

车用永磁同步电机定子模态分析

张 未, 吴文江, 张交青

(石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:针对电动汽车运行过程中产生的振动噪声问题,以某车用永磁同步电机为研究对象,运用 Ansys Maxwell 软件分析电机气隙磁密,得到电机运行的气隙磁场和径向电磁力,再对永磁同步电机的定子进行模态分析,得到定子系统的固有频率,同时采用锤击法结合 LMS 软件进行模态试验,将有限元仿真和模态试验数据进行对比,验证有限元模态分析的准确性。结果表明,该永磁同步电机的定子结构模态频率和径向电磁力波频率有较大的差异,不会由于电机径向电磁力而产生共振,这项工作为解决电机振动噪声问题和优化汽车 NVH 性能提供了参考。

关键词:永磁同步电机;定子;有限元法;模态试验

中图分类号:TM341 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2022)01-0076-05

0 引言

随着市场的竞争和客户的反馈,电机 NVH 性能成为一项重要指标,具有低振动和低噪声的永磁同步电机更受人青睐^[1-3],振动和噪声影响着电机的寿命、输出性能和乘坐者的舒适性^[4],因此需要在设计阶段尽量避免电机发生共振,电机定子模态分析成为了其中一个研究手段。

文献[5]建立了永磁同步电机的径向电磁力解析表达式,研究了电机电磁力和振动的关系,并且利用有限元模型分析定子结构参数对振动的影响。文献[6]通过有限元软件对定子总成的模态进行了仿真,研究其结构动力学特性。文献[7]基于有限元模型研究了定子各结构参数对固有频率变化的影响。文献[8]采用机电类比推导出定子固有频率解析式并且建立有限元模型,计算出了固有频率以及振型。文献[9]施加电磁脉冲获得电磁振动频率,然后通过模态试验求得电机固有频率,再将两者对比来判断电机是否共振,虽然实验方法准确但较为繁琐,在电机设计初期阶段预测电机振动情况不太合适。

国内文献大多利用有限元仿真软件计算定子固有频率和振型,并且锤击实验只出几个模态阶数,没有利用锤击实验生成振型图像。本文以某车用永磁同步电机为研究对象,采用 LMS Test, Lab 17 软件分析处理数据,可以精确得到定子的固有频率及对应振型,而且利用直接影响电机径向电磁力的径向磁密进行分析,更易直观看到永磁同步电机的定子结构模态频率与径向电磁力波频率的关系,试验和仿真的一致性也为永磁同步电机的优化设计提供了简单方法和依据。

1 数学建模

1.1 径向电磁力理论分析

由电机学理论知识,忽略铁芯磁阻饱和影响,得永磁同步电机的磁密为^[10]

$$b(\theta, t) = f(\theta, t)\lambda(\theta, t) \quad (1)$$

式中, $f(\theta, t)$ 为气隙磁势; $\lambda(\theta, t)$ 为气隙磁导。

永磁同步电机的径向电磁力和切向电磁力是导致电机产生振动噪声的主要原因之一,切向电磁力相对于径向电磁力太小,所以忽略不计,由麦克斯韦定律可以得到电机的径向电磁力表达式为

收稿日期:2021-09-22 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20210202

基金项目:河北省自然科学基金(E2017210166)

作者简介:张未(1998—),男,硕士研究生,研究方向为车辆工程。E-mail:1287660255@qq.com

张未,吴文江,张交青.车用永磁同步电机定子模态分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2022,35(1):76-80.

$$p_r(\theta, t) = \frac{b_r^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (2)$$

式中, $p_r(\theta, t)$ 为径向电磁力; μ_0 为空气磁导率; $b_r(\theta, t)$ 为径向磁密。

从式(2)可以看出, 永磁同步电机的径向电磁力大小直接受气隙磁密影响, 所以可以通过判断气隙磁密的分布情况分析电机的振动噪声。

1.2 电机定子结构模态分析

根据 Hamilton 原理把定子看作线性的自由振动系统, 可以得到电机结构的动力学方程为^[10-11]

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (3)$$

式中, $[M]$ 为质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $\{\ddot{x}\}$ 为加速度矢量; $\{\dot{x}\}$ 为速度矢量; $\{x\}$ 为位移矢量。

当永磁同步电机定子系统不涉及阻尼时, 式(3)简化为

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (4)$$

式(4)的解可以表示为

$$\{x\} = \{X\}e^{j\omega t} \quad (5)$$

把通解(5)代入式(4)可得

$$([K] - \omega^2[M])\{X\} = 0 \quad (6)$$

式(6)中方程的数值以及特征值向量分别代表定子系统的固有频率和模态振型。

2 电机定子的模态分析

研究对象为某车用 8 极 48 槽永磁同步电机, 电机的定子主要由机壳、绕组和铁芯构成, 在不影响结构模态的前提下, 可以对电机定子进行合适的简化等效, 对结构模态影响较小的倒角和小孔等进行适当的忽略, 如图 1 所示为电机的求解域截面有限元模型, 电机的基本参数如表 1 所示。

