

基于轴线方向不等宽度磁极结构的表贴式 永磁同步电机极频振动的削弱

武彤*, 夏加宽, 朱启升

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Reduction of Pole Frequency Vibration in Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Axially Unequal Width Pole Structure

WU Tong*, XIA Jiakuan, ZHU Qisheng

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: In order to solve the pole frequency vibration problem of a 10-pole and 12-slot surface-mount permanent magnet synchronous motor, a weakening scheme of the pole structure with axially unequal width is proposed. This scheme can effectively reduce the extreme frequency vibration of the motor under the premise of ensuring the torque density of the motor. Firstly, based on the Maxwell stress tensor method, an analytical expression for the radial electromagnetic force of the motor is derived, and a model of the electromagnetic force acting on the stator teeth of the motor is established. Simultaneously, factors contributing to the generation of pole frequency electromagnetic force harmonics in the prototype are analyzed. Then, through finite element simulation analysis, the basic mechanism of reducing pole frequency electromagnetic force by using the magnetic pole structure with axially unequal width is explained. And comparison analysis of the motor's electromagnetic performance and vibration acceleration before and after optimization is conducted. Finally, the results show that the polar structure with axially unequal width can effectively reduce the harmonics and vibrations of the polar electromagnetic force while maintaining the torque density of the motor, which confirms the effectiveness of the optimization scheme.

Key words: surface-mounted permanent magnet synchronous motor; weaken pole-frequency vibration; axially unequal width pole structure; finite element model

摘要: 针对一台 10 极 12 槽表贴式永磁同步电机的极

频振动问题,提出了一种轴线方向不等宽度磁极结构的削弱方案。该方案可以在保证电机转矩密度前提下,有效降低电机的极频振动。首先,根据麦克斯韦张量法,推导出电机径向电磁力的解析表达式,并建立了作用在电机定子齿部电磁力模型;同时,对样机中产生极频电磁力谐波的因素进行了分析研究。然后,通过有限元仿真分析,介绍了利用轴线方向不等宽度磁极结构降低极频电磁力的基本机理,并对优化前后的电机的电磁性能和振动加速度进行了比较分析。最后,研究结果表明,采用轴线方向不等宽度磁极结构能够有效地减弱极频电磁力谐波和振动,同时保持电机的转矩密度,证实了优化方案的有效性。

关键词: 表贴式永磁同步电机; 削弱极频振动; 轴线方向不等宽度磁极; 有限元模型

0 引言

由于永磁同步电机具有结构简单、功率密度高和效率高等优点,其在水下航行器和舰船推进系统中被广泛应用^[1]。随着声纳技术的不断提高,对水下推进设备的隐蔽性要求也越来越高,而永磁同步电机在运行过程中会产生低频振动噪声,该振动噪声会对水下设备的隐蔽性造成影响^[2]。

电机在运行过程中,会产生 2 倍频电磁力谐波,该谐波会引起电机的极频振动,在电机的低频段范围内,该振动十分显著^[3]。文献[4]通过对两台不同极槽配合的永磁同步电机进行研究,研究结果指出,电机的 2 倍频振动噪声最为显著。文献[5]对一台内置式永磁同步电机进行振动噪

基金项目: 国家自然科学基金(52077142)

National Natural Science Foundation of China (52077142)

声分析,结果表明,2倍频振动对电机的振动影响最为显著。文献[6]对电机的径向电磁力波进行研究,结果表明2倍频电磁力对电机的振动噪声影响最为显著。2倍频电磁力谐波产生的主要原因是电机基波磁场的作用,基波磁场对电机的机电能量转换起重要作用,因此,在各类永磁电机中极频振动是普遍存在的^[7-9]。因此,有必要深入分析并采取措施来削弱电机的极频电磁力,以改善其性能和振动特性。

当前,国内外已经存在多种减弱电机振动噪声的方法。文献[10]以一台44极48槽永磁同步电机为例,对其进行定子齿削角,以削弱电机的振动噪声,结果表明,通过电机定子齿削角可以削弱电机的振动噪声,但是该方法会影响基波磁场,导致平均转矩下降。文献[11]以一台8极48槽内置式永磁电机为例,提出了一种之字型磁极结构,结果表明,该结构对电机槽频振动的削弱效果显著。文献[12]中,为了削弱电机的振动,在电机的转子上插入铜环,结果表明,这种方法在削弱高频振动方面具有明显的效果,对低频段振动的削弱效果并不明显。文献[13]对电机的斜槽与斜极结构进行了分析,结果表明,电机斜槽和斜极结构主要适用于对电机齿槽转矩和槽频电磁力谐波的削弱。以上方法虽然都可以对电机的极频振动进行削弱,但是也会对电机的基波磁场产生影响,从而导致电机的输出转矩下降。因此,有效削弱电机极频振动同时保证电机输出转矩基本不成为一个需要解决的问题。

