

电动汽车用永磁同步电机振动噪声的计算与分析

李晓华, 黄苏融, 张琪, 李良梓

(上海大学 机电与自动化工程学院, 上海 200072)

(上海电力学院 电气工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了在电动汽车电机设计阶段估算电机的电磁振动噪声特性, 优化电机设计; 应用电机电磁场理论定性分析了产生电机电磁振动噪声最主要原因的径向力波的产生机理及特点。根据其特点, 提出了一种利用模态叠加法的电机振动噪声的分析方法。利用此方法对一台燃料电池汽车用永磁同步电机进行了计算, 借助有限元软件电磁和结构耦合分析方法分别计算主要径向力波在不同频率下的谐波响应, 最后把响应叠加得到电机运行范围内的振动噪声的估计值。计算结果和实验结果的比较验证了计算方法的准确性以及理论的正确性。

关键词: 车用永磁同步电机; 振动噪声; 机电耦合; 模态叠加; 锤击法模态实验

Calculation and analysis of vehicle vibration and noise of Permanent magnet synchronous motor applied in electric vehicle

LI Xiaohua, HUANG Surong, LI Liangzi

(School of mechatronic engineering and automation, shanghai university, shanghai 200072 china)

(Electric power engineering, shanghai university of electric power, shanghai 200093 china)

Abstract: To define the characteristics of NVH(noise, vibration, and harshness) in the process of electric vehicle motor designing, the principle and feature of the space radial force wave of the motor are analyzed qualitatively based on the motor electromagnetic field theory. According to its features, a method to analyze the NVH of the motor with modal superposition is proposed. The NVH characteristics of a permanent magnet synchronous motor are calculated with this method. Harmonic responses of main radial force waves at different frequencies are first calculated separately with finite element software electromagnetic and structural coupling analysis method, and then superposed to produce the estimates of the vibration and noise of the motor within its operating range. Finally, the accuracy of the calculation method and the correctness of the theoretical analysis are verified by the comparison between the calculation and the experimental results.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor; Vibration and noise; Electromechanical coupling; Modal superposition; Hammer modal experiments

中图分类号: TM 351

0 引言¹

电动汽车用驱动电机设计时极力追求高功率密度、轻量小型化以及宽范围调速, 因此电机结构复

杂、刚度低, 电磁振动噪声的抑制难度加大。引起电机振动噪声的最主要原因是径向力波的影响, 因此在汽车电机设计阶段估计计算电机的电磁振动噪声特点对降低成本、提高电机的运行稳定性具有重要的意义。

近几年, 国内外学者对电机振动噪声产生的机理进行了深入的研究。Jacek F. Gieras 采用解析法分别计算了8极36槽和10极36槽电机的电磁噪声, 结果表明10极36槽电机的齿槽转矩小, 但是振动噪声大, 因为有2阶力波存在^[1]。浙江大学的学者陈阳生, 杨浩东对直流永磁电机进行了分析, 认为

¹基金项目: 国家高新技术研究发展计划(863计划)(2012AA110701)。

作者简介: 李晓华(1974-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电力电子与电力传动;

黄苏融(1953-), 男, 博士生导师, 主要研究方向为电机设计, 电力电子与电力传动, 电机电磁场分析;

李良梓(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

通讯作者: 黄苏融

径向力主要是由转子上的永磁体产生,因此额定负载时的电磁振动仅比空载时高 20%^{[2-5]a}。韩国学者 Hong-seokKo 认为电磁振动源有三类:齿槽转矩、转矩脉动和径向力波,其中最重要的是径向力波^[6]。韩国学者 Tao Sun 分析比较了 8 极 9 槽和 8 极 12 槽两种极槽配合的内置式永磁同步电机的齿槽转矩和径向力^[7]。

上海大学的黄苏融教授采用定性分析的方法,得到了电磁力谐波的解析表达式^[8]。沈阳工业大学的于慎波,唐任远给出了一种解析计算电磁振动方法^[9-11],Rakib Islam 在文献[12-13]中研究表明电机振动与噪声的根源是径向力而非脉动转矩,Matthias Boesing 在文献[14-16]中先介绍了一种基于电磁和结构耦合的振动噪声的分析方法,又以一台 15kW, 24S10P 的电机为例,研究证明了切向力对 4 阶弯曲模态振动噪声有很大的影响,对 0 阶伸缩模态影响不大。诸自强教授在文献[17]中研究了转子上的不平衡磁拉力的特性,指出电机的不平衡磁拉力与齿槽配合有密切关系。

