

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.11.020

超高速永磁电机转子结构的研究*

程 鑫¹, 曾国辉^{1*}, 杜光辉²

(1. 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201600;

2. 西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要:针对超高速永磁电机在高速旋转时,永磁体因离心力作用易被破坏的问题,对适用于超高速永磁电机的转子结构进行了研究。采用有限元法对常规转子结构电机和实心永磁转子结构电机进行了研究,对比分析了两种结构电机在额定条件下的转子涡流损耗,分析了护套厚度和转速对转子强度的影响,最后分析了两种结构电机在温升方面的差异。研究表明:在满足电磁性能的前提下,实心永磁转子结构的电机在更小的转子护套厚度下,能够达到比常规结构永磁电机更好的转子强度;同时,实心永磁转子的电机的有效长度更短,转子涡流损耗和电机温升都比常规转子结构电机更低。

关键词:超高速永磁电机;涡流损耗;转子强度;温升

中图分类号:TM351

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2019)11-1226-05

Rotor structure for ultra-high speed permanent magnet motor

CHENG Xin¹, ZENG Guo-hui¹, DU Guang-hui²

(1. School of Electronics and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science,

Shanghai 201600, China; 2. School of Electronic Information Engineering,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: Aiming at the problem that the permanent magnet is easily damaged by the centrifugal force when the ultra-high speed permanent magnet motor rotates at high speed, the rotor structure which is suitable for the ultra-high speed permanent magnet motor was studied. The finite element method was used to study the conventional rotor structure motor and solid permanent magnet rotor structure motor. The rotor eddy current loss of two structure motors under rated conditions were compared and analyzed, and the influence of sleeve thickness and speed on rotor strength was analyzed. Finally, the difference of temperature rise between the two structural motors were analyzed. The results indicate that the permanent magnet motor with solid rotor structure can achieve better rotor strength than the conventional permanent magnet motor with smaller rotor sleeve thickness under the premise of satisfying the electromagnetic performance. At the same time, the effective length of the motor with solid permanent magnet rotor is shorter, and the eddy current loss and temperature rise of the motor are lower than those of the conventional rotor structure motor.

Key words: ultra-high speed permanent magnet motor; eddy current loss; rotor strength; temperature rise

收稿日期:2019-03-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807075);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2018JQ5009);陕西省教育厅专项科研计划资助项目(18JK0398)

作者简介:程鑫(1991-),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事高速电机设计方面的研究。E-mail:sues_chengx@163.com

通信联系人:曾国辉,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:zenggh@sues.edu.cn

0 引言

高速电机通常指转速 10 000 r/min 以上的电机,结构简单、体积小、功率密度高;同时,高速电机省去了中间的变速装置与负载直接连接,具有较高的可靠性^[1-3]。所以,高速电机在过去的 10 年间得到了广泛关注。

因为高速电机转速很高,普通的转子叠片难以承受电机在高速旋转时产生的巨大离心力,需要采用高强度的转子叠片或者实心结构。特别是超高速电机,转子的离心力更大,转子更容易损坏。对于功率较大、转速较高的高速永磁电机,一般采用表贴式。但是烧结成的永磁体在高速旋转时易被破坏,影响电机的可靠性。为了保证高速永磁电机能安全可靠的运行,一般采用高强度的碳纤维护套对永磁体进行保护。但是高速永磁电机在额定工况时,会在转子护套和永磁体中产生大的涡流损耗,引起转子升温,过高的温度会严重影响电机的性能与安全^[4-6]。

高速永磁电机设计过程中,涡流损耗、转子强度和电机温度是关键因素^[7-8]。如何在满足电磁性能与温升的同时,保证转子强度成为高速永磁电机研究的重点。王保俊等^[9]采用了解析法和有限元法分析了电机在静止与高速旋转时的转子应力,研究指出了解析法与有限元法误差很小;张凤阁等^[10]研究了护套材料对转子涡流损耗和温升的影响,研究指出了采用碳纤维护套时,电机的涡流损耗最小,温度最低。

