

内置式永磁同步电机电磁振动特性多物理场耦合仿真分析

Multi-physics simulation and analysis on electromagnetic vibration characteristics of an interior permanent magnet synchronous motor

廖晨东 姜文颖

(南京航空航天大学)

摘 要: 永磁同步电机由于其高效率和高功率密度的优点, 被广泛应用为电动汽车的驱动电机。作为主要的动力部件, 其电磁振动噪声对电动汽车的 NVH 性能产生直接影响。本文基于 JMAG 电磁仿真软件和 LMS Virtual lab 多物理场仿真软件, 以一台 48 槽 8 极内置式永磁同步电机为例, 分析了其电磁振动的特点。通过查看模态参与因子, 确定了对振动响应贡献较大的模态均为平面内振动的模态, 其中呼吸模态和局部齿振动的(0,8)模态的影响至关重要。

Abstract: Permanent magnet synchronous motors are widely used as traction motors for electric vehicles due to their advantage of high efficiency and high power density. The electromagnetic vibration and noise of the motor has a direct impact on the NVH performance of electric vehicles since it is one of the key component of the driveline. Based on JMAG electromagnetic simulation software and LMS Virtual lab multi-physics simulation platform, analysis of the characteristics of electromagnetic vibration of a 48-slot 8-pole interior permanent magnet synchronous motor is performed in this paper. By further viewing the modal participation factors, it is determined that the modes that are the major contributor to the vibration response are those modes whose mode shape are purely in-plane, among which the influence of the breathing mode and the (0,8) mode with local tooth vibration is crucial.

1. 引言

随着人们对能源和环境问题的重视程度的提高, 高效率低排放的新能源汽车越来越得到重视。永磁电机凭借高效、高功率密度的优势, 在电动汽车中得以广泛应用。但是, 其电磁力谐波引起的振动和噪声问题也给车辆乘坐舒适性和品质带来了新的挑战[1]。永磁电机的噪声按照来源可以分为三大类: 机械噪声、空气动力噪声和电磁噪声。其中, 径向电磁力造成的电磁噪声来源作用机理较为复杂, 谐波成分丰富, 给振动和噪声性能的优化带来了极大的困难[2]。在计算电磁振动响应时, 径向电磁力的空间形状和频率都很重要。一般认为, 定子铁心的振动位移响应大约与电磁力的振幅成正比, 与空间阶的四次方成反比[3]。因此, 分析电机电磁力的大小、频率和空间分布对理解响应的特点具有重要意义。为了探究径向电磁力引起电磁振动的作用机理和作用特点, 研究学者对径向电磁力波的时间次数和空间阶数进行了大量研究[4][5]。

本文以一台 48 槽 8 极内置式永磁同步电机为例, 对电机定子模态进行了有限元分析。进一步的, 通过建立多物理场耦合仿真的平台, 分析了在[2000rpm, 210Nm]工况下的电磁振动的特点, 确定了对振动贡献较大的模态。

2. 模态分析的基本理论

模态分析通过将线性定常系统振动微分方程组中的物理坐标变换到模态坐标,从而使方程组成为一组以模态坐标和模态参数描述的解耦方程从而让方程便于求解。一般的,自由度为 n 的物体的运动平衡方程形式如式(1)所示。

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

$$(-\omega^2[M]-j\omega[C]+[K])x(\omega)=F(\omega) \quad (2)$$

其中 $[M]$, $[C]$ 和 $[K]$ 分别代表系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; x 和 $F(t)$ 分别表示运动的位移矢量和激励力的向量。式(2)是式(1)在频域的表达式。将质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵对角化, n 自由度的耦合方程即可解耦成 n 个单自由度的方程进行求解。因此,在模态坐标下,物体的位移矢量可以表示成 n 个单自由度方程解的线性组合,如等式(3)所示。

$$x(\omega)=[U]\{p(\omega)\}=\{u_1\}p_1(\omega)+\{u_2\}p_2(\omega)+\dots+\{u_n\}p_n(\omega) \quad (3)$$

式(3)中, $[U]$ 由(2)式中左侧括号内部分矩阵的 n 个线性无关的特征向量组成的。特征向量 $[u_i], i=1,2,\dots,n$ 也被称为振型,反映了各点相对位移的大小。其中,线性组合系数 $p_i(\omega), i=1,2,\dots,n$ 被称为模态坐标或者模态参与因子(MPFs)。这些模态参与因子的幅值大小可以反映参与叠加的某一个模态对最终振动响应的贡献程度。

