

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

贾梦凡,于冰,唐小春,张殿海.
基于转子辅助槽的PMSM电磁振动噪声削弱方法研究.
电机与控制应用,2022,49(3):68.



SEARI
上電科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



科技改变未来
智慧创造价值

· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号 手机: 18918357509 电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904 邮箱: wangcj@seari.com.cn

基于转子辅助槽的 PMSM 电磁振动噪声削弱方法研究

贾梦凡^{1,2}, 于冰^{1,2}, 唐小春^{1,2}, 张殿海³

(1. 浙江中车尚驰电气有限公司, 浙江 海宁 314400;

2. 湖南省新能源汽车电机工程技术研究中心, 湖南 株洲 412001;

3. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 电机气隙中的径向电磁力作用于定子齿部, 通过定子、机座传递到空气中, 产生了振动噪声。针对实际工程中噪声突出问题, 解析径向电磁力得到产生振动噪声的主要阶次和频率, 分析电机的定子模态得到不同空间阶次下的频率。考虑电机转子凸极, 提出一种转子开辅助槽配合增加气隙宽度的方法改善电机的声振特性。通过搭建优化前后的电机有限元模型, 在加速工况下对比 $6f_1$ 和 $12f_1$ 频率(f_1 为基波频率)的电磁力, 以及 24 阶次和 48 阶次下的 A 计权声压级, 验证所提方法的有效性。最后在实际样机上测试加速工况下 24 阶次和 48 阶次的振动水平和声压级。试验结果表明, 所提转子开辅助槽配合改变气隙宽度的方法能够有效降低电机整体的振动噪声。

关键词: 永磁同步电机; 电磁力; 辅助槽; 振动噪声

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)03-0068-09

doi: 10.12177/emca.2021.181

Research on Reduction Method of PMSM Electromagnetic Vibration Noise Based on Rotor Auxiliary Slots

JIA Mengfan^{1,2}, YU Bing^{1,2}, TANG Xiaochun^{1,2}, ZHANG Dianhai³

(1. Zhejiang CRRC Shangchi Electric Co., Ltd., Haining 314400, China;

2. Hunan Provincial Engineering Research Center for Electric Vehicle Motors, Zhuzhou 412001, China;

3. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The radial electromagnetic force in the air gap of the motor acts on the teeth of the stator and is transmitted to the air through the stator and the base, resulting in vibration and noise. Aiming at the prominent problem of noise in actual engineering, the main order and frequency of vibration and noise are obtained by analyzing the radial electromagnetic force. The frequencies under different spatial orders are obtained by analyzing the stator mode of the motor. Considering the salient poles of the motor rotor, a method of opening auxiliary slots in the rotor and increasing the air gap width is proposed to improve the acoustic and vibration characteristics of the motor. The effectiveness of the proposed method is verified by building the finite element model before and after optimization and comparing the electromagnetic force of frequencies $6f_1$ and $12f_1$ (f_1 is the fundamental frequency) under acceleration conditions and the A-weighted sound pressure level under the 24th order and 48th order. Finally, the vibration level and sound pressure level under the 24th order and the 48th order under accelerated conditions are tested on the actual

收稿日期: 2021-12-29; 收到修改稿日期: 2022-01-06

作者简介: 贾梦凡(1993—), 男, 硕士, 研究方向为新能源汽车电机设计、振动噪声分析。

张殿海(1984—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电工磁性材料电磁特性测量与模拟、电机和变压器电磁场数值分析与计算等。(通信作者)

prototype. Experiment results show that the proposed method of opening auxiliary slots on the rotor and changing the air gap width can effectively reduce the vibration and noise of the whole motor.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); electromagnetic force; auxiliary slots; vibration noise

0 引言

随着国民经济的快速发展,人们对驾乘舒适度的要求越来越高,电动汽车的噪声、振动、舒适感,即 NVH 性能考核指标日益严格。电动汽车的动力主要来源于电机,而电机性能的优劣直接决定了驾乘的舒适程度^[1]。永磁同步电机(PMSM)在电动汽车领域得到广泛应用,随着电机的功率密度和转矩密度不断提高,对新型转子结构要求越来越严格,然而双层磁钢结构具有高凸极比和高弱磁扩速能力,已经成为了主流结构^[2]。但是双层拓扑会使电机的转子结构复杂,电机刚度变弱,容易引起振动噪声问题。因此,如何削弱电机电磁振动噪声变得日益重要。

近年来,电机振动噪声问题受到了国内外学者的广泛关注。众所周知,电机气隙中的径向电磁力是引起电机电磁振动噪声的主要原因^[3],对电机的径向电磁力详细分析发现低阶次谐波的影响比高阶次更大^[4]。削弱径向电磁力可以通过改变定转子的拓扑结构、增加气隙大小、不同极槽配合等方式来实现^[5-7]。齿槽转矩作为电磁振动的次要来源,对电机的空载影响较大,可以通过斜极斜槽、分数槽配合、改变极弧系数、增加辅助槽等方式削弱^[8-9]。

