

鼠笼异步电机启动过程工作特性与磁场分析

邵永, 刘赵淼

北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124

摘要 利用有限元数值分析软件建立了 1.1kW 三相鼠笼异步电机二维有限元模型, 对启动过程的工作特性以及电机内的磁场分布和转子电流密度分布进行了计算和分析。得到了定子电流、输出转矩随转子转速变化的关系图以及启动过程中不同时刻电机磁力线分布图和转子导条电流分布图。对电机磁场的研究表明: 启动时刻磁力线主要集中在临近转子表面较薄的一层内, 转子导条电流密度沿径向逐渐增大, 有明显的集肤效应。当电机稳定运行时, 磁力线较均匀地分布在定转子铁芯内部, 转子导条电流密度也均匀分布。通过场分析方法对该种异步电机进行研究, 为异步电机参数的计算、结构的改进、控制系统的设计以及进一步的异步电机温度场计算提供了可靠依据。

关键词 异步电机; 时步有限元; 电磁场; 工作特性

中图分类号 TM343

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)02-0050-05

Operating Characteristics and Magnetic Field in Starting Process of Squirrel-cage Asynchronous Motor

TAI Yong, LIU Zhaomiao

College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract A two dimensional finite element model of 1.1kW three-phase squirrel-cage asynchronous motor is built by using a finite element analysis software. The operating characteristics, the distribution of magnetic field and rotor current density are calculated and analyzed in the starting process. The diagrams of stator current and output torque against rotor speed are obtained. Motor magnetic lines of force and current of rotor bars at different times in the starting process are also obtained. It is shown that magnetic lines of force are mainly concentrated in the thin layer close to the surface of rotor while starting and the density of current of rotor bars gradually increases along the radial direction and the skin effect is significant. However, the magnetic lines of force are distributed evenly in the core of stator and rotor when the motor is steadily operating and the current of rotor bars is also evenly distributed. This kind of studies can offer a reliable basis for the calculation of parameters, the improvement of structure, the design of the control system of the motor and the temperature field calculation of asynchronous motors.

Keywords asynchronous motor; time stepping finite element method; electromagnetic field; operating characteristics

0 引言

异步电动机结构简单、价格低廉、运行可靠、坚固耐用、易于控制, 是电动机中应用最为广泛的一种。厂矿企业、交通运输、农业生产以及日常生活都离不开异步电动机^[1]。为了产生能量转换, 电机内必须要有磁场作为耦合场。转子旋转时,

耦合场受到扰动, 磁场及其贮能发生变化, 电枢绕组内就会产生感应电势, 转子上则将受到电磁力的作用, 于是机械能就转换为电能, 或反之。要研究异步电机内能量转换的机制, 必须对电机内的磁场分布有清楚的了解。因此, 研究电机中的电磁场对于分析和设计电机各项性能具有非常重要的意

收稿日期: 2009-09-14

作者简介: 邵永, 硕士研究生, 研究方向为电机电磁场与温度场的计算分析, 电子信箱: taiyong83@163.com; 刘赵淼 (通信作者), 教授, 研究方向为计算流体力学、薄膜涂覆过程分析和微流体装置、非线性动力学, 电子信箱: lzm@bjut.edu.cn

义^[2]。

现代电机电磁场的计算主要采用数值分析法,常用的数值分析方法有:有限差分法、有限元法和边界元法。与其他电磁场的数值计算方法相比,有限元法在处理复杂模型和进行非线性运算等方面具有更多优点^[3-10],因此本文采用时步有限元法计算三相异步电机的工作特性和电磁场。

1 三相异步电机有限元分析

采用有限元软件对一台 1.1kW 三相异步电动机建立二维有限元模型,并对边界条件进行有限元离散,通过计算磁矢量得到异步电机启动过程的磁场分布以及转子电流密度分布。对于轴向结构变化不大的电机,忽略电机端部和斜槽等影响,一般认为电磁场在电机的轴向不发生变化,分析其二维场并对结果进行修正就可获得较为满意的结果。因此,本文在分析三相异步电机时,假设电机铁心的轴向长度为无限长,场量在轴向基本无变化,将其作为二维电磁场问题进行计算^[11-16]。

