

# A Survey of Vibration Noise Analysis and Suppression Methods for Permanent Magnet Synchronous Motors

Wenbin Wang, Xin Zhang, Zihan Song, Yu Han, Haoyue Xu

Tianjin Key Laboratory of Advanced Electrical Engineering and Energy Technology,  
Tianjin Polytechnic University, Tianjin  
Email: 15028872337@163.com

Received: Nov. 28<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 12<sup>th</sup>, 2019; published: Dec. 19<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

With people's pursuit of comfort, low noise design of many kinds of electrical equipment has become a research hotspot. Because motor is widely used in electrical equipment, such as electric vehicles, large machinery, etc., the study of motor vibration and noise is one of the important problems that we need to solve urgently in motor design and application. Motor vibration noise is mainly acoustic noise, mechanical noise and electromagnetic noise, in which electromagnetic noise is the main source of noise, and electromagnetic noise is mainly caused by Maxwell force and magnetostrictive force. The noise of electromagnetic vibration is mainly caused by Maxwell force and magnetostrictive force. Firstly, this paper analyses the causes of electromagnetic noise of motor, and how to analyze and calculate the method of noise. Then, from the angle of electromagnetic force and harmonics which cause electromagnetic noise, it analyses various effective methods and development status of noise suppression and elimination at home and abroad. In order to reduce the influence of magnetostrictive force on motor vibration, the structure optimization design of motor stator and rotor and the control of harmonic components are mainly discussed. Some electromagnetic-mechanical coupling models and numerical calculation methods of motor are also described. The direction of future research on noise suppression is pointed out. Finally, the shortcomings of current research and the main contents of future research are summarized to provide reference for the follow-up research on suppressing motor noise.

## Keywords

Magnetostrictive Force, Vibration Suppression, Electromagnetic Force, Motor Noise Reduction

---

## 分析及抑制永磁同步电机电磁噪声方法综述

王文斌, 张欣, 宋子晗, 韩瑜, 徐浩月

天津工业大学的天津市电工电能新技术重点实验室, 天津  
Email: 15028872337@163.com

收稿日期: 2019年11月28日; 录用日期: 2019年12月12日; 发布日期: 2019年12月19日

## 摘要

随着人们对于舒适度的追求, 多种电气设备的低噪声设计成为了研究热点, 由于电机在电气设备中的广泛应用, 比如电动汽车, 大型机械等, 所以对于电机振动噪声的研究才是我们在电机设计和应用中亟待解决的重要问题之一。电机振动噪声主要是声学噪声, 机械噪声和电磁噪声, 其中电磁噪声是主要噪声来源, 而电磁噪声主要是由麦克斯韦力和磁致伸缩力引起。本文首先分析了电机电磁噪声的产生原因, 以及如何分析和计算噪声的方法; 然后分别从引起电磁噪声的电磁力和谐波等角度分析国内外对其进行噪声抑制和消除的多种有效方法和发展现状。主要是针对电机定转子的结构优化设计以及控制谐波分量, 以及减小磁致伸缩力对电机振动的影响, 并讲述了一些电机电磁-机械耦合模型和数值计算方法。对后续进行噪声抑制的研究指明方向。最后也总结了目前研究的不足以及未来需要进一步研究的主要内容, 为后续对抑制电机噪声的研究提供参考。

## 关键词

磁致伸缩力, 振动抑制, 电磁力, 电机降噪

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

永磁同步电动机有着效率高, 功率密度高, 功率因数高等性能特性, 所以在很多电气产品中可以将其作为驱动源。例如, 大型工业电器, 车辆, 家用电器等, 近年来, 车辆内部机械系统对电气系统的需求日益增加, 使永磁同步电机的市场变得巨大, 因此, 在舒适性方面会更要求低振动和低噪声环境。同时随着混合动力汽车和电动汽车的不断发展, 低振动和低噪音电机制造技术对于汽车制造商显得尤为重要[1] [2] [3], 电机上的振动源分为机械和电磁原因。机械原因是转子旋转, 转子内质量分布不均匀, 电机平衡, 轴承有缺陷等。电磁原因是电源的不平衡, 相电流的谐波分量, 气隙的不平衡等。机械原因可以通过精确的生产和生产后的修正来消除。主要的电磁原因是电机设计中的一个问题[2], 本文主要针对永磁同步电机的电磁噪声进行研究。

