

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.02.021

开关磁阻电机的铁损分析与计算

田 晶,朱学忠*,周 翔

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 210016)

摘要: 针对开关磁阻电机(SRM)双凸极结构引起的铁心磁场复杂和铁损计算难以实现的问题,开展了SRM铁损计算方法的研究,对电机铁损与铁心磁密正交分量之间的关系进行了分析,根据铁心损耗正交等效理论提出一种计算SRM铁损的方法—椭圆法。应用Ansoft得到一台三相12/8的SRM的铁心磁密及其分量 B_r 、 B_t ,并对磁密分量作了傅里叶分解,分别以对应的谐波幅值为长轴和短轴,画出了电机铁心椭圆形谐波磁密矢量图,再结合铁损计算公式计算了铁损。为对椭圆法的精确度进行评价,采用常规谐波分解法计算电机铁损,并与椭圆法计算结果进行了比较。研究表明,采用椭圆法计算铁损相对常规的谐波分解法计算更加准确,采用椭圆法可以更好的为SR电机的本体设计、绝缘材料的选取、冷却系统的设计等提供依据。

关键词: 开关磁阻电机; 铁损; 有限元分析; 谐波分解; 椭圆法

中图分类号: TH39; TM352 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2015)02-256-05

Iron loss analysis and calculation of switched reluctance motor

TIAN Jin, ZHU Xue-zhong, ZHOU Xiang

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the magnetic field analysis and iron loss calculation of switched reluctance motor (SRM, which has doubly salient structure), the method of iron loss calculation of SRM was investigated, and the relationship between the motor iron loss and quadrature components of core flux density was established. According to the core loss orthogonal equivalent theory, a method, Ellipse method, was presented to estimate the iron loss of SRM. A three-phase 12/8 SRM was analyzed with Ansoft so that the magnetic flux density and components B_r , B_t could be got and their FFT could be achieved. The accuracy of the Ellipse method was evaluated on the comparison between the iron loss value using Ellipse method, and the iron loss value using Harmonic method. The results indicate that Ellipse method to calculate the iron loss is more accurate than the Harmonic method and more advantageous for the design of motor body, cooling systems and insulation materials of SRM.

Key words: switched reluctance motor (SRM); finite element analysis (FEA); harmonic method; ellipse method

0 引 言

开关磁阻电机(SRM)的双凸极结构使其铁心磁场变化规律比较复杂,其磁通密度是非正弦、非线性、变化的空间矢量^[1],铁心各处的磁通密度不同且存在高度的局部饱和现象,定、转子的磁密变化频率也不相同。此外,SRM的铁心磁密与电机结构参数、转速、绕组连接方式以及控制策略等密切相关^[2-3]。而铁心

损耗又与磁密频率、幅值呈非线性关系,因此,对于SRM的铁损计算是比较困难的。SRM各部分的损耗不同,但最终都转化为热能使得电机温度升高,进行温度场分析时希望可以将电机不同部分的铁损作为热分析的载荷分别加载在电机热模型的对应部分以得到电机更精确的温度场分布,为电机绝缘材料的选择、冷却系统的设计提供依据。而通过有限元分析软件Ansoft计算得到的是铁心总铁损,无法输出铁心各部分的铁损耗,将其用于温度场分析时使得结果精度

收稿日期: 2014-09-24

作者简介: 田 晶(1990-),女,江苏盐城人,主要从事开关磁阻电机的损耗和温升方面的研究. E-mail: 15195843728@163.com

通信联系人: 朱学忠,男,副教授,硕士生导师. E-mail: 550125770@qq.com

较差,故有必要对SRM铁心各部分铁损值进行计算。

利用传统损耗公式、傅里叶级数分解和经验修正系数结合计算SRM铁耗是目前最常用的铁耗分析方法^[4]。SRM铁心磁场存在高度的局部饱和现象,直接对磁密波形进行谐波分解后的基波和谐波的幅值远远小于合成磁密的峰值,此时计算得到的铁损值较实际值小很多。本研究根据铁心损耗正交等效理论,采用椭圆法计算SRM的铁损,将铁心复杂磁场分解为两个正交的交变磁场,则复杂磁场所引起的损耗问题就可以分解为两个正交的交变磁场所引起的损耗问题。

