

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.03.011

基于 SMO 的开关磁阻电机无位置 传感器控制仿真研究*

唐广雪, 朱学忠*, 张磊

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏南京 211106)

摘要:针对开关磁阻电机中位置传感器的引入所带来的结构复杂程度以及系统的成本的提高、电机可靠性以及坚固性降低等问题,提出了一种新的基于滑模观测器的开关磁阻电机无位置传感器控制方法:采用五点法磁链模型,结合滑模观测器实现了转子位置无位置传感器控制。该方法以转速以及电机转子位置作为状态变量,以实际磁链以及估算磁链的偏差作为滑模面,构建出了滑模观测器,对转子位置进行了间接检测。然后利用 Matlab 仿真软件搭建出了 12/8 极开关磁阻电机的仿真模型,并在 Simulink 环境下对开关磁阻电机进行了仿真研究。研究表明,所给出的无位置传感器控制方法可以有效地估算出电机的转速以及转子的位置,测量得到的转子位置误差小,具有较好的鲁棒性以及抗干扰能力,动态性能较好。

关键词:开关磁阻电机;无位置传感器控制;滑模观测器;五点法磁链模型

中图分类号:TH39;TM352

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)03-0303-05

Simulation research on sensorless control of switched reluctance motor based on SMO

TANG Guang-xue, ZHU Xue-zhong, ZHANG Lei

(Automatic Department, University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, china)

Abstract: Aiming at the problem that the structure complexity was increased, and the cost of the system was raised, and the reliability was decreased by introduction of the position sensors of the switched reluctance motor, a new sensorless control based on sliding mode observer of switched reluctance motor was proposed; five point magnetic chain model was used, combining with sliding mode observer for rotor position sensorless control. In this method, the speed and position of rotor were taken as state variable and the deviation of measured flux linkage and estimated flux linkage was taken as sliding mode face, a sliding mode observer was constructed to detect the position of rotor indirectly. Then, 12/8 pole switched reluctance motor simulation model was built using Matlab simulation software, and simulation research on switched reluctance motor was carried out in Simulink environment. The results indicate that the sensorless control method can effectively estimate the speed and the position of the rotor; small measurement error of the position of the rotor, good robustness and anti-interference ability, also dynamic performance.

Key words: switched reluctance motor; position sensorless control; sliding mode observer; five point magnetic chain model

0 引 言

开关磁阻电机调速系统是集开关磁阻电机、电力电

子技术以及现代控制理论于一体的机电一体化电机调速系统,具有结构简单、工作可靠、效率高、调速性能好、启动电流小、可实现频繁正反转、适用于各种恶劣环境

收稿日期:2015-09-25

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20151574)

作者简介:唐广雪(1987-),女,江苏连云港人,主要从事开关磁阻电机无位置传感器技术方面的研究。E-mail:tangsnow2008@126.com

通信联系人:朱学忠,男,副教授,硕士生导师。E-mail:zxz@nuaa.edu.cn

等优点。自问世以来就引起了世界各国电气传动界的广泛关注。开关磁阻电机调速系统的结构主要由四部分组成,包括开关磁阻电机(SRM, switched reluctance motor)、功率变换器、控制系统、检测系统。检测部分包括电流检测以及位置检测。对于开关磁阻电机,实时而准确的转子位置信息是可靠运行的必要前提,而目前普遍采用光电式或磁敏式等轴位置传感器来检测转子位置信息,这些机械式的传感器不仅增加了系统的成本及复杂程度,还降低了电机运行的可靠性,限制了系统在恶劣环境下的应用。因此开关磁阻电机的无位置传感器技术研究已经成为开关磁阻电机热点研究问题^[1]。

