DOI: 10.3901/JME.2020.04.265

定子混合叠压再制造电机转矩优化分析*

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

(1. 合肥工业大学绿色设计与制造工程研究所 合肥 230000;
2. 机械工业绿色设计与制造重点实验室 合肥 230000)

摘要: 永磁同步电机铁心再制造研究较少, 性能提升困难, 寻求切实可行的铁心性能再制造提升方案具有重要意义。利用旧电机硅钢材料与新型非晶合金材料制成再制造混合叠压定子, 分析再制造前后电机性能变化, 提出转矩叠加优化方法并对转矩进行优化分析。混合叠压再制造后, 电机损耗大幅降低, 效率有所提升, 转矩有所减小; 再制造电机转矩随着定子齿宽、绕组匝数以及电流的增大而增大; 通过参数化扫描与正交分析方法, 对再制造电机进行基于定子槽型尺寸与电流变化的转矩与损耗综合优化分析, 确立再制造电机转矩优化方案为电机定子齿宽减小 0.8 mm, 槽高增大 1.2 mm, 额定电流减小 1.7 A; 电机台架试验测试表明, 与原电机相比, 优化后再制造电机转矩基本不变, 效率有所提升, 验证了优化方案与仿真结果的有效性。混合叠压定子的研究为电机再制造研究及铁心性能提升方法研究提供了新的思路。

关键词: 再制造; 混合叠压; 转矩优化; 永磁同步电机

中图分类号: TM351

Torque Optimization Analysis of Stator Hybrid Laminated Remanufacturing Motor

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

(1. Institute of Green Design and Manufacturing Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230000;
2. Key Laboratory of Green Design and Manufacturing in Machinery Industry, Hefei 230000)

Abstract: There are few researches on the remanufacturing of permanent magnet synchronous motor cores, and it is difficult to improve its performance. It is of great significance to find a feasible method for improving the performance of cores. The hybrid laminated stator is manufactured by silicon steel of old motors and amorphous alloy. The performances of the motor before and after remanufacturing are analyzed, and the method of optimizing the torque is proposed. After hybrid lamination remanufacturing, the loss and efficiency of the motor are greatly reduced, but the torque of the remanufactured motor is reduced. As the increase of stator tooth width, winding turns and current, the torque is gradually increased. By means of parametric scanning and orthogonal analysis, a comprehensive optimization analysis of the torque and loss of remanufactured motor based on the change of stator slot size and current is carried out. Further more, the optimum scheme of remanufactured motor torque is established, which reduces the width of stator teeth by 0.8 mm, increases slot height by 1.2 mm and reduces rated current by 1.7 A. The bench test of motor shows that compared with the original motor, the torque of remanufactured motor after optimization is basically unchanged but the efficiency is improved, which verifies the validity of the optimum scheme and simulation results. The research of hybrid laminated stator provides a new idea for motor remanufacturing and the performance improvement of motor cores.

Key words: remanufacture; hybrid laminated; torque optimization; permanent magnet synchronous motor.

0 前言

我国面临着严重的环境污染问题, 原油对外依赖度很高, 汽车产业落后于发达国家, 发展新能源

汽车是我国从汽车大国迈向汽车强国的必经之路, 预计到 2020 年新能源汽车的累积产销量可达 500 万辆^[1]。电机作为新能源汽车的驱动装置, 在新能源汽车的发展中占有重要的地位。其中内置式永磁同步电机以其效率高、功率因数大、单位功率密度大、弱磁扩速能力强和动态响应速度快等优点, 成为了新能源汽车驱动电机的理想选择^[2]。

* 国家自然科学基金资助项目(51575155)。20190905 收到初稿, 20191216 收到修改稿

21 世纪,再制造产业迅速发展,再制造是运用先进制造技术与产业化生产方式对废旧产品进行修复或升级改造,再制造后的产品其质量和性能达到甚至超过新品^[3]。随着新能源汽车不断发展,对电机的性能要求逐渐提高,同时电机的报废量也逐渐增多。如何对电机进行再制造并提升其再制造后的性能,是急需解决的问题。

