

基于磁链与转矩特性的开关磁阻电机建模研究

丁文¹, 梁得亮¹, 鱼振民¹, 唐任远²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 沈阳工业大学电气工程学院, 110023, 沈阳)

摘要: 提出了一种开关磁阻电机(SRM)数学建模的新方法. 在已知 SRM 5 个特殊位置电感数据的基础上, 将傅里叶级数分解和曲线拟合方法运用于磁链模型的建立中, 根据虚位移原理计算获得 SRM 的矩角特性, 并将自适应神经网络模糊推理系统(ANFIS)用于矩角模型的建立. 基于非线性磁链模型与 ANFIS 矩角模型, 对一台 6/4 结构的 SRM 进行了仿真与实验. 仿真结果与实验结果基本一致, 最大误差不超过 5%, 从而验证了这种建模方法的正确性. 同时, 该建模方法还可以进一步应用于 SRM 的磁链控制和转矩控制中, 为工程设计和调试提供依据.

关键词: 开关磁阻电机; 磁链模型; 矩角模型; 自适应神经网络模糊推理系统

中图分类号: TM352 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)02-0214-05

Modeling for Switched Reluctance Motor Based on Flux Linkage and Torque Characteristics

Ding Wen¹, Liang Deliang¹, Yu Zhenmin¹, Tang Renyuan²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China)

Abstract: A novel mathematic model for switched reluctance motor(SRM) was proposed. The Fourier series expression and curve fitting method were used to model the flux linkage according to the inductance data of five positions, then the torque characteristics were sought out via the principle of virtual displacement, and adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) was utilized to train the torque-angle model. The simulation and experiment were carried out comparatively on SRM with six stator poles and four rotor poles based on the nonlinear flux linkage model and torque-angle model of ANFIS to demonstrate the both coincidence with a maximal error lower than 5%. And the method is expected to apply to SRM flux linkage control and torque control to provide the basis for engineering design and debugging.

Keywords: switched reluctance motor; flux linkage model; torque-angle model; adaptive network-based fuzzy inference system

开关磁阻电机(SRM)由于其结构简单、成本低、控制容易,已经越来越受到人们的重视.但是,由于这种电机双凸极结构的特点,磁路和电路的非线性、开关性,使得 SRM 的各个物理量随转子位置作周期性变化,定子绕组电流、磁通波形及转矩波形极不规则,传统电机的建模和性能分析方法难以简单地应用于 SRM 计算中.因此,要对 SRM 进行准确

的性能分析就要求解非线性方程.求解非线性方程的首要条件是必须获得 SRM 的磁链模型和矩角模型,目前已有多种 SRM 磁链模型建模方法,如线性法^[1]、准线性法^[2]、函数解析法^[3]、有限元分析法^[4]和神经网络法^[5]等.目前对矩角特性模型的研究较少,主要是根据磁链模型的近似函数解析式求导而得到,或者是根据实测样机静态转矩数据得到.

本文在实测 SRM 电感数据的基础上,提出一种新型的 SRM 数学建模方法.该方法首先将傅里叶级数分解和曲线拟合方法运用于磁链特性的建模中,接着利用虚位移原理计算 SRM 矩角特性,采用基于自适应神经网络的模糊推理系统(ANFIS),将模糊推理与神经网络有机结合起来,利用它的自学习功能计算出模糊系统的隶属度函数以及相应的模糊规则,然后通过训练得到矩角特性模型.最后,基于磁链与矩角模型,对 SRM 进行数字仿真,其仿真结果与实验结果吻合较好,验证了这种建模方法的正确性.

1 SRM 非线性电感与磁链模型

开关磁阻电机在忽略互感时,各相磁链 Ψ_k 是相电感 L_k 和相电流 i_k 的非线性函数^[1-2,6],即

$$\Psi_k(\theta, i_k) = L_k(\theta, i_k) i_k \quad (1)$$

式中: $L_k(\theta, i_k)$ 表示相电感-转子位置-相电流关系,可由傅里叶级数近似逼近

$$L(\theta, i_k) = L_0(i) + L_1(i) \cos(N_r \theta + \pi) + \dots + \sum_{n=2}^{\infty} L_n(i) \cos(n N_r \theta + n \pi) \quad (2)$$

式中: N_r 为 SRM 转子齿数.

