

基于有限元法的电动汽车永磁同步电机 模态分析*

席荣盛¹, 吴柏禧²

(1. 佛山市顺德区金泰德胜电机有限公司, 广东 佛山 528000;

2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 车用永磁同步电机(PMSM)追求轻量化的设计带来了更为严重的电机振动噪声危害。准确分析计算 PMSM 的模态是对其进行振动噪声特性研究的基础。采用有限元法对电动汽车 PMSM 进行模态仿真计算。通过对电机模型进行适当的简化与等效,计算出电机自由状态下前 6 阶的固有频率及其对应的振型;并将样机进行锤击法的模态试验,验证了电机有限元模态仿真模型的准确性。

关键词: 电动汽车; 永磁同步电机; 有限元法; 模态分析

中图分类号: TM 301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)09-0108-04

Modal Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Based on Finite Element Method*

XI Rongsheng¹, WU Boxi²

(1. Kinetek De Sheng Motor Company, Foshan 528000, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology,
Guangzhou 510640, China)

Abstract: The weight reduction design of vehicle permanent magnet synchronous motor (PMSM) brought about more serious vibration and noise of the motor. An accurate modal calculation was the basis for the study of the vibration and noise characteristics of PMSM. The finite element method was used to perform the modal simulation of the PMSM. Through the reasonable simplification and equivalence of the motor model, the first 6 orders natural frequencies and corresponding modes of the motor under the free state were calculated. After that, the accuracy of the finite element model was verified by the hammering modal experiment of the prototype.

Key words: electric vehicle; permanent magnet synchronous motor (PMSM); finite element method; modal analysis

0 引言

随着汽车工业的高速发展,能源紧缺与环境污染这两大世界级的难题也表现得越来越严重^[1-2]。在此严峻的形势下,全球许多国家都开始制定禁售传统燃油车的计划^[3]。我国也将电动汽车作为未来的一个重要发展方向。驱动电机作

为电动汽车的一个核心零部件,对其进行研发在国内外引起了高度关注。永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)由于体积小、功率密度高、效率高等优点,成为了电动汽车用驱动电机的首选。但是对于车用电机,体积紧凑、轻量化的要求日益提高,电机结构设计以轻、薄为主要目标,其刚度往往较差,容易产生较

* 基金项目: 广东省前沿与关键技术创新专项资金(重大科技专项)项目(2014B010126003);佛山市重大科技项目(应用型核心技术攻关领域)(2016AG10773)

作者简介: 席荣盛(1970—),男,工程师,研究方向为电机设计。

大的振动噪声,导致电机结果疲劳并严重影响到电机性能和可靠性^[4]。因此,在设计车用 PMSM 时进行电机的振动噪声特性研究尤为重要。模态分析是开展结构动力学特性分析的基础,是结构振动特性研究的基本。其计算所得的电机固有频率是研究电机振动噪声的重要参数指标。

电机的模态分析主要有 3 种方法:解析法、有限元法 (Finite Element Method, FEM) 和试验法^[5]。早期对于电机模态的研究主要依赖于解析计算,当电机的结构较为复杂时解析法的计算精度较低。FEM 提出后,因其能对不规则结构进行模态计算且计算精度较高而得以推广。文献[6]建立了 6 种三维有限元模型,系统地研究了电机绕组对定子铁心模态频率的影响。文献[7]通过细致地研究分析电机的有限元仿真模型,找到了电机机壳、端盖以及转子对电机结构模态影响的规律。为了检验有限元模态仿真模型的正确性,一般需要对电机进行模态试验。文献[8]分别利用振动台正弦激振和力锤冲击激振,对电机进行了振动模态特性试验分析,证明所分析的电机不会发生共振。然而通过试验测得电机的振型较难,需在电机表面布置大量的传感器,且 PMSM 结构复杂,振型难以通过试验测到。

本文采用 FEM 对 1 台额定功率 50 kW 的电动汽车驱动电机进行模态分析,仿真得到电机的固有频率及振型,并利用悬挂样机的锤击法对样机进行模态试验验证。同时,利用电机有限元模态计算及模态试验对电机的固有频率和振型进行分析。

1 PMSM 模态有限元分析

1.1 模型求解域的建立

本文研究的电动汽车用驱动电机为强制水冷型 PMSM,有限元模态仿真计算的求解域为电机整体,主要由前端盖、机壳、绕有铜线的定转子和后端盖等组成,如图 1 所示。

电机的机壳与端盖为铝合金制成,以保证电机的轻量化;轴采用中空设计,材料为 42CrMo;为了减少涡流损耗,铁心由薄硅钢片压制而成,其在轴向与切向的材料属性不同,呈各向异性;绕组由铜线绕制并嵌入到定子齿槽中,同样具有各向不同的材料属性。电机主要零部件的材料属性如表 1 所示。



