

无轴承无刷直流电机悬浮力控制研究^{*}

陶 涛, 花良浩, 陈俊金
(扬州工业职业技术学院, 江苏 扬州 225127)

摘 要: 在分析无轴承无刷直流电机径向悬浮力产生机理的基础上, 建立了电机径向悬浮力的数学模型, 并设计了无轴承无刷直流电机径向悬浮力控制的控制系统。对所设计的控制系统使用 MATLAB 工具进行建模与仿真。最后, 在试验样机上进行了试验验证。结果表明, 无轴承无刷直流电机能够稳定运行, 且转子能够稳定悬浮于中心。

关键词: 无轴承无刷直流电机; 悬浮力; 模型; 控制

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)06-0017-04

Research on Bearingless Brushless DC Motor Suspension Force Control^{*}

TAO Tao, HUA Lianghao, CHEN Junjin
(Yangzhou Polytechnic Institute, Yangzhou 225127, China)

Abstract: The suspension force principle of the bearingless brushless DC motor was analyzed, and the mathematical model of suspension force was deduced. The suspension force control system was designed. By using MATLAB software, the control system model had been established and the simulation experiments had been completed. Finally, the experimental prototype was designed. The experimental results showed that the motor could stable operation, and the rotor could be stable suspended in the center.

Key words: bearingless brushless DC motor; suspension force; model; control system

0 引 言

无轴承无刷直流电机具有无轴承电机自身优点(如无需润滑、无摩擦磨损、无噪声、转速高、寿命长等)。相比单纯磁轴承支承的无刷直流电机, 克服了其轴向空间长、电机体积大、系统结构复杂、造价昂贵等不足^[1-2]。

本文以 12 槽无轴承无刷直流电机为例, 阐述了径向悬浮力产生的原理, 推导了径向悬浮力数学模型。利用 MATLAB/Simulink 软件建立了悬浮力控制系统模型。从仿真结果可以看出, 所提出的悬浮力控制系统是有效的, 转子能够稳定悬浮。

1 无轴承无刷直流电机径向悬浮力产生的机理

无轴承无刷直流电机的横截面如图 1 所示。

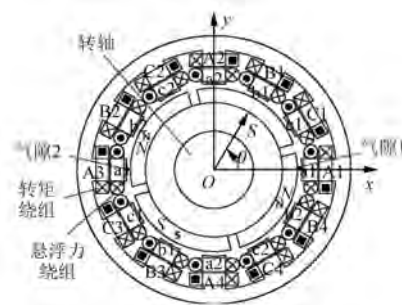


图 1 无轴承无刷直流电机本体结构图

定子上集中缠绕着两套绕组, 分别为: 转矩绕组和悬浮力绕组; 永磁体以表贴式的形式装置在转子表面。A 相转矩绕组由 A1、A2、A3、A4 串联构成, B 相和 C 相同理。a1、a2、b1、b2、c1、c2 分别构成 a 套、b 套和 c 套悬浮力绕组^[3]。

无轴承无刷直流电机转矩产生的原理与传统无刷直流电机相同。在转矩绕组方面, 当转子角

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51575244); 江苏省青蓝工程项目(2017); 扬州市自然科学基金项目(2017108)

作者简介: 陶 涛(1988—), 男, 博士, 研究方向为无轴承电机智能控制技术。

位置落在 $\theta=30^\circ$ 时,对 B 相转矩绕组和 C 相转矩绕组通电,产生电磁转矩,进而电机转子发生旋转;在悬浮力绕组方面,悬浮力绕组 a 套通电产生悬浮力,进而电机转子悬浮。若对 a1 绕组通电,电流方向如图 1 所示,会增大气隙 1 处周围的气隙磁通密度,同时会减小气隙 2 处周围的气隙磁通密度,因此转子周围均匀的气隙磁通密度发生改变,进而产生悬浮力,方向沿 x 轴正方向;同理可得,对绕组 a2 通电,可以产生沿 y 轴方向的悬浮力。综上可得,通过对 a 套悬浮力绕组通电电流的调整,能够产生在 xoy 平面内任意方向的可控悬浮力。各套悬浮力绕组通电时产生的相位如图 2 所示^[4]。

