

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司

支持

张晓宇, 刘国清, 董金文, 吴桐.
采用观测气隙的电磁吸力悬浮系统研究.
电机与控制应用, 2022, 49(3): 33.



SEARI
上電科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



科技改变未来
智慧创造价值

· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号 手机: 18918357509 电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904 邮箱: wangcj@seari.com.cn

采用观测气隙的电磁吸力悬浮系统研究^{*}

张晓宇, 刘国清, 董金文, 吴桐
(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610097)

摘要: 传统电磁吸力悬浮采用气隙反馈实现闭环控制, 而气隙传感器具有体积大、造价高、安装复杂等缺点。提出了一种通过磁场与电流观测气隙, 使用观测气隙进行闭环反馈的电磁吸力悬浮方法。通过理论分析和仿真研究了气隙与磁场和电流间的函数关系; 设计分析了磁场测量点的位置; 利用函数关系进行气隙观测。实测数据表明: 通过磁场与电流观测气隙, 所得结果与实测气隙吻合, 该方法可以用于闭环反馈。从理论上分析了观测拟合系数对闭环系统稳定性的影响。最后通过试验实现了 7 mm 处的稳定悬浮。

关键词: 电磁悬浮; 气隙辨识; 霍尔传感器; 电磁仿真

中图分类号: TM937.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)03-0033-07

doi: 10.12177/emca.2021.207

Study on Electromagnetic Suction Levitation System with Observation Air Gap^{*}

ZHANG Xiaoyu, LIU Guoqing, DONG Jinwen, WU Tong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610097, China)

Abstract: The traditional electromagnetic suction levitation adopts air gap feedback to realize closed-loop control, while the air gap sensor has the disadvantages of large volume, high cost and complex installation. An electromagnetic suction levitation method is proposed, in which the air gap is observed by magnetic field and current, and the observed air gap is used for closed-loop feedback. The functional relationship between air gap, magnetic field and current is studied by theoretical analysis and simulation. The position of magnetic field measuring point is designed and analyzed. The measured data show that the observed air gap under the proposed electromagnetic suction levitation method is consistent with the measured air gap, so it can be used for closed-loop feedback. The influence of observation fitting coefficient on the stability of closed-loop system is analyzed theoretically. Finally, the stable levitation at 7 mm is realized in experiment.

Key words: electromagnetic levitation; air gap identification; Hall sensor; electromagnetic simulation

0 引言

磁悬浮是指通过电磁铁或者永磁体产生的磁场作用到悬浮物体上, 使得物体的重力与磁场产生的斥力或者吸力达到平衡, 从而实现物体悬浮。随着技术的不断进步, 磁悬浮的应用领域不再局限于悬浮列车, 在工业生产领域与生命科学领域也得到应用^[1]。如磁悬浮轴承^[2]、磁悬浮熔炼^[3]

和磁浮人工心脏泵^[4]等。

单自由度悬浮系统有结构简单、数学模型明确、控制性能直观、研发周期短的优点^[5]。开环单自由度悬浮系统主要包括电流传感装置、悬浮体、控制电路、电磁铁等。当电磁铁通入电流时, 悬浮体会在电磁铁产生的磁场的作用下受到与重力相反的力; 不断调节电流的大小, 可使悬浮体实现稳定的悬浮。

收稿日期: 2021-12-21; 收到修改稿日期: 2022-02-22

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目(521770060)

作者简介: 张晓宇(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电磁悬浮与直线电机驱动。

当悬浮体受到外界扰动时,可能使悬浮体产生过大的位移偏离从而导致电磁力突然变化,失去与重力的平衡,从而不能达到悬浮。为了使悬浮体在外界扰动下仍具有良好的悬浮能力,往往要引入气隙传感器作为反馈从而实现闭环控制^[6]。气隙的精确采集对悬浮体稳定悬浮尤为重要,而传统的气隙采集方式对气隙传感器精度的要求高,且造价昂贵、体积大、安装复杂。若采用无气隙传感器的反馈方式,不仅能简化系统、降低成本,同时也能减少由于传感器测量不稳定而导致悬浮控制系统不稳定的风险,从而提高悬浮可靠性。