本研究对一台12/8结构、转速为10 000 r/min的SRM的铁心损耗进行有限元分析计算。笔者应用Ansoft得到SRM铁心不同部分的磁密波形,再采用基于磁场正交分解等效原理的椭圆法计算得到SRM的铁耗值,并与对铁心磁密波形直接傅里叶分解计算得到的铁损值进行比较,样机的铁心材料为硅钢片DW360-35,轴向长度60 mm,叠片系数95%,定子外径为60 mm,气隙为0.5 mm,控制策略为电流斩波控制(CCC),开通角 $\theta_{on}=0^\circ$,关闭角 $\theta_{off}=21^\circ$ 。

1 基于Ansoft的SRM的2D瞬态磁场分析

SRM的铁损与铁心磁场有密切关系,磁密的大小和变化频率直接决定了电机的铁损大小。本研究通过Ansoft软件二维瞬态仿真得到样机在10 000 r/min转速下空载时的动态磁场信息。

1.1 建立SRM有限元模型

SRM由定子、转子、绕组以及转轴构成,在Ansoft中建立的有限元模型如图1所示。电机绕组分为三相,每相由4个集中绕组构成,且4个绕组并联,励磁时相邻绕组极性相反,电机形成NSNS……NS分布的磁场。Ansoft一个显著的特点是在AnsoftCircuit Editor中定义外加电路,与模型构成一个完整系统进行仿真计算^[5-6]。在AnsoftCircuit Editor中定义的SRM功率

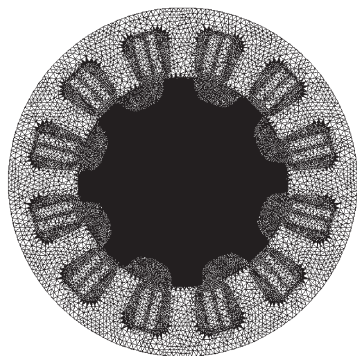


图1 SR电机有限元模型

变换器模型如图2所示。线圈 $L_{winding}$ 、端部电阻 R 和端部漏感 L 串联起来等效为每一相的绕组^[7-8], S_A 、 S_B 、 S_C 为主开关管, $D1\sim D6$ 为单向二极管, $D7\sim D12$ 为续流二极管, W_a 、 W_b 、 W_c 是电流控制开关管,其通断受电流表电流控制以实现电流斩波控制(CCC)。

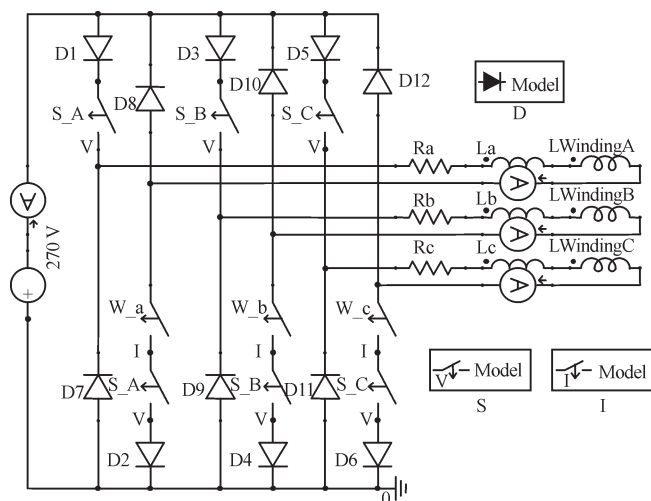


图2 功率变换器

1.2 SRM磁场仿真结果与分析

本研究建好模型后,根据任务栏的提示,依次完成材料、激励源、边界条件、运动选项、求解器、网格剖分的设置。设置完毕后即可对SRM进行Ansoft2D瞬态磁场分析。SRM铁心每个有限元单元的磁密波形各不相同,其大小和方向随着时间和转子位置变化而变化,在SRM定子齿、定子轭、转子齿、转子轭分别选取有限元单元节点,典型单元节点分布图如图3所示。

