

磁悬浮无刷直流电机新型直接悬浮力控制^{*}

孙玉坤^{1,2}, 张 宽¹, 袁 野¹

(1. 江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013;

2. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘 要: 针对磁悬浮无刷直流电机(BBLDCM)这一非线性、强耦合系统,为解决悬浮系统控制难度大、转子抖动严重等问题,设计了一种新型的直接悬浮力控制策略。借鉴传统的无刷直流电机直接转矩的控制思想,依据 BBLDCM 运行特点,推导出不同状态下的悬浮力矢量,并给出了悬浮绕组导通表,同时阐明了新型直接悬浮力工作过程。最后通过 Simulink 对所提控制策略进行仿真验证,结果表明该方法不仅能够实现转子稳定悬浮,而且有效削弱了悬浮转子的抖动,简化了悬浮控制系统,提高了悬浮系统的控制精度。

关键词: 磁悬浮; 无刷直流电机; 直接转矩控制; 悬浮力控制

中图分类号: TM 33 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)11-0001-06

A Novel Direct Suspension Force Control for Bearingless Brushless DC Motor^{*}

SUN Yukun^{1,2}, ZHANG Kuan¹, YUAN Ye¹

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

2. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: The bearingless brushless DC motor (BBLDCM) was a strong-coupled nonlinear system. To solve the problems of suspension system precise control and rotor jitter, a novel direct suspension force control strategy was proposed. With the reference of direct torque control of traditional brushless DC motor and the operating characteristics of the BBLDCM, the suspension force vector under different conditions was derived, the suspension winding conduction table was given, and the working process of the novel direct suspension force was clarified. Finally, the suspension control system was designed and simulated by Simulink. The simulation results showed that the rotor could be suspended stably, and the rotor jitter was weakened effectively. In addition, this method improved the control accuracy of the suspension system.

Key words: magnetic suspension; brushless DC motor; direct torque control; suspension control

0 引 言

磁悬浮无刷直流电机(Bearingless Brushless DC Motor, BBLDCM)在基本无刷直流电机(Brushless DC Motor, BLDCM)定子齿上增加了悬浮控制绕组,用来提供转子径向悬浮力,取代了原有的机械轴承。其不仅具有 BLDCM 无需励磁、

调速优、高效可靠、出力大等特征,同时还具备了磁悬浮电机高集成、无机械磨损、寿命长、无污染等优点^[1]。BBLDCM 在人工血泵等生物医学领域、飞轮储能等新能源领域以及航天航空领域具有较高的研究价值和广泛的应用前景^[2-4],因此开展对 BBLDCM 的研究,具有理论价值和工程意义。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51707082); 江苏省自然科学基金项目(BK20170546); 中国博士后科学基金项目(2017M620192)

作者简介: 孙玉坤(1958—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为特种电力传动的智能控制。

张 宽(1993—),男,硕士研究生,研究方向为磁悬浮无刷直流电机控制。

袁 野(1991—),男,博士,研究方向为飞轮储能系统优化设计。

BBLDCM 是一个强耦合、非线性的控制系统^[5]。对于转子悬浮精确控制难度大、转子抖动严重的难题,文献[6]运用 3 组悬浮控制绕组同时工作的方法,实现了转子的稳定悬浮,增加了系统整体功耗。文献[7-8]提出了一种悬浮绕组电流滞环的控制策略,通过对悬浮绕组电流进行闭环反馈,得到悬浮力控制量,最终保证转子稳定悬浮。该方法受制于电流滞环所设置的宽度和功率管工作频率,且缩短了功率管的使用寿命。文献[9-10]基于电感与位移之间所呈现出的线性关系,将高频信号注入悬浮绕组,实现转子位移的自检测,使得永磁型磁悬浮电机可以稳定运行并且无需径向位移检测器。该方法可节约径向位移检测装置的成本,但降低了电机运行可靠性。与电流滞环调节方式相同,通过调节悬浮力绕组中的电流,从而改变径向力的方向及大小,径向悬浮力控制的精度和响应速度受到限制,同时位移控制的精度受到转子参数影响大。文献[11]采用一种空间脉宽矢量调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)的闭环悬浮力控制方法调节悬浮绕组中的磁链,对径向悬浮力直接控制,削弱了转子的抖动。该算法需要进行繁琐的坐标变换和复杂的计算。

