

磁悬浮根轨迹校正实验 指导书



2023 年 4 月
哈尔滨工业大学（深圳）

实验设备使用安全注意事项

- 1、保持从磁悬浮正面观看或操作；（电源开关一侧为正面）
- 2、**严禁遮挡设备底部激光传感器**，如果遮挡，程序没有反馈，会导致磁悬浮系统失控！
- 3、遵守操作顺序：

悬浮操作：磁悬浮电源开关→下载程序→运行程序→用拇指和食指捏住小球，放在磁铁下方→小球悬浮后松开手；

停止悬浮操作：用拇指和食指捏住小球→停止程序→感觉球没有磁力拉引后，将球轻放在基座上；

- 4、调试过程中，一只手负责捏住小球，一只手操作执行程序，防止球不能悬浮掉落，砸伤！小球拿法如下图：



实验过程评分点与标准（占 60%）

- 1、校正前，系统稳定性分析，使用 MATLAB，有仿真图，有分析过程；（ 5% ）
- 2、校正环节设计步骤与方法，手写，详细给出计算方法和过程；（ 15% ）
- 3、校正后，系统的稳定性分析，使用 MATLAB ，有仿真图，有分析过程；（ 10% ）
- 4、磁悬浮根轨迹校正控制的 MATLAB 程序搭建，将小球悬浮起来；（ 15% ）
- 5、从实际系统运行角度，分析设计的控制器是否达到设计要求，如稳态误差在 1mm 以内；（ 5% ）
- 6、给一定的干扰，系统是否能调整到稳定状态，如抗干扰性不强，可以修正校正的控制器模型。（ 10% ）

重要提示：以上环节预习部分上课之前完成，其他要求课上时间内完成，当堂课打分。

第一章 磁悬浮系统简介

1.1 磁悬浮系统介绍

虽然磁悬浮的应用领域繁多，系统形式和结构各不相同，但究其本质都共同具有以下特性：

- ✧ **本质非线性：**磁悬浮是一个典型的非线性复杂系统。实际中可以通过线性化得到系统的近似模型，线性化处理后再进行控制，也可以利用非线性控制理论对其进行控制。
- ✧ **不确定性：**主要是模型误差以及电磁干扰，各种外界因素等，实际控制中一般通过减少各种误差，如通过风扇来降低电磁铁温升等不确定因素。
- ✧ **开环不稳定性：**磁悬浮系统的稳定状态只有一个，即当电磁力与所悬浮对象的重力平衡时，但这种状态是建立在系统为闭环的情况下。若系统处于开环状态下，只要有轻微的干扰即可破坏平衡状态。

激光位移传感器是利用激光技术进行距离测量的传感器。磁悬浮系统采用的激光传感器其模拟量输出为 0~5V，传感器的最大测距范围为 30mm。图 1.1 是磁悬浮系统中的激光传感器测距范围示意图。

特别强调:测距范围的 30mm，指的是从测量原点，即中心处的 $\pm 15\text{mm}$ 范围。

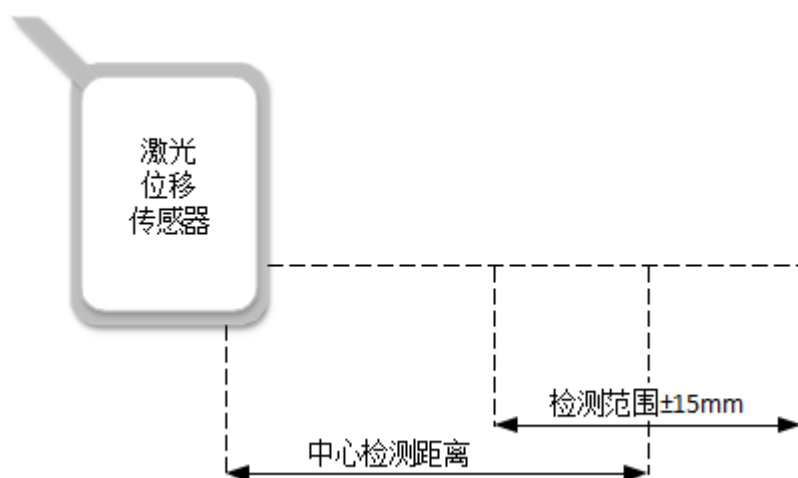


图 1.1 激光传感器测距范围

由于小球的直径大小影响，激光位移传感器能够测量的距离并非完整的 30mm，故实际控制时要进行电压量的零位补偿，转换到实际电压大小与位移的对应关系。磁悬浮系统真实可测的距离范围如图 1.2 所示：