刘憬奇等^[4]、魏中华等^[5]对 Y 系列交流异步电机进行高效再制造,再制造电机节能效果显著。施小豹等^[6]对电机再制造的关键技术进行了分析,并以一台轧钢机用 Y 系列电机为例进行再制造,通过增加用铜量,选择合适的定转子匝数比的方法,提高了电机的过载能力。NI 等^[7]、张炳义等^[8]分别对感应电机、大型异步电动机的转子进行改造,再制造成永磁电机,使得电机效率显著提升。SCHAU 等^[9]利用生命周期评价方法,对交流发电机再制造方案进行了评估,评估结果表明常规方案的效果较好。宋守许等^[10]对车用永磁同步电机的转子进行偏心再设计,减少了电机的损耗,提高了电机的效率。可见,目前电机再制造的主要研究对象是异步电机,通过对异步电机绕组与定转子的改造改善旧电机的性能,但对永磁同步电机再制造及其性能提升方法的研究较少。

旧电机经过长期服役之后,在电热磁的反复持续作用下,铁心本身性能存在一定劣化;同时随着国家能效指标的不断提升,旧电机的能效也有待提高。定子铁心是永磁电机的重要组成部分,也是永磁电机铁心损耗的主要集中区域,其性能的好坏对电机整体性能的影响较大。但永磁同步电机由于本身性能较为优越,同时再制造时受到原电机材料结构尺寸等的限制,性能与能效难以提升。因此,有必要对永磁同步电机定子再制造性能的提升方法展开研究。

非晶材料作为一种新型的软磁材料,具有高磁导、低损耗的优异性能;将其应用于电机铁心替代硅钢铁心,能够使电机损耗降低,效率提高,节能效果显著^[11]。文献[12-15]对非晶定子电机与传统硅钢电机进行了对比分析,结果表明非晶电机具有重量轻,损耗低,效率高等优点。但非晶定子的直接替换也存在着一定的条件。朱龙飞等^[16]研究了不同负载条件下非晶电机的损耗与效率的变化规律,随着负载率的升高,非晶铁心严重饱和,使得其效率优势逐渐减小。FAN 等^[17]通过同结构下,非晶电机与硅钢电机对比研究,提出了一个涉及铁损与铜损的比例系数,以此来判断非晶定子的替换是否有效。韩雪岩等^[18]对比研究了非晶轴向电机与硅钢轴向电机的损耗特性,发现在定子损耗降低的同时,由

于高频的影响,转子损耗有所提升,并进一步优化设计了该电机的冷却系统。可见,目前国内外已经对非晶合金材料在电机中的应用展开了一定的研究,非晶合金的应用,良好的改善了大部分电机的性能,但由于本身饱和磁密较低,非晶合金的直接替换应用也存在一定的局限性。因此对非晶合金与硅钢材料组合应用于再制造的研究是很有必要的。

综上所述,为了有效改善永磁同步再制造电机的性能,利用非晶合金材料与硅钢材料进行定子的混合叠压再制造。利用二维叠加方法与有限元分析了再制造电机的各项性能参数、进行了转矩的优化分析并完成了样机试验,验证了仿真结果与优化方案的可行性。

1 再制造电机分析

1.1 电机的参数与模型建立

以某公司型号为 JEEMC01003B 的 8 级 48 槽内置式永磁同步电机为研究对象,进行定子混合叠压再制造。电机的主要参数如表 1 所示。所用非晶材料牌号为 Metglas2605SA1(国内牌号为 1k101),硅钢材料牌号为 B35AV1900。根据先前研究,选取硅钢材料与非晶材料混合比例为 1:1,且沿轴向间隔分布,并将硅钢材料置于外层以保护脆硬的非晶材料。利用 Maxwell 内部路算软件生成电机 1/8 模型,并将定子替换为混合叠压定子,即得到再制造电机模型,如图 1 所示。

