

# 混合铁心横向磁通永磁电机的设计与分析

卢琴芬<sup>1</sup>, 谢舸<sup>1</sup>, 金勇<sup>2</sup>, 叶云岳<sup>1</sup>, 方攸同<sup>1</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027;

2. 浙江省质量技术监督检测研究院, 浙江省 杭州市 310013)

## Design and Analysis of a Transverse-flux Permanent Magnet Motor With Hybrid Iron-core

LU Qinfen<sup>1</sup>, XIE Ge<sup>1</sup>, JIN Yong<sup>2</sup>, YE Yunyue<sup>1</sup>, FANG Youtong<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;

2. Zhejiang Bureau of Quality and Technical Supervision, Hangzhou 310013, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** The structural features of transverse flux permanent magnet motor (TFPM) and advantages of soft magnetic composite (SMC) material were introduced, and then a hybrid iron-core TFPM was presented. The hybrid iron-core combined lamination and SMC material. In order to analyze torque and its influence factor, the torque equation was deduced by analytical method. Its parameters of permanent magnet flux linkage and winding inductance were obtained by static magnetic field analysis based on an effective 3D finite element method (FEM) model. Furthermore, the back EMF, no-load flux linkage, torque and its average value also can be calculated on this model by transient field analysis. By comparing, this FEM torque result was in agreement with that of analytical equation. The predicted analysis results are validated by prototype experimental EMF. It shows that the developed TFPM with hybrid iron-core are not only simple structure and easy manufacture, but also high torque density and easy module.

**KEY WORDS:** transverse flux permanent magnet motor (TFPM); hybrid iron-core; soft magnetic composite (SMC); torque equation; magnetic field analysis

**摘要:** 阐述了横向磁通永磁电机(transverse flux permanent magnet motor, TFPM)的结构特点与软磁复合(soft magnetic composite, SMC)材料的优点, 提出硅钢、SMC结合的混合铁心TFPM。为了分析电机转矩及其影响因素, 推导了转矩解析公式。基于3D有限元模型, 通过静态磁场分析求出了式中永磁体磁链幅值及线圈电感2个变量; 通过瞬态磁场分析, 得到了电机的空载电动势、空载磁链、一相转矩及其平均值, 转矩有限元结果与解析结果一致。样机测得的空载电动势验证了分析的正确性。结果表明, 混合铁心TFPM不但结构简单、加工方便, 而且转矩密度高、易于模块化。

**关键词:** 横向磁通永磁电机; 混合铁心; 软磁复合材料; 转矩公式; 磁场分析

## 0 引言

1986年德国的H.Weih提出了横向磁通永磁电机(transverse flux permanent magnet motor, TFPM), 该电机定子齿槽和电枢线圈在空间上相互垂直, 使得定子电流和磁负荷在空间上不存在竞争, 克服了传统电机由于齿槽宽度相互制约而无法提高转矩密度的缺点, 具有转矩密度高、转速低与容错性好的优点, 非常适用于低速大转矩应用场合<sup>[1]</sup>。20世纪90年代中期, 随着相关理论、方法与材料的发展, TFPM逐渐成为电机界研究的热点之一, 尽管成本高于同容量感应电机和普通永磁同步电机, 但它能够满足舰船、电动汽车及风力发电等要求体积小、重量轻、功率密度高的直接驱动应用场合。

TFPM磁路具有三维特性, 而硅钢片叠片铁心不具有三维导磁性能, 因此提出了种类繁多的拓扑结构来构建有效磁路, 并简化工艺。英国罗尔斯罗伊斯公司提出了聚磁双边结构的样机, 该样机能够在体积增加较少的情况下获得加倍的转矩, 但其加工装配工艺较复杂<sup>[2]</sup>。瑞典皇家技术学院提出了三相布置在同一圆周上的简单结构, 采用这种结构的优点是易于加工, 缺点是非聚磁结构导致功率因数与转矩密度较低<sup>[3]</sup>。华中科技大学提出永磁体轴向充磁的平板式结构, 铁心硅钢片需沿圆周叠压, 永磁体衔于U型磁轭之间旋转, 相数多时定转子配合精度要求较高, 其最大问题是拆装极不方便, 转子需要分成若干组, 分块安装好后, 再固定到转子外壳上<sup>[4]</sup>。由此可见, 硅钢片叠片铁心结构简单, 磁

基金项目: 国家自然科学基金项目(51077115, 50877070)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51077115, 50877070).