考虑定子。李岩等^[10]通过解析法和有限元方法分别分析了分数槽配合下定子削齿对电机振动噪声的影响。Zuo 等^[11]开展了仿真和试验分析,结果表明齿槽效应引起的电磁力对噪声影响最为显著,在对槽口宽进行优化后电磁噪声得以抑制。Torregrossa 等^[12]通过解析法分析电机的定子槽结构,避免发生共振情况。

考虑转子。国内外学者研究了转子的不同斜极分段对电磁振动噪声的影响^[13-15]。王晓远等^[16]对电机 d 轴方向开辅助槽,并对优化前后的电机进行有限元和试验分析,验证了方法的有效性。刘皖秋等^[17]提出一种电机转子外表面开辅助槽能够削弱电机的电磁噪声的方法。鲍晓华等^[18]通过解析法总结了转子辅助槽对表插式电机转矩脉动的影

响。申合彪等^[19]分析了不对称磁障对电磁振动噪声的影响。Ishikawa 等^[20]通过优化电机的转子拓扑结构,降低电机气隙中的径向电磁力,从而抑制电机的电磁振动。

综上所述,为了削弱振动噪声,在 d 轴方向开辅助槽的研究较多,而在 q 轴方向开辅助槽的文献相对较少。本文以额定功率为 60 kW 的电机为研究对象,提出一种转子 q 轴开辅助槽配合增加气隙宽度的方法来改变电机的磁导,从而降低电机的电磁力,改善声振特性。首先,分析优化前后的两台电机的电磁力理论,对结构模态和 A 计权声压级进行有限元分析。然后,通过制作样机,对比优化前后的实测噪声结果,证明了仿真结果的准确性,同时证明该方法能够降低电机的电磁力,从而削弱电机的振动噪声。因此,本文提出转子 q 轴开辅助槽配合增加气隙宽度的局部优化设计方法,能够在低成本的基础上解决实际工程中振动噪声问题。

1 原方案电机测试数据分析

本文研究的电动汽车用 PMSM 的原方案电机模型如图 1 所示,其主要参数如表 1 所示。

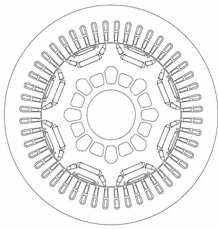


图 1 电机原模型截面图

表 1 电机基本参数

参数名称	参数值
直流母线电压/V	350
控制器最大电流/A	500
额定/峰值转速/($r \cdot \min^{-1}$)	4 000/12 000
额定/峰值功率/kW	60/130
额定/峰值转矩/($N \cdot m$)	140/320
定子外径/mm	220
气隙长度/mm	0.7

采用上述方案制作的一台电机进行测试,测试现场图如图2所示。电机在上部(z 轴方向)布置一个传声器,后端旋变盖板处布置一个传声器。振动加速度传感器布置在电机机座上下左右四个位置。在500 A(rms)@350 V(DC)的控制器下,对原方案加速峰值工况下的最大输出能力进行分析。峰值电流为480 A(rms),最大输出328 N·m@130 kW。

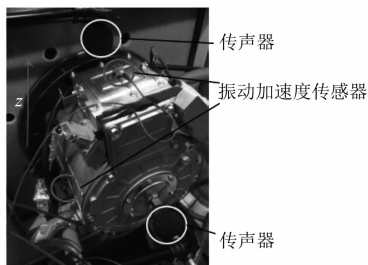


图2 样机测试

在加速峰值工况下对电机进行振动和噪声的测试,电机上部传声器采集到的A计权声压级频谱图如图3所示,电机各阶次较明显。

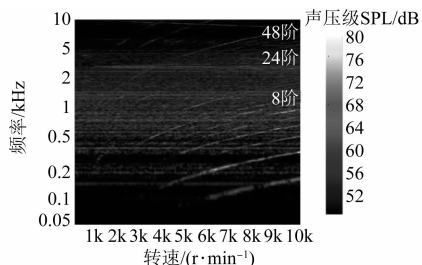


图3 原方案全转速下的A计权声压频谱图

通过图3频谱图所示,48阶次下的噪声相对较为明显,其中对48阶次的噪声声压级在不同转速下进行切片图分析,电机上部传声器采集到48阶次噪声声压级和转速的关系如图4所示。

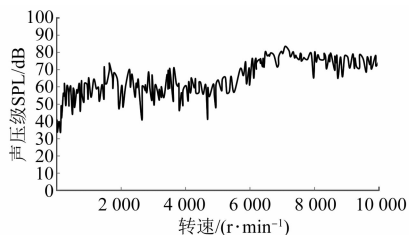


图4 不同转速下原方案48阶次噪声分析

在低速段噪声最高73 dB,噪声值超标,无法满足用车装车需要。在高速阶段无明显啸叫声,在7 000 r/min左右噪声声压级峰值点约83 dB,

人耳无明显不适。通过对图4的分析,得出原方案实测数据的主要超标噪声阶次为48阶次,对应的频率如表2所示。低速工况下,整车环境的胎噪和风噪不太明显,驾驶室的主要噪声源来自于电机,随着电机转速不断增加,胎噪和风噪明显增加,因此在高速时,电机本体产生的噪声容易被覆盖。