表 1 电机参数

参数	数值	参数	数值
额定电压/V	312	极数	8
峰值功率/kW	42	定子齿数	48
额定功率/kW	13	定子外径	210
额定转矩/(N·m)	42	定子内径/mm	136
峰值转速/(r·min ⁻¹)	6 000	转子外径/mm	134.6
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000	转子内径/mm	48
相数	3	轴向长度/mm	105

图 1 定子混合叠压电机八分之一模型

1.2 空载性能

再制造电机与原电机空载气隙磁密如图 2 所示。图中左下角为图形方框区域的局部放大图; 曲线 1 为混合电机非晶段的空载气隙磁密; 曲线 2 为混合叠压电机中硅钢段的空载气隙磁密; 曲线 3 为旧硅钢电机的空载气隙磁密。由图 2 可知, 定子混合叠压再制造电机的空载气隙磁密波形与原电机基本相同, 非晶材料段对应气隙中的磁密幅值较低, 硅钢材料段对应气隙中的磁密幅值略高于旧电机。再制造电机的 A 相空载电动势如图 3 所示。其中曲线 1 代表旧硅钢电机; 曲线 2 代表混合电机。由图 3 可知, 与原电机相比, 混合叠压电机的 A 相空载电动势略有降低, 约为原电机的 98.89%; 对其进行傅里叶分解, 计算得到原电机与混合叠压电机的空载电动势谐波畸变率分别为 5.7%、6.5%, 再制造电机的谐波畸变率略有升高。

图 2 空载气隙磁密

图 3 空载 A 相反电动势

1.3 额定性能

图 4~7 为额定工况下, 定子混合叠压再制造电机与原电机性能参数的对比。其中, 图 4 和图 5 分别是混合叠压电机 0 ms 和 2 ms 时电机的磁密云图。可以看出, 随着转子位置的不断变化, 定子混合叠

压电机中非晶材料段对应的磁密均低于硅钢材料段。这是由于非晶材料本身具有易饱和的特性, 与硅钢材料相比, 其饱和磁密值较低。

图 4 0 ms 时电机磁密云图

图 5 2 ms 时电机磁密云图

图 6 电机额定铁耗

图 7 电机额定转矩

图 6 和图 7 分别为电机的铁耗和转矩波形。由图 6 可知,在曲线稳定后,定子混合叠压电机的铁耗平均值约为 114.96 W,原电机的铁耗约为 185.94 W,再制造电机铁耗降低了 70.98 W,约为 38.17%。由图 7 可知再制造电机的转矩平均值为 40.78 N·m,原电机转矩平均值为 42.58 N·m,再制造电机转矩收缩了 1.8 N·m,约为 4.23%,同时转矩脉动减小了 0.85%。

由上述旧电机与再制造电机空载与额定工况下性能对比分析可知,定子混合叠压再制造电机的空载性能与原电机基本相同。额定工况下,再制造电机的铁耗大大降低;由于非晶材料的易饱和特性,定子中非晶段的磁密低于硅钢段,同时电机输出转矩存在收缩现象,转矩脉动略有改善。可见再制造电机整体性能有所提升,仅输出转矩有所减小,因此需要对其结构进行适当的优化,使转矩得到恢复。

2 混合定子的转矩叠加计算方法

定子混合叠压电机由于其结构特征,需要进行三维有限元分析,但在优化设计中,使用三维分析会大大增加分析时间,不利于优化的实施。由经典的 d-q 轴模型可知,电机的电磁转矩可由式(1)表示

$$T_{em} = P \left[\varphi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right] = \frac{P}{\omega} \left[e_0 i_q + (X_d - X_q) i_d i_q \right] \quad (1)$$

式中,表示电机的极对数; φ_f 表示永磁体产生的磁链; i_d 、 i_q 分别表示定子 d、q 轴的电流分量; L_d 、 L_q 分别表示定子绕组的 d、q 轴电感; ω 表示电动机转子电角速度; e_0 表示电机的空载反电动势; X_d 、 X_q 分别表示定子绕组的 d、q 轴感抗。

