

电动汽车驱动非晶开关磁阻电机静态测试与性能仿真

李立军, 李广敏, 戴白杨, 金晶, 李德仁, 卢志超
(中国钢研科技集团有限公司 安泰科技股份有限公司, 北京 100094)

摘要: 试制了 1 台 8 kW 电动汽车驱动非晶开关磁阻电机(SRM), 并对其进行了静态性能测试。使用有限元方法对电机在低速大扭矩及高速小扭矩共计 4 种工况下的铁耗、铜耗、扭矩和效率等性能进行了仿真计算。结果表明, 相对于硅钢, 非晶合金的高磁导率特性可有效保持 SRM 在高频激励条件下的相电感值; 非晶合金的低损耗特性可有效降低电机铁耗值, 尤其在铁耗为电机主要损耗的高速小扭矩工况下, 可显著提升电机效率(3%~9%)。然而, 非晶合金的饱和磁密较低, 非晶电机的磁链-电流曲线相对于硅钢电机会有区别, 应在其工作磁密、结构尺寸及控制参数上进行调整和优化以获得最佳性能。

关键词: 非晶铁心; 开关磁阻电机; 铁耗; 效率; 相电感; 磁链

中图分类号: TM 352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)09-0103-05

Static Test and Performance Simulation of Switched Reluctance Motor for EV with Amorphous Cores

LI Lijun, LI Guangmin, DAI Baiyang, JIN Jing, LI Deren, LU Zhichao
(Advanced Technology and Materials Co., Ltd., China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100094, China)

Abstract: An 8 kW switched reluctance motor (SRM) with amorphous cores was manufactured for electricity vehicle (EV) traction. The core magnetic performance and motor static parameters were tested and compared with the same type motor with 50W350 cores. Then, according to the character of EV traction, the motor's dynamic performance was simulated by finite element analysis (FEA) method. The test and calculation results showed that the amorphous cores had higher magnetic permeability compared with 50W350, which made the motor keep stable phase inductance in the high frequency excitation condition. In addition, amorphous cores significantly reduced motor core loss, and obviously increased motor efficiency (about 3%~9%) at high speed with small torque conditions. However, amorphous cores had lower saturated magnetic density, and the amorphous motor flux linkage-current curve was different from that of the motor with 50W350 cores, so the operating flux density, geometry and control parameters should be optimized to get the best performance.

Key words: amorphous core; switched reluctance motor (SRM); core loss; efficiency; phase inductance; flux linkage

0 引言

与传统硅钢材料相比, 非晶合金具有高磁导率、高电阻率、低损耗等优异的电磁性能, 已成为促

进电力设备和电力电子器件向高效节能、高频化、小型轻量化方向发展的关键材料。例如, 铁基非晶合金带材已经广泛替代硅钢材料应用于配电变压器铁心, 可将变压器的空载损耗降低 70% 以上^[1]。

作者简介: 李立军(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为非晶软磁材料开发及其在电机中的应用。

李广敏(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为非晶软磁材料开发及其在电机中的应用。

电机是生产、生活中非常重要的动力设备,其耗电总量也在各种电气设备中居于首位。自 20 世纪 80 年代开始,国内外学者陆续研究将非晶合金铁心应用于感应电机^[2-3]、永磁电机^[4-9]、开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)^[10-11]等机型,对促进电机向高效节能、高频高速、高功率密度或扭矩密度等方面发展产生了重要影响^[12-13]。

SRM 定、转子铁心均为凸极结构,且转子无绕组和永磁材料,适合高速运转,结构简单,可靠性高。其运行遵循磁阻最小原理,采用功率电路脉冲供电,控制方式灵活,可四象限运行,可实现宽范围转速调节,起动电流小、起动转矩大、加速性能好,在电动车驱动、航空航天、精密制造、工业调速驱动系统中得到了广泛应用,尤其是在电动汽车驱动领域,已成为感应电机、永磁电机的主要竞争机型^[14-18]。若采用非晶铁心制备电动汽车驱动用 SRM,研究非晶铁心在特定工况下对电机性能的影响,对于促进高效非晶电机的优化设计与应用开发有重大意义。

本文将采用非晶合金带材制备电机的定、转子铁心,试制 1 台 8 kW 电动汽车驱动非晶 SRM,测试非晶铁心磁性能及非晶电机的静态性能,并与硅钢电机对比分析;然后,根据测试结果及电机结构参数建立电机有限元模型,结合电动汽车驱动负载工况,对非晶电机和硅钢电机的稳态性能做仿真计算,对比分析非晶合金铁心磁性能对 SRM 电感、磁链、扭矩、损耗及效率等性能的影响。

