

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104055

# 基于分段解析建模的开关磁阻电机 在线转矩估算方法\*

张文港<sup>1,2</sup> 张小平<sup>1,2</sup> 李俊乐<sup>1,2</sup> 王易华<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:**针对目前开关磁阻电机采用单一解析模型进行在线转矩估算存在模型复杂、精度低的问题,提出一种基于分段解析建模的开关磁阻电机在线转矩估算方法。根据开关磁阻电机在一个电周期内磁链特性曲线的对称性及其定转子极弧的结构特点,提出将其半个电周期划分为5个区间,分别建立了每个区间的磁链与转矩简化解析模型,并通过有限元分析及构建基于DSP28335的实验系统分别对上述模型的估算精度与运算时间进行了验证,同时与传统单一解析模型进行了对比分析,结果表明,所提出的分段解析模型相较于传统单一解析模型,不仅有效提高了转矩估算精度,而且显著减少了运算时间,因而有助于提高开关磁阻电机调速系统的控制精度与动态性能,具有较好的应用价值。

**关键词:** 开关磁阻电机;在线转矩估算;分段解析建模;对比分析

**中图分类号:** TM352 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Online torque estimation method for switched reluctance motor based on piecewise analytical modeling

Zhang Wengang<sup>1,2</sup> Zhang Xiaoping<sup>1,2</sup> Li Junle<sup>1,2</sup> Wang Yihua<sup>1,2</sup>

(1. National-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:** Aiming at the problems of intricate model and low accuracy in online torque estimation of switched reluctance motor (SRM), a novel online torque estimation method based on piecewise analytical modelling is proposed. According to the symmetry of the flux linkage characteristics and the structural characteristics of the stator and rotor pole arc of the switched reluctance motor in one electrical cycle, a method of dividing the half electrical cycle into five intervals is proposed, and the flux linkage analytical model and torque analytical model of each interval are established respectively. The estimation accuracy and operation time of the above models are verified by finite element analysis and constructing an experimental system based on DSP28335. The results show that compared with the traditional single analytical model, the proposed partition analytical model not only effectively improves accuracy of torque estimation, but also significantly reduces the operation time, hence, it is helpful to improve the control accuracy and dynamic performance of switched reluctance motor speed control system, which has good application value.

**Keywords:** switched reluctance motor; online torque estimation; piecewise analytical modelling; comparative analysis

## 0 引言

开关磁阻电机 (switched reluctance motor, SRM) 具有结构简单坚固、起动电流小、起动转矩大、效率高等系列

优点<sup>[1-2]</sup>, 目前已在矿山装备、电动汽车及家用电器等众多领域得到了广泛应用<sup>[3]</sup>。在开关磁阻电机高性能调速控制中, 需要实时获取其实际转矩; 传统获取其实际转矩主要采用转矩传感器, 但转矩传感器的采用不仅增加了调速系统的体积、成本及维护工作量, 同时还降低了调速

系统的可靠性<sup>[4]</sup>,因此开展开关磁阻电机在线转矩估算方法研究具有重要意义。

目前,在开关磁阻电机在线转矩估算方面已开展了系列研究,提出了诸如查表法<sup>[5]</sup>、等效磁路法<sup>[6]</sup>、神经网络法<sup>[7]</sup>及解析拟合法<sup>[8]</sup>等多种方法。其中,查表法需要获取大量的样本数据,工作量大;等效磁路法建模过程极为复杂,精度低;神经网络法训练时间长,实时性较差;相对来说,解析拟合法具有建模方法简单、运算工作量适中等特点,因而得到了较广泛的应用。然而目前在采用解析拟合法对开关磁阻电机进行在线转矩估算时通常采用单一解析模型,虽然建模方法简单,但存在模型复杂、精度不高等缺点,严重影响了其调速系统的控制效果。

为此,本文提出一种基于分段解析建模的开关磁阻电机在线转矩估算方法。介绍了根据其磁链特性曲线的对称性提出将其半个电周期划分为 5 个区间的具体划分方法,分别建立了各区间磁链与转矩的简化解析模型,并对其效果进行了验证,同时与传统单一解析模型进行了对比分析,结果证明了所提分段解析模型的有效性和可行性。

