

文章编号: 1671-7449(2024)02-0109-11

基于力失衡的二维主动磁悬浮驱动 方法分析与测试

刘冠诚¹, 陆永华^{1*}, 杨海波², 冯强³, 周利华³

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京工业职业技术大学 机械工程学院, 江苏 南京 210023;
3. 国营锦江机器厂, 四川 成都 610043)

摘要: 提出一种基于力失衡的磁悬浮驱动系统, 并对外磁场主动驱动设计一种神经网络PID(Proportion Integration Differentiation)控制方法, 可以有效应对非线性、模型参数不明确的复杂驱动系统。实验结果表明, 该控制算法解决了基于模型控制方法中被控对象与稳态工作点之间偏差增大、跟踪性能迅速恶化等问题, 实现了磁性小球在二维空间中的稳定悬浮与高精度可控运动。可应用于工业领域细长管道内壁非破坏式质量检测、管道内部清淤和医疗领域血管、肠腔内的检查和手术。

关键词: 外磁场; 二维悬浮运动; 主动磁悬浮驱动; 神经网络控制; 力失衡

中图分类号: TH73

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024.02.003

引用格式: 刘冠诚, 陆永华, 杨海波, 等. 基于力失衡的二维主动磁悬浮驱动方法分析与测试[J]. 测试技术学报, 2024, 38(2):109-119.

LIU Guancheng, LU Yonghua, YANG Haibo, et al. Analysis and test of two-dimensional active maglev actuation and control method based on force imbalance [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(2):109-119.

Analysis and Test of Two-Dimensional Active Maglev Actuation and Control Method Based on Force Imbalance

LIU Guancheng¹, LU Yonghua^{1*}, YANG Haibo², FENG Qiang³, ZHOU Lihua³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China;

2. College of Mechanical Engineering, Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210023, China;

3. State-Owned Jinjiang Machinery Factory, Chengdu 610043, China)

Abstract: A magnetic levitation actuation system based on force imbalance is proposed, and a neural network PID (Proportion Integration Differentiation) control method is designed to activate actuation of external magnetic field, which can effectively deal with the complex actuation system with nonlinear and unclear model parameters. Experimental results show that the proposed control algorithm solves the problems such as the increase of deviation between the controlled object and the steady-state operating point and the rapid deterioration of tracking performance in the model-based control method. The stable levitation and high-precision controllable motion of the magnetic ball in two-dimensional space is realized. It can be applied to the non-

收稿日期: 2023-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51975293); 航空科学基金资助项目(2019ZD052010); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX20-0180)

作者简介: 刘冠诚(1993—), 男, 博士生, 主要从事磁悬浮检测、光电检测的研究。E-mail: nuaa_lgc@nuaa.edu.cn。

* 通信作者: 陆永华(1977—), 男, 博士生导师, 主要从事智能检测与控制、机器人、传感器方面的研究。E-mail: nuaa_lyh@nuaa.edu.cn。

destructive quality detection of the inner wall and the internal dredging of the long and thin pipeline in the industrial field, and the examination and operation of the blood vessel and intestinal cavity in the medical field.

Key words: external magnetic field; two-dimensional levitation motion; active magnetic levitation actuation; neural network control; force imbalance

0 引言

工业和医疗领域大多数磁悬浮运动都需要精确和较大位移的主动运动控制。现有研究是通过被控对象的特殊螺旋结构,在外加磁场作用下,使被控对象在液体中旋转产生推进力,从而实现被控对象的悬浮运动^[1,2]。BYUN等^[3]研发了一种蝌蚪式泳动微型机器人。机器人由两对垂直亥姆霍兹线圈组成的交变磁场驱动,通过摆尾进行运动,其方向和频率由磁场调节。JANG等^[4]提出了一种结合梯度场和均匀磁场驱动螺旋微型机器人的方法,为疏通血管阻塞提供了一种新的导航钻探方法。方法采用无动态模型和传统基于模型的控制形式,容易出现跟踪性能迅速恶化、控制能力不足、控制范围较小等问题,只能实现被控对象液体中被动悬浮运动。实际应用中磁悬浮驱动大多用于空气环境,依靠液体浮力被动悬浮使得磁悬浮应用范围受限。受限于现有传感器的采集方式,目前磁悬浮驱动系统无法应用于遮挡环境,使其难于进行实际应用^[5,6]。因此,主动磁悬浮驱动技术在实际工业和医疗领域具有广阔应用前景。

提出了基于力失衡外磁场驱动方式的磁性小球

二维主动磁悬浮驱动方法,设计了基于力失衡驱动方式的二维主动磁悬浮驱动系统。二维主动磁悬浮驱动系统是一个开环不稳定的非线性系统,神经网络对于非线性、模型不明确的复杂系统具有良好的适应能力,因此,将神经网络算法与PID控制、力失衡控制原理相结合,使主动磁悬浮驱动系统控制器参数实现自动整定,实现了磁性小球的稳定悬浮和可控悬浮运动。通过四电磁驱动器结构稳定被控物体受力,采用双霍尔传感器组和硬件差分方式提高控制稳定性和精度。该方法为航发燃油管道微小尺度弯管内壁检测和内部清淤提供了新的非破坏技术手段,为医疗领域血管肠腔的内部检查和手术提供了新的解决方案。

1 理论模型

设计了基于力失衡驱动方式的二维主动磁悬浮驱动系统。驱系统机械部分由两组对称分布的电磁驱动器构成,传感器由4组双霍尔传感器组构成,硬件部分由电流驱动模块、差分运算模块、PWM模块、A/D&D/A转换模块、控制器和主控单元构成,软件部分采用神经网络PID控制算法对参数进行调节,驱动原理如图1所示。