为了提高转子径向悬浮力控制精度,进一步削弱转子抖动,简化悬浮控制系统,本文提出了一种新型的 BBLDCM 直接悬浮力控制策略。借鉴 BLDCM 的直接转矩^[12-13]控制方法,不同于 SVPWM 的闭环悬浮力。分析了 BBLDCM 的运行机理,推导了转矩子系统和悬浮子系统的数学模型。根据 BBLDCM 的工作特点,推导出不同状态下的悬浮力矢量并给出了闭环悬浮力悬浮绕组导通表,阐明直接悬浮力的调节过程,利用 Simulink 搭建系统模型,仿真并验证了该控制策略的正确性和有效性。

1 BBLDCM 运行机理与数学模型

1.1 BBLDCM 运行机理

BBLDCM 比传统 BLDCM 的定子齿上多一套绕组,用来提供转子径向支承力。图 1 所示为外转子 BBLDCM 结构示意图。其中 U、V、W 是电机的转矩绕组,用来控制电机的旋转。U 相绕组由 U1、U2、U3 和 U4 串联组成,V 相绕组由 V1、V2、

V3 和 V4 串联组成,W 相绕组由 W1、W2、W3 和 W4 串联构成。a1、a2、b1、b2、c1 和 c2 是外转子 BBLDCM 的悬浮控制绕组,且 2 个串联的绕组组成一相悬浮绕组。转矩及悬浮绕组采取了集中绕组的分布方式,其中转矩控制绕组使用两相导通模式。因为集中绕组分布方式的绕组互感很小,且位于 1 个定子齿上的转矩绕组以及悬浮绕组不在同一时间内接通,因此转矩和悬浮绕组之间的相互耦合可以消除^[14-15]。

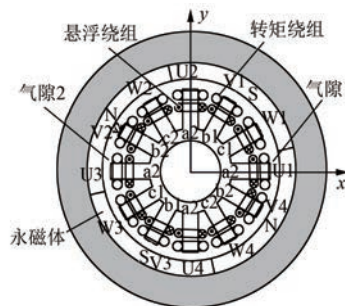


图 1 外转子 BBLDCM 结构示意图

若此时转子旋转 30° , 可知转子旋转所需的切向力由转矩绕组 V、W 相导通得到, 而转子径向悬浮力由绕组 a1 和 a2 导通提供。当悬浮绕组 a1 中的电流方向如图 1 时, 则气隙 1 中的磁密降低, 气隙 2 中的磁密上升, 转子两边气隙磁密间的平衡状态被破坏, 可得到转子沿 $+x$ 向位移的径向悬浮力。同样, 当悬浮绕组 a2 中的电流如图 2 时, 可得到转子沿 $+y$ 向位移的径向悬浮力。因此改变悬浮绕组 a1 和 a2 中电流的大小及方向, 即可获得转子在 xoy 平面的任意方向上位移, 最终转子稳定悬浮。设悬浮绕组产生径向悬浮力沿 a、b 和 c 坐标轴, 建立坐标系 a1-a2、b1-b2 和 c1-c2 如图 2 所示。

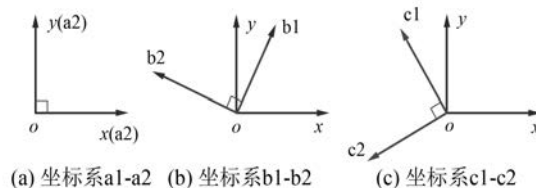


图 2 悬浮力产生相位

1.2 BBLDCM 数学模型

1.2.1 转矩数学模型

转矩绕组的电压方程为

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} di_a/dt \\ di_b/dt \\ di_c/dt \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: u_a, u_b, u_c ——三相定子绕组电压;
 e_a, e_b, e_c ——三相定子绕组反电动势;
 i_a, i_b, i_c ——三相定子绕组电流;
 L ——定子绕组电感;
 M ——定子绕组之间的互感。