由于相电感谐波分量远小于基波分量,取前 4 次谐波即可满足精度要求,则

$$L(\theta, i_k) = L_0(i) + L_1(i) \cos(N_r \theta + \pi) + L_2(i) \cos(2N_r \theta + 2\pi) + L_3(i) \cos(3N_r \theta + 3\pi) + L_4(i) \cos(4N_r \theta + 4\pi) \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} L_0 &= \frac{1}{6} L_a + \frac{1}{3} L_w + \frac{1}{3} L_t + \frac{1}{6} L_u \\ L_1 &= \frac{1}{3} L_a + \frac{1}{3} L_w - \frac{1}{3} L_t - \frac{1}{3} L_u \\ L_2 &= \frac{1}{4} L_a - \frac{1}{2} L_m + \frac{1}{4} L_u \\ L_3 &= \frac{1}{6} L_a - \frac{1}{3} L_w + \frac{1}{3} L_t - \frac{1}{6} L_u \\ L_4 &= \frac{1}{12} L_a - \frac{1}{3} L_w + \frac{1}{2} L_m - \frac{1}{3} L_t + \frac{1}{12} L_u \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: L_a 为 SRM 在平衡位置(齿对齿)处的相电感; L_w 为 SRM 距平衡位置(齿对齿)1/3 处的相电感; L_m 为 SRM 平衡位置与非平衡位置(齿对槽)中间处的相电感; L_t 为 SRM 电机距非平衡位置(齿对槽)1/3 处的相电感; L_u 为 SRM 非平衡位置(齿对槽 $\theta=0^\circ$)处的相电感,其值可近似认为与相电流无关,为一常值. L_a 、 L_w 、 L_m 、 L_t 为相电流的函数,通过曲线拟合方法确定.

图 1 为 SRM 样机 5 个特殊位置的电感实验测量数据及其对应的多项式拟合曲线,图 2 为所有位置的实测电感数据及其由式(3)拟合的曲线.将 L_a 、 L_w 、 L_m 、 L_t 、 L_u 代入式(4),并由式(1)及式(3)得到磁链特性估计曲线.图 3 为 SRM 样机磁链实验测量结果及其由式(1)得到的拟合曲线,拟合曲线结果与实验结果相吻合,证明了该方法的有效性.

