

切向结构永磁同步电机的结构优化

赵朝会^{1 2}, 秦海鸿¹, 严仰光¹

(1. 南京航空航天大学航空电源航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016 ; 2. 河南农业大学机电工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要 : 针对切向结构永磁同步电机漏磁大、结构复杂的缺陷, 利用有限元分析方法探讨了引入辅助磁极后非导磁衬套存在与否对电机性能的影响, 提出了一定条件下磁钢宽度的约束条件和多磁源情况下某一磁钢对气隙磁通贡献的概念, 并比较了在磁钢宽度达到极限情况、辅助磁钢自然消失后, 转轴为非导磁体和导磁体 2 种状态时气隙磁密、每极磁通的大小. 结果表明 (a) 增加辅助磁极, 不仅可以去掉非导磁衬套, 而且还有助于电机性能的改善; (b) 保持电机直径和磁钢厚度恒定, 增加磁钢宽度达到极限位置而使辅助磁极自然消失后, 能在电机性能基本不变的情况下, 使得电机结构简化.

关键词 : 切向结构永磁同步电机; 非导磁衬套; 辅助磁极; 结构优化

中图分类号 : TM313 **文献标识码** : A **文章编号** : 1000-198X(2007)01-0099-05

在稀土永磁同步电机中, 转子的结构形式多种多样, 其中切向结构转子由于具有转矩高、动态性能好等特性, 近年来在工业领域和家电行业获得了广泛的应用^[1-3]. 各国学者围绕影响切向结构永磁同步电机性能的各种因素展开了研究.

文献[4]研究了切向结构永磁同步电机极对数对电机性能的影响, 并认为增加极对数, 可以提高气隙磁密, 减小电机体积和重量, 增大效率和转矩, 但极对数的增加存在一个较为合理的值. 为了减小漏磁, 提高气隙磁密, 文献[5]在切向结构永磁同步电机中引入了辅助磁极. 其研究发现, 采用辅助磁极的方法可以使电机的气隙磁密提高 20% 以上, 并且很好地抑制转轴侧永磁体的端部漏磁. 文献[6]在文献[5]的基础上, 通过对辅助磁极材料、厚度和位置的研究, 指出了辅助磁极较为合适的厚度和位置(图 1). 文献[7]列出了 4 种规格稀土永磁同步电机的非导磁衬套厚度与漏磁系数(表 1), 并且认为: 对于小容量电机, 非导磁衬套的厚度可取 6~8 mm, 而对于 30 kW 以内的电机, 非导磁衬套的厚度应取 10 mm 左右, 增加非导磁衬套的厚度能在一定程度上减小漏磁, 但不可能使漏磁降为 0. 文献[8]从气隙大小、转轴材料、极弧系数、磁钢厚度和极对数等因素出发分析了切向结构电机气隙磁密的影响因素.

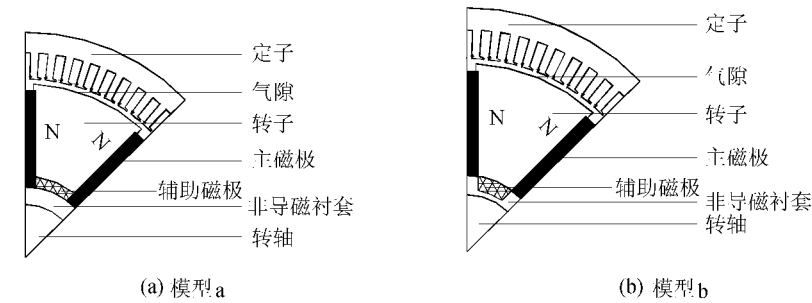


图 1 辅助磁极的 2 种合适位置

Fig.1 Two suitable positions of auxiliary pole

表 1 非导磁衬套厚度与漏磁系数
Table 1 Thickness of non-magnetism bush and leakage flux coefficient σ

极对数	容量/kW	非导磁衬套厚度/mm	漏磁系数 σ
3	0.8	8	1.23
2	13	10	1.04
2	15	10	1.05
2	15	10	1.05

本文以降低转轴侧永磁体的漏磁和简化切向永磁同步电机的结构为目标, 在非导磁衬套存在和不存在 2 种情况下, 比较分析了引入辅助磁极后电机气隙磁密、每极磁通的变化, 提出了多磁源情况下某一磁钢对气隙磁通贡献的概念, 并讨论了磁钢宽度达到极限条件而使辅助磁极自然消失情况下, 非导磁体衬套存在和不存在 2 种状况时的电机的气隙磁密、每极磁通和漏磁的变化.

