

车用电机的有限元模态分析

代颖¹, 崔淑梅², 宋立伟²

(1. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海市 宝山区 200072;

2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

Finite Element Method Modal Analysis of Driving Motor for Electric Vehicle

DAI Ying¹, CUI Shumei², SONG Liwei²

(1. School of Mechatronics and Automation, Shanghai University, Baoshan District, Shanghai 200072, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: Modal analysis is a technology for vibration characteristic research. It is the foundation for the structural dynamics analysis. Natural frequency is a very important performance in structural dynamics analysis. Modal characteristics of the electric vehicle (EV) driving motor were investigated by finite element method (FEM). FEM models for modal analysis were built for the stator winding, shell, end shield, rotor and shaft by appropriate structure simplification. The influences on natural frequencies of the motor were analyzed. Natural frequencies and mode shapes were simulated by FEM. The accuracy of the FEM analysis is validated by the modal analysis experiment of hammering method and the no-load noise spectrum analysis.

KEY WORDS: electric vehicle (EV); driving motor; modal; frequency spectrum analysis

摘要: 模态分析是一种确定结构振动特性的技术, 是结构运动学的分析基础, 固有频率是结构动力学特性分析中的重要指标。采用有限元法对电动汽车驱动用电机进行模态分析, 通过对电机结构进行适当假设和等效, 建立电机结构定子绕组、机壳、端盖以及转子和轴的模态有限元仿真模型, 分析各结构部件对电机固有频率的影响。通过有限元仿真得到电机结构径向各阶模态的固有频率和模态振型, 并通过锤击法模态实验和电机空载噪声频谱验证了有限元分析的准确性。

关键词: 电动汽车; 驱动电机; 模态; 频谱分析

0 引言

振动噪声是导致电机疲劳、缩短电机寿命的主要因素, 是衡量电机设计好坏的重要技术指标。在

能源以及环境污染问题日趋严峻的形势下, 电动汽车的研发引起了世界各国的高度关注。为提高电动汽车的市场竞争力, 抢占环保产业的发展先机, 电动汽车驱动用电机在设计上采取高密度、宽调速、轻量化和低成本的设计方案, 导致电机结构复杂、轻薄、刚度难以提高, 电磁噪声的抑制难度较大^[1-3]。

作用于电机定子结构上的各次径向电磁力波和定子结构的各阶径向模态是决定电磁振动和电磁噪声的 2 个关键因素^[4]。为有效抑制电磁振动和电磁噪声, 必须确保电机调速范围内电机结构的各阶模态频率远高于相应次数电磁力波的最高频率。准确预测电机结构的各阶模态频率是抑制电磁振动和电磁噪声的前提^[5-6]。

有限元法(finite element method, FEM)能够考虑结构的不规则性, 计算精度较高^[7], 本文采用有限元法对一台调速范围内存在较大电磁噪声的电动汽车驱动用异步电机进行有限元模态分析, 样机的技术指标如表 1 所示。

表 1 解放牌混合动力主驱动异步电机技术指标
Tab. 1 Qualifications of the induction motor for electric vehicle drives

参数	数值
相数/极数	3/4
额定功率/峰值功率/kW	40/80
定子/转子槽数	36/34
额定电压/V	220
额定转速/峰值转速/(r/min)	3 600/6 000
冷却方式	定子水冷

1 电动汽车驱动用电机的有限元模态分析

1.1 电机结构固有模态的有限元模型

本文依次建立样机定子铁心、铁心与绕组、定

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2005AA501530)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2005AA501530).

子结构和整个电机 4 种结构的三维有限元仿真模型，通过对 4 种结构的有限元模态仿真，分析结构部件对电机结构模态频率的影响。

电动汽车驱动用电机的电磁负荷高，一般采用水冷的冷却方式，电机的水冷机壳与定子铁心采用过盈配合紧密接触^[8]。为简化分析，本文在建立车用电机结构的模态有限元仿真模型时作如下处理：

1) 假设电机结构部件之间配合紧密；2) 忽略对结构刚度影响很小的小孔和倒角。

绕组对电机模态频率的影响一直是电机模态分析中的难点，原因是：1) 绕组端部形状复杂，建模难度大；2) 绕组的弹性模量等力学参数受槽满率和浸漆工艺影响较大，模态仿真参数难以确定。为了简化分析，早期研究一般将绕组作为定子铁心的附加质量来考虑绕组对电机模态的影响。随着研究的不断深入，人们发现与定子铁心紧密接触的绕组对电机模态的影响不仅是附加质量作用，还有刚度效应^[9-10]。M. Benbouzid 等研究指出与铁心紧密接触的绕组将使定子结构的固有频率明显提高^[10]。

