

3 对极无轴承交替极薄片电机的理论与实现

廖启新, 王晓琳, 邓智泉, 仇志坚, 黄燕, 解超

(南京航空航天大学自动化学院电气工程系, 江苏省 南京市 210016)

Theory and Realization of 3 Pole Pairs Consequent-pole Bearingless Slice Motor

LIAO Qi-xin, WANG Xiao-lin, DENG Zhi-quan, QIU Zhi-jian, HUANG Yan, XIE Chao

(Department of Electrical Engineering, College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The levitation of the consequent-pole bearingless PM motor is decoupled with the rotation, so the control system is simplified dramatically. However, that the motor pole pair number is larger than 3 is required. And the great pole number limits the application of the motor, especially in the high speed field. To reduce the pole number, the 3 pole pairs consequent-pole bearingless PM motor is studied. The magnetic circuit analysis shows that an inherent suspension force pulse exists in the 3 pole pairs motor which can't be eliminated completely. And it can be derived that the pulse can be suppressed to an acceptable range by thickening the permanent magnet and shortening the gap length properly. The conclusion is verified by finite element simulations. Finally, a prototype is built and the stable suspension is achieved which prove the feasibility of 3 pole pair consequent-pole bearingless slice PM motor.

KEY WORDS: magnetic suspension; bearingless; consequent-pole; slice motor

摘要: 无轴承交替极永磁电机因其悬浮与旋转本质上完全解耦, 其控制系统得以极大简化, 但其前提条件是电机极对数必须 ≥ 4 。极对数过大限制了其应用范围, 特别是在高速场合。为减少极对数, 该文研究了一种3对极无轴承交替极永磁电机。通过磁路分析发现, 3对极电机中存在一固有的悬浮力脉动, 且该悬浮力脉动无法完全消除。分析该脉动的数学模型发现, 通过适当增加永磁体厚度、减小气隙的方法, 可以将悬浮力脉动控制在可接受的范围内, 采用有限元仿真对该结论进行了验证。通过实验, 实现了3对极原理样机的稳定悬浮, 证明了3对极无轴承交替极永磁电机的可行性。

关键词: 磁悬浮; 无轴承; 交替极; 薄片电机

基金项目: 国家自然科学基金项目(50507008)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50507008).

0 引言

近年来, 无轴承薄片电机在无轴承技术的发展和推动下越来越成熟, 其在超纯净驱动领域体现出的突出优点引起了业界的关注。该电机除了具有磁悬浮技术的无磨损、无润滑、无机械噪音等特点外, 还具有结构简单、可靠性高、轴向利用率高、定转子完全可隔离等特点, 在超纯净驱动领域极具应用优势, 采用这种电机制造的泵类产品, 在生物化学、医疗、半导体制造等对纯净性要求高的领域具有广泛的应用前景。目前瑞士、德国、日本、美国、新加坡均在大力扶植该项高新技术的研究^[1-11], 如最早开展该型电机研究的瑞士联邦工学院主要研究了表贴式永磁无轴承薄片电机^[2,5,12]; 而日本学者主要对悬浮旋转无耦合的无轴承薄片电机进行了研究, 其中一种结构即为交替极结构^[1,13-15]; 国内学者的研究主要集中于无轴承技术的基础性研究^[3-4,6-9], 对于无轴承薄片电机的研究正处于起步阶段^[10-11]。

以往的无轴承薄片电机都存在一个缺点, 即悬浮力与转矩都存在严重的耦合, 悬浮控制系统需要转子转角信号, 这不仅增加了系统的复杂度, 且转角信号的轻微误差将导致悬浮性能的下降。为克服这个缺点, 文献[13-14]提出了交替极无轴承永磁电机, 该电机的特点在于其转子上的永磁体极性相同, 而不似普通永磁电机中, 相邻永磁体极性相反, 在该电机中相邻永磁体之间为铁心凸极, 该铁心凸极在永磁体的磁化作用下, 呈现出与永磁体相反的极性, 从而构成铁极与永磁极交替出现的结构形式。文献[13-15]研究认为这种电机在极对数 ≥ 4 的情况下, 电机的悬浮力与转子转角本质上是无关的, 达到了悬浮与旋转的完全解耦, 故以往的研究中多

