

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2011.06.003

# 密封泵中无轴承永磁同步电动机的试验研究

朱焜秋, 左文全, 吕艳博, 付向东

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 为解决密封泵系统中泵体的密封性问题, 提出采用无轴承电动机替代传统电机构成新型无轴承密封泵方案, 研制无轴承电动机成为其关键。阐述了无轴承密封泵中永磁型无轴承电动机转子悬浮原理, 并给出电磁转矩和径向悬浮力数学模型。根据无轴承永磁同步电动机控制系统功能框图, 构建无轴承永磁同步电动机数字控制系统, 为了使控制系统软件与硬件之间互相配合, 设计并使用人机交互界面对无轴承永磁同步电动机控制系统中转速、PID 控制器等参数进行实时在线调试和控制。样机试验结果表明: 使用人机交互界面进行试验调试, 能够快速达到预期目标, 转子转速为 1 200 r/min, 转子轴心在平衡位置中心(0, 0)附近振动, 径向偏心位移振幅值控制在 50  $\mu\text{m}$  范围之内, 满足对无轴承永磁同步电动机数字控制系统进行实时在线调试和控制的要求。对无轴承密封泵的研制与应用具有重要的理论意义和实用价值。

**关键词:** 密封泵; 无轴承电动机; 永磁同步电动机; 径向悬浮力; 人机交互界面

**中图分类号:** S277.9; TQ051.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2011)06-0471-06

## Experiment research on bearingless permanent magnet synchronous motor in canned pump

Zhu Huangqiu, Zuo Wenquan, Liu Yanbo, Fu Xiangdong

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract:** It was proposed that sealing problems existed in the traditional canned pumps could be solved by using bearingless canned pumps. Introducing the principle of rotor suspension of a bearingless permanent magnet synchronous motor (BPMSM), the mathematical models of electromagnetic torque and radial suspension forces were given. According to the BPMSM control system function block diagram, the digital control system was described. In order to make software and hardware of the BPMSM control system work in coordination, the human-computer interaction interface based on the BPMSM control system for real-time online debugging and control was designed and used. The experimental results showed that the human-computer interaction interface for debugging and controlling the system can achieve the design goal quickly, at a rotation speed of 1 200 r/min, the central line of the rotor-shaft oscillates near the equilibrium position (0, 0), the vibration amplitude of radial displacement is controlled in the range of 50  $\mu\text{m}$ . Both have met the requirements for the real-time online debugging and control in the BPMSM control system. Such a human-computer interface not only has important theoretical significance but practical value.

**Key words:** canned pump; bearingless motor; permanent magnet synchronous motor; radial suspension force; human-computer interaction interface

收稿日期: 2011-05-14

基金项目: 国家 863 计划项目(2007AA04Z213); 国家自然科学基金资助项目(60974053)

作者简介: 朱焜秋(1964—)男, 江苏靖江人, 教授, 博士生导师(zhuhuangqiu@ujs.edu.cn) 主要从事无轴承电动机研究。

左文全(1987—)男, 安徽宣城人, 硕士研究生(maxthonzqw@gmail.com) 主要从事无轴承电动机数字控制研究。

新型无轴承密封泵是在传统密封泵基础上融合了无轴承电动机和磁轴承无摩擦、无需润滑、高速度和高精度等优点而产生的新型密封泵,它可以很好地解决传统密封泵中存在的问题,在生命科学、化工、半导体制造等工业领域具有广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>.目前,瑞士成功研制了4 kW和30 kW无轴承永磁同步薄片电动机密封泵系统产品样机结构和控制系统,能够满足不同化工液体材料的输送<sup>[3-6]</sup>.国内江苏大学率先成功试制了无轴承电动机及其泵系统,并已逐步展开相关技术研究.

