文章编号：0258-8013 (2009) 15-0114-05　中图分类号：TM 352；TM 133.3　文献标志码：A　学科分类号：470·40

磁浮开关磁阻电机悬浮力的反馈线性化 PID 控制

王喜莲[1]，葛宝明[1]，赵楠[2]

(1. 北京交通大学电气工程学院，北京市 海淀区 100044;
2. 北京航天万源煤化工工程技术有限公司，北京市 大兴区 100176)

Axial Suspending Feedback Linearization PID Control for Magnetic Suspending Switched Reluctance Motor

WANG Xi-lian[1], GE Bao-ming[1], ZHAO Nan[2]

(1. Electrical Engineering College, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China;
2. Beijng Aerospace Wan Yuan Coal Chemical Engineering Technology Co. Ltd, Daxing District, Beijing 100176, China)

ABSTRACT: An axial suspending control strategy of magnetic suspending switched reluctance motor was proposed. The axial force mathematical model of magnetic suspending switched reluctance motor was analyzed. Aiming at serious nonlinear characteristic of suspending force, the double closed loops-based axial suspending force controller was designed. The complicated nonlinear object was transformed into a simple linear system using the feedback linearization control strategy. Furthermore, the PID was combined with the feedback linearization strategy to fulfill an accurate displacement tracking control. And the inner current closed-loop forced the actual winding current to follow the expected current. Simulation results show that the rotor displacement can quickly follow the given displacement under conditions of no-load, under-load and even a sudden load. Experimental results demonstrate the correctness and availability of the scheme.

KEY WORDS: magnetic suspending; switched reluctance motor; feedback linearization; PID

摘要：推导磁浮开关磁阻电机轴向悬浮力数学模型。针对悬浮力控制的严重非线性，设计双环控制的轴向悬浮力控制器。反馈线性化控制将复杂的非线性对象转变为简单的线性控制系统，结合PID控制实现精确的位移跟踪，电流内环则实现了绕组实际电流对期望电流的跟踪控制。仿真与实验测试了系统在空载、负载、突加负载时的位移跟踪性能，验证了所提出控制方法的可行性及有效性。

关键词：磁悬浮；开关磁阻电机；反馈线性化；比例积分微分

基金项目：教育部科学技术研究重点项目(2004104051)；高等学校博士学科点专项基金项目(20060004027)。

Key Project Supported by the Ministry of Education in China (106052).

0　引言

开关磁阻电机(switched reluctance motor，SRM)因其诸多优良特性受到世界各国的广泛研究及应用，然而在高速领域的应用同样受到了机械轴承磨损问题的制约。磁浮轴承代替机械轴承有效克服了机械轴承的缺点，无需机械接触、动力损失少、支撑力可控，因而倍受工业界重视。悬浮力严重非线性的磁浮SRM控制问题一直是国内外学者研究的重点，国外有学者分别用鲁棒控制、状态反馈、滑模结构、神经网络控制等方法[1-10]进行了稳定悬浮的理论研究及仿真分析；国内也有多所大学的学者在研究磁轴承，并取得了一定的理论和实验成果[11-15]，但目前仍主要处于理论研究阶段。磁浮开关磁阻电机径向和轴向力均具有强耦合、严重非线性的特点，其稳定悬浮是需要解决的关键问题[10]。目前对径向、轴向力的控制研究仍然存在模型局部线性化、难以稳定悬浮、实现困难等问题，这也是学者们努力的方向[16-19]。

反馈线性化的基本思想是用代数变换将一个非线性系统的动态特性变换成线性的动态特性，与通常线性化的不同在于反馈线性化是通过严格的状态变换与反馈来达到，而不是借助于动态特性的线性近似。本文在基于电磁理论推导出磁浮 SRM 轴向悬浮力的基础上，首先对非线性的磁浮 SRM 悬浮力系统进行反馈线性化，然后将线性控制理论中的经典方法 PID 控制应用到该非线性系统的控制中，设计控制方案，并通过仿真和实验验证了控制方案的可行性。