## 1 SRM 半个电周期区间划分方法

根据开关磁阻电机磁链特性曲线的对称性,取其半个电周期进行分析。分区时以开关磁阻电机定子凸极中心与转子凹槽中心对齐位置为基准,并根据其定转子极弧结构确定 3 个特殊位置角<sup>[9-10]</sup>,分别为:

$$\theta_1 = (\tau_r - \beta_s - \beta_r)/2 \quad (1)$$

$$\theta_{hr} = (\tau_r - \beta_r)/2 \quad (2)$$

$$\theta_2 = [\tau_r - (\beta_s - \beta_r)]/2 \quad (3)$$

式中: $\tau_r$  为转子极距; $\beta_s$  和  $\beta_r$  分别为定、转子极弧角; $\theta_1$  为转子凸极前沿与定子凸极后沿对齐的位置角; $\theta_{hr}$  为转子凸极前沿与定子凸极中心线重合的位置角; $\theta_2$  为转子凸极前沿与定子凸极前沿对齐的位置角。3 个特殊位置角示意图如图 1 所示。

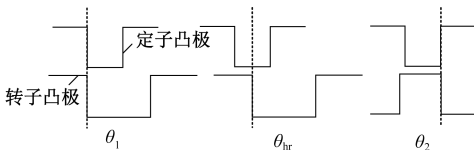


图 1 3 个特殊位置角示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three special position angles

考虑到开关磁阻电机磁链特性曲线不仅与其定转子极弧的结构有关<sup>[11-12]</sup>,而且与磁链的饱和程度有关,因此在综合分析其磁链特性曲线随转子位置角变化规律的基础上,并以上述 3 个特殊位置角为参照,提出将其半个电周期划分为 5 个区间(I~V),具体划分方法如下:

$$\text{第 I 区间: } [0, \frac{4}{5}\theta_1];$$

$$\text{第 II 区间: } [\frac{4}{5}\theta_1, \theta_1 + \frac{\beta_r}{8}];$$

$$\text{第 III 区间: } [\theta_1 + \frac{\beta_r}{8}, \theta_{hr}];$$

$$\text{第 IV 区间: } [\theta_{hr}, \theta_2 - \frac{\beta_r}{8}];$$

$$\text{第 V 区间: } [\theta_2 - \frac{\beta_r}{8}, \frac{\tau_r}{2}].$$

各区间划分示意图如图 2 所示。其基本特征是在第 I 区间内,磁链受位置角和电流是否饱和的影响均较小,其磁链特性曲线变化较平缓;而在第 II 区间内,其磁链变化率则随位置角的增加而迅速上升;至第 III 区间,其磁链变化率则趋于平缓;而至第 IV 区间,其磁链变化率则随位置角的增加开始逐步下降;到第 V 区间,其磁链变化率则几乎降至 0。

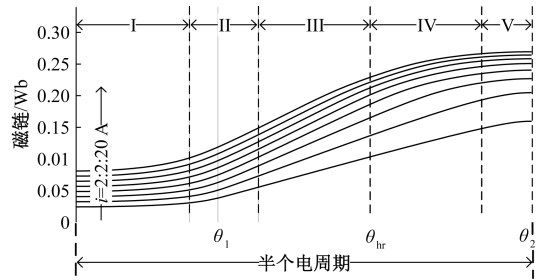


图 2 半个电周期磁链特性曲线分区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of half cycle flux linkage characteristic curve partition

## 2 磁链与转矩分段解析建模方法

针对上述将 SRM 半个电周期磁链特性曲线所划分成的 5 个区间,并根据每个区间内磁链特性曲线的变化特点构建其解析模型,再根据所得磁链解析模型得到相应的转矩解析模型。

### 2.1 磁链分段解析建模

根据各区间磁链特性曲线的变化特点构建其解析模型。

#### 1) 第 I 区间磁链解析模型

由于在该区间内其磁链受位置角和电流是否饱和的影响均较小,其磁链特性曲线的变化较为平缓,故建立其解析模型为:

$$\varphi_1(i, \theta) = a_0(i) + a_2(i)\theta^2 + a_3(i)\theta^3 + a_4(i)\theta^4 \quad (4)$$

式中: $i$  表示相绕组电流; $\theta$  表示转子当前位置角; $a_0(i) = A_0 i$ ,  $a_m(i) = \sum_{j=0}^3 A_{mj} \cdot i^j$ ,  $m = 2, 3, 4$ ,  $A_0$  和  $A_{mj}$  为多项式

