

开关磁阻电机及控制系统仿真与建模^{*}

朱彧姝, 王 锴, 孔镜凯, 单宇杰, 匡德兴, 荆世宏
(中国矿业大学 电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221000)

摘 要: 开关磁阻电机(SRM)应用广泛,但由于电机内部磁场的非线性和相电流难以解析等问题,因此高精度的建模和仿真较为困难。电机及驱动系统建模的研究直接影响到电机的优化设计、动静态性能分析、控制策略的评估等。为此,介绍了一种 SRM 及控制系统的建模方法,利用 Flux 有限元软件搭建的电机本体模型与 MATLAB 搭建的控制系统进行联合仿真。通过试验,测得电机在不同运行状态下的电流波形,并与仿真结果比较。结果表明:不同控制方式下的电流波形与仿真结果一致,是一种行之有效的建模手段。

关键词: 开关磁阻电机; 联合仿真; 建模; 有限元

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)10-0013-06

Simulation and Modeling of Switched Reluctance Motor and Control System^{*}

ZHU Yushu, WANG Kai, KONG Jingkai, SHAN Yujie, KUANG Dexing, JING Shihong

(School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221000, China)

Abstract: Switched reluctance motor (SRM) is widely used, but it is difficult to model and simulate SRMs with high precision because of the nonlinearity of the internal magnetic field and the difficult analysis of the phase current. The research of motor and drive system modeling directly affects the optimization design of motor, dynamic and static performance analysis, evaluation of control strategy, etc. A modeling method for SRM and its control system was introduced. It was a joint simulation, which used the finite element model of the motor built by Flux software and that of the control system built by MATLAB. Through the experiment, the current waveforms of the motor under different operating conditions were measured and compared with the simulation results. The results showed that the current waveforms in different control modes were consistent with the simulation results, which verified the effectiveness of the modeling method.

Key words: switched reluctance motor (SRM); joint simulation; modeling; finite element

0 引 言

作为一种机电能量转换的装置,开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)以其构造坚固、成本低、环境适应性强、可靠性高、调速范围大、惯性小、动态响应好等优点,在工业中应用广泛,成为国内外研究的热点^[1]。随着应用领域的不断拓宽,对电机控制系统的要求也越来越高,不但需要考虑成本,而且要求良好的控制性能,因此

建立有效的 SRM 控制系统仿真模型至关重要。由于 SRM 本身的双凸极结构,当定、转子凸极中心线对准时,气隙小,磁路趋于饱和,而且为了提高电动机出力,减少功率变换器的伏安容量,磁路需要饱和。电动机在运行时,其定、转子极身存在着显著的边缘效应和高度局部饱和,从而引起整个磁路的高度非线性^[2-3],因此高精度的建模和仿真较为困难。

SRM 电磁场计算模型包括线性模型、准线性

^{*} 基金项目: 大学生创新训练计划项目(201710290075)

作者简介: 朱彧姝(1997—),女,研究方向为新型电机及其控制。

王 锴(1993—),男,硕士研究生,研究方向为新型电机及其控制。

孔镜凯(1996—),男,研究方向为新型电机及其控制。

模型、非线性模型 3 种。线性模型忽略了磁路饱和和非线性影响,忽略了磁路非线性特性和磁通边缘效应,忽略了所有的功率损耗及铁心的迟滞和涡流效应,使得计算结果误差较大^[2,4]。准线性模型精度和可靠性得到了提高,但仍不能理想地反映 SRM 的实际运行特性^[5]。非线性模型在电磁数值计算或者试验的基础上获得 SRM 的磁化曲线族,并通过分析磁化曲线得到 SRM 的电感特性、转矩特性^[6]。SRM 的电磁计算主要有简化磁路法、等效磁网络法和有限元法。文献[7-11]中利用有限元软件对电机的电磁特性进行了分析,提高了仿真精度,但有限元方法计算量大,且在仿真过程中不易修改参数及观测电机的动态性能。文献[12-17]中利用 MATLAB/Simulink 搭建了 SRM 控制系统仿真模型,模型构建简单,容易修改参数、观测电机的动态性能,但其忽略了相间互感,对仿真的精确度造成了影响。

