

非线性功放扩大主动磁悬浮系统动态范围研究*

张燕红^{1,2} 赵德安¹ 张建生²

(1. 江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013; 2. 常州工学院电子信息与电气工程学院, 常州 213002)

摘要: 为了克服电磁铁芯材料的非线性对主动磁悬浮控制系统的影响, 提出一种非线性功率放大的新方法, 通过这种特殊的放大器将带有铁芯的差动电磁铁负载系统转换成一个线性系统, 对主动磁悬浮的控制器而言, 其控制对象就变成了一个线性控制系统, 这有利于系统控制量的实时计算。实验结果表明, 非线性功放的应用扩大了控制器的动态范围, 提高了主动磁悬浮控制系统的稳定性。

关键词: 磁悬浮控制器 非线性功率放大器 磁悬浮系统稳定性 非线性控制

中图分类号: TP273; TH133.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0268-05

Nonlinear Amplifier Expanded Dynamic Range of Active Magnetic Levitation System

Zhang Yanhong^{1,2} Zhao Dean¹ Zhang Jiansheng²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. School of Electronic Information and Electric Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China)

Abstract: In order to overcome the nonlinear influence of electromagnet material on control system, a new method of nonlinear power amplifier was put forward. By this special amplifier, the differential electromagnet load system became a linear system. For the controller of active suspension, the control object was transformed into a linear control system, which facilitated the real-time calculation of the controls variable. The experiment result showed that the nonlinear amplifier had expanded the dynamic range of the controller and improved the stability of the active magnetic levitation control system.

Key words: Magnetic levitation controller Nonlinear power amplifier Stability of magnetic levitation system Nonlinear control

引言

主动磁悬浮轴承能够实现非接触支承, 具有无机械磨损、无需润滑、工作温度范围大、工作极限转速高等优点^[1]。国内外专家在主动磁悬浮支承扩大稳定域和提高系统性能方面做了大量工作^[2~9]。研究发现电磁铁磁性材料的非线性对系统稳定性影响较大, 因此, 本文针对目前主动磁悬浮支承技术研究及实验中的非线性问题^[10~11], 对其产生的机理进行理论分析, 提出将一种数字化非线性功放应用于

主动磁悬浮系统中。

1 非线性产生的原理

在主动磁悬浮控制系统中, 影响控制系统稳定性的主要原因之一是磁路非线性, 它使得系统在多数扰动下, 不能准确地预算输出量, 因而造成系统响应延时, 最终影响系统频响。输出量不能准确预算主要是由磁滞回线造成的, 磁滞回线如图1所示。

在无扰动时, 电磁铁磁浮的工作点在A点, 当存在扰动时, 设扰动作用为正向时, 动态工作点应移

收稿日期: 2013-01-13 修回日期: 2013-03-03

* 国家自然科学基金资助项目(51175052)和常州工学院科研基金资助项目(YN1216)

作者简介: 张燕红, 博士生, 常州工学院讲师, 主要从事智能控制和磁悬浮控制研究, E-mail: zhangyh@czu.cn

通讯作者: 赵德安, 教授, 博士生导师, 主要从事智能自动化与网络控制研究, E-mail: dazhao@ujs.edu.cn

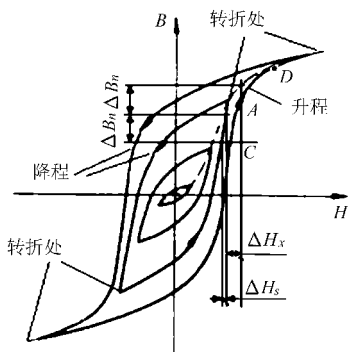


图 1 电磁铁的磁滞回线
Fig. 1 Hysteresis loop of electromagnet

到 D 点才能克服,但是当扰动作用为反向时,动态工作点就得移到 C 点,同样的扰动幅度可以看作磁感应强度的增量幅度相等,但是同样的磁感应强度的增量,当不同方向时,由于磁场的非线性,磁场强度的增量就不相同。如果扰动作用为正方向时,需要更大的磁场强度 H ,因而就需更大的线圈驱动。