1.1 物理模型和基本假设

该型号三相异步电机的物理模型如图 1 所示,由于电机的轴向截面是轴对称的,因此可取其一半作为计算区域。

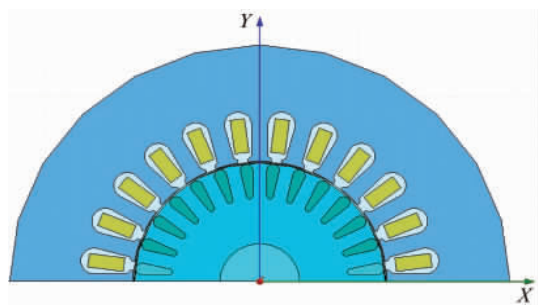


图 1 三相异步电机轴向截面

Fig. 1 Axial cross-section of three-phase asynchronous motor

电机的主要结构数据及计算参数如下:额定功率为 1.1kW;额定电压为 380V;同步转速 $n=3000\text{r/min}$;额定转速 $n_r=2850\text{r/min}$;相数 $m=3$;定子槽数 $Z=24$;转子槽数 $Z=28$;极对数 $p=1$;每极每相槽数 $q=Z/(2pm)=4$;定子绕组 Y 接,采用 60° 相带;定子外径为 128mm;定子内径为 65mm;铁芯长度为 80mm;气隙厚度为 0.4mm;每槽匝数为 70;绕组形式为单层交叉。

由于定子铁芯外圆的漏磁较小,理想的电压载荷为正弦交流电压,且转子导条与转子铁芯在理想情况下是没有电流传导的,所以在求解过程中,假设以下几点。

- 1) 定子铁芯外圆的漏磁忽略不计;
- 2) 电磁场的各场量随时间按正弦规律变化;
- 3) 转子导条和叠片铁心表面之间是绝缘的,即转子导条与叠片铁心之间没有电接触^[17]。

1.2 基本方程和边界条件

由麦克斯韦方程组得出,求解域内的涡流方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_s + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \Omega \sigma \left(x \frac{\partial A}{\partial y} - y \frac{\partial A}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式中 A 为二维场中轴向的矢量磁位, ν 为磁阻率, σ 为电导率, Ω 为转子角速度, J_s 为绕组中电流密度。

对式(1)进行有限元离散,得

$$KA + T\dot{A} = P \quad (2)$$

式中, K, T 为与各单元节点坐标、面积、材料性能及转子转速有关的系数矩阵,其阶数为 $n \times n$, n 为节点数; P 为与电流有关的矩阵, $P = EI$, I 为三相电流矩阵, E 为与槽部单元面积有关的矩阵; $A = [A_1, A_2, \dots, A_n]^T$, $\dot{A} = \left[\frac{\partial A_1}{\partial t}, \frac{\partial A_2}{\partial t}, \dots, \frac{\partial A_n}{\partial t} \right]^T$ 。

将场路方程结合起来,电流和场量作为未知量来求解。由欧姆定律得三相电路方程为

$$RI = U - L\dot{I} - QA \quad (3)$$

式中, R 为三相电阻矩阵, U 为三相电压列阵, I 为三相电流列阵, L 为三相绕组端部漏感系数矩阵, $\dot{I} = \left[\frac{\partial I_a}{\partial t}, \frac{\partial I_b}{\partial t}, \frac{\partial I_c}{\partial t} \right]^T$, Q 为与槽部单元有关的系数矩阵。

将式(2)和式(3)耦合,则有

$$\begin{bmatrix} K & -E \\ O & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T & O \\ Q & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A} \\ \dot{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O \\ U \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(4)采用通用形式的差分离散格式并进行简化,通过牛顿-拉菲森迭代法进行求解,经过数次迭代后,解趋于收敛,最后求得节点磁位和导体内电流,再通过有限元后处理得到所需场量^[18-20]。

2 数值模拟及结果分析

在分析三相鼠笼异步电机二维电磁场分布的过程中,根据定子槽中各相绕组的实际分布情况对定子绕组通以频率为 50Hz 的三相电压。加载后需要对模型设定边界条件,该电机模型需要在定子外圆周施加磁力线平行边界条件,即在定子外圆周令 $A=0\text{Wb/m}$ 。另外,需要在对称边界上设置好匹配边界条件。选择求解类型和设定求解器选项之后进行迭代求解,得到所需结果。

2.1 工作特性及分析

模拟的启动过程时间为 0.2s。得到定子绕组三相电流大小随时间变化如图 2 所示。可以看出,定子绕组的三相电流为正弦分布电流,开始启动时很不稳定,电流的波动较大,最大的启动电流要远大于稳定运行时刻的电流,在 0.04s 后定子绕组电流逐渐趋于稳定。

