

新能源汽车用永磁辅助同步磁阻电机 噪声及续航优化研究

唐小春^{1,2}, 于冰^{1,2}, 许时杰^{1,2}, 董江东^{1,2}

(1. 中车株洲电机有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 湖南省新能源汽车电机工程技术研究中心, 湖南 株洲 412001)

摘要: 永磁辅助同步磁阻电机具有高转矩/功率密度、高效率区间、高转速、低反电动势、低成本等优势, 在新能源领域特别是乘用车驱动系统中得到越来越广泛的应用。但该类电机凸极率大、波形畸变大、转矩脉动大, 易导致电机振动噪声及效率低下, 进而导致整车振动噪声及续航不足等问题。通过增加转子隔磁孔, 改变磁路走向的方式, 降低了电机全转速段转矩脉动和对应负载气隙感应电动势波形总谐波畸变(THD)。对电机优化前后径向电磁力及谐波响应进行仿真对比分析, 并通过试验验证了该优化方法的有效性。

关键词: 永磁辅助同步磁阻电机; 新能源汽车; 隔磁孔; 转矩脉动; 感应电动势波形

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)01-0091-06

doi: 10.12177/emca.2019.143

Research on Noise and Endurance Optimization of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor for New Energy Vehicles

TANG Xiaochun^{1,2}, YU Bing^{1,2}, XU Shijie^{1,2}, DONG Jiangdong^{1,2}

(1. CRRC Zhuzhou Motor Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;

2. Hunan Provincial Engineering Research Center for Electric Vehicle Motors, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: Permanent magnet assisted synchronous reluctance motor has the advantages of high torque/power density, high efficiency range, high speed, low back electromotive force (EMF), low cost, etc., so it is more and more widely used in new energy fields, especially passenger vehicle drive systems. However, this kind of motor has high salient pole rate, large waveform distortion and large torque ripple, which are easy to generate problems of vibration noise and low efficiency of the motor, resulting in the whole vehicle vibration noise and insufficient battery life. By adding the rotor magnetic isolation holes and changing the direction of the magnetic circuit, the torque ripple at the full speed range of the motor and the total harmonic distortion (THD) content of the corresponding load air gap induced EMF waveform are reduced. The radial electromagnetic force and harmonic response of the motor before and after optimization are compared and analyzed. Finally, the effectiveness of the optimization method is proved by experiments.

Key words: permanent magnet assisted synchronous reluctance motor; new energy vehicle; magnetic isolation hole; torque ripple; induced EMF waveform

收稿日期: 2019-10-10; 收到修改稿日期: 2019-12-05

作者简介: 唐小春(1986—), 男, 助理工程师, 研究方向为永磁电机设计。

于冰(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源汽车驱动电机。

许时杰(1986—), 男, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电机热管理。

0 引言

中国新能源汽车用电机大部分采用内置式永磁同步电机^[1]。该类电机具有转矩/功率密度高、功率因数高、恒功率区域宽、效率高、气隙磁密随负载变化时畸变小等优点,但稀土磁钢用量大、成本高、反电动势高、高速扩速能力差,总体性价比比较低。永磁辅助同步磁阻电机^[2-4]具有高磁阻转矩,在永磁体的辅助下,不仅能提高功率因数而且还能增加部分永磁转矩,提高合成转矩。与永磁同步电机相比,在更小的磁钢用量下,永磁辅助同步磁阻电机具有更高的转矩/功率密度、更广的扩速能力,并且其较低的反电动势也使控制器的耐久性、寿命、可靠性等得到保证。因此,未来永磁辅助同步磁阻电机将会越来越多地应用到新能源汽车特别是高速乘用车驱动电机中。