性能各向异性，应用于三维磁路时受到很大限制。

软磁复合(soft magnetic composite, SMC)材料采用粉末冶金技术制造，由表面绝缘的金属粉末颗粒组成，能一次成型压制成形形状复杂的铁心部件，并具有良好的各向同性磁性能，在具有三维磁路结构的TFPM中具有良好的使用前景。丹麦Aalborg大学、美国Voith Turbo公司、澳大利亚悉尼科技大学都利用SMC的优点开发了TFPM<sup>[5-7]</sup>，其优点在于铁心结构灵活，加工工艺简单，能够一次成型，缺点在于磁性能比硅钢片差，材料较脆，在多极电机定子齿尺寸较小时，容易发生根部断裂。可见，采用硅钢片叠片铁心与SMC铁心各有优势。

本文提出了结合这2种材料的混合铁心TFPM。文中一方面采用解析法推导了转矩计算公式，另一方面基于3D有限元分析模型，分析了电机一相的空载电动势、空载磁链、转矩及其平均值，并进行了相关实验，为该类型电机的设计提供依据。

## 1 结构与工作原理

图1给出了混合铁心TFPM一相的结构示意图，它包括外转子与内定子两部分。定子包括定子铁心与电枢绕组。定子铁心由两部分拼装而成：一部分是由采用自动铆接工艺的硅钢片叠压而成的齿(模块化)，在定子表面均匀分布，一相有两侧齿组成，相互之间错开180°电角度；另一部分是SMC材料做成的圆环状轭部铁心，由两块对称结构沿轴向拼装，外端面均匀开槽，定子齿从外侧插入SMC铁心槽中，齿根端部的伸出段压紧SMC，再通过两侧齿压板进行压紧，加工较方便。由于铁心由两种材料组合而成，称为混合铁心。电枢绕组是一个大的饼式绕组，嵌入在定子铁心之中。转子包括铁心和永磁体，永磁体按NS交替排列。定转子之间通过轴承保持气隙长度。为了使电机有自启动能力，实际电机由两相以上组成。当电机为两相结构时，由图1中的两组结构拼成，两相之间错开90°电角

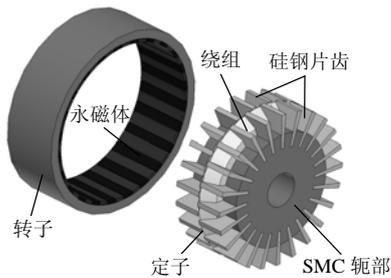


图1 混合铁心TFPM一相结构示意图

Fig. 1 One phase diagram of hybrid iron-core TFPM

度；当电机为三相结构时，由图中的3组结构沿轴向拼成，空间上两两错开120°电角度。该类电机相间电路与磁路均独立，在一相出现故障时不会影响到其它相，在多相结构时具有很好的容错能力。

永磁体磁场从N极出发，通过气隙，到一侧定子的齿部，再通过定子轭部，到另一侧定子上与之相邻的2个齿，最后通过气隙回到永磁极S极。从磁路分析来看，在定子齿中磁场是径向分布的，直接采用沿圆周方向叠压的硅钢片，既能够满足磁路要求，也能够保证足够的机械强度；在定子轭部铁心中，磁路偏过90°电角度，具有三维特性，需要采用SMC材料。结构上沿轴向分成2个对称部分，用模压技术完成。本电机加工简单，通过简单的拼装技术就可完成，安装时先把模块化的齿逐个嵌入SMC定子轭部铁心，完成混合铁心模块，再把绕制好的线圈夹在两个混合铁心模块之间，最后在两侧安装好齿压板，就可完成一相结构，转子加工方法与普通外转子电机相同。定转子都安装完成后，按普通电机的方法即可装配完成，能够很好地解决文献[4]中方案拆装麻烦的问题。