综上所述,电机驱动系统建模的研究直接影响到电机的优化设计、动静态性能分析、控制策略的评估等,因此,如何有效地搭建 SRM 控制系统仿真模型成为电机设计的关键问题。本文提出一种 MATLAB 与有限元结合的建模方法,可以实现 SRM 在多种控制策略下的精确仿真,并将仿真结果与试验结果进行比较,验证了仿真模型的精确性。

1 SRM 基本方程及控制策略

1.1 SRM 基本方程

对于 m 相 SRM,忽略相间互感时,某相绕组电压平衡方程式为^[1]

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{d\theta} \omega \quad (1)$$

式中: U ——每相绕组电压;

R ——电阻;

i ——电流;

L ——电感;

ω ——角速度。

SRM 在电磁转矩 T_e 和负载转矩 T_L 作用下的转子机械运动方程式为^[1]

$$T_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (2)$$

电磁转矩的表达式表现了系统机电能量的转换关系。SRM 的瞬时电磁转矩 T_x 为磁共能对转

子位置的偏导^[1]:

$$T_x = \frac{\partial W'}{\partial \theta} \quad (3)$$

式中: W' ——绕组的磁共能^[1]。

$$W' = \int_0^i \psi di = \int_0^i L(\theta, i) idi \quad (4)$$

则

$$T_x = \int_0^{i(\theta)} \frac{\partial L(i, \theta)}{\partial \theta} idi = \frac{1}{2} \frac{\partial L(i, \theta)}{\partial \theta} i^2 \quad (5)$$

式(1)~式(5)反映了 SRM 转子位置、相电流、电感、转矩之间的关系。由于电感及磁链的非线性,很难解析它们之间的关系及电机的运行特性。

1.2 SRM 控制策略

SRM 可调节的参数有绕组的端电压、相电流、开通角和关断角。针对以上的可控变量有 3 种基本的控制策略:电流斩波控制、电压脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)控制和角度位置控制。

(1) 电流斩波控制。电流斩波控制将相电流 i 与电流斩波限 i_H 进行比较。当转子位置在导通角与关断角之间时,若 $i < i_H$,则主开关开通,相电流逐渐上升并到达斩波限;若 $i > i_H$,则主开关关断,电流下降;如此循环,相电流将维持在斩波限附近,以实现电磁转矩的控制。

(2) 电压 PWM 控制。电压 PWM 控制保持电源电压、开通角与关断角不变,通过 PWM 方式调整相绕组端电压的有效值,改变相电流的波形,调节转矩和转速。

(3) 角度位置控制。角度位置控制指保持绕组上的电压恒定,调节绕组上主开关器件的开通角和关断角,来改变相绕组的通电、断电时刻,从而调整相电流的波形,对转速进行控制。

2 SRM 有限元建模

本文采用 Flux 有限元分析软件建立了三相 6/4 极结构 SRM 模型。样机结构参数如表 1 所示。SRM 有限元几何模型如图 1 所示。

建立电机几何模型后,对电机模型进行建立面域、设置边界、网格剖分、编辑材料、设置机械属性以及设置驱动电路等操作。

SRM 在 Flux 中的仿真虽然精度高,但是只能

表 1 样机结构参数

参数名称	参数值
转子极数 N_r	4
定子极数 N_s	6
轴径 D_i/mm	70
转子内径 D_a/mm	113.2
转子外径 D_t/mm	141.2
气隙 g/mm	0.4
定子外径 D_s/mm	260
定子轭高 H_s/mm	20
定子极高 H_{cs}/mm	39
转子极弧 b_{pr}/mm	36
定子极弧 b_{ps}/mm	32

