

# 转子分段斜极对永磁伺服电机性能的影响

王晓宇, 孙 宁, 陈丽香

(沈阳工业大学 国家稀土永磁电机工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110870)

**摘 要:** 着重研究不同分段斜极段数对转矩波动和噪声的影响。通过 Ansoft 软件进行 3D 电磁场计算, 并将 3D 场计算的气隙磁密进行矢量相加, 利用 Ansys 软件将叠加后的平均气隙磁密进行 2D 声场计算, 将分段斜极复杂的 3D 声场计算简单化, 同时提出一种将转子分成两段斜极结构的简单工艺, 并总结了满足该工艺的设计要求。通过试验验证, 该仿真计算与试验基本一致, 为该类电机设计计算提供参考。

**关键词:** 永磁伺服电机; 转子结构; 转矩波动; 噪声; 分段斜极

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)08-0059-06

## Influence of Rotor Step Skewing on Permanent Magnet Servo Motor Performance

WANG Xiaoyu, SUN Ning, CHEN Lixiang

(National Engineering Research Center for REPM Electrical Machine, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** The study focused on the influence of different step numbers on torque ripple and noise of motor. Through the Ansoft to calculate 3D electromagnetic field, and add the air gap flux density vector by 3D electromagnetic field calculation, using Ansys. The average of the air gap flux density after superposition to calculate by 2D sound field. To simplify the complex rotor step skewing 3D sound field calculation. Besides a simple process that the rotor could be divided into two segments skewing structure were put forward, the requirements met the process of design also summarized. Through experimental verification the simulation calculation and test were basically identical. To provide a reference for this kind of motor design and calculation.

**Key words:** permanent magnet servo motor; rotor structure; torque ripple; noise; step skewing

## 0 引 言

随着电力电子技术、计算机技术、新材料技术、控制理论不断发展, 以及装备系统对电机速度、精度和实时性要求的不断提高, 永磁伺服电机得到了空前的发展<sup>[1]</sup>。

永磁伺服电机为满足高端设备高精度的需要, 电机的稳态性能和动态性能均要求很高。电机采用正弦波输出的控制器供电, 因此气隙磁密波形正弦度要好。这样齿槽转矩小、定位准确、控制精度高同时谐波损耗小。在这些方面国内外学者做了大量的研究工作, 文献[2-3]研究了永磁

体充磁方式对永磁电机气隙磁密波形和气隙磁通大小有重要影响, 采用永磁体平行充磁时产生的齿槽转矩要比永磁体径向充磁时小很多。文献[4]研究了一种通过采用转子偏心磁极结构来削弱齿槽转矩的方法, 根据每极磁通不受到影响的情况下, 对不同的极槽配合数而合理选择磁极的偏心距大小可以有效削弱永磁电机的齿槽转矩。文献[5]总结了多种方法可以有效削弱无刷直流电动机齿槽转矩, 其中包括转子分段斜极。文献[6]利用 3D 有限元工具对转子分段斜极之间的斜极角进行了优化, 并提出了利用 2D 有限元法对电机转矩进行逐段分析的思路和分析方法。文

作者简介: 王晓宇(1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机设计。

孙 宁(1980—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特种电机及其控制。

陈丽香(1973—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为永磁电机研究和开发。

献[7]为了减小齿槽转矩有时会采用不对称结构,但是由于存在偏心时不对称使电机的不平衡径向力和转矩波动会对电机性能造成较大的影响,此外还会对反电动势波形和电流波形引起畸变,从而增加了转矩波动。文献[8]利用 Maxwell 公式计算径向力波时,可以用气隙中间的磁密代替定子电枢表面的磁密,同时可以忽略气隙磁密的切向分量也具有足够的准确性。

