

# 无刷双馈电机时步有限元分析

王爱龙, 熊光煜

(太原理工大学电气与动力工程学院, 山西省 太原市 030024)

## Analysis of Brushless Doubly-fed Machine by Time Stepping Finite Element Method

WANG Ai-long, XIONG Guang-yu

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, China)

**ABSTRACT:** Aiming at accurate evaluation of the transient and steady state behaviors as well as the related field distribution of brushless doubly-fed machine (BDFM), a 2-dimensional time-stepping finite element method was presented to solve coupled field-circuit motion problems. Core saturation and the rotor bar skin effects were directly taken into account in the field calculation. The adopted circuit equations are suitable for describing the stator windings and the special rotor-bar connections of BDFM. The waveform of supplied voltage source may be an arbitrary. Three-dimensional end effects were considered in the circuit parameter corrected by classical formulas. In addition, the coupling and constraint equations were used to handle rotor rotation without any process of remeshing. The proposed method were validated by the measured and calculated results of an application example.

**KEY WORDS:** brushless doubly-fed machine; time stepping; finite element method; magnetic-circuit coupled; field distribution

**摘要:** 为准确计算无刷双馈电机的暂态或稳态特性及其相应的磁场分布, 提出一种场路耦合运动问题的二维时步有限元方法。其特点是: 铁心饱和以及转子导条集肤效应可以直接在场的计算过程中加以考虑; 采用的电路方程可以方便地处理无刷双馈电机定子绕组和转子端环的各种特殊连接方式, 电压源可以是任意电压波形; 三维端部效应可以通过传统的方法在电路参数中加以修正; 采用耦合与约束方程来处理转子转动问题, 而无须不断地对转子重新进行剖分。通过一台样机的算例和实验结果对比, 表明所提出的方法是可行的。

**关键词:** 无刷双馈电机; 时步; 有限元法; 场路耦合; 磁场分布

## 0 引言

无刷双馈电机是近年来发展起来的一种新型

电机<sup>[1-4]</sup>。由于其特殊的结构和运行特性, 在大型风机和水泵的调速节能以及变速恒频风力发电方面具有推广应用前景。

在分析无刷双馈电机运行特性的文献中, 通常采用“路”的方法, 主要是基于abc坐标的电路模型<sup>[5]</sup>和基于转子轴dq0坐标系的双轴模型<sup>[6-7]</sup>。相关文献中, 直接采用“场”的分析方法很少, 其原因在于: ①无刷双馈电机结构复杂, 定子有两套绕组, 转子端接不规则, 使建模变得困难; ②无刷双馈电机既不同于传统的异步电机, 也不同于传统的同步电机, 通常交流电机有限元稳态分析模型并不适用于无刷双馈电机。

文献[8-9]利用无刷双馈电机的时步有限元模型研究了转子绕组电流分布和电机铁心饱和问题。该时步有限元模型属于有限元-状态空间变量模型(coupled finite element-state-space model), 称为耦合电路法(coupled circuit)。其基本原理是在每次静态有限元分析后, 利用能量摄动法(energy perturbation method)来计算微分电感系数, 并“升级”(更新)到电路状态方程组中; 而电路微分方程组计算出的电流变量值又返回到静态有限元模型中, 进行下一步的计算分析。通过多次循环、迭代可以求得满意的解, 其本质上是间接或顺序耦合(sequentially coupled)法。它与场路耦合法(magnetic-circuit coupled)有本质的不同。后者是直接耦合(direct coupled)法, 其本质是把描述电压、电流关系的方程组、机械运动方程、有限元离散方程组等联立并同时求解。二者相比, 后者的计算速度较快, 场路耦合更加紧密。

本文提出一种无刷双馈电机场路耦合二维时步有限元模型, 该方法属于直接耦合法, 可以对无刷双馈电机的磁场分布及运行特性进行计算分析。与单纯“路”的方法相比, 其计算结果精确; 与间