以上分析大都是取有限的运行点进行分析,不能分析电机运行范围内所关心的所有频率下电机的振动响应,本文介绍一种空间径向力波响应叠加的分析方法,并结合有限元机电耦合方法分析主要空间力波在所关注频率范围内的响应。能较快速的估计电机的振动噪声特性。

1. 本方法的计算步骤和样机参数

此方法把电机看作是线性结构,步骤如下:

- 1) 根据理论分析结果,采用有限元软件分析计算永磁电机电磁力大小,并对电磁力进行空间傅里叶谐波分解;
- 2) 利用有限元机电耦合分析方法计算电机结构在单位空间力波作用下不同频率下的结构响应(振动位移、加速度等);
- 3) 结构响应线性叠加得到电机关注频率范围内的振动结果;
- 4) 噪声特性估计。

计算流程图如下图 1 所示。

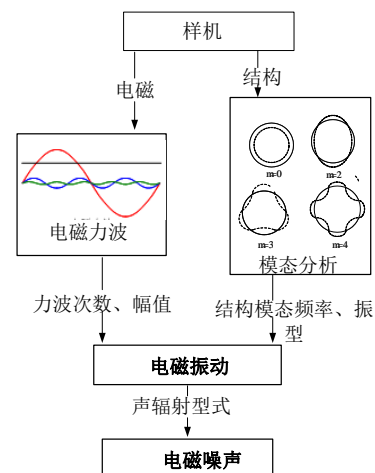


图 1 结构谐波响应分析的流程图

Fig.1 The flow chart of the harmonic response analysis of the structure

本文样机为一台燃料电池汽车用内置式永磁同步电机,样机参数如下:

表 1 样机结构技术参数

Tab 1 Technical parameters of the prototype structure

参数	数值
槽数/极数/相数	48/8/3
额定功率/kW	42
额定转速/rpm	4000
定、转子铁芯长度/mm	160
定子外径/mm	230
冷却方式	水冷

2. 径向电磁力计算

2.1 径向电磁力解析法分析

永磁同步电机中,由于切向磁密一般较径向气隙磁密小很多,所以在计算电磁力时,根据麦克斯韦应力张量法,单位面积上的径向力的瞬时值可表示为^[18]:

$$f(t, \alpha) = \frac{b_n^2(t, \alpha)}{2\mu_0} \quad (1)$$

t 表示时间, α 代表空间角度, $b_n(t, \alpha)$ 是气隙磁密。

空间 r 阶径向力波的 m 次时间谐波的大小为:

$$f_{r,m} = k_m \cos(m\omega t - r\alpha - \theta_m) \quad m=1 \cdots n \quad (2)$$

α 代表空间角度, r 表示空间力波的阶次, k_m 表示力波的幅值。这里假定力波无轴向分量。

合成空间 r 阶径向力波大小:

$$\begin{aligned}
f_r &= f_{r,1} + f_{r,2} + \cdots f_{r,m} + \cdots f_{r,n} \\
&= \sum_{m=1}^n k_m \cos(m\omega_1 t - r\alpha - \theta_m) \\
&= \sum_{m=1}^n k_m \cos(m\omega_1 t - \theta_m) \cos r\alpha \\
&\quad + \sum_{m=1}^n \sin(m\omega_1 t - \theta_m) \sin r\alpha \\
&= \sum_{m=1}^n (a_m(t) \cos(r\alpha) + b_m(t) \sin(r\alpha))
\end{aligned} \quad (3)$$

从上式可以看出,除0阶空间力波外, r 阶空间力波可以分解成两个正交的空间波形 $\cos(r\alpha)$ 和 $\sin(r\alpha)$ 的叠加,如图2所示。系数 $a_m(t)$ 、 $b_m(t)$ 与电机的转速有关,会随着电机转速的改变而改变。

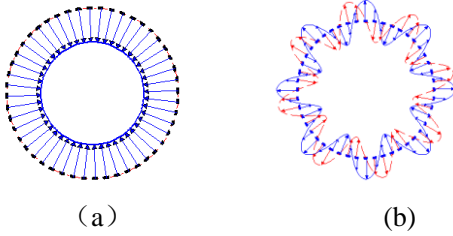


图2 样机空间径向力波分解图 (a)0阶力波 (b)8阶力波
Fig.2 The space radial force wave decomposition of prototype (a) 0-order force wave (b) 8-order force wave

