

电机定子系统振动模态的研究分析^{*}

袁西冰^{1,2}, 葛发华², 李长虹¹, 冯治国¹

(1. 贵州大学, 贵州 贵阳 550025; 2. 国家精密微特电机工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 针对电机定子系统的振动与噪声特性, 利用 Ansys 有限元仿真软件对电机定子系统三维模型进行模态仿真, 得到电机定子系统的固有频率与振形, 并通过试验对仿真结果进行验证。同时, 对电机进行电磁仿真, 分析其气隙磁密与电磁力谐波, 得到电机内部电磁力各次谐波频率。将电磁力谐波频率与电机固有频率进行对比, 确保电磁力谐波不会引起电机定子系统共振。验证了电机结构的合理性, 为同类产品的设计优化提供了一定的参考价值。

关键词: 电机定子系统; 振动模态分析; 电磁力谐波

中图分类号: TM 302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)04-0085-05

Analysis of Vibration Mode of Motor Stator System^{*}

YUAN Xibing^{1,2}, GE Fahua², LI Changhong¹, FENG Zhiguo¹

(1. Guizhou University, Guiyang 550025, China;

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

Abstract: Aiming at the vibration and noise of motor stator system, the ANSYS finite element simulation software was used to simulate the three-dimensional model of the motor stator system. The natural frequency and vibration shape of the stator system were obtained. And the simulation results were verified by experiments. At the same time, the electromagnetic simulation of the motor was carried out, and the air gap flux density and the harmonic frequency of electromagnetic force harmonic were obtained. The frequency of electric magnetic harmonic frequency was compared with the natural frequency of the motor to determine that the electromagnetic force harmonic does not cause the resonance of the motor stator system. The rationality of the motor structure was verified. A certain reference value for the design optimization of the same kind of products was provided.

Key words: motor rotor; vibration modal analysis; electromagnetic force harmonic

0 引言

噪声是电机的重要性能指标, 也是电机发展历程中有待进一步解决的一个问题。电机噪声主要分为 3 类: 电磁噪声、空气动力噪声和机械噪声。电机的电磁噪声除了与电机气隙磁场电磁力的频率、幅值和阶数有关之外, 还与电机定子的固有频率有很大的关系^[1]。为了有效抑制电磁噪声, 必须确保电机调速范围内电机定子系统的各阶模态频率远高于相应次数电磁力波的最高频

率^[2]。因此, 为了降低电机噪声, 必须对电机定子系统的固有频率与振动特性进行研究。

国内外学者针对电机的振动模态进行了不少研究。文献[3]针对小型异步电机进行了整机的模态计算与试验分析。文献[4]针对车用电机提出可以准确预测车用电机结构固有频率的绕组简化模型。文献[5-7]针对开关磁阻电机的定子系统模态进行了详尽的研究。文献[8]通过计算与仿真对比, 得到了异步电机的定子模态。文献[9]对直流电动机定子模态进行分析, 并研究了

^{*} 基金项目: 自主创新基金项目(技字[2016]49号)

作者简介: 袁西冰(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机电磁噪声研究。

葛发华(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为微特电机。

电机机脚螺栓对电机模态的影响。

本文针对某型号永磁无刷直流电机,建立三维模型,通过 Ansys 仿真软件对该电机进行模态仿真,分析其固有频率并利用试验对仿真结果的准确性进行验证。然后通过 Ansoft 电磁仿真分析软件对电机气隙电磁力谐波进行仿真分析,得到电磁力谐波各阶频率,并将其与电机定子系统的固有频率进行对比研究,确定电磁力谐波不会引起电机定子系统共振,避免激发严重的电磁噪声。这些工作对于电机的模态分析与电磁噪声的研究具有一定的参考价值。

1 定子系统模态仿真分析

1.1 模态分析理论

模态分析的实质是通过有限元方法对特征值和特征向量进行求解,确定系统的固有频率与振形。系统的动力响应方程为

$$[M]\{x''\} + [C]\{x'\} + [K]\{x\} = \{F(t)\}$$

(1)

式中: $[M]$ ——质量矩阵;

$\{x\}$ ——位移向量;

$[C]$ ——阻尼矩阵;

$[K]$ ——刚度矩阵;

$F(t)$ ——结构激振力向量。

令 $F(t)=0, [C]=0$, 得无阻尼的自由振动方程式(2), 可用于求解电机模态^[10]:

$$[M]\{x''\} + [K]\{x\} = \{0\}$$

(2)

令 $\{x\} = \{u\} \cos \omega t, \{u\} \neq 0$, 代入式(2), 解得:

$$-\omega^2[M]\{u\} \cos \omega t + [K]\{u\} \cos \omega t = 0$$

(3)

由于式(3)中 $\cos \omega t$ 不恒为零, 根据线性方程组存在非零解的充要条件可得:

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0$$

(4)

联立式(3)和式(4), 可得 ω_i 和 $\{u_i\}$ 分别是系统第 i 阶的固有频率和主振型。

1.2 有限元模型的建立

电机定子系统主要由定子铁心、绕组、机壳、插座、后罩等部分组成。为了方便 Ansys 的分析计算, 本文将对结果影响很小的倒角、圆孔等部分进行合理简化, 并将绕组端部形状等效为与实际绕组体积相同的空心圆柱体, 建立电机的三维模

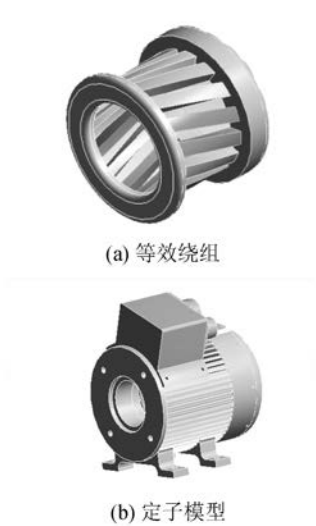


图1 定子系统三维模型

型如图1所示。

材料物理参数的合理设定,是电机模态分析的基础。对电机定子系统各部分按实际情况对材料属性进行定义,参数如表1所示。

表1 模型材料参数			
材料	弹性模量/Pa	泊松比	密度/(kg·m ³)
20WTG1500	1.9×10 ¹¹	0.26	7 650
铝棒	7.1×10 ¹⁰	0.33	2 770
不锈钢 2Cr13	2.23×10 ¹¹	0.30	7 750
铜	1.1×10 ¹¹	0.37	8 978

采用自适应网格剖分方式对电机定子系统进行网格剖分,在保证网格精度的前提下,共剖分网格节点数为 97 679,剖分总单元数为 50 097,网格如图2所示。在现实应用中,此电机是通过机壳底座的4个螺栓固定在平面上的,所以对4个螺栓孔施加固定约束来模拟现实使用情况。



图2 有限元网格模型

1.3 有限元分析结果

通过 Ansys 仿真软件对电机定子系统模态进行仿真求解,考虑电机振动一般是由低阶固有频率激振,从而引起共振,高阶固有频率相对较高,很难激振,因此本文选取电机的前 6 阶模态进行分析。各阶固有频率如表 2 所示。

仿真求解所得定子系统前 6 阶模态振形云图如图 3 所示,其中,定子系统形变量是以夸张的形

表 2 模态固有频率的有限元分析结果

仿真模型	频率/Hz					
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶
定子系统	872	1 041	1 687	2 290	2 561	3 034
电机整体	647	823	1 379	1 698	2 131	2 244

式表示振形相对位移变化,并不是实际振形位移情况。图 3 中, n 表示阶数, f 表示频率。

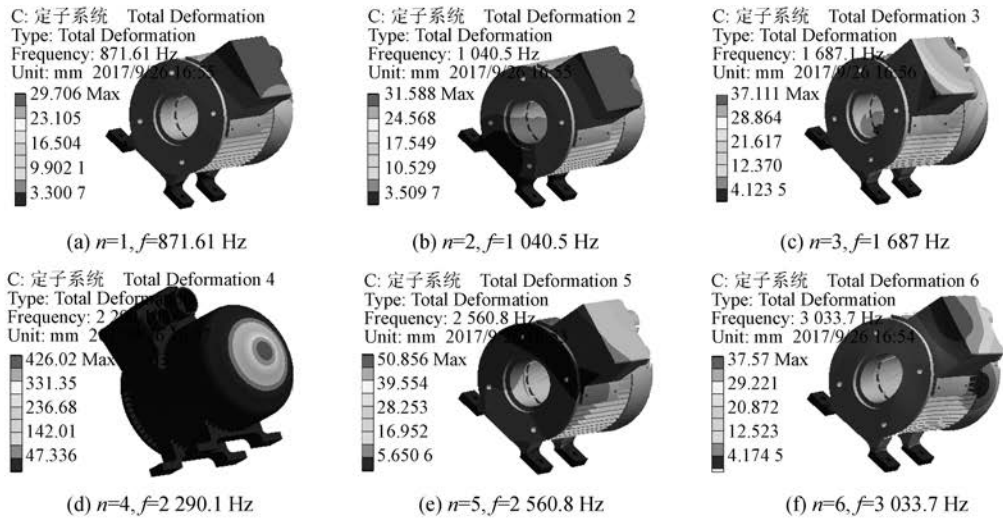


图 3 各阶频率振型位移云图

2 电机模态试验

在振动实验室对电机进行正弦振型扫描取样,用可变频率的正弦信号对电机进行激振,当激振力频率与电机固有频率重合时,电机会产生无阻尼谐振,因此,可以通过振动幅值近似得到电机固有频率,如图 4 所示。在电机定子系统上不同位置选取多个取样点,对电机进行不同方向和位置的正弦激振。对所得结果进行频谱分析,如图 5 所示。