1　磁浮 SRM 悬浮力数学模型

1.1　磁浮 SRM 结构

12/8 极磁轴承 SRM 的结构如图 1 所示，分别有独立的径向和轴向悬浮控制机构。由于轴向和径向的悬浮原理相似，所以本文以轴向悬浮为例分析其悬浮控制。

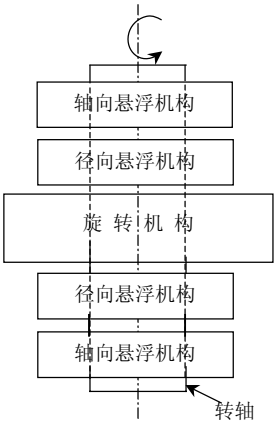


图 1　磁浮开关磁阻电机结构示意图

Fig. 1　Structure of magnetic suspending switched reluctance motor

1.2　轴向悬浮力数学模型

磁浮SRM轴向悬浮机构的俯视图如图 2 所示，其中阴影部分为导磁材料，与转子一起为悬浮磁力线提供闭合磁路，从而产生悬浮力。图中内侧导磁材料的面积为S_{z1}，外侧导磁材料的面积为S_{z2}。

图 3 为轴向悬浮机构的侧视图，图中绕组通以大小为i_z的控制电流，对应的线圈匝数为N_z，电压为U_z。内侧导磁材料(面积为S_{z1})对应的气隙磁感应强度为B_{z1}，磁场强度为H_{z1}，外侧导磁材料(面积为S_{z2})对应的气隙磁感应强度B_{z2}，磁场强度为H_{z2}，磁力线方向如图所示，L为整个磁回路的平均长度，转子与绕线磁极的距离为z。

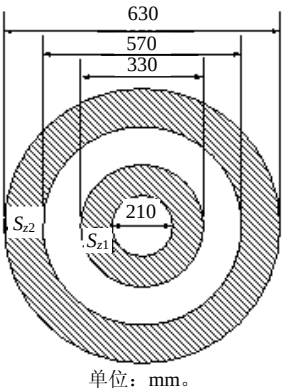


图 2　轴向悬浮机构的俯视剖面图

Fig. 2　Cross-section of axial suspension structure

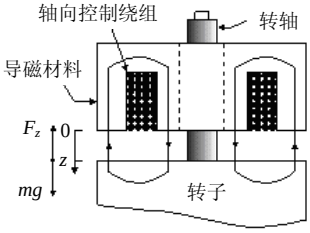


图 3　轴向悬浮的磁路示意图

Fig. 3　Magnetic circuit of axial suspension

当控制绕组中通以电流时，产生的磁通经内导磁材料、空气隙、转子、外导磁材料形成闭合回路，进而在磁极与转子间产生吸力；电机另一侧具有相同结构的轴向悬浮结构，同样可产生磁吸力，通过控制两侧的吸力即可实现控制轴向悬浮力的目的。

对模型进行分析时，做如下假设：忽略铁心的磁位降；空气隙中磁场均匀分布。由安培环路定律得：

$$B_{z1} = \mu_0 S_{z2} N_z i_z /[z(S_{z1} + S_{z2})] \tag{1}$$

$$B_{z2} = \mu_0 S_{z1} N_z i_z /[z(S_{z1} + S_{z2})] \tag{2}$$

则储存于气隙中的磁场能量为

$$W_z = \frac{1}{2} H_{z1} B_{z1} S_{z1} z + \frac{1}{2} H_{z2} B_{z2} S_{z2} z = \frac{z}{2}\left(\frac{B_{z1}^2}{\mu_0} S_{z1} + \frac{B_{z2}^2}{\mu_0} S_{z2}\right) \tag{3}$$

由此磁场力为

$$F_{z1} = \frac{\partial W_z}{\partial z} = \frac{1}{2}\left(\frac{B_{z1}^2}{\mu_0} S_{z1} + \frac{B_{z2}^2}{\mu_0} S_{z2}\right) = \frac{\mu_0 (S_{z1} S_{z2}^2 + S_{z1}^2 S_{z2}) N_z^2 i_z^2}{2 z^2 (S_{z1} + S_{z2})^2} \tag{4}$$

