

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.11.020

永磁无刷单相电机场路耦合有限元 仿真与实验研究*

宋腾飞,刘慧娟*,张 千,张振洋
(北京交通大学 电气工程学院,北京 100044)

摘要:针对永磁无刷单相电机在异步起动时必须借助起动副绕组而需进行电容切换,导致电机结构复杂和可靠性降低的问题,首先从电机的电磁设计入手,提出了一种电机磁路不对称、具有自起动能力的永磁无刷单相电机结构,然后采用 V/f 控制的变频控制方法,实现了电机带额定负载的平滑自起动和稳定运行。并利用 Maxwell 软件建立了电机的场路耦合有限元仿真模型,对电机及其控制系统进行了仿真分析。最后利用样机及其控制器的实验平台对样机系统的各种运行状态进行了实验测试,并将实验结果与有限元仿真结果进行了对比分析,两者达到了很好的一致性。研究结果表明,气隙不对称永磁无刷单相电机系统具有自起动迅速、运动平稳、效率较高的特性,在空调等家用电器领域具有很好的应用前景。

关键词:永磁无刷单相电机;Maxwell 软件;场路耦合有限元法仿真; V/f 控制方法

中图分类号:TM351;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)11-1392-06

Simulation and experiment of a PM brushless single phase motor using field circuit coupling FEM

SONG Teng-fei, LIU Hui-juan, ZHANG Qian, ZHANG Zhen-yang
(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to make the PM brushless single-phase motor have the self-starting capability and without complex structure, a new kinds of asymmetric air-gap topology which can lead to the d, q-axis magnetic circuit asymmetry of the PM brushless single-phase motor was presented. The field circuit coupling FEM simulation model of the proposed motor controlled with V/f control method was built by using 2D Maxwell software, and the performances such as the air-gap flux density and output torque of the proposed motor were investigated. Finally, the experimental platform of the prototype and its controlling system were set up. The performance comparison of the experimental results and simulation results of the proposed motor running in various operating mode were reported. All the results show that the asymmetric air-gap PM brushless single phase motor is potential to apply in the household appliances applications.

Key words: PM brushless single-phase motor; Maxwell software; field circuit coupling FEM simulation; V/f control method

0 引 言

随着高性能永磁材料、电力电子技术的飞速发展,永磁无刷电机以可靠性高、寿命长、效率高等优点逐渐取代传统有刷直流电机^[1],在数控、伺服控制等领域得到广泛的应用。其中,永磁无刷单相电机效率虽低

于永磁无刷三相电机,但其以体积小、结构简单的优点,广泛应用于冰箱、空调等各种高性能、低成本的家用电风扇中^[2-5]。但由于永磁无刷单相电机定子上只有一相绕组,使得它与一般的单相异步电动机一样,不能产生起动转矩,即不具备自起动能力^[6]。为了实现永磁无刷单相电机的自起动,一种方法是采用在电机中加入起动绕组与串入电容裂相起动的方法,国外

收稿日期:2016-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377008)

作者简介:宋腾飞(1993-),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事永磁电机与感应电动机设计方面的研究. E-mail: 15121467@bjtu.edu.cn

通信联系人:刘慧娟,女,教授,博士生导师. E-mail: hjliu@bjtu.edu.cn

研究者 Rahman 等人^[7]对电容起动单相内置永磁无刷电机作出了综述,并利用有限元法对其进行数值计算,得出电容起动单相内置永磁无刷电机效率要高于同体积单相异步电机的结论;而 Milter 等^[8]则利用对称分量法与 dq 分解法,对一台冰箱压缩机用电容起动主副双绕组永磁无刷单相电机进行了数值计算,提出了一种计算该电机性能的数值方法,但电容起动主副双绕组结构使计算变得困难。另一种方法是构造特殊结构的电机,CHEN Y 等人^[9]设计了一种永磁单相磁阻电机,其结构与开关磁阻电机相似,并利用有限元法证明了其具有起动能力,但转动方向无法确定,需依靠外部控制系统;山东理工大学边敦新等人^[10]提出了一种新型双凸极单相永磁电动机结构并介绍了其工作原理与参数计算,该电机可以可靠自起动并能双方向转动,且铜耗低效率高。但这些措施都使电机结构变得更为复杂,并大大降低了电机系统运行的可靠性,使其在空调等家用电器中的推广应用受到限制。