接耦合法相比,其计算速度较快,且容易处理铁心饱和以及转子导条集肤效应等问题。通过算例给出样机的实验数据和计算结果。

### 1 模型建立及方法实施

图1是无刷双馈电机定、转子绕组常见的一种结构形式的示意图。定子有2个绕组——功率绕组和控制绕组,其结构形式与普通交流电机类似;转子是由导条和端接导体组成的若干组同心式回路结构。

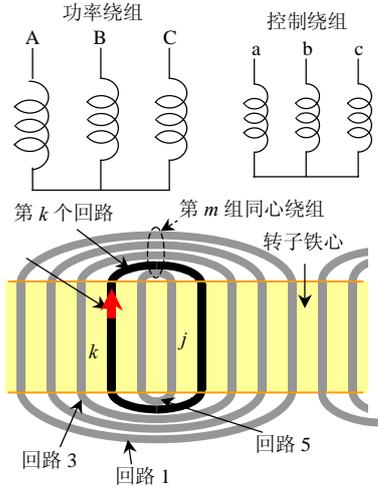


图1 定子和转子绕组结构示意图

Fig. 1 Construction of stator and rotor windings

建立无刷双馈电机场路耦合二维时步有限元模型时,为简化分析,假设:①电机的磁场按二维场来考虑;②忽略定子绕组中的集肤效应;③忽略转子斜槽(样机没有采用斜槽);④定、转子端部导体的电阻和漏抗可用集中参数或场的方法计入,体现在外电路方程中;⑤不考虑定子铁心外缘的磁场散漏,边界条件取定子铁芯外缘的矢量磁位为零。

无刷双馈电机定、转子场的方程分别建立在各自的坐标系中,令  $A$  为矢量磁位  $z$  轴分量;  $J$  为电流密度;  $\nu$  为磁阻率;  $\sigma$  为电导率。电机各区域满足的方程如下。

(1) 定转子铁心区域、气隙区域。

在这个区域没有外加电流分布,电磁场方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\nu \frac{\partial A}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\nu \frac{\partial A}{\partial y}) = 0 \\ A = 0 \end{cases} \quad (1)$$

(2) 定子功率绕组(以下简称功率绕组)区域。

功率绕组区域满足电磁场方程(2)。

$$\frac{\partial}{\partial x}(\nu \frac{\partial A}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\nu \frac{\partial A}{\partial y}) = J_p \quad (2)$$

式中  $J_p$  为功率绕组的电流密度,可由式(3)计算:

$$J_p = \frac{N_1}{aS_b} \sum_{s=A,B,C} (\alpha_s i_s) \quad (3)$$

式中:  $N_1$  为一个线圈的匝数;  $a$  为绕组并联支路数;  $S_b$  为一个线圈边所占的面积;  $i_s$  为功率绕组的相电流;  $\alpha_s$  (下标  $s = A, B, C$ ) 为单元的绕组电流系数。具体意义如下:

$$\alpha_s = \begin{cases} 1, & \text{当单元属于}s\text{相绕组正相带} \\ -1, & \text{当单元属于}s\text{相绕组负相带} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

功率绕组电压平衡方程为

$$u_s = R_p i_s + L_{p\sigma} \frac{di_s}{dt} + e_s \quad (5)$$

式中:  $R_p$  和  $L_{p\sigma}$  为功率绕组每相的电阻和端部漏电感;  $i_s$  为功率绕组的相电流;  $e_s$  为功率绕组中的感应电动势; 下标  $s$  代表某一相功率绕组。

感应电动势  $e_s$  可以表示为相绕组交链的磁链对时间的微分,而磁链与绕组区域的矢量磁位有关。最后,相绕组的感应电势可以表示为

$$e_s = -\frac{d\psi_s}{dt} = -\frac{N_1 l_{ef} P_p}{aS_b} \frac{d}{dt} \sum_{e=1}^{n_p} (\alpha_s \Delta_e \frac{A_i + A_j + A_k}{3}) \quad (6)$$

式中:  $\psi_s$  为  $s$  ( $s=A$  或  $B$ 、或  $C$ ) 相绕组的磁链;  $l_{ef}$  为绕组的有效长度;  $n_p$  为单元总数;  $P_p$  为功率绕组的极对数;  $\Delta_e$  为第  $e$  个单元的面积;  $A_i$ 、 $A_j$ 、 $A_k$  分别为该三角形单元 3 个节点的矢量磁位。

