

基于双霍尔传感器的磁性小球悬浮控制系统研究

张 驰, 陆永华, 梁立鹏, 赵采仪

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

摘要: 文章设计并实现了一种基于双线性霍尔传感器结构的磁性小球悬浮控制系统, 在电磁驱动器底端及顶端中心位置各同向布置一个线性霍尔传感器, 通过传感器信号调理电路, 将两路传感器的输出信号作减法处理, 消除了电磁驱动器磁场对传感器输出信号的影响; 试验表明, 磁性小球到电磁驱动器底端距离为 16.46~42.46 mm 时, 调理电路输出电压值与磁性小球到电磁驱动器底端距离的负三次方成正比; 基于 PID 控制策略, 设计了一个磁性小球悬浮控制系统, 选取合适的 PID 控制器参数, 试验表明, 系统的超调量和响应速度能够符合设计要求, 磁性小球实现了在 25 mm 位置处的稳定磁悬浮, 系统的位置控制精度达到 ± 0.125 mm。

关键词: 双霍尔传感器; 减法处理; 磁悬浮球; PID 控制

Research on Magnetic Ball Levitation Control System Based on Double Hall Sensor

Zhang Chi, Lu Yonghua, Liang Lipeng, Zhao Caiyi

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A magnetic ball levitation control system based on the structure of the double linear Hall sensor is designed and realized in this paper. The sensor is respectively placed in the bottom and the top center position of the electromagnetic driver. In order to eliminate the influence of electromagnetic driver magnetic field upon the sensor output signal, the output signal of the sensor is done subtract by the signal conditioning circuit. The experiment shows that when the distance varies within the range between 16.46 and 42.46 mm, the output voltage value of the signal conditioning circuit is proportional to the -3 power of the distance between the magnetic ball and the bottom end of the electromagnetic driver. We design a magnetic ball levitation control system based on PID controller and select suitable PID controller parameters. The overshoot and response speed of the system can meet the design requirements. The stable magnetic levitation of the magnetic ball at the position of 25 mm is realized. The position control accuracy of the system is up to ± 0.125 mm.

Keywords: double Hall sensor; subtraction processing; magnetic levitation ball; PID control

0 引言

磁悬浮是指物体利用磁场产生的电磁力抵消自身重力作用无支撑地悬浮于空中。随着电子技术与控制技术的发展, 磁悬浮技术在科学性研究和工业技术领域、生命科学领域等得到了广泛的应用^[1], 如磁悬浮轴承、磁悬浮列车、磁悬浮高速电机、磁悬浮天平等^[2-5], 同时, 磁悬浮技术研究的开展能带动控制技术、测量技术及电子技术等共同发展, 因此, 开展关于磁悬浮技术的研究具有重要的意义。

在磁悬浮技术研究领域, 单自由度磁悬浮球系统组成相对简单, 数学模型相对明确, 控制性能相对直观, 研发周期也相对较短, 得到了研究人员的重视与关注。如图 1 所示为单自由度磁悬浮球系统工作结构示意图, 该系统主

要由电磁驱动器、功率放大器、被控悬浮球体、传感器和控制器等部分组成。电磁驱动器线圈绕组通电后会产生电磁场, 位于磁场中的被控悬浮球体受到电磁吸力的作用, 通过控制电磁驱动器线圈绕组中通过的电流大小, 使被控悬浮球体受到的电磁力与其自身的重力相平衡, 进而无接触地稳定悬浮于空中。