单位面积上电磁力的瞬时值 $f(t, \alpha)$ 可以表示为所有空间径向力波的叠加:

$$f(t, \alpha) = \sum_{r=0}^R (a_m(t) \cos(r\alpha) + b_m(t) \sin(r\alpha)) \quad (4)$$

2.2 径向电磁力空间谐波分析及有限元仿真

对整数槽永磁同步电机来说,电机的振动噪声主要是由定转子高次谐波磁场相互作用引起的。定子绕组磁场谐波次数为:

$$\nu = (6k_1 + 1)p, k_1 = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots; \quad (5)$$

转子谐波磁场的极对数可以表示为:

$$\mu = (2k_2 + 1)p, k_2 = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

因此定子和转子谐波磁场相互作用产生的径向力波次数为:

$$\begin{aligned}
r &= \mu + \nu = 2p[(k_2 + 3k_1) + 1] \\
r &= \mu - \nu = 2p(k_2 - 3k_1)
\end{aligned} \quad (7)$$

从上式(7)可以看出,整数槽电机力波次数 r 可能等于零或等于电机极数的整数倍。因此本文样机气隙中空间力波阶数除了0阶以外,最低的力波阶次等于极数,即8阶。图3为有限元软件计算得

到的样机额定转速4000rpm时齿部电磁力密度的空间谐波的傅里叶分解。验证了式(7)的结果。

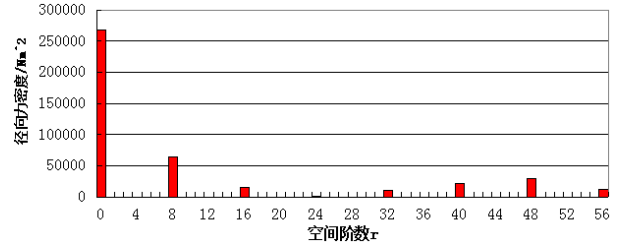


图3 4000rpm 径向力波空间谐波
Fig.3 4000 rpm No-load the radial force wave

径向电磁力波的阶次越低,电机变形相邻两节点间的距离越远,径向形变越大;因此低次径向力波是引起电磁振动和噪声的主要来源。更高阶力波由于影响很小,可以忽略^[19]。

3. 径向力波谐波响应 NVH 特性分析

3.1 单位力波谐波响应有限元分析

由上文分析可知,低次径向力波是引起电磁振动和电磁噪声的主要原因,因此,本文样机只计算0阶和8阶力波的响应,8阶以上的高阶力波因为影响小,可以忽略。

本文首先用有限元软件计算样机4000rpm时的电磁力并进行傅里叶谐波分解,见图3,然后取0阶力波和8阶力波单位力波分别根据式(3)分解、然后离散化后分别加到定子齿上,形变观测点选择定子外表面观察,形变量取定子外表面的偏移量。如图4所示。利用有限元软件机电耦合的方法,分别计算不同空间力波在不同频率下的力波响应,频率范围选择从500HZ到6000HZ,分析定子轭在 r 阶单位力波的不同频率下的响应。计算结果如下图5。

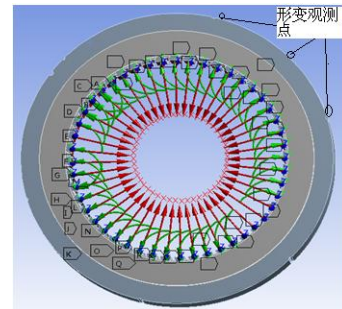


图4 r 阶单位力波加载及形变观测点图
Fig.4 r order units force wave loading and the deformation observation point

