

永磁同步电机定子系统模态振型研究

时方敏^{1,2}, 朱利伟^{1,2}

(1. 贵州航天林泉电机有限公司, 贵州 贵阳 550003;

2. 国家精密微特电机工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 针对永磁同步电机振动及噪声的问题, 从电机定子系统的结构模态入手, 通过仿真分析不同铁心模型及不同机壳厚度对定子系统的影响, 分析定子各参数对电机振动及噪声的影响。通过试验验证了仿真求解的可靠性, 得到各参数对定子系统振型影响的一般规律。

关键词: 永磁同步电机; 振型; 频率; 模态; 定子系统

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)10-0077-05

Research on Modal Vibration Mode of Permanent Magnet Synchronous Motor Stator System

SHI Fangmin^{1,2}, ZHU Liwei^{1,2}

(1. Guizhou Spaceflight Forest Spring Motor Co., Ltd., Guiyang 550003, China;

2. National Engineering Research Center for Small and Special Precision Motors, Guiyang 550003, China)

Abstract: Aiming at the problem of vibration and noise of permanent magnet synchronous motor, starting from the structural modality of the motor stator system, the influence of stator parameters on motor vibration and noise was analyzed through the simulation of the influence of different iron core models and different shell thicknesses on the stator system. The reliability of the simulation was verified by experiments. Finally, the general law of the influence of various parameters on the vibration mode of stator system was obtained.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); vibration mode; frequency; modality; stator system

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有结构简单、效率高、功率密度高和可靠性高等优点, 广泛应用于各个领域。随着 PMSM 使用量的剧增, 对其质量的要求也越来越高。电机的振动及噪声作为衡量电机质量的一项重要指标, 越来越受到重视。PMSM 振动及噪声的研究一般从 2 个方面出发: (1) 从电磁振动及噪声产生的激励源入手, 分析气隙磁场的电磁力谐波频率、谐波幅值及阶数; (2) 从电机的结构模态入手, 分析结构模态阶数和频率, 当径向电磁力频率与电机固有频率相近时, 引发

机共振, 产生较大的电磁振动及噪声。对此应采取措施使两者频率相避开, 避免发生共振^[1]。

本文从电机定子系统的结构模态入手, 分析了定子各参数对电机振动及噪声的影响, 结合仿真和试验, 得出了各参数定子系统振型影响的一般规律。

1 PMSM 模态振型的解析计算

电机电磁力波直接作用于定子齿和转子永磁体, 引起电机整体振动变形。定子轭部振幅远大于定子齿及永磁体, 因此定子模态振型的研究, 主要是分析定子轭的振动变形。轴向振动阶数为零的定子轭径向模态振型如图 1 所示。

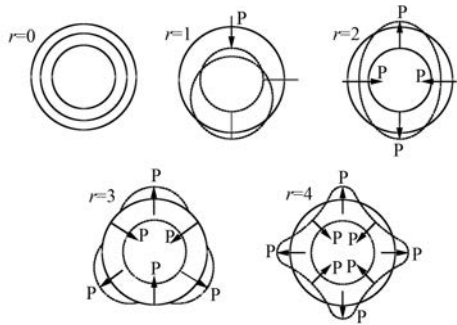


图1 定子径向振动模态振型

当 $r=0$ 时, 定子轭环做伸缩振动, 其径向力按余弦规律交变, 振动方程零阶模态频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Eh_j}{mR_{j1}^2}} \quad (1)$$

式中: h_j ——轭的径向高度;

m ——圆环平均半径处单位面积质量;

