

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.10.016

飞轮储能系统中高速电机转子的分析设计*

姚 阳,方攸同*,董 凡,张建承,黄晓艳,张 健
(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要:为解决表贴式永磁电机在高速场合下运行的问题,针对高速发电/电动机的转子设计,对转子强度与转子涡流损耗两个问题进行了研究,对一台应用于飞轮储能系统中80 kW表贴式高速永磁无刷直流电机,使用解析法研究了过盈量、保护套筒厚度与转子机械性能之间的关系,开展了定子槽口宽度、气隙长度、护套厚度等参数对转子涡流损耗的影响,得出了减小定子槽口宽度、增加气隙长度、减小护套厚度可以降低涡流损耗的结论。在保证强度的前提下,进行正交分析,得出了一套可以降低转子损耗,提高材料利用率的优化的定转子方案。使用有限元法对方案进行了验证。研究表明,该转子设计合理可靠,可以满足设计要求。

关键词:强度分析; 涡流损耗; 转子设计; 正交分析

中图分类号: TH122; TH39; TM30 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)10-1306-05

Analysis and design of the rotor of high speed machine for flywheel energy storage system

YAO Yang, FANG You-tong, DONG Fan, ZHANG Jian-cheng, HUANG Xiao-yan, ZHANG jian
(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the problem of surface mounted permanent magnet machine (SPM) running in the high speed situation, for the rotor design of the high speed motor/generator (M/G), motor strength and eddy current loss were analyzed. With a 80 kW high speed surface mounted brushless permanent magnet (PM) DC machine in the flywheel energy storage system (FESS), analytical method was adopted to study the relation between protective sleeve thickness, interference fit and rotor mechanical properties. The effects of the stator slot width, air gap length, and sleeve thickness to the rotor eddy current losses were carried out, which indicated that reducing the stator slot width or sleeve thickness and increasing air gap length could reduce rotor eddy current loss. With orthogonal analysis, a set of optimized rotor solution was given under the premise of ensuring the strength which could improve material utilization and reduce loss. The finite element method (FEM) was adopted to validate the design. The result indicate that the design is reasonable and reliable to meet the design requirements.

Key words: strength analysis; eddy current loss; rotor design; orthogonal analysis

0 引 言

飞轮储能电源是综合了磁轴承技术、先进复合材料转子、高速电动/发电机、功率电力电子技术等技术的机电一体化设备,其中高速电动/发电机的转子设计是一项关键技术。

高速电机通常是指转速超过10 000 r/min的电机,因具有功率密度大、转动惯量小、响应快、几何尺寸小、低噪声等优点,已在飞轮储能、真空泵、高速离心机、压缩机、高速磨床以及其他机床等场合广泛应用^[1-3]。

表贴式永磁无刷直流电机因具有结构简单、高功率密度、高效率、控制简单、运行方便可靠等优势,一

收稿日期: 2014-05-16

基金项目: 国家高技术研究发展计划("863"计划)资助项目(2011AA11A101);国家自然科学基金资助项目(51177144)

作者简介: 姚 阳(1990-),男,河北邯郸人,主要从事永磁电机设计与控制方面的研究. E-mail: yaoyang@zju.edu.cn

通信联系人: 方攸同,男,博士,教授,博士生导师. E-mail: youtong@zju.edu.cn

直是高速永磁电机的常见形式。该设计采用表贴式永磁无刷直流电机。

对于表贴式高速永磁电机本体,由于永磁电机采用烧结钕铁硼永磁材料,其抗压强度较大而抗拉强度很小,在高速电机转子离心力成为主要载荷的情况下,考虑到永磁体难以承受巨大离心应力,必须在永磁体外设置高强度非导磁套筒,提供一个预紧力,进行保护;此外,由于在高速情况下定子电流的基波频率很大,而定子磁动势的谐波频率及气隙磁场的变化频率都数倍于基波频率,在转子中会产生涡流损耗,而这种涡流损耗在中、低速永磁无刷电机中往往忽略不计^[4]。但高速电机的转子涡流损耗很大,会引起永磁体升温,甚至失磁,必须对涡流损耗进行合理的分析。文献[5-6]分析了定子槽口宽度、气隙长度等因素对转子涡流损耗的影响,给出了降低转子损耗的措施。总之,在套筒保护下的高速转子强度分析与考虑定子设计影响的转子涡流损耗的分析这两点是高速电机转子设计中的重点。