2 改善主动磁悬浮控制系统稳定域的措施

目前主动磁悬浮控制系统中,通常采用模拟 PID 控制器和智能 PID 控制器,以涡流传感器检测到的位移信号作为 PID 控制器的输入信号,但 PID 控制器无法准确预测到目标值,一次性地给出准确的输出电流,只能从趋势上增加或减少输出电流,再通过位置误差信号反复调整,逐步趋于稳定。显然这种方式的响应无法做到最快最准,因而很难进一步提高主动磁悬浮系统的性能。

典型的主动磁悬浮应用中,主动磁悬浮轴承是通过控制差动电磁铁内线圈电流来调整转子平衡位置,与用永磁体构成的轴承(常称为被动磁悬浮轴承)不同之处是控制器中采用了智能 PID 控制算法,由于积分环节的作用,可以做到无静差。以主动磁悬浮系统中的 1 个自由度为例,其结构如图 2

所示。
差动电磁铁对转子的吸力为
$$\Delta F_x = F_1 - F_2 = \frac{\mu s_0 N^2}{4} \left[\left(\frac{I_0 + i_{x0} + i_x}{c_0 + x} \right)^2 - \left(\frac{I_0 - i_{x0} - i_x}{c_0 - x} \right)^2 \right] \quad (1)$$
式中 μ ——铁磁材料真空磁导率, H/m
 s_0 ——气隙截面积, m^2
 N ——电磁线圈匝数
 c_0 ——转子平衡位置时电磁轴承的半径气隙, m
 x ——转子偏离中心轴的距离, m
 I_0 ——偏置电流, A
 i_{x0} ——固定作用力下的电流增量, A
 i_x ——受扰动时的电流增量, A
在以往主动磁悬浮轴承中,一般不考虑铁芯材料的非线性影响,把差动电磁铁、放大器当成对称的。当扰动很小时,只是在平衡位置上出现微变, $x = 0$, 则式(1)可简化为

$$\Delta F_x = F_1 - F_2 = \frac{\mu s_0 N^2}{c_0^2} I_0 (i_{x0} + i_x) \quad (2)$$

从式(2)可以看出,吸力与电流呈线性关系,差动电磁铁产生的吸力增量的模也是相等的(简称上线圈与下线圈吸力对称),控制器可以按线性模型作运算以便获得最佳控制。可见,只有当扰动很小,在平衡位置中点微变时,差动电磁铁中电流差异才较小,主动磁悬浮轴承系统才可视为线性系统。

当受冲击性负载时,电流增量较大,差动电磁铁中的吸力增量偏差较大,此时,上、下线圈中的电流差异较大,上、下磁路中的 μ 也不同,则不能把差动电磁铁再当成对称的了,上、下电磁铁中的磁感应强度变化量与电流呈非线性关系,吸力 F_1 、 F_2 的对称性与线性状态下的情形发生了很大的变化,即电流增量一致,而差动电磁铁的吸力变化不对称

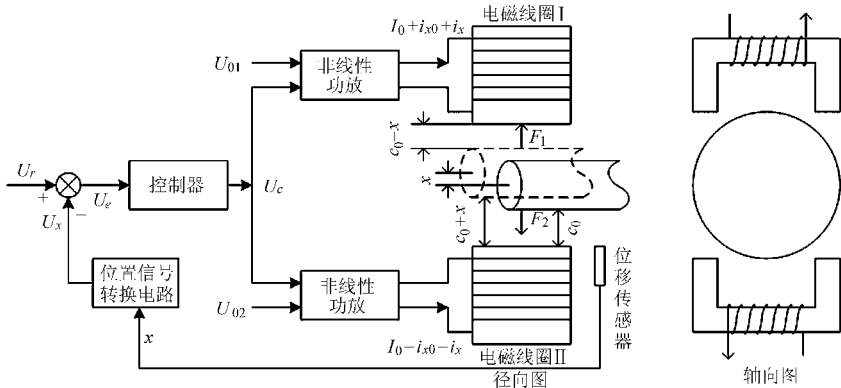


图 2 主动磁悬浮系统中 1 个自由度的示意图
Fig. 2 1-DOF active magnetic levitation system

$$\Delta F_x = \frac{\mu s_0 N^2}{4} \left(\frac{I_0 + i_{x0} + i_x}{c_0 + x} \right)^2 - \frac{\mu s_0 N^2}{4} \left(\frac{I_0 - i_{x0} - i_x}{c_0 - x} \right)^2 \quad (3)$$

