

基于 JMAG 的永磁同步电机电磁噪声评估

Evaluation of Electromagnetic Noise of Permanent Magnet Motor Based on JMAG

黄苏融, 张琪, 杨萍, 陈毅¹

(上海大学机电工程与自动化学院, 上海市 200072)

摘要: 本文提出了一种基于 JMAG 有限元软件的永磁同步电机电磁噪声评估方法。即在电机电磁力和固有频率模态仿真分析的基础上, 进行永磁同步电机电磁噪声声场有限元分析。为进一步验证分析方法的正确性, 论文采用锤击法模态实验和噪声实验进行验证。实验数据与仿真结果基本吻合, 验证了评估方法的准确性和可行性。

关键词: 电动汽车; 永磁电机; 电磁噪声; 模态分析; JMAG

Abstract: In this paper, an approach which is used to evaluate the electromagnetic noise of the permanent magnet synchronous motor is proposed. This approach adopts the FEA analysis for evaluating the electromagnetic noise of permanent magnet motor in the foundation of electromagnetic force simulation result and nature frequencies of modal simulation result. To verify the validity of this method, the hammer modal test and the noise test are adopted in this paper. The good agreement between the test result and simulation result verifies the feasibility and precision.

Keywords: Permanent Magnet Motor; Electromagnetic Noise; Modal Analysis; JMAG

0 引言:

永磁电机具有结构简单、高转矩惯量比、恒功率宽调速、高效率、高功率密度等优点, 在电动汽车、数控机床、城轨牵引、全电战车、电主轴驱动等系统中有着广泛的应用。然而, 永磁同步电机振动噪声一直是困扰人们的难题, 电磁噪声大小已成为衡量永磁同步电机设计与制造优劣的一个重要指标。如何精确计算和评估电机的电磁噪声, 大幅度降低电机的电磁噪声是永磁同步电机设计必须考虑的重要内容和关键技术^{[1][2][3]}。本文以一台 48 槽 8 极的永磁同步电机为例, 研究永磁同步电机电磁噪声的评估方法, 提出了基于 JMAG 有限元软件的永磁同步电机电磁噪声分析流程, 仿真分析样机电磁力、模态固有频率和电磁噪声。为验证分析方法的正确性, 论文采用锤击法模态实验和噪声实验进行验证。表 1 给出了永磁同步电机样机的主要参数。

表 1 实验样机技术指标

额定功率/峰值功率(kW)	40/88	额定转速/峰值转速 (r/min)	4000/11500
电机机座外径(mm)	270	相数/极数/槽数	3/8/48

定子铁芯外径(mm)	230	转子铁芯外径(mm)	155.2
定子铁芯长度(mm)	160	转子长度(mm)	160

1 永磁同步电机电磁噪声的评估方法

目前采用有限元法仿真永磁电机电磁噪声的文献还不多见,多数文献是从电机结构特性或电磁力两方面研究电机固有频率和电磁振动^{[4][5]},深入到电磁噪声声场仿真的文献还很少。本文提出一种基于 JMAG 有限元仿真软件的永磁同步电机电磁噪声评估方法。具体步骤为:首先,进行电磁分析,获得各工作点的气隙磁密时空特性,通过傅里叶变换进行气隙磁密的时间和空间的谐波分析,提取定子齿尖节点的径向电磁力数据进行时间谐波分析,获得不同频率下电磁力幅值;然后,进行结构分析,建立永磁电机的三维结构模型,仿真电机结构的固有频率;最后,进行频域分析,加载仿真获得的电磁力数据和阻尼参数,进行三维声场仿真,得出关键工作点的电磁噪声声场分布云图。具体仿真分析流程如图 1 所示。