建议采用 4 对极的设计方案。

但是 4 对极结构极对数过多造成了电机设计和制造上的困难，并且限制了其应用范围，特别是在高速场合，极对数过多将导致对开关器件的频率要求过高和磁损增加，削弱了该电机在高速领域的优势。为了拓展该类型电机的应用领域，降低电机的极对数，十分必要。通过分析发现，在 1~2 对极的情况下，悬浮力不可控，难以实现悬浮。而在 3 对极的情况，悬浮力随转子转角脉动，与转子转角有一定的耦合，产生该脉动的原因是悬浮磁密与转子铁极相互作用，通过适当增加永磁体厚度、减小气隙的方法，从而减小悬浮磁密，最终可以达到减小悬浮力脉动的目的。通过这种方法可以将悬浮力脉动抑制到 10% 左右，样机的实验结果证明，通过适当的设计，3 对极无轴承交替极薄片电机可以实现稳定悬浮。采用该方法，电机的极对数减少到了 3 对极，简化了该电机的设计和制造，降低了对驱动器件的频率要求，拓展了该电机的应用范围。

1 悬浮原理

无轴承电机的一个共性是：利用电机中的原有驱动磁场为偏置磁场，外加一个悬浮磁场来实现悬浮，要产生可控的悬浮力，驱动磁场与悬浮磁场的极对数必须相差±1。交替极无轴承电机的原理与此略有不同，该电机同样利用电机中的驱动磁场为偏置磁场，但却并不必满足旋转和悬浮磁场极对数相差±1 的要求，如图 1 所示，图中实线表示永磁磁场，虚线表示悬浮磁场。从图中可以看出该电机的特点是：永磁体磁化方向都是相同的，相邻永磁之间的铁极在永磁体磁化作用下，呈现出与永磁体相反的极性，从而构成铁极与永磁极交替出现的结构。如果假设永磁体厚度足够厚以至于悬浮磁场的磁力线基本上都只经过铁极，那么可以认为作为悬浮的偏置磁场就是铁极下的磁场。而铁极下的磁场为一单极磁场，磁场是由外向内或由内向外，要产生悬浮力只需要外加一极对数为 1 的悬浮磁场即可。

加入 1 对极的悬浮磁场后，从图 1(a)中可以看出，左侧 2 个铁极处(深色阴影区域)的磁密因为悬浮磁场和永磁磁场的方向一致而得到增强；而右侧 2 个铁极处(浅色阴影区域)的磁密因为悬浮磁场和永磁磁场的方向相反而得到削弱；从而产生一个方向向左的磁拉力。同理如图 1(b)所示，可以产生一个方向向下的磁拉力^[14]。以上为 4 对极的基本原理，3 对极的基本原理同上。