文中以无轴承永磁同步电动机为研究对象,对无轴承密封泵中的无轴承电动机部分进行研究.无轴承永磁同步电动机控制系统包括转矩控制子系统与径向悬浮力控制子系统<sup>[7-9]</sup>,在调试过程中多数控制器参数需要根据系统运行的效果经过实时在线调整后才能够确定.采用开发的人机交互调试界面,通过与以数字信号处理器(digital signal processor, DSP)为核心的数字控制器与上位机进行串行通信和数据交换,能够实现采用人机交互界面对数字控制系统进行实时在线试验调试<sup>[10-11]</sup>.文中采用人机交互调试界面对数字控制系统中的重要变量如转速 $n$ 和 $X, Y$ 径向位移以及PID控制器参数等进行实时在线调试,并进行样机试验,以提高调试效率,缩短试验周期.

## 1 无轴承永磁同步电动机悬浮原理

无轴承密封泵结构如图1所示,主要由传统液体输送泵、径向磁轴承、无轴承电动机和轴向磁轴承构成<sup>[4,12]</sup>,其中无轴承电动机为关键部件.

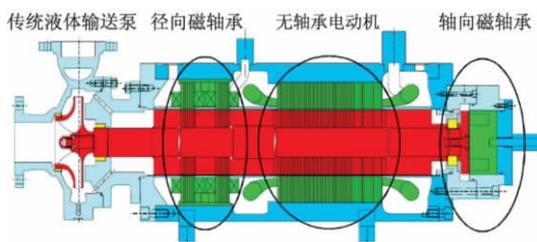


图1 无轴承密封泵示意图  
Fig.1 Bearingless canned pump

无轴承永磁同步电动机径向力由3部分构成:麦克斯韦力、洛仑兹力与由于转子偏心而引入的径向力<sup>[7,9]</sup>.当转矩绕组极对数 $P_M$ 为2,悬浮力绕组极对数 $P_B$ 为3时,将永磁体激励的磁场与转矩绕组激励的磁场进行合成并等效为如图2a所示的

大尺寸绕组的电流.同理,悬浮力绕组激励的磁场也可等效为如图2b所示的小尺寸绕组电流.图中: $\psi_4$ 为转矩绕组产生的磁链; $\psi_6$ 为悬浮力绕组产生的磁链.在图2a中,左图的磁场分布沿 $x$ 轴上下对称,但左右不对称,麦克斯韦力合力方向必沿 $x$ 轴,又由于 $y$ 轴左侧的转矩绕组气隙磁场与悬浮力绕组气隙磁场互相减弱而右侧互相增强,因此产生的麦克斯韦力合力指向 $x$ 轴正半轴方向;右图的磁场分布沿 $y$ 轴左右对称,而上下不对称,麦克斯韦力合力方向必沿 $y$ 轴,又由于 $x$ 轴上侧的转矩绕组气隙磁场与悬浮力绕组气隙磁场互相增强而下侧互相减弱,因此产生的麦克斯韦力合力指向 $y$ 轴正半轴方向.在图2b中,根据磁路最短原则,气隙内的磁力线必垂直于定子内表面,载流定子绕组所受洛仑兹力方向必与定子内表面相切.在图2b左图中,载流转矩绕组(大尺寸绕组)所受洛仑兹力合力指向 $x$ 轴正半轴方向,而载流悬浮力绕组(小尺寸绕组)所受洛仑兹力合力指向 $x$ 轴负半轴方向;右图中载流转矩绕组所受洛仑兹力合力指向 $y$ 轴正半轴方向,而载流悬浮力绕组所受洛仑兹力合力指向 $y$ 轴负半轴方向.根据牛顿第三定律,转子将受到与上述洛仑兹力方向相反的径向力,而所有径向力的合力方向则取决于相应的两部分洛仑兹力的相对大小关系.

