

无轴承开关磁阻电机转子质量偏心补偿控制

张倩影, 邓智泉, 杨艳

(航空电源航空科技重点实验室(南京航空航天大学), 江苏省 南京市 210016)

Compensation Control of Rotor Mass Eccentric in Bearingless Switched Reluctance Motors

ZHANG Qianying, DENG Zhiquan, YANG Yan

(Aero-Power Science-Technology Center (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics),
Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: In bearingless switched reluctance motors (BSRMs), the problem of rotor mass eccentric, which caused by mechanical errors, can result in extra and unbalanced radial magnetic force, and therefore worsen the motor suspension performances. Meanwhile, vibration caused by rotor mass eccentric is an important factor to limit the increase of motor speed at high speed. Influences of rotor mass eccentric on suspension performance were analyzed; vibration control principle was introduced; an adaptive notch filter based on least-mean-square (LMS) algorithm was designed and added to the BSRM control system; the vibration control method was simulated with Matlab/Simulink and utilized in experiments. The results show that the adaptive notch filter based on LMS algorithm can effectively compensate rotor vibration displacements at different motor speeds. Thus, the vibration caused by rotor mass eccentric is suppressed and rotor suspension performances are improved.

KEY WORDS: bearingless switched reluctance motor (BSRM); rotor mass eccentric; vibration; adaptive filter; least-mean-square (LMS) algorithm

摘要: 由于机械不平衡原因, 无轴承开关磁阻电机存在转子质量偏心的问题, 这会导致额外的不平衡径向磁拉力, 从而使电机的悬浮精度变差, 这也是限制电机高速时转速进一步提升的重要因素。分析转子质量偏心对电机悬浮性能的影响, 介绍悬浮转子振动控制原理, 设计基于最小均方(least-mean-square, LMS)算法的自适应凹陷滤波器, 将其加入到无轴承开关磁阻电机(bearingless switched reluctance motor, BSRM)系统中, 利用 Matlab/Simulink 对该振动控制方法进行仿真研究, 最后在一台实验样机上进行实验验证。结果表明, 基于 LMS 算法的自适应凹陷滤波器能够在不同

的电机转速条件下有效补偿转子的同频振动位移, 抑制转子偏心振动, 提高转子悬浮精度。

关键词: 无轴承开关磁阻电机; 转子质量偏心; 振动; 自适应滤波器; 最小均方算法

0 引言

无轴承开关磁阻电机(bearingless switched reluctance motor, BSRM)是利用磁轴承与电机结构的相似性, 将磁轴承中的悬浮绕组叠绕在开关磁阻电机(switched reluctance motor, SRM)定子上, 通过电力电子和微机控制使其同时具备驱动和磁悬浮支撑功能的一种新型磁悬浮电机^[1-6]。定子双绕组无轴承开关磁阻电机比开关磁阻电机多了一套绕组, 这增加了控制的灵活性, 从而有望改善因不对称磁拉力造成的开关磁阻电机振动和噪声问题^[7-10]。

实际应用中, 由于转子叠片质量分布不均匀、转子轴弯曲振动变形、加工装配精度等机械不平衡原因, 无论是 SRM 还是 BSRM, 都存在转子质量偏心问题, 由此会带来如下问题: ①电机转子磁路磁偏心, 从而产生不平衡的偏心磁拉力, 引起转子周期性振动, 加剧电机的振动和噪声; ②转子在旋转时, 由于偏心离心力而产生不平衡振动, 且振动幅值会随着转速的升高而增大^[11]。当转速升高到一定程度时, 定、转子将发生摩擦, 使系统失控, 严重影响系统的动态特性和安全运行。

C.Y.Wu 等就 SRM 的振动和噪声进行了时域分析, 提出了 SRM 振动噪声控制策略中最具代表性的“两步关断法”^[12]。此后, 很多学者从电机本体结构出发, 提出了设计低噪声 SRM 应考虑的问题以及具体的实施方法^[13-16]; 无论是从结构设计还是

基金项目: 国家自然科学基金项目(50877036)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50877036).

