

基于 MATLAB 频谱分析的永磁电机噪声分析方法

张玉柱

(上海鑫国动力科技有限公司, 上海 201815)

摘要: 设计开发了一款 200 kW 新能源车用永磁同步磁阻电机。对样机进行测试, 发现在转子转速 2 600 r/min 时, 电机发出尖锐的电磁噪声。采用录音设备录制了电机运行噪声, 并用 MATLAB 软件对噪声进行了频谱分析, 通过对比电机相关零部件共振频率以及电机运行噪声频谱分析结果, 分析了可能发生共振的零部件, 并对该零件结构进行了优化设计。优化后电机运行时的电磁噪声下降到了合理范围, 验证了基于频谱分析的电机噪声声源分析的可行性和准确性。

关键词: 频谱分析; 永磁同步电机; 新能源汽车; 共振频率; 噪声

中图分类号: TM 301.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)02-0095-06

Noise Research Method of Permanent Magnet Synchronous Motor with Spectrum Analysis Based on MATLAB

ZHANG Yuzhu

(Shanghai Xinguo Power Technology Co., Ltd., Shanghai 201815, China)

Abstract: A 200 kW permanent magnet synchronous reluctance motor was designed. However, it was found that the prototype motor made noises when the rotor speed was close to 2 600 r/min. An easier analysis method of the motor's noise was proposed. The noises of the motor were analyzed by the MATLAB software. The resonance frequencies of the components of the motor were analyzed using the finite element analysis method. The noise source of the motor was confirmed by comparing the motor noise spectrum with the analyzed resonance frequencies. According to the experimental result, the noise of the motor was visibly reduced after optimal design.

Key words: spectrum analysis; permanent magnet synchronous motor (PMSM); new energy vehicle; resonance frequency; noise

0 引言

雾霾已经成为全球范围内城市生活水平的重要影响因素, 其中最重要的因素之一就是汽车尾气排放^[1-2]。为了节约能源、降低污染, 全世界范围内正在积极推进新能源汽车的发展, 高效、高功率密度、低成本的电动机驱动系统成为了研究热点。

永磁同步磁阻电机属于内嵌式永磁同步电机的一种, 输出转矩由永磁转矩和磁阻转矩构成, 高速运行时, 磁阻转矩占比一般超过 50%。该电机结合了永磁同步电机和开关磁阻电机的优点, 运

行效率和功率因数较高、调速范围较宽, 在新能源汽车领域得到了广泛应用^[3]。

由于纯电动汽车没有发动机的背景噪声, 电机的运行噪声是纯电动汽车噪声的主要来源。较高的磁阻转矩占比提高了永磁同步磁阻电机的调速和转矩范围, 但同时也带来了不利因素, 例如在高负载和高速运行区间, 电机输出转矩波动较大, 带来了较大的振动和噪声污染, 影响了整车舒适性, 甚至降低整车性能^[4]。

根据产生机理, 电机噪声主要可以分为 3 类: (1) 电磁噪声。这类噪声由电磁力作用在定转子上产生的旋转力波或脉动力波引起, 最终引起定

转子振动,如果结构件共振频率与振动频率接近,将引起更为严重的共振^[5-7]。(2)机械噪声。电机中的机械噪声主要由轴承和电刷引起,与材料、加工精度和装配工艺密切相关。(3)空气噪声。对于敞开式电机,转子高速运行时风扇选型不当、进出风口设计不合理时容易引起较大的空气噪声,对于无风扇的密闭式电机而言,空气噪声基本可以忽略^[8]。

国内外对电机噪声的研究主要从电机转子转动不平衡、轴承噪声、气隙径向力波和谐波分析、电机模态分析及谐响应分析以及电机的减振降噪措施等几个方面展开。1981年,英国学者 Yang^[9]首次指出了电机定转子极槽配合对噪声声源的影响,提出了电机径向电磁力波对电机噪声的影响,特别是当径向电磁力波的某些波段频率接近电机零部件固有频率时,电机会因共振产生强烈的噪声。国内对电机噪声的研究起步较晚。1987年,浙江大学陈永校等^[10]详细研究了电机噪声机理及其控制方法,提出了降低电机噪声的一般措施,并且强调降低电机噪声没有统一的标准,需要根据具体情况而定。

本文设计研发了一款峰值功率为 200 kW 的永磁同步磁阻电机,试验测试发现,电机在 2 600 r/min 运行时有明显啸叫声。使用 MATLAB 软件对录制的噪声进行频谱分析,并将分析结果与主要结构件的共振频率进行对比,确定了发声共振的主要结构件,通过结构优化设计,改变了其固有频率,以期降低电机噪声。试验结果表明,优化设计后电机运行时啸叫声明显减小。