在乘用车驱动系统中,要求驱动电机在具有高转速、高转矩/功率密度、宽高效区间等性能的同时,还要满足低成本、低反电动势、高可靠性等要求。在这种应用场合下,永磁辅助同步磁阻电机的优势凸显,但该类电机凸极率大、气隙波形畸变大、转矩脉动大,导致径向电磁力大幅增加,如果没有合理的设计,很容易出现振动噪声问题^[5],并伴随电机退磁、损耗大、局部饱和程度高、转矩/功率低、效率低等一系列不良现象。随着新能源汽车行业的发展和消费群体的不断扩大,消费者对整车性能的要求不断提高,同时对新能源汽车的驾驶体验提出了更为严苛的要求,而影响体验感非常重要的因素之一是整车的振动噪声。电机作为驱动新能源汽车的核心动力部件之一,是整车振动噪声最主要的来源,对整车驾乘舒适性造成最为主要及直接的影响。随着电机驱动系统逐步向高转矩/功率密度、高转速、轻量化、低成本等方向发展,给电机设计带来了更大的挑战^[6]。

本文通过改进磁路走向,优化全转速段转矩脉动和对应负载感应电动势波形的方法,降低径向电磁力,改善阶次噪声,从而提高整车的舒适性;通过优化铁心的材料、叠厚、绕组等参数,提高NEDC工况下对应的电机效率,增加整车续航里程。通过对优化前后2种电机的电磁性能、电磁力及谐响应仿真对比分析,验证其噪声削弱水平,最后通过试验验证了该优化方法的有效性。

1 电机基本参数

本文以某永磁辅助同步磁阻电机作为优化研究对象,采用48槽8极(48S8P)槽极配合,定子绕组为单层绕组,转子为“双V”拓扑结构。优化前电机横截面如图1所示。电机基本参数如表1所示。

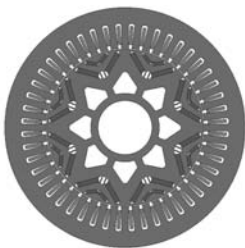


图1 优化前电机横截面

表1 电机基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
电池电压/V	DC 310	峰值电流/A	≤200
额定转矩/(N·m)	60	峰值转矩/(N·m)	120
额定功率/kW	15	峰值功率/kW	30
峰值转速/(r·min ⁻¹)	9 000	最高转速反电动势/V	≤DC 600
最大效率/%	96	冷却方式	水冷
定子外径/mm	200	定子内径/mm	130
气隙/mm	0.7	叠厚/mm	78

2 电磁有限元分析

利用Maxwell电磁仿真软件建立待优化电机的有限元分析模型。优化后电机横截面如图2所示。该优化方案在原方案的基础上,通过在转子侧增加2组对称的隔磁孔,改变磁路走向,从而优化电机转矩脉动和对应负载气隙感应电动势波形总谐波畸变(THD),减少电磁力,改善振动噪声。

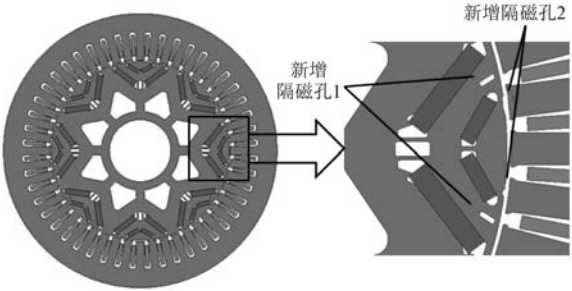


图2 优化后电机横截面

同时,由于搭载该电机的乘用车在 NEDC 工况下续航不足,需同步优化续航。NEDC 工况下电机运行数据如图 3 所示。由图 3 可知,电机主要运行在低转矩($0 \sim 40 \text{ N}\cdot\text{m}$)区域,经分析该区域电机主要损耗为铁耗。因此,可通过提高硅钢片牌号、降低叠厚等方式来提高 NEDC 工况下电机效率,增加整车续航。优化前后电机结构参数如表 2 所示。

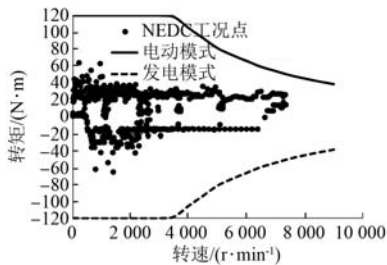


图 3 NEDC 工况下电机运行数据

表 2 优化前后电机结构参数

参数名称	优化前	优化后
定子外径/mm	200	200
定子内径/mm	130	130
气隙/mm	0.7	0.7
铁心长度/mm	78	72
硅钢片材料	35WGP1800	30WGP1600
磁钢材料	N45UH	N40UH

