

# 利用定子槽口宽度削弱永磁电机电磁噪声研究<sup>\*</sup>

王晓宇, 孙 宁, 陈丽香

(沈阳工业大学 国家稀土永磁电机工程技术研究中心 辽宁 沈阳 110870)

**摘 要:** 着重研究了永磁电机定子槽口宽度对电磁噪声的影响。通过电磁力解析计算得出电磁力与定子槽口宽度的计算关系。利用 Ansoft 软件对 1 台电动汽车用永磁电机进行电磁场计算,求解改变定子槽口宽度对电磁力波的影响,并用 ANSYS 软件对该永磁电机进行不同定子槽口宽度的 2D 声场计算。进行了试验验证,仿真计算与试验结果基本一致,可为该类电机削弱噪声设计计算提供参考。

**关键词:** 永磁电机; 电动汽车; 定子槽口宽度; 噪声

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)10-0073-04

## Study of Weakening Electromagnetic Noise for Permanent Magnet Motor by Stator Slot Width<sup>\*</sup>

WANG Xiaoyu, SUN Ning, CHEN Lixiang

(National Engineering Research Center for REPM Electrical Machine, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** The influence of permanent magnet motor stator slot width on electromagnetic noise was focused on. The relationship between electromagnetic force and the stator slot width was deduced by the analytical calculation of electromagnetic force. Electromagnetic field calculation was carried out for a permanent magnet motor for electric vehicle by Ansoft software, so as to solve the change of electromagnetic force wave with the change of stator slot width. At the same time, the 2D sound field of this permanent magnet motor was calculated by Ansys software for different slit widths. At last, experiment verification was performed. The simulation calculation result was basically identical with the experiment. This research could provide reference for weakening noise in motor designing process.

**Key words:** permanent magnet motor; electric vehicle; stator slot width; noise

## 0 引 言

随着全世界能源和环境的形势越来越严峻,发展新能源电动汽车势在必行。永磁同步电动机作为电动汽车驱动系统的核心动力部件,其性能的优劣直接决定了整台电动汽车的性能。其中噪声影响格外引人注目。比如,某种类型的高性能汽车使用的永磁电机,要求噪声低于 42 dB。对永磁电机设计研究的公司来说,降低永磁电机的噪声可以降低生产成本,有效提高产品的竞争

力<sup>[1]</sup>。因此,噪声削弱对永磁电机研究变得很重要而有意义。

目前,学者们对永磁电机的振动噪声做了大量的研究。主要研究集中在永磁电机的振动噪声计算和定转子振动特性以及分析噪声辐射模型。文献[2]利用有限元的计算方法,计算分数槽电动机的电磁噪声,根据计算结果得出了永磁无刷电机极数和定子槽数配合与主要激振力波阶数和频率之间的关系。文献[3]通过对永磁电机空载气隙磁场和负载气隙磁场进行解析计算,分析了

<sup>\*</sup> 基金项目: 沈阳市科技计划项目(17-7-2-00)

作者简介: 王晓宇(1981—)男,硕士,工程师,研究方向为永磁电机设计。

孙 宁(1980—)男,硕士,工程师,研究方向为特种电机及其控制。

陈丽香(1973—)女,硕士,高级工程师,研究方向为永磁电机研究和开发。

电磁噪声对永磁无刷直流电机的影响。文献[4]利用 Maxwell 公式进行径向力波计算,忽略气隙磁密的切向分量,定子电枢表面的磁密可以用气隙中间的磁密来代替,该计算是具有足够的准确性的。文献[5]提出一种削弱永磁电机齿槽转矩的方法,使内置式永磁电动机的电磁噪声减小。文献[6-7]分别研究了外转子永磁电机和永磁体内置式振动噪声的特性。文献[8-9]分析了施加在电动机定子内表面的电磁力的幅值和频率,计算了电机定子的固有频率特性,尽量减小施加在定子内表面上的电磁力幅值,减少定子振动幅度,或者让电磁力的频率远离定子的固有频域,以防止产生共振现象,从而减小电动机的振动噪声。