1 电机模型及试验测试

1.1 电机拓扑结构

所设计的电机采用 12 极 72 槽结构,机壳冷却方式为水冷。定转子有限元仿真模型如图 1 所示。电机主要设计参数如表 1 所示。

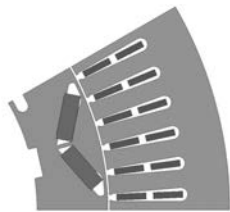


图1 定转子有限元仿真模型

表1 电机主要设计参数

参数名称	参数值
峰值功率/kW	200
峰值转速/(r·min ⁻¹)	3 000
峰值转矩/(N·m)	3 000
额定电压 DC/V	575
额定功率/kW	100
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000
额定转矩/(N·m)	955
峰值电流/A	950

1.2 仿真结果

电机采用转子分段斜极的方式来降低自定位转矩。仿真过程中根据转子位置建立不同的两个仿真模型,在相同定子电流作用下,对电机的输出转矩、铁耗、感应反电动势等仿真结果取平均值,从而得出模型最终仿真结果。

1.2.1 空载反电动势及傅里叶分析

分析电机转速为 500 r/min 时电机的反电动势波形,如图 2 所示。转子采用分段 V 型斜极方式,共 4 段,其中 1、4 段转子方向一致;2、3 段转子方向一致;1、4 段和 2、3 段转子之间相互错开 2.5°机械角。相对于中心位置,1、4 段转子正向旋转 1.25°,2、3 段转子反向旋转 1.25°。电机反电动势谐波含量仅为 5.6%。

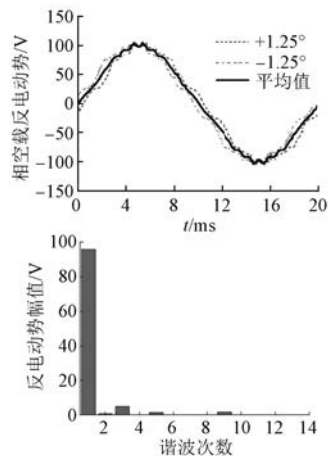


图2 电机相反电动势波形及傅里叶分析

1.2.2 齿槽转矩

齿槽转矩波形如图 3 所示。

转子分段斜极后,理论上电机齿槽转矩幅值仅为 3.5 mN·m。

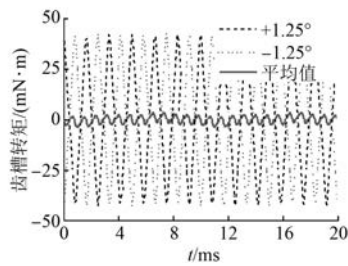


图3 齿槽转矩波形

1. 2. 3 气隙磁场

当转子磁极中心线与定子齿中心线对齐时,分析永磁磁场作用下,一对磁极范围内气隙中径向磁密波形,如图4所示。

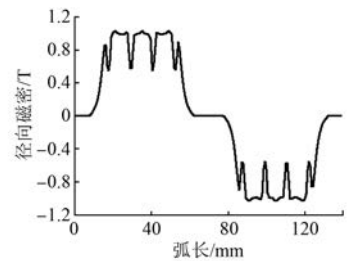


图4 电机气隙磁密波形

傅里叶分析结果表明,气隙磁场空间谐波成分主要为3次和5次谐波,且谐波含量达到26.3%。

1. 2. 4 外特性曲线

通过调节励磁电流降低电机感应反电动势大小,保证各个负载工况下,电机线感应反电动势的幅值低于电机有效输入电压,从而得出不同转速时电机的最大负载能力,即电机的外特性曲线,如图5所示。

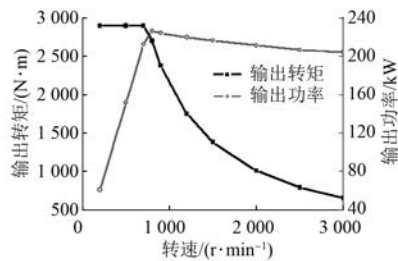


图5 电机外特性曲线

1. 3 实物样机及性能测试

所加工样机如图6所示。样机机壳为水冷机壳,采用旋转变压器反馈转子位置信息。



图6 实物样机

样机性能测试系统实物如图7所示。系统由直流电源柜供电。驱动控制器根据给定转矩、电机转速、直流电压等输出直轴和交轴控制电流,控制电机正常运行,拖动另外1台电机发电运行,输出电压回馈到电网。