1 切向结构永磁同步电机的结构参数及其磁场分布的有限元分析

1.1 结构及其参数

电机结构如图 2 所示.其中,定、转子材料选用硅钢片,定子外、内径分别为 $D_i = 204\text{ mm}$, $D_{i1} = 152\text{ mm}$,转子外径 $D_{i2} = 150\text{ mm}$;永磁体选用钕铁硼(NdFeB)材料,宽度 $b_m = 42\text{ mm}$,磁化方向的厚度 $h_m = 9\text{ mm}$,其剩磁感应强度 $B_r = 1.07\text{ T}$,矫顽力为 $H_c = 827\,600\text{ A/m}$,轴的材料为 45 # 钢,相对磁导率 $\mu_r = 1\,500$,轴径 $D_z = 45\text{ mm}$;非导磁衬套的厚度为 $t = 7.5\text{ mm}$,极对数 $P = 4$;每极槽数 $Z = 9$,槽型为半开口矩形槽,槽宽 $b_c = 4.25\text{ mm}$;电枢轭高 $h_E = 15\text{ mm}$,齿高 $h_C = 11\text{ mm}$.

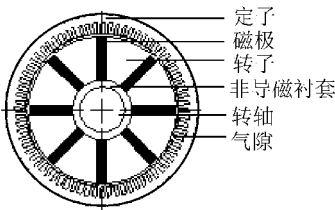


图 2 切向结构永磁同步电机
Fig.2 IPM synchronous machine

1.2 辅助磁极不存在时电机磁场分布的有限元分析

电机的磁场分布实际上是一个非线性的三维问题,但考虑到能量传递的物理过程主要发生在气隙中,与电机轴向尺寸比较,气隙又相对狭小,不计电机的端部效应,电机磁场的近似计算可以简化为二维问题.图 3 为传统的 4 对极切向结构永磁同步电机的磁场分布.可以看出,不论非导磁衬套存在与否,在转轴侧永磁体都存在漏磁现象.电机气隙磁密、每极磁通和漏磁大小如表 2 所示.

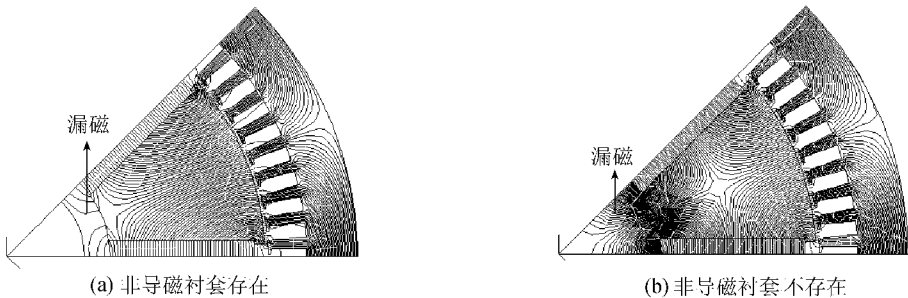


图 3 电机的磁场分布
Fig.3 Magnetic field of machine

由表 2 可知,非导磁衬套不存在时,电机的气隙磁密、每极磁通下降很多,漏磁系数急剧增大,它将导致电机功能不能正常发挥^[8].究其原因,是由于非导磁衬套不存在时永磁体形成了短路,使得转轴侧永磁体的漏磁相当严重,其磁场分布如图 3(b)所示.

1.3 引入辅助磁极后,电机磁场分布的有限元分析

在图 2 所示电机参数的基础上引入辅助磁极,其厚度为 4.5 mm ,位置如图 1 所示.