当前无气隙传感器的悬浮控制研究主要集中在状态估计法和参数辨识法上^[7]。状态估计法是选取特定的物理量作为观测量、状态量和控制量。传统的状态估计法选取位置信息、电流大小以及线圈电压分别作为状态量、观测量和控制量。文献[8]引入了状态观测器。考虑到外界对悬浮体的扰动,文献[9]采用了混合状态观测器,这种方法去除了降维电流观测器和外力观测器。文献[10]采用的高频小信号测试法所测量的激励值过大或者过小,容易导致控制效果不精确。

本文以单自由度悬浮系统为研究对象,提出了一种基于磁场和电流观测气隙,使用观测气隙进行闭环反馈的电磁吸力悬浮方法,可实现悬浮控制。分析了气隙与磁场和电流之间的函数关系,对气隙观测函数进行拟合,并分析了气隙函数中的参数对闭环系统稳定性的影响,最终应用观测气隙方法实现了悬浮物在无气隙传感器条件下的悬浮。

1 电磁吸力悬浮系统电磁场悬浮理论分析

在单自由度电磁吸力悬浮系统中,悬浮物分为永磁体与导磁体。本文以后者作为悬浮物,搭建了电磁吸力悬浮模型。

考虑到电磁铁工作时产生的漏磁较大,为单自由度电磁吸力悬浮系统增加了金属外壳以减少漏磁。单自由度电磁吸力悬浮系统模型如图1所示。

当电磁铁中通入电流时,根据安培环路定律^[11]有

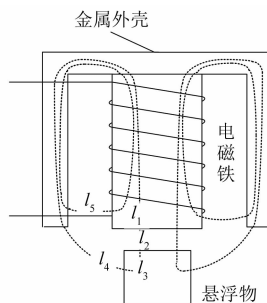


图1 单自由度电磁吸力悬浮系统模型

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 + N i' = N i \quad (1)$$

式中: $l_1 \sim l_4$ 分别为电磁铁及外壳、气隙、悬浮物、悬浮物到金属外壳间的积分路径的等效长度; $H_1 \sim H_4$ 分别为电磁铁及外壳、气隙、悬浮物内部、悬浮物到金属外壳间的磁场强度; N 为线圈匝数; i' 为 l_5 路径上漏磁对应的电流分量。

假设磁场为均匀磁场,则式(1)可以改写为

$$\frac{B}{\mu_0} \left(\frac{l_1}{\mu_{r1}} + l_2 + \frac{l_3}{\mu_{r2}} + l_4 \right) = N i - N i' \quad (2)$$

式中: μ_{r1} 为电磁铁的相对磁导率; μ_{r2} 为悬浮物的相对磁导率, $\mu_{r1} = \mu_{r2} = \mu_r$; B 为磁感应强度; $l_2 = \delta$, δ 为悬浮气隙值。显然,积分路径 l_4 与气隙存在比例关系。

式(2)可以表示为

$$B = \frac{\mu_0 N i (1 - K')}{(1 + \lambda) \delta + \delta_0} \quad (3)$$

式中: K' 为 l_5 路径漏磁的电流分量与主磁电流的比例系数; λ 为气隙与积分路径 l_4 的比例系数;

$$\delta_0 = \frac{l_1 + l_3}{\mu_r}。$$

由于结构原因,会有一部分磁通只经过金属外壳而不经悬浮物。假设这部分漏磁 $N i'$ 不会随气隙变化而变化,而与流经电磁铁中的电流正相关,则式(3)可写为

$$\delta = K_1 \cdot \frac{i}{B} - \delta_1 \quad (4)$$

$$\text{式中: } K_1 = \frac{\mu_0 N (1 - K')}{1 + \lambda}; \delta_1 = \frac{\delta_0}{1 + \lambda}。$$