实际绕组端部形状复杂，难以产生质量较好的有限元剖分网格，需要对槽内和端部绕组进行合理简化，本文在建立绕组模型时所做简化如下：1) 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；2) 绕组密度按估算绕组中铜线、绝缘材料和气隙所占比例等效。

通过对样机进行以上假设和等效，得到样机结构的模态有限元仿真模型如图 1 所示，其中铁心与绕组的模态有限元仿真模型如图 2 所示。铜线与铜条相比，X、Y 方向弹性模量将明显下降，本文绕组的弹性模量取值参考文献^[11]，样机的模态有限元仿真参数如表 2 所示。

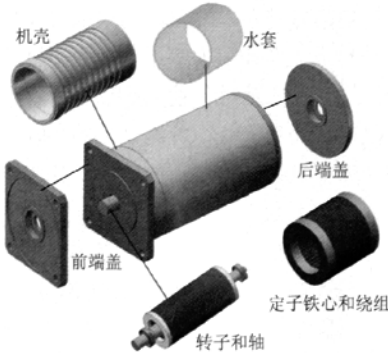


图 1 电机结构的有限元模态分析模型
Fig. 1 FEM model of motor structure

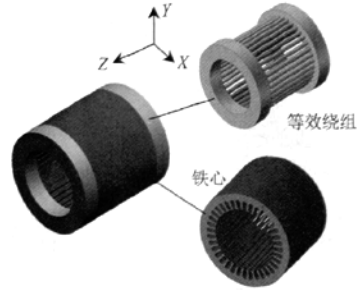


图 2 铁心与绕组的有限元模态仿真模型
Fig. 2 FEM model of steel core-winding structure

表 2 模态有限元仿真的材料力学参数

Tab. 2 Material parameters of modal analysis

结构部件	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m ³)
铁心	205	0.27	7 305
机壳/端盖	70	0.33	2 800
定子槽内绕组	$E_x=E_y=1.2, E_z=120$	0.30	5 454
定子端部绕组	$E_x=E_y=1.2, E_z=120$	0.30	6 223
导条和端环	108	0.34	8 900
转轴	206	0.30	7 800

本文采用 Ansys 有限元仿真软件，选择 solid45 结构分析单元仿真电机 4 种结构模型在自由无约束条件下的模态频率，图 3 所示为样机模态有限元仿真模型的网格剖分图。

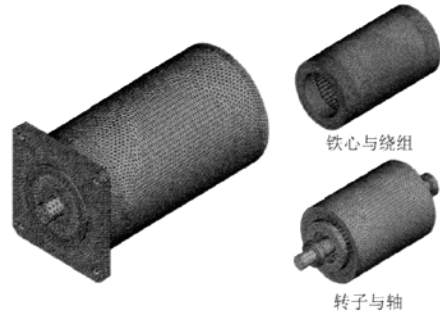


图 3 电机结构部件的有限元剖分网格
Fig. 3 FEM mesh of motor structure

1.2 有限元分析结果

4 种结构模态频率的有限元分析结果如表 3 所示。由表 3 可知，电机结构的 2 阶模态频率较低，容易在车用电机调速范围内发生电磁共振。

表 3 样机模态频率的有限元分析结果

Tab. 3 Modal frequency results for the sample motor Hz

仿真模型	模态频率			
	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶
定子铁心	1 106	2 865	5 111	7 479
铁心与绕组	1 169	3 204	5 728	8 476
定子结构	1 772	4 240	7 179	10 224
整个电机	1 466	3 800	6 350	9 671

定子绕组、机壳端盖和转子结构使电机结构各阶模态频率产生的相对变化率如图 4 所示。由图 4

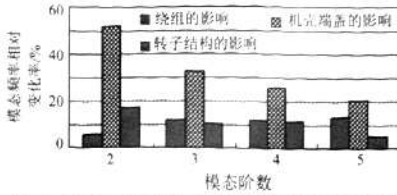


图4 电机结构部件引起的模态频率变化率
Fig. 4 Modal frequencies relative variable ratio of motor components

可知,各结构部件均对样机结构径向各阶模态频率产生一定的影响,尤其是机壳和端盖对样机结构各阶模态频率的影响较大;因此,为准确预测车用电机结构的模态频率,建立完整的电机结构有限元仿真模型是必要的。

