

# 整距绕组分块转子开关磁阻电机的电磁设计

陈小元, 邓智泉, 许培林, 范娜

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏省 南京市 210016)

## Electromagnetic Design of a Switched Reluctance Motor With Segmental Rotors and Full-pitch Windings

CHEN Xiaoyuan, DENG Zhiquan, XU Peilin, FAN Na

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** Switched reluctance motors with full-pitch windings and segmental rotors are particularly suitable for the drive systems in aerospace environments because of low wind (oil) resistance and iron losses at high speed. According to the working principles and electromagnetic performances of switched reluctance motors with full-pitch windings and segmental rotors, and combining with the relationship between average torque and electromagnetic power, the computational formula of main body for switched reluctance motors with full-pitch windings and segmental rotors could be obtained when the currents in phase windings were equivalent to square waveforms. The rule of selecting pole arcs of stator and rotor teeth for switched reluctance motors with full-pitch windings and segmental rotors was analyzed based on the electromagnetic performances of the motor, especially in aligned position and unaligned position. The principles of calculating the number of turns of windings and other key dimensions of the motor were also established. A prototype is designed with the method presented; the finite element analysis and the experiments were accomplished. The results verify this design method for the switched reluctance motors with full-pitch windings and segmental rotors.

**KEY WORDS:** switched reluctance motors (SRM); full-pitch winding; segmental rotor; electromagnetic design; pole-arc coefficient

**摘要:** 整距绕组分块转子开关磁阻电机具有高速运行时低风(油)阻和低铁心损耗等优点, 特别适用于航天航空驱动系统。根据整距绕组分块转子开关磁阻电机的基本工作原理, 结合输出功率与平均转矩的关系, 将绕组电流等效为方波,

推导出了整距绕组分块转子开关磁阻电机的主体尺寸计算公式; 基于电机定转子未对齐位置和对齐位置的电磁特性, 以及整距绕组分块转子开关磁阻电机的电磁特点, 确定了定、转子极弧系数选取的规则; 同时分析了绕组匝数等主要尺寸的选取的规则; 最后, 基于上述方法优化设计了一台实验样机, 并通过有限元仿真及实验验证了整距绕组分块转子开关磁阻电机的电磁设计方法的正确性。

**关键词:** 开关磁阻电机; 整距绕组; 分块转子; 电磁设计; 极弧系数

## 0 引言

近年来, 英国及日本等国学者开展了分块转子开关磁阻电机(switche reluctance motor, SRM)的研究<sup>[1-9]</sup>。分块转子 SRM 将转子铁心块嵌入在不导磁的转子套中组成圆柱形结构的转子, 且采用短路结构, 即磁通经过相邻定、转子齿极形成闭合回路。以上特点使得分块转子 SRM 除了具有普通 SRM 结构坚固、控制灵活、容错能力强、高温和高速适应性<sup>[10-13]</sup>等优点外, 还具有高速运行时低风(油)阻和低铁心损耗等优点, 在航天航空及电动车的驱动系统中很有应用价值。

英国纽卡斯尔大学的 B. C. Mecrow 教授最先提出了分块转子 SRM。文献[1-2]研究了 12/8 结构分块转子 SRM 的基本性能, 在铜耗相同时, 其输出转矩比普通 SRM 大 41%。文献[3-4]研究了分块转子铁心嵌入铝块的 6/4 结构分块转子 SRM, 指出其不仅能提高出力, 还能减小单齿径向力。文献[5]提出了一种定子为圆槽结构的 6/4 结构分块转子 SRM, 与同等 6/4 结构的普通分块转子 SRM 相比, 采用该结构能减小 14%的重量, 且电机出力增加,

基金项目: 国家自然科学基金项目(50877036)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50877036).