式(2)~(6)给出功率绕组区域的控制方程,其中的矢量磁位和相电流为未知量,电压激励源为已知量。

(3) 定子控制绕组区域。

与功率绕组类似,式(2)、(3)中的  $J_p$  用控制绕组的电流密度  $J_c$  替代,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  绕组代之以  $a$ 、 $b$ 、 $c$  绕组,其它物理量代之以相应的控制绕组的参数即可,从略。

(4) 转子导条区域。

无刷双馈电机通常采用同心式转子,其结构如图1所示。

转子导条部分的电磁场方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\nu \frac{\partial A}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\nu \frac{\partial A}{\partial y}) = J_b \quad (7)$$

在二维场分析中,转子导条中电流只有轴向分量,则导条径向截面是一个等势面。如图1所示,设第  $m$  组转子绕组第  $k$  个回路左侧导条  $k$  两端的电压为  $u_k$ , 右侧导条  $j$  两端的电压为  $u_j$ , 则其中第  $k$  根导条的电密可以表示为

$$J_{bk} = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \frac{u_k}{l_{bk}} \quad (8)$$

式中:  $-\sigma \partial A / \partial t$  为转子导条中感应的涡流电密;  $\sigma$  为转子导条电导率;  $l_{bk}$  为转子导条有效长度。则第  $k$  个回路的电流  $i_{bk}$  可以表示为

$$i_{bk} = \iint_{S_r} J_{bk} dS \quad (9)$$

对式(9)做空间有限元离散, 结合式(8)可得

$$i_{bk} = -\frac{\sigma}{3} \sum_{e=1}^{n_k} [\Delta_e \frac{\partial(A_i + A_j + A_k)}{\partial t}] + \sigma u_k \frac{S_r}{l_{bk}} \quad (10)$$

式中:  $S_r$  为转子导条区域面积;  $n_k$  为第  $k$  个导条区域的总单元数。

第  $k$  个回路的电压平衡方程式为

$$u_k - u_j = R_k i_{bk} + L_k \frac{di_{bk}}{dt} \quad (11)$$

式中  $R_k$  和  $L_k$  分别为第  $k$  个回路端接导体的电阻和电感。

其它转子回路的约束方程和式(10)、(11)相似, 从略。

式(7)、(10)和式(11)给出了转子导条区域的控制方程, 其中, 矢量磁位、各个导条电压和各回路电流均为未知量。

(5) 机械运动方程式。

转子旋转的机械运动方程式为

$$J_m \frac{d\Omega}{dt} = T_e - T_L - \lambda \Omega \quad (12)$$

式中:  $J_m$  为转动惯量;  $\Omega$  为转子角速度;  $T_e$  电磁转矩;  $T_L$  负载转矩;  $\lambda$  为粘滞摩擦系数。

$$\Omega = d\theta / dt \quad (13)$$

式中  $\theta$  为转子机械角度。

对(12)、(13)进行时间差分离散, 可以求得在每一时间步长下, 转子作匀加速运动的转速和机械角度。

$$\Omega^t = \Omega^{t-\Delta t} + \frac{T_e^t - T_L - \lambda \Omega(t - \Delta t)}{J_m} \Delta t \quad (14)$$

$$\Delta \theta = \Omega^{t-\Delta t} \Delta t + \frac{1}{2} \frac{T_e^t - T_L - \lambda \Omega(t - \Delta t)}{J_m} \Delta t^2 \quad (15)$$

整个计算方法的实施步骤:

(1) 首先计算那些二维场的分析中, 无法自动计及的集中参数, 例如, 计算定子绕组的直流电阻、绕组端部的漏电感, 转子端接导体电阻和漏感等。可采用电机设计程序中相关的参数计算公式进行计算。

