

# 电动汽车驱动电机电磁、结构及声学的 多场耦合数值分析\*

曾金玲 朴英子

(中国第一汽车股份有限公司技术中心 长春 130011)

**摘要:** 依据电动汽车永磁同步驱动电机电磁噪声产生的机理, 本文详细阐述了如何通过电机的电磁、结构及声学多元耦合数值分析方法对其进行振动噪声特性的预估。首先, 利用时步有限元法进行电机的二维瞬态电磁场计算, 并获得时域和频域内的定子表面电磁激振力; 基于三维电机结构总成, 研究整个系统的固有频率及振型, 耦合电机的电磁场, 进行电机在电磁激励力作用下的振动响应分析, 获得表面振动速度级; 最后, 耦合三维声学边界元模型, 计算电机的辐射声场。试验测试结果验证了本文电机电磁、结构及声学多元耦合数值分析方法可在设计阶段对电磁噪声进行有效预估, 有助于低噪声电动机的设计研发。

**关键词:** 电动车 永磁同步电机 电磁激振力 振动响应分析 电磁噪声

**中图分类号:** TM32

## The Multi-Physics Coupling Analysis Based On Electro-Magnetic, Structural And Acoustic Characters For A Drive Motor In Ev

Zeng Jinling Piao Yingzi

(The FAW Co., LTD R&D Center, China, Changchun 130011)

**Abstract:** According to generating mechanism of electromagnetic noise from the permanent magnet synchronous motor on EV, this paper proposed how to use a multi-physics coupling analysis based on the electromagnetic, structural and acoustic fields of the motor to estimate the noise and vibration characteristics. Firstly, the two-dimensional transient electromagnetic field of the motor was calculated by using the step finite element method, and the electromagnetic excitation force on the surfaces of the stator in both frequency and time domain are obtained; Then, based on three-dimensional structure of the motor assembly, the simulation of the entire system natural frequencies and mode shapes was executed, and coupling the electromagnetic field analysis results of the motor, the vibration velocity level of the motor surface was achieved through the frequency response analysis. Finally, the coupled three-dimensional acoustic boundary element model was employed to calculate the motor acoustic radiation. The experimental results demonstrated that this multi-physics coupling numerical analysis method can effectively predict the electromagnetic noise in the motor design phase and help low-noise motor design and development.

**Key words:** Electric vehicle Permanent magnet synchronous motor Electromagnetic exciting force Vibration response analysis Electromagnetic vibration and noise

## 0 引言

随着全球能源危机的不断加深, 以及大气污染、全球气温上升的危害加剧, 节能减排的电动汽车技术已成为国内外各大汽车公司的研究热点<sup>[1]</sup>。驱动电机是电动汽车驱动系统的关键部件, 相对普通工业驱动电机而言, 电动汽车对驱

动电机的性能提出了更高的要求: (1)负载变化大、调速范围宽; (2)为了降低车重、延长续航里程, 要求电机具有较高的功率密度和较好的效率特性; (3)安装空间小、工作环境恶劣, 对电机的可靠性和散热能力要求较高<sup>[2]</sup>。电机的这些性能要求和工作环境的特殊性加剧了电机的振动噪声问题, 目前, 振动噪声已成为衡量电机品质的

\* 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划) (2010CB736101)。  
The National Basic Research Program (973 Program) (2010CB736101).

一个重要指标，也是电机设计的难点。

近年来，已经有一些文章和书籍探讨驱动电机的振动噪声问题，但这是一个非常重要和复杂的课题，先进的数值分析方法、测试仪器和手段都在不停更新和发展。基于这个原因，本文陈述关于如何预测电机振动噪声的新知识和经验是非常值得的。在工程中，当电机出现振动噪声时，首先必须识别振动噪声源，换句话说，是激振力产生的高频振动，还是因为结构刚度不够导致了系统共振；然后针对问题进行求解。但当电机制造完成后，噪声源的识别和如何降低噪声都比较困难，因此如何在设计阶段准确的进行噪声源识别和低噪声设计是及其重要的<sup>[3-10]</sup>。为了能在产品设计阶段迅速而有效的掌握和解决振动噪声问题，本文针对电机的电磁、结构及声学多元耦合数值分析方法进行了研究。