振动噪声减小。文献[14]将双极性励磁方法用于四相8/6结构分块转子SRM来解决单极性励磁时的定子磁通冲突问题。以上研究的分块转子SRM的定子绕组均采用整距绕组<sup>[1-2,14-15]</sup>,即每个绕组需跨越 $m$ 个定子齿( $m$ 为电机的相数)绕制。文献[6-7]研究了三相12/10结构的单齿集中绕组分块SRM,并设计了一台功率为200kW用于飞机起动/发电的外转子三相18/15结构单齿集中绕组分块转子SRM。以上文献均未涉及分块转子SRM的电磁设计的研究。

为此,本文根据整距绕组分块转子SRM的工作原理和结构特点,研究其本体设计中的关键技术。这些关键技术涉及到电机主要尺寸计算公式的推导、定转子极弧系数的选取以及绕组参数的计算。最后完成一台12/8结构的整距绕组分块转子SRM实验样机的设计,并通过有限元仿真计算及样机实验验证了本文的设计方法。

### 1 电磁设计

#### 1.1 定、转子极弧系数

由于不同于普通SRM的电磁结构,分块转子SRM的定转子极弧系数与普通SRM也不同<sup>[1]</sup>,但其选取的原则同普通SRM一样,即需确保电机的出力及起动机性能等。应优选定子极弧系数( $\alpha_s$ )和转子极弧系数( $\alpha_r$ )以加大最小相电感和最大相电感的比值,并增加各相相电感的重叠区域。

对于分块转子SRM,当定子相邻的两齿间槽与相邻的两转子齿间的非导磁套部分对齐时,相应的定子相邻的两齿间绕组电感最小<sup>[1-2,14]</sup>。为了确保磁阻最大,需保证转子齿间非导磁套部分区域长度和相邻两定子齿间槽口长度相等,即在不考虑气隙因素时,应有

$$\frac{2\pi(1-\alpha_r)}{Z_r} = \frac{2\pi(1-\alpha_s)}{Z_s} \tag{1}$$

式中: $Z_s$ 为定子齿极数; $Z_r$ 为转子齿极数。

当转子齿块轴线与相邻两定子齿间槽轴线对齐时,相应的两定子齿间绕组电感最大<sup>[1-2,14]</sup>。此时转子齿须跨接一相绕组的两相邻定子齿,且转子齿极宽大于一个定子极距,以保证有足够的对齐面积,达到减小磁阻、增大最大电感的目的,即在不考虑电机气隙因素时,应有

$$\frac{2\pi\alpha_r}{Z_r} > \frac{2\pi}{Z_s} \tag{2}$$

图1所示为电机逆时针运转时,A相为 $22.5^\circ$ 转子位置角时的电机截面图,此时,B相处于开通状态。为了使得B相绕组产生的磁力线从 $F_1$ 路径闭合而不从 $F_2$ 路径闭合,即保证定子齿 $s_1$ 齿对转子齿 $r_1$ 的正向切向力远大于定子齿 $s_3$ 对转子齿 $r_1$ 的负向切向力,故 $\alpha_s$ 、 $\alpha_r$ 需满足:

$$\frac{2\pi\alpha_r}{Z_r} \leq \frac{2\pi}{Z_s} + \frac{2\pi(1-\alpha_s)}{Z_s} \tag{3}$$

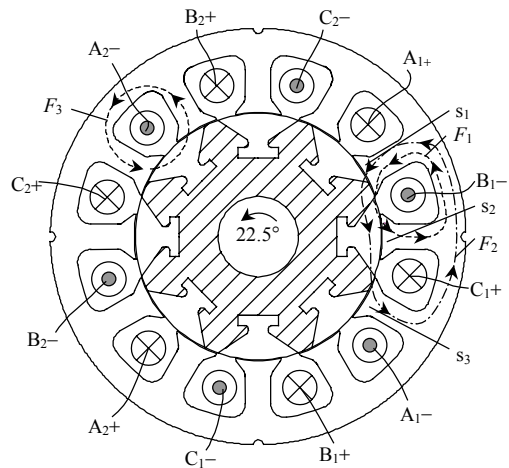


图1 A相 $22.5^\circ$ 位置时电机示意图  
Fig. 1 12/8 SRM with segmental rotors at  $22.5^\circ$  position of A phase

上述 $\alpha_s$ 和 $\alpha_r$ 关系可由图2来描述,式(1)可由直线CE表示,式(2)可表示为CDFH围合的矩形,式(3)可表示为ABHGD围合的多边形。综合以上关系可知, $\alpha_s$ 和 $\alpha_r$ 取值在直线IJ上(包括J点,不包括I点)。

