

基于Ansoft电动汽车用轮毂电机电磁场分析

主要介绍了利用有限元软件Ansoft对设计的电动汽车用轮毂电动机进行建模、仿真，以指导和优化电动机的设计。研究的主要内容包括：在RMxpert中搭建了永磁无刷直流电动机的几何模型，然后导入到 Maxwell 2D 中建立了二维有限元仿真模型，并运用瞬态求解器对电动机的基本特性进行瞬态分析。通过得到的仿真数据并对其整理，绘制成图标，直观地显示了电动机在运转时磁场在不同时刻的分布情况。与从试验台得到的数据对比，验证了设计的正确性，也对今后的电动机设计和优化提供了一定参考价值。

陈永飞¹ 雷良育^{1,2} 胡 焯¹ 潘汉明¹ / 1. 浙江农林大学工程学院 2. 浙江兆丰机电股份有限公司

0 引言

近几十年，电动汽车行业得到了迅猛发展。永磁无刷直流电动机得以产生并得到了快速发展，其是随着半导体电子技术发展而出现的，集电力电子、微电子技术、控制理论和电动机技术于一身的新型机电一体化电动机^[1]。轮毂电动机基于永磁无刷直流电动机技术，与其他电动机相比，具有很好的可控性、较宽的调速范围、功率密度高、工作寿命长且可靠性高等优点，已广泛应用到工业、电动汽车行业^[2]、医疗设备和家用电器等领域。然而，在实际应用中，电磁转矩脉动、控制算法以及散热等难题，还困扰着本行业的研究人员。

Maxwell软件包是Ansoft公司针对机电系统电磁计算开发的有限元软件包，是一款功能强大、结果准确且易于使用的二维电磁场有限元分析软件。软件包

包括了稳态、瞬态、Design2D和Design3D等模块。用户可根据需要自行选择，操作简便，使用快捷。本文使用RMxpert模块，在此平台上搭建了电动机模型，该软件的便捷之处是可以将其直接导入到Maxwell 2D^[3]中，进行瞬态特性分析，获得更准确的数据，对电动机的设计有很重要的工程意义。

1 电磁场分析的理论基础

19世纪中叶，麦克斯韦在总结前人工作的基础上，提出了适用于所有宏观电磁现象的数学模型，称之为麦克斯韦方程组。它是电磁场理论的基础，也是工程电磁场数值分析的出发点。麦克斯韦方程组是对电磁场的经典描述，是电磁场分析的理论基础^[4]。式（1）为麦克斯韦方程组的微分形式，即

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

洛伦兹力的表达式

$$\mathbf{f} = q\mathbf{E} + q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2)$$

磁介质的本构关系式

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \end{cases} \quad (3)$$

式中， $\mathbf{H}$ 为磁场强度矢量； $\mathbf{B}$ 为磁感应强度矢量； $\mathbf{E}$ 为电场强度矢量； $\mathbf{D}$ 为电位移



陈永飞/硕士研究生

关键词/Keywords

轮毂电动机 ·
有限元 ·
仿真分析设计 ·

杭州市重大科技创新专项（20132011A24）。

矢量； f 为电磁力矢量； v 为电荷 q 的运动速度矢量； J 为电流密度矢量； ρ 为体电荷密度； μ 为磁导率。

在稳态情况下，电磁场的边值问题可表述为

$$\begin{cases} \Omega: \frac{\partial}{\partial x} \left(v \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J \\ \Gamma_1: A_z = A_{z0} \\ \Gamma_2: v \frac{\partial A_z}{\partial n} = -H \end{cases} \quad (4)$$

式中， v 为磁阻率， $v = 1/\mu$ ； μ 为磁导率； A_z 为矢量磁位； J 为源电流密度； H 为磁场强度的切向分量。由式(4)可以看出，有限元的求解问题，可以归结为微分方程求解问题，若要获得唯一解，不仅要获方程基本解，还要获得任意常数的确定值。因此，边界条件的设置，会直接影响到求解结果的准确性。 Γ_1 为狄利克莱边界条件，在电磁场分析应用中，也称之为第一类边界条件。在有限元分析软件中，它规定了边界各节点电动势的分布，在进行电动机的电磁场分析时，磁通基本在内部，因此用到最多的也是第一类边界条件。 Γ_2 为诺依曼边界条件，在电磁场领域也称之为第二类边界条件，它规定了边界各节点电势的法向导数分布。在Ansoft计算时用到的诺依曼边界条件，其法向导数为零，为软件默认的边界条件，无须另外设置。因此，在进行Ansoft有限元仿真分析时，要注意以下问题：①磁极极距气隙很小且均匀，则其磁感应强度 B 只考虑径向分量，电动机轴向稳定不变，不考虑端部效应；②铁心磁导率各方向均为同性，外转子边缘的漏磁忽略不计；③根据每一个网格单元结果，把分成的每一个网格单元结果合并，求得求解域的电磁特性。

