

气隙偏心对车用永磁同步电机噪声特性的影响分析

赵哲¹, 林浩然¹, 熊端锋², 代颖^{1*}

(1. 上海大学机械与自动化学院, 上海 200072;

2. 晗兆检测技术(上海)有限公司, 上海 200435)

Analysis of the Influence of Air Gap Eccentricity on the Noise Characteristics of Permanent Magnet Synchronous Motors for Vehicles

ZHAO Zhe¹, LIN Haoran¹, XIONG Duanfeng², DAI Ying^{1*}

(1. School of Electrical and Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University,

Shanghai 200072, China;

2. Hanzhao Inspection Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200435, China)

Abstract: The intensification of competition in the field of new energy vehicles has raised the requirements for the noise, vibration, and acoustic vibration roughness (NVH) performance of drive motors. The eccentricity of the air gap may also cause vibration and noise problems in the vehicle motor. This article takes a permanent magnet synchronous motor with a rated power of 35 kW as the research object, and uses a combination of analytical and finite element simulation methods to analyze the effects of rotor dynamic eccentricity and rotor static eccentricity on the electromagnetic force characteristics of the vehicle motor. And a finite element modal simulation model of the motor structure is established, accurately analyze the working mode of the vehicle motor. Based on acoustic simulation analysis, the influence of different degrees of dynamic eccentricity and static eccentricity on the electromagnetic noise spectrum characteristics of two key working points of vehicle motors is analyzed. Finally, the correctness of the theoretical analysis is verified through motor noise testing experiments in a semi anechoic room.

Key words: permanent magnet synchronous motor for vehicle; rotor eccentric; electromagnetic force; NVH performance

摘 要: 新能源汽车领域竞争的加剧,对驱动电机噪声、振动与声振粗糙度(NVH)性能提出了更高的要求。其中气隙偏心可能导致车用电机出现振动和噪声问题。本文以一台额定功率 35 kW 的车用永磁同步电机为研究对象,采用解析和有限元仿真相结合的方法分别分析转子

动偏心和转子静偏心对车用电机电磁力特性的影响。并建立了电机结构的有限元模态仿真模型,准确分析车用电机的工作模态。在声学仿真分析基础之上,分析了不同程度的动偏心率和静偏心率对汽车电机两个关键工作点电磁噪声频谱特性的影响。最后,通过半消音室内的电机噪声测试试验验证理论分析的正确性。

关键词: 车用永磁同步电机; 转子偏心; 电磁力; NVH 性能

0 引言

转子偏心故障是电机运行的常见故障之一。电机内的偏心状况十分复杂。由于加工误差、不平衡激励等因素的存在,电机会出现转子偏心现象。按照偏心时的运动状况,偏心可以分为静偏心、动偏心以及混合偏心^[1]。2007 年,西安交通大学李江涛团队介绍了一种考虑转子偏心对开槽永磁电机气隙径向磁通密度影响的数学模型^[2]。2009 年,山东大学的张冉团队基于等效剩磁的方法,利用永磁电动机中标量磁位所满足的微分方程和场量所满足的边界条件提出了静态偏心气隙永磁电动机磁场的解析计算方法^[3]。2010 年,日立研究中心的 R. Takahata 团队通过分析永磁同步电机不平衡转子-定子气隙区域的磁通量分布,证明了转子偏心产生循环电流并使电磁力不平衡^[4]。2012 年,罗马尼亚布拉索夫特兰西瓦大学的 Andrei Negoita 等根据产生磁力的振幅和频谱,

介绍了单相鼠笼异步电动机分别处于无偏心和 15% 静偏心下的差异, 显示了偏心对其噪声影响^[5]。2014 年, 同济大学的左曙光团队针对表贴式永磁同步电机的电磁力进行了精确分析, 并且在 2017 年, 其团队分析了电机气隙在不同偏心率时对电磁振动和噪声的影响^[6-7]。2019 年, 上海电机学院的李全峰团队针对表贴式永磁同步电动机运行时转子发生偏心故障的问题, 提出一种利用振动速度频谱分析来快速诊断的方法^[8]。其通过引入静偏心修正系数和动偏心修正系数, 证明了当 SPMSM 发生转子偏心问题时, 会新增电磁力波分量。2020 年, 山东大学的任杰团队为计算转子偏心时的空载气隙磁场, 提出基于等效变换的解析计算方法^[9]。沈阳工业大学的张霄霆团队验证了不平衡磁拉力随着偏心率的增大而逐渐增加的现象^[10]。转子动偏心故障还引入新的时间谐波, 验证了时间谐波随偏心程度的变化规律, 以及在同等偏心程度下, 时间谐波随气隙位置的分布规律。同时有学者研究时间谐波随偏心程度的变化规律^[11]。河北科技大学的赵士豪团队提出了一种磁极偏心结构表贴式永磁同步电机混合磁场解析计算方法, 该方法能够考虑定、转子铁磁材料非线性变化对电机电磁参数的影响^[12]。2022 年, 山东大学的赵方伟团队研究了通过削弱固有轴电压分量来削弱动态偏心轴电压的方法^[13]。