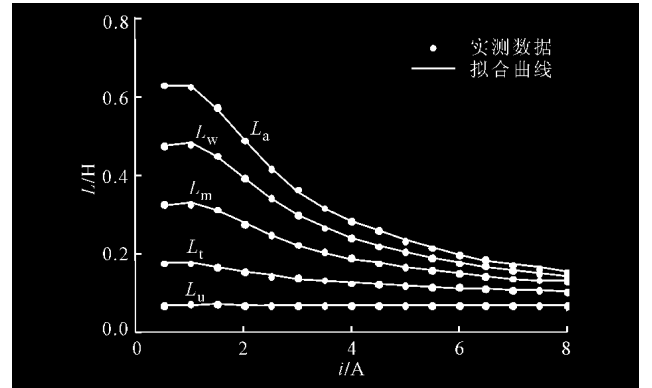


图 1 特殊位置实测电感数据及其拟合曲线

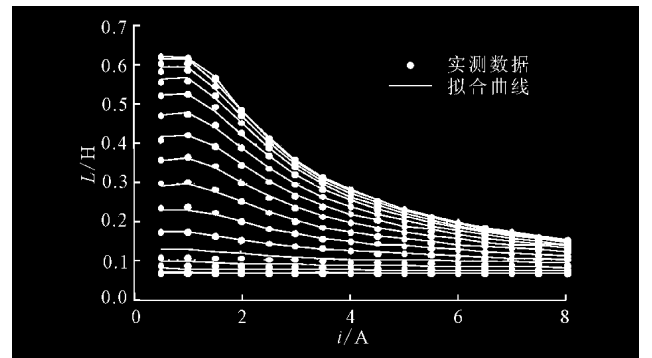


图 2 实测电感数据及其拟合曲线

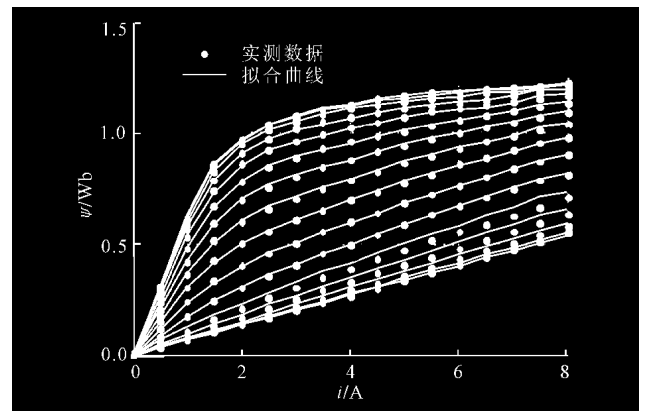


图 3 实测磁链数据及其拟合曲线

2 SRM 静态转矩特性虚位移计算

开关磁阻电动机的转矩是磁阻性质,其运行遵

循“磁阻最小原理”,即磁通总是沿着磁阻最小的路径闭合.因磁场扭曲产生切向磁拉力,磁路饱和和非线性是 SRM 的一个重要特征,因此 SRM 电磁转矩必须根据磁共能来计算^[2],即

$$T_{\text{total}}(\theta, i) = \sum_{j=1}^m T_j(\theta, i) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial W'_f(\theta, i)}{\partial \theta} \Big|_{i=\text{const}} \quad (5)$$

$$W'_f(\theta, i) = \int_0^i \Psi(\theta, i) di \Big|_{\theta=\text{const}} \quad (6)$$

式中: θ, i 分别为电机转子位置角和绕组相电流; $\Psi(\theta, i)$ 为相磁链; $W'_f(\theta, i)$ 为绕组磁共能.由于 SRM 的双凸极结构及磁路的非线性,使得 SRM 的绕组转矩是电流和转子位置的非线性函数.

SRM 转矩求解示意图如图 4 所示,图中阴影部分即为耦合磁场在转子位移增量 $\Delta\theta$ 内的磁共能增量,图中任何一运行点处的瞬时转矩可根据虚位移原理由式(5)求出.数值求解 SRM 一相静态转矩特性的过程如下.

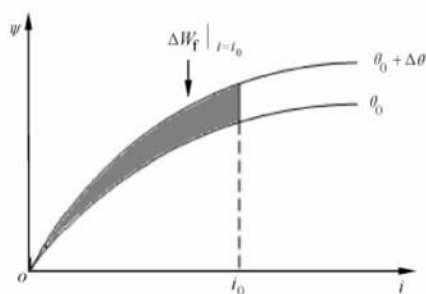


图4 SRM Ψ - i 轨迹及转矩求解示意图

(1)选定电流 i_0 ,利用三次样条积分,求得 SRM 转子位置角 θ_0 处的磁链特性所对应的磁共能

$$W'_f(\theta_0, i_0) = \int_0^{i_0} \Psi(\theta_0, i_0) di \quad (7)$$

(2)保持电流值 i_0 ,计算 $\theta_0 + \Delta\theta$ 处的磁共能 $W'_f(\theta_0 + \Delta\theta, i_0)$.

(3)重复(1)、(2)步计算过程,求出其他点 (θ, i) 处的磁共能值.

(4)利用三次样条导数,求解 SRM 在各位置处的转矩,则在点 (θ_0, i_0) 处

$$T(\theta_0, i_0) = \frac{\partial W'_f(\theta, i_0)}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_0} \quad (8)$$

(5)重复(1)~(4)步,求出其他点 (θ_0, i_0) 处的转矩值,得到 SRM 静态转矩特性曲线族如图 5 所示,其中电流为 0.5~8 A,间隔为 0.5 A,转子位置角为 $0^\circ \sim 45^\circ$,间隔为 3° .