R_{j1} ——定子轭平均半径。

定子铁心叠压而成时 $E = 1.777 \times 10^{11}$ Pa; 对于整块轭 $E = 2.06 \times 10^{11}$ Pa。

当力波次数 $r=1$ 时, 定子轭环沿径向摆动振动, 其模态频率为

$$f_1 = 2\sqrt{3} \frac{f_0 h_j f(a)}{R_{j1}} \quad (2)$$

式中: $f(a)$ ——电机底座固定时, 随定子底座加于定子中心的夹角变化的系数。

当力波次数 $r \geq 2$ 时, 电机定子轭的固有模态频率为

$$f_r = \frac{r(r^2 - 1)}{\sqrt{r^2 + 1}} \frac{f_0 h_j}{R_{j1}} \quad (3)$$

由以上解析过程可知, 高阶模态的求解是以零阶模态频率为准, 阶数越高误差累积越大, 求得的高阶模态频率越不可信, 解析计算仅适用于低阶模态频率的求解^[2]。

2 PMSM 定子模态振型的仿真分析

定子系统主要包括铁心、绕组和机座 3 部分, 如图 2 所示。

电机空载运行时, 径向电磁力直接作用于定子铁心的齿头, 引起定子铁心振动。铁心与机壳过盈配合, 将其视为一体, 铁心的振动将直接传至机壳, 机壳振动将带动周围空气的振动, 在周围空



图2 电机定子系统

气中产生噪声。通过对铁心、绕组和机座 3 个主要组成部分进行模态分析, 研究其对定子整体模态的影响。

2.1 定子铁心的模态振型分析

PMSM 的定子铁心是磁路的重要组成部分。电机正常工作时, 铁心部分受到两倍于工作频率的交变磁拉力及高梯度温度变化产生的较大热应力。因此, 实际应用中常用 0.35 ~ 0.50 mm 的硅钢片叠装定子铁心, 减小电机的涡流损耗, 并能满足强度及形变要求。铁心压装不紧, 将引起冲片松动, 造成局部片间绝缘破坏、线棒绝缘磨损, 甚至导致冲片齿折断。进行定子铁心的结构模态分析时, 为方便剖分, 多将其视为实体。但如此近似会影响模态分析的准确性。本文建立实心 和 叠片 两种铁心模型, 对比分析两种模型结构模态。

叠片铁心与实体铁心属性有很大差异。一般将硅钢片视为各向同性材料, 但由硅钢片叠压而成的铁心在 x 、 y 、 z 轴方向的材料参数有所差异。建模中将 z 轴设为电机轴向, x 、 y 轴设为电机径向, 定子铁心叠片叠压系数设为 0.97, 通过计算可得叠片定子的密度为 7498 kg/m^3 。将铁心的径向弹性模量视为与硅钢片相同, 则 $E_x = E_y = 1.98 \times 10^{11}$ Pa。在轴向可将铁心材料视为硅钢和涂层漆两种材料复合而成, 可得叠片铁心轴向弹性模量 $E_z = 2.11 \times 10^{11}$ Pa, 轴向剪切模量 $G_{xy} = 8.14 \times 10^{10}$ Pa, 实体剪切模量为 $G_{xz} = G_{yz} = 7.89 \times 10^{10}$ Pa。各方向泊松比视为 0.26。实体铁心的材料属性: 密度 7730 kg/m^3 ; 弹性模量 $E = 2.18 \times 10^{11}$ Pa; 泊松比为 0.26。

低价电磁力波幅值较大, 其频率与定子低阶振型频率相近时形成共振, 引起较大振动噪声^[3-4]。建立定子的两种模型, 分别对两模型进行相应参数设置, 其剖分结果如图 3 所示。

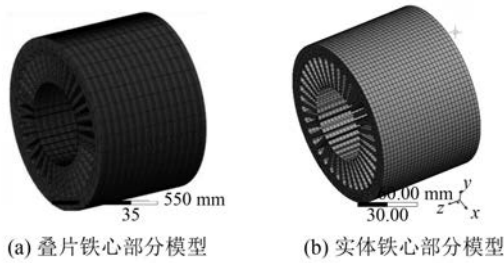


图3 两种铁心模型

仿真条件不添加任何约束和载荷,求解电机的自由模态振型。仿真结果的前六阶模态频率几乎为零,一般忽略不计,其意义为定子在 x, y, z 轴方向的平动和以 x, y, z 轴为旋转轴的旋转;第七阶开始才是模型的有效模态。电机振动及噪声关心的主要是轴向阶数为零的径向模态。从模态振型中提出铁心的前六阶径向模态如图4和图5所示。两种铁心模型各阶模态频率如表1所示。

