

电磁结构对高速永磁电机转子涡流损耗的影响

[陈夺]

[北京科技大学, 100083]

[摘要] 本文设计了一台高速永磁电机, 分析了定子槽数, 槽口宽度、定子裂变比、永磁体极弧系数等参数对转子涡流损耗的影响, 并对一种复合屏蔽层空心转子结构进行了研究, 分析了外屏蔽层电导率对转子各部分涡流损耗的影响, 并为屏蔽层的制作材料的选择提供了理论依据。最后, 本文建立了转子温升测试试验台, 对比了有, 无铜屏蔽层的两种转子的温升, 实验结果验证了理论分析的正确性

[关键词] 涡流损耗, 高速永磁电机, 电磁结构, 空心转子结构, 复合屏蔽层

Effect of Electromagnetic Structure Parameters on the Rotor Eddy Current Loss of High-Speed Permanent Magnet Motor

[CHEN-Duo]

[Mechatronics Engineering Department in School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing, 100083]

[Abstract] In this paper, the effect of electromagnetic structure parameters, such as the number of stator slots, slot width, fission ratio, pole arc coefficient of the permanent magnet on the rotor eddy current loss are analyzed. A hollow rotor with double shield structure is proposed and the contribution of the shield layer conductivity to the rotor eddy current losses is discussed, which provides theoretical basis for choosing the shield material. Finally, the temperature rising of the rotors with and without copper shield was experimentally studied and the validation of the theoretical analysis is verified by the experimental results.

[Keyword] eddy current loss, high-speed permanent magnet motor, electromagnetic structure, hollow rotor structure, Double shield

1 前言

高速永磁电机相比同功率的中低速电机,具有转速高、体积小、功率密度大、转动惯量小、动态响应快等优点,已成为了电机领域的研究热点,并在高速加工中心、分子泵、飞轮储能,离心式空气压缩机等领域获得了广泛应用^[1-2]。

转子的涡流损耗是指变化的磁通在导电的转子材料中引起的涡电流造成的损耗,具体包括:1)齿槽结构造成的气隙磁密变化产生的齿谐波在转子上产生的涡流损耗;2)绕组中磁动势造成的空间谐波在转子上产生的涡流损耗;3)相电流变化造成的时间谐波在转子上产生的涡流损耗。中低转速的电机,转子涡流损耗较小,影响可以忽略不计,高速电机的转速高,磁通变化快,转子的涡流损耗较大,而且由于结构原因,转子不易散热,产生的热量过大容易造成永磁体退磁,电机性能下降,甚至报废,所以从电磁结构设计角度分析转子涡流损耗并提出有效的抑制措施是非常必要的^[3-5]。文献^[6]中介绍了目前常用的两种表贴式转子结构,一种是在永磁体外用碳素纤维捆绑,一种是用不锈钢做保护套,不过碳素纤维导热能力差,而不锈钢结构涡流损耗大,文中没有对转子涡流损耗做进一步地分析。文献^[7-8]中提出了将永磁体内置在空心轴内的一种转子结构,但是只考虑了保护永磁体在高速旋转中抵抗离心力的问题,转子涡流损耗较大。文献^[9-11]分析了电流谐波对转子涡流损耗的影响,却忽略了电磁结构的影响,此外,文献还分析了在保护套内侧设置铜屏蔽层对转子涡流损耗的影响。但该方法可以屏蔽高次谐波向磁钢中的渗透,却不能降低保护套内的涡流损耗。

本文以高速永磁电机为研究对象,分别从定子槽数,槽口宽度、定子裂变比和永磁体极弧系数等参数对转子涡流损耗的影响进行了分析,同时对一种复合屏蔽层空心转子结构进行了研究,讨论了屏蔽层电导率和厚度对转子涡流损耗的影响。最后通过有、无铜屏蔽层的转子温升对比实验,验证了选择纯铜作为复合式屏蔽层的外层能有效降低转子涡流损耗的作用。

