

可控磁路式并联型永磁悬浮系统*

孙 凤¹, 韦 伟¹, 金俊杰¹, 金嘉琦¹, 岡宏一²

(1. 沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870; 2. 高知工科大学智能机械系统工学科 高知 782-8502)

摘要:提出一种主要由伺服电机、径向磁化盘状永磁铁、“F”形导磁体及悬浮物构成的可控磁路式并联型永磁悬浮系统。系统中, 并联悬浮物是置于导磁体正下方两个不同重量的铁球, 伺服电机驱动盘状永磁铁旋转, 改变通过悬浮物的有效磁通量, 进而控制悬浮力大小, 实现两铁球的稳定悬浮。根据系统结构及可控磁路式并联型永磁悬浮原理将系统模型简化, 并建立系统的数学模型, 分析使系统稳定悬浮的可能性, 计算使系统稳定悬浮的PD控制器反馈增益范围。实验结果表明: 在控制器参数满足计算范围条件下, 当给系统一较小阶跃外扰时, 在实时控制系统作用下, 系统在很短的响应时间内可达到新的稳定悬浮状态; 相同的外扰可导致左右球异向的位移响应结果, 左球移动方向与外扰相同, 而右球相反。

关键词: 永磁悬浮; 并联型; PD控制; 悬浮实验

中图分类号: TH-39 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.1520

Parallel permanent magnetic suspension system with flux path control

Sun Feng¹, Wei Wei¹, Jin Junjie¹, Jin Jiaqi¹, Oka Koichi²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Department of Intelligent Mechanical System Engineering, Kochi University of Technology, Kochi 782-8502, Japan)

Abstract: A parallel permanent magnetic suspension system is proposed, which is composed of a servo motor, a radial magnetized disk permanent magnet, an F shape magnetizer and suspending objects. In the system, the parallel suspending objects are two iron balls with different weights placed right under the magnetizer, the disk permanent magnet is driven by a servo motor and rotates. By changing the effective magnetic flux flowing through the suspended objects, the suspension force is controlled and the stable suspension of the two iron balls is realized. The system model is simplified based on the system structure and the parallel permanent magnetic suspension principle of the controllable flux path, and the mathematic model of the system is built, the stable suspension feasibility of the system is analyzed and the feedback gain range of the PD controller that makes the system stable suspending is analyzed. The experiment results indicate that when the PD control parameters meet the calculated range, the system can response to a small step disturbance quickly with real-time control and reach to new stable suspension state in a short response time; the same disturbance causes the displacement responses of two iron balls in different directions, the displacement direction of the left ball is the same as that of the disturbance and the right one is inverse to that of the disturbance.

Keywords: permanent magnetic suspension; parallel type; PD control; suspension experiment

1 引言

近年来,随着永磁材料的发展以及磁悬浮技术的深入研究,永磁悬浮技术相比于电磁悬浮技术具有节能、结

构紧凑、无发热等优点,因此,各国研究学者不仅对此技术普遍关注,还提出了多种永磁悬浮系统^[1-5]。水野毅等人^[6]提出一种新型双磁路磁悬浮系统,该系统的4个驱动器驱动铁板在永磁铁和悬浮物之间运动,以控制悬浮物所受到的磁通量,使悬浮物稳定悬浮。同时,通过驱动

器对磁路控制,控制悬浮物的向左、向右微运动。张钢等人^[7]对一种结构上为六磁环全永磁轴承进行理论研究,分析此系统的悬浮特性和力学特性,以实现刚性转子在动态情况下的稳定悬浮。张海龙等人^[8]提出了两种永磁悬浮直线导轨平台的对比方案,两方案均基于磁悬浮支撑技术,并利用 Ansoft Maxwell 磁场分析软件对磁场、磁力、承载能力、刚度以及磁力的变化进行计算,得出相对较好的支撑方案以及 x 方向上的磁力对整个平台的影响规律。秦伟等人^[9]提出一种永磁电动式磁悬浮装置,非铁磁性导体盘和永磁铁会产生相对运动,导体盘产生的涡流磁场与永磁铁周围的磁场互相作用,以达到悬浮的目的。Yang H. B. 等人^[10]提出一种基于混合励磁直线同步电机的磁悬浮进给平台,通过将永磁铁与励磁线圈分别安装在 V 型导轨与悬浮物上,通电后使其悬浮并沿导轨运动。田录林等人^[11]设计了一种永磁悬浮导轨结构,分别对悬浮磁力和导向磁力进行建模,并通过实验验证了理论模型的正确性,得到磁力与永磁铁间距、导轨倾斜度之间的关系,设计了永磁悬浮导轨结构并做优化处理。

本文提出一种通过控制系统中各磁路的磁通量使两个不同重量的铁球同时悬浮的并联型永磁悬浮系统^[12-13]。在本系统中,盘状永磁铁提供整个系统的磁通量,并通过两个“F”形导磁体分别传递给两个悬浮物。因此,通过电机旋转驱动,永磁铁的转角发生变化,两导磁体中的磁通量以相同的变化率改变,同时左右铁球悬浮力的大小也会发生变化^[14-15],通过控制使双铁球达到稳定悬浮的状态,则可实现对控制算法的验证。本系统是多自由度非接触驱动控制装置的一种,可用于高压接触器或断路器^[16-17]的非接触控制;由于系统的非线性较强,控制难度大,也可作为各种控制算法的验证装置^[18];通过控制双铁球的稳定悬浮,可以实现稳定状态下的零功率悬浮,达到节能的目的。随着非接触控制精度的提高,多自由度非接触控制技术在机械领域具有很广泛的应用前景。