系数。

2) 第 II ~ IV 区间磁链解析模型

在这 3 个区间内,其磁链虽然受位置角和电流是否饱和影响的程度不同,但随位置角都具有单一的变化趋势,故各区间模型具有相同类型,只是其系数项不同而已,具体分别为:

$$\varphi_2(i, \theta) = b_0(i) + b_1(i)\theta + b_2(i)\theta^2 + b_3(i)\theta^3 \quad (5)$$

$$\varphi_3(i, \theta) = c_0(i) + c_1(i)\theta + c_2(i)\theta^2 + c_3(i)\theta^3 \quad (6)$$

$$\varphi_4(i, \theta) = d_0(i) + d_1(i)\theta + d_2(i)\theta^2 + d_3(i)\theta^3 \quad (7)$$

式中:  $b_m(i) = \sum_{j=0}^6 B_{mj} \cdot i^j, c_m(i) = \sum_{j=0}^6 C_{mj} \cdot i^j, d_m(i) = \sum_{j=0}^6 D_{mj} \cdot i^j, m = 0, 1, 2, 3, B_{mj}, C_{mj}$  和  $D_{mj}$  为多项式系数。

3) 第 V 区间磁链解析模型

在该区间内,由于其磁链变化率已几乎降至 0,故其解析模型可表示为:

$$\varphi_5(i, \theta) = e_0(i) + e_2(i)(\theta - \tau_r/2)^2 + e_3(i)(\theta - \tau_r/2)^3 + e_4(i)(\theta - \tau_r/2)^4 \quad (8)$$

式中:  $e_m(i) = \sum_{j=0}^6 E_{mj} \cdot i^j, m = 0, 2, 3, 4, E_{mj}$  为多项式系数。

2.2 转矩分段解析建模

根据文献[13],开关磁阻电机的转矩计算公式为:

$$T(i, \theta) = \left. \frac{\partial W'(i, \theta)}{\partial \theta} \right|_{i=const} \quad (9)$$

式中:  $W' = \int_0^i \psi(i, \theta) di$ 。

根据式(4) ~ (9)可分别得到各区间的转矩解析模型。

第 I 区间转矩解析模型为:

$$T_1(i, \theta) = a_{11}(i)\theta + a_{12}(i)\theta^2 + a_{13}(i)\theta^3 \quad (10)$$

式中:  $a_{1(m-1)}(i) = m \int_0^i a_m(i) di = m \sum_{j=0}^3 \frac{A_{mj} i^{j+1}}{j+1}, m = 2, 3, 4$ 。

第 II 区间转矩解析模型为:

$$T_2(i, \theta) = b_{20}(i) + b_{21}(i)\theta + b_{22}(i)\theta^2 \quad (11)$$

式中:  $b_{2(m-1)}(i) = m \int_0^i b_m(i) di = m \sum_{j=0}^6 \frac{B_{mj} i^{j+1}}{j+1}, m = 1, 2, 3$ 。

第 III 区间转矩解析模型为:

$$T_3(i, \theta) = c_{30}(i) + c_{31}(i)\theta + c_{32}(i)\theta^2 \quad (12)$$

式中:  $c_{3(m-1)}(i) = m \int_0^i c_m(i) di = m \sum_{j=0}^6 \frac{C_{mj} i^{j+1}}{j+1}, m = 1, 2, 3$ 。

第 IV 区间转矩解析模型为:

$$T_4(i, \theta) = d_{40}(i) + d_{41}(i)\theta + d_{42}(i)\theta^2 \quad (13)$$

式中:  $d_{4(m-1)}(i) = m \int_0^i d_m(i) di = m \sum_{j=0}^6 \frac{D_{mj} i^{j+1}}{j+1}, m = 1, 2, 3$ 。

第 V 区间转矩解析模型为:

$$T_5(i, \theta) = e_{51}(i)(\theta - \tau_r/2) + e_{52}(i)(\theta - \tau_r/2)^2 +$$

$$e_{53}(i)(\theta - \tau_r/2)^3 \quad (14)$$

式中:  $e_{5(m-1)}(i) = m \int_0^i e_m(i) di = m \sum_{j=0}^6 \frac{E_{mj} i^{j+1}}{j+1}, m = 2, 3, 4$ 。