在轴向和倾斜自由度上的悬浮，则是利用了电机自身的磁拉力来实现，如图 1(c)和(d)所示。

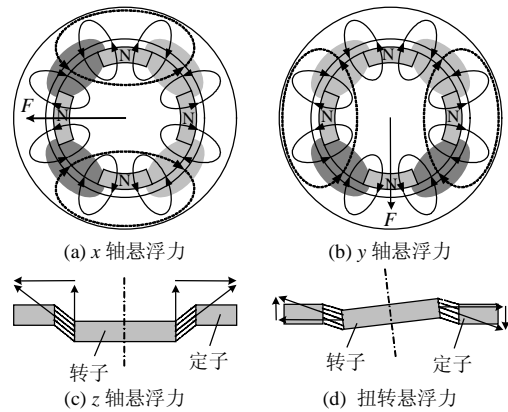


图 1 交替极无轴承永磁电机原理图

Fig. 1 Structure and principle of consequent-pole bearingless PM motor

2 悬浮力模型分析

由文献[12,14]的方法，可以推导出计及永磁极磁导的悬浮力公式，3 对极时的悬浮力公式为

$$\begin{cases} F_x = \frac{rl_x}{\mu_0} \{ 3(G_n \theta_n B_{pm} + G_m \theta_m B_{pm}) U_l \cos \theta_l - \\ 2[G_n^2 \sin(3\theta_n/2) - G_m^2 \sin(3\theta_m/2)] U_l U_t \cdot \\ \cos[3(\theta_r + \theta_t)] \cos \theta_l - \frac{1}{2} [G_n^2 \sin(3\theta_n/2) - \\ G_m^2 \sin(3\theta_m/2)] U_l^2 \cos(2\theta_l + 3\theta_r) \} \\ F_y = \frac{rl_x}{2\mu_0} \{ -3(G_n \theta_n B_{pm} + G_m \theta_m B_{pm}) U_l \sin \theta_l + \\ 2[G_n^2 \sin(3\theta_n/2) - G_m^2 \sin(3\theta_m/2)] U_l U_t \cdot \\ \cos[3(\theta_r + \theta_t)] \sin \theta_l - \frac{1}{2} [G_n^2 \sin(3\theta_n/2) - \\ G_m^2 \sin(3\theta_m/2)] U_l^2 \sin(2\theta_l + 3\theta_r) \} \end{cases} \quad (1)$$

4 对极及以上时的悬浮力公式为

$$\begin{cases} F_x = \frac{rl_x}{2\mu_0} \{ p(G_n \theta_n B_{pm} + G_m \theta_m B_{pm}) U_l \cos \theta_l - \\ 2[G_n^2 \sin(p\theta_n/2) - G_m^2 \sin(p\theta_m/2)] U_l U_t \cdot \\ \cos[p(\theta_r + \theta_t)] \cos \theta_l \} \\ F_y = \frac{rl_x}{2\mu_0} \{ -p(G_n \theta_n B_{pm} + G_m \theta_m B_{pm}) U_l \sin \theta_l + \\ 2[G_n^2 \sin(p\theta_n/2) - G_m^2 \sin(p\theta_m/2)] U_l U_t \cdot \\ \cos[p(\theta_r + \theta_t)] \sin \theta_l \} \end{cases} \quad (2)$$

其中，

$$G_n = \mu_0 / l_g \quad (3)$$

$$G_m = \mu_0 \mu_r / (l_m + \mu_r l_g) \quad (4)$$

$$B_{pm} = - \frac{\mu_0 \mu_r \theta_m H_c l_m}{\theta_n l_m + \mu_r \theta_n l_g + \mu_r \theta_m l_g} \quad (5)$$

$$B_{pm} = \frac{\mu_0 \mu_r \theta_n H_c l_m}{\theta_n l_m + \mu_r \theta_n l_g + \mu_r \theta_m l_g} \quad (6)$$

式中： r 为转子半径； l_x 为电机轴向长度； μ_r 为永磁体相对磁导率； θ_m 为永磁极弧度数； θ_n 为铁极极弧度数； $\theta_m + \theta_n = 2\pi/p$ ； l_g 为气隙宽； l_m 为永磁体厚度； U_f 为永磁磁势分布的幅值； U_l 为悬浮磁势分布的幅值； θ_l 为悬浮磁势的相位； θ_t 为转子的转角； U_t 为转矩磁势分布的幅值； θ_t 为转矩磁势的相位； p 为极对数。

当采用 $i_d=0$ 的控制策略时，式(1)、(2)中的 $\cos[p(\theta_t + \theta_l)]$ 为0。式(1)、式(2)进一步简化得

$$\begin{cases} F_x = kU_l \cos \theta_l + k_1 U_l^2 \cos(2\theta_l + 3\theta_t) \\ F_y = -kU_l \sin \theta_l + k_1 U_l^2 \sin(2\theta_l + 3\theta_t) \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} F_x = kU_l \cos \theta_l \\ F_y = -kU_l \sin \theta_l \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{式中: } k = \frac{r l_x}{2\mu_0} p(G_n \theta_n B_{pm} + G_m \theta_m B_{pm}) \quad (9)$$

$$k_1 = -\frac{r l_x}{4\mu_0} [G_n^2 \sin(3\theta_n/2) - G_m^2 \sin(3\theta_m/2)] \quad (10)$$

将各量代入式(9)、(10)，并设 $\theta_m = \theta_n = \pi/p$ 、 $\mu_r = 1$ 得

$$k = -\frac{\mu_0 \pi r l_x H_c l_m^2}{2l_g(l_m + l_g)(l_m + 2l_g)} \quad (11)$$

$$k_1 = -\frac{\mu_0 r l_x (l_m + l_g)^2 - l_g^2}{4 l_g^2 (l_m + l_g)^2} \quad (12)$$