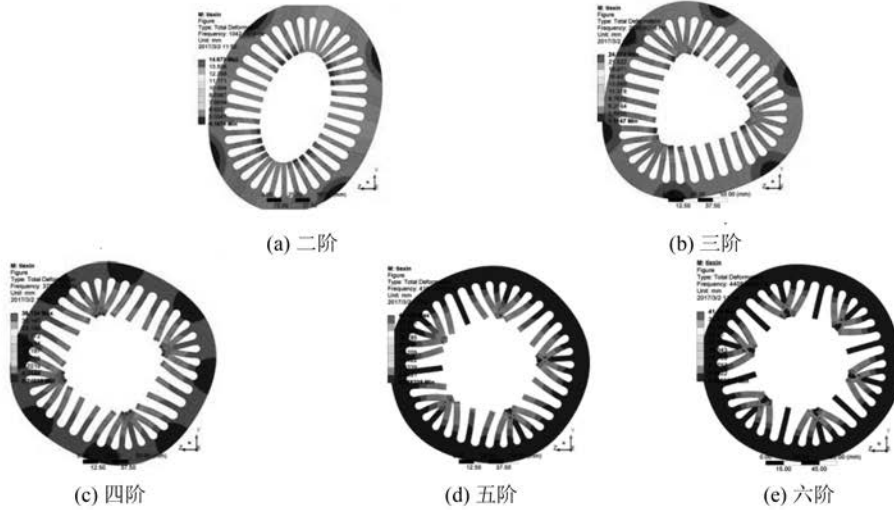


图4 实体铁心径向模态振型

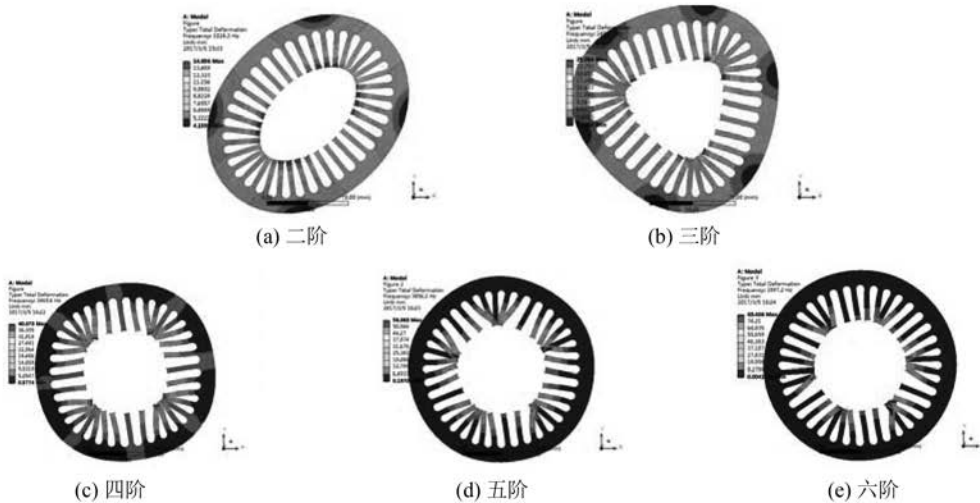


图5 叠片铁心径向模态振型

由表1可知,叠片铁心各阶模态频率均低于实体铁心,可使定子铁心每阶固有模态频率减小1%~3%。叠片铁心由一片片硅钢片叠压而成,这种结构降低了铁心的整体性,减小了刚度,增大了阻尼。虽然采用叠片铁心模型获得的模态与实际

