

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.01.021

基于混合定子铁芯的车用 再制造永磁电机性能研究*

宋守许, 胡孟成, 夏 燕, 杜 毅
(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对混合定子铁芯层数对再制造电机转矩和损耗性能的影响问题,对 3 层、5 层和 7 层混合定子铁芯再制造电机进行了分析。给出了不同层数混合定子铁芯硅钢段和非晶段的损耗计算公式,研究了不同层数混合定子铁芯磁密轴向分布规律,分析了不同层数混合定子铁芯的损耗分布;计算了再制造电机单位电磁转矩和单位电磁转矩轴向分布曲线,分析了不同层数再制造电机转矩性能;选取 3 层混合定子铁芯制作了再制造电机样机,并进行了台架实验。实验结果表明:再制造电机损耗降低、转矩提升、效率提高,验证了再制造电机的可行性。

关键词:混合定子铁芯;混合层数;输出转矩;定子铁芯损耗

中图分类号:TM351

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)01-0107-06

Performance of permanent magnet motor for vehicle remanufacturing based on hybrid stator

SONG Shou-xu, HU Meng-cheng, XIA Yan, DU Yi

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the influence of the number of hybrid stator core layers on the torque and loss performance of remanufactured motor, the three-, five-, and seven-layer hybrid stator core remanufactured motors were analyzed. The loss calculation formula of silicon steel segment and amorphous segment were given, the axial distribution of magnetic flux density and the loss distribution of different layers of hybrid stator cores were analyzed. The axial electromagnetic distribution of unit electromagnetic torque and unit electromagnetic torque of remanufactured motor were calculated, the torque performance of remanufactured motor was analyzed. The remanufactured motor prototype was fabricated by three-layer hybrid stator core and the bench experiment was carried out. The experimental results indicate that the remanufactured motor loss has reduced, torque and efficiency has increased, the feasibility of remanufacturing the motor is verified.

Key words: hybrid stator core; number of layers; output torque; stator core loss

0 引 言

近年来,我国新能源汽车发展迅速。而永磁同步电机作为新能源汽车的主流驱动电机,在我国驱动电机市场占有率高达 90%。旧永磁同步电机附加值高,对定转子、机壳等部件进行再制造,可有效降低电机成

本,减少资源浪费。

HASANUZZAMAN^[1]从多个方面研究了绕组重绕对再制造电机效率的影响;刘憬奇、李光耀等^[2-3]实现了电机的再制造;施小豹等^[4]从电机绝缘角度,对轧钢电机进行了再制造研究;ERWIN 等^[5]从生命周期的角度,对汽车发电机的再制造进行了评估。上述研究主要针对感应电机,以绕组重绕、部件再设计、变更电

机使用场合等为主,对车用永磁同步电机的再制造研究较为罕见。

铁基非晶合金具有导磁性能优良、单位损耗低、饱和磁密低等特性^[6-8],已成为学者研究的重点之一。中科院 FAN^[9] 研究制造的非晶合金电机,相比于硅钢电机其损耗明显下降,效率得到了有效提高;日立公司研发了不同功率等级的非晶合金轴向磁通永磁电机^[10-11]。目前,国内外已经对非晶合金材料在电机中的应用展开研究:韩雪岩等^[12]对比研究了非晶轴向电机与硅钢轴向电机,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;朱龙飞等^[13]研究发现了非晶电机随着负载率的增加,定子铁芯饱和严重,效率降低。因此,对非晶合金与硅钢材料组合应用的研究很有必要。

综合车用动力电机及非晶合金的特点,本文提出混合定子铁芯电机再制造方法。

1 材料及再制造电机模型

本文以某公司服役多年的风冷式车用永磁电机为研究对象,其主要参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

参数	参数值	参数	参数值
额定功率/kW	13	峰值功率/kW	42
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000	峰值转速/(r·min ⁻¹)	6 000
额定电压/V	312(DC)	定子槽数	48
极数	8	相数	3

本文将其进行拆卸,对拆卸下来的零部件进行检测,检测合格的零部件直接留用,有轻微损伤的零部件修复后使用,损毁严重的直接更换,并且将定子铁芯更换为由硅钢材料和非晶合金材料轴向混合叠压形成的混合定子铁芯,将其再制造成为高效率永磁电机。研究发现,随着混合定子铁芯中非晶合金比例的不断增大,电机效率的提升率不断增大,在非晶占比高于 50% 后,提升率趋于稳定。