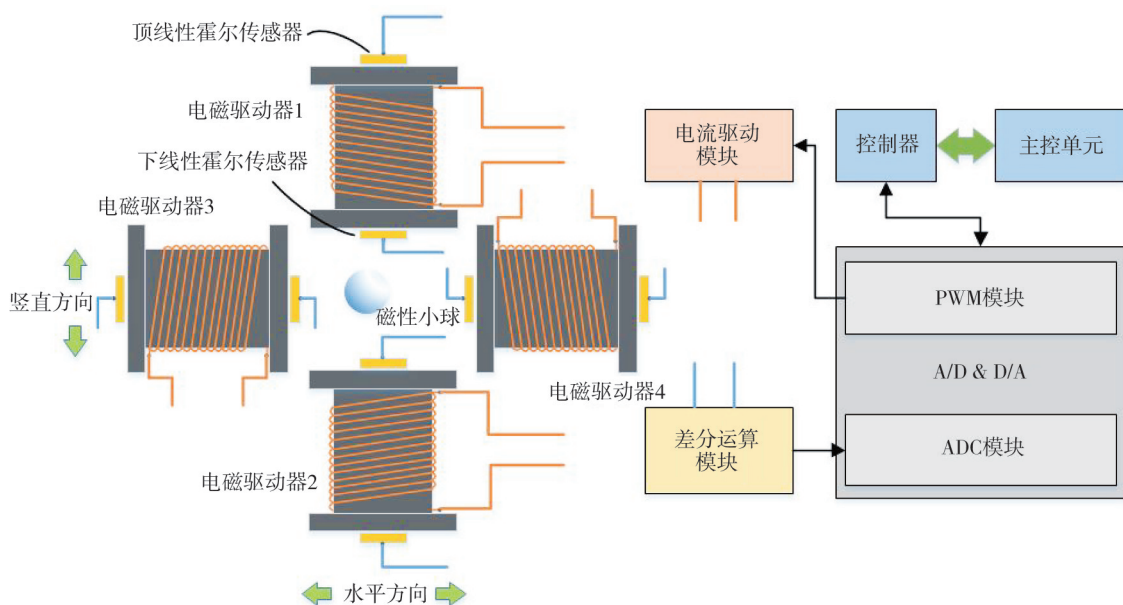


图1 二维外磁场驱动原理图

Fig. 1 Schematic diagram of 2D magnetic field drive

竖直方向和水平方向电磁驱动器的部分参数在表 1 中给出,磁性小球由 NdFeB 制成,其直径 $d=12.7\text{ mm}$,质量 $m=8.15\text{ g}$,表面磁感应强度 $B_s=677.3\text{ mT}$ 。

表 1 电磁驱动器相关参数

Tab. 1 Related parameters of electromagnetic actuators

参数	数值	描述
N_1	1 512	竖直方向线圈匝数
N_2	1 445	水平方向线圈匝数
R_{11}/mm	7.5	竖直方向内半径
R_{21}/mm	7.5	水平方向内半径
R_{12}/mm	33.66	竖直方向外半径
R_{22}/mm	20	水平方向外半径
L_1/mm	65	竖直方向高度
L_2/mm	60	水平方向高度
R_1/Ω	4.5	竖直方向线圈电阻
R_2/Ω	9.3	水平方向线圈电阻

由图 2 可知,磁偶极在环路电流中轴线上,则磁偶极矩沿 Z 方向准直,作用在磁偶极上的合力使其沿磁场增加的方向移动。由于 XY 平面内圆柱形对称力对磁偶极的总效应为零,因此忽略不计。由 $(\partial B_z)/\partial z$ 可得,空心螺线管的电磁力 F 为^[7,8]

$$F = (m \cdot \nabla) B = |m| \frac{\Delta B_z}{\Delta z} = \frac{3B_s}{2\mu_0} V_b \cdot \frac{\partial B_z}{\partial z}, \quad (1)$$

式中: m 为磁性小球质量; ∇ 为梯度; B 为电磁驱动器产生的磁场; B_z 为竖直方向电磁驱动器产生的磁场; B_s 为磁性小球表磁; V_b 为磁性小球体积; μ_0 为真空磁导率。

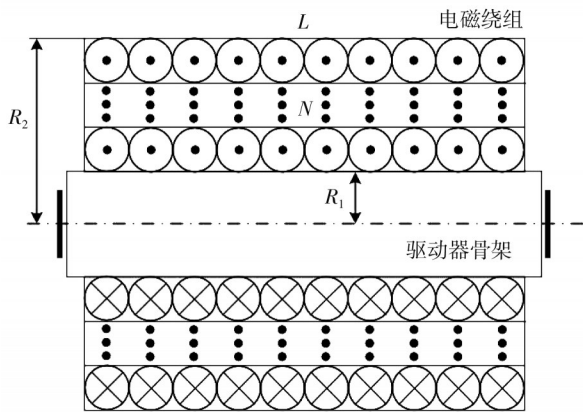


图 2 电磁驱动器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of actuator structure

式(1)中

$$\frac{\partial B_z}{\partial z} = \frac{1}{2} \mu_0 n_1 n_2 i f(x), \quad (2)$$

式中: i 为线圈电流, A; n_1 为电磁驱动器单位长度(轴向)匝数; n_2 为电磁驱动器单位厚度(径向)匝数。

由式(1)可知,永磁体受到电磁驱动器的电磁作用力与通过线圈绕组的励磁电流大小成正比。电磁驱动器对磁性小球的电磁力与励磁电流、磁性小球顶端到螺线管底端的距离相关。根据电磁力的影响变量,通过实验结果将式(1)简化为如下力失衡外磁场驱动电磁力方程的无量纲方程^[9,10]

$$F = \frac{di}{a\delta^2 + b\delta + c}, \quad (3)$$

式中: F 为水平单侧电磁作用力, N; i 为电磁驱动器线圈绕组励磁电流, A; δ 为悬浮间隙,即永磁体顶端到电磁驱动器线圈绕组底端的距离, m; a, b, c 和 d 是磁悬浮驱动系统相关系数。

根据图 3 力失衡二维主动磁悬浮驱动模型所示磁性小球与电磁驱动器的位置关系,单方向上双电磁驱动器对磁性小球施加的电磁力是双驱动器电磁力的叠加。

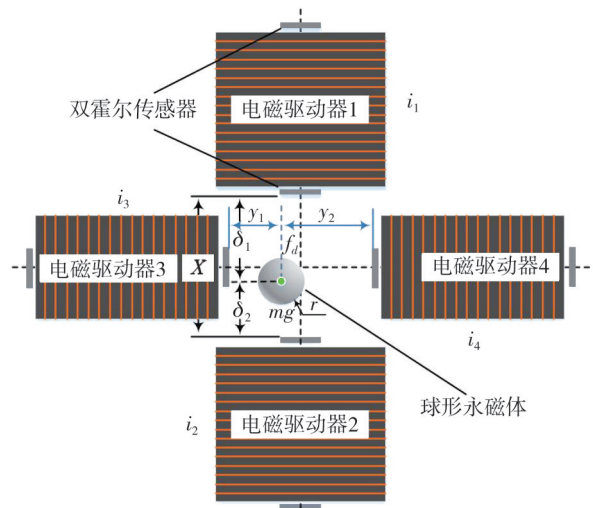


图 3 二维外磁场驱动模型

Fig. 3 External magnetic field actuation model of magnetic ball based on force imbalance

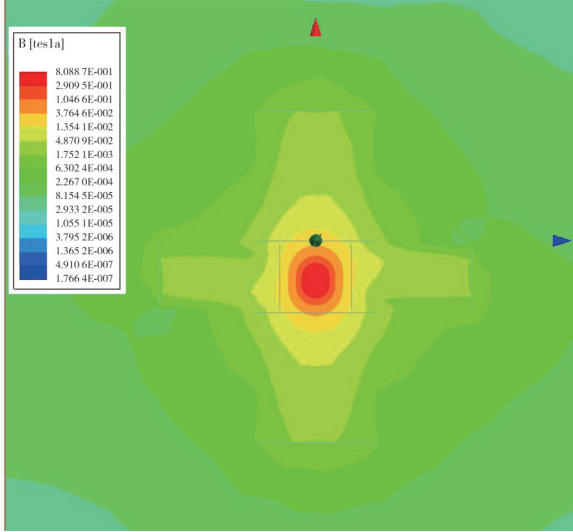
二维空间外磁场驱动结构的磁场分布和双电磁驱动器对磁性小球施加电磁合力的有限元仿真如图 4 所示。根据式(3)力失衡外磁场驱动电磁力方程的无量纲方程,竖直方向和水平方向上磁性小球受到双电磁驱动器的叠加电磁合力分别为

$$F_1(\delta_1, \delta_2, i_1, i_2) = \frac{d_1 i_1}{a_1(\delta_1 - r)^2 + b_1(\delta_1 - r) + c_1} - \frac{d_2 i_2}{a_2(\delta_2 - r)^2 + b_2(\delta_2 - r) + c_2}, \quad (4)$$