3 模型对比分析

针对本文提出的开关磁阻电机在线转矩估算分段解析模型,和传统解析拟合法所采用的单一解析模型,分别就转矩估算精度和模型运算时间进行对比分析。

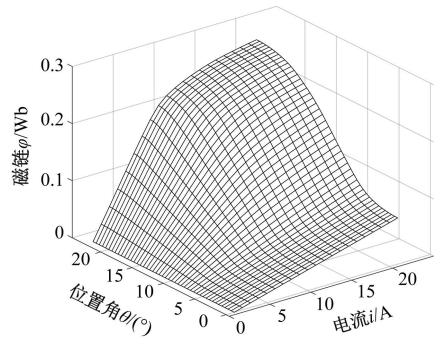
3.1 确定各模型的系数

以某三相开关磁阻电机为例,其主要参数如表 1 所示。根据表 1 电机参数,采用有限元法获取其磁链-电流-位置角( $\varphi-i-\theta$ )数据和转矩-电流-位置角( $T-i-\theta$ )数据<sup>[14-15]</sup>,其对应的三维曲面如图 3 所示。

表 1 开关磁阻电机主要参数

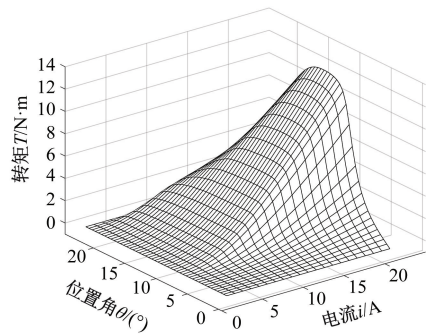
Table 1 Basic parameters of switched reluctance motor

名称	参数
定、转子极数	12/8
额定功率	2.2 kW
额定电压	270 V
定子极弧角	15°
转子极弧角	16°



(a) 磁链特性三维曲面图

(a) 3D curved surface diagram of flux characteristics



(b) 转矩特性三维曲面图

(b) Three-dimensional surface diagram of torque characteristics

图 3 磁链和转矩特性三维曲面图

Fig. 3 3D surface diagram of torque characteristics

根据上述所得  $\varphi-i-\theta$  数据,采用最小二乘法确定各区间磁链解析模型所对应的系数<sup>[16]</sup>,再根据所得磁链解析模型及式(10)~(14)得到对应的转矩解析模型,所得各转矩解析模型的系数分别如表 2~6 所示。

表 2 第 I 区间转矩解析模型的系数

Table 2 Coefficient of interval I torque analysis model

$mA_{mj}/(j+1)$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$
$mA_{m0}$	$-3.067 \times 10^{-3}$	$8.092 \times 10^{-2}$	$-3.256 \times 10^{-1}$
$mA_{m1/2}$	$5.146 \times 10^{-2}$	$-4.183 \times 10^{-1}$	4.650
$mA_{m2/3}$	$-2.020 \times 10^{-5}$	$-1.765 \times 10^{-3}$	$3.756 \times 10^{-2}$
$mA_{m3/4}$	$-6.347 \times 10^{-6}$	$3.301 \times 10^{-4}$	$-3.480 \times 10^{-3}$

表 3 第 II 区间转矩解析模型的系数

Table 3 Coefficient of interval II torque analysis model

$mB_{mj}/(j+1)$	$b_{20}$	$b_{21}$	$b_{22}$
$mB_{m0}$	1.973	$2.265 \times 10^{-1}$	$-6.240 \times 10^{-1}$
$mB_{m1/2}$	$-1.427 \times 10^{-1}$	1.133	-2.216
$mB_{m2/3}$	$-3.193 \times 10^{-2}$	$2.862 \times 10^{-1}$	$-8.452 \times 10^{-1}$
$mB_{m3/4}$	$4.686 \times 10^{-3}$	$-4.370 \times 10^{-2}$	$1.350 \times 10^{-1}$
$mB_{m4/5}$	$-2.443 \times 10^{-4}$	$2.494 \times 10^{-3}$	$-8.431 \times 10^{-3}$
$mB_{m5/6}$	$5.725 \times 10^{-6}$	$-6.643 \times 10^{-5}$	$2.486 \times 10^{-4}$
$mB_{m6/7}$	$-4.904 \times 10^{-8}$	$6.841 \times 10^{-7}$	$-2.860 \times 10^{-6}$