控制策略出发，现有的方法都没有突破对于电机转速的限制，另外对于高速时转子质量偏心带来的振动噪声问题也没有有效的抑制方法。事实上，SRM 由于转子质量偏心而引起的定转子间的不平衡磁拉力是相当大的，在研究其振动噪声时必须考虑转子的质量偏心^[17-18]。M.Takemoto 等提出将无轴承技术作为 SRM 的减振降噪途径，通过前馈补偿的方法对 BSRM 转子质量的不平衡进行了主动补偿控制，得到了预期效果^[2]；但该方法要求对转子磁中心进行精确测量，且当电机结构参数发生变化时不具备自适应能力，因此该方法的实际应用受到限制。

本文从避免检测转子磁中心这一复杂过程的角度出发，根据转子偏心位移、径向力以及转子位置角之间的关系，通过一种基于最小均方算法 (least-mean-square, LMS) 的自适应凹陷滤波器对 BSRM 转子径向位移进行主动补偿控制，从而抵消磁偏心带来的不利后果。仿真和实验表明，该方法在不同转速条件下均能有效抑制转子偏心振动。

1 电机结构及数学模型

以一台三相 12/8 定子双绕组结构的无轴承开关磁阻电机为研究对象，电机 A 相绕组结构如图 1 所示。文献[1,19]推导了电机单相导通的数学模型，以 A 相绕组为例，悬浮力和转矩的数学公式为

$$\begin{cases} F_{\alpha} = K_f i_{ma} i_{sa1} \\ F_{\beta} = K_f i_{ma} i_{sa2} \end{cases} \quad (1)$$

$$T_a = J_t (2N_m^2 i_{ma}^2 + N_b^2 i_{sa1}^2 + N_b^2 i_{sa2}^2) \quad (2)$$

式中： F_{α} 、 F_{β} 分别为 α 和 β 方向瞬时悬浮力； T_a 为瞬时转矩； N_m 、 N_b 分别为任一定子极的主绕组和悬浮绕组匝数； i_{ma} 、 i_{sa1} 、 i_{sa2} 分别为 A 相主绕组电流和 α 、 β 方向的悬浮绕组电流； K_f 为悬浮力系数； J_t 为转矩系数， K_f 和 J_t 均为电机结构参数和转子位置角 θ 的函数。

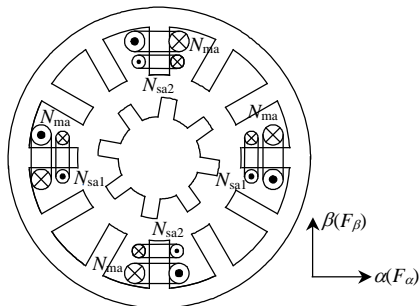


图 1 A 相绕组结构

Fig. 1 Configuration of A phase winding

2 理论分析

图 2 为 BSRM 转子径向位移闭环控制框图。现有 BSRM 控制系统中，悬浮转子的给定位置设定在其几何中心位置处。在不考虑转子质量偏心的情况下，当转子从任意方向偏离给定位置时，通过调节 α 、 β 方向悬浮绕组电流的大小和方向，进而调节悬浮力 F_{α} 、 F_{β} 的大小和方向，最终可将转子拉回到给定位置。

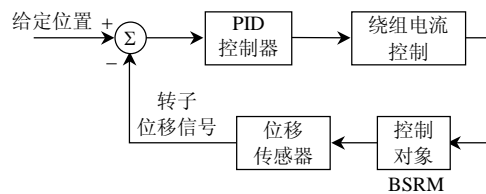


图 2 转子径向位移闭环控制框图

Fig. 2 Close-loop control block diagram of rotor radial displacement

实际运行中，转子质心 Q 与几何中心 O 并不重合，如图 3 所示，假定二者之间存在偏心距 e_0 ，则当转子位于给定位置时，磁偏心的结果将使得气隙磁场分布不均匀，转子受到不平衡的磁拉力以及离心力的作用，进而产生径向位移。通过位移传感器的反馈，转子必然受到控制系统施加的径向力的调节作用，这部分附加的径向力将恶化转子的径向振动。