本文主要分析了永磁同步电机的电磁噪声, 包括永磁体表面上电磁力的空间分布和频率特性, 介绍了分析并降低噪声的多种模型和方法。主要从电磁力的优化(减小激振力)以及降低磁致伸缩力对电机噪声的影响两方面来研究。

### 1.1. 优化电磁力

目前, 研究永磁同步电机的振动噪声大多是以径向电磁力, 齿槽转矩, 控制算法和谐波分量来进行分析和研究[4] [5] [6]。

## 转子定子优化设计

电机的振动源有电气原因和机械原因。电振动的主要原因是径向电磁力和齿槽转矩。特别是,在具有固有频率的相同频带中的转矩频率情况下产生谐振,降低了电机的性能,并对其他系统产生了不利影响。

文献[7]首先设计具有V型电机和磁通屏障的转子形状,形成气隙磁通密度的正弦分布。其次,根据转子形状设计,定子齿的磁通饱和度增加将会对磁场的性能产生负面影响,从而进行定子的形状设计,其参数要根据齿宽和磁轭厚度来考虑,这会极大地引起磁饱和。为了保持与基本模型相同的绕组空间系数需要根据增加的齿宽调节磁轭厚度,然后为了减小转矩脉动和径向磁力,设置了转子电弧,会在一定程度上影响气隙长度,随着磁阻的增加操作扭矩会随之减小。将操作扭矩的减小公差带设定在1%以内时,转子的电弧设计将会减小扭矩波动和径向电磁力,现了高效率 and 低振动特性。

当电激励模式的频率接近定子的固有频率时,电磁振动运动变得严重,因此,有必要考虑激振力来设计几何结构。为此文献[8]提出了五种不同的定子磁极形状和四种不同的定子磁轭结构来检查振动特性。为了获得较小振动的定子结构抵抗磁力,研究了所提出的定子几何结构对振动特性的影响。通过电磁三维(3-D)有限元方法(FEM)计算作为时间函数的径向力,然后当在定子上施加磁力时,通过结构3-D FEM分析定子的动态响应。同时利用模态分析预测固有频率和模态振型。提出了六角圆形磁轭上具有梯形磁极的定子结构以抑制对磁力的振动,同时文献[8][9][10]主要针对受振动和噪声限制较大的开关磁阻电机(SRM),从两个方面对减少振动进行研究,第一个方面是驱动控制策略包括电流波形,关断和开启,占空比等,提出了低转矩脉动控制策略,减振降噪控制策略(2步换相法,3步换相法)第二个方面是振动行为相关的机械设计,其中定子部分专门设计用于避免谐振频率和由谐波磁力激发的相关模态振型。可以明显起到抑制电机电磁噪声的效果。

文献[11]从定量的角度研究如何减小电机径向力,对于中小型电动机,电磁噪声是整体噪声的主要来源,并且它是由作用在定子和转子表面上的电磁力引起的[12]。该文献主要从定转子径向力上考虑,给出了径向力的计算方法:定子和转子谐波相互作用产生电磁径向力波振幅 $P$ :

$$P = \left( \frac{B_v}{f} \right) \times \left( \frac{B_u}{f} \right) \quad (1)$$

比径向力 $P_0$ :

$$P_0 = P \frac{R_0}{R_v} \quad (2)$$

定子铁心表面的振动速度 $v$ :

$$v = \frac{P_0}{z_c} \quad (3)$$

式中 $B_v$ 为定子谐波, $B_u$ 为转子谐波, $f$ 为谐波频率, $z_c$ 为定子机械阻抗, $P_0$ 为比径向力。

文献[13]和[14]中广泛讨论了作用在定子表面上的电磁力的空间分布和频率特性,并考虑了不同的槽/极组合和绕组层。文献[15]提出具有不对称绕组分布的机器可能产生不平衡的磁拉力并且会增加噪声水平。

近来,从环境改善的观点来看,电容器电动机(CRM)的电磁振动和噪声的降低也成为非常重要的课题,文献[15]研究了负载条件下CRM主导电磁振动的特性,从理论上和实验上讨论了槽组合和斜槽对负载条件下CRM主导电磁振动的影响。对于4极CRM,明确了槽组合的主要电磁振动的特性和歪斜槽对电磁振动的减小效果,从理论上显示了电磁力波与转子歪斜之间的关系,并且实验讨论了倾斜槽对电磁