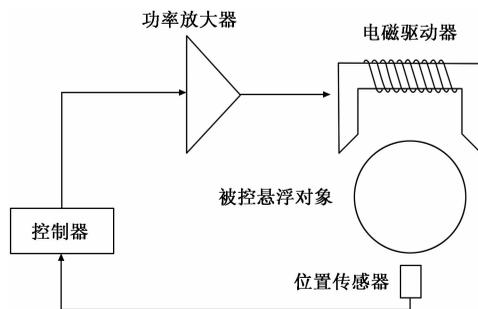


图 1 磁悬浮球系统结构示意图

磁悬浮球系统是一个典型的开环不稳定系统, 当系统受到外界的干扰时, 被控悬浮对象可能较大的偏离平衡位置, 电磁力激变, 电磁力无法保持与重力相平衡的状态,

收稿日期: 2019-04-29; 修回日期: 2019-05-21。

基金项目: 国家自然科学基金(51575277)。

作者简介: 张 驰(1994-), 男, 安徽黄山人, 硕士研究生, 主要从事计算机辅助测控方向的研究。

通讯作者: 陆永华(1977-), 男, 江苏南通人, 博士, 教授, 主要从事智能检测与控制、机器人、传感器方向的研究。

被控悬浮对象失去稳定的悬浮状态。为了实现对被控悬浮对象的稳定控制, 必须在控制系统中加入位置传感器作为反馈环节实现闭环控制^[6]。常用的磁悬浮球系统位置传感器包括光电位置传感器^[7-9]、电涡流传感器^[10]、线性霍尔传感器^[11]等。然而, 在传统的采用单线性霍尔传感器的磁悬浮球系统中, 传感器受到电磁驱动器磁场的影响, 输出信号受电磁驱动器和被控悬浮对象产生的磁场共同作用影响, 线性霍尔传感器输出信号既难以准确反映出被控悬浮对象的位置信息, 也不利于调整被控悬浮对象的平衡位置。

本文根据磁悬浮球系统的工作原理, 提出了一种基于双线性霍尔传感器结构的磁性小球悬浮控制系统, 设计并实现了系统的机械结构和硬件电路。利用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件对磁悬浮球系统的被控悬浮对象, 即磁性小球的磁场进行了分析, 并对信号调理电路的输出信号进行了标定试验。在此基础上, 基于 PID 控制策略, 设计了一个磁性小球悬浮控制系统, 使一个直径 $\phi 12.7$ mm, 表面磁感应强度 677.3 mT 的磁性小球在 25 mm 位置处稳定悬浮, 系统的位置控制精度达到 ± 0.125 。

1 磁悬浮球系统硬件设计与实现

磁悬浮球系统硬件主要分为机械机构和电路结构两大部分, 其中磁悬浮球系统的机械设计主要以电磁驱动器的设计为主, 电路设计主要以电磁驱动器电流驱动器电路设计和被控悬浮对象位置检测电路设计两部分为主。

1.1 系统机械结构

如图 2 给出了本文设计的基于双线性霍尔传感器结构的磁性小球悬浮控制系统的圆柱型电磁驱动器结构示意图, 主要由线圈骨架、线圈绕组、顶端线性霍尔传感器及底端线性霍尔传感器等部分组成。电磁驱动器是一个对称的圆柱体, 主要由线圈骨架和线圈绕组两部分组成, 顶端线性霍尔传感器及底端线性霍尔传感器分别同向布置在电磁驱动器线圈骨架的底端和顶端中心位置。磁悬浮球系统工作时, 电磁驱动器线圈绕组通电后在底端和顶端中心位置产生大小和方向相同的磁场, 通过信号调理电路将顶端线性霍尔传感器与底端线性霍尔传感器的输出信号作减法处理, 可以消除电磁驱动器磁场对输出信号的影响, 调理电路的输出信号与磁性小球的位置相关。

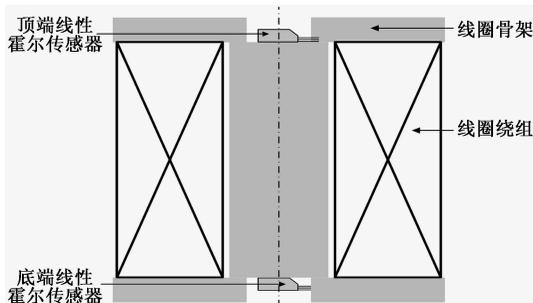


图 2 圆柱型电磁驱动器结构示意图

线圈作为电磁驱动器, 线圈骨架材料为丙烯酸塑料, 电磁驱动器的相关参数如表 1 所示。被控悬浮对象为一个钕铁硼制成的磁性小球, 性能牌号为 N42, 磁性小球直径 $d = 12.7$ mm, 质量 $m = 8.15$ g, 表面磁感应强度 $B_s = 677.3$ mT。