2 系统仿真模型的建立

2.1 轮毂电动机的电路模型

轮毂电动机一个完整的系统包括电动机、位置传感器和控制器。它的运行要通过位置传感器向控制器发送位置信号，从而让控制器能正确地

控制三相电流的导通与截止。

样机的位置传感器采用的是霍尔位置传感器，是基于霍尔效应原理和必要的外围电路制作而成。其具有工作稳定可靠，安装方便，体积较小，响应频率高等优点。安装在定子内，使用寿命较长。

轮毂电动机的驱动方式为方波电流驱动，样机绕组采用的是Y形接法。该接法在目前的电动机使用中已经很少见。在正常工作时，任意状态下，都是一相正向导通，一相为反向导通，而另外一相不导通。任意一相绕组，在一个电气周期内，是有120°正向导通，60°不导通，接着120°反向导通，60°不导通，如此循环。理论上，由此设计的电动机在运行时是没有转矩波动的。但由于实际加工误差原因的存在，在实际应用中是存在一定的转矩波动的，一般较小。因此，与其相对应的电路导通方式应为： $(A+C-)-(C-B+)-(B+A-)-(A-C+)-(C+B-)-(B-A+)$ 。轮毂电动机要想稳定地工作，控制器的匹配也十分关键。电动机的稳定输出、电路保护、短时过载和爬坡能力等都需要控制器的帮助才能得以体现。因此，在动力系统设计时，控制器与轮毂电动机的匹配显得尤为关键。结合电动机的电角度导通方式和换相规律，搭建了如图1和图2所示的电路系统。

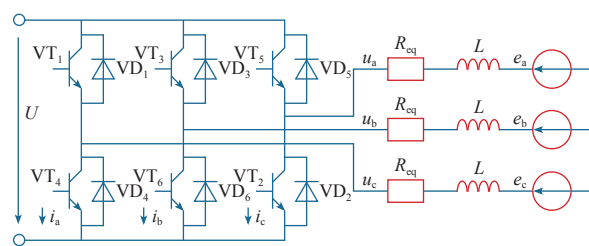


图1 电路驱动系统

2.2 轮毂电动机模型

1) 首先，在RMxpert模块里，首先选择电动机类型，永磁无刷直流电动机。外转子的内径为250 mm，定子的外径为232 mm，定子铁心长度为50 mm。电动机功率为3 kW；电压为72 V；相数为3相；额定转速为710 r/min；槽数为63槽；极对数28对