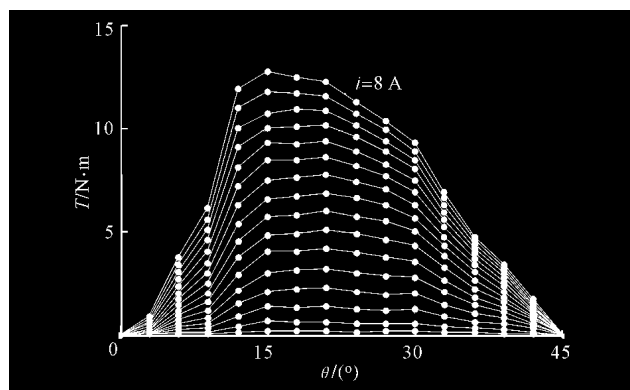


图5 计算转矩特性结果

3 基于自适应神经网络模糊推理系统 (ANFIS) 的 SRM 转矩模型

在计算获得了 SRM 的静态转矩数据之后,如何选用一种合适的模型来描述 SRM 的矩角特性 $T(\theta, i)$,成为研究人员面临的新问题.模糊逻辑与神经网络的结合是近年来计算机智能科学的一个重要研究方向,利用模糊神经网络可以很好地解决 SRM 转矩的建模问题.

3.1 基于 T-S 模型的自适应模糊神经网络

神经网络系统的一大特点是它的自学习功能,将这种自学习的方法应用于对模型特征的分析 and 建模上,就产生了自适应的神经网络技术.这种自适应的神经网络技术对于建立模糊系统的模型(模糊规则库的建立)是非常有效的^[7].

根据 T-S 模型模糊推理的特点,有关学者将其与神经网络结合起来,用于构造具有自适应学习能力的神经网络模糊系统.对于 T-S 模糊推理系统,其一阶模型的结论部分是输入变量的线性组合,即对于规则 R_j :如果 x_1 是 A_1^j ,并且 x_2 是 $A_2^j, \dots, x_n$ 是 A_n^j ,则

$$y_j = p_{j0} + p_{j1}x_1 + \dots + p_{jn}x_n \quad (9)$$

与一阶 T-S 模型相对应,Jang Roger 提出了与一阶 T-S 型模糊推理功能相同的 ANFIS,其结构如图 6 所示,同一层的每个节点具有相似的功能(这里用 $O_{1,i}$ 表示第 1 层的第 i 个节点的输出).

第 1 层:该层每个节点 i 是以节点函数表示的方形节点(该层参数是可变的)

$$\left. \begin{aligned} O_{1,i} &= \mu_{A_i}(x_1) & i &= 1, 2 \\ O_{1,i} &= \mu_{B_{(i-2)}}(x_2) & i &= 3, 4 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: x_1 (或 x_2)为节点的输入; A_i (或 $B_{(i-2)}$)是与该节点函数值相关的语言变量,如“大”、“小”等.或者

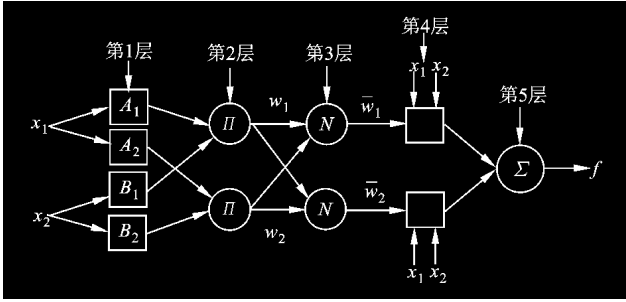


图6 典型的ANFIS结构原理图

说 $O_{1,i}$ 是模糊集 $A(A=A_1, A_2, B_1, B_2)$ 的隶属函数, 通常可选用钟型函数。

第2层: 该层的节点在图中用 Π 表示, 将输入信号相乘, 其乘积输出为

$$O_{2,i} = w = \mu_{A_i}(x_1)\mu_{B_i}(x_2) \quad i = 1, 2 \quad (11)$$

第3层: 该层节点在图中用 N 表示, 第 i 个节点计算第 i 条规则的 w_i 与全部规则值之和 w 的比值为

$$O_{3,i} = \bar{w}_i f_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2 \quad (12)$$

第4层: 该层每个节点 i 为自适应节点, 其输出为

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i(p_i x_1 + q_i x_2 + r_i) \quad i = 1, 2 \quad (13)$$

第5层: 该层的单节点是一个固定节点, 所有输入信号的总输出为

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \sum_i w_i f_i / \sum_i w_i \quad (14)$$