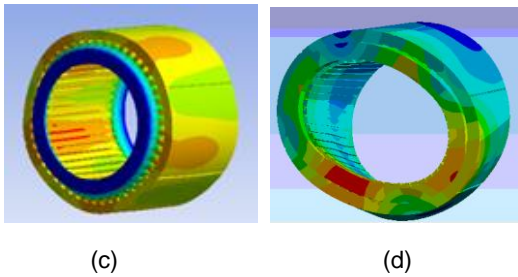
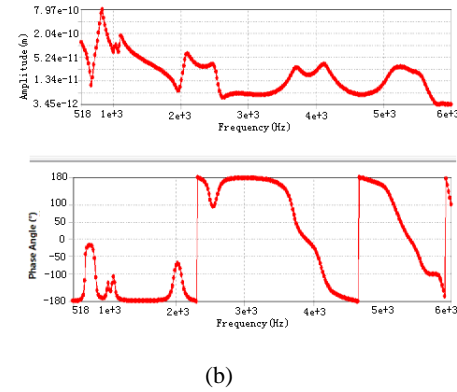
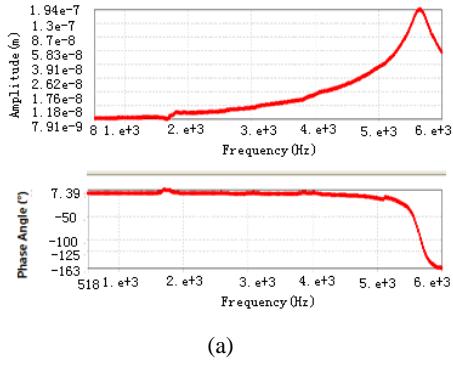


图 5 (a) 0 阶力波响应频谱图 (b) 8 阶力波响应频谱图 (c) 0 阶力波偏移量最大 5700HZ 处振型 (d) 8 阶力波偏移量最大 830HZ 处振型

Fig.5 (a) 0-order force response spectrum (b) 8-order force response spectrum (c) 0-order gravity wave offset shapes (d) 8-order gravity wave offset shapes

从图 5 可以看到, 0 阶力波的 5700HZ 处和 8 阶力波的 830HZ 处, 定子铁芯有较大形变。分别观察 5700HZ 和 830HZ 处振型, 可以看到, 0 阶力波 5700HZ 激振的形变模态是 0 阶, 8 阶力波 830HZ 处形变模态形状为 2 阶。但 8 阶力波最大形变为 $2.195 \times 10^{-8} \text{m}$, 明显比 0 阶力波激振的 $1.017 \times 10^{-7} \text{m}$ 小很多。而且 0 阶力波频率高。因此, 本样机振动噪声主要是 0 阶力波的作用引起的。

3.2 响应叠加

某一转速下, 所有响应的叠加即为总的响应结果, 见式 8。

$$X(\omega) = \sum_{r=0}^R X_{\text{unit},r}(\omega) f_r(\omega) \quad (8)$$

上式 (8) 是响应叠加后的计算结果, $f_r(\omega)$ 是 r 阶径向力波的幅值, $X_{\text{unit},r}(\omega)$ 是 r 阶单位力波作用到定子齿后在定子表面观察到的形变随频率变化的值, 由有限元软件计算得到; $X(\omega)$ 是某一转速下所有空间径向力波响应叠加后的结果随频率变化的值, 本文只考虑 0 阶和 8 阶力波; $X_{\text{unit},r}(\omega)$ 和 $X(\omega)$ 可以是偏移量、速度或者加速度。本文取偏移量。

4. 实验模态分析

为验证上文径向力波谐波响应分析的正确性, 本文采用某公司生产的 N-MODAL 信号分析系统对样机结构进行锤击法模态实验。将被测样机用软线悬挂, 模拟电机结构自由无约束情况。

在样机机身中间部位沿周向选择 96 个激振点, 对每个激振点进行敲击, 锤击时使锤头垂直电机表面敲击, 采取适当的锤击力度, 尽量使敲击信号接近脉冲信号。下图 6 和图 7 是实验过程和实验结果。

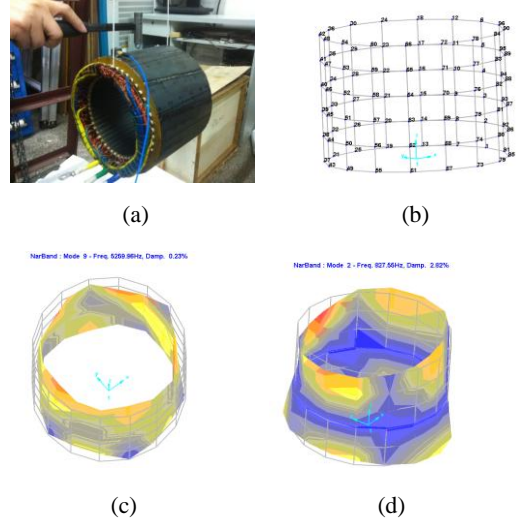


图 6 (a) 实验模态分析测试平台 (b) 实验模态分析布点图 (c) 0 阶模态振型 5259HZ (d) 2 阶模态振型 827 HZ

Fig.6 (a) Experimental modal analysis test platform (b) Distribution diagram of experimental modal analysis (c) 0-order modal shape :5259HZ (d) 2-order modal shape: 827 HZ