本文采用上述的方法,对电机定子进行模态分析。部分典型模态的振型如表 所示。这些模态一方面提供了为结构设计时避免谐振提供参考,一方面也作为后续模态叠加法计算谐振响应的基底。

3. 多物理场耦合仿真分析

本文研究对象为一台 48 槽 8 极分布绕组内置式永磁电机,节距为 5,其电磁模型如图 1 所示。考虑到电机轴向长度相对较长同时为了缩短计算时间,通过施加适当的边界条件,采用八分之一模型即可完成对电机电磁性能进行评估。相关的参数如表 1 所示。

表 1 电机基本参数

参数	数值
定子外径(mm)	264
定子内径(mm)	161.93
轴向长度(mm)	60.7
转子外径(mm)	160.47
转子内径(mm)	105
极数/槽数	8/48
峰值功率(kW)	50
峰值转速(rpm)	14000
逆变器母线电压(V _{dc})	250-650

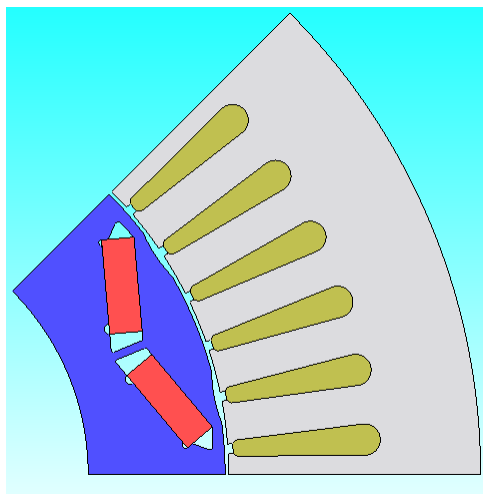


图1 电机二维有限元电磁模型

基于上述二维有限元电磁模型在进行有限元数值仿真之后可以得到转矩,磁链和反电势等基本参数。在 JMAG 软件中进行电磁计算后,利用输出的电磁网格和节点上的电磁力的信息可以进行后续的电磁振动的分析,整个耦合仿真的流程如图 2 所示。

本文以[2000rpm,210Nm]的工作点为例,对电机定子电磁振动的特点进行研究。对于其他的工作点,可以采用同样的方法进行分析。由于电磁力谐波很大程度上由极槽配合,永磁体充磁情况、绕组排布和电流谐波成分等因素有关。对于不同工作点,电磁力谐波的幅值和频率会有变化,但是其空间分布的规律基本一致,在该工作点下得到的一些结论也将适用于其他转速下的工作点。