1.3.1 主磁钢和辅助磁钢对气隙磁通贡献的定义

辅助磁极存在的情况下,电机的气隙磁通是由 2 个磁源同时产生的,2 个磁源对电机气隙磁通的贡献大小不同,为了区别不同磁钢对气隙磁通的贡献,定义

$$\alpha = \frac{\Phi_{mz}}{\Phi_{\delta}} \tag{1}$$

$$\beta = \frac{\Phi_{mf}}{\Phi_{\delta}} \tag{2}$$

式中: Φ_{mz} ——主磁钢产生的磁通; Φ_{mf} ——辅助磁钢产生的磁通; Φ_{δ} ——气隙磁通; α ——主磁钢对气隙磁通的贡献; β ——辅助磁钢对气隙磁通的贡献.

1.3.2 电机气隙磁密、每极磁通的有限元计算分析

以 4 对极电机为例进行有限元计算,图 1 所示模型 a、模型 b 在非导磁衬套存在和不存在 2 种情况下气隙磁密 B_{δ} 、气隙磁通 Φ_{δ} 、主磁钢产生的磁通 Φ_{mz} 、辅助磁钢产生的磁通 Φ_{mf} 以及 α 和 β 如表 3 和表 4 所示.其磁场分布如图 4 和图 5 所示.

表 2 非导磁衬套有无情况下电机气隙磁密 B_{δ} 、每极磁通 Φ_{δ} 、漏磁通 Φ_{σ} 和漏磁系数 σ

Table 2 Air gap flux density B_{δ} , flux of each pole Φ_{δ} , leakage flux Φ_{σ} , and leakage flux coefficient σ for non-magnetism bush installed and uninstalled

非导磁衬套	B_{δ}/T	Φ_{δ}/Wb	Φ_{σ}/Wb	σ
存在	0.999	46.62	3.09	1.07
不存在	0.791	35.15	34.46	1.98

注:表中磁通的值应乘以 10^{-3} .

表 3 模型 a 有限元仿真的计算值

非导磁衬套	B_{δ}/T	Φ_{δ}/Wb	Φ_{mz}/Wb	Φ_{ml}/Wb	Φ_{σ}/Wb	α	β	σ
存在	1.024	48.79	45.92	2.87	0	0.94	0.06	1
不存在	1.094	48.92	42.01	6.81	0	0.86	0.14	1

注:表中磁通的值应乘以 10^{-3} .

表 4 模型 b 有限元仿真的计算值

非导磁衬套	B_{δ}/T	Φ_{δ}/Wb	Φ_{mz}/Wb	Φ_{ml}/Wb	Φ_{σ}/Wb	α	β	σ
存在	1.013	46.89	45.35	1.54	0.89	0.97	0.03	1.02
不存在	1.032	47.68	45.02	2.66	8.8	0.94	0.06	1.18

注:表中磁通的值应乘以 10^{-3} .