本文着重研究永磁电机定子槽口宽度对电磁噪声的影响,提出减小槽口宽度可以削弱电磁力,并进而削弱电机的电磁噪声。

## 1 电磁力解析计算模型

永磁电机的气隙磁密  $B(\theta, t)$  受到永磁体产生的磁场、定子电枢的电流产生的磁场和定子齿槽结构的综合影响。在求解电动机气隙的磁密时,假设电动机定子没有齿槽,分别求解由永磁体形成的开路产生的气隙磁场  $B_{PM-slotless}$  和由电枢电流形成电枢反应产生的磁场  $B_{arm-slotless}$ ,然后根据永磁电机定子齿槽结构参数计算齿槽的气隙相对磁导,利用线性叠加的方法最后求出合成气隙磁场<sup>[10]</sup>,即

$$B(\theta, t) = (B_{PM-slotless} + B_{arm-slotless}) \tilde{\lambda} \quad (1)$$

式(1)中气隙相对磁导可写为傅里叶级数的形式<sup>[10]</sup>:

$$\tilde{\lambda}(r, \theta, t) = \sum_{\mu=0}^{\infty} \tilde{\Lambda}_{\mu}(r) \cos \mu Z \left( \theta - \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (2)$$

式中:  $Z$ ——定子的槽数。

系数  $\tilde{\Lambda}_{\mu}(r)$  与电机槽宽、气隙长度等结构参数相关,气隙相对磁导  $\tilde{\lambda}(r, \theta, t)$  的幅值受系数  $\tilde{\Lambda}_{\mu}(r)$  影响。 $\tilde{\Lambda}_{\mu}(r)$  可表示为

$$\tilde{\Lambda}_{\mu}(r) = -\beta(r) \frac{4}{\pi \mu} \left[ 0.5 + \frac{(\mu b_0 / \tau_t)^2}{0.78125 - 2(\mu b_0 / \tau_t)^2} \right] \cdot \sin(1.6 \pi \mu b_0 / \tau_t) \quad (3)$$

式中:  $\tau_t$ ——定子的齿距  $\tau_t = \frac{2\pi}{Z} R_r$ ;

$b_0$ ——槽口宽度;

$R_r$ ——定子的内径;

$\beta(r)$ ——由保角变换法确定的与半径  $r$  相关的系数。

根据 Maxwell 公式,电机气隙中作用在定子齿表面单位面积的径向电磁力瞬时值为

$$P_r = \frac{B^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (4)$$

由此可见电磁力受槽口宽度和定子齿距的影响。电磁力是使电机产生电磁振动和噪声的根本原因,通过合理设计槽口宽度和定子齿距尺寸可以有效地削弱电机的电磁噪声。

## 2 槽口宽度对电机性能的影响

本文以 1 台 12 极 54 槽的电动汽车永磁电机为例,通过改变槽口宽度来改善电磁力波形。永磁电机结构模型如图 1 所示。电机基本参数如表 1 所示。

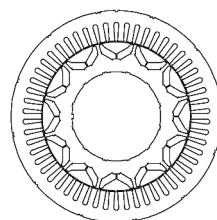


图 1 永磁电机结构模型

表 1 电机基本参数

参数名称	参数值
定子铁心外径/mm	380
定子铁心内径/mm	270
铁心长度/mm	250
定子槽数	54
槽口宽度/mm	2.4
极数	12
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1 250
转子铁心内径/mm	160

### 2.1 不同槽口宽度对反电动势的影响

从开口槽到全开口槽利用 Ansoft 进行电磁场分析计算。图 2 所示为槽口宽度为 2.4 mm 时的反电动势波形。不同槽口宽度对反电动势波形有

效值大小的影响如图 3 所示。

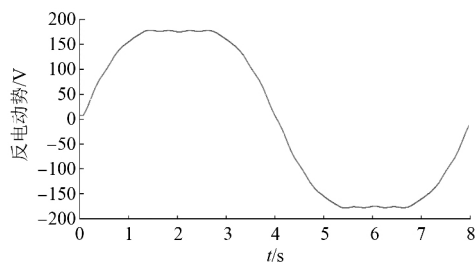


图 2  $b_0 = 2.4$  mm 时的反电动势波形

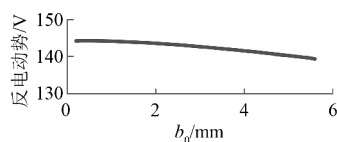


图 3 不同槽口宽度对反电动势的影响

从图 3 可看出,随着槽口宽度的增大反电动势的有效值略微减小。

## 2.2 槽口宽度对电磁力的影响

从开口槽到全开口槽对不同槽口宽度进行气隙磁密分析。图 4 所示为槽口宽 2.4 mm 时的气隙磁密波形。根据式(4)求解电磁力波形,结果如图 5 所示。通过图 5 对电磁力波进行傅里叶分解可得各阶激振力波幅值,如图 6 所示。

