

DOI: 10.7652/xjtuxb201803015

爪极发电机转子结构对电磁力谐波 和振动噪声的影响分析

左曙光, 张耀丹, 钟鸿敏, 吴双龙
(同济大学新能源汽车工程中心, 201804, 上海)

摘要: 为了削弱爪极发电机的电磁力谐波以降低振动噪声,利用解析方法分析了爪极转子结构参数对主要电磁力谐波的影响。首先,建立了考虑转子结构参数的电磁力解析模型,并通过有限元计算验证了解析模型的准确性;其次,分析了极尖和极根宽度对引起电磁振动噪声的主要电磁力谐波的影响规律;最后,对发电机振动噪声进行了削弱。研究表明:当极尖和极根宽度的变化范围控制在 15% 以内时,对发电性能的影响较小,且选取适当的极尖和极根宽度值能够有效降低电磁力谐波幅值;对转子结构进行改进后,发电机表面的径向振动峰值下降了 20%,总声功率级(A)下降了 2.3 dB。

关键词: 爪极发电机;转子结构;电磁力;振动噪声;解析模型

中图分类号: TM341 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)03-0111-08

Influences of Rotor Structure on the Electromagnetic Force Harmonics, Vibration and Noise of Claw Pole Alternator

ZUO Shuguang, ZHANG Yaodan, ZHONG Hongmin, WU Shuanglong
(Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To reduce the electromagnetic force harmonics of the claw pole alternator for weakening vibration and noise, the influences of rotor structure on main force harmonics are analyzed using analytic method. First, an electromagnetic analytic model of claw pole alternator is established taking rotor structural parameters into account, and the accuracy of the analytic model is validated by finite element method. Then the effects of pole tip and pole root on main force harmonics inducing vibration and noise are discussed. Results indicate that, as the variation range of pole tip and pole root is within the limit of 15%, the power generating performance is hardly affected, and suitable pole tip and root values can be selected to reduce the electromagnetic force harmonics. The maximum vibration acceleration of the improved alternator is reduces by 20%, and the overall noise decreased by 2.3 dB(A).

Keywords: claw pole alternator; rotor structure; electromagnetic force; vibration and noise; analytic model

爪极发电机可靠性高、成本低廉且工作稳定性好,已广泛应用于汽车工业^[1]。不同于一般工业用凸极发电机,爪极发电机的转子磁场采用鸟嘴型磁极。这种磁极将励磁绕组产生的周向磁场转变为径

向磁场,从而切割定子绕组产生趋于正弦波形的发电电流,但同时也引起爪极发电机产生较大的噪声,尤其在中低转速时电磁噪声严重影响了汽车的舒适性^[2]。发电机的电磁噪声来源于电磁激振力^[3]。特殊的转子结构使得爪极发电机的电磁力空间分布不同于一般径向发电机,爪极结构特征影响励磁磁动势和气隙磁导,从而显著影响发电机的电磁力^[4]。因此,有必要对爪极发电机转子结构对电磁力的影响展开研究。

为了有效降低电磁噪声,发电机结构对电磁力的影响规律一直是研究的主要方向。Yang 等针对开关磁阻电机提出了一种同时考虑转子斜极和定子斜槽的方法,分析了不同倾斜角度下径向电磁力波的幅值,并据此抑制了振动噪声^[5]。Leb 等分析了定、转子槽宽对感应电机电磁力的影响,指出选择适当的定转子槽宽比可以明显降低由开槽引起的电磁力谐波幅值,从而降低电磁噪声^[6]。Jung 等通过优化永磁体形状降低了发电机主要阶次的电磁力,并有效地削弱了振动噪声^[7]。对于轴向结构一致的发电机,分析定、转子结构对电磁力谐波的影响从而指导降低电磁噪声的方法已经得到广泛应用。爪极发电机振动噪声问题凸显之后,国内外学者逐渐关注其电磁力影响因素分析,例如:杨帆等针对爪极发电机转矩波动和电磁振动问题进行了研究,提出通过爪极转子切边来改变极弧系数的方式可以减小电磁力谐波幅值,在爪极表面开辅助槽能够降低转矩波动^[8-10];Li 等通过改变爪极磁极的偏心量减小了电磁力谐波,从而降低了振动噪声^[11];鲍晓华等用铜块焊接爪极磁极以降低电磁激振力波,从而抑制了发电机振动^[12];Tan-Kim 等研究了爪极切边的角度和长度等参数灵敏度,发现爪极切边处理选择较大倾角可以明显降低发电机电磁噪声^[13]。综合以上分析可知,通过改变爪极转子结构能够降低发电机的电磁振动噪声,但是,现有的研究没有通过爪极发电机电磁力的三维分布特征来分析转子结构对电磁力谐波的影响,对于爪极发电机结构的优化设计缺乏理论指导。