目前,针对常规转子结构的电机研究文献较多,而对实心永磁结构的电机研究很少,且没有文献对两种结构的电机进行综合对比的研究。

本文将对比分析常规转子结构和实心永磁结构对超高速永磁电机的涡流损耗、转子强度和电机温度的影响,以得出更适用于超高速高速永磁电机的转子结构。

1 两种不同的转子结构

本文以 100 kW、100 000 r/min 的超高转速永磁电机为例,分别设计出具有两种不同转子结构的超高速永磁电机。

两种结构电机的定子结构、转子外径、气隙长度一致,其基本参数如表 1 所示。

表 1 两种结构电机的基本参数

参数名称	常规转子	实心转子
额定功率/kW	100	
额定转速/(r·min ⁻¹)	100 000	

额定电压/V	380	
定子槽数	24	
极数	2	
定子外径/mm	150	
转子外径/mm	60	
气隙长度/mm	1	
护套厚度/mm	8.5	6.5
有效长度/mm	165	154

两种结构电机截面图如图 1 所示。

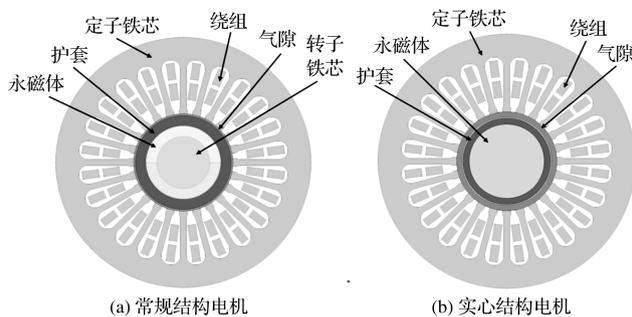


图 1 两种结构电机截面图

从图 1 可以看出:永磁体安装在转子铁芯表面,碳纤维护套与烧结永磁体之间通过过盈配合,对永磁体进行保护。

2 两种结构电机电磁对比分析

在保证两种电机定子结构、绕组电流、转子外径一样的前提下,下面将比较两种电机的气隙磁密和涡流损耗,以得出两种电机在电磁特性方面的差异。

两种结构电机气隙磁密如图 2 所示。

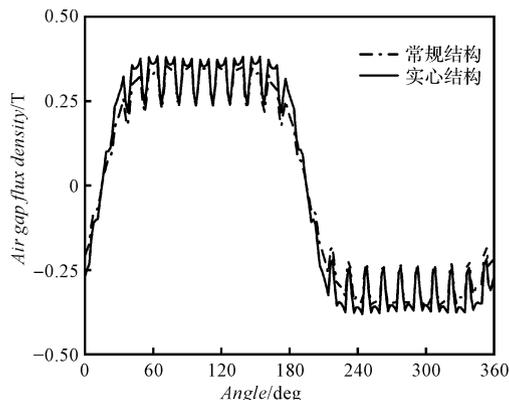


图 2 两种结构电机气隙磁密

从图 2 可以看出:常规转子电机的气隙磁密的幅值为 0.36 T,实心转子电机的气隙磁密的幅值为 0.38 T,实心转子电机幅值比常规转子电机略大,但两者波形基本一致。这是因为两种电机的定子结构、转子外径一样,气隙长度相同,实心转子电机的永磁体用量比常规转子电机多,能够提供更大的励磁磁通。

两种结构电机负载时的转子涡流损耗如表 2 所示。

表 2 两种结构电机的涡流损耗

参数名称	常规结构	实心结构
总损耗/W	99	98
护套/W	98.4	96.5
永磁体/W	0.6	1.5

表 2 显示:两种结构电机的总涡流损耗差别很小,两种结构电机的转子涡流损耗主要集中在转子护套上,永磁体中的涡流损耗都比较小。这是因为电机的转速很高,电机运行时的谐波频率很高,气隙中的高次谐波主要集中在转子护套上,难以透入永磁体中。

3 两种结构电机应力对比分析

超高速电机的额定转速达到 100 000 r/min,电机的永磁体和护套在高速旋转时会承受非常大的离心力,产生非常大的应力。尤其是永磁体材料不能承受高速旋转时产生的大的拉伸应力,过高的拉伸应力会造成永磁体破坏,影响电机的性能和可靠性,所以对永磁体采取保护措施。对于表贴式高速永磁电机,一般在永磁体外加高强度的护套,护套与永磁体之间采用过盈配合,利用护套对永磁体施加的预压力来抵消电机高速旋转离心力产生的应力。