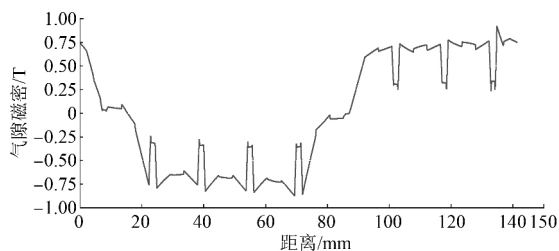


图 4  $b_0 = 2.4$  mm 时的气隙磁密波形

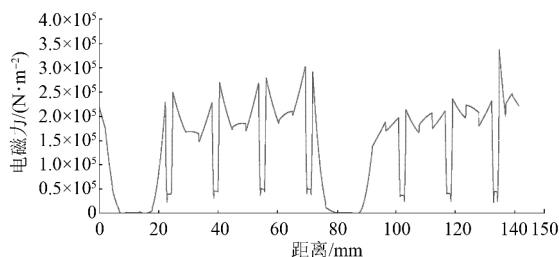


图 5  $b_0 = 2.4$  mm 时的电磁力波形

通常铁心振动时动态变形的振幅与力波阶数的 4 次方成反比,因此在计算电机的振动和噪声

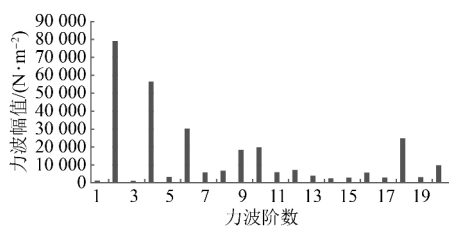


图 6  $b_0 = 2.4$  mm 时的各阶力波幅值

时常考虑阶数小于或等于 4 的力波。对不同槽口宽度进行电磁场计算,根据电磁场计算的气隙磁密波形求解电磁力,通过傅里叶分解比较不同槽口宽度下小于或等于 4 阶的电磁力波幅值,如图 7 所示。

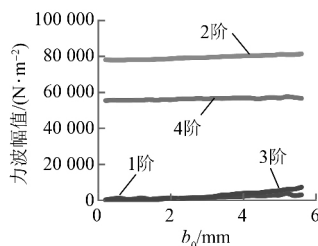


图 7 不同槽口宽度下小于或等于 4 阶的电磁力波幅值

由图 7 可以看出,改变槽口宽度可以削弱各阶力波幅值大小,槽口越小各阶力波幅值也会减小,从而削弱噪声大小。

## 2.3 槽口宽度对噪声的影响

利用电磁场计算结果,计算不同槽口宽度时作用在定子齿表面的电磁力。在进行声场分析时,有限元的模型、各种材料的属性以及约束条件的设置与电磁场计算时模型设置全部保持一致,并且对电机机壳和电机定子铁心及流体介质建模。将电磁场求解的电磁力作为载荷加载到定子齿表面求解其对噪声的影响。声场有限元计算模型及声场的计算单元如图 8 所示。

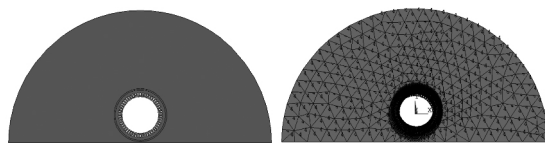


图 8 声场计算模型和声场计算单元图

在永磁电机噪声测试试验时,采用国家标准 GB/T 10069.1—2006《旋转电机噪声测定方法及限值——第 1 部分:旋转电机噪声测定方法》。由

于所测试永磁电机的轴中心高度为 200 mm ,小于测试标准中所提到的轴中心高度 225 mm ,但大于 90 mm ,所以采用的方法为半球面法。测试点半径  $R$  应为 1 m。将空间内的噪声测试点的声压求取出来作为计算结果。当槽口宽度  $b_0 = 2.4$  mm 时,某一点的声压曲线如图 9 所示。对该永磁电机不同的槽口宽度进行噪声计算 ,提取同一测试点计算结果 ,如图 10 所示。