根据表 1 所示的电磁驱动器相关参数, 设计并制作的磁悬浮球系统机械装置如图 3 所示, 磁悬浮球系统的机械机构以铝合金作为主要材料, 机械装置主要由电磁驱动器、顶端线性霍尔传感器、底端线性霍尔传感器及铝合金支架等部分组成。

表 1 电磁驱动器相关参数表

参数	符号	大小(单位)
线圈匝数	N	1445
内径	r	7.5 (mm)
外径	R	20 (mm)
高度	H	60 (mm)
磁通横截面积	A	$1.767 \times 10^{-4} (\text{m}^2)$
电阻	R	9.3 (Ω)

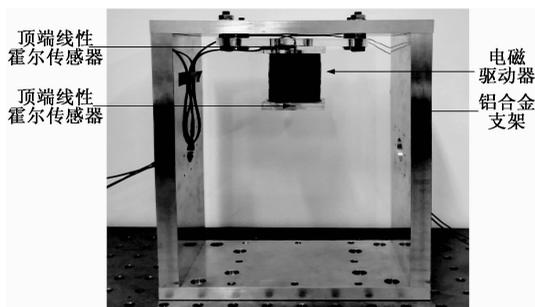


图 3 磁悬浮球系统机械装置

1.2 系统电路结构

为了实现对磁性小球的位置控制, 系统需要对磁性小球的位置实时检测, 通过将磁性小球的实际位置与理论位置进行比较, 调节电磁驱动器线圈绕组中的电流大小, 保证磁性小球在平衡位置处的稳定悬浮。基于双线性霍尔传感器结构的磁性小球悬浮控制系统电路结构如图 4 所示。

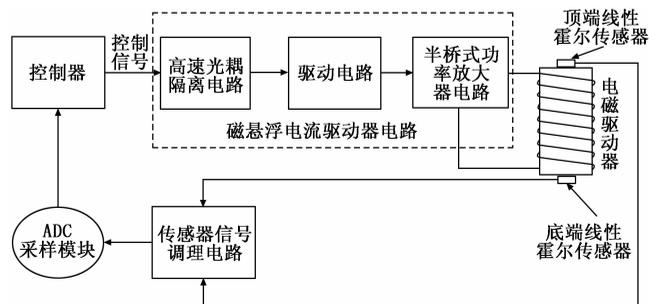


图 4 系统控制电路结构图

系统控制电路主要由控制器、电流驱动器电路、传感器信号调理电路、ADC 采样模块等部分组成。为了实现对电磁驱动器线圈绕组中的电流大小进行实时控制, 采用电流驱动器电路对电磁驱动器负载供电, 通过控制器输出—

本文采用一个 1 445 匝漆包线绕制的空心圆柱型螺线管

路占空比可调 PWM 信号控制电磁驱动器线圈绕组中通过的电流大小。电流驱动器主要由高速光耦隔离电路、驱动电路及功率放大器电路三部分组成。为了减少驱动电路对前级控制电路的影响,控制器与驱动器电路通过高速光电耦合器进行隔离;功率放大器电路采用半桥式拓扑结构,具有响应速度快、开关损耗小、输出脉宽没有限制等优点

线性霍尔传感器、传感器信号调理电路及 ADC 采样模块组成了系统的位置检测电路。系统工作时,传感器信号调理电路将两路线性霍尔传感器的输入信号作减法、放大等处理,并经由 ADC 采样模块将传感器信号调理电路输出电压值传递给控制器,控制器通过计算将传感器信号调理电路输出电压值转换为磁性小球的位置信息,从而实现了

2 磁场仿真与传感器标定

基于双线性霍尔传感器结构的磁性小球悬浮控制系统,信号调理电路的输出信号直接反映的是两个线性霍尔传感器所在位置的磁感应强度差值,通过分析磁性小球极轴线上的磁感应强度变化趋势,可以获得信号调理电路的输出信号与磁性小球到底端线性霍尔传感器距离之间的对应关系。