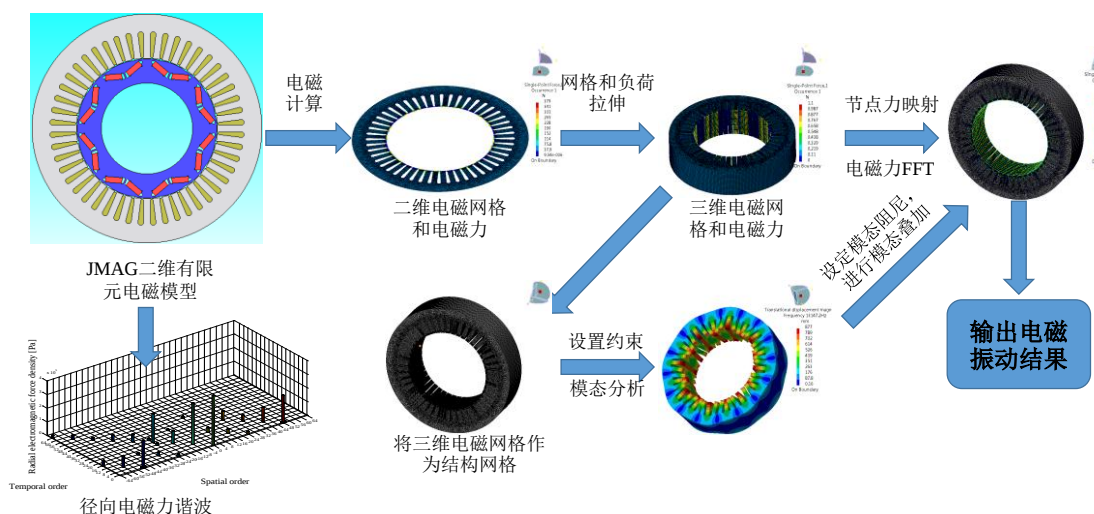


图2 电磁振动的电磁-结构耦合仿真流程

采用模态叠加法计算完电磁响应之后,可以观测定子外表面某一点的在该电磁激励下产生的响应,其径向、切向和轴向加速度响应如图 3 所示。

显然,径向和切向的加速度远大于轴向的加速度响应。这是因为所用的电磁力激励是由二维平面内计算得到的电磁力拉伸得到的,主要作用在平面内各个方向。但是由于定子作为一个连续的弹性物体,径向、切向和轴向的运动实际上是耦合的,因此,平面内的力也会产生一定的轴向加速度。

图 3 中标示了四个振动响应较大的频率,观察这些频率下各个模态的参与因子,即可确

定对响应贡献程度最大的模态。

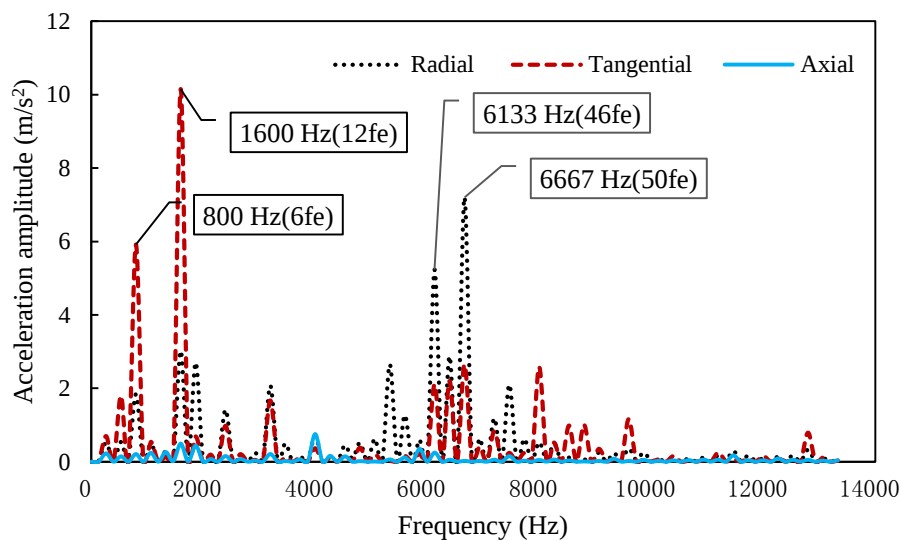


图3 观测点处电磁振动得加速度响应

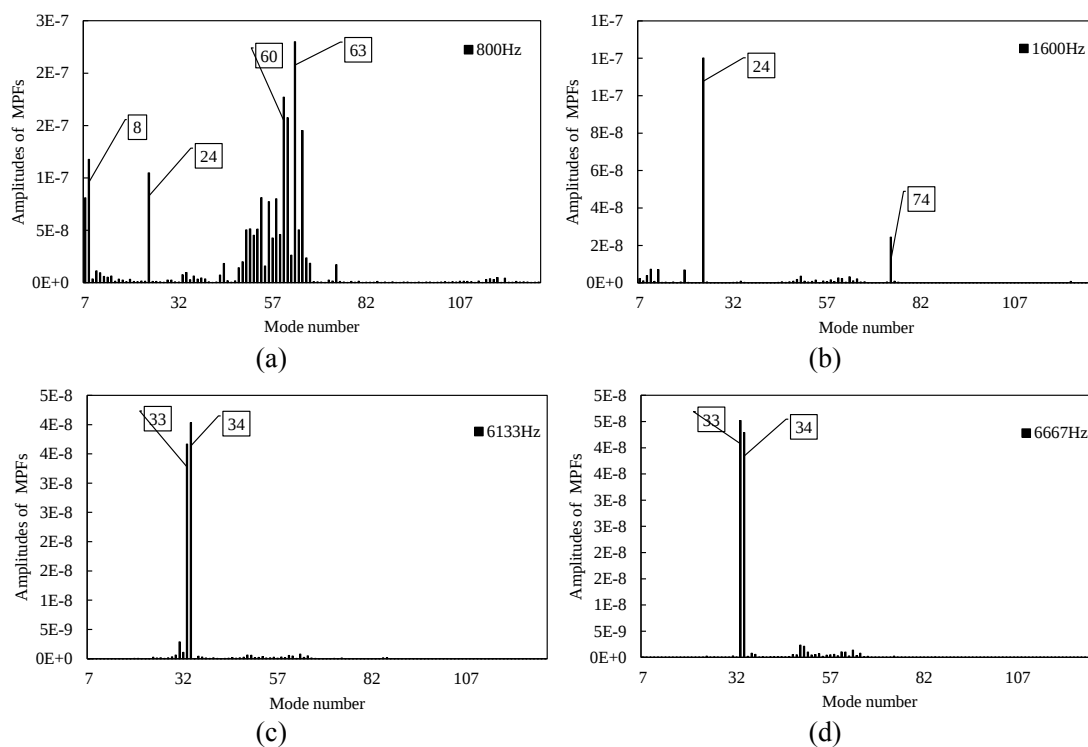
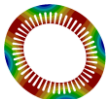
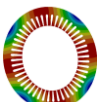
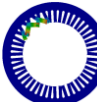
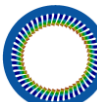