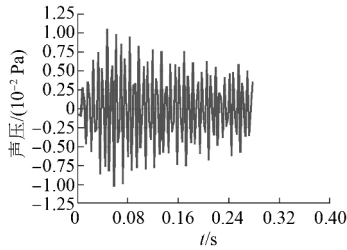


图 9  $b_0 = 2.4$  mm 的声压曲线

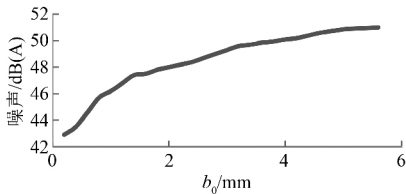


图 10 不同槽口宽度时的噪声大小

从图 10 可看出不同槽口宽度对噪声大小的影响 ,槽口减小噪声也减小。因此 ,减小槽口宽度可以有效地削弱噪声。但槽口宽度同时影响电机的其他性能 ,同样也由冲模制造、冲压和下线工艺等因素决定 ,因此应权衡考虑后做出选择。

3 试验验证

根据表 1 设计 1 台样机进行噪声试验 ,如图 11( a) 所示。试验所得的反电动势波形 ,如图 11( b) 所示。与计算进行了对比分析 ,数据如表 2 所示。

从表 2 可以看出 ,反电动势和噪声的试验值与计算值基本一致 ,说明该计算方法的正确性及计算结构的准确性。

表 2 计算值与试验值对比

参数名称	反电动势/V	噪声/dB
计算值	148.2	48.3
试验值	149.8	49.2

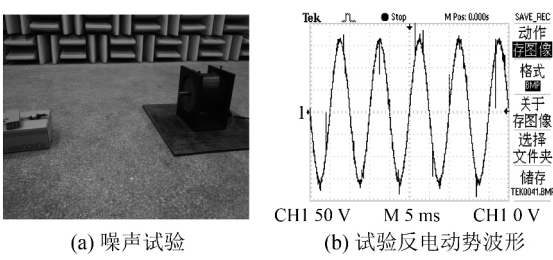


图 11 样机试验

4 结 语

(1) 本文通过电磁力解析计算 ,得出了电磁力和槽口宽度的计算关系。槽口宽度通过对电磁力的影响而对永磁电机的噪声大小产生影响。

(2) 通过电磁场分析计算可看出 ,减小槽口宽度可以削弱各阶电磁力波数幅值 ,进而削弱噪声。

(3) 本文设计了 1 台电动汽车用永磁电机并进行了试验验证 ,对比分析反电动势和噪声 ,发现试验值与计算值大小基本一致 ,满足了永磁电动机的设计要求 ,证明了该计算方法的正确性及计算结构的准确性。

【参考文献】

[ 1 ] 何鹤环.永磁有刷直流电动机电磁振动与噪声的分析[D].上海:上海交通大学,2012.

[ 2 ] CHEN Y S ,ZHU Z Q ,HOWE D. Vibration of PM brushless machines having a fractional number of slots per pole [J]. IEEE Transactions on Magnetics ,2006 , 42( 10) : 3395-3397.

[ 3 ] ZHU Z Q ,HOWE D. Electromagnetic noise radiated by brushless permanent magnet DC drives [C]//1993 Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives ,Oxford ,1993: 606-611.

[ 4 ] HWANG S M ,KIM K T ,JEONG W B ,et al. Comparison of vibration sources between symmetric and asymmetric HDD spindle motors with rotor eccentricity [J]. IEEE Transactions on Industry Applications ,2001 ,37( 6) : 1727-1731.

[ 5 ] LEE S H ,HAN K K ,AHN H J ,et al. A study on reduction of vibration based on decreased cogging torque for interior type permanent magnet motor [C]// IEEE Industry Applications Society Annual Meeting ,Edmonton ,2008: 1-6.

