

无轴承开关磁阻电机实验平台的设计与实现

杨 钢, 邓智泉, 张 媛, 曹 鑫, 王晓琳

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

The Design and Realization of Experiment Platform of a Bearingless Switched Reluctance Motor

YANG Gang, DENG Zhi-quan, ZHANG Yuan, CAO Xin, WANG Xiao-lin

(Aero-Power Sci-Tech Center, College of Automation and Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The bearingless technology has been applied to the switched reluctance motor, which could fully enhance its high-speed performance and broaden its applied fields of miniature and large power. The principles of radial force generation and mathematical model of the bearingless switched reluctance motor are analyzed briefly. In view of the control characteristics of electromagnetic torque and radial force, an experimental platform of digital and analog control system for real-time control is designed based on DSP(TMS320LF2407A). The experimental platform consists of a bearingless switched reluctance prototype motor, DSP digital controller, current hysteresis loop controller, PID controller, power inverter, sensors and correlative assistant circuit, whose principles of work are analyzed. Based on the platform, the system program is designed and program flow charts of most interrupt service routines are given. Test results of an experimental platform including hardware and software show the good performance of the suspension.

KEY WORDS: switched reluctance motor; bearingless; levitation winding; mathematical model; digital signal processor control; power inverter

摘要: 将无轴承技术应用于开关磁阻电机中可充分发挥该电机的高速适应性, 并拓宽其在微型和大功率领域中的应用。该文在已有数学模型基础上, 针对其电磁转矩和悬浮力的控制特点, 设计了以 DSP-LF2407A 为控制核心的数模混合控制实验平台。实验平台包括无轴承开关磁阻电机本体、DSP 数字控制器、电流滞环控制器、PID 调节单元、3 套功率逆变器、传感器和相关辅助电路, 并对其工作原理进行了分析。在此基础上设计了控制系统的软件, 并给出了主要子程序的流程图。通过对整个实验平台硬软件的联合调试, 实现了无

轴承开关磁阻电机的稳定悬浮。

关键词: 开关磁阻电机; 无轴承; 悬浮绕组; 数学模型; 数字信号处理器控制; 功率逆变器

0 引言

高速和超高速电机日益广泛地应用于高速机床、飞轮储能以及压缩机等工业设备中。磁轴承具有无摩擦、无磨损、高速度、高精度、长寿命等一系列优良特性, 在高速驱动领域获得了广泛应用。但由于其本身占有相当的轴向空间, 因此制约了高速电机的微型化, 使电机的临界转速和输出功率受到很大限制。而近些年发展起来的无轴承技术则是高速电机研究领域的一大突破, 它将悬浮绕组叠绕在电机定子中, 不占有额外轴向空间。它不仅继承了磁轴承的优点, 而且可较大幅度地减小电机体积和重量, 提高可靠性, 可突破更高转速和大功率的限制, 因而在很大程度上拓宽了高速电机的应用领域^[1-17]。

开关磁阻电机由于转子上无绕组、结构简单、成本低、易于调速、维护方便等特点, 非常适合于高速运行, 尤其在飞机起动发电机等方面有独特的应用价值^[18-22]。但其运行时产生的振动和噪声是该电机应用的主要障碍, 研究开关磁阻电机的无轴承技术不仅可充分发挥该电机的高速适应性, 并且由于对转子径向位置的控制而有望改善其因不对称磁拉力造成的振动和噪声问题^[7]。由于以上诸多优点, 使无轴承开关磁阻电机在航空高速、超高速起动发电机方面具有较大的应用优势。

相对于普通开关磁阻电机, 无轴承开关磁阻电机定子同时具有主绕组和两套悬浮绕组, 是一个更

基金项目: 航空基础科学基金项目(05F52044)。

为复杂的非线性系统,要实现无轴承开关磁阻电机的稳定运行,控制系统的设计尤为重要,特别是硬件必须综合设计,协调配合。由于磁悬浮机理和控制系统的复杂性,目前只有日本学者初步掌握了开关磁阻电机的无轴承技术^[7-11]。

本文以一台 12/8 结构的无轴承开关磁阻电机为研究对象,简要介绍了无轴承开关磁阻电机的磁悬浮机理和已有的数学模型。在此基础上研究了电磁转矩和悬浮力的控制方法,设计了以功率逆变器和 DSP 为核心的控制系统实验平台,通过对整个实验平台的调试,实现了实验样机的稳定悬浮。

