

基于 JMAG 的电动汽车 PMSM 电机性能仿真分析

Simulation and evaluation of PMSM for Electric Vehicle Based on JMAG

陈毅

(上海捷能汽车技术有限公司, 上海市 200072)

摘要: 本文利用有限元工具 JMAG 进行车用永磁电机的性能仿真设计分析, 分析电机的空载反电势、齿槽转矩、转矩脉动及铁耗等基本电磁性能。利用 JMAG 的耦合仿真功能, 分析了 PMSM 的电磁噪音。

关键词: 电动汽车; 永磁电机; 电磁噪声; JMAG

Abstract: In this paper, a permanent magnet motor for the electric vehicle was analyzed. The fundamental characteristic parameters of the motor (such as emf, cogging torque, torque ripple and core loss). The electromagnetic noise is analyzed using the coupled simulation function in JMAG.

Keywords: Electric Vehicle; Permanent Magnet Motor; Electromagnetic Noise; JMAG

0 引言:

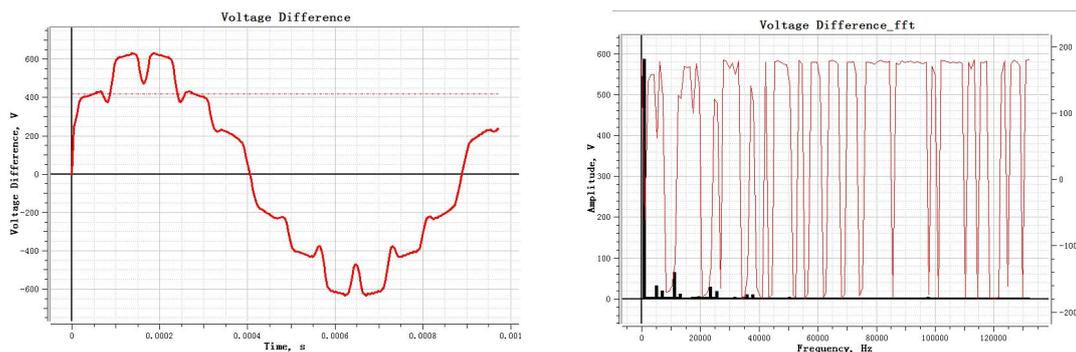
电动汽车采用电动机为牵引装置, 与传统内燃机车辆相比, 具有许多优点, 例如零排放、高效率、与石油无关等。电动汽车驱动电机是电动汽车的关键技术之一, 永磁同步电机(PMSM)是驱动电机的主要类型之一, 有着广泛的应用。与普通的工业用电机相比, 电动汽车电机的大转矩、宽调速和轻量化的要求苛刻, 使得电机必须在结构、电磁、力学、热能管理、电力电子、控制策略等多领域进行综合优化与平衡。因此, 传统的解析算法已经不能满足具有非线性特征的 PMSM 电机性能准确评估的需要。

JMAG 软件是由 JSOL 公司研发的一款电磁场仿真软件, 提供了电磁场分析、热场分析、结构场分析以及多物理场耦合分析, 并且可以与控制软件类软件进行联合仿真分析, 为满足高密度永磁同步电机性能评估提供了丰富的仿真策略。

1 基本电磁性能评估

电动汽车用 PMSM 的基本电磁性能包括空载反电势、齿槽转矩、电磁转矩、损耗、磁密分布等, 是评价 PMSM 电机优劣的基本指标。本文采用一台 48s8p 的永磁同步电机, 利用 JMAG-Designer 进行 2D 有限元分析。

本次设计采用 48 槽 8 极的极槽配合, 由于采用开口槽设计, 因此其空载线反电势有较大的齿谐波, 其齿谐波的次数为 $v_z = 2mqk \pm 1, k=1, 2, 3, \dots$, 其中 11、13 次齿谐波占主要部分。空载反电势波形及其谐波分析如下图 1, 各次谐波分量见表 1