针对现有研究的不足,本文构建了 12 极 36 槽电励磁爪极发电机的电磁力解析计算模型,并用有限元计算进行了验证;在解析模型中考虑了特殊爪极转子的结构参数,分析了极尖宽度和极根宽度对引起电磁噪声的主要电磁力谐波的影响规律,以期用于指导发电机电磁振动和噪声辐射的消弱。

1 汽车爪极发电机结构及样机参数

汽车爪极发电机的主要结构组成部分包括转子、定子、前后端盖、整流器、电刷、轴承、皮带轮等。发动机通过皮带轮带动转子旋转。转子结构为一对相互交叉的爪极包裹着直流励磁绕组,爪极表面形状近似梯形。爪极的作用是将励磁绕组产生的周向磁场转变为径向磁场,从而切割定子绕组产生近似正弦波形的三相交流电。

本文研究的爪极发电机样机的基本参数见表 1。

表 1 爪极发电机样机的基本参数

参数	数值
额定转速 $n/r \cdot \text{min}^{-1}$	6 000
转子极对数 p	6
转子爪极长度 H/mm	23.65
转子极尖宽度 w_1/mm	6.0
转子极根宽度 w_2/mm	26.1
转子爪极外径 r/mm	49.175
转子励磁绕组匝数 N	355
励磁电流直流分量 I/A	4
定子内径 R/mm	49.5
定子槽口宽度 b/mm	3.07
定子槽数 S	36

2 电磁力解析计算模型及验证

2.1 电磁力解析计算模型

由于爪极发电机具有独特的三维结构,使得用有限元法计算磁场耗时较长,不便于分析转子结构特征对电磁力的影响规律,因此本文通过考虑转子结构参数,构建了基于磁势和磁导的电磁力解析计算模型。

爪极转子结构沿轴向不一致的特征使得其励磁磁动势沿轴向位置变化,因此爪极结构特征主要影响励磁磁动势分布,其表面的励磁磁动势空间分布如图 1 所示。

按照图 1 中的几何关系,可以得到在轴向位置 z 处对应 N 极和 S 极的 2 个爪极宽度 w_N, w_S 为

$$\left. \begin{aligned} w_N &= \frac{z}{H}w_1 + \left(1 - \frac{z}{H}\right)w_2 \\ w_S &= \frac{z}{H}w_2 + \left(1 - \frac{z}{H}\right)w_1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: w_1 为爪极极尖宽度; w_2 为爪极极根宽度; H 为爪极长度。励磁绕组磁动势 f 是圆周电角度 ϕ

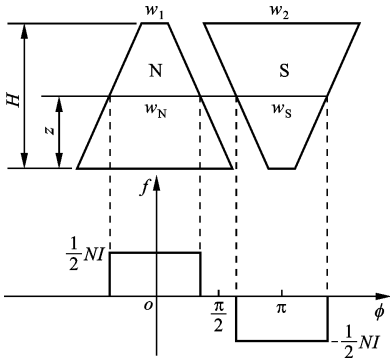


图1 转子绕组励磁磁动势

和轴向位置 z 的函数。将励磁绕组磁动势进行傅里叶分解

$$f(\phi, z) = \frac{w_N - w_S}{4\tau_p} NI + \begin{cases} \sum_{\mu=1,3,5,\dots} \frac{NI}{\mu\pi} \left(\sin \frac{\mu w_N \pi}{2\tau_p} + \sin \frac{\mu w_S \pi}{2\tau_p} \right) \cos(\mu\phi) \\ \sum_{\mu=2,4,6,\dots} \frac{NI}{\mu\pi} \left(\sin \frac{\mu w_N \pi}{2\tau_p} - \sin \frac{\mu w_S \pi}{2\tau_p} \right) \cos(\mu\phi) \end{cases} \quad (2)$$

式中: N 为励磁绕组的匝数; I 为励磁电流; τ_p 为发电机电距。

t 时刻发电机角速度 ω_r 、圆周电角度 ϕ 与机械角度 α 之间的转换关系为

$$\phi = p(\alpha - \omega_r t) \quad (3)$$

则励磁绕组磁动势可简写为

$$f(\alpha, z, t) = f_0 + \sum_{\mu=1}^{\infty} f_{\mu} \cos(\mu p \alpha - \mu p \omega_r t) \quad (4)$$

式中:幅值 f_0 和 f_{μ} 可由式(2)中的对应项得到。定子三相绕组电枢磁动势 f_s 的表达式^[14]为

$$f_s(\alpha, t) = \sum_{\nu=1,3,5,\dots,2k-1}^{\infty} f_{s\nu} \cos(\nu p \alpha - \Omega_{\nu} t + M_{\nu}) \quad (5)$$