对比3对极悬浮力式(7)与4对极及以上的悬浮力式(8)，可以看出3对极电机的悬浮力比4对极电机的悬浮力多出了一项悬浮磁势的平方项，该平方项引起了悬浮力随转子转角的3次脉动。分析式(9)~(12)，主要影响悬浮力脉动的电机参数为 l_m 、 l_g 。以产生相同大小的悬浮力为前提，分析 l_m 、 l_g 对悬浮力脉动的影响。

设在 x 方向产生 F_c 所需的总安匝数 U_l 为

$$U_l = F_c / k \quad (13)$$

将式(13)代入悬浮力脉动项，并将式(9)、(10)代入，得悬浮力脉动幅度 F_p ：

$$\begin{aligned} F_p &= k_1 U_l^2 = \frac{k_1}{k^2} F_c^2 = -\frac{(2l_g + l_m)^2 [(l_g + l_m)^2 - l_g^2]}{\pi \mu_0 H_c^2 l_x r^2 l_m^4} F_c^2 = \\ &= -\frac{F_c^2}{\pi \mu_0 H_c^2 l_x r^2} \frac{(2l_g + l_m)^2 [(l_g + l_m)^2 - l_g^2]}{l_m^4} = \\ &= -\frac{F_c^2}{\pi \mu_0 H_c^2 l_x r^2} d_{fp} \end{aligned} \quad (14)$$

式中 d_{fp} 定义为脉动系数：

$$d_{fp} = \frac{(2l_g + l_m)^2 [(l_g + l_m)^2 - l_g^2]}{l_m^4} \quad (15)$$

在电机主要尺寸确定后，气隙和永磁体厚度的取值对于悬浮力脉动有很大影响，脉动系数 d_{fp} 与永磁体厚度 l_m 、气隙长度 l_g 的关系如图2所示。从图2可以看出，气隙长度越小悬浮力脉动越小，永磁体越厚悬浮力脉动越小。因此，在电机设计中，为削弱电机的悬浮力脉动，气隙应适当减小，永磁体厚度应适当增加，同时结合电机设计中的其他要求综合考虑。

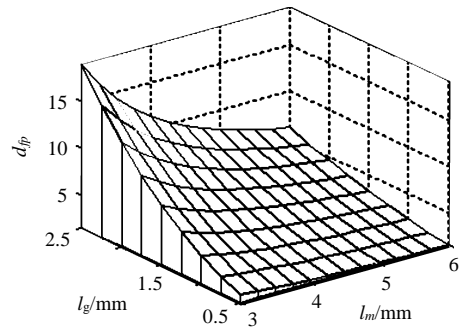


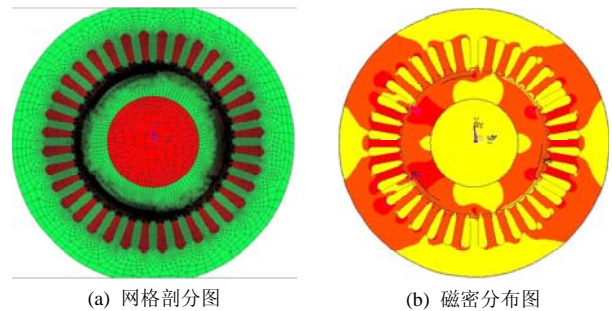
图2 d_{fp} 曲面图

Fig. 2 d_{fp} mesh

3 有限元分析

分别对永磁体厚度和气隙为A(5.15、2.5)，B(5.15、1.716)，C(3.09、1.716)mm的3种模型进行2D非线性有限元分析。其他模型参数相同，各参数为：定子外径200 mm、定子内径109.824 mm、定子槽数36、气隙1.716 mm、转子内径65 mm、转子极对数3、永磁体极弧60°、剩磁1 070 mT、矫顽力834 kA/m、悬浮绕组采用60°相带整距单层绕组。3种模型的悬浮电流幅值分别为20、28.78、38.12 A。