2.1 转矩输出特性及感应电动势分析

对于整数槽永磁辅助同步磁阻电机而言,由于电机的齿谐波较大,产生的转矩脉动相对较高,且凸极率大,气隙波形畸变明显,容易引起电机振动噪声^[7]。因此,减少振动噪声最直接的方法就是降低电机的转矩脉动及优化气隙感应电动势波形 THD 含量。因为新能源汽车用驱动电机关注的是全转速区间段的振动噪声表现,所以对优化前后电机在低、中、高 3 个转速区间段各取 1 个典型工况点进行对比分析,结果如下。

(1) 电机优化前后低速 2 000 r/min、120 N·m 转矩对比如图 4 所示。转矩脉动从 9.75%降低到 5.10%,降低了 47.7%。

(2) 电机优化前后中速 4 500 r/min、30 kW 转矩对比如图 5 所示。转矩脉动从 7.3%降低到 4.8%,降低了 34.2%。

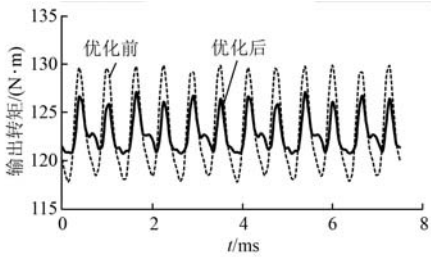


图 4 电机优化前后低速/峰值转矩对比

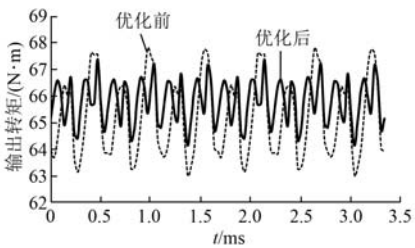


图 5 电机优化前后中速/恒功率转矩对比

(3) 高速 8 470 r/min、30 kW 转矩对比如图 6 所示。转矩脉动从 8.0%降低到 6.6%,降低了 17.5%。

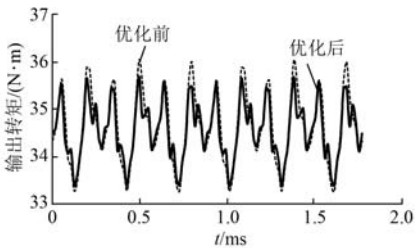


图 6 电机优化前后高速峰值功率转矩对比

电机优化前后全转速段气隙感应电动势傅里叶分解对比如图 7 所示。从图 7 可以看出,11 次和 13 次谐波发生了明显的降低:低速段分别降低了 58% 和 42%;中速段分别降低了 41% 和 45%;高速段分别降低了 46% 和 70%。各区间段的 5 次

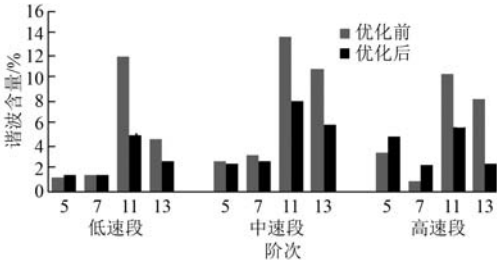


图 7 电机优化前后全转速段气隙感应电动势傅里叶分解对比

和 7 次谐波基本不变。

2.2 电磁力分析

电机运行中振动与噪声的来源有电磁振动噪声、机械噪声、空气动力噪声等,其中电磁振动噪声为噪声的主要来源,而产生电磁振动噪声的根本原因是电磁力。根据麦克斯韦张量法,作用于定子电枢内表面的径向电磁力密度可描述为^[8-11]

$$f_r = \frac{1}{2\mu_0}(B_r^2 - B_t^2) \approx \frac{B_r^2}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中: f_r 为径向电磁力密度; μ_0 为空气磁导率; B_r 、 B_t 分别为气隙磁密的径向和切向分量。