2 可控磁路式悬浮原理

本文提出的可控磁路式并联型永磁悬浮系统的系统结构,如图1所示,该系统主要由径向磁化的盘状永磁铁、两个“F”形导磁体及两个直径不同的铁球、减速器以及直流伺服电机构成,电机经过减速器同轴驱动盘状永磁铁回转。两个“F”形导磁体对立安装在盘状永磁铁的左、右两侧,将导磁体曲面设计与永磁铁相对面同心的圆弧面,此种设计可以减少漏磁现象。“F”形导磁体的材料为坡莫合金,该材料具有窄而陡的磁滞回线,具有高磁导率和低矫顽力特性,可有效降低系统磁滞,提高系统响应。

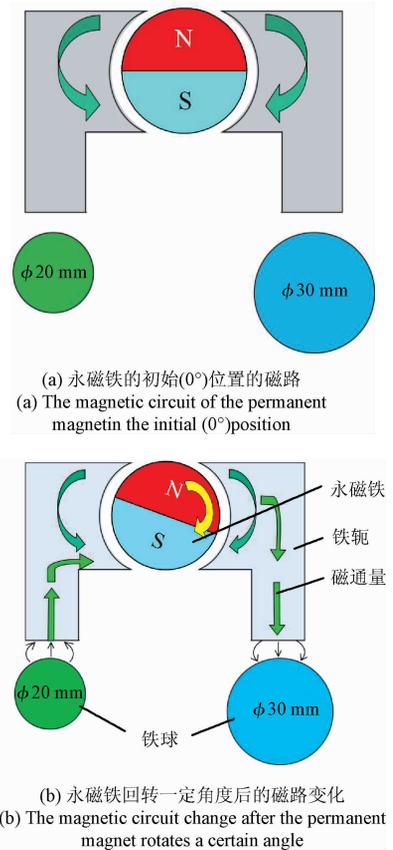


图1 系统悬浮原理

Fig. 1 Schematic diagram of system suspension

首先,对系统作如下假设:1)假设两铁球间的距离足够大,它们之间的吸引力可忽略不计;2)图1(a)所示位置盘状永磁铁转角为0°。

本系统采用磁路控制原理控制双铁球的悬浮力,电机驱动永磁铁旋转,改变通过双铁球的磁通量,可改变悬浮力的大小。永磁铁在电机未旋转时的初始位置(0°)如图1(a)所示,N、S磁极处于竖直位置,磁力线是由永磁铁的N极发出,分别经由两“F”形导磁体回到S极,但不经过铁球,因此两铁球和导磁体之间无悬浮力产生。当如图1(b)所示时,永磁铁旋转一定角度(例如20°)时,部分磁力线由永磁铁的N极出发经由右导磁体到达右铁球,同理,部分磁力线也经过左铁球和左导磁体回到S极,此时铁球与导磁体之间存在悬浮力。通过电机改变永磁铁转角的大小同时控制流经两铁球的磁通量,可达到控制两导磁体与两铁球之间的悬浮力的目的。两铁球在悬浮的过程中,铁球的重力由装置提供,并不是由伺服电机承担重力,适当增大盘状永磁铁和装置尺寸,可以控制质量较大的物体。

3 悬浮特性理论分析

为进一步了解本系统的悬浮特性,根据系统结构及可控磁路式悬浮原理,建立系统的力学模型和动力学模型,并通过理论计算分析了系统稳定悬浮的可能性。

3.1 力学模型建立

3.1.1 系统等效模型

系统悬浮原理图如图2所示。图中 m_1 和 m_2 为两铁球的质量; f_{m1} 和 f_{m2} 为两铁球与导磁体之间的吸引力; d_1 和 d_2 表示导磁体与两铁球间的气隙长度; z_1 和 z_2 分别为铁球上下悬浮时,偏离稳定悬浮平衡点的垂直位移(假设正方向为上); θ 为盘状永磁铁相对于初始位置(0°)的回转角(假设正方向为旋转的顺时针方向); φ 为永磁铁与“F”形导磁体之间的弧形气隙相对应的角度; g 为重力常数。

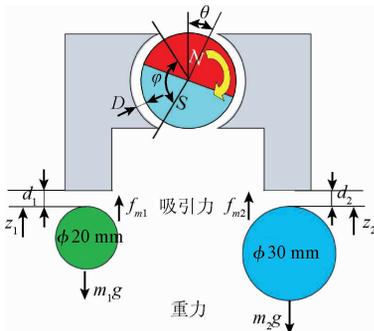


图2 模型图示及符号定义

Fig. 2 Model diagram and symbol definition

本系统中,由于控制永磁铁的旋转角度来控制通过悬浮物的有效磁路的磁通量变化,与磁势可变化的长方体形永磁铁改变导磁体中的磁通量等效,盘状永磁铁与“F”形导磁体之间的间隙是相等的,为使磁通量均匀穿过导磁体,导磁体的弧形面须等效成平面,并且其间隙与盘状永磁铁与“F”形导磁体之间的间隙相等。为简化系统模型,盘状永磁铁可等效为磁势可变化的长方体形永磁铁,等效的长方体与导磁体的间隙为 l_g ,其等效模型如图3所示。在等效后盘状永磁铁的工作面积 S_m 不变情况下,永磁铁的磁能与其体积 V 成正比例关系。在保证磁能不变的前提下,等效成长方体形永磁铁后,永磁铁的长度 L_m 可表示为:

$$L_m = \frac{V}{S_m} = \frac{\pi r}{\varphi} \quad (1)$$

式中: r 为盘状永磁铁的半径。

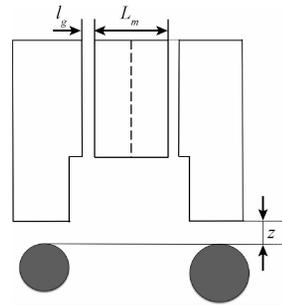


图3 系统的等效模型

Fig. 3 The equivalent model of the system

永磁铁的磁感应强度 B 与回转角 θ 的变化规律为正弦变化,所以,永磁铁的磁感应强度 B 和磁势 U 也呈正弦变化规律。假设系统中的良导磁材料(“F”形导磁体和悬浮球)及永磁铁的磁阻忽略不计,整个系统的磁势 U 可表示为:

$$U = U_m \sin \theta \quad (2)$$

式中: U_m 为整个系统中等效磁路磁势的峰值。

根据磁路欧姆定律,可得系统中的有效磁通 Φ_g 为:

$$\Phi_g = \frac{U}{\sigma_1^2 \sigma_2^2 \left(2 \frac{1}{\Lambda_g} + \frac{1}{\Lambda_{g1}} + \frac{1}{\Lambda_{g2}} \right)} \quad (3)$$

式中: Λ_g 为整个磁路的“F”形导磁体与盘状永磁铁间相对应的弧形气隙磁导, Λ_{g1} 为左导磁体与悬浮球之间的气隙磁导, Λ_{g2} 为右导磁体与悬浮球之间的气隙磁导。 σ_1 为“F”形导磁体与永磁铁间气隙的漏磁系数, σ_2 为“F”形导磁体与悬浮物间气隙的漏磁系数。

通常, σ_1 、 σ_2 的取值范围为 $1 \sim 20$, σ_1 、 σ_2 的取值与整个磁路中的漏磁导和气隙磁导有关, σ_1 、 σ_2 的计算表达式分别为:

$$\sigma_1 = \frac{\Lambda_g + \Lambda_1}{\Lambda_g}, \quad \sigma_2 = \frac{\Lambda_{g1} + \Lambda_{g2} + \Lambda_2 + \Lambda_3}{\Lambda_{g1} + \Lambda_{g2}} \quad (4)$$

式中: Λ_1 为永磁铁的弧形侧面与相对应的“F”形导磁体弧形侧面的漏磁导, Λ_2 为导磁体腿部的端面棱边漏磁导, Λ_3 为“F”形导磁体腿部的侧面漏磁导。

3.1.2 气隙磁导

根据系统的等效模型,系统磁路中永磁铁与单个导磁体间的弧形气隙磁导 Λ_g 为:

$$\Lambda_g = \mu_0 \frac{\alpha_r \varphi}{\left(\frac{r + l_g}{r} \right)} \quad (5)$$

式中: μ_0 为空气的磁导率, α_r 为径向磁化永磁铁的轴向厚度。

永磁铁的弧形侧面与相对应的“F”形导磁体弧形侧面的漏磁导 Λ_1 为:

$$\Lambda_1 = 2\mu_0 \frac{r\varphi}{\pi} \ln \left(1 + \frac{2l_c + 2\sqrt{l_c^2 + l_c l_g}}{l_g} \right) \quad (6)$$

式中: l_c 为永磁铁的漏磁力线在与导磁体相对应的弧形侧面之间的径向漏磁长度,在此设定 $l_c = l_g$ 。

左、右侧“F”形导磁体的腿部底面分别与左、右悬浮球的弧面之间的气隙磁导 Λ_{gj} 为:

$$\Lambda_{gj} = \mu_0 \frac{a_p b}{d_j} \quad (7)$$

式中: a_p 为“F”形导磁体的厚度, b 为“F”形导磁体的腿部宽度, $j=1$ 时均表示左侧铁轭吸引的铁球, $j=2$ 时表示右侧铁轭吸引的铁球,以下类同。

导磁体腿部的端面棱边漏磁导 Λ_2 为:

$$\Lambda_2 = 0.52\mu_0(2a_p + 2b) \quad (8)$$

导磁体腿部的侧表面漏磁导 Λ_3 为:

$$\Lambda_3 = \frac{2\ln 2\mu_0(2a_p + 2b)}{\pi} \quad (9)$$

3.1.3 悬浮力数学模型

通过电磁场理论可知,2个“F”形导磁体分别与2个悬浮物之间气隙的磁能 W_{gj} 为:

$$W_{gj} = \frac{\Phi_g^2}{\Lambda_{gj}} \quad (10)$$

根据虚位移法得到的悬浮力 F_{gj} 为:

$$F_{gj} = -\frac{\Phi_g^2}{\Lambda_{gj}^2} \frac{\partial \Lambda_{gj}}{\partial d_j} \quad (11)$$

将式(2)、(3)和(7)代入式(11)中可得到悬浮力 F_{gj} 公式为:

$$F_{gj} = K_j \frac{\sin^2 \theta}{(\Delta d_j + \sum_{j=1}^2 d_j)^2} \quad (12)$$

$$K_j = \frac{U_m^2 \mu_0 a_p b}{\sigma_1^4 \sigma_2^4}, \Delta d_j = 2 \frac{\mu_0 a_p b}{\Lambda_g}$$

式中: K_j 为系统悬浮力的常量系数, Δd_j 为忽略漏磁、铁球与导磁体脚部之间正对面积的不规则性的气隙补偿值,当系统结构不变时为常量。

3.2 动力学模型的建立

根据系统结构和力学特性,由于悬浮物的悬浮力在悬浮过程中克服自身重力和空气阻力,可得到系统的动力学微分方程为:

$$m_j \ddot{z}_j = F_{gj} - m_j g - c_j \dot{z}_j \quad (13)$$

式中: c_j 为空气的阻尼系数。

将此系统处于稳定平衡状态时的位置假设为 (z_0, θ_0) ,其中 z_0 为“F”形导磁体与悬浮物间的气隙, θ_0 为永磁铁的旋转角度,则此时系统在悬浮平衡位置的悬浮力可表示为:

$$F_{gj} = k_j \frac{\sin^2(\theta_0 + \Delta\theta_0)}{(\Delta d_j + \sum d_j + z_j)^2} \quad (14)$$