图5为样机各阶径向模态振型,左为电机结构振型的整体视图,右为电机结构振型的铁心视图。



图5 电机结构模态振型的有限元仿真结果
Fig. 5 FEM results of mode shapes for the motor

2 样机的锤击法模态试验

为验证电机结构有限元模态分析的正确性,本文采用南京安正软件公司的CRAS信号分析系统对样机结构的进行锤击法模态测试。为获得与有限元模态仿真一致的边界约束条件,将被测样机放置于弹性塑胶垫上^[12]。图6所示为样机模态测试的示意图。图7为实验样机照片。

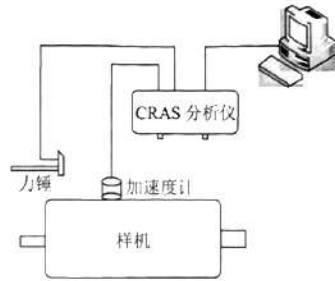


图6 样机模态测试示意图

Fig. 6 Modal test sketch of sample motor

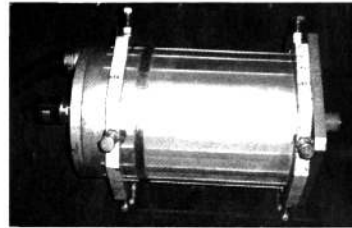


图7 实验样机照片

Fig. 7 Picture of sample motor

在样机机身中间部位沿周向选择40个激振点,对每个激振点进行敲击,锤击时使锤头垂直电机表面敲击,采取适当的锤击力度,尽量使敲击信号接近脉冲信号^[13]。

由于人工敲击很难保证敲击的力度和位置,为了提高加速度信号与力锤信号的相关性,减小干扰信号造成的误差,采取同一点多次敲击并对传递函数取平均值的方法,保证分析结果的可靠性^[13-14]。

通过与加速度计和力锤连接的传感器,将每个激振力信号和响应信号传输到CRAS信号分析系统中进行分析、处理,获得各测试点的频响函数。

图8为样机某一测试点的频响函数曲线,虚部峰值对应的频率为1400 Hz,与样机结构2阶径向模态的有限元分析结果(1466 Hz)基本一致。

由于锤击法模态试验的激振力频率范围不易控制,且电机结构存在结构阻尼,对于高频模态不易激发出来^[15],本文锤击法模态测试得到的模态振型只有2阶模态。

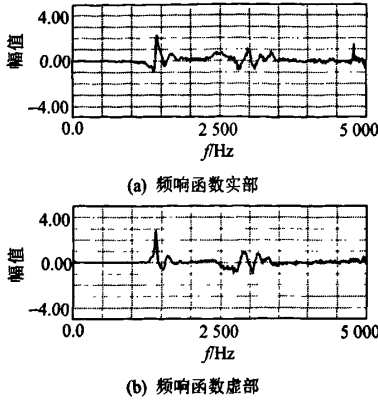


图 8 样机的频响函数

Fig. 8 Frequency response function of sample motor

3 样机的空载噪声频谱分析

车用电机调速范围较宽，发生电磁共振的可能性很大。当作用于电机结构的某次电磁力波频率接近或等于电机结构相应阶次的固有频率时，电机将辐射较大的电磁噪声，因此通过对电磁噪声的频谱分析可以间接地证明电机结构固有频率分析结果的正确性^[16-17]。

异步电机可能存在的电磁力波次数^[18]为

$$r = p(\mu_i \pm \lambda_j) \quad (1)$$

式中： μ_i 为定子磁场产生的气隙磁密谐波次数； λ_j 为转子感应磁场产生的气隙磁密谐波次数； p 为电机极对数。

电磁力波的频率为

$$f_r = \begin{cases} f_1[kS_2(1-s)/p + 2], & (\Gamma_1) \\ f_1[kS_2(1-s)/p], & (\Gamma_2) \end{cases} \quad (2)$$

式中： f_1 为基频； k 为正整数； S_2 为转子槽数； s 为转差； Γ_1 表示力波旋转方向与磁密基波方向相同； Γ_2 表示力波旋转方向与磁密基波方向相反。

分析 36/34 槽配合异步电机的电磁力波可知，定子磁场 17 次齿磁密谐波与转子感应磁场的 16 次气隙磁密谐波互相作用产生 2 次电磁力波，定子磁场 35 次和 37 次齿谐波磁密与转子感应磁场的 33 次和 35 次气隙磁密谐波互相作用产生 4 次电磁力波。