1 试 验

非晶电机铁心选用成分为 Fe80Si9B11 (at.-%) 的非晶合金带材制备,带宽 213 mm,带厚 $30 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 。首先将非晶合金带材剪成 213 mm 长的带片,然后叠成 $213 \text{ mm} \times 213 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ 的叠块,在热处理炉中 $380 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保温 100 min,再浸入环氧树脂中浸泡 1.2 h,最后在干燥箱 $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境中保温 2 h 进行固化。定子铁心、转子铁心以及 1 个 $\phi 60 \text{ mm} \times \phi 30 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的环状测试样件均采用线切割方式在块体上切出,如图 1 所示。

采用湖南联众的 MATS-2010SD 软磁直流测

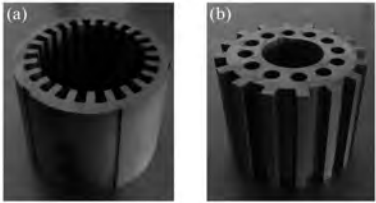


图 1 非晶 SRM 定、转子铁心

量装置测量非晶铁心的基本磁化曲线。采用 IWATSU 公司 B-H 测试系统测量非晶铁心在不同频率及磁密下的铁心损耗。本文中硅钢材料的磁性能数据从制造商技术文件获得。

用联轴器连接分度盘轴和电机转子轴以固定、调整转子齿与某相定子齿的相对角度。采用精密阻抗分析仪测试此相绕组在不同位置角、不同工作频率下的相电感。采用 EDK DPG10 功率电感测试仪用大信号脉冲测量法测量此相绕组在不同位置角下完整的电感-电流曲线及相电阻。

采用 Infolytica 软件对电机模型的磁密、铜耗和铁耗等瞬态性能进行有限元计算仿真。

2 结果与讨论

2.1 电机结构设计

电机采用 24/16 结构、三相供电、相电压 DC 240 V、额定功率 8 kW、额定转速 $2\,500 \text{ r/min}$ 、调速范围 $0 \sim 5\,000 \text{ r/min}$ 。在 $2\,500 \text{ r/min}$ 、8 kW 条件下,定子齿平均磁密设计值为 1.0 T;在转速 $5\,000 \text{ r/min}$ 时,电机定子齿磁通频率为 1 333 Hz。电机结构参数如表 1 所示。

表 1 电机结构参数

参数名称	参数值
定/转子齿数	24/16
定子外径/mm	210
转子外径/mm	146
气隙长度/mm	0.4
定子齿宽/mm	10
定子齿高/mm	17.5
转子齿宽/mm	11
转子齿高/mm	10
铁心长度/mm	110
绕线直径/mm	0.72×2
并联支路数	4

2.2 铁心性能分析

图2所示为非晶铁心的基本磁化曲线测试结果。与50W350硅钢材料相比,非晶铁心的初始磁导率高于硅钢材料,但其饱和磁密低于硅钢,在磁场强度为1 000 A/m时二者的磁密值分别为1.35 T和1.48 T。

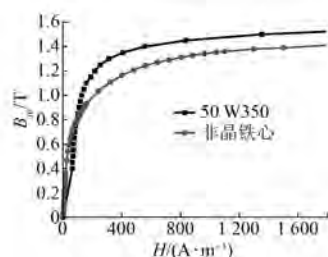


图2 非晶铁心与硅钢铁心 $B-H$ 曲线对比

图3所示为非晶铁心在0.5、1.0、1.2 T磁密下,在不同频率的正弦励磁电流下的损耗曲线。与50W350硅钢数据相比(见图4),非晶铁心的铁耗显著低于硅钢:在1 kHz、1.0 T条件下,非晶铁心和硅钢材料损耗分别为8 W/kg和129 W/kg。

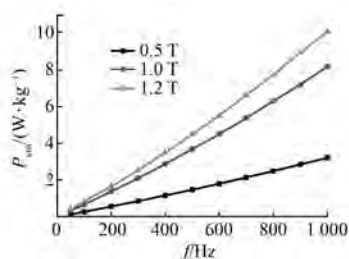


图3 非晶铁心损耗测试曲线

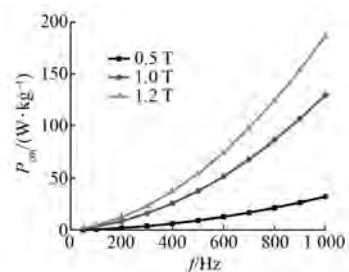


图4 50W350硅钢铁心损耗曲线

2.3 电机静态性能测试

图5、图6分别为非晶电机(AMM)和具有相同结构的硅钢电机(SIM)的某相绕组在不同频率的小信号正弦波激励下电感随电气角的分布曲线。电机转子为16齿,转子机械角为22.5°对应