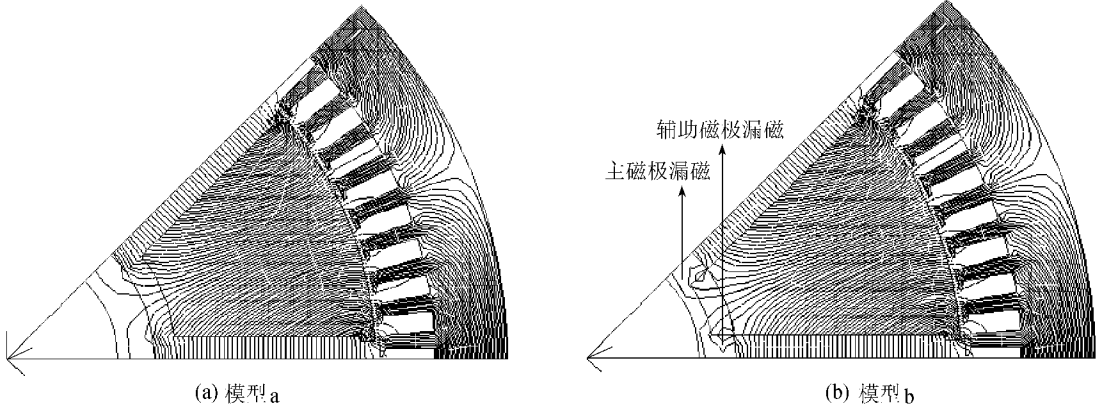


图 4 非导磁衬套存在的磁力线分布

Fig.4 Flux distribution of machine at the existence of non-magnetism bush

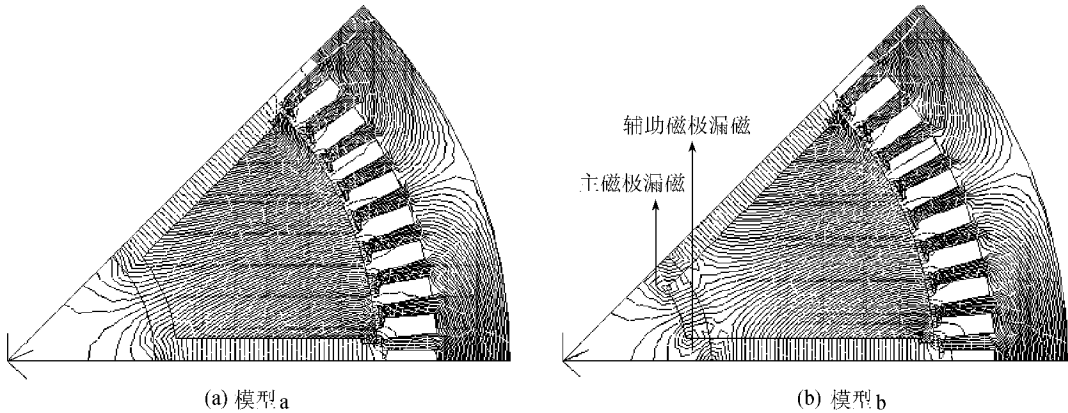


图 5 非导磁衬套不存在的磁力线分布

Fig.5 Flux distribution of machine in the absence of non-magnetism bush

比较表 2、表 3 和表 4 可知,无论非导磁衬套存在与否,模型 a、b 所示电机的气隙磁密、每极磁通都大于没有辅助磁极的切向结构永磁同步电机,并且漏磁明显减小。

比较表 3 和表 4 可知,无论非导磁衬套存在与否,模型 a 中主磁极产生的磁通对气隙磁通的贡献 α 小于模型 b 中主磁极产生的磁通对气隙磁通的贡献 α ,这可以作如下解释:模型 a 中辅助磁极的出现相当于主磁极的有效长度缩短,而模型 b 中辅助磁极对主磁极的有效长度影响不大,模型 a 中辅助磁极产生的磁通对气隙磁通的贡献 β 却大于模型 b 中辅助磁极产生的磁通对气隙磁通的贡献 β ,这是因为模型 a 中辅助磁钢的用量较多造成的。

由表 3 和表 4 可以看出,无论是模型 a 还是模型 b,非导磁衬套不存在时,气隙磁密要大于非导磁衬套存在的情况,而磁通则相差不大,因此,不用非导磁衬套更好。

2 磁钢极限宽度时,空心轴和导磁轴电机气隙磁密及磁通的比较

上面分析已知,辅助磁极存在时,可以省去非导磁衬套,使得电机结构得到简化。如果把辅助磁极沿直径方向向轴方向移动,辅助磁极所占的空间会越来越小,当主磁极的磁钢宽度达到极限状态时,辅助磁极自然消失,此时电机结构将进一步简化,但电机性能将如何变化呢?

2.1 磁钢尺寸的几何约束条件

在切向结构永磁同步电机中,磁钢尺寸受到许多因素的制约.由图6可知,

$$\frac{h_m}{2} \leq (R_{i2} - b_m) \tan(\frac{\pi}{2P}) = (R_Z + t) \tan(\frac{\pi}{2P}) \tag{3}$$

$$\alpha'_{\text{p}} \tau_{\text{p}} = \tau_{\text{S}} = \frac{\pi R_{i2}}{P} - h_{\text{m}} \tag{4}$$

式中: R_{i2} ——转子半径; P ——极对数; R_Z ——转轴半径; t ——非导磁衬套的厚度; τ_{p} ——极矩; α'_{p} ——计算极弧系数.

式(3)(4)构成了切向结构永磁同步电机磁钢尺寸的几何约束条件.从式(3)可知,在电机半径 R_{i2} 和磁钢厚度 h_{m} 确定后,磁钢长度 b_{m} 存在一个最大值.保持磁钢厚度 h_{m} 和电机半径 R_{i2} 和图2所示电机参数相同,极对数与磁钢极限宽度的关系如表5所示.