目前,国内外学者提出了许多开关磁阻电机无位置传感器控制方法,每种方法都各有其优缺点,主要可以分成以下几类^[2]:导通相检测法、非导通相检测法、附加元件检测法、基于智能控制的检测法。其中导通相检测法是通过导通相的特性来检测转子位置信息的,比较常见的主要有电流波形检测法、状态观测器法、电流磁链法等。非导通相检测法则通过控制向非激励相注入高频测试信号,测量电流等信息,从而通过计算和分析获得转子信息。附加元件检测法主要包括附加电容检测法和附加电感线圈检测法。附加电容检测法是通过电容和转子转角的关系确定实际运行时定转子的相对位置,附件电感线圈检测法是将测试线圈与定子线圈绕在一起,通过检测测试线圈电感变化规律获得转子位置信息。基于智能控制的检测法主要有模糊控制法和神经网络法。笔者所研究的状态观测器法需要根据电机的电磁特性建立由电机本身所固有的物理参数决定的磁链模型以及特征状态观测器,然后检测输入的相电压信号和输出的相电流信号,由此来判断转子的位置信息。近年来用的较多的状态观测器有滑模观测器^[3-10]和 Luenberger^[11]观测器。Luenberger 观测器计算量比较大,线性的 Luenberger 观测器没有考虑磁路饱和的影响,对参数变化比较敏感,在磁路高度饱和的情况下,鲁棒性不是很好,而滑模观测器考虑了开关磁阻电机的非线性特性,可实现连续的位置估计,具有极强的鲁棒性,抗干扰能力好。

笔者提出一种新的基于滑模观测器的开关磁阻电机无位置传感器控制方法,采用五点法磁链模型,与滑模观测器相结合,根据实际磁链与观测磁链的磁链偏差构成滑模面,对转子位置进行估算,其不需要额外的硬件设备以及查询磁链-电流-位置三维表,结构简单,运算量少,易于实现,鲁棒性能好,通过 Matlab/Simulink 仿真验证了其可行性。

1 五点法简化磁链模型

基于滑模观测器的开关磁阻电机无位置传感器控制系统的设计中开关磁阻电机的建模是一个比较关键的问题。精确的数学模型有助于滑模观测器性能的提高。而开关磁阻电机的双凸极结构使其具有高度的非线性,电机结构如图 1 所示,为三相 12/8 极开关磁阻电机。开关磁阻电机模型的建立需要考虑两个方面的因素,即既不能使计算过于复杂,又要突出开关磁阻电机的物理特性。线性模型以及准线性模型简单易于实现,但误差较大,精度较低。非线性函数拟合模型计算较为复杂。查表法需要存储大量的实验数据。本研究选取五点法简化磁链模型,具体如下分析。

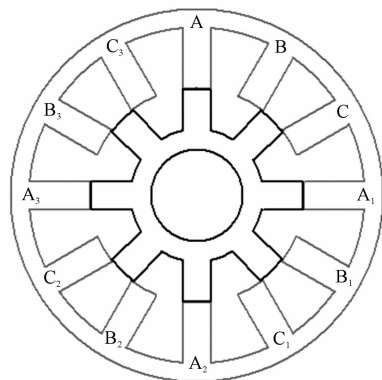


图 1 三相 12/8 极开关磁阻电机结构

开关磁阻电机电机的相电感模型可以用傅里叶级数近似表示为:

$$L(i, \theta) = L_0(i) + L_1(i) \cos(N\theta) + L_2(i) \cos(2N\theta) \quad (1)$$

式(1)两边乘以电流 i 即可得到磁链公式为:

$$\psi(i, \theta) = iL(i, \theta) = \psi_0(i) + \psi_1(i) \cos(N\theta) + \psi_2(i) \cos(2N\theta) \quad (2)$$

式中: N —电机的转子数; ψ_0, ψ_1, ψ_2 —对齐位置磁链 ψ_a 、非对齐位置磁链 ψ_u 以及中间位置磁链 ψ_m , 算出这三者, 即可确定开关磁阻电机的磁链表达式。

非对齐位置磁链 ψ_u 可以表示为一条直线, 对齐位置和中间位置通过反正切拟合, 三者的磁链表达式分别为:

$$\psi_u = L_u i \quad (3)$$

$$\psi_a = \frac{\tan^{-1}(a_1 i)}{a_2} \quad (4)$$

$$\psi_m = \frac{\tan^{-1}(m_1 i)}{m_2} \quad (5)$$

上面两个表达式中, a_1, a_2, m_1, m_2 为待定的常数,

在对齐位置和中间位置磁链曲线上取两个点,在非对齐位置磁链曲线上取一个点,代入式(3~5)中,即可确定 a_1 、 a_2 、 m_1 、 m_2 、 L_u 5 个常数的值。如何取点可通过如下方法确定:非对齐位置磁链曲线为一条直线,可任取一点,而对齐和中间位置可在相电流为 $i = i_s$, 即磁链刚开始饱和时,在磁链曲线上各取一点,然后在 $i = (3 \sim 4)i_s$ 时,在各自的磁链曲线上再各取一点,如图2所示。磁链饱和是一个渐进的过程,如何确定饱和附近两个点影响到整个五点法磁链模型的精度。文献[12]对此作了优化分析,得出 $i_s = 5$ A 时,五点法磁链模型的相对误差最小,因此选取 $i_s = 5$ A 作为选取5个点的基准,选出5个点,确定 a_1 、 a_2 、 m_1 、 m_2 、 L_u 5 个常数的值, ψ_u 、 ψ_a 、 ψ_m 三者的表达式最终可以表示为:

$$\psi_u = 0.001\ 193\ 4i \quad (6)$$

$$\psi_a = \frac{\tan^{-1}(0.2534i)}{1420.72} \quad (7)$$

$$\psi_m = \frac{\tan^{-1}(0.1i)}{1433.71} \quad (8)$$

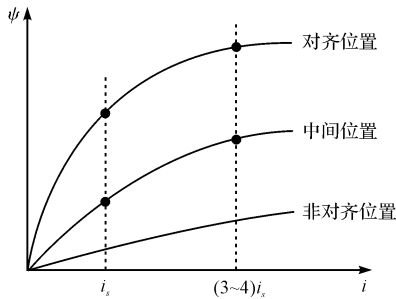


图2 五点法简化磁链模型

2 滑模观测器原理

滑模状态观测器的输入为开关磁阻电机的导通相的相电压 U_{ph} 和相电流 i_{ph} , 输出为转子角速度 ω 以及转子位置角 θ 。开关磁阻电机运行特性的状态方程。如以下公式所示:

$$\frac{d\vec{\psi}}{dt} = -R\vec{i} + \vec{U} \quad (9)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{D}{J}\omega + \frac{T_e - T_L}{J} \quad (10)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (11)$$

$$T_e = \sum_{j=1}^n T_j(i, \theta) \quad (12)$$

式中: $\vec{\psi}$ —电机的磁链向量; \vec{i} —相电流向量; \vec{U} —相电压向量; ω —转子角速度; θ —转子位置; D —粘滞系数; J —转动惯量; T_e —电磁转矩; T_L —负载转矩; n —电机相数^[13-14]。

对开关磁阻电机的状态方程进行降阶处理,以转子角速度以及转子位置作为状态变量,得到滑模观测器状态方程(13,14)。

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} = -\frac{D}{J}\hat{\omega} + \frac{\hat{T}_e - \hat{T}_L}{J} + k_\omega \text{sgn}\left(\sum_{j=1}^n \frac{dL_j}{d\theta}(\psi_j - \hat{\psi}_j)\right) \quad (13)$$

$$\frac{d\hat{\theta}}{dt} = \hat{\omega} + k_\theta \text{sgn}\left(\sum_{j=1}^n \frac{dL_j}{d\theta}(\psi_j - \hat{\psi}_j)\right) \quad (14)$$

式中: $\hat{\omega}$ 、 $\hat{\theta}$ 、 \hat{T}_e 、 \hat{T}_L 、 $\hat{\psi}_j$ —对应变量的估计值; k_ω 、 k_θ —反馈系数; $\text{sgn}(x)$ —符号函数; $\frac{dL_j}{d\theta}$ 的引入是为了使估计值按正确的方向收敛于实际值,磁链值可由式(9)积分得到。

在实际应用中,通常将 \hat{T}_e 、 \hat{T}_L 作为扰动项处理, $-\frac{D}{J}\hat{\omega}$ 的值相对很小,也作扰动项处理, k_ω 数值很大,因此可以得到滑模观测器状态方程(15,16):

$$\frac{d\hat{\omega}}{dt} = k_\omega \text{sgn}\left(\sum_{j=1}^n \frac{dL_j}{d\theta}(\psi_j - \hat{\psi}_j)\right) \quad (15)$$

$$\frac{d\hat{\theta}}{dt} = \hat{\omega} + k_\theta \text{sgn}\left(\sum_{j=1}^n \frac{dL_j}{d\theta}(\psi_j - \hat{\psi}_j)\right) \quad (16)$$