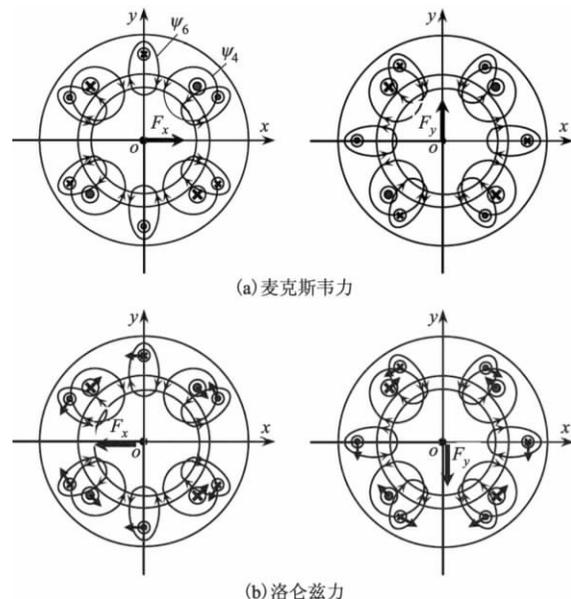


图2 无轴承永磁同步电动机麦克斯韦力与洛仑兹力示意图  
Fig.2 Sketch of Maxwell force and Lorentz force in bearingless PMSM

无轴承永磁同步电动机内存在4种洛仑兹力:  
①载流转矩绕组在转矩绕组气隙磁场中受到的洛仑

兹力; ②载流转矩绕组在悬浮力绕组气隙磁场中受到的洛仑兹力; ③载流悬浮力绕组在转矩绕组气隙磁场中受到的洛仑兹力; ④载流悬浮力绕组在悬浮力绕组气隙磁场中受到的洛仑兹力. 其中洛仑兹力 ②和③合力均为径向力, 洛仑兹力 ④构成的电磁转矩为磁阻转矩. 对于表面贴装式无轴承永磁同步电动机, 当转子处于中心位置时, 这部分电磁转矩为 0. 此时, 无轴承永磁同步电动机的电磁转矩仅由洛仑兹力 ①构成, 其方程<sup>[10-11]</sup>为

$$T_{em} = P_M \psi_{PM} i_{Mq}, \quad (1)$$

式中:  $i_{Mq}$  为转矩绕组电流在其两相旋转坐标系下的交轴分量;  $\psi_{PM}$  为转子永磁体产生的磁链.

在定子上沿位移传感器方向建立  $xOy$  静止坐标系, 设  $P_B = P_M \pm 1$ , 则无轴承永磁同步电动机径向悬浮力方程<sup>[8-9]</sup>为

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = k_m \sqrt{(I_{PM} + i_{Md})^2 + i_{Mq}^2} \begin{bmatrix} i_{Bd} \\ \pm i_{Bq} \end{bmatrix} + k_c [(I_{PM} + i_{Md})^2 + (k_q i_{Mq})^2] \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:  $F_x, F_y$  分别为径向悬浮力在  $x$  轴、 $y$  轴上的分量;  $I_{PM}$  为转子永磁体激励的磁场等效到转矩绕组中的电流;  $i_{Md}, i_{Mq}$  分别为转矩绕组电流在其两相旋转坐标系下的直轴分量和交轴分量;  $i_{Bd}, i_{Bq}$  分别为悬浮力绕组电流在其两相旋转坐标系下的直轴分量与交轴分量;  $x$  与  $y$  分别为转子在  $x$  轴、 $y$  轴上的位移;  $k_m, k_c$  与  $k_q$  均为常数.

## 2 BPMSM 控制系统构成

无轴承永磁同步电动机控制系统 ( $P_B = P_M + 1$ ) 功能框图<sup>[13]</sup>如图 3 所示. 图中:  $i_{M\alpha}, i_{M\beta}$  分别为转矩绕组电流在两相静止坐标系下的分量;  $i_{B\alpha}, i_{B\beta}$  分别为悬浮力绕组电流在两相静止坐标系下的直轴分量与交轴分量;  $i_{MA}, i_{MB}, i_{MC}$  分别为转矩绕组电流在三相静止坐标系下的分量;  $i_{BA}, i_{BB}, i_{BC}$  分别为悬浮力绕组电流在三相静止坐标系下的直轴分量与交轴分量;  $x^*$  与  $y^*$  分别为转子在  $x$  轴、 $y$  轴上的给定参考位移.