转矩方程为

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\Omega} \quad (2)$$

运动方程为

$$T_e = T_l + B\omega + J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

式中: Ω ——机械角速度;

T_e ——电磁转矩;

T_l ——负载转矩;

J ——转动惯量。

1.2.2 径向悬浮力数学模型

BBLDCM 轴向摆放时, 转子径向悬浮力可不考虑重力的影响。

(1) 当电机转子旋转于 $[0^\circ, 30^\circ]$ 时, 悬浮力的估算由图 2 中坐标系 a1-a2 可得到, 悬浮力表达式为

$$\begin{bmatrix} F_{sa1} \\ F_{sa2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_i i_{a1} + k_x a_1 \\ k_i i_{a2} + k_x a_2 \end{bmatrix} = k_i \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{a2} \end{bmatrix} + k_x \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: i_{a1}, i_{a2} ——悬浮绕组 a1、a2 中通入的电流;

a_1, a_2 ——a1、a2 在坐标系上的位移;

k_i ——电流刚度系数;

k_x ——位移刚度系数;

F_{sa1}, F_{sa2} ——沿 a1 和 a2 方向的悬浮力。

将悬浮力 F_{sa1}, F_{sa2} 转换到 $x-y$ 坐标系中, 可得:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{sa1} \\ F_{sa2} \end{bmatrix} = k_i \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{a2} \end{bmatrix} + k_x \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

(2) 当电机转子旋转于 $[30^\circ, 60^\circ]$ 时, 悬浮力的估算可由坐标系 b1-b2 计算得到, 悬浮力表达式为

$$\begin{bmatrix} F_{sb1} \\ F_{sb2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_i i_{b1} + k_x b_1 \\ k_i i_{b2} + k_x b_2 \end{bmatrix} = k_i \begin{bmatrix} i_{b1} \\ i_{b2} \end{bmatrix} + k_x \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

将悬浮力 F_{sb1}, F_{sb2} 转换到 $x-y$ 坐标系中:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{sb1} \\ F_{sb2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 60^\circ & \cos 150^\circ \\ \sin 60^\circ & \sin 150^\circ \end{bmatrix} \quad (7)$$

(3) 当电机转子旋转于 $[60^\circ, 90^\circ]$ 时, 悬浮力的估算可由坐标系 c1-c2 计算得到, 悬浮力表达式为

$$\begin{bmatrix} F_{sc1} \\ F_{sc2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_i i_{c1} + k_x c_1 \\ k_i i_{c2} + k_x c_2 \end{bmatrix} = k_i \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \end{bmatrix} + k_x \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

将悬浮力 F_{sc1}, F_{sc2} 转换到 $x-y$ 坐标系中, 可得:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{sc1} \\ F_{sc2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos 120^\circ & \cos 240^\circ \\ \sin 120^\circ & \sin 240^\circ \end{bmatrix} \quad (9)$$

2 BBLDCM 直接悬浮力控制

BBLDCM 的直接悬浮力控制和 BLDCM 直接转矩控制具有类似性: (1) 洛伦兹力是电机旋转的基本原理, 是切向力; 转子悬浮力是麦克斯韦力、径向力, 且都是定转子磁场相互影响的结果。(2) 悬浮和转矩控制绕组的分布方式、结构相类似。(3) 悬浮力和转矩控制绕组其控制目标虽然不同, 但是本质上基本相似。