该神经网络的每一层对应于模糊逻辑推理的每一步计算, 完全实现了基于 T-S 的模糊推理。

基于自适应神经网络的模糊推理系统多用于下列情况:

(1) 已经获得大量希望用于建模或是希望模型能够跟随的输入输出数据对;

(2) 不一定需要或是不能预先得到所要研究系统的基于变量特征的结构模型。

我们所研究的 SRM 转矩模糊系统模型, 完全符合以上 2 个 ANFIS 的建模条件。在事先不知道模糊系统的隶属度函数及其形状参数的情况下, 可以通过神经网络与模糊逻辑的结合, 利用神经网络的参数和结构训练方法, 自组织地获取模糊推理系统的规则库、隶属度函数。

3.2 模糊神经网络训练 SRM 转矩模型

用于开关磁阻电机矩角特性建模的自适应模糊神经网络输入变量为转子位置角 θ 和相电流 i , 输出

为转矩 T , 转子位置角和相电流论域分别为 $0^\circ \sim 45^\circ$ 和 $0 \sim 8$ A, 每个输入变量有 5 个模糊子集, 其隶属度函数选用钟型函数, 初始值均匀覆盖输入变量的整个论域。训练样本选用第 2 节中计算获得的 SRM 转矩特性数据 $T(\theta, i)$, 转子位置角每隔 3° 、相电流每隔 0.5 A 取一样本点, 将这些样本数据对自适应模糊神经网络进行训练。在训练中, 初始步长选为 0.01, 步长递减速率为 0.9, 递增速率为 1.2, 初始规则为 25 条。图 7 为训练结束后得到转矩 $T(\theta, i)$ 与转子位置角 θ 和相电流 i 之间的非线性输入、输出映射关系, 与计算获得的转矩曲线(图 5)相比具有很好的吻合性。

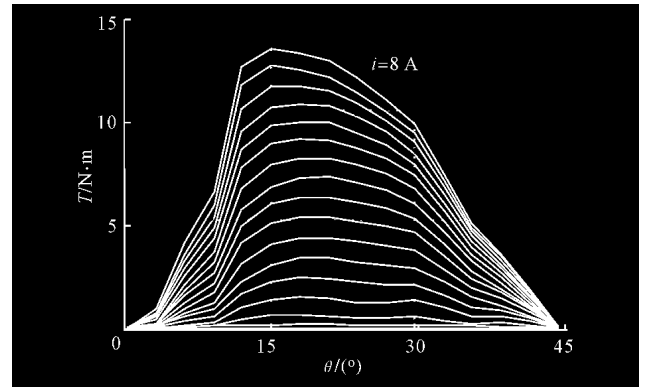


图7 SRM 模糊神经网络转矩训练曲线

4 SRM 性能仿真与实验

SRM 的电路方程和机电联系方程为^[8]

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_k}{dt} &= U_k - R_k i_k \\ T_e &= J \frac{d\omega}{dt} + K_\alpha \omega + T_L \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: U_k 为绕组相电压; R_k 为相绕组电阻; T_e 为输出电磁转矩; J 为转动惯量; K_α 为摩擦系数; T_L 为负载转矩。

为了验证本文建模方法的正确性, 将磁链模型和转矩模型运用到 SRM 的系统仿真中, 并进行了实验。图 8 为系统仿真原理图, 其中 $\Psi(i, \theta)$ 为非线性磁链模型, ANFIS $T(i, \theta)$ 为模糊神经网络矩角模型。从图 9、图 10 的波形可以看出, 仿真结果与实验波形吻合较好, 其误差不超过 5%, 说明了本文所述的非线性建模和仿真方法的正确性和有效性, 仿真结果如实地反映了 SRM 实际的工作状况。