当前, 文献针对偏心对电磁力影响的研究主要是在产生的气隙、不平衡磁拉力以及气隙磁场等方面。针对异步电机的偏心问题研究较多; 针对永磁同步电机的偏心问题分析主要集中在表贴式永磁同步电机; 针对内置式永磁同步电机的偏心问题以及偏心对 NVH 性能的影响鲜有研究。

目前新能源汽车电机领域的研究进展及深度与日俱增, 人们对新能源汽车的选择越来越多, 电机各方面性能都需要严格把控^[14]。对于 NVH 性能来说, 人们对汽车驾驶感受不再局限于平稳驾驶过程中, 也存在于极端加速过程中, 例如快速启动、急刹等, 这些驾驶过程也会产生噪声^[15]。这些极端驾驶过程中电机会在一段时间处于峰值功率的工况中, 因此需要对处于峰值功率工况下的电机进行 NVH 性能分析。并且如果电机处于峰值工况时的性能符合要求, 那么其在额定工况下

也能满足要求。

本文以一台 6 极 36 槽新能源汽车驱动用内置式永磁同步电机为研究对象, 该电机的主要技术指标如表 1 所示。采用解析法和有限元仿真相结合的分析方法定量分析转子不同偏心时对永磁同步电机电磁噪声的影响。

1 转子偏心对电磁力的影响

1.1 转子未偏心状态下的电磁力

永磁同步电机的气隙磁密可以表示为式(1)和(2):

$$B_r = B_x \cos \theta + B_y \sin \theta \tag{1}$$

$$B_t = B_y \cos \theta - B_x \sin \theta \tag{2}$$

式中: B_r 为径向气隙磁密; B_t 为切向气隙磁密。

由于永磁同步电机的切向电磁力远小于径向电磁力, 因此径向电磁力表达式可以简化为

$$F_r(\theta, t) = \frac{B_r^2(\theta, t)}{2\mu_0} \tag{3}$$

式中: μ_0 为真空磁导率。

表 1 车用永磁同步电机的主要技术指标

Tab. 1 Main technical indicators of permanent magnet synchronous motors for vehicles

参数名称	参数值
定子槽数	36
极对数	3
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
峰值转速/(r·min ⁻¹)	8 000
额定功率/kW	35
峰值功率/kW	70
定子外径/mm	102.5
转子铁心外径/mm	61
气隙/mm	1
铁心有效长度/mm	132

1.2 转子偏心状态下的径向电磁力波

转子动态偏心是指在转子转动时, 由于转子的几何中心位置发生了偏移, 其转子转动轴与定子转动轴轴线一致; 并且在运转时, 空气间隙的最大值和最小值都是固定的, 而且随着转子的转动, 空气间隙的数值也会发生周期性的改变。

转子静态偏心是指电机转子的几何中心偏移, 转子旋转的轴线不是定子的轴线。在运行过程中定、转子间气隙呈现静态稳定但不均匀的现象, 最小气隙位置与最大气隙位置及其气隙宽度均不随转子系统旋转而发生变化。

车用驱动电机的气隙为0.5~1 mm,一般认为偏心率<5%为可接受范围;5~10%为临界范围,存在风险;10%~20%为不可接受范围;>20%为完全不可接受范围^[16]。

根据研究表明偏心主要影响气隙磁导,从而影响气隙磁密的分布以及影响气隙的径向力波分布,表现为电磁力额外出现多个不同空间阶次和时间频率的谐波分量^[6]。

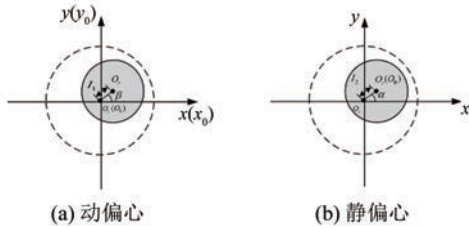


图1 转子偏心示意图

Fig.1 Schematic diagram of rotor eccentricity

根据研究结果可知电机气隙存在静偏心时的磁导修正系数为^[7,17]

$$\lambda_d = 1 + \tau_d \cos\left(\theta - \frac{\omega_e}{p}t\right) \quad (4)$$

$$\lambda_s = 1 + \tau_s \cos\theta \quad (5)$$

式中: λ_d 为动偏心修正系数; λ_s 为电机动偏心时气隙; τ_d 为动偏心修正系数; τ_s 为电机静偏心时气隙; ω_e 为电角速度; p 为极对数。

气隙磁场由转子永磁体产生的磁场和三相定子绕组产生的磁场作用产生,气隙磁场的径向分量可以用磁导修正系数与无偏心气隙磁场相乘得到,如式(6)所示:

