

高速异步电主轴电机的电磁噪声分析

孙 雪, 代 颖, 赵剑飞, 郑 江

(上海大学 机电工程及自动化学院, 上海 200072)

摘 要: 采用有限元法分析了高速异步电主轴电机定子结构的动力学特性(振型、固有频率), 分别采用解析法和有限元法分析了电机在额定转速60 000 r/min 下空载和负载的电磁力波, 利用傅里叶变换对径向气隙磁密和径向电磁力波进行了谐波分析, 得到了不同阶次不同频率下的谐波幅值。还将得到的电磁力波加载到电机定子相应节点处, 对高速异步电主轴电机进行了电磁振动和声场分析, 并计算出电机在空载和负载情况下产生的电磁噪声。

关键词: 电磁噪声; 电磁力; 模态; 振动; 异步电主轴电机

中图分类号: TM 301.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)12-0066-08

Analysis on Electromagnetic Noise of High Speed Induction Spindle Motor

SUN Xue, DAI Yin, ZHAO Jianfei, ZHENG Jiang

(School of Mechanical and Electronic Engineering and Automation, Shanghai University,
Shanghai 200072, China)

Abstract: The finite element method was used to analyze the dynamic characteristics (such as shapes, natural frequencies) of the stator structure of high speed induction motor. The analytical method and the finite element method were used to analyze the electromagnetic force wave of the motor under the rated speed 60 000 r/min. Harmonics of radial air gap flux density and radial electromagnetic force wave were analyzed by Fourier transform. And the harmonic amplitudes at different frequencies were obtained. The electromagnetic force wave were added to the corresponding node of the motor stator. Electromagnetic vibration and sound field of high speed induction spindle motor were analyzed. The electromagnetic noise of the motor under no-load and load conditions was calculated.

Key words: electromagnetic noise; electromagnetic force; modal; vibration; induction spindle motor

0 引 言

异步型电主轴电机具有结构紧凑、重量轻、振动小、噪声低、响应快等优点, 能够简化机床设计, 易于实现主轴定位, 具有较高的运行效率和较好的工作特性, 从空载到满载范围内接近恒速运行, 能够满足大多数生产机械的传动要求, 目前已广泛应用于电主轴单元中^[1-5]。电磁振动和噪声是评价一台电主轴电机性能的重要指标。在电主轴运行的过程中, 气隙中存在着基波磁场和许多谐波磁场, 会产生作用在定子铁心上的径向电磁力,

使其发生振动进而给电主轴带来电磁噪声^[6-7]。

本文以 24 s/20 槽的高速异步电主轴电机为研究对象, 以 ANSYS 有限元仿真软件为平台, 分析电机定子结构的固有频率、空载和负载下的二维瞬态磁场分布以及电磁振动和噪声。首先建立电机定子结构的三维模型, 仿真电机定子结构的各阶模态固有频率; 然后分别用解析法和有限元法进行电磁分析, 通过有限元仿真获取气隙磁密的时空分布, 采用傅里叶变换对其进行谐波分析, 根据麦克斯韦方程得到定子齿尖节点的径向电磁力, 同样采用傅里叶变换

作者简介: 孙 雪(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电机与电器。

代 颖(1980—), 女, 博士后, 研究方向为电机的振动噪声, 车用电机的设计分析, 同步发电机的瞬态分析, 电机的多物理场分析。

对其进行谐波分析,得到不同阶次不同频率下的电磁力波幅值;最后进行频域分析,将仿真获得的电磁力波作为激励源加载到定子齿尖相应位置,进行三维谐波响应分析和声场仿真,得到空载和负载下电机的电磁噪声声场分布云图,并计算该电机产生的电磁噪声。

1 电机定子结构模态分析

模态分析是结构运动学的分析基础,是电机振动噪声研究过程中必不可少的环节。有限元模态分析可以考虑电机结构的不规则形状,计算精度高,通过合理的网格剖分可以准确地分析复杂机械结构的模态特性^[8-12]。因此,本文通过有限元法建立高速异步电主轴电机定子结构的 3D 模型,对定子结构进行有限元模态分析。

