

超高速永磁同步电机振动噪声分析*

刘朋鹏, 王建辉, 韦福东

[上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063]

摘要: 超高速永磁同步电机(PMSM)具有转速高、径向力波阶数低等特点,但定子易共振引发较大噪声。以1台超高速PMSM为例,依据电机实际尺寸,建立了电机电磁场模型和定子结构的3D模态模型。采用有限元法对该电机的径向电磁力进行仿真,分析了引起电机振动的主要电磁力谐波次数,确认了电机电磁噪声的主要来源。最后,通过ANSYS声场的声压级云图研究了超高速PMSM的电磁噪声特性。

关键词: 超高速永磁同步电机; 径向力波; 电磁噪声

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)11-0047-04

doi: 10.12177/emca.2020.149

Vibration and Noise Analysis of Ultra-High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor*

LIU Pengpeng, WANG Jianhui, WEI Fudong

[Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China]

Abstract: Ultra-high-speed permanent magnet synchronous motor (PMSM) has the characteristics of high speed and low radial force wave orders, but its stator is easy to resonate and cause loud noise. Taking an ultra-high-speed PMSM as an example, the electromagnetic field model of the motor and the 3D modal model of the stator structure are established based on the actual size of the motor. The radial electromagnetic force of the motor is simulated by finite element method, and the main harmonic frequencies of the electromagnetic force causing the vibration of the motor are analyzed, through which the main source of electromagnetic noise is confirmed. Finally, the electromagnetic noise characteristics of ultra-high-speed PMSM are studied by using the sound pressure level cloud image of ANSYS.

Key words: ultra-high-speed permanent magnet synchronous motor (PMSM); radial force wave; electromagnetic noise

0 引言

采用超高速永磁同步电机(PMSM)驱动的压缩机具有效率高、体积小、功率密度大等优点,在燃料电池中得到了广泛的应用。但超高速PMSM转速高,电机径向力波阶数低,轻量化的结构设计导致定子刚度较差易共振引发较大噪声,影响压缩机的使用体验,因此在超高速PMSM设计时不

仅需要考虑电机的电磁性能指标,还需要关注电机的振动噪声特性^[1-3]。

电机的振动噪声伴随电磁、结构、力学和声场等多个领域错综复杂的耦合关系,是一个复杂的多物理场问题。为了对电机进行准确的噪声分析,国内外许多学者已进行了研究^[4-5]。张增杰^[6]研究了小功率PMSM气隙磁场对电机产生的振动及辐射噪声的影响。张玉柱^[7]基于

收稿日期: 2020-08-12; 收到修改稿日期: 2020-09-15

*基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B090909002)

作者简介: 刘朋鹏(1991—),男,硕士,研究方向为电机设计与控制技术。

王建辉(1971—),男,博士,副教授,研究方向为电机设计与控制技术。

韦福东(1992—),男,硕士,研究方向为电机设计与控制技术。

MATLAB 频谱分析的分析方法研究了永磁电机噪声声源。朱海峰^[8]对异步电机电磁激振力进行了分析。郑江^[9]研究了低速大转矩和高速恒功率车用 PMSM 电磁噪声特性。林巨广等^[10]研究了 8 极 48 槽 PMSM 径向力波、噪声来源,并说明电机噪声受单壳体刚度、前后端盖影响。

本文以 1 台 120 000 r/min 的超高速 PMSM 为例,通过 Maxwell 计算定子内表面径向和切向电磁力时域密度分布,将该力密度作为激励源耦合到 Mechanical 中进行频域的谐响应分析,并将分析结果作为激励耦合到 Harmonic Acoustic 中,得到径向力波对电磁噪声的影响,根据电磁力波二维傅里叶变换及噪声声压级云图研究了超高速 PMSM 的电磁噪声特性。

1 电机径向力波分析

样机的基本参数如表 1 所示。根据表 1 尺寸参数建立的电机模型如图 1 所示。

表 1 电机的基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	10	额定转速/(r·min ⁻¹)	120 000
额定电压/V	315	效率/%	97
铁心长度/mm	50	定子槽数	12
极数	2	转子外径/mm	18
定子外径/mm	80	紧固层外径/mm	22
定子内径/mm	24	充磁方式	平行