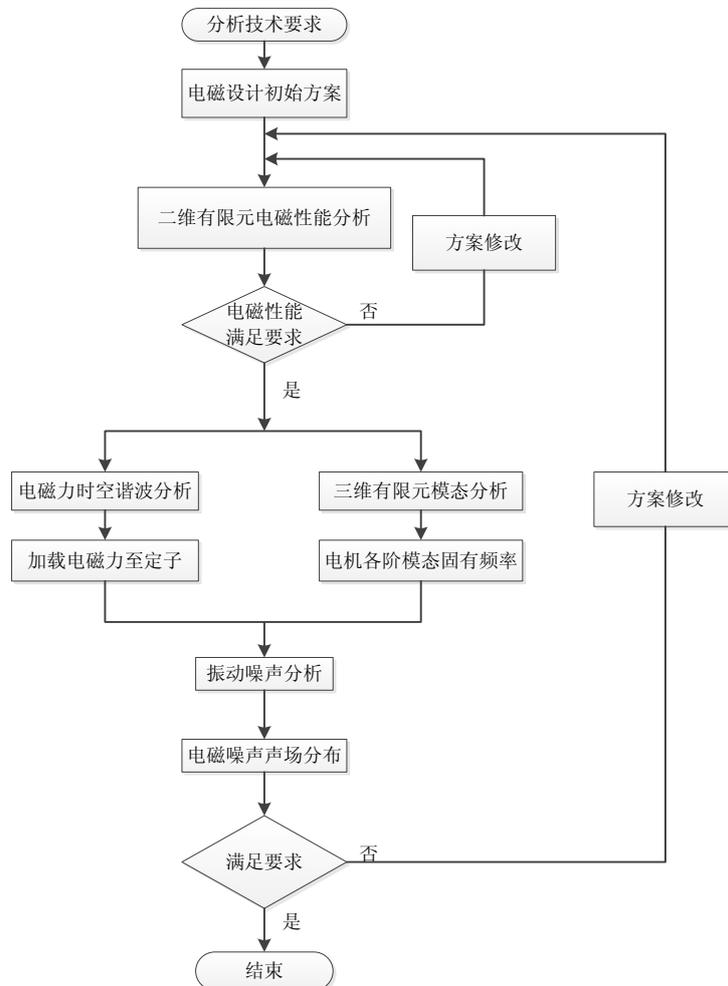
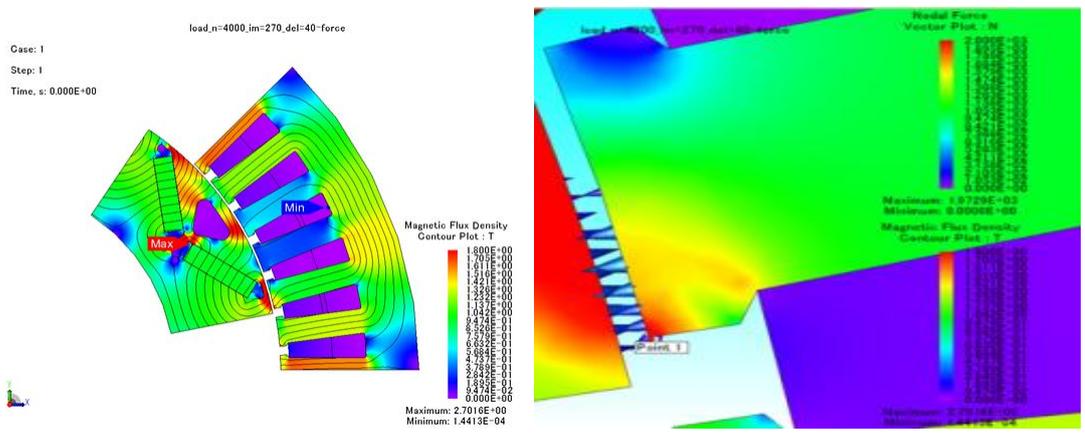