1.1 定子结构有限元模型的建立

建立定子铁心的 3D 模态有限元仿真模型,弹性模量 205 GPa,泊松比 0.27,密度 7 305 kg/m³。

如图 1 所示为定子结构有限元仿真模型和网格剖分图。

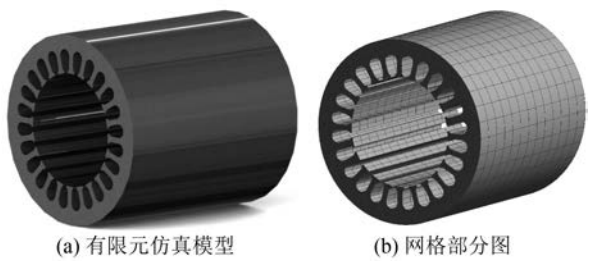


图 1 定子铁心有限元仿真模型和网格剖分图

1.2 定子结构有限元分析结果

表 1 为定子铁心固有频率的仿真结果。如图 2 所示为定子结构各阶次的模态振型。电机定子铁心的 2 阶固有频率较低,容易引发较大的电磁振动。

表 1 定子铁心有限元仿真结果					
振型阶次	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
频率/Hz	4 049.6	10 674	18 402	24 999	28 537

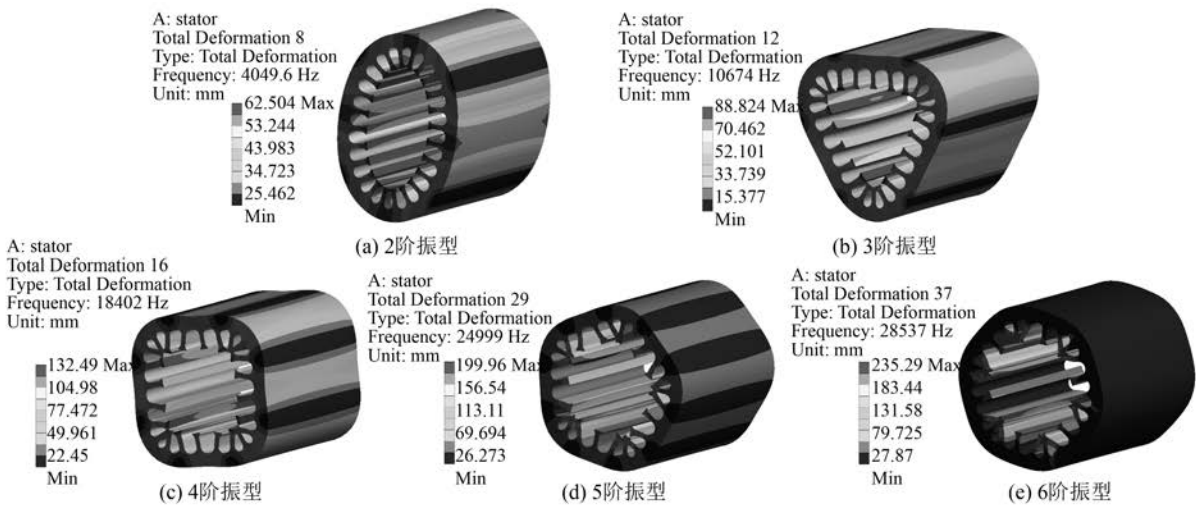


图 2 定子铁心有限元仿真模型和网格剖分图

2 高速异步电主轴电机电磁力波分析

在电机中,主磁通大致上沿径向进入气隙,定、转子的基波和各次谐波磁场相互作用产生随时间和空间变化的径向电磁力波,从而引起电磁振动和噪声。

2.1 电磁力波解析法分析

根据电磁理论,可得定子各次磁动势谐波幅

值,见式(1):

$$F_{1v} = \frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi v p} N_1 k_{Nv} I_1$$

(1)

式中: m_1 ——电机的相数;
 v ——谐波的次数;
 p ——电机的极对数;
 N_1 ——每相串联线圈匝数;
 k_{Nv} —— v 次谐波的绕组系数;