表2 原方案实测数据超标噪声频率对比

工况	高速	低速
转速/(r·min ⁻¹)	6 500~7 500	1 800~4 000
频率/Hz	5 200~6 000	1 440~3 200

根据对上述实测结果分析,需要对电机的声振特性进行优化设计,重点降低低速段噪声,同步降低高速段噪声。

2 电机电磁力的解析分析

电机的振动噪声主要是由电磁振动引起的,而电机内部的电磁振动主要是由气隙中电磁力作用于定子齿部所产生的,为了解决上述工程问题中遇到的48阶次噪声存在啸叫声的问题,对电机的电磁力数学模型进行分析^[21]。

电机气隙中的电磁力是由电机气隙磁密的径向和切向分量产生,铁心材料的相对磁导率远大于气隙,因此与径向气隙磁密相比,切向磁密可以忽略不计,采用麦克斯韦应力张量法,径向电磁力可表示为

$$p_r(\theta, t) = \frac{b_r^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中: $p_r(\theta, t)$ 为径向电磁应力; $b_r(\theta, t)$ 为气隙磁密; θ 为转子机械角度; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。

不考虑电机饱和的情况,气隙磁密可表示为磁动势 $f(\theta, t)$ 与磁导 $\Lambda(\theta, t)$ 的乘积,即

$$b_r(\theta, t) = f(\theta, t)\Lambda(\theta, t) \quad (2)$$

电机气隙磁动势则由永磁体绕组共同产生:

$$f(\theta, t) = f_{PM}(\theta, t) + f_{AM}(\theta, t) \quad (3)$$

永磁体产生的转子磁动势如下所示:

$$f_{PM}(\theta, t) = \sum_{\mu} F_{\mu} \cos\left(\mu \frac{\omega}{p} t - v\theta\right) \quad (4)$$

式中: F_{μ} 为磁动势的 μ 次谐波幅值; μ 为磁动势谐波次数, $\mu = (2s+1)$, $s = 0, 1, 2, \dots$; p 为极对数。

定子绕组产生的定子磁动势如下所示:

$$f_{AM}(\theta, t) = F_v \cos(v\theta - \omega t - \varphi_v) \tag{5}$$

式中： F_v 为磁动势的 v 次谐波幅值； φ_v 为 v 次谐波初相角； v 为定子磁势谐波极对数，本文为整数槽绕组 $v = (6k + 1)p, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。

将式(2)~式(5)代入式(1)，可以得到电磁力的空间力波阶次和时间频率。

当空间阶次为 $(u - v)$ ，时间阶次 $f = 2sf_1$ 。 f_1 为基波频率。

当空间阶次为 $(u + v)$ ，时间阶次 $f = 2(s + 1)f_1$ 。

由于空间阶数对定子铁心的变形 Δd 取决于空间阶数 r ，两者的关系如下所示：

$$\Delta d \propto \frac{1}{r^4} \tag{6}$$

低周向振型数 r (即空间阶数) 对于振动噪声行为最关键。如式(6)所示，空间阶数和定子铁心的变形成反比，因此当 $r \geq 8$ 时，定子铁心的变形较小，其产生的径向力密度不太重要。如表 3 所示，通过列力表法分析 8 极 48 槽的主要空间阶数和时间谐波频率，表 3 中仅列出空间阶数 ≤ 8 ，可能出现振动噪声的阶次。

表 3 径向电磁力空间阶次和频率

		k	0	-1	+1	-2	+2
s	v						
	μ	4	-20	28	-44	52	
0	4	0/0					
1	12	8/2 f_1	-8/4 f_1				
2	20		0/6 f_1	-8/4 f_1			
3	28		8/8 f_1	0/6 f_1			
4	36			8/8 f_1	-8/10 f_1		
5	44				0/12 f_1	-8/10 f_1	
6	52				8/14 f_1	0/12 f_1	

其中，主极磁场 u 次谐波与一阶磁导齿谐波相互作用是引起同步电机振动噪音的主要根源。齿谐波的极对数为

$$v_i = p \pm iZ_1 \tag{7}$$

式中： i 为齿谐波次数， $i = 1, 2, 3, \dots$ 。

当 $i = 1$ 时，代入式(7)可以得出一阶齿谐波的极对数为 52 和 -44。电机在空载和负载时的电磁噪音主要成分是由一阶齿谐波 $v = 52$ 或 $v = -44$ 和主极磁场极对数 u 与定子槽数 $Z_1 = 48$ 最

接近的谐波 $\mu = 44, 52$ ($Z_1 = \mu$ 时为 3 个， $Z_1 \neq \mu$ 时为 2 个) 相互作用所产生的 0 阶 $12f_1$ ，-8 阶 $10f_1$ ，8 阶 $14f_1$ ，0 阶 $12f_1$ 。