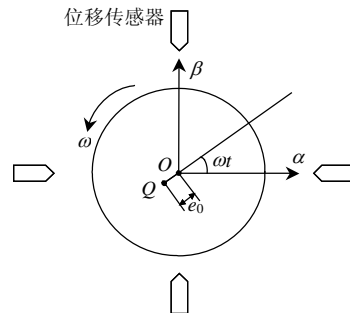


图 3 转子质量偏心示意图

Fig. 3 Rotor mass eccentric

假设转子以角速度 ω 旋转。由于质心围绕几何中心旋转，不平衡磁拉力和离心力必然是周期性的，且与转速同频。若转子刚度足够高，且转子刚度在 α 和 β 方向相等，那么，不平衡力在 α 和 β 方向产生的振动强度则近似相等；因此，不平衡振动在 α 和 β 方向产生的位移是与转速同频的正弦信号^[11]，二者幅值相等，只是在相位上相差 90° 。

当考虑转子质量偏心时， α 或 β 方向的转子径向位移如式(3)所示，其由 2 部分组成：①转子的随

机位移；②与转速同频的振动位移。

$$d = d_a + d_s \quad (3)$$

式中： d 为 α 或 β 方向的转子径向位移； d_a 为转子的随机位移； d_s 为与转速同频的振动位移，表示为

$$d_s = A \cos \omega(t + \varphi) \quad (4)$$

式中 A 为同频振动位移的幅值。

从式(3)可以看出，若在位移信号 d 进入PID控制器之前，通过抵消或滤波的方法消除其中的同频振动信号 d_s ，控制系统将不产生周期性控制力，转子的不平衡振动也会得到抑制。基于该思路，本文采用自适应LMS滤波器对转子偏心振动进行控制，通过分离出位移检测信号中的同频振动信号分量，并叠加一正弦补偿信号与之抵消，从而进入控制器的位移信号中不含同频振动分量，控制器对同频分量不控制，以达到消除不平衡振动力的目的。

3 仿真分析

3.1 自适应LMS滤波器的设计

图4为加入自适应LMS滤波器后BSRM转子径向位移闭环控制框图。基本输入 d 包含转子的随机位移和不平衡振动位移，参考输入 x_1 是一个与振动位移同频的正弦信号， x_2 为 x_1 经过 90° 移相后的余弦信号。自适应滤波器利用位移环反馈的位移误差信号 e 及转速信息，通过LMS算法调整自适应参数 w_1 、 w_2 ，使合成的补偿信号 y 的幅值和相位与 d 中振动位移分量 d_s 的幅值和相位相同，从而输出 e 中不含同频振动位移分量。

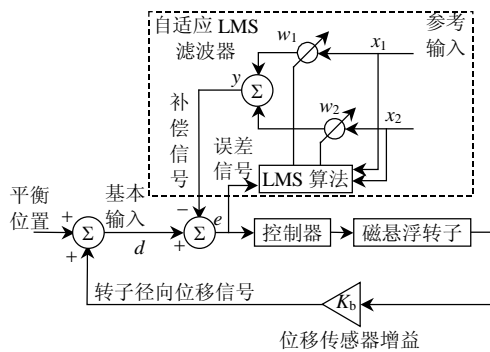


图4 加入补偿的转子径向位移闭环控制框图

Fig. 4 Close-loop control diagram of rotor radial displacement adding compensation
图4中，基本输入可表示为