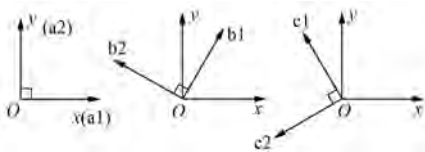


图 2 悬浮力产生的相位

2 无轴承无刷直流电机径向悬浮力数学模型

由于永磁体和绕组通电的作用,转子会受到沿转子表面切线方向的切向力和沿 x 、 y 轴方向的径向力。转子旋转主要靠切向力提供,而转子的悬浮则靠径向力提供。径向力又可以分为不平衡磁拉力和电磁力两种。定子铁心和永磁体产生不平衡磁拉力,当转子不在中心时,产生的不平衡磁拉力的方向沿气隙长度减小的方向。对悬浮力绕组通电能够产生电磁力,目的是抵消因转子偏心造成的不平衡磁拉力,使转子能够悬浮于空中。因此由悬浮力绕组通电产生的电磁力与不平衡磁拉力相互作用,使转子能够稳定悬浮^[5]。

当转子偏心时,磁力合力发生变化,不再为零,产生了不平衡磁拉力,方向为沿气隙长度减小的方向。当转子沿水平方向偏心时,因转子偏心产生的不平衡磁拉力为

$$F_x = \frac{6B_r^2 l_m^2 S}{\mu_0 (l_m + g)^3} x \quad (1)$$

式中: B_r ——剩磁密度^[6];

l_m ——永磁体厚度;

S ——磁路的有效截面积;

μ_0 ——真空磁导率;

g ——平均气隙长度。

当转子发生偏心时,对悬浮力绕组通可控电流,由电流产生的电磁力可以抵消转子受到的不平衡磁拉力,使得转子所受合力方向能够一直沿着定子中心方向,则悬浮力绕组通电产生的电磁力。

悬浮力绕组 a_{11} 通电时的电磁力为

$$F_{a11} = \frac{N^2 \mu_0 S (I_m / N + i_a)^2}{2(l_m + g)^2} \quad (2)$$

根据对电磁力 F_{a11} 的分析推导过程可得悬浮力绕组 a_{12} 通电时产生的电磁力为

$$F_{a12} = \frac{N^2 \mu_0 S (I_m / N - i_a)^2}{2(l_m + g)^2} \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可得悬浮力绕组 a_1 对转子的电磁力合力为

$$F_{a1} = F_{a11} - F_{a12} = \frac{2SB_r l_m N}{(l_m + g)^2} i_a \quad (4)$$

式中: N ——悬浮力绕组匝数;

i_a ——悬浮力绕组通入的电流。

根据式(1)和式(4)分别对不平衡磁拉力及悬浮力绕组通电产生电磁力的分析,可知转子沿 x 轴单自由度径向悬浮力合力为

$$F_{sa1} = F_{a1} + F_x = \frac{2SB_r l_m N}{(l_m + g)^2} i_a + \frac{6B_r^2 l_m^2 S}{\mu_0 (l_m + g)^3} x \quad (5)$$

3 无轴承无刷直流电机悬浮力控制系统设计

无轴承无刷直流电机的控制系统原理图如图 3 所示,包括转矩子系统和悬浮力子系统两个模块。其中,转矩子系统与传统的无刷直流电机相同,采用两两导通的全桥式功率驱动方式进行驱动控制,在调速控制方面采用以 PID 控制为基础的双闭环调速控制系统,内环为电流环(转矩环),外环为速度环(电压环)。无轴承无刷直流电机正常运行时,利用 PWM 调制方法使电枢端的输入电压发生改变,从而控制电机的速度^[7]。