振动的影响。得出的结论是主导电磁振动与谐波次数的倾斜因子的绝对值大致成比例地减小，这是振动的主要原因。

对于带有外部定子的永磁同步电动机已经充分地研究了作用在电机定子表面的力，而对于具有外部转子的情况噪声需从转子考虑，主要由作用在永磁体表面上的电磁力引起。文献[16]在具有非重叠绕组的外转子电机中讨论了径向力的空间和特定频率谐波序数。提出了优化永磁体和齿的形状来减小由定子槽引起的波动，但仍需要分析具有不同槽/极组合的外转子永磁同步电机的力特征以及一些非理想因素，例如电流谐波。

## 1.2. 分析计算振动和噪声的方法

分析和数值方法都可以用于计算电机的振动和噪声。文献[17]中建立了二维分析振动模型。该模型可以快速计算出振动和噪声，但并没有考虑端带对结构固有特性的影响，这些影响可能非常巨大[18]。也可以通过机械脉冲响应而不是模态试验获得结构固有特性，然后将力加载到齿表面的中心来计算振动[19]。文献[20]中建立了开关磁阻电机的多物理场数值预测有限元模型，噪声的峰值和总体趋势可以通过噪声测试验证。但是将电磁力沿齿面的不均匀分布简化成集中作用在磁体表面中心的力可能会导致额外的计算误差[18] [21] [22]。在电磁脉冲响应用于获得结构固有特性，利用某些点的振动信息，采用模态扩展方法来预测定子的整体振动。计算出的其他点的振动与振动试验一致。但是，在该计算过程中，应预先进行振动试验以获得某些点的振动信息[23]。

在永磁同步电动机中，气隙磁场由永磁场和电枢反应场组成，可以通过相对磁导率  $\lambda_g$  分析开槽对气隙磁场的影响，合成径向通量密度  $B_{rs}$  气隙磁场中表示为：

$$B_{rs} = (B_r\_mag + B_r\_arm)\lambda_g \quad (4)$$

其中  $B_r\_mag$  和  $B_r\_arm$  为无槽径向永磁场和无槽径向电枢反应场，特别的  $\lambda_g$  为相对磁导率的真实部分。忽略切向通量密度分量[17]。径向力密度可用麦克斯韦应力法计算。因此，

$$f_r \approx \frac{Brs^2}{u_0} \quad (5)$$

## 1.3. 控制消除谐波影响

对于振动和降噪，优化电磁力和提高结构的刚度都可以实现。然而，后一种方法需要相对高的成本。减少振动和噪声的最广泛使用的方法是消除接近模态频率的电磁力。文献[24]通过对载波频率的优化选择，使电流谐波产生的电磁力与谐振区分离，从而使振动减少了 35%。另外也可以使用倾斜的定子来减小接近模态频率的电磁力的幅度[25] [26]，并且在文献[26]中，提出了最佳倾斜角的计算方法。文献[27]通过在转子极面上形成最佳槽口来实现振动和噪声的最小化。在该方法中，通过消除气隙场的三次谐波，减小了对总噪声贡献最大的谐波阶数为 12 的 n 次方的电磁激励。然而，在具有外转子的 PMSM 中，由于激励特征的改变，降噪的优化方法不同于具有外部定子的 PMSM。

文献[28]研究了一种降低双三相绕组永磁同步电动机(PMSM)振动特性的方法，重点研究了载波谐波分量。载波相移脉冲宽度调制(PWM)使第一绕组和第二绕组的 PWM 载波相位产生差别，适用于 24 槽 20 极 PMSM。制造并测试的电动机结果表明，与传统的同相载波 PWM 相比，当载波相位在每个三相绕组之间是  $\pi/2$  弧度时，振动和声压可以在载波频率的大约两倍处大约减半。

创新有源滤波器(AF)拓扑结构，滤波器拓扑结合 AF 系列和 L 型无源电磁干扰(EMI)滤波器的补偿特性已被证明能够减小转矩脉动和电流谐波[29]。集中绕组电动机的振动往往高于分布式绕组电动机。这种

现象是由径向应力的投射引起的。文献[30]表明对于集中绕组电动机, 径向应力变得部分大, 这导致定子铁心的变形, 径向力大的气隙长度增大。发现通过部分地增大气隙, 气隙中的径向应力变得平滑, 因此, 也可以减小电动机的振动。

