

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902823

# 考虑磁路饱和的开关磁阻电机无位置 传感器控制方法\*

匡斯建<sup>1,2</sup> 张小平<sup>1,2</sup> 王易华<sup>1,2</sup> 刘 苹<sup>1,2</sup> 张光辉<sup>1,2</sup>

(1. 湖南科技大学 海洋矿产资源探采装备与安全技术国家地方联合工程实验室 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 信息与电气工程学院 湘潭 411201)

**摘要:**开关磁阻电机在磁路饱和情况下,其导通相电感会随导通相电流的变化而变化,从而影响转子位置估算精度,提出一种电机转子位置估算方法。首先建立了相电感函数关系式;然后分析了相电流与相电感极值定位点位置角之间的关系;最后阐述了由两相邻采样定位点来估算出相应的转子位置角度的实现过程。以三相6/4结构电机进行了相关仿真与实验,结果表明上述方法的可行性。

**关键词:** 开关磁阻电机;无位置传感器;电感采样定位点;磁路饱和;位置估算

**中图分类号:** TM352 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460

## Position sensorless control method for switched reluctance motor considering magnetic circuit saturation

Kuang Sijian<sup>1,2</sup> Zhang Xiaoping<sup>1,2</sup> Wang Yihua<sup>1,2</sup> Liu Ping<sup>1,2</sup> Zhang Guanghui<sup>1,2</sup>

(1. National and Local Joint Engineering Laboratory of Marine Mineral Resources Exploration Equipment and Safety Technology

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. College of Information and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The conduction phase inductance of switched reluctance motor will change with the change of the conduction phase current under the case of magnetic circuit saturation, resulting in a low rotor position estimation accuracy. Aiming at this problem, a position sensorless control method of switched reluctance motor considering magnetic circuit saturation is proposed. Firstly, the relationship formula of the phase inductance function is established, and then the relationship between the phase current and the position angle of the extreme positioning point of the phase inductance is analyzed. Finally, the realization process of estimating the corresponding rotor position angle from the two adjacent extreme positioning points is described. Finally, the related simulation and experiment were carried out with a three-phase 6/4 structure motor. The results show the feasibility of the above method.

**Keywords:** switched reluctance motor; sensorless; inductance extreme value; magnetic circuit saturation; position estimation

## 0 引言

开关磁阻电机 (switched reluctance motor, SRM) 是一种采用双凸极结构的新型特种电机,具有诸多优点,比如结构简单、启动电流小以及效率高<sup>[1-2]</sup>,能够实时并准确获取转子位置角度是实现开关磁阻电机高性能调速控制的前提,但是位置传感器的安装会使电机本身结构变得更加复杂,限制了其在复杂情况下的工作可靠性。因

此针对开关磁阻电机开展无位置传感器控制研究具有较高的应用价值<sup>[3]</sup>。

目前,国内外学者针对开关磁阻电机的无位置传感器控制从不同方面提出了诸多解决方案。文献[4]提出一种利用非导通相电流斜率来获取全周期电感值,然后通过电感线性区间建立相应与角度相关的电感函数,从而估算出电机转子位置角度,该方法只能用于电感线性区的转子位置角度估算。文献[5-6]提出一种通过离线获取并存储电机的磁链、电流以及转子位置角度信息,

收稿日期: 2021-05-17 Received Date: 2021-05-17

\* 基金项目: 湖南省教育厅科研项目(19JC0791)资助

然后再通过实时测量磁链和电流值来查询转子位置角度。该方法需要占用大量的存储空间。文献[7-8]提出利用智能算法中的神经网络方法来拟合开关磁阻电机的磁链-电流与转子位置角度之间的关系,该方法不需要事先构建精确的模型,但是需要准确数据以及花费大量的时间用于数据训练。文献[9-10]提出一种SRM的状态空间模型,利用向量机理论实现转子位置角度的估算。文献[11]通过改变向非导通相注入脉冲的宽度来改善因响应电流较小而导致位置估算误差大的不足。文献[12-13]根据自举电路的充电电流与相电感之间的线性关系,从而用于估算开关磁阻电机的初始位置角度值。文献[14-17]提出了通过向静止的开关磁阻电机各相注入高频脉冲,然后根据测量的响应电流大小来确定当前电机转子的准确位置。文献[18]提出一种利用线电感交点来实现转子位置角度估算的方法,根据线电感交点位置角度差值与相电流大小无关的特性来实时估算电机转子位置角度值,该方法可以有效的避免磁路饱和对转子位置估算的影响。文献[19]通过检测电流斜率和电感斜率过零点,来避免开通角对转子位置估算精度的影响,该方法具有很高的容错性。