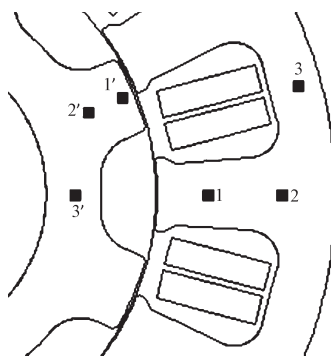
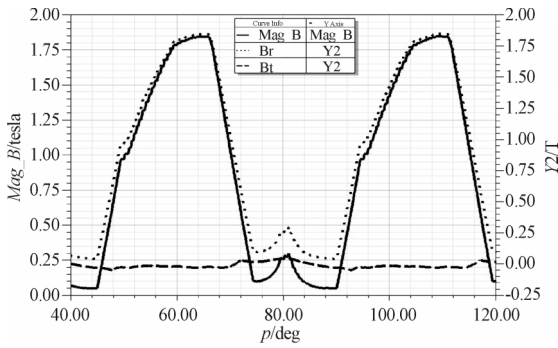


图3 典型单元节点分布图

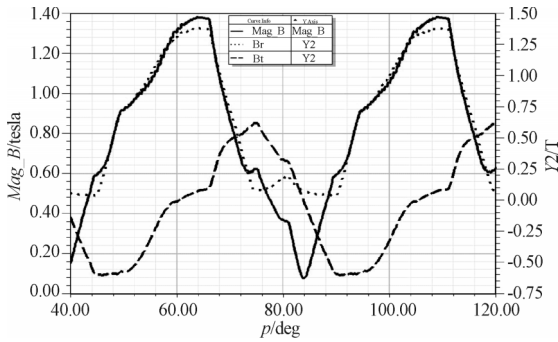
各节点合成磁密及其分量如图4、图5所示,其中径向分量 B_r 的正方向为由外径指向内径,切向分量 B_t 正方向为逆时针方向。

从图4可以看出,定子各节点磁密都是周期变化,变化频率相同,为1 333 Hz,一个磁密变化周期对应转子旋转 45° ;节点1、3所处的定子铁心磁场饱和。

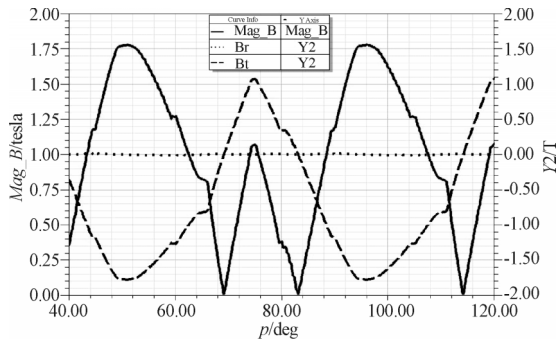
从图5可以看出,转子各节点磁密都是周期变化,合成磁密(不考虑方向)变化频率为2 000 Hz,一个磁