对比图 5 的谐波响应分析结果和和图 6 的锤击法模态实验结果可以看到:

- 1) 有限元谐波响应结果 0 阶力波偏移量最大处为 5700HZ, 振型为 0 阶, 8 阶力波偏移量最大处为 830HZ, 振型为 2 阶;
- 2) 模态实验结果测得样机 0 阶模态频率为

5259HZ, 二阶模态频率为 827 HZ, 与电磁力波谐波响应分析的结果吻合很好, 验证了电磁力谐波响应 NVH 特性分析的正确性。

5. 电磁噪声的估计计算

r 阶力波的声压级水平可以表示为下式 (9), 单位为分贝 (dB):

$$L_p = 10 \log \left(\frac{2P_s}{P_{\text{Sref}}} \right) \quad (9)$$

P_s 是电机对应频率辐射的声功率, 单位是

W, P_{Sref} 是参考声功率级, 大小为 10^{-12}W 。

$$P_s = 4\sigma_{\text{rel}} \rho c \pi^3 f_e x^2 R_{\text{out}} L_{\text{stk}}^{[15]}, \quad (10)$$

其中, $\sigma_{\text{rel}} = \frac{k^2}{1+k^2}$; $k = 2\pi R_{\text{out}} f_e / c$ 。上式

中 ρ 是传播声波的介质的密度, 20°C 的空气密度是

1.186kg/m^3 , c 是介质中的声速, 20°C 及标准大气

压下, 空气中的声速是 344m/s , f_e 是电机某一转速

下的频率, R_{out} 是定子铁芯外径, L_{stk} 是定子铁芯

轴长, x 是定子铁芯外表面形变大小, 这里的 x 即式 (8) 中的 $V(\omega)$ 。

把样机参数和上文中式 (8) 中计算出的偏移量分别带入公式 (9) 和 (10), 可得样机在 4000rpm 的最大声压为 $L_p = 61.7 \text{dB}$ 。

5. 电机噪声的实验测定

为验证本文方法的正确性, 对样机进行噪声实验测试^[19], 如图 7 所示为样机噪声测试实验图。实验是在电机处于 4000rpm 空载运行状态、平均背景噪声 66.2 dB 环境下进行的, 以电机在台架上的垂直投影中心为球心, 测点在空间半径为 1m 的半球表面上, 电机的前、后、左、右及正上方各设置一个测点, 根据检测环境对检测结果的影响, 对实验结果进行修正然后用声级计测出各测点的 A 计权声功率级, 求得平均值为 89.1dB。结果如下:

表 2 样机噪声数据表 (修正)

Tab 2 the noise data table of prototype (corrected)	
平均背景噪声 (dBA)	66.2

电机转速 (rpm)	4000
电机前方(dBA)	88.1
电机左方(dBA)	89.1
电机后方(dBA)	88.7
电机右方(dBA)	89
电机正上方(dBA)	90.4
平均值(dBA)	89.1

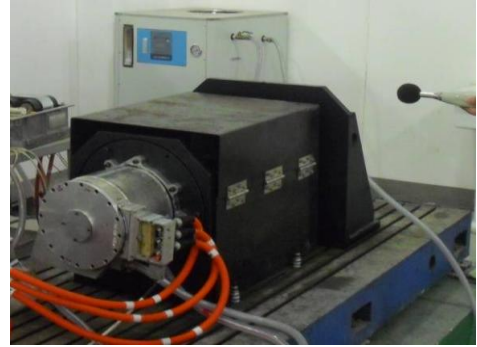


图 7: 样机噪声测试实验图

Fig.7 Prototype noise test experimental Figure

应用本文方法对电机结构进行振动噪声估算时仅考虑电机的电磁振动噪声, 而噪声实验结果还包含电磁噪声和机械噪声等, 因此实验结果与噪声估计结果有误差是合理的。

4. 结论

根据电机电磁场理论, 对电机 NVH 特性进行了计算和分析, 并提出了一种基于模态叠加的车用永磁同步电机 NVH 的分析方法, 应用该方法对一台燃料电池用永磁同步电机进行了计算分析, 计算结果和实验结果基本吻合, 验证了计算方法的准确性和理论方法的正确性。结果表明: 应用本文方法可以在电机设计阶段估计电机的 NVH 特性, 进而优化电机设计。本文方法也可以适用于其它分数槽永磁同步电机。