气隙磁密的切向分量远小于径向分量,在工程中常用的方法是将其忽略。因此,径向电磁力可近似用气隙磁密径向分量的平方表示。

通过有限元仿真得到定子齿面电磁力,对电磁力时空三维傅里叶分解,对比数据如图 8 所示。

由图 8 可知:①低速 2 000 r/min、120 N·m 时,48 阶从 9 821 N/m² 降低到 2 437 N/m²,降低了 75.2%,24 阶升高了 29.8%;②中速 4 500 r/min、30 kW 时,48 阶从 6 688 N/m² 降低到 3 739 N/m²,降低了 44%,24 阶降低了 5%;③高速 8 470 r/min、30 kW 时,48 阶从 2 013 N/m² 降低到 482 N/m²,降低了 76%,24 阶升高了 28.8%。

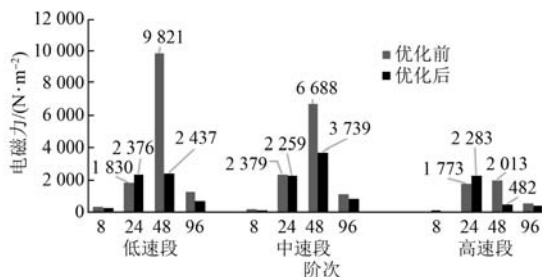


图 8 电机优化前后全转速段径向电磁力对比

3 谐响应分析

采用仿真软件 ANSYS Workbench 建立谐响应模型,对电机低速、中速、高速各工况进行有限元谐响应分析,通过对比分析电机优化前后的谐响应特性,验证电机优化后的性能。

2 000 r/min、120 N·m 工况下的谐响应对比如图 9 所示。

图 9 中,电机在 48 阶(1 600 Hz)处时,等效声功率辐射等级降低约 5 dB;在 24 阶(800 Hz)处

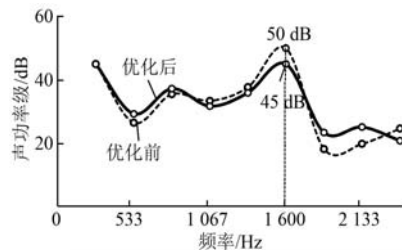


图 9 2 000 r/min、125 N·m 工况下谐响应对比

时,优化后方案比优化前方案稍有恶化,径向声功率辐射等级升高了约 2 dB,由 35.5 dB 升高至 37.2 dB。

4 500 r/min、30 kW 工况下的谐响应对比如图 10 所示。

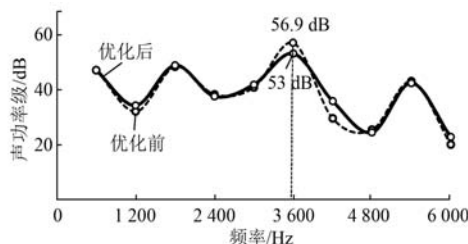


图 10 4 500 r/min、30 kW 工况下的谐响应对比

图 10 中,电机在 48 阶(3 600 Hz)处时,表面等效声功率级降低了约 4 dB;而在 24 阶(1 800 Hz)处时,对应电机定子表面响应略微恶化。

8 470 r/min、30 kW 工况下的谐响应对比如图 11 所示。该工况点为电机 0 阶模态对应共振点。

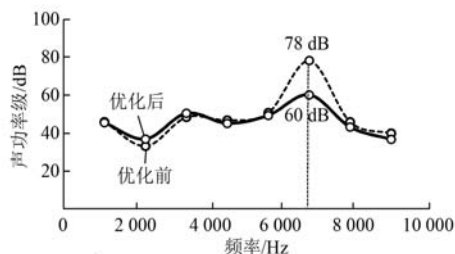


图 11 8 470 r/min、30 kW 工况下的谐响应对比

图 11 中,对比优化前后定子表面等效声功率,电机在 48 阶(6 776 Hz)处时,优化后声功率级降低较为明显,对应定子径向声功率辐射等级由 78 dB 降低至 60 dB,降幅为 18 dB。其他频率点基本变化不大。