在混合叠压电机中,当通入定子的电流不变时,d、q 轴的电流分量不会发生变化。但由于非晶材料与硅钢材料的导磁性能不同,绕组上的感应电动势及其电感存在区别。考虑到材料交界面相比于各自叠片段而言厚度较小,材料的交互作用影响较小,因此根据定子混合叠压电机的特征,电压与电感参数可以用电路的串联叠加原理求得,其表达式如式(2)和式(3)所示

$$e_{eq} = \sum_{i=1}^n e_i \quad (2)$$

$$L_{eq} = \sum_{i=1}^n L_i \quad (3)$$

式中, e_{eq} 表示混合叠压电机的等效空载电动势; L_{eq} 表示混合叠压电机的等效电感; e_i 表示各材料分段中绕组上的空载电动势; L_i 表示各材料分段中绕组上的电感。

将式(2)和式(3)代入式(1)便可得到定子混合叠压再制造电机的电磁转矩,如式(4)所示

$$T_{em} = P \left[\varphi_{feq} i_q + (L_{deq} - L_{qeq}) i_d i_q \right] = \frac{P}{\omega} \left[e_{eq} i_q + (X_{deq} - X_{qeq}) i_d i_q \right] \quad (4)$$

式中, φ_{feq} 表示等效磁链; L_{deq} 、 L_{qeq} 分别表示定子绕组的 d、q 轴等效电感; X_{deq} 、 X_{qeq} 分别表示定子绕组的 d、q 轴等效感抗。

由式(4)可知,定子混合叠压电机的转矩可以通过叠加的方法计算。图 8 为电机定子结构不变时,二维有限元叠加结果与三维仿真结果的对比。由图可知,二维叠加所得转矩平均值为 41.04 N·m,三维仿真所得转矩平均值为 40.78 N·m,相差约为 0.64%,两种计算方法所得输出转矩基本一致。因此,可以利用二维有限元叠加的方法代替三维,便于定子混合叠压电机转矩的优化分析。

图 8 叠加转矩与混合转矩

3 混合叠压再制造电机的转矩优化

3.1 转矩优化参数的确定

由式(4)可知,定子混合叠压电机的转矩与所加载电流、空载感应电动势及绕组电感有关。其中空载电动势的表达式如式(5)所示

$$E = 4.44 f K_{dp} N \phi_{10} \quad (5)$$

式中, E 为空载电动势; f 为电源频率; K_{dp} 为绕组因数; N 为定子绕组每相串联匝数; ϕ_{10} 为空载气隙磁通的基波幅值。

由式(5)可知，空载电动势主要与绕组匝数与气隙磁通有关。气隙磁通主要受永磁体、定转子结构以及材料导磁性能影响，再制造时，应尽量留用旧电机的相关部件，因此可以认为空载电动势主要与绕组匝数有关。同时由文献[18]可知，当加载电流变化时，磁路的饱和程度对交直流电感具有一定的影响，磁路越饱和，其电感值越小；此外，磁路的饱和程度还与磁路的面积有关，即与定子的槽空间大小有关。由上述分析可知，通过调整绕组匝数和定子齿槽的结构参数可以解决转矩收缩问题。

图 9 为只改变非晶段定子齿槽宽度和高度时，电机的转矩变化情况。图中将非晶材料段的长度设为 105 mm，即与电机的轴向长度相同；同时为了便于表述，以齿宽的变化来反应齿槽宽度的变化。则当硅钢与非晶以 1:1 比例混合叠压时，为使转矩恢复到原电机水平，则非晶段的转矩应至少大于等于 42.58 N·m。从图 9 中可以看出，随着齿宽的增加，转矩显著增加；而在所选参数范围内，随着槽高的减小，转矩的变化较小。当齿宽增加 1 mm，槽高减小 2 mm 时，非晶段的转矩仍小于 42.58 N·m，约为 42.03 N·m。若想使转矩进一步增大，可进一步增大齿宽或减小槽高，但会使槽面积会大幅减少，造成绕组的布置空间不足，下线困难或无法下线。因此，只改变非晶段的槽型尺寸，难以将转矩恢复到原有水平。