### 1 分段斜极对永磁伺服电机影响

为消除齿谐波电势,交流伺服电机通常采用定子斜槽和转子斜极两种方法。转子斜极分为两类,一类是连续斜极,另一类则是分段斜极。转子分段斜极因为其成本低,更易采用。

斜极与斜槽具有同样的效果,即削弱电机齿谐波、齿槽转矩及转矩波动。

分段斜极的斜极角度为<sup>[9]</sup>

$$\alpha = \frac{2p\pi}{LCM(Q_1, 2p)} \cdot \frac{n-1}{n} \quad (1)$$

式中:  $n$ ——转子在轴向的分段数;

$\alpha$ ——斜极角(电角度);

$LCM(Q_1, 2p)$ ——定子槽数和极数的最小公倍数。

本文以一台 8 极 36 槽电机为例,利用 Ansoft 进行 3D 电磁场对没有斜极电机、斜极分成 2 段电机和斜极分成 3 段电机进行了反电动势、齿槽转矩、转矩波动有限元计算。按照上述斜极角度方法,当分段斜极电机分段段数为 2 时,斜极角度为  $10^\circ$ ,斜极  $1/4$  个齿距。当分段斜极电机分段段数为 3 时,斜极角度为  $13.3^\circ$ ,斜极  $1/3$  个齿距。转子斜极结构模型如图 1 所示。