$$d(nT) = d_a(nT) + A \cos \omega_0(nT + \varphi) \quad (5)$$

式中： T 为采样周期； ω_0 为转子角频率。

参考输入为

$$x_1(nT) = A \sin \omega_0(nT + \varphi_0) \quad (6)$$

根据LMS算法，滤波器的自适应参数 w_1 、 w_2 的更新如式(7)—(10)所示^[20]。

$$w_1(n+1) = w_1(n) + 2\mu e(n)x_1(n) \quad (7)$$

$$w_2(n+1) = w_2(n) + 2\mu e(n)x_2(n) \quad (8)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (9)$$

$$y(n) = w_1(n)x_1(n) + w_2(n)x_2(n) \quad (10)$$

式中 μ 为调节自适应滤波器稳定性和收敛速度的步长参数。

图4所示的自适应LMS滤波器模型可看作作为一个闭环反馈系统，输入为 d ，输出为 e 。令 $w_1(0) = w_2(0) = 0$ ，并利用式(7)—(10)，可推导出该自适应LMS凹陷滤波器的闭环传递函数为

$$H(z) = \frac{z^2 - 2z \cos \omega_0 + 1}{z^2 - 2(1 - \mu A^2 / 2)z \cos \omega_0 + (1 - \mu A^2)} \quad (11)$$

$H(z)$ 的零点位于单位圆上的 $z = e^{\pm j\omega_0}$ 处。当步长 μ 较小，即 $\mu A^2 / 2 \ll 1$ 时，可求出 $H(z)$ 的极点为

$$z \approx \left(1 - \frac{\mu A^2}{2}\right) e^{\pm j\omega_0} \quad (12)$$

$H(z)$ 的2个极点位于单位圆内，这意味着自适应凹陷滤波器是稳定的，其3dB带宽近似为

$$B \approx \mu A^2 \text{ rad} = \mu A^2 / (2\pi T) \text{ Hz} \quad (13)$$

由式(13)可见， μ 越小， B 越小，陷波性能越好；但若 μ 过小，将会使系统的收敛速度变得很慢；同时若 μ 过大，不利于干扰信号的消除，甚至可能使算法发散。经过多次仿真分析，本文选取 μ 为0.02，以满足BSRM控制系统精度和快速性的要求。

3.2 系统仿真分析

在Matlab/Simulink中建立无轴承开关磁阻电机系统仿真模型，主要包括电机本体模块、悬浮力控制模块、转矩控制模块、主绕组及悬浮绕组电流控制模块、三套功率逆变器和相关辅助电路等，其偏心振动控制原理框图如图5所示。

仿真时在位移传感器输出端叠加了一正弦信号，来模拟转子旋转时由于质量偏心而产生的同频振动。由3.1节的推导可知，自适应LMS滤波器的输入即为位移传感器输出的转子位移信号，输出为补偿后的转子位移信号，由于仿真时给定转子径向位移 α^* 、 β^* 大小为0，因此补偿后的转子位移信号

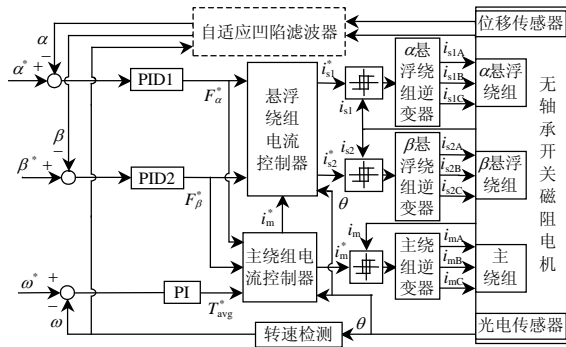


图 5 基于自适应凹陷滤波器的偏心振动控制框图

Fig. 5 Diagram of eccentric vibration control based on adaptive notch filter

即为进入 PID 控制器的信号。

仿真样机主要结构参数如表 1 所示。由于 α 、 β 方向的不平衡振动控制方法相同，本文仅以 α 方向为例来进行说明。

表 1 样机参数

Tab. 1 Parameters of the test motor

参数	数值	参数	数值
定子外径/mm	120	转子外径 r/mm	60
定子极高/mm	24	转子极高/mm	5
定子轭高/mm	5.75	转子轭高/mm	10
轴径/mm	30	气隙长度 l_0 /mm	0.25
定、转子极弧/rad	15	铁心叠长 h/mm	75
主绕组匝数 N_m	14 匝	悬浮绕组匝数 N_s	17 匝