欲使轴承转子平衡,以往的控制器的是在上下间隙不等的位置上建立新的平衡点(称之为自由平衡),会带来两个问题:①建立新的平衡点即 $x > 0$,就会使平衡点位置偏离中心,减小了磁轴承间隙裕量。建立新平衡点的过程中,由于没有非线性控制模型,从微观上讲,控制器只能在位置传感器偏差信号的作用下边调整边检查,逐步接近新的平衡,而不是预测新的平衡点处的输出量。②如增大电流 $i_{x0} + i_x$,使轴承在过电流状态下建立新的平衡点(也是一种自由平衡方式),无法做到最佳控制,同时也牺牲了控制器的动态范围,而且 $i_{x0} + i_x$ 增大的量与系统的增益有关,所以很难将控制器、放大器做成标准化,也没有互换性。以上两种情况都会减少稳定域,无法进一步提升转子的角速率。

综上所述,电磁铁芯材料对磁悬浮系统的直接影响有:①对大部分双电磁铁结构的磁悬浮系统,由于铁芯材料的非线性,必然导致线圈1和线圈2的不对称,从而产生对控制器的影响,造成稳定域下降^[12~13]。②单纯补偿磁滞回线的非线性后仍然还

有电流与吸力之间的平方关系。因此,若通过加入数字化非线性功放来抵消铁芯非线性对系统的影响,在一定范围内按磁滞回线非线性规律增加电流,使磁场强度 H 与输入信号产生非线性的关系,而这种关系再乘上 μ 以后使磁感应强度 B 对输入信号的关系呈线性化,这样主动磁悬浮控制器就相当于在线性系统下工作,从而提升了主动磁悬浮系统的稳定域。

3 数字化非线性功放

3.1 数字化非线性功放的原理

在主动磁悬浮控制系统中,采用数字化非线性功率放大器来抵消铁芯非线性影响,使控制器的控制对象等效成为一个线性系统。数字化非线性功放的结构框图如图3所示,在实际工作时,上线圈与下线圈中通过的电流增量是不等的,电流的大小是根据铁芯工作点的移动来动态调整的,而铁芯工作点的移动是按磁芯材料的瞬时导磁率的变化而变化,因此,通过非线性功放来确定上线圈与下线圈中的电流,使上线圈与下线圈产生的吸力增量对称,从而改善控制系统的动态性能,扩大控制器的动态范围。

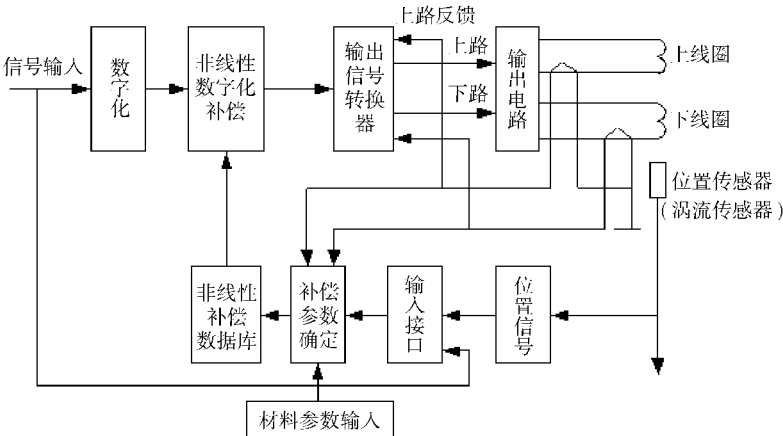


图3 数字化非线性功放框图

Fig.3 Block diagram of digital nonlinear power amplifier

数字化非线性功放的补偿原理是根据铁芯材料磁滞特性来补偿线圈电流的增量,其本质是获得实时的磁导率 μ 。一旦磁导率 μ 获得后,吸力增量 ΔF_n 与线圈电流的关系为

$$\Delta F_n = A_{sn} \mu_{sn} i_{sn}^2 - A_{xn} \mu_{xn} i_{xn}^2 \quad (n=0,1,\dots,m) \quad (4)$$

其中
$$A_{sn} = \frac{s_0 N^2}{4 (c_0 + x_n)^2} \quad A_{xn} = \frac{s_0 N^2}{4 (c_0 - x_n)^2}$$
$$i_s = I_0 + i_{x0} + i_{xs} \quad i_x = I_0 - i_{x0} - i_{xs}$$