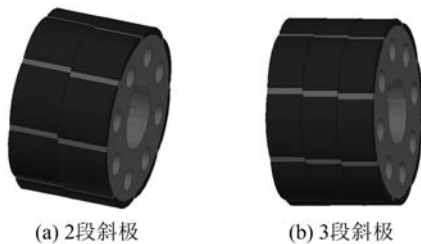


图 1 转子斜极结构图

#### 1.1 分段斜极对反电动势波形的影响

通过斜极效果有限元分析计算,得出不同转子斜极段数对反电动势的影响。图 2 为不同斜极段数的反电动势波形,图 3 为不同斜极段数波形

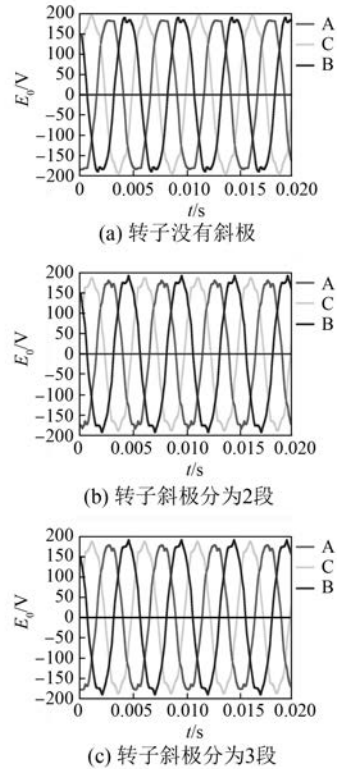


图 2 不同斜极段数的反电动势波形

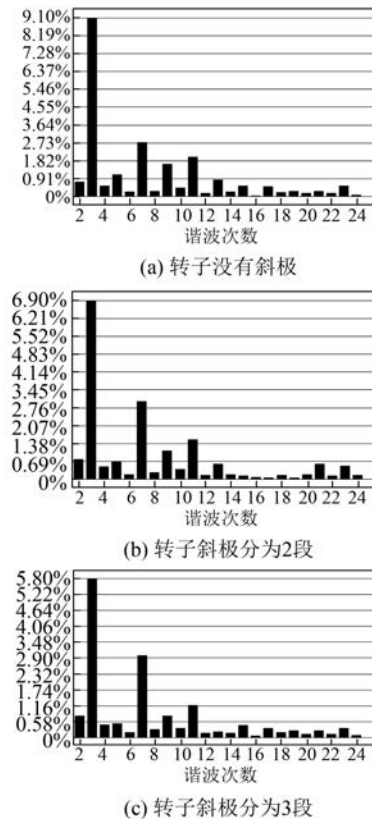


图 3 不同斜极段数的反电动势波形谐波分析

分析。数据如表 1 所示。

表 1 不同转子斜极段数对反电动势波形的影响

斜极段数	1 段	2 段	3 段
$E_0/V$	273.9	266.1	264.1
电压 THD/%	10.06	7.94	6.82

从表 1 可以看出,通过斜极的方法有效地削弱了电压波形畸变率,同时也减小了反电动势的大小,随着斜极段数的增加,反电动势的大小和电压波形畸变率也随之减小。

### 1.2 分段斜极对齿槽转矩的影响

用 3D 有限元对不同分段斜极的转子结构进行齿槽转矩波形仿真分析,如图 4 所示。数据如表 2 所示。

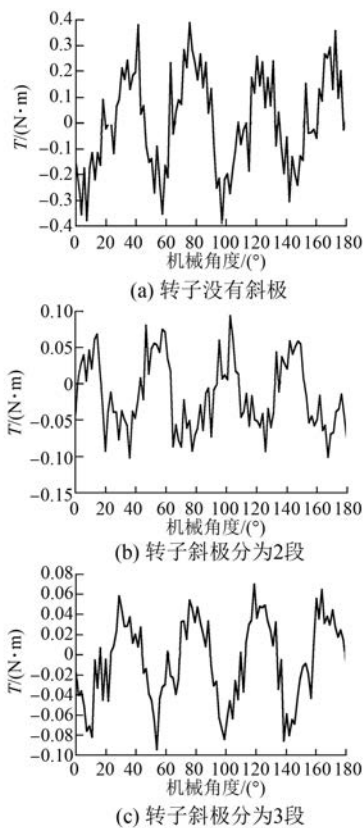


图 4 不同斜极段数的齿槽转矩波形

表 2 不同转子斜极段数对齿槽转矩波形的影响

斜极段数	1 段	2 段	3 段
齿槽转矩/(N·m)	0.390	0.090	0.072

从表 2 可以看出,通过斜极的方法可以有效地削弱齿槽波动的大小,随着斜极段数的增加,齿

槽转矩的大小随之减小。

### 1.3 分段斜极对转矩波动的影响

用 3D 有限元对不同分段斜极的转子结构进行转矩波动仿真分析,如图 5 所示。数据如表 3 所示。

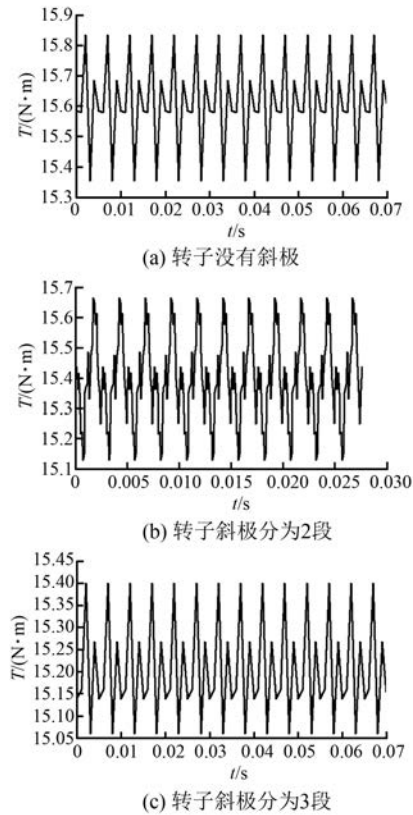


图 5 不同斜极段数的转矩波动

表 3 不同转子斜极段数对转矩波动的影响

斜极段数	1 段	2 段	3 段
转矩波动/%	1.7	1.5	1.1

从表 3 可以看出,通过斜极的方法可以有效地削弱转矩波动的大小,随着斜极段数的增加,转矩波动的大小随之减小。

## 2 分段斜极对噪声的影响

当转子斜极分为  $n$  段时,每一段对应一个气隙磁密矢量,因此分段斜极的气隙磁密可视为每一段的气隙磁密矢量叠加后的平均。利用 Ansys 软件对斜极电机的 3D 声场计算比较复杂,因此可以利用叠加后的气隙磁密进行 2D 声场计算。图 6 为斜极分为 2 段和 3 段时相对应的矢量。叠加后的平均气隙磁密计算公式为