式中: $f_{s\nu}$ 为与 ν 有关的幅值系数; Ω_{ν} 为频率特征; M_{ν} 反映相位特征。由于转子爪极相互交错,相邻两极间存在间隙,且定子上也有开槽,所以在建立气隙磁导 Λ 建立时,需要在均匀气隙磁导 Λ_r 的基础上同时考虑定、转子的开槽效应,即有

$$\Lambda(\alpha, t, z) = \Lambda_r(\alpha, t, z) \epsilon(\alpha) = \Lambda_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \Lambda_n \cos(nS\alpha) + \sum_{n=1}^{\infty} \Lambda_k \cos[kp(\alpha - \omega_r t)] + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \Lambda_{nk} \cos[kp(\alpha - \omega_r t)] \cos(nS\alpha) \quad (6)$$

由式(6)可知,气隙磁导由4个部分组成:磁导不变部分 Λ_0 、定子结构引起的磁导谐波(幅值系数

Λ_n)、转子结构导致的磁导谐波(幅值系数 Λ_k)以及定转子相互作用引起的磁导谐波(幅值系数 Λ_{nk})。其中,第4部分的幅值极小,在计算磁场时忽略。

负载下气隙磁场 B 由转子绕组产生的励磁磁场 B_r 和定子绕组产生的电枢磁场 B_s 组成

$$B(\alpha, z, t) = B_r(\alpha, z, t) + B_s(\alpha, z, t) = f(\alpha, z, t) \Lambda(\alpha, t, z) + f_s(\alpha, t) \Lambda(\alpha, t, z) \quad (7)$$

由于发电机铁芯材料的磁导率远大于空气磁导率,进出定、转子铁芯的磁力线基本垂直于表面,因此气隙磁密的径向分量 B_R 远大于切向分量 B_T ,切向分量对径向电磁力波的影响极小可忽略。径向电磁力 P_n 可表示为

$$P_n(\alpha, z, t) = \frac{B_R^2 - B_T^2}{2\mu_0} \approx \frac{B_R^2}{2\mu_0} = \frac{B^2(\alpha, z, t)}{2\mu_0} \quad (8)$$

2.2 模型的验证

发电机电磁力无法通过试验直接进行验证,因此采用间接的方法来验证解析模型的准确性,即利用通过试验验证的有限元模型来验证解析计算的电磁力。

首先建立样机的电磁仿真计算模型并进行试验验证。根据爪极发电机的周期性,只需建立发电机的1/6三维有限元模型,如图2所示。爪极、铁芯以及绕组等材料参数的设置与实际材料一致,气隙网格设置为滑移网格。发电机电路及定、转子绕组的电流方向如图3所示。电压源充当负载,相当于发电机发电给蓄电池充电,转子绕组励磁电流方向设为沿旋转周期对称面垂直进入转子绕组。

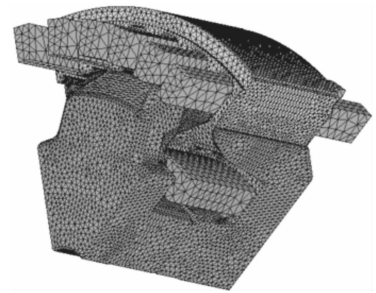
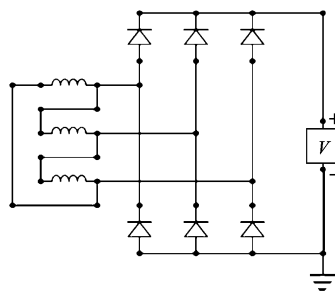


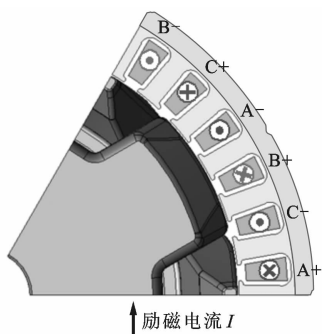
图2 爪极发电机1/6三维有限元模型

通过试验测量了爪极发电机试验样机在转速为1500 r/min、励磁电流为3 A时的反电动势。爪极发电机固定在台架上,驱动电机通过皮带传动带动爪极发电机运行,模拟发电机在车内的工作状态。试验与有限元计算的结果对比如图4所示,可见计算结果与试验结果相一致,证明了所建立有限元模型的准确性。