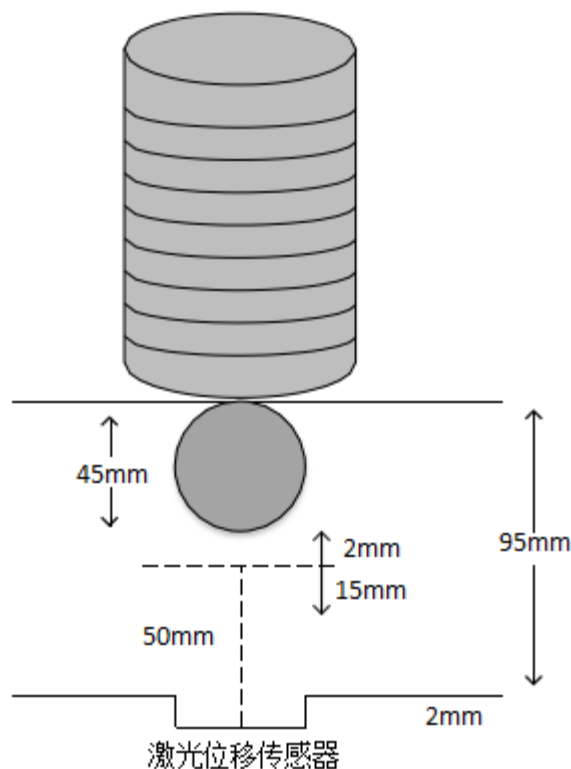


图 1.2 磁悬浮系统激光传感器可测范围

图 1.2 中，理论上小球能够悬浮的最大范围为 17mm。实际系统中小球能够悬浮的最大范围受到控制器优劣的影响。由于传感器输入的为 0 到 5V 的电压信号，在实际控制系统设计时需要系统模型进行相应变换，根据 5V 对应 3cm，可得如下电压与距离的转换关系：