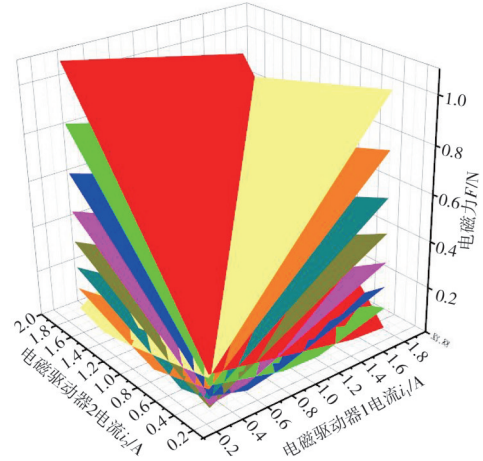
$$F_2(y_1, y_2, i_3, i_4) = \frac{d_3 i_3}{a_3(y_1 - r)^2 + b_3(y_1 - r) + c_3} - \frac{d_4 i_4}{a_4(y_2 - r)^2 + b_4(y_2 - r) + c_4}, \quad (5)$$

式中: $F_1(\delta_1, \delta_2, i_1, i_2)$, $F_2(y_1, y_2, i_3, i_4)$ 为磁性小球在竖直和水平方向受到的电磁力, N; X 为竖直方向电磁驱动器1, 2近球端霍尔传感器间的距离, m; i_1, i_2, i_3, i_4 分别为驱动器1, 2, 3, 4线圈中通过的电流, A; δ_1, δ_2 分别为小球中心位置到驱

动器1, 2近球端霍尔传感器间的悬浮间隙, 且 $\delta_1 + \delta_2 = X$, m; y_1, y_2 为小球中心到左右驱动器近球端霍尔传感器的距离; 参数 $a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4, c_1, c_2, c_3, c_4, d_1, d_2, d_3, d_4$ 为系统相关参数。



(a) 磁场分布



(b) 电磁作用力有限元仿真

图4 二维外磁场驱动系统磁场分布与电磁作用力有限元仿真数据拟合

Fig. 4 Magnetic field distribution of 2D maglev actuation system and finite element simulation of electromagnetic force

2 控制方法

提出了基于力失衡外磁场驱动方式的磁性小球二维主动磁悬浮驱动方法, 将神经网络PID控制与力失衡控制原理相结合, 使被控物体获得更加精确平稳的力失衡瞬时过程, 实现稳定悬浮运动。

磁性小球在电磁驱动器作用下处于平衡状态, 为了改变磁性小球在悬浮区域内的位移, 需要打破小球受力平衡态。去除小球外部磁场并瞬间再次加入磁场后, 小球所受外部磁力和运动均发生瞬时突变, 磁性小球外部受力失衡后再瞬时平衡的过程称为力失衡过程。瞬时的力失衡状态使小球位移发生变化, 需通过控制使小球瞬时恢复平衡。实现磁性小球从平衡到失衡再到平衡的力控原理称为力失衡控制原理。在控制过程中, 力失衡过程只是瞬时打破平衡状态, 过慢过快都会导致磁性小球失稳坠落, 因此快速精确地控制力的失衡和平衡过程是小球实现稳定悬浮与运动控制的关键。

力失衡二维主动磁悬浮驱动系统竖直方向采用电磁驱动器1, 2整合受力的控制模型, 水平方

向上采用左右单独调节的控制方式。根据式(4)和牛顿第二定律建立竖直方向驱动系统动力学模型。在设计悬浮范围内通过近似线性模型代替非线性动力学模型。由图3所示驱动结构, 竖直方向上的外磁场驱动控制系统动力学模型为

$$\frac{md^2\delta_1}{dt^2} + k_{\delta_1}\delta_1 + k_{i_1}i_1 + k_{i_2}i_2 = f_d, \quad (6)$$

式中: $k_{\delta_1} = \partial F / \partial \delta_1$, k_{δ_1} 为 δ_1 相关的位移刚度系数, N/m; $k_{i_1} = \partial F / \partial i_1$, k_{i_1} 为 i_1 相关的电流刚度系数, N/A; $k_{i_2} = \partial F / \partial i_2$, k_{i_2} 为 i_2 相关的电流刚度系数, N/A; f_d 为外部干扰, N。

主动磁悬浮驱动系统中上电磁驱动器施加给小球的电磁力不受小球位置变化恒定为2 mg(磁性小球重力的2倍), 下电磁驱动器施加电磁力恒定为1 mg(1倍重力), 根据设计要求建立驱动系统动力学模型。对该模型进行拉普拉斯变换, 励磁电流 $I_1(s)$, $I_2(s)$ 为输入, 悬浮间隙 $[\delta_1 \ \delta_2]^T$ 矢量组合为输出, 建立主动磁悬浮驱动系统控制模型

$$\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(-\frac{k_{i_1}}{m}\right) / \left(s^2 + \frac{k_{\delta_1}}{m}\right) & 0 \\ 0 & \left(-\frac{k_{i_2}}{m}\right) / \left(s^2 + \frac{k_{\delta_2}}{m}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: k_{i_1}, k_{i_2} 分别为电磁驱动器1, 2的电流刚度系

数, N/A; $k_{\delta 1}$ 、 $k_{\delta 2}$ 分别为驱动器 1, 2 的位移刚度系数, N/m; $I_1(s)$ 、 $I_2(s)$ 分别为驱动器 1, 2 电流输入的拉氏变换; $\delta_1(s)$ 、 $\delta_2(s)$ 分别为磁性小球和驱动器 1, 2 悬浮间隙的拉氏变换。

建立驱动系统的状态空间模型

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} x + Bi, \\ \delta &= Cx, \end{aligned} \quad (8)$$

式中: A_{11} 、 A_{22} 为 2×2 分布系数矩阵; B 为 4×2 分布系数矩阵; C 为 2×4 分布系数矩阵。

由图 5 位移刚度系数和电流刚度系数分布规律可知, 随着悬浮间隙增大, $k_{\delta 1}$ 、 $k_{\delta 2}$ 均先减小后增大。在 $7.702 \text{ mm} < \delta_1 < 31.35 \text{ mm}$ 和 $7.702 \text{ mm} < \delta_2 < 31.35 \text{ mm}$ 范围内, $k_{\delta 1}$ 、 $k_{\delta 2}$ 始终为负。在 $0 < \delta_1 < 31.35 \text{ mm}$ 和 $0 < \delta_2 < 31.35 \text{ mm}$ 范围内, k_{i1} 、 k_{i2} 始终为正。在设定悬浮范围内, $k_{\delta} - k_i$ 始终小于 0。因磁性小球尺寸, δ_1 、 δ_2 均大于 8 mm。根据劳斯稳定性判据, 磁悬浮驱动系统是一个天然开环不稳定系统, 要使系统实现稳定控制, 必须增加微分项。