从再制造成本考虑,对于该款电机,非晶合金与硅钢材料以 1:1 比例混合较为合适^[14]。其中,非晶合金材料型号为 Metglas2605SA1(国内牌号为 1k101),硅钢材料牌号为 B35AV1900。

两种材料的 $B-H$ 曲线如图 1 所示,

从图 1 可以看出:非晶合金材料的饱和磁密值仅为 1.44 T,远小于硅钢的 1.80 T,同一磁场强度下,非晶合金的磁密小于硅钢,同等条件下非晶合金损耗仅为硅钢材料的 1/6。

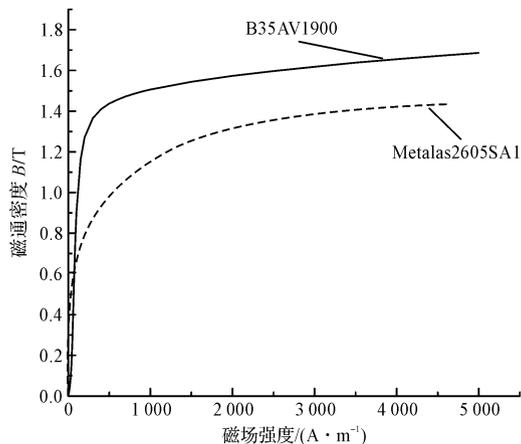


图 1 非晶合金和硅钢 $B-H$ 曲线

2 混合定子铁芯层数对磁密的影响

由于混合定子层数太多,不利于加工和成本的控制,本文只考虑 3 层、5 层、7 层混合定子铁芯对再制造电机的影响,其电机的磁密云图如图 2 所示。

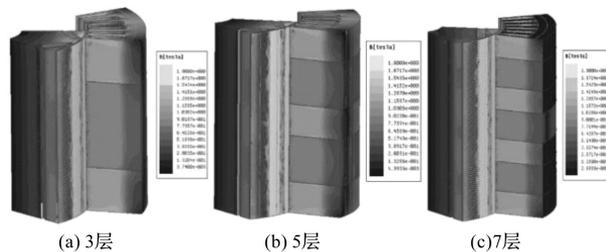


图 2 再制造电机磁密云图

从图 2 中可以看出:不同材料段磁密存在明显区别,混合定子铁芯定子硅钢段的磁密大于定子非晶段的磁密,并且随着混合定子铁芯层数的变化,磁密轴向分布规律也随之变化。

本文选取混合定子铁芯齿中区域对定子铁芯磁密轴向分布规律进行研究。

3 层、5 层、7 层混合定子铁芯和原电机定子磁密轴向分布曲线如图 3 所示。

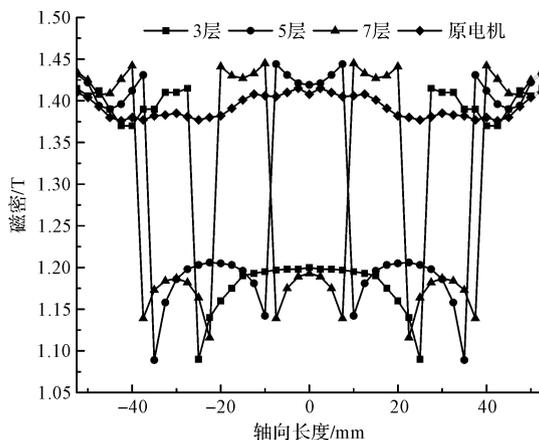


图 3 再制造电机与原电机磁密轴向分布

从图3可以看出:原电机磁密轴向分布处于稳定状态,而混合定子铁芯磁密轴向分布存在较大波动,混合定子铁芯硅钢段磁密明显大于非晶段磁密,相比于原电机磁密也略有增大;定子硅钢段从交界面位置开始磁密慢慢减小,在定子硅钢段中心位置达到最小值,随后慢慢增大;定子非晶段则是正好相反,交界面处磁密值最小,中心位置磁密最大,在定子硅钢段和定子非晶段的交界面处,磁密值产生突变。混合定子铁芯的层数不同,对应的磁密轴向分布也存在明显的区别。