图 1 永磁电机振动噪声分析流程图

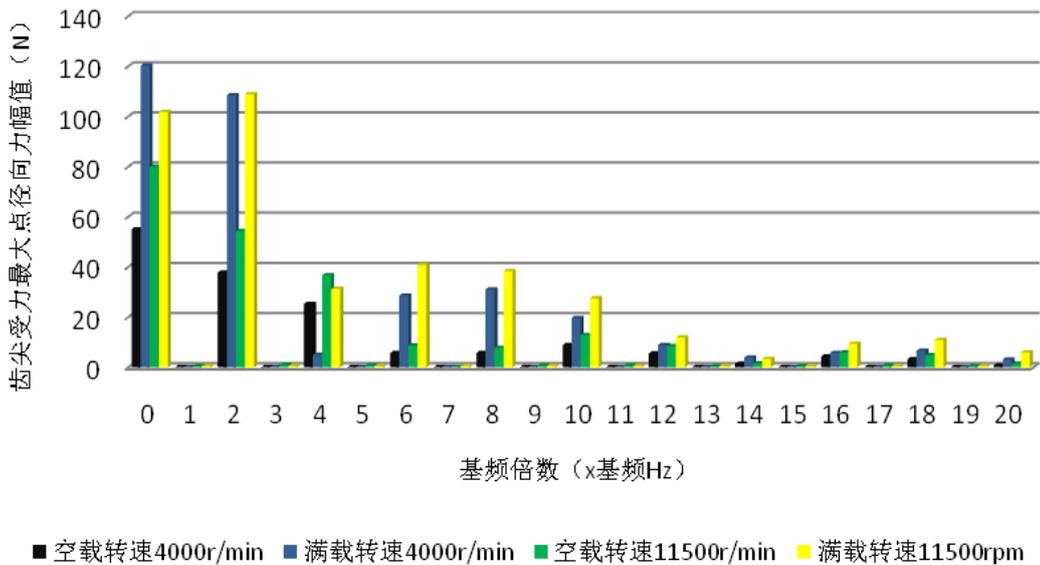
2 永磁同步电机电磁力有限元分析

对于中小型电机而言，定子铁芯内表面的各次径向电磁力波是产生电磁噪声的主要来源。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，因此幅值较大的低次径向电磁力波是引起电磁振动噪声的主要根源 [6][7]。

永磁同步电机峰值扭矩最高转速工作点的工作电流大，电磁力幅值大；恒功率最高转速工作点弱磁控制造成气隙磁密畸变，电磁力波谐波分量多，这两个工作点是容易产生较大电磁噪声的关键工作点。本文对永磁同步电机这两个关键工作点的电磁噪声特性采用有限元法仿真分析。在 JMAG 有限元软件仿真平台上，建立永磁同步电机的 2D 有限元仿真模型，仿真空载和满载工况下峰值扭矩最高转速工作点 4000r/min 和恒功率最高转速工作点 11500r/min 的电磁力特性，提取定子齿的节点电磁力数据，通过时间谐波分析得到不同频率下的电磁力幅值。仿真结果如图 2 所示。



(a) 负载 4000r/min 磁密云图和定子齿部径向电磁力局部放大图



(b) 定子齿尖受力最大点径向电磁力傅里叶分解

图 2 提取定子齿尖受力最大点不同频率下的径向力幅值

由图 2 (a) 可知, 电磁力直接作用在定子齿部, 提取定子齿部径向电磁力数据进行分析。在 JMAG 软件中利用探针提取定子齿尖受力最大节点的径向电磁力进行时间谐波分析, 傅里叶分解结果如图 2 (b) 所示。其中, 0Hz 对应的是电磁力直流分量, 对振动噪声没有影响; 基波磁场产生的 2 倍基波频率的电磁力幅值较大, 是引起电磁噪声的主要原因。

由图 2 仿真结果可以看出, 与恒转矩最高转速 4000r/min 工作点相比, 恒功率最高转速 11500r/min 工作点的高频电磁力幅值较大, 这是由于高速弱磁造成气隙磁场畸变, 谐波含量增多, 如 4、6、8 倍基频这些谐波产生的电磁激振力频率低、幅值大、数量多, 易产生与电机固有频率接近的振动, 且力波频率在人耳敏感范围内 (2000Hz ~5000Hz), 对噪声也有较大影响。

3 永磁同步电机固有频率模态分析

模态分析是对系统动力学特性参数进行参数辨识和估计的技术, 是结构运动学的分析基础^[8]。本文基于有限元法和实验模态技术对永磁同步电机结构进行模态分析, 为研究电机振动与噪声提供力学分析依据。

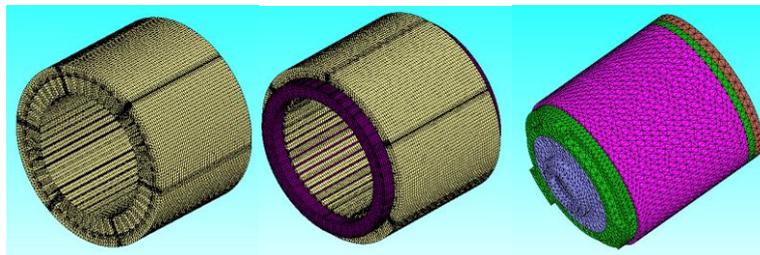
3.1 永磁同步电机有限元法模态分析

首先对电机结构进行合理的简化, 假设各结构部件之间紧密配合, 定子绕组等效为体积相同的空心圆柱体, 绕组密度和弹性模量按照槽满率, 绝缘材料和气隙比例进行等效。电机结构部件模态固有频率仿真的材料力学参数如表 2 所示^{[2][9][10]}。

