

车用永磁同步电机电磁噪声分析研究

申秀敏, 王 勇, 李 彬

(汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室, 重庆 400039)

摘要: 以电动汽车驱动用永磁同步电机为研究对象, 从作用于电机定子表面的电磁力波和电机定子结构的动态特性两个方面对电动汽车驱动用永磁同步电机空载工况的电磁噪声展开研究。通过研究永磁同步电机产生电磁力波的机理, 推导了空载工况电磁力波的解析分析方法, 结合电磁仿真的手段, 精确计算了电机在空载工况下电磁力波的波次、频率和幅值; 通过建立电机定子结构的有限元仿真模型及有限元模态仿真计算, 得到了定子结构的模态频率和振型。发现: 电机定子结构的前 6 阶模态频率较低, 电机空载工况在调速过程中所激发的电磁力容易引起电机定子结构的共振。该研究为电动汽车驱动用永磁同步电机的减振降噪提供了指导。

关键词: 电动汽车; 永磁同步电机; 电磁噪声; 电磁力波; 模态分析

中图分类号: TM341 TB535

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-06-0589-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.06.011

Electromagnetic noise study of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle

SHEN Xiu-min, WANG Yong, LI Bin

(State Key Laboratory of Vehicle NVH (Noise, Vibration and Harshness) and Safety Technology, Chongqing 400039, China)

Abstract: This paper takes permanent magnet synchronous motor(PMSM) for Electric Vehicles(EV) as study object and considers the electromagnetic force waves acting on the stator and the structure dynamic characteristics of the stator as two key factors to analyze the electromagnetic noise of PMSM for EV drives. Through studying the electromagnetic force wave generation mechanism of PMSM, the analytical method of electromagnetic wave under no-load condition is deducted. Combined with electromagnetic simulation, the wave time, frequency and amplitude of electromagnetic force are accurately calculated. By building the finite element simulation model of motor structure and using the finite element modal simulation, the modal frequencies and shapes are obtained. From the results it can be found that the first six orders modal frequencies of the whole stator structure is low, and the stator structural resonance is easily inspired by the electromagnetic force under no-load condition during the process of speed regulation. The study provides guidance for the structural design of low-noise motor.

Keywords: electric vehicle, permanent magnet synchronous motor, electromagnetic noise, electromagnetic force, modal analysis

0 前 言

为解决环境污染和能源短缺的问题, 电动汽车技术已成为国内外各大汽车公司的研究热点。为提高电动汽车的市场竞争能力, 增强电动汽车的过载能力, 电动汽车的驱动电机设计的电密和磁密取值较高, 使电机在大负载工作点饱和程度较高, 增加了电磁力波的含量; 电动汽车驱动电机的轭部厚度等电机结构参数取值比一般工业驱动电机小, 电机

结构的刚度有所降低, 引起电磁振动幅值增大^[1]。电磁噪声的频带通常分布在 700Hz~5kHz 之间, 在这个频带范围内, 由于人耳对 800Hz 具有很高的灵敏度, 会产生强烈的噪声感觉, 最难以容忍的是刺耳的啸叫声。该电磁噪声过大不仅影响驾驶的舒适性, 而且对周边环境造成噪声污染。

电机的电磁噪声来源于电磁振动, 是由电机气隙磁场作用于定、转子产生的径向电磁力波所激发, 当电磁力波的频率及其阶次与定子结构的固有频率接近时, 电机就会发生共振, 引起电磁振动产生噪声。因此, 电机的电磁噪声振动是由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共同决定的。目前, 对于电磁噪声振动的研究, 大多是针对感应电机、同步电机和直流电机展开, 永磁同步电机作为新兴的高效特种电

收稿日期: 2011-12-20; 修回日期: 2012-02-23

基金项目: 中央企业电动汽车产业联盟共性技术资助项目(JS-101)

作者简介: 申秀敏(1982-), 女, 山东聊城人, 博士, 工程师, 研究方向为汽车振动与噪声控制。

通讯作者: 申秀敏, E-mail: sxm2004_2000@163.com

机, 针对其电磁噪声和振动的研究还较少。本文针对电动汽车驱动用永磁同步电机空载工况的电磁噪声和振动进行研究和分析。

1 永磁同步电机电磁力波分析原理

电机中, 主磁通大致上沿径向进入气隙, 并在定子和转子上产生径向力, 从而引起电磁噪声和振动^[2]。电机气隙磁场所产生的作用于定子铁心内表面单位面积上的径向电磁力的数值和分布 F_n (单位: N/m^2), 可根据 Maxwell 定律求得^[3]:

$$F_n(\theta, t) = \frac{b^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; $b(\theta, t)$ 为气隙磁密。