系统的估计误差定义为:

$$e_\omega = \hat{\omega} - \omega \quad (17)$$

$$e_\theta = \hat{\theta} - \theta \quad (18)$$

滑模观测器的误差方程为:

$$\dot{e}_\omega = k_\omega \text{sgn}\left(\sum_{j=1}^n \frac{dL_j}{d\theta}(\psi_j - \hat{\psi}_j)\right) \quad (19)$$

$$\dot{e}_\theta = e_\omega + k_\theta \text{sgn}\left(\sum_{j=1}^n \frac{dL_j}{d\theta}(\psi_j - \hat{\psi}_j)\right) \quad (20)$$

系统稳定的条件之一是 $e_\theta = 0$, 下面对滑模观测器的收敛性进行分析, e_θ 的收敛条件为: $\dot{e}_\theta e_\theta < 0$, 将式(20)代入其中,得:

$$\left[e_\omega + k_\theta \text{sgn}\left(\sum_{j=1}^n \frac{dL_j}{d\theta}(\psi_j - \hat{\psi}_j)\right) \right] e_\theta < 0 \quad (21)$$

当转子处于某一相电感上升区域时,可以得到 $\frac{dL_j}{d\theta} > 0$, 此时如果 $e_\theta = \hat{\theta} - \theta > 0$, 则 $\hat{\theta} > \theta$, 因为有 $\psi = Li$, 则 $\hat{\psi}_j > \psi_j$, 所以 $\frac{dL_j}{d\theta}(\psi_j - \hat{\psi}_j) < 0$, 因此可得

$$\text{sgn}\left(\sum_{j=1}^n \frac{dL_j}{d\theta}(\psi_j - \hat{\psi}_j)\right) = -\text{sgn}(e_\theta) \quad (22)$$

当 $e_\theta < 0$ 时,式(22)也成立。当转子处于某一相电感下降区域时,式(22)同样成立。将式(22)代入式(21)中,可得:

$$\dot{e}_\theta e_\theta = [e_\omega - k_\theta \text{sgn}(e_\theta)] e_\theta < 0 \quad (23)$$

从式(12)可以推导出:

$$k_\theta > |e_\omega| \quad (24)$$

上式为滑模观测器滑动模态存在性和可达性的条件。将式(22)代入式(19),可得:

$$\dot{e}_\omega = -k_\omega \text{sgn}(e_\theta) \quad (25)$$

k_θ, k_ω 的数值需要合理选取,以满足滑模观测器的收敛要求,其选取需要综合动态性能以及抖振大小。

滑模状态观测器(15)、(16)中, $\frac{dL_j}{d\theta}$ 无法直接计算得到,可以由 $\text{sgn}\left(\frac{dL_j}{d\theta}\right)$ 替代。

3 仿真分析

根据上述理论分析,笔者对本研究中所提出的新的基于滑模观测器的开关磁阻电机无位置传感器控制方法,进行仿真研究其可行性。本研究中通过 Matlab 软件搭建 12/8 极开关磁阻电机仿真模型,其系统框图如图 3 所示。滑模观测器以开关磁阻电机的相电压 U_{ph} 和相电流 i_{ph} 作为输入,输出转子位置 $\hat{\theta}$ 以及转速估计值 $\hat{\omega}$,转速估计值 $\hat{\omega}$ 与给定转速值 ω 比较,经过速度控制器调节得到参考电流 i_{ref} ,其与电机的相电流 i_{ph} 比较,比较值作为控制器的输入,经过控制器调节,得到功率开关管的触发信号,通过控制开关管的导通与关断,从而控制电机相绕组的导通与关断,相电压 U_{ph} 直接代入电机电压方程式中计算求解得到磁链值 ψ 与通过滑模观测器估测的磁链值 $\hat{\psi}$ 比较得到磁链偏差作为滑模观测器的输入。

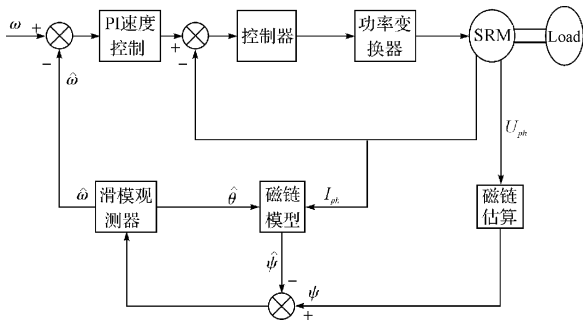


图 3 基于滑模观测器的开关磁阻电机无位置传感器控制系统框图

在仿真中,开关磁阻电机选取 12/8 极结构,转动惯量 J 的取值为 $1.3213 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$,摩擦系数 D 取值为 $0.001 \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ 。转速选取为 4000r/min ,分 3 种情况对电机进行仿真,空载、负载以及突加负载。空载时实际转子位置以及滑模估算转子位置如图 4 所示。