电机要想安全稳定运行,转子各个部分的应力必须满足材料的需用应力,尤其是永磁体受到的应力要小于永磁体的极限拉伸应力。此外,电机从启动到额定运行时,转子是在不同的温度下运行,转子应力受到温度的影响。所以,对转子强度的分析还必须考虑温度的影响。

本文采用有限元法,对两种结构电机在额定工况下的转子强度进行分析。

两种结构电机永磁体随温度下的应力如图 3 所示。

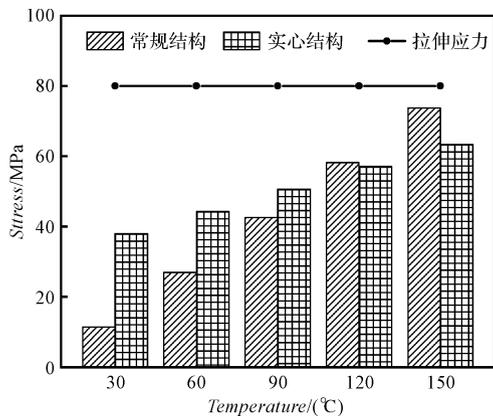


图 3 两种结构电机永磁体应力随温度的变化

从图 3 可以看出:两种结构电机的永磁体受到的应力随温度的变化相同,都随着温度的升高而变大;当温度为 150 °C,电机在额定转速时,常规转子电机的永磁体受到的最大应力为 74.1 MPa,而实心转子电机的永磁体受到的最大应力为 62.8 MPa;永磁体能承受的 80 MPa 拉伸应力和 800 MPa 的压缩应力,两种结构电机在额定转速下均能够安全运行。

转子护套厚度会对转子强度产生很大的影响:较小的护套厚度不能保证永磁体强度,在电机高速运行时会造成永磁体损坏;而较大的护套厚度虽然能有效保护永磁体安全,但碳纤维护套的热导率很低(是热的不良导体),转子护套会给电机转子的散热带来困难,过高的转子温度可能会造成永磁体不可逆退磁,同样难以保证电机的可靠运行。因此,选择合适的转子护套厚度,研究护套厚度对永磁体应力的影响很有必要。

两种结构电机永磁体应力随护套厚度的变化如图 4 所示。

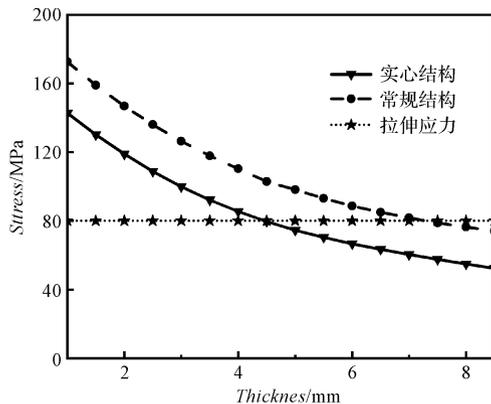


图 4 两种结构电机永磁体应力随护套厚度的变化

从图 4 可以看出:两种结构电机的永磁体应力随转子护套厚度的变化是一致的,都是随着转子护套厚度的增加而减小;在额定转速下,当常规结构电机护套厚度为 7.8 mm 以上时,永磁体受到的应力在永磁体的极限拉伸应力以下,而实心电机的护套厚度需要 4.7 mm 以上。

所以,在满足永磁体安全的条件下,实心结构电机需要的护套厚度要小于常规结构电机。

电机的转速对转子的应力影响同样很大,分析电机永磁体在不同转速下的应力分布尤为重要。

两种结构电机永磁体应力随转速的变化如图 5 所示。



从图 5 可以看出:两种结构的电机的永磁体应力都随转速的增加而增加;在相同的转速下,实心结构电机永磁体受到的应力要比常规结构电机低,常规结构电机转速在 10×10^4 r/min 时,永磁体受到的应力已经很接近永磁体的极限拉伸应力;而实心转子电机时在 10×10^4 r/min 时,永磁体受到的应力还有较大的余量。