然后,将有限元模型和解析模型计算的电磁力

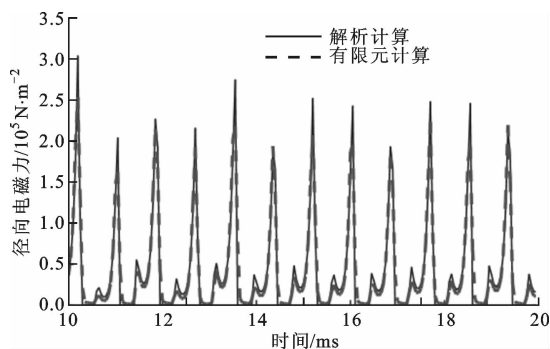


(a) 爪极发电机电路图

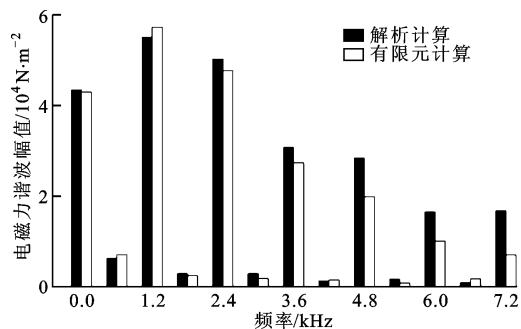


(b) 定、转子绕组电流方向

图3 1/6有限元模型电路及定、转子绕组电流方向图



(a) 时间特征对比



(b) 频率特征对比

图5 径向电磁力特征的解析和有限元计算结果对比

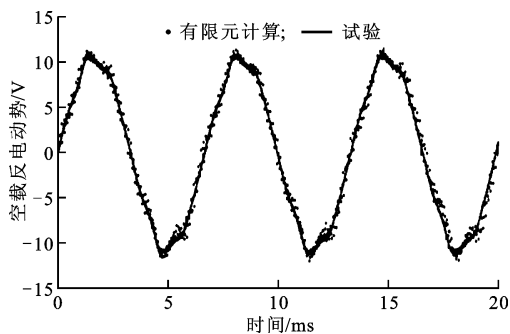
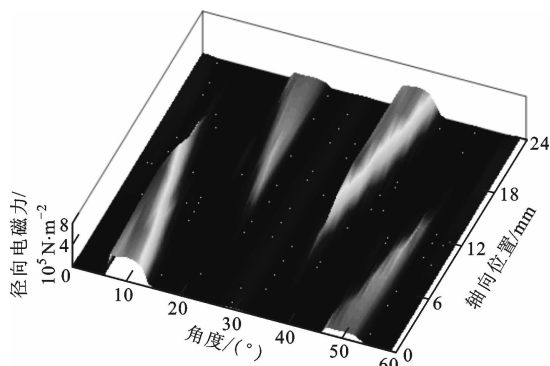
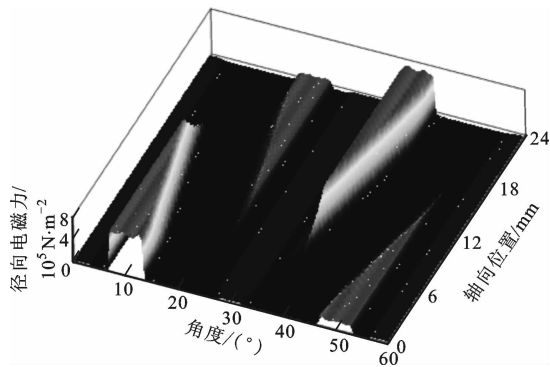


图4 空载反电动势有限元计算与试验结果对比



(a) 有限元计算结果



(b) 解析模型计算结果

图6 径向电磁力三维分布的解析和有限元计算结果对比

进行对比。提取同一空间位置电磁力随时间和频率变化的特征进行对比,如图5所示,可见解析计算与有限元仿真得到的时间、频率特征吻合一致。提取同一时刻的电磁力空间分布,有限元和解析计算结果对比如图6所示。由图6可以看出,解析和有限元法计算的电磁力沿周向和轴向位置分布是一致的,均能反映电磁力因爪极结构特征而引起的特殊三维空间分布,因此间接证明了解析模型的准确性。

3 转子结构对电磁力谐波的影响分析

3.1 主要电磁力谐波

定子表面的电磁力在不同空间位置的大小不同,而且随着时间变化。通过解析模型对电磁力进行时空二维分解,得到电磁力的频率和空间阶次特

征(以轴向 1/4 位置的电磁力分解为例),如图 7 所示。由图 7 可知,每一空间阶次下的电磁力包含不同的频率成分,每一频率下的电磁力包含不同的阶次,且电磁力空间阶次为 $6k(k$ 为非负整数),频率为转频 $f_r(100\text{ Hz})$ 的 $6k$ 倍。