(2) 把上述计算出的集中参数加入到场路耦

合模型中的电路方程式中。

(3) 完成一次某个时步  $t$  下的非线性二维瞬态场的计算。

(4) 对每个时步的计算结果进行必要的后处理, 电磁转矩的求解可以用麦克斯韦应力张量或虚位移的方法进行计算。

(5) 利用机械运动方程, 可求得转子角加速度、角速度以及角位移, 为转子转动到下 1 个位置做好准备。

(6) 根据上一步的计算结果将转子单元网格整体旋转到一个新的位置, 并重新建立耦合与约束方程。转子的旋转用插值运动边界法, 其基本思路是: 定子及气隙的一半组成一个整体, 转子及气隙的另一半组成另一个整体, 两个整体分别独立进行剖分, 目的是使定、转子之间可以相互移动而不影响对方的单元网格。但是, 这将在共同半径的圆周上形成不一致的网格, 为了正确解算, 还必须利用耦合与约束方程以及有限元的形函数, 把气隙共同半径圆周上节点的自由度进行关联。

(7) 时间变量  $t$  增加  $\Delta t$ , 返回到第 3 步继续求解下一时步  $t_{n+1}$ , 直到时间变量到达设定的终值  $t_{\text{end}}$ 。

## 2 计算实例

用场路耦合时步有限元法对一台无刷双馈电机的样机进行了分析, 样机的参数为: 电压为 380 V, 频率为 50 Hz, 定子功率绕组极对数  $P_p=3$ , 控制绕组极对数  $P_c=1$ , 定转子铁心冲片采用 Y160M4 的内外径尺寸, 功率绕组和控制绕组为独立的双层短距分布绕组, 转子绕组为类鼠笼式不带公共笼条、端环同心式绕组结构, 笼型绕组可分 4 组, 每组由 5 个大小不等的 U 形导条构成, U 形导条的开口由端接导体短接(参见图 1); 槽内导条采用四根线规 1.8×6.7 扁铜导线并联。

为了得到某一转速下的稳态特性, 方便与实验对比算, 图 2~5 的算例在计算双馈运行方式时, 忽略电机牵入同步的瞬态过程, 强制转速  $n$  为 600 r/min, 可大大缩短计算时间。大约在 0.1 s 后, 计算曲线近似处于稳定(随时间周期变化)状态, 即得到稳态特性。计算异步或同步运行方式时, 同理。

由图 2~5 可以看出: 定、转子电流和转矩波形中均含有较大的谐波成分。

图 6~8 是样机在不同运行状态下计算出的磁场图。图 6 是同步运行状态时的场图; 图 7 是  $n = 150$  r/min, 双馈运行状态时的场图; 图 8 是  $n =$

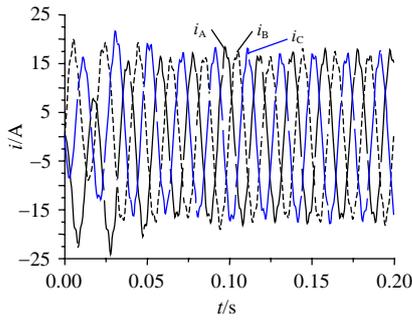


图2 功率绕组电流计算结果( $n=600$  r/min)  
Fig. 2 Calculated current in the power winding ( $n=600$  r/min)

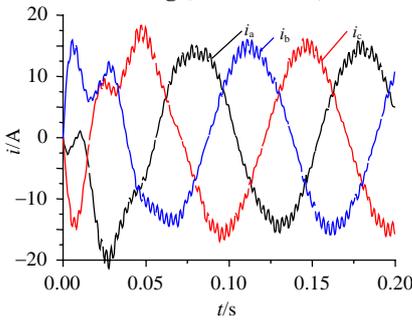


图3 控制绕组电流计算值( $n=600$  r/min)  
Fig. 3 Calculated current waveform in the control winding ( $n=600$  r/min)

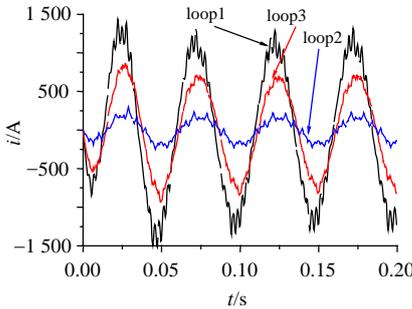


图4 转子绕组回路电流计算结果( $n=600$  r/min)  
Fig. 4 Calculated current waveform in the rotor loops ( $n=600$  r/min)

