

基于 Ansys 的永磁同步电机转子振动分析*

时方敏^{1,2,3}, 张卫^{2,3}, 唐杨^{2,3}

(1. 贵州大学, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州航天林泉电机有限公司, 贵州 贵阳 550003;

3. 国家精密微特电机工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 振动是电机的重要指标, 对电机转子进行振动分析为其结构改进和性能优化提供理论依据。运用 Ansys 有限元分析软件对永磁同步电机转子进行模态分析, 得到该电机转子振动系统的低阶固有频率和模态振型, 分析了电机振动特性。通过电机转子模态试验, 求得电机低阶固有频率, 对比仿真与试验结果, 验证有限元分析结果的可靠性。由结果分析可知, 研究对象在额定转速下未产生共振, 验证了其结构设计的合理性。研究内容对永磁同步电机的设计和优化有一定的指导意义。

关键词: 有限元分析; 共振; 模态试验; 锤击法; 永磁同步电机

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)05-0116-05

Analysis of Vibration for Permanent Magnet Synchronous Motor Rotor Based on Ansys*

SHI Fangmin^{1,2,3}, ZHANG Wei^{2,3}, TANG Yang^{2,3}

(1. College of Mechanical Engineering, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Aerospace Linquan Motor Co., Ltd., Guiyang 550003, China;

3. National Precision Micro Motor Engineering Center, Guiyang 550003, China)

Abstract: Motor vibration was an important performance indicators and motor vibration analysis could improve its structure and provide a theoretical basis for performance optimization. In order to understand the vibration characteristics of the motor, the first six order natural frequencies and corresponding vibration modes of the motor rotor vibration system were obtained, with the modal analysis of the rotor of the permanent magnet synchronous motor carried on by the Ansys finite element analysis software. The accuracy of the Ansys finite element analysis was verified by the hammering method of modal experiment. The result of analysis showed that the motor did not appear resonance phenomenon, so the design of the motor rotor was reasonable. This research content has certain guiding significance for the design and optimization of permanent magnet synchronous motor.

Key words: finite element analysis (FEA); resonance; modal text; hammering method; permanent magnet synchronous motor (PMSM)

0 引言

电机广泛应用于各领域工业生产和人们生活的方方面面。其中永磁同步电机具有结构简单, 设计生产方便; 运行可靠, 安全性高; 体积小和质量轻, 灵活性高; 损耗小和效率高, 节约资源等很

多突出优点。永磁同步电机的应用范围非常广泛, 在航空航天、国防事业、工业与农业生产、日常生活等各领域均得到普遍应用。

振动一直以来是电机的共性问题, 严重影响电机的性能和电机的发展。电机振动会加速电机轴承的磨损破坏, 高强度的振动加剧电机线圈、绝

* 基金项目: 黔科合人才团队项目资助([2014]4023); 贵州省航天用低噪音、长寿命、高可靠微特电机关键技术攻关科技创新团队
作者简介: 时方敏(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机械制造及其自动化。

缘与机壳相互之间的摩擦,导致电机绝缘性降低,严重影响电机的性能和使用寿命。

本文通过三维建模软件建立电机的简化模型,导入到有限元分析软件 Ansys 中,对电机转子进行模态分析。因转子机构比较复杂,三维模型需要简化处理。简化模型既可以保证计算结果精确度,又可以提高工作的效率。得到电动机的各阶频率振型位移云图,并通过锤击法模态试验,将得到的试验结果与仿真结果对比分析,验证了有限元仿真的正确性和转子结构设计的合理性。

1 数学模型和研究方法

振动模态分析的实质是进行特征值和特征向量的求解,通过数值技术计算构件的振动特性,求取部件的固有频率和振型。

振动模态分析方法又称为模态叠加法。各阶模态在叠加中所占的比重或加权系数取决于各阶模态的响应。任取单元体作为研究对象,由拉格朗日函数可得

$$L = T - U - W_d - W_e \quad (1)$$

式中: T ——动能;

U ——应变能;

W_d ——阻尼消耗的能量;