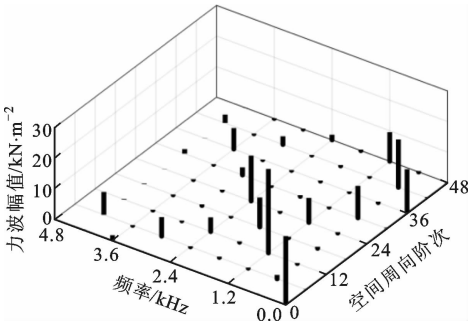
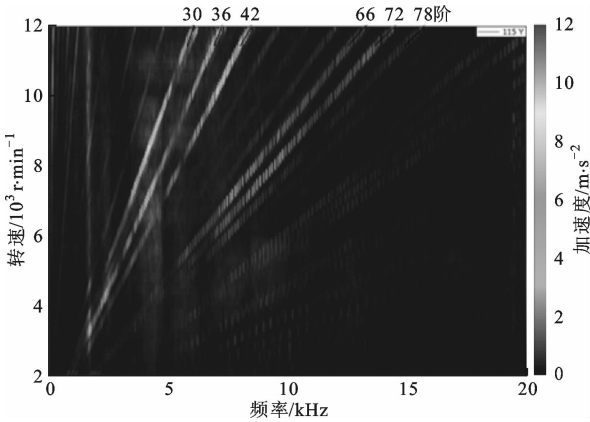
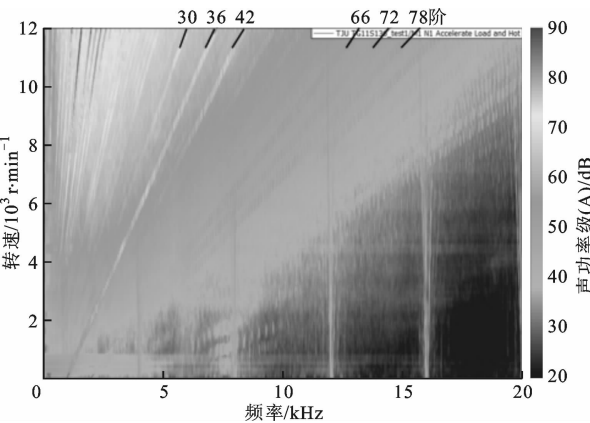


图 7 定子表面电磁力的时空二维分解
($z=L/4, 6\,000\text{ r/min}$)

对样机进行振动和噪声测试,结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,12 极 36 槽爪极发电机在中低转速时以 30、36、42 阶电磁振动噪声占据主导,表明引起发电机电磁振动噪声的主要是低阶电磁力谐波。



(a) 振动加速度图



(b) 噪声声功率级图

图 8 样机的振动噪声试验结果

由图 7 可知,爪极发电机的空间低阶电磁力谐波为 0 阶和 6 阶,其中空间 0 阶电磁力谐波的频率对应 $36f_r$,空间 6 阶谐波的频率主要对应 $30f_r$ 和 $42f_r$ 。因此,30 倍频空间 6 阶($30f_r, 6$)、36 倍频空间 0 阶($36f_r, 0$)和 42 倍频空间 6 阶($42f_r, 6$)的电磁力谐波分别引起了 30、36、42 阶振动噪声,对电磁振动噪声贡献最大。本文主要分析转子结构对以上 3 种阶次电磁力谐波的影响规律。

3.2 转子结构参数范围

研究表明,电磁力谐波的空间分布对振动和噪声影响很大^[3,15]。爪极发电机由于其特殊的转子结构使得电磁力沿轴向分布不均,而极尖和极根宽度决定了爪极结构的特殊性,对电磁力的周向和轴向分布有很大的影响。因此,本文主要讨论极尖和极根这 2 个参数对上述电磁力谐波的影响,进而确定最优的参数来降低发电机的振动噪声。

优化爪极发电机结构不应以牺牲发电性能为代价,所以需要根据所选结构参数对电流的影响来确定参数变化范围。爪极发电机发电电流的大小取决于定子三相绕组中相电流基波的大小,而定子相电流基波取决于感应电动势基波,并由励磁磁场的基波决定,因此励磁磁场基波的幅值决定了爪极发电机的发电输出性能。下面,首先分析结构参数对励磁磁场基波的影响。图 9 所示为极尖宽度和极根宽度对励磁磁场基波幅值的影响,从图中可以发现:极根和极尖尺寸改变越小,对励磁磁场基波的影响就越弱;当极尖和极根宽度变化范围控制在 $\pm 15\%$ 以内时,励磁磁场基波幅值的变化在 8.3% 以内,对发电性能的影响较小。因此,可以在 15% 变化范围内来选取适当的极尖和极根宽度,以达到降低电磁力谐波的目的。

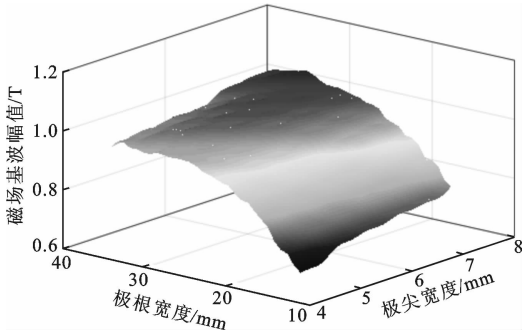
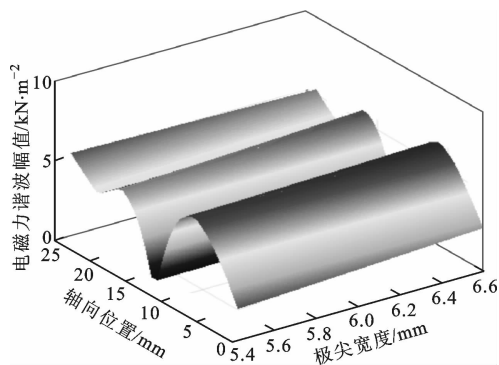