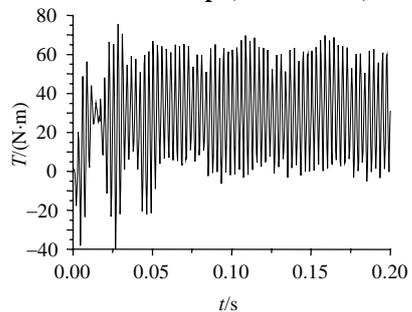


图5 电磁转矩计算值( $n=600$  r/min)  
Fig. 5 Electromagnetic torque calculated ( $n=600$  r/min)

600 r/min, 异步运行状态时的场图。细心观察无刷双馈电机的各种场图分布,可以得到2个直观重要结论:①无刷双馈电机的磁场分布在不同转速或同一转速不同运行方式下没有“极对称性”,没有明确、明显的固定极数;②随着时间变化,磁场的移

动很复杂,并不是简单的整体旋转。以上2点暗示:不能把传统异步电机中的“饱和因子”照搬到无刷双馈电机中使用。此外,无刷双馈电机中电磁场分布的不规则性表明,把传统异步电机中铁耗的计算方法移植到无刷双馈电机上使用将是牵强的。

表1是控制绕组短路、电机空载条件下,实验

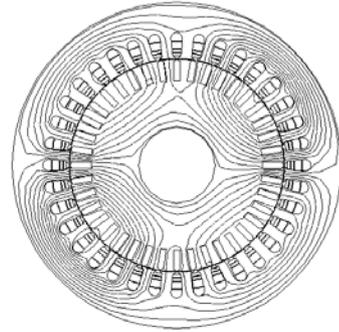


图6 同步运行场图( $n=750$  r/min)  
Fig. 6 Flux distribution in synchronous operation ( $n=750$  r/min)

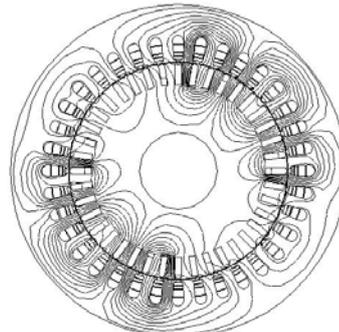


图7 双馈运行场图( $n=150$  r/min)  
Fig. 7 Flux distribution in doubly-fed operation ( $n=150$  r/min)

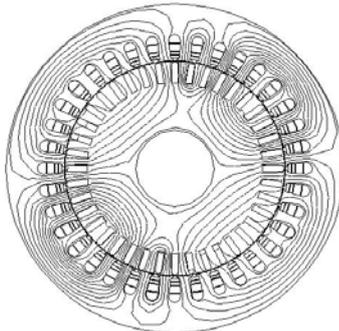


图8 异步运行场图( $n=600$  r/min)  
Fig. 8 Flux distribution in asynchronous operation ( $n=600$  r/min)

表1 电机空载时电流值的比较(控制绕组短路)

Tab. 1 Calculated and measured currents as unloaded(short circuit in control winding)

功率绕组线 线电压/V	功率绕组电流/A		控制绕组电流/A	
	实验值	计算值	实验值	计算值
86	1.0	0.99	0.4	0.53
198	1.8	1.84	0.05	0.10
280	2.5	2.59	0.02	0.042

和计算结果的对比。此时, 这相当于一台无刷双馈电机异步运行空载实验。表 2 是控制绕组短路、电机加负载条件下, 实验结果和计算值的对比。这时, 功率绕组加额定电压, 转子加不同负载, 相当于一台无刷双馈电机异步运行负载实验。从试验结果可以看出, 计算结果和实验吻合较好。

表 2 电机加载后电流值比较(副绕组短路)  
Tab. 2 Calculated and measured currents as loaded (short circuit in control winding)

转速/ (r/min)	功率绕组电流/A		功率绕组功率因数	
	实验值	计算值	实验值	计算值
620	5.6	5.7	0.63	0.60
640	5.1	5.37	0.62	0.61
700	4.1	4.08	0.49	0.47
720	3.8	3.73	0.38	0.35
740	3.6	3.53	0.18	0.15

