

开关磁阻电机两种绕组连接方式下铁心损耗的有限元计算

刘 闯 周 强 杨 丽

南京航空航天大学航空电源重点实验室

开关磁阻电机两种绕组连接方式下铁心损耗的有限元计算

Iron Loss FEM Analysis on Two Types of Winding Connection for Switched Reluctance Motor

刘 闯 周 强 杨 丽

南京航空航天大学航空电源重点实验室

摘 要：本文基于电磁场有限元分析软件 JMAG-Studio，用动态有限元方法对比分析了一台 3 相，12/8 结构开关磁阻电机在两种绕组连接方式下的磁场分布。在 (r, θ) 坐标系中细致描述了电机定子铁心和转子铁心特征区域的磁密的周期性变化规律，并比较了两种绕组连接方案对电机磁场的谐波含量及其铁耗等的影响，从而为定子绕组的优化设计提供了基础。

关键词：开关磁阻电机 绕组连接 铁耗 有限元法 JMAG-Studio

Abstract: Based on JMAG-Studio software of Finite-element Analysis in Electromagnetic Fields, this paper compares the magnetic fields of a three-phase 12/8 pole prototype switched reluctance motor under two different winding connections by using two-dimensional finite element analysis. The periodic distribution and changes in magnetic flux densities of the motor are described in detail using a coordinate of system (r, θ) . The effect of two different winding connections on the magnetic field harmonic component and iron loss are then discussed. As a result, an optimization stator winding is proposed.

Key words: switched reluctance motor, Winding Connection, Iron Loss, Finite Element Analysis, JMAG-Studio

引言

开关磁阻电机 (Switched Reluctance Motor 简称 SR 电机) 具有双凸极结构，其定、转子铁心中磁场的变化规律比较复杂，存在高度的局部饱和现象，具有强的非线性关系，且定、转子磁场的变化频率也不相同^{[1][2]}，因此非线性建模及铁耗计算一直是 SR 电机研究的技术难点。随着对 SR 电机研究的深入和有限元技术的发展，SR 电机的设计和优化，特别是高速运行时的性能预测十分需要对电机铁心损耗进行准确的预估，业内人士广泛关注的电机温升分析也需进行铁损计算，为了更深入地研究 SR 电机各部分的磁场变化频率、铁心损耗、热分析等，有必要对其进行动态磁场的有限元分析。

由于电机铁心各点磁密是随时间变化着的空间矢量，即在一个 (r, θ) 坐标系 (将空间矢量分解为径向分量和切向分量) 中，各点磁密都存在 r 分量和 θ 分量，但目前的绝大部分文献中均假设：定、转子齿的磁通只有 r 分量，而定、转子轭的磁通只有 θ 分量^{[1][2]}。本文的磁场计算未作该假设，给出了铁心各部分磁密的 r 分量和 θ 分量。为了清晰地表述磁场

的周期变化信息,本文采用 JMAG-Studio 动态磁场有限元软件对比分析了两种定子绕组连接方式时电机铁心的磁场变化。由于磁密波形含有大量的谐波分量,采用 MATLAB 对其进行了离散傅立叶分解。在此基础上计算并对比了两种方案下电机的铁心损耗,为开关磁阻电机绕组的优化设计提供了理论基础。

1. 12/8 结构 SR 电机两种绕组方式

电机内的磁场分布主要与绕组的连接方式、相邻相极性、通电相数及相绕组之间的连接有关^[3]。目前已有为数不多的文章对 SR 电机绕组的连接方式进行了研究^{[3][4]},一般针对相邻相极性不同展开研究。