本文提出了一种考虑磁路饱和的开关磁阻电机无位置传感器控制方法,能有效解决磁路饱和时转子位置估算不准确的问题,具有算法简单、实时性高等特点。首先建立了相电感函数关系式,然后分析了相电流与相电感采样定位点位置角之间的关系,最后阐述了由两相邻采样定位点来估算出相应的转子位置角度的实现过程。最后以三相6/4结构电机进行了相关仿真与实验,结果表明上述方法的可行性。

## 1 全周期相电感与相电流之间的关系

在电机导通相电流小于饱和电流时,即处于磁路非饱和状态时,各相绕组电感随转子位置角度的变化是相同的且对称分布。本文以三相6/4结构开关磁阻电机为例,其三相绕组电感 $L_A$ 、 $L_B$ 和 $L_C$ 随转子位置角度 $\theta$ 的变化曲线如图1所示。从图1中可以看出, $L_A$ 、 $L_B$ 和 $L_C$ 相互错开 $15^\circ$ 机械角且相互对称分布,在一个周期内三相电感曲线有6个交点,在磁路未饱和时,上述交点位置与相电流的大小无关。

根据实验电机参数规格如下:功率为4 kW、额定电压为380 V,利用ANSYS Maxwell仿真软件搭建电机仿真模型,以单相导通模式运行,当导通相A通入不同相电流时得到A相与B相电感交点与A相电流之间的关系曲线,如图2所示。从图2可知,当导通相电流大于一定时,其相电感值将随电流的增大而减小,从而导致其与非导通相电感曲线交点位置角度发生偏移,进而会导致估

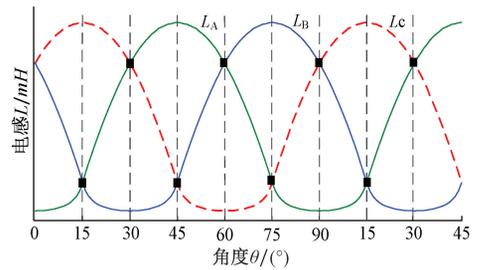


图1 全周期电感与转子位置角度的关系

Fig. 1 Relationship between full-cycle inductance and rotor position angle

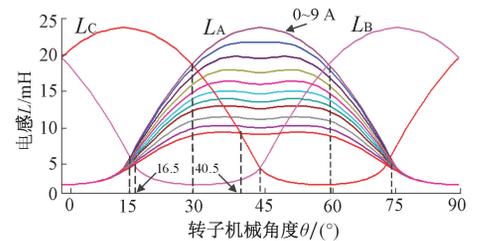


图2 磁路饱和时的全周期电感曲线

Fig. 2 Full-cycle inductance curve when the magnetic circuit is saturated

算的位置角度与实际位置角度之间将有很大的误差。

## 2 全周期相电感的估算方法

根据开关磁阻电机相电压平衡方程,在不考虑互感的情况下有:

$$u_{dc} = iR + \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

式中: $u_{dc}$ 、 $i$ 和 $\psi$ 分别为开关磁阻电机某相的相电压、相电流和磁链; $R$ 为相电阻。

由式(1)所示相电压平衡方程可有如下两种情况。

当功率开关导通时:

$$u_{dc} = iR + \omega_e i \frac{dL}{d\theta_e} + L(\theta) \frac{di}{dt_{on}} \quad (2)$$

当功率开关关断时:

$$-u_{dc} = iR + \omega_e i \frac{dL}{d\theta_e} + L(\theta) \frac{di}{dt_{off}} \quad (3)$$

式中: $di/dt_{on}$ 和 $di/dt_{off}$ 分别表示开关管在一个开通与关断周期内的电流上升与下降斜率; $\omega_e$ 为SRM的角速度。