本研究主要进行应用于飞轮储能系统的高速永磁电机转子的设计工作。

1 高速转子的初步设计

1.1 转子尺寸、极对数的选择

当电机的容量、转速和电磁负荷的确定后,电机的主要尺寸满足下式:

$$D^2 L = C_A \quad (1)$$

式中: D —电枢直径; L —电枢的长度。

对于高速电机,为了保证转子具有足够的刚度和较高的临界转速,转子轴向不可过长,即希望电机的转子能够尽量做到粗短。但从降低离心应力的角度来分析,高速电机转子直径应尽量取小,即转子要细长,然而转子要有足够大的空间放置永磁体和转轴,因而转子直径不可过小。对于转子硅钢片,可承受的最大线速度为 200 m/s。

考虑到高速电机使用磁轴承,对转子的刚度有很高的要求,在保证机械性能的前提下,应取尽量大的转子直径。

单位铁损耗与频率的 1.3~1.5 次方成比例。因此,高速电机的极对数一般取 1 或 2。由于两对级电机的定子绕组端部较短和铁心轭部较薄,可以节省材料,本研究选择极对数为 2 的方案。

1.2 转子套筒的材料选择

套筒的材料选择通常有以下两种:一种是电导率小的非金属材料如碳纤维、玻璃纤维等。该材料的电

导率很低,套筒中的涡流损耗很小,可以忽略,但热传导率低,不利于永磁体中热量的散失。另一种是电导率大的金属材料如不导磁的钢、钛合金等,金属材料由于具有良好的导电性,气隙磁场的谐波分量会在保护套筒中产生的涡流损耗,但是金属材料的热传导率高,利于永磁体中热量的散失。本研究选择电导率低的高强度钛合金材料。

2 高速转子的机械强度分析

高速转子的机械强度分析关键是对保护套筒的分析。机械应力的分析方法有:有限元法或者解析法。作者在初步分析使用解析法进行研究^[7-8]。

套筒与永磁体为过盈配合,考虑到应力沿轴向均匀分布,可采用 2D 简化模型分析。套筒与永磁体之间的过盈配合可以用一对等效正压力来代替,2D 分析简图如图 1 所示。对于永磁体,相当于在外部施加一个压应力,对于套筒,相当于在内部施加一个压应力。为简化分析,取极弧系数为 1。等效正压力 p 可由下式计算^[7]:

$$p = \frac{\delta}{r_{ei} \left[\frac{1}{E_m} \left(\frac{r_{mo}^2 + r_{mi}^2}{r_{mo}^2 - r_{mi}^2} - v_m \right) + \frac{1}{E_e} \left(\frac{r_{eo}^2 + r_{ei}^2}{r_{eo}^2 - r_{ei}^2} + v_e \right) \right]} \quad (2)$$

式中: E_m , E_e —永磁体、套筒的弹性模量; v_m , v_e —永磁体、套筒的泊松比; r_{mi} , r_{mo} —永磁体、套筒内径; r_{ei} , r_{eo} —永磁体、套筒外径; δ —过盈量。

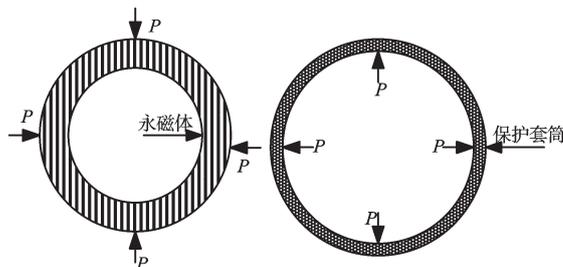


图1 2D分析简图

由上述公式可见,等效正压力 p 同过盈量呈正比。但由于温升与高速旋转会导致材料发生膨胀变形,这会降低过盈量,降低等效正应力。我们采用文献[7]中的公式来分析温度与旋转情况对过盈量的影响,我们根据文献[7]给出的强度公式对转子强度进行分析。