图 1 永磁同步电机三维模型

表 1 电机主要零部件材料属性

部件名称	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
轴	7 850	2.1×10^{15}	0.28
机壳/端盖	2 660	7.0×10^{14}	0.32
永磁体	7 500	1.6×10^{15}	0.24
铁心	7 650	径向: 2.0×10^{15} 轴向: 1.5×10^{15}	0.27
绕组	6 298 (等效密度)	径向: 0.9×10^{14} 轴向: 1.4×10^{14}	0.30

电机零件众多且复杂,直接进行有限元计算将导致模型网格数量众多,而且零部件上小尺寸的特征会使网格出现畸变,严重影响到网格的质量,最终降低有限元模型的计算效率及计算精度。因此,在建立有限元模型前对电机三维模型进行简化。电机模态有限元仿真模型作了以下简化:(1)将线束绕组等效为实体;(2)将螺栓等紧固件删除,通过面与面装配来连接零件;(3)删除与电机模态无关的螺纹等特征;(4)删除接线盒等对电机模态影响很小的零部件,保留圆角、倒角等对电机结构强度影响较大的特征。简化后的电机求解域模型如图 2 所示。

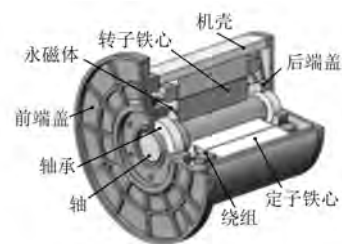


图 2 电机求解域模型

1.2 电机有限元模型的建立

将简化后的电机三维模型导入有限元仿真软件。先将各零部件进行适当切分,获得规则几何

形状后,进行网格划分。为提高模型网格质量,使用基于曲率(Curvature)的高级网格控制函数。该方法可以在模型的曲面上自动对网格加密,更好地体现出弯曲结构的特性。对于规则的几何形状,包括转子铁心、永磁体和驱动轴,做基于“扫掠”方法的网格划分,得到六面体网格。通过改变全局网格尺寸,对模型网格无关性进行验证后取模型最小单元尺寸为 2.0 mm,此时计算速度最快且不影响计算精度。电机网格模型划分如图 3 所示。最终模型网格节点数量为 283 702,单元数量为 107 069。因对电机进行自由状态下的模态计算,所以不施加任何约束。



图 3 电机网格划分模型

进行模态仿真计算时主要采用能量法,电机的动力学方程^[9]为

$$[M]\{\ddot{X}(t)\} + [C]\{\dot{X}(t)\} + [K]\{X(t)\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中:[M]——质量矩阵;

{X(t)}——位移矢量;

[C]——阻尼矩阵;

[K]——刚度矩阵;

{F(t)}——外力。

计算电机的固有频率时,电机模型在自然状态,即 $F(t) = 0$,同时为了获得固有频率及振型,忽略阻尼矩阵,计算方程如下^[9]:

$$[M]\{\ddot{X}(t)\} + [K]\{X(t)\} = \{0\} \quad (2)$$

1.3 有限元分析结果

利用有限元仿真软件对 PMSM 整机的固有频率及振型进行计算。因为对电机振动特性产生影响的主要是其低阶的固有频率,因此考虑电机低阶固有频率即可。当电机的最高运行频率低于电机结构的 1 阶固有频率,也就是电机运行转速低于其临界转速时,电机在正常运行状况下不会发生共振现象。对自由状态下的电机进行模态计算,提取前 6 阶的固有频率及其对应的振型。电

机前 6 阶的固有频率如表 2 所示,最低频率为 1 219 Hz。本文研究的 PMSM 的极对数为 4 对极,最高转速为 6 000 r/min,即最高工作频率远低于电机 1 阶固有频率 1 219 Hz,因此根据仿真结果该电机结构不会发生共振。