图 9 只优化非晶段时转矩随槽尺寸的变化

图 10 为绕组匝数和电流变化时，混合叠压再制造电机转矩的变化情况。在电机结构不变时，随着绕组匝数的增加，电机输出转矩显著增大。同时，随着电流的增大，转矩也有所增大。原电机的绕组匝数为 8，额定电流为 48 A。当电流增大到 50 A 左右时，电机转矩恢复到原电机水平，但电流增加会导致电机温升增加，铜耗增加，不利于电机性能的

提升。当电机绕组匝数增加为 9，电流减为 46 A 时，转矩仍高于原电机的转矩值。可见，通过增加绕组匝数的方式，电流可以适当减小，有利于电机性能的提升，也可以有效解决转矩收缩的问题。

图 10 转矩随绕组匝数和电流的变化

综上所述，增大绕组匝数可以提高混合叠压电机的转矩，但绕组匝数增加，定子槽形尺寸需要对应调整，以容纳多出的导体。同时，定子槽型的变化，会引起磁路饱和情况的变化，影响电机的转矩、电感和损耗等参数。因此最终选定电流 I 、定子齿宽 b_1 和槽身部分的高度 h_{s2} 三个参数进行参数化扫描，以初步确定合适的电机优化方案。

3.2 电机转矩与损耗三维正交分析

参考前文的分析结果，取电机的绕组匝数为 9；电流 I 的范围为 46~48 A，步长为 0.5 A；齿宽 b_1 的范围为 5.2~3.6 mm，步长为 0.4 mm；槽身部分高度 h_{s2} 的范围为 20.28~23.28 mm，步长为 0.6 mm 进行参数化扫描。分析参数化扫描结果，选取满足目标转矩的部分参数，建立正交表。利用三维仿真对比分析各项性能参数，从而确定最终优化方案。三维有限元结果如表 2 所示。

表 2 三维有限元结果

试验号	A	B	C	转矩 T (N·m)	铁耗 P /W	转矩 脉动/%
	齿宽 b_1 /mm	槽高 h_{s2} /mm	电流 I /A			
1	4.8	20.88	47.0	44.58	119.32	13.54
2	4.8	21.48	46.0	43.64	118.66	13.90
3	4.8	22.08	46.5	43.49	111.99	14.06
4	4.4	20.88	46.5	42.78	112.36	13.32
5	4.4	21.48	47.0	43.22	112.18	13.34
6	4.4	22.08	46.0	42.03	111.75	13.53
7	4.0	20.88	46.0	40.91	116.45	13.55
8	4.0	21.48	46.5	40.92	115.10	13.56
9	4.0	22.08	47.0	41.55	116.23	14.25

为确定满足目标转矩的最优参数。对表 2 中

各个因素进行平均值与方差分析。各因素的平均值与方差计算结果如表 3 所示。表中 A1、A2 和 A3 分别表示齿宽参数的三个水平 4.8 mm、4.4 mm 和 4.0 mm；B1、B2 和 B3 分别表示槽高的三个水平 20.88 mm、21.48 mm 和 22.08 mm；C1、C2 和 C3 分别表示电流的三个水平 47.0 A、46.5 A 和 46.0 A。

表 3 各因素的平均值与方差

	转矩均值 (N·m)	损耗均 值/W	转矩脉动 均值(%)	转矩 方差	铁耗 方差	转矩脉 动方差
A1	43.90	116.66	13.83			
A2	42.67	112.10	13.40	1.284	3.999	0.038
A3	41.13	115.93	13.79			
B1	42.75	116.04	13.47			
B2	42.59	115.31	13.60	0.015	1.321	0.041
B3	42.36	113.32	13.95			
C1	43.12	115.91	13.71			
C2	42.39	113.15	13.65	0.160	1.534	0.000 7
C3	42.19	115.62	13.66			