图4 尖峰频率响应的参与因子

查看图 3 中所示的各尖峰频率下各模态的参与因子,可以得到对振动响应做主要贡献的模态,对应的结果如图 4 所示。参照模态分析的结果,可以进一步确定这些模态对应的振型和频率等信息。将对响应贡献较大的模态归纳如表 2 所示。

表 2 主要模态振型

模态序号	振型	频率	模态序号	振型	频率
7		704.417	60		7231.493

8		704.512	61		7233.277
24		5274.579	63		7236.080
33		6539.698	65		7246.999
34		6546.030	74		8364.375

对电磁振动其主要贡献的模态的振型均为平面内的振型。其中的呼吸模态(No.24)和(0,8)模态(No.33, No.34)的作用尤其重要, 这是因为电磁力空间最低非零的阶数是 8。由于电磁力主要作用在定子齿上, 这些贡献较大的模态振型往往定子齿的局部振动较为剧烈而轭部的振动幅值相对较小, 如 No.60、61、63、65、74。通过改变约束或者几何参数(如齿宽、轭厚)等方式, 使得上述模态尽量远离电磁力激励, 从而降低电磁振动和噪声, 也是一种重要的手段。

4. 结论

本文以一台 48 槽 8 极永磁电机为例, 运用电磁-结构耦合仿真的方法, 分析了其电磁振动的特点, 可以得到以下结论:

- 1) 对于本例中的径向磁通永磁电机, 径向和切向的振动响应远远大于轴向的响应;
- 2) 对振动响应贡献较大的模态均为平面内振动的模态。此外, 由于电磁力非零空间阶数为 8 和 8 的倍数, 呼吸模态和(0,8)模态对振动等贡献尤其明显。

5. 参考文献

- [1] Deng W , Zuo S . Electromagnetic Vibration and Noise of the Permanent Magnet Synchronous Motors for Electric Vehicles: An Overview[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018:1-1.
- [2] Islam R , Husain I . Analytical Model for Predicting Noise and Vibration in Permanent-Magnet Synchronous Motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 46(6):2346-2354.
- [3] K. Putri, S. Rick, D. Franck and K. Hameyer, "Application of Sinusoidal Field Pole in a Permanent-Magnet Synchronous Machine to Improve the NVH Behavior Considering the MTPA and MTPV Operation Area," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 3, pp. 2280-2288, May-June 2016
- [4] 张佳敏, 姜文颖等, 分布绕组内置式永磁同步电机电磁力分析, 2017 年 idaj 中国区用户年会, 2017
- [5] W. Fei and P. C. Luk, "Investigation of radial electromagnetic force density and vibration in a fractional-slot interior permanent magnet synchronous machine," 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, 2013, pp. 4998-5005.
- [6] [1]LI Xiaohua, LIU Chengjian, MEI Boshan, WEI Shurong, XIA Nenghong. "Vibration and Noise Sources Analysis of IPMSM for Electric Vehicles in a Wide-speed Range," in Proceeding of the CSEE, 38(17): 5219-5227. 2018.