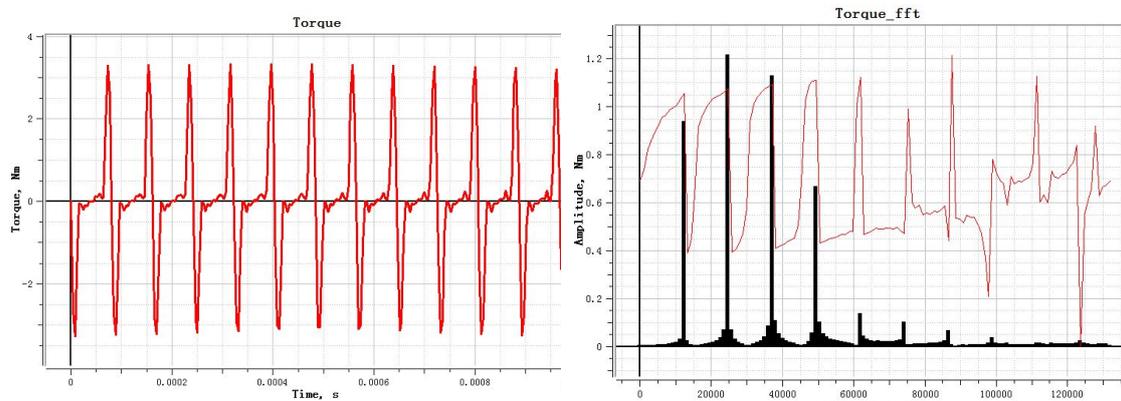
a)空载线反电势 (b)反电势傅里叶分解

图 1 空载线反电势及谐波傅里叶分解

表 1 傅里叶分解各次谐波大小

E_1 [V]	E_5 [V/%]	E_7 [V/%]	E_{11} [V/%]	E_{13} [V/%]	E_{23} [V/%]	E_{25} [V/%]
584.6	30.7/5	18.9/3.3	64.1/10.9	10.9/1.8	27.4/4.7	16.8/2.9

齿槽转矩是永磁体不通电时永磁体和铁心之间相互作用产生的转矩，是由于永磁体与电枢齿相互作用力的切向分量的波动引起的。齿槽转矩导致转矩波动，影响系统的控制精度，同时产生振动和噪声。一个电周期内，齿槽转矩谐波次数 $v_k = k[LCM(Z, 2p)] / p, k = 1, 2, 3, \dots$ ，(Z 为槽数，p 为极对数)。利用 JMAG-Designer 在定子不通电时得到齿槽转矩波形和谐波分析如图 2，各阶谐波分量见表 2。



a)齿槽转矩 (b)齿槽转矩谐波傅里叶分解

图 2 齿槽转矩及谐波傅里叶分解

表 2 齿槽转矩各阶谐波幅值

谐波阶数	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
$T_{cog_harmonic}$ (Nm)	0.9	1.2	1.1	0.66	0.13	0.1

采用转矩脉动率 $TRF\% = \frac{T_{em_max} - T_{em_min}}{T_{em_avg}} \cdot 100\%$ 来评价永磁同步电机转矩脉动的大小，

在 JMAG-Designer 设置电流源，定子三相通入交流电，可以精确计算出电磁转矩及转矩脉动，如图 3 所示，在定子电流幅值 200A, 电流角 32 度时， $TRF\% = 20.6\%$