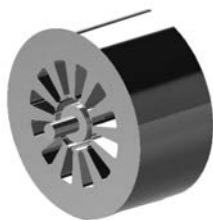


图 1 120 000 r/min 电机模型

分析电机电磁力波的前提是准确计算出电机的气隙磁场,获得气隙磁场后,利用麦克斯韦应力张量法就可推导出电机电磁力波。其计算式为

$$P_r = \frac{1}{2\mu_0} [b^2(\alpha, t) - b_1^2(\alpha, t)] \quad (1)$$

式中: P_r 为电机径向力波和切向力波; μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; $b(\alpha, t)$ 、 $b_1(\alpha, t)$ 分别

为气隙磁通密度的径向和切向分量。

定子和转子空间谐波的次数为

$$v = 2km_1 \pm 1 \quad (2)$$

$$\mu = 1 \pm 2k \quad (3)$$

式中: v 、 μ 为定子、转子的空间谐波次数; $k = 0, 1, 2, 3, \dots$; m_1 为相数。

振动阶次为

$$\begin{cases} r = 2p[k(m_1 + 1) + 1] \\ r = 2p[k(m_1 + 1) - 1] \end{cases} \quad (4)$$

振动频率为

$$\begin{cases} f_r = 2f(1 + k) \\ f_r = 2fk \end{cases} \quad (5)$$

式中: r 为力波次数; p 为电机极对数; f 为电源频率; f_r 为振动频率。

当仅考虑定子铁心周向振动模态时,定子铁心的形变量 Δ_d 与电磁力波次数的 4 次方成反比,即:

$$\Delta_d \propto \frac{1}{r^4} \quad (6)$$

因此,对于小型电机,最重要的周向模态振型是低阶阶数 ($r = 0, 1, 2, 3, 4, 5$),而当力波阶次较大时,其对应的阶次模态固有频率大,不会共振产生噪声。由以上分析可以得到电机的主要电磁激振力,表 2 列出了阶次小于 4 阶的电磁激振力波。

表 2 电机的电磁激振力谐波次数

r	k	v						
		0	-1	1	-2	2	-3	3
	μ	1	-5	7	-11	13	-17	19
0	1	0	-4					
1	3	2	-2	-4				
2	5	4	0	-2				
3	7		2	0	-4			
4	9		4	2	-2	-4		
5	11			4	0	-2		
6	13				2	0	-4	
7	15				4	2	-2	-4
8	17					4	0	-2

由 Maxwell 仿真可得电机径向、切向磁密 $b(\alpha, t)$ 、 $b_1(\alpha, t)$ 如图 2 所示。

根据麦克斯韦应力张量法可得电机气隙径向力波,为时间和空间的函数,对某一时刻随空间位

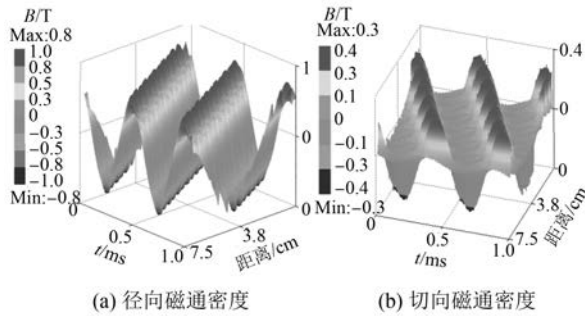


图2 电机径向磁密及切向磁密 3D 云图

置变化的电磁力进行傅里叶分解,可得电磁力的空间阶数 r ;对气隙某一点随时间变化的电磁力进行傅里叶分解,可得电磁力的时间频率 f 。电机电磁噪声分析时,需确定电磁力波空间阶数和时间频率各自的对应关系,一次 FFT 分析不能完全反应径向力波中的谐波分量幅值,需要对电磁力进行时间和空间 FFT 分解,2 次 FFT 分解结果如图 3 所示。