2.1 磁性小球磁场仿真

基于 COMSOL Multiphysics 多物理场有限元仿真软件,建立球形钕铁硼永磁体模型,求解出磁性小球的磁场分布。如图 5 所示为磁性小球在其极轴平面内的磁场分布图,其中 z 轴为磁性小球的极轴。磁性小球极轴线上磁感应强度变化曲线如图 6 所示。

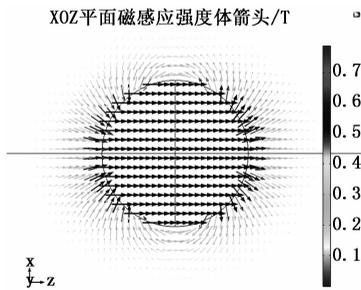


图 5 磁性小球 XOZ 平面磁场体分布图

由图 6 可知,磁性小球轴线上某点的磁感应强度的量值随着距离的增大而减小,且磁感应强度的量值和场点与源点距离的三次方成反比,磁性小球轴向上某点的磁感应强度量值与距离的关系如式 (1) 所示:

$$B_z = \beta z^{-3} \quad (1)$$

式中, B_z 为磁性小球轴向上某点的磁感应强度量值,单位 T ; z 为场点与球心之间的距离,单位 mm ; 拟合系数 $\beta = 1.73 \times 10^5 \text{ mT}/(\text{mm}^{-3})$ 。

2.2 位置传感器标定试验

根据霍尔效应可知,线性霍尔传感器的输出电压与所在位置点的磁感应强度线性相关^[13],如式 (2) 所示,当磁

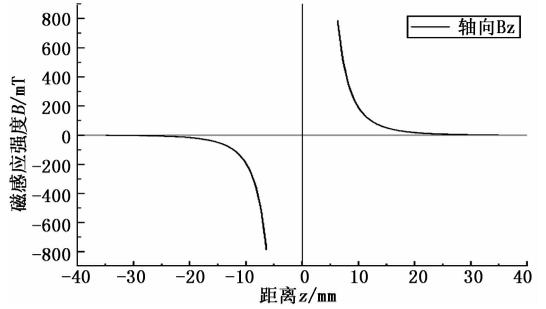


图 6 磁性小球极轴线上磁感应强度变化曲线

性小球与线性霍尔传感器之间的距离改变时,线性霍尔传感器的输出信号发生相应改变。

$$V_h = KIB + U_0 \quad (2)$$

式中, V_h 为线性霍尔传感器的输出电压值,单位 V ; B 为线性霍尔传感器所在位置磁感应强度值,单位 T ; I 为通过霍尔的电流大小,单位 A ; K 为霍尔灵敏度,单位 kg/s^{-2} ; U_0 为线性霍尔不受磁场作用时的输出电压,单位 V 。

磁悬浮球系统工作时,假设电磁驱动器线圈绕组在其底端和顶端中心位置处产生的磁场的磁感应强度大小为 B_1 ,当磁性小球与底端线性霍尔传感器的距离为 x 时,由式 (1) 和式 (2) 可得,底端线性霍尔传感器的输出电压理论值为:

$$U_1 = KI(B_1 - \beta x^{-3}) + U_0 \quad (3)$$

顶端线性霍尔传感器的输出电压理论值为:

$$U_2 = KI[B_1 - \beta(x + H)^{-3}] + U_0 \quad (4)$$

通过信号调理电路将顶端线性霍尔传感器与底端线性霍尔传感器的输出信号作减法处理,得到信号调理电路的输出电压为:

$$U_m = U_2 - U_1 \quad (5)$$

将式 (3) 和式 (4) 代入式 (5),考虑到当 H 较大时, $(x + H)^{-3} \approx 0$, 因此最终可得:

$$U_m = KI\beta x^{-3} \quad (6)$$

由式 (6) 可知,理论上,信号调理电路的输出电压值与磁性小球到底端线性霍尔传感器距离的负三次方成正比。

基于如图 7 所示的标定试验装置,对信号调理电路的输出电压进行标定试验,表 2 给出了传感器信号调理电路输出电压与磁性小球到电磁驱动器底端距离之间的对应关系。根据表 2 中的试验数据及式 (6),对输出电压值和距