因为注入的脉冲频率非常高,则开关管开通与关断时刻的相电流 $i$ 和反电动势 $\omega_e i dL/d\theta_e$ 在相同脉冲周期内相同,因此由式(2)和(3)可得:

$$L(\theta) = \frac{2u_{dc}}{\Delta i} \quad (4)$$

式中:  $\Delta i$  为一个开关周期内的相电流斜率差。

由式(4)即可得到电机全周期内在不同位置以及不同相电流时的相电感值,其傅里叶级数形式的展开式可表示为<sup>[20]</sup>:

$$L = \sum_{n=0}^{\infty} L_n(i) \cos(nN_r\theta + \varphi_n) \quad (5)$$

式中:  $N_r$ 、 $L_n(i)$  和  $\varphi_n$  分别表示 SRM 的转子级数、各相系数函数以及转子的初相位。

为简化分析计算,对式(5)忽略高次项后展开,可得 SRM 的各相电感函数表达式,分别为:

$$L_A(\theta_e) = L_0(i_A) + L_1(i_A) \cos(\theta_e + 2\pi/3) + L_2(i_A) \cos 2(\theta_e + 2\pi/3) \quad (6)$$

$$L_B(\theta_e) = L_0(i_B) + L_1(i_B) \cos(\theta_e) + L_2(i_B) \cos 2\theta_e \quad (7)$$

$$L_C(\theta_e) = L_0(i_C) + L_1(i_C) \cos(\theta_e - 2\pi/3) + L_2(i_C) \cos 2(\theta_e - 2\pi/3) \quad (8)$$

式中:  $L_A(\theta_e)$ 、 $L_B(\theta_e)$ 、 $L_C(\theta_e)$  分别表示 SRM 的 A、B、C 的电感函数表达式。

其中式(6)~(8)中的各项系数函数  $L_n(i_k)$  可由式(9)~(11)来具体确定<sup>[21]</sup>:

$$L_0(i) = \frac{1}{4}L_a(i) + \frac{1}{4}L_u(i) + \frac{1}{2}L_m(i) \quad (9)$$

$$L_1(i) = \frac{1}{2}L_a(i) - \frac{1}{2}L_u(i) \quad (10)$$

$$L_2(i) = \frac{1}{4}L_a(i) + \frac{1}{4}L_u(i) - \frac{1}{2}L_m(i) \quad (11)$$

式中:  $L_a$  表示最大相电感值;  $L_u$  表示最小相电感值;  $L_m$  表示转子位置角度为  $\pi/2N_r$  时的电感值;  $i$  表示注入脉冲响应电流。

### 3 开关磁阻电机定位点与相电流关系的分析

根据式(6)和(7)可得图 3 所示的开关磁阻电机的磁路饱和情况下的三相电感曲线。

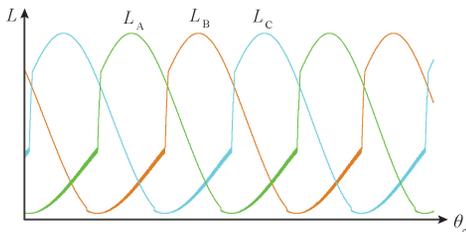


图 3 开关磁阻电机的磁路饱和情况下的三相电感曲线  
Fig. 3 The three-phase inductance curve of the switched reluctance motor when the magnetic circuit is saturated

分别对式(6)~(8)进行求导,可得:

$$L'_A = -L_1(i) \sin(\theta + 2\pi/3) - 2L_2(i) \sin 2(\theta + 2\pi/3) \quad (12)$$

$$L'_B = -L_1(i) \sin(\theta) - 2L_2(i) \sin 2(\theta) \quad (13)$$

$$L'_C = -L_1(i) \sin(\theta - 2\pi/3) - 2L_2(i) \sin 2(\theta - 2\pi/3) \quad (14)$$

分别令式(12)~(14)为 0, 可得在采样定位点处的位置角度值。

令  $L'_A = 0$  时可得:

$$\theta_A = \arccos\left[\cos\left(-\frac{L_1(i)}{4L_2(i)}\right)\right] - \frac{2\pi}{3} \quad (15)$$

令  $L'_B = 0$  时可得:

$$\theta_B = \arccos\left[\cos\left(-\frac{L_1(i)}{4L_2(i)}\right)\right] \quad (16)$$

当令  $L'_C = 0$  时可得:

$$\theta_C = \arccos\left[\cos\left(-\frac{L_1(i)}{4L_2(i)}\right)\right] + \frac{2\pi}{3} \quad (17)$$

式中:  $\theta_A$ 、 $\theta_B$ 、 $\theta_C$  分别为电机三相电流值为  $i$  时的采样定位点处的位置角度。

从式(15)~(17)可得:

$$\theta_B - 2\pi/3 = \theta_A \quad (18)$$

$$\theta_C - 2\pi/3 = \theta_B \quad (19)$$

$$\theta_A - 2\pi/3 = \theta_C \quad (20)$$

可见,极值定位点角度  $\theta_A$  滞后于  $\theta_B$  的相位角为  $2\pi/3$ ,同理, $\theta_B$  滞后于  $\theta_C$  及  $\theta_C$  滞后于  $\theta_A$  的相位角也等于  $2\pi/3$ ,也即当转子位置估算定位点取上述采样点时,对应各转子位置估算点电气角度间均相差  $2\pi/3$  为恒定值,与导通相磁路饱和和无关。