忽略饱和时, 气隙磁密 $b(\theta, t)$ 可由气隙磁势 $f(\theta, t)$ 和磁导 $\lambda(\theta, t)$ 的乘积得到, 即:

$$b(\theta, t) = f(\theta, t)\lambda(\theta, t) \quad (2)$$

由此可见, 电机电磁噪声振动的激励力取决于定、转子的绕组磁势和气隙磁导, 即决定于定、转子磁场。因此, 对车用永磁同步电机的电磁噪声振动的研究问题即可转化为对定、转子磁场的分析。

对于永磁同步电机, 定子开槽且转子表面光滑, 气隙磁导可通过式(3)求得:

$$\lambda(\theta, t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos kZ_1\theta \quad (3)$$

式中: Z_1 为定子槽数; A_0 为气隙平均磁导幅值; A_k 为气隙 k 次谐波磁导幅值。

2 永磁同步电机空载电磁力波分析

永磁同步电机空载时, 定子绕组中无电流, 气隙磁势仅由转子磁势产生, 表达式见公式(4)。

$$f(\theta, t) = \sum_{\mu} F_{\mu} \cos(\omega_{\mu}t - \mu\theta) = \sum_{\mu} F_{\mu} \cos(\mu \frac{\omega}{p}t - \mu\theta) \quad (4)$$

式中: p 为基波极对数即极对数; μ 为转子谐波极对数即谐波次数, $\mu = (2r+1)p$, $r=1, 2, 3, 4 \dots$; ω_1 和 ω_{μ} 分别为转子基波旋转角速度和转子 μ 次谐波旋转角速度。

由公式(3)和(4)可以求得永磁同步电机空载气隙磁密 $b_{\mu}(\theta, t)$ 。

$$b_{\mu}(\theta, t) = \sum_{\mu} F_{\mu} A_0 \cos(\mu \frac{\omega}{p}t - \mu\theta) + \sum_{\mu} \sum_k F_{\mu} A_k \cos(\mu \frac{\omega}{p}t - (\mu \pm kZ_1)\theta) \quad (5)$$

其中 v_z 为齿谐波的极对数。

$$v_z = p \pm kZ_1, \quad k=1, 2, 3, 4 \dots$$

通过公式(5)可以看出, 永磁同步电机的空载磁场主要包括转子主极磁场和齿谐波磁场。

以电动汽车驱动用永磁同步电机为例, 电机采用内转子 8 极 48 槽结构, 额定功率为 20kW, 额定转速为 2800rpm, 最高转速为 8000rpm, 采用 $I_d=0$ 的矢量控制。

利用电磁仿真分析软件 Ansoft 建立该电机的有限元电磁仿真模型, 如图 1 所示。采用时步有限元法对电动汽车驱动用永磁同步电机进行空载特性仿真分析, 计算出电机空载工况的气隙磁密波形如图 2 所示。

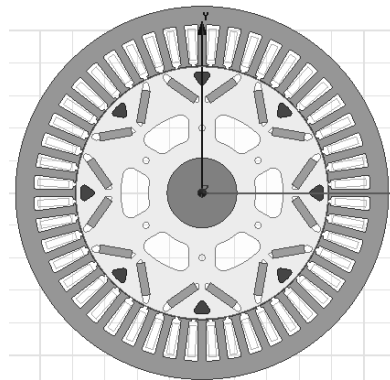


图 1 电机有限元电磁仿真模型
Fig.1 Electromagnetic simulation model of motor

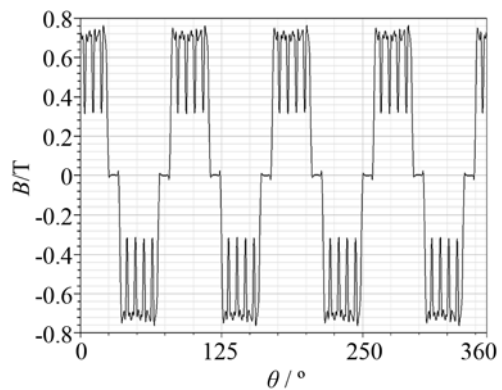


图 2 永磁同步电机空载工况气隙磁密
Fig.2 Air-gap flux density of PMSM under no-load condition

根据以上推导分析, 针对电动汽车驱动用永磁同步电机进行空载工况的主极磁场谐波、齿谐波分析, 得到转子主极磁场谐波及齿谐波的次数; 再将仿真计算出的气隙磁密波形的数据保存并作傅里叶分析, 得出谐波磁场的幅值, 如表 1 和表 2 所示。