$$B_r(\theta, t) = (B_{mr} + B_{sr}) \cdot \lambda_d / \lambda_s \quad (6)$$

式中: B_{mr} 为永磁体径向磁通密度; B_{sr} 为电机的电枢反应径向磁通密度; θ 为空间角度的系数代表空间阶次; t 为时间的系数代表旋转角频率。

根据麦克斯韦张量法,可以得出电机偏心时径向电磁力波解析式为^[17]

$$F_{rd} \approx \frac{B_r^2}{2\mu_0} = \dots + \frac{1}{2\mu_0} \sum_n \sum_v p_{nvr} \cdot \cos[(np + v)\theta - (n\omega_e \mp \omega_e)t] + \frac{1}{2\mu_0} \sum_n \sum_v p_{nvr} \cdot \cos[(np \pm v \pm 1)\theta - (n\omega_e \mp \omega_e \pm \omega_e/p)t] + \dots \quad (7)$$

$$F_{rs} \approx \frac{B_r^2}{2\mu_0} = \dots + \frac{1}{2\mu_0} \sum_n \sum_v p_{nvr} \cdot$$

$$\cos[(np + v)\theta - (n\omega_e \mp \omega_e)t] + \frac{1}{2\mu_0} \sum_n \sum_v p_{nvr} \cdot$$

$$\cos[(np \pm v \pm 1)\theta - (n\omega_e \mp \omega_e)t] + \dots \quad (8)$$

式中: n 为电磁径向力波的空间阶次; v 为电磁径向力波的频率; p_{nvr} 为空间阶次为 n ,频率为 v 的电磁径向力波的幅值。

根据式(7)可得,对比无偏心情况,电机转子动偏心时,其主要频率的径向电磁力波幅值会随之增长,并且其边频所对应的径向电磁力波幅值会大幅度增加。

根据式(8)可得,永磁同步电机气隙存在静偏心时,其径向电磁力波幅值随偏心率的增加而增加。

峰值转速工作点和额定转速工作点是校核汽车电机性能的两个重要的工作点,本节对电机这两个工作点的径向电磁力进行仿真分析。

仿真结果如图2~5所示。由图2和图3可知,电机气隙存在动偏心时,径向电磁力波幅值随着动偏心率增加而增加之外,其他边频所对应的径向电磁力波幅值也有不同程度的增加,加大了车用电机电磁噪声问题的解决难度。

由图4和图5可知,电机气隙存在静偏心时,径向电磁力波幅值随着静偏心率增加而增加,不存在边频电磁力。

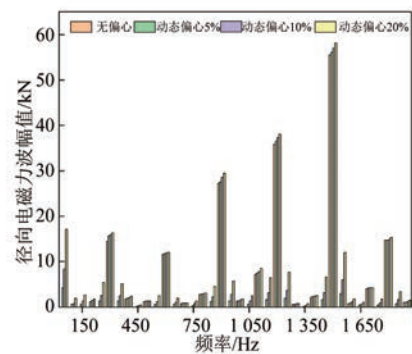


图2 额定转速不同动偏心径向电磁力时间谐波

Fig.2 Time harmonics of moving eccentric radial electromagnetic force with different rated speeds

由式(7)和(8)与图2~5的结论对比可知,有限元法与解析法分析得出的径向电磁力波幅值变化规律一致。

当电机发生偏心时,由于气隙中的不对称磁场分布而作用在转子上的磁力合力不再为零,出现不平衡磁拉力^[18]。不平衡磁拉力会对电机的

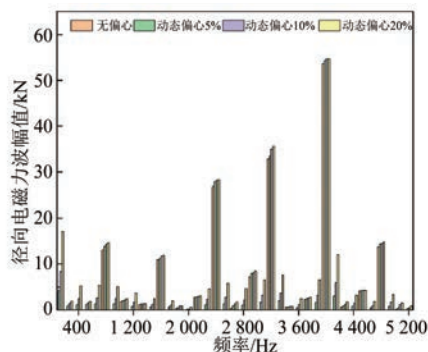


图 3 峰值转速不同动偏心径向电磁力时间谐波
Fig. 3 Time harmonics of radial electromagnetic force with different peak speeds

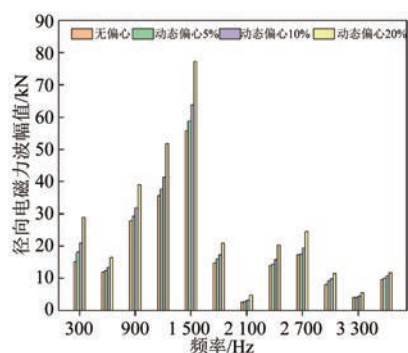


图 4 额定转速不同静偏心径向电磁力时间谐波
Fig. 4 Space harmonics of radial electromagnetic force with different static eccentricity at rated speed

