

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.05.013

# 单相开关磁阻电机径向力的研究

张 辉, 瞿遂春, 王 旭, 邱爱兵

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 针对开关磁阻电机特殊双凸极结构和非线性磁饱和产生较大电磁噪声的问题, 设计一台相数最少的新型结构单相开关磁阻电机。对引起电磁噪声的径向力进行计算, 分析径向力的产生原理和分布情况, 采用有限元仿真软件 Ansoft 对其进行静态和动态磁场的仿真, 并从结构参数出发对定子所受径向力进行优化, 从而减少单相开关磁阻电机的电磁噪声和转矩脉动。

**关键词:** 单相开关磁阻电机; Ansoft; 有限元仿真; 电磁噪声

**中图分类号:** TM352

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2014)05-0064-04

## Research on the Radial Force of Single-Phase Switched Reluctance Motor

Zhang Hui, Qu Suichun, Wang Xu, Qiu Aibing

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In view of problems of switched reluctance motor's special doubly salient structure and nonlinear magnetic saturation resulting in large electromagnetic noise, designed a new structural single-phase switched reluctance motor to compute the radial force which causing electromagnetic noise, and analyzed the radial force generation principle and distribution. Applied finite element simulation software Ansoft to simulate its static and dynamic magnetic field, and from structural parameters optimized the radial force on stator, thereby reducing electromagnetic noise and torque ripple of single-phase switched reluctance motor.

**Keywords:** single-phase switched reluctance motor; Ansoft; finite element simulation; electromagnetic noise

## 0 引言

开关磁阻 (switched reluctance) 电机 (SR 电机) 具有结构简单坚固、调速范围宽, 在整个调速范围内都具有较高效率, 可靠性高等诸多优点<sup>[1]</sup>。近年来, 由 SR 电机构成的调速系统迅速成为继变频调速系统、无刷直流电动机调速系统的最新一代无极调速系统。SR 电机调速系统主要由开关磁阻电机、功率变换器、控制器与位置检测器 4 部分组成。SR 电机调速系统已成功地应用于通用工业、家用电器和

纺织机械等领域。

SR 电机调速系统是一个多可控量, 强耦合的非线性系统<sup>[1]</sup>, 加上电机本身特殊的双凸极结构, 使电机转动过程中存在显著的边端效应和局部饱和现象, 导致 SR 电机磁路的高度非线性<sup>[2]</sup>, 从而产生转矩脉动和电磁噪声等问题。研究表明: 电磁噪声是由电机运行时径向吸力导致的定子形变激发定子振动而产生的, 径向吸力是维持电机转动的电磁力的径向分量。因此, 从电磁噪声和振动最明显、结构最简单坚固、实用性最大的单相 SR 电机出发, 进行径向

收稿日期: 2014-08-04

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (61104028)

作者简介: 张 辉 (1989-), 男, 湖北麻城人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力传动技术及其故障诊断,

E-mail: 525306186@qq.com

力相关研究是SR电机减震降噪的重要环节。

### 1 单相SR电机

单相SR电机控制相对简单、灵活,造价低。为解决普通单相SR电机无法自启动和转矩非连续性的缺点,采用如图1所示加入了永磁体的SR电机。定子绕组通电时,转子受到气隙中扭曲磁力的作用而逆时针旋转,从启动前由永磁体单独控制的位置(如图1所示),到由永磁体和励磁磁极共同控制的不对齐位置,实现自启动。

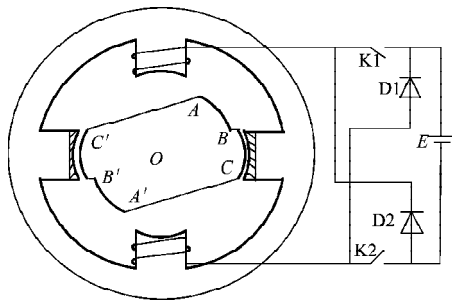
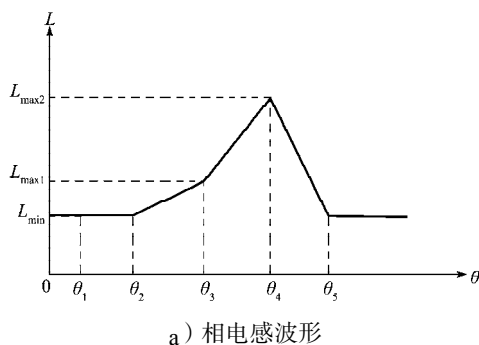