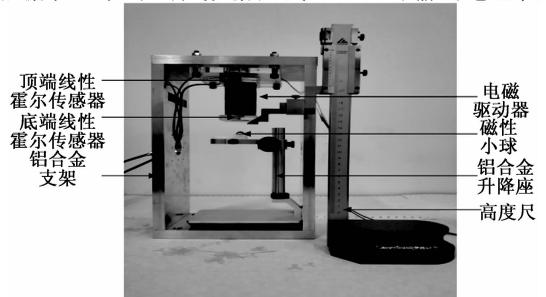


图 7 标定试验装置图

离进行了幂函数拟合, 拟合结果如图 6 所示。

$$U = \gamma x^{-3} \quad (7)$$

由图 8 可知, 调理电路输出电压与磁性小球到电磁驱动器底端距离之间具有良好的负三次幂拟合关系, 信号调理电路的输出电压与磁性小球到底端线性霍尔传感器的距离的负三次方成正比, 拟合曲线函数如式 (7) 所示, 其中系数 $\gamma=6\,940\text{ V/mm}^{-3}$, 拟合相关系数为 0.998 7, 标定试验结果与磁性小球的磁场仿真结果及理论推导结果相符。

表 2 信号调理电路输出电压试验数据

序号	距离 x/mm	输出电压值 U_m/V
1	16.46	1.525
2	18.44	1.119
3	20.42	0.860
4	22.46	0.617
5	24.44	0.471
6	26.44	0.375
7	27.46	0.329
8	28.50	0.298
9	29.46	0.278
10	30.50	0.245
11	31.52	0.224
12	32.40	0.206
13	33.50	0.181
14	34.46	0.168
15	35.46	0.154
16	36.44	0.143
17	37.40	0.133
18	38.52	0.121
19	39.40	0.113
20	40.44	0.103
21	41.46	0.098
22	42.46	0.091

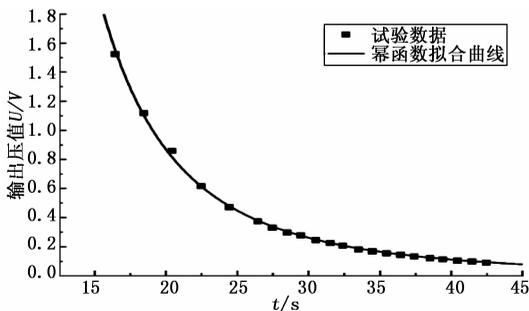


图 8 调理电路输出电压与磁性小球位置关系曲线

3 控制系统仿真与试验

3.1 磁悬浮球系统的线性化数学模型

磁悬浮球系统中, 不考虑永磁体漏磁等情况, 电磁驱动器对磁性小球的电磁力为^[14]:

$$F = \frac{\mu_0 AN^2 I^2}{2x^2} \quad (8)$$

式中, $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}\text{ N/A}^2$ 为空气磁导率; I 为电磁驱动器线圈绕组中通过的电流大小, 单位 A; 其余表达符在表 1 中有具体说明。此外, 磁性小球还受到自身重力 mg , 根据牛顿第二定律, 平衡时, 系统的动力学方程为:

$$F(x_0, I_0) = \frac{\mu_0 AN^2 I_0^2}{2x_0^2} = mg \quad (9)$$

式中, x_0 为磁性小球到电磁驱动器底端距离, I_0 为平衡状态时电磁驱动器线圈绕组中通过的电流大小, $g=9.8\text{ m/s}^2$ 为重力加速度。

将电磁吸力 $F(x_0, I_0)$ 在平衡点 (x_0, I_0) 处进行泰勒展开, 舍去高次项后, 可得:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + k_{xx} x - k_{xi} I = 0 \quad (10)$$

式中, $k_{xi} = \frac{\mu_0 AN^2 I_0}{x_0^2}$ 为系统的电流刚度, $k_{xx} = \frac{\mu_0 AN^2 I_0^2}{x_0^3}$ 为系统的位移刚度。