该电机既可以运行于无刷交流模式，也可以运行于无刷直流模式。当定子绕组中通入电流时，定子电枢磁场与转子永磁体磁场相互作用，使转子转动，如果有多相，就能够产生自启动转矩，而且相数越多，运行越平稳。与普通永磁电机相同，其速度正比于电流频率，反比于极对数。本电机的优点是极对数比普通永磁电机大很多，因此在相同供电频率下，能够达到更低的速度，并具有很高的转矩密度，非常适用于低速大转矩的直接驱动场合。

## 2 设计与分析

### 2.1 设计方案

该混合铁心TFPM各相磁路独立，与普通永磁同步电机相比，其结构复杂，成本高，突出的优点是转矩密度高，其值可达传统感应电机的10倍、普通永磁电机的5倍以上，因此该电机适用于体积小、重量轻、功率密度高的特殊场合。与普通电机设计不同的是，该电机设计时需尽量增大电机的极数，这是由于SMC材料低频工作时的涡流损耗要比普通硅钢片叠片铁心大很多，两者差距将随工作频率升高而缩小，因此需要尽量提高电机的额定工作频率，发挥SMC材料的优点<sup>[8]</sup>。

通过类似于永磁电机的设计步骤，可获取一个满足设计要求的可行方案，然后再以提高转矩密度

或降低成本为优化目标,以结构参数为优化变量,对电机进行优化设计,就可以得到一个较好的设计方案。表1给出了本文混合铁心TFPM样机的设计参数。为了实验时有足够的机械强度,本样机中定子齿压板、外壳及轴承的尺寸取值较大,实际开发产品时能够进一步缩小。

表1 TFPM设计参数  
Tab. 1 Design parameters of TFPM

参数	数值	参数	数值
转子外径/mm	128	转子内径/mm	110
定子外径/mm	109	定子内径/mm	24
电机总长/mm	155	铁心长度/mm	80
定子齿宽/mm	3.5	极对数	24
永磁体外径/mm	115	相数	2
额定电流/A	5	额定频率/Hz	100
额定转矩/(N·m)	35	永磁体类型	N38SH
额定电压/V	220	SMC材料	Somaloy550

## 2.2 转矩分析

TFPM性能的一个重要指标是转矩,其大小与电流、永磁体磁链直接相关。通过磁路分析,可推导出它们之间的定量关系,为本电机的转矩分析提供有利的依据<sup>[5]</sup>。

TFPM工作过程中,电机永磁体磁链在定子齿与转子永磁体中心线对齐时达到最大值 $\psi_m$ ,定义此时为初始位置,则在运行过程中永磁体磁链 $\psi_0$ 随着转子位置 $\theta$ (电角度,等于机械角度乘以极对数 $p$ )发生变化,其表达式为

$$\psi_0 = \psi_m \cos \theta \quad (1)$$

电机带负载运行时,线圈磁链除了永磁体磁链外,还需加上定子电枢电流产生的磁链 $\psi_a$ ,则总磁链为

$$\psi = \psi_m \cos \theta + \psi_a \quad (2)$$

假设此时定子电流为

$$i_a = -\sqrt{2}I \sin \theta \quad (3)$$

式中 $I$ 为定子电流有效值,则产生的转矩为

$$T = p \frac{d\psi_0 / L_{a0}}{d\theta} \psi_a = p \frac{d\psi_0}{d\theta} \frac{L_a}{L_{a0}} i_a = \frac{\sqrt{2}}{2} p \psi_m \frac{L_a}{L_{a0}} (1 - \cos 2\theta) I = C_M \frac{L_a}{L_{a0}} (1 - \cos 2\theta) \psi_m I \quad (4)$$