定子一相绕组电流随转子转速变化如图 3 所示。可以看出,启动时刻转子转速为 0,此时定子绕组内的输入电流很大,约为 16.8A。随着转子转速的逐渐增大,输入电流逐渐变小,当转子转速为额定转速时,定子绕组内的输入电流约为

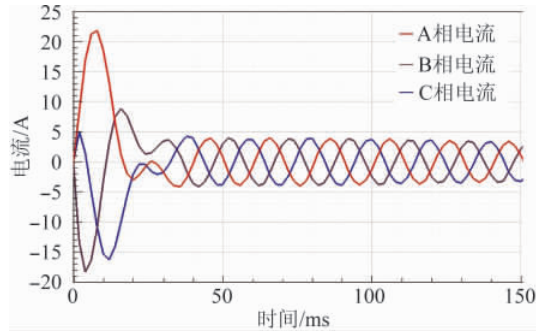


图 2 三相电流大小随时间变化图

Fig. 2 Three-phase current versus time

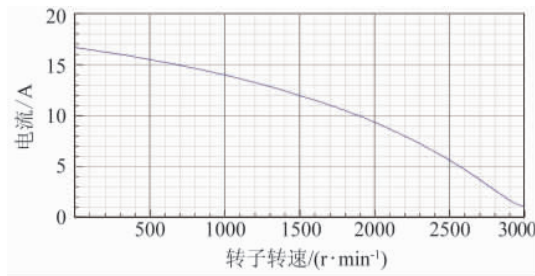


图 3 定子一相绕组电流随转子转速变化图

Fig. 3 One-phase current of stator versus rotor speed

2.3A。

电机的输出转矩随转子转速变化如图 4 所示。可以看出,在启动瞬间输出转矩就几乎达到了最大值,这保证了电机转子的转速能迅速提高,电机能较快地实现稳定运行。在达到 1500r/min 以后,输出转矩随着转子转速的增加迅速减小。

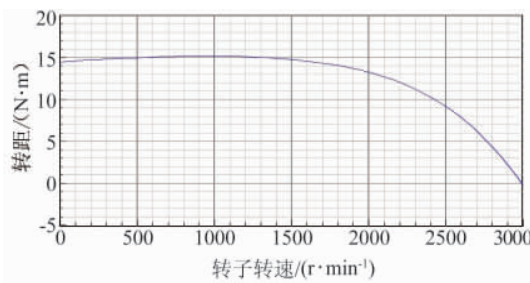


图 4 输出转矩随转子转速变化图

Fig. 4 Output torque versus rotor speed

2.2 磁场分布及分析

不同时刻电机内磁力线分布如图 5~图 8 所示。可以看出,在 0.004s 时刻,穿过转子的磁力线主要集中在临近转子齿表面较薄的一层内,定、转子齿端磁通密度很高;在 0.01s 时刻,集中在转子表面的磁力线变得分散并转向转子齿内部;在 0.02s 时刻,这一现象更加明显;而到了 0.04s,磁力线主要集中在转子的轭部,转子齿表面几乎没有磁力线通过。

这主要是由于电机启动时的电流较稳定运行时大得多,由于定子绕组产生的磁动势正比于通过的电流,因此此时的磁动势也大为增加。在启动瞬间,转子电流频率等于定子电源频率。转子集肤效应显著,通过气隙进入转子的磁通,大多不能达到转子轭部,只能在槽表面部穿过。而当电动机达到稳定后,滑差很小,转子电流频率很低,挤流效应很小。因此气隙磁通由齿槽穿过进入转子轭部,分布均匀,而不像启动时刻磁力线主要集中在临近转子表面较薄的一层内,这印证了异步电动机的实际运行状况。