I_1 ——定子电流有效值。

定子磁动势中主要存在的谐波次数见式(2):

$$v = (2k_1 m_1 + 1)p, k_1 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

其中:“+”号表示旋转方向和基波相同,“-”号表示旋转方向与基波相反, $k_1=0$ 时为基波。

齿谐波是分析电磁噪声的研究重点,齿谐波由于其绕组系数与基波的绕组系数相同而不能通过短距绕组的方式削弱,所以谐波磁密的幅值较大。它的谐波次数见式(3):

$$v_1 = k_1 Z_1 + p, k_1 = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

当 k_1 为1时所对应的齿谐波为1阶齿谐波,是使异步电机产生较大电磁噪声的主要来源。

同理可得转子各次谐波所引起的磁动势的幅值,见式(4):

$$F_{2\mu} = \frac{m_2 \sqrt{2}}{\pi \mu p} N_2 k_{N\mu} I_2 \quad (4)$$

其中: m_2 为鼠笼转子的相数,与槽数 Z_2 相等;转子每相串联导体数 N_2 为 $\frac{1}{2}$;各相绕组的绕组系数 $k_{N\mu}$ 为1。

由于转子的相数多,转子磁动势中主要存在的是齿谐波,其谐波次数见式(5):

$$\mu = k_2 Z_2 + p, k_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5)$$

式中: Z_2 ——转子槽数, $k_2=0$ 时为基波。

将定转子磁动势相加则得到气隙合成磁动势,见式(6):

$$F_0(\theta, t) = F_1(\theta, t) + F_2(\theta, t) \quad (6)$$

式中: θ ——空间角度;

t ——时间。

通过气隙合成磁动势与气隙磁导相乘,就可以得到电机的气隙磁通密度沿圆周的分布,见式(7):

$$b(\theta, t) = F(\theta, t) \Lambda(\theta, t) \quad (7)$$

根据麦克斯韦应力张量法,可以得到作用于电机气隙中单位面积上的径向电磁力,见式(8):

$$p_r(\theta, t) = \frac{1}{2\mu_0} [b^2(\theta, t) - b_t^2(\theta, t)] \quad (8)$$

式中: $b(\theta, t)$ ——径向气隙磁密;

$b_t(\theta, t)$ ——切向气隙磁密;

μ_0 ——真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

由于铁心内的磁导率远大于气隙内的磁导率,磁通线几乎垂直于定子和转子铁心,因此气隙磁密的切向分量可以忽略不计。式(8)可简化为:

$$p_r(\theta, t) \approx \frac{b^2(\theta, t)}{2\mu_0} =$$

$$\frac{1}{2\mu_0} [F_1(\theta, t) + F_2(\theta, t)] 2\Lambda^2(\theta, t) = \frac{1}{2\mu_0} [b_1^2(\theta, t) + 2b_1(\theta, t)b_2(\theta, t) + b_2^2(\theta, t)] \quad (9)$$

式中: $b_1(\theta, t)$ ——定子磁场产生的气隙磁密;

$b_2(\theta, t)$ ——转子磁场产生的气隙磁密。

由式(9)可知,径向电磁力波可以分为三种类型,其角频率和阶次如下:

(1) 定子磁场 v 次谐波产生的电磁力波:

$$\omega_r = 2\omega; \quad f_r = 2f; \quad r = 2v \quad (10)$$

(2) 定子磁场 v 次谐波和转子磁场 μ 次谐波相互作用产生的电磁力波:

$$\omega_r = \omega \pm \omega_\mu;$$

$$f_r = f \pm f_\mu = \begin{cases} f k_2 \frac{Z_2}{p} (1-s) \\ f \left[k_2 \frac{Z_2}{p} (1-s) \pm 2 \right] \end{cases};$$

$$r = v \pm \mu \quad (11)$$

(3) 转子磁场 μ 次谐波产生的电磁力波:

$$\omega_r = 2\omega_\mu; \quad f_r = 2f_\mu = 2f \left[1 \pm k_2 \frac{Z_2}{p} (1-s) \right];$$

$$r = 2\mu \quad (12)$$

式中: r ——径向电磁力波的阶数;

f_r ——径向电磁力波的频率;

f ——基波频率;

ω_μ ——转子角速度。

本文中高速异步电主轴电机为24/20槽2极电机,其额定转速为60 000 r/min,根据式(2)、式(5)、式(10)、式(11)和式(12),可以得到各阶次的电磁力波。表2为定子谐波产生的电磁力和转子谐波产生的电磁力。表3为定子谐波与转子谐波相互作用产生的电磁力,其中标注下划线的谐波为齿谐波。