1 无轴承开关磁阻电机的悬浮机理及其数学模型

1.1 悬浮力产生原理

无轴承开关磁阻电机悬浮力产生原理与磁轴承悬浮原理相似,也是利用麦克斯韦力实现转轴悬浮。图 1 是 12/8 结构无轴承开关磁阻电机径向悬浮力产生原理图(以 A 相为例)^[7-11]。如图 1 所示,无轴承开关磁阻电机采用集中绕组,每个定子凸极上有 2 套绕组,①主绕组 N_{ma} ,由 4 个正对凸极上的主绕组串联而成;②悬浮绕组,分为 a 方向悬浮绕组 N_{s1} 和 b 方向悬浮绕组 N_{s2} ,分别由各自方向两个正对凸极上的悬浮绕组串联而成。图 1 中 i_{ma} 、 i_{s1} 、 i_{s2} 分别是主绕组 N_{ma} 和悬浮绕组 N_{s1} 、 N_{s2} 的电流,下标“+”代表流入,“-”代表流出。粗实线代表主绕组电流 i_{ma} 产生的对称四极磁通,粗虚线代表悬浮绕组电流 i_{s1} 产生的对称二极磁通。

各绕组通入如图所示方向电流时,在气隙 1 处,主绕组 N_{ma} 和悬浮绕组 N_{s1} 产生的磁场方向相反,磁密减弱;在气隙 2 处,两套绕组产生的磁场方向相同,磁密增强。这样,叠加的磁场就会在 a 方向

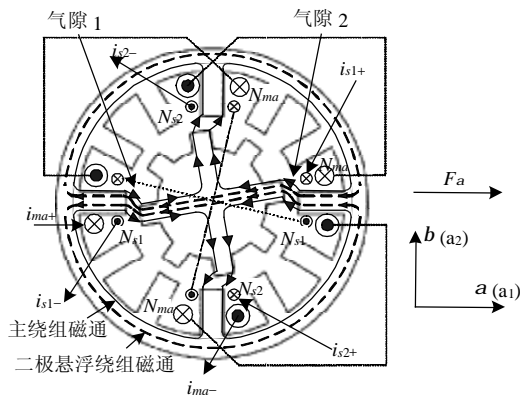


图 1 无轴承开关磁阻电机径向力产生原理图

Fig. 1 Principle of radial force production of a bearingless switched reluctance motor

上产生一个作用于转子轴的径向力 F_a , 方向向右。如果主绕组电流不变,改变悬浮绕组 N_{s1} 输入电流 i_{s1} 的方向,则可产生方向向左的径向悬浮力。同样,在 b 方向上也可产生作用于转子轴的径向悬浮力 F_b 。通过转子位移的负反馈控制,可控制沿任意方向、大小的径向悬浮力来实现转轴悬浮。该原理可同样推广到 B 相和 C 相。

1.2 数学模型

文献[7-11]中,首先用有限元法得到气隙磁导的解析表达式,然后根据等效磁路原理推导出用气隙磁导表示的绕组电感矩阵,进而得到磁场储能的表达式,最后根据电能量转换原理得出悬浮力和转矩的表达式,其结果如下^[7]:

$$F_a = \frac{\partial W_a}{\partial a} = N_m N_b \left(\frac{m_0 h r (\pi - 12q)}{6l_0^2} + \frac{32m_0 h c r q}{\pi(4c r q(l_0 + a) + \pi l_0^2)} \right) i_{ma} i_{s1} \quad (1)$$

$$F_b = \frac{\partial W_a}{\partial b} = N_m N_b \left(\frac{m_0 h r (\pi - 12q)}{6l_0^2} + \frac{32m_0 h c r q}{\pi(4c r q(l_0 + b) + \pi l_0^2)} \right) i_{ma} i_{s2} \quad (2)$$