2.1 直接悬浮力绕组控制开关表

BBLDCM 转矩绕组采用二二导通的模式, 即 BBLDCM 在正常运行时, 转矩绕组只有两相导通。定义 1 个六位的二进制数来代替逆变器的工作状态, 逆变器的开状态定义为数字“1”, 闭状态定义为数字“0”, 则转矩绕组有 6 种开关状态: $V_{T1}(010010)$, $V_{T2}(000110)$, $V_{T3}(100100)$, $V_{T4}(100001)$, $V_{T5}(001001)$, $V_{T6}(011000)$ 。由 BBLDCM 运行机理可知, 转矩绕组 V、W 导通工作时, 转子径向悬浮力由悬浮绕组 a1、a2 提供, 则悬浮绕组 a1、b1、c1、a2、b2、c2 导通状态可以表示为 $V_{F1}(100100)$, 同理可得悬浮绕组其他状态: $V_{F2}(010010)$, $V_{F3}(001001)$ 。BBLDCM 根据霍尔位置传感器的 3 个输出信号 HA、HB、HC 的不同逻辑组合, 选择导通相应的转矩和悬浮控制绕组, 实现连续稳定悬浮运行。电机顺时针旋转绕组导通表如表 1 所示。电机逆时针旋转绕组导通表如表 2 所示。

表 1 电机顺时针旋转绕组导通表

HA	HB	HC	转矩绕组状态	悬浮绕组状态
1	0	1	$V_{T1}(010010)$	$V_{F2}(010010)$
1	0	0	$V_{T2}(000110)$	$V_{F1}(100100)$
1	1	0	$V_{T3}(100100)$	$V_{F3}(001001)$
0	1	0	$V_{T4}(100001)$	$V_{F2}(010010)$
0	1	1	$V_{T5}(001001)$	$V_{F1}(100100)$
0	0	1	$V_{T6}(011000)$	$V_{F3}(001001)$

表 2 电机逆时针旋转绕组导通表

HA	HB	HC	转矩绕组状态	悬浮绕组状态
1	0	1	$V_{T1}(100001)$	$V_{F2}(010010)$
1	0	0	$V_{T2}(001001)$	$V_{F1}(100100)$
1	1	0	$V_{T3}(011000)$	$V_{F3}(001001)$
0	1	0	$V_{T4}(010010)$	$V_{F2}(010010)$
0	1	1	$V_{T5}(000110)$	$V_{F1}(100100)$
0	0	1	$V_{T6}(100100)$	$V_{F3}(001001)$

以悬浮绕组 a1、a2 工作为例推导直接悬浮力绕组开关表。a1、a2 悬浮绕组工作时,可产生如图 3(a)所示的非零悬浮力矢量 F_{sa1} 、 F_{sa2} 、 $-F_{sa1}$ 、 $-F_{sa2}$,非零悬浮力矢量把平面划分为 4 个扇区,同时非零悬浮力矢量又可合成不同大小和方向的径向力 F_{a1} 、 F_{a2} 、 F_{a3} 、 F_{a4} 。当电涡流位移传感器检测到转子位移 (x, y) 位于扇区 III 时,选择径向力 F_{a1} 控制转子位移。同理可得到其他状态下的导通方式,可得直接悬浮力绕组开关表如表 3 所示。

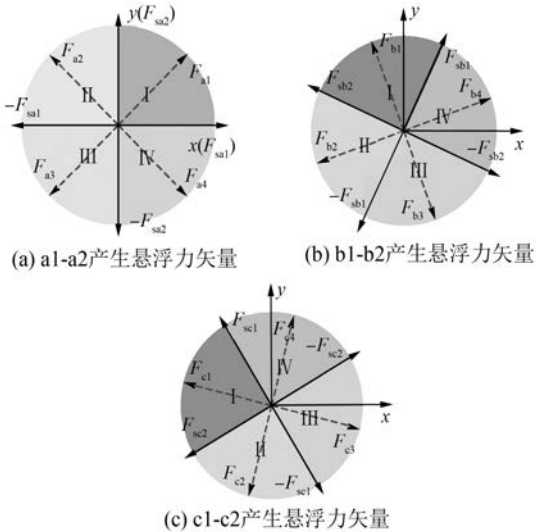


图 3 悬浮绕组产生悬浮力矢量

表 3 直接悬浮力绕组选择开关表

扇区	a 相导通	b 相导通	c 相导通
I	F_{a3}	F_{b3}	F_{c3}
II	F_{a4}	F_{b4}	F_{c4}
III	F_{a1}	F_{b1}	F_{c1}
IV	F_{a2}	F_{b2}	F_{c2}