一个相电流脉冲周期(360°电气角),当转子齿和定子齿完全对齐时(180°)电机磁路气隙最小,电机相电感值最大。

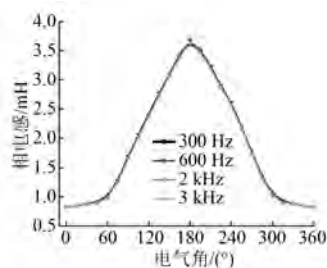


图5 非晶电机相电感随供电频率变化曲线

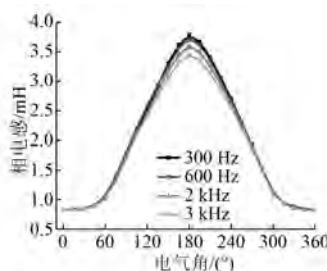


图6 硅钢电机相电感随供电频率变化曲线

对比结果表明,在低频正弦波激励下,硅钢电机相电感值与非晶电机基本相同,但是,随着供电频率的增大,硅钢电机相电感峰值下降明显,在3 kHz下,电感峰值下降了约8%,而非晶电机相电感则基本保持不变。在SRM线性简化模型中,电机输出功率与相电感随转子角度的变化率成正比,因此可以推断,相对于硅钢电机,非晶电机在高频供电、铁心不饱和条件下的输出功率会优于硅钢电机。

图7所示为非晶电机和硅钢电机分别在180°、120°、60°和0°电气角时磁链-电流曲线。首先采用功率电感测试仪用大信号脉冲测量法测量电机某相绕组在不同定、转子相对位置下完整的电感-电流曲线,再经过积分运算,即:

$$\Psi_{i+\Delta i} = \Psi_i + L_i \times \Delta i \quad (1)$$

计算出电机相绕组的磁链-电流曲线。对比结果表明:受非晶铁心饱和磁密较低影响,在铁心饱和段,非晶电机磁链值低于硅钢电机。因此,为获得最佳电机性能,非晶电机的工作磁密、结构尺寸及控制参数应做出调整或优化。

2.4 电机瞬态磁场分析

将非晶铁心和硅钢磁性能数据输入电机有限

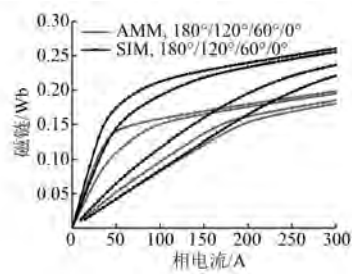


图 7 非晶电机与硅钢电机磁链-电流曲线对比

元模型中,计算出的电机电感曲线及磁链-电流曲线与测试结果基本相符,验证了模型及计算方法的准确性。

相电流为非正弦的脉冲波及铁心磁路的局部高饱和是SRM的显著特点^[19-20]。图8是非晶电机和在2 500 r/min、8 kW满功率条件下的磁场分布模型,在此时刻,转子齿和定子齿处于半对齐位置,相电流脉冲达到最大值。可以看出,电机定、转子齿尖部位饱和严重,磁通密度明显大于其余部位,分别为1.5 T和1.1 T。在同样条件下,硅钢电机2个部位磁密值分别为1.7 T和1.2 T,如图9所示。