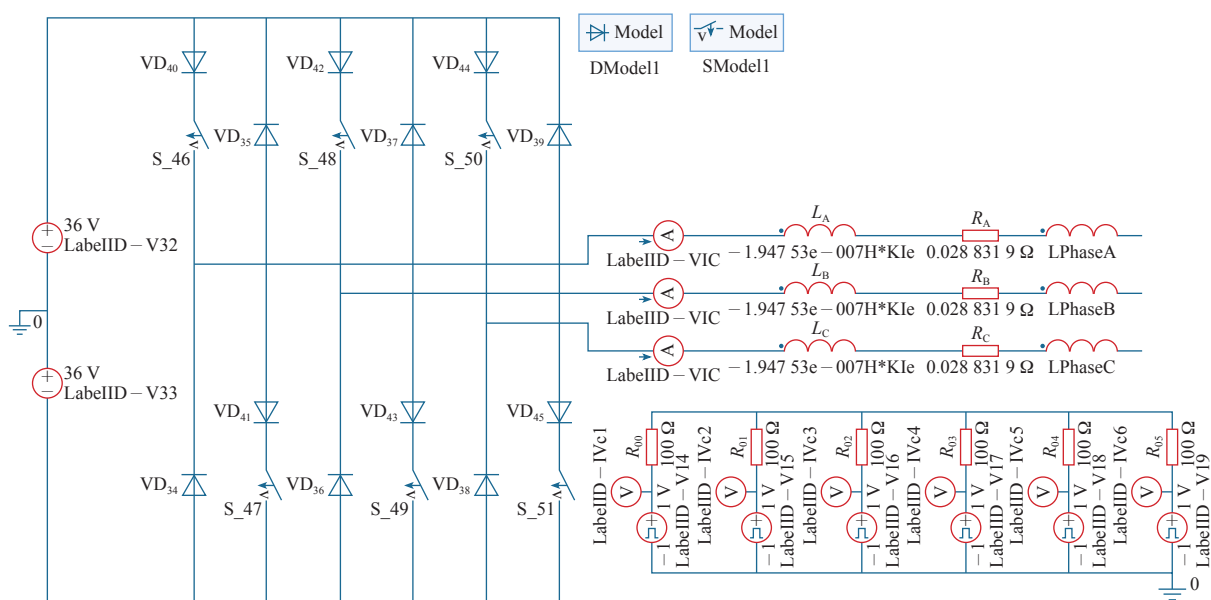


图2 外部电路

极。绕组建立起样机模型。

2) 定义材料。本文转子和定子采用的是冷压钢DW470-50, 导入 $B-H$ 曲线, 如图3所示, 确定材料。

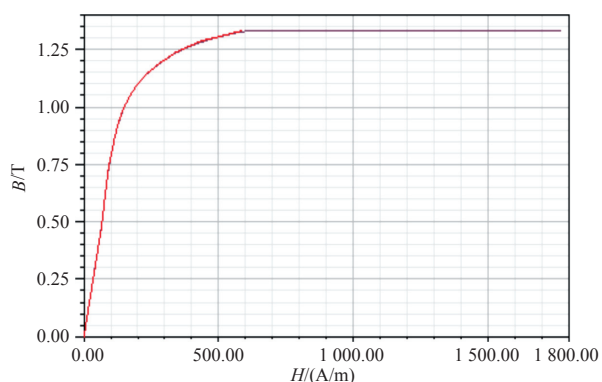


图3 $B-H$ 曲线

绕组材料为1.3 mm铜线, 三相接法为Y形接法。其他材料选择Air。永磁体采用的是第三代稀土材料钕铁硼, 型号N50; 稀土材料的磁性能十分优异, 高磁能积、高矫顽力等优点, 重要的是其退磁曲线基本为直线, 即回复线与退磁曲线基本重合。电动机的动态工作点就会在这条直线上移动, 动态范围比较宽, 也不容易去磁。对电动机的性能以及稳定性、噪声等方面都有直接的影响关系。目前, 稀土材料的永磁体价格不断降低, 也在一定程度上推动了永磁体电动机的发展。

3) 运算后, 可直接通过Create Maxwell Design导入Maxwell 2D中, 该软件的便捷之处在于导入后, 边界条件、Band面域已自动设置好, 无须再手动设置。其中定义绕组激励源时采用外电路输入的方法。建立的电动机模型如图4所示。

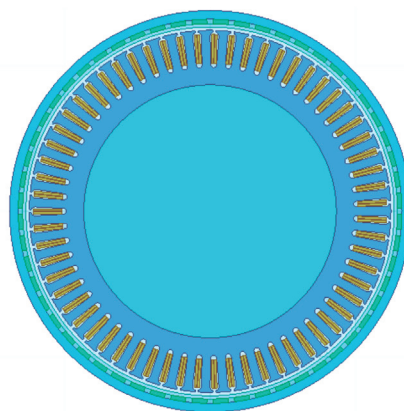


图4 电动机几何模型

网格剖分, 要对电动机的模型进行离散化, 为了保证计算的准确性, 可以根据电动机不同部位准确度要求进行设置。需要注意的是, 介于定子与永磁体之间的气隙是电动机最重要的部分, 磁场变化率大, 为提高准确度, 应采用较密集的网格剖分。因为不需要计算整个模型, 只需要对模型的一个周期计算即可。剖分结果如图5所示。