## 1 电机的磁场分析

要分析永磁同步电机的振动和噪声特性，首先应分析定子齿上电磁激振力的变化规律。以一台电动汽车用永磁同步驱动电机为例，电机的基本参数如下：额定母线电压为288V，持续功率20KW，持续扭矩120Nm，峰值功率40KW，峰值扭矩260Nm，转速范围0~7600rpm，定子绕组相数为3，定子槽数为48，定子绕组为单层绕组，定子绕组联结为星型接法，铁心长度为140mm，定子外径为200mm，定子内径为132mm，转子内径为47.5mm，极对数为4，气隙为非均匀气隙。

永磁同步驱动电机的三维总成模型如图1所示，该电机如果忽略端部效应，则可认为沿轴向任何横截面上电磁场分布都一样，所以本文采用了二维瞬态场路耦合分析方法，其有限元分析模型如图2所示。为了提高气隙磁密的分析精度，本文沿气隙长度方向将气隙均匀分为7等份，在圆周方向每 $1^\circ$ 圆周角剖分1个网格，气隙剖分如图3所示。为了验证电磁场有限元分析模型的计算精度，可以通过计算结果与试验数据对比。该电机在空载下测得的相反电势常数( $k_e$ )为：25.39mV/rpm，而本文通过有限元法获得该电机在1469rpm时空载相反电势为37.38V(RMS)，如图4所示。因此，空载时相反电势计算误差仅为0.22%，该部分误差主要是由于实际电机存在少

量端部漏磁所致，说明该有限元分析模型已满足工程需求。

定、转子气隙磁场谐波相互作用产生的电磁激振力，作用于定子齿部，从而导致电机表面产生振动和噪声。利用场路耦合时步有限元法计算出永磁同步电动机的二维瞬态磁场，并根据麦克斯韦定律，计算出作用于定子齿部的电磁激振力。定子齿表面径向电磁力随空间和时间的变化曲线分别如图5和图6所示，通过曲线可以得知该电机空间和时间力波都存在大量的谐波含量，这将不利于电机的振动和噪声。对计算出的电磁激振力进行频谱分析，得到主要电磁激振力的频率与幅值，如图7和表1所示，激振力的基频为195.9Hz。电机振动和噪声的频率将与这些力波的频率存在对应关系。