此外,研究发现永磁无刷单相电机驱动系统的控制方法决定了电机的工作性能,国外研究者讨论了永磁无刷单相电机的无传感器控制方法^[11],提出了一种混合 $I-f$ 起动和无位置传感控制方法,其具有较高的工作效率;国内湖南理工学院荣军等人^[12]介绍了 5 种 PWM 调制方式对永磁无刷直流电机调速性能的影响,通过理论分析和实验证实了选择合理的调制方式对电机的平稳运行有非常重要的意义。但这些控制方法都较为复杂,加大了单相永磁无刷电机调速系统的成本,不符合空调等家用电器希望价格低廉的要求。因此研究适合于家用电器风机的结构简单、可靠性高、价格低廉和效率高,且具有自起动能力的永磁无刷单相电机及其控制系统,具有重要的工程应用价值。

本研究提出一种具有自起动能力的永磁无刷单相电机的新拓扑结构,该电机采用定、转子间气隙不对称、不均匀结构,使得电机的 d 、 q 轴磁路不对称,从而保证电机起动时能产生起动转矩。并利用 Maxwell 软件,建立该电机的场路耦合有限元仿真模型,对该电机及其控制系统进行仿真分析,搭建该电机及采用基于 V/f 控制的带位置传感器的变频控制系统的实验平台,对样机系统的各种运行状态进行实验测试,并将实验结果与有限元仿真结果进行对比分析。

1 永磁无刷单相电机新拓扑结构

与单相异步电机一样,常规的永磁无刷单相电机,由于定子上只有一相绕组,当通入单相交流电流时,电机内不能产生旋转磁场,使得该电机不能产生起动转

矩,因而不具备自起动能力。为了确保永磁无刷单相电机的结构简单、可靠性高并具备自起动能力,必须对该电机的磁路结构进行改进。文献[13]中给出了具有自起动能力的永磁无刷单相电机磁路结构改变的 2 种方法:①U 型定子铁芯采用气隙不对称结构;②定、转子采用双凸极结构。

采用 U 型定子铁芯结构可使电机实现自起动,但其结构特点限制了定子的极对数(1 对极),且电机体积大,功率密度低,不适合在空调等家用电器领域中使用,而双凸极结构会导致转速波动变大、且必须依靠外部的控制电路才能工作。

因此,本研究利用 U 型定子铁芯结构永磁无刷单相电机气隙不对称的特点,设计的单绕组永磁无刷单相电机如图 1 所示。

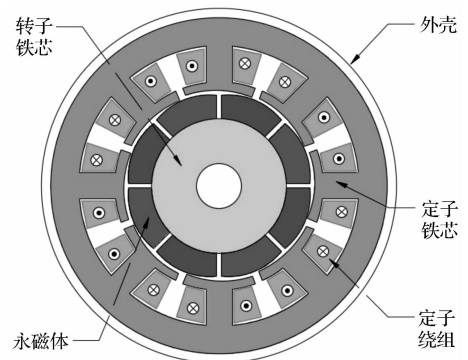


图 1 永磁无刷单相电机结构图

气隙不对称的放大示意图如图 2(a) 所示,气隙对称的放大示意图如图 2(b) 所示。

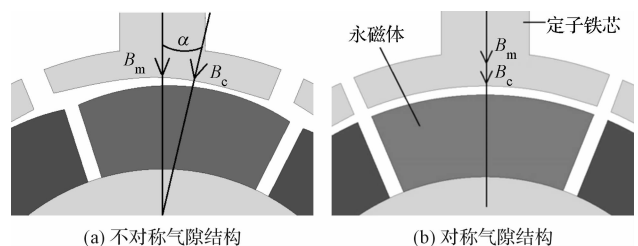


图 2 不同气隙结构示意图

可见,当电机采用均匀气隙结构,且永磁体轴线和定子铁轭轴线重合时,定子绕组产生的磁场 B_c 和永磁体产生的磁场 B_m 夹角 $\alpha = 0^\circ$ 或 180° ,由瞬时转矩的表达式可知此时电机的电磁转矩为零,电机无法起动;图 2(a) 中,当电机采用不均匀结构时,由于定位力矩的存在,电机停转时永磁体轴线和定子铁轭轴线不重合,即 $\alpha \neq 0^\circ$ 或 180° ,电机接入电流瞬间转矩不为零,具有自起动的能力。