无轴承永磁同步电动机控制系统硬件主要包括 4 部分: DSP 控制器、功率放大器、无轴承永磁同步电动机、接口电路板与微机系统. 其中包含的功能模块有: ①无轴承永磁同步电动机样机; ②转编码器;

③旋转编码器信号调理电路; ④正交编码单元; ⑤转子径向位移传感器; ⑥转子径向位移传感器信号调理电路; ⑦A/D 转换器; ⑧处理、计算与控制程序; ⑨PWM 信号发生器; ⑩信号解调电路; ⑪功率开关管控制信号发生电路; ⑫整流、滤波与逆变单元; ⑬故障控制逻辑电路; ⑭电流传感器; ⑮电流传感器信号调理电路; ⑯人机交互界面.

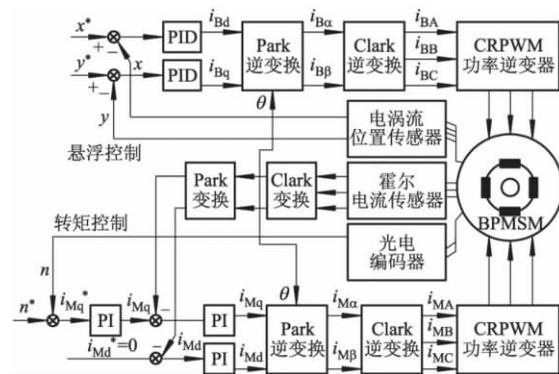


图 3 无轴承永磁同步电动机控制系统功能框图

Fig. 3 Functional block diagram of bearingless PMSM control system

软件程序中采用 Park 逆变换与 Clark 逆变换实现变量的控制, 以累计检测到的正交编码脉冲数为索引, 通过查询  $N_{QEP}/P_M$  (其中  $N_{QEP}$  为 4 倍的旋转编码器光栅总数) 点的正弦表得到 Park 逆变换中所需要的正弦值和余弦值.

## 3 控制系统人机交互界面设计

无轴承永磁同步电动机数字控制系统人机交互界面是以 SCI 串口通信为载体, 实现上位机与下位机之间的实时通信. 通过对人机交互界面中系统控制量的在线调整, 实现对数字控制系统的实时在线调试和控制. 人机交互界面主要是由上位机通信程序、下位机通信程序以及互相约定的共同通信协议构成. 根据控制系统中以 TMS320LF2407A DSP 为核心的控制器, 人机交互界面采用标准 NRZ(非归零)格式的异步串行数字通信协议<sup>[14-15]</sup>. 人机交互界面的操作界面主要有 3 个部分组成: ①功能菜单项; ②实时数据显示与通信协议项; ③虚拟示波器项. 上位机的通信程序由串口接收与发送事件引导, 基于 Microsoft Visual Basic 6.0 编写运行界面.

下位机的数据发送程序与接收程序均通过中断方式引导, 其流程图如图 4 所示, 采用汇编语言编写通信运行程序.