2.2 悬浮力控制

对悬浮力闭环控制,首先需要对悬浮力进行观测,悬浮力的估算可采用式(4)~式(9)计算。同时,采用两点式悬浮力调节器,以实现电机转子悬浮控制的高动态性,如图 4 所示。

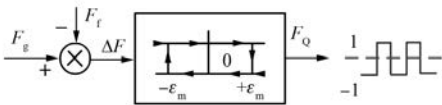


图 4 两点式悬浮力调节器

图 4 中,悬浮力调节器的输入量是悬浮力给定值 F_g 和悬浮力反馈值 F_f 的误差值 ΔF ,输出量 F_Q 是悬浮绕组的开关信号。 $\pm \epsilon_m$ 是两点式悬浮力调节器的容差,并应用离散的两点式控制方法。直接悬浮力工作过程如图 5 所示。

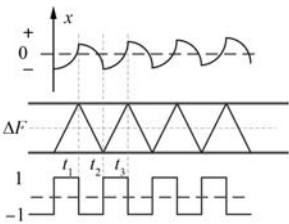


图 5 直接悬浮力工作过程

以单自由度 x 轴位移方向为例分析:在 t_1 时刻,转子偏心 $+x$ 方向,悬浮力的误差值小于调节器设定的容差下限 $-\epsilon_m$,此时两点式控制器控制 $F_Q = -1$ 。在 $F_Q = -1$ 的控制下,电机悬浮控制系统反向导通相应的悬浮绕组(这相悬浮绕组由电机转子位置信号决定),此时沿 $-x$ 的方向增大转子径向力,控制转子位移向中心偏移。在 t_2 时刻,转子沿 $-x$ 方向位移,悬浮力的误差小于控制器设定的上限值 $+\epsilon_m$,则两点式调节器控制 $F_Q = +1$ 。在 $F_Q = +1$ 的控制下,电机悬浮控制系统正向导通相应的悬浮绕组,使转子径向悬浮力沿 $+x$ 方向增加,调节转子位移向中心偏移。再到 t_3 时刻,重复 t_1 时刻的调节过程。转子在 y 轴向的

位移调节过程与之相同。由此可见,通过合理选择调节器的容差限 $\pm\epsilon_m$,即可把径向悬浮力的波动抑制在所允许的容差范围之内,最终达到电机转子稳定悬浮的目的。

2.3 悬浮控制子系统结构框图

BBLDCM 悬浮控制子系统的直接悬浮力控制结构框图如图 6 所示。

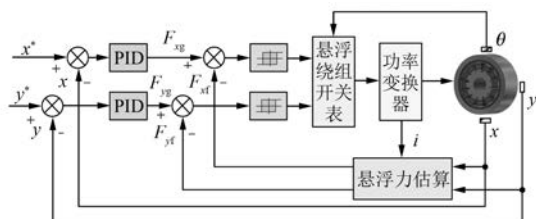


图 6 BBLDCM 悬浮子系统的直接悬浮力控制结构框图

图 6 中, x^* 、 y^* 分别是给定转子位移, x 、 y 是电涡流传感器实际检测的电机转子轴向位移。 F_{xg} 、 F_{yg} 是给定悬浮力, F_{xf} 、 F_{yf} 是转子实际径向悬浮力。位移误差 $x^* - x$ 和 $y^* - y$ 由 PID 调节器产生给定悬浮力 F_{xg} 、 F_{yg} , 悬浮力误差经过悬浮力两点式调节器输出悬浮绕组开关信号, 结合转子位置信号选择悬浮绕组导通相, 最后通过功率变换器控制电机的悬浮子系统。