表 2 电机固有频率有限元计算结果

阶数	固有频率值/Hz	阶数	固有频率值/Hz
1	1 219	4	2 247
2	1 612	5	3 080
3	1 614	6	3 090

有限元仿真计算得到的前 6 阶电机振型如图 4 所示。

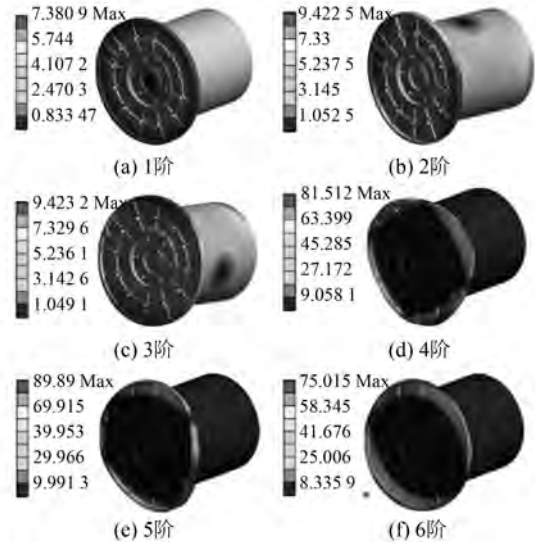


图 4 电机振型有限元计算结果

因电机主体结构关于轴对称,因此在第 2、3 阶和第 5、6 阶时,其固有频率值相似,振型也几乎相同。通过电机的振型分析可以看到,电机发生 1 阶共振时主要为轴向形变,2、3 阶共振时主要为电机整体产生 1 阶扭转变形,4、5、6 阶共振时主要为电机前端盖的 2 阶扭曲变形。随着共振频率的增高,电机的振型越来越复杂,并且该电机主要发生形变的部位为前端盖,可以对前端盖结构进行加强以减少电机振动带来的风险。

2 PMSM 锤击法模态试验

为验证电机有限元模态计算的可靠性,对样机进行模态试验分析。试验采用悬挂样机的锤击法。

2.1 模态试验平台

试验时待测样机应处于自由状态,即样机不应该与地面接触,使用弹性绳将样机吊起,保证其没有额外的阻尼与附加质量。以带有传感器的力锤敲击样机作为激励源,通过紧贴于样机表面的加速度传感器来收集信号。试验使用 BBM-PAK 系统进行振动特性测试。该系统包括数字采集仪、数据线、便携式计算机和三向加速传感器等,配合 PAK 软件进行数据分析。电机模态试验平台如图 5 所示。

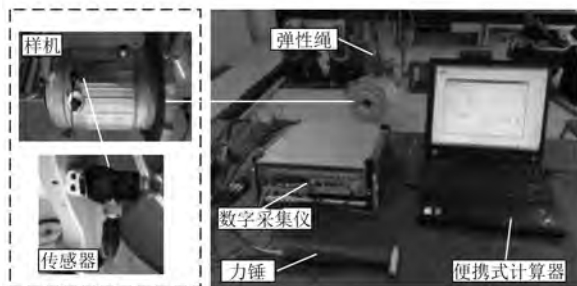


图 5 电机模态试验平台

试验时先将电机悬置,再参照电机有限元仿真振型在样机非节点处安装三向加速度传感器,连接好线路后打开 PAK 软件进入到试验模块。待系统开始测试后,在样机表面的标记位置使用力锤进行敲击,锤头垂直于电机表面并使用适当的锤击力度,然后对数据信号进行采集并分析。因为电机结构复杂,由多个零部件装配而成,敲击时内部零部件的相互碰撞会给试验结果带来干扰,因此需要多次更换样机表面的敲击位置,进行多次试验并对数据进行相干性分析计算,以保证试验结果的准确性。

2.2 模态试验结果分析

选取激励出较全的电机固有频率的试验数据,试验数据频谱图如图 6 所示。

图 6 中 3 条曲线分别为 X、Y、Z 3 个方向的传递函数幅值,出现明显波峰处为电机的固有频率。所得电机前几阶次的固有频率分别为 1 265、1 595、2 233 Hz。对比固有频率仿真数据与试验测得的数据,如表 3 所示。

可以看到,仿真与试验数据的误差在 0.6% ~ 3.6%,试验结果与仿真结果基本一致,证明了所建立的电机有限元模态仿真模型是符合实际的,

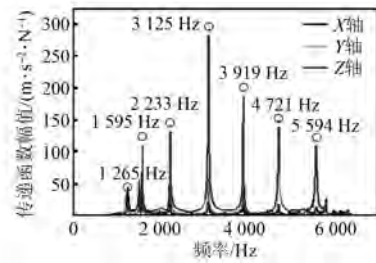


图 6 电机模态测试试验数据

电机在其工作转速内不会发生共振现象的结论成立,电机结构安全。

表 3 电机固有频率有限元仿真数据与试验对比

阶数	仿真值/Hz	试验值/Hz	误差/%
1	1 219	1 265	3.6
2	1 612		1.1
3	1 614	1 595	1.2
4	2 247	2 233	0.6
5	3 080		1.4
6	3 090	3 125	1.1