本文提出了一种优化磁极结构方案,采用轴线方向不等宽度磁极结构。该磁极结构能够使电机轴线方向上磁极过零点的位置发生偏移,从而使径向电磁力波的最低点得到填充,进而有效地削弱电机的极频振动,且电机输出转矩基本不受影响。首先,基于麦克斯韦张量法,对电机径向电磁力的解析表达式以及作用在定子齿部的电磁力进行了推导。其次,介绍了轴线方向不等宽度磁极结构削弱电机的极频振动的基本机理。然后,对比了电机在优化前后的电磁性能和振动加速度。结果表明,优化磁极结构能够有效地减少极频电磁力谐波和振动,同时又能保持电机的输出转矩,证明了优化结构可以有效地对极频振动进行削弱。由于电机的噪声趋势和特征可以通过空

载条件下的噪声响应准确反映^[14],因此,本文主要针对空载工况运行下的电机进行分析。

1 电机模型

本文所研究的10极12槽表贴式永磁同步电机横截面示意图如图1所示,该电机的主要参数如表1所示。

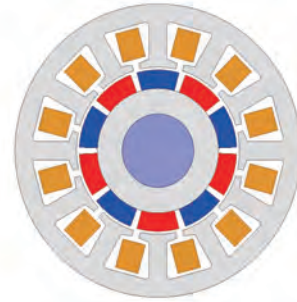


图1 表贴式永磁同步电机横截面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cross-section of surface-mounted permanent magnet synchronous motor

表1 永磁同步电机基本参数

Tab. 1 The basic parameters of permanent magnet synchronous motor

参数名称	参数值
额定功率/W	63
额定转速/(r·min ⁻¹)	4 000
额定转矩/(N·m)	0.15
额定电流/A	3
极数	10
槽数	12
极弧系数	0.86
铁心长度/mm	45
定子外径/mm	40
定子内径/mm	25
转子外径/mm	22.7
磁极材料	SmCo28

2 永磁电机径向力分析

2.1 电机气隙磁场解析计算模型

一般情况下,由于永磁体的作用,空载时气隙处的等效磁动势^[15]为

$$F_r = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} F_n \cos[n(p\theta - \omega t)] \quad (1)$$

式中: p 为电机的极对数; θ 为转子空间机械角度; t 为时间; ω 为转子机械角速度; F_n 为 n 次磁动势谐波幅值。

当考虑定子开槽的影响时,气隙磁导^[16]可以

表示为

$$\Lambda = \Lambda_0 + \sum_{k=1,2}^{\infty} \Lambda_k \cos(kZ\theta) \quad (2)$$

式中: Λ_0 为气隙平均磁导; Λ_k 为 k 次谐波磁导的幅值; Z 为电机定子槽数。

将永磁磁动势与气隙磁导相乘, 得到气隙磁通密度^[17]为

$$B_r = F_r \Lambda = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \Lambda_0 F_n \cos[n(p\theta - \omega t)] + \sum_{k=1,2}^{\infty} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \Lambda_k F_n \cos[(np \pm kZ)\theta - n\omega t] \quad (3)$$

2.2 电机径向电磁力密度解析模型

当忽略麦克斯韦张量的切向分量和磁致伸缩效应时, 根据麦克斯韦应力方程, 定子齿表面单位面积受到的径向电磁力密度^[18-19]为

$$f_r \approx \frac{1}{2\mu_0} B_r^2 = f_{r1} + f_{r2} + f_{r3} \quad (4)$$

式中: μ_0 为真空磁导率。

$$f_{r1} = \frac{1}{4\mu_0} \sum_{n_1} \sum_{n_2} \Lambda_0^2 F_{n_1} F_{n_2} \cos[(n_1 \pm n_2)p\theta - (n_1 \pm n_2)\omega t] \quad (5)$$

$$f_{r2} = \frac{1}{4\mu_0} \sum_k \sum_{n_1} \sum_{n_2} \Lambda_0 \Lambda_k F_{n_1} F_{n_2} \cdot \cos\{[(n_1 \pm n_2)p \pm kZ]\theta - (n_1 \pm n_2)\omega t\} \quad (6)$$

$$f_{r3} = \frac{1}{8\mu_0} \sum_{k_1} \sum_{k_2} \sum_{n_1} \sum_{n_2} \Lambda_{k_1} \Lambda_{k_2} F_{n_1} F_{n_2} \cdot \cos\{[(n_1 \pm n_2)p \pm (k_1 - k_2)Z]\theta - (n_1 \pm n_2)\omega t\} \quad (7)$$