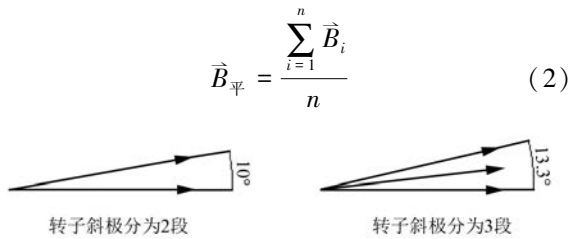


图6 转子斜极分为2段和3段的气隙磁密矢量图

叠加后的平均气隙磁密波形如图7所示,并对其进行谐波分析,数据如表4所示。

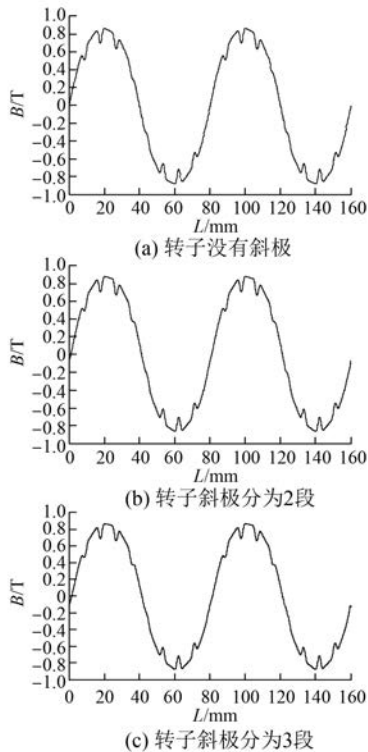


图7 不同斜极段数的气隙磁密波形

表4 不同转子斜极段数对气隙磁密波形的影响

斜极段数	1段	2段	3段
气隙磁密/T	0.886 8	0.886 1	0.878 8
波形畸变率/%	10.1	9.89	9.86

从表4可以看出,通过分段斜极可以有效地削弱气隙磁密波形畸变率,同时也减小了气隙磁密的大小。随着斜极段数的增加,气隙磁密的大小和气隙磁密波形畸变率也随之减小。

根据麦克斯韦定律,在电机气隙中的单位面积径向电磁力的瞬时值表示为<sup>[10]</sup>

$$p_r = \frac{b^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (3)$$

利用 Ansys 软件将其作为加载电磁力载荷作用在定子齿表面,计算分段斜极对电机噪声的影响;在 Ansys 中进行声场分析时,包括对流体介质及电机定子铁心和机座建模。从有限元模型中可以看到,将电机机壳与空气接触的表面看作流固耦合面,即将其剖分单元设置为结构-流体单元,这种单元可以在流固结合部分向结构外流体传递节点压力值;将空气流体边界单元设为吸声单元,以实现声波无反射的自由传播。因此,此处的设置充分模拟了半自由声场。此外,声场计算时电机的有限元模型、各种材料属性及约束条件与电磁场计算时模型完全一致。声场计算模型及声场计算单元如图8所示。

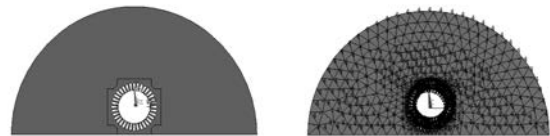


图8 声场计算模型和声场计算单元图

永磁电动机噪声测试的过程中,采用了国际标准 ISO1680.1(1986)《声学——旋转电机辐射空气噪声的测定方法——第一部分:反射平面上自由场条件的工程法》,并且考虑到电机的轴中心高为 87.5 mm,小于测试标准中所提到的 225 mm,故采用半球面法的测点配置方案。本方法适用于轴中心高或电机高度的一半小于 225 mm 的电机,小于 90 mm。测试点半径  $r$  为 0.4 m。计算完成后提取空间内噪声测试点的声压结果。数据如表5所示。声压曲线如图9所示。