本文对一台 2.5hp、3200rpm、3 相 12/8 结构,由不对称半桥驱动的 SR 电动机进行了磁场的有限元分析。电机工作在额定转速,仅采用角度位置控制,导通角度 $\theta_c = 20^\circ$ 。样机的铁心材料为硅钢片 50W470,叠厚 140mm,叠片系数 95%,定子外径为 105mm,气隙为 0.3mm。样机的截面图和绕组连接方式如图 1a, b 所示。图 1a 所示为对称磁场,即定子齿的磁场为 S-N-S-N-...;图 1b 所示为不对称磁场,即定子齿的磁场为 S-S-S-N-N-N-...,以下简称图 1a 连接方式为方案 1,图 1b 为方案 2。目的是通过对称及不对称的磁场分析,更能说明 SR 电机磁场的变化规律和谐波含量的不同,以及这两种不同的方式对电机的铁耗的影响,从而为电机的绕组连结方式优化设计提供依据。

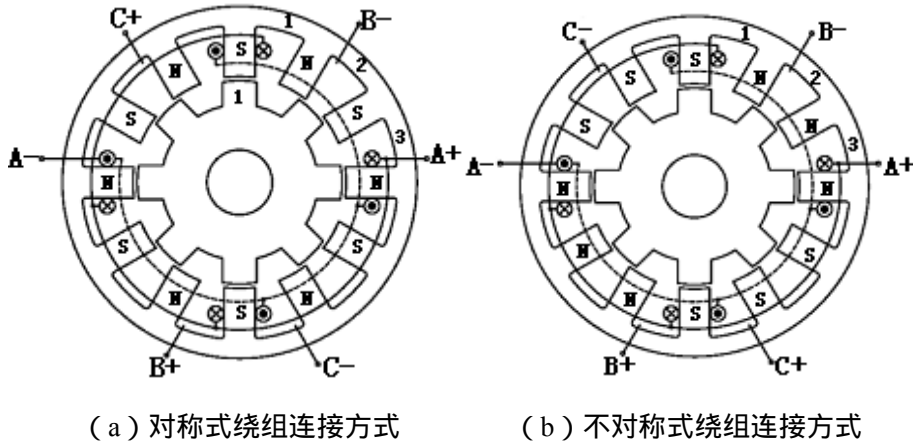


图 1 两种绕组连接方式

2. SR 电机动态磁场波形分析

本文用 JMAG-Studio 电磁场有限元分析软件分别对图 1 所示的对称式和不对称式绕组连接模型进行建模分析,为简化模型,忽略末端效应。在一个 (r, θ) 坐标系中,各点磁密都存在 r 分量和 θ 分量,即某有限单元的磁密可表示为:

$$\vec{B}_t = B_r(t) \cdot \vec{e}_r + B_\theta(t) \cdot \vec{e}_\theta \quad (1)$$

定义 r 分量由内向外为正, θ 分量逆时针为正,通过磁场仿真可以得到 $B_r(t)$ 和 $B_\theta(t)$ 随时间变化的波形,本文给出 SR 电机定子齿,定子轭,转子齿,转子轭等一些重要位置的磁密波形。位置如图 2 所示。

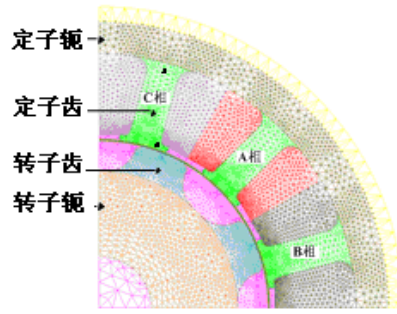
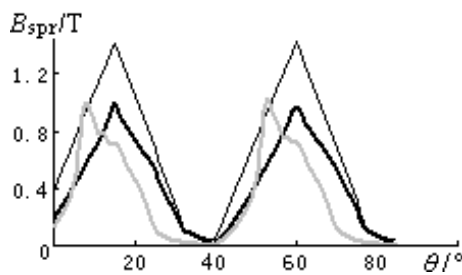
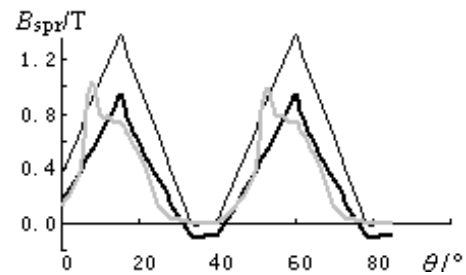
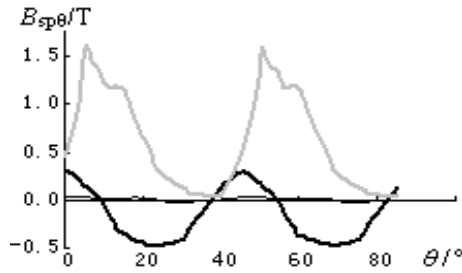
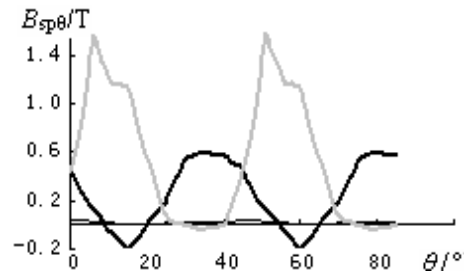