模型的网格剖分图及磁密分布图如图3所示(B模型)。分析结果如图4所示，3种模型的悬浮力



(a) 网格剖分图

(b) 磁密分布图

图3 有限元分析模型

Fig. 3 Model of FEA

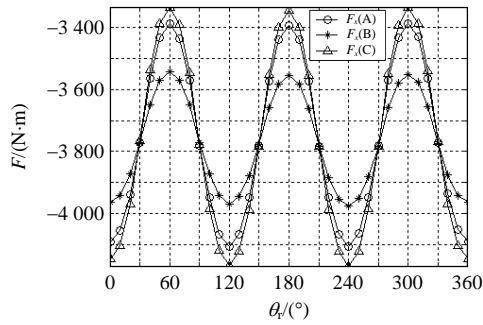


图 4 悬浮力脉动比较

Fig. 4 Compare of suspension force pulse

脉动分别为 19.18%、11.48%、22.18%。可以看出，通过增加永磁体较厚、减小气隙，悬浮力的脉动显著减小。

4 系统实现

根据上述原则，设计并制造了一台 3 对极的交替极无轴承薄片电机，永磁体厚度为 5.15 mm，气隙为 1.716 mm，轴向长度 28.6 mm，其他参数与上述模型一致。电机图片如图 5 所示。

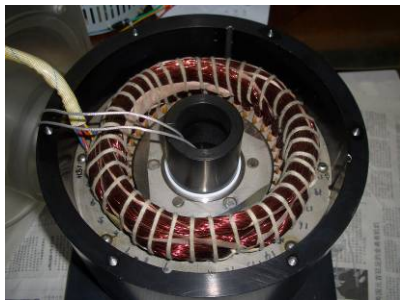


图 5 电机照片

Fig. 5 Picture of motor

悬浮力脉动得到抑制的情况下，忽略式(7)中的后一项，则式(7)简化为式(8)。将 $U_f = k_u I_f$ 代入式(8)，并进行坐标变换得

$$\begin{cases} F_x = k k_u i_{\alpha} \\ F_y = -k k_u i_{\beta} \end{cases} \quad (16)$$

式中： k_u 为悬浮绕组系数； i_{α} 为悬浮电流 α 轴分量； i_{β} 为悬浮电流 β 轴分量。

从式(16)可以看出，该电机的悬浮力与电机的转矩电流、转子转角完全解耦，因此采用如图 6 所示的控制策略。

整个控制系统分为悬浮系统与转矩系统，悬浮系统中，位移信号经过PID控制器后，得到 $\alpha\beta$ 电流，经 $\alpha\beta$ 变换后得到 3 相悬浮电流，再经过电流跟踪型逆变器将电流送入电机。转矩系统则采用 $i_d=0$ 的矢量控制。

电机在 1 000 r/min下悬浮波形如图 7 所示。图 7(a)为转子径向位移 x 、 y 波形，图 7(b)为转子电角度和径向位移 y 的波形，电机转子的径向位移跳动约为 160 μm 。

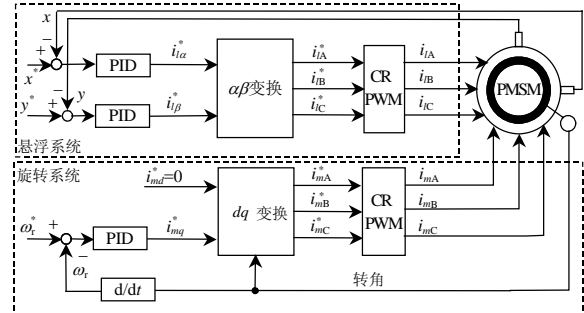
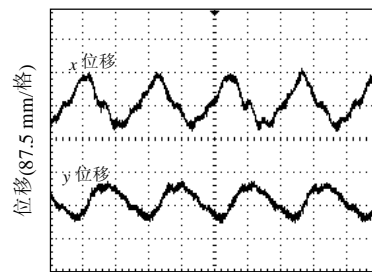
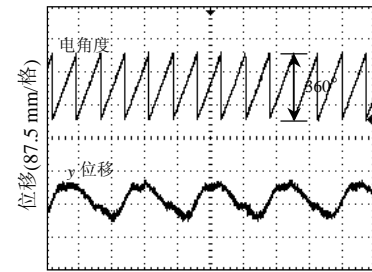