3 混合定子铁芯层数对铁耗的影响

根据经典的铁耗两项式模型,电机中基本铁耗主要分为磁滞损耗和涡流损耗。其中,单位铁耗为:

$$P = P_h + P_e = K_h f B^\alpha + K_e f^2 B^2 \quad (1)$$

式中: f — 交变电流频率; P_h — 磁滞损耗; P_e — 涡流损耗; K_h, K_e — 分别为磁滞损耗、涡流损耗系数,损耗系数 K_h, K_e 通过测得的损耗数据拟合得到; α — 常系数,取值为2。

因经典铁耗计算公式无法直接计算混合定子铁芯铁耗,需要分别计算硅钢段和非晶段的铁耗进行叠加。由于混合定子铁芯不同材料段磁密轴向分布存在波动,需要考虑电机轴向磁密变化对损耗计算的影响。非晶定子和硅钢定子的单位铁耗为:

$$\begin{aligned} P_1 &= B_1^2(l)(K_{h1}f + K_{e1}f^2) \\ P_2 &= B_2^2(l)(K_{h2}f + K_{e2}f^2) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: P_1, P_2 — 定子非晶段和定子硅钢段单位铁耗; $B_1(l), B_2(l)$ — 定子非晶段和定子硅钢段的磁密。

本文分别计算定子铁芯齿部和轭部损耗,进行叠加,得到定子铁芯损耗。计算齿部损耗时, B 采用齿磁路长度上磁密平均值;计算轭部的损耗时, B 选取轭中的最大磁密值。混合定子铁芯铁耗为:

$$\begin{aligned} P_{Fe1} &= P_{Fe1y} + P_{Fe1l} \\ &= [k_y(K_{h1}f + K_{e1}f^2)S_y\rho_1 10^{-3}] \int_{l_1} B_{1y}^2(l) dl + \\ &= [k_l(K_{h1}f + K_{e1}f^2)S_l\rho_1 10^{-3}] \int_{l_1} B_{1l}^2(l) dl \\ P_{Fe2} &= P_{Fe2y} + P_{Fe2l} \\ &= [k_y(K_{h2}f + K_{e2}f^2)S_y\rho_2 10^{-3}] \int_{l_2} B_{2y}^2(l) dl + \\ &= [k_l(K_{h2}f + K_{e2}f^2)S_l\rho_2 10^{-3}] \int_{l_2} B_{2l}^2(l) dl \end{aligned} \quad (3)$$

式中: P_{Fe1}, P_{Fe2} — 定子非晶段和定子硅钢段铁耗; $S_y,$

S_l — 铁芯表面轭部和齿部表面积; ρ_1, ρ_2 — 非晶合金和硅钢材料的密度; k_y, k_l — 定子铁芯轭部和齿部损耗修正系数; l_1, l_2 — 非晶合金定子和硅钢定子的长度; B_y, B_l — 定子轭部最大磁密和齿部平均磁密。

对于不同层数的混合定子铁芯,非晶合金占比均为50%,定子硅钢段和定子非晶段的总长度相等。本文利用式(3)对3层、5层、7层混合定子铁芯非晶段和硅钢段损耗进行计算,不同材料定子段铁耗的区别体现在 $\int_l B^2 dl$ 中。

为研究混合定子铁芯层数对再制造电机铁耗的影响,本文得到的3层、5层和7层混合定子铁芯硅钢段最大磁密平方值 B_{2y}^2 和齿部平均磁密平方值 B_{2l}^2 曲线如图4所示。