(a) 定子典型点1磁密波形

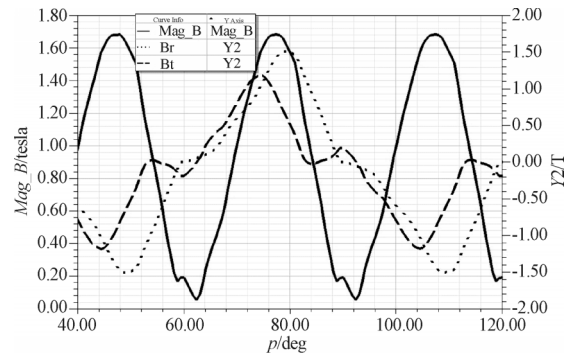


(b) 定子典型点2磁密波形

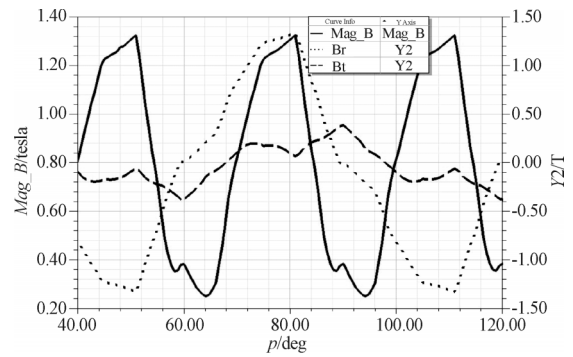


(c) 定子典型点3磁密波形

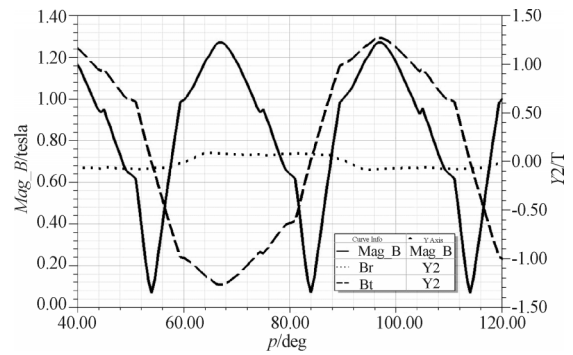
图4 定子典型点1、2、3磁密波形



(a) 转子典型点1磁密波形



(b) 转子典型点2磁密波形



(c) 转子典型点3磁密波形

图5 转子典型点1、2、3磁密波形

密变化周期对应转子旋转 30° ,分量磁密 B_r 和 B_t 的变化频率相同,为1 000 Hz,对应转子旋转 60° , B_r 和 B_t 波形为奇谐波函数,这是由SRM绕组的励磁方式决定的,绕组励磁磁场极性为NSNS……NS分布,每隔 30° 磁场极性反向,每隔 60° 磁场极性相同^[8]。

2 SRM 铁损椭圆法计算

2.1 铁心损耗正交等效计算理论

旋转电机铁心中包含两种磁场,即交变磁场与旋转磁场。磁场磁密幅值发生改变但方向不变的磁场称为交变磁场,而磁场磁密幅值不变但方向改变的磁场称为旋转磁场。SRM定子铁心节点2(图3)的椭圆磁场图如图6所示,可以看出,铁心磁场中同时存在交变磁场与旋转磁场,相应地产生交变铁心损耗与旋转

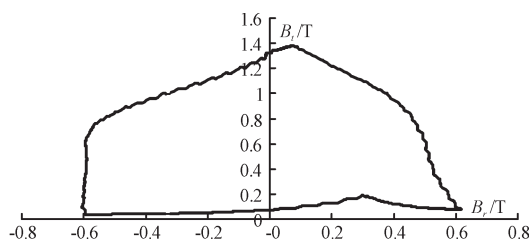
铁心损耗。

对于铁心硅钢片中任意的磁场波形,无论是交变磁场、旋转磁场、还是交变与旋转磁场的合成磁场,都可以分解为两个正交的交变磁场,因此,对于合成磁场所引起的损耗问题也可以分解为两个正交的交变磁场所引起的损耗问题进行研究^[10]。本研究将SRM铁心磁场正交分解,径向分量磁场引起的铁损称为径向分量磁场铁损而切向分量磁场引起的铁损称为切向分量磁场铁损,分别计算这两个铁损再对两者求和即可得到电机铁心总损耗^[11]。