设
$$A_s = \begin{bmatrix} A_{s1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_{s2} & \cdots & \vdots \\ \vdots & & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & A_{sm} \end{bmatrix}$$
$$A_x = \begin{bmatrix} A_{x1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_{x1} & \cdots & \vdots \\ \vdots & & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & A_{x1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \boldsymbol{M}_s &= \begin{bmatrix} M_{s1} \\ M_{s2} \\ \vdots \\ M_{sm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{s1}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & i_{s2}^2 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & i_{sm}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{s1} \\ \mu_{s2} \\ \vdots \\ \mu_{sm} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{M}_x &= \begin{bmatrix} M_{x1} \\ M_{x2} \\ \vdots \\ M_{xm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{x1}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & i_{x2}^2 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & i_{xm}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{x1} \\ \mu_{x2} \\ \vdots \\ \mu_{xm} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

由此得实时吸力增量为

$$\Delta \boldsymbol{F} = [\Delta F_1 \quad \Delta F_2 \quad \cdots \quad \Delta F_m]^T = \boldsymbol{A}_s \boldsymbol{M}_s - \boldsymbol{A}_x \boldsymbol{M}_x \quad (5)$$

即

$$\begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta F_2 \\ \vdots \\ \Delta F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{s1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_{s2} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & A_{sm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & i_{s2}^2 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & i_{sm}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{s1} \\ \mu_{s2} \\ \vdots \\ \mu_{sm} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_{x1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_{x2} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & A_{xm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{x1}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & i_{x2}^2 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & i_{xm}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{x1} \\ \mu_{x2} \\ \vdots \\ \mu_{xm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

令下线圈电流为线性,则可以通过 PID 控制算法计算出来,并根据式(6)推导出上线圈的电流平方向量为

$$\begin{bmatrix} i_{s1}^2 \\ i_{s2}^2 \\ \vdots \\ i_{sm}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{s1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_{s2} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & A_{sm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mu_{s1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mu_{s2} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \mu_{sm} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta F_2 \\ \vdots \\ \Delta F_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_{s1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_{s2} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & A_{sm} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{x1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_{x2} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & A_{xm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mu_{x1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mu_{x2} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \mu_{xm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{x1}^2 \\ i_{x2}^2 \\ \vdots \\ i_{xm}^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)中的 $\mu_{s1}, \cdots, \mu_{sm}, \mu_{x1}, \cdots, \mu_{xm}$ 为数字化非线性功放内数据表的内容,根据电磁铁芯材料 $B-H$ 曲线跟踪法^[14~15],由测试装置测得后,再制成规定的数据库,获得 $\mu_{s1}, \cdots, \mu_{sm}, \mu_{x1}, \cdots, \mu_{xm}$ 。这样,相当于把原非线性曲线分段处理,控制量可以用算式精确描述,控制器动态范围完全对称,有利于增加稳定域。