$$K_s = \frac{U}{X} = \frac{5}{3}$$

1.2 磁悬浮系统模型

假设忽略小球受到的其他干扰力(风力、电网突变产生的力等)，则受控对象小球在此系统中只受电磁吸力 和自身的重力 mg 。球在竖直方向的动力学方程可以如下描述：

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

式中： 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/s^2

1. 功率放大器

主要是解决感性负载的驱动问题，将控制信号转变为控制电流。因系统功率低，故采用模拟放大器。模拟功率放大器根据输出信号的不同又分为电压-电流型功率放大器和电压

-电压型功率放大器。前者根据控制器的输出信号自动地向励磁线圈提供电流，而后者的输入输出均为电压信号。本系统设计采用电压-电流型功率放大器。

在功率放大器的线性范围以内，其主要表现为一阶惯性环节，其传递函数可以表示为：

$$G_0(s) = \frac{U(s)}{I(s)} = \frac{K_a}{1 + T_a s} \quad (1-2)$$

其中： K_a 为功率放大器的增益， T_a 为功率放大器的滞后时间常数。

在系统实际过程当中，功率放大器的滞后时间常数非常小，对系统影响可以忽略不计。

因此可以近似认为功率放大环节仅由一个比例环节构成，其比例系数为 K_a （该值只与放大环节自身电路参数有关）。本系统中传递函数由硬件电路计算得：

$$G_0(s) = K_a = 5.8 \quad (1-3)$$

2. 系统平衡的边界条件

小球处于平衡状态时，其加速度为零，由牛顿第二定律可知小球此时所受合力为零。

小球受到向上的电磁力与小球自身的重力相等，即：

$$mg + F(i_0, x_0) = 0 \quad (1-4)$$

3. 电磁力模型：最基本的磁路法电磁力模型

$$F(i, x) = k \frac{i^2}{x^2} \quad (1-5)$$

其中： $F(i, x)$ 为电磁力、 i 为电磁铁线圈中电流、 x 为气隙

4. 系统方程的描述

磁悬浮系统方程可以由上面的方程联合描述，现归纳如下：

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F(i, x) - mg \rightarrow \text{动力学方程} \\ F(i, x) = K \left(\frac{i}{x} \right)^2 \rightarrow \text{电磁力模型} \\ mg + F(i_0, x_0) = 0 \rightarrow \text{边界条件} \end{cases}$$

5. 系统模型线性化处理

由于电磁系统中的电磁力 F 和电磁铁中绕组中的瞬时电流 i 、气隙 x 间存在着较复杂的非线性关系，若要用线性系统理论进行控制器的设计必须对系统中各个非线性部分进行线性化。此系统有一定的控制范围，所以对系统进行线性化的可能性是存在的，同时实验也证明，在平衡点 (i_0, x_0) 对系统进行线性化处理是可行的。利用前面提到的非线性系统线性化方法，我们可以对此系统进行线性化处理。

对式(1-1)作泰勒级数展开，省略高阶项可得

$$F(i, x) = F(i_0, x_0) + F_i(i_0, x_0)(i - i_0) + F_x(i_0, x_0)(x - x_0) \quad (1-6)$$

式中 $F(i_0, x_0)$ 是当磁极与小球间的气隙为 x_0 ，平衡电流为 i_0 时电磁铁对小球的电磁引力，且与小球的重力平衡，即：

$$F(i_0, x_0) = mg \quad (1-7)$$

$$F_i(i_0, x_0) = \frac{\delta F(i, x)}{\delta i} \Big|_{i=i_0, x=x_0}$$

$$F_x(i_0, x_0) = \frac{\delta F(i, x)}{\delta x} \Big|_{i=i_0, x=x_0}$$

定义 K_i, K_x 分别为：

$$K_i = F_i(i_0, x_0) = \frac{2Ki_0}{x_0^2} \quad (1-8)$$

$$K_x = F_x(i_0, x_0) = -\frac{2Ki_0^2}{x_0^3} \quad (1-9)$$

由上两式可知， K_i 为平衡点处电磁力对电流的刚度系数， K_x 为平衡点处电磁力对气隙的刚度系数。

将式(1-7)、(1-8)、和(1-9)代入式(1-6)有：

$$F(i, x) = K_i(i - i_0) + K_x(x - x_0) + mg \quad (1-10)$$

故完整描述此系统的方程式如下：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = K_i(i - i_0) + K_x(x - x_0) \quad (1-11)$$

6. 系统数学模型的建立

本系统在建立数学模型时，由于输入量直接是电磁铁的控制电流，没有考虑感抗对系统的影响，而从感性元件储能的角度加以分析建模。且假设功率放大器的输出电流与输入电压之间呈严格的线性关系且无延迟。

系统可用下列方程来描述：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = K_i(i - i_0) + K_x(x - x_0) = \frac{2Ki_0}{x_0^2} i - \frac{2Ki_0^2}{x_0^3} x$$

拉普拉斯变换后得：

$$x(s)s^2 = \frac{2Ki_0}{mx_0^2} i(s) - \frac{2Ki_0^2}{mx_0^3} x(s)$$

由边界方程 $mg = -K(\frac{i_0^2}{x_0^2})$ 代入得系统的开环传递函数：

$$\frac{x(s)}{i(s)} = \frac{-1}{As^2 - B}$$

定义系统对象的输入量为功率放大器的输入电压也即控制电压 U_{in} ，系统对象输出量为

x 所反映出来的输出电压为 U_{out} (传感器后处理电路输出电压), 则该系统控制对象的模型可写为:

$$G(s) = \frac{U_{out}(s)}{U_{in}(s)} = \frac{K_s x(s)}{K_a i(s)} = \frac{-(K_s / K_a)}{As^2 - B} \quad (1-12)$$

$$A = \frac{i_0}{2g}, B = \frac{i_0}{x_0}$$

则有开环系统的特征方程为: $As^2 - B = 0$

$$s = \pm \sqrt{\frac{B}{A}} = \pm \sqrt{\frac{2g}{x_0}}$$

解得系统的开环极点为:

可以看出系统有一个开环极点位于复平面的右半平面, 根据系统稳定性判据, 即系统所有的开环极点必须位于复平面的左半平面时系统才稳定, 所以磁悬浮球系统是本质不稳定的。

由于电磁铁为感性负载, 实际上励磁线圈的电感作用将阻止任何时刻电流的突变, 实际上电感作用不可忽视。

7. 系统物理参数

实际系统的模型参数如下:

表 1-1 实际系统物理参数

参数	值	参数	值
m	104g	x_0^*	31.4mm
铁芯直径	$\phi 22\text{mm}$	漆包线径	$\phi 0.8\text{mm}$
R	13.8 Ω	r	21.9mm (浮球半径)
N	2450 匝	K	2.3142e-004 Nm^2 / A^2
i_0^*	0.54A	K_f	0.25



注 意

上参数表为产品出厂时相应参数的参考值, 由于环境变化可能会发生微弱的变化。其中带有*号的参数为本系统定义建立实际模型的参考值, 用户也可以换用其它大小重量的小球来进行实验。

8. 实际系统模型

将以上参数代入可得到

$$G_0(s) = \frac{28.74}{0.02755s^2 - 17.19}$$

系统输入量为电磁铁电压，输出量为小球位移。

当选择小球位移和小球速度为系统状态量时，系统的状态方程为：

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 623.956 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1043.19 \end{pmatrix} U_{in}$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} U_{in}$$