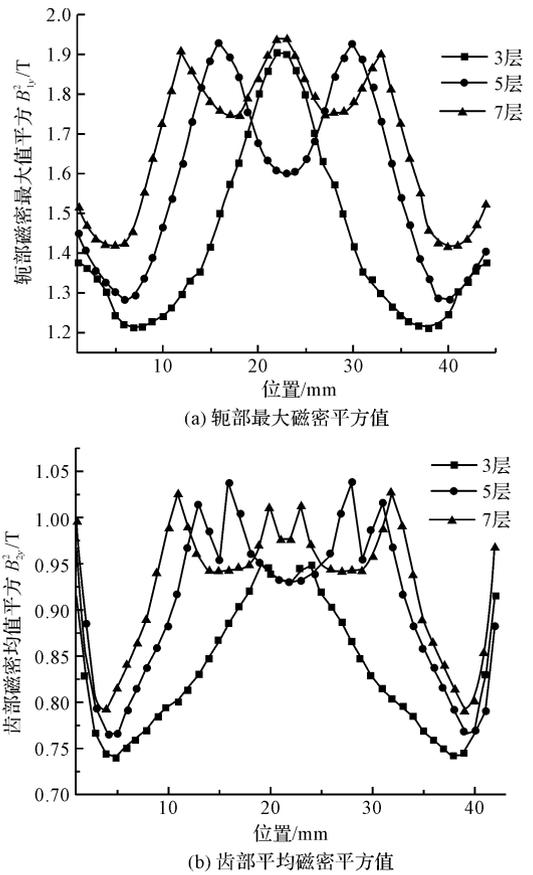


图4 混合定子铁芯硅钢段磁密

图4中:对于不同层数的混合定子铁芯,定子硅钢段的 B_{2y}^2 和 B_{2l}^2 分布存在较大的区别,3层混合定子铁芯硅钢段的 B_{2y}^2 和 B_{2l}^2 小于5层、7层定子硅钢段的 B_{2y}^2 和 B_{2l}^2 ,故3层混合定子铁芯硅钢段的 $\int_l B^2 dl$ 值更小,由式(3)可以得到3层混合定子铁芯硅钢段损耗小于5层、7层损耗。

非晶段轭部最大磁密平方值 B_{2y}^2 和齿部平均磁密平方值 B_{2i}^2 曲线如图 5 所示

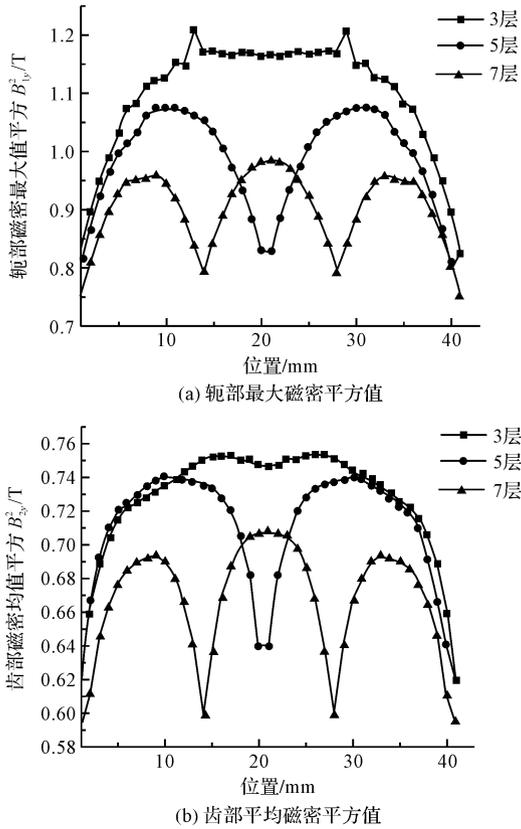


图 5 混合定子铁芯非晶段磁密

图 5 中,3 层定子非晶段的 B_{1y}^2 和 B_{2i}^2 大于 5 层、7 层混合定子铁芯非晶段的 B_{1y}^2 和 B_{2i}^2 , 因此 3 层混合定子铁芯非晶段损耗最大,5 层、7 层损耗最小。

综上所述,3 层混合定子铁芯硅钢段损耗最小,非晶段损耗最大;7 层混合定子铁芯非晶段损耗最小,硅钢段损耗最大。由于非晶合金损耗仅为硅钢材料的 1/6,混合定子铁芯的损耗主要取决于定子硅钢段。因此相比于 5 层、7 层混合定子铁芯,3 层混合定子铁芯的损耗最小。

仿真得到 3 层混合定子铁芯损耗为 83.53 W, 小于 5 层 88.58 W 和 7 层的 90.28 W, 与分析结果一致, 证明了分析方法的正确性。

4 混合定子铁芯层数对转矩的影响

在二维电磁场中,作用于电机定子或转子上的切向电磁力密度为:

$$f_t = \frac{1}{\mu_0} B_n B_t \quad (4)$$

式中: B_r, B_θ —气隙磁密的径向和切向分量; μ_0 —真空

磁导率。

电磁转矩沿半径为 r 的圆周积分,单位电磁转矩为:

$$T_{em} = \frac{1}{\mu_0} \int r^2 B_r B_\theta d\theta \quad (5)$$

由于混合定子铁芯的层数会对电机气隙磁密产生影响,使再制造电机输出转矩产生变化,本文对其输出转矩特性进行分析,以得出其影响规律。

本文用式(5)计算得到额定工况下,再制造电机轴向位置单位电磁转矩分布曲线,如图 6 所示。

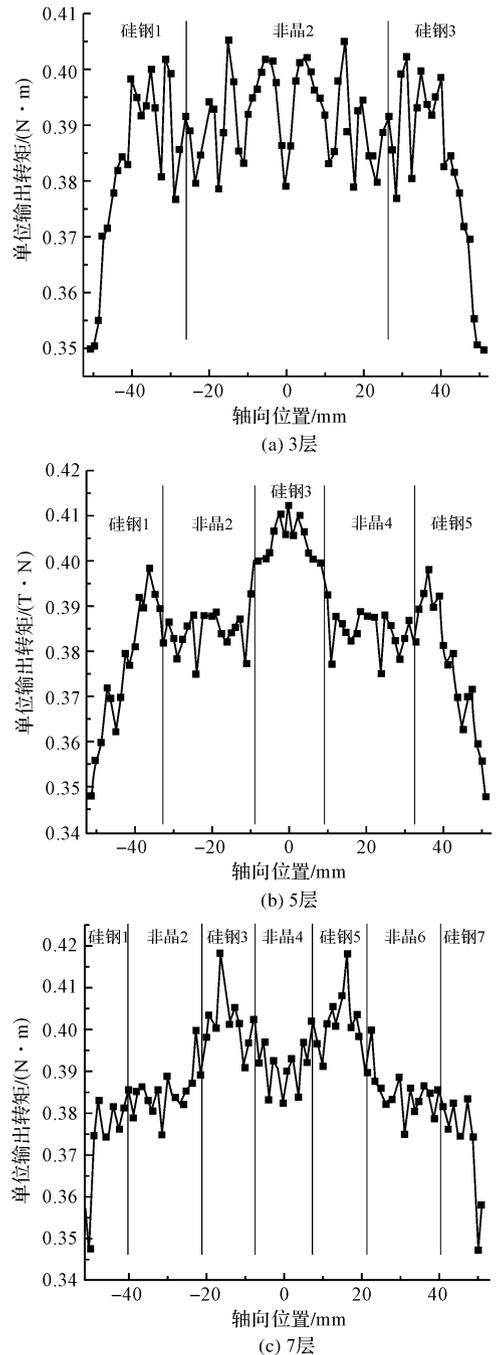


图 6 再制造电机输出转矩轴向分布

图6中:3层电机单位输出转矩轴向分布较为平稳,由于端部漏磁影响使硅钢段的输出转矩值有所降低,定子硅钢段单位输出转矩与非晶段基本一致,电机输出转矩分布较为平稳;5层电机单位输出转矩轴向分布波动较大,中间部位的硅钢段对应输出转矩明显大于非晶段和端部硅钢段对应输出转矩;7层电机单位输出转矩轴向分布同样存在较大波动,处于混合铁芯中间位置的定子硅钢段对应输出转矩明显大于非晶段对应输出转矩,而端部附近的硅钢段和非晶段由于漏磁的作用,对应输出转矩值小于中间部分。

本文对图6单位输出转矩曲线进行积分,可得到不同层数电机输出转矩值,3层、5层、7层电机输出转矩均为 $42.00\text{ N}\cdot\text{m}$ 左右。可见,不同层数混合定子铁芯再制造电机输出转矩基本相等,铁芯层数对电机输出转矩值基本没有影响。但不同层数电机单位输出转矩轴向分布存在明显差异,5层、7层的输出转矩轴向分布波动较大,3层则较为平稳;不同材料定子段输出转矩作用在转子铁芯表面,定子硅钢段和定子非晶段输出转矩差值较大,会使转子铁芯表面受力不平衡,产生转矩不平衡现象,可能对转子铁芯的强度及电机运行产生影响。因此,应该尽可能减小不同材料段对应输出转矩差值,并且将混合定子铁芯布置为3层较为合适。

5 再制造电机性能分析

前期,本文将齿宽由 2.5 mm 优化为 4.4 mm ,槽高由 20.28 mm 优化为 21.48 mm ,同时将线圈匝数由8匝变为9匝,电流取值 46.3 A 。