在实际转子位置计算时,可以根据式(15)~(17)通过在线获取的相电感各分量的系数函数值  $L_0(i)$ 、 $L_1(i)$  和  $L_2(i)$  来实时计算出相电感采样点处的位置角度值。如表 1 所示,为当电机导通相电流分别取不同数值时,三相电感采样点的位置角度。可见,随着导通相电流的增大,相电感采样点处的位置角度也会有较小的增大。

表 1 不同相电流时,相电感采样点的位置角度

Table 1 The position angle of the sampling point of phase inductance at different phase currents

相电流/A	A 相	B 相	C 相
3	0	30	60
5	0	30	60
8	0	30	60
12	0.5	30.5	60.5
16	1.50	31.5	61.5

### 4 电机转子位置估算方法

两相邻相电感采样点处的位置角度  $\Delta\theta_n$  为定值  $2\pi/3$ , 因此只需要准确测量出两相邻定位点之间的时间  $\Delta t_n$  就可以计算出该两定位点之间的平均转速, 即:

$$\overline{\omega}_n = \frac{\Delta\theta_n}{\Delta t_n} \quad (21)$$

式中:  $\overline{\omega}_n$  表示电机转子在第  $n$  个定位区间内的平均转速。

最后根据电机转子平均转速, 由准确测量出的区间任意时间即可计算出任意时刻的转子位置角度。

### 5 仿真研究

为了验证磁路饱和对转子位置估算精度的影响, 利用 Simulink 搭建了相应的仿真模型。为了验证在不同导通相电流下的实际估算效果, 在临界饱和电流 9 A 之下和之上, 任取电机导通相电流分别为 8、12 和 16 A, 转速取 1 000 r/min 的条件下进行仿真验证, 仿真波形分别如图 4~6 所示, 仿真结果如表 2 所示。从图 4 可见, 当开关磁阻电机的导通相电流为 8 A 时, 其全周期相电感曲线形状未发生明显的形变, 从图 4(b) 可见, 此时的电机转子估算角度与实际角度之间的偏差很小。另外从表 2 可见, 此时转子位置的估算角度与其实际角度间的最大偏差为 0.9°。

当开关磁阻电机的导通相电流大于 9 A 时, 从图 5 和 6 可见, 当电机导通相电流分别取 12 和 16 A 时, 对应的导通相电感曲线在其导通区间内发生了较大变形, 当电流由 12 A 增大到 16 A 时, 其电感曲线的变形程度更加厉害。但从图 5(b) 和 6(b) 可见, 虽然相电感采样点的绝对位置随着磁路饱和程度的增加发生了变化, 但其相对位置未有明显变化, 因此转子估算位置与实际位置之间的角度差值依旧能保持很小。从表 2 可知, 当导通相电流值分别为 12 和 16 A 时, 转子位置估算角度最大偏差均为 1.0° 和 1.2° 以内。

表 2 位置角度估算误差

Table 2 Position angle estimation error

电流/A	最大角度误差/(°)
8	0.9
12	1.0
16	1.2

### 6 实验验证

搭建一套以 TMS320F28335 DSP 为系统控制核心的

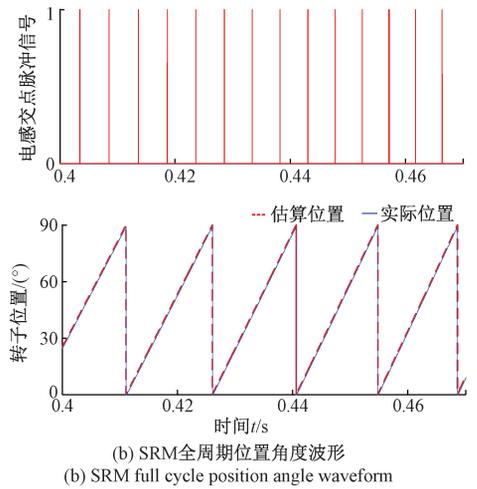
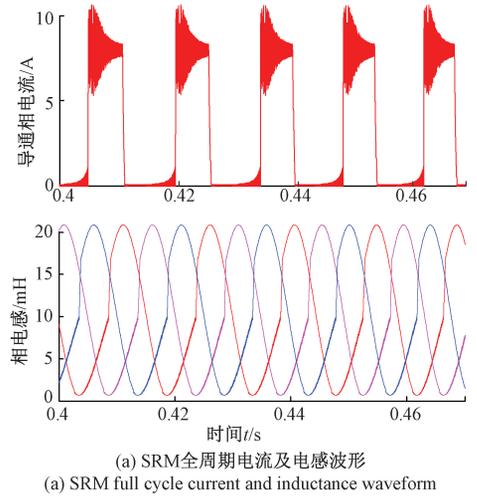