式中: $C_M = \sqrt{2}p/2$ 为转矩常数; $L_{a0}$ 为空载时线圈电感; $L_a$ 为负载时线圈电感。

从式(4)可以看出,电机一相绕组产生的转矩是正弦脉动的,其可以分解成2个分量:一个平均值分量;另一个是以2倍次转子位置角正弦脉动的分量。转矩平均值表达式为

$$T_{av} = C_M L_a \psi_m I / L_{a0} \quad (5)$$

平均转矩大小与定子电流有效值和永磁体磁链幅值成正比。TFPM在定子电流小时,铁心不饱和, $L_{a0}=L_a$ ,此时转矩仅正比于定子电流,随着负载电流增大,铁心开始饱和, $L_a$ 将小于 $L_{a0}$ ,转矩增加的速度降低。实际分析时,可先通过3D静态磁场分析得到 $\psi_m$ 与 $L_a$ ,就可以计算得到电机的动态转矩与其平均值<sup>[9-10]</sup>。虽然TFPM的转矩可通过3D动态有限元来求出,但计算精度与步长有很大的关系,计算过程非常耗时。相对来说,3D静态有限元分析相对简单,计算也较方便。

## 3 有限元分析

该混合铁心TFPM的磁场在定子轭部是三维分布的,因此需要建立3D有限元模型,考虑到计算时间,建模的对象取最小对称单元,即一相对极下的电机,如图2(a)所示,左右设置对称边界条件,电枢电流从一侧进,另一侧出,如图中所示方向,设计方案结构参数如表1所示。在线圈电流设置为0时,就可以求得空载磁场,如图2(b)所示,由图2(b)可以看出定子轭部磁场呈3D分布。利用建立的有限元模型既可以进行静态分析,也可以进行动态分析<sup>[11-15]</sup>。

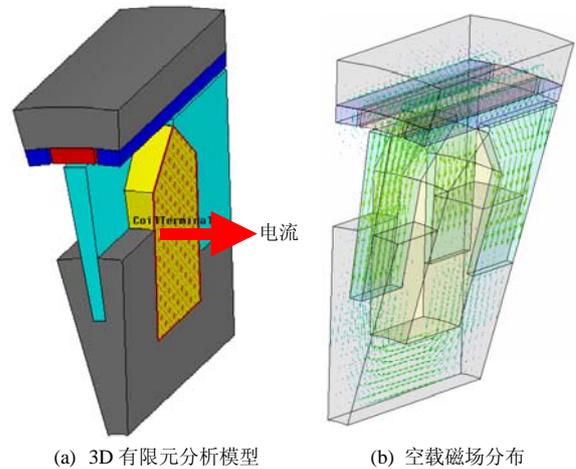


图2 TFPM有限元分析模型及空载磁场分布

Fig. 2 FEM analysis model and its no-load magnetic field of TFPM

通过静态磁场分析可求得空载永磁体磁链与转子不同位置时电枢绕组的磁链,图3给出了转子位置 $\theta=0^\circ、90^\circ、180^\circ$ 三种典型位置线圈中的磁链(一对极下)。当转子位置 $\theta=0^\circ$ 时,定子齿与转子永磁体中心线对齐( $d$ 轴),线圈磁链达到最大值,当定子电流 $i_a=0$ 时就可以得到永磁体最大磁链 $\psi_m$ ,此时磁路不饱和。当转子转到 $\theta=90^\circ$ 时,定子齿与转子

$q$  轴对齐，永磁体通过定子齿形成回路，此时线圈中永磁体分量为 0，线圈磁链均由电枢电流产生，当电流小时，磁路不饱和，当增加到 1000 安匝时，磁路趋于饱和；当转子再转到  $\theta=180^\circ$  时，此时线圈中永磁体产生的磁链为负值。转子在其他位置时，可由这 3 种情况通过曲线拟合得到。