由表2、表3可知,在该24/20槽异步电机中产生了大量2、4、6次的电磁力波,它们都在2f、18f、20f、22f频率处有分布,最高频率为22 000 Hz。通过对比模态仿真结果可知,2、4次电磁力波的最高频率均超过了2阶、4阶模态频率,而6次电磁力波的最高频率低于并远离于电机结构的6阶模态频

率,且 6 阶模态频率超出人耳听觉范围,因此该电机产生的 2、4 次电磁力波将在电机运行时发生电磁共振,从而产生噪声。

表 2 定子/转子产生的电磁力

定子谐波产生的电磁力	2	-10	14
转子谐波产生的电磁力	2	-38	42

表 3 定子谐波和转子谐波相互作用产生的电磁力

转子谐波	定子谐波								
	1	-5	7	-11	13	-17	19	-23	25
1	2	-4/-6	6						
-19					-6	-2		-4	6
21					4	2	-2	4	
-39									
41									

2.2 电磁力波有限元分析

基于 ANSYS 多物理仿真软件平台,分析电机 60 000 r/min 空载和负载工况下的电磁力波。如图 3 所示为高速异步电主轴电机的电磁场分析模型。

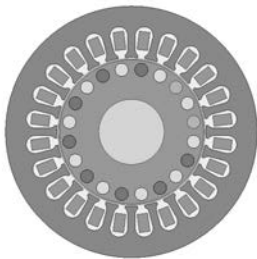
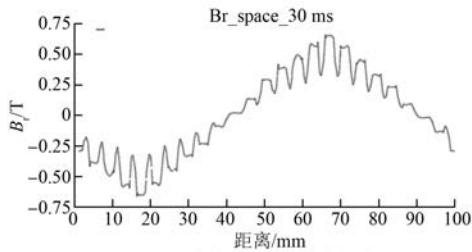


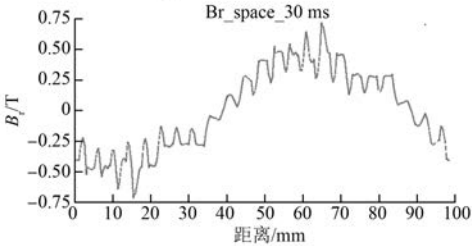
图 3 异步电机电磁场有限元分析模型

首先,对该电机 60 000 r/min 时空载和负载工作点的气隙磁通密度进行对比。如图 4 所示为电机空载和负载时空间分布的径向气隙磁密波形。如图 5 所示为电机空载和负载时径向气隙磁密的谐波对比。通过对比可以发现,径向气隙磁密中含有丰富的谐波,其中 23、25 次谐波幅值较大,这是由 1 阶定子齿谐波产生的。负载工作点相对于空载工作点,其基波和 1 阶齿谐波幅值减小,其余各次谐波幅值均增大,容易产生较大的电磁力波。

高速异步电主轴电机的气隙磁密会随着时间和空间的变化而发生改变。对气隙磁密的时空分布进行了 2D FFT,如图 6 所示。通过对比空载和



(a) 空载径向气隙磁密波形



(b) 负载径向气隙磁密波形

图 4 异步电机 60 000 r/min 时径向气隙磁密波形

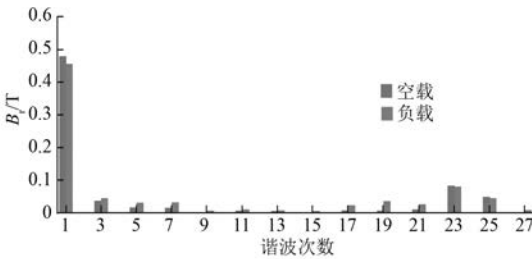
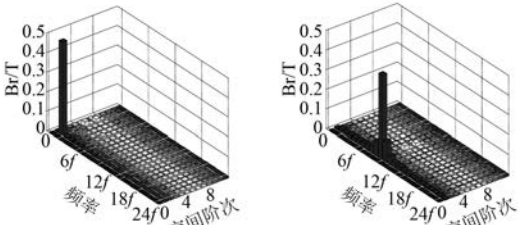