图 2 SR 电机铁心截面上的四个单元

2.1 定子齿

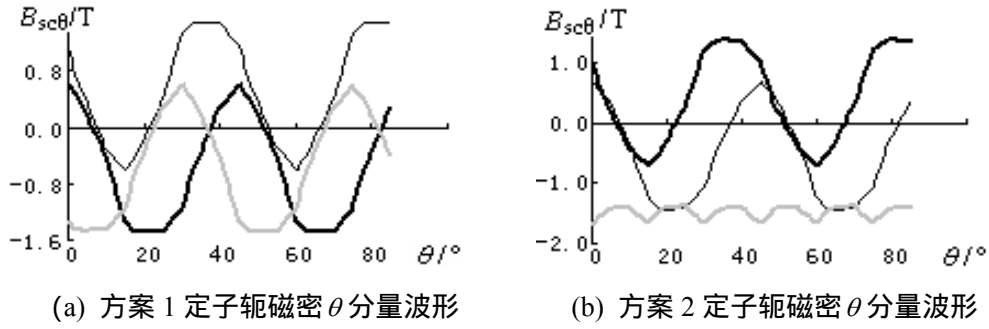
(a) 方案 1 定子齿磁密的 r 分量波形(b) 方案 2 定子齿磁密的 r 分量波形(c) 方案 1 定子齿磁密的 θ 分量波形(d) 方案 2 定子齿磁密的 θ 分量波形图 4 两种方案下定子齿磁密 θ 分量波形对比

图中，——极根部，——极中部，——极尖部。

图 3a 给出了方案 1 时 A 相定子齿前极尖、极中部和极根部单元磁密的 r 分量波形，图 3b 则对应方案 2 时各单元的 r 分量波形。图 3c 给出了方案 1 时 A 相定子齿前极尖、极中部和极根部的磁密的 θ 分量波形，图 3d 则对应方案 2 时各单元的 θ 分量波形。

从图中可以看出，两种方案的定子齿各单元的磁密变化频率相同，周期对应转子角度为 45° 。其中，极中部单元磁密 θ 分量几乎为零，这是由于在极中部磁力线全是顺着齿极方向向内或向外，即只有 r 分量。前极尖和极根部磁密含有较大的 θ 分量，特别是前极尖，其 θ 分量甚至大于 r 分量。