在平衡位置 (z_0, θ_0) 处,对悬浮力 F_{gj} 进行泰勒级数展开,并忽略高阶无穷小量,经过整理可得到系统在平衡位

置的悬浮力为:

$$F_{gj} = \frac{k_j \sin^2 \theta_0}{(\sum d_j + \Delta d_j)^2} - \frac{2k_j \sin^2 \theta_0}{(\sum d_j + \Delta d_j)^3} \Delta z + \frac{k_j \sin 2\theta_0}{(\sum d_j + \Delta d_j)^2} \Delta \theta \quad (15)$$

将式(15)的 F_{gj} 代入到(13)中,可得到系统在平衡点附近的线性微分方程如下:

$$m_j \ddot{z}_j = -\frac{2k_j \sin^2 \theta_0}{(\sum d_j + \Delta d_j)^3} \Delta z + \frac{k_j \sin 2\theta_0}{(\sum d_j + \Delta d_j)^2} \Delta \theta \quad (16)$$

$$\text{令 } k_{mj} = \frac{2k_j (\sin \theta_0)^2}{(\sum d_j + \Delta d_j)^3}, k_{\theta j} = \frac{k_j \sin 2\theta_0}{(\sum d_j + \Delta d_j)^2}, \text{其中}$$

k_{mj} 为左、右悬浮球在垂直方向上的位移 z_j 的系数, $k_{\theta j}$ 为左、右悬浮球在稳定悬浮时的单位回转角 $\Delta\theta$ 的系数;由 k_{mj} 和 $k_{\theta j}$ 计算公式可知 k_{mj} 和 $k_{\theta j}$ 必须为正数。

3.3 可控性分析

根据系统结构及悬浮原理可知,盘状永磁铁转角直接改变系统磁路,影响悬浮力,选取磁铁转角 θ 为输入量,建立系统状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\Delta\theta \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{式中: } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} z_1 \\ \dot{z}_1 \\ z_2 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \\ 0 \\ b_2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

其中:

$$a_{21} = \frac{k_{m1}}{m_1}, a_{22} = \frac{c_1}{m_1}, a_{43} = \frac{k_{m2}}{m_2}, a_{44} = \frac{c_2}{m_2}, b_1 = \frac{k_{\theta 1}}{m_1},$$

$$b_2 = \frac{k_{\theta 2}}{m_2} \quad (18)$$

由方程(17)可得系统的可控性判定矩阵为:

$$\mathbf{P}_c = (\mathbf{B} \quad \mathbf{A}\mathbf{B} \quad \mathbf{A}^2\mathbf{B} \quad \mathbf{A}^3\mathbf{B}) \quad (19)$$

则可控矩阵的行列式为:

$$\det(\mathbf{P}_c) = ((a_{43} - a_{21})^2 + (a_{21} \cdot a_{44} + a_{22} \cdot a_{43}) \cdot (a_{44} - a_{22})) b_1^2 b_2^2 \quad (20)$$

当双球稳定悬浮状态时,即 $a_{21} \neq a_{43}$ 且 $a_{22} \neq a_{44}$ 时,可控矩阵的行列式非0,所提的悬浮系统通过计算验证为可控系统,通过理论计算,证实了此系统稳定悬浮的可能性。根据永磁悬浮系统的特性可知许多因素可引起 a_{21} 和 a_{43} 的值不同,例如导磁体的材料和尺寸,铁球的材料和尺寸等,本文仅讨论在相同材料不同尺寸的情况下,两铁球在永磁悬浮系统中的特性。为减小计算量,设 $c_1 = c_2 = 0$ 。

4 控制系统增益特性分析

控制系统结构如图4所示。由图可知控制系统以两铁球的位置 $Refz_1$ 和 $Refz_2$ 为输入,分别经 PD₁ 和 PD₂ 控制环节计算,得到的结果求和后作为输入实时调节盘状永磁体的回转角度。由于本系统中永磁体回转采用直流伺服电机驱动,为提高电机响应,加入 PD₃ 环节。为简化分析过程,理想化伺服电机控制,暂不考虑 PD₃ 增益对系统影响。

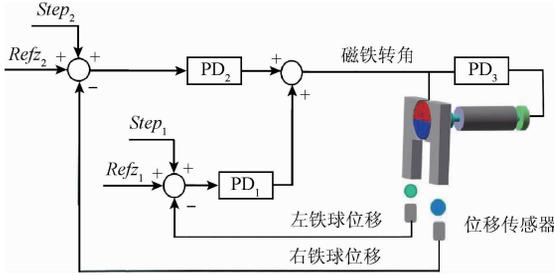


图4 控制系统结构

Fig. 4 Structure diagram of the control system

输入 θ 角为:

$$\Delta\theta = -(k_{p1}z_1 + k_{d1}\dot{z}_1 + k_{p2}z_2 + k_{d2}\dot{z}_2) \quad (21)$$

式中: k_{p1} 、 k_{d1} 分别是左铁球比例和微分环节的反馈增益, k_{p2} 、 k_{d2} 则是右铁球比例和微分环节的反馈增益。

将式(21)代入式(17)得:

$$\dot{\mathbf{x}} = A_c \mathbf{x} \quad (22)$$

A_c 的特征多项式为:

$$D(s) = s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0 \quad (23)$$

其中, $a_3 = b_1k_{d1} + b_2k_{d2}$, $a_2 = -a_{21} - a_{43} + b_1k_{p1} + b_2k_{p2}$, $a_1 = -a_{43}b_1k_{d1} - a_{21}b_2k_{d2}$, $a_0 = a_{21}a_{43} - a_{43}b_1k_{p1} + a_{21}b_2k_{p2}$ 。