2 电磁场有限元仿真

为了验证对式(4)假设的正确性,选取 7 mm 作为悬浮平衡点,对不同电流下的电磁模型进行有限元仿真。仿真参数如表1所示。仿真结果如

表 2 所示。

表 1 电磁铁仿真参数

参数名称	参数值
线圈电流/A	2.5
电磁铁长度/mm	60
电磁铁直径/mm	36
线圈匝数	367
悬浮物等效截面积/m ²	5.3×10 ⁻⁴
悬浮物长度/mm	88

表 2 仿真结果

电流/A	气隙/mm	总磁通/mWb	漏磁通/mWb
2.5	6	4.609	1.848
2.5	7	4.478	1.846
2.5	8	4.550	1.850
1.0	7	1.868	0.740
2.0	7	3.622	1.480
3.0	7	5.498	2.224

由表 2 可知,漏磁大小与气隙近似无关,与总安匝数近似成正比。

为了获取更准确的磁场,设计了两个磁场测量点,如图 2 所示。位置 1 是悬浮物顶部几何中心,位置 2 是电磁铁底部几何中心。仿真参数仍如表 1 所示。

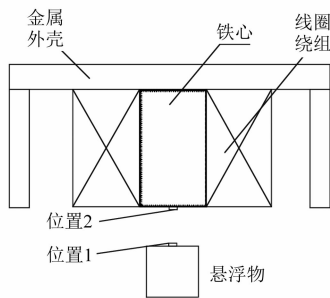


图 2 霍尔传感器不同放置位置

气隙为 7 mm, 电流为 2.5 A 时,磁密分布图如图 3 所示。

磁密分布图显示,气隙为 7 mm 时,气隙的磁感应强度仅为 0.07 T 左右,未达到悬浮物磁场强度的饱和值 0.84 T,可以认为此时磁感应强度与磁场强度之间的关系为线性关系。

分别对位置 1 与位置 2 两个位置的磁感应强

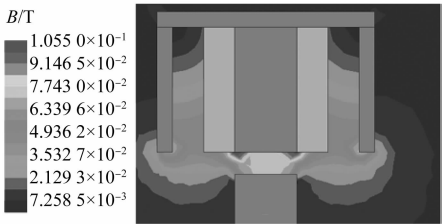


图 3 磁密分布图

度随气隙的变化情况进行仿真。结果如图 4 所示。

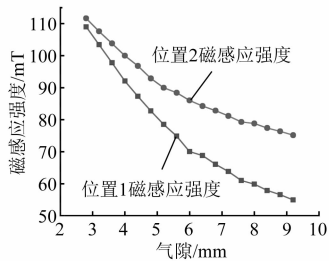


图 4 位置 1、2 磁感应强度值

大气隙下漏磁不断增多,导致位置 1 较位置 2 磁感应强度值变化更明显。

3 磁场测量及传感器安装

由式(4)知,若 K_I 已知,则可以借助通入电磁铁中的电流和磁感应强度观测气隙,磁感应强度可以通过霍尔传感器测量。与气隙传感器相比,霍尔传感器安装方便,成本低,更易于集成,可以通过磁场测量电路输出一个电压信号。磁场测量原理如图 5 所示。