图 4 电机试验

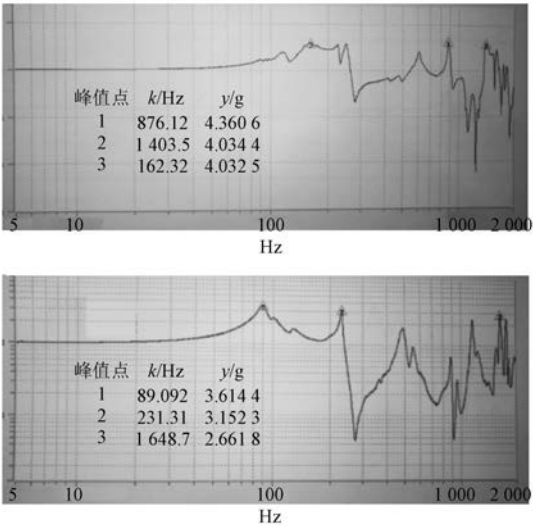


图 5 扫描频谱

下频率,通过改变不同的激振方向与激振点,通过多次试验测试,分析频谱图可以得到排除电机工装带来的影响后,频谱曲线始终在 876.12 Hz 和

因试验设备的局限性,只能测出 2 000 Hz 以

1 403.5 Hz 附近频率达到振动峰值,可以确定这两个值是电机的固有频率。将其与以上仿真结果进行对比,可以看出与电机仿真结果中第 2 阶与第 3 阶模态对应,如表 3 所示,误差在可接受范围之内。

表 3 试验结果与仿真结果对比

模态阶数	试验结果/Hz	仿真结果/Hz	误差/%
2	876.12	823	6.06
3	1 403.5	1 379	1.75

3 电机电磁力谐波仿真分析

本文所研究的电机是 1 台 4 极 15 槽的永磁直流无刷电机,其额定功率 $P=5.5\text{ kW}$ 、额定转速 $n=11\text{ 000 r/min}$ 、气隙宽度 $l=1\text{ mm}$ 、极对数 $p=2$ 、定子槽数 $Z=15$ 。利用 Ansoft 中的 RMXprt 模块对电机参数进行设置,并导入 Maxwell 2D 生成二维电机模型,如图 6 所示。

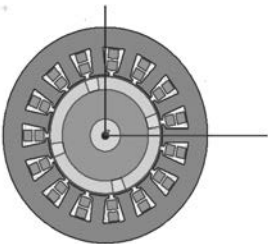


图 6 Maxwell 2D 电机模型

空载情况下,对电机的气隙磁密进行仿真运算,分别求得电机的径向气隙磁密和切向气隙磁密分布曲线,如图 7 所示。

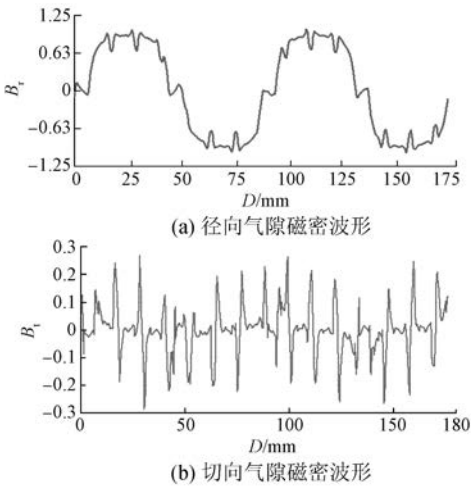


图 7 电机气隙磁密波形

由图 7 中的曲线可以清晰看出,相对于径向气隙磁密,切向气隙磁密的幅值很小,对电磁力的影响不大,所以在对电磁力分析计算时,将切向气隙磁密忽略不计,对径向电磁力密度进行仿真计算。其中,径向电磁力密度求解方程如下:

$$p_r = \frac{1}{2\mu_0} B_r^2 \tag{5}$$

式中: μ_0 ——空气磁导率;

B_r ——径向气隙磁密。

仿真可得径向电磁力密度波形如图 8 所示。利用 Maxwell 2D 自带的 FFT 处理器将所得波形曲形进行快速傅里叶分解,得到径向电磁力密度频谱如图 9 所示。