5 结 论

本文针对 SRM, 提出了一种比较精确而实用的

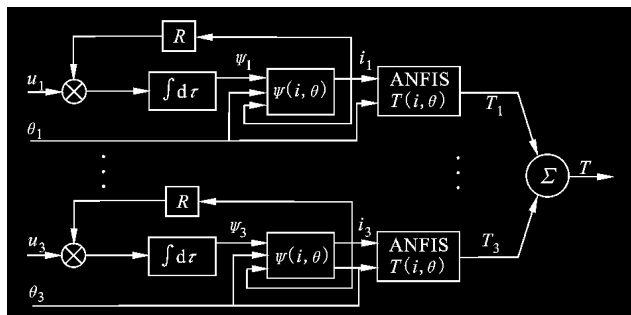
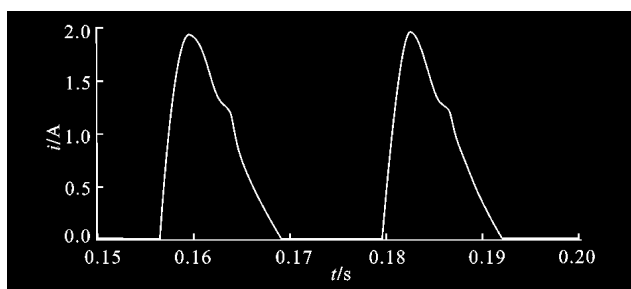
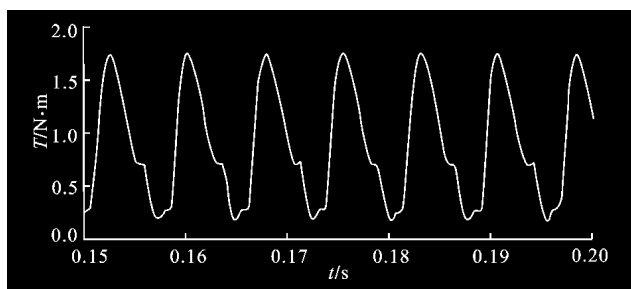


图8 SRM系统仿真原理图



(a) 相电流波形



(b) 总转矩波形

$\theta_{on}=0^\circ; \theta_{off}=27.5^\circ; U=60\text{ V}; n=660\text{ r/min}; T_L=0.92\text{ N}\cdot\text{m}$

图9 转子位置角控制模式下的SRM仿真结果

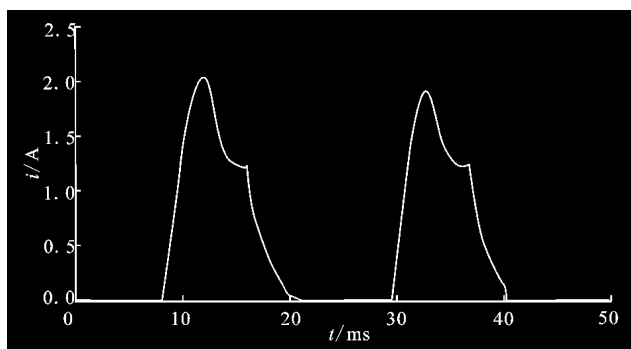


图10 SRM实测相电流波形

SRM建模方法,利用傅里叶级数分解和自适应神经网络的模糊推理系统,建立了SRM的非线性磁链模型和转矩模型,并把磁链模型和转矩模型运用到SRD的系统建模中,进行了仿真与实验,获得了良好的效果.仿真结果与实验结果对比表明,该方法可以迅速准确地对SRM进行性能分析,适用于SRM的CAD设计和分析,并且还可以进一步应用于开关磁阻电动机的其他实时控制(如转矩控制)之中,为工程设计和调试提供了依据.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王宏华. 开关磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- [3] 甘卫红,林辉,齐蓉. 基于结构参数的开关磁阻电机非线性模型[J]. 现代电力,2005,22(5):47-51.
Gan Weihong, Lin Hui, Qi Rong. A nonlinear model of switched reluctance motor based on structural parameters[J]. Modern Electric Power, 2005, 22(5):47-51.
- [4] Radimov N, Ben-Hail N, Rabinaovici R. Simple model of switched reluctance machine based on only aligned and unaligned position data[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(3):1562-1572.
- [5] Xue Xiangdang, Cheng K W E, Ho S L. Simulation of switched reluctance motor drives using two dimensional bicubic spline[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17(4):471-477.
- [6] 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. The simplified modeling for doubly salient electro-magnetic machines based on equivalent inductance[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 109-114.
- [7] 吴晓莉,林哲辉. MATLAB辅助模糊系统设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- [8] Soares F, Costa Branco P J. Simulation of a 6/4 switched reluctance motor based on Matlab/Simulink environment[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(3):989-1007.

(编辑 杜秀杰)