

# 外转子双凸极永磁电动机的有限元分析

郭建龙, 陈世元

(华南理工大学电力学院, 广东省 广州市 510640)

## Finite Element Analysis of Doubly Salient Permanent Magnet Motor With External Rotor

GUO Jian-long, CHEN Shi-yuan

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

**ABSTRACT:** This paper proposes a doubly salient permanent magnet motor with external rotor on the base of the doubly salient varied reluctance motor, and appoints its structure and size. It makes finite element analysis on the motor based on the field arguments in the terms of no-loading, loading and single armature field, thinking of different rotor angle, different armature current, single pulse and double pulse working mode. It gets the static parameters curves for the motor. In contrast to the doubly salient varied reluctance motor, the armature flux-linkage can circle only by adjacent poles, but does not circle by crossing magnet because of the permanent magnet which has high reluctance and resistance, which makes characteristics of the armature windings induction vary. The characteristics of strengthening or weakening armature field versus permanent field makes orientation of permanent magnetic flux-linkage vary. The motor performs from half circle mode to whole circle mode.

**KEY WORDS:** doubly salient permanent magnet motor with external motor; performing characteristics; finite element analysis

**摘要:** 在双凸极变磁阻电机基础上, 提出了一种外转子结构的双凸极永磁电动机并确定了其结构尺寸。针对该电机在不同转子位置角、不同电枢电流分别工作在单拍和双拍时的空载、负载以及电枢磁场单独作用的情况进行了基于场量的有限元数值计算, 并进一步得出了该电机的静态参数特性曲线。分析表明, 相对于双凸极变磁阻电机而言, 由于该电机高磁阻高矫顽力的永磁体的存在, 电机电枢磁链只能通过相邻极闭合而不能穿过磁钢匝链到其他相, 使得绕组电感特性发生了变化。电枢磁通对永磁磁通增磁或去磁特性改变了永磁磁链的流向。电机由半周期控制运行模式变为全周期控制运行。

**关键词:** 外转子双凸极永磁电动机; 运行特性; 有限元分析

## 0 引言

双凸极永磁电动机是在开关磁阻电动机基础上发展起来的一种新型特种永磁电动机。具有结构简单、运行可靠、控制灵活、高功率密度、高效率、高转矩电流比、高转矩惯量比等优点。外转子结构可以实现电动汽车轮毂直接驱动, 显著提高了驱动效率, 是一种非常好的驱动用电动机。但是该电机定转子齿槽结构和磁场的周期性变化使其存在严重的局部饱和。加之高磁积能、高矫顽力的永久磁钢的存在, 它又是一个强耦合的非线性系统。目前专门针对其运行原理进行全面深入剖析的文章尚未见诸文献<sup>[1-8]</sup>。本文提出了一种新型外转子结构双凸极永磁电动机, 并完全基于有限元场的计算对其运行原理和特性进行了剖析, 为该电机的进一步研究与深入提供了参考。

## 1 电机的结构尺寸

一台三相 1 000 W 的外转子双凸极永磁电动机结构如图 1 所示。定子为 12 极, 转子为 8 极。定子空间相对的 4 个极所串联的绕组为一相, 图中只标出 A 相绕组(阴影部分)。

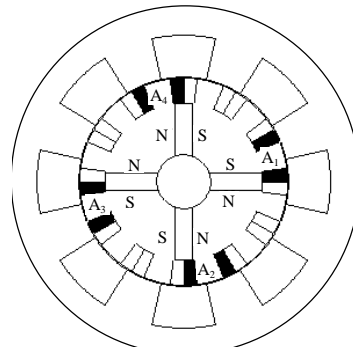


图 1 外转子双凸极永磁电机横截面示意图  
Fig. 1 Cross-section of doubly salient permanent magnet motor with external rotor

电机采用外转子结构后,外转子的尺寸和结构形状参照相同功率传统电机(外定子内转子结构)的定子尺寸和结构形状,外转子电机定子尺寸和结构形状参照相同功率传统电机转子的尺寸和结构形状,在外转子电机的定子上有固定轴孔,固定轴用来对外转子和整个电机起支撑和固定作用。根据电机的电磁设计原理,采用类比法<sup>[9]</sup>确定该电机的主要尺寸如表 1 所示。