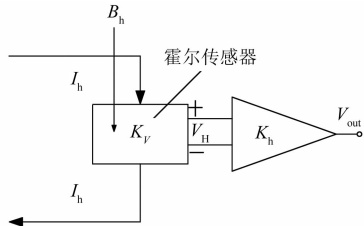


图 5 磁场测量原理

当通入霍尔传感器中的电流 I_h 与通过霍尔传感器的磁场感应强度 B_h 恒定时,霍尔传感器两端的电压与温度的关系为

$$V_H = K_T \cdot T + a \tag{5}$$

式中: V_H 为霍尔传感器两端电压; K_T 为温度系数; K_V 为霍尔传感器敏感系数; T 为温度; a 为

偏置。

磁场测量电路输出的电压与霍尔传感器两端电压关系为

$$V_{out} = K_h V_H = K_h K_V I_h B_h + a K_h \tag{6}$$

式中： V_{out} 为磁场测量电路输出的电压值； K_h 为磁场测量电路的放大系数。

在电磁铁中通入 2.5 A 电流，测得在气隙为 7 mm 时两位置磁场测量电路输出电压变化情况如图 6 所示。

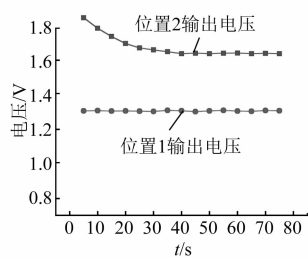


图6 相同电磁铁电流下位置1与位置2的磁场测量电路输出电压

由图 6 可知，当霍尔传感器放在位置 2 时，随着时间增加，磁场测量电路的输出电压先逐渐减小然后保持不变，这是由电磁铁通入的电流导致电磁铁温度升高所致。当霍尔传感器放在位置 1 时，输出电压基本保持不变。

综上所述，位置 1 对磁感应强度的灵敏度高于位置 2，且位置 2 易受到温度影响，故将霍尔传感器放置于位置 1。

将霍尔传感器置于位置 1，在线圈中通入 2.5 A 的电流。由表 2 知，可以近似认为在平衡点附近固定漏磁为总磁通的 40%。计算式(4)中 λ 为 0 时的磁感应强度的理论值并对电磁悬浮模型进行有限元仿真，其磁场理论值、仿真值、实际值曲线如图 7 所示。在平衡点附近，实际值与仿真值基本一致。部分计算与仿真结果如表 3 所示。

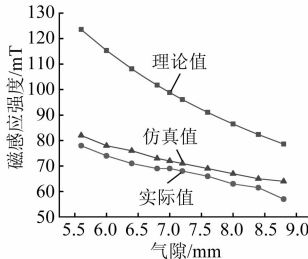


图7 位置1的磁感应强度

表3 计算与仿真结果

气隙/mm	理论值/mT	仿真值/mT	理论值/仿真值
5.6	123.6	82	1.51
6.4	108.1	76	1.42
6.8	101.7	73	1.39
7.0	98.8	72	1.37
7.2	96.1	71	1.35
8.0	86.5	67	1.29
8.4	82.4	65	1.26

由于 $\delta_0 \ll \delta$ ，可以忽略 δ_0 对 δ 的影响，理论值与仿真值的比值即为 $1+\lambda$ 在平衡点附近发生较小位移时的值。由表 3 可知，可以近似认为 λ 在平衡点附近为一常值。

4 气隙观测函数的设计

采集电路与悬浮电路结构设计如图 8 所示。闭合开关 2 与开关 3，断开开关 1，使得悬浮物在传统模式下稳定悬浮。在平衡点附近上下拽动悬浮物，采集实时的气隙、电流以及磁场信号，根据式(4)的形式进行拟合。闭合开关 1，断开开关 2 与开关 3，将拟合函数运用到悬浮控制中，从而实现无气隙传感的悬浮。

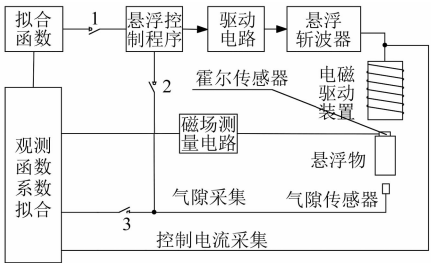


图8 采集电路与悬浮电路结构

4.1 观测气隙的拟合

加入霍尔传感器和磁场测量电路，采集悬浮物在平衡点周围的磁场测量电压、线圈电流以及气隙值。采用两种方法对这些实测数据开展分析，进行观测气隙拟合。

方法一：非线性曲线局部线性化。将式(4)在平衡点附近展开，并忽略二阶及其以上项，有：

$$\delta = f(i, B) = \Delta \delta + \delta_1 = f(i_0, B_0) + \frac{\partial f}{\partial i} \cdot \Delta i + \frac{\partial f}{\partial B} \cdot \Delta B \tag{7}$$