表5 不同转子斜极段数对噪声大小的影响

斜极段数	1段	2段	3段
噪声/dB	52.9	51.2	49.9

从表5可以看出,通过斜极的方法可以有效地削弱噪声的大小,随着斜极段数的增加,噪声的大小随之减小。

### 3 分段斜极工艺的实现

就理论而言,分段段数越多,斜极的效果就越好,但是增加分段段数必然会加大工艺生产的复杂

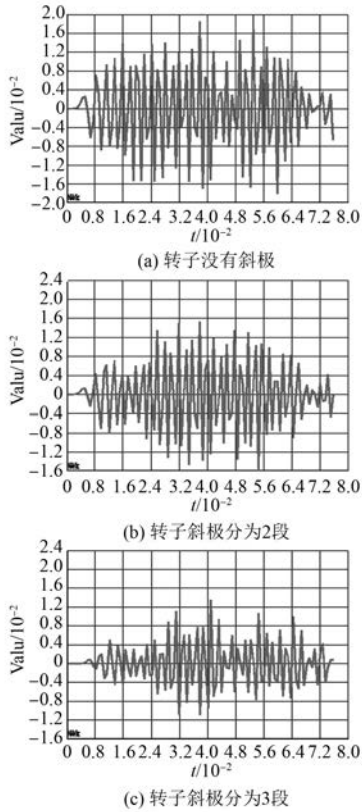


图9 不同斜极段数的声压曲线

程度,降低电机的可靠性。本文采用转子铁心在轴向分为两段结构,从而达到斜极的效果,同时简化了工艺,节约了成本;两段铁心由转子冲片叠成且长度相等,两段铁心由键槽轴线对齐互为反向装配,组成两段铁心相近的两个磁极,相错角度为 $2\alpha$ 。本文以8极电机为例,转子冲片如图10所示。

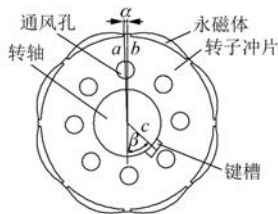


图10 转子冲片结构图

转子表面贴有8个永磁体,转子冲片有8个通风孔,通风孔的圆心与转轴的圆心所在的轴线 $a$ 与一对称磁极的轴线 $b$ 相错了一定的角度 $\alpha$ ,转子上键槽过圆心的对称轴线 $c$ 与轴线 $b$ 的角度为 $\beta$ ,这时 $\beta=45^\circ+\alpha$ ,将转子冲片叠压成两段铁心相等的转子,将两转子正反叠装,使两段转子的键槽对齐,保证了转子铁心与转轴的装备,实现了通

风孔通畅一致,达到了转子斜极角度为 $2\alpha$ ,两段转子铁心叠装后的结构如图11所示。

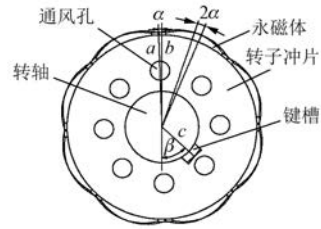


图11 两段转子铁心叠装后结构图

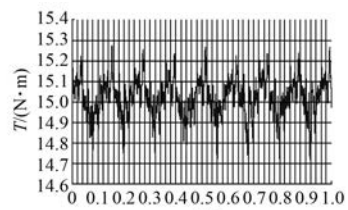
通过总结,该方法适用于斜极段数分为两段,并且满足于永磁体的极数为 $n$ 个, $n=2^k$ , $(k=1, 2, 3, \dots)$ ,通风孔的个数为 $m$ 个均布, $m=2^i$ , $(i=1, 2, 3, 4, \dots)$ ,夹角 $\beta=360^\circ/2^h + \alpha$  $(h \leq k+1, h$ 为正整数, $0 < \alpha < 360^\circ/m)$ 的永磁电机。