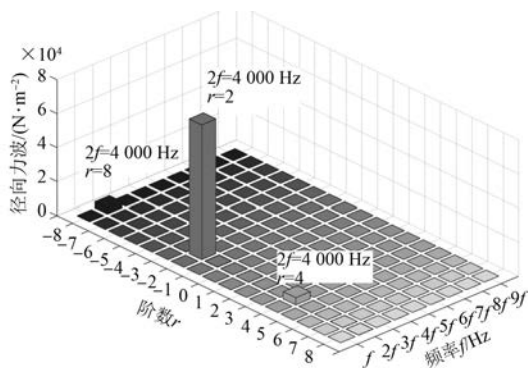


图3 电机径向力波 2D 傅里叶分解

由于 0 力波不会产生振动噪声,以此将 0 力波分量删除,由图 3 可知径向力波幅值最大的分量为 2 阶 $2f$ 谐波,其次为 4 阶 $2f$ 与 8 阶 $2f$ 谐波分量,但幅值均较小,原因是该超高速电机气隙磁密谐波少,径向力波基本只有 $2f$ 基本力谐波。

2 电机模态分析

对于电机定子而言,除了频率接近或相同之外,还需要考虑电磁力波的波形也需要与定子某一阶模态振型相近或相同。即当径向电磁力波某一阶次与定子空间模态振型相同,且电磁力波的频率与定子这一阶模态频率接近或相等时,定子

会发生共振,故电磁力波需要从振型和频率上与电机定子的模态阶次避开,以减少电机定子系统产生的电磁噪声。因此,研究高速电机定子模态具有重要的意义。

图 4 为笛卡尔坐标系下电机定子 0 阶、2 阶、3 阶、4 阶、5 阶、6 阶模态,频率分别为 20 948、6 006.6、13 648、18 135、19 505、19 804 Hz,结果表明 4 阶以上模态频率较高,不易使定子振动,2 阶模态频率较低,且径向力波存在多个频率的分量,当径向力波频率接近模态频率时可能共振产生较大噪声,另外需要关注 0 阶呼吸模态,频率较高但阶数低,较小的力波共振也会引起较大电机噪声。

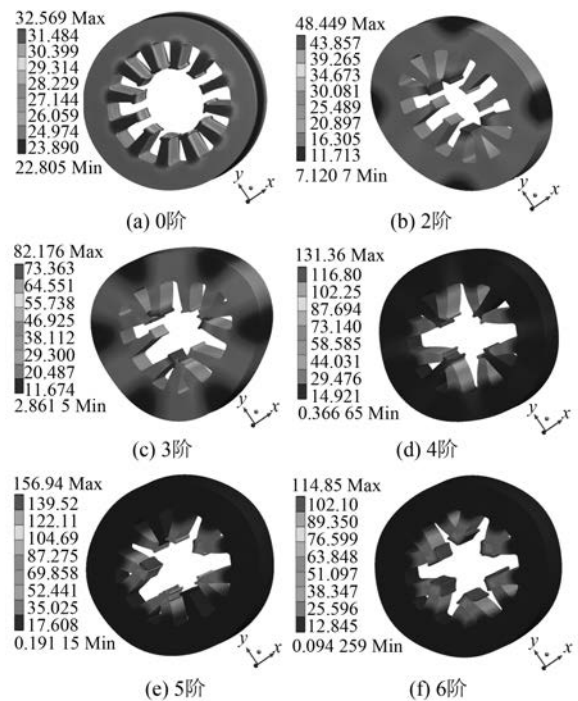


图4 电机定子径向模态振型[dB(A)]

3 电机谐响应分析

将定子齿部电磁力施加到模态分析相同的模型上,进行有限元谐响应分析,在谐响应中,振动幅值与力波幅值成正比,低次谐波的幅值较大容易引起振动。但是当特定阶激振力波的频率与对应模态的固有频率相接近时,即使力波幅值很小也会引起较大的振动响应。

因为该电机 Z 轴方向电机振动幅值较小,所以仅给出了电机定子表面 X 轴和 Y 轴方向最大振动位移幅值,如图 5 所示。由图 4、图 5(a)可知

电机在 6 000、13 600、18 200、19 800 Hz 会有振动幅值尖峰,分别对应 2 阶、3 阶、4 阶及频率相近的 5 阶、6 阶模态,其中 2 阶模态振动幅值远高于其他模态阶数;从图 5(b)标出的电机 2f、4f、6f、8f 力波频率点可知,在二倍基波频率点振动幅值最大,但超高速电机定子较小刚度好,固有频率高于二倍基波频率,不会引起较大的噪声。