文献[8]的分析表明:套筒在冷态高速旋转下所受拉应力最大,永磁体在高温高速旋转状态下所受压应力最小。在不同过盈量下,高温旋转情况下的永磁体、冷态旋转情况下的套筒沿着半径方向的应力情况如图 2、图 3 所示。图 2 中,对于永磁体,当过盈量较小

时,永磁体的切向应力会大于0,即呈现拉伸状态,甚至超过了永磁材料的抗拉极限,如图2中当0.5 mm过盈配合的情况;径向由于等效正压力的作用,永磁体的径向压应力总小于0,所以必须维持足够的过盈量以防止永磁体切向发生拉伸破坏。另一方面,对于套筒,在装配面处套筒的等效应力最大如图3所示,随着过盈量的增大,最大等效应力会增加,可能会超过材料的许用极限,所以过盈量又不能过大。

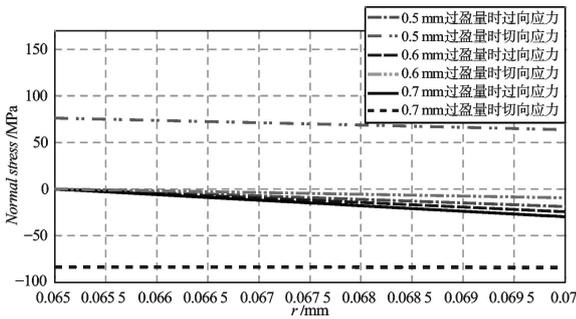


图2 永磁体的应力分布

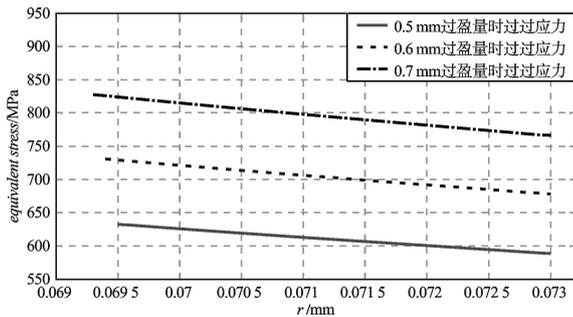


图3 套筒的应力分布

由于永磁体属于脆性材料,需要保证永磁体的切向应力与法向应力均不超过材料的极限,钛合金属于塑性材料,需保证钛合金的等效应力不超过材料极限。由图2、图3的分析表明:永磁体切向最大应力在永磁体内径处;护套最大等效应力在护套内径处。即需要满足以下约束条件:

$$\begin{cases} \sigma_{\theta_{pm}}(r=r_{mi}) < \frac{\sigma_t}{S} \\ \sigma_{rpm} < 0 \\ \sigma_{en_max}(r=r_{ei}) < \frac{\sigma_s}{S} \end{cases} \quad (3)$$

式中: σ_{rpm} —永磁体外径上的径向应力; σ_t —永磁体的抗拉极限; σ_s —套筒的屈服极限; S —安全系数,大于1。

本研究取0.5 mm,0.6 mm,0.7 mm 3种过盈量,分析套筒的厚度对套筒最大等效应力的影响。

增加套筒的厚度可以降低套筒的最大等效应力,套筒厚度与最大等效应力的关系如图4所示,利于高速转子的运行。

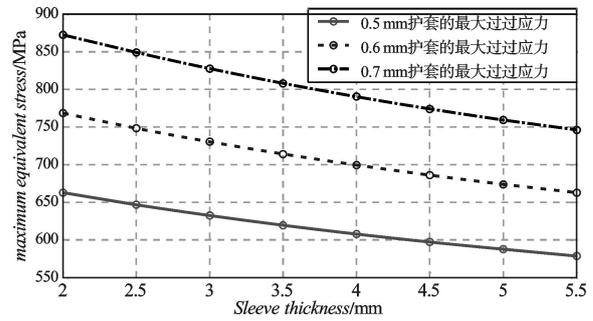


图4 套筒厚度与最大等效应力的关系

3 转子的涡流损耗分析

由于定子槽开口导致的气隙磁导率的变化,以及定子电流的时间、空间谐波,将给高速无刷直流电机带来较高的转子涡流损耗^[9-10]。将分析定子槽开口的宽度、气隙长度、套筒厚度等因素对转子涡流损耗的影响。