在直线IJ上,从点I到点J, $\alpha_s$ 和 $\alpha_r$ 逐渐递增。当 $\alpha_s$ 和 $\alpha_r$ 取直线IJ上点I附近点时, $\alpha_s$ 和 $\alpha_r$ 有较小值,此时图1所示的定子齿 $s_1$ 和转子齿 $r_1$ 间气隙

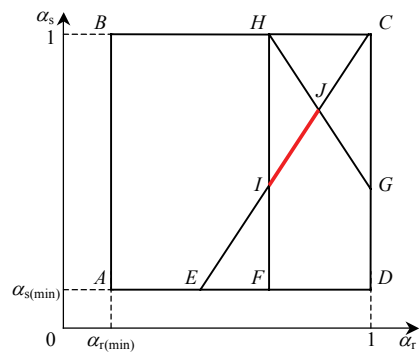


图2  $\alpha_s$ 、 $\alpha_r$ 关系图  
Fig. 2 Relationship between  $\alpha_s$  and  $\alpha_r$

较大，不利于提高分块转子 SRM 的出力。

图 3 为三相 12/8 结构的整距绕组分块转子 SRM 在不同定转子极弧系数时的相矩角特性，可以发现，定转子极弧系数沿着  $IJ$  上从点  $I$  到点  $J$  时，转矩区间前移，有利于电机起动，同时整个转矩区间增大。因此，为了提高分块转子 SRM 的出力， $\alpha_s$  和  $\alpha_r$  取值在直线  $IJ$  上，且接近  $J$  点(包括  $J$  点)比较合适。

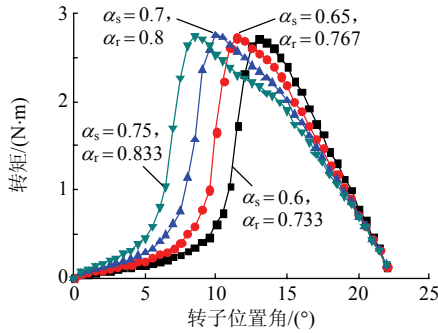


图 3 不同定转子极弧系数时的矩角特性

Fig. 3 Torque plots at different pole-arc coefficients

### 1.2 主要尺寸计算

与普通 SRM 相同，整距绕组分块转子 SRM 的工作过程是严重非线性的，无法严格列写相电感和相电流的具体解析表达式，这给前期设计带来很大困难<sup>[16-17]</sup>。为此，在计算主体尺寸时，有必要根据经验对分块转子 SRM 的相电流和相电感作出近似(如图 4 所示)，即将绕组电流波形等效为方波，并忽略磁场饱和及相间互感的影响，则每相电磁转矩( $T_{ph}$ )可表示为

$$T_{ph} = \int \frac{1}{2} [i(\theta)]^2 \frac{\partial L(i, \theta)}{\partial \theta} \approx \frac{1}{2} I_{ph}^2 \frac{\Delta L}{\Delta \theta} \quad (4)$$

又有

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_{ph}^2 dt} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{ph} = k_i i_m \quad (5)$$

$$\Delta \theta \approx \theta_r / 2 = \pi / Z_r \quad (6)$$

$$\Delta L = L_{max} - L_{min} = L_{max}(1 - k_m) \quad (7)$$

式中： $I_{ph}$  为相电流半周期平均值； $I$  为绕组相电流有效值； $i_m$  为绕组相电流峰值； $T$  为相电流的周期； $k_i$  为峰值电流系数，即相电流有效值与相电流峰值的比值，文献[18]根据大量的实际计算后指出，额定工况下峰值电流系数  $k_i$  为 0.48~0.51，一般取  $k_i=0.5$ ； $k_m$  为相最小电感与最大电感的比值，其值越大，越有利于电机的出力<sup>[17]</sup>。

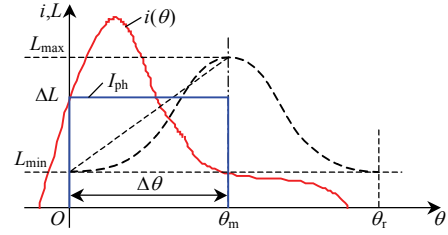


图 4 相电流和相电感近似示意图

Fig. 4 Schematic diagram of phase current and inductance

由基本磁路定律，有

$$N \frac{i_m}{c} = \frac{B_\delta}{\mu_0} 2k\delta \quad (8)$$

式中： $c$  为一相绕组串并联系数，一相两线圈串联时  $c=1$ ，并联时  $c=2$ ； $N$  为定子每个线圈匝数； $B_\delta$  为最大相电流时电机平均气隙磁密值； $\mu_0$  为空气导磁系数； $k$  为计及铁心磁压降的磁路的系数； $\delta$  为气隙长度。