### 3 结论

本文提出一种分析无刷双馈电机的场路耦合二维时步有限元方法, 可用来分析该类电机的暂态或稳态特性以及相应的磁场分布。该方法计算速度较快; 在场的计算中考虑了铁心饱和以及转子导条的集肤效应; 电路方程可以方便地表述无刷双馈电机定子绕组和转子端环的各种特殊连接方式; 将端部绕组参数计入电路参数来考虑三维场的影响; 用耦合与约束方程来加以处理转子转动问题而无须对转子重新进行剖分。一台样机的实验结果证明了该方法的有效性。

### 参考文献

- [1] Williamson S. Generalized theory of the brushless doubly-fed machine, part 1: analysis[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1997, 144(2): 111-122.
- [2] Williamson S. Generalized theory of the brushless doubly-fed machine, part 2: Model verification[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1997, 144(2): 123-129.
- [3] 邓先明, 姜建国. 无刷双馈电机的工作原理及电磁设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 126-132.  
Deng Xianming, Jiang Jianguo. The principle and electromagnetic design of brushless doubly-fed machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 126-132(in Chinese).
- [4] 杨顺昌. 无刷双馈电机的电磁设计特点[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 107-110.  
Yang Shunchang. Feature of electromagnetic design for brushless doubly-fed machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 107-110(in Chinese).
- [5] 张凤阁, 王凤翔, 王正. 不同转子结构无刷双馈电机稳态运行特性的对比实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 52-55.  
Zhang Fengge, Wang Fengxiang, Wang Zhang. Comparative

experiment study on the performance of doubly-fed brushless machine with different rotor structures[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 52-55(in Chinese).

- [6] Zhou Dongsheng, Spee R, Alexander G C. Experiment evaluation of a rotor flux oriented control algorithm for brushless doubly-fed machine[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(1): 72-78.
- [7] 杨向宇, 励庆孚. 变频器-无刷双馈电机调速系统的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 95-100.  
Yang Xiangyu, Li Qingfu. Simulation of inverter-brushless doubly-fed machines for adjustable speed drive systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 95-100(in Chinese).
- [8] 黄守道, 王耀南, 王毅. 无刷双馈电机有功和无功功率控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 87-93.  
Huang Shoudao, Wang Yaonan, Wang Yi. A study of active and reactive power control for brushless doubly-fed machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 87-93(in Chinese).
- [9] 卞松江, 贺益康, 潘再平. 级联式无刷双馈电机的建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 33-37.  
Bian Songjiang, He Yikang, Pan Zaiping. Modeling and simulation of the cascade brushless doubly-fed machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 33-37(in Chinese).
- [10] McMahan R A, Roberts P C, Tavner P J. Performance of BDFM as a generator and motor[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2006, 153(2): 289-299.
- [11] Roberts P C, McMahan R A, Tavner P J. Equivalent circuit for the brushless doubly-fed machine (BDFM) including parameter estimation[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2005, 152(4): 932-942.
- [12] Ferreira A C. Time-stepping FE analysis of brushless doubly-fed machine taking iron loss and saturation into account[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(3): 583-588.
- [13] Kemp A, Boger M S. Investigation of rotor-current distributions in brushless doubly-fed machine[C]. Thirty-First IAS Annual Meeting, San Diego, CA, 1996.
- [14] Nehl T W, Fouad F A, Demerdash N A. Determination of saturated values of rotating machinery incremental and apparent inductances by an energy perturbation method[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(12): 4441-4451.
- [15] 王爱龙. 无刷双馈电机的数学模型和有限元仿真[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.  
Wang Ailong. Modeling and finite-element method simulation of brushless doubly-fed machine[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008(in Chinese).



王爱龙

收稿日期: 2007-03-22.

作者简介:

王爱龙(1968—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事电机电磁场数值分析的科研教学工作, allan.w@tom.com;

熊光煜(1946—), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 主要研究方向: 特种电机。

(责任编辑 丁玉瑜)