图 5 异步电机 60 000 r/min 时径向气隙磁密谐波对比

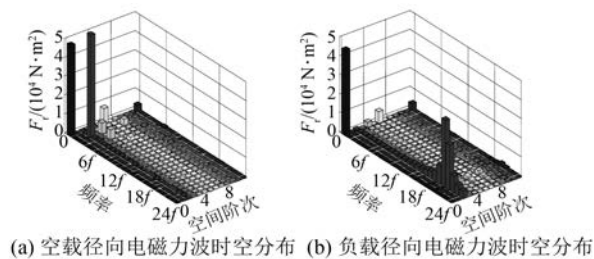
负载时的 2D FFT 结果可以发现,负载时径向气隙磁密的谐波分量增多,且谐波幅值较大。



(a) 空载径向气隙磁密时空分布 (b) 负载径向气隙磁密时空分布

图 6 异步电机 60 000 r/min 时径向气隙磁密时空 2D FFT 分析结果

根据式(9),通过导出的气隙磁密的时空分布数据,计算得到作用于电机定子结构的电磁力波时空分布,如图 7 所示。通过径向电磁力波的 2D FFT 分析结果可以发现,空间阶次为 0、2、4、6、8 次时,电磁力波的谐波幅值较大,尤其是 0 阶和 2 阶电磁力波。其中 0 阶电磁力波主要分布在 0 倍频处,空载时的 2 阶电磁力波主要分布在 2 倍



频处,而负载时的 2 阶电磁力波主要分布在 20 倍频处。该结果与电磁力波解析法分析结果一致。2 阶、4 阶电磁力波的分布、幅值都因负载发生了较大变化。

3 高速异步电主轴电机电磁噪声特性分析

电机的定转子磁场相互作用产生径向和切向的电磁力,切向电磁力作用在转子上产生转矩使得转子旋转,径向电磁力作用在定子齿面上引起定子铁心产生振动从而带动机壳表面振动,引起空气振动产生声音然后向四周扩散传播^[13-20]。本文基于多物理场有限元软件 ANSYS 分析高速

异步电主轴电机的电磁噪声特性。

3.1 径向电磁力波谐波响应分析

在 ANSYS MECHANICAL 的谐响应模块中,采用与模态分析时相同的定子模型,对其进行 3D 有限元谐波响应分析,将时域下的电磁力通过傅里叶分解转换成频域下的电磁力,将其作为谐响应分析的激励源添加到定子模型齿部相应位置,并对定子模型进行谐响应分析,得到了定子铁心表面的形变与振动速度结果,如图 8、图 9 所示。

在谐响应中,形变与速度幅值与激励力波幅值成正比,低次谐波的幅值较大,更容易引起振动,当某阶激励力波的频率与相对应的模态固有频率接近时,即使力波幅值很小也会因共振而引起较大的振动响应。由谐响应分析结果可以得到,定子铁心在 2 000、4 000、18 000、20 000 Hz 处均发生了较大的振动。通过电磁力波 2D FFT 可以得知在 2 倍频与 20 倍频处均有较大的谐波幅值,因此定子铁心会在 2 000 Hz 和 20 000 Hz 处发生较大的振动。定子铁心的 2 阶与 4 阶模态固有频率分别为 4 049.6、1 840.2 Hz,这使得 2 阶与 4 阶电磁力波与定子铁心发生共振,从而产生较大的振动。

