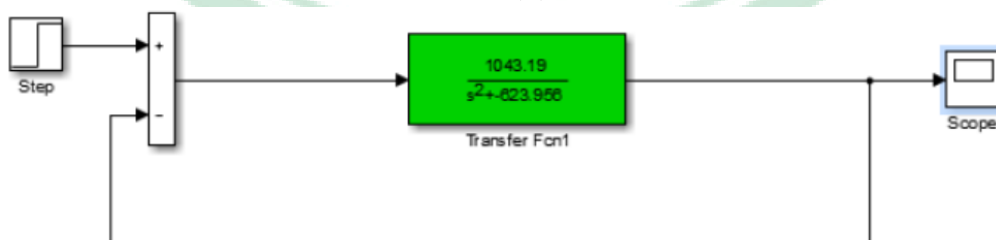
PID 各校正环节的作用总结如下：

- a) 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；
- b) 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。
- c) 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。

六、实验步骤及结果心得

任务 1：未校正系统 Simulink 仿真实验

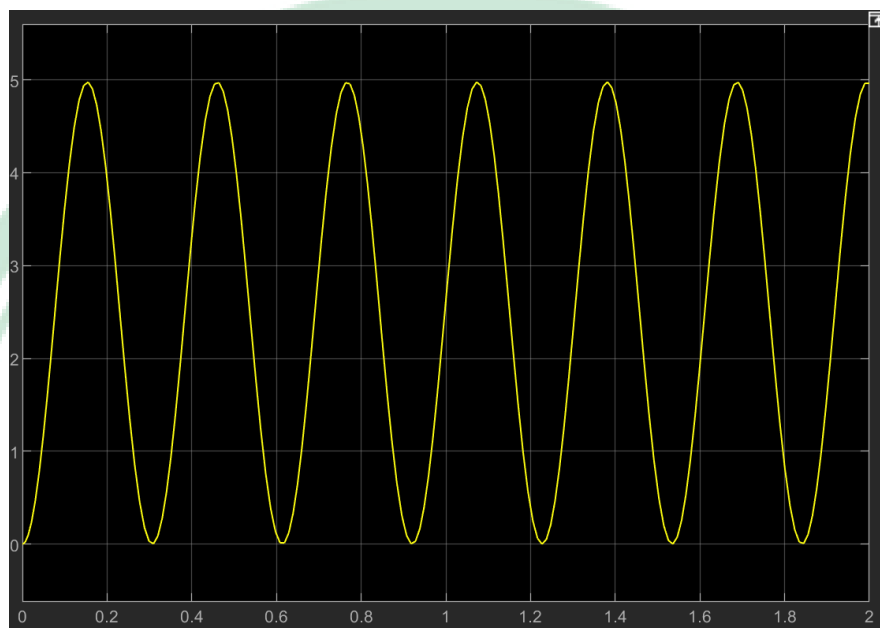
② 在 Simulink 中建立磁悬浮闭环系统的仿真程序，如下图所示：



- 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；
- ④ 分析单位负反馈系统的稳定性，并填写表 1。

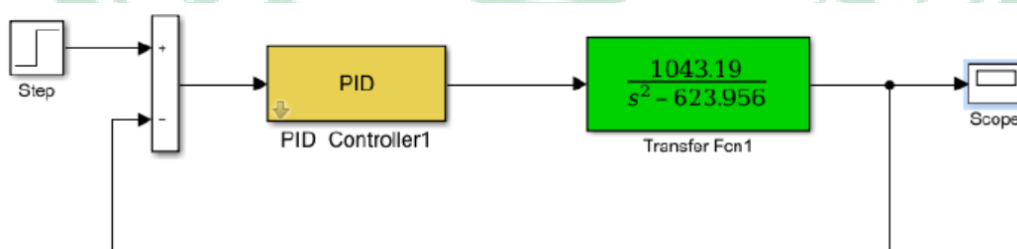
表 1

内容	数据
开环系统传递函数	$\frac{1043.19}{s^2 - 623.956}$
闭环系统传递函数	$\frac{1043.19}{s^2 + 419.234}$
闭环系统输入信号	$\frac{1}{s}$
闭环系统输出信号	如下图所示



任务 2：加 PID 校正环节后 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 取 $K_p=2.8$, $K_i=0.001$, $K_d=60$;