若不计漏磁，在整距绕组分块转子 SRM 定转子对齐位置，即最大相电感位置的气隙磁导为

$$A_{max} = \frac{\mu_0 L k_c}{2\delta} \left[ \frac{\pi D \alpha_r}{Z_r} - \frac{\pi D (1 - \alpha_s)}{Z_s} \right] \quad (9)$$

式中： $D$  为气隙直径，即定子内径； $L$  为定子迭厚； $k_c$  为迭片系数。

对于一相两绕组串联的情况，相最大电感  $L_{max}$  可表示为

$$L_{max} = \frac{Z_s N^2 A_{max}}{2mc} \quad (10)$$

式中  $m$  为相数。

根据电磁功率与转矩的关系，相平均转矩还可以表示为

$$T_{ph} = \frac{60 k_{em} P_2}{2mn\pi} = \frac{30 k_{em} P_2}{m\pi n} \quad (11)$$

式中： $P_2$  为电磁功率； $n$  为转速； $k_{em}$  为考虑机械摩擦及杂散等损耗时的电磁转矩与输出转矩比。

联合式(4)~(11)，结合式(1)整理可得

$$DL = \frac{30 \mu_0 k_{em} P_2}{\pi k_c k_i^2 c (1 - k_m) Z_s (2\alpha_r - 1) n B_\delta^2 k^2 \delta} \quad (12)$$

式(12)所示的整距绕组分块转子 SRM 的电磁设计公式适用于三相 12/8、6/4 以及四相 8/6 结构电机。

由分块转子 SRM 对齐位置时的磁力线分布可知，为了保证定子轭部、定子齿部及转子铁心块内

的磁密基本一致<sup>[1-2]</sup>, 需保证定子齿宽( $w_{st}$ )、定子轭高( $h_{sy}$ )和转子齿高( $h_r$ )基本相等, 即:

$$w_{st} \approx h_{sy} \approx h_r \quad (13)$$

为了使电机的磁通路径接近圆形, 以使磁通路径尽量最短, 达到提高电机性能的目的<sup>[5]</sup>。在保证足够的槽空间前提下, 定子轭和定子齿结合处需要较大的圆弧倒角, 同时满足:

$$\frac{\pi(D+h_{st})}{2Z_s} \approx \frac{h_{st}+h_{sy}}{2} \approx \frac{h_{st}+h_r}{2} \quad (14)$$

其中, 定子齿高  $h_{st}$  为

$$h_{st} = h_{t1} + h_{t2} + h_{t3} \quad (15)$$

式中:  $h_{t1}$  为定子齿极尖高, 其作用是防止齿极尖过饱和, 同时增加定子极端的机械强度;  $h_{t2}$  为定子极靴高;  $h_{t3}$  为定子齿上半部分高。  $w_{st}, h_{t1}, h_{t2}, h_{t3}$  的具体标示参见图 5。

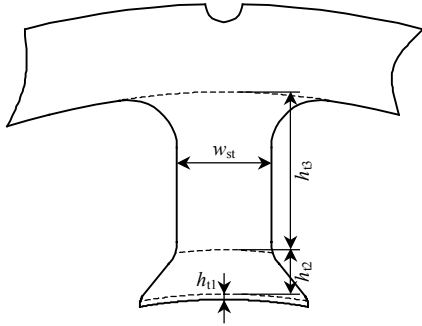


图 5 12/8 结构的分块转子定子齿示意图

Fig. 5 Construction of the pole of the stator of 12/8 SRM with segmental rotors

### 1.3 绕组参数计算

由给定母线电压  $U_s$ 、输出功率  $P_2$ , 可计算出直流电源向电机每相绕组提供的电流平均值  $I'_{ph}$ :

$$I'_{ph} = I_{ph} / 2 = P_2 / (mU_s\eta) \quad (16)$$

式中  $\eta$  为电机效率。

由式(5)、(8)和(16)可得一个线圈的匝数的计算公式:

$$N = \sqrt{2cmU_s\eta B_\delta k\delta k_i} / (\mu_0 P_2) \quad (17)$$

根据电机散热条件可确定线圈的允许电流密度  $J$ , 则需要并绕的导线的股数  $N_p$  可计算如下:

$$N_p = \frac{4I'_{ph}}{\pi J d_{co}^2} = \frac{8P_2}{\pi m U_s \eta J d_{co}^2} \quad (18)$$