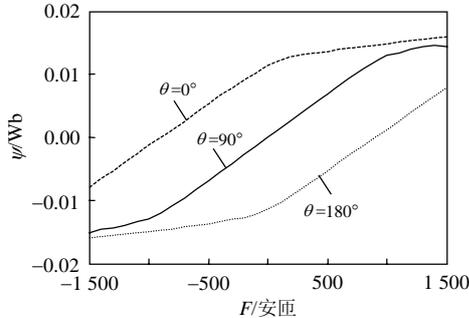


图 3 线圈磁链与电枢磁动势的关系(一对极下)

Fig. 3 Relationship between coil flux linkage and armature MMF of one pole pair

利用建立的 3D 模型，在  $i_a=0$  时给转子设置相应的速度，就可以求得绕组的空载电动势及空载磁链(为显示出相位关系，磁链增大了 300 倍)，图 4 给出在 50 Hz 电源供电时的空载电动势及空载磁链，此时电机转速为 125 r/min。由图可见磁链是正弦分布的，在  $\theta=0^\circ$  时达到最大值，与式(1)相吻合。

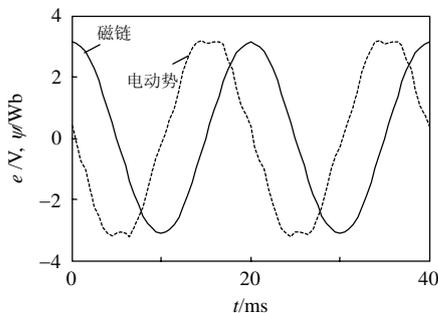


图 4 一对极下线圈空载磁链( $\times 300$ )与空载电动势

Fig. 4 Flux linkage and no-load EMF of armature winding of one pole pair

在建立的有限元模型中，根据式(3)给电枢绕组施加电流，可得到一对极下的转矩，再乘以极对数即可以得到整个电机的转矩。图 5 为一相额定电流时(5A)的转矩瞬时值与平均值，并与由式(4)不考虑饱和及考虑饱和 2 种情况的计算结果进行了对比。在不考虑饱和作用下，转矩计算值较大，与 FEM 结果也相差较大；在考虑饱和后，解析计算结果与 FEM 结果很接近，可见在额定电流时，磁路已经趋于饱和状态，这一点也可由图 3 看出。

由图 5 可知，一相转矩的平均值为 17.3 N·m，有效铁心部分的转矩密度为  $33.6(\text{kN}\cdot\text{m})/\text{m}^3$ ，约为

普通永磁电机的 8 倍。本设计方案两相结构在空间上错开  $90^\circ$  电角度，电流相位上相差  $90^\circ$ ，因此两相结构的转矩平均值为单相结构的 2 倍，即本设计方案转矩为  $34.6 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，与设计值相接近，可见该类型电机转矩密度高，磁路独立，容错性好。

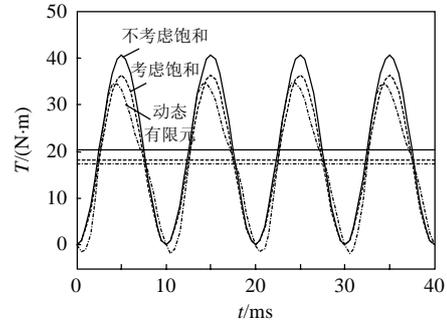


图 5 一相结构的动态转矩及平均转矩

Fig. 5 Dynamic torque and average torque of one phase structure

#### 4 实验结果

两相混合铁心 TFPM 样机照片如图 6 所示。图 6(a)为定子，由两相磁路组成，两相之间隔开一定距离，且两者齿错开  $90^\circ$  电角度，绕组接线由定子内径处的轴孔中抽出。图 6(b)为整体结构图，外转子直接套入定子，两者之间由轴保持气隙长度。