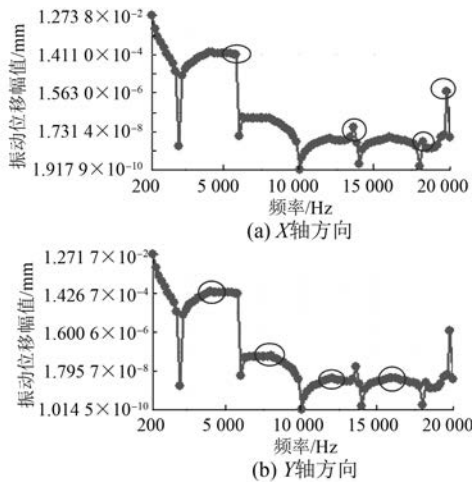


图 5 电机定子表面最大振动位移幅值

4 电机噪声特性

建立半径 1 m 包裹电机定子空气球噪声仿真模型,对该谐响应状态下电机噪声进行仿真,120 000 r/min 时电机定子表面二倍基波频率声压级与电机整体声压级云图如图 6 所示。由图 6(a)可知,尽管电机二倍基波频率点振动幅值最大,但不会与电机共振,噪声很小;由图 6(b)可知,由于电机气隙磁密正弦度较好,电机整体最大噪声为 53.3 dB(A),电磁噪声较小,符合电机设计要求。

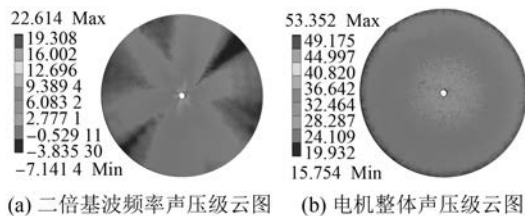


图 6 电机 A 计权声压级云图[dB(A)]

5 结 语

针对超高速 PMSM 转速高、电机径向力波阶数低、定子易共振引发较大噪声等特点,本文以 1 台超高速 PMSM 为例,依据电机实际尺寸,建立了电机电磁场模型和定子结构的 3D 模态模型。通过电机结构和电磁力波分析了电机电磁噪声,并得到以下结论:

(1) 二倍基波频率点振动幅值最大,但超高速电机定子较小刚度好,固有频率高于二倍基波频率,不需要过多关注此力波振动。

(2) 电机额定转速 120 000 r/min 运行时,电机力波阶数、频率与模态阶数、频率均不重合,不会共振引起较大的噪声。

本文为行业设计人员分析电机噪声提供了方法,提高了超高速电机噪声分析的准确性与可靠性,目前已完成样机试制,后续将对电机噪声进行进一步的测试验证。

【参考文献】

- [1] 刘士兴. 压缩机永磁同步电机振动降低方案[J]. 国内外机电一体化技术,2016(2): 48.
- [2] 崔淑梅,于天达,宋立伟. 基于 ANSYS 和 SYSNOISE 的电机噪声仿真分析方法[J]. 电机与控制学报,2011,15(9): 63.
- [3] 郝雪莉. 永磁电动机电磁振动噪声的计算分析研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2010.
- [4] 张维,黄坚,李志强. 异步电机电磁噪声国内外研究现状[J]. 电机与控制应用,2012,39(9): 1.
- [5] 包猛. 电动汽车用永磁同步电机的电磁振动噪声分析研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2014.
- [6] 张增杰. 小功率永磁同步电动机振动噪声的计算与分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2013.
- [7] 张玉柱. 基于 MATLAB 频谱分析的永磁电机噪声分析方法[J]. 电机与控制应用,2019,46(2): 95.
- [8] 朱海峰. 异步电机电磁激振力分析[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [9] 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.
- [10] 林巨广,吴梦. 基于模态分析的永磁同步电机噪声研究[J]. 机械设计,2020,37(3): 33.