式中: q 为转子位置角(定转子齿轴线重合处为零度); h 为电机定子轴向长度; r 为转子极半径, m_0 表示真空中磁导率; l_0 表示平均气隙长度; a 为电机转子水平方向位移量; b 为电机转子垂直方向位移量; c 为常数 $c=1.49$ 。式(1)和(2)中括号内的第 1 项在数值上远大于第 2 项,所以悬浮力表达式可简化为^[7,10-11]:

$$\begin{bmatrix} F_a \\ F_b \end{bmatrix} \approx i_{ma} \begin{bmatrix} K_f(q) & 0 \\ 0 & K_f(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $K_f(q)$ 为:

$$K_f(q) = \left(\frac{m_0 h r (\pi - 12q)}{6l_0^2} + \frac{32m_0 h c r q}{\pi(4c r l_0 q + \pi l_0^2)} \right) \quad (4)$$

从以上简化后的悬浮力表达式可以看出,悬浮力和转子的径向位移量无关,而是和主绕组电流、悬浮绕组电流、转子位置角及电机参数有关。该简化对数学模型的精确性影响很小,且有利于简化控制^[7]。同理,可导出 B 相和 C 相绕组产生的径向悬浮力。

根据机电能量转换原理,由磁场储能 W_a 对 q 求偏导,即为 A 相绕组作用时的电磁转矩^[8-11]:

$$T_a = J_t(q) (2N_m^2 i_{ma}^2 + N_b^2 i_{s1}^2 + N_b^2 i_{s2}^2) \quad (5)$$

其中 $J_t(q)$ 为转子位置角和电机参数的函数^[10]。

对 A 相瞬时转矩在一个开通周期内求平均得平均电磁转矩为 T_{avg} 。 T_{avg} 的结果包括 2 部分，主绕组平均转矩 T_{mavg} 和悬浮绕组平均转矩 T_{savg} ^[8-11]：

$$T_{avg} = \frac{3}{\pi/4} \int_{q_{on}}^{q_{off}} T_a dq = T_{mavg} + T_{savg} = G_{tm}(q_m) i_{ma}^2 + G_{ts}(q_m) F^2 / i_{ma}^2 \quad (6)$$

式中： $q_{on} = -\frac{\pi}{24} - q_m$ ； $q_{off} = \frac{\pi}{24} - q_m$ ； $F^2 = F_a^2 + F_b^2$ ；

q_m 为主绕组方波电流导通周期的中点位置和定转子对中位置轴线之间的夹角。

其中 $G_{tm}(q_m)$ 、 $G_{ts}(q_m)$ 为转子位置角和电机参数的函数。此原理同样适用于 B 相和 C 相。

2 控制系统设计

2.1 控制原理

无轴承开关磁阻电机要实现转子稳定悬浮，控制系统的设计至关重要。根据上述数学模型，可以看出电磁转矩是主绕组电流、悬浮力、开通角以及电机参数的函数，悬浮力与主绕组电流和悬浮绕组电流的乘积成比例，确定控制原理如图 2。

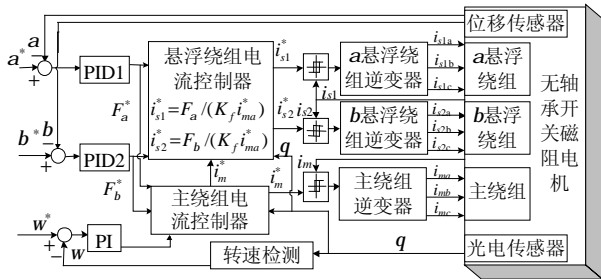


图 2 无轴承开关磁阻电机控制原理框图
Fig. 2 Control block diagram of a bearingless switched reluctance motor

根据所需悬浮力 F 和转矩 T_{avg} ，由转矩脉动最小原则下确定 q_m ^[11]，然后由式(29)，求得主绕组电流，再由式(20)求得悬浮绕组电流。最后通过相应的逆变器去控制绕组实际电流，进而控制所需悬浮力和转矩。悬浮力 F 是由位移反馈经 PID 调节后得到；转矩 T_{avg} 由转速反馈经 PI 调节后得到。

本系统实验样机转子齿个数为 8 个，则绕组电感曲线的周期为 $T=360^\circ/8=45^\circ$ ，所以三相绕组导通宽度必须大于等于 15° 才能保证任何时刻至少有一相绕组在工作。但若导通宽度大于 15° ，则必会在某些时刻有两相同时工作，虽可增大悬浮力，但会带来负转矩，增加负面效应，并且还得考虑悬浮力如何在两相中分配的问题，加大控制难度，所以最终选择单拍工作方式，每相导通 15° 的控制策略。