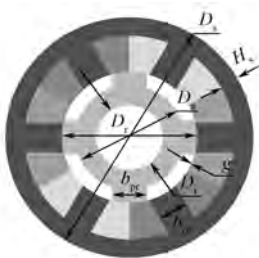


图 1 SRM 有限元几何模型

实现角度位置控制,而电流斩波控制方式和电压 PWM 控制方式在 Flux 中暂时无法仿真,而且在 Flux 中不易修改仿真参数及观测电机的动态性能。

3 联合仿真建模

SRM 控制系统由功率变换器、SRM、位置检测模块、控制器组成,如图 2 所示。直流电源向功率变换器供电,由功率变换器向 SRM 提供运转所需的能量,位置检测模块将转子位置信号提供给控制器,控制器综合给定转速、速度反馈、电流反馈,控制功率变换器中主开关器件的开通或关断,实现对 SRM 的控制。

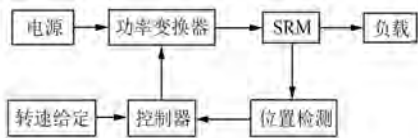


图 2 SRM 控制系统组成

SRM 控制参数多,控制方法多变,相电流波形难以解析,磁路非线性,无法得到简单统一的解

析模型。采用 Flux 建立的有限元电机模型与 Simulink 搭建的控制系统进行联合仿真可有效解决 SRM 非线性建模与电机性能的预测问题,能够完成多种控制方式下对 SRM 进行精确的仿真与动态分析。

3.1 联合仿真建模

联合仿真时,要从 Flux 进入 MATLAB。此时,在 Simulink 库列表中可以看到 Flux_link 耦合模块,如图 3 所示。



图 3 Simulink 库列表

打开建立好的 SRM Flux2D 模型,设置与 Simulink 交互的物理量,以变量的形式表示。本文共设置 GADOWN、GAUP、GBDOWN、GBUP、GCCDOWN、GCUP、TL、US 8 个输入变量,分别表示 A、B、C 三相开关管下、上管的控制信号,负载转矩以及电源电压;IA、IB、IC、TEM、POSIA、POSIB、POSIC、WR 8 个输出变量,分别表示 A、B、C 三三相的电流,电机输出转矩,转子相对定子 A、B、C 三相绕组的位置,转子转速。将建立好的 Flux 模型加入 SRM 控制系统模型中,建立联合仿真模型,如图 4 所示。

换相逻辑控制模块中,如果转子相对某一相的位置在开通角 (switch on) 与关断角 (switch off) 之间,该相的导通逻辑控制信号 $S_n = 1$ ($n = A, B, C$), 否则, $S_n = 0$ 。当设置的开通角小于 0° 时,如果直接根据转子相对位置决定相应相的导通逻辑,则会出现一段开通盲区。开通角一般至多可提前到 θ 处,而当 $P_n \geq 90^\circ - |\theta|$ ($n = A, B, C$) 时,以转子凹槽与该相定子凸极中心线重合处作为参考位置零点,则转子相对该相的位置实际为 $P_n - 90^\circ$ 。为实现这种角度转换,将 switch 的 1 号输入端信号设置为 $P_n - 90^\circ$,这样就可以根据所设置的开通角、关断角,进行正确的换相逻辑控制。换相逻辑控制仿真模型如图 5 所示。