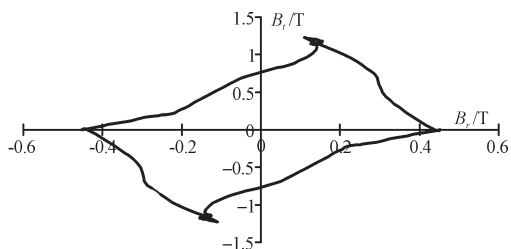
2.2 基于有限元分析的SRM铁损椭圆法计算

2.2.1 铁损计算公式

铁心在正弦磁场中的铁损与磁密的幅值和频率



(a) 定子铁心节点2的椭圆磁场图



(b) 转子铁心节点2的椭圆磁场图

图6 铁心节点的椭圆磁场图

有关,单位质量铁心的铁损计算公式如下^[12]:

$$P_{Fe} = C_h f B_m^n + C_e f^2 B_m^2 \quad (1)$$

式中: P_{Fe} —电机铁心单位质量铁损, w/kg; C_h, C_e —铁心磁滞损耗和涡流损耗系数,是与铁心材料特性、工艺因素和结构因素有关的常数; $n=1.6\sim 2.2$,与 B_m 的大小有关。

计算非正弦磁场中的铁心铁损值时常将磁密作傅里叶分解后再对其基波和各次谐波分别按式(1)计算得到各次谐波产生的铁损值,求和后得到非正弦磁场下铁心的铁损估算值。非正弦磁场铁损估算公式如下式所示:

$$P_{Fe} = C_h f \sum_{k=1}^m k B_m^n + C_e f^2 \sum_{k=1}^m k^2 B_m^2 \quad (2)$$

式中: k —磁密波形的第 k 次谐波, m —最高谐波次数。

SRM 铁心磁场存在高度的局部饱和现象,直接对磁密作傅里叶分解得到的基波和谐波幅值远小于合成磁密峰值,饱和磁场被分解成若干不饱和磁场,此时计算得到的损耗值较实际值小很多且电机速度越高这种误差越大。

2.2.2 SRM 铁损椭圆法计算

SRM 铁心磁密分量 B_r 和 B_t 都是非正弦、非线性的,傅里叶分解后得到基波及一系列谐波,以图3中的定子节点2为例,其磁密分量的傅里叶分解如图7所示,其中每个柱图的高度代表磁密对应次谐波的幅值。本研究将 B_r 和 B_t 的第 k 次谐波的幅值作为长轴和短轴画出一个椭圆,该椭圆即为 k 次谐波磁密矢量的轨迹图,1、2、3、4次谐波磁密矢量图如图8所示(未考虑各矢量的初始相角差异)。

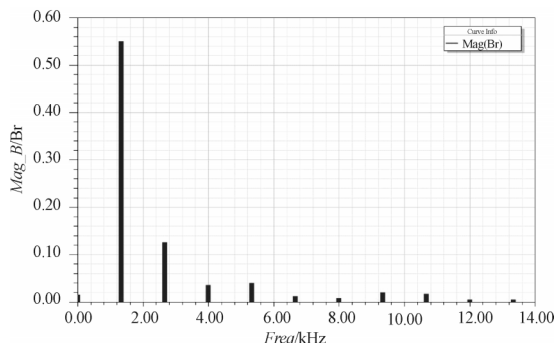
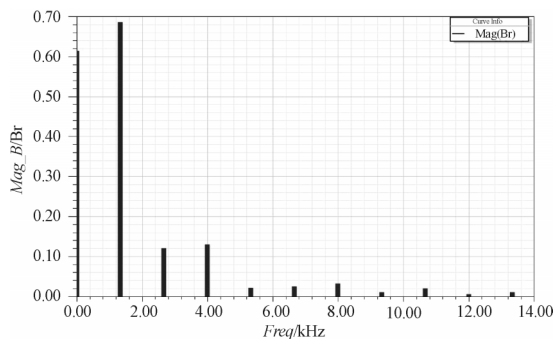