此外:

$$a_2a_3 - a_1 = b_1k_{d1}(b_1k_{p1} + b_2k_{p2} - a_{21}) + b_2k_{d2}(b_1k_{p1} + b_2k_{p2} - a_{43}) \quad (24)$$

$$a_1(a_2a_3 - a_1) - a_0a_3^2 = (a_{21} - a_{43})b_1b_2((a_{21} - a_{43})k_{d1}k_{d2} + (b_1k_{d1} + b_2k_{d2})(k_{d1}k_{p2} - k_{d2}k_{p1})) \quad (25)$$

根据 Routh-Hurwitz 判定准则,为使系统保持稳定,式(20)~(22)的系数须为正数。因此有:

$$-b_2k_{d2} < b_1k_{d1} < -\frac{a_{21}}{a_{43}}b_2k_{d2} \quad (26)$$

$$a_{21} + a_{43} - b_2k_{p2} < b_1k_{p1} < a_{21} + \frac{a_{21}}{a_{43}}b_2k_{p2} \quad (27)$$

$$a_{21} + a_{43} - b_1k_{p1} < b_2k_{p2} < a_{43} - \frac{a_{43}}{a_{21}}b_1k_{p1} \quad (28)$$

$$b_1k_{d1}a_{43} + b_2k_{d2}a_{21} > 0 \quad (29)$$

$$(a_{21} - a_{43})b_1b_2((a_{21} - a_{43})k_{d1}k_{d2} + (b_1k_{d1} + b_2k_{d2})(k_{d1}k_{p2} - k_{d2}k_{p1})) > 0 \quad (30)$$

因为 b_1 、 b_2 、 a_{21} 为正数,当 $a_{21} < a_{43}$ 时由式(28)可得:

$$a_{21} - b_2k_{p2} < -\frac{a_{43}}{a_{21}}b_1k_{p1}; \quad \left(\frac{a_{43}}{a_{21}} - 1\right)b_1k_{p1} < -a_{21};$$

$$k_{p1} < -\frac{a_{21}}{b_2\left(\frac{a_{43}}{a_{21}} - 1\right)} < 0。$$

由式(27)得:

$$a_{43} - b_2k_{p2} < \frac{a_{21}}{a_{43}}b_2k_{p2}; \quad \left(\frac{a_{21}}{a_{43}} + 1\right)b_2k_{p2} > a_{43};$$

$$k_{p2} > \frac{a_{43}}{b_2\left(\frac{a_{21}}{a_{43}} + 1\right)} > 0。$$

对式(26)进行整理,可得:

$$\left(1 - \frac{a_{21}}{a_{43}}\right)b_2k_{d2} > 0; \quad \left(1 - \frac{a_{21}}{a_{43}}\right)b_2 > 0; \quad k_{d2} > 0。$$

由式(29)可知, k_{d1} 与 k_{d2} 符号相反,可知 $k_{d1} < 0$ 。

$$\text{由式(29)得, } k_{d2} > -\frac{b_1a_{43}}{b_2a_{21}}k_{d1}。$$

由式(28)以及(30)得:

$$b_2k_{p2} + b_1k_{p1} > a_{21} + a_{43} > 0; \quad k_{d1}k_{p2} - k_{d2}k_{p1} > 0;$$

$$\frac{k_{p1}}{k_{d1}} < \frac{k_{p2}}{k_{d2}}。$$

即:

$$k_{p1} < 0, k_{p2} > 0, k_{d1} < 0, k_{d2} > 0,$$

$$k_{d2} > -\frac{b_1a_{43}k_{d1}}{b_2a_{21}}, \frac{k_{p1}}{k_{d1}} < \frac{k_{p2}}{k_{d2}} \quad (31)$$

当 $a_{21} > a_{43}$ 时,同理可得:

$$k_{p1} > 0, k_{p2} < 0, k_{d1} > 0, k_{d2} < 0,$$

$$k_{d2} > -\frac{b_1a_{43}k_{d1}}{b_2a_{21}}, \frac{k_{p1}}{k_{d1}} > \frac{k_{p2}}{k_{d2}} \quad (32)$$

由式(31)和(32),通过比较 a_{21} 和 a_{43} 之间的大小,可得出 k_{p1} 、 k_{p2} 、 k_{d1} 、 k_{d2} 的正负和比值关系,由此可知控制系统中质量不同的两铁球的反馈增益是不同的,且符号相反,其中小铁球的反馈增益为负。

5 悬浮特性实验验证

5.1 实验验证方案

本实验中,驱动盘状永磁体的驱动电机选用日本 HarmonicD 公司生产的 RH-5A8802 型号的伺服电机,测量两个悬浮球位移的位移传感器选用的是日本圣铁克公司生产的电涡流位移传感器,表1所示为实验器材参数。永磁体的材料为钕铁硼 NdFeB30,“F”形导磁体的材料为坡莫合金 1J85。

表 1 实验器材参数

Table 1 Parameters of the experiment equipment

参数	数值
伺服电机的额定电压 U/V	12
伺服电机的转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	6.3×10^{-4}
伺服电机的额定回转速度 $v_{\text{额}}/(r \cdot \text{min}^{-1})$	88
伺服电机的最高转速 $v_{\text{高}}/(r \cdot \text{min}^{-1})$	180
位移传感器的测量范围 d/mm	0 ~ 3.5
位移传感器的分辨率/ μm	2