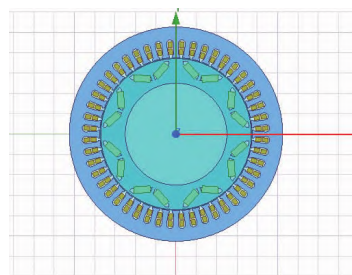


图 1 电机求解域模型

表 1 电机的基本参数

额定功率/kW	额定电压/V	额定转矩/(N·m)	额定转速/(r·min ⁻¹)	磁极数/个	定子槽数/个	定子外径/mm	定子内径/mm	气隙长度/mm	永磁体材料
60	220	120	3 600	8	48	105	75	1.5	N38UH

2.1 有限元计算结果

由式(2)可知, 永磁同步电机的径向电磁力大小和气隙磁密相关, 所以可以利用有限元软件判断气隙磁密的分布情况。在建立有限元模型的基础上, 采用有限元计算仿真可以得到电机的气隙磁密分布图如图 2 所示。

把定子气隙磁密图进行 FFT 变换计算, 可得到各阶电磁力谐波频率和幅值如图 3 所示。

由图 3 计算可得表 2 的电磁力波频率, 由于随着频率增大振幅越来越小, 因此只分析低阶模态。

表 2 电磁力波频率

电磁力波阶数	电磁力波频率/Hz
2	100
3	150
4	200
5	250

由表 2 和图 3 分析可知, 永磁同步电机在 2 次和 4 次

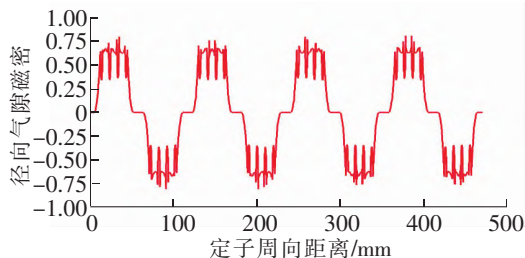


图 2 定子气隙磁密分布图

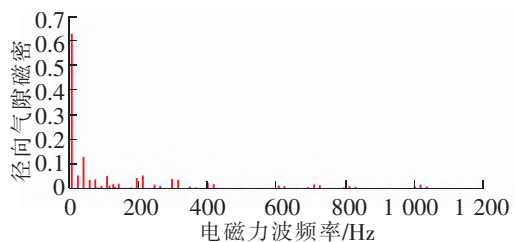


图 3 电磁力谐波频率和幅值

的电磁力波容易造成电机产生较大的振动噪声,因此结构设计时应该避免电机的定子固有频率和电磁力波 2 次和 4 次接近。

2.2 电机定子振动分析

在建立了定子三维结构有限元模型的基础上,利用有限元软件设置定子的各个参数,去掉影响较小的特征,选取合适的网格尺寸进行划分,最后对永磁同步电机定子进行模态求解,可以计算得到其固有频率,振型结果如图 4 所示,固有频率如表 3 所示。