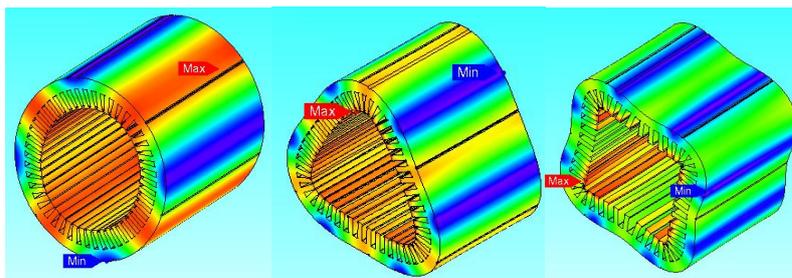
表 2 模态有限元仿真的材料力学参数

属性	定子铁芯 (叠片钢)	定子槽内绕组 (铜)	机壳端盖 (铝)	磁钢 (铝镍钴)
密度(kg/m ³)	6960	5454	2770	7400
杨氏模量(Pa)	$E_x=E_y=2.06e11$ $E_z=1.5 e11$	$E_x=E_y=9.5e10$ $E_z=1.4 e10$	$E_x=E_y= E_z=7.1e10$	$E_x=E_y= E_z=1.6e11$
剪切模量(Pa)	$G_{xz}=G_{yz}=7.3e10$ $G_{xy}=8.0e10$	$G_{xz}=G_{yz}=5.4e9$ $G_{xy}=4.6e9$	$G_{xy}=G_{xz}=G_{yz}=2.7e10$	$G_{xy}=G_{xz}=G_{yz}=6.5e10$
泊松比	0.3	0.3	0.33	0.24

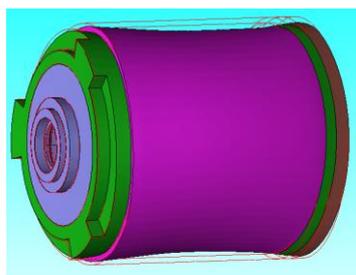
有限元模型的网格剖分图和定子铁芯的 2、3、4 阶模态振型如图 3 所示。电机结构部件及整机结构的模态频率有限元仿真结果表 3 所示。



(a) 有限元网格剖分图



(b) 定子铁芯 2、3、4 阶模态振型图



(c) 整机模态仿真图

图 3 电机结构部件及整机模态振型有限元仿真结果

表 3 电机整机及结构部件有限元仿真结果

模态阶数	定子结构及整机各阶模态固有频率 (Hz)			
	定子铁芯	定子铁芯加绕组	定子结构	整机
2 阶	684	1301/1502	1384/1891	1472/1542/1873
3 阶	1720	3449	1365	4102/4210
4 阶	2989	5678	7821	6712

有限元分析时考虑定子铁芯是叠片钢，分析了材料的各向同性和各向异性的区别。仿真结果分析可知定子铁芯材料的各向同性与各项异性相比在低阶径向振动的固有频率上几乎没有差别，只是在切向和轴向方面有差别且组合模态数量增多，对样机振动噪声的影响很小。由表 3 可知 2 阶模态的固有频率低，对电机的振动噪声影响最大。

3.2 永磁同步电机锤击法模态实验分析

为了验证有限元分析的有效性，本文采用数据采集分析仪 MI-7008 和 N-Modal V5.0 模态分析后处理软件对样机进行了锤击法模态实验。为了尽可能与有限元设置的边界约束条件一致，达到自由模态的效果，把电机用弹性较好的绳子悬挂，如图 4 所示。实验测得定子铁芯 2、3、4 阶振型，如图 5 所示。实验测得定子铁芯及整机各阶模态固有频率与有限元仿真结果对比如表 4 所示。