图 3 为 $q_m=0^\circ$ ，力为恒值时，A 相导通时电感电流示意图。

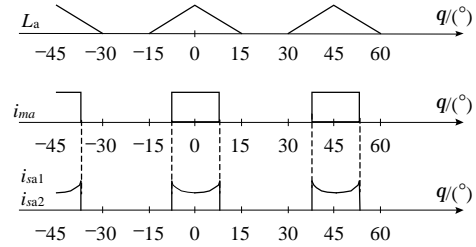


图 3 A 相电感电流示意图
Fig. 3 Sketch map of inductance and current

2.2 硬件系统

由控制原理图，可确定控制系统的硬件构成。图 4 为无轴承开关磁阻电机硬件系统框图，主要包括：无轴承开关磁阻电机本体、DSP 数字控制器、电流滞环控制器、PID 调节单元、三套功率逆变器、传感器和相关辅助电路。

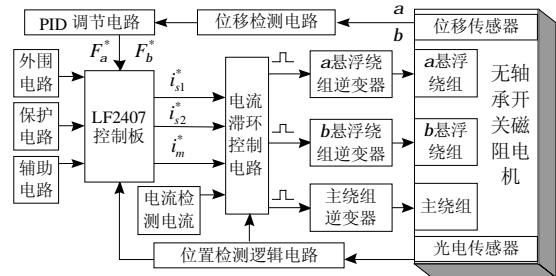


图 4 无轴承开关磁阻电机硬件系统框图
Fig. 4 Hardware block diagram of a bearingless switched reluctance motor

(1) 数字控制器。

由数学模型和控制原理知，与一般开关磁阻电机相比，无轴承开关磁阻电机既要控制转矩，又要控制悬浮力，主绕组和悬浮绕组电流必须实时控制，因此要实现稳定悬浮，其核心控制芯片必须具备 PWM 输出、A/D 转换等外围接口，能够实时处理复杂运算。本系统采用 TMS320F2407A 芯片作为控制系统的核心部件，其是 TI 公司专用于电机控制(DMC)的数字信号处理芯片，它把特别适合于电机控制用的外围设备和具有低成本、高性能处理能力的 CPU 内核结合在一起，使其能满足无轴承电机的控制要求^[19-20]。

(2) 主绕组功率逆变器。

无轴承开关磁阻电机系统中的功率逆变器是向绕组提供能量的单元，其要求与普通开关磁阻电机功率变换器有相似性又有特殊性。

由无轴承开关磁阻电动机的基本悬浮原理知道，主绕组既产生旋转转矩，使电机旋转，又提供

产生悬浮力的偏置磁场,与悬浮绕组产生的磁场相互作用产生麦克斯韦力,使转子轴悬浮。因此悬浮力的大小与方向,与主绕组电流和悬浮绕组电流的大小和方向均有关。从理论上讲,要控制悬浮力,主绕组电流和悬浮绕组电流有多种组合方式,但为简化控制方案,本系统是在保持主绕组电流方向不变的前提下,通过调节悬浮绕组电流的大小和方向,以及主绕组电流的大小来控制悬浮力的大小和方向。因此,主绕组电流大小变化,方向不变,与普通开关磁阻电机绕组中的电流特点相似。为减少功率逆变器控制复杂度以及未来更多控制策略(两相绕组同时供电)的实现,所以选用不对称半桥电路作为主绕组的功率逆变器电路,如图5所示。其特点是:每相有2个主开关管和2个续流二极管,可同时开通或关断;开关管的电压定额为 U_m ;全压控制相绕组电流;桥臂不存在直通现象;相与相之间完全独立;控制简单可靠等。

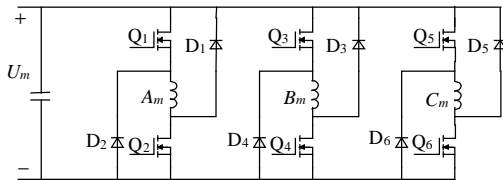


图5 主绕组功率逆变器电路

Fig. 5 Power inverter circuit of main winding

主绕组采用斩波控制方式,因电流为滞环控制,希望功率器件有尽可能高的开关频率,所以主绕组功率器件采用功率场效应管 MOSFET,驱动芯片为 IR2110,环宽为 0.1A。