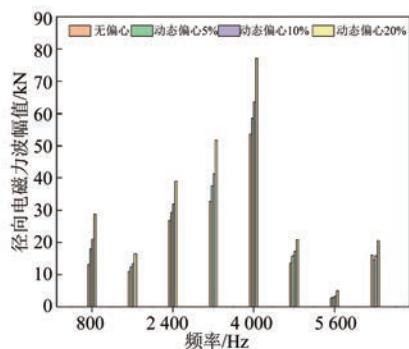


图 5 峰值转速不同静偏心径向电磁力时间谐波
Fig. 5 Spatial harmonics of radial electromagnetic force with different peak speeds and static eccentricity

运行产生影响,加剧电机的振动和噪声,增加转子轴承的磨损,严重时甚至可能发生扫膛。

采用有限元法分析了车用永磁同步电机单边磁拉力随气隙偏心率的变化规律,如图 6 所示。由图可知,动静偏心产生的单边磁拉力均随着偏心程度的增加而增大,且变化规律基本一致。

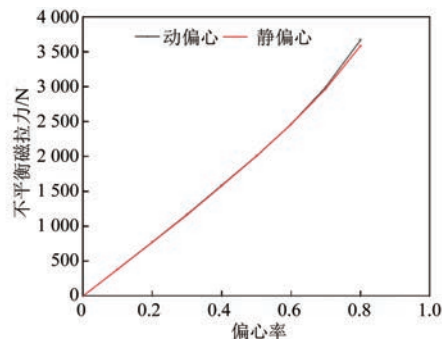


图 6 不平衡磁拉力与偏心率关系曲线
Fig. 6 Unbalanced magnetic pull and eccentricity curve

2 转子偏心对车用永磁同步电机振动噪声的影响

2.1 车用永磁同步电机模态分析

电磁噪声是电机振动噪声的主要来源,当作用于电机结构的径向电磁力波频率接近电机结构的相应阶次的固有频率时,将引发较大的电磁振动,从而可能辐射较大的电磁噪声。

电机转子偏心会导致径向电磁力波幅值增加并产生不平衡磁拉力,本文基于 ANSYS Workbench 仿真平台对本文车用永磁同步电机的 NVH 性能进行有限元仿真和分析。

首先对电机进行模态分析,当电机发生共振或接近共振点时,即使很小的电磁力也可能产生很大的电磁振动。避免电机产生共振现象需要同时考虑频率和振型问题,即所谓的“避频”和“避型”。

电机振动的主体是定子铁心,但电机结构各阶次模态的固有频率受定子绕组、机壳端盖及转子结构的质量和刚度分布影响,电机的安装固定方式和位置也对电机模态的固有频率产生影响。为准确分析电机的噪声特性,本文建立车用电机实际安装固定方式下的电机结构有限元模态仿真模型。

本文对电机结构模态仿真模型做如下等效与简化:

(1) 绕组端部结构复杂,提高仿真精度和网格剖分质量,将槽内绕组等效成实心导体,将绝缘层、空气以及绝缘纸等效成绝缘层。

(2) 在建模过程中忽略一些对结构刚度影响很小的螺栓孔、倒角等结构。

建立如图 7 所示的模态仿真模型,电机为前端盖固定方式。模态仿真的材料特性设置如表 2 所示。

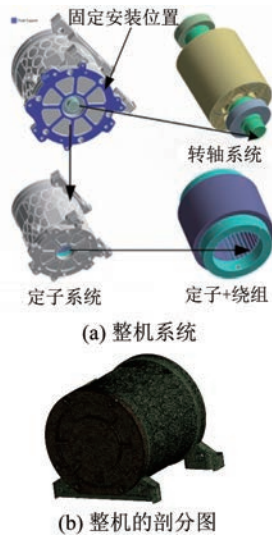


图 7 电机模态分析的有限元仿真模型

Fig. 7 Finite element simulation model for motor modal analysis

表 2 有限元电机模态分析的材料参数

Tab. 2 Material parameters for finite element modal analysis of electrical machines

结构	主要材料	弹性模量/Pa	泊松比
定、转子铁心	35WW250	$E_x = E_y = 2.06E+11$	0.3
		$E_z = 1.5E+11$	
永磁体	N40UH	$E = 1.6+11$	0.24
转轴、轴承	碳钢	$E = 2.12+11$	0.289
外壳	铝	$E = 7.0E+9$	0.33
等效导体	铜	$E_x = E_y = 9.5E+10$	0.3
		$E_z = 1.4E+10$	
等效绝缘层	云母、绝缘漆、空气	$E = 1.4E+8$	0.3

整机模态 FEM 分析结果如图 8 所示。1 000–6 000 Hz 是人耳最敏感的频率范围,模态仿真结果表明电机结构 2 阶和 4 阶振型的固有频率均在此范围内,是电磁噪声抑制最需要关注的阶次。