为了构造气隙不均匀结构,除了铁轭不对称外,本研究还在转子上采用不等厚永磁体结构,研究表明,不

等厚永磁体结构不仅能减少齿槽转矩,而且还能减少边角废料,降低永磁体的成本^[14]。不等厚磁极示意图如图 3 所示。

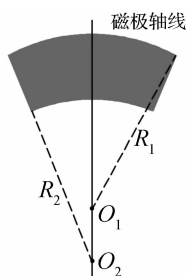


图 3 不等厚磁极示意图

2 电机 V/f 控制方法及系统构成

虽然采用不对称的气隙结构可以使设计的永磁无刷单相电机具有自起动的能力,但电机的旋转方向由于与电源的初始角和转子永磁体的相对位置有关^[15];因此,在空调等家用电器用的驱动电机系统中,必须采取合适的控制方法和控制电路来实现对电机旋转方向的控制,以满足电机的性能要求。因该电机系统用于空调系统的家用电器,其负载多为风机,对调速精确要求不是很高,但对电机调速范围要求比较宽,而且电机多数时间工作在轻载状态,采用 V/f 控制方法可以使系统在较低负载时也有较高的效率,节能效果明显。另外,工程单位对电机调速系统的成本要求比较严格,希望价格低廉,而且必须具备较高的可靠性。因此,综合考虑,该电机调速系统采用 V/f 控制方法是比较好的控制策略。

由于负序磁场的存在,永磁单相电机在起动过程中常常由于转矩波动过大而无法达到同步状态^[16-17],为了克服这一缺点,本研究采用变频调速实现电机的平滑起动。根据电机运行原理有:

$$E_{\varphi 1} = 4.44Nk_{N1}f\Phi_1 \quad (1)$$

式中: $E_{\varphi 1}$ —感应电动势, N —相绕组串联匝数, f —电源频率, k_{N1} —基波绕组系数, Φ_1 —电机主磁通。

电机在变频起动过程中为了避免弱磁和磁饱和现象的发生,必须保证电机中的磁通 Φ_1 一定,从式(1)可知,即要保持定子绕组感应电势与电源频率之比 $E_{\varphi 1}/f$ 为常数,由于电机的 $E_{\varphi 1}$ 不易控制,所以,在实际控制中常用输入电压代替感应电势,即保持 U_1/f 为常数的方式来实现对磁通的控制,也就是常说的变频器 V/f 控制方法。

控制系统利用霍尔传感器检测永磁体即转子位置,将位置信号发送至 MCU 单元分析,然后控制逆变电路中 IGBT 的开通关断时间及相序,最终实现对电

机运行状态的控制。所设计永磁无刷单相电机的控制系统框图如图 4 所示。

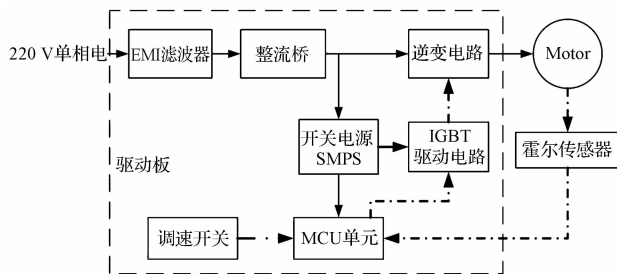


图 4 电机控制系统框图

3 场路耦合有限元仿真

本研究设计的永磁无刷单相电机的主要参数如表 1 所示。

表 1 电机主要参数

名称	数值	名称	数值
定子外径/mm	90	转子外径/mm	49.7
定子内径/mm	50.4	定/转子材料	DW465-50
定子槽数	8	永磁体材料	NdFe30
极对数	4	永磁体厚度/mm	13.7
铁芯长度/mm	33	永磁体长度/mm	44
定子绕组匝数	169	气隙宽度/mm	0.35
额定功率/W	65	额定电压/V	200
额定转速	1 200	额定电流/A	0.75