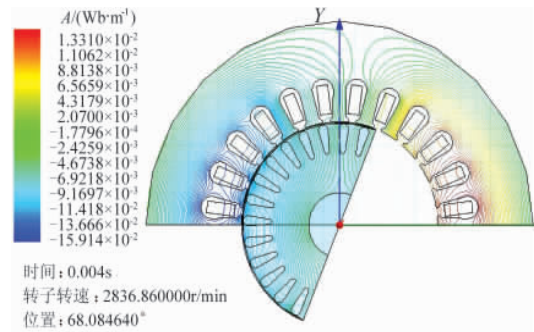


图 5 0.004s 时刻电机磁力线分布图

Fig. 5 Distribution of magnetic lines of force at 0.004s

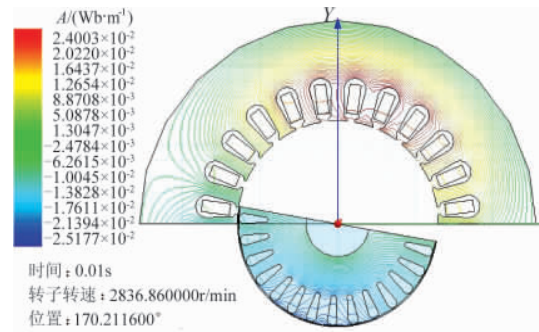


图 6 0.01s 时刻电机磁力线分布图

Fig. 6 Distribution of magnetic lines of force at 0.01s

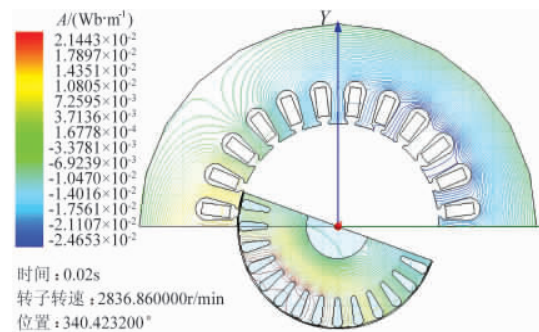


图 7 0.02s 时刻电机磁力线分布图

Fig. 7 Distribution of magnetic lines of force at 0.02s

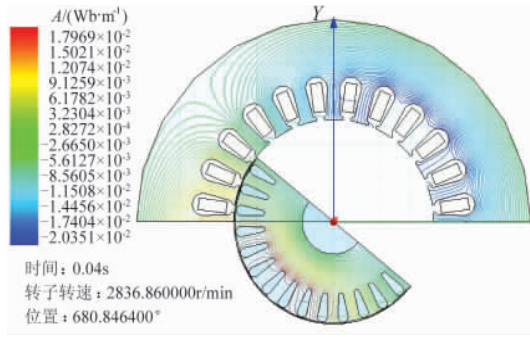


图 8 0.04s 时刻电机磁力线分布图

Fig. 8 Distribution of magnetic lines of force at 0.04s

图 9~图 12 为不同时刻电机转子鼠笼导条内的电流分布图。可以看出,在 0.004s 时刻,转子鼠笼导条电流密度沿径向逐渐变大;在 0.01s 时刻,导条内电流密度沿径向增大的趋势不如 0.004s 时刻明显;而在 0.02s 和 0.04s 时刻,虽然鼠笼导条内的感应电流由于位置不同而有大小差异,但每个鼠笼导