参考文献:

- [1]. Jacek F.Gieras, Analytical Prediction of noise of magnetic origin Produced by Permanent magnet brushless motors[C] IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2007,vol.1:148 — 152.
- [2]. Y.S.Chen, et al., Vibration of PM brushless machines having a fractional number of slots Per Pole[J]. IEEE Trans. MagneticS, 2006,vol.42(10):3395 — 3397.
- [3]. Yangsheng Chen, et al., Investigation of Electromagnetic vibration of Permanent magnet brushless magnet brushless machines[C], Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008,:621 — 626.

- [4]. 杨浩东、陈阳生 永磁同步电机常用齿槽配合的电磁振动 电工技术学报 2011,26 (9) :25-30
YANG Haodong, CHEN Yangsheng, Electromagnetic Vibration of PM Synchronous Motors with Different Combinations of Slot and Pole Number[J], Transactions of China Electrotechnical Society, 2011,26 (9) :25-30
- [5]. 杨浩东, 永磁同步电机电磁振动分析, 博士学位论文, 浙江大学, 2011 年 10 月
YANG Haodong, Electromagnetic vibration analysis of Permanent magnet synchronous motor, PhD thesis, Zhejiang University, October 2011
- [6]. Hong-Seok Ko, Kwang-Joon Kim, Characterization of noise and vibration sources in interior Permanent-magnet brushless dc motors vibration force in brushless Permanent magnet motors[J]. IEEE Trans. Magnetics, 2004,40(6):3482-3489.
- [7]. Tao Sun, Ji-Min Kim, Effect of Pole and Slot Combination on Noise and Vibration in Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, NO(5):1038-1041
- [8]. S. Huang, M. Aydin, T. A. Li Po. Electromagnetic vibration and noise assessment forces for surface mounted PM machines [C]. Proc. of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2001 3(15-19):1417-1426.
- [9]. 于慎波, 永磁同步电动机振动与噪声特性研究:[博士学位论文]. 沈阳工业大学, 2006.
YU Shenbo, Vibration and noise characteristics of the permanent magnet synchronous motor, PhD thesis, Shenyang University of Technology, 2006.
- [10]. YU S, Tang R Electromagnetic and mechanical characterizations of noise and vibration in Permanent magnet synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006:1335-1338.
- [11]. Shenbo Yu, et al., Investigation on noise and vibration origin in Permanent magnet electrical machine for elevator[C]. Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems, 2005, vol. 1:330 — 333.
- [12]. Rakib Islam and Iqbal Husain, Analytical model for Predicting noise and vibration in Permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009, pp3461 — 3468.
- [13]. Rakib Islam, Iqbal Husain, Analytical Model for Predicting Noise and Vibration in Permanent-Magnet Synchronous Motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(6):2346-2353
- [14]. M. Boesing, K. Kasper, and R. De Doncker, Vibration excitation in an electric traction motor for a hybrid electric vehicle[J]. in Proc. 37th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. (INTER-NOISE), Shanghai, China, Nov. 2008.
- [15]. M. Boesing, T. Schoenen, K. Kasper, and R. De Doncker, Vibration synthesis for electrical machines based on force response superposition[J]. IEEE Trans. Magn., 2010, 46(8) :2986–2989.
- [16]. Matthias Boesing, and Rik W. De Doncker, Exploring a Vibration Synthesis Process for the Acoustic Characterization of Electric Drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(1) : 70-78
- [17]. Zhu Z Q, Ishak D, Howe D, et al. Unbalanced magnetic forces in Permanent-magnet brushless Machines with diametrically asymmetric Phase windings[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(6):1544-1553.
- [18]. Jacek F. Gieras, Chong Wang, Joseph Cho. Lai, 《Noise of polyphase electric motors》[M]. CRC/Taylor & Francis, 2006
- [19]. 马大猷. 噪声与振动控制工程手册[M]. 机械工业出版社. 2002
MA Dayou, Noise and Vibration Control Engineering Manual [M]. Machinery Industry Press, 2002