本研究仅改变定子槽开口的宽度,保持电机其他参数不变,使用ansoft进行有限元分析,分别得到电机在空载、负载情况下的涡流损耗,定子槽开口对转子涡流损耗的影响如图5所示。

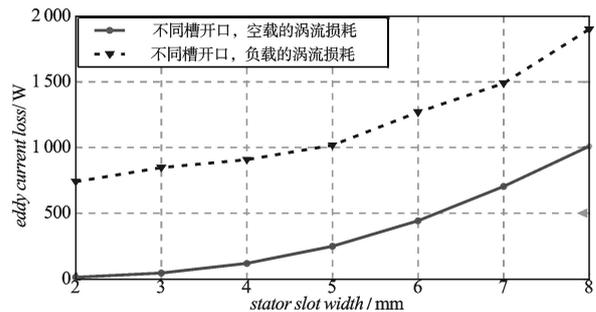


图5 定子槽开口对转子涡流损耗的影响

可见,随着槽开口宽度的增加,转子的涡流损耗快速增加,因为随着槽开口的变大,气隙磁导的变化变强,转子涡流损耗变大,根据数据可见:当槽口宽度在满开槽宽度的30%以下时,转子涡流损耗减少70%。所以,对于高速电机的设计,定子槽开口尽可能取小,此处要求小于4 mm。

本研究分别计算不同厚度下高速转子在空载、负载情况下转子涡流损耗,结果如图6所示。

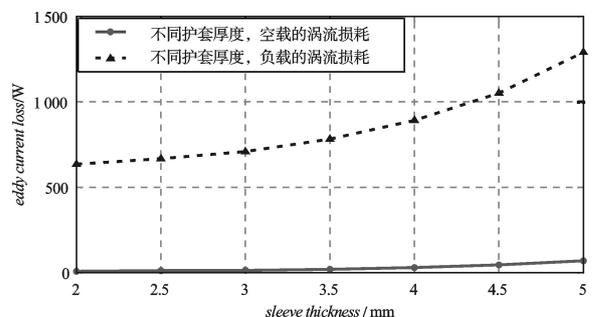


图6 套筒厚度对转子涡流损耗的影响

可见,随着套筒厚度的增加,转子涡流损耗会增加,因此,在保证机械条件的情况下,为了降低转子涡流损耗,应该尽量减小套筒厚度。

本研究保持定子侧设计不变,槽开口取2 mm,套筒厚度取3 mm,在不同的气隙长度下,通过调整永磁体的厚度以保持气隙磁密不变^[6],分别计算不同气隙厚度下的涡流损耗,结果如图7所示。

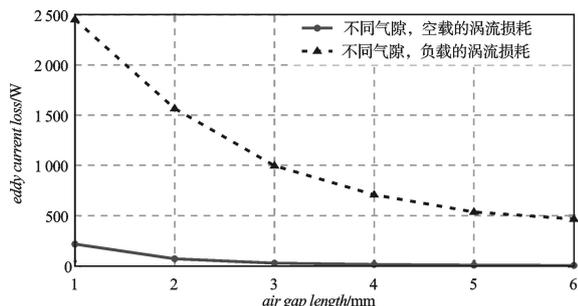


图7 气隙长度对转子涡流损耗的影响

图7中,随着气隙长度的增加,定子开槽对转子涡流影响变小,涡流损耗降低。空载时,当气隙长度增加到3 mm以上时,转子损耗几乎为0。

综上,为了降低高速电机的转子涡流损耗,在电机设计中,定子的槽开口应该尽量小,一般小于4 mm;在满足机械强度的条件下,护套厚度应该尽量小;虽然增加气隙厚度会降低永磁体的利用率,但在保证电磁性能的前提下,为了降低涡流损耗,气隙应该取大。