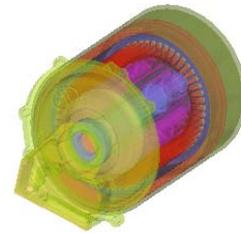


图1 电机总成几何模型

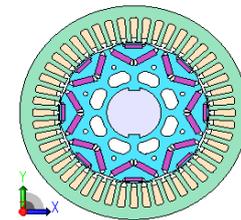


图2 电机电磁场有限元分析模型

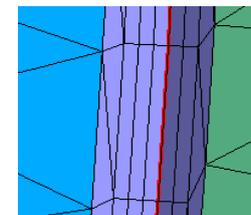


图3 气隙网格剖分模型

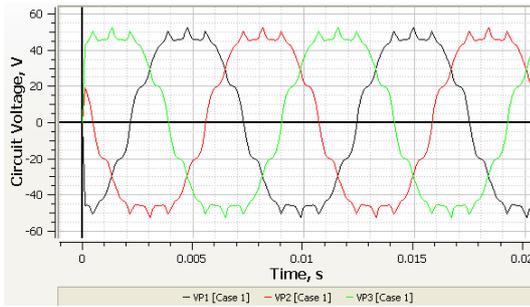


图4 电机在 1469rpm 时空载相反电势时间曲线

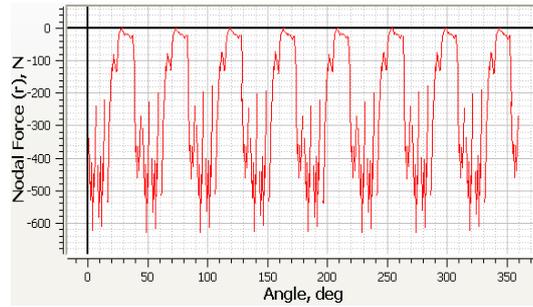


图5 定子齿表面径向电磁力的空间分布曲线

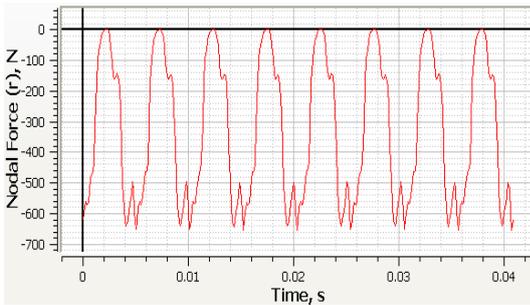


图6 定子齿表面径向电磁力的时间分布曲线

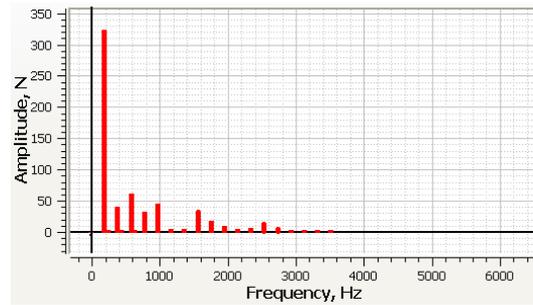


图7 定子齿表面径向电磁力的频谱图

表1 定子齿表面径向电磁力主要频率及幅值

频率 (Hz)	195.9	391.7	587.6	783.5	979.3	1566.9	1762.8	2546.3	2742.1
幅值 (N)	321.4	38.2	59.1	30.6	43.3	36.7	16.0	18.5	8.4

## 2 电机的结构分析

电磁噪声是由定子总成（包含定子、绕组、水套、外壳、端盖等）振动引起的，以下从两个方面对定子总成的振动特性进行研究，一是定子总成的模态振型和固有频率，二是定子电磁激振力作用下的振动响应。

该电机定子铁芯结构由380片薄硅钢片叠压而成，因此，轴向上弹性模量要比叠片平面上弹性模量小的多，在进行结构有限元分析时，可将其视为正交各向异性的弹性材料。为了获得定子铁芯在轴向方向的力学参数，必须进行定子铁芯的模态试验和参数识别。图8是定子铁芯在无绕组和有绕组状态下的模态试验模型、激励点分布和自由悬挂图。图9为两种不同试验模型在自由悬挂状态时某节点测量得到的所有FRF平均曲线。利用定子铁芯在该节点测量得到的平均FRF曲线识别出定子铁芯在自由悬挂状态下的模态参数如表2所示，对应的铁芯主要振型如图10所示。

为了模拟这种线弹性正交各向异性材料的本构关系，可用九个独立的弹性刚度参

数模拟结构在不同方向的力学特性，如果需要，还可以设置成温度或场的函数。对于本文研究的定子结构，应力应变关系如公式(1)所示：

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{2323} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中， $p, t$  分别代表定子平面和叠压方向的材料属性， $E_1 = E_2 = E_p$ ，

$$\nu_{31} = \nu_{32} = \nu_{tp} \quad , \quad \nu_{13} = \nu_{23} = \nu_{pt} \quad ,$$

$$G_{13} = G_{23} = G_t \quad , \quad G_p = E_p / 2(1 + \nu_p) \quad ,$$

$\nu_{tp} / E_t = \nu_{pt} / E_p$ 。公式(1)的刚度矩阵中，

$$\begin{aligned}
D_{1111} &= E_1(1 - \nu_{23}\nu_{32})\Gamma, \\
D_{2222} &= E_2(1 - \nu_{13}\nu_{31})\Gamma, \\
D_{3333} &= E_3(1 - \nu_{12}\nu_{21})\Gamma, \\
D_{1122} &= E_1(\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23})\Gamma, \\
D_{1133} &= E_1(\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32})\Gamma, \\
D_{2233} &= E_2(\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31})\Gamma, \\
D_{1212} &= G_{12}, \\
D_{1313} &= G_{13}, \\
D_{2323} &= G_{23},
\end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中

$$\Gamma = \frac{1}{1 - \nu_1\nu_2 - \nu_2\nu_3 - \nu_3\nu_1 - 2\nu_1\nu_2\nu_3}$$