在式(11)中，设定 $A=1$ ， $T=10^{-4}$ s， $\mu=0.02$ ，取转速 $n=4\ 000$ ， $7\ 500$ r/min，考虑转子偏心和基本不偏心 2 种情况进行仿真研究。

图 6 为转子基本不偏心时补偿前后 α 方向的转子位移 (d_α) 波形。由图 6 可以看出，补偿前，转子

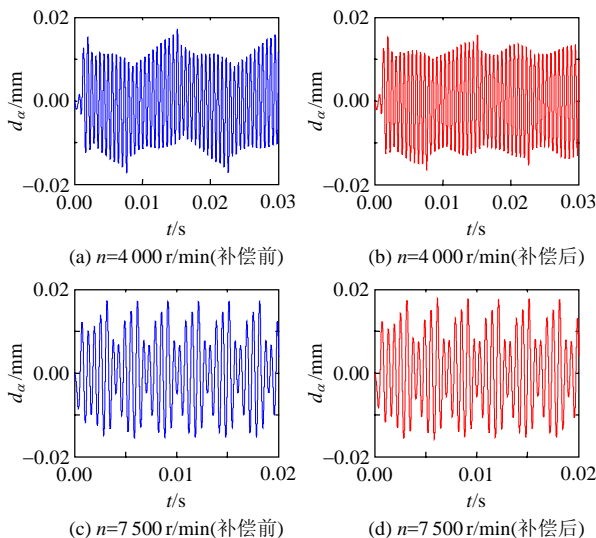


图 6 转子不偏心，补偿前后转子位移波形

Fig. 6 Waveforms of rotor displacement before and after compensation without rotor eccentric

位移信号中只含有转子的随机位移；补偿后，转子径向位移基本不变化；这说明自适应 LMS 滤波器对不偏心的转子系统基本没有影响。

图 7 为转子偏心时补偿前后 α 方向的转子位移波形。由图 7 可以看出，补偿前， α 方向的转子位移信号中含有与转速同频的振动信号；补偿后，同频振动分量基本被消除掉。

图 8 为转子偏心时补偿前后的径向悬浮力波

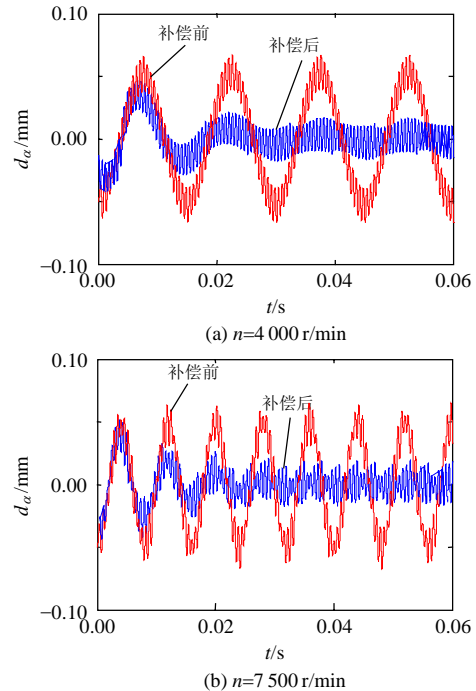


图 7 转子偏心，补偿前后转子位移波形

Fig. 7 Waveforms of rotor displacement before and after compensation with rotor eccentric