1. 电机的建模与仿真

高速永磁电机转子涡流损耗产生于转子的导电材料中,包括空心轴和永磁体两部分。涡流损耗 P 的计算公式为:

$$P = \int_V \sigma E^2 dV = \int_V J^2 / \sigma dV \quad (1)$$

式中 σ 是材料的电导率; E 是电场强度; J 是涡电流密度; V 是体积。

由公式(1)可知,电机定、转子结构参数,如槽数,槽口宽度、定子裂变比等,永磁体极弧系数和材料电导率等参数会影响转子上的电场强度,进而影响转子涡流损耗。本文通过耦合控制电路和电机电磁场有限元分析的方法,计算出电机转子上的涡电流损耗,并通过参数研究得出涡流损耗的变化规律。计算中使用的高速永磁电机模型如图 1 所示,包括定子,定子绕组、空心转子、永磁体等几个部分。设计中为降低电机高速运行时产生的铁心损耗,高速永磁电机定子材料采用厚度为 0.2mm 的高频低损硅钢片;为降低绕组集肤效应产生的涡流损耗,绕组采用多股漆包线并绕;转子采用非导磁不锈钢材料和空心轴结构,减小了转子的转动惯量,提高了转子动态响应速度;将两极柱状永磁体固定在空心转子中心位置,永磁体材料选择高性能的钕铁硼材料。电机的主要参数见表 1。

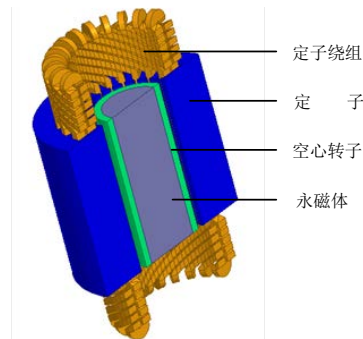


图 1. 高速永磁电机模型

Fig 1. The model of high speed permanent magnet motor

表 1. 电机主要参数

Tab1. The main parameters of motor

| | |
|-------|-----------|
| 额定功率 | 10kw |
| 额定电压 | 380V |
| 额定转速 | 100krpm |
| 定子外径 | 60mm |
| 铁心长度 | 55mm |
| 定子内径 | 36mm |
| 转子外径 | 31mm |
| 定子材料 | 10JNEX900 |
| 永磁体材料 | N35UH |

2. 定子结构的影响

2.1 定子槽数的影响

定子槽会在气隙磁场中产生齿谐波，进而影响转子涡流损耗。通过有限元计算，在同一功率下，6槽、12槽、24槽、36槽结构下转子的涡流损耗数值如图2所示，其中6槽结构涡流损耗数值较大，为106.2W，24槽结构与36槽结构数值接近71W左右，由图2可以看出转子涡流损耗的数值随着槽数的增加而减小，槽数大于24以后，涡流损耗数影响可以忽略，定子选择24槽或者24槽以上结构有利于降低转子涡流损耗。

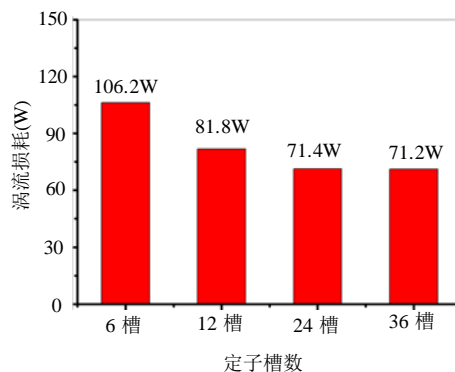


图 2. 槽数的影响

Fig 2. The effect of the slot number

2.2 定子槽口宽度的影响

定子槽口宽度影响气隙磁密波形进而影响转子涡流损耗，本文选择 24 槽结构电机，进行有限元分析，得到槽口宽度变化从 0.8mm 到 1.6mm 转子涡流损耗如图 3 所示，由图可知，转子的涡流损耗数值随着槽口宽度的增加而增大，所以可以通过减小槽口宽度的方法来降低转子的涡流损耗。

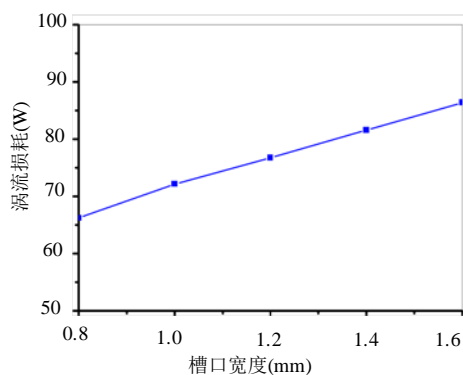


图 3. 槽口宽度的影响

Fig 3. The effect of the slot width

2.3 定子裂变比的影响

定子裂变比（定子内径与外径的比例）变化会改变气隙磁密和转子体积，进而影响转子涡流损耗。通过有限元分析，裂变比 0.4-0.6 之间转子涡流损耗变化如图 4 所示。由图可知转子涡流损耗随着定子裂变比的增加而下降。定子裂变比增加，转子直径增大，气隙内的磁场强度增加，同一功率下电枢绕组的安匝数就会减少，从而导致磁动势中谐波的幅值减小，谐波中的高次谐波幅值同样减小，因而转子中涡流损耗数值下降。因此，在设计电机时适当提高定子裂变比有利于降低转子涡流损耗。