工况更加接近,但增加了仿真操作难度,增大了计算成本。同时采用实体铁心模型求得的模态频率与其相近,足以表达定子各阶模态的特性。因此,仿真中可以用实体铁心代替叠片铁心,不但可以保证正确率还能提高计算速度。

表 1 两种铁心模型各阶模态频率

模态阶数	实体铁心 模态频率/Hz	叠片铁心 模态频率/Hz	实体铁心相 对变化量/%
2s	1 024	1 016	0.79
2a	1 029	1 017	1.18
3s	2 462	2 456	0.57
3a	2 482	2 469	0.53
4s	3 513	3 469	1.27
4a	3 518	3 490	0.802
5s	3 934	3 853	2.02
5a	3 944	3 877	1.73
6s	4 111	3 997	2.85
6a	4 113	4 043	1.73

2.2 机壳厚度对结构模态的影响

对机壳模型进行简化处理,忽略对电机整体模态影响不大的特征,以得到较理想的剖分结果,提高计算速度。

建立机壳壁厚为 9、11、13、14、15、16、17 mm 的电机定子系统三维模型。模型主要由机壳、定子铁心及绕组 3 部分组成,接触方式设为绑定。定子系统各部分组成材料属性如表 2 所示。

表 2 定子系统各部分材料参数

部分	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/Pa	泊松比
机壳	7 750	2.23×10^{11}	0.297
铁心	7 730	2.18×10^{11}	0.2
绕组	3 869	1.2×10^9	0.3

添加材料属性后的剖分模型(机壳壁厚为 17 mm)如图6所示。模态仿真的约束条件无限

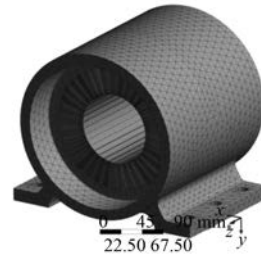


图 6 机壳壁厚为 17 mm 的剖分模型

接近于实际工况,在实际工况下电机机脚应通过螺栓固定,因此仿真时应地对脚螺纹孔添加全约束。对其仿真求解,从 70 阶模态频率中提取 1~5 阶齿对称模态频率,如图 7 所示。

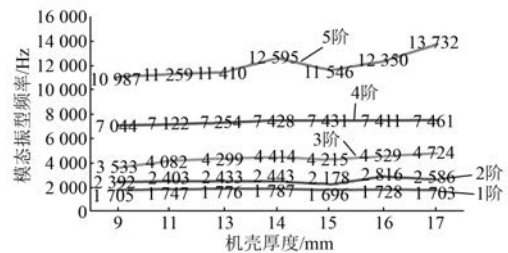


图 7 不同机壳厚度低阶模态频率变化曲线

由图 7 可知,增加机壳厚度可有效提高径向模态频率,模态阶数越高径向模态频率增大效果越明显,机壳刚度对定子模态的贡献量大于机壳质量。增大机壳厚度可有效提高各阶模态频率,但机壳过厚会导致电机过于笨重,增加生产成本。综合考虑电机各性能,机壳厚度选取 17 mm,可最大限度地提高各阶模态频率,同时电机也不致过于笨重。定子系统前五阶模态振型如图 8 所示^[5-6]。