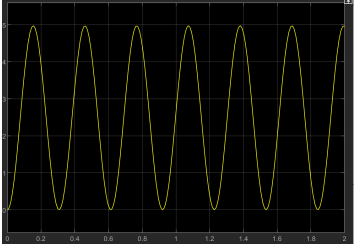
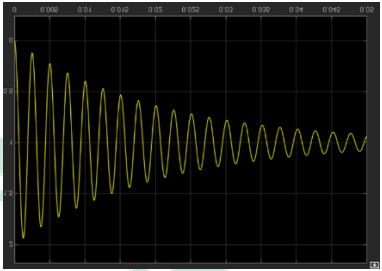
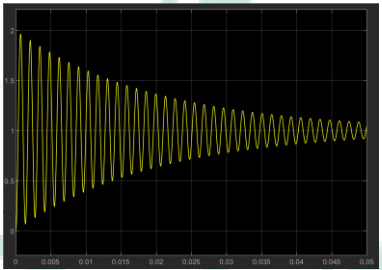
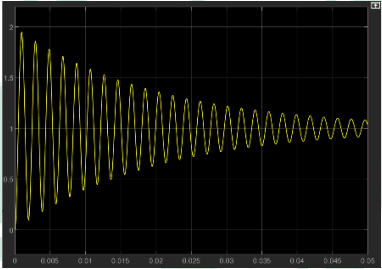
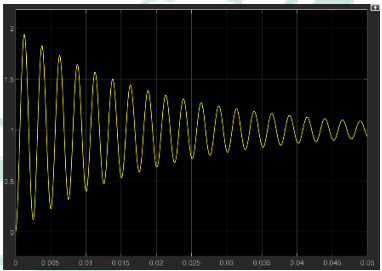
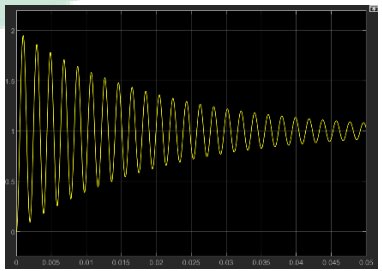
③ 双击 Step 模块，设置 Final value 值为 1;

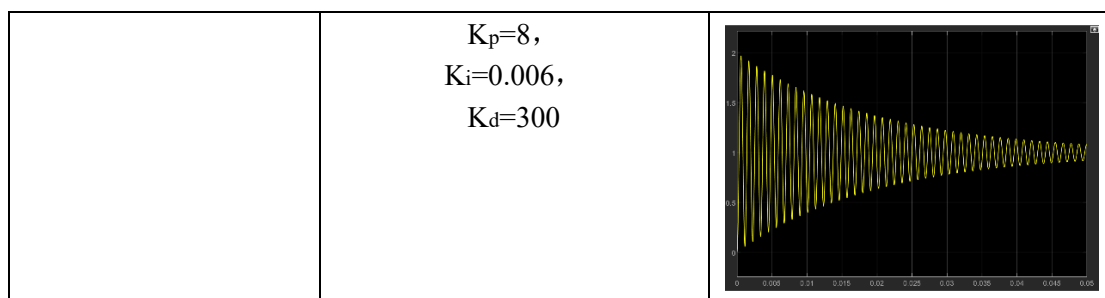
④ 点击运行按钮运行仿真程序，打开 Scope 示波器查看输出波形，并记录仿真结果。

通过仿真测试 PID 校正的效果，并分析不同 PID 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 2。

表 2

	控制器参数	系统性能
--	-------	------

未校正系统	×	
PID 校正实时控制系统	$K_p=2.8,$ $K_i=0.001,$ $K_d=60$	
	$K_p=4,$ $K_i=0.003,$ $K_d=200$	
	$K_p=4,$ $K_i=0.001,$ $K_d=100$	
	$K_p=6,$ $K_i=0.001,$ $K_d=60$	
	$K_p=2.8,$ $K_i=0.006,$ $K_d=100$	



对比几组参数可以看出：

(1) K_p 加大，将使系统响应速度加快， K_p 偏大时，系统振荡次数增多，调节时间加长； K_p 太小又会使系统的响应速度缓慢。

对系统的稳态性能影响：在系统稳定的前提下，加大 K_p 可以减少稳态误差，但不能消除稳态误差。

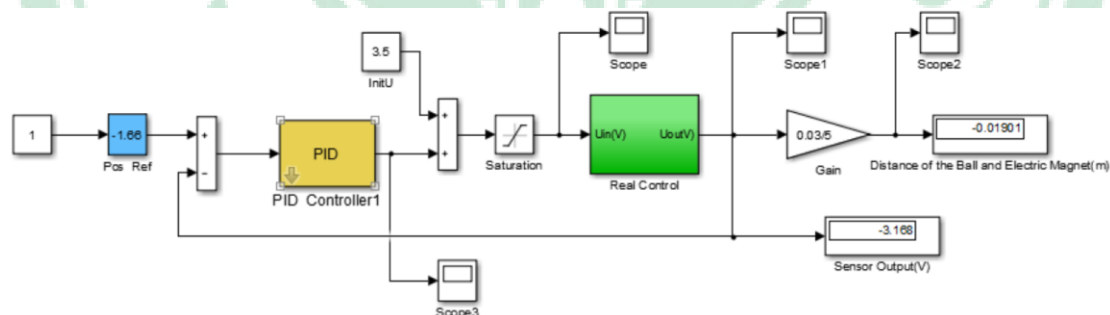
(2) T_i 太小，系统可能不稳定，且振荡次数较多； T_i 太大，对系统的影响将削弱；当 T_i 较适合时，系统的过渡过程特性比较理想。积分控制有助于消除系统稳态误差，提高系统的控制精度，但若 T_i 太大，积分作用太弱，则不能减少余差。