式中: i_0 为平衡点的电流值; B_0 为平衡点的磁感应强度值; δ_1 为设定的气隙参考值; $\Delta\delta$ 为实际气隙与参考气隙的差值。

将 $f(i_0, B_0) = \delta_1$ 代入式(7)有:

$$\Delta\delta = K_I \cdot \Delta i + K_B \cdot \Delta B \quad (8)$$

式中: $K_I = \frac{\partial f}{\partial i}$, $K_B = \frac{\partial f}{\partial B}$ 。

此方法可以很好地解决平衡点线性化的问题,但拟合函数中有两个变量,增加了函数拟合的复杂性。此外,这种方法只在平衡点附近很小的范围内适用,当有大扰动发生时,最终的控制效果会偏离预期。

方法二:设 $\tilde{i}$ 、 $\tilde{\delta}$ 、 $\tilde{B}$ 为 i 、 δ 、 B 的检测值,且认为 $\tilde{\delta} = \delta$ 。为了克服第一种方法的缺陷,假设

$$\begin{cases} \bar{K}_1 \cdot \left(\frac{\tilde{i}_1}{B_1} \right) - \tilde{\delta}_0 = \hat{\delta}_1 \\ \bar{K}_1 \cdot \left(\frac{\tilde{i}_2}{B_2} \right) - \tilde{\delta}_0 = \hat{\delta}_2 \\ \vdots \\ \bar{K}_1 \cdot \left(\frac{\tilde{i}_n}{B_n} \right) - \tilde{\delta}_0 = \hat{\delta}_n \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\hat{\delta}_1 \sim \hat{\delta}_n$ 为气隙的观测值; $i_1 \sim i_n$ 为不同时刻的电流; $B_1 \sim B_n$ 为对应时刻的磁感应强度。

在函数拟合过程中将 $\frac{i}{B}$ 视为一个参变量,不但简化了函数拟合,而且拟合函数在气隙变化明显时仍适用。

$$\text{令 } \begin{bmatrix} \left(\frac{\tilde{i}_1}{B_1} \right) - 1 \\ \left(\frac{\tilde{i}_2}{B_2} \right) - 1 \\ \vdots \\ \left(\frac{\tilde{i}_n}{B_n} \right) - 1 \end{bmatrix} = A, \begin{bmatrix} \bar{K}_1 \\ \tilde{\delta}_0 \end{bmatrix} = x, \begin{bmatrix} \hat{\delta}_1 \\ \hat{\delta}_2 \\ \vdots \\ \hat{\delta}_n \end{bmatrix} = Y,$$

有:

$$\begin{cases} A^T A x = A^T Y \\ x = (A^T A)^{-1} A^T Y \end{cases} \quad (10)$$

通过试验测得的部分数据如表4所示。

将所有实测数据代入式(10)中,求得 $x = \begin{bmatrix} 199 \\ -0.2 \end{bmatrix}$,也即求得拟合函数为 $\hat{\delta} = 199 \cdot \frac{\tilde{i}}{\tilde{B}} - 0.2$ 。

表4 实测数据

i/A	V_{out}/V	B/mT	δ/mm
1.34	0.77	40.4	6.4
2.13	1.15	60.6	6.8
2.53	1.31	69.1	7.0
2.81	1.59	75.1	7.2
4.43	2.03	107.5	8.0
5.95	2.49	131.6	8.8