图 9 极尖和极根宽度对励磁磁场基波的影响

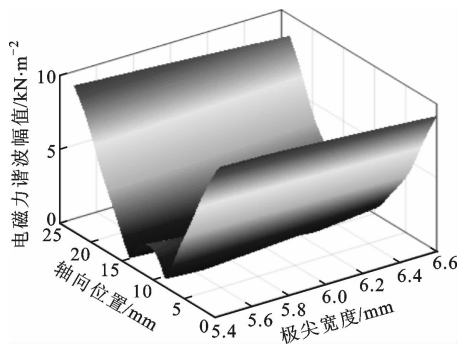
3.3 极尖宽度对主要电磁力谐波的影响

极尖宽度对($30f_r, 6$)、($36f_r, 0$)、($42f_r, 6$)三个阶次电磁力谐波的影响规律如图 10 所示,从中可以

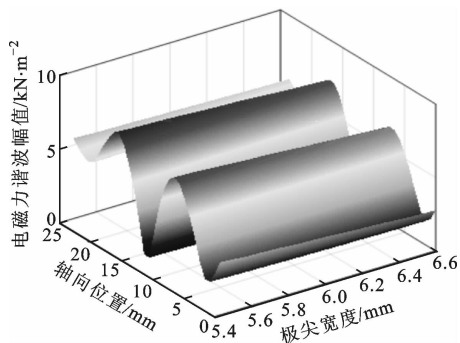
看出:同一电磁力谐波幅值在不同轴向位置出现较大的差异,在 $L/2$ 位置处幅值最小,但在不同轴向位置随着极尖宽度变化的趋势一致,即极尖宽度增大时,电磁力谐波幅值有减小的趋势; $(30f_r, 6)$ 和 $(42f_r, 6)$ 电磁力谐波沿轴向位置分布相似,且随极尖宽度的变化波动较小, $(36f_r, 0)$ 电磁力谐波幅值随极尖参数的变化波动较大。



(a) 极尖宽度对 $(30f_r, 6)$ 电磁力谐波的影响



(b) 极尖宽度对 $(36f_r, 0)$ 电磁力谐波的影响



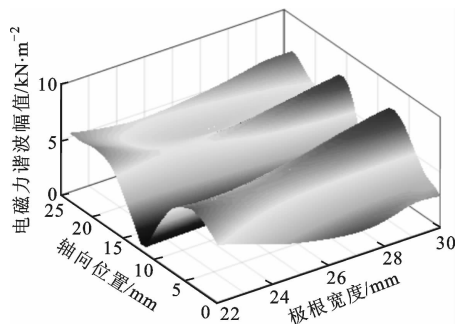
(c) 极尖宽度对 $(42f_r, 6)$ 电磁力谐波的影响

图 10 极尖宽度对不同轴向位置主要电磁力谐波的影响

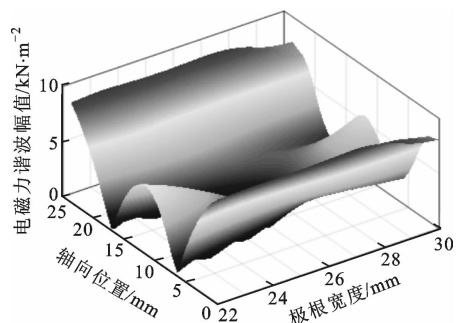
3.4 极根宽度对主要电磁力谐波的影响

$(30f_r, 6)$ 、 $(36f_r, 0)$ 、 $(42f_r, 6)$ 三个阶次的电磁力谐波随极根宽度的变化趋势如图 11 所示,可见相较于极尖宽度,电磁力谐波更容易受极根宽度的影响,且在不同轴向位置,随极根宽度的增大整体呈现

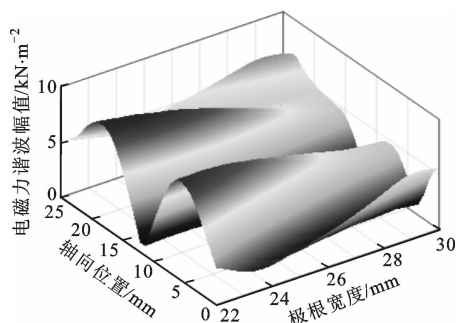
先减小后增大的变化波形。 $(30f_r, 6)$ 和 $(42f_r, 6)$ 电磁力谐波均在轴向 $L/4$ 和两端位置处对极根宽度变化敏感, $(30f_r, 6)$ 电磁力谐波在极根宽度为 25 mm 时最小, $(42f_r, 6)$ 电磁力谐波在极根宽度为 27 mm 时最小,而 $(36f_r, 0)$ 电磁力谐波在轴向 $L/2$ 处变化敏感,且在 25 mm 时最小。