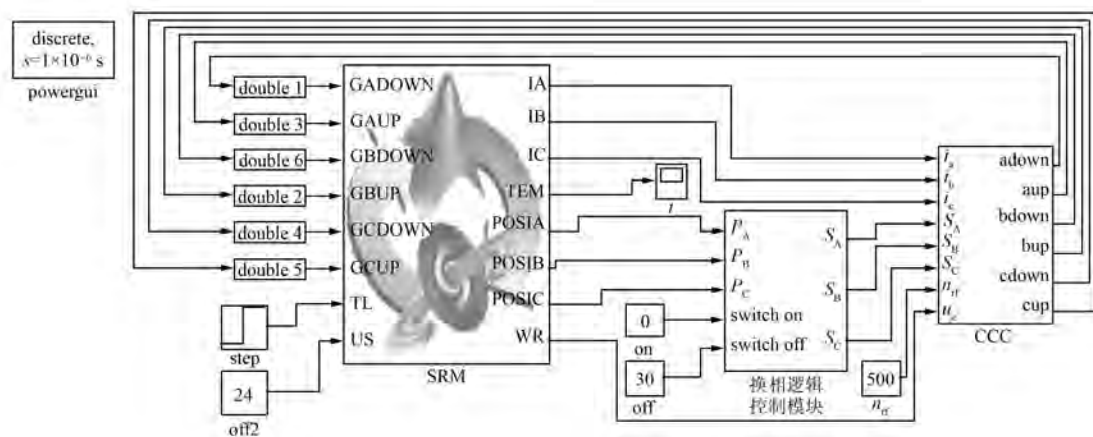


图4 SRM 联合仿真模型

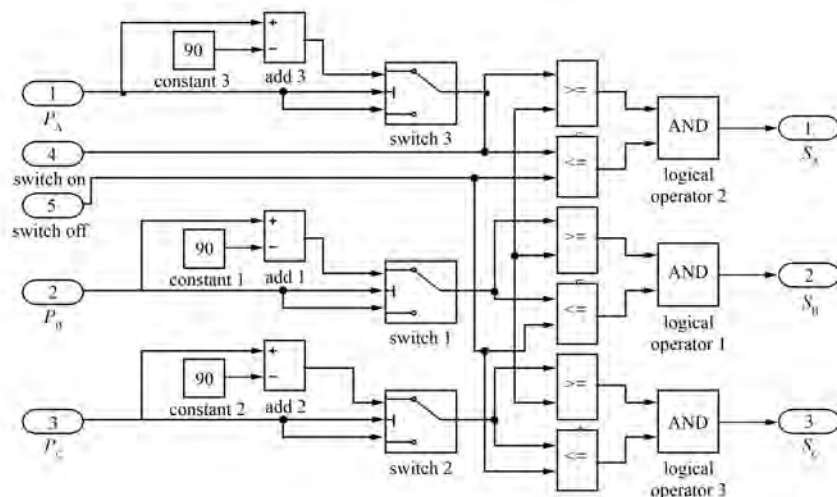


图5 换相逻辑控制仿真模型

CCC 为电流斩波模块,模块中斩波限是通过实际转速与给定转速的差值经过 PI 调节得出的,调节 relay 的大小,即可实现滞环宽度的调节。与换相逻辑信号相与后,得到开关管的控制信号。电流斩波模块仿真模型如图 6 所示。

在实现电压 PWM 控制时,将电流斩波模块换成电压 PWM 模块就可实现。电压 PWM 模块中,将实际转速与给定转速的差值通过 PI 调节调整占空比,与换相逻辑信号相与后,可得开关管的控制信号。电压 PWM 模块如图 7 所示。