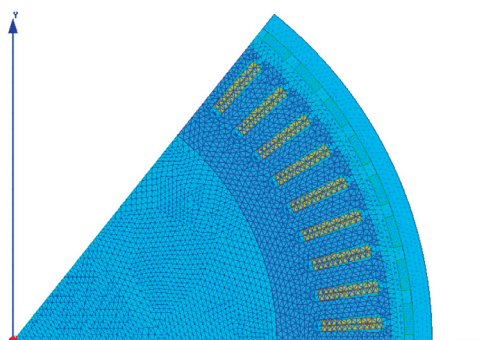


图5 网格剖分

电磁场的分析和计算通常归结为求微分方程的解。对于常微分方程，只要由辅助条件决定任意常数之后，其解就是唯一的。对于偏微分方程，使其解成为唯一的辅助条件可分为两种：①表达场的边界所处的物理情况、称为边界条件；②确定场的初始状态，称为初始条件。边界条件和初始条件合称为定解条件。目前，电磁场问题主要研究的是没有初始条件而只有边界条件的定解问题。

有限元法是将整个求解区域离散化，分成无数个小单元，把所要求解的微分方程型数学模型——边值问题，首先转化为相应的变分问题，及泛函求极值问题；然后利用剖分插值，离散化变分问题为普通多元函数的极值问题，最终归结为一组多元的代数方程组，解之即得待求边值问题的数值解^[5]。

3 分析结果和后处理

在运算前，要设置求解参数。在Type选项中选择线性步长Linear Step，信息保存开始及终止时间分别设置为0 s和0.5 s，场信息保存时间步长设置为0.02 s，求解过程中会自动保存数据，然后点击按钮将具体设置增加到时间菜单中。电动机的额定转速为710 r/min，在运算前软件可以进行自我检验。当检查完毕后，执行Maxwell 2D/Analysis all命令，启动求解过程。运算完毕后，得到不同时刻的磁力线分布图，如图6和图7所示。

由图6可知，当 $t=0$ s时，此时没有电流通过，磁力线分布良好；每个时刻，三相中只有两

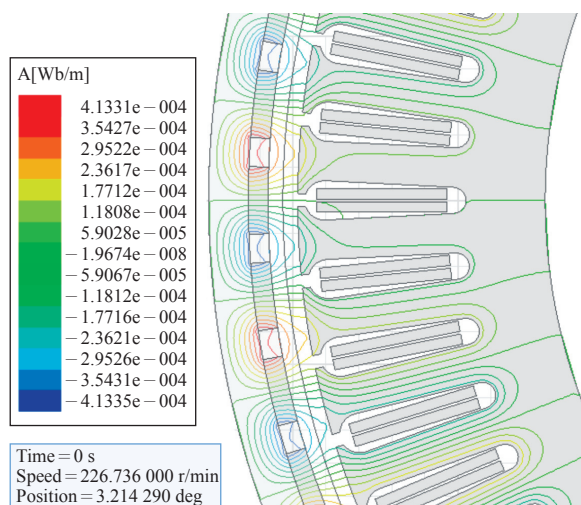


图6 $t=0$ s时刻磁力线分布图

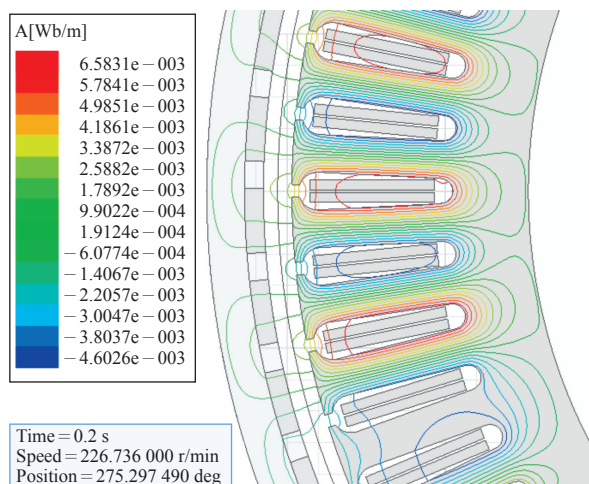


图7 $t=0.2$ s时磁力线分布图

相有电流通过。由图7可知，当 $t=0.2$ s时，其中一相没有电流通过，其覆盖的齿槽磁力线分布相比于 $t=0$ 时变化不大，仍然较为均匀。有电流通过的两相，磁力线相对于 $t=0$ 时变化较大，且有轻微漏磁现象，电枢轭部分分布极为密集，电枢下部较为稀疏。因此，可以考虑适当减小槽的宽度、加深槽的深度，或者采用减少每相匝数、增加绕线圈数的做法。就电动机设计而言，设计参数基本正确，磁力线分布较为均匀，漏磁现象控制较好。