由式(5)~式(7)可以得到电机径向电磁力的时空特性, 如表2所示。

表2 径向电磁力密度时空特性

Tab. 2 Radial electromagnetic force density spatiotemporal characteristics

源	时间阶次	空间阶次
f_{r1}	$n_1 \pm n_2$	$(n_1 \pm n_2)p$
f_{r2}	$n_1 \pm n_2$	$(n_1 \pm n_2)p \pm kZ$
f_{r3}	$n_1 \pm n_2$	$(n_1 \pm n_2)p \pm (k_1 \pm k_2)Z$

当 $n_1 + n_2 = 2, 4, 6$ 时, 电机产生 2 阶、4 阶和 6 阶极频电磁力谐波成分。根据磁场调制原理^[20]对电机极频电磁力谐波的产生进行分析, 以 2 阶电磁力为例, 可以得出形成电机 2 阶电磁力谐波的力波分量需要满足:

$$n_1 + n_2 = 2 \quad (8)$$

本文主要关注气隙磁密谐波幅值较高的谐波之间的相互作用, 如 1、3、5 次谐波。当基波磁场单独作用、基波磁场与 3 次谐波磁场相互作用、3 次谐波磁场与 5 次谐波磁场相互作用时, 可以产生 2 阶极频电磁力谐波。可以看出, 电机的极频电磁力主要由这些幅值较大的谐波相互作用产生。此外, 电机的基波磁场与其能量转换密切相关。因此, 降低电机极频电磁力谐波可能会影响电机的转矩性能。

单个齿的积分区域如图2所示。由于电磁力密度作用于电机的齿部, 因此需要对电机齿部的电磁力进行分析。通过对电磁力密度进行周向积分, 可以计算出作用在第 i 个齿部上的电磁力^[21]为

$$F_{r,i} = \int_{-\frac{1}{2}\theta_i + \frac{2\pi}{Z}}^{\frac{1}{2}\theta_i + \frac{2\pi}{Z}} f_r R_s L_{ef} d\theta \quad (9)$$

式中: θ_i 为定子齿宽; L_{ef} 为电机铁心长度; R_s 表示定子内径。

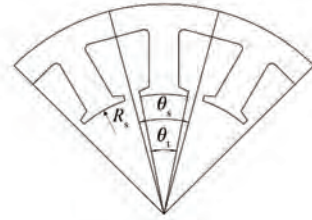


图2 单个齿积分区域

Fig. 2 The integral area of one tooth

2.3 径向电磁力仿真分析

空载工况电机一对极下的气隙磁密曲线如图3所示。从图中可以看出, 电机气隙磁密的过零点位于磁极之间, 该处的磁密幅值在 0 与平顶位置 (0.56 T) 之间波动。同时可以看到在 $90^\circ \sim 120^\circ$ 和 $240^\circ \sim 270^\circ$ 之间, 由于电机定子开槽的原因, 磁密存在一定波动, 但波动范围较小。

电机在空载状态下, 相邻磁极的径向电磁力密度曲线如图4所示。从图中可以看出, 在相邻磁极之间的区域, 电磁力密度表现出最大的波动振幅, 并且与磁通密度的零交叉区域相对应。

电机在空载状态下, 一个齿上受到的电磁力及快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 结果如图5所示。从图中可以看出, 电机受到的电磁力谐波主要有 $2f$ 、 $4f$ 、 $6f$, 其中 $2f$ 电磁力谐波

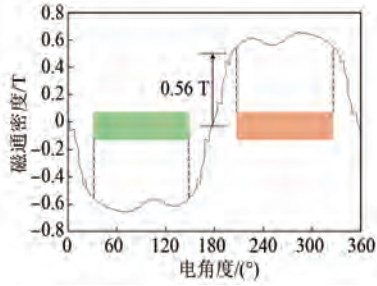


图 3 气隙磁通密度

Fig. 3 Air-gap magnetic flux density

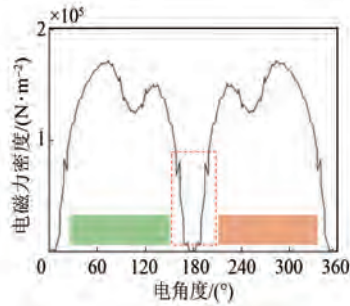


图 4 径向电磁力密度

Fig. 4 Radial electromagnetic force density

幅值占比最大。电机磁极之间存在磁通密度过零点的区域,因而该处的电磁力密度波动较大,从而引起电机的极频电磁力和极频振动。而一个变化的电磁力作用在电机的定子齿部,导致电机的定子发生振动。因此,减小电机磁极之间磁密过零点引起的径向电磁力密度波动可以有效的削弱极频振动。