## 2. 考虑磁致伸缩效应降噪

控制和减少永磁同步电机的电磁振动, 需精确计算电机铁芯中的应力, 这是振动的固有原因。电机铁芯中的电磁应力主要来自定转子之间的麦克斯韦力和硅钢片的磁致伸缩力。

### 2.1. 磁致伸缩力与麦克斯韦力

有限元研究表明, 在大型电机中, 磁致伸缩对机器模态激励的影响与麦克斯韦力的影响相当。对于某些模式, 磁致伸缩减少了模态激励, 而对于其他模式, 磁致伸缩增加了模态激励[31]。在某些情况下, 麦克斯韦力和磁致伸缩力的综合作用放大了定子铁心产生的振动, 但在其他情况下, 与每个力的单独作用的影响相比, 减少了定子铁心的振动[32]。文献[33]分析了由麦克斯韦力和磁致伸缩力引起的具有分布气隙的U形(双肢)电感器的振动现象。在GetDP开源仿真环境下开发了弱二维磁力机械有限元模型(FEM), 包括磁致伸缩张量。利用有限元模型建立并验证了磁力作用下振动的简单分析模型, 分析了磁致伸缩力和麦克斯韦力对电感结构的共振效应, 并对部分电感几何参数进行了灵敏度分析。并提出了一种通过抵抗磁致伸缩力和麦克斯韦力来减少磁力激励下垂直振动的方法。

对于小型变压器, 因为气隙在变压器铁芯的每个电气片之间很小, 磁力可以忽略不计, 磁致伸缩引起的磁芯变形被认为是噪声发射的主要来源[31]。基于以上文献[31], 研究了采用全耦合磁-机械方法预测变压器铁心变形的算法, 实现了磁致伸缩引起的应力的反馈回路, 更准确地预测出了磁-机械耦合场, 在后续中还添加了一个后处理块, 用于计算声功率, 为优化核心结构提供了新的标准。并对变压器铁芯的结构进行正确的设计, 使磁致伸缩产生较小的全局变形, 实现了所研究变压器的声学振动最小化。

磁致伸缩是铁磁材料在没有约束的情况下在磁场作用下产生的机械应变的现象, 是杨氏模量, 外加应力和相对磁导率的复杂函数[32]。其有正负之分, 在应力作用下, 具有负磁致伸缩特性的材料将会收缩, 正磁致伸缩特性的材料则反之。且当材料达到其弹性极限时, 应力的增加会导致其磁导率继续降低。在每个应力水平下, 磁导率对磁场的依赖性都会发生变化[34][35]。

在交流电机中, 对电机叠片铁心考虑硅钢片磁致伸缩效应进行磁-机械的分析, 其振动方程可以表示为:

$$M_m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + C_m \frac{\partial u}{\partial t} + Ku = f(t) \quad (6)$$

上式(4)中,  $M_m$  为质量矩阵,  $C_m$  为阻尼矩阵,  $K$  为刚度矩阵,  $u(t)$  为节点的位移[6]。

### 2.2. 建立模型分析磁致伸缩力

无取向电工钢中的磁致伸缩是电机中振动和声学噪声的有害来源。它比特定功率损耗更具各向异性, 这导致预测振动和声学噪声更加复杂。为此文献[36]介绍了一种无取向电工钢的磁致伸缩和机械弹性各向异性的研究。为了研究磁致伸缩各向异性的影响, 进行感应电动机模型铁芯的定子齿的变形测量。计算由气隙中的麦克斯韦力引起的应变, 并与测量的变形进行比较。测量结果表明, 各向异性磁致伸缩对感应电机铁芯定子齿的不对称变形有很大影响。

文献[37]研究了永磁同步电动机(PMSM)的振动特性, 包括磁致伸缩(MS)和谐波, 基于压磁定律建立了磁场与定子机械形变之间的强耦合模型。然后, 通过使用该模型和测量的MS曲线, 在有限元中进行