( 下转第 133 页)

将有所发展,并最终可能演变为纯金属性短路甚至一点或两点接地故障,其具体发展的速度取决于不同发电机的转子绕组冷却条件、过渡电阻及发电机的不对称程度等因素。

## 5 结 语

本文在同步发电机不对称状态下进行了转子绕组匝间短路故障仿真,研究了负序磁场对转子匝间短路故障的恶化影响,并在此基础上粗略地分析了转子短路电流与短路线圈的匝数、节距以及短路点过渡电阻之间的关系,得出以下结论:

(1) 发电机在不对称运行状态下发生转子绕组匝间短路故障,不对称程度越严重,负序磁场越强,转子电流、转子绕组的感应电动势、转子短路回路电流及阻尼电流的二倍频交流分量的幅值也越大。

(2) 当发电机内只有正序磁场时,转子短路电流稳定后的大小与短路线圈的匝数、节距并无明显关系;当发电机中出现负序磁场时,转子短路电流随短路线圈匝数的减小和线圈节距的增大而增大。

(3) 发电机不对称运行产生的负序磁场造成转子短路回路电流增大,并且当短路点的过渡电阻值较大时会引起短路部分更为严重的发热,进而加速转子绕组匝间绝缘的破坏。因此,在转子绕组的匝间短路故障不能被立即处理的情况下,应加强对发电机定子侧不对称运行情况的监视,避免因出现负序磁场造成短路故障的快速恶化以及更严重的经济损失。

## 【参 考 文 献】

[1] ALBRIGHT D R. Inter-turn short circuit detector for

turbine generator rotor windings [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, 1971, 90 (2): 478-483.

[2] 李永刚,宋欣羽,武玉才.基于多回路理论的转子匝间短路时定子并联支路环流分析[J].电力系统自动化, 2009, 33(17): 71-75.

[3] 李永刚,李和明,赵华.汽轮发电机转子绕组匝间短路故障诊断新判据[J].中国电机工程学报, 2003, 23(6): 112-116.

[4] 武玉才,李永刚,李和明.基于轴电压的隐极同步发电机转子典型故障诊断[J].电工技术学报, 2010, 25(6): 178-184.

[5] 中广核工程有限公司.红沿河3号励磁机与LAB故障分析报告[R].2014.

[6] 李晓明,刘东明.大型汽轮发电机转子绕组匝间短路故障的测试与分析[J].大电机技术, 2003(3): 7-10.

[7] 郝亮亮,孙宇光,邱阿瑞,等.同步发电机励磁绕组匝间短路故障稳态数学模型及仿真[J].电力系统自动化, 2010, 34(18): 51-52.

[8] 高云鹏.大型半速汽轮发电机相间短路时瞬态负序分量研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2013.

[9] 张鹏鹏.大型半速汽轮发电机不对称短路及其负序分量的研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2015.

[10] 汤蕴璆.电机学[M].北京:机械工业出版社, 2014.

[11] 侯纪勇.汽轮发电机励磁绕组匝间短路分析及实验研究[D].保定:华北电力大学, 2011.

[12] 郝亮亮,孙宇光,邱阿瑞,等.隐极发电机励磁绕组匝间短路故障定位及短路匝数估算[J].中国电机工程学报, 2011, 31(21): 85-90.

收稿日期: 2018-04-25

(上接第76页)

[6] CARMELI M S, CASTELLI D F, MAURI M. Electromagnetic vibration and noise analysis of an external rotor permanent magnet motor [C] // International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Taormina, 2006: 1028-1033.

[7] KO H S, KIM K J. Characterization of noise and vibration sources in interior permanent-magnet brushless DC motors [J]. IEEE Transactions on

Magnetics, 2004, 40(6): 3482-3489.

[8] 于慎波.永磁同步电动机振动与噪声特性研究[D].沈阳:沈阳工业大学, 2006.

[9] 代颖.电动汽车驱动用感应电机的电磁噪声研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2007.

[10] ZHU Z Q, HOWE D. Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors. IV. Magnetic field on load [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(1): 143-151.

收稿日期: 2018-04-25