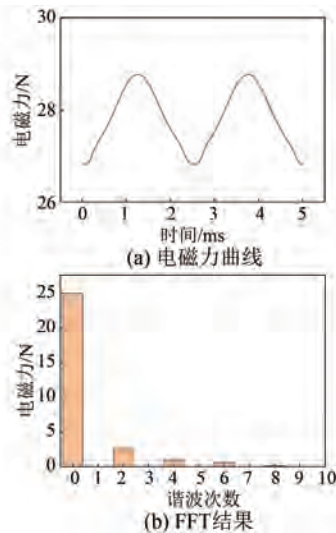


图 5 电磁力曲线及 FFT 结果

Fig. 5 Electromagnetic force curve and FFT results

3 优化磁极结构削弱极频电磁力原理

3.1 轴线方向不等宽度磁极结构

图 6 为轴线方向不等宽度磁极结构的 3D 结构。该结构特点如下:

(1) 磁极在电机的轴线方向分为三个部分,这种三段磁极结构使得电机磁通密度过零点的区域在轴线方向上发生偏移;

(2) 同一轴线上的三个磁极极性相同,磁极的中心线存在偏移,且磁极宽度不同;

(3) 沿着圆周方向,转子表面上的每个磁极段都具有相等的极弧系数,且它们极性相反。



图 6 轴线方向不等宽度磁极 3D 结构

Fig. 6 The 3D structure of axially unequal width magnetic poles

3.2 优化磁极结构对极频电磁力谐波的削弱

轴线方向不等宽度磁极结构的定子齿部径向电磁力计算模型如图 7 所示。由于磁极分三段,所以电机定子齿部分别受到段一、段二和段三各自作用的电磁力。因此,电机定子齿部受到的合力为三段共同作用下的合成电磁力,该电磁力在轴线方向发生偏移。

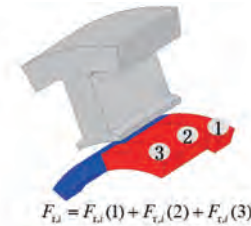


图 7 新磁极结构齿部电磁力模型

Fig. 7 Teeth electromagnetic force model of new magnetic pole structure

忽略麦克斯韦张量的切向分量和磁致伸缩效应时,根据麦克斯韦应力方程,优化结构定子齿部受到的电磁力密度解析模型^[22]为

$$f_r \approx \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2\mu_0} B_r^2(1) + \frac{1}{2\mu_0} B_r^2(2) + \frac{1}{2\mu_0} B_r^2(3) \right] =$$

$$\frac{1}{2}[f_r(1) + f_r(2) + f_r(3)] \quad (10)$$

作用在第 i 个齿上的电磁力由式(9)变为

$$F_{r,i} = \int_{-\frac{1}{2}\theta_i + \frac{2\pi}{Z}}^{\frac{1}{2}\theta_i + \frac{2\pi}{Z}} f_r(1) R_s \frac{L_{ef}}{3} d\theta + \int_{-\frac{1}{2}\theta_i + \frac{2\pi}{Z}}^{\frac{1}{2}\theta_i + \frac{2\pi}{Z}} f_r(2) R_s \frac{L_{ef}}{3} d\theta + \int_{-\frac{1}{2}\theta_i + \frac{2\pi}{Z}}^{\frac{1}{2}\theta_i + \frac{2\pi}{Z}} f_r(3) R_s \frac{L_{ef}}{3} d\theta = F_{r,i}(1) + F_{r,i}(2) + F_{r,i}(3) \quad (11)$$

式中: $f_r(1)$ 、 $F_{r,i}(1)$ 为第 i 个齿在段一作用下受到的电磁力密度和电磁力; $f_r(2)$ 、 $F_{r,i}(2)$ 为第 i 个齿在段二作用下受到的电磁力密度和电磁力; $f_r(3)$ 、 $F_{r,i}(3)$ 为第 i 个齿在段三作用下受到的电磁力密度和电磁力。

通过对比原磁极与优化磁极结构和解析式,可以看出:

(1) 与原磁极结构相比,优化磁极在轴线方向上交叉分布,轴线方向上磁场的过零区域发生偏移;

(2) 优化磁极结构的电机在定子齿部上受到轴线方向上三段磁极共同作用的电磁力合力,如图 7 所示,该合力在轴线方向上发生偏移;

(3) 由于磁场的过零区域发生了位移,优化后的轴线方向不等宽度磁极结构的不同部分(段一、段二和段三)所产生的电磁力波谷位置不同。当这些作用叠加时,总合力的波谷会被填充,从而减小了电磁力的最大波动幅值,降低了电机齿部所受电磁力的大小。

电机在空载条件下优化磁极结构气隙磁密分布如图 8 所示。从图中可以看出,段一、段二和段三的气隙磁密在过零区域存在一定的位置偏移,因此当三段磁极共同作用时,优化磁极结构的气隙磁密在电机轴线方向上的过零区域会发生明显的偏移。这种偏移会减小电机磁场过零区域面积,填充电磁力密度波谷,减小了电磁力在峰值和最小值之间的波动,使电机在电磁力密度波谷区域的峰峰值减小。从而导致电机在该区域所受到电磁力波动引起的齿部振动减小,进而削弱了电机的极频振动,达到减小电机振动的目的。