一般阶次小于 10 的力波才会对电磁噪声有较大的影响, 所以根据所分析出的转子主极磁场的各次谐波以及齿谐波, 重点分析低阶次径向电磁力波。

可以确定出永磁同步电机的电磁力波主要成分包括由一阶齿谐波 $v_z = -11$ 或 $v_z = 13$ 和主极磁场

表 1 永磁同步电机空载工况转子主极磁场谐波

Table 1 Polar magnetic field harmonic waves of PMSM rotor under no-load condition

r	μ/p	气隙磁密幅值	频率 f
0	1	0.7519	f
1	3	0.0933	$3f$
2	5	0.0734	$5f$
3	7	0.1089	$7f$
4	9	0.0639	$9f$
5	11	0.0533	$11f$
6	13	0.0652	$13f$
7	15	0.0229	$15f$
8	17	0.0335	$17f$
9	19	0.0188	$19f$

表 2 永磁同步电机空载工况齿谐波分析

Table 2 Harmonic waves of PMSM stator under no-load condition

k	1		2	
v_z/p	-11	13	-23	25
频率 f	f	f	f	f

表 3 永磁同步电机空载工况径向力波分析

Table 3 Radial force wave analysis of PMSM under no-load condition

力波次数	径向力幅值/(Nm ²)	频率 f
9(-11)	1355	$10f$
11(-11)	1130	$12f$
11(13)	1383	$10f$
13(-11)	1383	$14f$
13(13)	1706	$12f$
1+1	224947	$2f$

谐波 μ 相互作用产生的径向力波，以及基波磁场的 2 倍频径向力波，整理结果如表 3 所示。

通过表 3 可知，永磁同步电机空载工况所产生的径向电磁力波的次数为 0 或 2 次。

在表 1~3 中： f 为基波频率(Hz)， $f = p \frac{n}{60}$ ，其中， n 为电机转速。

因此只需确定电机转速，就可以精确计算电机定子表面所受的电磁力的波次、频率及幅值。

3 永磁同步电机结构动态特性分析

电机定子结构在径向电磁力的作用下产生振动，其强度与电磁力的频率和大小、定子结构的固有频率等因素有关^[4]。假设，将定子简化为带两个端盖的圆柱形外壳， r 阶径向电磁力产生的振动位移为^[3]

$$A_r = \frac{F_r}{M} \frac{1}{\sqrt{(\omega_r^2 - \omega_n^2)^2 + 4\zeta_r^2 \omega_n^2 \omega_r^2}} \quad (6)$$

式中： M 为圆柱壳的质量(单位：kg)； ω_r 为 r 阶固有角频率(单位：rad/s)； ω_n 为 r 次电磁力角频率(单

位：rad/s)； ζ_r 为模态阻尼比； F_r 为径向电磁力(单位：N)， $F_r = \pi D_{im} L_i P_m$ ； D_{im} 为电机贴心内径直径(单位：m)； L_i 为电机贴心的有效长度(单位：m)； P_m 为 n 阶电磁力密度幅值(单位：N/m²)。

模态阻尼比一般采用经验公式：

$$\zeta_r = \frac{1}{2\pi} (2.76 \times 10^{-5} f_r + 0.062) \quad (7)$$

式中： f_r 为电机结构的固有频率(单位：Hz)。

从公式(6)中可以看出：当径向电磁力的频率和电机的固有频率接近时，振动达到最大，并产生很大的电磁噪声。因此，在设计电机时，需使两者的频率差拉大，以防止共振。

为确定所研究的电动汽车驱动用永磁同步电机在空载工况是否存在共振现象，本文依次建立了样机定子铁芯、铁芯与绕组和定子结构的三维有限元仿真模型，通过对三种结构的有限元模态仿真计算，得到了定子结构的有限元模态频率和振型，并分析了结构部件对电机定子结构模态频率的影响。

在建立电机定子结构的有限元仿真模型时，因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，因此需对绕组进行合理的简化，文中将绕组端部形状简化为等效与实际绕组体积相同的空心圆柱体。所建立的电机定子结构的有限元仿真模型如图 3 所示，电机定子结构的模态有限元仿真参数如表 4 所示。

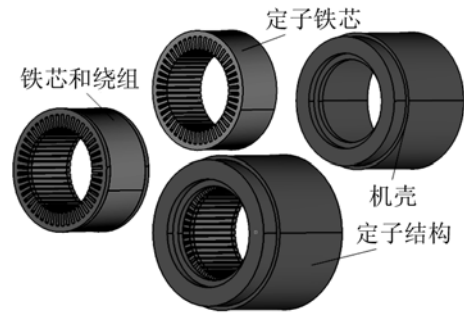


图 3 电机定子结构 CAD 模型

Fig.3 CAD model of motor stator structure

表 4 电机定子结构有限元仿真的材料力学参数

Table 4 Material mechanical parameters of PMSM stator

材料	密度/(kg/m ³)	杨氏模量/GPa	泊松比 ν	
定子铁芯	硅钢片	7.5×10^3	210	0.3
定子机壳	铝合金	2.5×10^3	71	0.34
绕组	铜	8.6×10^3	10	0.34

