

非晶合金转子铁心对再制造电机性能的影响^{*}

宋守许^{1,2}, 胡孟成^{1,2}, 杜毅^{1,2}, 李诺楠^{1,2}

(1. 机械工业绿色设计与制造重点实验室, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 用铁基非晶合金转子铁心替换原电机中的硅钢转子铁心, 基于有限元软件 Ansoft 分析了非晶转子铁心替换对电机性能的影响。与原电机相比, 再制造电机的转矩提升了 2.6%, 效率提高了 0.05%, 齿槽转矩幅值大幅增加。采用定子斜槽削弱其齿槽转矩, 当斜槽精确为一个齿距时, 电机的齿槽转矩幅值为 0.128 N·m, 相比于未采用斜槽时的再制造电机减小了 92.36%, 相比于原电机减小了 38.46%。

关键词: 永磁同步电机; 非晶合金; 转子铁心; 再制造

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)11-0066-06

Effects of Amorphous Alloy Rotor Core on Performance of Remanufacturing Motor^{*}

SONG Shouxu^{1,2}, HU Mengcheng^{1,2}, DU Yi^{1,2}, LI Nuonan^{1,2}

(1. Green Design and Manufacturing of Mechanical Industry Key Laboratory, Hefei 230009, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Replacing the silicon steel rotor core of original motor by the amorphous alloy rotor core, effects of amorphous alloy rotor core on the performance of motor was analyzed based on finite element software Ansoft. Compared with the original motor, the load torque of the remanufacturing motor was enhanced by 2.6%, the efficiency was 0.05% higher, and the cogging torque was highly improved. In order to reduce the cogging torque, stator with skewed slots was adopted. When the skewed slot number was 1, the cogging torque of the motor was 0.128 N·m, which was reduced by 92.36% compared with the remanufacturing motor and was 38.46% lower than the original motor.

Key words: permanent magnet synchronous motor; amorphous alloy; rotor core; remanufacturing

0 引言

目前,我国以电动汽车为代表的新能源汽车产业发展迅猛,预计到 2020 年我国新能源汽车保有量将达到 500 万辆。在这样的背景下,每年都会有大量的永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 淘汰。相比于传统的异步电机,永磁电机成本更加昂贵,若能够将这些淘汰的 PMSM 进行再制造然后重新投入使用,将会产生巨大的经济价值和社会价值。

电机再制造是通过将电机重新设计、更换零部件等方法,再制造成高效率电机或者适用于特定负载和工况的系统节能电机。近些年来有不少学者就电机再制造展开了研究。史国银等^[1]对电机再制造的必要性进行了简要叙述并总结了目前国内电机再制造的基本流程。电机种类多种多样,而对于不同类型的电机其再制造的方式也会有所区别。对于普通低效电机,可以留用其定转子铁心,更换电机绕组将原电机再制造成同功率或降功率等级的高效电机^[2];对于表贴式感应电

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51575155)

作者简介: 宋守许 (1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为绿色设计与制造、再制造工程等。

胡孟成 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为绿色设计与制造。

杜毅 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机电产品绿色设计与制造。

机可以将其再制造为 PMSM 或将定子铁心经过重新设计提高效率,提升电机性能^[3-4]。此外电机再制造的方式也要根据电机负载和工况的不同而相应做出改变,相应的再制造电机的设计技术和产品标准应该及时提出^[5]。上述研究对象主要是感应电机,而较少有针对车用 PMSM 再制造展开的研究。

随着电机技术的发展,电机铁心采用新型低损耗材料已经成为一种提升电机性能的有效方法。非晶合金是一种新型的材料,具有低铁耗、高磁导、低饱和磁密的特性,目前将其作为电机铁心材料是目前研究的热点。当采用新型浸漆固化方法制作非晶合金定子铁心时,饱和磁密可达 1.36 T,齿磁滞损耗只有硅钢的 1/10,同时,小型异步非晶合金电机的仿真和试验分析结果一致表明非晶合金电机能够大幅降低损耗^[6-7]。将非晶合金使用在电机中也会产生一定的负面影响:研究发现非晶电机的形变量大于硅钢电机,非晶电机在周围环境中的噪声高于硅钢电机,且由于非晶合金的低饱和磁密特性会造成电机的输出转矩有一定幅度的收缩^[8-9]。目前非晶合金电机主要指将非晶合金用于定子铁心,而关于将非晶合金用于转子铁心的研究较少。