根据引起无刷直流电动机转矩波动的原因，有非理想的反电动势波形。当反电动势为梯形波、定子电流为方波的情况下，此时电动机产生

的电磁转矩为恒值,理论上没有波动。但是实际情况中反电动势更接近于正弦波,因此会引起转矩波动。控制器换相,当控制器换相时,由于电感的存在,电流的变换不可能瞬间完成,势必会引起电磁转矩波动。齿槽效应,齿槽效应是永磁电动机的固有特性,主要是当低速转动时影响比较大。电枢反应,对外转子无刷直流电动机有一定的影响作用,但对内置式转子电动机影响基本可以忽略。加工工艺,即使设电动机的设计比较合理,但由于加工工装势必会引起偏差。这就导致原始设计与实际会有出入,加工的偏差会引起永磁场分布不均等一系列问题,也会影响电动机的转矩波动。

减小转矩波动的常用方法一般有:优化电动机设计、合理的电流、最佳开通角法和谐波消除法等。如图8所示可以看出,存在一定的转矩波动,但影响较小。

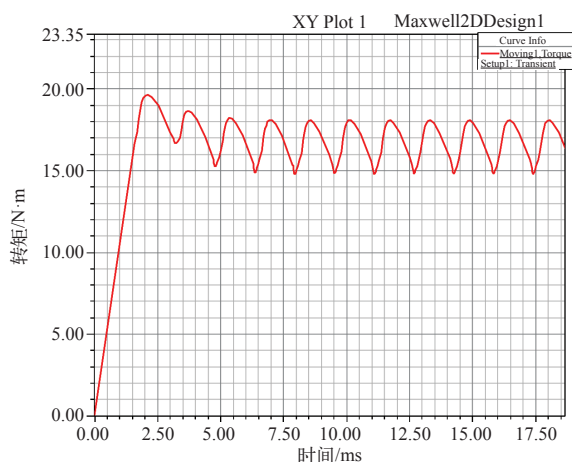


图8 空载转矩波形图

齿槽转矩是由于电枢铁心的齿槽和永磁体相互作用而产生的磁阻转矩。电动机在工作时,齿槽转矩虽然不会引起有效转矩的变化,但是它会速度引起速度的波动,电动机的振动和噪声,在低速运转时会尤为明显。因此,有效地降低齿槽转矩,是电动机设计时必须考虑的。空载齿槽转矩波形如图9所示。对永磁体电动机,齿槽转矩的解析式为

$$T_{\text{cog}}(\alpha) = \frac{\pi z L_a}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_r (nz/2p) \sin(nz\alpha) \quad (5)$$

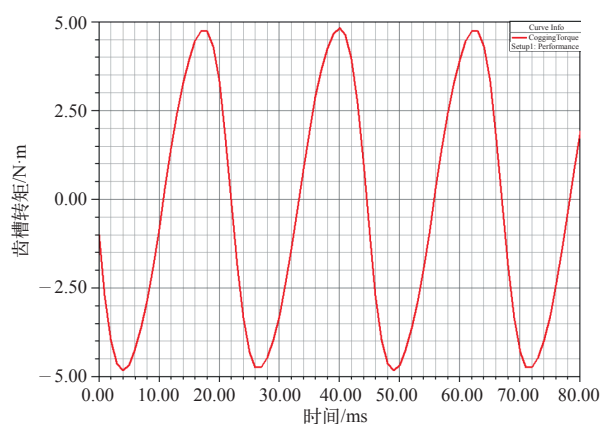


图9 空载齿槽转矩波形

式中, z 为槽数; $2p$ 为极数; L_a 为铁心长度; R_1 和 R_2 为内定子的外半径和外转子的内半径。可以根据式(5)来降低齿槽转矩,不难看出,式(5)中,只有 $nz/2p$ 谐波对齿槽转矩有影响,因此,设法减小 $nz/2p$ 的幅值,可以有效抑制齿槽转矩。而采用分数槽绕组,可以有效减小其幅值,因此,目前无刷直流电动机大多使用分数槽绕组,也是抑制齿槽转矩的最佳方法之一。其中分数槽的是这样定义

$$q = \frac{z}{2mp} \quad (6)$$

式中, m 为绕组的相数; z 为槽数; p 为极对数。当 q 为整数时,成为整数槽绕组;当 q 为分数时,成为分数槽绕组。分数槽也有其独特的优点:槽满率利用率较高,可以改善反电动势的波形,可以使用机械绕线,改善绕线质量,降低铜耗,进而降低电动机温度和提高电动机效率,最主要的是降低齿槽转矩等优点。因此,目前使用较多的便是分数槽绕组。