本研究利用 Maxwell 软件建立了永磁无刷单相电机的 2D 有限元模型,并结合控制电路建立了场路耦合有限元模型,该模型如图 5 所示。

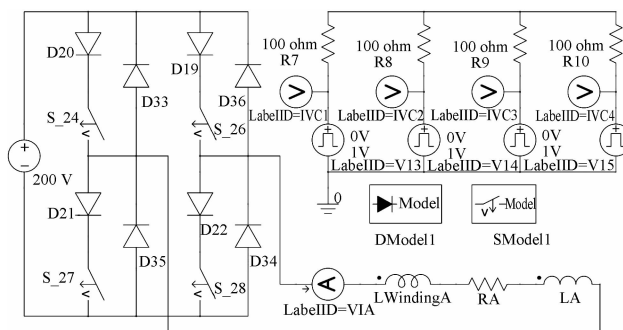


图 5 场路耦合图

LWindingA—电机电枢绕组模型

本研究利用所建立的场路耦合有限元仿真模型,仿真计算了电机的各种运行特性。永磁无刷单相电机的空载运行性能主要取决于气隙磁密波形。电机空载运行时气隙磁密波形及其谐波分析如图 6 所示。

永磁无刷单相电机的空载气隙磁场波形为平顶波,其谐波含量中仅含奇次谐波,且随次数增高幅值逐渐下降。即 3、5、7 次谐波含量最高。气隙磁密谐波会

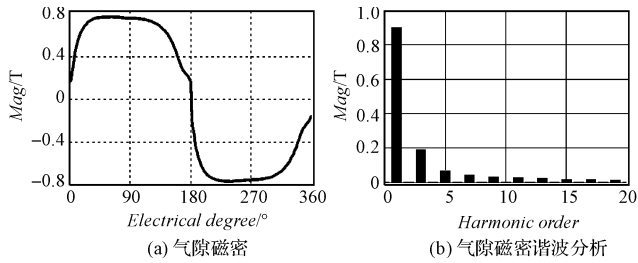


图 6 空载气隙磁密及谐波分析图

导致电机的噪声和振动,为了改善高次谐波对电机的影响,可采用转子开槽、斜槽、定转子极对数配合的方式来削弱磁密谐波对电机运行的影响。

电机在额定负载(500 mN·m)下的输出转矩(T_e)曲线如图 7 所示。

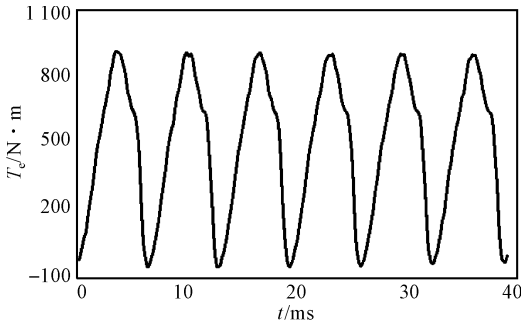


图 7 额定负载下的转矩波形

从图 7 中可以看出,与三相电机不同,单相电机的输出转矩波动较大,这是由于电机中的负序旋转磁场含量较大,使电机的负序转矩过大而不能忽略,这也是单相电机性能差于三相电机的原因所在,怎样改善单相电机转矩波动问题,从而提高单相电机性能将在后续的论文中讨论。

为了获得电机的功角特性,本研究在电机的有限元模型中,改变定子绕组所加交流电流的初相位角 θ ($0^\circ < \theta < 360^\circ$),记录电机每次稳定运行的电磁转矩,可画出转矩随电流初相位角变化的曲线如图 8 所示。