(3) 悬浮绕组功率逆变器。

当主绕组电流一定时,通过控制悬浮绕组电流就可控制径向悬浮力。为实现稳定悬浮,悬浮绕组功率逆变器,必须能提供大小可调,方向可变的电流。这样的功率电路拓扑通常有几种形式:三相全桥电路、三相半桥电路、三单相全桥电路等^[21]。三相全桥电路简单,但若同时要控制绕组电流大小和方向,需两相同时工作,这使其应用于本系统时受到很大限制;而三单相全桥虽控制灵活,但是需12个开关管,数量较多,器件成本太高。而三相半桥电路,其特点是控制灵活,每相可以独立控制,通过对主开关管的导通和关断,可同时控制负载电流大小和方向,所需开关器件为6个,但是需要两个分裂电容。综合以上几种电路特点及悬浮绕组功率逆变器要求,在本系统中功率电路拓扑采用三相半桥电路。*a*悬浮绕组功率逆变器电路图如图6所示。

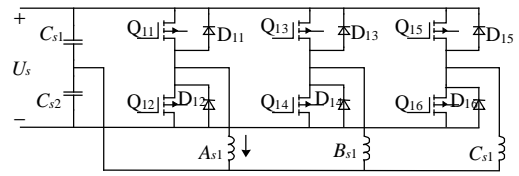


图6 *a*悬浮绕组功率逆变器电路

Fig. 6 Power inverter circuit of Levitated winding 'a'

当绕组(以A相为例)需要通过如图所示方向电流时,闭合 Q_{11} ;反之,则闭合 Q_{12} 。

在本系统中,无轴承开关磁阻电机采用单拍工作方式,各相之间相互独立。*a*绕组和*b*绕组分别采用一套功率逆变器,结构相同,控制信号均来自DSP控制器。电流为滞环控制,环宽为0.1A,功率器件均采用功率场效应管 MOSFET,驱动芯片为 IR2110。

(4) 滞环控制器。

本系统只用一片 DSP 处理芯片,同时要实时控制输出转矩和所需悬浮力,为了简化控制系统的复杂度,方便悬浮绕组电流计算,保证实时性,主绕组采用方波电流控制方式。而悬浮绕组电流则根据所需悬浮力和主绕组电流值,由式(20)计算而得。系数 $K_f(q)$ 采用查表方式获得。由于本系统电流控制要求的特殊性,不同于异步机或同步机的正弦信号(如图5),所以采用电流滞环控制方式。利用其具有动态响应快、硬件电路简单、瞬时电流可以控制等特点,实时控制悬浮绕组电流大小,以产生相应的悬浮力。

(5) 调节单元。

为保证无轴承开关磁阻电机稳定悬浮,如图2所示,在控制系统中,采用位置闭环控制和速度闭环控制。由于PID控制简单,易于实现,位移反馈采用PID调节,得到所需悬浮力;转速反馈经PI调节,得到所需转矩,然后由DSP去控制绕组电流,实现闭环控制。

为减小DSP运算负担,增加控制的实时性,位置闭环控制中的PID调节采用模拟电路来实现,而速度闭环控制中,速度信号是通过DSP定时器程序计算获得,为数字量,所以其PI调节采用数字方式。

此外,对实现无轴承开关磁阻电机高精度悬浮控制影响较大的另一个环节是对转轴位移变量的实时检测。本文采用电涡流位移传感器检测转轴位移,它的标准灵敏度为16V/mm,灵敏度误差不大于1.5%,分辨率为0.05 μ m,额定工作电压-24V。

为了防止温漂等因素的影响，采用两个传感器的差分信号作为位置反馈信号。最后反馈信号通过 PID 调节电路送往 DSP 的模数转换口转换为数字量，由软件来实现位置闭环控制。

2.3 软件部分

鉴于本系统的复杂性和实时性，实验平台控制系统软件部分全部采用汇编语言编写，模块化编程。这不仅提高了 DSP 的运行效率，而且增加了程序的通用性和可移植性，有利于系统的维护改进。