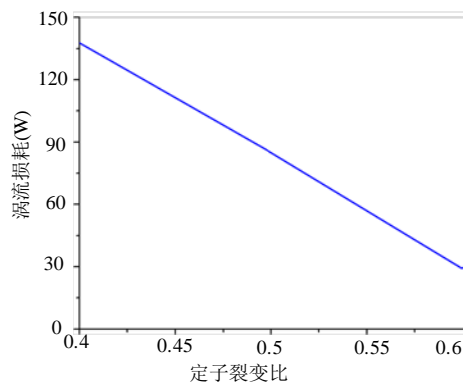


图 4. 定子裂变比的影响

Fig 4. The effect of fission ratio

3. 转子结构的影响

3.1 永磁体极弧系数的影响

永磁体的极弧系数可以改善气隙磁密波形进而影响转子的涡流损耗。本文电机结构采用的是柱状永磁体结构，通过有限元分析极弧系数对转子涡流损耗影响如图 5 所示。由图可知，随着永磁体极弧系数增加，涡流损耗减小，当极弧系数为 1 时，气隙磁场的波形为正弦，转子的涡流损耗数值最小，因此提高柱状永磁体的极弧系数有利于降低转子的涡流损耗。

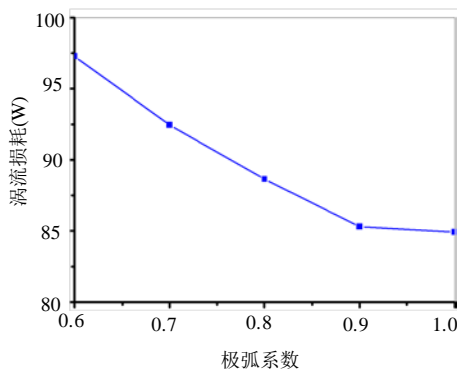


图 5. 极弧系数的影响

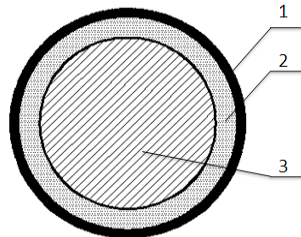
Fig 5. The effect of pole acr coefficient

3.2 复合屏蔽层结构及其影响

为了降低转子的涡流损耗，本文对一种复合转子结构进行了研究，结构如图 6 所示。将柱状永磁体内置于非导磁不锈钢空心转子中，并在空心转子外表面增加一层导电屏蔽层。这种转子结构的优点在于：

- 1) 保护套与主轴一体化，结构简单，易于加工；

- 2) 磁刚在主轴中心，抗离心力能力强，适合在高速、超高速条件下工作；
- 3) 体积小，重量轻，转动惯量小，动态响应快。



1. 铜屏蔽层 2. 空心轴 3. 永磁体

图 6. 复合屏蔽层空心转子结构

Fig 6. hollow rotor structure with Double

3.2.1 外屏蔽层电导率的影响

屏蔽层电导率对转子涡流损耗的影响如图 7 所示。由图可知，永磁体和空心轴上的损耗随着屏蔽层电导率的增加而减小；屏蔽层上的损耗在电导率小于 10MS/m 时随着电导率的增加而增大，在大于 10MS/m 时随着电导率的增加而减小，当电导率大于 40MS/m 以后，涡流损耗的下降趋于平缓；而转子涡流的总损耗随着电导率的增加而减小。此外，该图也提示，当采用单一屏蔽层时，电导率在 1-20MS/m 范围内会使转子涡流损耗处于较高水平，不利于降低转子温升。常用于制作电机转子保护套的不锈钢，如 1Cr18Ni9Ti 等材料，其导电率为 1.4MS/m，并不利于降低转子涡电流损耗和温升。而像非磁性钛合金材料的电导率只有 0.61MS/m，相比不锈钢