表 4 第 III 区间转矩解析模型的系数

Table 4 Coefficient of interval III torque analysis model

$mC_{mj}/(j+1)$	$c_{30}$	$c_{31}$	$c_{32}$
$mC_{m0}$	$-1.206 \times 10^{-2}$	$4.319 \times 10^{-2}$	$-5.320 \times 10^{-2}$
$mC_{m1/2}$	$7.139 \times 10^{-2}$	$-8.355 \times 10^{-2}$	$6.970 \times 10^{-2}$
$mC_{m2/3}$	$-1.117 \times 10^{-2}$	$2.487 \times 10^{-2}$	$-1.424 \times 10^{-2}$
$mC_{m3/4}$	$1.749 \times 10^{-3}$	$-2.757 \times 10^{-3}$	$-2.190 \times 10^{-4}$
$mC_{m4/5}$	$-1.201 \times 10^{-4}$	$7.935 \times 10^{-5}$	$2.718 \times 10^{-4}$
$mC_{m5/6}$	$2.603 \times 10^{-6}$	$7.105 \times 10^{-6}$	$-2.785 \times 10^{-5}$
$mC_{m6/7}$	$1.740 \times 10^{-10}$	$-2.888 \times 10^{-7}$	$7.184 \times 10^{-7}$

表 5 第 IV 区间转矩解析模型的系数

Table 5 Coefficient of interval IV torque analysis model

$mD_{mj}/(j+1)$	$d_{40}$	$d_{41}$	$d_{42}$
$mD_{m0}$	$-1.376 \times 10^{-1}$	$3.139 \times 10^{-1}$	$-1.612 \times 10^{-1}$
$mD_{m1/2}$	$-3.443 \times 10^{-2}$	$6.912 \times 10^{-1}$	-1.303
$mD_{m2/3}$	$1.289 \times 10^{-1}$	$-6.175 \times 10^{-1}$	$8.998 \times 10^{-1}$
$mD_{m3/4}$	$-3.905 \times 10^{-2}$	$1.621 \times 10^{-1}$	$-2.142 \times 10^{-1}$
$mD_{m4/5}$	$4.302 \times 10^{-3}$	$-1.677 \times 10^{-2}$	$2.105 \times 10^{-2}$
$mD_{m5/6}$	$-1.991 \times 10^{-4}$	$7.497 \times 10^{-4}$	$-9.129 \times 10^{-4}$
$mD_{m6/7}$	$3.308 \times 10^{-6}$	$-1.218 \times 10^{-5}$	$1.455 \times 10^{-5}$

对于传统解析拟合法来说,其所用磁链和转矩解析模型一般采用包含 4 次谐波的六阶多项式 Fourier 解析模型<sup>[17]</sup>。

表 6 第 V 区间转矩解析模型的系数

Table 6 Coefficient of interval V torque analysis model

$mE_{mj}/(j+1)$	$e_{51}$	$e_{52}$	$e_{53}$
$mE_{m0}$	$-3.851 \times 10^{-1}$	-2.672	3.348
$mE_{m1/2}$	$4.995 \times 10^{-1}$	5.485	4.431
$mE_{m2/3}$	$-6.050 \times 10^{-1}$	-6.066	-5.157
$mE_{m3/4}$	$1.008 \times 10^{-1}$	1.096	1.376
$mE_{m4/5}$	$-7.158 \times 10^{-3}$	$-8.296 \times 10^{-2}$	$-1.257 \times 10^{-1}$
$mE_{m5/6}$	$2.386 \times 10^{-4}$	$2.904 \times 10^{-3}$	$4.850 \times 10^{-3}$
$mE_{m6/7}$	$-3.071 \times 10^{-6}$	$-3.882 \times 10^{-5}$	$-6.815 \times 10^{-5}$

磁链解析模型:

$$\varphi_{Fourier}(i, \theta) = \sum_{n=0}^4 a_n(i) \cos(n \frac{8\pi}{180} \theta) \quad (15)$$

式中:  $a_n(i) = \sum_{j=0}^6 h_{nj} i^j$ 。

转矩解析模型:

$$T_{Fourier}(i, \theta) = \frac{\partial}{\partial \theta} \int_0^i \varphi_{Fourier}(i, \theta) di = \sum_{n=1}^4 -A_n(i) n \frac{8\pi}{180} \sin(n \frac{8\pi}{180} \theta) \quad (16)$$