(a) 极根宽度对 $(30f_r, 6)$ 电磁力谐波的影响



(b) 极根宽度对 $(36f_r, 0)$ 电磁力谐波的影响



(c) 极根宽度对 $(42f_r, 6)$ 电磁力谐波的影响

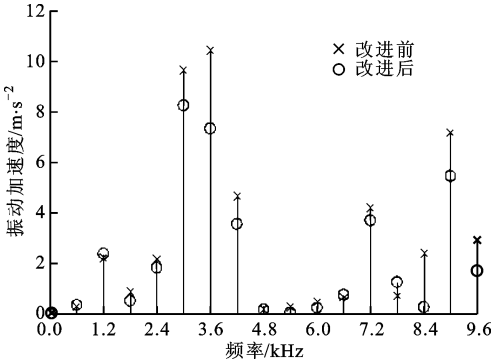
图 11 极根宽度对不同轴向位置主要电磁力谐波的影响

4 转子结构的改进设计

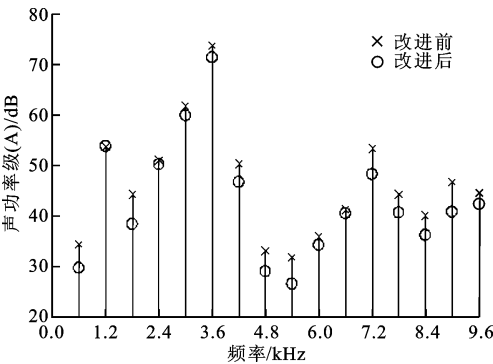
通过上节对振动噪声贡献大的转子结构电磁力谐波的分析可知,极尖宽度越大,电磁力谐波幅值就越小。因此,为了削弱电磁力谐波,应增大极尖宽度,最优值为 6.6 mm(初始值为 6.0 mm)。相较于极尖参数,极根的变化对电磁力谐波的影响更为显著。由于中低速噪声阶次中最主要的是 36 阶噪

声,因此根据引起 36 阶噪声的主要电磁力谐波 ($36f_r,0$) 的最小幅值,极根宽度最优值选取 25 mm (初始值为 26.1 mm)。

对于本文研究的样机,电磁振动与噪声的多物理场仿真计算已得到了试验的验证^[16]。通过仿真计算得到的改进前、后爪极发电机壳体表面的径向振动和辐射噪声如图 12 所示,从中可以看出,改进后的振动加速度和噪声幅值都有所下降,峰值处 (3 600 Hz) 的振动加速度幅值下降了 20%,电磁噪声的总声功率级(A)下降了 2.3 dB。发电电流由初始模型的 90.0 A 变为 90.6 A,增加了 0.7%。因此,转子结构的改进对发电机的振动噪声有所削弱,且并未影响发电性能。



(a) 振动加速度对比



(b) 发电机辐射噪声对比

图 12 转子改进前后发电机表面的振动加速度和辐射噪声对比

5 结 论

本文建立了爪极发电机的电磁力解析计算模型,分析了爪极发电机转子结构参数对径向电磁力谐波的影响规律,并在此基础上通过有限元法对转子结构进行了改进,削弱了振动噪声。通过对 12 极 36 槽爪极发电机样机的分析,得出以下结论:

(1)本文建立的解析模型能够正确反映对振动

和噪声贡献最大的电磁力谐波,并且能够准确分析电磁力谐波的时空分布特征,解析计算结果与有限元结果吻合良好;

(2)极尖和极根宽度当变化范围在 15% 内时对励磁磁场基波影响很小,不会对发电性能产生影响;

(3)转子极尖宽度对不同轴向位置电磁力谐波的影响规律基本一致,主要谐波幅值随着极尖宽度增大而有所减小,而极根宽度对主要电磁力谐波的影响更为敏感,随着极根宽度增大,谐波幅值整体呈先减小后增大的趋势;

(4)根据转子结构对主要电磁力谐波的影响规律,对转子结构进行了改进,改进后发电机的表面振动加速度峰值减小了 20%,辐射噪声总声功率级(A)下降了 2.3 dB。

参考文献:

[1] 王群京,倪有源,李国丽. 爪极电机的结构理论及应用 [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2006:1-12.

[2] EVERSMAN W, BURNS S, PEKAREK S. Noise generation mechanisms in claw pole alternators [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 283(1): 369-400.

[3] GIERAS J F, WANG C, LAI J C. Noise of polyphase electric motors [M]. Boca Raton, FL, USA: CRC/ Taylor & Francis, 2006: 45-50.

[4] 李佳庆. 汽车爪极发电机电磁噪声的产生机理及其抑制方法 [D]. 合肥:合肥工业大学,2015:30-42.

[5] YANG H Y, LIM Y C, KIM H C. Acoustic noise/vibration reduction of a single-phase SRM using skewed stator and rotor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4292-4300.