本文分别分析静偏心和动偏心时车用电机两个关键工况的电磁噪声。

2.2 动偏心对于电机 NVH 性能的影响

本文分析车用电机峰值功率时两个关键转速工作点的电磁噪声。已知电机正常运行时,10 倍频和 12 倍频噪声较大^[19]。

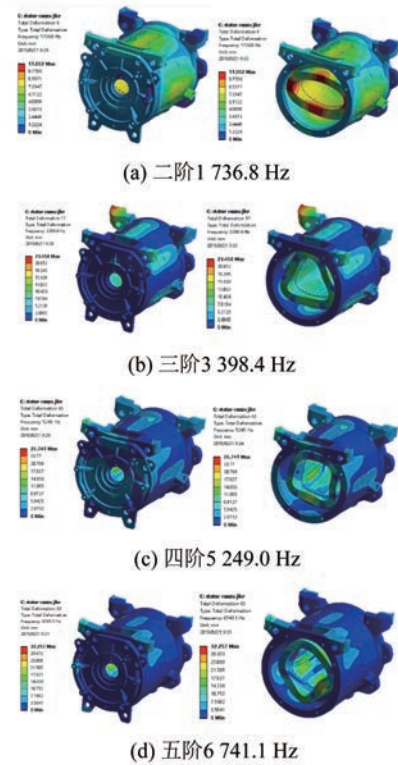


图 8 整机的模态振型图

Fig. 8 Modal shape diagram of the whole machine

本文样机峰值功率额定转速和峰值转速两工作点不同动偏心时电磁噪声的仿真结果如图 9 和图 10 所示。由图可知,12 倍频的电磁噪声幅值最大,其次是 10 倍频。电磁噪声的各频率分量幅值随动偏心的增大而增大,12 倍频和 10 倍频电磁噪声受动偏心的影响较小;低频电磁噪声分量受动偏心的影响较大,特别是 4 倍频和 6 倍频。此外,动偏心产生 1 倍频、3 倍频、5 倍频以及 7 倍频等边频噪声,即使偏心程度为 5% 时,边频电磁噪声分量的幅值也较大。

2.3 静偏心对于电机 NVH 性能的影响

图 11 和图 12 为本文样机不同静偏心时电磁噪声的仿真结果对比。由图可知,各频率分量的电磁噪声随静偏心的增大而增大,12 倍频和 10 倍频的电磁噪声仍是最大电磁噪声分量。12 倍频和 10 倍频电磁噪声虽然受静偏心影响而增大,但增大幅度确较小;相比动偏心,静偏心对电磁噪声的影响较小。

由表 3 和表 4 可得,车用永磁同步电机工作时,气隙存在偏心会严重影响电机的 NVH 性能,其中动偏心影响较大。

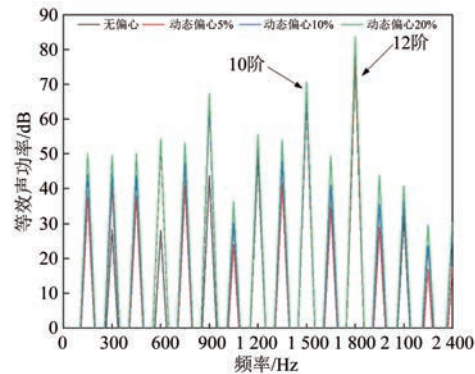


图 9 额定转速峰值功率工作点不同动偏心的电磁噪声
Fig. 9 Electromagnetic noise when the peak operating point of the rated speed is different from the moving eccentricity

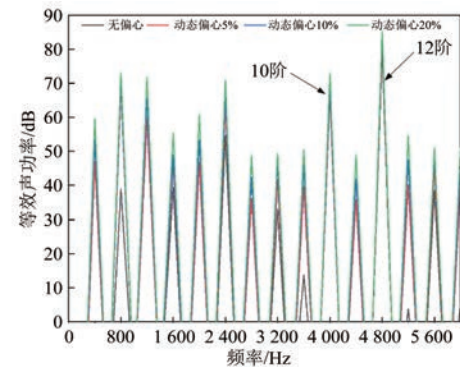


图 10 峰值转速峰值功率工作点不同动偏心的电磁噪声
Fig. 10 Electromagnetic noise when peak speed, peak power, and operating point are different from dynamic eccentricity

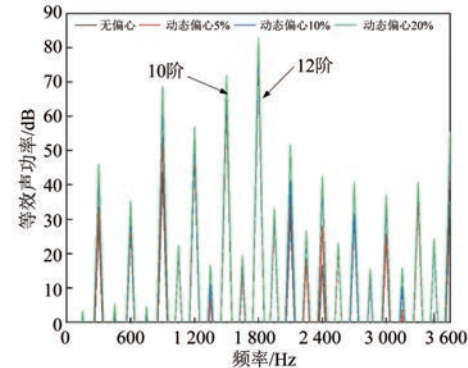


图 11 额定转速峰值功率工作点不同静偏心的电磁噪声
Fig. 11 Electromagnetic noise of different static eccentricity at rated speed peak power operating point