3 仿真验证

根据 BBLDCM 的数学模型以及控制系统框图, 利用 MATLAB 软件, 搭建 BBLDCM 直接悬浮力控制系统仿真模型, 验证所提控制策略。BBLDCM 模型设置参数: 起始时间为 0, 终止时间为 2 s, 转子 x 轴向起始位移为 0.2 mm, 转子 y 轴向起始位移为 -0.2 mm, 转速设定为 6 000 r/min, 转子重 0.5 kg, J 设置为 0.005 kg/m², 悬浮绕组电阻为 1.5 Ω 。

3.1 无干扰时转子悬浮运行分析

传统控制算法转子位移曲线如图 7 所示。

转子在传统控制算法运行工作时, 初始转子以最大位移幅值 -0.12 mm 沿 x 轴向波动, 以最大位移 0.11 mm 沿 y 轴向波动。在 0.3 s 时刻之后转子稳定悬浮, 且转子稳定悬浮在 -0.06 ~ 0.07 mm 之间, 稳定悬浮最大抖动幅值为 0.13 mm。

新型直接悬浮力控制转子位移曲线如图 8 所示。

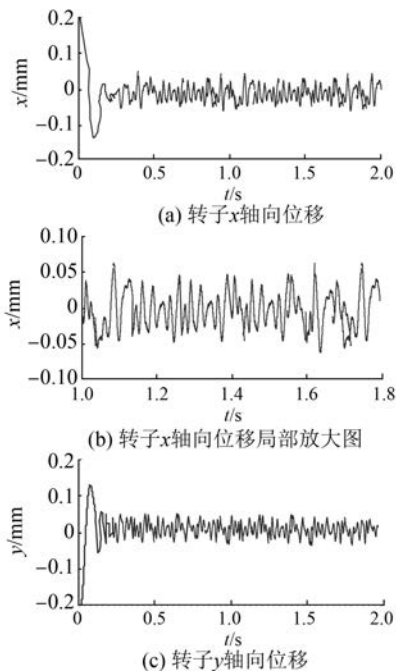


图 7 传统控制算法转子位移曲线

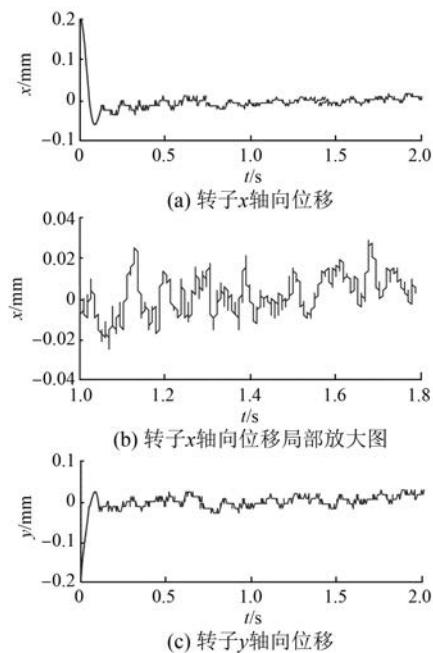


图 8 新型直接悬浮力控制转子位移曲线

转子在新型直接悬浮力控制运行时, 初始转子 x 轴向最大位移波动幅值在 -0.060 mm, y 轴向最大位移幅值 0.050 mm。在 0.3 s 时刻之后转子稳定悬浮, 且转子稳定悬浮在 -0.025 ~ 0.030 mm 之间, 最大抖动幅值为 0.055 mm。相较于传统控制算法, 该