图7 样机测试系统

电机空载性能测试结果如表2所示。

表2 电机空载性能测试			
参数名称	参数值	参数名称	参数值
仿真线反电动势幅值/ V(1 000 r/min)	344	仿真齿槽转矩/ (N·m)	0.004
实测线反电动势幅值/ V(1 000 r/min)	346	实测齿槽转矩/ (N·m)	0.58

由于软件计算忽略了装配公差、实际工艺(包括偏心和轴向位移、定子齿槽加工精度、冲片工艺等)和轴承等问题,一般仿真会比实际小很多。通过测试,可得电机的外特性曲线以及效率云图,如图8所示。电机整体运行效率较高,效率超过92%的区域面积超过85%。

1. 4 电机噪声

测试过程中发现转子转速为2 600 r/min时,电机发出尖锐啸叫声,且噪声随着负载增大而增大。用分贝仪在距电机中心点1 mm处测得电机噪声从78 dB逐步增加到92 dB(生产车间背景噪声42 dB)。在其他转速范围段运行时,电机运行声音正常。噪声耳感发声位置如图9所示。

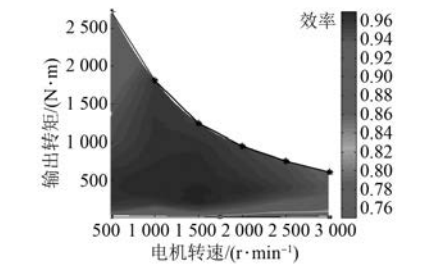


图 8 电机效率云图及外特性曲线



图 9 噪声耳感发声位置

使用录音设备录制电机转速 2 600 r/min, 负载为 500 N·m 时的噪声, 并使用 MATLAB 软件对该录音文件进行频谱分析, 可得录音文件的 FFT 分析结果, 如图 10 所示。

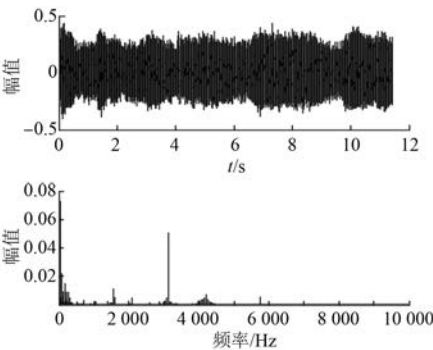


图 10 电机噪声音频及 FFT 分析

采用数值滤波方法对不同频段噪声进行滤波, 并还原噪声, 发现: 低频噪声主要为台架振动频率, 而啸叫声主要为高频段噪声, 且频率为 3 120 Hz。用 3 100~3 150 Hz 的带阻滤波器对原信号进行滤波处理后, 电机啸叫声消失。

2 电机噪声声源确认

2.1 径向电磁力波分析

永磁电机气隙中, 存在随时间和空间变化的

电磁力。现有的电机电磁噪声研究理论认为: 使定子铁心产生振动变形的径向电磁力分量是电机电磁噪声的主要来源, 解析表达式如式 (1) 所示^[11], 而使齿根部产生弯曲变形的切向电磁力分量是电磁噪声的次要来源^[12]。

$$p_n(\theta,t)=\frac{1}{2\mu_0}\left\{\frac{B_0^2}{2}\cos(2p\theta-2\omega_0t-2\varphi_0)+\sum_v\sum_{\mu}\sum_lB_vB_{\mu}\cos\left[(\pm lz+\mu\pm v)\theta-\left(\frac{\mu}{p}\pm1\right)\omega_0t-\varphi_{\mu}\varphi_v\right]\right\}$$

式中: μ_0 ——真空磁导率;
 B_0 、 B_v 、 B_{μ} ——基波、 v 次、 μ 次磁感应强度;
 p ——基波极对数;
 ω_0 ——基波转子角速度;
 φ_0 、 φ_v 、 φ_{μ} ——基波、 v 次、 μ 次电流电压相角;
 v ——定子磁场谐波次数, 每极每相槽数为整数时, $v=(6k_1+1)p, k_1=\pm1, \pm2, \pm3, \cdots$;
 μ ——转子磁场谐波次数, $\mu=(2k_2+1)p, k_2=0, 1, 2, 3, \cdots$ 。