文中采用 Hypermesh 有限元前处理软件对电机定子结构 3 种结构模型进行六面体网格的划分及分析设置，基于 Nastran 求解器求解定子结构的 3 种结构模型在自由无约束条件下的模态参数。

3 种结构的模态频率的有限元分析结果如表 5 所示。可以看出，电机定子结构的前 6 阶模态频率

较低, 电机空载工况在调速过程中所激发的电磁力容易导致电机定子结构的共振。

图 4 是永磁同步电机定子结构的前 6 阶模态振型, 从图中可以看出, 由于电机定子结构是对称的, 因此会出现振型和频率相同但相位不同的情况。

表 5 电机定子结构模态频率有限元分析结果
Table 5 Analysis result of modal frequencies of motor stator

模型阶数	模态频率/Hz		
	定子铁芯	铁芯和绕组	定子结构
1	484.3	415.4	1077
2	484.5	416.2	1077
3	1085	801.6	1881
4	1085	801.8	1881
5	1300	1113	2643
6	1300	1114	2643
7	2344	1719	4016
8	2344	1720	4016
9	2418	1994	4249
10	2418	1997	4249

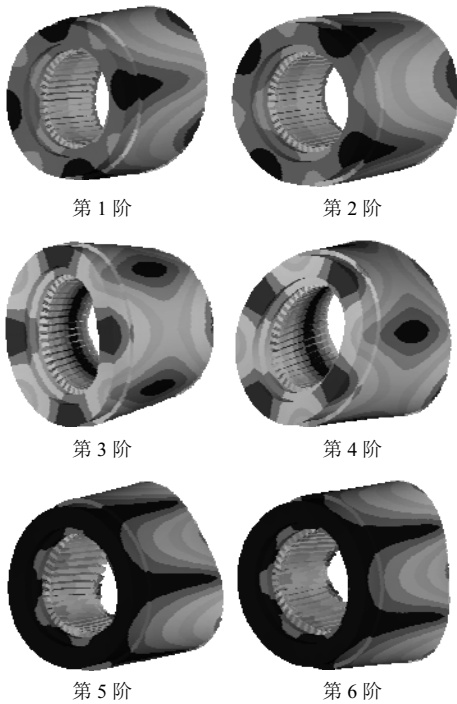


图 4 定子结构的模态振型
Fig.4 Modal shapes of motor stator structure

5 结 论

电机的电磁振动和噪声是由作用于电机定子

结构上的各次径向电磁力波和定子结构的各阶径向模态共同决定的。因此本文从这两个方面入手, 针对电动汽车驱动用永磁同步电机空载工况的电磁噪声和振动展开研究和分析。

(1) 通过研究永磁同步电机的电磁力波产生机理, 推导了空载工况电磁力波的解析分析方法, 分析了电机定子表面所受电磁力的力波次数和频率;

(2) 基于 Ansoft 软件建立了电机的有限元电磁仿真模型, 采用时步有限元法计算了电机在空载工况的气隙磁密, 通过对仿真结果进行傅里叶分析得到了气隙磁密的频谱;

(3) 结合电机电磁力的解析计算和仿真分析的结果, 精确计算出了电机在空载工况电磁力波的波次、频率和幅值;

(4) 结合电机模型, 建立了电机定子结构的有限元仿真模型, 通过有限元模态仿真计算, 得到了定子结构的有限元模态频率和振型。发现: 电机定子结构的前 6 阶模态频率较低, 电机空载工况在调速过程中所激发的电磁力容易导致电机定子结构的共振。

参 考 文 献

- [1] 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.
CHEN Yongxiao, ZHU Ziqiang, YING Shancheng. Analysis and control of motor noise[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1987. (in Chinese)
- [2] 申秀敏, 左曙光. 燃料电池车声振测试机噪声源识别[J]. 声学技术, 2008, 27(4): 570-576.
SHEN Xiumin, ZUO Shuguang. Noise And Vibration Test And Noise Sources Identification For Fuel Cell Vehicle[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(4): 570-576.
- [3] Jacek F Gieras, Chong Wang, Joseph Cho Lai. Noise of Polyphase Electric Motors[M]. CRC Press. 2006: 21~185.
- [4] 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.
- [5] 汪庆年, 李红艳, 史凤娟. 基于频谱分析的电机噪声源的识别[J]. 声学技术, 28(4): 527-530.
WANG Qingnian, LI Hongyan, SHI Fengjuan. Motor noise source identification based on spectrum analysis[J]. Technical Acoustics, 28(4): 527-530.