式中  $d_{co}$  为漆包线铜芯标称直径。

电机单个槽面积  $S_s$  为

$$S_s = \frac{\pi(D_{sy}^2 - D^2)}{4Z_s} - \frac{\pi D \alpha_s}{Z_s} (h_{t1} + h_{t2}) - w_{st} h_{t3} \quad (19)$$

式中  $D_{sy}$  为定子轭径。

槽满率  $k_u$  为

$$k_u = \pi N_p N d_{co}^2 / (4S_s) \quad (20)$$

式中  $d_{co2}$  为漆包线直径

## 2 设计实例

电磁设计过程是根据整距绕组分块转子 SRM 的设计目标, 应用电磁设计的经验计算公式, 对主要结构参数进行初步计算, 然后进行有限元电磁场计算, 在此基础上再用计算机仿真进行分析校核, 并反复多次调整设计参数, 最后才能获得较为合理的结果。

以三相 12/8 结构整距绕组分块转子 SRM 为例, 样机设计目标如下: 额定功率  $P_2 = 1000$  W; 主绕组额定电压 198 V; 额定转速  $n = 3600$  r/min; 系统效率  $\eta = 0.76$ ; 铁心材料为 35DW250; 冷却方式采用自然冷却。

取气隙长度  $\delta = 0.25$  mm,  $B_\delta = 1.3$  T, 磁路的磁压降系数  $k = 1.05$ ,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m, 叠片系数为  $k_c = 0.95$ ,  $k_m = 0.143$ , 取功率系数  $k_{em} = 1.05$ , 取峰值电流系数  $k_i = 0.5$ 。另外, 根据 1.1 节的分析, 并考虑定转子极宽尺寸加工测量的方便性, 取定子极弧系数为  $\alpha_s = 0.748$ ,  $\alpha_r = 0.8332$ 。

将上述参数代入式(12), 得

$$DL = \frac{30\mu_0 k_{em} P_2}{\pi k_c k_i^2 c (1 - k_m) Z_s (2\alpha_r - 1) n B_\delta^2 k^2 \delta} = 4614 \text{ mm}^2 \quad (21)$$

取  $D = 73$  mm,  $L = 63$  mm, 此时  $DL = 4599 \text{ mm}^2$ 。

电机一相绕组串连, 即一相支路数  $c = 1$ , 代入式(17), 得到绕组匝数:

$$N = \frac{\sqrt{2cmU_s\eta B_\delta k\delta k_i}}{\mu_0 P_2} = 86.7 \quad (22)$$

经过有限元仿真分析, 最终取  $N = 83$ 。由于采用自然冷却, 取电流密度  $J = 4$  A/mm<sup>2</sup>, 选取的漆包线铜芯标称直径  $d_{co} = 0.71$  mm, 漆包线直径  $d_{co2} = 0.76$  mm, 代入式(18), 得绕组并绕股数:

$$N_p = \frac{8P_2}{\pi m U_s \eta J d_{co}^2} = 2.797 \quad (23)$$

取并绕股数  $N_p=3$ ，槽满率为

$$k_u = \pi N_p N d_{co2}^2 / (4S_s) = 41.3\% \quad (24)$$

取定子齿宽、定子轭高和转子齿高相等，即  $w_{st} = h_r = h_{sy} = 7.5 \text{ mm}$ 。取定子齿高  $h_{st} = 18 \text{ mm}$ 。

以上尺寸基本满足式(14)的要求。

最终优化后的电机主要尺寸如表 1 所示。

表 1 样机结构参数

Tab. 1 Parameters of the prototype

参数	数值	参数	数值
定子外径/mm	124	铁心叠长/mm	73
定子轭高/mm	7.5	定子极高/mm	18
转子极高/mm	7.5	转子外径/mm	72.5
定子极弧系数	0.748	转子极弧系数	0.833 2
绕组匝数	83	槽满率/%	41.3