2.2 磁钢宽度达到极限状态时切向结构永磁同步电机的有限元计算

在磁钢厚度、电机直径恒定,磁钢宽度达到极限状态的情况下,以4对极电机为例,计算了非导磁轴(相当于非导磁衬套存在)和导磁轴(相当于非导磁衬套不存在)2种切向结构永磁同步电机气隙磁密、每极磁通和漏磁的大小,计算结果如表6所示.磁力线分布如图7所示.此时辅助磁极自然消失.

比较表6与表3、表4可知,气隙磁密和每极磁通都有较大增加,虽然表6的漏磁较表3大,但每极磁通却增加很多,并且结构更为简单.

从表6可以看出,在磁钢宽度极限条件约束下,相对于非导磁轴的情况,转轴为导磁材料时电机的气隙磁密、每极磁通有所降低,漏磁增大.通过图7(a)和(b)的比较也能看出非工作气隙端漏磁的变化.

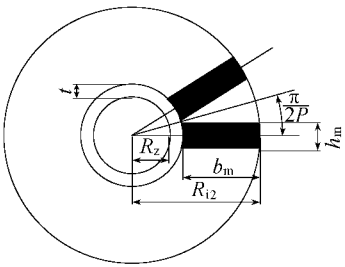


图6 磁钢宽度的几何关系

Fig.6 Geometric relation of magnet width

表5 极对数与磁钢极限宽度的关系

Table 5 Relation between pole pairs number P and maximum magnet width b_{m}

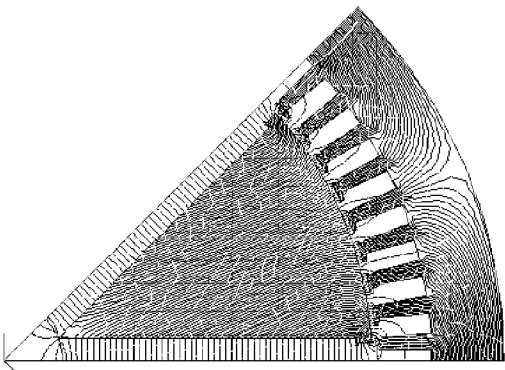
极对数 P	3	4	5	6
磁钢极限宽度 b_{m}/mm	67.2	65.4	61.2	58.2

表6 轴材料不同时电机的气隙磁密 B_{δ} 、每极磁通 Φ_{δ} 、漏磁通 Φ_{σ} 和漏磁系数 σ

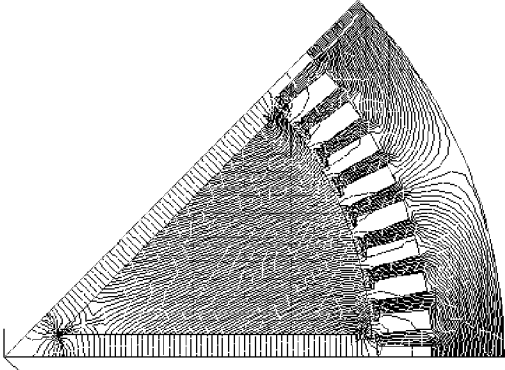
Table 6 Air gap flux density B_{δ} , flux of each pole Φ_{δ} , leakage flux Φ_{σ} , and leakage flux coefficient σ for different shaft materials

轴的性质	B_{δ}/T	Φ_{δ}/Wb	Φ_{σ}/Wb	σ
非导磁轴	1.147	52.62	1.92	1.04
导磁轴	1.122	50.66	7.14	1.14

注:表中磁通的值应乘以 10^{-3} .



(a) 轴为非导磁材料



(b) 轴为导磁材料

图7 电机的磁力线分布

Fig.7 Flux distribution plot of machine

3 设计实例

由上面分析可知:当磁钢宽度达到极限位置时,气隙磁密可得到提高;在电机性能基本不变的情况下,简化了电机结构.表7是电机定子外径、转子外径、气隙、电枢长度、槽数、极对数、槽型及槽尺寸相同情况下2种电机的一些计算参数,电机I是图2所示的传统的切向结构电机,电机II是图7所示的磁钢宽度达到极限、轴材料为非导磁体时的切向结构电机.