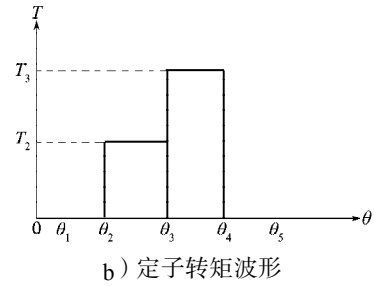
图1 单相开关磁阻电机结构图

Fig. 1 The structural diagram of single-phase switched reluctance motor

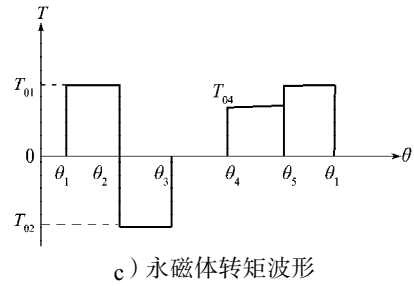
定义转子短磁极与永磁体磁极轴线重合位置为转子位置角 $0^\circ$ 位置,绕组相电理想线性曲线如图2a所示。为简化分析,取定子和转子极弧均为 $45^\circ$ 机械角,转子转过 $112.5^\circ$ 期间,绕组相电感从最小值(转角为 $\theta_1$ )到最大值(转角为 $\theta_2$ ),再经过 $67.5^\circ$ 回到最小电感位置。一个电感变化周期为 $180^\circ$ (转角在 $0$ 与 $\theta_5$ 之间)。一定绕组电流产生的转矩如图2b所示。永磁体磁导率与空气接近,因而可认为其磁路线性,永磁体等效视为电流为 $i_0$ 的恒流线圈,其产生的转矩如图2c所示。两者合成的静态转矩如图2d所示。由图2c与2d可知:合理的永磁体设计和气隙调整可以实现单相SR电机的自启动和转矩非连续,还能使合成转矩各段相差较小,有利于减少转矩脉动。另外选择剩磁感应大,矫顽力高的钕铁硼等,有助于减小电机体积和质量。



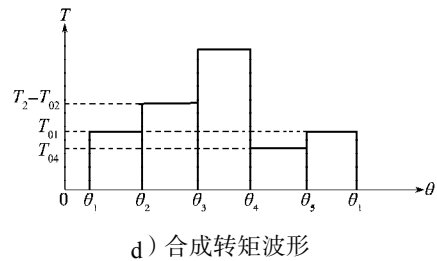
a) 相电感波形



b) 定子转矩波形



c) 永磁体转矩波形



d) 合成转矩波形

图2 单相SR电机特性曲线

Fig. 2 The characteristic curve of single-phase switched reluctance motor

### 2 径向力与电磁噪声

SR电机因不对称磁拉力而转动,磁拉力可以分为沿着半径方向的径向力和垂直于半径方向的切向力。切向力作用于转子上并产生电磁转矩,驱动电机转动;而径向力则由于垂直于电机运动方向和轴径,不但不能产生所需的电磁转矩,反而缩小电机定、转子间的气隙空间。定子是壳体结构,很容易在径向吸力作用下发生形变而产生电磁噪声<sup>[3]</sup>。

采用麦克斯韦应力法计算径向力,将给定体积 $V$ 的磁质内的合力和力矩等效为包围 $V$ 表面的 $S$ 面上各张力的合力,即

$$F = \oint_S T dS = \int_V f dV, \quad (1)$$

式中: $V$ 为物体体积;

$S$ 为包围 $V$ 的任意闭合曲面;

$T$ 为电磁场张力张量;

$f$ 为单位体积内的磁质力。

将 $F$ 分解为沿着磁力线方向的张力和垂直于磁力线方向的压力,则其法向力 $F_n$ 和切向力 $F_t$ 为

$$F_n = \frac{1}{2\mu_0} \iint_S (B_n^2 - B_t^2) dA, \quad (2)$$

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} \iint_S B_n B_t dA, \quad (3)$$

式(2)~(3)中： $\mu_0$ 为真空磁导率；

$B_n$ 为法向上的磁密；

$B_t$ 为切向上的磁密。

积分路径的选择会影响径向力计算结果和精度，合适的积分路径可以方便地计算交界面上的电磁力。为获得较精确的数值结果，选取包围定子极并且穿过定子轭的完整闭合路径。假设定子极两边的轭部分磁密相同，并且忽略其他路径段上的磁场，则实际有效部分只是定子极下沿的直线段。在此积分路径上的径向力可表示为