当这些材料刚度参数被直接给定时,由于结构在叠压方向不可能产生拉应力,因此将

$\sigma_{33} = 0$  作为强制约束。根据上述公式,结

合试验数据,利用有限元法获得定子铁芯在轴向方向的弹性模量为横截面内的1/30,各阶分析模态如表2所示。由表2可以得出,无论定子铁芯有无绕组,获得的定子铁芯在轴向方向的力学参数已经满足工程求解精度需求。将其力学特性带入定子总成进行模态分析,表3和图11给出了定子总成在实际装配关系下的主要固有频率和振型。由表3可以得知,水套对定子铁芯的过盈装配关系导致刚度效应远大于附加质量效应,因而定子总成在同一圆周振型下的固有频率比带上绕组后的定子铁芯固有频率高。

为了得到定子总成在电磁激振力作用下的振动响应,本文利用图12的电机电磁、结构及声学多元耦合数值分析模块,将电磁场分析软件中获得的二维电磁力映射到电机的三维结构有限元分析模型上,结合前面计算得到的定子总成模态计算结果,利用模态频响分析法进行结构在不同频率激振力作用下的响应分析,从而获得电机在20Hz~5000Hz范围内的振动响应。图13是该电机定子外壳的分析与试验所测振动速度级频谱对比图,从图中可以得知,电机的表面振动速度级计算值和实测值之间趋势基本一致,虽然在2000Hz~3000Hz之间出现了峰值振动速度级的频率偏差,但这主要是因为