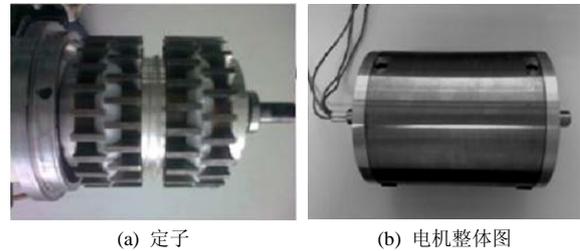


图 6 两相混合铁心 TFPM 样机照片

Fig. 6 Photo of two-phase hybrid iron-core TFPM

两相混合铁心横向磁通电机在驱动控制器的作用下，运行平稳，输出转矩大，但转矩测量比较麻烦，需要开发专用测量夹具。从式(4)可以看出，转矩的主要影响因素是永磁体磁链，而磁链的测量可通过测量绕组空载电动势来实现。图 7 为测得的一相绕组空载电动势，其有限元分析值与实验测量值相吻合，表明了分析结果的正确性。从图 7 看出，测量波形存在高频毛刺，这主要是由于样机加工工艺造成的。受限于实验室加工条件，目前样机定子齿部硅钢片还没有采用自动铆接工艺，而是叠压后直接插入 SMC 铁心槽中，齿根部由齿压板压紧，而齿顶部没有压紧装置，因此在运行时存在细微的抖动，导致测量结果中存在高频毛刺。将来混合铁心 TFPM 将采用自动铆接工艺的定子齿，其整体性

很好,能够解决这个问题。

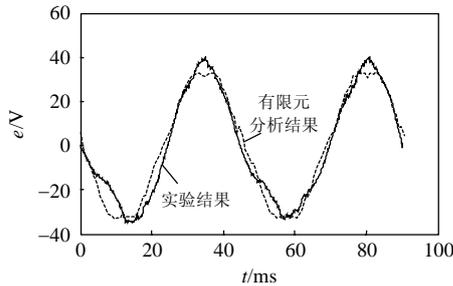


图7 混合铁心TFPM绕组空载电动势测量图

Fig. 7 Experimental no-load EMF curve of T hybrid iron-core TFPM

图7表明了本文分析的TFPM磁场性能的正确性,验证了所提混合铁心TFPM分析结果的有效性,这也是受限于实验条件时电机设计验证的有效方法。为了更全面地研究该电机,下一步将继续研究该电机的负载能力与优化设计。

## 5 结论

本文针对TFPM磁场的三维特性,提出了定子齿采用硅钢、定子轭部采用SMC的混合铁心结构。在详细分析该混合铁心TFPM结构与工作原理基础上,提出了设计方法与加工工艺,制造了相应的样机,进行了详细的理论分析与实验测试,并分析了实验测试中存在的误差。结果表明混合铁心TFPM样机转矩密度达到 $33.6 \text{ (kN}\cdot\text{m)/m}^3$ 。利用文中提出的有限元分析方法,对电机结构进一步优化,还能够提高电机的转矩密度。可见,结构简单、加工方便的混合铁心TFPM非常适用于低速大转矩直驱系统,具有很好的应用前景。