式中:  $A_n(i) = \int_0^i a_n(i) di = \sum_{j=0}^6 \frac{h_{nj} i^{j+1}}{j+1}$ 。

同样,根据上述所得  $\varphi-i-\theta$  数据,可得其转矩解析模型各项系数如表 7 所示。

表 7 传统 Fourier 转矩解析模型系数

Table 7 Coefficients of traditional Fourier torque analytical model

$h_{nj}/(j+1)$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
$h_{n0}$	$-1.975 \times 10^{-4}$	$2.542 \times 10^{-4}$	$-2.423 \times 10^{-4}$	$1.638 \times 10^{-4}$
$h_{n1/2}$	$-5.259 \times 10^{-3}$	$9.208 \times 10^{-5}$	$5.647 \times 10^{-4}$	$-1.658 \times 10^{-4}$
$h_{n2/3}$	$5.659 \times 10^{-5}$	$1.881 \times 10^{-4}$	$-2.530 \times 10^{-4}$	$1.816 \times 10^{-4}$
$h_{n3/4}$	$-3.820 \times 10^{-5}$	$-1.887 \times 10^{-5}$	$3.686 \times 10^{-5}$	$-2.733 \times 10^{-5}$
$h_{n4/5}$	$5.249 \times 10^{-6}$	$3.416 \times 10^{-7}$	$-2.237 \times 10^{-6}$	$1.741 \times 10^{-6}$
$h_{n5/6}$	$-2.403 \times 10^{-7}$	$1.847 \times 10^{-8}$	$6.083 \times 10^{-8}$	$-5.156 \times 10^{-8}$
$h_{n6/7}$	$3.752 \times 10^{-9}$	$-5.772 \times 10^{-10}$	$-6.062 \times 10^{-10}$	$5.848 \times 10^{-10}$

### 3.2 转矩估算精度对比分析

对于转矩解析模型的估算精度,本文提出采用误差均方根(RMSE)值作为其精度指标<sup>[18]</sup>,其计算方法为:

$$RMSE(\theta_k) = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{j=1}^n (T(i_j, \theta_k) - T_{FEM}(i_j, \theta_k))^2} \quad (17)$$

式中:  $RMSE(\theta_k)$  表示对应于转子位置角  $\theta_k$  时的转矩估算精度,  $i_j$  表示绕组电流,  $T_{FEM}(i_j, \theta_k)$  为采用有限元法获得的转矩值,  $T(i_j, \theta_k)$  为采用转矩估算方法得到的转矩值,  $n$  为精度指标计算所选择的样本数。



在开关磁阻电机的半个电周期( $0^\circ \sim 22.5^\circ$ )内,从  $0^\circ$  开始,如以  $1.5^\circ$  为间隔,等间距选取若干个位置角  $\theta_k$ ,并针对每个位置角  $\theta_k$ ,任取精度计算的样本数  $n$  为 20,其中取电流  $i_j$  从 1 A 开始,并以 1 A 为间距依次递增取值,则根据式(17)可分别得到本文所提出的转矩分段解析模型和传统 Fourier 转矩解析模型所对应各位置角的转矩估算精度,如图 4 所示。

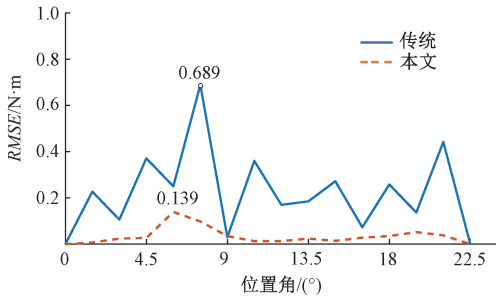


图 4 两种模型对应各位置角的转矩估算精度

Fig. 4 Torque estimation accuracy of two models for corresponding position angles

根据图 4 可见,在所取各位置角处,本文所提转矩分段解析模型的最大  $RMSE$  值为  $0.139 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,而传统 Fourier 解析模型的最大  $RMSE$  值为  $0.689 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,可见,本文提出的转矩分段解析模型,其转矩估算精度明显高于传统 Fourier 解析模型。