3.2 仿真结果

3.2.1 角度位置控制

设置关断角为 30° 固定,负载转矩为 $0.9 \text{ N}\cdot\text{m}$,

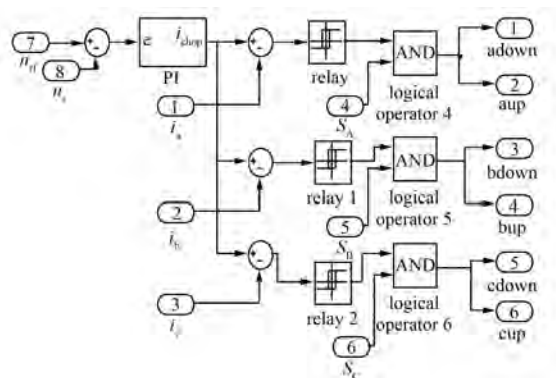


图6 电流斩波模块仿真模型

开通角为 0° 和 -2° ,此时转速分别为 2200 r/min 和 2350 r/min 。相电流波形如图 8 所示。

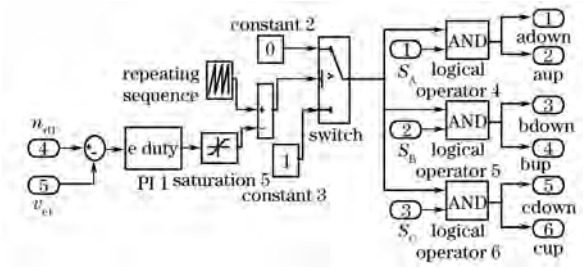


图7 电压PWM模块仿真模型

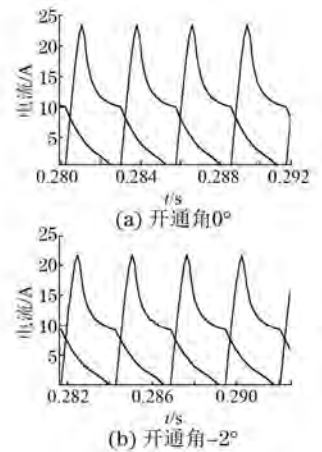


图8 角度位置控制仿真相电流波形

3.2.2 电流斩波控制

设置开通角为0°,关断角为30°,负载转矩为0.9 N·m,滞环宽度为4,给定转速为500 r/min和1 000 r/min,对应的斩波限分别为16.1 A和17.5 A。相电流仿真结果如图9所示。

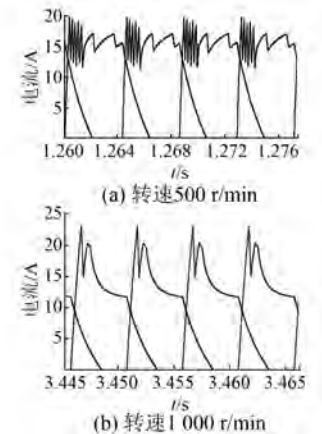


图9 电流斩波控制仿真相电流波形

3.2.3 电压PWM控制

设置开通角为0°,关断角为30°,负载转矩为

0.9 N·m,斩波频率为10 kHz,给定转速为500 r/min和1 000 r/min,对应的占空比分别为0.52和0.61。相电流仿真结果如图10所示。

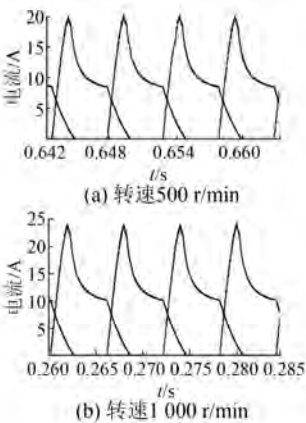


图10 电压PWM控制仿真相电流波形

4 试验验证

为了验证仿真结果的正确性,在与仿真相同的工况下,实测了三相6/4极SRM相电流。在试验中,电流的变比为10:1,示波器显示的波形图中,一纵格代表1 V。

4.1 角度位置控制

设置关断角为30°固定,负载转矩为0.9 N·m,开通角为0°和-2°时,实测的电流波形如图11所示。

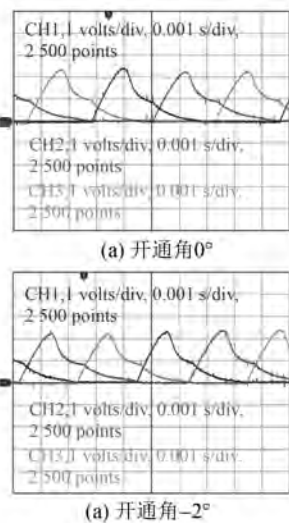


图11 角度位置控制实测相电流波形

在图11中,开通角提前,理论上电流峰值应该变大,但是,实际上,开通角为0°时,电机转速为

2 200 r/min, 开通角为 -2° 时, 转速为 2 360 r/min, 转速变大, 旋转反电动势就会变大, 导致电流降低。同时, 电机的转速比较大, 在实际试验过程中, 利用角度位置控制时, 电机转速一般都比较, 因此角度位置控制一般适用于电机高速运行。