(3) 微分时间 T_d 的增加即微分作用的增加可以改善系统的动态特性，如减少超调量，缩短调节时间等。适当加大比例控制，可以减少稳态误差，提高控制精度。但 T_d 值偏大或偏小都会适得其反。另外微分作用有可能放大系统的噪声，降低系统的抗干扰能力。

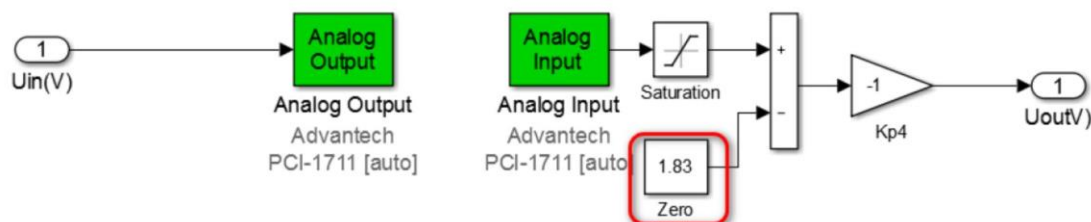
任务 3：加 PID 校正环节后实时控制实验

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



② 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：

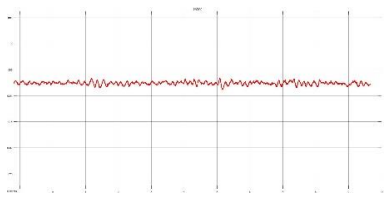
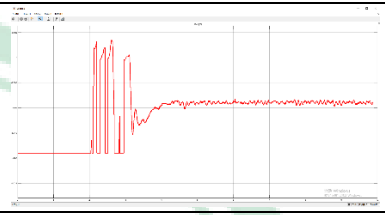
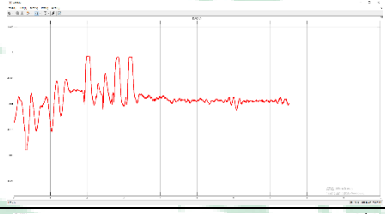
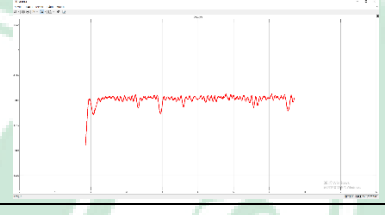
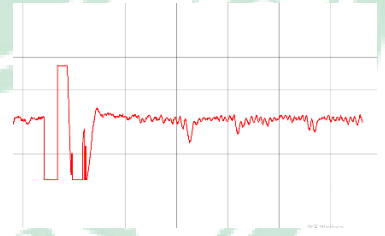
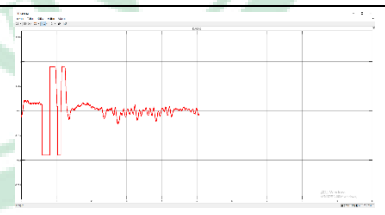
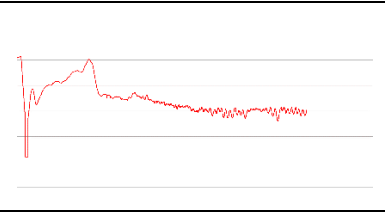


③ 取 $K_p=1.2$, $K_i=0.001$, $K_d=30$;

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。

⑤ 通过实时控制实验测试 PID 校正的效果，并分析不同 PID 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 3；

表 3

	控制器参数	系统性能
未校正系统	×	
PID 校正实时控制系统	$K_p=7,$ $K_i=0.000003,$ $K_d=200$	
	$K_p=8,$ $K_i=0.000003,$ $K_d=200$	
	$K_p=9,$ $K_i=0.000003,$ $K_d=300$	
	$K_p=9,$ $K_i=0.000003,$ $K_d=400$	
	$K_p=10,$ $K_i=0.000005,$ $K_d=400$	
	$K_p=10,$ $K_i=0.000008,$ $K_d=400$	

任务 4： 对比分析仿真系统与实时控制系统的性能差异。

系统仿真时输入输出都是理想化状态，不存在误差；而实时控制时，系统的输入输出与理论值会有所偏差，阻尼等数值也会有所变化，且在运动过程中还会有扰动输入，

因此仿真所用的 PID 值会与时控系统不匹配。从结果上看，也能明显发现，仿真时的系统是十分稳定的，而实时控制的系统是在一定的误差范围内实现的动态稳定。由此可知，影响实时控制系统性能的主要原因是系统的数学模型不够精确，在对系统进行建模时忽略了很多重要的因素，从而影响了系统的性能。