4 高速转子的综合设计及实验分析

本研究第3节仅对单一因素对转子涡流损耗的影响进行了分析。

正交分析是利用正交表来安排与分析多因素条件的一种分析方法。针对护套厚度、转子强度、槽开口宽度3种因素的对涡流损耗的综合影响效果,进行正交分析,计算的结果如表1所示。

极差 $R_3 > R_2 > R_1$, 可见气隙长度对涡流损耗的影响最大,护套厚度对涡流损耗的影响较小。考虑到降低永磁体的使用量,本研究采用永磁体5 mm的方案,转子其他主要参数如表2所示。

电机在额定运行时的磁场分布如图8所示,对高速永磁电机的设计,为降低电机损耗,定子齿部和轭部的磁感应强度一般都小于1 T,只有这样才能有效地减小损耗。通过图12看出,整个场域除了个别区域外磁密都小于1 T,满足高速电机的设计要求。

本研究使用ANSYS对保护套筒与永磁体的应力进行分析验证。验证结果如图9~11所示。

经ANSYS有限元分析,保护套筒的等效力范围

表1 正交分析结果表($L_9 3^4$)

计算序号	影响因素			涡流损耗 /W	永磁体厚度 /mm
	护套厚度 /mm	槽口宽度 /mm	气隙长度 /mm		
1	3	2	2	1 180.1	3.335
2	3	3	3	1 089.9	4.2
3	3	4	4	870.4	5
4	4	2	3	892	5
5	4	3	4	648.6	6
6	4	4	2	1 733.4	4.2
7	5	2	4	586.9	7
8	5	3	2	1 423	5
9	5	4	3	1 031	6
极差	77.7	325.3	701.9	—	—

表2 电机主要参数

电机参数	参数值
定子内径/mm	154
转子外径/mm	146
转子内径/mm	80
护套厚度/mm	3
气隙/mm	4
转子长度/mm	108
过盈量/mm	0.6
定子槽口宽度/mm	2
额定转速/($r \cdot \text{min}^{-1}$)	30 000