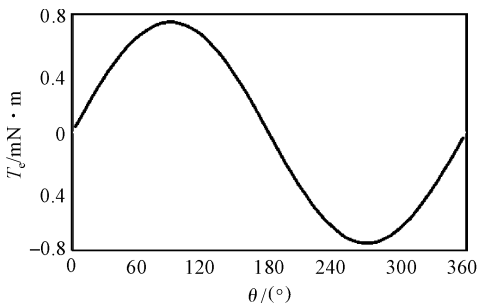
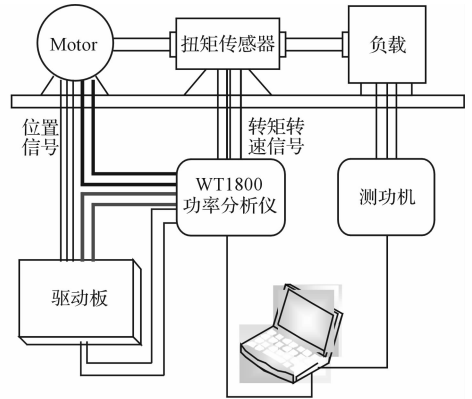


图 8 输出转矩-电源初始角曲线

可见,电机的最大输出转矩 T_{max} 约为 750 mN·m,电机过载倍数 $k_M = 1.5$ 。在电机的实际运行时,可以通过控制系统来实现电机在最大转矩点运行。

4 实验及分析

根据电机控制方式,笔者搭建的实验平台如图 9(a)所示。实验平台照片如图 9(b)所示。



(a) 实验平台系统结构示意图



(b) 实验平台照片

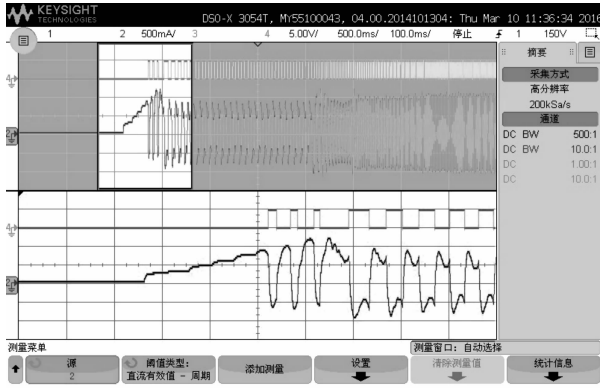
图 9 实验平台系统结构与实物照片

永磁无刷单相电机的实验平台由驱动板、测功机、功率分析仪、样机组成,其中驱动板的功能包括:整流、逆变、变频、调速等。

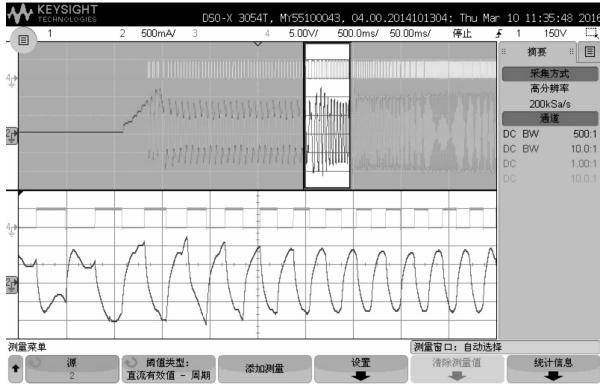
为了验证该电机带额定负载的自启动能力,本研究在搭建的实验平台上,对电机的启动过程进行了实验测试。