2.2 定子轭

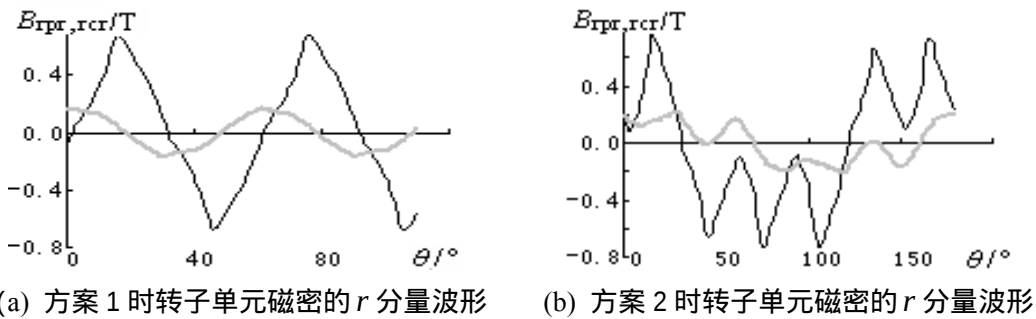
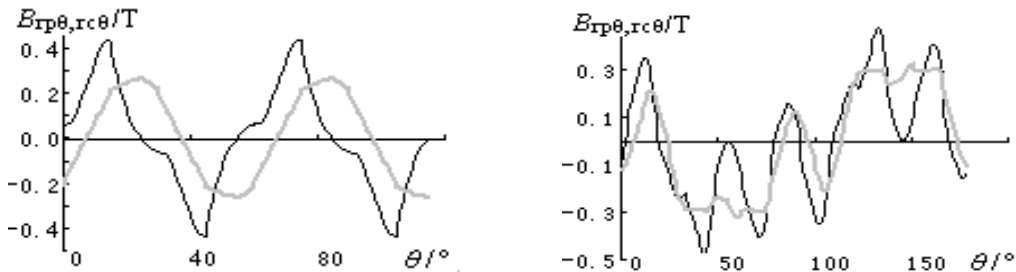
图 4 两种方案下定子轭磁密 θ 分量波形对比

图中，——定子轭 1，——定子轭 2，——定子轭 3。

图 4a 给出了图 1a 所示定子轭 1, 2, 3 为中部单元的磁密 θ 分量波形，图 4b 则对应方案 2 时各单元的 θ 分量波形。

仿真发现，定子轭中部各单元磁密几乎不含 r 分量。对方案 1，定子轭 1, 2, 3 各单元的磁密变化频率相同，且与定子齿频率一致，周期为对应转子角度为 45° 。对方案 2，如图 4b，定子轭 1, 2 单元的磁密变化频率相同，且与定子齿一致，周期为对应转子角度为 45° ，定子轭 1、2 单元的磁密波形分别与方案 1 时定子轭 2、1 单元的磁密波形较为相似，但定子轭 3 却有明显不同，在一个周期内，磁密全为负（顺时针变化）。

2.3 转子齿、转子轭

图 5 两种方案下转子铁心 r 分量磁密波形对比图 6 两种方案下转子铁心 θ 分量磁密波形对比

图中，——转子齿，——转子轭。

图 5a 给出了方案 1 时转子齿和转子轭单元磁密的 r 分量波形,图 5b 则给出方案 2 时对应单元的 r 分量波形。图 6a 给出了方案 1 时转子齿和转子轭单元磁密的 θ 分量波形,图 6b 则给出方案 2 时对应单元的 θ 分量波形。

从图中可以看出,两种方案下,转子齿和转子轭各单元磁密均含有不可忽略的 r 分量和 θ 分量。转子齿单元 r 分量占较大比例,转子轭单元 θ 分量占较大比例。方案 1 时转子各单元的磁密变化频率相同,对应转子角度 60° 。方案 2 时转子各单元的磁密频率一致,对应转子角度 180° ,表明绕组连接方式不同时,转子铁心磁场有很大差异。这是由于方案 1 时,定子齿磁场 N-S-N...分布,每相隔 60° 空间位置,与定子齿极性相同;方案 2 时,如图 1b 所示,定子齿磁场空间位置相差 180° 时,磁极形成一个 S-S-S-N-N-N 的周期,且刚好到达同一相的相对齿极。

3. 两种方案的铁心损耗分析

3.1 SR 电机磁密的谐波分量比较

由上面波形可以看出,SR 电机的磁密是非正弦的,铁心各部分特别是转子铁心的磁密存在大量的谐波分量。采用离散傅立叶分解(DFT)模块,分解出磁密波形的谐波分量。以定子齿中部磁密 r 分量、定子轭 1 中部磁密 θ 分量、转子齿中部磁密 r 分量、转子轭中部磁密 θ 分量为例,其傅立叶分解结果如图 7 所示。