$$F_r = \frac{h}{2\mu_0} \int (B_r^2 - B_t^2) dl, \quad (4)$$

式中： $h$ 为铁心叠片长度；

$B_r$ 为径向上的磁密。

### 3 径向力仿真与优化

为了较好地分析单相SR电机径向力，给出表1所示样机参数<sup>[4]</sup>。

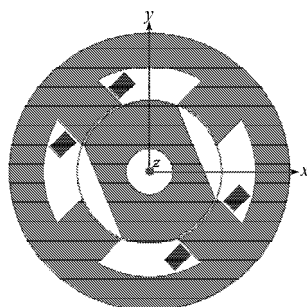
表1 单相SR电机主要结构参数

Table 1 The main structural parameters of single-phase switched reluctance motor

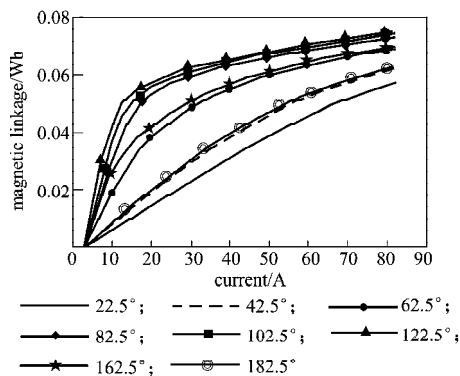
参数	取值	参数	取值
额定功率/W	900	额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	16 200
定子极数	4	转子级数	2
定子外径/mm	72	转子外径/mm	37
定子轭高/mm	8.68	转子极弧/(°)	45
定子槽深/mm	8.47	永磁磁极/(°)	45
定子极弧/(°)	45	永磁体长度/mm	0.3
第一气隙/mm	0.35	铁心长度/mm	45
第二气隙/mm	0.65	每相绕组匝数	150

由样机参数可得如图3所示的电机仿真模型和磁化曲线。由图可知，随着相电流的不断增加，磁场会逐渐趋于饱和。这符合单相SR电机内部电磁场的一般分布规律。

图4为在整个气隙圆弧中的径向磁通密度波形，图5为整个气隙圆弧中的切向磁通密度波形，两者都是在额定转速为16 200 r/min，时间为0.005 s条件下得出的仿真波形。在获得电机气隙径向磁密 $B_r$ 和切向磁密 $B_t$ 后，就可以利用场计算器按照式(4)计算电机定子所受的径向力<sup>[5]</sup>。



a) 单相SR电机模型



b) 单相SR电机磁化曲线簇

图3 单相SR电机模型与磁化曲线

Fig. 3 Single-phase SRM model and the magnetization curve

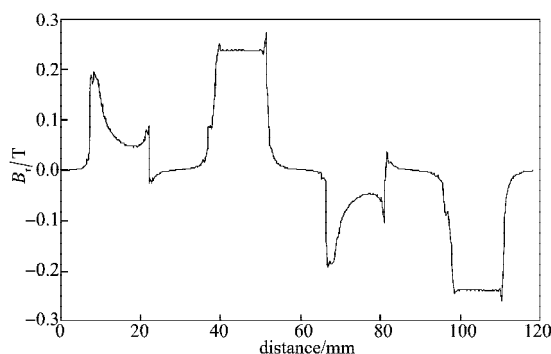


图4 径向磁密曲线

Fig. 4 Radial flux density curve

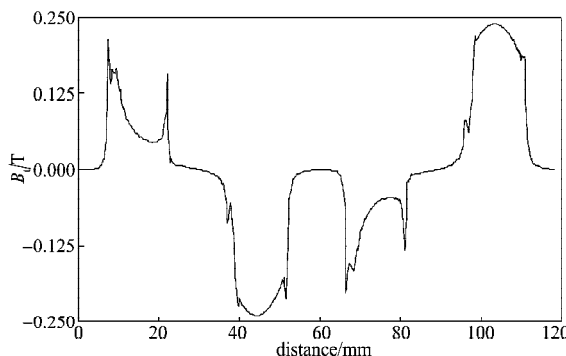


图5 切向磁密曲线

Fig. 5 Tangential flux density curve

图6为单相SR电机定子极上的径向力曲线。由图可知，径向力是随时间，以及转子位置角周期性地脉动，这种脉动波有很高的尖峰值，这表明在电机运行过程中定子所受的径向力不稳定，会严重影响转矩脉动。在定子极与转子极最大不对齐位置处的径向力最小；在定子凸极与转子长短极中心线对齐位置（最大电感位置）处的径向力最大。由于电机发生形变的主要结构是定子壳体，因此在最大电感位置处有最大噪声，并且最大限度地加剧转矩脉动，定子也是在此刻最易发生形变。