式(4)中的导磁面积、线圈匝数等物理量都由电机本体确定。设 $K_z = \dfrac{\mu_0 (S_{z1} S_{z2}^2 + S_{z1}^2 S_{z2}) N_z^2}{2(S_{z1} + S_{z2})^2}$，则式(4)可化简为

$$F_{z1} = K_z i_z^2 / z^2 \tag{5}$$

若电机轴向垂直于地面放置，则始终存在转子重力，因此，可利用转子重力作为恒定向下的动力，只控制向上的悬浮力。设平衡位置时气隙为z_0，则平衡位置处的电磁力为

$$F_{z0} = \frac{K_z i_{z0}^2}{z_0^2} = mg \tag{6}$$

综上，z 轴正方向设为垂直向下，则磁悬浮系统在 z 轴正方向产生的合力为

$$F_z = mg - F_{z1} = mg - K_z i_z^2 / z^2 \tag{7}$$

系统轴向悬浮的运动方程为

$$m\ddot{z} = F_z = mg - \frac{K_z i_z^2}{z^2} \tag{8}$$

2 反馈线性化 PID 控制及仿真

2.1 控制原理

将式(8)改写为

$$\ddot{z} = g - K_1(i_z^2 / z^2) \tag{9}$$

式中K_1=K_z/m。

取状态变量 $z_1 = z_{\mathrm{ref}} - z$， $z_2 = \dot{z}_1 = -\dot{z}$，得轴向悬浮系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = -\ddot{z} = K_1(i_z^2 / z^2) - g = K_1[i_z^2 /(z_{\mathrm{ref}} - z_1)^2] - g \end{cases} \tag{10}$$

式中z_{ref}为给定参考位移。

应用反馈线性化，定义：

$$i_z^2 = [(z_{\mathrm{ref}} - z_1)^2 / K_1]v \tag{11}$$

式中 v 为待设计的等效输入。于是，式(10)所示的非线性系统可变成线性的输入–输出状态关系：

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = v - g \end{cases} \tag{12}$$

由于新的动态系统是线性和能控的，可采用线性状态反馈控制律对极点任意进行配置。本文选择 PID 控制，即令：

$$v = k_{\mathrm{P}} z_1 + k_I \int z_1 \mathrm{d}t + k_{\mathrm{D}} \dot{z}_1 \tag{13}$$

将式(13)代入控制律式(11)，可得与此控制律相应的原控制输入：

$$i_z^2 = \frac{(z_{\mathrm{ref}} - z_1)^2}{K_1} v = \frac{(z_{\mathrm{ref}} - z_1)^2}{K_1}(k_{\mathrm{P}} z_1 + k_{\mathrm{I}} \int z_1 \mathrm{d}t + k_{\mathrm{D}} \dot{z}_1) \tag{14}$$

即

$$i_z = (z_{\mathrm{ref}} - z_1)\sqrt{(k_{\mathrm{P}} z_1 + k_I \int z_1 \mathrm{d}t + k_{\mathrm{D}} \dot{z}_1) / K_1} \tag{15}$$

式中i_z即为电流内环的参考量。

2.2 仿真分析

基于 2.1 节的控制原理，建立的轴向悬浮控制系统如图 4 所示。轴向悬浮系统为双环控制，其中外环为位移环，采用反馈线性化PID控制；内环为电流环，采用PI控制[20]。

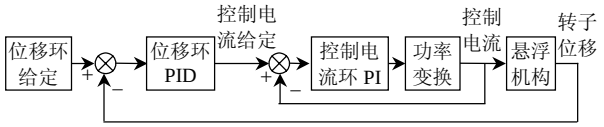


图 4 轴向悬浮控制图

Fig. 4 Control diagram of axial suspension

利用Matlab中的Simulink建立仿真模型，其相关参数为：m=11.5 kg，g=9.8 m/s^2，K=1.53 125×10^{-9} m^{3}A^2/s^2。设轴向位移和力的正方向均为竖直向下，转子与悬浮装置距离为零时，位移为零。仿真中转子的初始位置为 0.2 mm，令转子由 0.2 mm的位置向上悬浮。图 5 为给定位移为 0.1 mm时，轴向位移跟踪给定的仿真结果。