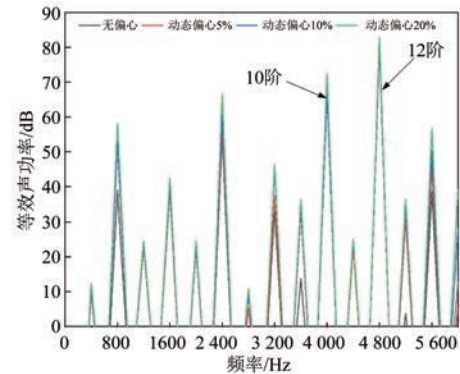


图 12 峰值转速峰值功率工作点不同静偏心的电磁噪声
Fig. 12 Electromagnetic noise of different static eccentricity at peak speed and peak power operating points

表 3 峰值工况时不同偏心下主要阶次等效声功率增长率对比

Tab. 3 Comparison of the growth rate of main order equivalent sound power under different eccentricity under peak operating conditions

频率阶次	2 阶	6 阶	10 阶	12 阶
无偏心/dB	38.89	54.75	66.94	79.94
动偏心 20%/dB	72.98	70.88	73.77	85.22
增长率/%	87.66	29.46	10.20	6.61
静偏心 20%/dB	58.10	66.455	72.41	82.93
增长率/%	49.40	21.38	8.17	3.74

表 4 额定工况时不同偏心下主要阶次等效声功率增长率对比

Tab. 4 Comparison of the growth rate of main order equivalent sound power under different eccentricity under rated operating conditions

频率阶次	2 阶	6 阶	10 阶	12 阶
无偏心/dB	28.33	43.66	65.27	76.56
动偏心 20%/dB	49.48	67.26	70.62	83.69
增长率/%	74.66	54.05	8.20	9.31
静偏心 20%/dB	45.90	65.67	69.79	82.84
增长率/%	62.02	50.41	6.92	8.20

3 试验验证

为减小电机气隙偏心导致的噪声问题,本文车用永磁同步电机进行了动平衡试验,电机转子的要求达到了国家标准 GB/T 9239.1-2006 中的 G2.5 平衡质量级别,即转子剩余不平衡量低于 15 g·mm。

测试满足国标要求的样机噪声特性,图 13 为试验样机。

为验证本文理论分析的正确性,在半消音室对本文样机进行噪声测试,测试现场图如图 14 所示。

测得样机噪声瀑布图如图 15 所示,由图 15 可知,样机 12 倍频(图 15(b)中 36 阶次)和 10 倍频(图 15(b)中 30 阶次)的噪声分量最大,与理论分析结果一致。结合理论分析可知,电机动静偏心会使样机的 12 倍频电磁噪声增大,但增加幅度不大,造成 12 倍频电磁噪声的主要原因是电磁设计参数的选取,可通过斜槽/斜极等方法削弱。由图 15(b)可知,噪声频谱中存在 1 倍频、3 倍频和 5 倍频等边频噪声。结合图 15(a)和理论分析可知,转子动偏心加剧了低频电磁噪声。

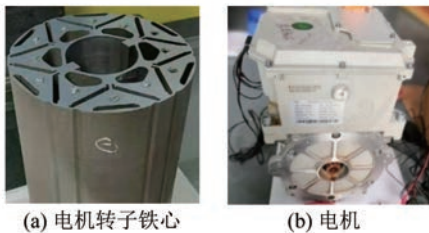


图 13 试验样机图

Fig. 13 Experimental prototype diagram

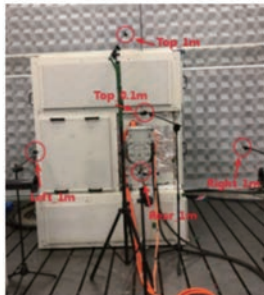


图 14 半消声室中电机噪声测试现场

Fig. 14 Motor noise test site in semi-anechoic chamber

4 结语

本文采用解析法与有限元法分析了一台 6 极 36 槽内置式车用永磁同步电机的动、静转子偏心对电磁噪声的影响,并通过半消音室中的噪声测试验证了理论分析的正确性,得出结论如下:

(1) 动偏心和静偏心会使永磁同步电机各频率分量的电磁噪声幅值增大,加剧电机的噪声问题。

(2) 相比静偏心,动偏心对永磁同步电机的电磁噪声影响更大,必须采取一定的电磁设计和

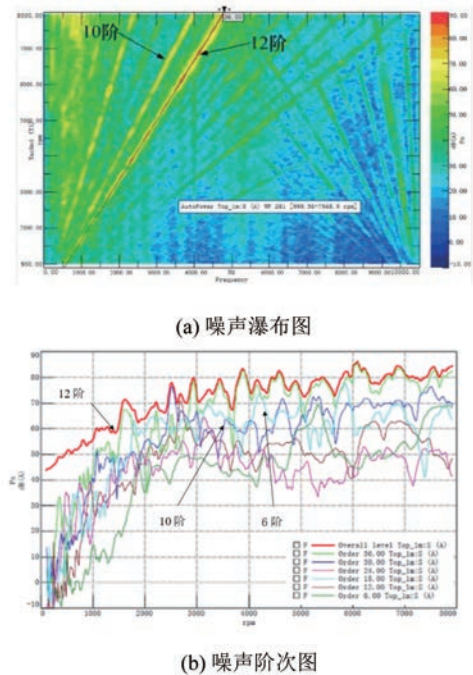


图 15 样机实测瀑布图和噪声阶次图

Fig. 15 Prototype measured waterfall diagram and noise order diagram

工艺措施加以改善。

(3) 气隙偏心对低频电磁噪声的影响较大,会出现由于单边磁拉力造成的边频电磁噪声分量,在偏心程度较大时会对电机的噪声产生较大影响。

参考文献

- [1] 谢哲. 转子偏心对小型感应电机振动特性影响分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2021.
XIE Z. Analysis of effect of rotor eccentricity on vibration characteristic in small induction Motor [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [2] LI J T, LIU Z J, NAY L H A. Effect of radial magnetic forces in permanent magnet motors with rotor eccentricity [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(6): 2525-2527.
- [3] 张冉, 王秀和, 杨玉波, 等. 基于等效剩磁法的永磁电动机转子偏心磁场解析计算[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 7-12.
ZHANG R, WANG X H, YANG Y B, et al. Analytical prediction of magnetic field in permanent magnet motors with rotor eccentricity based on the method of equivalent remanence [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 7-12.

- [4] TAKAHATA R, WAKUI S, MIYATA K, et al. Influences of rotor eccentricity on permanent magnet synchronous motor characteristics [C] // 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009.
- [5] NEGOIT A, SCUTARU G, PETER I, et al. Influence of rotor static eccentricity on the noise level of a single phase squirrel cage induction motor [C] // 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2012.
- [6] 左曙光, 高丽华, 吴旭东, 等. 电动车用永磁同步电机转子偏心对电磁力影响分析[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2014, 32(2): 166-170+175.
ZUO S G, GAO L H, WU X D, et al. The analysis of electromagnetic force in permanent magnet synchronous motors with rotor eccentricity in electric vehicles [J]. Journal of Jimusi University (Natural Science Edition), 2014, 32(2): 166-170+175.
- [7] 左曙光, 张耀丹, 刘晓璇, 等. 转子偏心对永磁同步电机振动噪声的影响分析[J]. 机电一体化, 2017, 23(6): 38-45+51.
ZUO S G, ZHANG Y D, LIU X X, et al. Analysis on the vibration and noise of permanent magnet synchronous motor with rotor eccentricity [J]. Mechatronics, 2017, 23(6): 38-45+51.
- [8] 李全峰, 黄厚佳, 黄苏融, 等. 表贴式永磁电机转子偏心故障快速诊断研究[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(12): 48-58+67.
LI Q F, HUANG H J, HUANG S R, et al. Research on fast diagnosis of rotor eccentricity fault for surface-mounted permanent magnet motor [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(12): 48-58+67.
- [9] 任杰, 王秀和, 赵文良, 等. 永磁同步电机转子偏心空载气隙磁场解析计算[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(8): 26-32.
REN J, WANG X H, ZHAO W L, et al. Open circuit magnetic field prediction in permanent magnet synchronous machine with rotor eccentricity [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(8): 26-32.
- [10] 张霄霆, 张炳义, 曹永鹏. 偏心状态下的轴向磁通永磁电机受力分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊 1): 110-116.
ZHANG X T, ZHANG B Y, CAO Y P. Force analyze of axial magnetic flux permanent magnet motor under eccentricity condition [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1): 110-116.
- [11] 戈宝军, 毛博, 林鹏, 等. 无刷双馈电机转子偏心对气隙磁场的影响[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 502-508.
GE B J, MAO B, LIN P, et al. Effect of rotor eccentricity fault on air gap magnetic field in brushless doubly-fed machine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 502-508.
- [12] 于占洋, 李岩, 井永腾, 等. 基于混合磁场解析法的磁极偏心型表贴式永磁同步电机空载特性分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(18): 3811-3820.
YU Z Y, LI Y, JING Y T, et al. No-load characteristic analysis of surface-mounted permanent magnet synchronous motor with non-concentric pole based on hybrid magnetic field analysis method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(18): 3811-3820.
- [13] 左曙光, 刘晓璇, 于明湖, 等. 永磁同步电机电磁振动数值预测与分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 159-167.
ZUO S G, LIU X X, YU M H, et al. Numerical prediction and analysis of electromagnetic vibration in permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 159-167.
- [14] 杨永喜, 蔡蔚, 赵慧超, 等. 新能源汽车高速电机定子换位绕组优化设计[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(10): 85-95.
YANG Y X, CAI W, ZHAO H C, et al. Design and optimization of the transported winding for the high-speed electrical machine of electric vehicles [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(10): 85-95.
- [15] 王宇. 某轿车车身 NVH 性能分析与研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
WANG Y. Analysis and research on NVH performance of a car body [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [16] 赵方伟, 王秀和, 赵文良, 等. 内置式永磁同步电机动态偏心故障下的轴电压解析分析和削弱[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 837-848.
ZHAO F W, WANG X H, ZHAO W L, et al. Analysis and reduction of shaft voltage in interior