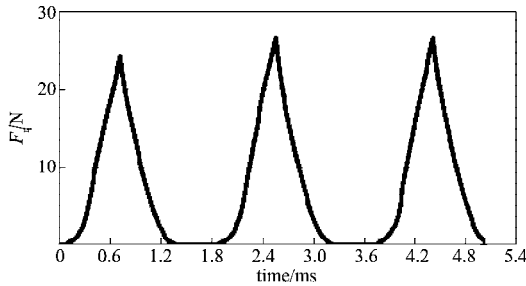


图6 单相SR电机定子极径向力曲线

Fig. 6 Stator pole radial force curve of SSRM

图7为定子径向力关于相电流和转子位置角的函数关系曲线。由图可知，从总体上看，径向力有随相电流和转子位置角的增加而逐渐增大的趋势，但有一个饱和点，无论是相电流还是转子位置角，超过自身饱和点就不会继续增加。具体地，在相电流为0~10 A，转子位置角小于等于77.5°范围内（即转子短极与定子极有部分重合，转子长极开始与定子极产生磁场效应的位置），由于气隙的间距较大，电流较小，磁路不饱和，使径向力偏小；在转子位置角增大过程中，转子长极慢慢与定子极重合，磁场开始分布不均，磁场不饱和区域的径向力增加较大，随着相电流的增加，气隙饱和程度增加，径向力也就较缓慢增加；直到转子位置角到达90°以后，多数磁通均匀通过定转子和气隙形成闭合回路，径向力基本饱和保持不变，最大径向力保持在转角为135.5°左右，此时转子长极与定子极中心线完全重合，径向力导致气隙缩小，有最大噪声。

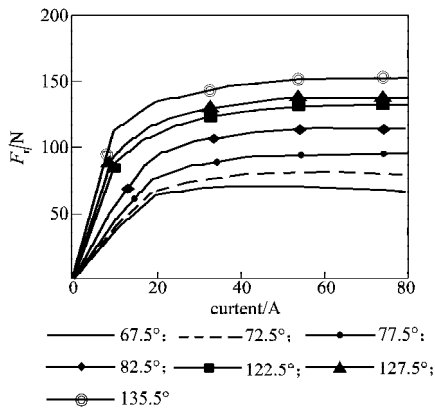


图7 径向力关于电流和角度的曲线

Fig. 7 Radial force curve for current and angle

图8为只考虑铁心叠片长度时，单相SR电机径向力与铁心长度的关系曲线。由图可知，随着铁心长度的增加，径向力相应减小，但径向力变化的幅值和频率会慢慢降低，径向力虽然随铁心长度增大而减小，但永远不会消失。从径向力方面看可以保持较大的铁心长度，但过大的铁心长度会造成严重的转矩脉动以及铜和铁的过量使用，优化时需要综

合考虑，合理取值。

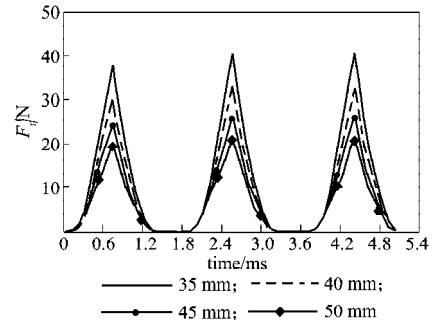


图8 径向力关于铁心长度的波形

Fig. 8 Radial force waveform for core length

图9为只考虑定子极弧时，单相SR电机定子所受径向力与定子极弧之间的关系曲线。由图可知，在一定范围内，单相SR电机径向力随着定子极弧的增大有减小的趋势；定子极弧在43°时径向力有最大值，大于或者小于此值径向力都减小。当定子极弧大于45°后继续增加，径向力逐渐减少，但变化并不明显；当定子极弧小于43°后继续减小，径向力有减小的趋势，但过小的极弧使得电感重叠系数减小，SR电机无法启动，并且导致转动脉动过大。综合考虑，单相SR电机的定子极弧最优化取值为43°~45°。

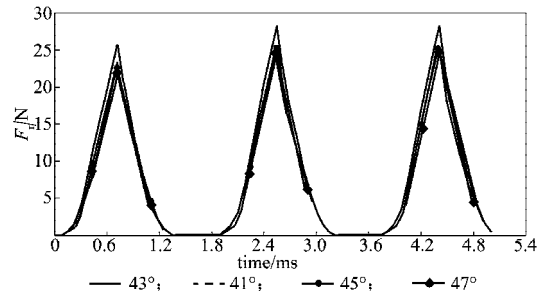


图9 径向力关于定子极弧的波形

Fig. 9 Radial force waveform for stator pole arc

根据图8和图9可知，单位铁心长度对电机径向力的变化幅值的影响要大于单位极弧大小对径向力的变化幅值的影响。因此，铁心长度对单相SR电机的影响比定子极弧的影响更大<sup>[6]</sup>。

## 4 结语

本文基于有限元仿真软件Ansoft对单相SR电机进行了径向力方面的仿真研究，并给出所设计的单相SR电机部分结构尺寸和额定参数。利用麦克斯韦应力张量法给出径向力在特定积分路径上的函数解析式，并进行动静磁场有限元仿真。通过径向力仿真结果，完成电机结构参数的优化，最终实现单相SR电机参数最优化，为SR电机的结构优化提供参考。

(下转第83页)