图 6 为转子块和硬铝 LY12CZ 材料的转子非导磁套实物图。为了在径向上固定转子块，在不影响转子磁路的条件下，将转子块的底部设计成 T 型槽，方便嵌入在非导磁套中；图 7 为样机定子和转子的实物图。

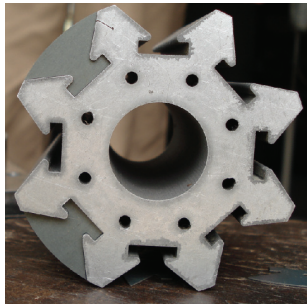


图 6 转子块和转子铝套实物图

Fig. 6 Photograph of the segmental rotor and aluminum rotor block

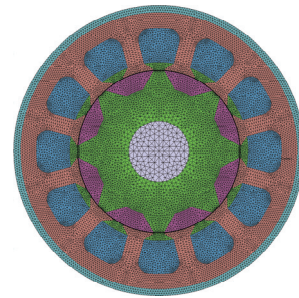


图 7 样机实物图

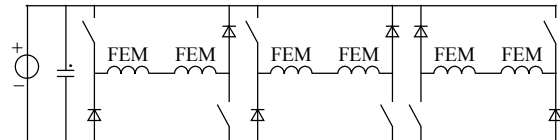
Fig. 7 Photograph of the prototype

### 3 仿真与实验

利用有限元法对样机进行动态电磁性能仿真，图 8 为场路耦合的有限元软件 JMag-Studio 建立的样机的有限元模型和功率电路<sup>[19-20]</sup>。



(a) 有限元模型



(b) 功率电路

图 8 样机的有限元模型和功率电路

Fig. 8 Finite element model and power circuit of the prototype

图 9、10 分别为母线电压 198 V，额定转速 3 600 r/min，导通角  $-2^\circ$ ，关断角为  $-16^\circ$  时样机的三相电流和电磁转矩波形，此时电机的平均电磁转矩为 2.937 N·m，电磁功率为 1 107 W。

图 11 为分块转子 SRM 的实验平台，其中转速转矩测试仪输出信号为幅值 5 V 的方波信号，频率

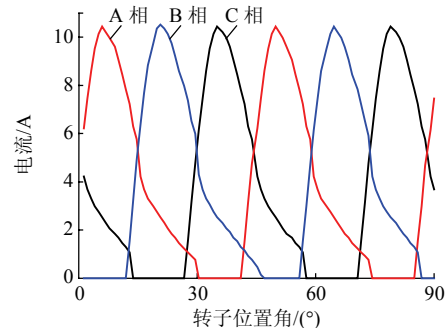


图 9 额定状态下样机的仿真相电流波形

Fig. 9 Simulation phase currents waveforms of the prototype

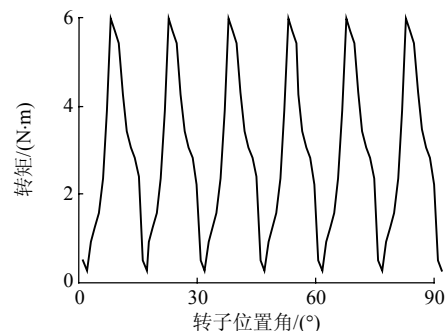


图 10 额定状态下样机的合成转矩波形

Fig. 10 Simulation total torque waveform of the prototype

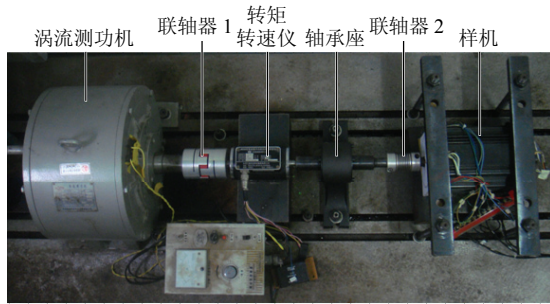


图 11 样机实验平台

Fig. 11 Experimental platform of the prototype

根据转矩或转速的值变化。输出转矩(反向)为

$$M_r = M_f (f_0 - f_r) / (f_0 - f_r) \quad (25)$$

式中:  $M_f$  为转矩满量程, 本型号转矩测试仪为转矩满量程为 20 N·m;  $f_r$  为实测转矩输出频率值, Hz;  $f_r$  为满量程输出频率值(反向), 大小为 4.976 kHz;  $f_0$  为空载时输出频率值, 大小为 9.991 kHz( $f_r$  及  $f_0$  由传感器测试说明书提供)。