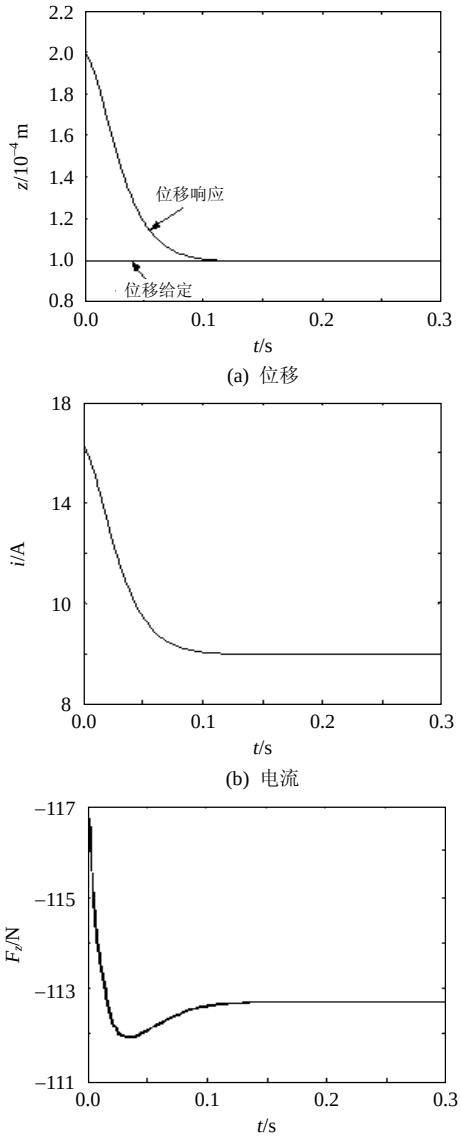
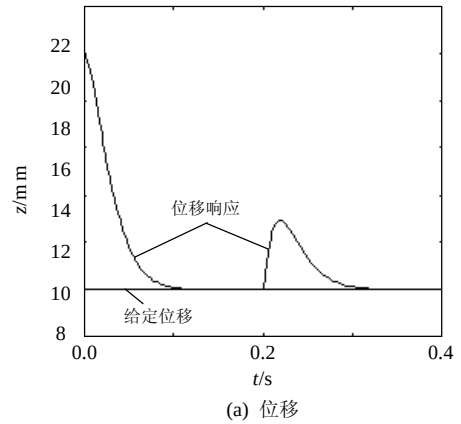
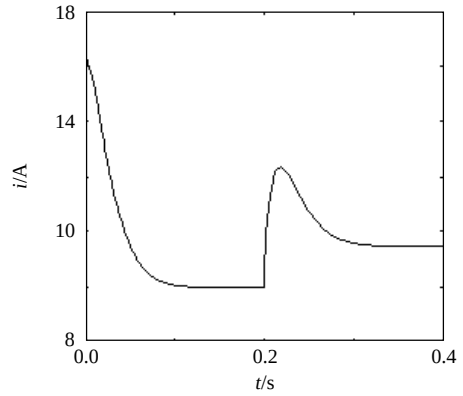


图 5 给定位移为 0.1 mm时位移、电流、电磁力响应曲线

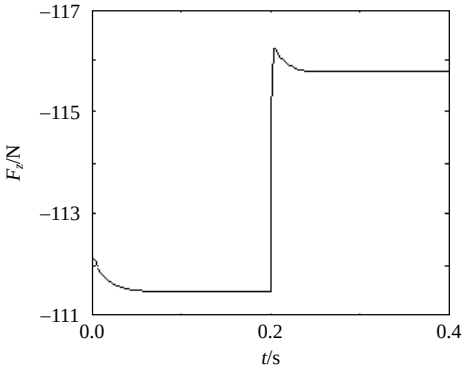
Fig. 5 Displacement, current, electric magnetic force curve of 0.1 mm preset displacement

图 6 为悬浮系统的带负载仿真结果，悬浮位移





(b) 电流



(c) 电磁力

图 6　加向下负载的位移、电流、电磁力响应曲线

Fig. 6　Displacement, current, electric magnetic force curve under load

给定为 0.1 mm，在 0.2 s时，加入一个 5.7 kg重的向下的负载。可见，加入向下的负载后，转子有一个向下的位移波动，但又在很短的时间内恢复到给定位移。