表 1 电机的主要尺寸  
Tab. 1 Major size of the motor

定子内径/mm	定子外径/mm	定子极高/mm	转子内径/mm	转子极高/mm
19.3	74.3	9	75	15
磁铁尺寸/mm <sup>3</sup>	转子外径/mm	定子极弧/(°)	气隙/mm	转子极弧/(°)
75×18.5×6	142	15°	0.35	20
转子齿宽/mm	迭片长/mm	定子齿宽/mm		
13	75	9.6		

在该电机的定子上放有 4 块永磁铁,永磁铁采用烧结钕铁硼 280/135,电阻率为  $150\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ,磁铁剩磁磁密为 1.18 T,磁铁矫顽力为 1 350 kA/m。硅钢片采用冷轧无取向 DW540-50(通过文献[10]可以得到永磁铁的退磁曲线和硅钢片的直流磁化曲线)。每相绕组串联匝数为 260 匝,每相绕组电阻为  $2.736\Omega$ 。定子固定轴采用磁导率非常低的材料做成,磁导率接近空气磁导率。

## 2 有限元分析

### 2.1 基本假设

根据所分析问题的性质和双凸极永磁电机特点可以做如下假设:①不考虑铁磁材料的铁心损耗;②电机轴向为无限长,忽略边缘效应;③电机外缘漏磁场忽略不计;④忽略位移电流。

### 2.2 电磁场分析的数学模型和边界条件

电机求解区域如图 1 所示。在求解区域内向量磁位  $A$  满足二维非线性泊松方程

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\nu\frac{\partial A}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\nu\frac{\partial A}{\partial y}\right)=-J \quad (1)$$

式中: $\nu$ 为磁阻率; $J$ 为电流密度。空载时电机电枢绕组不通电流,整个电机磁场是由永久磁钢建立的,将永久磁钢等效为面电流密度 $J_{\text{pm}}$ 表示,所以 $J=J_{\text{pm}}$ ;负载时电机磁场由永磁磁场和电枢磁场共同建立,此时 $J=J_{\text{pm}}+J_c$ , $J_c$ 为电枢绕组的电流密度;电枢磁场单独作用时,整个电机磁场完全由电枢绕组产生, $J=J_c$ 。在分析中,载荷时电流密度取  $5.89\text{ A/mm}^2$ 。在电机外转子外边界上向量磁位满足  $A=0$  的边界条件。

### 2.3 有限元前处理

前处理包括单元剖分和材料属性定义。单元类型为 3 节点三角形。首先把材料属性和单元类型分配给几何模型中对应的各个区域,然后对模型进行网格剖分,整体剖分图如图 2 所示,气隙局部剖分图如图 3 所示。

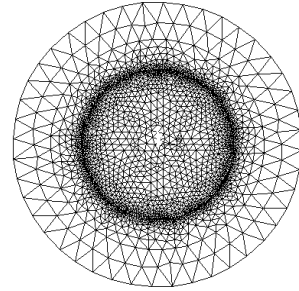


图 2 整体剖分图

Fig. 2 Meshing plot of the whole motor

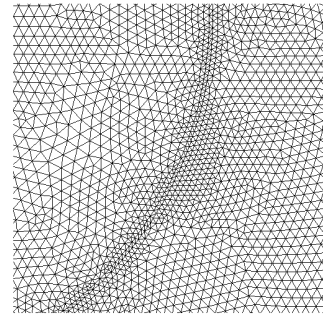


图 3 气隙局部剖分图

Fig. 3 Meshing plot of local gap

对于铁磁区域,硅钢片的磁阻率可通过查直流磁化曲线得到,硅钢片的电阻率 $\rho=5.7\times 10^{-7}\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ;对于空气区域、绕组区域和气隙的磁导率为 $\mu_0$ ;对于永久磁钢<sup>[11]</sup>区域,其电阻率为 $1.5\times 10^{-6}\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ,线性磁导率为 0.7(磁阻尽可能高),矫顽力各向异性,对于 4 块磁铁可分别定义。

### 2.4 有限元计算

本文采用 ANSYS 软件<sup>[12-13]</sup>对该电机进行了有限元计算<sup>[14]</sup>。单元剖分后根据不同分析情况对模型加载(可以参考 2.2 节),然后进入到 SOLUTION 环节进行求解,因为分析的是 2-D 静态磁场,所以选用波前求解器 Frontal 进行求解,求解完成后就可以进入到通用后处理器 post1 进行结果分析。