在计算模型中没有考虑转子总成及轴承

等振动因素。



图8 定子无绕组和有绕组模态试验时的自由悬挂图

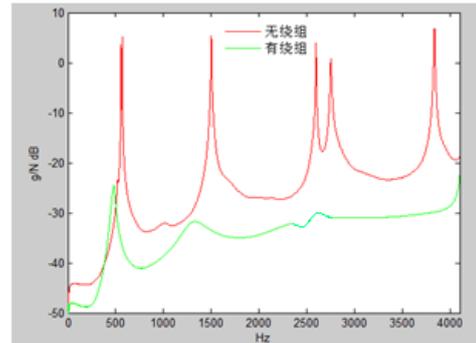


图9 自由悬挂状态下第6号节点的平均FRF曲线

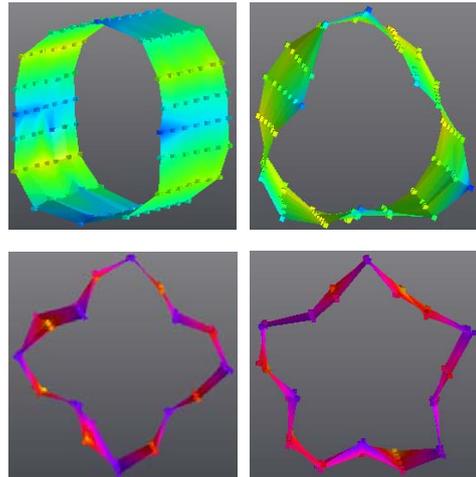


图10 定子自由悬挂状态下的主要模态振型

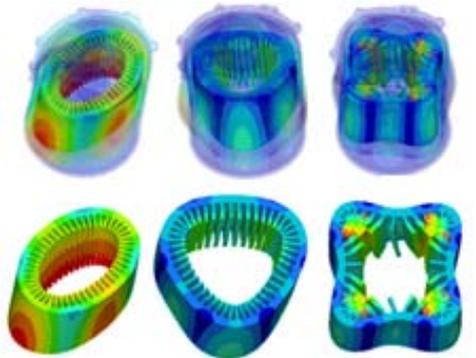


图11 定子总成在装配约束下的主要模态振型图

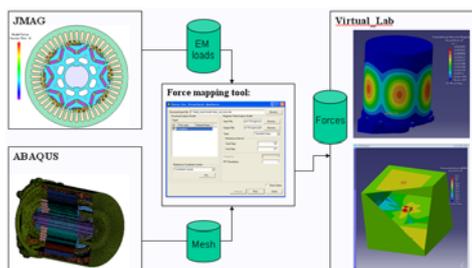


图12 电机的电磁、结构及声学多元耦合数值分析模块图

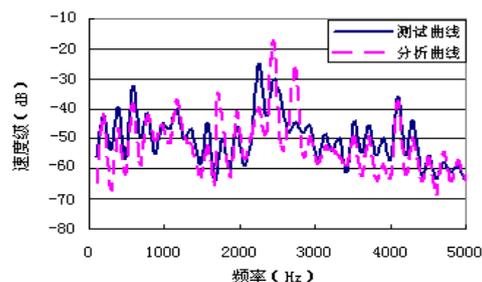


图13 电机总成外壳的振动速度级频谱对比曲线

表2 定子自由悬挂状态下的主要模态参数

振型特点 定子模型		2阶弯曲		4阶弯曲		5阶弯曲
		测试频率 (Hz)	分析频率 (Hz)	测试频率 (Hz)	分析频率 (Hz)	测试频率 (Hz)
无绕组	测试频率 (Hz)	567	1500	2592	2751	3832
	分析频率 (Hz)	559	1492	2654	2744	3814
	误差 (%)	-1.4	-0.5	2.4	-0.3	-0.4
有绕组	测试频率 (Hz)	472	1350	2325	2523	无明显第5阶
	分析频率 (Hz)	471	1296	2307	2493	3654
	误差 (%)	-0.2	-0.7	-0.8	-1.2	

表3 定子总成在装配约束下的主要模态参数

振型特点	2阶弯曲	3阶弯曲	4阶弯曲	
测试频率 (Hz)	498	1435	2401	2649
分析频率 (Hz)	503	1428	2427	2703
误差 (%)	1.0	-0.5	1.1	2.0

### 3 电机的噪声分析

声波是媒质质点振动的传播，普遍描述声波特性的物理量是声压。对于线性声学问题，可以在输入（机械结构表面处的振动）和输出（声场中某点处的声压）之间建立线性关系。本文利用声学边界元方法中的声学传递向量法，对声场中某点处的声压与模型节点振动速度之间建立起如下关系：

$$P(\omega) = \{ATV(\omega)\}^T \cdot \{v_{ns}(\omega)\} \quad (3)$$

其中  $P(\omega)$ ——是与频率有关的辐射场点的声压；

$\{ATV(\omega)\}$ ——是与频率有关的声学传

递向量；

$\{v_{ns}(\omega)\}$ ——是与频率有关的结构法向振动速度。

然后将结构有限元分析中得到的表面节点振动速度施加到声学边界元模型上，从而求出电机各个频率的辐射声场。

电机辐射声场中特定位置的声压级，是评价电机辐射噪声的指向性噪声指标。根据 ISO 3744-1994 国际标准，声压测试点取在距离电机外壳左、右、上、下、前、后 1m 远的 6 个节点处，如图 14 所示。图 15 是该电机某测点的分析与测试所得噪声声压级频谱对比图，通过 15，一方面可以得知，电机分析所得的辐射噪声只有在  $f=2448\text{Hz}$  和

$f=2742\text{Hz}$ 时有明显峰值(测试所得的辐射噪声峰值在 $f=2252\text{Hz}$ 和 $f=2448\text{Hz}$ 时),低频区域内无明显峰值存在,这说明该电机的辐射噪声主要是因为定子总成第四阶圆周方向振型频率与电磁激振力谐波频率相近,导致定子总成共振产生;另一方面,可以得知电机电磁噪声的计算值和实测值之间基本一致,说明利用本文的多元耦合数值分析方法可以有效的计算出电机噪声的主要频率成分及幅值,为今后预测和抑制永磁电机的振动噪声奠定了基础。