表 7 两种电机设计结果

Table 7 Comparison of the results of two kinds of machine design

电机 类型	定子 外径/ mm	转子 内径/ mm	气隙/ mm	电枢 长度/ mm	槽数 Z	极对 数 P	槽型及 尺寸	转子 内径/ mm	轴径/ mm	磁钢 厚度/ mm	磁钢 宽度/ mm	功率/ kW	额定 电 压/V (r·min ⁻¹)	额定 转速/ r·min ⁻¹	总重 量/ kg	气隙 磁密/ T	效率 /%
电机 I	235	150	1	135	24	4	相同	50	30	9	50	19	70	3 000	40.18	1.18	91.91
电机 II	235	150	1	135	24	4		24	24	9	63	20	74	3 000	41.73	1.27	91.74

4 结 论

- a. 在多磁源情况下 ,提出了某一磁钢对气隙磁通贡献的概念 .
- b. 引入辅助磁极后 ,可以去掉非导磁衬套 ,气隙磁密和每极磁通可得到提高 ,漏磁可减小 ,电机结构也可以得到简化 .
- c. 磁钢宽度达到极限状态时 ,辅助磁极自然消失 ,无论转轴采用导磁材料还是非导磁材料 ,电机的气隙磁密和每极磁通相比 ,图 1 所示的切向结构永磁同步电机都有所提高 .这样既提高了电机性能 ,又简化了电机结构 .

参考文献 :

[1] NICOLA B ,SILVERIO B. Interior PM synchronous motor for high performance applications[J]. IEEE Trans Ind Applicat ,2002 ,24(1) : 148-153.

[2] ZHU Z Q ,HOWE D. Halbach permanent magnet machines and applications : a review[J]. Electric Power Application ,IEE proceedings , 2001 ,39(7) 299-308.

[3] PARK J W ,KOO D H ,KIM J M ,et al. Improvement of control characteristics of permanent-magnet synchronous motor for electric vehicle [J]. IEEE Trans Ind Applicat ,2001 ,37(6) :1754-1760.

[4] 赵朝会 ,朱德明 ,秦海鸿 ,等 . 切向结构永磁同步电机极对数的选择[J]. 南京航空航天大学学报 ,2006 ,38(3) 281-285.

[5] 崔巍 ,江建中 ,汪信尧 . 一种新型高功率密度的正弦波永磁电机[J]. 电源技术学报 ,2003(6) 486-490.

[6] 赵朝会 ,朱德明 ,严仰光 . 切向结构永磁同步电机辅助磁极的优化[J]. 南京航空航天大学学报 ,2006 ,38(1) 53-57.

[7] 王群京 . 切向结构稀土永磁同步电动机设计中若干问题的讨论[J]. 中小型电机 ,1994 ,21(5) 7-9.

[8] 赵朝会 ,李遂亮 ,王新威 ,等 . 永磁同步电机气隙磁密影响因素的分析[J]. 河南农业大学学报 ,2005 ,39(3) 338-344.

Structure optimization of IPM synchronous machine

ZHAO Chao-hui^{1, 2} , QIN Hai-hong¹ , YAN Yang-guang¹

(1. Aero-Power Sci-Tech Center , Nanjing University of Aeronautics and Astronautics , Nanjing 210016 , China ;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering , Henan Agricultural University , Zhengzhou 450002 , China)

Abstract :The non-magnetism bush of IPM synchronous machine can effectively reduce the leakage flux near the shaft ; however , it makes the structure of the machine complex and reduces the usable space of IPM . Based on finite element analysis , a discussion was made on the influences of the non-magnetism bush on the performance of IPM synchronous machine after the introduction of the auxiliary pole , and the restriction condition of magnet width under certain conditions and the concept about the contribution of a magnet to the air gap flux under multi-magnetic sources were proposed . The air gap flux density and the flux of each pole under two conditions that the shaft material was magnetism or non-magnetism were compared when the magnet width reached maximum after the disappearance of the auxiliary pole . Some conclusions are drawn as follows :(1) the introduction of the auxiliary pole makes it possible to remove the non-magnetism bush , and it can also improve the performance of IPM synchronous machine ;(2) to keep the machine diameter and magnet thickness invariable and to increase the magnet width to the maximum so as to remove the auxiliary pole can simplify the machine structure without any negative influence on the machine performance .

Key words :IPM synchronous machine ; non-magnetism bush ; auxiliary pole ; structure optimization