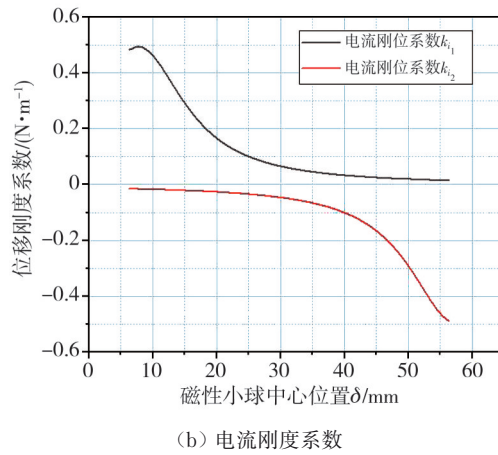
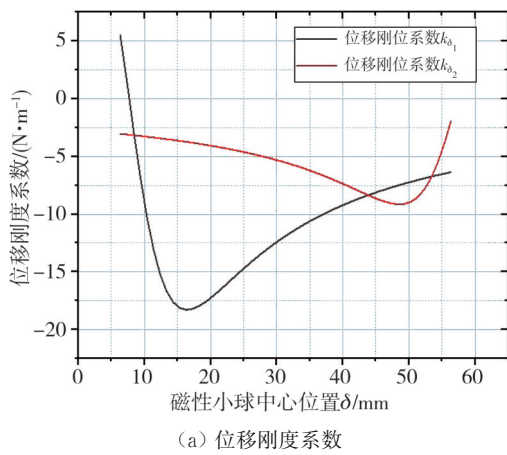


图 5 刚度系数分布图

Fig. 5 Stiffness coefficient distribution diagram

神经网络控制对于非线性、模型不明确的复杂系统具有良好适应能力, 在磁悬浮技术领域得到广泛应用^[11,12]。由于神经网络良好的跟踪性能, 依据式(7)系统控制模型和二阶系统稳定性要求^[13,14], 主动磁悬浮驱动系统采用神经网络确定的参数可调PID控制器, 使控制系统依据控制过程中小球位置变化实时调整PID参数, 从而使驱动系统始终保持良好的控制能力, 控制原理采用力失衡控制理论对磁性小球进行驱动和运动控制, 控制流程和系统控制框图如图 6、图 7 所示。

PID公式将导数替换为后向差分, 积分替换为矩形面积之和, 替换后的PID控制器的状态模型为 $u(k) = k_p e(k) + k_i T \sum_{j=0}^k e(j) + k_d [e(k) - e(k-1)]$, (9) 式中: $e(k) = \delta - \delta_d$, 其中 δ 为磁性小球当前位置值, k 为当前状态; $u(k)$ 为神经网络PID控制器输出, 物理意义为电磁驱动器的励磁电流 $i(k)$; $k-1$ 为上一状态; k_p 、 k_i 、 k_d 为控制器的调节系数, 分别为比例系数、积分系数和微分系数。

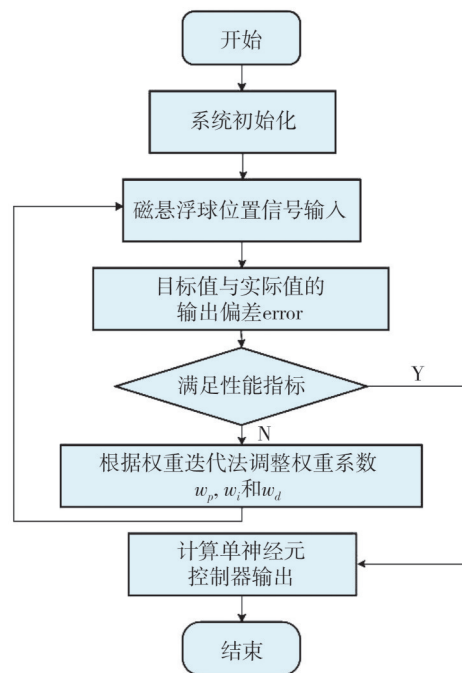


图 6 神经网络PID控制流程图

Fig. 6 Control flow chart of controller

根据神经网络PID控制器结构,控制器输入为

$$\begin{aligned} x_1(k) &= e(k), \\ x_2(k) &= T \sum_{j=0}^k e(j), \\ x_3(k) &= [e(k) - e(k-1)]/T_0. \end{aligned} \quad (10)$$

调整后的输出为

$$u(k) = w_1(k)x_1(k) + w_2(k)x_2(k) + w_3(k)x_3(k), \quad (11)$$

式中: $w_i(k)$ 为神经元输入 $x_i(k)$ 对应的加权系数, 相当于神经网络修正的比例系数 k_p 、积分系数 k_i 、微分系数 k_d 。

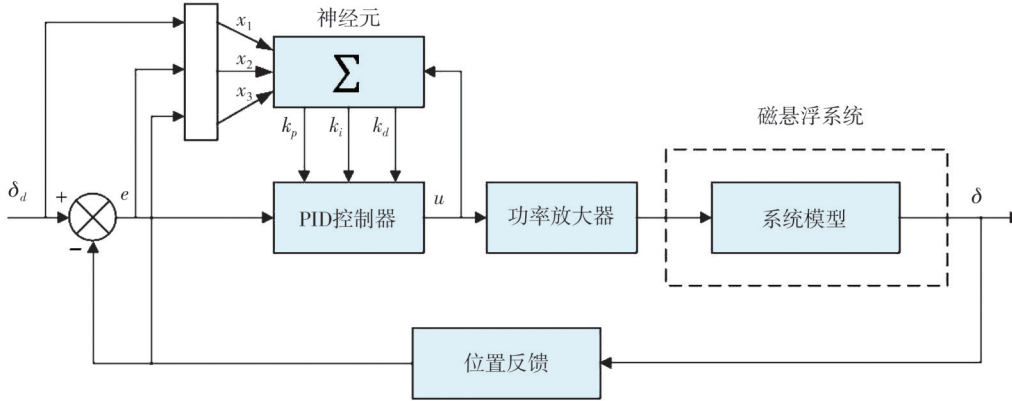


图7 系统控制框图

Fig. 7 System control block diagram

加权系数调整采用神经元权值修正的梯度下降算法

$$\begin{aligned} w_1(k) &= w_1(k-1) + \eta e(k)x_1(k) \frac{\partial \delta(k+1)}{\partial u(k)}, \\ w_2(k) &= w_2(k-1) + \eta e(k)x_2(k) \frac{\partial \delta(k+1)}{\partial u(k)}, \\ w_3(k) &= w_3(k-1) + \eta e(k)x_3(k) \frac{\partial \delta(k+1)}{\partial u(k)}, \end{aligned} \quad (12)$$