为验证系统悬浮可能性原理及系统的响应特性,遵循表 2 所示的系统结构参数及 PD 控制方法进行不同质量的双铁球悬浮特性的实验论证。

表 2 永磁悬浮系统结构参数

Table 2 Structure parameters of the permanent magnetic suspension system

参数	数值
左铁球质量 m_1/kg	0.059 7
右铁球质量 m_2/kg	0.132 5
左铁球引力常数 $k_1/(N \cdot m^2)$	2.56×10^{-5}
右铁球引力常数 $k_2/(N \cdot m^2)$	4.06×10^{-5}
永磁铁初始转角 $\theta_0/(\circ)$	40
左球悬浮气隙 d_1/mm	2.2
右球悬浮气隙 d_2/mm	1.8
左球气隙补偿 $\Delta d_1/\text{mm}$	2
左球气隙补偿 $\Delta d_2/\text{mm}$	1.8

5.2 悬浮系统的实验结果分析

为进一步验证悬浮可能性及系统响应特性,结合 dSPACE 控制器搭建并联型永磁悬浮系统实验装置,系统稳定悬浮状态如图 5 所示。系统中,为消除两球之间的影响,两铁球均采用直线导轨限定铁球仅做垂直运动。悬浮实验中,小铁球位移控制器 PD_1 及大铁球位移控制器 PD_2 分别为 $k_{p_1} = -91\ 745.97, k_{d_1} = -1\ 326.62; k_{p_2} = 117\ 989.58, k_{d_2} = 1\ 601.62$,此外,伺服电机转角控制器 PD_3 增益设为 $k_{p_3} = 47.56, k_{d_3} = 0.29$ 。

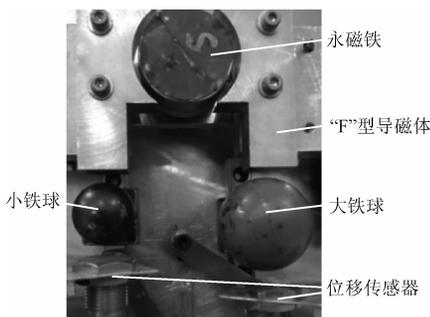
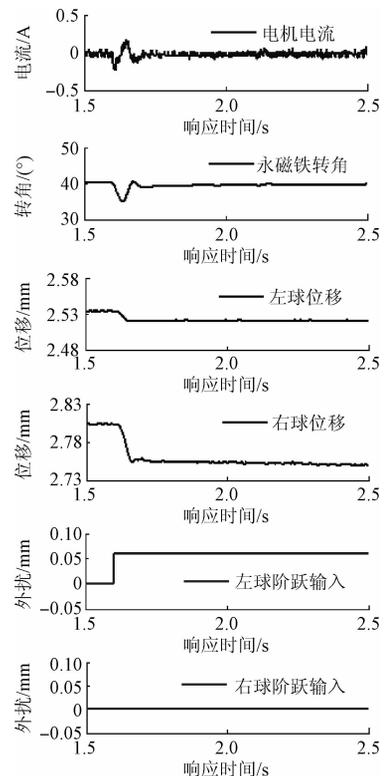


图 5 系统稳定悬浮状态

Fig. 5 Stable and suspending status of the system

当系统处于稳定悬浮状态时,以 0.06 mm 的阶跃扰动作为输入,系统实验响应曲线如图 6 所示。结果表明,当给左铁球以 0.06 mm 的上升沿阶跃扰动作为输入时,系统能在短时间内达到稳定悬浮状态。上升沿阶跃输入,可减小永磁铁的转角,两铁球悬浮力减小,重力作用下左右两铁球悬浮气隙增大,为保持两铁球稳定悬浮,在闭环控制系统作用下永磁铁转角瞬间增大后稳定,进而重新达到稳定悬浮状态。两铁球的悬浮力由两“F”形导磁体支撑,伺服电机仅驱动永磁铁的旋转,当系统达到稳定悬浮状态时,伺服电机电流恢复至 0。在系统的悬浮过程中,悬浮物的悬浮力是由永磁铁提供的,电机的控制电流很小,可以用很小的电流控制相对较重的物体,达到一种“小功耗,大悬浮力”的节能特性。图 6(b)所示为给右铁球输入相同阶跃扰动时的响应结果,与左球输入阶跃时响应结果比较可知,相同的阶跃扰动,导致了不同的响应结果,向上的阶跃使两球同时向上移动。此结果表明如果 PD 控制器参数符号是相反的,所导致的响应结果也是相反的。

根据表 1 参数及式(16)、(18)计算得 $a_{21} = 4\ 782.8, a_{43} = 5\ 427.1, b_1 = 23.9, b_2 = 23.3$ 。由于 $a_{21} < a_{43}$,与所给 PD 控制器的参数结合,通过计算可知,系统已满足式(32)限定条件。