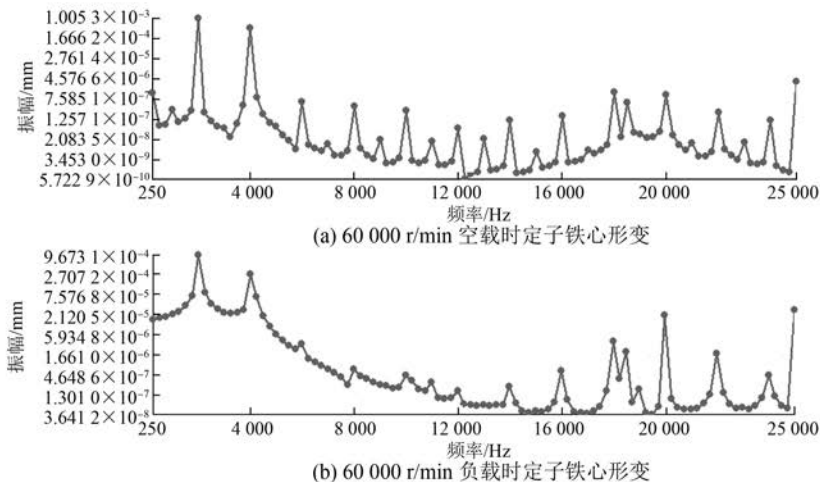


图 8 60 000 r/min 时定子铁心形变

3.2 高速异步电主轴电机电磁噪声特性分析

在 ANSYS ACOUSTIC 模块中建立电机的电磁噪声辐射的空气域模型。本文建立圆柱面空气域模型来模拟噪声辐射区域,空气域内表面与定子外表面相重合。将谐响应分析中得到的定子外

表面的振动速度作为声学分析的激励源,设置空气的声场特性和边界条件,并对整个空气域进行声学分析,得到各个频率下的声压与声压级分析结果。如图 10 所示为噪声辐射空气域外表面 A 计权声压级结果。

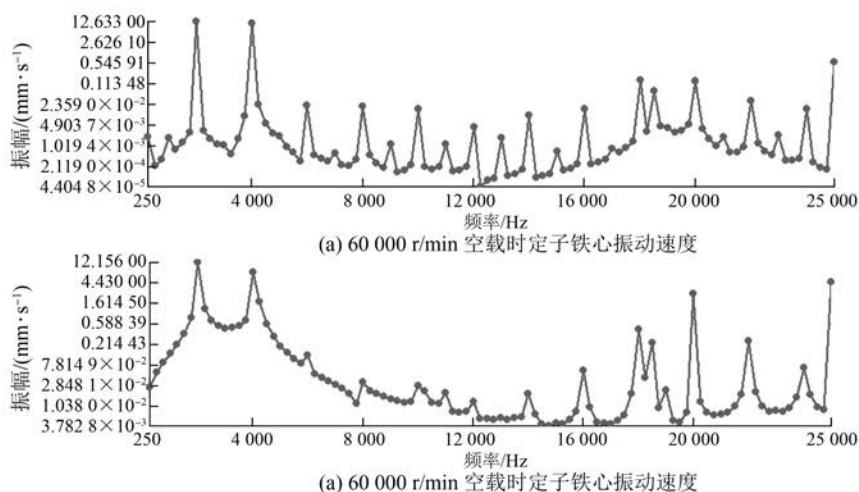


图9 60 000 r/min 时定子铁心振动速度

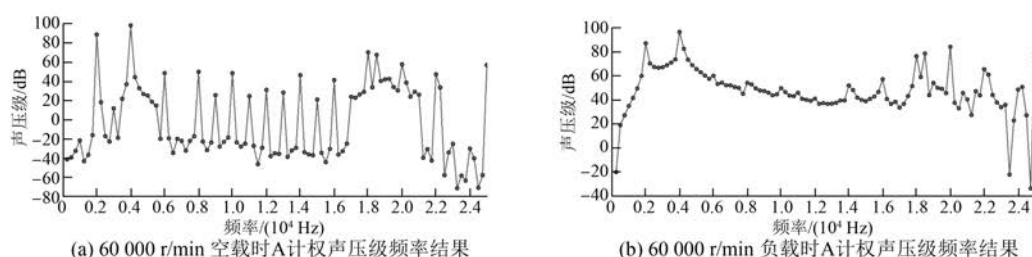


图10 60 000 r/min 时 A 计权声压级频率结果

由图10可知,无论是空载还是负载,电磁噪声的最大峰值均出现在4 000 Hz处,这是由于2阶电磁力波与定子铁心发生了共振,从而产生了较大的噪声。在2 000 Hz处电磁噪声的幅值也比较大,仅

次于4 000 Hz处,这是由于2倍频处电磁力波幅值较大引起了振动,从而产生了较大的噪声。如图11、图12所示为电机60 000 r/min时在最大噪声频率分量4 000 Hz处的声压和声压级仿真结果。