忽略外界干扰的情况下, 对式 (10) 进行拉氏变换, 可得系统的传递函数为:

$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{-k_{xi}}{ms^2 - k_{xx}} \quad (11)$$

3.2 PID 控制系统仿真

由式 (11) 可知, 磁悬浮球的开环传递函数的特征方程缺少一次项, 且常数项为负值, 因此, 为使磁悬浮球系统达到稳定, 控制系统中必须增大微分环节。基于磁悬浮球系统的数学模型, 本文设计了一个基于 PID 控制器的磁悬浮球控制系统^[15-16], 并在 MATLAB/Simulink 环境下建立磁悬浮球系统的仿真模型, 如图 9 所示, 其中, Transfer Function 为磁悬浮球系统被控对象传递函数模型, Power、Sensor 分为系统的功率放大器和位移传感器, 其中 $K_a=1\text{ A/V}$ 、 $K_s=\gamma^{-1}=52.42\text{ V}^{-1}/\text{m}$ 。

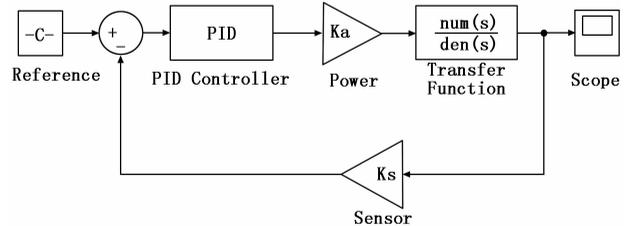


图 9 磁悬浮 PID 控制系统仿真程序

为了验证所提出方法的可行性, 实现磁性小球在 $x_0=25\text{ mm}$ 位置处的稳定悬浮, 利用 MATLAB 中 PID 参数整定工具, 选取多组稳定的 PID 控制器参数分别代入到系统的仿真模型中, 得到 PID 控制下系统的仿真结果如图 10 所示。由图 10 的仿真曲线可知, 当 $K_p=-4$, $K_i=-1.5$, $K_d=-0.1$ 时, 系统的超调量和响应速度均符合系统的设计要求, 因此选取这组 PID 控制器参数作为磁悬浮球系统的控制参数值。

3.3 磁悬浮控制试验

在磁悬浮球 PID 控制系统仿真的基础上, 将选取的 PID 控制参数直接用于磁悬浮球系统的实际控制, 磁性小球的平

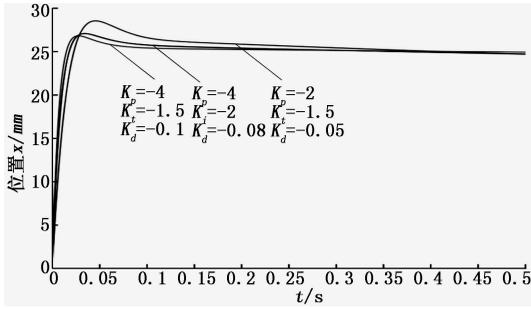


图 10 磁悬浮球系统 PID 仿真曲线

衡位置为，磁悬浮球系统的实际悬浮效果如图 11 所示。

为了观察磁悬浮球 PID 控制器的实际控制效果，试验中，在磁性小球稳定悬浮的情况下，提取控制器中存储的 10 000 个连续的磁性小球的位置数据（时长共计 7.812 5 s），绘制磁性小球的位置波动曲线如图 12 所示，由图 12 可知，通过选取合适的 PID 参数，系统实现了磁性小球在 25 mm 位置处的稳定悬浮，系统的位置控制精度达到±0.125 mm，实现了预期控制效果。