本文提出采用非晶合金转子铁心替换原电机中的硅钢转子铁心的永磁电机再制造方法,在有限元软件 Ansoft 的基础上分析了非晶转子替换对电机性能的影响,针对再制造电机效率提高但齿槽转矩增大的问题,采用了定子斜槽的方法消除谐波影响,从而削弱其齿槽转矩。

1 再制造电机材料

本文中采用的非晶合金铁心材料牌号为 Metglas2605SA1,原电机的硅钢牌号为 B35AV1900,由非晶合金材料制成再制造电机转子铁心,定子铁心保留为硅钢材料,经过 MATS-2010S 和 MATS-2010M 软磁磁性测量装置测量非晶合金材料磁性能,硅钢磁性能数据由厂家提供。非晶合金和硅钢的 $B-H$ 曲线图如图 1 所示。非晶合金与硅钢性能参数如表 1 所示。可以看出,非晶合金材料最显著的特点是饱和磁密和铁耗低,其铁耗仅为硅钢片的 1/5~1/10;并且非晶合金的矫顽力小,电阻率高,但是其硬度高、性脆、厚度仅

为 0.03 mm,一方面可以减小涡流损耗,但另一方面增加了加工工艺的难度。

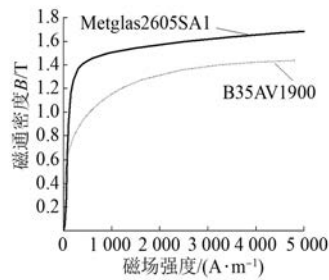


图 1 非晶合金和硅钢 $B-H$ 曲线

表 1 非晶合金与硅钢性能参数

性能指标	非晶合金	硅钢
	Metglas2605SA1	B35AV1900
饱和磁密/T	1.43	1.56
矫顽力/($A \cdot m^{-1}$)	<4	<30
叠片系数	0.9	0.97
电阻率/($\mu\Omega \cdot cm$)	130	45
损耗/($W \cdot kg^{-1}$)	50 Hz、1.3 T $P < 0.2$	50 Hz、1.5 T $P = 1.2$

2 非晶转子再制造电机性能分析

2.1 电机参数

为了研究非晶转子再制造电机的性能,本文选用 1 台已经服役多年的车用 PMSM 进行再制造并进行有限元分析。原 PMSM 的具体参数如表 2 所示。

表 2 PMSM 参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	13	极数	8
额定电压/V	48	定子槽数	48
额定电流/A	20	相数	3
额定转速/($r \cdot min^{-1}$)	3 000	定子铁心外径/mm	210
定子铁心内径/mm	136	转子铁心外径/mm	134.6
转子铁心内径/mm	48	气隙长度/mm	0.7

2.2 再制造电机仿真模型的建立

在进行二维有限元分析时,选择电机的轴向截面作为求解区域。由于电机的对称性,同时为了节省仿真时间,在 Ansoft 中采用 1/8 模型在空载和负载情况下对电机进行仿真分析^[10]。再制

造电机的定子铁心继续留用,转子铁心替换为非晶合金材料。再制造电机模型如图 2 所示。

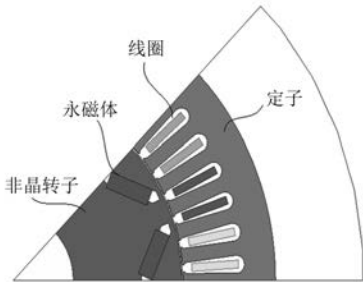


图 2 再制造电机模型

再制造电机定子铁心材料为硅钢 B35AV1900, 转子铁心材料为非晶合金 Metglas2605SA1, 永磁体均采用钕铁硼 (NdFeB) N35UH。选用主从边界条件, 采用电流激励源, 空载运行时电流为零, 负载运行时电流激励源为三相交流电源:

$$\begin{cases} I_A = I\sqrt{2}\sin(\omega t + \beta) \\ I_B = I\sqrt{2}\sin(\omega t + \beta - 2\pi/3) \\ I_C = I\sqrt{2}\sin(\omega t + \beta + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