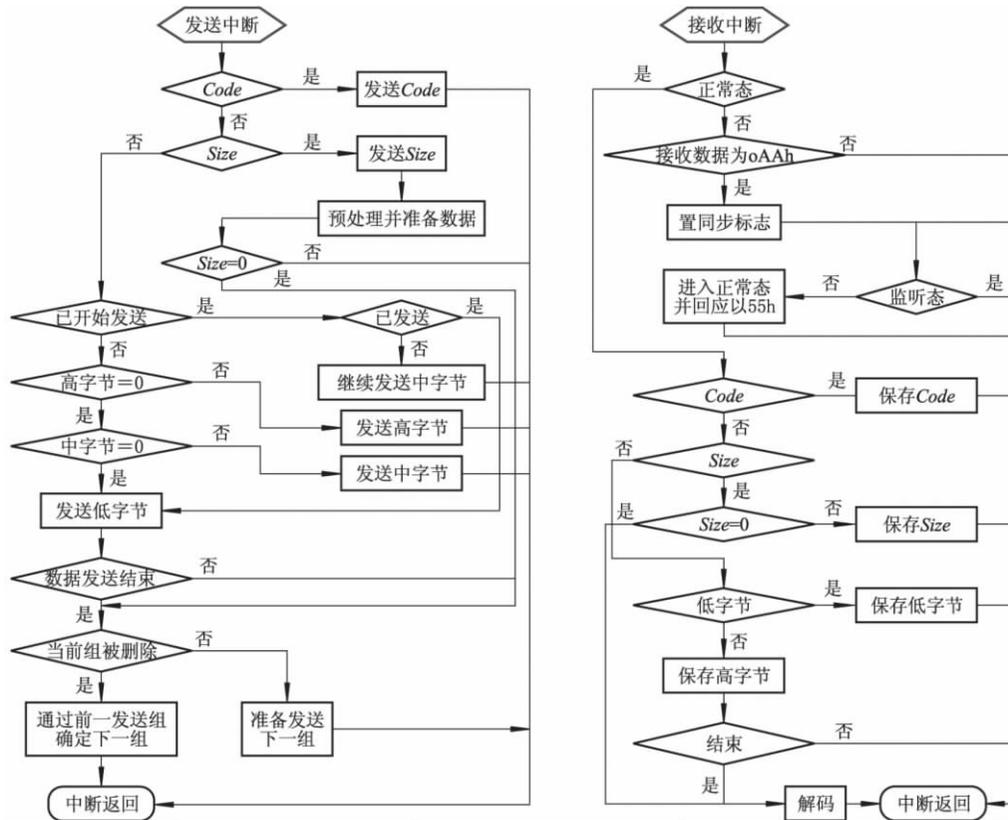


图 4 下位机发送与接收中断服务子程序流程图

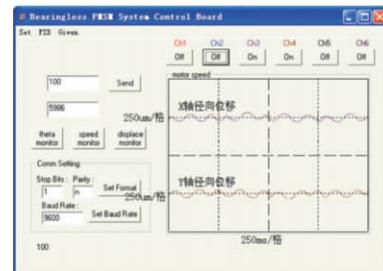
Fig. 4 Flowchart of sending and receiving interrupt service subroutine in slave computer

### 4 基于人机交互界面试验及分析

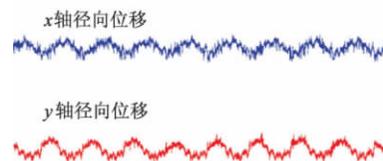
无轴承永磁同步电动机试验样机参数分别为功率  $P_N = 1 \text{ kW}$  , 转速  $n = 3 \text{ 000 r/min}$  , 定子绕组极对数  $P_M = 2$  , 定子电阻  $R_M = 2.01 \text{ } \Omega$  , 转子直径  $D_R = 88 \text{ mm}$  , 转子质量  $m = 2.85 \text{ kg}$  , 转动惯量  $J = 0.007 \text{ 69 kg} \cdot \text{m}^2$  , 定子直轴和交轴电感  $L = 0.008 \text{ H}$  , 悬浮力绕组极对数  $P_B = 3$  , 电动机气隙长度  $l_g = 2 \text{ mm}$  , 辅助机械轴承气隙长度  $\delta = 0.25 \text{ mm}$  . 根据图 3 所示的无轴承永磁同步电动机控制系统功能框图, 由试验样机和瑞泰 ICETEK - LF2407 - A DSP 开发板及相关功率驱动板、辅助电源构成完整的无轴承永磁同步电动机控制系统.

在人机交互界面功能设置菜单项中设置给定速度 Given Value of Motor Speed  $N = 600 \text{ r/min}$  ,  $x$ 、 $y$  径向位移参数 Given Value of  $x$  Displacement =  $0 \text{ } \mu\text{m}$  , Given Value of  $y$  Displacement =  $0 \text{ } \mu\text{m}$  . 虚拟示波器中通道 CH3 显示  $x$  径向位移, 通道 CH4 显示  $y$  径向位移. 使用人机交互界面对  $x$ 、 $y$  方向位移 PID 控制器参数进行实时在线调整. 经过多次调整后, 得到性能较好的 PID 控制参数:  $x$ 、 $y$  Displacement PID 中  $K_p =$

7.2  $K_i = 0.7$   $K_d = 0.035$  , 此时  $x$ 、 $y$  径向位移波形分别如图 5 所示, 其中图 5a 为虚拟示波器观察得到的波形, 图 5b 为真实示波器测量得到的波形.