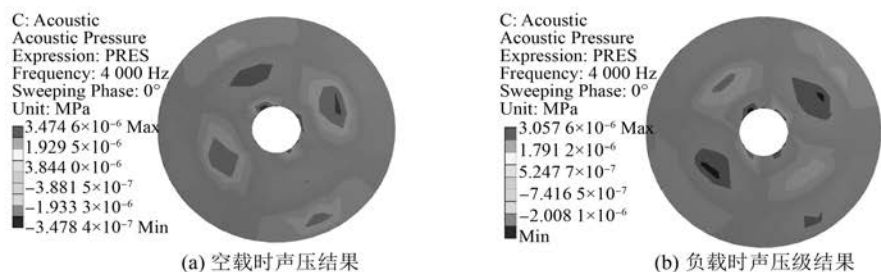


图11 60 000 r/min 时4 000 Hz处声压仿真结果

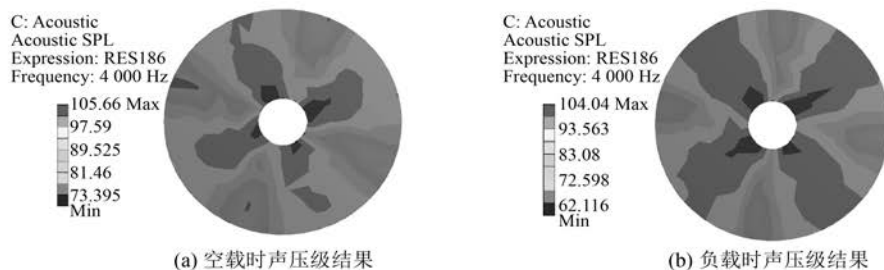


图12 60 000 r/min 时4 000 Hz处声压级仿真结果

通过以上声压和声压级云图可以看出,声音沿 4 个方向传播,其中相邻两个方向上声压的相位相差 180° ,当其中一个方向的声压最大时,相邻方向的声压最小。该声压分布与 2 阶模态振型一致,可以得出这是由 2 阶电磁力波引起振动从而产生的电磁噪声。

通过声压级求和公式可计算得到电机 60 000 r/min 时空载和负载的电磁噪声,见式 (13):

$$L = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0.1L_i} \right) \quad (13)$$

式中: L_i ——第 i 个频率下的声压级值;

n ——频率点的个数。

通过计算得出该高速异步电主轴电机在 60 000 r/min 空载时的电磁噪声值为 98.8 dB,负载时的电磁噪声值为 98.0 dB。

4 结 语

本文分析了高速异步电主轴电机的电磁噪声特性,从电机结构与电磁力两个角度分析了电磁噪声来源,并通过多物理场的有限元仿真分析了电机的振动和噪声特性,并得出以下结论:

(1) 电机负载相对于空载时产生了大量的气隙磁密谐波,且无论在负载还是空载情况下齿谐波分量的幅值都较大。

(2) 电机产生的 0、2、4、6、8 阶电磁力波都比较大,尤其是在 2 倍频和 20 倍频处的 2 阶电磁力波。

(3) 在 2、4、18、20 倍频处,电机都发生了较大的振动,并产生了较大的噪声。这是由于 2 倍频和 20 倍频处的电磁力波幅值较大,产生了较大的振动,而在 4 倍频处,2 阶电磁力波频率与电机 2 阶模态固有频率重合,从而发生共振,产生较大的噪声。同理,在 18 倍频处,4 阶电磁力波频率与电机 4 阶模态固有频率重合,发生共振而产生较大噪声。

(4) 为抑制电机的电磁噪声,在电机设计时应尽量使电机各次电磁力波的频率偏离电机结构模态固有频率,避免产生电磁共振。

【参考文献】

[1] 胡伟龙.永磁同步电主轴模态计算及对声辐射系

数影响规律的研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2015.

[2] 成涛,合烨,陈小安,等.基于有限元的异步型电主轴电机电磁场分析和参数优化[J].机械,2013,40(2): 1-5,8.

[3] HONG D K, CHOI J H, KIM D J, et al. Development of a high speed induction motor for spindle systems[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2013, 49(5): 4088-4091.

[4] HONG D K, LEE J Y, WOO B C, et al. Investigating a direct-drive PM type synchronous machine for turret application using optimization[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2012, 48(11): 4491-4494.