电机在空载状态下,优化磁极结构在三段磁极共同作用时一对极下的电磁力密度曲线及其 FFT 结果如图 9 和图 10 所示。从图 9 可以看出,与原磁极结构相比,由于优化磁极结构的气隙磁

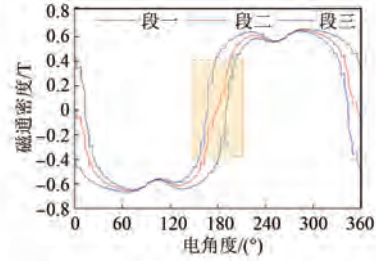


图 8 三段磁极分别作用下的气隙磁通密度曲线

Fig. 8 The air-gap magnetic flux density curves under the combined action of three magnetic poles

密在过零区域发生偏移,电磁力密度在波谷处的最小值明显增大。从图 10 可以看出,优化磁极结构的电机径向电磁力密度的各倍频谱波幅值也得到了明显的削弱。

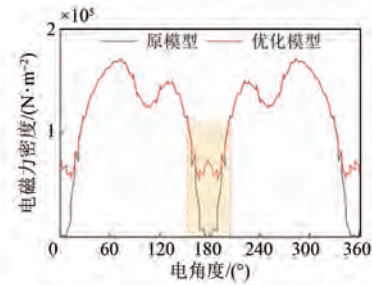


图 9 三段磁极共同作用下的电磁力密度曲线

Fig. 9 The Electromagnetic force density curves under the combined action of three magnetic poles

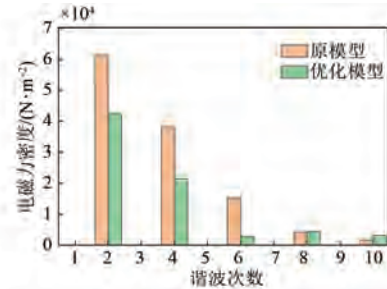


图 10 三段磁极共同作用下电磁力密度曲线 FFT 结果
Fig. 10 The FFT results of electromagnetic force density curves under the combined action of three magnetic poles

在空载条件下,采用优化磁极结构后,电机一个齿受到的电磁力波形及其 FFT 结果如图 11 所示。从图 11(a)可以看出,与原始磁极结构相比,电机齿部受到的电磁力曲线的峰峰值明显降低。从图 11(b)可以观察到,采用优化模型后,2 倍频电磁力相较于原模型减少了 35.43%,4 倍频电磁力降低了 39.41%,6 倍频和 8 倍频的电磁力也有显著降低。

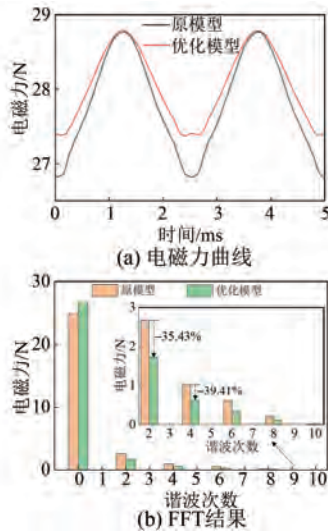


图 11 优化模型与原模型齿部电磁力对比

Fig. 11 The comparison of electromagnetic forces of the teeth between optimized model and original model

3.3 优化模型与原模型电磁性能对比

由于电机定子的齿部存在杠杆效应,会导致电机齿部切向力波振动的形态与径向力波相似。在这种情况下,齿部切向电磁力对电机振动的影响可以与径向力波相媲美。因此,齿部切向电磁力也成为电机中重要的激励源^[23],对优化模型齿部切向电磁力进行分析是有必要的。

电机的局部切向电磁力作用在单个定子齿上,会在该齿部产生切向力矩。电机单个齿所受切向力矩的波形及其 FFT 分析结果如图 12 所示。从图 12 可以看出,在优化模型下,单个齿受到的切向力矩峰峰值显著减小,从 66.5 mN·m 减少至 55.6 mN·m,相较于原模型减小了约 17%。因此,优化模型在减弱电机局部切向力方面也表现出良好效果。

为了验证优化结构是否可以有效的保证电机的转矩密度,对优化前后电机的输出转矩进行分析。优化磁极结构与原磁极结构在保持定子绕组和电流相同的输出转矩曲线如图 13 所示,原磁极和优化磁极结构的输出转矩平均值对比如表 3 所示。

由图 13 和表 3 可以看出,当电机在额定工况条件下,原磁极结构与优化磁极结构的平均输出转矩分别为 149.95 mN·m 与 148.96 mN·m,优化磁极结构平均转矩相较于原磁极结构下降了 0.6%,基本保持不变。因此,优化磁极结构可以