(a) 给左球阶跃输入
(a) Step input to the left ball

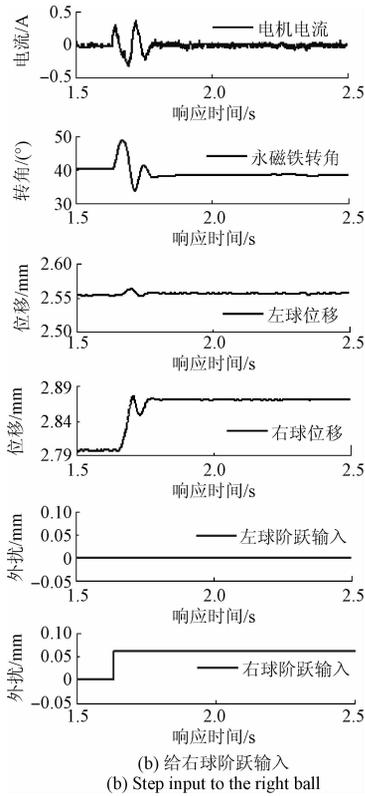


图6 系统实验响应曲线

Fig. 6 Response curves of system experiment

为验证 $a_{21} > a_{43}$ 时控制器反馈增益分析的正确性,将左右球位置互换,系统稳定悬浮时,左球和右球的阶跃输入分别为 0.06 mm,图 7 所示为左右球位置互换后系统的响应结果。由于位置互换,图 7 中的响应结果与图 6 是一致的,且系统满足 $a_{21} > a_{43}$ 时式(33)限定条件。

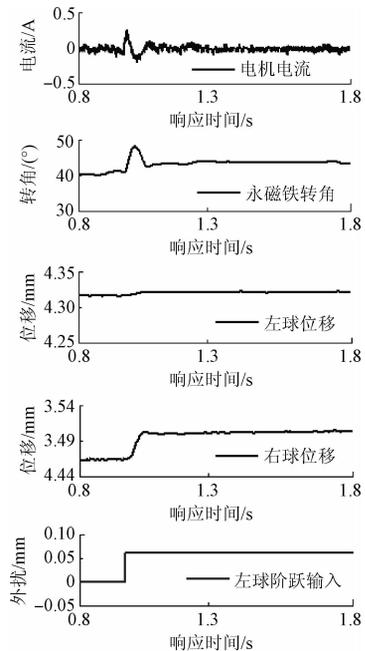


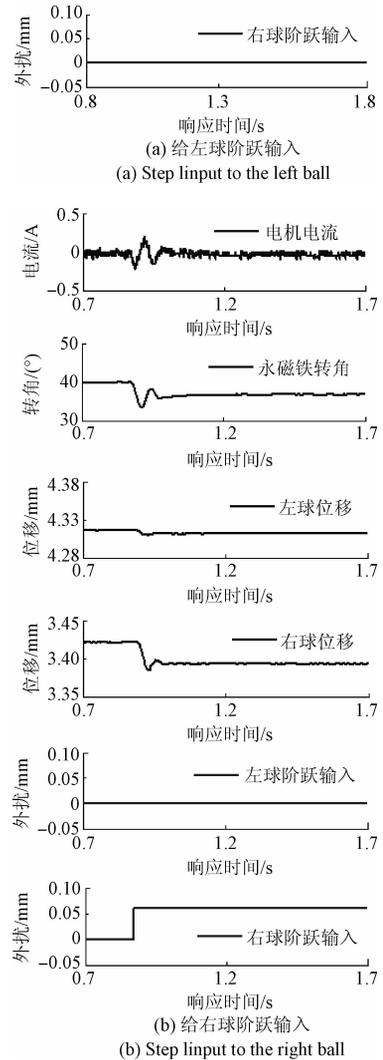
图7 左右球位置互换后系统实验响应曲线

Fig. 7 Response curves of system experiment after the left and right ball positions swap

实验结果表明,1)给右铁球输入相同阶跃扰动时的响应结果与左球输入阶跃时响应结果不同:给右铁球输入 0.06 mm 向上阶跃扰动时,左右铁球的位置均上移,给左铁球输入 0.06 mm 向上阶跃扰动时,左右铁球的位置均下移。可将左球和右球的位置调换,则将会出现相反的阶跃响应结果。2)可控磁路式并联型永磁悬浮系统的两铁球稳定悬浮可验证 PD 控制器反馈增益分析结果的正确性。

6 结 论

本文根据系统结构及原理简化了系统模型,建立了系统动力学模型,从理论上分析了可控磁路式并联型永磁悬浮系统的悬浮原理并建立其数学模型。



根据 Routh-Hourwith 判定准则,判定系统的悬浮稳定性,通过理论分析得出系统稳定悬浮的 PD 控制器的反馈增益范围,结果表明,控制系统中质量不同的两铁球的反馈增益是不同的,且符号相反,其中小铁球的反馈增益为负。

通过并联型永磁悬浮实验研究了系统动态特性,由实验结果可看出在控制器参数满足限定条件情况下利用 PD 控制方法能够使两铁球同时稳定悬浮。通过较小阶跃扰动作用,系统可迅速达到新的稳定悬浮状态,验证了分析的正确性及所提出的永磁悬浮系统的动态响应特性。由于节能特性和装置结构特点,铁球的重力由整个装置提供,不由电机直接承担,由于此特性,装置可以用小电流悬浮相对较重的悬浮物;如果悬浮物过大,可通过适当增大盘状永磁体和装置的尺寸来实现悬浮更大的物体。

本文对单个外扰情况下的可控磁路式并联型永磁悬浮系统进行理论分析和实验验证,下一步工作将考虑从以下两个方面进行研究分析:1)对系统受到不同数量、不同类型的外扰时两铁球的稳定悬浮进行研究分析。2)改进或设计新的控制器,进一步提高可控磁路式并联型永磁悬浮系统的悬浮精度以及悬浮稳定性。

参考文献

- [1] 胡文艳. 钕铁硼永磁材料的性能及研究进展[J]. 现代电子技术, 2012, 35(2): 151-152.
HU W Y. Property and research progress of NbFeB permanent magnets[J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(2): 151-152.
- [2] 江东, 张静, 杨嘉祥. 磁悬浮振动测试系统的混沌运动[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(10): 2177-2183.
JIANG D, ZHANG J, YANG J X. Research on chaotic movement of maglev vibration test system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(10): 2177-2183.
- [3] 朱坚民, 沈正强, 李孝茹, 等. 基于神经网络反馈补偿控制的磁悬浮球位置控制[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 976-986.
ZHU J M, SHEN ZH Q, LI X R, et al. Magnetic levitation ball position control based on neural network feedback compensation control[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 976-986.
- [4] 刘虎, 房建成. 新型永磁偏置轴向磁轴承的磁力特性[J]. 机械工程学报, 2010, 46(8): 167-174.
LIU H, FANG J CH. Magnetic force characteristics of a novel permanent magnet biased axial magnetic bearing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(8): 167-174.
- [5] 王晓乐, 付小利, 崔宸昱, 等. 基于多类别满意优化

控制的磁悬浮球控制系统[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1928-1936.