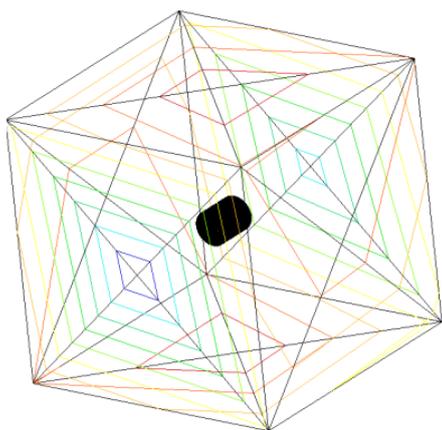


图14 电机声压级测点布置图

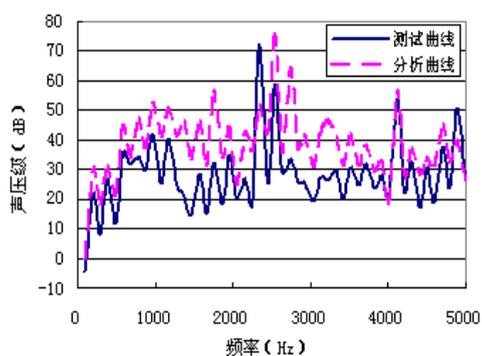


图15 电机某测点的辐射噪声声压级频谱对比曲线

## 4 结论

本文利用数值分析法对电动汽车驱动电机的电磁、结构和声学等多场耦合分析进行了研究,得出以下结论:

(1) 该电机在空间和时间上的力波都存在较多谐波含量,不利于电机的振动和噪声,为了实现低噪声电机设计,需要重新合理优化该电机的电磁方案,尽量减少力波的谐波成分及幅值。

(2) 通过弹性正交各向异性材料的本构关系可以近似模拟电机定子铁芯叠压结构

的力学特性,通过与试验对比,其计算精度已达到工程需求。

(3) 根据电机外壳表面振动速度级的对比,得知电机的转子和轴承对电机总成的振动特性存在一定影响,在以后的电机振动噪声分析时,应建立完整的电机模型。

(4) 该电机的辐射噪声峰值集中在 $2500\text{Hz}$ 左右,结合电机定子总成在圆周方向的振型及频率,可以得知该峰值主要是因为定子铁芯的第四阶固有频率与激振力的谐波频率相近,导致定子总成共振产生。因此,可以通过改善定子铁芯的装配工艺,例如提高铁芯的叠压系数,增加定子绕组与铁芯之间的固定程度,添加阻尼措施等,使主要结构件的固有频率偏离激振力频率,特别是使结构件的共振频率远离高阶电磁激振力的频率,从而达到低噪声电机设计的目的。

## 参考文献:

- [1] 杨孝纶,刘晓康,汪斌.电动汽车技术发展趋势及前景[J].变频器世界, 2007, (7): 36~40.
- [2] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光.现代电动汽车技术[M].北京理工大学出版社, 2002, 88~91.
- [3] Sang-Moon Hwang, Hong-Joo Lee. The Influence of Electromagnetic Force Upon the Noise of an IPM Motor Used in a Compressor[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2006, 42 (10): 3494~3496.
- [4] William R. Finley, Mark M. Hodowanec, Warren G. Holter. An Analytical Approach to Solving Motor Vibration Problems[J]. IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference, 1999, 217~232.
- [5] Pragasen Pillay. An Investigation into Vibration in Switched Reluctance Motors[J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 1999, 35 (3): 589~596.
- [6] Pedro Vicente Jover Rodríguez, Antero Arkkio. Air-gap force distribution and vibration pattern of Induction motors under dynamic eccentricity[J]. Electr Eng, 2008, (90): 209~218.
- [7] 王荀,邱阿瑞.鼠笼异步电动机电磁噪声的仿真分析[J].微电机, 2011, 44 (7): 15~19.

- 
- [8] Z. Q. Zhu, David Howe. Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2000, 15 (4): 407~412.
- [9] Ishibashi F, Matsushita M. Change of Mechanical Natural Frequencies of Induction Motor[J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 2010, 46( 3) : 922~927.
- [10] Besnerais J Le, Lanfranchi V. Prediction of Audible Magnetic Noise Radiated by Adjustable Speed Drive Induction Machines[J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 2010, 46( 4) : 1367~1373.

---

作者简介: 曾金玲, 女, 1975 年出生, 博士, 主要研究方向为电机的电磁场、温度、结构及振动噪声分析。

E-mail: zengjinling@rdc.faw.com.cn