方差反映了各因素对不同参数的影响程度。在所选的参数范围内，由方差分析可知，齿宽对各项参数都有较大的影响，且相比于槽高和电流，齿宽对转矩的影响最大；槽高主要影响转矩的脉动和损耗，对电机的转矩影响相对较小；电流主要影响电机的转矩与损耗，对脉动的影响较小；槽高与电流对损耗的影响程度相当，齿宽与槽高对转矩的脉动影响程度基本相同。

再制造电机优化的最主要目的是使转矩不低于原有水平，由平均值分析可知，当齿宽取 4.4 mm，其他参数变化时，转矩均在 42.58 N·m 附近，且损耗和脉动也较小，因此选定齿宽为 4.4 mm；随着槽高的增大，损耗逐渐减小，转矩脉动逐渐增大，转矩脉动可通过控制策略进行抑制，因此优先考虑损耗的大小；考虑到绕组布置空间的限制，最终选取槽高为 21.48 mm；由表中数据可知，电流取值在 46.5 A 附近时，损耗与转矩脉动均较小，因此，初步选定电流为 46.5 A，此时转矩值略大于目标转矩值；根据目标转矩值 42.58 N·m，对电流进行一定调整，最终取值为 46.3 A。

对优化后的电机进行三维仿真分析，得到电机各项性能参数，与优化前进行对比，对比结果如表 4 所示。表中磁密幅值一项中，第一个值表示硅钢材料段中对应位置处的磁密幅值，第二个值表示非晶材料段中对应位置处的磁密幅值。齿部与轭部磁密幅值取值方法如图 11 所示，选取曲线上一个周期

内的磁密最大值作对比分析。

表 4 优化前后电机性能对比

性能参数	优化前的电机	优化后的电机
转矩/(N·m)	40.73	42.58
铁耗/W	114.49	112.39
铜耗/W	138.24	131.62
转矩脉动(%)	12.09	13.32
效率(%)	98.06	98.21
齿部磁密幅值/T	1.75/1.49	1.78/1.50
轭部磁密幅值/T	1.36/1.29	1.49/1.41

图 11 齿部与轭部磁密取值

由表 4 可知，相比于优化之前，电机的转矩得到恢复，损耗降低 2.1 W，铜耗降低 6.62 W，效率提高了 0.15%，但转矩脉动增加了 1.23%。由于槽面积增大，磁路面积减小，磁路饱和程度增大，因此齿部与轭部磁密幅值相比优化前均有增加；硅钢材料的饱和磁密约为 1.80 T，非晶材料的饱和磁密约为 1.56 T，优化后，硅钢与非晶段齿部与轭部磁密最大值仍低于对应材料的饱和磁密值，因此优化是合理的。

4 试验验证

为了验证仿真结果与优化方法的有效性，根据优化后电机的结构参数，制作了样机并进行了台架试验。线切割的非晶定子块与样机台架测试如图 12 所示。

(a) 线切割非晶定子块

(b) 样机台架测试
图 12 再制造电机

通过电机台架测试，在 3 000 r/min 的额定转速下，给定转矩指令，测定电机实际的功率、转矩等特性，并与原电机相关数据进行对比，测试结果如表 5 所示。

表 5 电机台架性能测试

性能参数	原电机	再制造电机
直流电压/V	312.18	311.38
直流电流/A	46.41	45.88
输入功率/kW	14.02	14.03
输出功率/kW	13.27	13.34
总损耗/W	756.35	706.89
铜耗/W	154.63	151.61
指令转矩/(N·m)	43	43
实际转矩/(N·m)	42.23	42.46
电机效率(%)	94.65	95.08