2.3 再制造电机的性能分析

为了研究再制造电机的性能, 将原电机和再制造电机设置在相同的空载和负载工况下进行仿真分析。负载工况下, 电机功率为额定功率 13 kW, 转速为额定转速 3 000 r/min, 电流有效值 $I=48$ A, 内功率因数角 $\beta=20^\circ$; 空载运行时设置电枢电流有效值为零, 其余参数与负载工况相同。

2.3.1 空载电动势

空载电动势作为矢量控制 PMSM 的重要参数, 其大小及谐波含量对系统调速性能、过载能力、热能力都有着重要影响。通过改变电机转速参数得出电机在不同转速下的空载电动势, 再对空载电动势波形进行傅里叶分解得到电机空载电动势谐波含量。电机在不同转速下的空载电动势如图 3 所示。

再制造电机的空载电动势比原电机有所增加, 且随着转速的提高再制造电机的空载电动势与原电机空载电动势之间的差值越来越大。原电机与再制造电机额定转速下空载电动势的波形傅里叶分解结果如表 3 所示。由表 3 可以看出电机

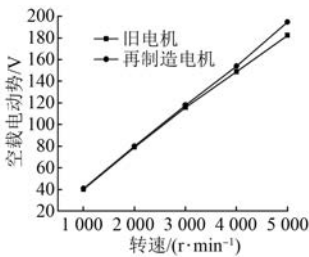


图 3 电机空载电动势随转速变化

基波幅值由原电机的 117.9 V 上升到 123.1 V, 同时其余各次谐波均有不同程度的减小。计算得出原电机的波形畸变率为 8.4%, 再制造电机的波形畸变率为 6.4%, 再制造电机的波形畸变率相比于原电机降低了 2%。

表 3 空载电动势傅里叶谐波分解

谐波次数	空载电动势谐波幅值/V	
	再制造电机	原电机
1	123.1	117.9
3	1.2	3.7
5	6.0	6.2
7	2.8	4.8
9	4.1	5.0

2.3.2 电机气隙磁密

永磁电机工作的理想状态是正弦分布的电流与正弦分布的气隙磁场相互作用, 但由于永磁电机的磁路特点其气隙磁密的分布并非正弦分布, 气隙磁密分布不合理将导致脉动转矩增大、启动电流增大, 造成电机振动或电机负载设备损伤。基于 Ansoft 软件对再制造电机和原电机进行有限元分析, 当 $t=15$ ms 时, 电机气隙磁密如图 4 所示。由图 4 可知, 再制造电机的气隙磁密幅值为 0.964 6 T, 原电机的气隙磁密幅值为 0.908 0 T, 再制造电机比原电机的气隙磁密幅值高 0.056 6 T。

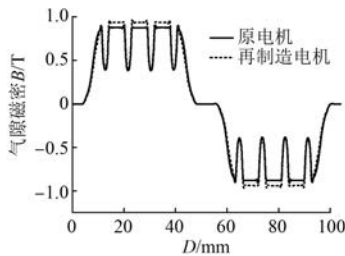


图 4 电机气隙磁密

两种电机气隙磁密的傅里叶分解结果如图 5 所示。由图 5 可得两种电机气隙磁密谐波幅值,再制造电机的基波幅值为 0.909 T,原电机的基波幅值为 0.870 T,再制造电机的气隙磁密基波幅值大于原电机的气隙磁密基波幅值,说明相同条件下再制造电机出力大于原电机。经过计算得到再制造电机的波形畸变率为 28.9%,原电机的波形畸变率为 30.0%,再制造电机的波形畸变率小于原电机,说明再制造电机的气隙磁密波形更加接近正弦波,磁密波形得到改善。