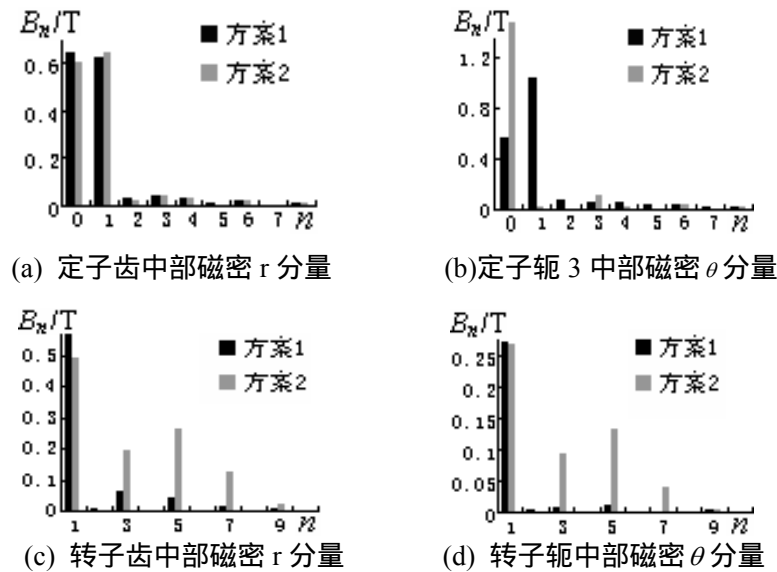


图 7 SR 电机磁密的傅立叶分解

从图中可以看出,方案 2 时转子铁心的谐波含量要较方案 1 时大。两种方案下,定子铁心磁密均同时含有直流分量、奇次谐波和偶次谐波,而转子铁心磁密仅含有奇次谐波成分。

3.2 涡流损耗和磁滞损耗的计算

电机铁心损耗的计算一直就备受关注^[5,6]在磁密为 B 时的正弦磁场中,铁心的单位体积的铁损 (W/m^3) 可表示为:

$$p_{\text{Fe}} = a(B)f + b(B)f^2 \quad (2)$$

利用双频法根据磁场仿真结果动态地得出 $a(B)$ 和 $b(B)$,以达到分离磁滞损耗和涡流损耗的目的。分离出这两种损耗后,在程序中用不同的方法计算,涡流损耗采用傅立叶频率分解法计算,磁滞损耗采用最大磁密值分析。涡流损耗的计算公式为:

$$W_e(W) = \sum_{i=1}^j \left\{ \sum_{m=1}^n b(|B_m|) \times f_m^2 \right\} \times V_i \quad (3)$$

式中, j 是电机铁心(定子齿、轭,转子齿、轭)所含的有限元单元数, n 为计及的谐波次数, f_m 为第 m 次谐波对应的频率,是基波频率 f 的 m 倍, V_i 是各有限元单元的体积。 $|B_m|$ 是指各单元磁密的 r 、 θ 分量分别进行频率分解后,第 m 次谐波对应的两个磁密分量幅值 B_{mr} , $B_{m\theta}$ 的合成值。在复数域中, $|B_m|$ 可表示为:

$$|B_m| = \sqrt{B_{mr} \cdot B_{mr}^* + B_{m\theta} \cdot B_{m\theta}^*} \quad (4)$$

其中, B_{mr}^* , $B_{m\theta}^*$ 分别为 B_{mr} , $B_{m\theta}$ 的共轭复数,由这些量,用式(3)可求得各段铁心得涡流损耗。

磁滞损耗的计算公式为:

$$W_h(W) = \sum_{i=1}^j \left\{ \sum_{p=1}^q a(B_p) \times f \right\} \times V_i \quad (5)$$