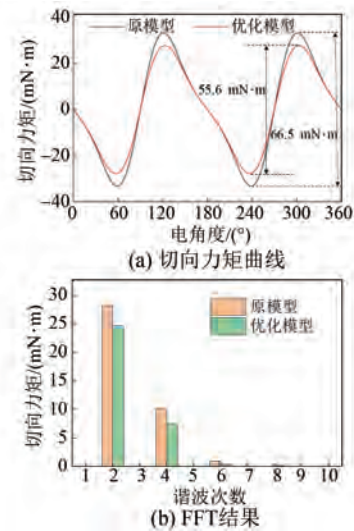


图 12 齿部切向力矩及其 FFT 结果

Fig. 12 Teeth tangential moment of teeth and its FFT results

有效保证电机的输出转矩。

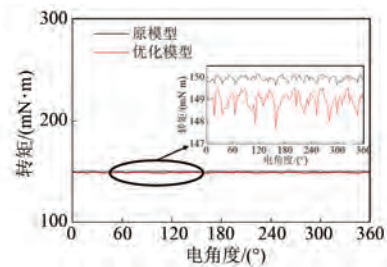


图 13 电磁转矩曲线

Fig. 13 The curves of electromagnetic torque

表 3 原磁极与优化磁极结构电磁转矩对比

Tab. 3 The comparison of electromagnetic torque between original magnetic pole structure and optimized magnetic pole structure

参数名称	原磁极	优化磁极
电磁转矩/(mN·m)	149.95	148.96
变化程度/%	—	-0.6

4 电机振动分析

4.1 模态分析

当电机径向电磁力的谐波阶数和频率与电机定子的固有频率接近或相近时,会导致定子侧发生共振现象。这种情况会加剧电机的振动,产生明显的振动噪声^[24]。因此,对电机的模态进行分析对于理解其电磁振动特性至关重要。

电机转子的旋转运动在电机系统中充当一种激励源,转子的旋转运动与电机的端盖和机壳相互作用时会引入或影响一些较低阶的模态。然

而,就定子的周向模态而言,通常可以忽略电机转子的影响。对于常见转速运行的电机,转子旋转产生的激励频率相对电机本身的模态而言较低,对电机振动的影响不大。因此,本文电机转子不参与几何建模。样机定子结构 3D 有限元模型如图 14 所示,电机定子模态的二阶、三阶和四阶振型如图 15 所示,电机模态振型固有频率如表 4 所示。



图 14 样机定子结构 3D 模型

Fig. 14 The 3D model of stator structure of the prototype



图 15 定子模态振型

Fig. 15 The modal shapes of the stator

表 4 电机固有频率表

Tab. 4 The table of motor natural frequency Hz			
阶次	2 阶	3 阶	4 阶
频率	3 023.4	8 631.7	14 731

由图 15 和表 4 可以得知,当电机在额定工况下运行时,电机定子各个阶次的固有频率与电磁力频率之间存在明显差异,因此电机不会发生共振现象。

4.2 振动响应分析

由于在空载条件下,电机的噪声响应能够表现出电机噪声的趋势和特征,因此对空载条件下的电机进行振动分析。电机优化前后在 $2f$ 、 $4f$ 、 $6f$ 等关键频率点下的振动加速度幅值对比如图 16 所示。从图 16 中可以看出,与原模型相比,采用优化模型的电机在 $2f$ 、 $4f$ 、 $6f$ 处的振动加速度幅值都有了明显的降低,分别降低了 18.08%、10.02%、45.3%,与电磁力谐波分析的结果一致。

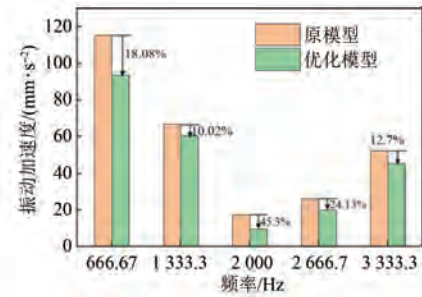


图 16 电机空载条件下 2 倍频处振动加速度对比

Fig. 16 The comparison of vibration acceleration at 2rd the frequency under no-load conditions of motor

5 结语

本文针对表贴式永磁同步电机的极频振动问题,提出了一种轴线方向不等宽度交叉磁极结构,并对优化前后的样机进行了电磁性能和振动分析。研究结果显示,通过优化磁极结构,在保持电机转矩密度的前提下,有效地减弱了电机的极频振动,验证了方案的有效性,得出以下结论:

(1) 电机相邻两个磁极之间存在磁场过零点的交替区域,这一区域的电磁力密度会出现明显的波动,从而导致电机齿部受到的电磁力在峰值和最小值之间波动,进而引起电机的极频振动。