式中: η 为学习速率, $0 < \eta < 1$; 一般, $(\partial y(k+1))/(\partial u(k)) \approx (y(k+1) - y(k))/(u(k) - u(k-1))$, 是一个决定加权系数调整方向的重要系数。

3 力失衡稳定悬浮试验

超调量 σ 是主动磁悬浮驱动系统的主要参数, 其实际含义是磁性小球位置变化的幅度, 表征了磁性小球悬浮运动的可行性和运动过程的稳定性。较低超调量可使被控物体在实际运动中获得更精确的位置控制, 降低被测表面被物体损伤的可能性。因此, 优化超调量是磁悬浮主动驱动的意义所在, 也是系统稳定的前提。

采用有限元仿真进行电磁力模拟, 根据磁性小球受力的有限元仿真结果, 采用最小二乘法对无量纲方程进行参数拟合, 根据拟合结果确定式(4)拟合参数: $d_1 = d_2 = 25.1$, $a_1 = a_2 = 0.779$, $b_1 = b_2 = -6.873$, $c_1 = c_2 = 83.577$, 式(5)拟合参

数: $d_3 = d_4 = 4.199$, $a_3 = a_4 = 1.113 \times 10^5$, $b_3 = b_4 = -301.0$, $c_3 = c_4 = 8.691$, 得到力失衡外磁场驱动电磁力方程

$$F_1(\delta_1, \delta_2, i_1, i_2) = \frac{25.1i_1}{0.799(\delta_1 - r)^2 - 6.873(\delta_1 - r) + 83.577} - \frac{25.1i_2}{0.799(\delta_2 - r)^2 - 6.873(\delta_2 - r) + 83.577}, \quad (13)$$

$$F_2(y_1, y_2, i_3, i_4) = \frac{4.199i_3}{111300(y_1 - r)^2 - 301(y_1 - r) + 8.691} - \frac{4.199i_4}{111300(y_2 - r)^2 - 301(y_2 - r) + 8.691}. \quad (14)$$

通过计算, $k_{r1} = 0.1437$, $k_{\delta 1} = -16.6152$, $k_{r2} = -0.02757$, $k_{\delta 2} = -4.19762$ 。将电流刚度系数和位移刚度系数的实际值代入系数矩阵得到

$$\begin{aligned} A_{11} &= \begin{bmatrix} 0 & 63.69 \\ 32 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 16.1 \\ 32 & 0 \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.25 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & -0.551 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4228 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

主动磁悬浮驱动系统位置控制过程如图1所示。磁性小球的位置信号通过上下均布的霍尔传感器组采集的位置信号硬件差分处理后得到。霍尔传感器采用AH49H型线性霍尔效应传感器, 采集范围 ± 3000 Gs, 具有优良的温度稳定性、可靠

性和灵敏度。采用双霍尔传感器均布方式消除传感器采集信号时,电磁驱动器磁场对采集结果的影响。对比激光位置传感器和电涡流传感器^[15],霍尔传感器不受被控物体材质和光折射的影响,能准确采集磁性小球周围磁场,使得主动磁悬浮驱动的应用范围更加广泛。

为了实现磁性小球的稳定悬浮,需高频采集小球周围的磁场信号。采集频率过低会使采集到的信号产生延迟,导致控制频率低于磁场变化频率,进而导致小球剧烈抖动甚至失稳坠落。采用运放对双霍尔传感器采集的电压信号硬件差分,解决了软件差分位置信号处理延迟导致的位置信号误差。

水平方向采用定占空比方式调节电磁驱动器电流值,驱动控制磁性小球在悬浮范围内的水平位置。水平方向电磁驱动器采用极性相吸布置方式,如图8所示。在同一极性排布下,受到左右任意电磁力时磁性小球旋向一致,试验验证磁性小球移动方向唯一。通过对电磁驱动器极性进行变换,实现磁性小球实轴线左右双向位置偏移。

AH49H 霍尔传感器采集精度 0.33 mV/Gs,测试位置标定精度 0.002 mm,16 b AD7606 采集精度 0.153 mV,驱动系统测试结果综合位置精度为 0.002 mm。

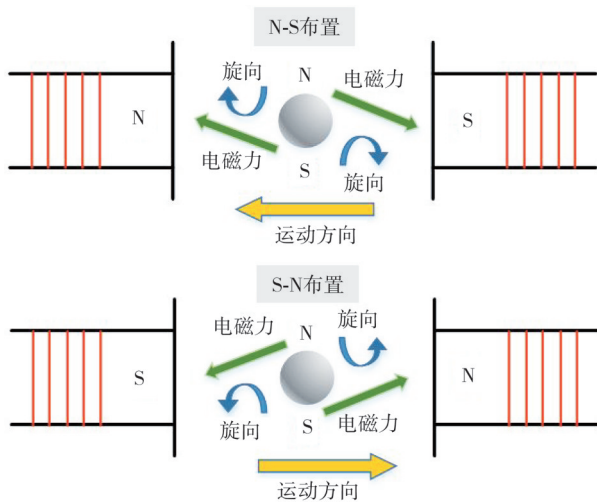
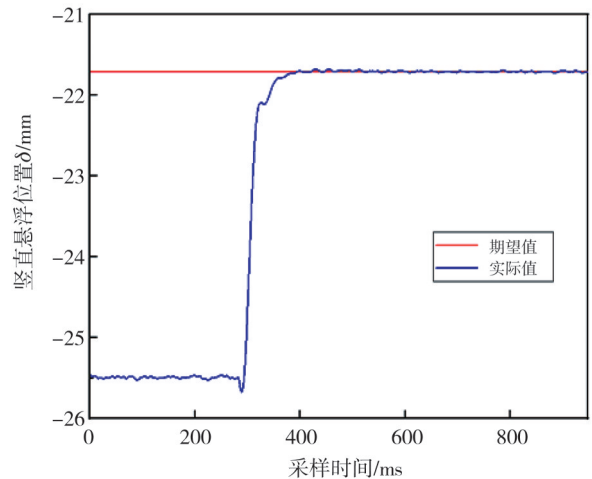


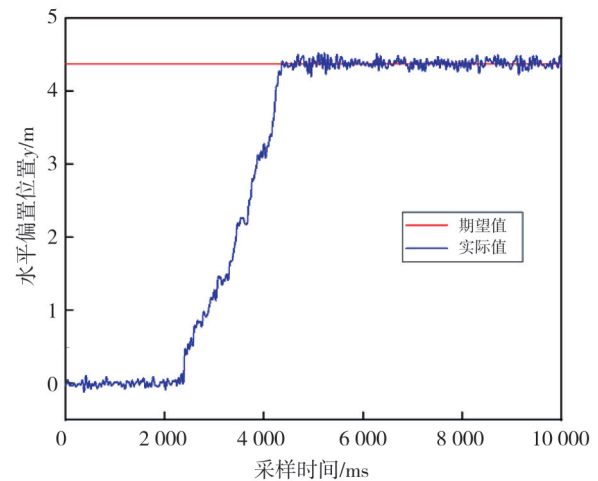
图 8 水平方向驱动器磁极布置

Fig. 8 Magnetic pole layout of horizontal actuators

对主动磁悬浮驱动系统进行实际悬浮驱动控制,通过试验得到了神经网络PID控制器对实际悬浮系统的控制效果,如图9所示。竖直方向磁性小球初始位置 -25.50 mm,目标平衡位置 -21.70 mm;水平方向初始位置为轴线0位置,目标平衡位置为左偏移 4.38 mm 位置。