3.2 非线性功放的软件设计

非线性功放的软件结构分为反馈采样模块、辨识模块、算法分配模块、非线性补偿模块、输出模块等部分,其软件框图如图 4 所示。

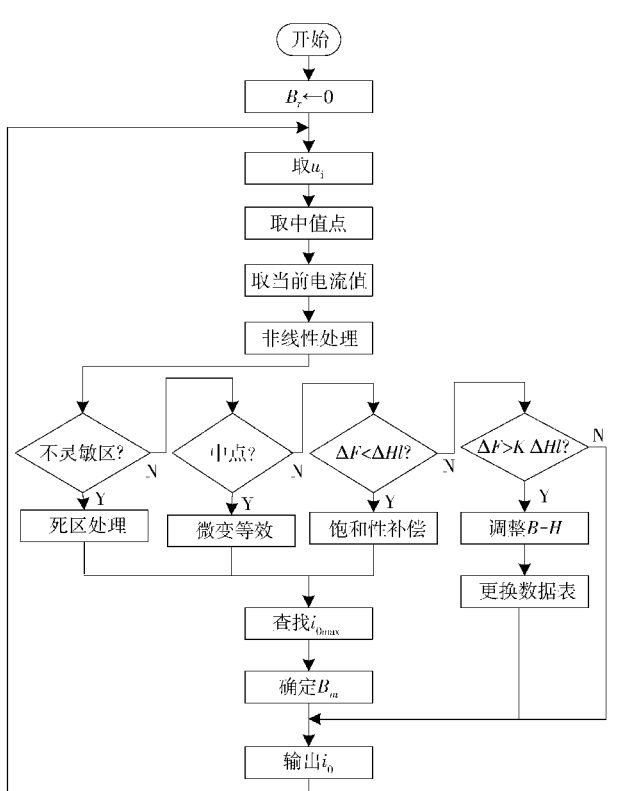


图 4 非线性功放的软件流程图

Fig. 4 Software diagram of nonlinear power amplifier

反馈采样模块是将输出电流的采样作为反馈运算的依据,电流的准确度在非线性功放中将决定磁场强度 H 。辨识模块是用剩磁 B_r 在磁滞回线族中确定出工作曲线。算法分配模块是根据工作状态选用相应的算法,也有几种算法的综合。非线性补偿模块是将所有的补偿运算综合成需要输出的值。

4 实验结果

用非线性功放在同一个实验台上作验证和测试。在测量前,首先用外部标准的传感器逐个标定电主轴内部磁轴承上的传感器(图 5),然后再从内部 5 个自由度传感器上取位移信号。

图 6 是用普通开关功放所测得的 4 个径向自由度的跳动曲线,图 7 是采用非线性功放后所测得的 4 个径向自由度的跳动曲线。

通过图 6 和图 7 对比,可以看到非线性功放应用后,主动磁悬浮系统的动态范围有了一定程度的提高,反映在系统的最高转速相比于应用非线性功放之前提高了近 20%。采用非线性功率放大后,用数字化的办法补偿了磁滞回路的非线性影响,对于

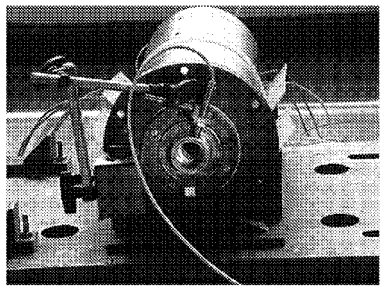


图5 电主轴径向跳动测试台

Fig. 5 Radial runout test of motorized spindle

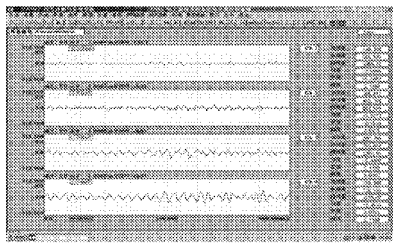


图6 非线性补偿前电主轴4个径向自由度静态位移信号

Fig. 6 Static displacement signal of four radial DOF before nonlinear compensation

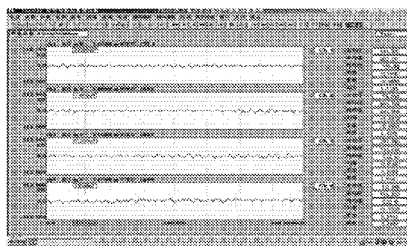


图7 非线性补偿后电主轴4个径向自由度静态位移信号

Fig. 7 Static displacement signal of four radial DOF after nonlinear compensation