式中, q 是磁滞循环的数目,包括主磁滞回线和局部磁滞回线,可认为 q 等于一个周期内磁密波形上下脉动的次数。 $B_p = (B_{p1} - B_{p2})/2$, B_{p1} 、 B_{p2} 分别为一次脉动的最大值与最小值。求得单元的 B_p 后,用与涡流损耗相同的方法求得与其对应的 $a(B_p)$ 。这些量得出后,由式(5)可求得各段铁心得磁滞损耗。而涡流损耗和磁滞损耗之和即为电机铁损大小。以方案1为例,其定、转子铁心的损耗密度云图如图8所示。从比损耗分布云图可看出,该样机定子铁心的比损耗高,且定子轭损耗最大。

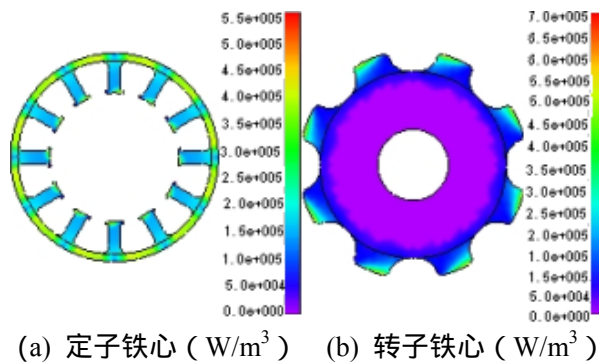


图8 方案1时定子铁心和转子铁心的涡流损耗密度云图

表1 方案1时SR电机铁心各部分的铁损计算值

铁心		定子齿	定子轭	转子齿	转子轭
涡流损耗/W	方案 1	19.59	34.39	7.0	4.20
	方案 2	19.75	24.54	6.61	4.23
磁滞损耗/W	方案 1	10.01	13.22	3.99	3.45
	方案 2	10.0	9.39	2.87	2.70
总铁损/W	方案 1	95.85			
	方案 2	80.09			

方案 1 和方案 2 时 SR 样机的铁损计算结果如表 1 和表 2。由表可以看出,SR 电机的铁心损耗主要集中在定子铁心;方案 1 时电机的铁损较方案 2 时大 19.68%。两者的差值主要是定子轭及转子铁心部分。对比图 4a、图 4b 可以看出,两种方案下,定子轭 3 的铁心磁密波形发生了很大变化,虽然其脉动频率相同,但方案 2 时磁密脉动幅值大为减小,使得该段铁心产生的损耗也大大减小。而在转子铁心部分,两种方案时的磁密频率发生了很大变化,方案 1 时的磁场频率是方案 2 时的 3 倍,但由图 7c、图 7d 可以看出,后者的磁密高频谐波含量要明显大于前者,因而转子铁心的铁损差异不如定子轭部分明显。

4. 结论

本文对 3 相 12/8 结构 SR 电机在两种不同绕组连接方式下分别进行了磁场的动态有限元计算分析,并对铁心各部分的磁密波形进行了傅立叶分解。研究表明,绕组连接方式不同,磁场的变化规律有很大差异,主要表现为铁心各部分的磁密波形和变化频率均有较大不同,从而带来铁心损耗的差异,不对称绕组连接方式更有利于减少铁心损耗。通过分析了两种绕组连接方式的动态磁场,为优化 SR 电机绕组设计、铁心损耗分析及热设计等提供了理论基础。

参考文献

- [1] 林鹤云,周鹗,黄建中等,开关磁阻电机磁场有限元分析与铁耗计算[J],电工技术学报,1996 年 2 月,第 11 卷第 1 期: 24 -29.
- [2] 吴建华,詹琼华,林金铭.开关磁阻电机的磁通波[J],中国电机工程学报,1993,13(5): 57-64.
- [3] 詹琼华,开关磁阻电机绕组连接方式的研究[J],电机与控制学报,2002,6(2).
- [4] Peter N.Materu, Ramu Krishnan. Esitimation of switched reluctance motor losses[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1992,28(3): 668-679.
- [5] Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino, Mario Lazzari *etc.* A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(4): 945-952.
- [6] ShyShenq P.Liou, Jim Ye. Flux distribution and core losses of switched reluctance motors[C], IEEE,1996: 935-938