(a) 虚拟示波器测量波形

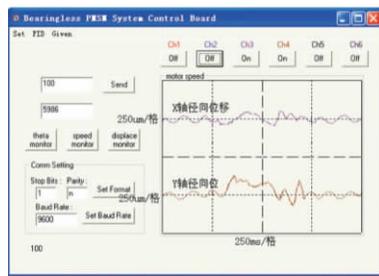


(b) 真实示波器测量波形

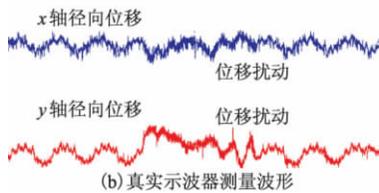
图 5 测量得到的  $x$ 、 $y$  径向位移波形

Fig. 5 Waveform of  $x$ 、 $y$  axial displacement on real oscilloscope

对转子中心转轴突然施加径向外力产生径向位移干扰后, 观察其  $x$ 、 $y$  轴径向位移变化如图 6 所示, 其中图 6a 为虚拟示波器观察得到的波形, 图 6b 为真实示波器测量得到的波形.



(a) 虚拟示波器测量波形

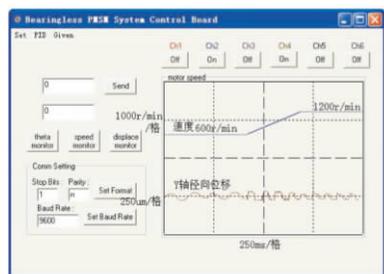


(b) 真实示波器测量波形

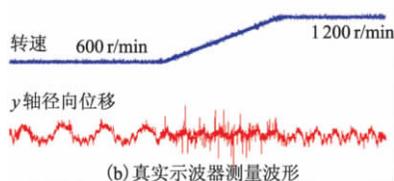
图 6 施加位移扰动时  $x$   $y$  径向位移波形

Fig. 6 Waveform of  $x$   $y$  axial displacement on real oscilloscope when disturbance imposed

通过人机交互界面功能设置对话框改变系统给定速度,设置速度 Given Value of Motor Speed  $N = 1\ 200$  r/min,观察转子转速  $N$  和  $y$  轴径向位移变化如图 7 所示,其中图 7a 为虚拟示波器观察得到的波形,图 7b 为真实示波器测量得到的波形.



(a) 虚拟示波器测量波形



(b) 真实示波器测量波形

图 7 当速度增加时速度和  $y$  径向位移波形

Fig. 7 Waveform of speed and  $y$  axial displacement on real oscilloscope when speed increases

通过以上试验结果可以看出:在无轴承永磁同步电动机数字控制系统试验调试中使用人机交互界面系统,不仅能够实时显示控制系统中的传感器检测的位移和速度信号,而且能够快速地在在线调整控制系统中的  $x$   $y$  径向位移 PID 系数及给定转速等重要控制参数.试验结果均满足预期目标让转子转速为  $1\ 200$  r/min,转子轴心在平衡位置中心(0, 0)附近振动,径向偏心位移振动幅值控制在  $50\ \mu\text{m}$

范围之内,对外界扰动具有很好地抗干扰能力,变速过程中系统能够很好地稳定运行.

## 5 结 论

1) 无轴承密封泵采用无轴承电动机代替了传统密封泵中的普通驱动电动机,可以很好地解决传统密封泵中存在的密封问题.

2) 针对无轴承密封泵中永磁型无轴承电动机的研究,开发的基于串口通信的人机交互调试界面,对数字控制系统中重要参数  $x$   $y$  径向位移 PID 参数进行了进行实时在线调试.