3 结 语

为了分析车用 PMSM 的振动特性,本文对一台额定功率为 50 kW 的电机进行模态分析。建立了电机模态有限元仿真模型,计算得到电机的固有频率及振型,并对样机进行锤击法模态试验,验证了仿真模型的准确性。主要结论如下:

(1) 对电机进行有限元模态分析,计算得到电机 1 阶固有频率为 1 219 Hz。通过对电机振型进行分析,判断电机前端盖为结构的薄弱位置,建议进行加强。

(2) 试验测得电机的固有频率与仿真计算值误差在 0.6% ~ 3.6%,验证了仿真的准确性。电机 1 阶固有频率为 1 265 Hz,远大于电机最高运行频率 400 Hz,电机在其工作转速内不会发生共振现象。

【参考文献】

- [1] WAN Z, SPERLING D, WANG Y. China's electric car frustrations [J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2015, 34(1): 116-121.

(下转第 131 页)

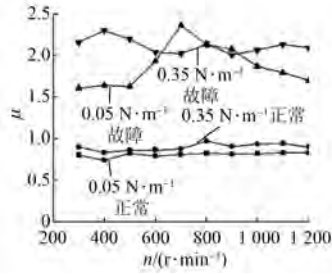


图9 特征量转速鲁棒性试验验证

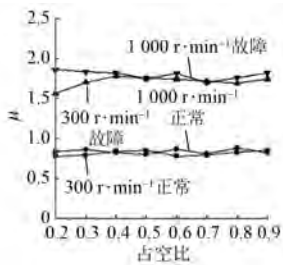


图10 特征量负载鲁棒性试验验证

5 结 语

本文以 100 W 三相 12/8 型 SRD 为研究对象,将适用于该种电机的不对称半桥功率变换器的故障类型进行分类讨论,归纳整理出 4 种功率开关器件的故障类型,并采用 DWT 方法提取相关相电流的平均值与标准差的比值作为故障诊断特征量,然后通过建立 Simulink 仿真模型和设计试验来验证所提取的特征量具有良好的诊断特性,从而证实了本文提出的基于小波变换的故障诊断方法的有效性。

【参考文献】

- [1] GOPALAKRISHNAN S, OMEKANDA A M, LEQUESNE B. Classification and remediation of electrical faults in the switched reluctance drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42 (2): 479-486.
- [2] 卢胜利.开关磁阻电机故障诊断研究 [D].徐州:中国矿业大学,2010.
- [3] WANG W. Fault tolerant operation of switched reluctance machine [D]. Dallas: The University of Texas, 2013.
- [4] 张晓文,杨煜普,许晓鸣.基于小波变换的特征构造与选择 [J].计算机工程与应用,2003,39(19): 25-28.
- [5] GAMEIRO N S, CARDOSO A J M. A new method for power converter fault diagnosis in SRM drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (2): 653-662.
- [6] 严利.基于 MATLAB/Simulink 开关磁阻电机非线性建模方法研究与实践 [D].南京:南京航空航天大学,2005.
- [7] 杨福生.小波变换的工程分析与应用 [M].北京:科学出版社,1999.
- [8] 刘涛,曾祥利,曾军.实用小波分析入门 [M].北京:国防工业出版社,2001.
- [9] 于志伟,苏宝库,曾鸣.小波包分析技术在大型电机转子故障诊断系统中的应用 [J].中国电机工程学报,2005,25(22): 158-162.
- [10] 赵刚,周波.基于小波包分析的双凸极无刷直流发电机系统故障诊断 [J].中国电机工程学报,2008, 28(8): 121-126.
- [11] 魏云冰.小波变换在电机故障诊断与测试中的应用研究 [D].杭州:浙江大学,2002.

收稿日期: 2018-02-25

(上接第 111 页)

- [2] 石华.我国 2015 年进口原油 3.34 亿 t [J].石油库与加油站,2016,25(1): 22.
- [3] 多国公布禁售燃油车时间表 [J].汽车维修,2017 (9): 48.
- [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] 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): 53-59.

- [6] 王天煜,王凤翔.大型异步电动机定子振动与模态分析 [J].中国电机工程学报,2007,27(12): 41-45.
- [7] 代颖.电动汽车驱动用感应电机的电磁噪声研究 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- [8] 闫兵,李伟,雷应锋,等.起动电机模态特性试验分析 [J].机械设计与制造,2012(6): 199-201.
- [9] 田东.高速永磁电机转子动力学特性分析 [D].沈阳:沈阳工业大学,2016.

收稿日期: 2018-04-25