设外转子逆时针方向旋转,电机运行中永磁磁链一个变化周期为  $45^\circ$ ,定义  $0^\circ$  位置为定子 A 相磁极的中心线比相对的转子槽中心线超前  $5^\circ$  的位置, $17.5^\circ$  位置为定子 A 相磁极的中心线比相对的转子磁极的中心线超前  $10^\circ$  的位置, $30^\circ$  位置为定子 A 相磁极的中心线比相对的转子磁极中心线落后  $2.5^\circ$  的

位置。

在有限元分析计算中,针对转子这3个特殊位置分别得出电机在空载、负载和电枢磁场单独作用下的磁场分布图、气隙中心线处的磁密( $B$ )分布图、磁场强度( $H$ )分布图和特定路径的矢量磁位( $A$ )分布图,而且还考虑了电机在一相和多相加载下的情况。

本文仅列出部分有限元计算分析的结果。需要说明的是本文在分析时所有量都是采用国际单位。

图4、图5和图6分别是转子位置为 $17.5^\circ$ 时两磁场共同作用下磁密云图、永磁磁场单独作用、电枢磁场单独作用时对应的磁场分布图。

图7、图8分别为转子位置为 $17.5^\circ$ 时两磁场共同作用和永磁磁场单独作用对应的气隙中心线处

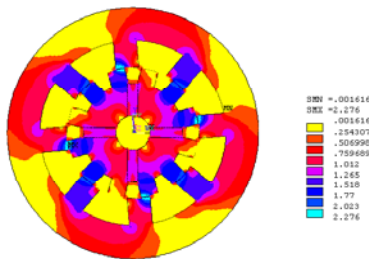


图4  $17.5^\circ$ 位置A相加载两场共同作用磁密云图  
Fig. 4 Magnetic plot of both magnetic field interacting of  $17.5^\circ$  position and A phase exciting

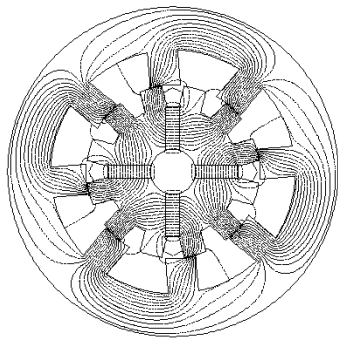


图5  $17.5^\circ$ 位置永磁磁场单独作用时磁场分布图  
Fig. 5 Magnetic plot of single permanent magnetic field action of  $17.5^\circ$  position

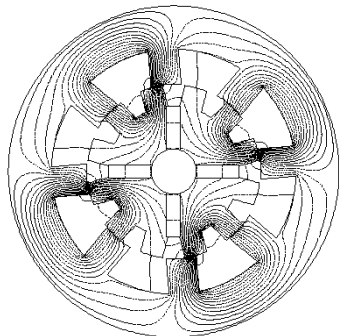


图6  $17.5^\circ$ 位置电枢磁场单独作用时磁场分布图  
Fig. 6 Magnetic plot of single armature magnetic field action of  $17.5^\circ$  position

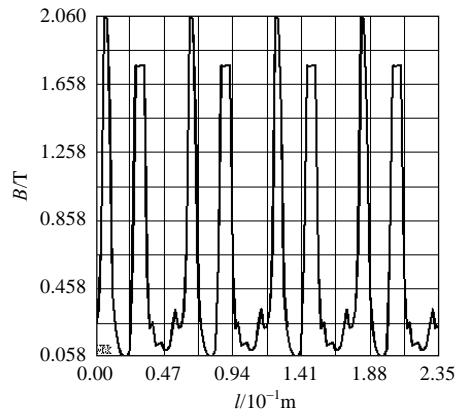


图7  $17.5^\circ$ 位置A相加载两场共同作用B图  
Fig. 7 B plot of both magnetic field interacting of  $17.5^\circ$  position and A phase exciting

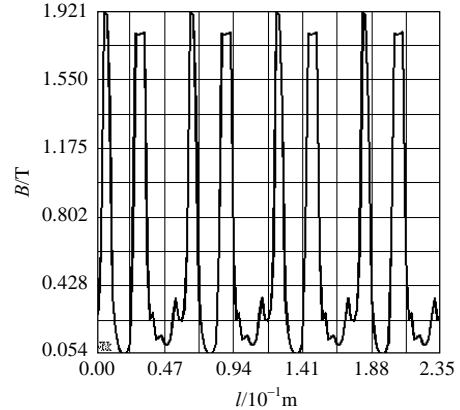


图8  $17.5^\circ$ 位置永磁磁场单独作用时B图  
Fig. 8 B plot of single permanent magnetic field action of  $17.5^\circ$  position