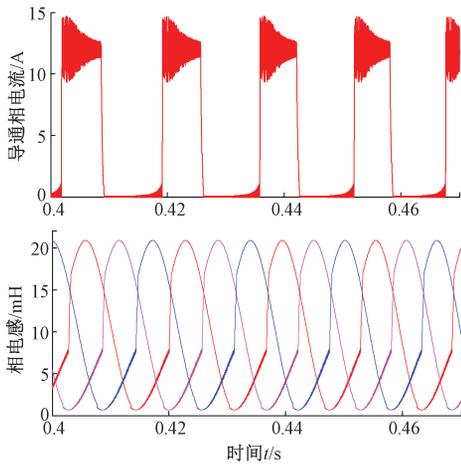
图 4 导通相电流为 8 A 时仿真波形

Fig. 4 Simulation waveform when the conduction phase current is 8 A

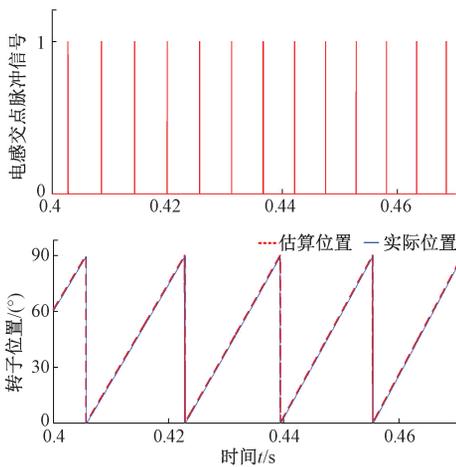
三相开关磁阻电机实验装置, 如图 7 所示。主电路采用非对称半桥结构。本文分别采用相电感非饱和区定位法和传统相电感交点法对开关磁阻电机进行无位置传感器控制, 其具体实验如下。

在临界饱和电流 9 A 之下, 取电机导通相电流为 7 A, 取转速为 600 r/min, 其实验波形如图 8 所示, 表 3 为实验结果。从图 8 可见, 当导通相电流为 7 A 时, 不管是使用传统相电感交点法进行转子位置估算还是利用相电感非饱和区极值点进行转子位置估算, 此时获取的相电感曲线均能保持基本正常形态, 估算角度波形能较好的跟踪实际角度波形。从表 3 可知, 采用传统相电感交点法与相电感非饱和区采样点法时的转子位置估算角度与其实际角度间的最大偏差均为 1.0°。

当开关磁阻电机相电流取值为 12 A 时, 实验波形如图 9 所示, 实验结果如表 3 所示。可见, 当电流大于 9 A 时, 电机导通相磁路进入饱和状态, 此时开关磁阻电机导通