本文的极对数 $p = 4$ ，通过上述电磁力的理论分析，空间 0 阶的主要电磁力频率为 $12f_1, 6f_1$ ，分别对应 48 阶次和 24 阶次噪声，是噪声的主要来源阶次。第 1 节中的原方案电机的实测噪声在 48 阶次出现峰值点，满足上述理论分析的 $12f_1$ (48 阶) 易出现噪声情况。通过上述理论分析，能够解释在工程问题中的实测结果的有效性。

3 电机的模态分析

对一个电机结构施加一个初始激励后，会产生多种振型，而这些只与结构本身相关的振型称为固有振型。每一个固有振型均对应一个固有频率，空间 r 阶的固有频率和电磁力的振型、频率一致时候，将会发生共振，对于电动汽车而言，共振存在很大的隐患。李晓华等^[22] 通过对定子结构系统的固有频率分析，发现在定子铁心的基础上增加绕组对电机固有频率的影响较大。为了能够更加准确地计算电机的固有频率，本文采用有限元方法对电机进行模态分析。电机气隙中的电磁力主要映射定子齿部，通过定子铁心传递，从而产生振动。在尽可能不牺牲精度的前提下，本文仅采用定子和绕组的简化模型进行计算分析。

通过有限元仿真分析能够得到不同空间阶次下，电机定子的固有频率如图 5 所示。

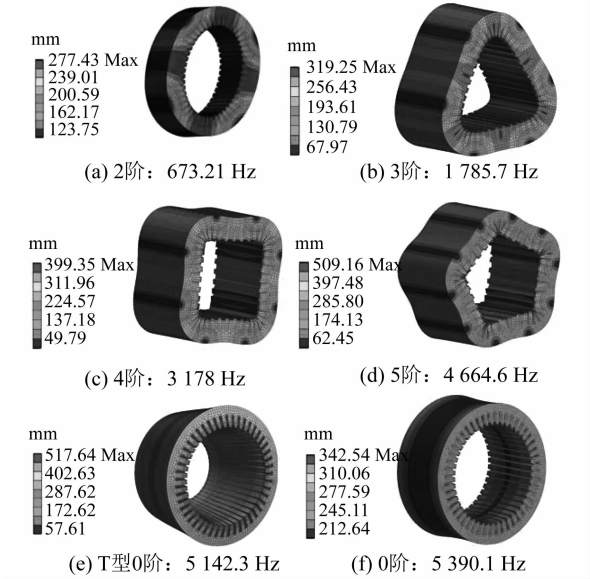


图 5 电机定子模态振型图

通过电机定子模态的有限元分析,可以看出不同振型下对应不同的频率,在空间 0 阶的固有频率为 5 390.1 Hz,实测值在 5 200~6 000 Hz 频率段内出现峰值点。由于本文未考虑整机数模下的模态仿真,以及在实际运行过程中的复杂性,导致仿真结果和实际可能存在一定的差异性。结合实测结果进行分析,需要重点关注空间 0 阶的固有频率 5 390.1 Hz 在 $6f_1$ 和 $12f_1$ 所产生的噪音。

根据工程中原方案暴露的问题,在低速 4 000 r/min 内,电机未弱磁,电磁力恒定,电机噪声啸叫声明显。而 6 500~7 500 r/min 中测试噪音有高点。因为电机的噪声响应和电磁力的幅值成正比,所以本文决定通过优化电机转子磁路,降低气隙中的气隙磁密,从而降低电磁力的幅值,削弱电机振动噪声效应。

4 电机优化方案的电磁分析

如式(2)所示,电机的气隙磁密和气隙磁势和气隙磁导相关,不考虑电机定子开槽和转子凸极情况,即气隙长度均匀,气隙磁导用常数 Λ_0 表示:

$$\Lambda_0 = \frac{\mu_0 A_\delta}{2\delta K_s K_g} \quad (8)$$

式中: A_δ 为每极气隙有效面积; δ 为等效气隙长度; K_s 为磁路饱和系数; K_g 为气隙系数。

若仅在定子开槽,相对气隙磁导可以表示为

$$\Lambda(\theta) = \Lambda_0 + \sum_{k=1,2,3}^{\infty} \Lambda_k \cos(kZ\theta) \quad (9)$$

本文研究的内置式永磁电机,需要考虑由转子凸极引起的气隙磁导变化,转子凸极引起的气隙磁导如下所示:

$$\Lambda(\theta, t) = \Lambda_0 + \sum_{l=1,2,3}^{\infty} \Lambda_l \cos(2l\omega - 2mp\theta) \quad (10)$$