DSP 完成的主要功能是计算主绕组电流和悬浮绕组电流。位移信号经 PID 调节后，得到所需悬浮力，然后根据悬浮力和所需转矩，查表计算出主绕组电流和悬浮绕组电流，再送给滞环控制器，去控制绕组实际电流。

DSP 程序主要包括初始化程序、主程序、捕获中断服务子程序、保护中断服务子程序和 3 个定时器服务子程序等。程序运行时，经初始化后，运行主程序，处于等待状态，以随时响应中断服务子程序。

捕获中断服务子程序，主要任务是启动 T1 定时器，读入捕获值，根据捕获值计算转速。

保护中断服务子程序，主要任务是过压过流保护，封锁所有的输出信号。

T1 定时器是控制从相捕获中断发生到相开通所需的时间。其服务子程序如图 7 所示。T1 定时器中断服务子程序主要是执行主绕组电流的给定输出和第 1 次悬浮绕组电流的给定值输出。在控制过程中，每相导通 15°，悬浮绕组电流共控制 32 次，

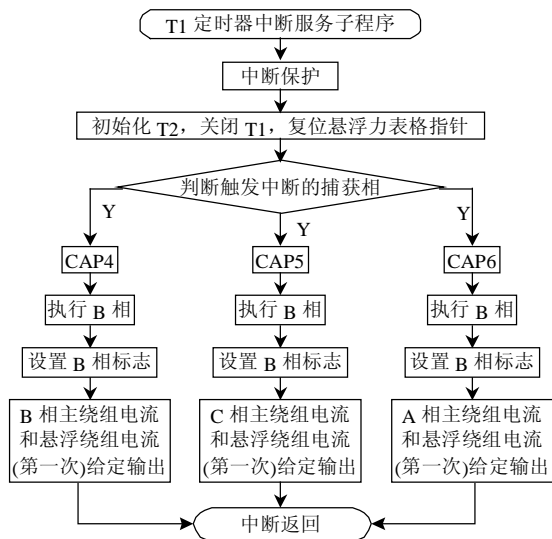


图 7 T1 中断服务子程序
Fig. 7 T1 interrupt service routine

第 1 次输出值在 T1 定时器服务子程序中给出。

T2 定时器是控制悬浮绕组电流刷新周期。其中断服务子程序主要是实现悬浮绕组电流的给定输出，如图 8 所示。

T4 定时器是控制整个系统的控制周期。其中断服务子程序主要功能是实现控制算法，实时更新控制参数，如图 9 所示。

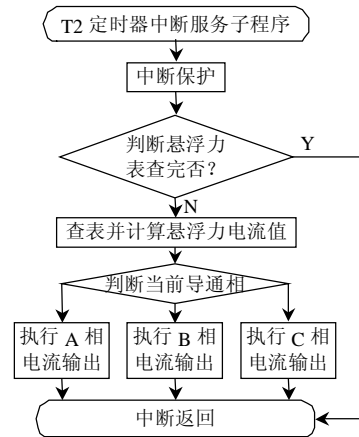


图 8 T2 中断服务子程序
Fig. 8 T2 interrupt service routine

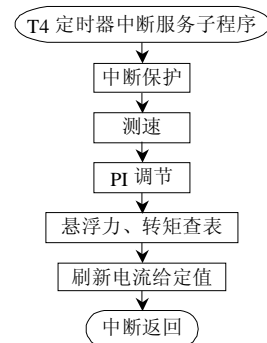


图 9 T4 中断服务子程序
Fig. 9 T4 interrupt service routine

3 实验结果

3.1 实验样机

基于以上设计方案，本文研制了无轴承开关磁阻电机控制系统实验平台，并在实验样机上进行了调试。以下实验是在空转矩负载条件下进行，转轴本身有重量，相当于施加了一个 Y 方向的悬浮力负载。

图 10 为实验样机外观图，电机部分参数如下：定转子为 12/8 结构，定子铁心外径 145mm，定子轭部直径 130mm，定子铁心内径 77mm，转子极半径 38.25mm，转子轭部直径 46mm，转轴直径 30mm，轴向长度 95mm，定、转子极弧 15°，平均气隙长