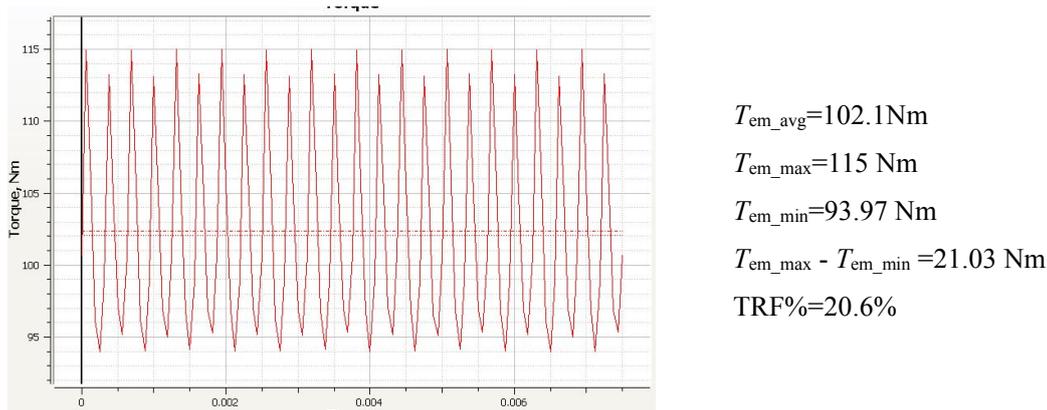


图 3 转矩与转矩脉动

JMAG 计算铁耗可将转子铁耗和定子铁耗分开，磁滞损耗和涡流损耗分开，有利于损耗的分析。定子铁耗谐波频率有 $f_1, 3f_1, 5f_1, 7f_1, 9f_1, \dots, (2n-1)f_1$ 次，转子铁耗谐波频率与齿谐波频率对应为 $k[LCM(Z, 2p)/p]f_1, k=1, 2, 3, \dots$ 。样机在空载 10000rpm 时的定、转子铁耗如表 3 所示。

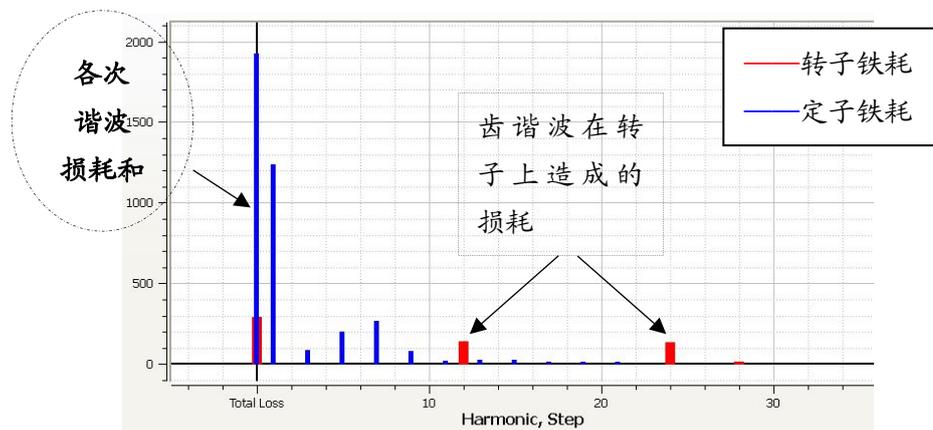
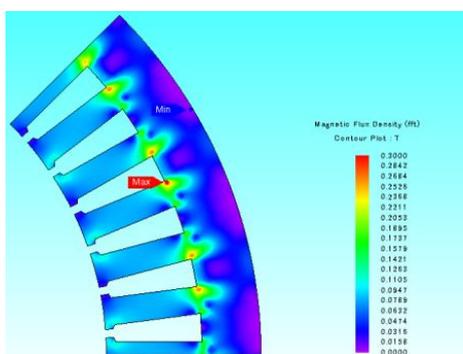
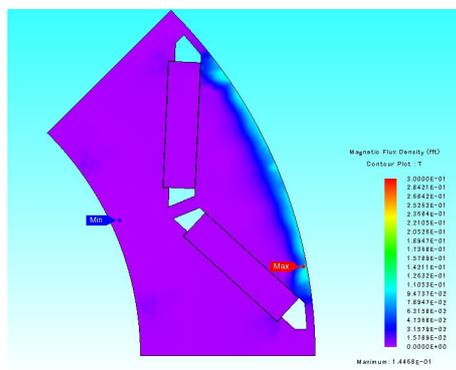


图 4 空载 10000rpm 时的定、转子铁耗

JMAG-Designer12 的新功能可以观察到谐波分量的磁场分布云图，如图 5 所示，分别提取了定子的 5 次磁密谐波云图和转子的 12 次磁密谐波云图。可以看到，转子上的 12 次磁密谐波主要集中的转子外圆表面。



5 次磁密谐波云图



12 次磁密谐波云图

图 5 谐波磁密云图

2 电磁噪声分析

定子铁芯内表面的电磁力是产生电磁噪声的主要来源。定子铁芯的定子铁芯变形量与电机径向电磁力波次数成反比，与力波幅值成正比，因此幅值较大的低阶径向电磁力波是引起电磁振动噪声的主要根源。目前电磁噪声分析是困扰工程师们的难题之一，JMAG 的多物理域耦合功能为电磁噪声的计算提供了便捷的途径，如图 6 所示，将 JMAG 软件将电磁场计算所得到的电磁力结点数据导入到结构场中，经过网格之间的插值映射，进行电磁场与结构场的耦合计算，求解出电磁振动和噪声的频响结果。