3) 样机试验表明,实现预期目标,对外界扰动具有很好的抗干扰能力,数据通讯完整,波形显示平滑,能够满足对无轴承永磁同步电动机数字控制系统进行实时在线调试和控制的要求.

## 参考文献(References)

- [1] 王其磊,杨逢瑜,杨倩,等.电磁轴承在立式高速泵中的应用[J].排灌机械工程学报,2010,28(1):88-92.  
Wang Qilei, Yang Fengyu, Yang Qian, et al. Application of electromagnetic bearings in vertical high-speed pump [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering* 2010, 28(1): 88-92. (in Chinese)
- [2] Guo Jihyan, Liang Yihsu, Jing Huiwang, et al. Axial-flux permanent magnet brushless motor for slim vortex pumps [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(10): 4732-4735.
- [3] Klaus Raggl, Bernhard Warberger, Thomas Nussbaumer, et al. Robust angle-sensorless control of a PMSM bearingless pump [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2009, 56(6): 2076-2085.
- [4] Redemann C, Meuter P, Ramella A, et al. 30 kW bearingless canned motor pump on the test bed [C] // *Proceedings of the 7th International Symposium on Magnetic bearings*. Zurich, Switzerland [s. n.], 2000.
- [5] Takemoto M, Uyama M, Chiba A, et al. A deeply-buried permanent magnet bearingless motor with 2-pole motor windings and 4-pole suspension windings [C] // *Proceedings of the 38th Industry Applications Society Annual Meeting*. Salt Lake City, USA: Northern Illinois University, 2003: 1413-1420.
- [6] Takenaga T, Kubota Y, Chiba A, et al. A principle and a design of a consequent-pole bearingless motor [C] // *Proceedings of the 8th International Symposium on Magnetic*

- Bearings. Mito, Japan: Ibaraki University, 2002: 259 - 264.
- [7] 刘贤兴, 孙宇新, 朱焯秋, 等. 无轴承永磁同步电机的发展、应用和前景[J]. 中国机械工程, 2004, 15(17): 1594 - 1597.  
Liu Xianxing, Sun Yuxin, Zhu Huangqiu, et al. Development, application and prospect of bearingless permanent magnet-type motors [J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, 15(17): 1594 - 1597. (in Chinese)
- [8] Ooshima M, Kitazawa S, Chiba A. Design and analyses of a coreless-stator-type bearingless motor/generator for clean energy generation and storage systems [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(2): 3461 - 3463.
- [9] Ooshima M, Chiba A, Rahman A, et al. An improved control method of buried-type IPM bearingless motors considering magnetic saturation and magnetic pull variation [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, 19(3): 569 - 575.
- [10] 王成波, 朱焯秋, 吉裕晖. 基于 SVPWM 的无轴承永磁同步电机转子磁场定向控制系统研究[J]. 电工电能新技术, 2010, 29(2): 48 - 52.  
Wang Chengbo, Zhu Huangqiu, Ji Yuhui. Study on rotor field oriented control system of bearingless PMSM based on SVPWM [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2010, 29(2): 48 - 52. (in Chinese)
- [11] 邓智泉, 仇志坚, 王晓琳, 等. 无轴承永磁同步电机的转子磁场定向控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 104 - 108.  
Deng Zhiqian, Qiu Zhijian, Wang Xiaolin, et al. Study on rotor flux orientation control of permanent magnet bearingless synchronous motors [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(1): 104 - 108. (in Chinese)
- [12] 严欣平. 无轴承永磁同步电机电磁设计与控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学电气工程学院, 2008.
- [13] 张少如, 吴爱国, 李同华. 无轴承永磁同步电机转子偏心位移的直接控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12): 65 - 70.  
Zhang Shaoru, Wu Aiguo, Li Tonghua. Direct control for rotor eccentric displacement of bearingless permanent magnet-type synchronous motors [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(12): 65 - 70. (in Chinese)
- [14] 赵世廉. TMS320X240x DSP 原理及应用开发指南[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007: 134 - 208.
- [15] 徐科军. TMS320LF/LC24 系列 DSP 指令和编程工具[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 114 - 155.

(责任编辑 陈建华)