1.5 kW PMSM 的振动分析。最后,测试了 1.5 kW PMSM 的振动,分析和测量结果都表明 MS 和谐波很重要,必须考虑到电机核心电磁设计。文献[37] [38] [39] [40]使用有限元算法研究了不同电机结构的振动计算由于磁各向异性和应力的相互作用,仍有许多工作需要改进,在此基础上文献[41]测量了不同应力下无取向硅钢片的多组磁致伸缩和磁特性曲线,以支持计算。然后提出了考虑各向异性的电机电磁-机械耦合数值模型以及应力对铁芯材料磁性能的影响,并计算了电机铁心的应力分布。从计算结果可以看出,径向应力和圆周应力在电机铁芯的不同部位表现出不同的特性,为进一步分析振动和降噪提供了理论依据。

### 2.3. 考虑磁致伸缩力的降噪方法

在设计阶段考虑电机的振动和噪声水平已经很多年了,仍然是机器设计者和操作者的主要考虑因素。在电机低速和中速运行时,电机噪声的主要来源是电磁噪声。而电磁噪声主要由麦克斯韦力和磁致伸缩力这两个力引起。所以想要减小噪声,必须从这两个力着手。为此文献[42]介绍了一种磁性双压电晶片的概念,作为控制定子齿中磁致伸缩的一种手段,使磁致伸缩力的分量起到抵消麦克斯韦力的选定分量的作用。这导致目标振动模式的零电磁激励,从而减少了电磁振动和由机器产生的噪声。该降噪技术适用于大型电机。这是一种实用且低成本的方法,可以在不降低机器性能的情况下实现。

目前来看,各行各业如飞机机载系统,电动汽车启动系统都对电力的需求在不断地增加,这就需要功率更高的变压器来为不同的电气设备进行供电,这意味着需要更大更重的变压器,这样就会增加变压器产生的噪声,所以对变压器进行降噪,也成为近年来研究的热门。变压器的噪声主要是由变压器的杂散磁场和载流线圈的相互作用[43],以及变压器铁芯的周期性形变引起的。产生这种形变主要有两方面的原因其一是与其表面和体积上出现的磁力相关的弹性应变,其二是取决于由材料局部磁状态的不同引起的自发性磁致伸缩[44]。

随着人们对各种材料的不断研究,文献[45]讲述了在具有一定机械强度的电机铁芯冲片上打孔的工艺,包括槽、通风孔、标记槽和磁极冲片上的各种孔等,通过有限元算法和结构优化对孔的位置进行优化设计,用于填充具有负磁致伸缩特性的软磁复合材料,要求所填充材料在磁导率和电阻率上与硅钢片基本一致,这样就可以利用所填充材料的负磁致伸缩效应引起的形变去抵消硅钢片正磁致伸缩效应引起的形变,从而实现降噪。

使定子铁芯变形的径向力和切向力是振动和噪声的主要原因。有研究表明通过设计转子的形状可以将激振力最小化。但是如果改变转子的形状那么电机的开发成本将会增加,文献然而,转子形状的改变增加了电动机的开发成本。因此,文献[46]在设计中应用了阶梯偏斜转子以减小激振力,采用三维有限元分析(FEA)来考虑轴向漏磁通和磁致伸缩效应,并对原型和阶梯偏斜型两种模型进行激振力测试分析,从而可以实现振动和噪声的降低以及开发的成本效益。文献[47]发现使用纳米晶体软磁复合材料填充间隙会降低磁芯的磁致伸缩和振动,因为磁通量分布得到改善。

无取向电工钢板被广泛用作电动机的核心材料。电工钢板的磁性通常在无应力条件下测量,从材料的角度来看,对压电应力下电工钢板铁损的研究很少。文献[48]无取向电工钢板在压应力下的磁性能。压缩应力下的铁损随着 Si 含量的增加而降低。特别研究了 6.5% Si 钢板在压缩应力下表现出极低的铁损劣化率。此外,6.7% Si 钢的劣化率为负。并且通过磁致伸缩很好地解释了这些结果。压缩应力下铁损的劣化率随着磁致伸缩的减小而降低。在降低电机噪声的同时如何减小铁心损耗一直是研究热点,为此文献还提出了制造负磁致伸缩材料通过压缩应力来减少铁损。所以负磁致伸缩效应的材料是我们需要进一步研究的。