如式(8)~式(10)所示,气隙增加会使气隙磁导降低,从而降低气隙磁密和径向电磁力。但是,气隙长度增加会使电机的输出能力降低,而转子开槽会影响转子凸极性,降低电机的电磁力,削弱电机的振动噪声。由于本文原方案实测在低速情况下电机振动噪声整体比较高,因此,适当增加气隙长度配合转子开槽改变电机的凸极性,从而改善振动噪声效应,同时能够在逆变器限制电流下,保证电机具有相同的输出能力。

原方案转子拓扑已经在 d 轴方向开槽,如果继续在 d 轴方向开槽,会增加拓扑的复杂程度,导致应力集中,使磁阻增加。因此本文选择在 q 轴方向开槽,通过优化辅助槽的形状、位置,合理改变磁路的走向,从而降低气隙磁导 $\Lambda(\theta, t)$,由式(2)可知,此方法能够降低电机的气隙磁密,从而能够降低电机的径向电磁力密度,改善电机的振动噪声。通过在原方案转拓扑基础上进行优化设计,以及气隙长度和 q 轴方向隔磁孔位置的优化分析,以电机输出能力最高和电磁力最低为优化目标,寻求最优参数结果。优化后的电机结构如图 6 所示,比原方案气隙长度增加 0.1 mm,其中在 q 轴方向增加厚度 0.7 mm 的辅助槽为最优。图 6 中,阴影部分为增加的 q 轴辅助槽位置。

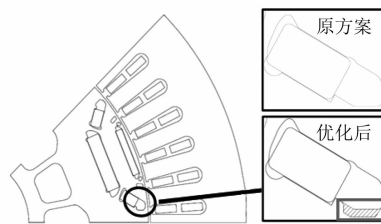


图6 优化后和原方案电机方案对比示意图

为了能够更加清晰地对比由转子开辅助槽配合增加气隙长度使电机磁路发生的变化。原方案和优化后方案的在空载工况下的电机磁力线分布如图 7 所示。如图 7(b) 优化后方案所示,由于在转子的 q 轴区域开辅助槽使得闭合磁力线路径及长度发生变化,如式(8)~式(10)所示,进而会影响

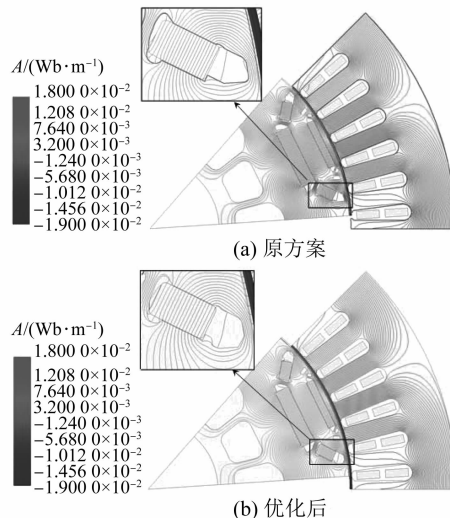


图7 原方案和优化后的空载磁力线分布

响电机的磁导,从而影响电机的电磁力。

由于电机的气隙减少和转子的开槽,可能会造成应力的集中。为了保证优化后的转子冲片高速运行的可靠性,建立 3D 转子模型,采用有限元方法对电机进行等效应力的计算。为了避免超速的影响,计算转速采用峰值转速的 1.2 倍,即 14 400 r/min。电机的转子材料为硅钢片,屈服强度为 405 MPa。计算得到的平均应力分布云图如图 8 所示,原方案的冲片强度峰值为 233.61 MPa,优化后的冲片强度峰值为 242.61 MPa 左右,均小于材料的屈服强度,能够满足在全转速要求范围内的机械强度。

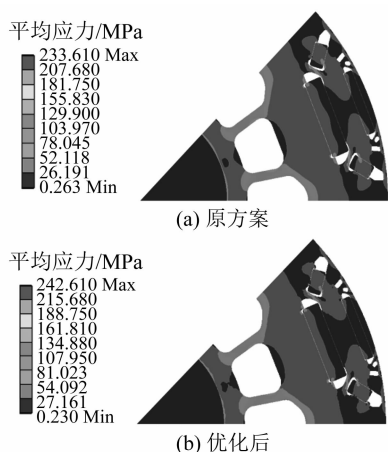


图 8 原方案和优化后平均应力分布云图

5 电机电磁力的有限元分析

建立优化前后的电机有限元模型,对优化前后的电机进行全转速仿真对比分析。如图 9 所示,在峰值 480 A(rms) 下,原方案最大输出为 328 N·m,优化后为 323.5 N·m,降低约 1.4%,相反高速弱磁区域功率略提升 1%~1.3%。总体来看,在 500 A(rms)@350 V(DC) 控制器下,优化前后输出转矩和功率都满足 320 N·m@130 kW 的需求。