12 极 72 槽电机电磁力谐波分析如表 3 所示。

表 3 中, u 为转子磁场谐波的极对数, z 为定子槽数, l 为正整数, $l=1, 2, 3, \cdots$ 。

表 3 12 极 72 槽电机电磁力谐波分析							
μ	$\mu+lz$	v					
		42	-30	78	-66	114	-102
6	78	120	48	156	12	192	-24
18	90	132	60	168	24	204	-12
μ	$\mu-lz$	v					
		42	-30	78	-66	114	-102
6	-66	-24	-96	12	-132	48	-168
18	-54	-12	-84	24	-120	60	-156
μ	$\mu+lz$	$-v$					
		42	-30	78	-66	114	-102
6	78	36	108	0	144	-36	180
18	90	48	120	12	156	-24	192
μ	$\mu-lz$	$-v$					
		42	-30	78	-66	114	-102
6	-66	-108	-36	-144	0	-180	36
18	-54	-96	-24	-132	12	-168	48

由于电磁力引起的振动和噪声与力波的幅值和频率有关,定子铁心变形量与力波幅值成正比,与力波次数的4次方成反比,因此力波次数大于4时引起的振动和噪声可以忽略不计。表3中主要考虑0阶力波,其中0阶力波产生的电磁力频率为2倍电主频率。当电机运行转速为2 600 r/min时,电主频率为260 Hz,0阶力波频率为520 Hz,与电机噪声频率不符,因此排除了定子受径向力波作用而引起的电磁噪声。

受电机定转子齿槽的影响,电机齿谐波噪声频率的表达式为

$$f=iQn/60 \tag{2}$$

式中： i ——齿谐波次数；

Q ——齿槽数；

n ——转速。

当 $i=1$ 时,齿谐波噪声频率为3 120 Hz。因此,电机齿谐波是引起电机噪声的一个主要原因。

2.2 切向电磁力波分析

切向电磁力波即为电机输出力矩。该电机输出转矩脉动频率为电机电主频率的12倍,例如:电机2 600 r/min、380 N·m输出转矩工况下,转矩仿真波形如图11所示,一个电周期内有12个转矩波动,转矩波动频率为电频率的12倍,且转矩波动幅值较大。

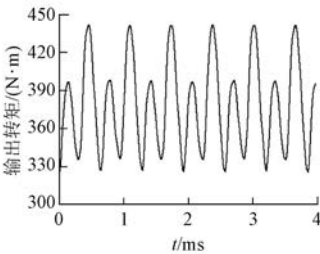


图 11 2 600 r/min、380 N·m 负载电机仿真转矩波形

因此,径向电磁力波是本电机产生电磁噪声的另外一个主要原因。

2.3 零部件共振模态分析

电机产生较大电磁噪声需要两个因素同时具备:一是有较大幅度的振动激励;二是电机内有零部件的固有频率与振动激励频率一致,产生共振。

使用 ANSYS 对电机主要零部件进行模态分析,边界条件设置如下:轴的轴承档在沿轴向旋转方向自由,其他方向静止,其他零件为自由状态。

根据模态分析结果,固有频率为2 500~4 000 Hz的零件如表4所示。

各零部件在表4所示固有频率时的振动模态如图12所示。图12中所示为轴在共振频率下的模态,颜色越浅,形变位移量越高。

表 4 固有频率在 3 000 Hz 附近的零件列表

零件名称	固有频率/Hz
轴	3 010
前轴承盖板	3 759
前端盖	3 341
后端盖	3 785

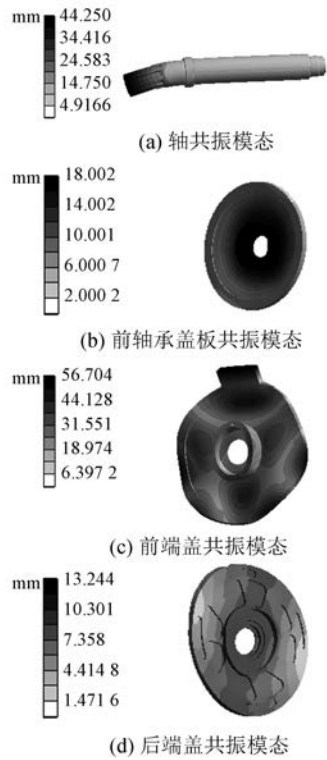


图 12 各零件振动模态

由于仿真时边界条件与实物安装固定时的边界条件存在差异,仿真得到的各零件固有频率与实际固有频率存在偏差。

从上述零件固有频率分析可得:(1)轴伸存在弯曲振动模态,容易引起负载机械异响,严重时影响轴承寿命;(2)前轴承盖板内孔存在振动,可能引起空气啸叫声;(3)前后端盖存在弯曲振动,容易引起共振噪声。