算法有效地削弱了转子抖动幅值 58%。

3.2 施加干扰时转子悬浮运行分析

干扰下的转子位移曲线如图 9 所示。

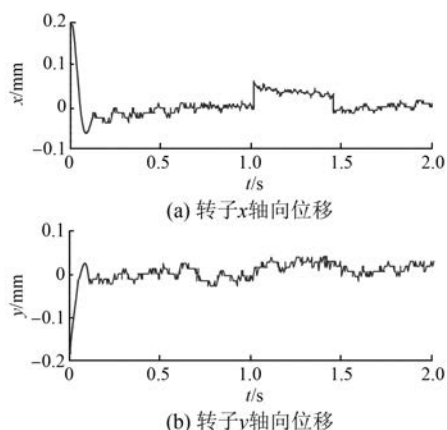


图 9 干扰下的转子位移曲线

转子在新型直接悬浮力控制运行时,在 1 s 时刻施加于 x 轴向位移持续 0.5 s 的 1 N 干扰力。干扰开始时,转子以最大位移幅值 -0.06 mm 沿 x 轴向波动,以最大位移幅值 0.05 mm 沿 y 轴向波动。在 0.3 s 时刻之后转子稳定悬浮。施加干扰力之后, x 轴向发生位移为 0.05 mm, y 轴向产生 0.03 mm 的波动,并逐渐恢复稳定。

4 结 语

针对 BBLDCM 悬浮子系统控制精度低、控制复杂且难度大的问题,提出了新型的 BBLDCM 直接悬浮力控制策略,推导了悬浮绕组控制开关表,阐明了新型直接悬浮力工作原理和调节过程。在 Simulink 中进行仿真,仿真结果表明:该新型控制策略不仅可以实现转子稳定悬浮,而且具有较好的动静态性能,还有效地削弱了转子悬浮抖动。同时,该方法结构简单、实现容易,为磁悬浮电机的悬浮力控制提供了一条新的途径。

【参考文献】

[1] 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.
[2] OKADA Y, UENO S, OHISHI T, et al. Magnetically levitated motor for rotary blood pumps[J]. Artificial

Organs, 1997, 21(7): 739-745.

[3] 朱焜秋,张伟霞,费德成,等.磁悬浮无轴承电动机发展、应用和前景[J].微特电机,2006,34(3): 39-41.
[4] 黎海文,白越,贾宏光,等.用于小卫星姿态控制的磁悬浮电机设计[C]//2004 精密工程学术研讨会,2004: 307-311.
[5] 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.
[6] 朱焜秋,单龙.无轴承无刷直流电机悬浮力新型控制策略[J].江苏大学学报(自然科学版),2015,36(2): 209-214.
[7] DENG Z, ZHANG H, WANG X, et al. Nonlinear decoupling control of the bearingless induction motors based on the airgap motor flux orientation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2002, 15(1): 38-43.
[8] 方晓厅,卢健康,高扬,等.磁悬浮无轴承无刷直流电动机控制及仿真研究[J].微电机,2006,39(1): 66-68.
[9] 年珩,贺益康,黄雷.内插式永磁无轴承电机转子位置/位移综合自检测[J].中国电机工程学报,2007,27(9): 52-58.
[10] 年珩,贺益康.永磁型无轴承电机无径向位移传感器运行研究[J].电工电能新技术,2006,25(4): 15-18.
[11] 仇志坚,邓智泉,章跃进.交替极永磁无轴承电机的直接悬浮力控制[J].电工技术学报,2011,26(9): 94-99.
[12] 夏长亮,张茂华,王迎发,等.永磁无刷直流电机直接转矩控制[J].中国电机工程学报,2008,28(6): 104-109.
[13] PAN H, GU M, GU J. A kind of simplified structure direct torque control method for brushless DC motor [C] // Third International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, IEEE, 2014: 1480-1483.
[14] 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.
[15] SUN Y, YANG F, YUAN Y, et al. Control of out-rotor bearingless brushless DC motor[C]//2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation, IEEE, 2017: 624-627.

收稿日期: 2018-04-25