径向悬浮力控制系统也是无轴承无刷直流电机运行中的重要环节。本文根据第 2 节推导的公式中的电流刚度系数和位移刚度系数,在传统的

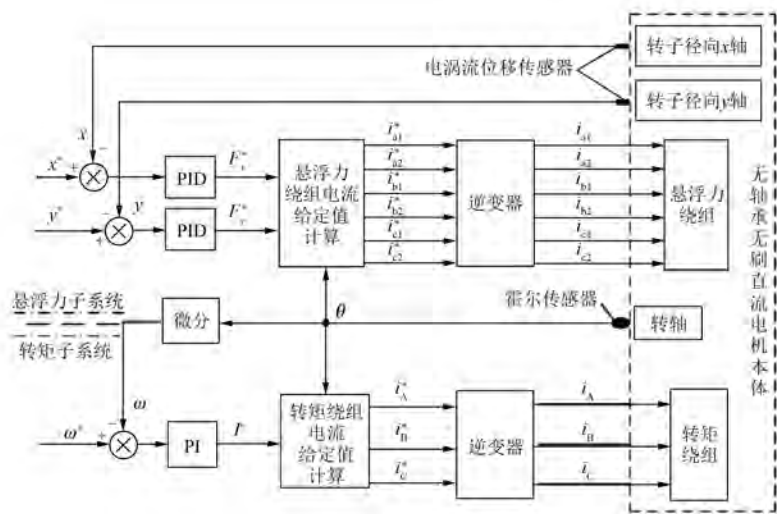


图3 无轴承无刷直流电机控制系统原理图

悬浮力控制系统上进行改进和优化。将电涡流位移传感器分别安装在无轴承无刷直流电机转子的径向 x 轴和径向 y 轴两端,通过电涡流位移传感器,可以实时检测电机转子在 x 轴方向和 y 轴方向的位移,分别得到在 x 、 y 轴方向的参考位移 x^* 、 y^* 与实时检测位移的差值,通过 PID 控制器能够分别求得无轴承无刷直流电机转子在 x 轴方向的给定悬浮力 F_x^* 及在 y 轴方向的给定悬浮力 F_y^* 。将悬浮力 F_x^* 和 F_y^* 输至悬浮力绕组电流给定值计算模块中,得到三相悬浮力绕组给定电流 i_{a1}^* 、 i_{a2}^* 、 i_{b1}^* 、 i_{b2}^* 、 i_{c1}^* 、 i_{c2}^* ,最后经逆变器得到悬浮力绕组电流 i_{a1} 、 i_{a2} 、 i_{b1} 、 i_{b2} 、 i_{c1} 、 i_{c2} [8-10]。

通过 MATLAB 软件中 Simulink 模块,以转矩子系统和悬浮力子系统为基础,搭建无轴承无刷直流电机控制系统模型。无轴承无刷直流电机样机参数如表 1 所示。

表 1 电机样机参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
电阻 R_m/Ω	1	反电动势系数 k_e	0.4
自感 L/H	0.018	电阻 R_s/Ω	1
互感 L_m/H	0.005	自感 L_s/H	0.016
极对数 p_1	2	转子质量 m/g	1 000
转动惯量 $J/(kg\cdot m^2)$	0.006		

电机以空载起动,在 0.03 s 时,施加负载转矩 1 N·m;0.09 s 时,转矩跳变到 4 N·m;0.15 s 时,转

矩跳变到 2 N·m。图 4 为无轴承无刷直流电机仿真运行状态曲线,从图 4(a)可以看出,转速的超调量小,转速基本不受负载的变化而变化;从图 4(b)可以看出,转矩波动较小,转矩响应快速;从图 4(c)、图 4(d)可知,转子位置收敛于电机中心位置,转子实现了稳定悬浮。

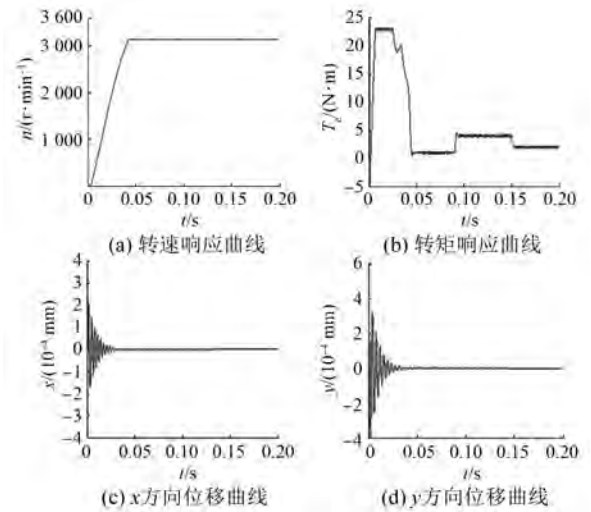


图4 仿真运行状态曲线

4 样机试验

本文根据上述控制系统设计了无轴承无刷直流电机的数字控制系统,进行了试验验证。该系统由 TMS320F2812 DSP、接口电路、功率板、电涡流传感器、光电编码器以及电机本体等组成。无轴承无刷直流电机的转速曲线如图 5 所示,电机