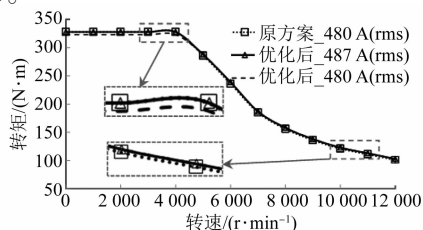


图 9 电机的最大输出能力对比分析

但是为了能够对比优化前后电机性能,对优化后同比例提高电流至 487 A(rms),从而保证和优化前的最大输出扭矩一致。因此,下文开展的电机对比均在原方案_480 A(rms)和优化后_487 A(rms)下进行。

电机在实际运行中,转速 4 000 r/min 以下,整车工况的胎噪和风噪不太明显,驾驶室内主要是电机作为噪声源传递的声音,针对 4 000 r/min 峰值工作点,本文进行原方案和优化后方案的气隙磁密仿真分析,取靠近定子齿表面的圆弧作为参考点,径向气隙磁密波形及快速傅里叶变换(FFT)如图 10 所示。

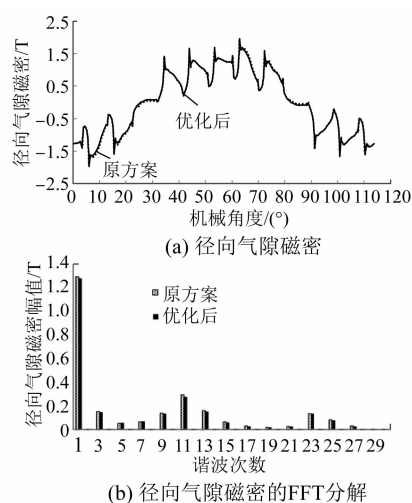


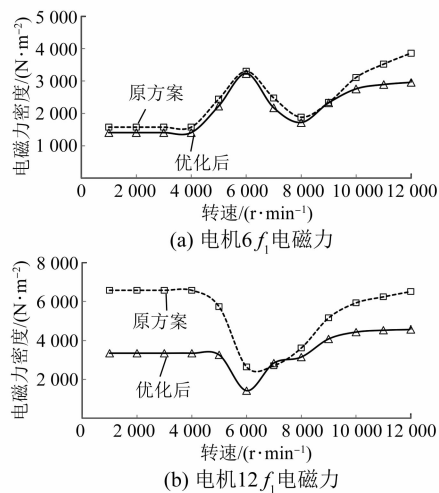
图 10 电机的径向气隙磁密和 FFT 分解

通过图 10 可以看出,电机的基波幅值几乎不变,对电机的性能影响不大,各阶次幅值均有所降低,比原方案的奇次谐波对基波占比(29 次以下)降低约 3%,优化后的电机气隙磁密波形正弦度得以改善,证明了优化方案有效。

从电磁力理论分析中可以看出,8 极 48 槽电机的主要频率为 $6f_1$, $12f_1$,因此下面主要针对优化前后电机在不同转速下的 $6f_1$, $12f_1$ 的电磁力对比分析,如图 11 所示。

如图 11(a)所示,优化前后 $6f_1$ 电磁力在整个转速范围内均稍有降低,低速降低 10.7% 左右,高速最高降低 23.3% 左右。

如图 11(b)所示,优化前后 48 阶电磁力在低速段降低明显,降低 49.2% 左右,但在 7 000 r/min 时,超原方案 5%;高速阶段最高降低 30% 左右。

图 11 电机 $6f_1$ 和 $12f_1$ 电磁力对比

通过实测和理论分析,电机在低速运行下对整车的影晌较大,需要重点降低低速电磁力,同比优化高速电磁力。通过全转速范围 $6f_1$, $12f_1$ 的电磁力分析,优化后方案能够起到削弱电机电磁力作用,满足初始目标要求,证明优化后方案有效。

6 电机的噪声仿真分析

电机定子未发生变化,定子的固有频率和上述分析一致,不再重复分析。保证电机的相同测试环境,在峰值外特性下,计算优化前后电机的全转速工况下的电磁力,然后以集中力的形式加载到定子齿部,电磁力的示意图如图 12 所示。然后利用模态叠加法计算电机谐响应,仿真结果同步导入到声场计算模块中,进行仿真分析。电机的求解域设置为半径 1 m 的半球体,重点分析电机侧面产生的噪声分布,分析球体外表面产生的声压级。这也是径向电磁力的主要传播路径。

不同转速下优化前后 24 阶次和 48 阶次的 A 计权声压级仿真结果分析如图 13 所示。



图 12 电机电磁力加载

24 阶次声功率等级如图 13(a) 所示,在电机优化后整个转速区域, A 计权声压级都有不同程度的降低,低速降低 1 dB 左右,高速降低 1.5 dB 左右。

48 阶次 A 计权声压级如图 13(b) 所示,在电机优化后整个转速区域,低速和高速降低明显,低速段约降低 2.5 dB,高速段约降低 2 dB。由于 48 阶次电磁力在约 7 000 r/min 时略有增加,使得噪声变化不明显、略有增加趋势。