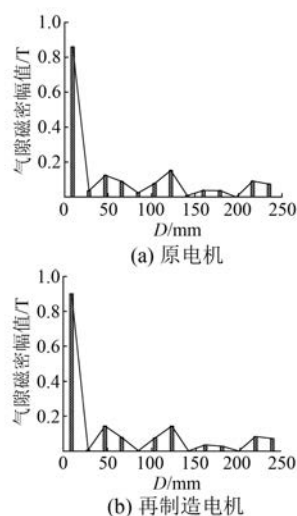


图 5 气隙磁密谐波傅里叶分解

2.3.3 电机负载性能分析

基于建立的再制造电机与原电机的有限元模型,设置相关参数,对再制造电机与原电机的转矩、损耗、效率进行分析对比。

通过有限元模型仿真分析可得电机在标准工况下的转矩特性如图 6 所示。再制造电机的平均输出转矩为 43.85 N·m,原电机的平均输出转矩为 42.73 N·m,再制造电机输出转矩比原电机增加了 2.6%。

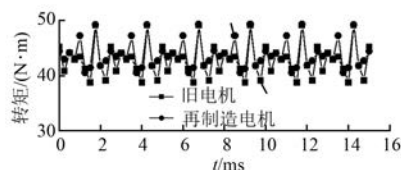


图 6 电机转矩

图 7 所示为再制造电机和原电机在标准工况下的铁耗对比情况。再制造电机的铁耗为

178.7 W/kg,原电机的铁耗为 177.1 W/kg,再制造电机的铁耗相比于旧电机有所增加。

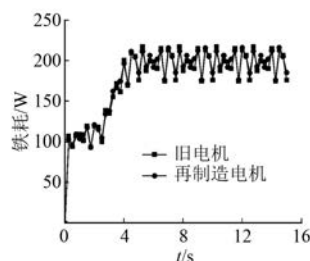


图 7 电机铁耗

电机效率计算式为

$$\eta = 1 - \frac{P_1 + P_2}{P_1 + P_2 + P_3} \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{Tn}{9550} \times 10^3 \quad (3)$$

$$P_3 = 3I^2R \quad (4)$$

式中: P_1 ——电机铁心损耗;

P_2 ——电机输出功率;

P_3 ——电机铜耗;

T ——电机输出转矩;

n ——电机转速;

R ——电机绕组电阻值。

将上面所有数据代入算式可得再制造电机的效率 $\eta=97.75\%$,原电机的效率 $\eta=97.70\%$ 。

2.3.4 齿槽转矩

齿槽转矩是永磁电机绕组不通电时永磁体和铁心之间相互作用产生的转矩,由永磁体和电枢齿之间的相互作用力的切向分量引起。齿槽转矩导致电机转矩波动,引起振动和噪声,影响系统的控制精度。

利用有限元分析软件 Ansoft 对电机进行分析,可得电机的齿槽转矩如图 8 所示。

再制造电机的齿槽转矩幅值为 1.675 N·m,

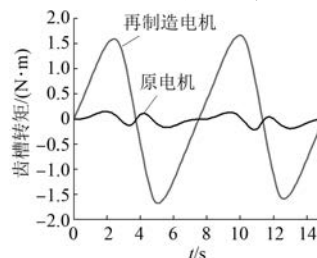


图 8 电机齿槽转矩

原电机的齿槽转矩幅值为 $0.208 \text{ N} \cdot \text{m}$, 再制造电机的齿槽转矩相比于原电机有较大幅度的增加, 这对于电机的稳定运行有较大的影响。对再制造电机和原电机的齿槽转矩进行傅里叶分解, 结果如图 9 所示。由图 9 可以看出再制造电机齿槽转矩的基波和 2 次谐波含量显著增大, 其中基波由原电机的 0.092 增加到再制造电机的 1.506, 2 次谐波由原电机的 0.038 增加到再制造电机的 0.350, 这是再制造电机齿槽转矩大幅增加的主要原因。