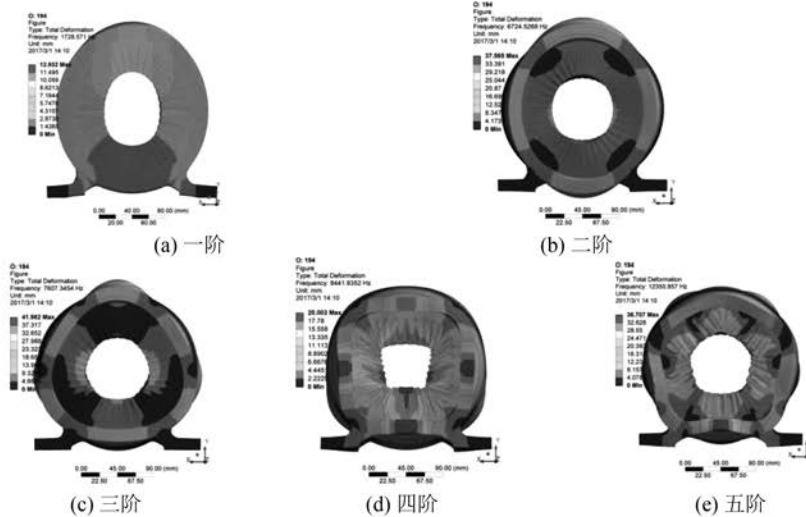


图 8 定子系统前五阶模态模型

3 试验分析

为了验证仿真可靠性,对 17 mm 厚机壳定子系统模态振型求解。试验系统使用的仪器主要包括力锤、传感器、电荷放大器、数据采集仪和电脑,如图 9 所示。试验选用弹性垫模拟定子系统弹性支撑边界条件,通过小锤激振,放大器将获得的力信号及加速度信号放大,传输到数据采集仪,经过相应处理得到频率响应函数,求得电机定子系统两测点幅频图,如图 10 所示。



图 9 试验仪器及系统搭建

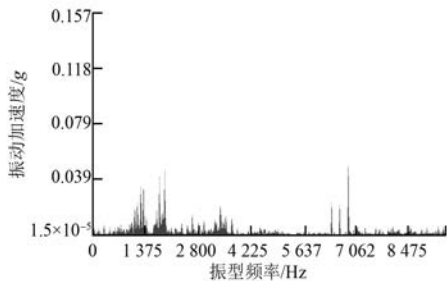


图 10 测点幅频图

由图 10 可得定子系统各阶振型模态频率。将试验所得频率与仿真结果进行对比,如表 3 所示。

表 3 仿真结果与试验结果对比

模态阶数	仿真结果 /Hz	试验结果 /Hz	误差 /%
1	1 703	1 598	6
2	2 586	2 405	6.9
3	4 724	4 618	2.2
4	7 461	—	—

注:表中“—”代表测试仪器量程外未测出的频率。

由表 3 可知,仿真求得的结果与试验结果有一定差异,但误差均小于 10%,在可接受范围内,从而验证了仿真结果的可靠性。

4 结 语

数值分析不同定子铁心结构的振型。由仿真分析得知叠片铁心的各阶模态频率比实体铁心模态频率下降 1%~3%,对整体模态影响不大。

数值分析不同机壳厚度对定子系统模态振型的影响。由仿真得知增加机壳厚度可以有效提高模态各阶频率,但机壳太厚会导致电机过于笨重,增加生产成本,综合考虑,电机机壳厚度选取 17 mm。通过试验验证了仿真结果的可靠性。

本文通过数值分析及试验验证相结合的方法,求得了电机定子系统响应参数对定子振型的影响结果。这对工程设计实践具有一定的参考价值。

【参考文献】

- [1] 曾庆初.永磁无刷直流电机噪声分析及降噪设计方法的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [2] 于慎波.永磁同步电机振动与噪声特性研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2006.
- [3] 吴建华.基于物理模型开关磁阻电机定子模态和固有频率的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(8): 109-114.
- [4] 孙剑波,詹琼华,黄进.开关磁阻电机的定子振动模态分析[J].中国电机工程学报,2005,25(22): 148-152.
- [5] CHEN Y S, ZHU Z Q, HOWE D. Vibration of PM brushless machines having a fractional number of slots per pole[J].IEEE Transactions on Magnetics,2006,42(10): 3395-3397.
- [6] 王天煜,王凤翔.大型异步电机定子振动与模态分析[J].中国电机工程学报,2007,27(12): 41-45.

收稿日期: 2018-06-21