(a) 竖直方向



(b) 水平方向

图 9 实时动态响应轨迹

Fig. 9 Dynamic response position tracking

从图9可以看出,磁性小球实现了稳定悬浮和水平稳定偏移。步长 3.8 mm 驱动系统超调量为 2.8%,小球稳定悬浮后竖直方向位置波动范围为 0.030 mm。对比文献[16]中磁悬浮球系统的试验结果,采用滑模控制的超调量为 8.5%,粒子群滑模模糊PID的超调量为 6.7%,且文献[16]中控制器测试的初始位置与目标位置步长为 2 mm。主动磁悬浮驱动系统通过对驱动结构和控制方法优化,与文献[16]中两种控制系统相比,系统的动静态输出更加稳定准确,抗干扰能力更强。水平方向运动受惯性影响出现小范围的晃动,位置波动范围为 0.190 mm,在允许的±0.2 mm 范围内。以水平和竖直方向轴线的交点为坐标原点,磁性小球竖直方向的悬浮极限范围为 $-15.70 \text{ mm} < \delta_1 < 15.10 \text{ mm}$,水平方向悬浮极限范围为 $-5.50 \text{ mm} < y_1 < 4.20 \text{ mm}$,采集悬浮位置分布如图10所示,磁性小球实际悬浮

效果如图 11 所示。

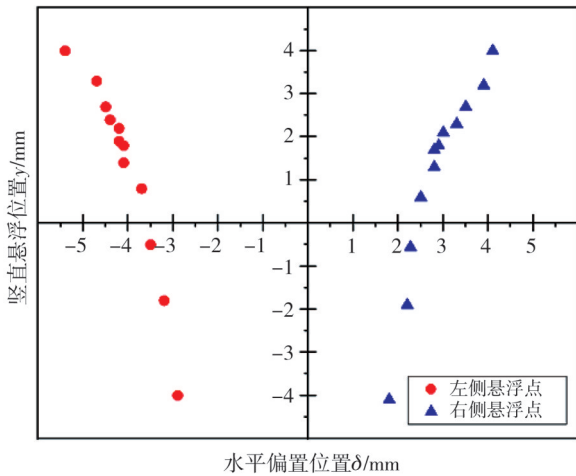


图 10 二维稳定悬浮位置分布

Fig. 10 Position distribution of 2D stable levitation

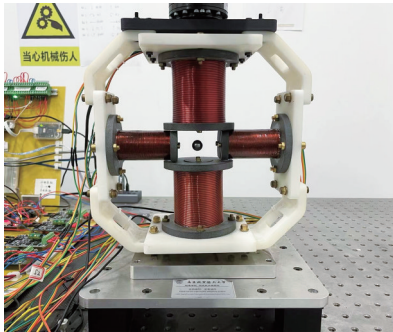


图 11 实际稳定悬浮效果

Fig. 11 Actual stable levitation effect

4 力失衡运动控制试验

实现稳定悬浮后，采用步进式驱动对被控悬

浮对象进行运动控制。磁性小球悬浮控制范围内，通过一系列离散过渡点将控制范围划分成连续区间，每个离散点位置的系统数学模型根据电磁力方程推导获得，整定得到每个过渡点的控制器参数。通过被控悬浮对象在过渡点之间的连续位置变化，实现磁性小球基于力失衡驱动方式的外磁场驱动，在每个小步阶跃输入时更新控制参数，保证被控对象在每个过渡点位置的悬浮稳定性。

被控悬浮对象直接对较大阶跃输入响应时，由于电磁力与悬浮间隙之间非线性关系，被控对象容易出现“失控坠落”，并且显著超调量意味着被控对象运动过程并不平稳。竖直方向悬浮驱动分为轴线上、轴线左侧和轴线右侧的悬浮运动。轴线上的运动步长分别设置 3.800, 1.900, 0.950 和 0.476 mm；非轴线上存在水平横切力，过大步长会导致小球出现较大晃动，因此轴线左侧和右侧运动步长设置 2.120, 1.060, 0.530 和 0.266 mm 分别进行试验，到达目标位置的步数分别为 1, 2, 4 和 8 步。轴线左侧运动和轴线右侧轨迹距轴线水平距离分别为 3.240 mm 和 3.070 mm。竖直方向轴线上以 -25.500 ~ -21.700 mm 悬浮位置的运行为例，非轴线左侧以 -21.150 ~ -19.040 mm 悬浮位置的运行为例，非轴线右侧以 -21.500 ~ -19.350 mm 悬浮位置的运行为例，分别比较下降运动和上升运动过程中不同步长对被控对象阶跃响应超调量的影响，其对比结果如图 12 和图 13 所示。

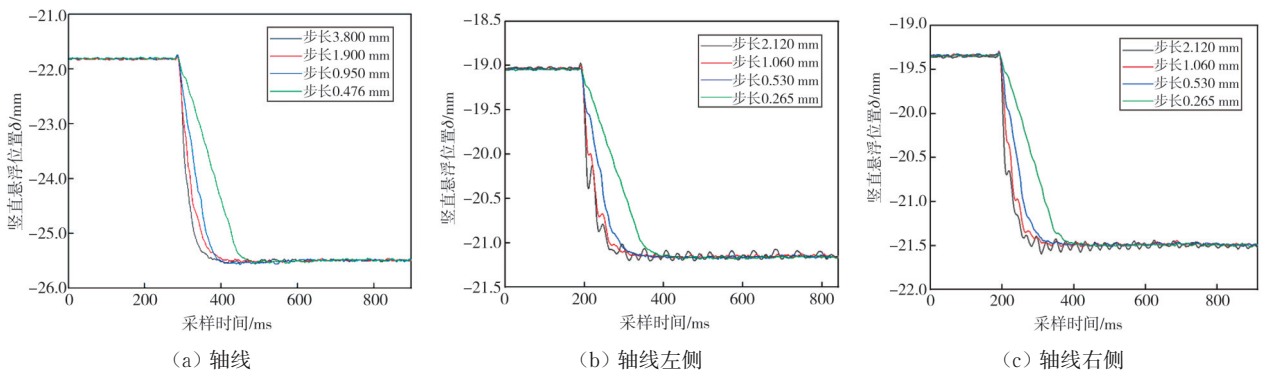


图 12 下降运动 4 种步长动态实时位置响应

Fig. 12 Dynamic position response of ball with different step length in descending motion