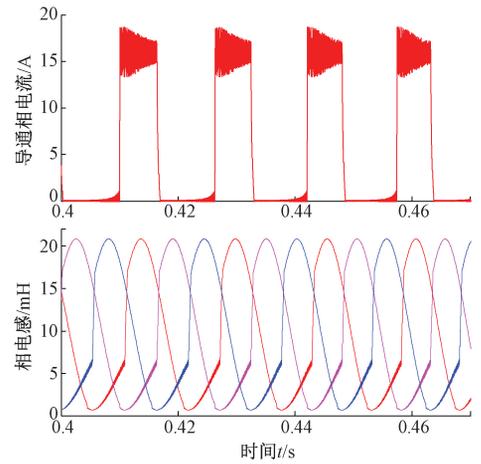


(a) SRM全周期电流及电感波形  
(a) SRM full cycle current and inductance waveform

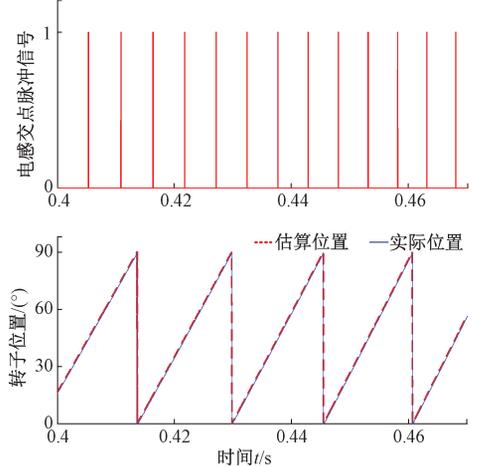


(b) SRM全周期位置角度波形  
(b) SRM full cycle position angle waveform

图 5 导通相电流为 12 A 时仿真波形  
Fig. 5 Simulation waveform when the conduction phase current is 12 A



(a) SRM全周期电流及电感波形  
(a) SRM full cycle current and inductance waveform



(b) SRM全周期位置角度波形  
(b) SRM full cycle position angle waveform

图 6 导通相电流为 16 A 时仿真波形  
Fig. 6 Simulation waveform when the conduction phase current is 16 A

相电感将由正常形态发生一定程度的形变,此时相电感交点位置也将发生偏移。从图 9(b)可知,传统的相电感交点法估算出的转子位置角度与实际位置角度之间存在很大的偏差,由图 9(a)可知,采用本文所述方法依旧能保持较好的转子位置估算精度。从表 3 可见,两种无位置传感器控制方法下,电机转子位置角度估算精度分别为 1.3°和 7°。

表 3 位置角度估算误差

Table 3 Position angle estimation error

电流/A	最大角度误差/(°)	
	相电感交点	相电感非饱和区极值点
7	1.0	1.0
12	1.3	7.0

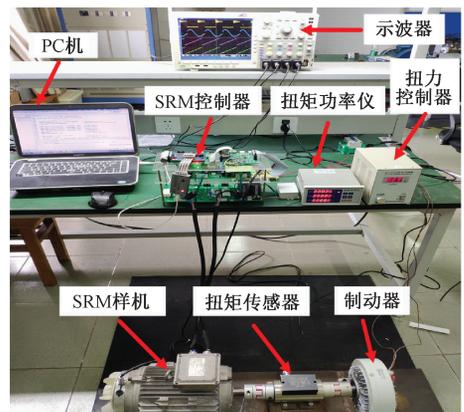
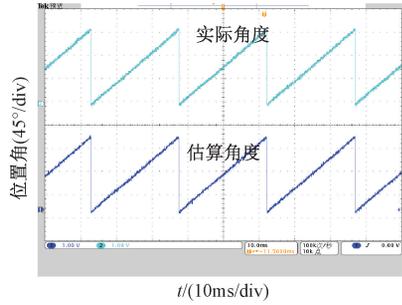
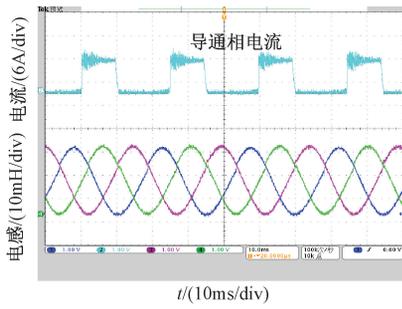
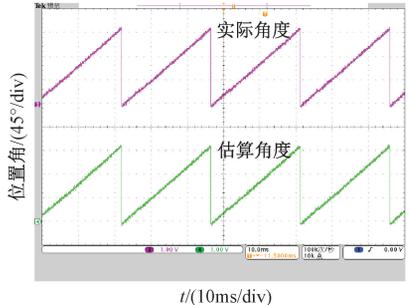
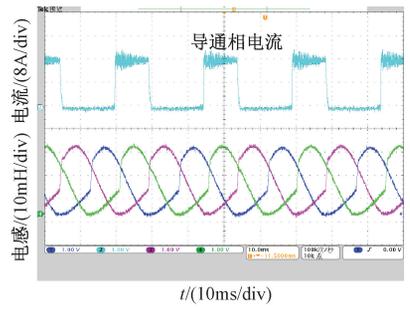