度 0.25mm。电枢绕组: 4 极集中主绕组, 22 匝, 三根导线并绕, 额定电压 90V, 最大电流 21A; 悬浮绕组: 2 极集中悬浮绕组, 18 匝, 两根导线并绕, 额定电压 180V, 最大电流 14A。电机转子一端(图 10(a)中左端)采用调心球轴承, 而另外一端(图 10(a)中右端)装有辅助轴承, 辅助轴承和转子轴间的平均气隙为 0.15mm, 如图 10(b)中所示。

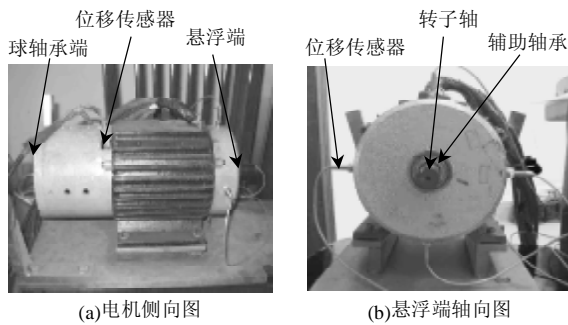


图 10 电机外观图

Fig. 10 Photograph of the motor

3.2 实验结果与分析

图 11(a)和(b)分别是转轴在稳态转速 400r/min 和 2000r/min 时, 沿 $a(X)$ (通道 1)和 $b(Y)$ (通道 2)轴的径向位移以及悬浮绕组 N_{s1} (通道 3)和 N_{s2} (通道 4)的电流波形。通道 1、2 纵轴刻度为 $62.5\mu\text{m}/\text{格}$, 通道 3、4 纵轴刻度为 $4\text{A}/\text{格}$ 。

从位移波形可以看出, 转轴在 a 和 b 方向上总的位移跳动范围均小于 $100\mu\text{m}$, 悬浮时观察辅助轴承一端, 可以看到辅助轴承静止, 不随转子的转动而转动, 这说明转轴已与辅助轴承脱离, 没有任何机械接触, 平稳悬浮在空中。

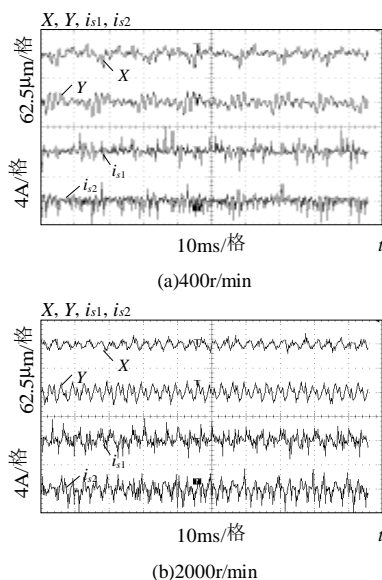


图 11 径向位移和电流波形

Fig. 11 Waveforms of radial displacement and current

4 结论

无轴承开关磁阻电机作为一种新型的高速电机, 是一个复杂的多变量非线性系统。针对其控制系统特点, 本文设计了一套以 DSP 为核心的数模混合控制系统实验平台, 其硬件电路结构合理、可靠; 软件采用模块化设计, 流程清晰。实验证明该实验平台具有很好的稳定性和实时处理能力, 达到了无轴承开关磁阻电机悬浮控制要求。

参考文献

- [1] 邓智泉, 严仰光. 无轴承交流电机的基本理论和研究现状[J]. 电工技术学报, 2000, 15(2): 29-35.
Deng Zhiquan, Yan Yangguang. The main theory and status of AC bearingless motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(2): 29-35(in Chinese).
- [2] Bosch R. Development of a bearingless electric motor[C]. Proc. Int. Conf. Electric Machines(ICEM'88), Pisa, Italy, 1988: 373-375.
- [3] Bichsel J. The bearingless electrical machine[C]. Proc. Int. Symp. Magnetic Suspension Technology. NASA Langley Res. Center, Hampton, 1991: 561-573.
- [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] 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).
- [6] 邓智泉, 张宏荃, 王晓琳, 等. 无轴承异步电机悬浮子系统独立控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 107-111.
Deng Zhiquan, Wang Xiaolin, Zhang Hongquan, et al. Study on independent control of the levitation subsystem of bearingless induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 107-111(in Chinese).
- [7] Takemoto M, Shimada K, Chiba A, et al. A design and characteristics of switched reluctance type bearingless motors[C]. Proc. NASA/CP-1998-207654, Gifu, Japan, 1998: 49-63.
- [8] 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 bearingless switched reluctance motor [J]. Proceeding of the CSEE, 2005, 25(9): 139-146(in Chinese).
- [9] Takemoto M, Suzuki H, Chiba A, et al. Improved analysis of a bearingless switched reluctance motor[J]. IEEE Trans. on Industry Application, 2001, 37(1): 26-34.
- [10] Takemoto M, Chiba A, Fukao T. A new control method of bearingless switched reluctance motors using square-wave currents [C]. Proceedings of the 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore, 2000: 375-380.
- [11] Takemoto M, Chiba A, Fukao T. A method of determining advanced angle of square-wave currents in a bearingless switched motor