4.2 电流斩波控制

设置开通角为 0° , 关断角为 30° , 负载转矩为 $0.9 \text{ N}\cdot\text{m}$, 滞环宽度为 4, 给定转速为 500 r/min 和 1 000 r/min, 对应的斩波限分别为 16.2 A 和 17.6 A, 实测的电流波形如图 12 所示。

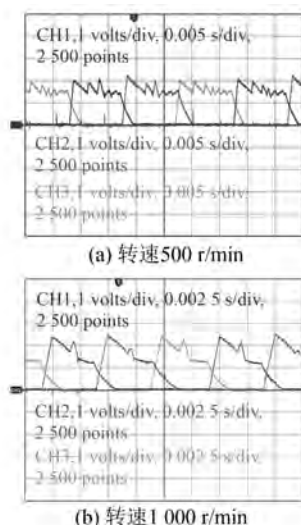


图 12 电流斩波控制实测相电流波形

由图 12 可知, 当电机处于低速运行状态时, 电流斩波效果比较好; 电机处于高速运行状态时, 电流斩波的效果比较差。因此在实际中电流斩波一般应用于电机起动和低速运行阶段。

4.3 电压 PWM 控制

设置开通角为 0° , 关断角为 30° , 负载转矩为 $0.9 \text{ N}\cdot\text{m}$, 斩波频率为 10 kHz, 给定转速为 500 r/min 和 1 000 r/min, 对应的占空比分别为 0.51 和 0.60, 实测的电流波形如图 13 所示。

从以上结果可以看出, 角度位置控制方式和电压 PWM 控制方式下的实测电流波形与仿真结果相比误差较小, 而电流斩波控制方式的实测电流波形与仿真结果斩波的次数相同, 但仿真时电流下降较快。这是因为步长太大, 而减小步长又会增加仿真的计算量, 因此, 需要合理地设置仿真步长。

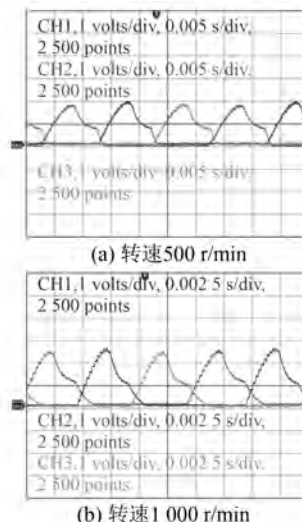


图 13 电压 PWM 控制实测相电流波形

5 结 语

本文在已有 SRM 基本理论分析的基础上, 基于 Flux 有限元分析软件环境, 建立了三相 6/4 极 SRM 有限元模型, 与 MATLAB 进行联合仿真, 搭建了 3 种控制方式下 SRM 控制系统的仿真模型, 并进行仿真分析。通过试验验证了仿真模型的正确性, 证明了所提方法可对 SRM 及控制系统进行精确仿真。

【参考文献】

- [1] 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, 2014.
- [2] RADUN A. Analytically computing the flux linked by a switched reluctance motor phase when the stator and rotor poles overlap [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(4): 1996-2003.
- [3] CAI J, DENG Z, LIU Z. Nonlinear modeling of switched reluctance motor using different methods[C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE, IEEE, 2010: 1018-1025.
- [4] LAWRENSON P J, STEPHENSON J M, BLENKINSOP P T, et al. Variable-speed switched reluctance motors [J]. IEE Proceedings B: Electric Power Applications, 1980, 127(4): 253-265.
- [5] 裘锦灼. 开关磁阻电机中一相转矩和电感的计算修正[J]. 微电机, 2010, 43(1): 98-99.