综上所述,在低速、中速、高速各工况区间下,电机 48 阶响应和等效声功率级有明显降低,其

中、中、低速降低了 4~5 dB, 高速区间段降低明显; 3 个工况区间下电机 24 阶噪声有略微恶化现象, 但因为该阶噪声的声功率值较低, 所以不会影响整体声品质。

4 测试验证

4.1 噪声测试

为了验证电机优化方法的有效性, 制作样机

装车并按整车振动噪声测试评估方法对其验证。在整车加速工况下, 电机优化前后驱动总成噪声测试对比如图 12 所示。

从图 12 可看出, 优化后电机在 1 000 ~ 3 000 r/min 爬坡阶段啸叫有明显改善, 48 阶降低约 5 dB(A), 24 阶 200~2 000 r/min 多处尖峰有明显削减, 整体声音品质达到项目要求, 提高了整车的舒适性。

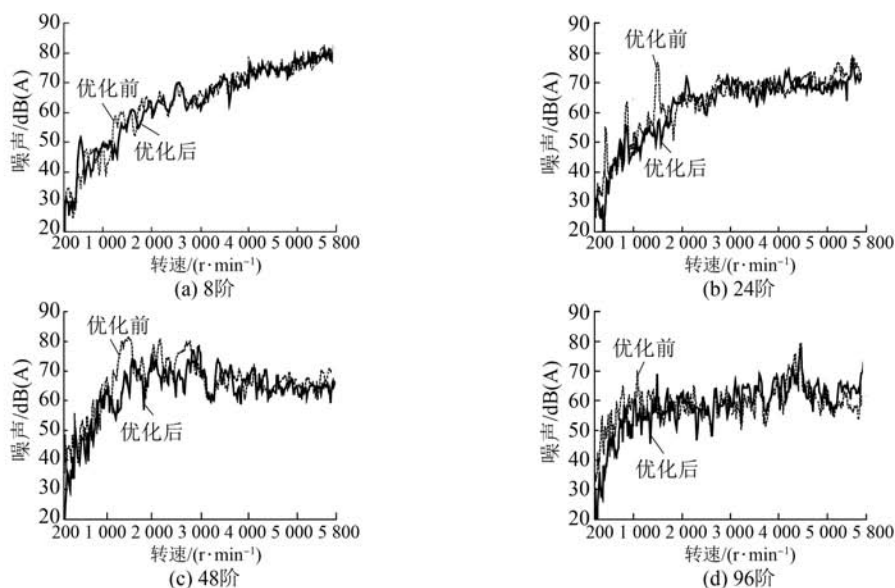


图 12 优化前后驱动总成噪声测试对比

4.2 效率 MAP 测试

优化前后电机效率实测 MAP 对比图如图 13 所示。

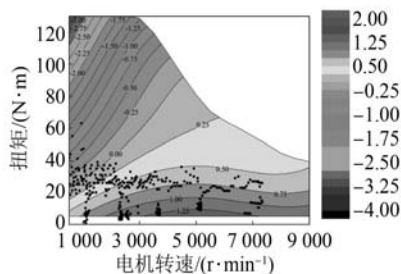


图 13 优化前后电机效率实测 MAP 对比图

由图 13 可知: ①优化后的方案比优化前在 NEDC 工况下有明显提升, 特别在 0~30 N·m、2 000~9 000 r/min 区域, 电机效率整体提升了 0.5%~1.0%; ②优化后方案在低速大转矩区域效率比优化前有所降低, 主要是由叠厚减少、电流增

加、铜耗增大所致。但在整车的整个运行区域, 爬坡段较短、时间较少, 因此耗电量低, 对整车的续航影响较小。

5 结 语

本文以一款乘用车用驱动电机为研究对象, 通过在转子侧增加 2 组对称的隔磁孔, 改变磁路走向, 对电机转矩脉动和负载气隙感应电动势波形正弦性优化, 从而达到优化振动噪声性能的目的。通过优化铁心的材料、叠厚、绕组等参数, 提高了 NEDC 工况下电机效率, 增加了整车续航里程。利用有限元软件仿真对电机电磁性能、电磁力、谐波响应仿真对比分析。最后通过试验验证了优化手段的合理性和有效性, 得出主要结论如下。