测试样机的空载噪声特性，电机置于弹性橡胶垫上^[19]，采用 BK 声级计测试样机在 6000 r/min 以下 18 个不同转速工作点的空载噪声，样机的空载噪声特性曲线如图 9 所示。

在样机噪声测试过程中发现，电机在转速 $n = 2\,600$ r/min 附近噪声明显增大，表现为刺耳的啸叫声。随着转速的进一步增大，啸叫声明显减小，在

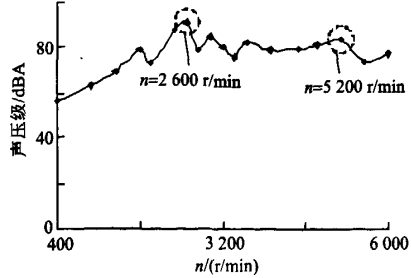


图 9 样机的空载噪声特性曲线

Fig. 9 No-load noise characteristics of the sample motor
转速接近 5 200 r/min 时电机振动加剧，噪声增大。

异步电机空载时转差接近于 0，由式(2)可知作用于电机结构的 2 次电磁力波在转速为 2 600 和 5 200 r/min 下的力波频率分别为 1 473.3 和 2 946.7 Hz；4 次电磁力波在转速 5 200 r/min 下的力波频率为 5 893.3 Hz。

对样机各转速工作点的噪声进行频谱分析，样机转速分别为 2 600、5 200 r/min 时的空载噪声频谱如图 10、11。 $n = 2\,600$ r/min 的噪声频谱中峰值声压对应的频率为 1 477 Hz， $n = 5\,200$ r/min 的噪声频谱中 2 个峰值声压对应的频率分别为 2 942 和 5 896 Hz，与两个转速下 2 次和 4 次电磁力波的频率基本一致。依次对各转速的空载噪声频谱进行分析，得到 2 次和 4 次电磁力波产生的噪声声压随电机转速的变化曲线，如图 12。2 次和 4 次力波分量引起的电磁噪声声压分别在转速为 2 600 和 5 200 r/min 时达到最大。电机结构在这两个转速点发生电磁共振，

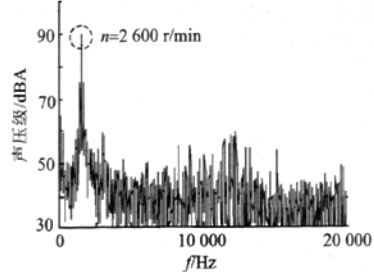


图 10 样机空载噪声特性曲线($n = 2\,600$ r/min)

Fig. 10 No-load noise spectra at the speed of 2 600 r/min

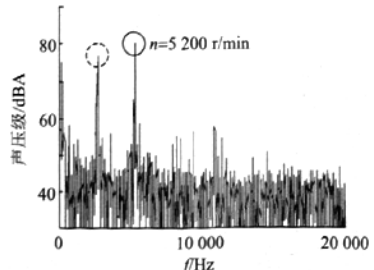


图 11 样机空载噪声特性曲线($n = 5\,200$ r/min)

Fig. 11 No-load noise spectra at the speed of 5 200 r/min

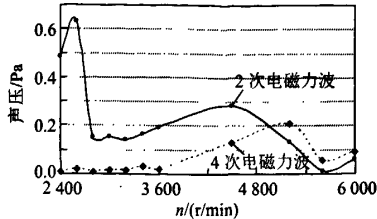


图12 电磁噪声声压-转速变化曲线

Fig. 12 Sound pressure-speed variation curves produced by 2nd and 4th electromagnetic forces

辐射较大的电磁噪声,由此推知,电机结构的2阶和4阶固有频率分别近似为1473.3和5893.3 Hz,与电机结构有限元模态分析结果基本一致,从而间接证明了电机结构固有频率理论分析的正确性。

4 结论

本文以一台调速范围内存在电磁共振的电动汽车驱动用电机为研究对象,建立电机结构各部件的3维有限元仿真模型,经分析和实验得出以下结论:

- 1) 利用本文提出的电机结构模态分析的绕组简化模型可以准确预测车用电机结构的固有频率;
- 2) 对于结构复杂的车用电机而言,很多模态振型难以通过锤击法模态实验获得,本文采用噪声频谱测试与电磁力波分析相结合的方法间接验证了电机结构固有频率预测的正确性。