3　实验结果及分析

基于 2 节的轴向悬浮控制方案进行实验研究，电流环采用PI控制，位移环采用反馈线性化PID控制。图 7 为在转子上增加 4.2 kg重物后，转子轴向起浮和稳定悬浮的实验波形。图中上面曲线是轴向悬浮绕组电流波形，稳态时绕组电流是 9.5 A；下面曲线是位移传感器输出波形，实验中转子的位移给定值设为 0.11 mm。图 8 为悬浮稳定后，突然减去 4.2 kg重物的实验波形，负载发生变化，转子位置仍然可以较短的时间跟踪给定值。

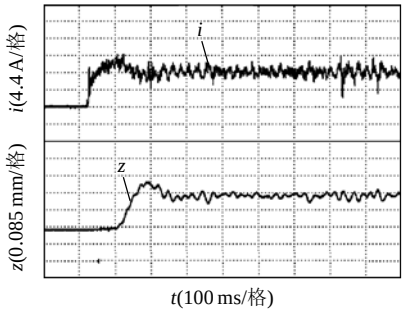


图 7　加负载时转子轴向稳定悬浮的实验波形

Fig. 7　Experimental waveform of axial suspension under load

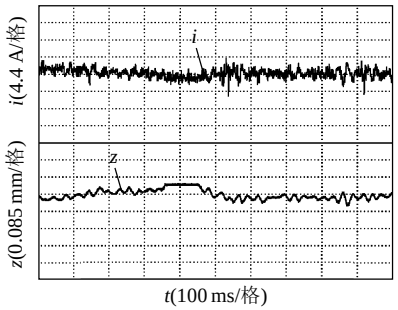


图 8　转子轴向稳定悬浮后减负载时的实验波形

Fig. 8　Experimental waveform of axial suspension removing load

由实验结果可以看出，反馈线性化 PID 控制的轴向悬浮系统可有效地跟踪给定位移，且响应速度快、稳定性好；同时系统在突加负载的情况下，能较快地恢复到给定位移，具有一定的鲁棒性。

4　结论

本文提出的磁浮开关磁阻电机反馈线性化 PID 控制方案，实现了轴向力的稳定悬浮控制，对系统在空载和负载情况的仿真和实验结果均验证了该控制方案的可行性，系统具有一定的鲁棒性。磁浮 SRM 轴向、径向悬浮力都是严重非线性系统，其控制有一定的相似性，该控制方案同样可以用于径向悬浮力控制及其它非线性系统。本文提出的控制方案为进一步研究磁悬浮 SRM 的径向力和旋转力控制提供了基础。

参考文献

[1] Smith R D，Weldon W F．Nonlinear control of a rigid rotor magnetic bearing system：modeling and simulation with full state feedback [J]．IEEE Transactions on Magnetics，1995，31(2)：973-980．

[2] Duan Guangren，Wu Zhanyuan，Bingham C．Robust magnetic bearing control using stabilizing dynamical compensators[J]．IEEE Transactions on Industry Applications，2000，36(6)：1654-1660．

[3] Rundell A E，Drakunov S V，Decarlo R A．A sliding mode observer and controller for stabilization of rotational motion of a vertical shaft magnetic bearing[J]．IEEE Transactions on Control Systems Technology，1996，4(5)：598-608．

[4] Jin T J，Lee T T．Control of magnetic bearing systems via the Chebyshev polynomial-based unified model (CPBUM) neural network[J]．IEEE Transactions on Systems，Man，and Cybernetics：Part B，2000，30(1)：85-92

[5] Chin T L，Chong P J．GA-based fuzzy reinforcement learning for control of a magnetic bearing system[J]．IEEE Transactions on Systems，Man，and Cybernetics：Part B，2000，30(2)：276-289．

[6] Chen Min，Knospe C R．Feedback linearization of active magnetic bearings：current-mode implementation[J]．IEEE/ASME Transactions on Mechatronics，2005，10(6)：632-639．

[7] Matsumura F，Namerikawa T，Hagiwara K，et al．Application of gain scheduled H_∞ robust controllers to a magnetic bearing[J]．IEEE Transactions on Control Systems Technology，1996，4(5)：484-493．

[8] Sahinkaya M N，Abulrub a H G，et al．Multiple sliding and rolling contact dynamics for a flexible rotor/magnetic bearing system [J]．IEEE/ASME Transactions on Mechatronics，2007，12(2)：179-189．