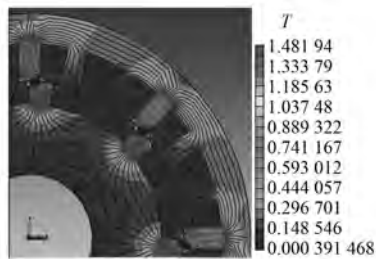


图 8 非晶电机定子齿与转子齿半对齐位置时磁场分布

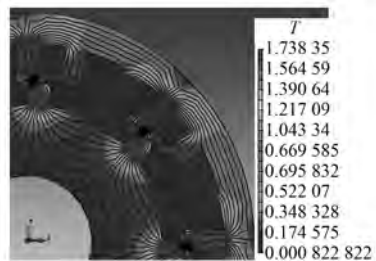


图 9 硅钢电机定子齿与转子齿半对齐位置时磁场分布

硅钢与非晶电机相同定子齿中心点磁通波形对比如图10所示。

对比结果表明,受非晶铁心饱和磁密低特性影响,在相同电流激励下,非晶电机定子齿磁密值略低于硅钢电机。

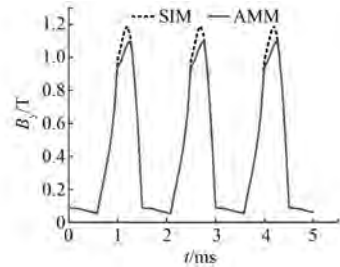


图 10 硅钢与非晶电机相同定子齿中心点磁通波形对比

2.5 电机稳态性能仿真

根据电动汽车驱动电机低速大扭矩、高速小扭矩的特点,选定4个不同工况对非晶电机和硅钢电机分别进行稳态仿真计算:2 500、3 500、5 000 r/min工况下为角度位置控制,保持开通角相同;在1 500 r/min工况下采用电流斩波控制,保持与2 500 r/min下的扭矩相同。模型的仿真计算过程不考虑机械损耗及风阻损耗。图11所示为非晶电机和硅钢电机在低速大扭矩工况下其铜耗、铁耗及输出功率的对比。在此工况下,电机绕组电流大、频率低,硅钢电机的铜耗是电机的主要损耗,占总损耗的80%以上。虽然非晶电机铁心损耗较硅钢电机铁耗有明显降低,但对电机效率提升效果不明显。如图12所示,在高速小扭矩工况下,电机绕组电流小、频率高,硅钢电机的铁耗值急剧增大,在5 000 r/min工况下成为电机的主要损耗;与之相比,非晶电机在上述工况下的铁心损耗仅为硅钢电机的10%~20%,可有效提高电机效率。

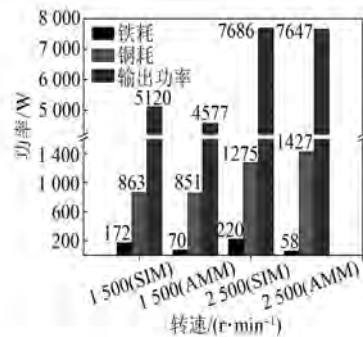


图 11 非晶和硅钢电机在低速大扭矩工况下的损耗对比

图13所示为4种工况下非晶电机和硅钢电机的效率对比。数据表明,非晶电机在高速小扭矩工况下的效率提升效果显著:在转速5 000 r/min工况下,非晶电机效率较硅钢电机提升了约9%。

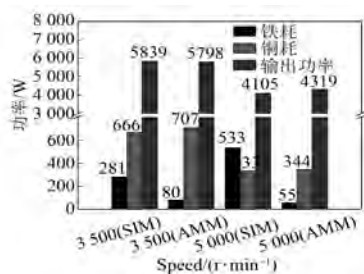


图 12 非晶和硅钢电机在高速小扭矩工况下的损耗对比

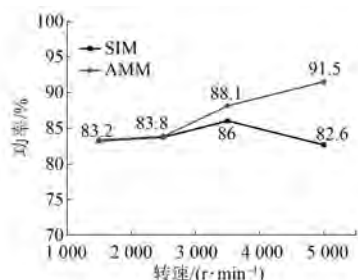


图 13 非晶电机和硅钢电机在不同工况下的效率对比

3 结 语

本文通过对 1 台 8 kW 电动汽车驱动非晶 SRM 的制备及静态测试,分析了非晶合金铁心磁性能特点;结合电动汽车驱动电机运行工况,利用有限元方法对非晶电机动态性能进行了性能仿真。测试及仿真结果表明:非晶合金的高磁导率特性可有效保持 SRM 在高频激励条件下的相电感性;非晶合金的低损耗特性可显著降低电机铁损值,尤其在铁耗与铜耗比值较大的高速小扭矩工况下,可有效提升驱动电机效率(3%~9%)。但非晶合金的饱和磁密较低,非晶电机的磁链-电流曲线相对于硅钢电机会产生变化,应在工作点磁密、结构尺寸以及控制参数上进行调整和优化以获得电机最佳性能。研究结果为高效非晶 SRM 的优化设计及其在电动汽车驱动中的应用提供了依据。

【参考文献】

[1] LI D R, ZHANG L, LI G M, et al. Reducing the core loss of amorphous cores for distribution transformers [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2012, 22(3): 244-249.