(1) 电机优化后低速转矩脉动降低了 47.7%, 对应的气隙反电动势 11 次和 13 次谐波分别降低了 58% 和 42%; 中速转矩脉动降低了

34.2%, 对应的气隙反电动势 11 次和 13 次谐波分别降低了 41% 和 45%; 高速转矩脉动降低了 17.5%, 对应的气隙反电动势 11 次和 13 次谐波分别降低了 46% 和 70%。各区间段 5 次和 7 次谐波基本不变。

(2) 电机优化后谐波响应特性有所改善, 48 阶电机等效声功率辐射等级在低速及中速工况下分别降低了约 5 dB 和 4 dB, 高速工况下降低明显。3 个工况区间电机 24 阶噪声有略微增强, 但该阶噪声功率低, 不影响整体声品质。由装车实测结果可知, 优化前在低速段 1 000~3 000 r/min 出现的啸叫特别是 48 阶噪声大大削弱, 证明该优化方法效果显著。

(3) 优化新能源车用电机振动噪声问题时, 最直接有效的办法就是降低全转速段转矩脉动和负载下对应的气隙感应电动势 THD 含量, 进而降低径向电磁力, 达到改善电机振动噪声的目的。

(4) 结合整车 NEDC 工况, 分析了电机损耗分布, 通过改变铁心叠厚、材料、绕组等参数, 提高了对应工况下的电机效率, 从而使整车续航里程增加。

【参考文献】

- [1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [2] HRABOVCOVA V, MAKYS P, RAFAJDUS P, et al. Improved barriers rotor of the reluctance

synchronous motor[J]. Electrical Engineering, 2017, 99: 1325.

- [3] NIAZI P, TOLYAT H A, CHEONG D H, et al. A low-cost and efficient permanent-magnet-assisted synchronous reluctance motor drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(2): 542.
- [4] HONDA Y, MURAKAMI H, KAZUSHIGE N, et al. Optimum design of a multi layer interior permanent magnet synchronous motor using reluctance torque [J]. IEEJ Transactions on Industry Applications, 1997, 117(7): 898.
- [5] 陈永校, 诸自强, 应善成. 电机噪声的分析和控制[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.
- [6] 杨浩东. 永磁同步电机电磁振动分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [7] 黄辉, 胡余生. 永磁辅助同步磁阻电机设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [8] 陈益广, 韩柏然, 沈勇环, 等. 永磁同步推进电机电磁振动分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 16.
- [9] 杨浩东, 陈阳生, 邓志奇. 永磁同步电机常用齿槽配合的电磁振动[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 24.
- [10] 王晓远, 贺晓钰, 高鹏. 电动汽车用 V 型磁钢转子永磁电机的电磁振动噪声削弱方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4919.
- [11] 陈彬, 黄辉, 胡余生, 等. 永磁同步磁阻电机径向电磁力及振动抑制[J]. 微特电机, 2017, 45(6): 65.

(上接第 77 页)

- [7] 刘国海, 黄旭, 周华伟. 基于定子磁链最优的五相永磁电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 6119.
- [8] 黄其, 罗玲, 白娅梅, 等. 基于 MagNet 的深槽串励电动机设计[J]. 微特电机, 2012, 40(8): 31.
- [9] BODO N, JONES M, LEVI E. Multi-level space-vector PWM algorithm for seven-phase open-end winding drives[C]// 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2011.

- [10] WANG Y, PANDA D, LIPO T A, et al. Open-winding power conversion systems fed by half-controlled converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2427.
- [11] 孙丹, 林斌, 周文志. 开绕组电机系统拓扑及控制技术综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 76.
- [12] 黄其, 陈星宇, 唐扬, 等. 电动汽车电机及控制器智能测试系统设计[J]. 自动化与仪表, 2019, 34(6): 63.