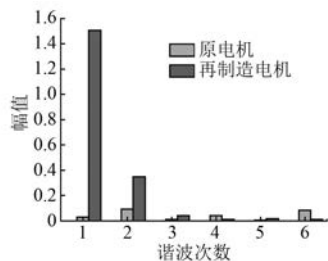


图 9 电机齿槽转矩傅里叶分解

综上所述, 将原电机的硅钢转子替换为非晶合金转子之后, 电机的转矩增加了 2.6%, 效率提高了 0.05%, 气隙磁密波形有所改善。由于电机的铁耗主要集中在定子铁心上, 所以电机的铁耗基本没有变化, 但是再制造电机的齿槽转矩有一个较大的增加, 达到了 $1.675 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。齿槽转矩的增加会对电机产生不利影响, 因此需要对再制造电机结构进行进一步优化以改善电机性能。

3 再制造电机定子结构优化

由上文分析可知, 再制造电机齿槽转矩增大的原因主要在于基波和 2 次谐波含量的增加, 故可通过定子结构优化减小齿槽转矩的基波和 2 次谐波含量, 从而达到削弱齿槽转矩的目的。斜槽和斜极是削弱齿槽转矩比较有效和应用较广的方法之一, 能够有效消除谐波。但是由于斜极工艺复杂, 通常采用斜槽^[11]。斜槽示意图如图 10 所示。

当采用斜槽时, 齿槽转矩的表达式为

$$T_{\text{cog}}(\alpha, N_s) = \frac{\pi L_a}{2\mu_0 N_s \theta_{s1}} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} G_n B_{r_{2p}}^{nz} \sin \frac{nz N_s \theta_{s1}}{2} \sin \left[nz \left(\alpha + \frac{N_s \theta_{s1}}{2} \right) \right] \quad (5)$$

式中: L_a ——定子铁心的轴向长度;

μ_0 ——真空磁导率;

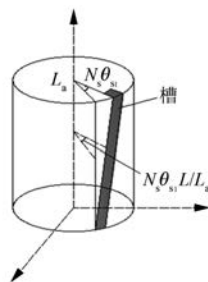


图 10 斜槽示意图

N_s ——定子所斜的槽数;

θ_{s1} ——用弧度表示的定子齿距;

R_1, R_2 ——电枢外半径和定子铁心内半径;

$B_{r_{2p}}^{nz}$ ——第 $\frac{nz}{2p}$ 次谐波磁密值;

α ——定转子相对位置角。

由式(5)可知, 若要消除齿槽转矩中的第 n 次

谐波, $\sin \frac{nz N_s \theta_{s1}}{2}$ 必须为 0, 即 N_s 为 $1/n$ 的整数

倍。由上文分析可知, 造成再制造电机的齿槽转矩增加的原因主要是基波和 2 次谐波大幅增加, 故为消除基波和 2 次谐波的影响, 取 $N_s = 1$ 能够达到效果。使定子采用一个斜槽时仿真分析结果如图 11 所示, 可以看出斜槽数为 1 时, 齿槽转矩幅值为 $0.128 \text{ N} \cdot \text{m}$, 相比于未采用斜槽时的再制造电机减小了 92.36%, 相比于原电机减小了 38.46%。图 12 所示为齿槽转矩傅里叶分解结果。由图 12 可以得知, 电机定子采用的斜槽数为 1 时, 齿槽转矩中的基波和 2 次谐波含量较未采用斜槽的再制造电机有了明显的削弱, 同时其他次谐波均有一定幅度的减小; 相比于原电机, 虽然基波含量稍大于原电机, 但是其他次谐波含量都要小于原电机。以上分析说明定子采用斜槽能够消除谐波的影响从而削弱再制造电机的齿槽转矩, 同时也验证了理论分析的结果。