W_e ——外力的势能。

由哈密顿原理和应力-应变、应变-位移可得,单元体的运动方程为

$$M_e \ddot{q}^e + C_e \dot{q}^e + K_e q^e = F_e \quad (2)$$

式中: M_e ——单元体的质量矩阵;

C_e ——单元体的阻尼矩阵;

K_e ——单元体的刚度矩阵;

F_e ——单元体的载荷矩阵;

q^e ——单元体的节点位移;

e ——单元。

对系统各单位集合整理,可得振动系统的运动方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (3)$$

式中: M ——总的质量矩阵;

C ——总的阻尼矩阵;

K ——总的刚度矩阵;

F ——节点力矢量。

一般将固有频率视为无阻尼情况下的振动,因此将总的阻尼矩阵和节点力矢量视为零。由微

分方程理论可得

$$\{u(t)\} = \{e^{j\omega t}\} \{\phi\} \quad (4)$$

式中: $\{\phi\}$ ——模态向量;

ω ——模态的固有频率。

联立式(3)与式(4)可得

$$(K - \omega^2 M) \{\phi\} \{e^{j\omega t}\} = \{0\} \quad (5)$$

由线性方程理论有非零解的充分必要条件为

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (6)$$

联立式(5)与式(6)求得 ω 和 ϕ_r , 分别为电机的固有频率和固有阵型。

2 有限元仿真

2.1 三维有限元建模

电机转子模型由轴、磁钢、磁轭、护套、挡板、磁极隔板 6 部分组成,在电机转子模型的简化过程中不考虑倒角,倒角对模态分析结果影响较小。由于转子模型由多部件构成,不便在 Ansys 附带建模功能中完成,所以通过 UG 绘制转子零部件三维模型,将零部件根据工况装配,结果如图 1 所示。



图 1 转子三维模型

2.2 材料参数的确定

模型材料属性定义的合理性对模态分析的精度有直接影响。转子各组成部分的材料属性如表 1 所示。

表 1 模型材料属性

材料	弹性模量/Pa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
不锈钢 C660	2.1×10 ¹¹	0.3	7 620
磁钢 XG28/20	1.75×10 ¹¹	0.3	8 400
铝棒 2A12-T4	7.1×10 ¹⁰	0.33	2 770
不锈钢 2Cr13	2.23×10 ¹¹	2.97	7 750
电工钢带 50WW310	2.18×10 ¹¹	0.26	7 730

2.3 网格划分

本样机转子有由 6 部分组成,结构相对复杂,为保证网格质量需对其网格细化处理。按轴的结构特点,将其沿轴向分割,对分割后的各部分进行扫描剖分,可得到剖分结果如图 2 所示。剖分网格节点数为 173 124,剖分总单元数为 75 755。



图2 网格剖分

2.4 边界条件

转子的工况为在轴承的支撑下旋转,因此转子进行模态分析时,边界条件设为轴承面处施加弹性支撑,弹性模量大小由轴承型号决定。

2.5 有限元结果分析

低阶振动频率较低、幅值较大,容易引起电机共振。高阶振动频率较高、难以激振,因此电机模态分析主要分析构建前6阶。振型位移云图可直观显示部件最大形变点,为刚度条件分析提供有效参考。

仿真求解得到转子前6阶振型云图如图3所示。将得到的振型图整理分析如表2所示。振型云图以夸张的形式显示振动位移变化,图3中变化并非实际位移变化量,大小不代表实际工作中的位移量,仅表示该频率振动传递趋势。

表2 前六阶频率

阶数	频率/Hz	振型
一阶	1 605.748 7	小轴承端径向振动
二阶	1 606.325 4	小轴承端径向振动
三阶	3 643.251 1	四方径向振动
四阶	3 647.087 7	四方径向振动
五阶	6 774.570 8	四方、小轴承径向轴向振动
六阶	6 780.02 3	四方、小轴承径向轴向振动