[5] HONG D K, WOO B C, LEE J Y, et al. Ultra high speed motor supported by air foil bearings for air blower cooling fuel cells[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2012, 48(2): 871-874.

[6] HONG D K, WOO B C, KOO D H. Rotordynamics and unbalance response analysis of 200 kW 15 krpm 3 phase induction motor [J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2010, 86(5): 129-132.

[7] SZUCS A. Macro element approach for electromagnetic simulations in multi-physics and system analysis[C]// Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium on, 2012: 700-705.

[8] 谢颖,王严,吕森,等.小型异步电机模态计算与试验分析[J].电工技术学报,2015,30(16): 1-9.

[9] 韩伟,贾启芬,邱家俊.异步电机定子的振动与模态分析[J].振动与冲击,2012,31(17): 91-94,115.

[10] 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): 24-30.

[11] 代颖,崔淑梅,宋立伟.车用电机的有限元模态分析[J].中国电机工程学报,2011,31(9): 100-104.

[12] ISHIBASHI F, MATSUSHITA M, NODA S, et al. Change of mechanical natural frequencies of induction motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(3): 922-927.

[13] BOESING M. Acoustic modeling of electrical drives-noise and vibration synthesis based on force response superposition[M]. Aachen: Shaker Verlag, 2013.

[14] BOESING M, HOFMANN A, DONCKER R W D. Universal acoustic modelling framework for electrical drives[J]. IET Power Electronics, 2015, 8(5): 693-

- 699.
- [15] SAITO A, SUZUKI H, KUROISHI M, et al. Efficient forced vibration reanalysis method for rotating electric machines [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015(334): 388-403.
 - [16] GALEA M. High performance, direct drive machines for aerospace applications [D]. Nottingham: University of Nottingham, 2013.
 - [17] FARRELL P E, MADDISON J R. Conservative interpolation between volume meshes by local Galerkin projection [J]. Comp Methods Appl Mech Engrg, 2011(200): 89-100.
 - [18] 赵天环, 高国旺, 王卫民, 等. 基于 ANSYS 的开关磁阻电机定子振动模态分析 [J]. 电机与控制应用, 2013, 40(5): 6-9.
 - [19] DOS-SANTOS F L M, ANTHONIS J, NACLERIO F, et al. Multiphysics NVH modeling: Integrated simulation of a switched reluctance motor drivetrain for an electrical vehicle [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 469-476.
 - [20] SARRAZIN M, JANSSENS K, AUWERAER H V D. Virtual car sound synthesis technique for brand sound design of hybrid and electric vehicles [C] // SAE Brasil International Noise and Vibration Colloquium 2012, 2012: 2-9.

收稿日期: 2017 -05 -05

(上接第 35 页)

- [7] 王同旭, 马鸿雁, 聂沐晗. 电梯用永磁同步电机 BP 神经网络 PID 调速控制方法的研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 43-47.
- [8] 王家军, 赵光宙, 齐冬莲. 反推式控制在永磁同步电动机速度跟踪控制中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 95-98.
- [9] 刘栋良, 郑谢辉, 崔丽丽. 无速度传感器永磁同步电机反推控制 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 67-72.
- [10] 付培华, 陈振, 丛炳龙, 等. 基于反步自适应滑模控制的永磁同步电机位置伺服系统 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 288-293, 301.
- [11] 徐艳平, 雷亚洲, 马灵芝, 等. 基于反推控制的永磁同步电机新型直接转矩控制方法 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 83-89.
- [12] TING C, CHANG Y, SHI B, et al. Adaptive backstepping control for permanent magnet linear synchronous motor servo drive [J]. IET Electr Power Appl, 2015, 9(3): 265-279.
- [13] 刘栋良, 王家军, 崔丽丽. 永磁同步电机参数自适应调速控制 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 159-165.
- [14] 郭阎彦, 刘锐, 史婷娜, 等. 基于反推自适应控制的永磁同步电机摩擦力矩补偿策略 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(33): 76-84.
- [15] ZHOU J, WANG Y. Adaptive backstepping speed controller design for a permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Proceedings-Electric Power Applications, 2002, 149(2): 165-172.
- [16] 范仁凯. 直接驱动永磁同步电机的转速跟踪控制 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

收稿日期: 2017 -02 -24

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录, 请在来稿时向本刊声明, 本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部