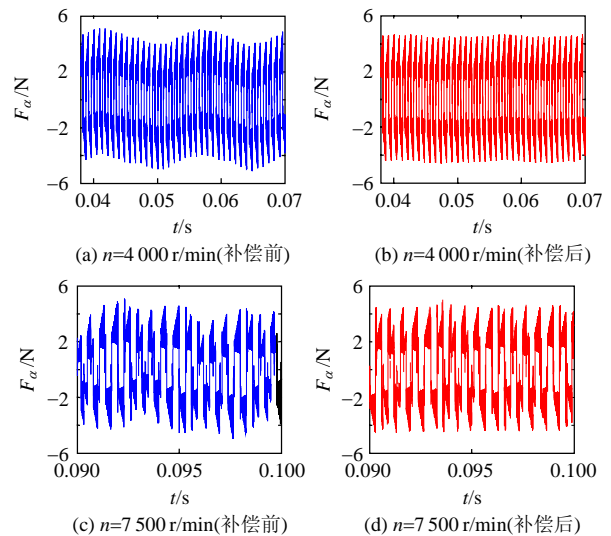


图 8 转子偏心，补偿前后悬浮力波形

Fig. 8 Waveforms of suspension force before and after compensation with rotor eccentric

形。由图8可以看出,补偿前,同频位移经PID控制器调节后,产生了相应的不平衡控制力,该力的周期性作用使得悬浮力脉动很大;补偿后,转子位移经PID控制器调节后基本不产生不平衡控制力,因此悬浮力脉动显著减小;这表明该自适应滤波器能够有效补偿转子的同频振动位移,减小不平衡振动力,且不会影响系统稳定性。

4 实验分析

本文对以上理论和仿真分析的结果在12/8结构的实验样机上进行了实验验证,实验样机结构参数与仿真分析一致。实验样机由于加工、装配等机械不平衡原因存在转子质量偏心问题,且偏心程度未知,电机外观如图9所示,系统控制框图如图5所示,其中转速信号由光电传感器获得。由于转子重力的影响,近似于对电机转子在 β 方向施加了一个5kg的径向负载。

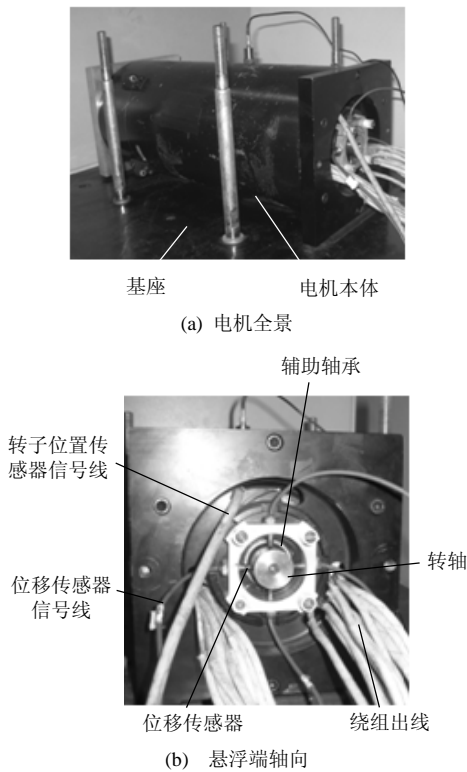


图9 电机外观
Fig. 9 Photograph of the motor

图10、11分别为电机转速 $n=4000, 7500\text{r/min}$ 时,补偿前和补偿后电机转子的稳定悬浮位移波形。由于电机旋转时,若PID控制器参数不同,对转子悬浮精度的影响也会不同,因此为了在相同条件下进行比较,补偿前和补偿后应调节电机 α 和 β