图 6 控制框图

Fig. 6 Control block



(a) 位移波形



(b) 角度位移波形

图 7 悬浮波形

Fig. 7 Waveform of suspension

5 结论

通过理论分析发现，3 对极无轴承交替极薄片电机的悬浮力脉动主要由悬浮磁密的平方项引起，通过适当增加永磁体的厚度及减小气隙，可以减小悬浮磁密，从而达到抑制悬浮力脉动的目的，有限元仿真证明了该措施的有效性。同时通过实验实现了 3 对极无轴承交替极薄片电机 1 000 r/min下的 5 自由度全悬浮，证明了通过适当的设计，3 对极无轴承交替极薄片电机也可以实现稳定悬浮。

参考文献

[1] Salazar A O, Chiba A, Fukao T. A Review of developments in the

- bearingless motors[C]. The 7th Symposium Magnetic Bearings, Zurich, Switzerland, 2000.
- [2] Amrhein W, Silber S, Nenninger K, et al. Developments on bearingless drive technology[C]. The 8th Symposium Magnetic Bearings, Mito, Japan, 2002.
- [3] 邓智泉, 王晓琳, 张宏荃, 等. 无轴承异步电机的转子磁场定向控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 89-92.
Deng Zhiquan, Wang Xiaolin, Zhang Hongquan, et al. The nonlinear control of bearingless induction motors based on the motor rotor flux orientation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 89-92(in Chinese).
- [4] 王宝国, 王凤翔. 磁悬浮无轴承电机悬浮力绕组励磁及控制方式分析[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).
- [5] Pascal Nang Bösch. Lagerlose Scheibenläufermotoren höherer leistung[D]. Zurich, Swiss: Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2004.
- [6] 邓智泉, 杨钢, 张媛, 等. 一种新型的无轴承开关磁阻电机数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 139-146.
Deng Zhiquan, Yang Gang, Zhang Yuan, et al. An innovative mathematical model for a bearingless switched reluctance motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 139-146(in Chinese).
- [7] 贺益康, 年珩, 阮秉涛. 感应型无轴承电机的优化气隙磁场定向控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 26(6): 116-121.
He Yikang, Nian Heng, Ruan Bingtao. Optimized air-gap-flux orientated control of an induction-type bearingless motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 26(6): 116-121(in Chinese).
- [8] 年珩, 贺益康. 永磁型无轴承电机的设计与运行分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(6): 891-895.
Nian Heng, He Yikang. Design and function analysis of permanent magnet-type bearingless motor[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(6): 891-895(in Chinese).
- [9] 仇志坚. 永磁同步电机的无轴承技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.
Qiu Zhijian. Research on the bearingless technology of the permanent magnet synchronous motor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2003(in Chinese).
- [10] 徐龙祥, 朱小春, 姚凯. 片状无轴承薄片电机的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 141-145.
Xu Longxiang, Zhu Xiaochun, Yao Kai. Research on bearingless slice PM motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(6): 141-145(in Chinese).
- [11] 廖启新. 无轴承永磁薄片电机的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.
Liao Qixin. Research on the bearingless PM slice motor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2003(in Chinese).
- [12] Dorell D G. Calculation of unbalanced magnetic pull in cage induction machines[D]. Cambridge, England: University of Cambridge, 1981.
- [13] Asami K, Chiba A, Rahman M A, et al. Stiffness analysis of a magnetically suspended bearingless motor with permanent magnet passive positioning[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(10): 3820-3822.
- [14] Amemiya J, Chiba A, Dorrell D G, et al. Basic characteristics of a consequent-pole-type bearingless motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(10): 82-89.
- [15] Takenaga T, Kubota Y, Chiba A, et al. A principle and a design of a consequent-pole bearingless motor[C]. The 8th International Symposium on Magnetic Bearing, Mito, Japan, 2002.



廖启新

收稿日期: 2008-04-21。

作者简介:

廖启新(1979—), 男, 博士研究生, 研究方向为无轴承薄片电机研究及其控制系统设计, 电机调速, liaoqixin@nuaa.edu.cn;

王晓琳(1976—), 男, 讲师, 研究方向为无轴承电机;

邓智泉(1969—), 男, 教授, 研究方向为无轴承电机, 高速电机, 交流电机控制;

仇志坚(1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为无轴承永磁电机;

黄燕(1982—), 女, 硕士研究生, 研究方向为无轴承交替极永磁电机;

解超(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为无轴承交替极薄片电机。

(责任编辑 王剑乔)