- [J]. IEEE Trans. on Industry Application, 2001, 37(6): 1702-1709.
- [12] 杨静, 虞烈, 谢敬. 永磁偏置磁轴承特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 122-125.
Yang Jing, Yu Lie, Xie Jing. Study on dynamics of permanent magnet biased magnetic bearing[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 122-125(in Chinese).
- [13] 张宏荃, 邓智泉, 王晓琳, 等. 无轴承异步电动机的实现[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(11): 1490-1493.
Zhang Hongquan, Deng Zhiquan, Wang Xiaolin, et al. Accomplishment of bearingless induction motor system[J]. Journal of Harbin Institute of technology, 2004, 36(11): 1490-1493(in Chinese).
- [14] 仇志坚, 邓智泉, 严仰光. 无轴承永磁同步电机的原理及实现[J]. 电工技术学报, 2004, 19(11): 8-13.
Qiu Zhijian, Deng Zhiquan, Yan Yangguang. Principle and realization of bearingless permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(11): 8-13(in Chinese).
- [15] 王晓琳, 邓智泉, 严仰光. 一种新型的五自由度磁悬浮电机[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(2): 210-214.
Wang Xiaolin, Deng Zhiquan, Yan Yangguang. Innovative motor with five-degree magnetic suspension[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 36(2): 210-214(in Chinese).
- [16] 王凤翔, 王宝国, 徐隆亚. 一种新型混合转子结构无轴承电动机磁悬浮力的矢量控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 98-103.
Wang Fengxiang, Wang Baoguo, Xu Longya. Levitation force vector control of a novel bearingless motor with hybrid rotor structure [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 98-103(in Chinese).
- [17] 年珩, 贺益康, 秦峰, 等. 永磁型无轴承电机的无传感器运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 101-105.
Nian Heng, He Yikang, Qin Feng, et al. Sensorless operation of PM type bearingless motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 101-105(in Chinese).
- [18] Barnes M, Pollock C. Power electronic converters for switched reluctance drives[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1998, 13(6): 1100-1111.
- [19] 叶霜. 无轴承开关磁阻电机的基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.
Ye Shuang. Research on bearingless switched reluctance motors [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003(in Chinese).
- [20] 杨钢. 无轴承开关磁阻电机实验平台的开发与研制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2003.
Yang Gang. Study on the experimental system of the bearingless switched reluctance motors[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003(in Chinese).
- [21] 王川云. 双凸极无刷直流起动发电系统起动控制的研究与实现 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
Wang Chuanyun. Study on starting operation of doubly salient brushless DC starter/generator system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002(in Chinese).
- [22] 刘迪吉等. 开关磁阻调速电动机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.

收稿日期: 2006-08-20。

作者简介:

杨 钢(1975—), 男, 山东淄博人, 博士研究生, 研究领域为无轴承开关磁阻电机, 高速电机, sdzbyg@yahoo.com.cn;

邓智泉(1969—), 男, 湖北黄冈人, 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;

张 媛(1982—), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 研究领域为无轴承开关磁阻电机;

曹 鑫(1981—), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 研究领域为无轴承开关磁阻电机;

王晓琳(1976—), 男, 四川内江人, 讲师, 研究领域为无轴承电机研究及其控制系统设计, 电机调速。

(责任编辑 云爱霞)

致 谢

本课题由南航博士学位论文创新与创优(BCXJ05-04)基金资助, 特此致谢!