如图10所示,反电动势有一定的谐波成分。遏制谐波的办法一般有:优化极弧系数、合理设计气隙、永磁体分布均匀、加工工艺和开槽优化等方法^[6]。

在电动机正常运转时,反电动势波形的幅值会略大于线电压,在图10的反电动势波形图中也得到了较好的体现。得到反电动势的波形,在设计电动机的控制系统时,可以把控制策略做到最优。以提高整个电动机系统的运行稳定性和

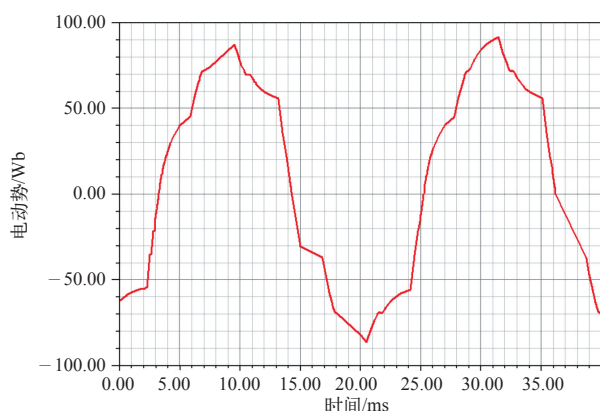


图10 空载A相反电动势波形图

实用性。

4 结束语

1) 本文在直流无刷电动机设计上采用电磁场有限元法进行设计,充分利用Ansoft有限元分析软件中的参数化语言进行建模,分析模型,然后比较分析结果,以此来确定电动机的尺寸。这种方法设计周期短,直观。

2) 仿真结果反映了电动机起动时的转矩、齿槽转矩、空载绕组磁链和反电动势等结果。为电动机的优化设计,减少磁力波动提供了可靠的依据。

3) 在能源和环境问题日益凸显的背景下,一种能代替燃油车辆的替代品显得尤为重要,轮毂电动机技术也被看作电动汽车最终的驱动形式。得天独厚的优势,使其发展十分迅速。但也还有

一些尚未解决或尚需要提高之处。比如:散热、减速装置、密封和续航能力等。在某些地方,还需要有与之相匹配的其他技术领域的支撑,作为被人广为诟病的续航能力,就迫切地需要更加强劲耐用的蓄电池,可以充当长时间的稳定电流的电源系统。

参考文献

- [1] 谭建成. 永磁无刷直流电机技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 10-11.
- [2] 顾云青, 张立军. 电动汽车电动轮驱动系统开发现状与趋势 [J]. 汽车研究与开发, 2004 (12): 27-30.
- [3] Vong P K, Rodger D. Coupled electromagnetic-thermal modeling of electrical machines [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2003, 39 (3): 1614-1617.
- [4] 刘国强, 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: 135-136.
- [5] 张文敏, 李伟力, 沈稼丰. 永磁无刷直流电动机反电动势及定位力矩的计算与仿真 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38 (2): 297-300.
- [6] 赵博, 张洪亮. Ansoft12在工程电磁场中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 58-87.

(收稿日期: 2015-08-17) **EA**

(上接第19页)

参考文献

- [1] 李海涛, 张志秀. RFID技术在小区安防系统中的应用综述 [J]. 山东轻工业学院学报: 自然科学版, 2008 (1): 43-45.
- [2] 郑炎. 数字化变电站若干技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

- [3] 姜燕. 探究配网数字化管理系统 [J]. 通信世界, 2013 (19): 117-118.
- [4] 庞国明. RFID在安防行业中的应用前景探讨 [J]. 中国安防, 2009 (7): 60-64.
- [5] 吴奇石, 邱家驹. 配网规划智能决策支持系统的研究——基于地理信息系统及人工智能方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 1998 (3): 17-24.

(收稿日期: 2015-09-21) **EA**