转速输出值为

$$n = 60f/z \quad (26)$$

式中:  $f$  为实测转速输出频率值, Hz;  $z$  为传感器测速盘齿数, 本实验中为 900 齿。

图 12 为样机起动时相电流波形, 斩波限为 15 A。图 13、14 分别为转速为 3 668 r/min 时的相电

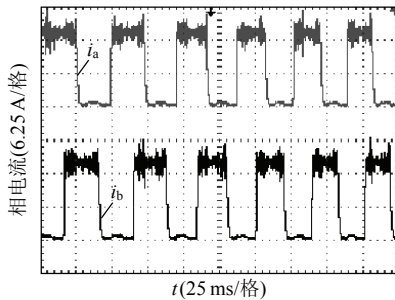


图 12 样机起动相电流波形

Fig. 12 Phase current waveform of the prototype on starting operation

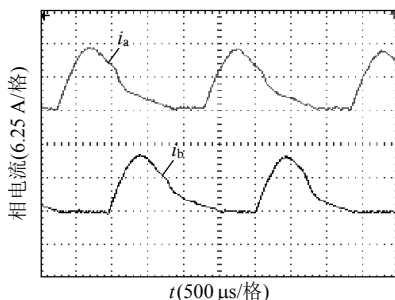


图 13 样机额定负载时相电流波形

Fig. 13 Phase current waveform of the prototype under rated load

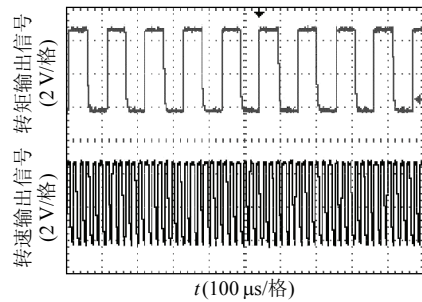


图 14 样机额定负载时转矩转速仪输出波形

Fig. 14 Output waveform of torque and rotational speed sensor under rated load

流和转矩波形, 由式(25)可计算出此时输出转矩为 2.72 N·m, 输出功率为 1 045 W, 达到电机的设计功率。

#### 4 结论

本文从整距绕组分块转子 SRM 的工作原理和磁路特点出发, 研究了整距绕组分块转子 SRM 的电磁设计方法, 并得到如下结论:

1) 整距绕组分块转子 SRM 的定子极弧系数( $\alpha_s$ )和转子极弧系数( $\alpha_r$ )具有固定的线性关系, 一般为了提高分块转子 SRM 的出力,  $\alpha_s$  和  $\alpha_r$  取在此直线上端点位置附近比较合适(即  $\alpha_s$  和  $\alpha_r$  取较大值);

2) 将绕组电流波形等效于方波, 推导出了整距绕组分块转子 SRM 的主要尺寸计算公式及绕组参数设计公式, 以一台 1 000 W 的样机为例, 通过仿真分析和样机实验验证了本文提出的整距绕组分块转子 SRM 的设计方法的有效性。

#### 参考文献

- [1] Mecrow B C, Finch J W, EI-Kharashi E A, et al. Switched reluctance motors with segmental rotors[J]. IEE Proceedings-Electric Power Application, 2002, 149(4): 245-254.
- [2] Mecrow B C, EI-Kharashi E A, Finch J W, et al. Preliminary performance evaluation of switched reluctance motors with segmental rotors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(4): 679-686.
- [3] Oyama J, Higuchi T, Abe T, et al. The fundamental characteristics of novel switched reluctance motor with segment core embedded in aluminum rotor block[C]//Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems. Nanjing, China: CES & CSEE & National Nature Science