所以,在相同的转速下,实心结构电机可以在更高的转速下运行。

4 两种结构电机温度仿真分析

高速电机设计必须考虑到电机的温度。高速电机体积小、功率密度大,单位体积内的损耗要比普通的电机大得多。温升过高会损坏电机定子绕组的绝缘,尤其是在过高的温度下永磁体会产生不可退磁,影响电机的使用寿命和运行可靠性。为了保证高速永磁电机的安全、可靠运行,本文必须对高速永磁电机内部的温升进行准确计算。

两种结构电机都采用了定子水冷和转子通风散热的冷却方式,保证两种结构电机的转子通风量和定子水道流量相同。两种结构电机具有相同的定子结构、气隙长度和转子外径。

电机转子的摩擦损耗如下式所示:

$$P_f = kC_f \pi \rho \omega^3 r^4 L \quad (1)$$

式中: k — 转子表面的粗糙度系数; C_f — 旋转转子表面的摩擦系数; ρ — 空气密度; ω — 转子旋转角速度; r — 转子外半径; L — 电机的有效长度。

旋转转子表面的摩擦系数如下式所示:

$$C_f = \frac{0.015}{Re_\delta^{0.24}} \left[1 + \left(\frac{32Re_\alpha}{7Re_\delta} \right)^2 \right]^{0.38} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Re_\delta = \frac{\rho \omega r \delta}{\mu} \\ Re_\alpha = \frac{2\rho V_\alpha \delta}{\mu} \end{cases} \quad (3)$$

式中: Re_δ — 径向雷诺数; Re_α — 轴向雷诺数; δ — 气隙长度; V_α — 轴向强迫风冷的风速; μ — 空气运动粘度。

两种结构电机的风摩擦损耗如表 3 所示。

表 3 两种结构电机的风摩擦损耗

电机类型	风摩擦损耗/W
常规结构电机	1 028
实心结构电机	960

表 3 显示:常规结构电机和实心结构电机的风摩擦损耗分别为 1 028 W、960 W。虽然两种结构电机的通风量、气隙长度和转子外径一致,但是由于电机的有效

长度更短,实心结构电机风摩擦损耗比常规结构电机小。

以高速永磁电机的各部分损耗为电机的发热源,本文建立两种结构电机的热分析模型,对两种结构电机进行热分析。

两种结构电机温度分布如图 6 所示。

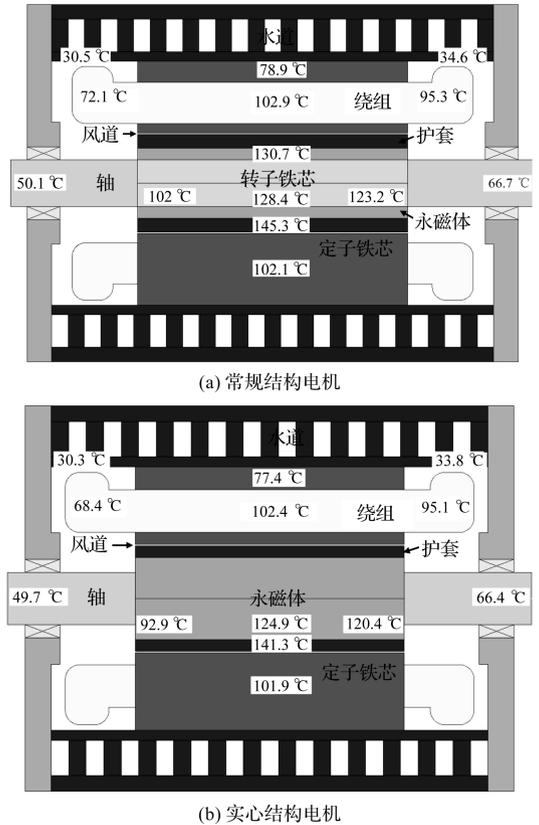


图 6 两种结构电机温度分布图

从图 6 可以看出:两种电机都是中间的部分比两边的部分温度高,电机的最高温度都出现在转子护套上,常规电机的护套最高温度为 145.3 °C,永磁体上的最高温度为 130.7 °C,实心电机的护套最高温度为 141.3 °C,永磁体上的最高温度为 124.9 °C。实心转子电机由于护套厚度更小,转子更容易散热,实心转子电机的护套上的最高温度比常规转子电机低 4 °C,永磁体上的温度降低了 5.8 °C。

5 结束语

以一台 100 kW,100 000 r/min 的超高速永磁电机为例,本研究对比分析了两种结构的电机在电磁、转子强度和温度等方面的差异,得出以下结论:

- (1)在满足额定性能的要求下,实心电机转子长度更短;
- (2)实心转子电机的气隙磁密更高,但由于电机有效长度比常规转子电机要短一些,两者的转子涡流

损耗基本一致,实心转子电机并没有牺牲效率;

(3)实心转子电机的转子强度更好,在相同的转速下运行,实心电机可以在更小的转子护套厚度下达到比常规转子电机更好的转子强度;

(4)相同的冷却条件下,实心转子电机由于护套厚度和风摩擦损耗更小,转子更容易散热,转子温度更低。

参考文献 (References):

[1] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等. 高速电机发展与设计综述 [J]. 电工技术学报,2016,31(7):1-18.

[2] 董剑宁,黄允凯,金龙,等. 高速永磁电机设计与分析技术综述 [J]. 中国电机工程学报,2014,34(27):4640-4653.

[3] 姚 阳,方攸同,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.

[4] 周凤争,田占元,祝长生,等. 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.

[5] ZHANG F G, DU G H, WANG T Y, et al. Electromagnetic design and loss calculations of a 1.12-MW high-speed per-

manent-magnet motor for compressor applications[J]. **IEEE Transactions Energy Conversion**, 2016,31(1):132-140.

[6] ZHENG Y, MCLOONE S, CAO W P, et al. High speed permanent magnet motor design and power loss analysis[C]. 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, Harbin:IEEE,2017.

[7] BARRANS S M, MAHIR M J, CARTER J, et al. Mechanical design of rotors for permanent magnet high-speed electric motors for turbocharger applications [J]. **IET Electrical Systems in Transportation**, 2017,7(4):278-286.

[8] LI W L, QIU H B, ZHANG X C, et al. Influence of rotor sleeve electromagnetic characteristics on high speed permanent-magnet generator[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2014,61(6):3030-3037.

[9] 王保俊,毕刘新,陈亮亮. 碳纤维绑扎表贴式高速永磁电机转子强度分析[J]. 浙江大学学报:工学版,2014,47(12):2101-2110.

[10] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等. 基于多物理场的高速永磁电机转子护套研究[J]. 电机与控制学报,2014,18(6):15-21.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

程 鑫,曾国辉,杜光辉. 超高速永磁电机转子结构的研究[J]. 机电工程,2019,36(11):1226-1230.

CHENG Xin, ZENG Guo-hui, DU Guang-hui. Rotor structure for ultra-high speed permanent magnet motor[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(11):1226-1230.
《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn

(上接第 1125 页)

[2] 宋 伟,姜红建,王 滔,等. 爬壁机器人磁吸附组件优化设计与试验研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2018,52(10):6-13.

[3] ZHU Z Q, HOWE D. Halbach permanent magnet machines and applications: a review[J]. **IEEE Proceedings-Electric Power Applications**, 2001,148(4):299-308.

[4] 陈 勇,王昌明,包建东. 新型爬壁机器人磁吸附单元优化设计[J]. 兵工学报,2012,33(12):1539-1544.

[5] 闫晨飞,孙振国,张文增,等. 变磁化方向单元组合式永磁吸附装置优化设计[J]. 电工技术学报,2016,31(3):188-194.

[6] 李春生,杜玉梅,夏平畴,等. 磁浮列车工程中的 Halbach 永久磁体结构的优化[J]. 工程设计学报,2007,14(4):334-337.

[7] 尹 真. 电动力学[M]. 3 版. 北京:科学出版社,2010.

[8] KIM W J, TRUMPER D L. High-precision magnetic levitation stage for photolithography [J]. **Precision Engineering**, 1998, 22(2):66-77.

[9] DANIELSSON O, LEIJON M. Flux distribution in linear permanent-magnet synchronous machines including longitudinal end effects [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2007,43(7):3197-3201.

[10] 宋玉晶,张 鸣,朱 煜. Halbach 永磁阵列磁场解析求解及推力建模[J]. 电工技术学报,2014,29(11):61-67.

[11] 白英杰,庄圣贤,李晓龙,等. 基于等效磁荷法的永磁电机 Halbach 阵列磁极磁场分析[J]. 磁性材料及器件, 2016,47(3):13-18.

[编辑:程 浩]