(下转第 112 页)

- et al. Least squares support vector machines [J]. International Journal of Circuit Theory & Applications, 2002, 27(6): 605-615.
- [8] 王立达. 基于混合核函数的 SVM 及其应用研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [9] CAO L J, TAY F H. Support vector machine with adaptive parameters in financial time series forecasting [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2003, 14(6): 1506-1518.
- [10] 孙俊, 毛罕平, 羊一清. 基于 GA-LS-SVM 的水稻叶片含氮率预测 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2010, 31(1): 6-10.
- [11] 朱志莹, 孙玉坤, 嵇小辅, 等. 磁悬浮开关磁阻电机转子位移/位置观测器设计 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 83-89.
- [12] ZHU Z, SUN Y, HUANG Y, et al. Displacement self-sensing of bearingless switched reluctance motors based on LS-SVM [J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2012, 88(12a): 310-313.
- [13] LIU X, BO L. Identification of resonance states of rotor bearing system using RQA and optimal binary tree SVM [J]. Neurocomputing, 2015, 152: 36-44.
- [14] BU W, LI Z, LU C, et al. Research on the least squares support vector machine displacement observer of a bearingless induction motor [J]. Transactions of the Institute of Measurement & Control, 2015, 10(1): 1-12.
- [15] BU W, HUANG Y, LI Z, et al. Displacement sensorless control strategy of bearingless induction motor [J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2017, 54(4): 597-610.
- [16] 谢凌然, 高长伟, 沈玉娣. 基于混合核函数支持向量机的齿轮诊断方法研究 [J]. 机械传动, 2011, 35(9): 45-47.
- [17] 李春祥, 丁晓达, 叶继红. 基于混合蚁群和粒子群优化 LSSVM 的脉动风速预测 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(21): 131-136.
- [18] 郭啸, 魏延, 吴瑕. 基于混合核函数的支持向量机 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2011, 25(10): 66-70.
- [19] WANG L Y, LIU Z, ZHAO Z G, et al. A mixed-kernel-based SVR controller for biped robots [C] // Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, Yantai, 2011: 3925-3929.

收稿日期: 2018-03-26

(上接第 18 页)

- [6] SPONG M, MARINO R, PERESADA S M, et al. Feedback linearizing control of switched reluctance motors [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1987, 32(5): 371-379.
- [7] 史秀梅, 郑寿森, 祁新梅, 等. 电动汽车用开关磁阻电机有限元分析及仿真 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(7): 1374-1377.
- [8] 杨丽, 刘闯, 严加根. 开关磁阻电机铁损的双频法有限元计算研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 117-121.
- [9] 张新华. 三相 6/4 极开关磁阻电机参数设计与有限元分析 [J]. 微电机, 2010, 43(12): 98-101.
- [10] SHOLAHUDDIN U, PURWADI A, HERYANA N, et al. Modelling and simulation of switched reluctance motor based on comsol [C] // International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation, IEEE, 2014: 365-369.
- [11] 武瑞兵. 开关磁阻电机的磁场有限元分析及动静态仿真 [J]. 电机与控制应用, 2015, 42(6): 13-16.
- [12] 卢胜利. 开关磁阻电机系统的故障诊断方法研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.
- [13] 宋建国, 许灵, 牟蓬涛. 基于 MATLAB 12/8 极开关磁阻电机控制系统仿真 [J]. 电力电子技术, 2017, 51(2): 75-77.
- [14] 孟耀辉, 高岩. 基于 MATLAB/Simulink 的开关磁阻电机控制策略仿真 [J]. 电气自动化, 2014(2): 4-7.
- [15] 孙晓明, 赵德安, 李瑶, 等. 基于 MATLAB 的开关磁阻电机非线性建模仿真 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(1): 67-70.
- [16] 王智杰, 蔡燕, 姜文涛. 三相 12/8 极开关磁阻电机驱动系统建模与仿真 [J]. 科技创新与应用, 2017(5): 11.
- [17] 齐金标, 钱伟康, 潘定海. 4 相 8/6 极开关磁阻电机建模与仿真 [J]. 信息技术, 2015(1): 180-183.

收稿日期: 2018-04-25