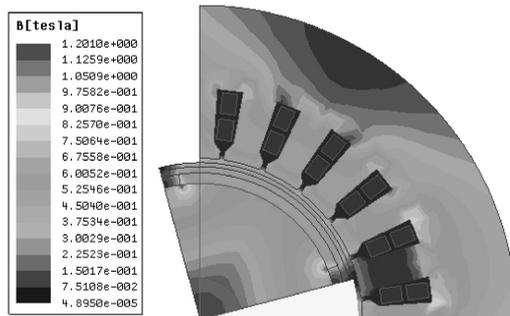


图8 额定电动时的磁场分布

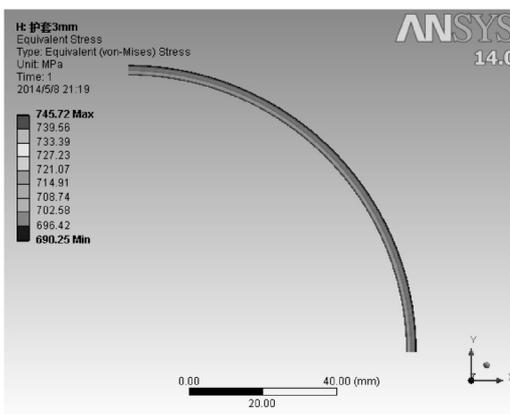


图9 保护套筒的等效力分布

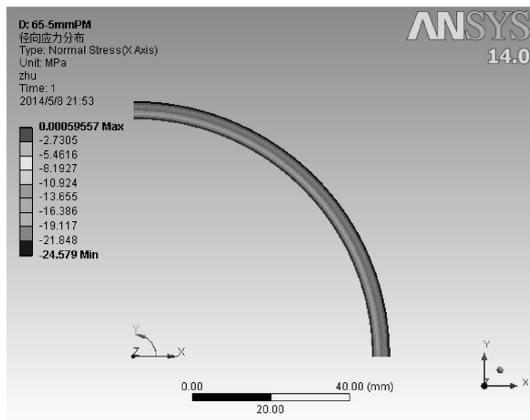


图10 永磁体的径向应力

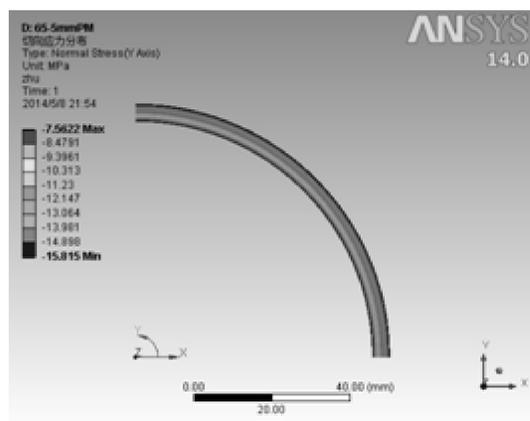


图11 永磁体的切向应力

是:690.25 MPa~745.42 MPa。永磁体的径向等效应力范围是:0~24.58 MPa。永磁体的切向等效应力范围是:-7.562 MPa~-15.815 MPa。结果均满足机械约束条件,满足设计要求。

5 结束语

本研究主要进行了应用于飞轮储能系统的高速永磁电机转子的设计工作。

(1) 使用解析法分析了表贴式高速转子的力学特性,分析护套厚度对表贴式高速永磁电机机械性能影

响,发现了采用降低定子槽口宽度、增加气隙长度、减小护套厚度等措施可以降低转子涡流损耗,提高了飞轮储能系统的冷却性能与运行效率。

(2) 为降低损耗,提高材料利用率,使用正交分析法进行优化分析,给出了一台80 kW表贴式高速永磁无刷直流电机的转子设计方案,并用有限元法对转子强度与机械性能进行验证,表明设计合理可靠。

参考文献(References):

- [1] 戴兴建,邓占峰,刘刚,等.大容量先进飞轮储能电源技术发展状况[J]. 电工技术学报,2011,26(7):133-140.
- [2] 王凤翔. 高速电机的设计特点及相关技术研究[J]. 沈阳工业大学学报. 2006,28(3):258-264.
- [3] BIANCHI N, BOLOGNANI S, LUISE F. Potentials and limits of high-speed PM motors [J]. **Industry Applications, IEEE Transactions on**, 2004, 40(6): 1570-1578.
- [4] 沈建新,李鹏,郝鹤,等. 高速永磁无刷电机电磁损耗的研究概况(英文)[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 62-74.
- [5] 车良松,潘伯松,戈道川,等. 轮毂式永磁无刷直流电机空载气隙磁密波形的模拟分析[J]. 机电工程, 2011, 28(3): 374-376, 384.
- [6] 田占元,祝长生,王玘. 飞轮储能用高速永磁电机转子的涡流损耗[J]. 浙江大学学报:工学版, 2011, 45(3): 451-457.
- [7] 王继强,王凤翔,鲍文博,等. 高速永磁电机转子设计与强度分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 48(20): 140-145.
- [8] 王天煜,王凤翔,方程. 高速永磁电机转子多场综合设计[J]. 沈阳工业大学学报, 2011, 33(5): 486-490, 495.
- [9] JIAN X S. Reduction of rotor eddy current loss in high speed PM brushless machines by grooving retaining sleeve [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2013, 49(7): 3973-3976.
- [10] ZHOU F. Study of retaining sleeve and conductive shield and their influence on rotor loss in high-speed PM BLDC motors [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2006, 42(10): 3398-3400.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

姚阳,方俊同,董凡,等. 飞轮储能系统中高速电机转子的分析设计[J]. 机电工程, 2014, 31(10): 1306-1310.

YAO Yang, FANG You-tong, DONG Fan, et al. Analysis and design of the rotor of high speed machine for flywheel energy storage system [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(10): 1306-1310.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>