### 3.3 模型运算时间对比分析

为对比分析本文提出的分段解析模型和传统 Fourier 解析模型在磁链和转矩估算方面所需运算时间,采用 DSP28335 微处理器并通过对其设置程序断点的方式进行测试<sup>[19-20]</sup>。其中 DSP28335 微处理器的系统频率为 150 MHz,测试时以完成一次磁链和转矩计算所需运算时间为准,所得结果如表 8 所示。鉴于本文提出的分段解析模型中,每个区间所采用的磁链和转矩解析模型均不相同,因而对应于每个区间完成一次磁链或转矩计算所需运算时间也不相同,因此表中所列本文所提方法的运算时间为对应于 5 个区间的最大运算时间。

表 8 两种模型对应的运算时间

Table 8 Operation time of the two methods ( $\mu\text{s}$ )

估算模型	磁链	转矩
传统 Fourier 解析模型	2.85	2.62
本文提出的分段解析模型	1.64	0.80

根据表 8 可见,本文提出的磁链和转矩分段解析模型在模型运算时间方面,分别较传统 Fourier 解析模型下降了 42.46% 和 69.47%,可见其下降幅度极其可观。

## 4 结 论

针对目前开关磁阻电机采用单一解析模型进行在线转矩估算时存在模型复杂、精度低的问题,提出一种基于分段解析建模的开关磁阻电机在线转矩估算方法。根据开关磁阻电机半个电周期内的磁链特性提出对其进行区间划分的具体方法,分别建立了各区间磁链与转矩的解析模型,并通过有限元分析及构建基于 DSP28335 的实验系统对上述模型的估算精度与运算时间进行了验证,同时与传统单一解析模型进行了对比分析。结果表明:所提出的分段解析模型较传统单一解析模型,不仅有效提高了转矩估算精度,而且显著减少了运算时间,因而可有效提高开关磁阻电机调速系统的控制性能,具有较好的应用价值。

## 参考文献

- [1] 刘勇智,李杰,鄢成龙,等. 基于 KELM-SAPSO 的开关磁阻电机优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(2): 148-153.  
LIU Y ZH, LI J, SHAN CH L, et al. Multi-objective optimization of torque characteristics of hybrid excitation switching reluctance motors [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 32 (5): 148-153.
- [2] 曹鑫,李小笛,刘晨昊,等. 基于旋转坐标系的锥形无轴承开关磁阻电机数学模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(17): 4029-4036.  
CAO X, LI X D, LIU CH CH, et al. Mathematical model of tapered bearingless switched reluctance motor based on rotating coordinate system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33 (17): 4029-4036.
- [3] 饶盛华,张小平,张铸,等. 基于果蝇算法的开关磁阻电机多目标优化研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 1152-1158.  
RAO SH H, ZHANG X P, ZHANG ZH, et al. Study on multi-objective optimization of SRM based on FOA [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(7): 1152-1158.
- [4] SONG S J, FANG G, ZHANG Z, et al. Unsaturated inductance based instantaneous torque online estimation of switched reluctance machine with locally linearized energy conversion loop [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6109-6119.
- [5] SANTOS BARROS T A, SANTOS NETO P J, PAULA M V, et al. Automatic characterization system of switched