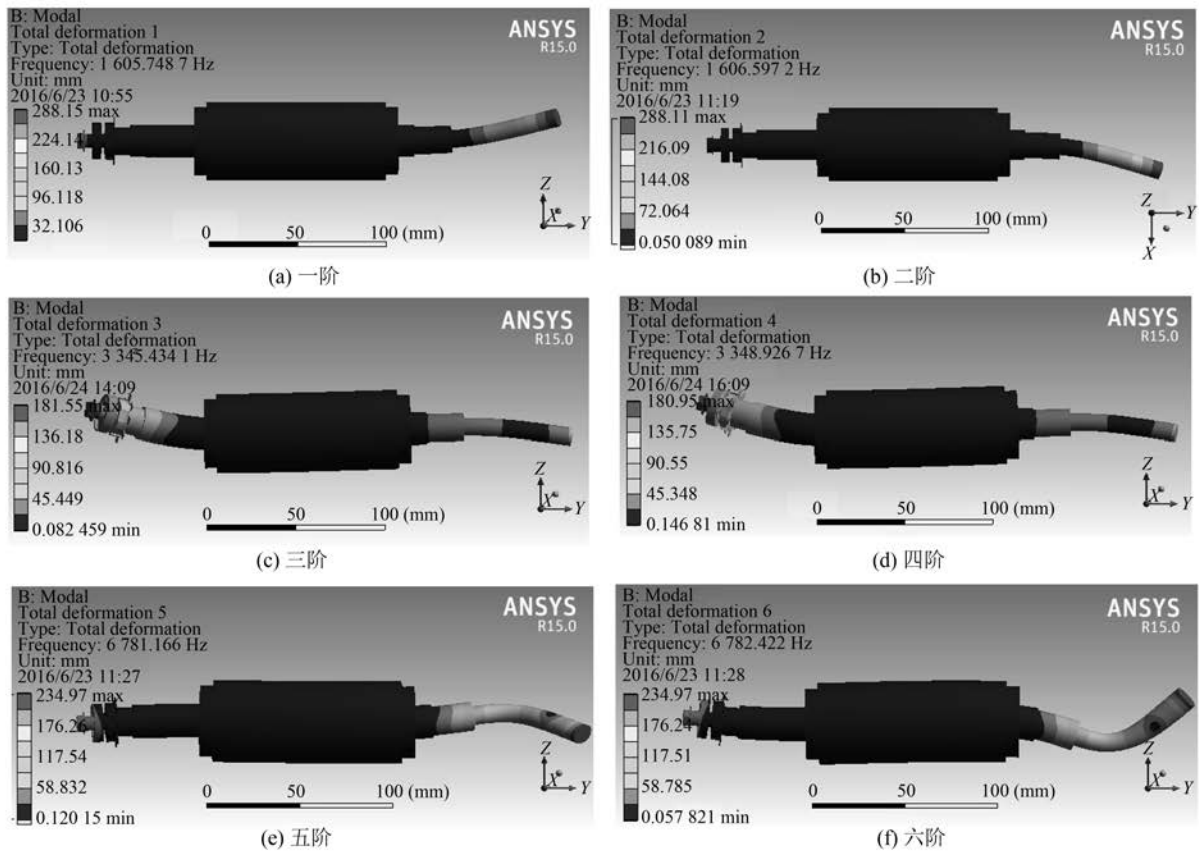


图3 各阶频率振型位移云图

3 电机转子的模态试验

为验证前文模态仿真分析得到可靠性,现对电机转子模态试验分析。

3.1 试验系统组成及试验对象描述

试验为模拟弹性支撑的边界条件,采用橡皮绳系在轴两端轴承安装的阶梯面上悬空,加速度传感器粘结在转子表面,如图4所示。



图4 转子悬挂图

试验系统使用仪器主要有:力锤、力传感器、加速度传感器、电荷放大器、数据采集仪和分析仪,如图5所示。试验激励由力锤敲击实现,敲击时小锤受力由其内部力传感器测得,吸附在转子表面加速度传感器测得转子振动的加速度变化量。因为实际产生的力信号与加速度信号都较小,传感器测得的信号需要放大器放大后,将信号传输到数据采集仪和记录仪,经过谐响应函数分析,得到激励点与响应点的频响函数。