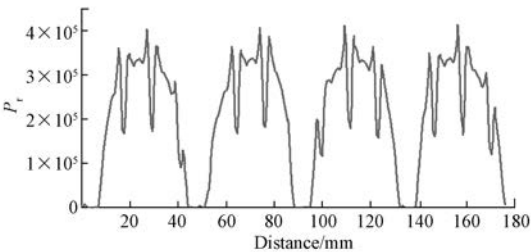


图 8 径向电磁力密度波形

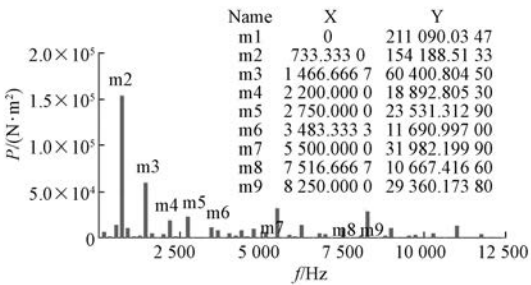


图 9 径向电磁力密度频谱

由分析可知,径向电磁力密度各次谐波中,幅值较大的谐波成分频率主要集中在 733、1 467、2 200、2 750、5 500 和 8 250 Hz 等。与电机固有频率相差较大,因此电磁力各次谐波不会引起电机定子系统的共振,避免了电机定子系统被电磁力波激振引起较大电磁噪声的问题,验证了电机结构设计的合理性。

4 结 语

本文在模态分析理论的基础上,对 1 台永磁无刷直流电机的定子系统进行模态分析,通过

Ansys 仿真结果与试验数据的对比,表明其误差在可接受范围内。Ansys 仿真软件可以比较可靠地对电机模态进行仿真模拟。

电机内部电磁力谐波如果激起电机定子系统共振,会引发较大噪声。将电磁力谐波频率与电机定子系统固有频率进行对比,两者各阶频率并不在共振频率范围之内,避免了电机电磁噪声的加剧,验证了电机结构设计的合理性。

【参考文献】

- [1] 诸自强,陈永校.电机定子固有频率及其模态的有限元法分析[J].电工技术学报,1987,2(4): 39-45.
- [2] 陈永校,诸自强,应善成.电机噪声的分析与控制[M].杭州:浙江大学出版社,1987.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] LONG S A, ZHU Z Q, HOWE D. Vibration

behaviour of stators of switched reluctance motors[J]. IEEE Proceedings of Electric Power Applications, 2001, 148(3): 257-264.

- [6] 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.
- [7] 孙剑波,詹琼华,黄进.开关磁阻电机的定子模态分析[J].中国电机工程学报,2005,25(22): 148-152.
- [8] 管兵.异步电机定子模态分析及定转子槽配合对其噪声的影响[J].电机与控制应用,2012,39(9): 43-47.
- [9] 史忠震,张卫,陈强,等.直流电动机定子有限元模态分析[J].微特电机,2014,42(5): 14-16.
- [10] VERDYCK D, BELMANS R, GEYSEN W, et al. Acoustic model for a permanent magnet machine: modal shape and magnetic forces [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994(6): 1625-1631.

收稿日期: 2018 -01 -03

(上接第 66 页)

该研究成果打破了国外相关技术垄断,填补了国内 LIM 轨道交通牵引传动领域的空白。

【参考文献】

- [1] 周建乐,韩志卫,张雄飞,等.直线电机车辆的技术创新现状及应用展望[C]//青岛:城市轨道交通管理和技术创新研讨会,2014: 79-94.
- [2] 阮毅,陈伯时.电力拖动自动控制系统[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [3] PUCCI M. State space-vector model of linear induction motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 2014, 50(1): 195-207.
- [4] 李永东.交流电机数字控制系统[M].北京:机械工业出版社,2012.
- [5] 王成元.现代电机控制技术[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [6] ACCETTA A, CIRINCIONE M, PUCCI M, et al. Neural sensorless control of Linear Induction Motors by a full-order Luenberger observer considering the end effect [J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 2014, 50(3): 1891-1904.
- [7] LIU J Q, LIN F, YANG Z P, et al. Field Oriented

Control of Linear Induction Motor Considering Attraction Force&End- Effects [C] // Proceeding of Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2006), 2006: 1-5.

- [8] 程宁子,李耀华,张瑞华,等.基于 CANopen 协议的城市轨道交通直线电机车辆通信网络研究与实现[J].城市轨道交通研究,2012,15(9): 67-71.
- [9] 陈振锋,钟彦儒,李洁,等.转子电阻变化对电力牵引感应电机起动转矩的影响[J].电工技术学报,2011,26(6): 12-17.
- [10] 王高林,杨荣峰,张家皖,等.一种感应电机转子时间常数 MRAS 的在线辨识方法[J].电工技术学报,2012,27(4): 48-53.
- [11] 樊扬,瞿文龙,陆海峰,等.基于转子磁链 q 轴分量的异步电机间接矢量控制转差频率校正[J].中国电机工程学报,2009,29(9): 62-66.
- [12] MAITI S, CHAKRABORTY C, HORI Y, et al. Model reference adaptive controller-based rotor resistance and speed estimation techniques for vector controlled induction motor drive utilizing reactive power [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(2): 594-601.

收稿日期: 2017 -09 -05