- reluctance machines and nonlinear modeling by interpolation using smoothing splines[J]. IEEE Access, 2018, 6: 26011-26021.
- [ 6 ] 左曙光, 刘明田, 胡胜龙. 考虑铁芯磁饱和的开关磁阻电机电感及转矩解析建模[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(7): 118-125,143.  
ZUO SH G, LIU M T, HU SH L. Modeling inductance and torque analysis of switched reluctance motor considering core magnetic saturation [ J ]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2019, 53 ( 7 ): 118-125,143.
- [ 7 ] HAN L L, XU A D, ZHU J W, et al. Torque observer of SRM based on BP neural network optimized by bat algorithm [ C ]. The 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2019: 1-6.
- [ 8 ] CHEN H, YAN W, CHEN L. Analytical polynomial models of nonlinear magnetic flux linkage for SRM[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 28(3): 1-7.
- [ 9 ] LI C H, WANG G F, LIU J, et al. A novel method for modeling the electromagnetic characteristics of switched reluctance motors [ J ]. Applied Sciences-Basel, 2018, 8(4): 1-11.
- [ 10 ] 孙利宏. SRM 神经网络建模及间接转矩控制策略研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.  
SUN L H. Research on neural network modeling and indirect torque control strategy of SRM [ D ]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
- [ 11 ] 叶威, 马齐爽, 徐萍, 等. 开关磁阻电机矩角特性模型非线性拟合方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(1): 83-92.  
YE W, MA Q SH, XU P, et al. Nonlinear fitting method for torque-angle characteristic model of switched reluctance motor [ J ]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(1): 83-92.
- [ 12 ] 陈吉清, 洗浩岚, 兰凤崇, 等. 开关磁阻电机结构性转矩脉动抑制方法 [ J ]. 机械工程学报, 2020, 56(20): 106-119.  
CHEN J Q, XIAN H L, LAN F CH, et al. Structural torque ripple suppression method for switched reluctance motor [ J ]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(20): 106-119.
- [ 13 ] 朱叶盛, 章国宝, 黄永明. 基于 PWM 的开关磁阻电机直接瞬时转矩控制 [ J ]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 31-39.  
ZHU Y SH, ZHANG G B, HUANG Y M. Direct instantaneous torque control of switched reluctance motor based on PWM [ J ]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 31-39.
- [ 14 ] 高洁, 孙鹤旭, 米彦青, 等. 计及互感的开关磁阻电机单双相励磁静态性能分析 [ J ]. 电机与控制学报, 2012, 16(11): 45-51.  
GAO J, SUN H X, MI Y Q, et al. Static performance analysis of switched reluctance motor with mutual inductance [ J ]. Electric Machines and Control, 2012, 16(11): 45-51.
- [ 15 ] 周凯, 石增. 开关磁阻电机转矩脉动抑制技术 [ J ]. 电机与控制学报, 2019, 23(12): 85-92.  
ZHOU K, SHI Z. Torque ripple suppression technology of switched reluctance motor [ J ]. Electric Machines and Control, 2019, 23(12): 85-92.
- [ 16 ] 曾辉, 陈昊, 徐阳, 等. 基于新型磁链检测方案的开关磁阻电机非线性建模 [ J ]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 124-130.  
ZENG H, CHEN H, XU Y, et al. Nonlinear modeling of switched reluctance motor based on novel flux linkage detection scheme [ J ]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 124-130.
- [ 17 ] 钟锐, 曹彦萍, 徐宇柘, 等. 三角函数的开关磁阻电机磁链解析模型 [ J ]. 电机与控制学报, 2013, 17(1): 13-19.  
ZHONG R, CAO Y P, XU Y T, et al. Analytical flux linkage model of switched reluctance motor based on trigonometric function [ J ]. Electric Machines and Control, 2013, 17(1): 13-19.
- [ 18 ] AHMAD S S, NARAYANAN G. A simplified flux linkage characteristics model of switched reluctance machine [ C ]. 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2016: 1-6.
- [ 19 ] 颜宁, 曹鑫, 张蕾, 等. 基于直接转矩控制的开关磁阻电机模型预测控制方法 [ J ]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5446-5453,5544.  
YAN L, CAO X, ZH L, et al. Model predictive control of switched reluctance motor based on direct torque control [ J ]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 ( 18 ): 5446-5453,5544.
- [ 20 ] 卿龙, 王惠民, 葛兴来. 一种高效率开关磁阻电机转矩脉动抑制方法 [ J ]. 电工技术学报, 2020, 35(9): 1912-1920.  
QING L, WANG H M, GE X L. A high efficiency torque ripple suppression method for switched reluctance motor [ J ].

Transactions of China Electrotechnical Society, 2020,  
35(9): 1912-1920.

## 作者简介



张文港, 2019 年于湖南工业大学获得学士学位, 现为湖南科技大学硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail: 1802918497@qq.com

**Zhang Wengang** received his B. Sc. from Hunan University of Technology in 2019.

Now he is a M. Sc. candidate at Hunan University of Science and Technology. His main research interests include power electronics and power transmission.



张小平(通信作者), 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, 现为湖南科技大学教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动、智能控制等。

E-mail: zxp836@163.com

**Zhang Xiaoping** (Corresponding author) received his B. Sc. from Xi'an Jiaotong University in 1987 and Ph. D. from Central South University in 2009. Now he is a professor and M. Sc. supervisor at Hunan University of Science and Technology. His main research interests include power electronics and power transmission, and intelligent control.