图 7 实验平台

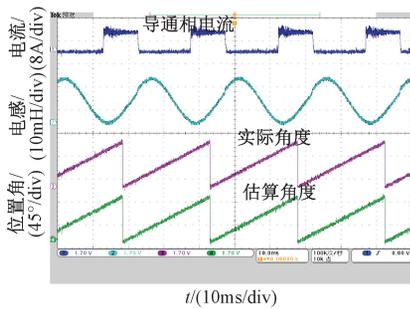
Fig. 7 Experiment platform



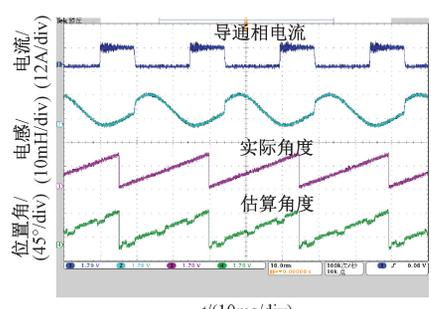
(a) 相电感非饱和和区定位法控制  
(a) Phase inductance non-saturation zone positioning method control



(a) 相电感非饱和和区定位法控制  
(a) Phase inductance non-saturation zone positioning method control



(b) 传统相电感交点法控制  
(b) Traditional phase inductance intersection method control



(b) 传统相电感交点法控制  
(b) Traditional phase inductance intersection method control

图 8 导通相电流为 7 A 时的实验波形

Fig. 8 Experimental waveform when the on-phase current is 7 A

图 9 导通相电流为 12 A 时的实验波形

Fig. 9 Experimental waveform when the on-phase current is 12 A

由上述仿真与实验结果可知,传统的相电感交点法和本方法在磁路非饱和情况下均有较好的转子位置估算精度。但是在磁路饱和时,传统的相电感交点法会产生很大的转子位置估算误差,但采用本方法则可以避免因导通相绕组的磁路饱和对转子位置估算精度的影响。

## 7 结 论

针对开关磁阻电机在磁路饱和和情况下,其导通相电感会随导通相电流的变化而变化,从而影响转子位置估算精度,提出一种电机转子位置估算方法。首先建立了相电感函数关系式,然后分析了相电流与相电感采样定位点位置角之间的关系,接着阐述了由两相邻采样定位点来估算出相应转子位置角度的实现过程。最后以三相

6/4 结构电机进行了相关仿真与实验,结果表明该方法能够有效克服磁路饱和对转子位置估算精度的影响,适合于受磁路饱和和影响的开关磁阻电机无位置传感器控制领域,具有较好的应用价值。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] EHSANI M,FAHIMI B. Elimination of position sensors in switched reluctance motor drives; state of the art and future trends [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2002,49( 1 ):40-47.
- [ 2 ] KRISHNAN R. Switched reluctance motor drives:modeling, simulation, analysis, design and applications [ M ]. Boca Raton: CRC Press,2001:6-7.
- [ 3 ] FAHIMI B,SURESH G,EHSANI M. Review of sensorless