### 3. 总结与展望

随着人们对舒适度要求的不断提高,国内外对各种电气设备的降噪研究逐渐地增加,电机减振降噪成为了热门研究对象。

本文主要研究了永磁同步电机的振动降噪,从不同的角度对其进行分析,整理了目前国内外对于该种电机减振降噪的多种思路和方法,主要考虑了在优化电机定转子结构,振动和噪声的计算分析,控制消除谐波以及考虑磁致伸缩效应的降噪多种方法等角度,总结出了电机减振降噪方面的研究情况;也分析了其他类型的电机,例如开关磁阻电动机,从它们的结构特性上进行多种优化从而减小振动和噪声,以及磁致伸缩力对电机噪声的影响和抑制。从目前来看,研究电机的减振降噪仍然还有一些问题亟待开展深入的研究。

1) 优化定转子的结构设计可以在一定程度上降低电机径向力和电机谐波,成功抑制部分电机振动噪声。但是同时也会使电机的稳定性和可靠性随之下降。所以设计出可以减小径向力和切向力对电机振动的影响又可以不影响电机的稳定性的定转子结构依然需要进行研究。

2) 关于电机,电感器,电力变压器的磁致伸缩力的研究比较多,但是利用减小磁致伸缩力来抑制电机振动噪声的研究比较少。目前提出来的软磁复合材料虽然能够在抑制电机噪声方面起到作用,但是受限于其高应力灵敏度和低磁饱和度,会在一定程度上限制它们的使用,因此还需继续开发新型的软磁复合材料。

3) 从减小空气动力性噪声的研究方法很多,比如消音器,加强外壳设计,改善装配的工艺等,这些方法依然有很大的改进空间。

### 参考文献

- [1] Zeze, E. and Akatsu, K. (2012) Research on Vibration Analysis and Noise-Reduction Technique of PM Motor. 2012 20th International Conference on Electrical Machines, Marseille, France, 2-5 September 2012, 458-463. <https://doi.org/10.1109/ICEIMach.2012.6349909>
- [2] Lee, S.H., Han, K.K., Ahn, H.J., Kang, G.H., Son, Y.D. and Kim, G.T. (2008) A Study on Reduction of Vibration Based on Decreased Cogging Torque for Interior Type Permanent Magnet Motor. 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Edmonton, 5-9 October 2008, 1-6. <https://doi.org/10.1109/08IAS.2008.40>
- [3] Jung, J.-W. and Lee, S.-H. (2010) Reduction Design of Vibration and Noise in IPMSM Type Integrated Starter and Generator for HEV. IEEE Transactions on Magnetics, 46, 2454-2457. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2041434>
- [4] 王建民, 让余奇. 电机噪声分析及抑制措施[J]. 船电技术, 2010, 30(8): 8-10+34.
- [5] 陈永校. 电机的振动与噪声分析[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987: 12-20.
- [6] 祝丽花. 叠片铁心磁致伸缩效应对变压器、交流电机的振动噪声影响研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2013.
- [7] Lee, G.D., Kim, G.T., Shin, H.K. and Kim, C.J. (2015) The Optimum Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for the Vibration Reduction. 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems, Pattaya, 25-28 October 2015, 227-231. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2015.7385032>
- [8] Hong, J.-P., Ha, K.-H. and Lee, J. (2002) Stator Pole and Yoke Design for Vibration Reduction of Switched Reluctance Motor. IEEE Transactions on Magnetics, 38, 929-932. <https://doi.org/10.1109/20.996239>
- [9] 孙剑波, 詹琼华, 王双红, 马志源. 开关磁阻电机减振降噪和低转矩脉动控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(12): 134-138.
- [10] 王宏华, 陈永校, 许大中. 开关磁阻调速电机定子振动抑制[J]. 电工技术学报, 1998, 13(3): 9-12.
- [11] Zhu, Z.Q., Xia, Z.P., Wu, L.J. and Jewell, G.W. (2009) Influence of Slot and Pole Number Combination on Radial Force and Vibration Modes in Fractional Slot PM Brushless Machines Having Single- and Double-Layer Windings. 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, CA, 20-24 September 2009, 3443-3450. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2009.5316553>
- [12] Zuo, S. and Lin, F. (2015) Noise Analysis, Calculation, and Reduction of External Rotor Permanent-Magnet Syn-