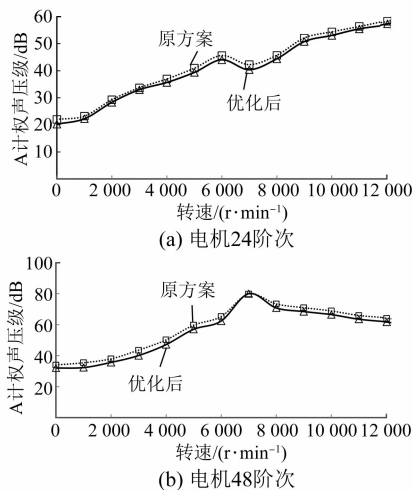


图 13 电机 24 和 48 阶次 A 计权声压级对比

从以上有限元仿真结果可以看出,优化后的电机在低速阶段电磁力和 A 计权声压级的趋势相同,均有降低的趋势,同比高速阶段也有相应的降低,能够证明减少气隙、增加辅助槽的方法的有效性。

7 电机声振特性实测对比分析

为了验证理论和仿真计算的有效性,采用优化后方案制作一台电机对标分析。为了能够区分转子冲片对性能的影响,电机的其余部件均一致。在试验条件下,为了避免电机台架固有频率的影响,采用相同的台架进行测试,振动加速传感器和传声器的布局均和图 1 相同。在相同的控制方法下,使优化前后电机具有一致的输出能力,对电机进行振动噪声的测试分析。

对峰值工况 ($320 N \cdot m @ 130 kW$) 优化后电机加速分析,上部传声筒采集的频谱图如图 14 所示,与图 3 原方案的频谱图相比,各阶次均有一定程度的降低,能够证明仿真方法的有效性。

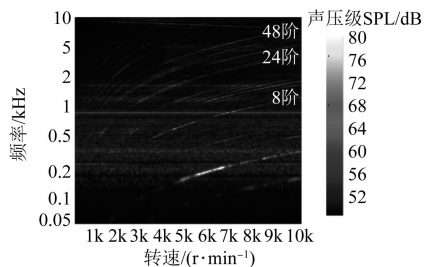


图14 优化后全转速下的A计权声压频谱图

原方案和优化后方案电机在Z轴方向的48阶振动水平如图15(a)所示,在低速1 800~2 200 r/min区域内,电机的振动水平最大降低约60%,高速区域降低了5%左右。

通过电机噪声近场的采集,在加速工况下,48阶次优化后方案噪声和原方案对比如图15(b)所示。低速阶段,优化后方案整体加速平缓很多,无明显啸叫声,整体波形无明显尖锐点,在低速1 800~4 000 r/min平均噪声声压级降低6 dB,整体降低约10%,高速情况下平均噪声声压级降低3 dB,整体降低约3.7%。

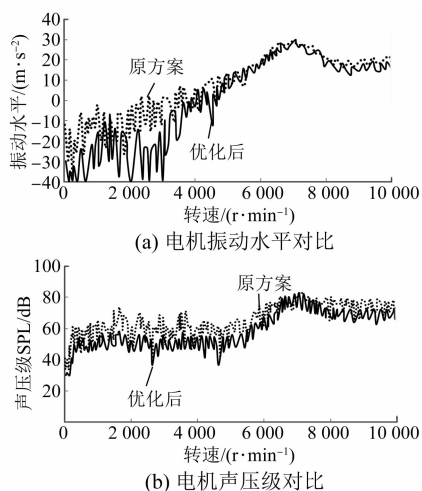


图15 电机的48阶次振动水平和声压级对比

原方案和优化后方案电机在Z轴方向的24阶振动水平如图16(a)所示,在低速区域内,电机的振动水平最大降低约58%,高速区域降低了6%左右。

原方案和优化后方案电机在Z轴采集传声器得到24阶噪声声压级对比如图16(b)所示。低速阶段,原方案24阶噪声无明显尖锐点,优化后方案,低速阶段相比原方案的声压级整体降低

约4 dB,降幅6%左右。高速降低约2 dB,降幅2.5%左右。

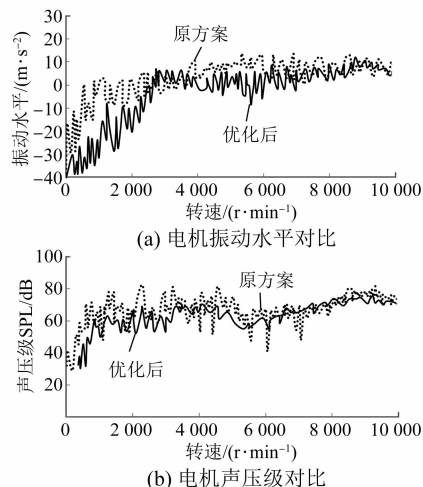


图16 电机的24阶次振动水平和声压级对比

由于仿真结构的模态和实际不尽相同,结果具有一定的差异性,但是通过48阶次和24阶次的振动水平和声压级对比分析可知,在全转速范围内的变化趋势相同;经过实测的验证,可以证明仿真结果的准确性,可以证明转子开辅助槽配合增加气隙的方法具有削弱振动噪声的作用。