(2) 优化磁极结构通过使轴线方向上电机磁场过零区域发生偏移,从而减小电机磁场过零区域面积,填充电磁力密度波谷,减小了电磁力在峰值和最小值之间的波动,进而削弱了电机的极频振动。同时,该磁极结构有效的保证了电机的转矩密度。

参考文献

- [1] CHASIOTIS I D, KARNAVAS Y L. A generic multi-criteria design approach toward high power density and fault tolerant low-speed PMSM for pod application [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(2): 356-370.
- [2] 夏加宽, 康乐, 詹宇声, 等. 表贴式三相永磁同步电机极槽径向力波补偿模型及参数辨识 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1596-1606.
- XIA J K, KANG L, ZHAN Y S, et al. The model of pole slot radial force wave compensation for surface-mounted three-phase permanent magnet synchronous motor and parameter identification [J]. Transactions

- of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1596-1606.
- [3] 李泽星, 夏加宽, 刘铁法, 等. 基于分段交错不等磁极的表贴式永磁电机极频振动的削弱 [J]. 电工技术学报, 2023, 38(4): 945-956.
- LI Z X, XIA J K, LIU T F, et al. Reduction of pole-frequency vibration of surface-mounted permanent magnet synchronous machines with piecewise stagger unequal poles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 945-956.
- [4] KIM J H, PARK S H, RYU J Y, et al. Comparative study of vibration on 10-pole 12-slot and 14-pole 12-slot PMSM considering tooth modulation effect [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023: 4007-4017.
- [5] 王晓远, 贺晓钰, 高鹏. 电动汽车用 V 型磁钢转子永磁电机的电磁振动噪声削弱方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4919-4926+4994.
- WANG X Y, HE X Y, GAO P. Research on electromagnetic vibration and noise reduction method of V type magnet rotor permanent magnet motor electric vehicles [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4919-4926+4994.
- [6] 安忠良, 于浩泽. 轮毂电机振动噪声抑制措施 [J]. 电机与控制应用, 2022, 49(3): 103-108.
- AN Z L, YU H Z. Vibration and noise suppression measures for in-wheel motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(3): 103-108.
- [7] 陈益广, 韩柏然, 沈勇环, 等. 永磁同步推进电机电磁振动分析 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 16-22.
- CHEN Y G, HAN B R, SHEN Y H, et al. Electromagnetic vibration analysis of permanent magnet synchronous propulsion motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 16-22.
- [8] 李晓华, 黄苏融, 李良梓. 电动汽车用永磁同步电机振动噪声的计算与分析 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17(8): 37-42.
- LI X H, HUANG S R, LI L Z. Calculation and analysis of vehicle vibration and noise of permanent magnet synchronous motor applied in electric vehicle [J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(8): 37-42.
- [9] 谢颖, 李飞, 黎志伟, 等. 内置永磁同步电机减振设计与研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5437-5445+5543.
- XIE Y, LI F, LI Z W, et al. Optimized design and research of vibration reduction with an interior permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5437-5445+5543.
- [10] 李岩, 李双鹏, 周吉威, 等. 基于定子齿削角的近极槽永磁同步电机振动噪声削弱方法 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 45-52.
- LI Y, LI S P, ZHOU J W, et al. Weakening approach of the vibration and noise based on the stator tooth chamfering in PMSM with similar number of poles and slots [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 45-52.
- [11] WANG X Y, SUN X B, GAO P. A study on the effects of rotor step skewing on the vibration and noise of a PMSM for electric vehicles [J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(1): 131-138.
- [12] HONG J F, WANG S M, SUN Y G, et al. An effective method with copper ring for vibration reduction in permanent magnet brush DC motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 1-5.
- [13] WANG S M, HONG J F, SUN Y G, et al. Effect comparison of zigzag skew PM pole and straight skew slot for vibration mitigation of PM brush DC motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 4752-4761.
- [14] BAYLESS J, KURIHARA N, SUGIMOTO H, et al. Acoustic noise reduction of switched reluctance motor with reduced RMS current and enhanced efficiency [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(2): 627-636.
- [15] 李晓华, 刘成健, 梅柏杉, 等. 电动汽车 IPMSM 宽范围调速振动噪声源分析 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5219-5227+5319.
- LI X H, LIU C J, MEI B S, et al. Vibration and noise sources analysis of IPMSM for electric vehicles in a wide-speed range [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5219-5227+5319.
- [16] WANG Z F, TIAN W, ZHAO W X. Magnet slotting design to reduce high order electromagnetic force and vibration of permanent magnet motor [J]. Energies, 2022, 15(22): 8684.
- [17] WU Z C, FAN Y, LEE C H T, et al. Vibration