WANG X L, FU X L, CUI CH Y, et al. Magnetic levitation ball control system based on multi-class satisfactory optimization control algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 1928-1936.

- [6] 水野毅, 星野博, 高崎正也, 等. 磁悬浮系统的磁路控制的方案和基础实验[J]. 日本 AEM 学会杂志, 2006, 3(14): 346-352.
MIZUNO T, HOSHINO H, TAKASAKI M, et al. Proposal and basic experimental study of flux path control magnetic suspension[J]. Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics, 2006, 3(14): 346-352.
- [7] 张钢, 孟庆涛, 钟永彦, 等. 五自由度全永磁轴承系统的稳定悬浮特性分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(5): 56-63.
ZHANG G, MENG Q T, ZHONG Y Y. Stable Levitation performance analysis of five degrees of freedom all permanent magnetic bearing system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(5): 56-63.
- [8] 张海龙, 张坚, 孟庆涛, 等. 基于 Ansoft 的永磁悬浮直线导轨平台的设计及磁力分析[J]. 轴承, 2014(5): 12-15.
ZHANG H L, ZHANG J, MENG Q T, et al. Design and magnetic analysis of linear platform using permanent magnetic suspension technology based on ansoft[J]. Bearing, 2014(5): 12-15.
- [9] 秦伟, 范瑜, 朱熙, 等. 永磁电动式磁悬浮装置的研究[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(7): 77-81.
QIN W, FAN Y, ZHU X, et al. Analysis of permanent-magnet electro-dynamic maglev device[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(7): 77-81.
- [10] YANG H B, YU S J, YANG R J, et al. A new hybrid excited magnetic levitation feeding platform[J]. Applied Mechanics & Materials, 2013(385-386): 772-776.
- [11] 田录林, 杨晓萍, 李言, 等. 适用于永磁悬浮轨道及永磁轴承的解析磁力模型研究[J]. 摩擦学学报, 2008, 28(1): 73-77.
TIAN L L, YANG X P, LI Y, et al. Research on magnetic analytical model suitable for permanent magnetic levitation and permanent magnetic bearing[J]. Journal of Tribology, 2008, 28(1): 73-77.
- [12] SUN F, OKA K. Feasibility analysis of two iron balls' simultaneous suspension using flux path control mechanism[J]. Journal of System Design & Dynamics, 2011, 5(5): 1155-1166.
- [13] SUN F, OKA K. Magnetic suspension using variable flux

- path control mechanism with permanent magnet (Simultaneous suspension experiment of two iron balls)[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 2012, 78(792): 2771-2780.
- [14] SUN F, OKA K and JIN J J. A zero suspension force improvement method of a permanent magnetic suspension device [J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2013, 41(1): 3-12.
- [15] SUN F, OKA K, SAIBARA Y. Magnetic suspension system by flux path control using rotary actuator [J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2010, 33(1): 769-776.
- [16] 章上聪, 许海波, 吴桂初, 等. 塑壳断路器分断角速度非接触式检测方法及其应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(7): 995-1002.
- ZHANG SH C, XU H B, WU G CH, et al. Non-contact measurement method of angular rate in breaking process of MCCB [J]. Journal of electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(7): 995-1002.
- [17] 李亚星, 忻尚芝, 杨迪瑞, 等. 永磁机构在空气式断路器中可行性分析及其 MATLAB 仿真[J]. 电子测量技术, 2017, 40(3): 31-34.
- LI Y X, XIN SH ZH, YANG D R, et al. Feasibility analysis and MATLAB simulation of permanent magnetic actuator in air circuit breaker. [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(3): 31-34.
- [18] 刘少军, 张思雨. 基于 DSP 控制的永磁同步电机变频调速系统的设计 [J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(1): 84-88.

LIU SH J, ZHANG S Y. Design of PMSM variable frequency speed control system based on DSP [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(1): 84-88.

作者简介



孙凤(通讯作者),分别在2002年和2005年于沈阳工业大学获得学士学位和硕士学位,2010年于高知工科大学获得博士学位,现为沈阳工业大学副教授,主要研究方向为磁悬浮技术与数控加工技术与装备。
E-mail:sunfeng@ sut. edu. cn

Sun Feng (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Shenyang University of Technology in 2002 and 2005, received his Ph. D. degree in 2010 from Kochi University of Technology. Now, he is an associate professor in Shenyang University of Technology. His main research interest is magnetic levitation technology, and NC manufacture technology and equipment.



岡宏一,1983年于日本京都大学获得硕士学位,1997年于东京大学获得博士学位,现为高知工科大学教授,主要研究方向为磁悬浮系统、机电一体化、机器人等领域。
E-mail: oka. koichi@ kochi-tech. ac. jp

Koichi Oka received his M. Sc. degree from Kyoto University in 1983 and Ph. D. degree from University of Tokyo, Japan in 1997. Now, he is a professor at Kochi University of Technology. He main research interest includes the fields of magnetic levitation system, mechatronics and robotics.