## 参考文献

- [1] Weh H, May H. Achievable force densities for permanent magnet excited machines in new configuration[C]//Proceedings of 1986 International Conference on Electrical Machines. Muchen, Germany: ICEM, 1986: 1107-1111.
- [2] Miteham A J, Rolls-Royce IRD Ltd. Transverse flux motors for electric propulsion of ships[J]. IEE Colloquium on New Topologies for Permanent Magnet Machines, 1997, 18(3): 1-6.
- [3] Arshad W M, Backstorm T, Sadarangani C. Analytical design and analysis procedure for a transverse flux machine[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Electric Machines and Drives. Cambridge, USA: IEEE, 2001: 115-121.
- [4] 陈金涛, 辜承林. 新型横向磁通永磁电机研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 155-160.  
Chen Jintao, Gu Chenglin. Study on novel transverse-flux permanent magnet machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 155-160(in Chinese).
- [5] Lu K Y, Ritchie E, Rasmussen P O, et al. General torque equation capable of including saturation effects for a single phase surface mounted permanent magnet transverse flux machine[C]//Conference Record of International Conference on Industry Applications. Salt Lake City, USA: IEEE, 2003: 1382-1388.
- [6] Pennander Lars-Olova, Jack Alanb. 铁粉软磁复合材料开发及其在电机上的应用[J]. 金属功能材料, 2002, 9(3): 19-25.  
Pennander Lars-Olova, Jack Alanb. Development of iron powder SMC materials and its application in electrical machines[J]. Metallic Functional Materials, 2002, 9(3): 19-25(in Chinese).
- [7] 黄允凯, 朱建国, 胡庚生. 采用软磁复合材料设计高速爪极式永磁电机[J]. 电机与控制应用, 2005, 25(15): 155-160.  
Huang Yunkai, Zhu Jianguo, Hu Qiansheng. Design of a high speed claw-pole permanent magnet motor with soft magnetic composite core[J]. Electric Machines & Control Application, 2005, 25(15): 155-160(in Chinese).
- [8] 陈金涛, 辜承林. 轴向磁场无铁心无刷永磁盘式电机的设计[J]. 微电机, 2002, 35(5): 14-16.  
Chen Jintao, Gu Chenglin. The design of axial-filed permanent magnet brushless coreless disc motor[J]. Micro-motors, 2002, 35(5): 14-16(in Chinese).
- [9] 卢琴芬, 叶云岳. 基于场路结合模型的深槽式单相直线感应电机特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18): 89-93.  
Lu Qinfen, Ye Yunyue. Characteristics study of single phase deep-slot linear induction motor based on field-circuit combined model [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(18): 89-93(in Chinese).
- [10] 王晓远, 任娜, 刘艳, 等. 横向磁通电机的三维磁场分析与计算[J]. 微电机, 2004, 37(2): 12-14.  
Wang Xiaoyuan, Ren Na, Liu Yan, et al. Analysis and computation of 3D magnetic field of TFM[J]. Micro-motors, 2004, 37(2): 12-14(in Chinese).
- [11] 卢琴芬, 方攸同, 叶云岳. 大气隙直线感应电机的力特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 25(21): 132-136.  
Lu Qinfen, Fang Youtong, Ye Yunyue. A study on force characteristic of large air gap linear induction motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 25(21): 132-136(in Chinese).
- [12] 刘细平, 林鹤云, 杨成峰. 新型双定子混合励磁风力发电机三维有限元分析及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(20): 142-146.  
Liu Xiping, Lin Heyun, Yang Chengfeng. 3-D FEA and experiment study of novel dual-stator hybrid excited wind generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(20): 142-146(in Chinese).
- [13] 刘哲民, 陈谢杰, 陈丽香, 等. 基于3D-FEM的新型横向磁通永磁电机的研究[J]. 电工技术学报, 2006, 23(5): 19-23.  
Liu Zhemin, Chen Xiejie, Chen Lixiang, et al. Study of a new transverse flux permanent magnet machine based on 3D-FEM [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 23(5): 19-23(in Chinese).
- [14] Lu Q F, Fan C Z, Ye Y Y, et al. A high torque density permanent magnet motor for oil pumping unit[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(7): 07F108-07F108-3.
- [15] 卢琴芬, 范承志, 叶云岳. 新型抽油机用盘式永磁电机的磁场与力特性[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2008, 42(4): 651-655.  
Lu Qinfen, Fan Chengzhi, Ye Yunyue. Magnetic field and force characteristic of disc-type permanent magnet motor for novel pumping unit[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(4): 651-655(in Chinese).



卢琴芬

收稿日期: 2010-11-02.

作者简介:

卢琴芬(1972), 女, 副教授, 研究方向为直线电机及其控制、电机优化设计, luqinfen@yahoo.com.cn;

谢舸(1986), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机电磁场分析及高速铁路牵引仿真。

(编辑 李婧妍)