空载、负载为 $3.5 \text{N} \cdot \text{m}$ 以及 0.02s 时突加 $3.5 \text{N} \cdot \text{m}$ 时转子实际位置与估算位置误差分别如图(5~7)所示。从图 5、图 7 中可以看出转子位置误差的最大波动范围小于 4.5° ,图 6 中转子位置误差的最大波动范围小于 3° ,满足开关磁阻电机调速系统的控制要求。

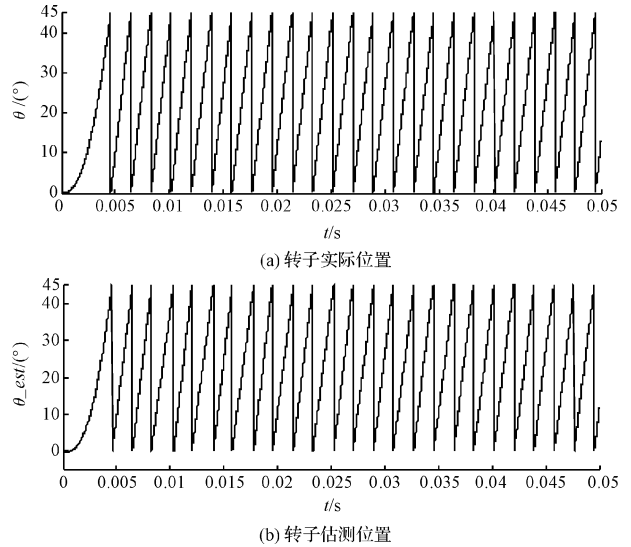


图 4 转子实际位置与转子估测位置

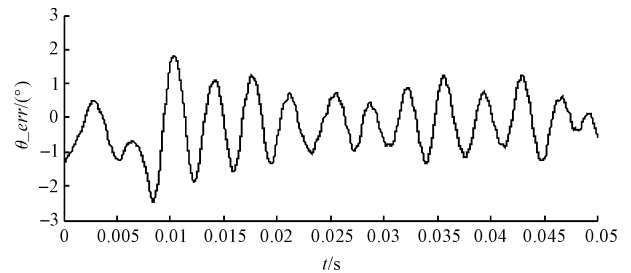
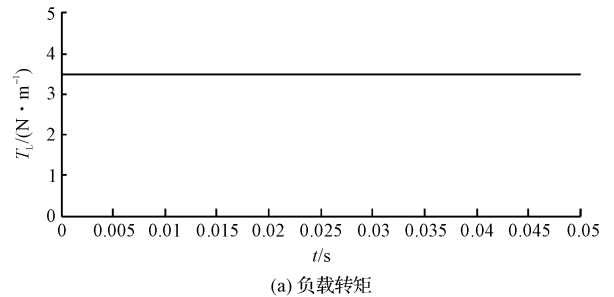
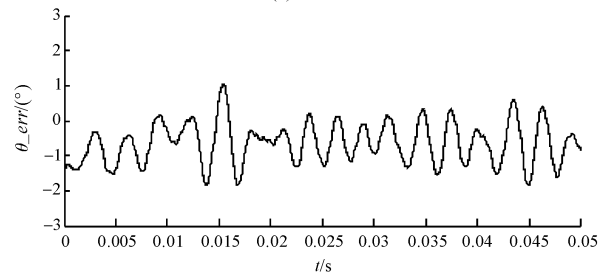