4.2 观测气隙试验

同理,得到实际气隙函数 $\hat{\delta} = 199 \cdot \frac{\tilde{i}}{\tilde{B}} - 0.2$,

得到的拟合曲线如图9所示。

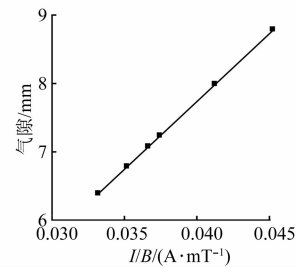


图9 气隙函数拟合曲线

为了确定气隙观测函数的可靠性,在平衡位置附近上下拽动悬浮物,绘制了实际气隙曲线与观测气隙的动态波形,如图10所示。

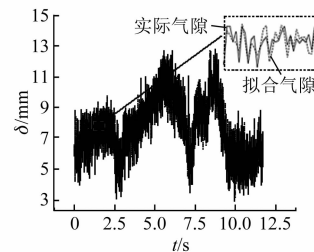


图10 实际气隙与观测气隙动态波形

由图10知,观测气隙可以跟随实际气隙。

5 观测气隙的仿真与分析

5.1 观测参数对闭环系统的影响

采用PD控制下悬浮系统的动力学方程组为

$$\begin{cases} m \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = mg - F + f_d \\ F = \frac{\mu_0 S N^2 i^2}{2 \delta^2} \\ \Delta i = k_p \Delta \delta + k_d \Delta \dot{\delta} \end{cases} \quad (11)$$

式中: m 为悬浮物质量; g 为重力加速度; F 为所受磁场力; f_d 为外界干扰; k_p 、 k_d 分别为控制系数。

δ_0 为参考气隙, $F(I_0, x_0) = mg$ 为平衡点所受磁场力。令 $k_\delta = \frac{\mu_0 SN^2 i_0^2}{\delta_0^3}$, $k_i = \frac{\mu_0 SN^2 i_0}{\delta_0^2}$, 则有:

$$m\Delta\ddot{\delta} + k'_d\Delta\dot{\delta} + k'_p\Delta\delta = 0 \quad (12)$$

式中: $k'_d = k_d k_i$, $k'_p = k_p k_i - k_\delta$ 。

采用观测气隙作为反馈有

$$\begin{cases} \Delta\dot{\delta} = \bar{K}_1 \cdot \frac{\dot{i}}{B} + \bar{b} + \delta_0 \\ \Delta\ddot{\delta} = K_1 \cdot \frac{i}{B} + b + \delta_0 \end{cases} \quad (13)$$

则:

$$\begin{aligned} \Delta\hat{\delta} &= \frac{\bar{K}_1}{K_1}(\Delta\ddot{\delta} - b - \delta_0) + \bar{b} + \delta_0 = \\ &\frac{\bar{K}_1}{K_1}\Delta\ddot{\delta} - \frac{\bar{K}_1}{K_1}(b + \delta_0) + \bar{b} + \delta_0 \end{aligned} \quad (14)$$

将式(14)代入式(12)得:

$$m'\Delta\ddot{\delta} + k''_d\Delta\dot{\delta} + k''_p\Delta\delta = b' \quad (15)$$

式中: $b' = \frac{\bar{K}_1}{K_1}(b + \delta_0) + \bar{b} + \delta_0$, $k''_d = k'_d \frac{\bar{K}_1}{K_1}$, $m' =$

$\frac{m\bar{K}_1}{K_1}$, $k''_p = k'_p \frac{\bar{K}_1}{K_1}$ 为系统的刚度。系统的特征方程为

$$p(s) = s^2 + \frac{k'_d}{m}s + \frac{k'_p}{m} \quad (16)$$

该系统为二阶系统,其阻尼系数为 $\frac{k'_d}{2\sqrt{mk'_p}}$,

自振角频率为 $\sqrt{\frac{k'_p}{m}}$ 。

由式(14)知,当 $\bar{b} + \delta_0 - \frac{\bar{K}_1}{K_1}(b + \delta_0)$ 的值不为 0 时,会对平衡点位置产生影响。由式(15)知,当气隙观测函数拟合系数 $\bar{K}_1$ 与实际气隙函数拟合系数 K_1 的比值大于 1 时,在平衡点附近系统的刚度变大,当气隙观测函数拟合系数 $\bar{K}_1$ 与实际气隙函数拟合系数 K_1 的比值小于 1 时,在平衡点附近系统的刚度变小。