电机带额定负载(500 mN·m)启动过程中不同时刻定子电流的波形如图 10 所示。

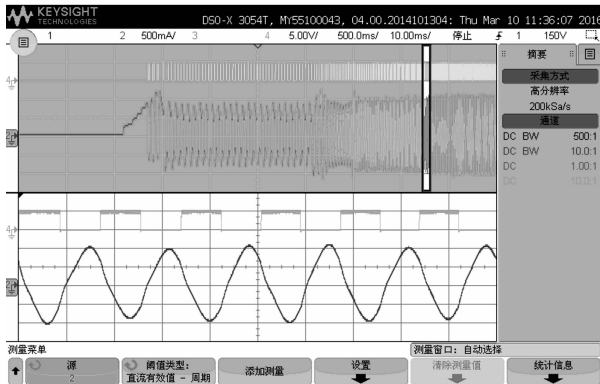
分析电机启动过程的电流波形,可见其启动过程大约为 3 s;因该电机采用了变频器的 V/f 控制方法,其启动时电压较小,从而启动电流也较小,减小了对电网的冲击;且如图 10(a)所示,电机的启动过程较为平滑,输入电流的波动频率随电压频率的提高而提高,其波形不为正弦波,有效值较大;图 10(b)中,随着电机转速的提高,输入电流幅值逐渐稳定在额定电流附近,其波形也逐渐趋于正弦波;图 10(c)中,电机已稳定在额定转速,其电流幅值也稳定于 1 A 左右,但由于单相电机中负序磁场的存在,电机电流中含有较多的高次谐波,使电流波形畸变,导致电机的输出转矩波动。



(a) $t=0-1\text{ s}$



(b) $t=2\text{ s}-2.5\text{ s}$



(c) $t=3.3\text{ s}-3.4\text{ s}$

图 10 额定负载启动下的电流波形

实验测量的电机转矩与有限元仿真计算的转矩的比较如图 11 所示。

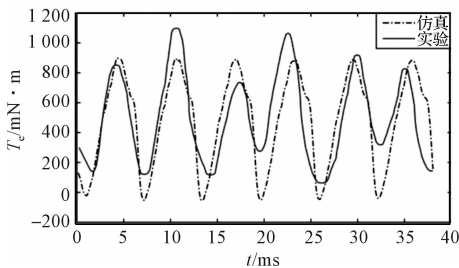


图 11 额定负载时的输出转矩曲线

由此可以看出,试验结果与仿真结果存在一定误差,这主要由两方面的原因引起。第一个原因是:仿真采用的是 2D 有限元模型,无法考虑电机端部效应及

三维轴向结构;第二个原因是:该电机的转动惯量小,在实际运行中转子系统很容易受到外界机械干扰的影响,使得转子转速并不恒定,有微小波动。而在仿真模型中不能考虑这种机械干扰,从而使实际测量转矩与仿真转矩存在一定的误差。

实验测试的转速曲线如图 12 所示。

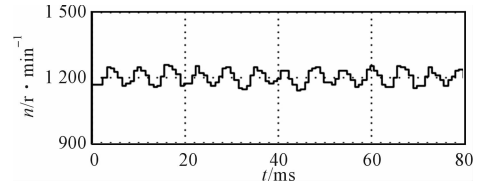


图 12 额定负载时的转速曲线

电机在额定运行状态时的一些实验结果与仿真结果的比较结果如表 2 所示。

表 2 电机主要参数

名称	仿真结果	实验结果
电压/V	200	200
电流/A	0.71	0.77
平均转矩/mN·m	489	523
额定功率/W	61.4	65.7
额定效率	85%	83%

从表 2 中可以看出,有限元仿真结果与实验结果基本保持一致,验证了场路耦合有限元法的有效性。实验测定的永磁无刷单相电机的效率-转矩曲线如图 13 所示。

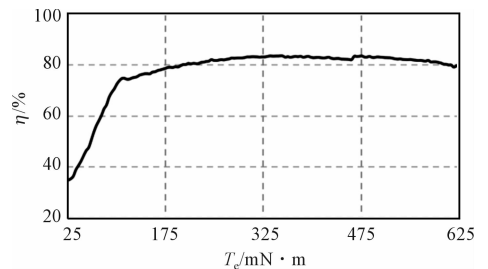


图 13 电机的效率-转矩曲线

由图 13 可以看出,在额定负载下,本研究所设计的永磁无刷单相电机效率大约在 83% 左右,相比于单相异步电机,其效率有了明显的提高,使其在空调等家用电器领域中具有很好的应用前景。

5 结束语

本研究提出了一种具有自启动能力的永磁无刷单相电机的新拓扑结构,并利用 Maxwell 软件建立了电机的场路耦合有限元仿真模型,仿真分析了电机的空载磁场、功角特性及额定负载运行时的输出转矩,可发现由于负序磁场的存在,单相电机的输出转矩波动较