- control methods in switched reluctance motor drives[C]. Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, 2000:1850-1857.
- [ 4 ] 蔡骏,邓智泉.基于电感线性区模型的开关磁阻电机无位置传感器控制技术[J].中国电机工程学报, 2013,32(15):114-123.  
CAI J, DENG ZH Q. Sensorless control of switched reluctance motors based on phase inductance model in linear regions [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 32(15):114-123.
- [ 5 ] LYONS J P, MAC M S R, PRESTON M A. Flux-current methods for SRM rotor position estimation[C]. Annual Meeting of IEEE Industry Application Society, 1991: 482-487.
- [ 6 ] KOBLARA T, SORANDARU C, MUSUROI S, et al. A low voltage sensorless switched reluctance motor drive using flux linkage method [C]. International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2010:665-672.
- [ 7 ] 夏长亮,王明超,史婷娜.基于神经网络的开关磁阻电机无位置传感器控制[J].中国电机工程学报, 2005, 25(13):123-128.  
XIA CH L, WANG M CH, SHI T N. Position sensorless control for switched reluctance motors using neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 123-128.
- [ 8 ] DESAI P C, KRISHNAMURTHY M, SCHOFIELD N, et al. Novel switched reluctance machine configuration with higher number of rotor poles than stator poles; concept to implementation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(2):649-659.
- [ 9 ] 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  
ZHU ZH Y, SUN Y K, JI X F, et al. Displacement and position observers designing for bearingless switched reluctance motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(12):83-89.
- [ 10 ] 戴聪,刘勇智,李杰.开关磁阻电机位置传感器机械偏移故障诊断和容错控制[J].电子测量与仪器学报, 2018,33(9):12-19.  
DAI C, LIU Y ZH, LI J. Mechanical deviation fault diagnosis and tolerant control on position sensor in switched reluctance motor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 33(9):12-19.
- [ 11 ] 邵杰,邓智泉,胡荣光,等.基于改进脉冲注入开关磁阻电机无位置传感器技术[J].电工技术学报, 2015, 30(21):147-153.  
SHAO J, DENG ZH Q, HU R G, et al. An improved sensorless driving method of switched reluctance motors using impressed voltage pulse [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21):147-153.
- [ 12 ] SHEN L, WU J H, YANG S Y. Initial position estimation in SRM using bootstrap circuit without predefined inductance parameters [J]. IEEE Transaction on Power Electron, 2011, 26(9):2449-2456.
- [ 13 ] 沈磊,吴建华,杨仕友.基于自举电路的开关磁阻电机初始位置估计方法[J].中国电机工程学报, 2011, 31(6):98-102.  
SHEN L, WU J H, YANG SH Y. A novel estimation method for initial position of switched reluctance motor based on bootstrap circuit [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6):98-102.
- [ 14 ] GAO H, SALMASI F R, EHSANI M. Sensorless control of SRM at standstill [C]. Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001: 850-856.
- [ 15 ] YU C H, CHEN T C. Novel sensorless driving method of SRM with external rotor using impressed voltage pulse [J]. IEEE Proceedings on Electric Power Applications, 2006, 153(5):632-641.
- [ 16 ] CHEN H J, SHI L X, ZHONG R, et al. A robust non-reversing starting scheme for sensorless switched reluctance motor [C]. International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE, 2009:2297-2301.
- [ 17 ] AMIRI H, AFJEI E, ATAIEI S. A novel sensorless technique for a new field assisted switched reluctance motor [C]. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drivers, Automation and Motion, IEEE, 2008:1077-1081.
- [ 18 ] 匡斯建,张小平,刘苹等.线电感特征点定位的开关磁阻电机无位置传感器控制方法[J].控制理论与应用, 2020,37(3):551-559.  
KUANG S J, ZHANG X P, LIU P, et al. Position estimation method of switched reluctance motor based on line inductance characteristic points [J]. Control Theory & Application, 2020, 37(3):551-559.
- [ 19 ] 蔡骏,邓智泉.一种具有容错功能的开关磁阻电机无位置传感器控制方法[J].中国电机工程学报, 2012, 32(36):109-116.  
CAI J, DENG ZH Q. A fault-tolerant sensorless control method for switched reluctance motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7):125-132.
- [ 20 ] 蒯松岩,王鹏飞,成静红,等.基于变系数电感模型开关磁阻电机四象限无位置传感器技术[J].电工技术学报, 2014, 29(7):114-124.

KUAI S Y, WANG P F, CHENG J H, et al. Four-quadrant sensorless technology of switched reluctance motors based on variable coefficients inductance model [ J ]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7):114-124.

- [21] 毛宇阳, 邓智泉, 蔡骏, 等. 基于电流斜率差值法的开关磁阻电机无位置传感器技术 [ J ]. 电工技术学报, 2011, 26(9):87-93.

MAO Y Y, DENG ZH Q, CAI J, et al. Sensorless control of switched reluctance motor based on current difference method [ J ]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9):87-93.

### 作者简介



**匡斯建**, 2019 年于湖南科技大学获得硕士学位, 主要研究方向为电力电子和电力驱动、无传感器控制技术和高速开关磁阻起动机/发电机。

E-mail: sq1437self@163.com

**Kuang Sijian** received a M. Sc. degree from Hunan University of Science and Technology in 2019. His main research interests include power electronics, electric drive, sensorless control techniques and high-speed switched reluctance starter/generators.



**张小平**, 1987 年于西安交通大学获得学士学位, 2009 年于中南大学获得博士学位, 目前是湖南科技大学的教授和硕士生导师, 主要研究方向为电力电子和电气驱动系统、智能控制。

E-mail: zx163p@163.com

**Zhang Xiaoping** received B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 1987, received Ph. D. degree from Central South University in 2009. He is currently a professor and M. Sc. supervisor at Hunan University of Science and Technology. His main research interests include power electronics and electric drive systems, and intelligent control.



**王易华**, 2019 年于重庆大学城市科技学院获得学士学位, 现为湖南科技大学硕士研究生, 主要研究方向为电力电子和电力驱动、无传感器控制技术和高速开关磁阻起动机/发电机。

E-mail: 1916206741@qq.com

**Wang Yihua** received B. Sc. degree from City College of Science and Technology Chongqing University in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Hunan University of Science and Technology. His main research interests include position sensorless control technology and high speed switched reluctance starters/generators.