经过 0.1 s 后可以达到额定转速 1 600 r/min, 电机在转速响应方面性能较好, 且转速较为稳定。

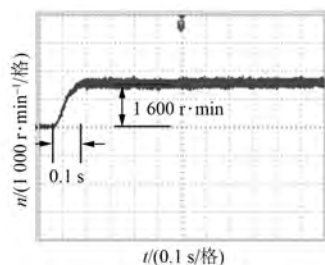


图5 电机运行转速曲线

图6是转子质心位置图。从图6中可以看出, 转子在没有机械支承的情况下可以在中心稳定悬浮。图6也为直角坐标系中无轴承无刷直流电机转子偏心位移轨迹。从图6中可以看出电机转子 x 轴正方向最大偏移位移约为 $300\ \mu\text{m}$, x 轴负方向最大偏移位移约为 $220\ \mu\text{m}$, y 轴正方向最大偏移位移约为 $200\ \mu\text{m}$, y 轴负方向最大偏移位移约为 $290\ \mu\text{m}$, 转子位移基本在 $200\sim 300\ \mu\text{m}$ 波动。由此可见, 与图7的转子在径向方向位移曲线波动一致, 波动范围较小, 可以看成转子稳定悬浮。

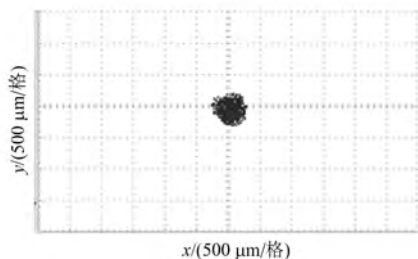


图6 转子质心位置

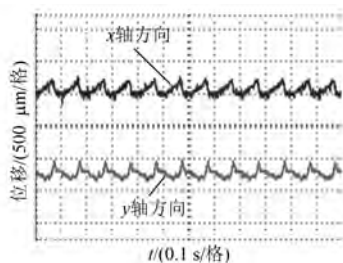


图7 转子径向位移曲线

5 结 语

无轴承无刷直流电机是一种新型的高精度、高性能电机, 作为驱动电机具有潜在的应用价值。

本文针对 12 槽的无轴承无刷直流电机, 建立了径向悬浮力数学模型, 设计了无轴承无刷直流电机悬浮力控制系统。仿真表明, 悬浮力控制系统能够使转子在没有机械接触的情况下稳定悬浮, 运行状态良好, 位移响应较快, 能够快速使得电机转子达到悬浮状态。最后, 以样机为对象进行了转速及悬浮测试。经试验表明, 无轴承无刷直流电机可以在稳定运行的情况下悬浮于中心, 验证了悬浮力控制系统的有效性。

【参考文献】

- [1] 夏长亮. 无刷直流电机控制系统[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 贾磊, 朱焜秋, 徐亚超. 无轴承无刷直流电动机原理、控制及应用综述[J]. 微电机, 2009, 42(4): 62-65.
- [3] OOSHIMA M. Winding arrangement to increase suspension force in bearingless motors with brushless DC structure[C] // The proceedings of 33rd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, Taipei: IEEE, 2007: 181-186.
- [4] OOSHIMA M. Analyses of suspension force in a bearingless motors with brushless DC structure[C] // The Proceedings of 2006 International Conference on Electrical Machines and Systems, Nagasaki, 2006.
- [5] 陈雷刚, 朱焜秋. 无轴承无刷直流电机径向悬浮力精确数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(36): 75-81.
- [6] 王冲. 基于飞轮储能系统的无轴承无刷直流电动机内模控制[J]. 微特电机, 2015, 43(12): 72-76.
- [7] OOSHIMA M. A magnetic suspension control strategy by 3-phase inverters in bearingless brushless DC motors[C] // Power & Energy Society General Meeting, IEEE, 2009: 1-5.
- [8] OOSHIMA M. Magnetic suspension characteristics of a bearingless brushless DC motor[C] // The Proceedings of Power and Energy Society General Meeting Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh: IEEE, 2008: 1-5.
- [9] OOSHIMA M, RAHMAN M A. Control strategy of magnetic suspension and performances of a bearingless BLDC motor[C] // The Proceedings of International Conference on Electric Machines & Drives, Niagara: IEEE, 2011: 71-76.