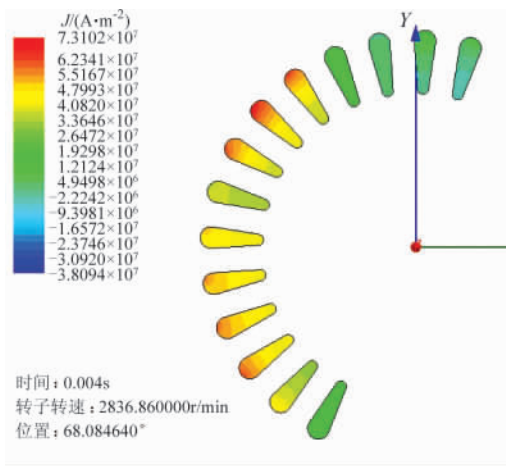


图 9 0.004s 时刻转子电流分布图

Fig. 9 Distribution of rotor current at 0.004s

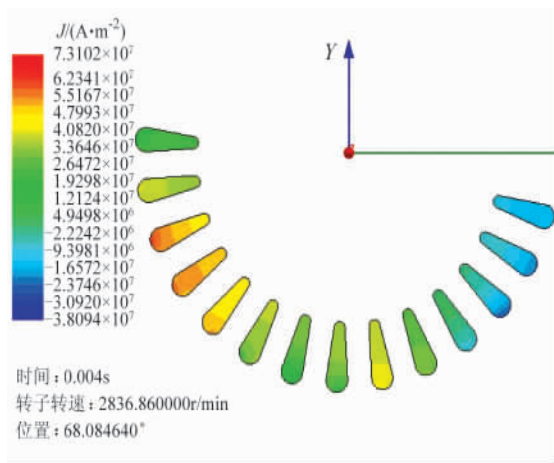


图 10 0.01s 时刻转子电流分布图

Fig. 10 Distribution of rotor current at 0.01s

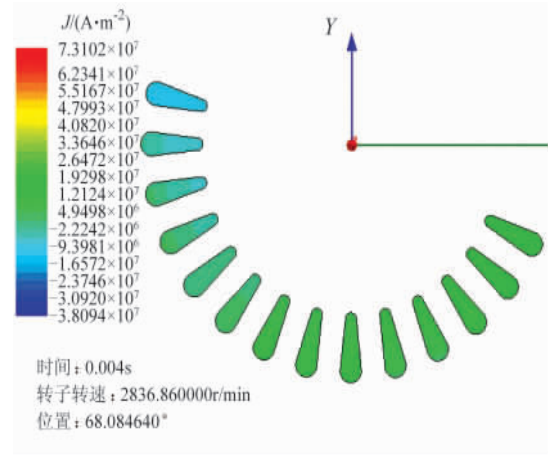


图 11 0.02s 时刻转子电流分布图

Fig. 11 Distribution of rotor current at 0.02s

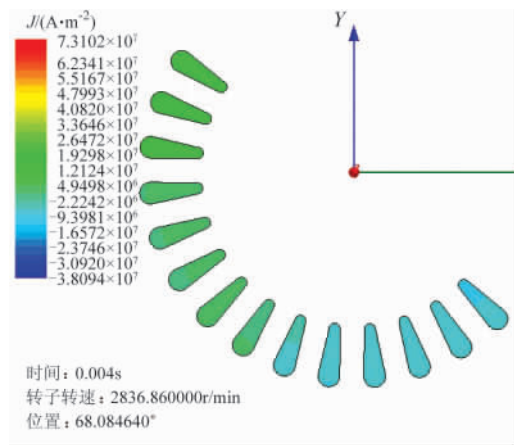


图 12 0.04s 时刻转子电流分布图

Fig. 12 Distribution of rotor current at 0.04s

条内部电流密度分布基本均匀,没有沿径向增大的趋势。此外,还可以看出从启动时刻到稳定运行时刻转子导条的电流密度有大幅的减小。

这主要是因为启动时刻转子电流频率与电源频率相同,启动电流远高于稳定运行时的电流,导致磁力线主要集中在临近转子表面较薄的一层内,转子齿端磁通密度高于齿根磁通密度,转子导条内电流产生较强的集肤效应。而当电动机达到稳定后,气隙磁通由齿槽穿过进入转子轭部,分布均匀,没有明显的集肤效应。由启动到稳定运行,随着转子转速的增大,电机的转差率由启动时刻的 1 减少到稳定运行时的 0.05,转子导条电流密度随着转子转速的增加而减小。

3 结论

利用有限元数值分析软件建立三相异步电机二维有限元模型,得到了定子电流和输出转矩随转子转速变化的关系图。分析了电机启动过程中电机内的磁场分布以及转子电流密度分布情况。得到以下结论。

1) 当电机稳定运行时,磁力线较均匀的分布在定转子铁芯内部。而当电机启动时电磁场主要集中在临近转子表面较薄的一层内,定、转子齿端磁通密度很高。

2) 稳定运行时转子绕组电流密度分布均匀。而启动时刻由于启动电流很大,转子绕组电流密度沿径向逐渐变大,有明显的集肤效应。

通过场分析方法对该种电机的工作特性及磁场分布进行研究,为电机参数的计算、结构的改进、控制系统的设计、损耗计算以及电机温度场计算提供了可靠依据。

参考文献 (References)