由试验测试结果对比可知，额定转速 3 000 r/min 工况下，给定额定转矩指令，非晶混合再制造电机所需的激励电流减小，实际转矩值较大，输出功率较高。再制造电机的总损耗较原电机降低约 49.46 W，两者输入输出功率差别不大，杂散损耗基本一致；而机械损耗主要由转子转动造成，原电机与再制造电机转子结构相同，因此机械损耗差别不大；由原电机与再制造电机测试时的绕组温度计算铜耗可知，两者铜耗差值约为 3.02 W，因此再制造电机铁耗较原电机降低约 46.44 W，效率提高了 0.43 %。由于仿真忽略了电机的机械损耗与杂散损耗等，因此试验测得的电机效率低于仿真结果。非晶材料由于本身脆硬的特性，加工过程中存在表面材料脱落的现象，同时线切割加工过程中，电火花高温放热导致部分区域的非晶合金发生了结晶现象，性能有所降低，因此对电机效率的实际提升效果略有降低。但总体上试验结果与仿真结果基本一致，验证了优化方案的可行性。

5 结论

(1) 与原电机相比，混合叠压再制造电机的空

载性能基本不变，额定工况下，非晶材料段的磁密低于硅钢材料段；电机损耗降低 38.17 %，转矩减小 4.23 %，转矩脉动减小 0.85 %。再制造电机除转矩外，整体性能得到有效提升。

(2) 在忽略材料界面影响的情况下，通过电路的叠加原理，推导了定子混合叠压电机电磁转矩的计算公式，提出并验证了利用二维代替三维进行转矩优化分析的可行性。

(3) 混合叠压再制造电机的转矩随着定子齿宽、电流、槽高以及绕组匝数的增大而增大，其中绕组匝数对转矩的影响程度最大，齿宽与电流的影响程度适中，槽宽的影响较小。

(4) 确定了再制造电机转矩的优化方案。优化后电机绕组匝数为 9，齿宽为 4.4 mm，槽高为 22.6 mm，额定电流为 46.3 A。相比于旧电机，额定工况下，优化后的电机转矩保持不变的同时损耗降低了 39.56 %，铜耗降低 4.79 %，效率提高了 0.61 %，电机整体性能得到提升。

(5) 根据优化后的电机结构进行了样机试验，试验测得优化后再制造电机额定转速下转矩与原电机基本相同，电机效率为 95.08 %，较原电机提高了 0.43 %，验证了优化方法以及仿真分析的有效性。

参 考 文 献

[1] 国电工技术学会电动车辆专业委员会. 我国电动汽车市场化进程中相关问题综述[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(7): 1-10.
China Electrotechnical Society Electric Vehicle Specialized Committee. Annual report on technical and industrial development of electric vehicle power supply and drive in China[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(7): 1-10.

[2] 王建设, 徐荣, 孙友增. 永磁同步电动机发展现状综述[J]. 科技与创新, 2016(16): 5-6.
WANG Jianshe, XU Rong, SUN Youzeng. Review on the development of permanent magnet synchronous motor[J]. Science and Technology & Innovation, 2016 (16): 5-6.

[3] 郑汉东, 史佩京, 李恩重, 等. 我国电动机再制造发展现状分析[J]. 现代制造工程, 2017(2): 153-157.
ZHENG Handong, SHI Peijing, LI Enzhong, et al. Analysis of development status of electric motor remanufacturing in China[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2017(2): 153-157.

[4] 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.
LIU Jingqi, ZHANG Wei. High-efficient remanufacturing motor for applications of circulating pump energy-saving