图7 定子节点2磁密分量 B_r, B_t 傅里叶分解图

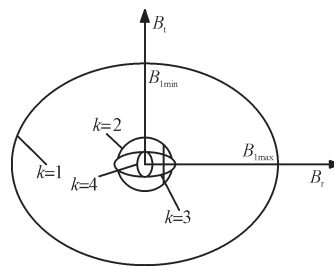


图8 椭圆形谐波磁密矢量图

由式(2)和铁心损耗正交等效理论,SRM 铁心每个剖分单元的单位质量铁损耗 (w/kg)可用下面的公式估算:

$$P_h^{(e)} = C_h f \sum_{k=1}^m k (B_{k\max}^n + B_{k\min}^n) \quad (3)$$

$$P_e^{(e)} = C_e f^2 \sum_{k=1}^m k^2 (B_{k\max}^2 + B_{k\min}^2) \quad (4)$$

式中: $P_h^{(e)}, P_e^{(e)}$ — e 单元的磁滞损耗和涡流损耗; f —铁心磁密基波频率,与电机转速、定转子极数有关; $B_{k\max}, B_{k\min}$ —第 k 次谐波椭圆形磁密矢量图的长轴和短轴;根据同类电机的实验结果本研究取 n 为1.6。SRM 铁心的铁损耗为:

$$P_{Fe} = \sum_{i=1}^j (P_h^{(e)} + P_e^{(e)}) \cdot \rho_{Fe} L_{Fe} \Delta_e(w) \quad (5)$$

式中: ρ_{Fe}, L_{Fe} —电机铁心密度和轴向长度; Δ_e —铁心剖分单元的面积; j —铁心剖分单元的总个数。

2.3 样机铁损计算结果

查询相关材料手册可知样机铁心材料DW360-35在两种不同频率下的铁损-磁感应强度(P-B)曲线,拟

合后得到铁心的涡流损耗系数 C_e 和磁滞损耗系数 C_h 。曲线拟合得到样机的两种系数分别为： $C_e = 5.21 \times 10^{-4}$ ， $C_h = 0.02157$ 。

笔者采用椭圆法计算样机铁心损耗时定子铁心剖分单元数 $j_1 = 42$ ，转子铁心剖分单元数为 $j_2 = 30$ ，计算结果如表1所示。通过直接对铁心磁密波形作傅里叶分解(谐波法)计算得到的样机铁心损耗结果如表2所示。

表1 椭圆法计算SRM铁心各部分铁损值及其比例

铁心	定子齿	定子轭	转子齿	转子轭	总计	比例
磁滞损耗/w	75.37	50.37	46.11	15.83	187.68	4.38%
涡流损耗/w	1 875.02	1 309.86	654.64	262.58	4 102.1	95.62%
损耗总计/w	1 950.39	1 360.23	700.75	278.11	4 289.78	100%
比例	45.47%	31.71%	16.34%	6.48%	100%	

表2 谐波法计算SRM铁心各部分铁损值及其比例

铁心	定子齿	定子轭	转子齿	转子轭	总计	比例
磁滞损耗/w	74.36	54.23	29.86	9.34	167.79	4.49%
涡流损耗/w	1 523.57	1 103.82	567.72	372.49	3 567.6	95.51%
损耗总计/w	1 597.93	1 158.05	597.58	381.83	3 735.49	100%
比例	42.78%	31.01%	16%	10.22%	100%	

从表1、表2可以看出：

(1) SRM铁心各部分的磁场分布不同，故铁心损耗也不同；

(2) 由于涡流损耗与磁场变化频率的平方成正比而磁滞损耗与磁场变化频率成正比，电机高速运行时，涡流损耗远大于磁滞损耗；

(3) SRM铁损主要由定子铁心产生，定子铁损值占总铁损的比例达77.18%。一方面，定子铁心磁场变化频率高于转子铁心磁场，另一方面，定子铁心的体积质量转子的体积重量大得多。