[2] DEMS M, KOMEZA K. Finite element and analytical calculations of no-load core losses in energy-saving

induction motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(7): 2934-2946.

[3] 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.

[4] 张超,朱建国,韩雪岩,等.高速永磁电机综合设计与分析[J].电机与控制应用,2017,44(9): 9-16.

[5] 张超,朱建国,佟文明,等.基于裂比的非晶合金永磁电机设计技术[J].电机与控制应用,2017,44(8): 48-53.

[6] 韩雪岩,赵森磊,周挺,等.非晶合金电机振动噪声影响因素的研究[J].电工技术学报,2015,30(14): 531-538.

[7] 佟文明,朱晓锋,朱龙飞,等.不同供电方式对非晶合金永磁同步电机铁耗的影响[J].电工技术学报,2015,30(10): 115-122.

[8] 吴胜男,唐任远,韩雪岩,等.非晶合金卷绕定子铁心振动噪声的研究[J].电工技术学报,2015,30(11): 14-21.

[9] KOLANO R, KRYKOWSKI K, BURIAN A K, et al. Amorphous software magnetic materials for the stator of a novel high-speed PMBLDC motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(4): 1367-1371.

[10] ENOMOTO Y, ITO M, KOHARAGI H, 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.

[11] 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.

[12] WANG Z, ENOMOTO Y, ITO M, et al. Development of a permanent magnet motor utilizing amorphous wound cores [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(2): 570-573.

[13] 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 Application, 2008, 44(3): 699-705.

[14] CHEN Y D, LIU H J, ZHANG J X. Structure optimization and performance analysis of SRM with amorphous alloys core using FEM [J]. Sensors & Transducers, 2014, 162(1): 273-279.

(下转第 124 页)

- classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2004, 40 (3): 735-739.
- [27] ÖNEL I Y, BENBOUZID M E H. Induction motor bearing failure detection and diagnosis: Park and Concordia transform approaches comparative study [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2007, 13(2): 257-262.
- [28] BENBOUZID M E H. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(5): 984-993.
- [29] 侯新国, 吴正国, 夏立. 基于 Park 矢量模信号小波分解的感应电机轴承故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 115-119.
- [30] 李万清. 基于朴素贝叶斯方法和权值分析方法的电机轴承故障诊断[J]. 机电工程, 2012, 29(4): 390-393.
- [31] 张巍, 秦玉志, 崔瑞. 双馈式风力发电机组发电机滚动轴承状态监测及故障诊断方法探究[J]. 吉林电力, 2015, 43(6): 16-18.
- [32] 杜谋军. 基于时频流形的风力发电机轴承轴电流故障诊断与预测方法[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2016.
- [33] 王冰, 李洪儒, 田海雷. 形态梯度解调在电机轴承故障特征提取中的应用研究[J]. 大电机技术, 2013(5): 25-29.
- [34] 于湘涛, 卢文秀, 褚福磊. 柔性形态滤波和遗传规划在电机轴承故障诊断的应用[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(9): 953-957.
- [35] 岳红利, 田慕琴. 基于分形维数的电机轴承故障诊断[J]. 电气技术, 2011(1): 21-23.
- [36] 贺王鹏, 瞿艳阳, 陈彬强, 等. 周期稀疏导向超小波在风力发电设备发电机轴承故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报, 2016, 52(3): 41-48.

收稿日期: 2018-01-05

(上接第 107 页)

- [15] FAN T, LI Q, WEN X H. Development of a high power density motor made of amorphous alloy cores [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(9): 4510-4518.
- [16] KRINGS A, BOGLIETTI A, CAVAGNINO A, et al. Soft magnetic material status and trends in electric machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(3): 2405-2414.
- [17] KIYOTA K, CHIBA A. Design of switched reluctance motor competitive to 60 kW IPMSM in third-generation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 2303-2308.
- [18] KIYOTA K, KAKISHIMA T, CHIBA A. Comparison of test result and design stage prediction of switched reluctance motor competitive with 60 kW rare-earth PM motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5712-5721.
- [19] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [20] 吴建华. 开关磁阻设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

收稿日期: 2018-04-25

[主要栏目]

- 综述
- 研究与设计
- 变频与调速
- 控制与应用技术
- 应用
- 运行与保护
- 新产品介绍
- 新能源与风力发电
- 电机系统节能
- 测试技术与检测设备
- 行业信息

引领技术发展趋势

报道经典实用案例

反映行业最新动态