- permanent magnet synchronous motors under dynamic eccentricity fault [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4): 837-848.
- [17] JIA S, QU R, LI J, et al. Analysis of FSCW SPM servo motor with static, dynamic and mixed eccentricity in aspects of radial force and vibration [C]//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014.
- [18] 张岩岩, 耿海鹏, 周健, 等. 永磁同步电机转子偏心磁场解析计算[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(2): 96-103.
- ZHANG Y Y, GENG H P, ZHOU J, et al. Analytical calculation for magnetic field of permanent magnet synchronous motors with rotor eccentricity [J]. Journal of XI'AN Jiaotong University, 2019, 53(2): 96-103.
- [19] 李阳, 王天宝, 王海燕, 等. 车用永磁同步电机的电磁噪声分析与抑制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(10): 86-94.
- LI Y, WANG T B, WANG H Y, et al. Analysis and suppression of electromagnetic noise of vehicle permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(10): 86-94.
-
- 收稿日期:2023-08-17
收到修改稿日期:2023-09-11
作者简介:
赵 哲(1997-),男,硕士研究生,研究方向为车用电机、高速电机的电磁分析以及多物理场分析,962314861@shu.edu.cn;
*通信作者:代 颖(1980-),女,博士,副教授,研究方向为电机的振动噪声、电动汽车牵引用电机设计等,ying.dai@shu.edu.cn。

Analysis of the Influence of Air Gap Eccentricity on the Noise Characteristics of Permanent Magnet Synchronous Motors for Vehicles

ZHAO Zhe¹, LIN Haoran¹, XIONG Duanfeng², DAI Ying^{1*}

(1. School of Electrical and Mechanical Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Hanzhao Inspection Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200435, China)

Key words: permanent magnet synchronous motor for vehicle; rotor eccentric; electromagnetic force; NVH performance

Rotor eccentricity fault is one of the common faults in motor operation. The eccentricity inside the motor is very complex. Due to factors such as machining errors and unbalanced excitation, the motor may experience rotor eccentricity. As shown in Fig.1, the most common eccentricity faults during motor operation are divided into static eccentricity, dynamic eccentricity, and mixed eccentricity, with dynamic eccentricity and static eccentricity being the two most important types.

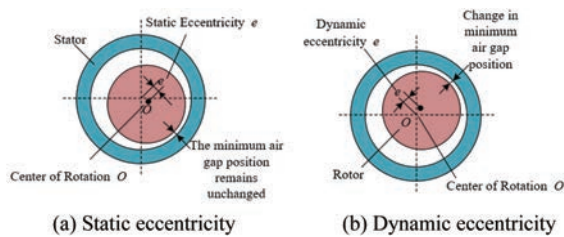


Fig. 1 Schematic diagram of rotor eccentricity

At present, the focus of literature research on the impact of eccentricity on electromagnetic force is on the analysis of the generated air gap and unbalanced magnetic pull. There is a lot of research on the eccentricity problem of asynchronous motors, but there is less research on the eccentricity problem of built-in permanent magnet synchronous motors and the impact of eccentricity on NVH performance.

At present, the research progress and depth in the field of new energy vehicle motors are increasing day by day, and people are increasingly choosing new energy vehicles. All aspects of motor performance need to be strictly controlled. In some extreme driving processes, the motor will be in peak power state for a period of time, so it is necessary to

analyze the NVH performance of the motor in peak power state. If the performance of the motor can meet the requirements under peak conditions, it can also meet the requirements under rated conditions.

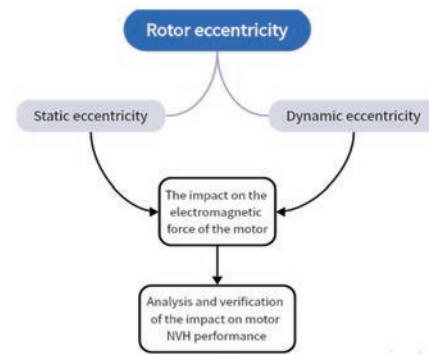


Fig. 2 Analysis flow chart

This article takes a 6-pole 36 slot rated power 35 kW permanent magnet synchronous motor for vehicles as the research object. The analysis process is roughly shown in Fig.2. The combination of analysis and finite element simulation is used to analyze the effects of rotor dynamic eccentricity and rotor static eccentricity on the electromagnetic force characteristics of the motor. A finite element simulation model is established of the motor and accurately analyzed the working mode of the automotive motor. Based on acoustic simulation analysis, the influence of different dynamic and static eccentricities on the frequency spectrum characteristics of electromagnetic noise at two key operating points of automotive motors is analyzed. The correctness of the theoretical analysis is verified through motor noise testing experiments in a semi anechoic chamber.