#### 4 试验验证

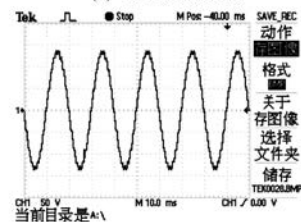
本文以一台8极36槽、转子分段斜极为2段的样机为例进行了试验。样机如图12所示。试验波形如图13所示试验值与计算值进行了对比分析。数据如表6所示。



图12 样机



(a) 转矩波动波形



(b) 反电动势波形

图13 试验测得的波形

表 6 计算值与试验值对比

	转矩波动/%	反电动势/V	噪声/dB
计算值	1.5	266.1	51.2
试验值	1.9	262.4	54.2

从表 6 可以看出试验值与计算值基本一致,验证了计算方法的正确性及计算结构的准确性。

## 4 结 语

(1) 本文通过 3D 电磁场对转子分段斜极的永磁伺服电机进行了仿真分析计算。通过计算结果分析转子分段斜极可以有效地减小齿槽转矩、转矩波动,随着段数的增加齿槽转矩和转矩波动也随之减小;并对每段气隙磁密进行矢量叠加后平均,利用叠加后的平均气隙磁密进行 2D 声场计算,通过仿真计算可以看出斜极的方法可以有效地削弱噪声的大小,随着斜极段数的增加噪声的大小也随之减小。

(2) 提出了转子斜极分成 2 段时的简单工艺,并总结了分成 2 段斜极时,能满足这种简单工艺的转子设计要求。

(3) 本文设计了一台转子斜极为 2 段的样机,并进行了试验验证。通过对比分析试验值与计算值基本一致,满足了设计要求,证明了计算方法的正确性及计算结构的准确性。

### 【参 考 文 献】

- [ 1 ] 唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [ 2 ] 朱德明,严仰光.表贴式永磁电机的两种充磁方式[J].南京航空航大大学学报,2006,38(3): 304-308.
- [ 3 ] 沈建新,费伟中,陈利根.气隙磁场波形及磁瓦充磁方式对无刷直流电动机性能的影响[J].微特电机,2006,34(6): 7-9.
- [ 4 ] 宋伟,王秀和,杨玉波.削弱永磁电机齿槽转矩的一种新方法[J].电机与控制学报,2004,8(3): 214-217.
- [ 5 ] ISLAM M S, MIR S, SEBASTIAN T. Issues in reducing the cogging torque of mass-produced permanent magnet brushless DC motor [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40 ( 3 ): 813-820.
- [ 6 ] EASTHAM J F, IONEL D M, BALCHIN M J, et al. Finite element analysis of an interior-magnet brushless DC machine, with astep-skewed rotor [ J ]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33 ( 2 ): 2117-2119.
- [ 7 ] ZHU Z Q, XIA Z P, WU L J, et al. Analytical modeling and finite element computation of radial vibration force in fractional-slot permanent magnet brushless machines [ J ]. IEEE Trans on Industry Applications, 2010, 46(5): 1908-1918.
- [ 8 ] HWANG S M, KIM K T, JEONG W B, et al. Comparison of vibration sources between symmetric and asymmetric HDD spindle motors with rotor eccentricity [ J ]. IEEE Trans on Industry Applicatuihs, 2001, 37(6): 1727-1731.
- [ 9 ] 应红亮,张舟云,曲家骥,等.转子分段斜极在永磁同步电机中的应用分析[J].微特电机,2009,37(7): 10-48.
- [ 10 ] 陈永校,诸自强,应善成.电机噪声的分析与控制[M].杭州:浙江大学出版社,1987.

收稿日期: 2016 -11 -22

### [ 读者群 ]

《电机与控制应用》杂志的读者包括电机与控制领域内从事科研、设计、生产的工程技术人员,全国各大高等院校师生,企业经营、管理、营销、采购人员,各类产品代理分销渠道人员以及最终用户等,遍及电力、石油、冶金、钢铁、交通、航

天、工控、医疗、机械、纺织、矿山等多个行业。

杂志读者群专业、稳定、层次高,无论是交流前沿技术、实践经验,还是传递行业信息,开展企业及产品的广告宣传都能达到事半功倍的效果。