综上所述,初步判定电机噪声由前轴承盖板、前端盖和后端盖固有频率与电机振动频率一致,

产生共振而引起。

3 电机结构优化设计

3.1 前轴承盖板

样机取消前轴承盖板重新装配后,发现电机在 2 600 r/min 运行时仍然存在啸叫声,因此排除该零件发生共振的可能性。

3.2 前后端盖

将前后端盖容易发生共振的部位进行结构修改,措施包括:(1)将前后端盖轴承室外圆减小,使电机轴承室壁厚变薄;(2)在后端盖发生弯曲振动的部位钻 12 个直径为 20 mm 的圆孔。修改前后前端盖实物图片对比如图 13 所示。

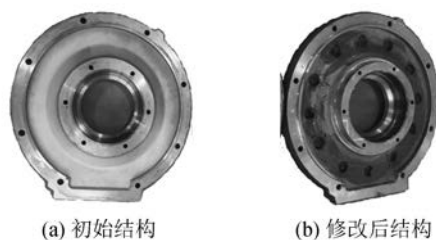


图 13 前端盖修改实物图

3.3 噪声测试

进行上述优化设计后,重新组装电机,并测试不同转速、负载工况下电机噪声。

测试结果表明:全负载范围内,电机运行噪声较小,在 2 600 r/min 时仍然存在轻微的啸叫声,使用分贝仪测量电机运行时最大噪声仅为 79 dB,对比图 10 中,2 600 r/min、500 N·m 负载工况,电机噪声频谱分析结果如图 14 所示,3 120 Hz 附近电磁噪声幅值从最初的 0.05 下降到 0.02,电机啸

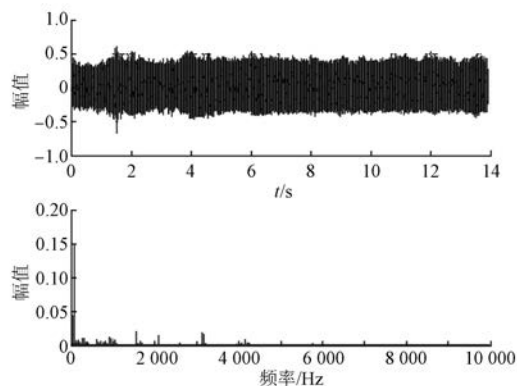


图 14 电机结构优化后 2 600 r/min 峰值功率运行时电机噪声频谱分析

叫声得到了有效抑制,满足了设计要求。

4 结 语

本文设计开发了一款新能源车用 200 kW 永磁同步磁阻电机,通过样机测试发现电机在 2 600 r/min 运行时存在尖锐啸叫声。通过电机定转子之间径向、切向电磁力波分析和零部件共振模态分析,判断电机噪声由齿谐波及电机转矩波动共同激励,引起电机前后端盖以及前轴承盖板发生共振所致。优化设计各零件结构,改变其固有频率后,电机在全工况下均无明显啸叫声,满足电机设计噪声要求。本文验证了基于 MATLAB 频谱分析对电机噪声进行分析的方法的准确性。

【参考文献】

- [1] 张军英,王兴峰.雾霾的产生机理及防治对策措施研究[J].环境科学与管理,2013,38(10): 157.
- [2] 温旭辉.电动汽车电机驱动技术现状与发展综述[J].电力电子,2013,11(2): 5.
- [3] 沈建新,蔡顺,郝鹤,等.同步磁阻电机分析与设计(连载之十二)永磁辅助同步磁阻电机的设计研究[J].微电机,2017,50(3): 79.
- [4] 张承宁,王再宙,宋强.基于传声器阵列电动汽车用电机系统噪声源识别研究[J].中国电机工程学报,2008,28(30): 109.
- [5] 邢正坤,胡龙.爪极电机电磁噪声特征研究与分析[J].微特电机,2016,44(7): 17.
- [6] 郑江,代颖,石坚.车用永磁同步电机的电磁噪声特性[J].电工技术学报,2016,31(增刊1): 53.
- [7] 于洋,苑利维,魏思维,等.大功率永磁同步电机的减振降噪控制方法研究[J].电机与控制应用,2017,44(1): 77.
- [8] 王再宙,宋强,张承宁.电动汽车用电机噪声分析和降噪方法初探[J].微电机,2006,39(7): 62.
- [9] YANG S J. Low-Noise Electrical Motors[M]. Oxford: Oxford University Press, 1981.
- [10] 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.
- [11] ZHU Z Q, HOVE D. Electromagnetic noise radiated by brushless permanent magnet DC drives [C] // Proceedings of the Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives, 1993: 606.
- [12] 伍先俊,李志明.汽车电机噪声机理和降噪方法[J].微特电机,2003,31(1): 14.

收稿日期: 2018-12-05