5 结论

(1) 针对主动磁悬浮支承技术研究及实验中的非线性问题,分析了系统中非线性产生的原因及非线性对主动磁悬浮系统稳定域的影响。

(2) 设计了一种数字化非线性功放并应用于主动磁悬浮系统中,解决了主动磁悬浮系统中磁性材料的非线性对系统性能的影响。

(3) 对 20 kW 电主轴进行了实验,实验结果表明,数字化非线性功放的应用扩大了控制器的动态范围,提高了主动磁悬浮控制系统的稳定性。

控制器来讲,扩大了控制的动态范围,显然,稳定性得到明显改善,进一步提高了电主轴的最高转速。

参 考 文 献

- 周伟. 磁悬浮功率放大器的研究和设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
Zhou Wei. Study and design of magnetic levitation power amplifier[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- Keith F J, Maslen E H, Humphris R R, et al. Switching amplifier design for magnetic bearing [C] // Proceedings of the 11th International Symposium on Magnetic Bearings, Nara, Japan. 2008: 211 ~ 218.
- 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.
Chang Xiao, Xu Longxiang, Dong Jiyong. Digital power amplifier of active magnetic bearing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(20): 9 ~ 14. (in Chinese)
- Li Minfang, Xu Wenjun. The research and design of full digital magnetic levitating bearing control and amplifier system [C] // Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China, 2006: 6 279 ~ 6 282.
- 魏彤, 房建成. 磁悬浮控制力矩陀螺轴承的变工作点线性化自适应控制方法[J]. 机械工程学报, 2007, 43(6): 110 ~ 115.
Wei Tong, Fang Jiancheng. Adaptive control based on variant operating-point linearization magnetic bearings of MSCMG [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(6): 110 ~ 115. (in Chinese)
- Zhang Jiansheng. Magnetic bearing intelligent control systematic design methods [C] // Proceedings of International Symposium on Computational Intelligence and Industrial Applications, Haikou, China, 2008: 167 ~ 170.
- Yang F Y, Zhang W. Problems on homoclinic tangency in a rotor-active magnetic bearing system [C] // Proceedings of the 3rd International Conference on Dynamics, Vibration and Control, 2011.
- 周丹, 祝长生. 一种电磁轴承用三电平 PWM 开关功率放大器的失效机制[J]. 中国电机工程, 2010, 30(36): 103 ~ 110.
Zhou Dan, Zhu Changsheng. Failure mechanism of one kind of three-level PWM switching power amplifier for active magnetic bearings [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(36): 103 ~ 110. (in Chinese)
- 杨韶, 曾庆万. 解决五自由度磁悬浮轴承耦合效应的试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2009, 22(2): 46 ~ 49.
Yang Shao, Zeng Qingwan. Experimental study on the coupling effect of the magnetic bearing with five dimensional freedom [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2009, 22(2): 46 ~ 49. (in Chinese)
- 齐斌, 戴利明, 周海波, 等. 精密磁浮运动系统电磁力的非线性建模分析[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2009, 30(1): 22 ~ 26.
Qi Bin, Dai Liming, Zhou Haibo, et al. Nonlinear modeling and analysis of magnetic force in precision magnetic levitation system [J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 2009, 30(1): 22 ~ 26. (in Chinese)

11 Jan G Smits, Susan I Dalke, Thomas IL Cooney. The constituent equations of piezoelectric bimorphs[J] . Sensors and Actuators A: Physical, 1991, 28(1): 41 ~ 61.

12 Lin Shuyu. Study on the radial vibration of a new type of composite piezoelectric transducer[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 306(1):192 ~ 202.

13 郑炜,董景石,于洪洋,等. 单振子气体压电泵研究[J]. 农业机械学报,2012,43(2):226 ~ 229.
Zheng Wei, Dong Jingshi, Yu Hongyang, et al. Kipp oscillator gas piezoelectric pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(2):226 ~ 229. (in Chinese)

14 詹启贤. 自动机械设计[M]. 北京:中国轻工业出版社,1997:225 ~ 245.

15 汤瑞. 轻工机械设计[M]. 上海:同济大学出版社,1992:55 ~ 71.

16 尚久浩. 自动机械设计[M]. 北京:中国轻工业出版社,2002:231 ~ 258.



(上接第 272 页)

11 刘宗川. 铁磁性材料磁滞回线数学模型的研究[D]. 南宁:广西大学, 2007.
Liu Zongchuan. Research of the hysteresis model about ferromagnetic material [D]. Nanning: Guangxi University, 2007. (in Chinese)

12 Rashid M H. Power electronics[M]. USA: Prentice-Hall,Inc. , 1988: 20 ~ 150.

13 谷会东,赵鸿宾,赵雷. 电磁轴承功率放大器参数设计[J]. 机械工程学报,2006,42(2):208 ~ 211.
Gu Huidong, Zhao Hongbin, Zhao Lei. Design of active magnetic bearing's power amplifier[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2006,42(2):208 ~ 211. (in Chinese)

14 余宇翔,胡业发. 磁悬浮主轴数字功率放大器的设计研究[J]. 武汉理工大学学报, 2005,27(5):230 ~ 233.
Yu Yuxiang, Hu Yefa. Research and design of digital power amplifier for magnetic levitating bearing system[J]. Journal of WUT,2005,27(5):230 ~ 233. (in Chinese)

15 张建生. 磁悬浮支承系统中数控技术及功率放大器的应用研究[D]. 上海:上海大学,2006.
Zhang Jiansheng. Study and applications on digital control technology and power amplifier in magnetic levitation support system [D]. Shanghai:Shanghai University,2006. (in Chinese)