磁通密度分布图。

图9和图10分别是转子位置为 $0^\circ$ 和 $30^\circ$ 时A相加载两磁场共同作用对应的电机矢量磁位( $A$ )沿闭合路径 $l$ 的分布曲线。其中 $l$ 是与气隙中心线同心的圆,其直径为定子外径减去定子极高。图11是计算得到的电机静态参数曲线。图12是A、C

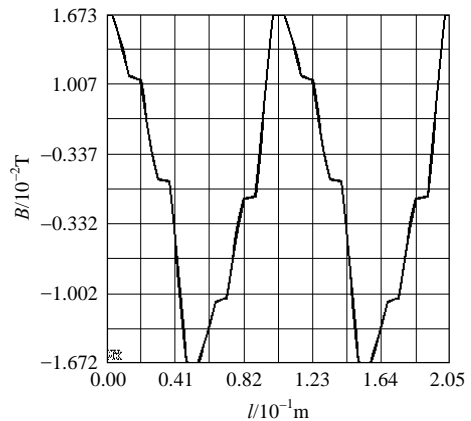


图9  $0^\circ$ 位置A相加载两场共同作用A图  
Fig. 9 A plot of both magnetic field interacting of  $0^\circ$  position and A phase exciting

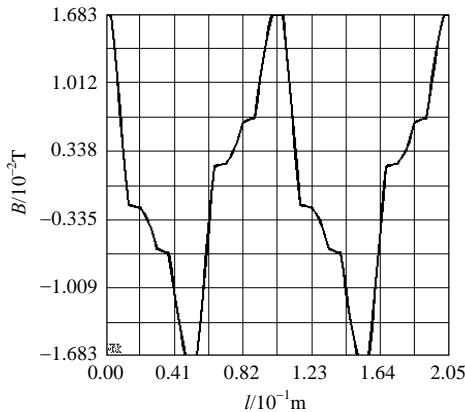


图 10 30°位置 A 相加载两场共同作用 A 图  
Fig. 10 A plot of both magnetic field interacting of 30° position and A phase exciting

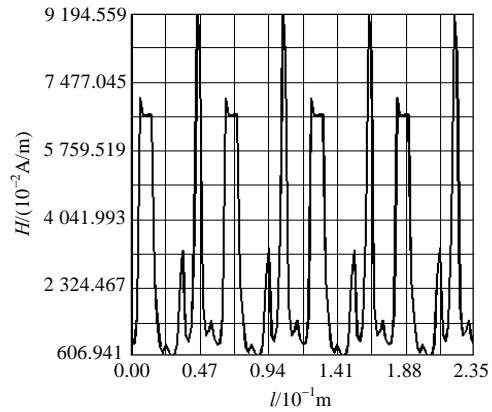
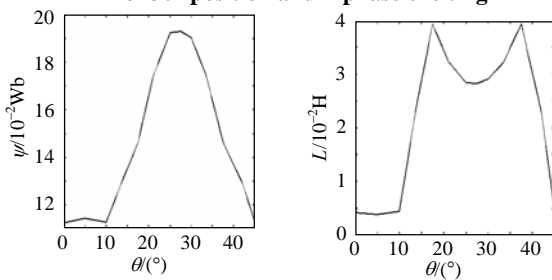


图 13 30°位置 A、B 两相加载两场共同作用 H 图  
Fig. 13 H plot of both magnetic field interacting of 30° position and A, B phase exciting



(a)永磁磁场单独作用时磁链曲线 (b)电枢磁场对永磁磁场增磁时电感特性

图 11 外转子双凸极永磁电机静态参数特性曲线

Fig. 11 Characteristics curve of static parameters for doubly salient permanent magnet motor with external rotor

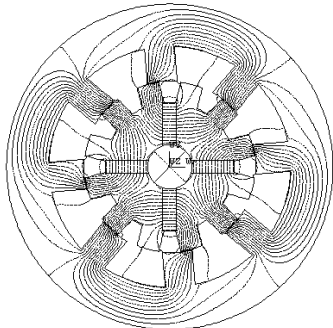


图 12 A、C 两相加载 17.5°位置两磁场共同作用磁场分布图

Fig. 12 Magnetic plot of both magnetic field interacting of 17.5° position and A, C phase exciting