5.2 观测气隙在闭环系统中的控制仿真

为了验证试验的可行性,根据图 6 在 Simulink 仿真条件下搭建了传统控制方式实现悬浮物在气

隙为 7 mm 处的悬浮模型,并将拟合的气隙观测函数加入气隙辨识模型中,如图 11 所示。

为了检验气隙观测函数的可靠性,在模型中加入方波扰动。两种不同控制方式下的气隙响应曲线如图 12 所示。

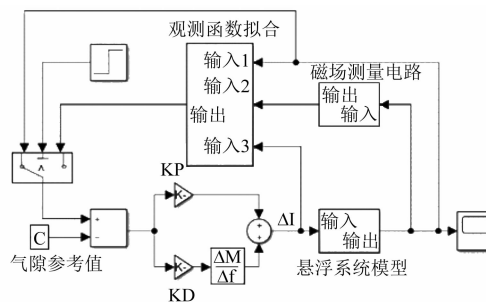


图 11 Simulink 仿真模型

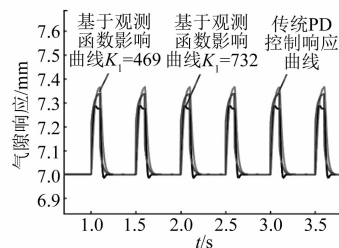


图 12 两种控制下的响应曲线

由图 12 可知,基于霍尔传感器的悬浮控制在扰动下的响应与传统 PD 控制响应基本一致。

6 试 验

现将得到的气隙观测函数应用到悬浮控制电路中。由于没有使用气隙传感器,在放入悬浮物之前在电磁铁中通入 $I = 2.5$ A 的电流产生磁场,然后将悬浮物放到平衡点附近,待磁场检测电路检测到有输出电压时取消恒定电流。实际悬浮效果如图 13 所示。

绘制悬浮物的浮动波形如图 14 所示。由图 14 可知,通过气隙观测函数作为气隙反馈的方法,可以实现悬浮物在气隙为 7 mm 处的悬浮。

7 结 语

提出了一种基于气隙辨识的无气隙传感器悬浮系统,推导了气隙与电流和磁感应强度的数学模型,利用有限元仿真软件对数学模型进行仿真。分析了利用拟合气隙作为气隙反馈的方法,并将



图 13 悬浮试验平台

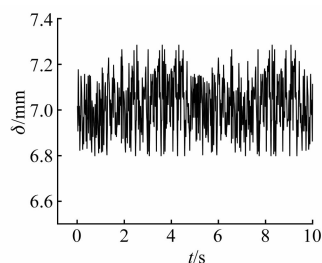


图 14 悬浮物浮动曲线

拟合函数应用到悬浮控制系统中。试验表明,悬浮物实现了在气隙为 7 mm 处的悬浮。

【参考文献】

- [1] GHOSH A, KRISHNAN T R, TEJASWY P, et al. Design and implementation of a 2-DOF PID compensation for magnetic levitation systems[J]. ISA Transactions, 2014, 53(4): 1216.

- [2] 张维煜,朱焜秋,袁野. 磁悬浮轴承应用发展及关键技术综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 12.
- [3] 王永清,李雷,周金香,等. 电磁悬浮熔炼技术的发展及其在金属中气体分析领域的应用[J]. 冶金分析, 2008, 28(11): 16.
- [4] 刘泽辉. 磁悬浮离心式人工心脏泵设计及性能评价[D]. 济南:山东大学, 2021.
- [5] 张弛,陆永华,梁立鹏,等. 基于双霍尔传感器的磁性小球悬浮控制系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(11): 86.
- [6] 姜文雪,周凯. 基于干扰观测器的磁悬浮系统精确反馈线性化[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(10): 1067.
- [7] 戴玉. 无气隙传感器悬浮控制器研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
- [8] VISCHER D, BLEULER H. Self-sensing active magnetic levitation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(2): 1276.
- [9] TZENG Y, WANG T C. A novel compensating approach for self-sensing maglev system with controlled-PM electromagnets [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(6): 4208.
- [10] SCHAMMASS A, HERZOG R, BUHLER P, et al. New results for self-sensing active magnetic bearings using modulation approach[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(4): 509.
- [11] 王泽忠. 工程电磁场[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2011.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部