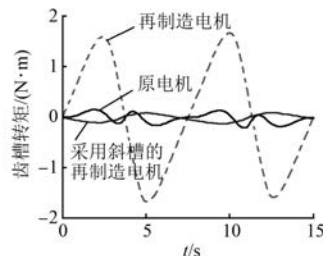


图 11 齿槽转矩对比示意图

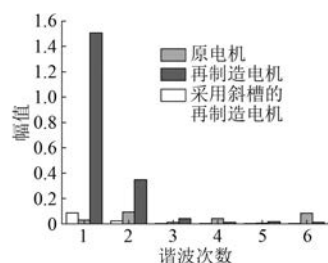


图 12 电机齿槽转矩傅里叶分解

电机空载电动势波形对比和傅里叶分解如图 13 所示。由 13(a) 可以看出,采用斜槽的再制造电机空载电动势波形更加平滑,其空载电动势幅值较再制造电机稍有降低,但是依旧大于原电机的空载电动势幅值。图 13(b) 中,采用斜槽之后,再制造电机的空载电动势基波含量有所降低,但是依然大于原电机中的基波含量,同时其他各次谐波均有不同程度的削弱,且其波形畸变率由未采用斜槽之前的 6.4% 降低到 3.6%,远低于原电机的 8.4%。

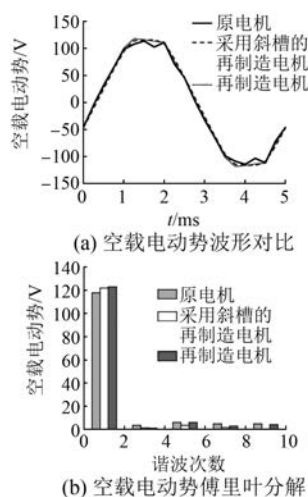


图 13 电机空载电动势波形对比和傅里叶分解

4 结 语

(1) 提出了用非晶合金转子代替原电机硅钢转子的电机再制造方法,应用 Ansoft 分析了空载电动势和气隙磁密,验证了采用非晶转子再制造电机的可行性。

(2) 对再制造电机进行有限元仿真分析,结果表明电机转矩增加了 2.6%,效率提升了 0.05%,损耗与原电机基本相同,说明采用非晶合金转子

在增加电机转矩的同时,对铁耗并无太大影响,但齿槽转矩增加明显。

(3) 通过设置定子斜槽以削弱齿槽转矩。当定子的斜槽数为 1 时,再制造电机的齿槽转矩为 $0.128 \text{ N}\cdot\text{m}$,比未设斜槽时的齿槽转矩减小了 92.36%,比原电机减小了 38.46%;其空载电动势基波幅值稍有降低,谐波得到改善,电机保持良好的三相对称性。

【参考文献】

- [1] 史国银,杨敬增,徐海萍.车用电机再制造现状分析与发展构想[J].中国资源综合利用,2014,31(10): 46-50.
- [2] 李光耀,陈伟华,李志强,等.电机高效再制造简介[J].电机与控制应用,2012,39(4): 1-3.
- [3] 刘憬奇,张维.电机高效再制造在某石化厂循环水泵中的应用[J].电机与控制应用,2012,39(8): 59-64.
- [4] HOFMAN I, SERGEANT P, VANDB A. Influence of soft magnetic material in a permanent magnet synchronous machine with a commercial induction machine strator[J]. IEEE Transactions on Magetics, 2012, 48(4): 1645-1648.
- [5] 李光耀,陈伟华,李志强,等.电机节能再制造的探讨[C]//第十届中国电机与系统发展论坛论文集, 2011: 87-94.
- [6] 李广敏,李德仁,倪晓俊,等.用于电机定子的新型非晶材料铁心的研究[J].功能材料与器件学报, 2012, 18(3): 232-236.
- [7] DEMS M, KOMEZA K. Performance characteristics of a high speed energy-saving induction motor with an amorphous stator core [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(6): 3046-3055.
- [8] 王倩营.非晶合金电机电磁性能与定子振动研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [9] 宋守许,谭浩,王战春,等.非晶合金定子铁心对再制造电机性能的影响[J].中国机械工程,2016,27(16): 2179-2185.
- [10] 刘慧娟,上官明珠,张颖超,等. Ansoft Maxwell 13 电机电磁场实例分析[M].北京:北京国防出版社, 2014.
- [11] 王秀和.永磁电机[M].北京:中国电力出版社, 2011.

收稿日期: 2018-08-03