(4) 谐波法计算结果比椭圆法计算结果小13%，根据电机铁损计算经验可知基于傅里叶分解的铁损计算结果比实际结果要小，所以椭圆法计算结果更接近实际值，计算精度更高。

当电机铁心磁路饱和时，铁磁材料的非线性使得饱和磁场并不满足叠加原理，而SRM的磁场存在高度的局部饱和现象，直接对磁场进行谐波分解后的基波和谐波幅值远远小于合成磁密的峰值，饱和磁场被分解成若干不饱和磁场，此时计算得到的损耗值较实际值小很多。而椭圆法对磁场密度先进行的分解，再傅立叶处理，在一定程度上减少了铁心饱和现象对铁损计算的影响，从而提高其计算精度。

本文引用格式：

田 晶,朱学忠,周 翔. 开关磁阻电机的铁损分析与计算[J]. 机电工程,2015,32(2):256-260.

TIAN Jin, ZHU Xue-zhong, ZHOU Xiang. Iron loss analysis and calculation of switched reluctance motor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(2): 256-260.

3 结束语

SRM的双凸极结构使得其铁心磁场变化规律复杂,铁损计算难度较大,从而也使电机的发热不易分析。本研究利用Ansoft软件得到SRM铁心各部分磁密波形,分析得出铁心磁通的波形变化规律。笔者在此基础上采用本研究介绍的椭圆法计算得到SRM铁心各部分的铁损值以及总铁损。计算结果表明,椭圆法计算铁损比谐波法更接近实际值。

在SRM设计过程中,利用磁路法算出电机铁心各部分的平均磁密,再利用椭圆法即可估算出电机各部分的铁损。将电机不同部分的铁损值作为电机温升分析的载荷可以得到电机更精确的温度场分布情况,为SRM绝缘材料的选取、冷却系统的设计等提供依据,具有实际的工程意义。

参考文献(References):

- [1] RAULIN V, RADUN A, HUSAIN I. Modeling of losses in switched reluctance machines [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, 40(6): 1560-1569.
- [2] 刘迪吉,张焕春,傅风礼. 开关磁阻电动机[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
- [3] TOULABI M S, TORKAMAN H, AFJEI E. Experimental Comparison between the Electric Efficiencies of Two Different Types of Switched Reluctance Generators [C]//2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, [s.n.], 2011: 157-162.
- [4] 丁 文,周会军,鱼振民. 开关磁阻电机磁通波形与铁耗计算[J]. 电机与控制应用, 2006, 33(6): 11-17.
- [5] 刘 国,赵凌志,蒋继娅. Ansoft工程电磁场有限元分析[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [6] 赵 博,张洪亮. Ansoft12在工程电磁场中的应用[M]. 1版. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [7] 邓秋玲,陈 强,肖 锋. 开关磁阻电动机调速系统[J]. 电机技术, 2003(2): 23-28.
- [8] 马鹏宇,王洪诚,王秀娟. 基于粒子算法实现的开关磁阻电机调速系统[J]. 兵工自动化, 2013(10): 86-89.
- [9] 张灵霞. 开关磁阻电机损耗及其温升研究[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院, 2013.
- [10] 张洪亮. 永磁同步电机铁心损耗与暂态温度场研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学电气工程学院, 2010.
- [11] ZHU J G, RAMSDEN V S. Core Loss Modeling in Rotational Electrical Machines [C]//Proceedings of International Conference on Electrical Machines, ICEM'93, Adelaide, Australia. 1993: 52-57.
- [12] 周克定. 工程电磁场数值计算理论方法及应用[M]. 北京:高等教育出版社. 1994.

[编辑:洪炜娜]