- [1] 戴文进, 徐龙权. 电机学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
Dai Wenjin, Xu Longquan. Electric machines [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [2] 张映明. 实心转子异步电机机械特性及涡流效应分析[J]. 中小型电机, 2002, 29(3): 11-14.
Zhang Yingming. *Small and Medium Electric Motor*, 2002, 29(3): 11-14.
- [3] Chari M V K, Bedrosian G, d'Angelo J, et al. Finite element applications in electrical engineering [J]//IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(2): 1306-1314.
- [4] Liu C, Yao R. A new approach to calculate equivalent circuit parameters of the induction motor with solid rotor[C]. *IEEE International on Electric Machines and Drives Conference*, 2003, 3(1-4): 1612-1615.
- [5] 黄国治, 傅丰礼. 中小旋转电机设计手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
Huang Guozhi, Fu Fengli. Medium and small sized motors design handbook[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [6] Ergene L T, Salon S J. One-slot AC steady-state model of a canned-solid rotor induction motor[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2004, 40(4): 1892-1896.
- [7] 杨通, 周理兵, 蒋伟. 实心笼型异步电机转子涡流分析与计算[J]. 电机与控制应用, 2006, 33(4): 3-6.
Yang Tong, Zhou Libing, Jiang Wei. *Electric Machines and Control Application*, 2006, 33(4): 3-6.
- [8] 郭建龙, 陈世元. 外转子双凸极永磁电动机的有限元分析 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 46-51.
Guo Jianlong, Chen Shiyuan. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(36): 46-51.
- [9] 王莉, 周增福, 周波, 等. 双凸极电励磁发电机非线性建模方法 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 86-92.
Wang Li, Zhou Zengfu, Zhou Bo, et al. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(6): 86-92.
- [10] 周波, 任立立, 韦海荣. 基于等效电感方法的电磁式双凸极电机系统简化控制模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 109-114.
Zhou Bo, Ren Lili, Wei Hairong. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(14): 109-114.
- [11] Cheng M, Chan K T, Chan C C. Static characteristics of a new doubly salient permanent magnet motor [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2001, 16(1): 20-25.
- [12] 张乐, 周波, 方斯琛. 基于三维非线性电感模型电励磁双凸极发电机系统建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 126-132.
Zhang Le, Zhou Bo, Fang Sichen. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(23): 126-132.
- [13] Sharma N D, Anbarasu R, Nataraj J, et al. Experimental investigations on high speed solid and composite rotor induction motor[C]//Proceedings of the 1996 International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1996, 2: 913-919.
- [14] Zaim M E. Non-linear models for the design of solid rotor induction machines[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, 35(3): 1310-1313.
- [15] 梁得亮, 陈世坤. 用时步有限元法分析实心转子异步电机的瞬态特性[J]. 中小型电机, 1995, 22(5): 3-6.
Liang Deliang, Chen Shikun. *Small and Medium Electric Motor*, 1995, 22(5): 3-6.
- [16] 刘长红, 姚若萍. 基于场路结合的实心转子异步电机转子参数计算 [J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(9): 1372-1374.
Liu Changhong, Yao Ruoping. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2003, 37(9): 1372-1374.
- [17] 严登俊, 刘瑞芳, 胡敏强, 等. 鼠笼异步电机启动性能的时步有限元计算[J]. 电机与控制学报, 2003, 7(3): 177-181.
Yan Dengjun, Liu Ruifang, Hu Minqiang, et al. *Electric Machines and Control*, 2003, 7(3): 177-181.
- [18] 李伟力, 周封, 侯云鹏, 等. 大型水轮发电机转子温度场的有限元计算及相关因素的分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 85-90.
Li Weili, Zhou Feng, Hou Yunpeng, et al. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(10): 85-90.
- [19] 夏正泽, 刘慧娟. 基于 Ansys 的异步牵引电机电磁场分析 [J]. 防爆电机, 2008, 43(3): 18-21.
Xia Zhengze, Liu Huijuan. *Explosion-proof Electric Machine*, 2008, 43(3): 18-21.
- [20] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
Chen Shikun. Motor design[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

(责任编辑 杨书卷)

学术动态



“第七届海峡两岸材料腐蚀与防护研讨会”征文

由中国腐蚀与防护学会主办的“第七届海峡两岸腐蚀与防护研讨会”, 将于 2010 年 7 月 25—31 日在昆明举办。

会议现面向相关科技工作者征文, 征文范围如下: 腐蚀原理与分析测试技术; 自然环境腐蚀; 石化及电力设备腐蚀与防护; 建筑材料腐蚀与防护; 电子材料腐蚀与防护; 生物医药材料腐蚀与防护; 环境断裂(应力腐蚀、氢脆、腐蚀疲劳、磨蚀等); 高温氧化与腐蚀; 腐蚀模拟与数据库; 腐蚀检测与监测技术; 防蚀涂层与表面改性。

全文截稿日期: 2010 年 3 月 30 日。

联系方式: 北京市海淀区学院路 30 号北京科技大学腐蚀与防护中心(100083), 宿彦京。

电话: 010-62333884; 传真: 010-62332345; 电子邮箱: yjsu@ustb.edu.cn。