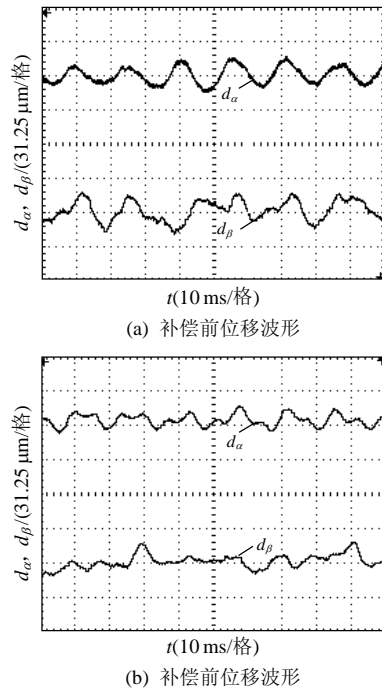


图10 $n=4000\text{ r/min}$ 时补偿前后转子位移波形
Fig. 10 Waveform of rotor displacement before and after compensation when $n=4000\text{ r/min}$

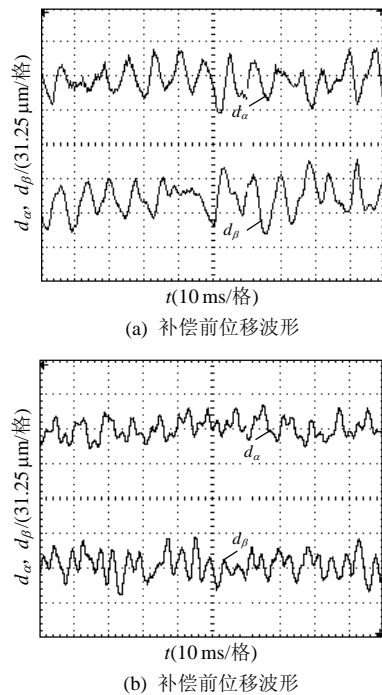


图11 $n=7500\text{ r/min}$ 时补偿前后转子位移波形
Fig. 11 Waveform of rotor displacement before and after compensation when $n=7500\text{ r/min}$

两个方向的PID控制器的控制参数相同。从图10—11可以看出,补偿前的悬浮位移由于转子质量偏心的影响存在正弦性, β 方向由于转子重力的影响正弦性虽然没有 α 方向明显,但也接

近于正弦, 且悬浮位移的峰峰值较大; 补偿后位移波形的正弦波峰部分出现了明显的凹陷, 悬浮位移的峰峰值也有较大幅度的减小; 这说明本文采用的基于 LMS 算法的自适应凹陷滤波器能够在不同的转速下发挥其补偿作用, 有利于悬浮精度的提高。

5 结论

本文采用了基于 LMS 算法的自适应凹陷滤波器对无轴承开关磁阻电机转子偏心振动进行补偿控制, 得到如下结论:

1) 转子质量偏心使得无轴承开关磁阻电机系统运转时, 进入控制器的位移信号中与转速同频的振动分量很大, 相应的不平衡控制力也很大, 从而引起的转子径向振动较大;

2) 采用基于 LMS 算法的自适应凹陷滤波器进行偏心补偿控制以后, 同频振动信号基本能够被消除, 悬浮位移的峰峰值出现了大幅度减小, 这不仅节省了系统的控制能量, 增加了转子的悬浮精度, 且由于力的相互作用, 作用在定子上的不平衡力也相应减小, 因此有望抑制电机运行时的振动噪声;