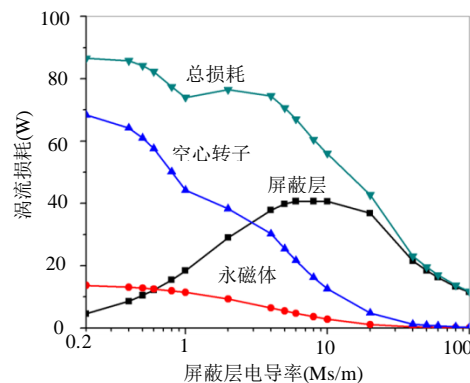


图 7. 屏蔽层电导率的影响

Fig 7. The effect of the outer shield layer conductivity

更适合用于制作高速永磁电机的磁钢保护套。纯铜、银合金等材料的电导率可以达到或超过 60 MS/m，虽可有效降低转子涡流损耗，但由于机械强度过低，不适合单独作为磁钢保护套的材料而使用。因此，将两种不同电导率和机械强度的材料复合使用，可以达到既降低转子涡流损耗，又满足机械强度要求的目的，如本文所介绍的复合屏蔽层空心转子结构等。

3.2.2 外（铜）屏蔽层厚度的影响

本文选择纯铜作为外屏蔽层材料，分析屏蔽层厚度对转子涡流损耗的影响，如图 8 所示。可以看出随屏蔽层厚度增加，转子的涡流损耗先迅速减小，然后趋于平稳。这提示对于降低涡流存在

最小屏蔽层厚度（图中情况大致为 0.65mm）。这是因为转子谐波的透入深度有限，超过这一深度，谐波基本被屏蔽，也就不会引起转子发热了。因此，应该选取作用在转子上高次谐波的透入深度作为设定屏蔽层厚度的最佳值。

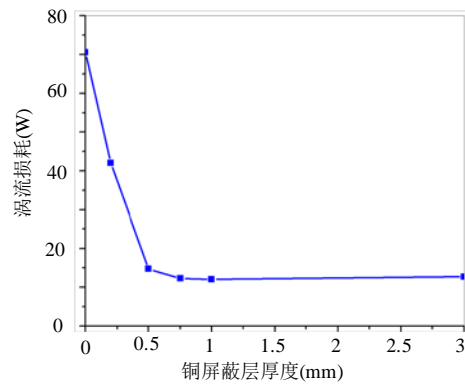
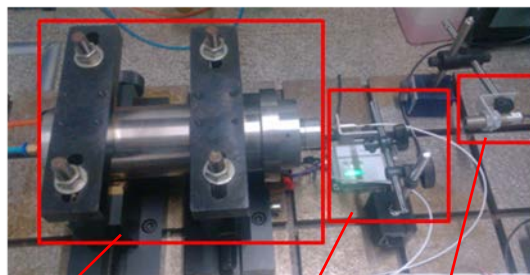


图 8 铜屏蔽层厚度的影响

Fig 8. The effect of the copper outer shield layer

4. 实验研究

为验证本文所提出的新型转子结构可以有效地降低转子涡流损耗，我们搭建了高速电机实验台。为使电机能够高速运转，采用了空气动静压轴承最为转子支撑；同时，为了测量磁钢的温度，在转子前、后两端都设计了测试孔，以便红外温度传感器能够从电机两端外侧实时地测量高速旋转磁钢中心的温度，如图 9 所示。转子分别采用无铜屏蔽层和有铜屏蔽层两种结构，分别如图 10 (a) 和 (b) 所示。



1. 高速主轴电机 2. 红外线温度传感器 3. 速度传感器

图 9. 转子温升实验台

Fig 9. Temperature test bench of the rotor

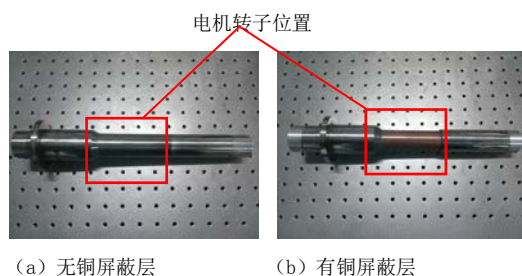


图 10. 转子结构实物图

Fig 10. The prototype of rotor

实验中电机最高转速设定为 40000rpm，采用 BLDC 模式驱动，实验所测转子磁钢中心部的温度结果如图 11 所示。由图可知，有铜屏蔽层的转子温度明显低于无铜屏蔽层转子，且转速越高，两者相差越明显。实验中，最高转速下的温度差可达 20 度左右，证明复合屏蔽层结构能够有效减小转子涡流损耗和温升。