- in petrochemical plant[J]. Electric Machines & Control Application, 2012, 39(8): 59-64.
- [5] 魏中华, 范荣华. 电机高效再制造在企业生产中的应用[J]. 冶金动力, 2014(7): 3-6.
- WEI Zhonghua, FAN Ronghua. The application of high-efficiency motor remanufacturing in enterprise production[J]. Metallurgical Power, 2014(7): 3-6.
- [6] 施小豹, 曹婷婷. 电机再制造技术探讨[J]. 电机与控制应用, 2012, 39(12): 43-45.
- SHI Xiaobao, CAO Tingting. Explore of motor remanufacturing technology[J]. Electric Machines & Control Application, 2012, 39(12): 43-45.
- [7] NI R, XU D, WANG G, et al. Efficiency enhancement of general AC drive system by remanufacturing induction motor with interior permanent-magnet rotor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 808-820.
- [8] 张炳义, 郑军铭, 冯桂宏, 等. 大型异步电动机再制造造成自启动永磁同步电机技术研究[J]. 节能技术, 2017, 35(4): 344-348.
- ZHANG Bingyi, ZHENG Junming, FENG Guihong, et al. Research on the technology of the large asynchronous motor remanufactured the line-start PMSM[J]. Energy Conservation Technology, 2017, 35(4): 344-348.
- [9] SCHAU E M, TRAVERSO M, FINKBEINER M. Life cycle approach to sustainability assessment: a case study of remanufactured alternators[J]. Journal of Remanufacturing, 2012, 2(1): 5.
- [10] 宋守许, 许可, 王文哲, 等. 基于转子再设计的电动汽车永磁同步电机再制造研究[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(7): 122-128.
- SONG Shouxu, XU Ke, WANG Wenzhe, et al. Remanufacturing of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle based on rotor redesign[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(7): 122-128.
- [11] 韩雪岩, 佟文明, 唐任远. 非晶合金在电机中的应用[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(12): 46-52.
- HAN Xueyan, TONG Wenming, TANG Renyuan. Application of amorphous alloy in motor[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(12): 46-52.
- [12] OKAMOTO S, DENIS N, KATO Y, et al. Core loss reduction of an interior permanent-magnet synchronous motor using amorphous stator core[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3): 2261-2268.
- [13] 冷建伟, 刘婷, 李俊芳, 等. 传统电机和新型非晶电机性能的仿真对比[J]. 化工自动化及仪表, 2011, 38(6): 729-732.
- LENG Jianwei, LIU Ting, LI Junfang, et al. Performance simulation and compare of conventional motors and amorphous alloy motors[J]. Control & Instruments in Chemical Industry, 2011, 38(6): 729-732.
- [14] 王倩莹, 李春茂, 卢俊文. 非晶电机机械性能与电磁特性的数值分析[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(3): 13-16.
- WANG Qianying, LI Chunmao, LU Junwen. Numerical analysis of mechanical properties and electromagnetic character of amorphous motor[J]. Electric Machines & Control Application, 2015, 42(3): 13-16.
- [15] 江伟, 姚光久, 王亚文. 非晶合金在永磁同步电机的应用[J]. 防爆电机, 2017, 52(4): 13-16.
- JIANG Wei, YAO Guangjiu, WANG Yawen. Application of amorphous alloy to permanent magnet synchronous motor[J]. Explosion-proof Electric Machine, 2017, 52(4): 13-16.
- [16] 朱龙飞, 朱建国, 佟文明, 等. 非晶合金永磁电机负载损耗及效率特性分析[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(7): 35-40.
- ZHU Longfei, ZHU Jianguo, TONG Wenming, et al. Analysis of characteristics of power losses and efficiency of amorphous alloy permanent magnet motor[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(7): 35-40.
- [17] FAN T, LI Q, WEN X. Development of a high power density motor made of amorphous alloy cores[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4510-4518.
- [18] 韩雪岩, 张华伟, 徐昕, 等. 基于计算流体力学的非晶合金轴向磁通永磁电机冷却系统设计[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 189-197.
- HAN Xueyan, ZHANG Huawei, XU Xin, et al. Design of cooling system for amorphous alloy axial flux permanent magnet motor based on CFD[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 189-197.

作者简介: 宋守许, 男, 1964 年出生, 教授、博士研究生导师。主要研究方向为绿色设计与绿色制造、再制造工程。

E-mail: shouxus@163.com。

杜毅(通信作者), 男, 1994 年出生, 主要研究方向为电机再制造。