3) 参数自适应使得该滤波器使用方便, 同时不受电机结构参数的影响, 在不同电机转速和转子偏心程度情况下均可发挥补偿控制作用。

参考文献

- [1] Takemoto M, Shimada K, Chiba A, et al. A design and characteristics of switched reluctance type bearingless motors[C]//Fourth International Symposium on Magnetic Suspension Technology. Gifu, Japan, 1998: 49-63.
- [2] Takemoto M, Chiba A, Fukao T. A feed-forward compensator for vibration reduction considering magnetic attraction force in bearingless switched reluctance motors[C]//7th International Symposium on Magnetic Bearings. ETH Zurich, 2000: 395-400.
- [3] Amrhein W, Silber S, Nenninger K. Developments on bearingless drive technology[C]//8th International Symposium on Magnetic Bearings. Mito, Japan, 2002: 229-234.
- [4] Choi B B, Siebert M. A bearingless switched reluctance motor for high specific power applications[C]//42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Sacramento, CA: AIAA, 2006: 1-14.
- [5] 张媛, 邓智泉. 无轴承开关磁阻电机控制系统的设计与实现[J]. 航空学报, 2006, 27(1): 77-81.
- [6] Cao X, Deng Z, Yang G, et al. Independent control of average torque and radial force in bearingless switched-reluctance motors with hybrid excitations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(5): 1376-1385.
- [7] Ji Jinghua, Sun Yukun, Zhu Huangqiu, et al. Magnetic field analysis of bearingless switched reluctance motor using finite element method[C]//Eighth International Conference on Electric Machines and Systems. Nanjing, China: IEEE, 2005: 2121-2123.
- [8] 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 Zhiqian, 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).
- [9] 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): 217-226.
Wang Qiurong, Ge Baoming. Analysis of magnetic field and force characteristics of bearingless switched reluctance motor[J]. Electric Machines and Control, 2007, 11(3): 217-226(in Chinese).
- [10] 杨艳, 邓智泉, 曹鑫, 等. 无轴承开关磁阻电机径向电磁力模型[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(3): 377-382.
Yang Yan, Deng Zhiqian, Cao Xin, et al. Magnetic radial force model of bearingless switched reluctance motors[J]. Electrical Machines and Control, 2009, 13(3): 377-382(in Chinese).
- [11] 王磊. 主动磁悬浮轴承的振动补偿研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
Wang Lei. Research on the vibration compensation of active magnetic bearing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007(in Chinese).
- [12] Wu C Y, Pollock C. Analysis and reduction of vibration and acoustic noise in the switched reluctance drive [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1995, 31(1): 91-98.
- [13] 唐超. 开关磁组电机振动和噪声的研究与实践[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
Tang Chao. Research on vibration and acoustic noise of SRM [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005(in Chinese).
- [14] 孙剑波, 詹琼华. 一种利于开关磁阻电机降噪的新散热

- 筋结构[J]. 电工技术学报, 2005, 20(9): 34-38.
- Sun Jianbo, Zhan Qionghua. A novel radiating rib structure of switched reluctance motor for low acoustic noise[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(9): 34-38(in Chinese).
- [15] 王宏华, 王治平, 江泉. 开关型磁阻电动机固有频率解析计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 133-137.
- Wang Honghua, Wang Zhiping, Jiang Quan. Analytical calculating of natural frequencies of stators of switched reluctance motor based on electromechanical analogy method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 133-137(in Chinese).
- [16] Vijayakumar K, Karthikeyan R, Rajkumar S, et al. An investigation into vibration in high speed switched reluctance motor with soft magnetic composite material[C]//IEEE Region 10 Colloquium and the Third ICIIS, Kharagpur, India, 2008.
- [17] 刘闯, 周强, 唐超, 等. 线圈连接方式对开关磁阻电机振动噪声的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(2): 265-269.
- Liu Chuang, Zhou Qiang, Tang Chao, et al. Influence of winding connection on vibration and acoustic noise of switched reluctance machine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(2): 265-269(in Chinese).
- [18] 孙剑波. 开关磁阻电机的减振降噪和低转矩脉动研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- Sun Jianbo. Study on reduction of vibration noise and low torque ripple for switched reluctance motor [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005(in Chinese).
- [19] 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).
- [20] 赫金 S. 自适应滤波器原理[M]. 郑宝玉, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003: 183-198.
- Haykin S. Adaptive filter theory[M]. Zheng Baoyu, translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 183-198(in Chinese).



张倩影

收稿日期: 2010-09-10。

作者简介:

张倩影(1986), 女, 硕士研究生, 研究领域为无轴承开关磁阻电机, zhangqianying@nuaa.edu.cn;

邓智泉(1969), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为无轴承电机、高速电机、交流电机控制;

杨艳(1976), 女, 博士研究生, 研究领域为无轴承开关磁阻电机。

(责任编辑 李婧妍)