[9] Franco A L D，Bourles H．Robust nonlinear control associating robust feedback linearization and H_∞ control[J]．IEEE Transactions on Control Systems Technology，2006，51(7)：1200-1207．

[10] 范冬，杨艳，邓智泉，等．无轴承高速开关磁阻电机设计中的关键问题[J]．电机与控制学报，2006，10(6)：547-552．
Fan Dong，Yang Yan，Deng Zhiquan，et al．The key technology on designing a high-speed bearingless switched reluctance motor [J]．Electric Machines and Control，2006，10(6)：547-552(in Chinese)．

[11] 曹鑫，邓智泉，杨钢，等．一种无轴承开关磁阻电机独立控制策略[J]．中国电机工程学报，2008，28(24)：94-100．
Cao Xin，Deng Zhiquan，Yang Gang，et al．An independent control scheme of bearingless switched reluctance motors[J]．Proceedings of the CSEE，2008，28(24)：94-100(in Chinese)．

[12] 陈佳驹，成秋良，潘伟，等．无轴承电机轴向混合磁轴承自抗扰控制[J]．电机与控制学报，2008，12(4)：365-369．
Chen Jiaju，Cheng Qiuliang，Pan Wei，et al．Active disturbance rejection control for axial hybrid magnetic bearings of bearingless motors[J]．Electric Machines and Control，2008，12(4)：365-369(in Chinese)．

[13] 王秋蓉，葛宝明．无轴承开关磁阻电机磁场及力特性的分析[J]．电机与控制学报，2007，11(3)：217-220．
Wang Qiurong，Ge Baoming．Analysis of magnetic field and force characteristics of bearingless switched reluctance motor[J]．Electric Machines and Control，2007，11(3)：217-220(in Chinese)．

[14] 王宝国，王风翔．磁悬浮无轴承电机悬浮力绕组励磁及控制方式分[J]．中国电机工程学报，2002，22(5)：105-108．
Wang Baoguo，Wang Fengxiang．Excitation and control analysis of levitation force winding for magnetic suspension bearingless motors [J]．Proceedings of the CSEE，2002，22(5)：105-108(in Chinese)．

[15] 张亮，孙玉坤．基于微分几何的磁悬浮开关磁阻电机径向力的变结构控制[J]．中国电机工程学报，2006，26(19)：121-126．
Zhang Liang，Sun Yukun．Variable structure control of bearingless switched reluctance motors based on differential geometry [J]．Proceedings of the CSEE，2006，26(19)：121-126(in Chinese)．

[16] Hijikata K，Kobayashi S，Takemoto M，et al．Basic characteristics of an active thrust magnetic bearing with a cylindrical rotor core [J]．IEEE Transactions on Magnetics，2008，44(11)：4167-4170．

[17] Yamada T，Nakano Y，Asama J，et al．Outer rotor consequent-pole bearingless motor with improved start-Upcharacteristics[J]．IEEE Transactions on Magnetics，2008，44(11)：4273-4276．

[18] Beizama A M，Echeverria J M，Martinez-Iturralde M，et al．Comparison between pole-placement control and sliding mode control for 3-pole radial magnetic bearings[C]．International Symposium on Power Electronics，Electrical Drives，Automation and Motion，Ischia，Italy，2008．

[19] Budig P K．Magnetic bearings with DC bias：design and optimum material choice[C]．International Symposium on Power Electronics，Electrical Drives，Automation and Motion，Ischia，Italy，2008．

[20] 葛宝明，赵楠，de Almeida A T，等．横向磁场直线开关磁阻电机及其控制系统[J]．中国电机工程学报，2007，27(33)：22-28．
Ge Baoming，Zhao Nan，de Almeida A T，et al．Transverse flux linear switched reluctance motor and its control system[J]．Proceedings of the CSEE，2007，27(33)：22-28(in Chinese)．

王喜莲

收稿日期：2009-04-21。

作者简介：

王喜莲(1974—)，女，博士研究生，讲师，主要研究方向为电机及其控制、电机动态参数测试，xlwang1@bjtu.edu.cn；

葛宝明(1971—)，男，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为电机及其控制、控制理论与应用等。

(编辑 张玉荣)