(下转第 33 页)

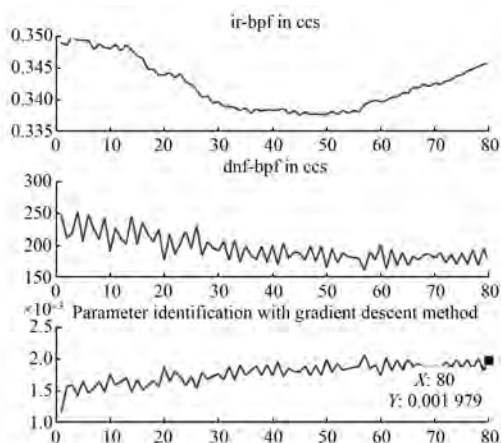


图 10 100% 负载工况下惯量辨识结果

较为理想,50% 稳定负载加载之后相对误差绝对值超过 15%;100% 额定负载加载之后,相对误差绝对值超过 30%。转动惯量辨识的结果,直接用于配置速度环控制器 PI 参数,实现控制器的参数自整定。以上辨识结果的识别误差虽各不相同,但皆在一个数量级之间,并且针对参数自整定而言,误差在可接受范围之内,对控制器的调节不会产生影响。

5 结 语

模型参考自适应辨识的主要思想就是以数字化搭建的包含前馈系数和反馈系数的可调参考模型针对实时系统实现在线重构,以两者输出的无差收敛作为辨识条件,达到对转动惯量的在线辨识。

针对电机控制中负载转矩会对转矩观测产生扰动的特殊性,加入全维观测器对扰动负载转矩进行观测,并基于重构系统,准确完成了在线对转动惯量和粘滞摩擦因数的辨识过程,基本消除了负载对辨识结果的影响,实现了速度环控制器的比例和积分系数参数自整定。这也为对粘滞摩擦力实现补偿控制提供了基础。

【参考文献】

- [1] 杨明,张扬,曹何金生,等.交流伺服系统控制器参数自整定及优化[J].电机与控制学报,2010,14(12): 29-34.
- [2] 李杰.伺服系统惯量识别及谐振抑制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [3] 刘辉.交流伺服系统及参数辨识算法研究[D].南京:南京航空航天大学,2005.
- [4] 杜帅,陈阳生.永磁同步电动机伺服系统转动惯量辨识[J].微特电机,2012,40(8): 7-10.
- [5] TUNGPATARATANAWONG S, OHISHI K, MIYAZAKI T. High performance robust motion control of industrial robot parameter identification based on resonant frequency [C] // Industrial Electronics Society,2004: 111-116.
- [6] 郑泽东,李永东,肖曦,等.永磁同步电机负载转矩观测器[J].电工技术学报,2010,25(2): 30-36.
- [7] SKOCZOWSKI S, DOMEK S, PIETRUSEWICZ K, et al. A method for improving the robustness of PID control[J].Industrial Electronics, IEEE Transactions on,2005,52(6): 1669-1676.

收稿日期: 2018 -01 -03

(上接第 20 页)

- [10] OOSHIMA M, TAKEUCHI C. Magnetic suspension performance of a bearingless brushless DC motor for small liquid pumps[J].IEEE Transactions on Industry

Applications,2011,47(1): 72-78.

收稿日期: 2017 -12 -04

中文核心期刊 中国科技核心期刊 中国学术期刊(光盘版)
 全国优秀科技期刊 华东优秀科技期刊
 中国科学引文数据库来源期刊 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