参考文献

- [1] Grabner C. Design impacts to the acoustic noise emission of a converter driven squirrel cage induction motor[C]/International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motiron. Ischia, Italy: IEEE, 2008: 711-716.
- [2] Kim U, Lieu D K. Effects of magnetically induced vibration force in brushless permanent-magnet motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(6): 2164-2172.
- [3] 祝长生, 陈永校. 变频器供电的三相异步电机的噪声特性[J]. 中小型电机, 1997, 24(5): 9-12.
Zhu Changsheng, Chen Yongxiao. Noise characteristics of the asynchronous machines fed by inverters[J]. S & M Electric Machines, 1997, 24(5): 9-12(in Chinese).
- [4] 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: 21-89.
Chen Yongxiao, Zhu Ziqiang, Ying Shancheng. Analysis and control of motor noise[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1987: 21-89(in Chinese).
- [5] 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.
Wang Tianyu, Wang Fengxiang. Vibration and modal analysis of stator of large induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(12): 41-45(in Chinese).
- [6] Mori D, Ishikawa T. Force and vibration analysis of induction motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5): 1948-1951.
- [7] 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.
Sun Jianbo, Zhan Qionghua, Huang Jin. Modal analysis of stator vibration for switched reluctance motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 148-152(in Chinese).
- [8] Jeongmin K, Namdo K, Sungtae C, et al. Motor-generator control of an electro-mechanical variable transmission for a hybrid electric vehicle[C]/SICE-ICASE International Joint Conference. Busan, Korea: IEEE, 2006: 2420-2423.
- [9] Tetsuya H, Katsuyuki N, Takashi Y, et al. Modeling method of vibration analysis model for permanent magnet motor using finite element analysis[C]/International Conference on Electrical Machines and Systems. Tokyo, Japan: IEEE, 2009: 1-6.
- [10] Benbouzid M E H, Reyne G, Derou S, et al. Finite element modeling of a synchronous machine: electromagnetic forces and mode shapes [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(2): 2014-2018.
- [11] Long S A, Zhu Z Q, David H. Vibration behaviour of stators of switched reluctance motors[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2001, 148(3): 257-264.
- [12] 沃德·海伦, 斯蒂芬·拉门兹, 波尔·萨斯. 模态分析理论与试验[M]. 白化同, 郭继忠, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 2001: 1-45.
Heylen W, Stefan L, Bohr S. Modal analysis theory and testing [M]. Bai Huatong, Guo Jizhong, Translated. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2001: 1-45(in Chinese).
- [13] 李德葆, 陆秋海. 工程振动实验分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 5-15.
Li Debao, Lu Qiu Hai. Analysis experiments in engineering vibration [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 5-15(in Chinese).
- [14] 黄捷, 李忠, 段虎明, 等. 机械结构实验模态分析及典型应用[J]. 中国测试, 2010, 36(2): 4-8.
Huang Jie, Ji Zhong, Duan Huming, et al. Experimental modal analysis of mechanical structure and typical applications[J]. China Measurement & Test, 2010, 36(2): 4-8(in Chinese).
- [15] 曹树谦, 张文德, 萧龙翔. 振动结构模态分析-理论、实验与应用[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001: 232-234.
Cao Shuqian, Zhang Wende, Xiao Longxiang. Modal analysis of vibration-Theory, experiment and application[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001: 232-234(in Chinese).
- [16] Hirotsuka I, Niwa Y, Tsuboi K, et al. Experimental study of radial distributions of electromagnetic vibration and noise in three-phase squirrel-cage induction motor at no-load[C]/International Conference on Electrical Machines and Systems. Wuhan, China: IEEE, 2008: 64-68.
- [17] Yoon T Y. Magnetically induced vibration in a permanent-magnet brushless DC motor with symmetric pole-slot configuration[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(6): 2173-2179.
- [18] Timar P L. Noise and vibration of electrical machines [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989: 30-46.
- [19] 中国国家标准化管理委员会. GB10069.1-88 旋转电机噪声测定方法及限值噪声工程测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.



代颖

收稿日期: 2010-11-09.

作者简介:

代颖(1980), 女, 讲师, 研究领域为电机的振动噪声, 车用电机的设计与分析, 电机的多物理场分析, ying.dai@shu.edu.cn;

崔淑梅(1964), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电动汽车、汽车电子与计算, 电机驱动与控制, 电机的参数辨识与智能测试, cuisu@hit.edu.cn;

宋立伟(1970), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为直线推进系统, 有限数量复杂工况电驱动系统的驱动电机研究, song_lw@hit.edu.cn.

(编辑 李婧妍)