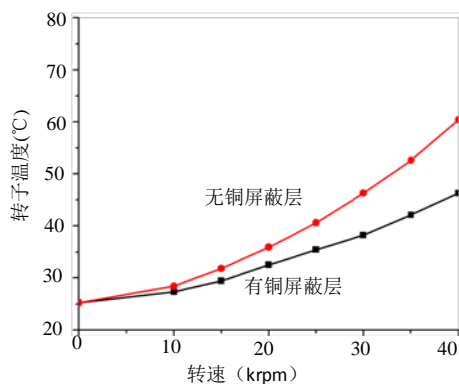


图 11. 有、无铜屏蔽层转子温升结果比较

Fig 11. The temperature comparing between the rotor with copper shield and the rotor without copper shield

5. 结论

本文对电机定、转子结构（参数），如定子槽数，槽口宽度、定子裂变比、永磁体极弧系数和复合屏蔽层转子结构等对转子涡流损耗影响进行了分析，得到如下结论：

- 1) 转子涡流损耗的数值随着定子槽数的增加而减小，当槽数大于 24 以后，其对涡流损耗数影响可以忽略不计。
- 2) 转子的涡流损耗数值随定子槽口的宽度缩小而减小，但最小宽度应根据绕组线径和制作工艺而确定。

- 3) 转子涡流损耗随着定子裂变比增加而减小。
- 4) 转子的涡流损耗随着永磁体极弧系数的增加而减小，因此选择极弧系数接近 1 的柱状或整体环状永磁体最佳。
- 5) 采用单一屏蔽层结构时，电导率在 1-20MS/m 范围内的材料会使转子涡流损耗处于较高水平。理论和实验证明钛合金或不锈钢外包铜屏蔽层的方法可以显著降低转子涡流损耗。外屏蔽铜层的厚度应达到高次谐波的渗透深度。

[参考文献]

- [1] M. A. Rahman, and Akira Chiba, "Super High Speed Electrical Machines-Summary", IEEE-PES Meeting at Denver-2004-Panel Session on Super High Speed Drive, pp.1-4, 2004.
- [2] N.Bianchi, S.Bolognani, F.Luise. Potentials and limits of High -Speed PM Motor. IEEE Transactions on Industry Applications. 40(6):1570-1578,2004
- [3] Co Huynh, Liping Zheng, Dipjyoti Acharya. "Losses in High Speed Permanent Magnet Machines Used in Microturbine Applications", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 131 / 022301-1, MARCH 2009.
- [4] L.Zheng, T.X.Wu."Design of a Super-High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor for Cryogenic Applications ,IEEE PP: 874-881 2005.
- [5] 李伟利,李守法.感应电动机定转子全域温度数值计算及相关因素敏感性分析.[J]中国电机工程学报 pp:85-91 2007
- [6] 王凤翔.高速电机的设计特点及相关技术研究.沈阳工业大学学报.2006,28(03):258-264
- [7] S. Lin, T. X. Wu, L. Zhou, F. Moslehy, J. Kapat, and L. Chow, "Modeling and Design of Super High Speed permanent Magnet Synchronous Motor", IEEE, pp.41-44, 2008.
- [8] L.Zheng, T.X.Wu, D.Acharya, K.B.Sundaram "Design of a Super-High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor for Cryogenic Applications" IEEE, pp.874-881,2005.
- [9] Fengzheng Zhou, Jianxin Shen, Weizhong Fei, and Ruiguang Lin. "Study of Retaining Sleeve and Conductive Shield and Their Influence on Rotor Loss in High-Speed PM BLDC Motors." IEEE, VOL. 42, NO. 10, OCTOBER 20
- [10] Aglen O,Andersson A.Thermal analusis of a high speed generator[A] IEEE-IAS. Conference Record of the IEEE Industry Application Society Thirty Eingt Annual Meeting[C]. salt Lake city: IEEE, 2003: 547—554.
- [11] Aglen O. Loss calculation and thermal analusis of a high-speed generator[A]. IEEE Electric Machines and Drives Conference[C],Madison :IEEE,2003:1117-1123