本文利用Maxwell对优化后的非晶合金比例50%、3层电机进行分析,得到再制造电机与原电机性能参数,如表2所示。

表2 原电机与再制造电机性能参数

参数	参数值	
	原电机数据	再制造电机数据
转矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	42.5	42.87
损耗/W	177.31	89.34
齿槽转矩/($\text{mN}\cdot\text{m}$)	341.7	441.5
空载电动势/V	117.3	115.7
效率/(%)	97.57	98.35

从表2可以看出:再制造电机输出转矩为 $42.87\text{ N}\cdot\text{m}$,高于原电机的 $42.5\text{ N}\cdot\text{m}$,电机铁耗为 89.34 W ,仅为原电机的一半左右,效率也由原电机的97.57%增加至98.35%;再制造电机空载电动势幅值略有降低,齿槽转矩增大;由于非晶合金材料密度较小,再制造电机的质量得到明显降低。

6 实验验证

本文以非晶合金比例50%、层数为3层制作了混合定子铁芯再制造电机,并和原电机一起进行了电驱动实验,结果如表3所示。

表3 再制造电机与原电机实验数据

参数	参数值	
	原电机数据	再制造电机数据
直流电压/V	312.2	311.43
直流电流/A	46.41	45.88
输出功率/kW	13.27	13.34
总损耗/W	756.35	706.89
输出转矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	41.86	42.03
效率/(%)	94.65	95.08

表3中:再制造电机转矩为 $42.03\text{ N}\cdot\text{m}$,高于原电机的 $41.86\text{ N}\cdot\text{m}$,再制造电机的效率为95.08%,高于原电机的94.65%;非晶合金材料加工过程会对材料性能产生影响,使材料性能退化,并且仿真忽略了机械损耗和杂散损耗等,所以实验得到的效率比仿真数据低。总体来说,实验与仿真结果一致,验证了混合定子铁芯再制造电机方案的可行性。

7 结束语

本研究提出了一种基于混合定子铁芯替换原定子铁芯的电机再制造方法,研究了混合定子铁芯叠压方式对再制造电机性能的影响,结果表明:混合定子铁芯层数对再制造电机性能产生较大影响,3层混合定子铁芯再制造电机损耗最小,转矩分布最为稳定。

本研究进行3层混合定子铁芯再制造电机样机实验,实验结果与仿真相一致,验证了再制造电机的可行性。

参考文献(References):

- [1] HASANUZZAMAN M, RAHIM N A, SAIDUR R. Analysis of energy savings for rewinding and replacement of industrial

- motor [C]. 2010 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Kuala Lumpur:IEEE,2010.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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):43-45,55.
- [5] ERWIN M S, MARZIA T, MATTHIAS F. Life cycle approach to sustainability assessment; a case study of remanufactured alternators [J]. **Journal of Remanufacturing**, 2012,2(1):1-14.
- [6] ENOMOTOY, ITOM, KOHARAGIH, et al. Evaluation of experimental permanent magnet brushless motor utilizing new magnetic material for stator core teeth[J]. **IEEE Transactions on Magnetics**,2005,41(11):4304-4308.
- [7] CHIBA A, HAYASHI H, NAKAMURA K, et al. Test results of an SRM made from a layered block of heat-treated amorphous alloys[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**,2008,44(3):699-706.
- [8] WANG Z, ENOMOTO Y, MASAKI R, et al. Development of a high speed motor using amorphous metal cores [C]. 2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), Jeju:IEEE,2011.
- [9] 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.
- [10] WANGZ, ENOMOTOY, ITOMOTOYA, et al. Development of a permanent magnet motor utilizing amorphous wound cores [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2010,46(2):570-573.
- [11] WANGZ, MASAKI R, MORINAGAS, et al. Development of an axial gap motor with amorphous metal cores [J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**,2011,47(3):1293-1299.
- [12] 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.
- [13] 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):35-40,48.
- [14] 宋守许,杜 毅,许 可. 定子铁芯混合叠压再制造电机的齿槽转矩分析[J]. 中国机械工程,2018,29(19):2364-2370.

[编辑:程 浩]

本文引用格式:

宋守许,胡孟成,夏 燕,等. 基于混合定子铁芯的车用再制造永磁电机性能研究[J]. 机电工程,2020,37(1):107-112.

SONG Shou-xu, HU Meng-cheng, XIA Yan, et al. Performance of permanent magnet motor for vehicle remanufacturing based on hybrid stator[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020,37(1):107-112.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>