- chronous Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, **62**, 6204-6212. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2426135>
- [13] Zhu, L., Yang, Q., Yan, R., *et al.* (2014) Magnetic and Vibration Element Analysis of PM Motor under Frequencies Including Magnetostriction. International Conference on Electrical Machines and Systems, Hangzhou, 22-25 October 2014, 1136-1139. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2014.7013641>
- [14] Zhu, Z.Q., Xia, Z.P., Wu, L.J. and Jewell, G.W. (2010) Analytical Modeling and Finite-Element Computation of Radial Vibration Force in Fractional-Slot Permanent-Magnet Brushless Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **46**, 1908-1918. <https://doi.org/10.1109/TIA.2010.2058078>
- [15] Zhu, Z.Q., Jamil, M.L.M. and Wu, L.J. (2011) Influence of Slot and Pole Number Combinations on Unbalanced Magnetic Force in Permanent Magnet Machines. 2011 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Phoenix, AZ, 17-22 September 2011, 3291-3298. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2011.6064213>
- [16] Krotsch, J. and Piepenbreier, B. (2012) Radial Forces in External Rotor Permanent Magnet Synchronous Motors with Non-Overlapping Windings. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **59**, 2267-2276. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2151827>
- [17] Husain, I. (2010) Analytical Model for Predicting Noise and Vibration in Permanent-Magnet Synchronous Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **46**, 2346-2354. <https://doi.org/10.1109/TIA.2010.2070473>
- [18] Torregrossa, D., Peyraut, F., Fahimi, B., M'Boua, J. and Miraoui, A. (2011) Multiphysics Finite-Element Modeling for Vibration and Acoustic Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **26**, 490-500. <https://doi.org/10.1109/TEC.2010.2080681>
- [19] Torregrossa, D., Fahimi, B., Peyraut, F. and Miraoui, A. (2012) Fast Computation of Electromagnetic Vibrations in Electrical Machines via Field Reconstruction Method and Knowledge of Mechanical Impulse Response. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **59**, 839-847. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2143375>
- [20] Dos Santos, F.L.M., *et al.* (2014) Multiphysics NVH Modeling: Simulation of a Switched Reluctance Motor for an Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **61**, 469-476. <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2247012>
- [21] Kim, D.Y., Jang, G.H. and Nam, J.K. (2013) Magnetically Induced Vibrations in an IPM Motor Due to Distorted Magnetic Forces Arising from Flux Weakening Control. *IEEE Transactions on Magnetics*, **49**, 3929-3932. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2238614>
- [22] Islam, M., Islam, R. and Sebastian, T. (2014) Noise and Vibration Characteristics of Permanent Magnet Synchronous Motors Using Electromagnetic and Structural Analyses. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **50**, 3214-3222. <https://doi.org/10.1109/TIA.2014.2305767>
- [23] Chenjie, L. and Fahimi, B. (2014) Prediction of Acoustic Noise in Switched Reluctance Motor Drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **29**, 250-258. <https://doi.org/10.1109/TEC.2013.2291702>
- [24] Torregrossa, D., Paire, D., Peyraut, F., Fahimi, B. and Miraoui, A. (2012) Active Mitigation of Electromagnetic Vibration Radiated by PMSM in Fractional-Horsepower Drives by Optimal Choice of the Carrier Frequency. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **59**, 1346-1354. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2081961>
- [25] Kim, D.-J., Jung, J.-W., Hong, J.-P., Kim, K.-J. and Park, C.-J. (2012) A Study on the Design Process of Noise Reduction in Induction Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, **48**, 4638-4641. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2197187>
- [26] Cassat, A., *et al.* (2012) A Practical Solution to Mitigate Vibrations in Industrial PM Motors Having Concentric Windings. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **48**, 1526-1538. <https://doi.org/10.1109/TIA.2012.2210172>
- [27] Hur, J., Reu, J.-W., Kim, B.-W. and Kang, G.-H. (2011) Vibration Reduction of IPM-Type BLDC Motor Using Negative Third Harmonic Elimination Method of Air-Gap Flux Density. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **47**, 1300-1309. <https://doi.org/10.1109/TIA.2011.2128850>
- [28] Miyamas, Y., Kometani, H., Akatsu, K. and Ishizuka, M. (2017) Vibration Reduction by Applying Carrier Phase-Shift PWN on Dual Three-Phase Windings Permanent Magnet Synchronous Motor. 2017 *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Miami, FL, 21-24 May 2017, 1-6. <https://doi.org/10.1109/IEMDC.2017.8002021>
- [29] Gulez, K. and Adam, A.A. (2008) Torque Ripple and EMI Noise Minimization in PMSM Using Active Filter Topology Ang Field-Oriented Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **55**, 251-257. <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.896295>
- [30] Asano, Y. and Honda, Y. (2002) Novel Noise Improvement Technique for a PMSM with Concentrated Winding. *Proceedings of the Power Conversion Conference*, Osaka, Japan, 2-5 April 2002, 460-465.
- [31] Liu, M. and Hubert, O. (2017) Reduction of Power Transformer Coer Noise Generation Due to Magnetostriction-Induced Deformations Using Fully Coupled Finite-Element Modeling Optimization Procedures. *IEEE Transactions on Magnetics*, **53**, Article No. 8400511. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2687409>
- [32] Hilgert, T., Vandeveld, L. and Melkebeek, J. (2007) Numerical Analysis of the Contribution of Magnetic Forces and Magnetostriction to the Vibrations in Induction Machines. *IET Science, Measurement & Technology*, **1**, 21-24.