两相加载 17.5°位置两磁场共同作用磁场分布图，图 13 是 30°位置 A、B 两相加载两磁场共同作用电机气隙中心线处磁场强度(H)分布图。

### 3 有限元结果分析

从图 4 可见该电机完全是一个局部饱和、非线性、强耦合的系统，在定转子极重叠位置存在严重的局部饱和。

从图 7、8 所示的气隙中心线处的磁密变化曲线可以看出，17.5°位置电枢磁场和永磁磁场共同作用时气隙中心线的磁密变化规律和 17.5°位置永磁

磁场单独作用时气隙中心线磁密的变化规律大致相同，但在数值上有所差异，前者磁密最大值为 2.060 T，后者磁密最大值为 1.921 T。对比图 5 发现，通过有限元计算得到的 17.5°位置两磁场共同作用的场图与图 5 基本相同。可以得出：从永久磁场来看，如果忽略端部磁场效应，气隙磁阻与转子位置无关，永久磁钢的磁通保持恒定，当绕组不通电时，转子始终处于转矩平衡静止状态。当电枢绕组磁场和永磁磁场共同作用时，平衡被打破，表现为电枢磁场使得产生某一方向转矩的极对极上磁密增大，而相反方向的磁密减小。可以看出，电枢磁场不改变永磁磁场的大小，只是改变了永磁磁场的流向。

图 9、10 就是有限元计算得出的沿路径  $l$  的各点矢量磁位值，根据式(2)~(4)，可以进一步得到电机的静态参数。

$$L(i, \theta_r) = \frac{\psi(i, \theta_r) - \psi_m}{i} \quad (2)$$

$$\psi = N\Phi \quad (3)$$

$$\Phi = L_c |A_1 - A_2| \quad (4)$$

式中： $A_1$ 、 $A_2$ 分别表示一匝线圈有效边截面中心线处的矢量磁位； $L_c$ 表示铁心长度； $N$ 表示电机一相绕组匝数； $\psi$ 表示电枢绕组匝链的磁链； $\psi_m$ 表示永磁磁链； $L$ 为电枢绕组电感； $\theta_r$ 为转子位置角； $i$ 表示电枢绕组电流。可见绕组电感不仅是转子位置角的函数，而且是电流的函数。图 11 就是计算得到的绕组静态参数特性曲线。

从图 6 看出，由于永磁磁场的存在(磁阻很高)，使得整个磁通路径发生了改变。绕组最大电感不是发生在定转子极对极，而是在定转子极与极对齐一半位置处，在极对极和极对槽位置处绕组电

感都很小。在永磁磁场单独作用下永磁磁链还是极对极时最大,极对槽时最小,同理可以证实电枢磁场单独作用下绕组电感还是极对极时最大,极对槽时最小。电机的静态参数特性曲线(图 11)验证了这点。

定子励磁极与转子槽重合区间,永磁磁链变化率小,通电所能产生的电磁转矩不大,因此,从提高能量转换比出发,定子每相绕组的导通区间应在定转子极重叠区间即磁链开始上升和磁链下降结束之前的区间。

针对外转子双凸极永磁电动机的电磁转矩,依据磁共能对转子位置角 $\theta$ 的偏导数方法<sup>[15]</sup>得到

$$T_e = \left. \frac{\partial W(i, \theta)}{\partial \theta} \right|_{i=\text{const}} \quad (5)$$

$$W(i, \theta) = \int_0^i \psi(i, \theta) di \quad (6)$$

$$\psi(i, \theta) = \psi_m + \psi_i \quad (7)$$

在线性磁路模型下,根据式(5)~(7)可推出双凸极永磁电动机电磁转矩表达式

$$T_e = i \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta} + \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} = T_m + T_r \quad (8)$$

可见,磁阻转矩与电流方向无关,在整个永磁磁链周期内,若通以大小恒定的电流值,磁阻转矩正负抵消,合成为零。电机电磁转矩主要是永磁转矩,与电流方向有关。为产生连续的正向转矩,在永磁磁链上升区通以正向电流,在永磁磁链下降区通以负向电流。如若要电机反向运转,则改变通电绕组次序即可。如若在连续运转过程中需要反向制动转矩,那么这时可以在永磁磁链上升区通负电,在永磁磁链下降区通正电。

以上分析的是针对外转子双凸极永磁电动机一相加载情况,通过有限元分析计算结果可知电机多相加载时运行特性和规律与一相时是一致的。

## 4 结论

本文通过确定电机主要尺寸和有限元分析后得出以下结论:

(1) 给出了 1 000 W 的 12/8 极外转子双凸极永磁电动机的主要尺寸方案。

(2) 对电机进行了有限元分析,得出电机在不同运行情况下的磁场分布图、气隙中心线处的磁通密度分布图、磁场强度分布图以及特定路径的矢量磁位分布图。

(3) 电机的静态参数特性曲线表明,由于永磁铁的存在,电枢绕组只能通过相邻极闭合而匝链不到其它相,这使得绕组电感和电感变化率减小,绕组最大电感处在定转子极与极对齐一半位置处。

(4) 该电机磁场主要是永磁磁场,电枢磁场不会改变永磁磁场的大小,只是改变了永磁磁场的流向。永磁磁场单独作用时,气隙磁阻与转子位置无关,电机总是处于平衡状态。

(5) 电磁转矩主要是永磁转矩,磁阻转矩带来了转矩脉动,从整个周期运行看,磁阻转矩正负相抵消,合成为零。相对于双凸极变磁阻电机工作原理发生根本变化。

## 参考文献

- [1] 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的工作原理与参数计算[J].中国电机工程学报,2000,20(10):14-18.  
Bian Dunxin, Zhan Qionghua, Hareb Fathi, et al. The operation principle and parameters calculation for a novel single-phase doubly salient permanent magnet motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10): 14-18(in Chinese).
- [2] 程明,周鄂,蒋全.双凸极变速永磁电机的静态特性[J].电工技术学报,1999,14(5):9-13.  
Cheng Ming, Zhou E, Jiang Quan. Static characteristics of doubly salient permanent magnet motors for adjustable speed drives [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(5): 9-13(in Chinese).
- [3] Liao Y, Lipo T A. A new doubly salient permanent magnet motor for adjustable speed drives[J]. Electric Machines and Power Systems, 1994, 22(1): 256-270.
- [4] Liao Y, Liang F, Lipo T A. A novel permanent magnet motor with doubly salient structure[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1995, 31(5): 1069-1078.
- [5] Claudia Martis, Radulescu M M, Bi-ro K. On the dynamic model of a doubly-salient permanent-magnet motor[C]. Mediterranean Electrotechnical Conf., Tel-aviv, Israel, 1998: 410-414.
- [6] Cheng Ming, Chau K T, Chan C C. Design and analysis of a new doubly salient permanent magnet motor[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2001, 37(4): 3012-3020.
- [7] Cheng Ming, Chau K T, Chan C C. Static characteristics of A new doubly salient permanent magnet motor[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2001, 16(1): 20-25.
- [8] 程明.双凸极变速永磁电机的运行原理及其静态特性的线性分析[J].科技通报,1997,13(1):16-20.  
Cheng Ming. Principle and linear analysis of static characteristics of a doubly salient variable speed permanent magnet motor[J]. Bulletin of Science and Technology, 1997, 13(1): 16-20(in Chinese).
- [9] 林明耀,程明,周鄂.新型12/8极双凸极变速永磁电机的设计与分析[J].东南大学学报:自然科学版,2002,32(6):944-948.  
Lin Mingyao, Cheng Ming, Zhou E, Design and analysis of a new

- 12/8-pole doubly salient permanent-magnet motor[J], Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2002, 32(6): 944-948 (in Chinese).
- [10] 电子工业部第二十一研究所. 微特电机设计手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社.
- [11] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [12] 朱中平, 薛剑峰. 中外磁性材料实用手册[M]. 北京: 中国物资出版社, 2004.
- [13] 唐兴伦, 范群波, 张朝晖, 等. ANSYS 工程应用教程热与电磁学篇[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
- [14] 龚曙光. ANSYS 基础应用及范例解析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [15] 闫大伟, 陈世元. 外转子开关磁阻电动机有限元分析[J]. 微电机, 2004, 37(4): 25-26.
- Yan Dawei, Chen Shiyuan. The finite element analysis of the switch reluctance motor with external rotor[J]. Micro Motor, 2004, 37(4): 25-26(in Chinese).
- 
- 收稿日期: 2007-03-06.
- 作者简介:
- 郭建龙(1982—), 男, 山西省兴县人, 硕士研究生, 目前正在从事特种电机及其控制的研究, guojL5103@163.com;
- 陈世元(1954—), 男, 辽宁省辽阳人, 教授, 主要从事特种电机及其智能控制, 电机的交流绕组理论、电磁场、热交换和 CAD 等方面的研究。
- (责任编辑 丁玉瑜)