由图 12 和图 13 可知，1步到达目标平衡位置的超调量较大，而且运动过程中波动较大，运动有明显的起伏。这是由于运动距离过大导致数学模型和实际模型之间误差加剧，控制器调节能力

有限，从而运动出现较大误差。运动步数从 1 步到 2 步、4 步、8 步，单步运动距离缩短，超调量逐渐降低，运动曲线更加平稳光滑，到达目标位置后悬浮稳定性更强。竖直方向无论是轴线还是非

轴线运动过程,与直接对目标信号进行响应相比,步进式力失衡驱动控制方法显著减小了被控悬浮对象阶跃响应的超调量,且步长越小,超调量越小,然而步数越多导致调节时间逐渐增长,且步长与调节时间之间关系并不单调。调节时间是达到并保持在最终稳态误差条内所需的最小时间,因此,调节时间增加使得系统反应能力相对减弱。到达目标位置后,非轴线悬浮稳定性低于轴线悬浮,这是由于非轴线悬浮状态下水平切力

加重小球的惯性运动,使得小球晃动加剧。在步长相同情况下,上升过程的调节时间比下降过程的调节时间长,这与主动磁悬浮闭环控制系统的特性有关。上升过程力电流系数小于下降过程力电流系数。当微分系数相同时,上升过程的调节时间要比下降过程的调节时间长,实验结果与理论分析基本一致。不同条件下动态特性比较如表 2 所示。

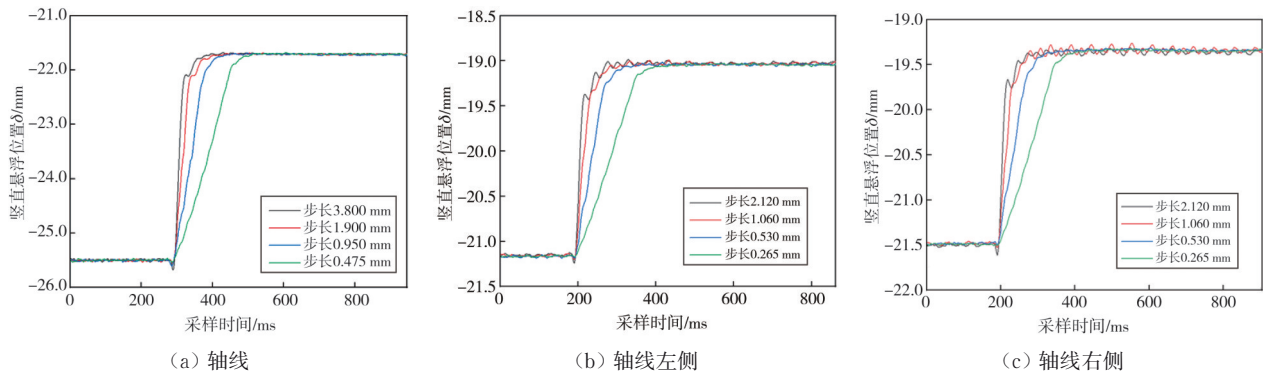


图 13 上升运动 4 种步长动态实时位置响应

Fig. 13 Dynamic position response of ball with different step length in ascending motion

表 2 竖直方向动态特性比较

Tab. 2 Comparison of vertical dynamic characteristics

悬浮位置	运动	步长/mm	稳定值/mm	最大偏差/mm	超调量/%	调节时间/ms
轴线	下降	3.800	-25.500	-25.566	0.256	111.20
		1.900		-25.550	0.196	137.78
		0.950		-25.546	0.176	154.62
		0.476		-25.532	0.129	196.20
	上升	3.800	-21.700	-21.676	0.115	112.68
		1.900		-21.686	0.074	149.08
		0.950		-21.688	0.051	177.36
		0.476		-21.692	0.032	226.42
轴线左侧	下降	2.120	-21.150	-21.202	0.252	116.98
		1.060		-21.182	0.156	150.82
		0.530		-21.176	0.118	179.20
		0.266		-21.170	0.098	201.82
	上升	2.120	-19.040	-18.990	0.262	120.12
		1.060		-19.000	0.210	156.86
		0.530		-19.016	0.131	186.58
		0.266		-19.036	0.032	247.18
轴线右侧	下降	2.120	-21.500	-21.590	0.418	88.62
		1.060		-21.516	0.070	145.22
		0.530		-21.512	0.056	232.08
		0.266		-21.508	0.042	251.0
	上升	2.120	-19.350	-19.330	0.103	128.30
		1.060		-19.282	0.351	147.72
		0.530		-19.338	0.057	235.02
		0.266		-19.346	0.026	256.66

水平方向以上驱动器底部霍尔传感器为原点,传感器下方小球的悬浮高度分别设置

16.850, 17.705 和 18.640 mm 进行试验,比较不同步长对被控对象阶跃响应超调量的影响。试验

过程包括小球在设定悬浮高度上偏移的去程与回

程,其对比结果如图 14 所示。

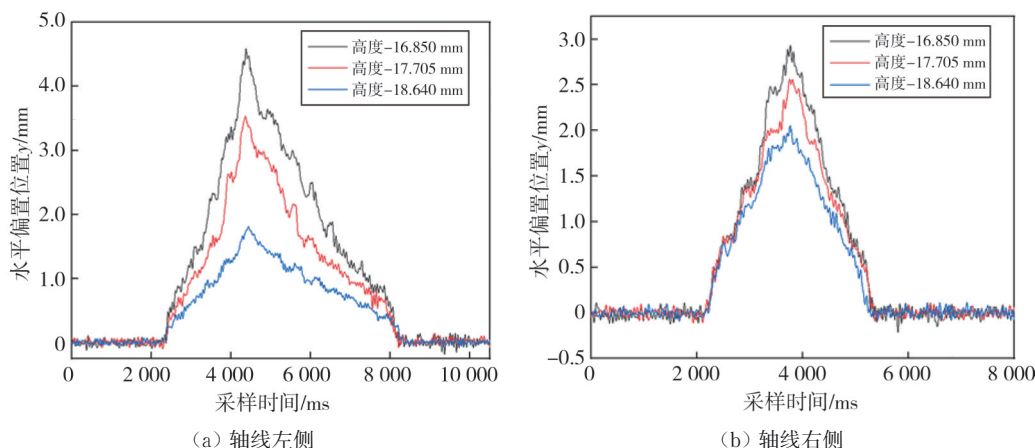


图 14 水平运动被控对象动态实时位置响应

Fig. 14 Position response of horizontal motion

由图 14 可知,水平运动受竖直悬浮力限制的同时受惯性影响,步进运动速度变化导致小球产生晃动,因此,水平方向步长大小对波动影响较大。根据实验结果可得,运动速度越快,小球悬浮运动受惯性影响越大,运动过程中出现波动和晃动的频次越多,悬浮运动稳定性也就越差。