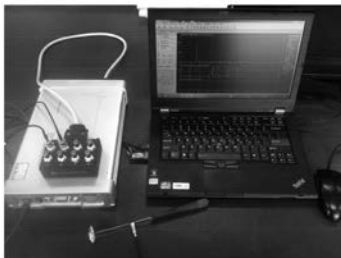


图5 试验仪器及系统搭建

3.2 试验方法及数据分析

常用激振方法有力锤激励和激振器激励两种。力锤激励比较快速,使用方便,比较适于现场操作,因此本文选用力锤激励方式。激振方式主要有多点激励单点输出和单点激励多点输出两种,对于电机转子模态振型试验来说,两种方式是等效的。如果选用单点激振多点输出方式,需要在转子表面分布较多传感器,大量的传感器会使得附加质量过大,影响试验分析精度。鉴于试验精度考虑,本试验采用多点激励单点输出方式。

将转子进行轴向8等分,加速度传感器粘结在4号激励点上,测点位置如图6所示。锤击时确保锤头与转子表面相垂直,力度选择要适当,避免出现连击情况,每个测点激励3次。对获得的模态参数通过模态多自由度导纳圆识别法进行拟

合。试验过程采用变时基采样方法,最大采样频率7 000 Hz,变时倍数选择4倍。传感器的灵敏度决定最大采样频率为6 500 Hz,所以6 500 Hz之后的幅频图的可信性就大大降低,因此本试验只选取转子的前三阶幅频。

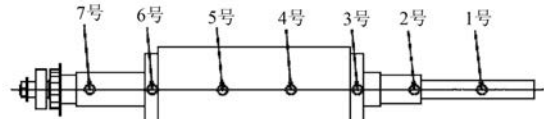


图6 测点分布

各测点测试所得幅频图如图7所示。

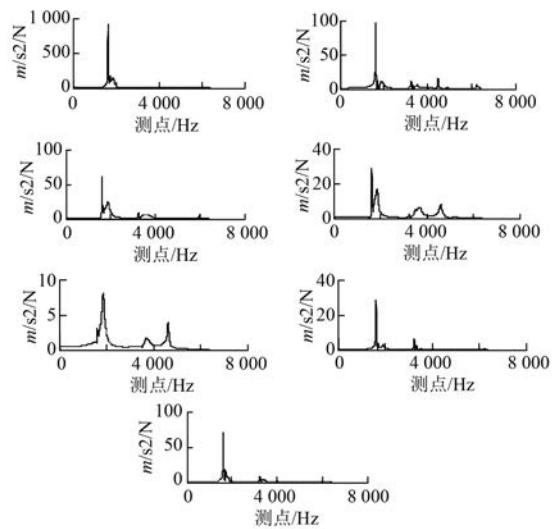


图7 各测点幅频图

通过测点的幅频集总显示图可以确定模态阶数以及各阶固有频率,如图8所示,可以确定模态阶数及各阶固有频率,如表3所示。

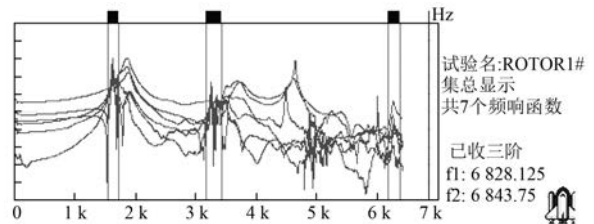


图8 集总显示

表3 仿真结果与试验结果对比

模态阶数	Ansys 仿真结果/Hz	试验结果/Hz	误差/%
1	1 606.325 4	1 621.88	0.96
2	3 345	3 250	2.92
3	6 774.570 8	6 352	6.6