图 4 电机结构部件及整机模态实验

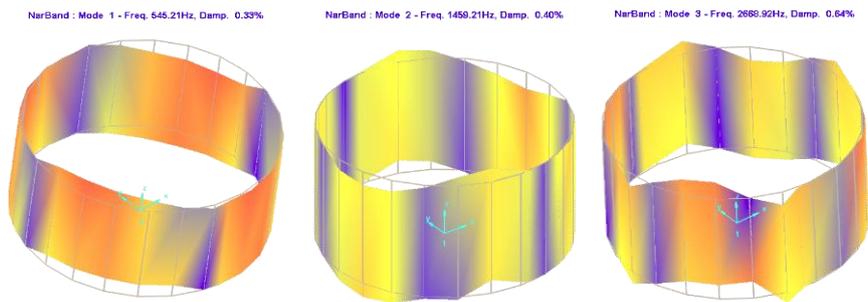


图 5 定子铁芯 2、3、4 阶模态实验振型图

表 4 定子铁芯及整机模态实验数据和有限元仿真结果对比

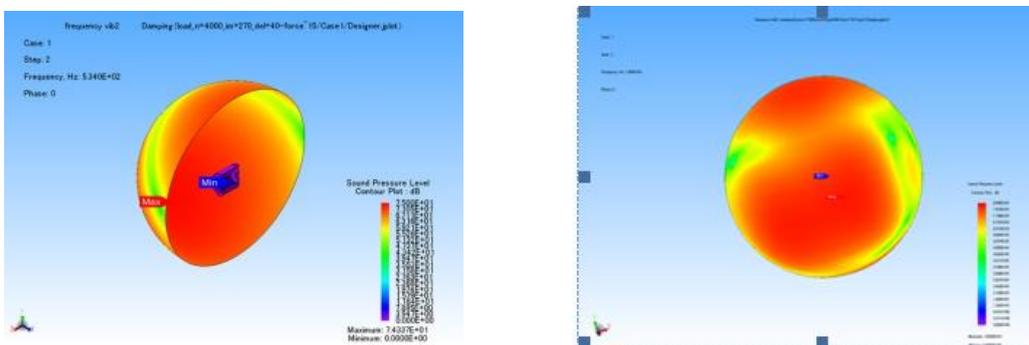
模态阶数	定子铁芯各阶模态固有频率 (Hz)		整机各阶模态固有频率 (Hz)	
	实验结果	有限元仿真结果	实验结果	有限元仿真结果
2 阶	545	684	2198	1472/1542/1873
3 阶	1459	1720	4411	4102/4210
4 阶	2669	2989	-	6712

由于实验中力锤锤头材料的限制使得高于 5000Hz 的频率响应精度低，因此未能测得整机的 4 阶模态频率。实验结果表明定子铁芯锤击法模态分析结果与有限元仿真结果基本一致，验证了有限元分析方法的可信性。电机整机 2 阶固有模态频率实验数据结果是 2198Hz，与有限元结果有一定的误差，这是由于模态分析是基于线性分析理论，而整机有限元分析中绕组和接触摩擦部分进行了简化，结构阻尼增大，非线性因素增加引起的。

4 永磁同步电机电磁噪声声场有限元分析

基于 JMAG 有限元仿真软件为平台，仿真永磁同步电机关键工作点的电磁噪声声场分布情况。通过模态实验的方法测得电机不同频率下的阻尼参数作为电机三维声场有限元仿真的阻尼参数，使有限元仿真结果更逼近真实。

样机属于小型电机，几何直径与轴长接近，选择半径为 1m 球形声场模型分析电机的电磁噪声特性，仿真电机不同转速下的电磁噪声。图 6 为样机关键工作点电磁噪声有限元仿真结果，4000r/min 峰值转矩额定转速点在 2 倍基频（频率 534Hz）的电磁力作用下产生的电磁噪声声场分布云图如图 6（a）所示；11500r/min 恒功率最高转速工作点在 2 倍基频（频率 1543Hz）的电磁力作用下产生的电磁噪声声场分布云图如图 6（b）所示。



(a) 4000r/min 时的电磁噪声分布云图

(b) 11500r/min 时的电磁噪声分布云图

图 6 电机关键工作点电磁噪声有限元仿真结果

从图 6 仿真结果可以，电机机身附近的声功率较大，电机端盖两端声功率值小，这是由于径向

电磁激振力是直接作用在电机定子铁芯内表面，机身附近辐射的是电磁噪声，而电机端盖两端对外辐射的主要是轴承的机械噪声。

空载和满载工况下峰值转矩最高转速工作点 4000r/min 及恒功率最高转速工作点 11500r/min 不同频率下由电磁振动引起的噪声声压级的仿真结果如表 5 所示。