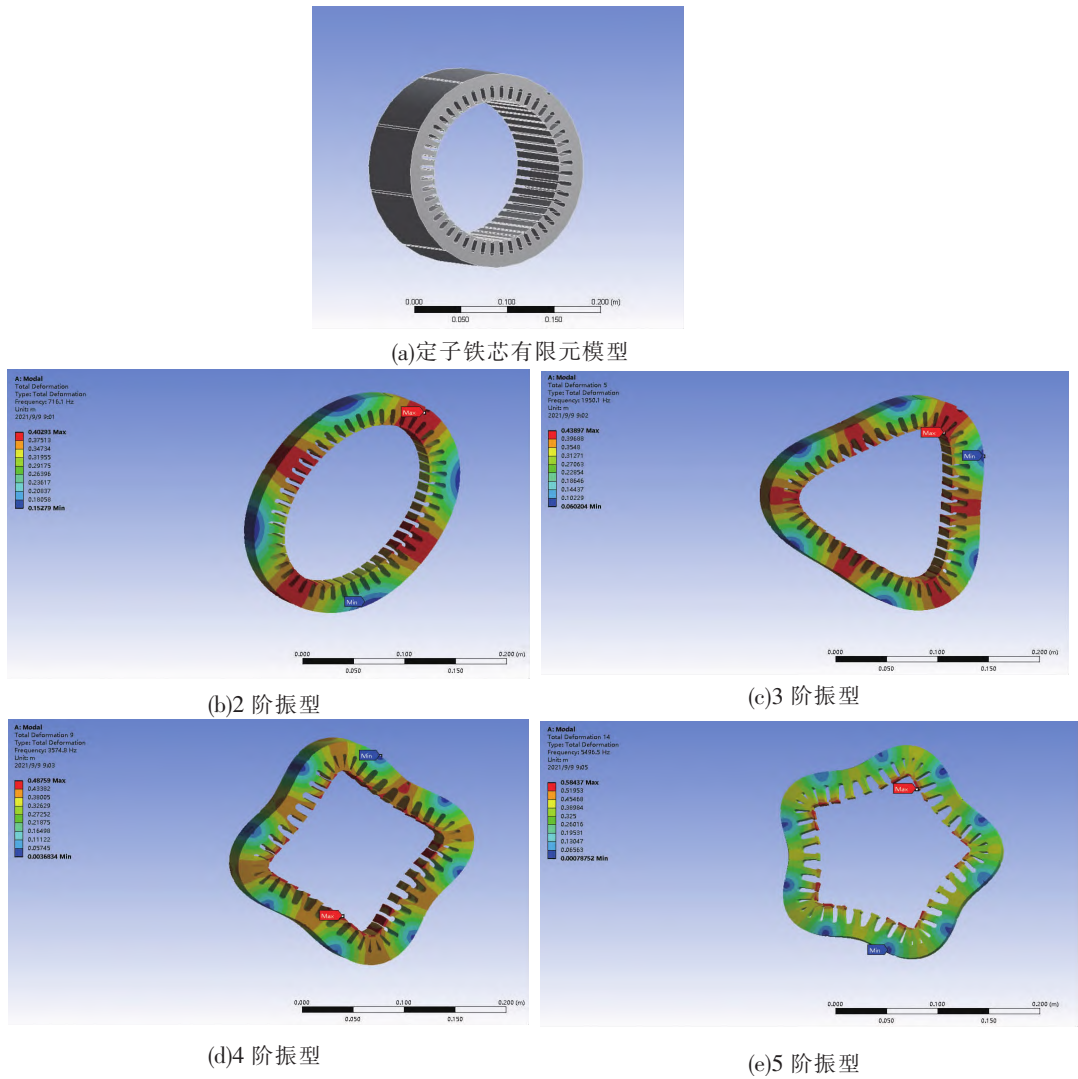


图 4 定子模态振型

由图 4 可知,2 阶振型是椭圆形,频率为 716.1 Hz,3 阶振型是三角形,频率为 1 950.1 Hz,4 阶振型是四边形,频率为 3 574.8 Hz,5 阶振型是五边形,频率为 5 496.5 Hz。

永磁同步电机的定子结构固有频率和电磁力频率接近时会发生共振,导致电机振动增大,造成较大磨损和噪声^[12]。由表 2 和表 3 可以看出,电磁力波频率和定子结构频率 2 次、4 次相差较远而且力波幅值较小,表明定子结构设计合理。

表 3 定子结构模态频率

模态阶数	固有频率/Hz
2	716.1
3	1 950.1
4	3 574.8
5	5 496.5

3 电机定子模态试验

3.1 试验平台搭建

在有限元仿真的基础上进行锤击法模态试验, 采用型号 SCL220 的 LMS48 通道进行数据分析处理, 同时在被测定子表面布置三相振动加速度传感器, 把电机定子采用悬挂方式保持平衡, 试验为多点激励单点输出, 在电机定子外表面选取多个位置的点进行 X、Y、Z 3 个方向的激振, 力锤保持同一大小的激振力, 通过传感器连接前端, 最后输入到 LMS 软件进行求解分析, 如图 5 所示。