- Foundation of China, 2005: 515-519.
- [4] Oyama J, Higuchi T, Abe T, et al. Novel switched reluctance motor with segment core embedded in aluminum rotor block[J]. IEEJ Transactions on Industry Applications, 2006, 126(4): 385-390.
- [5] Attikuti N, Rallabandi V, Fernandes B G. A novel high torque and low weight segmented switched reluctance motor[C]//2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Rhodes, Poland: IEEE, 2008: 1223-1228.
- [6] Mecrow B C, El-Kharashi E A, Finch J W, et al. Segmental rotor switched reluctance motors with single-tooth windings[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2003, 150(5): 591-599.
- [7] Hall R, Jack A G, Mecrow B C, et al. Design and initial testing of an outer rotating segmented rotor switched reluctance machine for an aero-engine shaft-line-embedded starter/generator[C]//2005 IEEE International Conference on Electric Machines and Drives. San Antonio, USA: IEEE, 2005: 1870-1877.
- [8] Higuchi T, Ueda T, Abe T. Torque ripple reduction control of a novel segment type SRM with 2-steps slide rotor[C]//2010 International Power Electronics Conference (IPEC). Sapporo, Japan: IEEE & IET & Nanyang Technological University, 2010: 21-24.
- [9] Higuchi T, Suenaga K, Abe T. Torque ripple reduction of novel segment type switched reluctance motor by increasing phase number[C]//2009 International Power Electronics Conference (IPEC). Tokyo, Japan: IEEE, 2009: 1-4.
- [10] Rahman K M, Fahimi B, Suresh G, et al. Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: design and control issues[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(1): 111-121.
- [11] 刘迪吉. 开关磁阻电机发展及应用[J]. 电气技术, 2006(7): 17-19.  
Liu Diji. Development and application of the switched reluctance motor[J]. Electrical Engineering, 2006(7): 17-19(in Chinese).
- [12] Schramm A, Gerling D. Researches on the suitability of switched reluctance machines and permanent magnet machines for specific aerospace applications demanding fault tolerance[C]//2006 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Taormina, Italy: IEEE, 2006: 56.
- [13] 周强, 严加根, 刘闯, 等. 航空开关磁阻发电机双通道容错性能研究[J]. 航空学报, 2007, 28(5): 1146-1152.  
Zhou Qiang, Yan Jiagen, Liu Chuang, et al. Research on fault-tolerant performance of dual-channel of aviation switched reluctance generator[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2007, 28(5): 1146-1152(in Chinese).
- [14] 陈小元, 邓智泉, 范娜, 等. 双极性分块转子开关磁阻电机[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(10): 1-7.  
Chen Xiaoyuan, Deng Zhiquan, Fan Na, et al. Bipolar switched reluctance motors with segmental rotor[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(10): 1-7(in Chinese).
- [15] Mecrow B C. Fully pitched winding switched reluctance and stepping motor arrangements[J]. IEE Proceedings B-Electric Power Applications, 1993, 140(1): 61-70.
- [16] 周强. 高速开关磁阻电机的关键技术研究与实践[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.  
Zhou Qiang. The research and practice on key techniques of high speed switched reluctance machine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009(in Chinese).
- [17] 陈昊. 开关磁阻调速电动机的原理·设计·应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000: 70-72.  
Chen Hao. Principle, design and application of switched reluctance motor drive[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2000: 70-72(in Chinese).
- [18] 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: 119-124.  
Wu Jianhua. Design and application of switched reluctance machine [M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 119-124(in Chinese).
- [19] 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.  
Yang Li, Liu Chuang, Yan Jiagen. A study on iron loss finite element analysis of switched reluctance motor based on a double-frequency method[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 117-121(in Chinese).
- [20] 刘闯, 周强, 杨丽. 开关磁阻电机两种绕组连接方式的铁心损耗[J]. 电工技术学报, 2007, 22(11): 41-45.  
Liu Chuang, Zhou Qiang, Yang Li. Iron loss on two types of windings connection for switched reluctance motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(11): 41-45(in Chinese).

收稿日期: 2011-03-07。

作者简介:

陈小元(1980), 男, 博士研究生, 研究领域为开关磁阻电机设计与控制, xychen610@nuaa.edu.cn;

邓智泉(1969), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为磁悬浮电机、磁通切换电机等特种电机。



陈小元

(责任编辑 李婧妍)