<https://doi.org/10.1049/iet-smt.20060018>

- [33] Rossi, M. and Le Besnerais, J. (2015) Vibration Reduction of Inductors under Magnetostrictive and Maxwell Forces Excitation. *IEEE Transactions on Magnetics*, **51**, 1-6. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2469643>
- [34] Belahcen, A. (2004) Magnetoelasticity Magnetic Forces and Magnetostriction in Electrical Machines.
- [35] Mohammad, O.A. (2001) Numerical Prediction of Magnetostrictive Behaviour in Non-Oriented Electrical Steel Sheets. *Proceedings. IEEE SoutheastCon 2001*, Clemson, SC, 1 April 2001, 179-182.
- [36] Somkun, S., Moses, A.J. and Anderson, P.J. (2009) Effect of Magnetostriction Anisotropy in Nonoriented Electrical Steels on Deformation of Induction Motor Stator Cores. *IEEE Transactions on Magnetics*, **45**, 4744-4747. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2022320>
- [37] Zhu, L., Yang, Q., Yan, R., Li, Y. and Yan, W. (2014) Magnetoelastic Numerical Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor Including Magnetostriction Effects and Harmonics. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **24**, Article No. 0503304. <https://doi.org/10.1109/TASC.2013.2288683>
- [38] Mori, D. and Ishikawa, T. (2005) Force and Vibration Analysis of Induction Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*, **41**, 1948-1951. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2005.846262>
- [39] Arkkio, A. and Holopainen, T.P. (2016) Space-Vector Models for Torsional Vibration of Cage Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **52**, 2988-2995. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2547361>
- [40] Martinez, J., Belahcen, A. and Muetze, A. (2017) Analysis of the Vibration Magnitude of an Induction Motor with Different Numbers of Broken Bars. *IEEE Transactions on Industry Applications*, No. 99, 1-10.
- [41] Ben, T., Yang, Q., Yan, R. and Zhu, L. (2017) Stress Analysis of Motor Cores Based on the Measurement of Magnetostriction of Non-Oriented Silicon Steel Sheet. *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems*, Sydney, 11-14 August 2017, 1-4.
- [42] Shahaj, A. and Garvey, S.D. (2011) A Possible Method for Magnetostrictive Reduction of Vibration in Large Electrical Machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, **47**, 374-385. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2095875>
- [43] Ertl, M. and Landes, H. (2007) Investigation of Load Noise Generation of Large Power Transformer by Means of Coupled 3-D FEM Analysis. *COMPEL-The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, **26**, 788-799. <https://doi.org/10.1108/03321640710751226>
- [44] De Lacheisserie, E.D.T. (1993) Magnetostriction. CRC Press, Boca Raton, FL.
- [45] 胡志强. 电机制造工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [46] Jung, J.-W. and Kim, D.-J. (2010) Effect of Skewed Rotor Type IPMSM on Noise and Vibration. *Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, Chicago, IL, 9-12 May 2010, 1.
- [47] Zhu, L., *et al.* (2013) Numerical Computation for a New Way to Reduce Vibration and Noise Due to Magnetostriction and Magnetic Forces of Transformer Cores. *Journal of Applied Physics*, **113**, 2014-2017. <https://doi.org/10.1063/1.4800077>
- [48] Oda, Y., Toda, H., Shiga, N., Kasai, S. and Hiratani, T. (2012) Effect of Si Content on Iron Loss of Electrical Steel Sheet under Compressive Stress. *IEEE Transactions on Magnetics*, **50**, 1-4. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2290321>