大,而怎样改善单相电机转矩波动问题将在后续的论文中讨论。随后搭建了样机及其控制器的实验平台,实验测试了样机系统的各种运行状态,并将实验结果与有限元仿真结果进行了比较,两者达到了很好的一致性。

通过分析结果可发现,永磁无刷单相电机具有自启动迅速、运动平稳、效率较高的特性,在空调等家用电器领域具有很好的应用前景。

参考文献(References):

- [1] 陈亚玲. 永磁无刷直流电动机的发展及应用[J]. 电气开关,2010,48(4):62-63.
- [2] STEPHAN D, ANNETTE M. Design Constraints of Small Single-Phase Permanent Magnet Brushless DC Drives for Fan Applications[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**,2015,51(4):3178-3186.
- [3] 李新华,李蓉,翁萍. 空调风机单相永磁同步电动机启动过程仿真研究[J]. 湖北工业大学学报,2011,26(3):66-69.
- [4] 张钊,陈涛,周勇. 永磁同步电机伺服控制系统建模与仿真[J]. 兵工自动化,2014,33(4):75-78.
- [5] 胡鹏,肖梦,刘辉. 基于永磁同步电机的电机控制器检测电路设计及仿真分析[J]. 机械,2015,42(5):45-50,63.
- [6] 付大金,杨玉波,王秀和. 单相自启动永磁同步电动机综述[J]. 电机技术,2003,24(1):34-37.
- [7] RAHMAN M A, OSHEIBA A M. Advances on Single-Phase Line-Start High Efficiency Interior Permanent Magnet Motors[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**,2012,59(3):1333-1345.
- [8] MILLER T J E, POPESCU M, COSSRA C, et al. Line-start

- permanent-magnet motor single-phase steady-state performance analysis[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**,2004,40(2):516-525.
- [9] CHEN Y, CHEN S, ZHU Z Q, et al. Starting Torque of Single-Phase Flux-Switching Permanent Magnet Motors[J]. **IEEE Transactions on Magnetics**,2006,42(10):3416-3418.
- [10] 边敦新,詹琼华,哈里布·法迪,等. 一种新型双凸极单相永磁电动机-工作原理与参数计算[J]. 中国电机工程学报,2000,20(10):14-18.
- [11] IEPURE L I, BOLDEA I, BLAABJERG F. Hybrid I-f Starting and Observer-Based Sensorless Control of Single-Phase BLDC-PM Motor Drives[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**,2012,59(9):3436-3444.
- [12] 荣军,李一鸣,万军华,等. 不同 PWM 调制方式对无刷直流电机调速的影响[J]. 微电机,2015,48(10):70-74.
- [13] 付敏,于长胜,白宏哲,等. 阶梯气隙结构对 U 型单相永磁电机自启动性能的影响[J]. 电机与控制学报,2010,14(6):39-44.
- [14] 陈贤阳,黄开胜,明国锋,等. 高性能风机用外转子无刷直流电机的设计与研究[J]. 微电机,2014,47(7):26-30.
- [15] SMITH A C, WONG A K B. Performance of Line-Start Single Phase Permanent Magnet Motors for Domestic Applications[C]// Industry Applications Conference, IEEE IAS Annual Meeting. San Diego: IEEE,1996.
- [16] 张小波,谢芳,郝副刚. 提高单相自启动永磁同步电机启动性能研究[J]. 微电机,2014,47(7):35-38.
- [17] 梁伟,邱建琪. 气隙结构对单相无刷直流电动机双向启动性能的影响[J]. 微电机,2014,47(7):10-15.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

宋腾飞,刘慧娟,张千,等. 永磁无刷单相电机场路耦合有限元仿真与实验研究[J]. 机电工程,2016,33(11):1392-1397.

SONG Teng-fei, LIU Hui-juan, ZHANG Qian, et al. Simulation and experiment of a PM brushless single phase motor using field circuit coupling FEM[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(11):1392-1397.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>