的悬浮运动。竖直方向和水平方向悬浮驱动实际效果如图 15(a) 和图 15(b) 所示。

由于传感器采集范围有限,悬浮高度越靠近上电磁驱动器,水平悬浮运动的范围越大,水平运动动态特性对比结果如表 3 所示。由数据可知,水平方向运动波动范围均在 ± 0.2 mm 允许范围内,采用小步长较慢速的运动方式可获得水平方向较为平稳

表 3 水平方向动态特性比较

Tab. 3 Comparison of horizontal dynamic characteristics

偏移方向	悬浮高度/mm	波动范围/mm	悬浮极限/mm
轴线左侧	-16.850	0.184	4.590
	-17.705	0.140	3.536
	-18.640	0.086	1.808
轴线右侧	-16.850	0.202	2.718
	-17.705	0.166	2.336
	-18.640	0.160	1.944

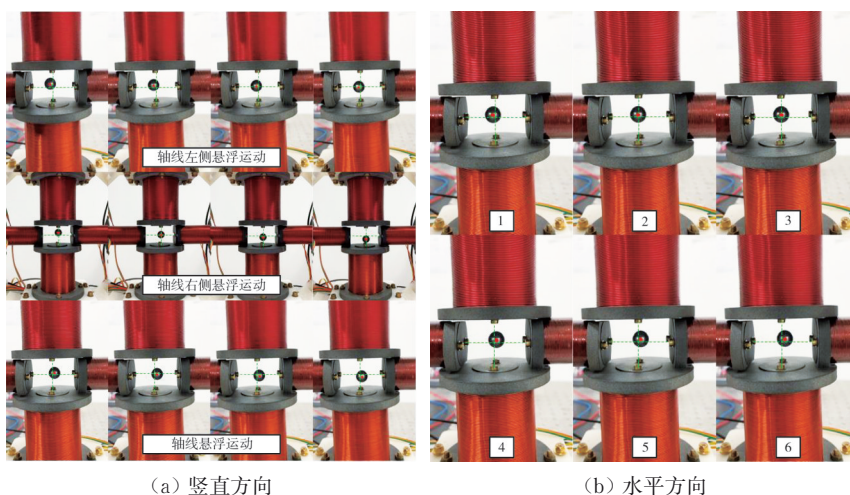


图 15 悬浮驱动实际效果

Fig. 15 Actual levitation actuation effect

5 结 论

1) 提出了基于力失衡外磁场驱动的磁性小球二维主动磁悬浮驱动方法,设计并搭建了基于力失衡

驱动方式的二维主动磁悬浮控制系统。将神经网络 PID 控制方法与力失衡控制原理相结合,解决了传统基于模型控制器的控制方法中被控对象与稳态工作点间偏差增大、跟踪性能迅速恶化等不足之处,使被控物体获得更加精确平稳的力失衡瞬时过程,

促使系统具备良好动静态特性与高度鲁棒性,实现控制参数在允许范围内自动整定,适应环境变化,实现了磁性小球二维空间稳定悬浮和可控运动。

2) 采用双霍尔传感器与硬件差分结合的采集结构,解决了电磁驱动器磁场干扰和控制频率断帧对系统的影响,提高了控制精度。提出的双霍尔位置采集方式和二维主动磁悬浮驱动系统,解决了激光传感器、电涡流传感器采集方式无法应用于有遮挡环境的问题,且提出的驱动系统适用于气体、液体细长弯管等环境。在球体上附加其他检测和操作设备,提出的非接触式磁悬浮驱动系统可实现工业领域细长管道内壁无损质量检测、管道内部疏通,医疗领域血管肠腔的内部检查和手术,进一步开拓磁悬浮技术的应用场景。

参考文献:

- [1] DREYFUS R, BAUDRY J, ROPER M L, et al. Microscopic artificial swimmers[J]. Nature, 2005, 437(7060): 862-865.
- [2] TANG P, LIANG L, XIANG Y. Measurement and simulation of fluid flow field in the pipe of magnetic capsule robot[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(12): 417-428.
- [3] BYUN D, CHOI J, CHA K, et al. Swimming micro-robot actuated by two pairs of helmholtz coils system[J]. Mechatronics, 2011, 21(1): 357-364.
- [4] JANG G B, JEON S, NAM J, et al. A spiral microrobot performing navigating linear and drilling motions by magnetic gradient and rotating uniform magnetic field for applications in unclogging blocked human blood vessels[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 9100404.
- [5] YIM S, SITTI M. Design and rolling locomotion of a magnetically actuated soft capsule endoscope[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28: 183-194.
- [6] ZHOU H, ALICI G, THAN T D, et al. Magnetic propulsion of a spiral-type endoscopic microrobot in a real small intestine [C]//IEEE/ASME International Conference. Kaohsiung, China: Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2012: 63-68.
- [7] CHOI J, BAEK Y. A single DOF magnetic levitation system using time delay control and reduced-order observer[J]. Ksme International Journal, 2002, 16(12): 1643-1651.
- [8] 孙鑫, 曲立国, 陈国豪, 等. 基于 MLP 的磁导航机器人方向控制系统设计[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2022, 43(6): 530-535.
- SUN Xin, QU Ligu, CHEN Guohao, et al. Design of direction control system of magnetic navigation robot based on MLP[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2022, 43(6): 530-535. (in Chinese)
- [9] MARINO H, BERGELES C, NELSON B. Robust electromagnetic control of microrobots under force and localization uncertainties[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2014, 11(1): 310-316.
- [10] CHO D, KATO Y, SPILMAN D. Sliding mode and classical controllers in magnetic levitation systems[J]. IEEE Control Systems, 2002, 13(1): 42-48.
- [11] GAO X, LIAO L. A new one-layer neural network for linear and quadratic programming[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2010, 21(6): 918-929.
- [12] 张进秋, 滕涛, 黄大山, 等. 基于神经网络的磁流变减振器力学模型研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 51-55.
- ZHANG Jinqiu, TENG Tao, HUANG Dashan, et al. Research on mechanical model of magnetorheological damper based on neural network[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2015, 36(1): 51-55. (in Chinese)
- [13] 祖冉, 李敏, 黄妍慧, 等. 带负载观测器的永磁同步电机滑模无差拍控制[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2022, 43(5): 411-417.
- ZU Ran, LI Min, HUANG Yanhui, et al. Sliding mode deadbeat control of permanent magnet synchronous motor with load observer[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2022, 43(5): 411-417. (in Chinese)
- [14] TENG Q, CUI H, TIAN J. Double ESOs-based field-oriented control for PMSM drive system with current sensorless[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2019, 10(2): 126-133.
- [15] 陈本永, 陈军, 杨涛, 等. 同步跟随式电磁悬浮驱动器的力学分析与测试[J]. 测试技术学报, 2009, 23(2): 95-101.
- CHEN Benyong, CHEN Jun, YANG Tao, et al. Measurement and mechanics analysis of an electromagnetic levitation micro-actuator[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2009, 23(2): 95-101. (in Chinese)
- [16] ZHANG C, WU X, XU J. Particle swarm sliding mode-fuzzy PID control based on maglev system[J]. IEEE Access, 2021, 9: 96337-96344.