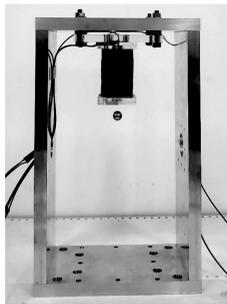


图 11 磁悬浮球系统悬浮效果图

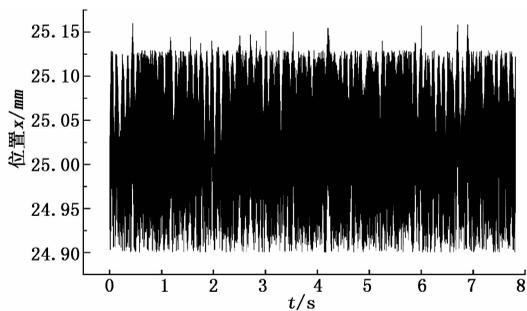


图 12 磁性小球位置波动曲线

4 结束语

本文设计的基于双线性霍尔传感器结构的磁性小球悬浮控制系统，弥补了单线性霍尔传感器输出信号难以准确反映被控悬浮对象位置信息的不足。试验结果表明，当磁性小球到电磁驱动器底端距离为时，信号调理电路输出电压值与磁性小球到电磁驱动器底端距离的负三次方成正比，传感器标定试验结果与 COMSOL Multiphysics 有限元仿真结果及理论推导结果相符。

由磁悬浮球系统的数学模型，基于 PID 控制策略，本

文设计了一个磁性小球悬浮控制系统，通过 MATLAB/Simulink 仿真选取合适的 PID 控制器参数，仿真结果表明，系统的超调量和响应速度能够符合设计要求；将仿真选取的 PID 控制器参数用于磁悬浮球系统的实际控制，试验结果表明，磁性小球实现了在位置处的稳定磁悬浮，系统的位置控制精度达到。

参考文献:

- [1] Ghosh A, Rakesh Krishnan T, Tejaswy P, et al. Design and implementation of a 2-DOF PID compensation for magnetic levitation systems [J]. ISA Transactions. 2014, 53 (4): 1216-1222.
- [2] 陈 琪, 刘 刚, 郑世强. 基于自适应变步长最小均方差算法的磁悬浮电动机自动平衡方法 [J]. 机械工程学报. 2015, 51 (15): 119-127.
- [3] 常 肖, 徐龙祥, 董继勇. 磁悬浮轴承数字功率放大器 [J]. 机械工程学报. 2010, 46 (20): 9-14.
- [4] Chen S, Lin F. Robust Nonsingular Terminal Sliding-Mode Control for Nonlinear Magnetic Bearing System [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2011, 19 (3): 636-643.
- [5] 张 涛, 刘欣凤, 莫丽红, 等. 磁悬浮高速电机系统建模与控制 [J]. 电机与控制学报. 2018, 22 (4): 98-104.
- [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 (10): 1067-1071.
- [7] Qin Y, Peng H, Ruan W, et al. A modeling and control approach to magnetic levitation system based on state-dependent ARX model [J]. Journal of Process Control. 2014, 24 (1): 93-112.
- [8] Morales R, Feliu V, Sira-Ramirez H. Nonlinear Control for Magnetic Levitation Systems Based on Fast Online Algebraic Identification of the Input Gain [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2011, 19 (4): 757-771.
- [9] 邵雪卷, 孟凡斌, 张井岗, 等. 模糊自适应预测函数控制在磁悬浮球系统中的应用 [J]. 南京理工大学学报. 2017, 41 (3): 278-284.
- [10] 刘 蕾. 驱动磁悬浮球旋转的技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [11] 胡业发, 郭建光. 大型磁悬浮地球仪控制系统的研究 [J]. 武汉理工大学学报 (信息与管理工程版). 2010, 32 (1): 35-38.
- [12] 严乐阳, 叶佩青, 张 勇, 等. 圆筒型永磁直线同步电机用线性霍尔位置检测的误差补偿 [J]. 电工技术学报. 2017, 32 (5): 26-32.
- [13] 石 燕. 倾斜式电磁、永磁混合悬浮地球仪及旋转系统的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [14] 张占军, 林小玲. 磁悬浮球系统控制器的分析设计 [J]. 机电工程. 2007 (1): 19-21.
- [15] Majhi L, Roy P, Roy B K. Design of PID and FOPID Controllers Tuned by Firefly Algorithm for Magnetic Levitation System [A]. Fourth International Conference on Soft Computing for Problem Solving [C]. 2014.