由表 3 可知,数值仿真计算结果与试验结果有一定差异,一阶结果相差较小,随着阶数的增加其相差也逐渐增大。这是由于本试验采用橡皮绳模拟弹性支撑的边界条件,本身就是一种近似,同时模态试验操作过程也存在误差。但所求的仿真结果与试验数据误差小于 10%,在可接受范围内,已经可以验证仿真结果是可靠的。

为进一步验证仿真结果的可靠性,对模态试验前四阶试验结果进行拟合,拟合结果如图 9 所示。对比前文各阶模态变化趋势与拟合结果相符合,因此仿真结果的可靠性得以验证。

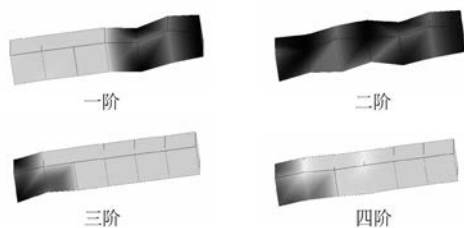


图 9 模态拟合

在实际工作中,电机额定转速为 12 000 r/min,固有频率为 $f=pn/60=400$,远低于一、二阶频率对应的转速,不在 5% 范围内,所以不会引起共振,说明该电机转子结构设计具有可靠性。

4 结 语

对比表 3 所示结果可知,运用 Ansys 对电机转子模态分析具有一定可靠性,其误差在可接受

范围内,可以很好地满足工程要求,为共振验证提供理论依据。

由图 3 转子模态振型云图可知,其最大形变位置在轴两端位置,这是因为其两端直径较小,轴伸较长,因此转子选材要满足一定强度要求。通过模态仿真云图可以了解构建结构设计强度的薄弱点,为提高电机振动特性提供依据,也为该电机以后的设计优化提供参考。

对比转子转动频率与定子低级固有模态,可知转子结构不会引起共振现象,验证了转子结构设计的合理性。

【参 考 文 献】

- [1] 冯春亮,张高丽,封旭升,等.基于 ANSYS 小型食品机械用电动机转子模态分析[J].包装与食品机械,2012,30(4): 66-68.
- [2] 翟文波.基于 Ansys 技术的直线振动电机模态分析[J].微电机,2011,44(4): 29-31.
- [3] 浦广益.ANSYS Workbench12 基础教程与实例详解[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [4] ISHIBASHI F, MATSUSHITA M, NODA S, et al. Change of mechanical natural frequencies of induction motor[J]. Transactions on Industry Applications, 2010, 46(3): 922-927.
- [5] 陈国军,文立辉.同步推进电动机模态分析[J].船电技术,2009,12(29): 32-34.
- [6] 张相庭,王志培.结构振动力学[M].上海:同济大学出版社,2005.

收稿日期: 2016 -08 -20

(上接第 89 页)

- [7] 聂亚林,黄允凯,胡庚生.SPWM 供电时电机铁心损耗的研究与测试[J].电机与控制应用,2009,36(10).
- [8] 满永奎.通用变频器及其应用[M].北京:机械工业出版社,1995.
- [9] 周志敏,周纪海,纪爱华.变频调速系统工程设计与调试[M].北京:人民邮电出版社,2009.
- [10] LEVI E. Impact of iron loss on behavior of vector controlled induction machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(6): 1287-1296.
- [11] 芦晓静,温旭辉,张立伟,等.考虑铁损的异步电机仿真建模[J].电机与控制应用,2005,32(8): 3-6.
- [12] 王建渊,安少亮,李洁,等.考虑主磁路饱和与铁损

的异步电机模型[J].电工技术学报,2010,25(10): 44-50.

- [13] BOGLIETTI A, CAVAGNINO A, IONEL D M, et al. A general model to predict the iron losses in PWM inverter-fed induction motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(5): 1882-1890.
- [14] 赵海森,张冬冬,王义龙,等.变频供电条件下感应电机空载铁耗分布特点及其精细化分析[J].中国电机工程学报,2016,36(8): 2260-2269.
- [15] CASANELLAS F. Losses in PWM inverters using IGBTs [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1994, 141(5): 235-239.

收稿日期: 2016 -10 -28