图 5 空载时转子实际位置与估计位置角度误差



(a) 负载转矩



(b) 转子位置误差

图 6 负载为 $3.5 \text{N} \cdot \text{m}$ 时转子位置误差

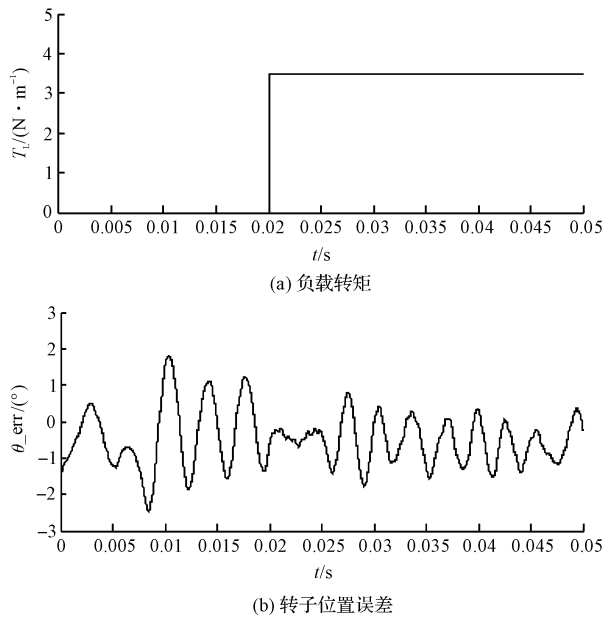


图7 0.02s时突加负载3.5N·m时转子位置误差

4 结束语

本研究提出一种新的基于滑模观测器的开关磁阻电机无位置传感器控制方法,采用五点法磁链模型,不需要增加额外的硬件设备,只需要测得导通相的相电压以及相电流,并以此为依据进行计算,计算量比较小,实现起来较为容易,并通过 Matlab/Simulink 对 12/8 极开关磁阻电机搭建了仿真模型,进行了仿真研究。研究表明,所提的控制方法可以有效地实现转子位置估算,算法简单易于实现,转子位置误差较小,系统的动态性能良好,抗扰动能力较好。本研究方法适用于电机高速运行情况,在以后的研究中,可以进一步研究电机低速运行情况,以使开关磁阻电机在整个调速范围内实现无位置传感器控制。

参考文献 (References):

- [1] 刘迪吉,张焕春,傅丰礼,等. 开关磁阻调速电动机[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
- [2] 辛凯,詹琼华. 基于滑模观测器的开关磁阻电动机间接位置检测技术研究[J]. 微电机,2007,40(9):9-13.

- [3] 孙明,杨向宇. 滑模观测器在开关磁阻电机无位置传感器控制中的应用研究[J]. 电机电器技术,2004,8-11.
- [4] 李超,王凯. 基于模糊滑模控制的导弹电液伺服机构半实物仿真研究[J]. 液压气动与密封,2013(1):29-32.
- [5] 龙洪宇,程小华. 开关磁阻电机无位置传感器控制技术综述[J]. 微电机,2011,44(9):71-74.
- [6] 孙园,崔璨,陈天翔,张辑. 开关磁阻电机 SMO 无位置传感器系统研究[J]. 微电机,2014,47(12):36-39.
- [7] Islam M S, Husain I, Veillette R J, et al. Design and performance analysis of sliding-mode observers for sensorless operation of switched reluctance motors[J]. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 2003, 11(3):383-389.
- [8] KHALIL A, UNDERWOOD S, HUSAIN I, et al. Four-quadrant pulse injection and sliding-mode-observer-based sensorless operation of a switched reluctance machine over entire speed range including zero speed[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2007, 43(3):714-723.
- [9] LU Wen-zhe, KEYHANI A. Sensorless control of switched reluctance motors using sliding mode observers[C]//Electric Machines and Drives Conference, 2001, 69-72.
- [10] MCCANN R, ISIAM M, HUSAIN I. Application of a sliding-mode observer for position and speed estimation in switched reluctance motor drives[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2001, 37(1):51-58.
- [11] ELMAS C, Zelaya-De La Para H. Application of a full-order extended Luenberger observer for a position sensorless operation of a switched reluctance motor drive[J]. **IEE Proceedings-Control Theory and Applications**, 1996, 143(5):401-408.
- [12] 张磊,刘闯,王云林,等. 开关磁阻电机改进型简化磁链无位置传感器技术[J]. 电机与控制学报,2013,17(11):13-19.
- [12] 赵燕,陈秋霞,文凯. 枕式包装机控制系统设计[J]. 包装与食品机械,2015(2):42-45.
- [14] 陈海进. 开关磁阻电动机无位置传感器控制技术研究与应用[D]. 南京,东南大学,2010.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

唐广雪,朱学忠,张磊. 基于 SMO 的开关磁阻电机无位置传感器控制仿真研究[J]. 机电工程,2016,33(3):303-307.

TANG Guang-xue, ZHU Xue-zhong, ZHANG Lei. Simulation research on sensorless control of switched reluctance motor based on SMO[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(3):303-307.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>