径向电磁力是定子振动的主要振源，它不仅是个空间函数，同时也是时间的函数。JMAG-Designer 计算电磁力时，可以同时得到径向电磁力的时间与空间波形，如图 7 所示。

经过耦合分析，得到 4000 负载时电机半径 1m 的球面内，最大噪音为 79dB，如图 8。

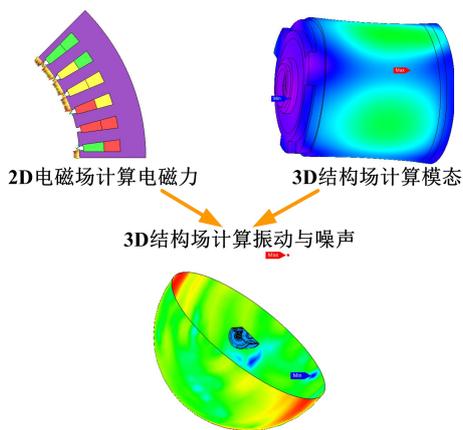


图 6 JMAG 结构场与电磁场耦合计算电磁振动噪声示意图

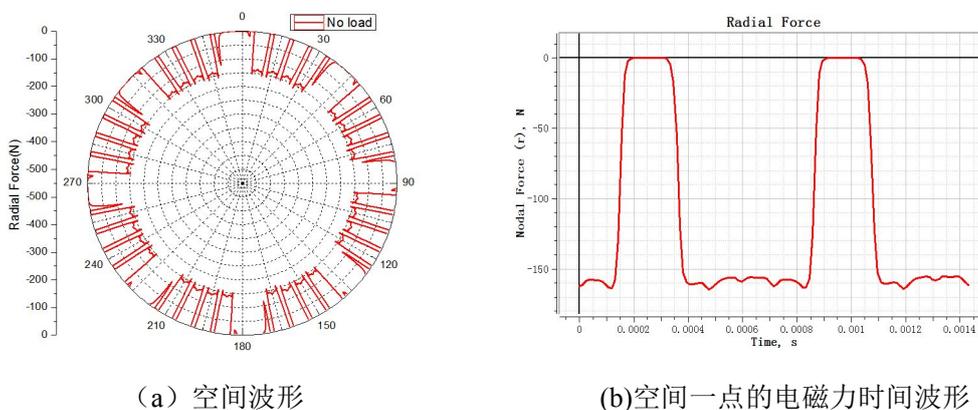


图 7 径向电磁力时、空波形

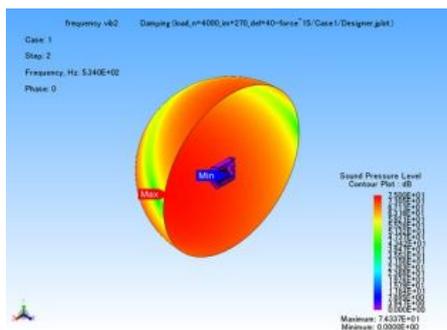


图 8 4000r/min 负载的电磁噪声声场分布云图

3 结论

永磁同步电机的性能分析不仅涉及到非线性问题,同时涉及到多层面、多领域的分析。本文借助 JMAG 软件分析了车用永磁同步电机的基本电磁性能和电磁噪声,证明 JMAG 能够为车用永磁同步电机的性能设计分析提供有力的帮助。

4 参考文献

- [1] 黄苏融, 张琪, 谢国栋, 贡俊, 燃料电池轿车用高密度无刷永磁牵引电机[J], 机械工程学报, 2005年第12期
- [2] 黄苏融, 钱慧杰, 张琪, 谢国栋, 现代永磁电机技术研究和应用开发[J], 电机与控制应用, 2007年第一期, pp. 1-6.
- [3] 王秀和, 永磁电机, 中国电力出版社