8 结 语

本文以一台额定功率为60 kW的电动汽车用PMSM为研究对象,以实际工程中低速48阶次的噪声突出问题为切入点,通过对原方案实测噪声结果进行分析,同时采用解析法进行理论计算验证;然后提出一种转子开辅助槽和增加气隙的方法来削弱振动噪声。对优化前后方案在峰值工况下进行电磁力和谐响应的仿真分析计算,并通过样机试验,测试了全转速下24阶和48阶次的振动和噪声,验证了仿真计算的准确性,主要得出以下结论。

(1) 本文提出一种转子q轴方向开槽和增加气隙长度的方法降低电机在气隙中的电磁力,从而削弱振动噪声。

(2) 对负载4 000 r/min下对比优化前后的气隙磁密和FFT分析,以及对全转速下 $6f_1$ 和 $12f_1$ 的电磁力对比分析。发现优化后电机的方案能够在低速和高速区降低比例较大,在7 000 r/min变化不明显。

(3) 对全转速范围内的 A 计权声压级进行仿真分析,为证明仿真的准确性,制作优化后方案的电机,对 24 和 48 阶次进行全转速的噪音测试分析,对比声压级和振动水平,能够证明仿真准确性,即能够证明本文提出的转子开辅助槽和减少气隙的方法具有削弱振动噪声的作用。

【参考文献】

- [1] 唐小春,于冰,许时杰,等. 新能源汽车用永磁辅助同步磁阻电机噪声及续航优化研究[J]. 电机与控制应用,2020,47(1): 91.
- [2] 韩雪岩,张新刚,朱龙飞,等. 内置式多层磁钢永磁同步电机振动噪声抑制措施[J]. 电机与控制学报,2021,25(8): 67.
- [3] ISLAM M S, ISLAM R, SEBASTIAN T. Noise and vibration characteristics of permanent magnet synchronous motors using electromagnetic and structural analyses[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2014,50(5): 3214.
- [4] MIN S G, SARLIOGLU B. Modeling and investigation on electromagnetic noise in PM motors with single- and double-layer concentrated winding for EV and HEV application [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification,2018,4(1): 292.
- [5] 罗玉涛,卢若皓. 基于结构参数分级优化的电机电磁噪声抑制[J]. 电工技术学报,2021,36(14): 2957.
- [6] FU L, ZUO S, WU X. Electromagnetic vibration and noise analysis of permanent magnet synchronous motor with different slot-pole combinations[J]. IET Electric Power Applications,2016,10(9): 900.
- [7] HAN Z, LIU J, GONG C, et al. Influence mechanism on vibration and noise of PMSM for different structures of skewed stator[C]//2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS),2017.
- [8] 王凯,孙海阳,张露锋,等. 永磁同步电机转子磁极优化技术综述[J]. 中国电机工程学报,2017,37(24): 7304.
- [9] 唐旭,王秀和,田蒙蒙,等. 基于改变定子齿槽参数的异步起动永磁同步电动机齿槽转矩削弱措施研究[J]. 电工技术学报,2016,31(23): 1.
- [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.
- [11] ZUO S, LIN F, WU X. Noise analysis, calculation, and reduction of external rotor permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2015,62(10): 6204.
- [12] TORREGROSSA D, PEYRAUT F, CIRINCIONE M, et al. A new passive methodology for reducing the noise in electrical machines: impact of some parameters on the modal analysis [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2010,46(5): 1899.
- [13] 徐珂,应红亮,黄苏融,等. 转子分段斜极对永磁同步电机电磁噪声的削弱影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(11): 2248.
- [14] WANG X, SUN X, GAO P. Study on the effects of rotor-step skewing on the vibration and noise of a PMSM for electric vehicles [J]. IET Electric Power Applications,2019,14(1): 131.
- [15] BLUM J, MERWERTH J, HERZOG H G. Investigation of the segment order in step-skewed synchronous machines on noise and vibration[C]//2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC),2014.
- [16] 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.
- [17] 刘皖秋,代颖,叶飞,等. 基于转子辅助槽的车用永磁同步电机振动噪声优化[J]. 电机与控制应用,2020,47(6): 76.
- [18] 鲍晓华,吴长江,胡云鹏,等. 一种优化表插式永磁电机性能的方法[J]. 电工技术学报,2018,33(2): 238.
- [19] 申合彪,赵朝会,陆海玲,等. 不对称磁障对 IPMSM 电磁振动噪声的影响分析[J]. 电机与控制应用,2021,48(10): 71.
- [20] ISHIKAWA T, YAMADA M, KURITA N. Design of magnet arrangement in interior permanent magnet synchronous motor by response surface methodology in consideration of torque and vibration [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2011,47(5): 1290.
- [21] 兰华. 永磁同步电机的电磁力波与电磁振动研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [22] 李晓华,黄苏融,张琪. 电动汽车用永磁同步电机定子结构固有频率分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(8): 2383.