- optimization of FSCW-IPM motor based on iron-core modification for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69 (12): 14834-14845.
- [18] FANG H Y, LI D W, QU R H, et al. Modulation effect of slotted structure on vibration response in electrical machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 2998-3007.
- [19] LEE C M, SEOL H S, LEE J Y, et al. Optimization of vibration and noise characteristics of skewed permanent brushless direct current motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53 (11): 8210605.
- [20] 程明,文宏辉,曾煜,等. 电机气隙磁场调制行为及其转矩分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 921-930.
- CHENG M, WEN H H, ZENG Y, et al. Analysis of airgap field modulation behavior and torque component in electric machines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 921-930.
- [21] LAN H, ZOU J B, XU Y X, et al. Effect of local tangential force on vibration performance in fractional-slot concentrated winding permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(2): 1082-1093.
- [22] 李泽星,夏加宽,刘铁法,等. 基于分段交错梯形磁极的分数槽集中绕组永磁电机局部切向力的削弱[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1447-1459+1485.
- LI Z X, XIA J K, LIU T F, et al. Reduction of local tangential force of fractional-slot concentrated winding permanent magnet synchronous machines with piecewise stagger trapezoidal poles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38 (6): 1447-1459+1485.
- [23] LIU M C, ZOU J B, XU Y X, et al. Vibration enhancement or weakening effect caused by permanent magnet synchronous motor radial and tangential force formed by tooth harmonics [J]. Energies, 2022, 15(3): 744.
- [24] 谢颖,辛尉,蔡蔚,等. 内置式永磁同步电机不同转子拓扑结构的电磁性能及电磁振动噪声分析[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(1): 110-119.
- XIE Y, XIN W, CAI W, et al. Electromagnetic performance and electromagnetic vibration noise analysis of different rotor topologies of interior permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(1): 110-119.

收稿日期:2024-02-29

收到修改稿日期:2024-03-22

作者简介:

武 彤(2000-),男,硕士研究生,研究方向为永磁电机振动噪声分析及抑制,895178377@qq.com;

* 通信作者:武 彤(2000-),男,硕士研究生,研究方向为永磁电机振动噪声分析及抑制,895178377@qq.com。

Reduction of Pole Frequency Vibration in Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Axially Unequal Width Pole Structure

WU Tong^{*}, XIA Jiakuan, ZHU Qisheng

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Key words: surface-mounted permanent magnet synchronous motor; weaken pole-frequency vibration; axially unequal width pole structure; finite element model

Permanent magnet synchronous motor (PMSM) is extensively employed in underwater vehicles and ship propulsion systems due to its simplicity, high power density, and efficiency advantages. However, the increasing demand for stealth in underwater propulsion equipment, coupled with the inherent low-frequency vibration noise generated by PMSMs during operation, which poses challenges. Among these challenges, pole frequency vibration of the motor stands out as particularly significant in the low-frequency domain. Consequently, mitigating the pole frequency vibration of the motor becomes essential.

A method to weaken the pole frequency vibration of the motor by introducing an axially unequal width pole structure is proposed in the paper. In this structure, the magnetic poles are distributed axially, and the zero-crossing region of the magnetic field is offset in the axial direction. This offset reduces the area of the magnetic field zero-crossing region, fills the valleys of the electromagnetic force density, and decreases the fluctuation of the electromagnetic force between its peaks and valleys. Consequently, the peak-to-peak value of the electromagnetic force in the region of the electromagnetic force density valley decreases, leading to a reduction in tooth vibration caused by the fluctuation of electromagnetic force in this region. Thus, the pole frequency vibration of the motor is weakened, achieving the goal of reducing motor vibration.

To validate the effectiveness of the proposed magnetic pole structure, a comparative analysis is

conducted based on the finite element model of the motor. This analysis compared the radial electromagnetic force and other major electromagnetic performance parameters between the motor with new magnetic pole structure and the one without it.

Through calculations and comparisons, it is evident that the peak-to-peak fluctuation of the radial electromagnetic force density in the motor with the new magnetic pole structure is significantly reduced. Compared to the original motor, the radial electromagnetic force at the second harmonic and fourth harmonic is reduced by 35.43% and 39.41%, respectively. Moreover, there is a noticeable reduction in vibration acceleration at key frequency points in the motor with the new magnetic pole structure. Specifically, compared to the original motor, the vibration acceleration amplitudes at the second harmonic, fourth harmonic, and sixth harmonic frequencies are reduced by 18.08%, 10.02% and 45.3%, respectively. The electromagnetic torque of the motor remains essentially unchanged compared to the original motor.

The comparative finite element analysis between the motor with the new magnetic pole structure and the original motor demonstrates that adopting an axially unequal width pole structure effectively reduces the radial electromagnetic force density and pole-frequency vibration of the motor. At the same time, also effectively ensured the electromagnetic torque of the motor, confirmed the effectiveness of the new magnetic pole structure.