第二章 根轨迹校正实验

(一)实验目的

1. 了解根轨迹法校正系统的原理。
2. 采用根轨迹法设计磁悬浮控制器。

(二)实验设备

1. GML2001 磁悬浮系统
2. 电脑（装有 MATLAB 平台）
3. 电控箱

(三)实验原理

1. 设磁悬浮控制系统如图 2.1 所示。

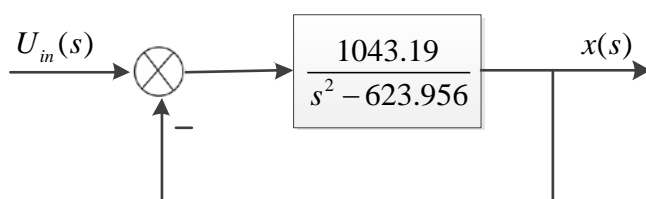


图 2.1 磁悬浮控制系统

未校正系统的开环传递函数为：

$$G_0(s) = \frac{1043.19}{s^2 - 623.956}$$

根轨迹校正部分的实验原理，请参考相关考教科书。

(四)实验步骤

- 1、磁悬浮的 Matlab 程序放在实验电脑的桌面上，可直接双击打开。
- 2、根轨迹校正 MATLAB 程序解析、编写。

根轨迹校正程序参考如图 2.2，可以根据参考程序搭建 simulink 程序。其中，controller1 模块，需要自行设计。

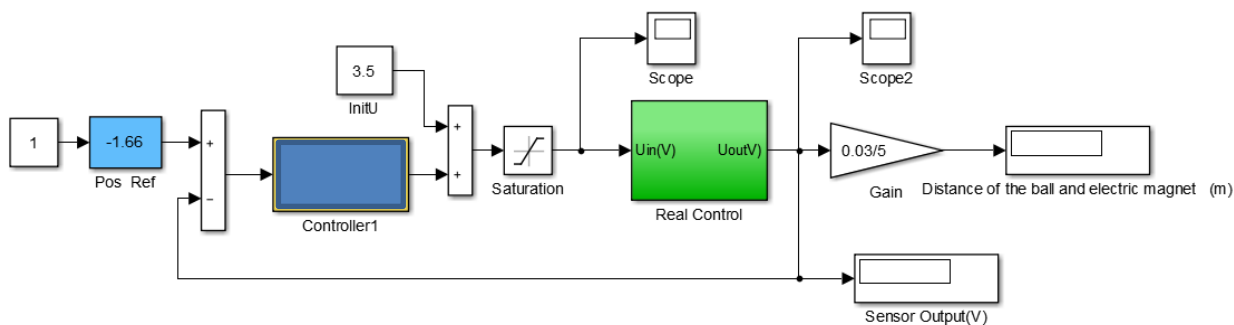


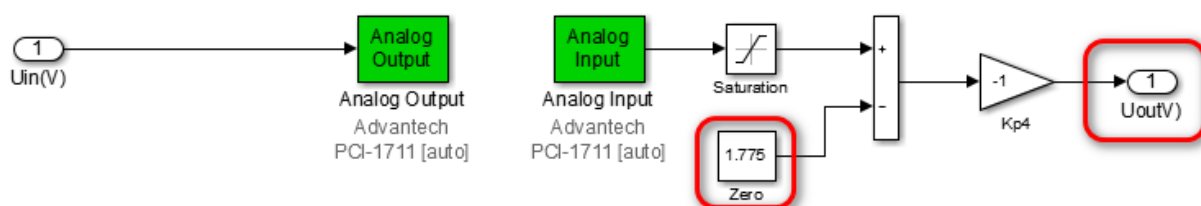
图 2.2 磁悬浮根轨迹控制系统参考程序

图 2.2 各模块功能说明如下：


- ① Pos Ref 模块：测距距离转换成模拟电压，单位：厘米转换成伏特；（前面给到的 5/3）

- ② **Controller1** 模块：根轨迹控制器；（此控制器需要自行设计）
- ③ **InitU** 模块：平衡点的电压。经测试，当输出电压在 3.5V 附近时，小球能在磁体表面距离小球顶端距离 1cm 处稳定，则给 **InitU** 填入 3.5 为平衡点的电压；
- ④ **Saturation** 模块：限幅模块；
- ⑤ **Real Control** 模块：为 1711 数据采集卡在 matlab 中的软件接口，用于标定激光传感器的零位，传感器零位与小球的大小和激光传感器的安装有关；
- Real Control** 模块程序如图 2.3 所示，**Saturation** 模块：限幅模块激光传感器反馈电压最大 5V，所以设置限幅为 5；**Kp4** 模块：由于输入信号为负值输入（与建模方向有关），所以反馈信号也需要乘以“-1”使系统闭环形成负反馈。

（此步骤已经提前调试过，zero 的值不再标定也可。）



- ⑥ **Gain** 模块：电压转换成距离，单位：伏特转换成米；

当根轨迹控制器设计好后，编译程序，点击  运行程序，用手扶起小球，可以悬浮，则控制器设计成功。

（五）实验任务与要求

1、分析磁悬浮系统校正前的系统根轨迹，以及系统的稳定性，要求：给出详细的分析、计算过程，并使用 **MATLAB** 进行仿真，截取仿真图作为实验结果的分析依据；

2、设计根轨迹法设计控制器：

要求：加入阶跃信号输入后，系统输出指标为：

- ✧ 超调量在 15% 以内；
- ✧ 稳态误差在 1mm 以内；
- ✧ 调节时间小于 0.04s；

设计校正环节，使小球稳定悬浮于电磁铁下方 10mm 位置。

分析磁悬浮系统校正后的系统根轨迹，以及系统的稳定性，要求：给出详细的分析、计算过程，并使用 **MATLAB** 进行仿真，截取仿真图作为实验结果的分析依据；

3、将设计的控制器加入到 **MATLAB** 程序中，将小球悬浮起来；给一定的干扰，系统仍能调整到稳定状态，截取实验响应曲线，分析设计的控制器是否达到设计要求。

注意：所有实验任务均在课上完成，当场记录成绩！