3.2 试验结果分析

通过多次锤击试验, LMS 软件中曲线基本稳定, 可以在 LMS 软件中得到电机的固有频率和振型图像, 其中数据如表 4 所示, 振型图如图 6 所示。

表 4 LMS 分析定子结构模态频率

模态阶数	固有频率/Hz
2	740.6
3	2 137.4
4	3 824.7
5	5 962.8



(a) 锤击法试验

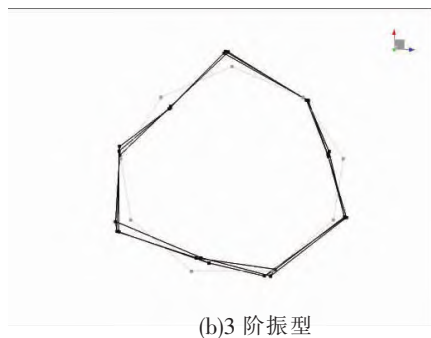


(b) LMS 软件数据分析

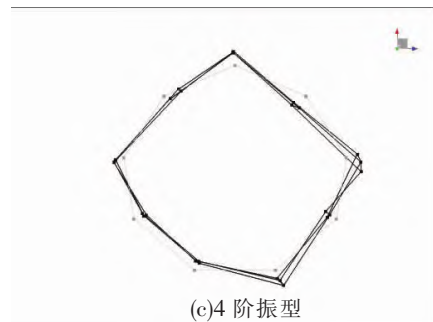
图 5 模态试验图



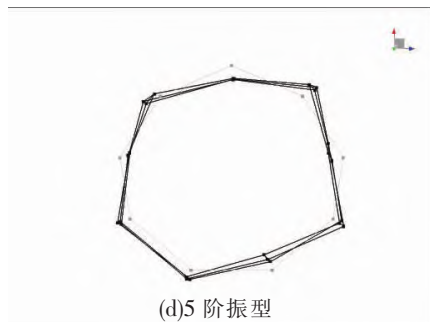
(a) 2 阶振型



(b) 3 阶振型



(c) 4 阶振型



(d) 5 阶振型

图 6 定子结构模态振型图

由表 4 可以看出, 有限元仿真模态和锤击法模态试验数据误差较小, 满足误差要求 10% 以内, 证明有限元方法的可靠性, 也说明锤击法模态试验的准确性。

4 结论

采用有限元软件分析永磁同步电机的振动情况, 并且和模态试验结果进行对比, 得到以下结论:

(1) 永磁同步电机的定子结构模态频率和径向电磁力波频率有较大的差异, 2 次和 4 次可能产生较大

的共振频率,但是该频率和定子固有频率相差较大,所以该定子结构不会由于电机径向电磁力而产生较大的共振,符合电机结构设计要求,这项为解决电机振动噪声问题和优化汽车 NVH 性能提供了参考。

(2) 锤击法模态试验证实有限元仿真结果和试验较为一致,误差控制在 10% 以内,证明有限元仿真模态分析的可靠性和锤击法模态试验的准确性。

(3) 由于试验设备有限,仅在试验样机上测试,未来可以在更多的实物进行测试,仍需要进行进一步的大量数据测试。

参 考 文 献

- [1] Wang Yongchao, Gao Hui, Wang Haiyang, et al. NVH optimization analysis of permanent magnet synchronous motor by rotor slotting[J]. Vehicles, 2020, 2(2): 1-4.
- [2] 左曙光, 刘晓璇, 于明湖, 等. 永磁同步电机电磁振动数值预测与分析[J]. 电工技术报, 2017, 32(1): 159-167.
- [3] 王伟, 杜晓彬, 胡弼, 等. SPMSM 定转子系统及整机结构的模态分析[J]. 防爆电机, 2018, 53(5): 10-15, 32.
- [4] 张镇, 薛勇, 周文, 等. 新能源汽车用电机模态有限元分析[J]. 时代汽车, 2020(6): 51-52, 65.
- [5] 杨浩东. 永磁同步电机电磁振动分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [6] 李东升, 王涛, 刘汉, 等. 车用永磁同步电机定子总成模态仿真分析研究[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(5): 149-150.
- [7] 骆开军, 林曦鹏, 陈海生, 等. 电动车用永磁同步电机定子铁心固有频率研究[J]. 汽车技术, 2021(1): 31-36.
- [8] 黄克峰, 徐晔, 王金全. 永磁同步电机振动特性模态研究[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(3): 22-27.
- [9] 王悦东, 张佳宇. 基于改进的 Goodman 曲线的车轮疲劳强度评估方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017(4): 827-832.
- [10] 陈永校, 诸自强, 应善成. 电机噪声的分析和控制[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.
- [11] 陈秋明, 陈勇. 永磁同步电动机电磁振动噪声机理研究[J]. 微特电机, 2013, 41(8): 1-5.
- [12] 时方敏, 张卫, 唐杨. 基于 Ansys 的永磁同步电机转子振动分析[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(5): 116-120.

Analysis of Stator Modal of Permanent Magnet Synchronous Motor for Vehicle

Zhang Wei, Wu Wenjiang, Zhang Jiaoqing

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Aiming at the problem of vibration and noise during the operation of electric vehicles, and taking the vehicle permanent magnet synchronous motor as the research object, the air gap magnetic density of the motor was analyzed by using the software Ansys Maxwell, and the air gap magnetic field and radial electromagnetic force of the motor were obtained, then modal analysis was carried out on the stator of permanent magnet synchronous motor, and the natural frequency of the stator system was obtained. At the same time, modal test was carried out by using hammering method and LMS software, and the data of finite element simulation and modal test were compared, verifying the accuracy of Finite Element Modal Analysis. The results show that the modal frequency of the stator structure is quite different from that of the radial electromagnetic wave, and the resonance is not caused by the radial electromagnetic force, which provides a reference for solving the problem of motor vibration and noise and optimizing the vehicle NVH performance.

Key words: permanent magnet synchronous motor; stator; finite element method; modal test