表 5 样机噪声特性有限元仿真数据

满载转速 11500r/min		空载转速 11500r/min		满载转速 4000r/min		空载转速 4000r/min	
频率 (Hz)	噪声 (dB)	频率 (Hz)	噪声 (dB)	频率 (Hz)	噪声 (dB)	频率	噪声 (dB)
1534	78.2	767	76.9	534	74.4	534	69.3
3068	72.0	1534	68.2	1068	68.1	1068	73.9
4602	71.3	3835	64.4	1602	67.1	2136	62.8
6136	66.9	4602	71.9	2136	72	2670	64.9
7670	65.5	6136	67.4	2670	70.9	3204	73.1
9204	71.2	7670	66.3	3738	60.7	3471	58.8

声级求和计算公式为 (3-1) 所示

$$L = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{0.1L_i} \right) \quad (3-1)$$

式中 L_i 为各个噪声的声级值，单位为 dB； n 为噪声的个数。

频率不同的噪声信号相加是能量相加，信号相加先把分贝数转换为比数，相加后再转换为分贝数。通过查功率比与分贝数换算表^[11]，计算得出 4000r/min 峰值转矩工作点满载时电磁噪声值为 79 dB，空载时电磁噪声值为 78 dB；满载恒功率最高转速 11500r/min 工作点电磁噪声值为 81 dB，空载时电磁噪声值为 79 dB。为了验证采用有限元法预估电机电磁噪声的方法的有效性，对样机进行了噪声实验测试，如图 7 所示。



图 7 样机噪声测试实验图

实验是在电机处于空载运行状态、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，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 87dB。

实验结果数据高于有限元法结果数据 10% 左右，这主要是由于有限元仿真过程中对电机结构进行了等效和假设，与实际存在一定的误差；其次，有限元仿真过程是理想的空载状态负载为 0，而实际实验中要克服摩擦转矩；此外，有限元仿真结果仅是电磁噪声，并没有把电机产生的轴承、基座等机械噪声计算在内，而实验测得的噪声是电机的所有可能的噪声，因此从电磁噪声方面来说，有限元法预测的值与实际电机电磁噪声的值基本一致。故本文提出的基于有限元法的电机电磁振动噪

声的评估方法有效可行。

5 结论

本文基于有限元工具 JMAG 和模态实验技术进行永磁同步电机的振动噪声研究, 以一台样机为例进行分析验证, 得出结论如下:

- 1) 提出了一种预估电机振动噪声特性的方法。样机仿真数据和实验结果验证了本文提出的方法的可行性。
- 2) 有限元仿真表明电机结构阻尼对电机噪声影响较大, 电机设计中增加电机结构阻尼可以减小电机振动噪声。
- 3) 为抑制电机的电磁噪声, 在电机设计时应尽量使电机各次电磁力波的频率远离电机结构模态固有频率, 避免在电机工作转速区间内产生电磁共振。

参考文献

- [1] 黄苏融. 电动车用电机的技术发展概况[J], 电器工业·中小型电机专辑, 2003.1, pp.8-10.
- [2] 代颖, 崔淑梅, 宋立伟. 车用电机的有限元模态分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 100-105.
- [3] 张胜川, 黄苏融, 张琪. 燃料电池轿车用牵引电机定子固有频率计算与实验测定 [J]. 电机与控制应用, 2008, 35(7): 1-4.
- [4] Rakib Islam. Analytical Modal for Predicting Noise and Vibration in Permanent-Magnet Synchronous Motors[J]. IEEE Transactions on industry applications, 2010, 46(6): 2346-2354.
- [5] Jae-Woo Jung, Do-Jin Kim, Jung-Pyo Hong, Geun-Ho Lee, Seong-Min Jeon. Experimental Verification and Effects of Step Skewed Rotor Type IPMSM on Vibration and Noise[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 3661-3665.
- [6] Z. Q. Zhu, Z. P. Xia, L. J. Wu, Geraint W. Jewell. Analytical Modeling and Finite-Element Computation of Radial Vibration Force in Fractional-Slot Permanent-Magnet Brushless Machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(5): 1908-1918 .
- [7] Huang. S. R, Aydin. M, Lipo. T. A. Electromagnetic Vibration and Noise Assessment for Surface Mounted PM Machines[C]. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. Vancouver, 2001: 1417-1426.
- [8] 沃德. 海伦, 斯蒂芬. 拉门兹, 波尔. 萨斯. 模态分析理论与试验[M]. 白化同, 郭继忠, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 2001: 1-45.
- [9] 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.
- [10] Long S A, Zhu Z Q, David H. Vibration Behaviour Of Stators of Switched Reluctance Motors[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2001, 148(3): 257-246.
- [11] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 科学出版社, 2004: 31-3