[6] LE BESNERAIS J, LANFRANCHI V, HECQUET M, et al. Optimal slot opening width for magnetic noise reduction in induction motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(4): 869-874.

[7] JUNG J, LEE S, LEE G, et al. Reduction design of vibration and noise in IPMSM type integrated starter and generator for HEV [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(6): 2454-2457.

[8] 杨帆,鲍晓华,吴锋,等. 削弱汽车爪极发电机转矩脉动的仿真与实验研究 [J]. 电气工程学报, 2015, 10(5): 43-50.

YANG Fan, BAO Xiaohua, WU Feng, et al. Simulation and experiment study on reducing torque ripple for automotive claw-pole alternators [J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(5): 43-50.

- [9] YANG F, BAO X, DI C, et al. Simulation and experiment on reducing electromagnetic vibration and noise of claw-pole alternators [C]// 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 1452-1458.
- [10] 鲍晓华, 吴锋, 魏琼, 等. 基于辅助槽的汽车爪极发电机电磁振动削弱方法 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 161-166.
- BAO Xiaohua, WU Feng, WEI Qiong, et al. Reduction of electromagnetic vibration for automobile alternator by auxiliary slot [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9): 161-166.
- [11] LI J, WEI Q, YANG F, et al. Reduction of radial magnetic force waves based on eccentric magnetic pole for claw pole alternator [C]// 2014 Fourth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 55-60.
- [12] 鲍晓华, 李佳庆, 魏琼, 等. 爪极发电机转子磁极间铜焊降低电磁激振力波研究 [J]. 电气工程学报, 2016, 11(6): 1-8.
- BAO Xiaohua, LI Jiaqing, WEI Qiong, et al. Reducing exciting force waves of claw pole alternator with copper welding rotor poles [J]. Journal of Electrical Engineering, 2016, 11(6): 1-8.
- [13] TAN-KIM A, LANFRANCHI V, VIVIER S, et al. Vibro-acoustic simulation and optimization of a claw-pole alternator [C]// IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 5227-5232.
- [14] 左曙光, 吴双龙, 吴旭东, 等. 电励磁爪极发电机气隙磁场解析模型 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(12): 2400-2408.
- ZUO Shuguang, WU Shuanglong, WU Xudong, et al. Analytical model of air gap magnetic field for electric excitation claw pole alternators [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(12): 2400-2408.
- [15] 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): 6204-6212.
- [16] WU S, ZUO S, WU X, et al. Vibroacoustic prediction and mechanism analysis of claw pole alternators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,

2017, 64(6): 4463-4473.

[本刊相关文献链接]

- 刘小民, 魏铭, 杨罗娜, 等. 内凹式蜗舌对多翼离心风机气动性能和噪声的影响. 2017, 51(12): 128-135. [doi: 10.7652/xjtuxb201712019]
- 杨毅, 刘石, 田丰, 等. 突发短路条件下变压器绕组振动特性的仿真研究. 2017, 51(10): 19-26. [doi: 10.7652/xjtuxb201710004]
- 王爽, 郭永存, 王鹏或, 等. 复合式磁力耦合器的设计与试验研究. 2017, 51(7): 115-123. [doi: 10.7652/xjtuxb201707017]
- 左曙光, 张耀丹, 阎礁, 等. 考虑定子各向异性的永磁同步电机振动噪声优化. 2017, 51(5): 60-68. [doi: 10.7652/xjtuxb201705010]
- 张凡, 汲胜昌, 祝令瑜, 等. 短路冲击下变压器振动频响函数研究. 2017, 51(2): 97-103. [doi: 10.7652/xjtuxb201702016]
- 邵卫东, 李志刚, 李军. 二维时间发展混合层噪声的直接数值模拟. 2017, 51(1): 38-44. [doi: 10.7652/xjtuxb201701007]
- 黄康, 孙顺强, 葛新方, 等. 采用 Udadia-Kalaba 理论的微振动隔振平台研究. 2017, 51(1): 51-58. [doi: 10.7652/xjtuxb201701009]
- 许广灿, 徐俊, 李士盈, 等. 电动汽车振动能量回收悬架及其特性优化. 2016, 50(8): 90-95. [doi: 10.7652/xjtuxb201608015]
- 蔺彦虎, 赵宁, 彭艳军. 具有循环对称特点的耦合结构振动特性分析. 2016, 50(7): 68-74. [doi: 10.7652/xjtuxb201607011]
- 方源, 章桐, 陈霏霏, 等. 电动车动力总成噪声品质粒子群-向量机预测模型. 2016, 50(1): 41-46. [doi: 10.7652/xjtuxb201601007]
- 陈起旭, 徐俊, 杨松, 等. 大功率盘式交流永磁同步电机电磁场分析. 2015, 49(9): 120-125. [doi: 10.7652/xjtuxb201509020]
- 刘菲菲, 陈刚, 李跃明. 用于飞机机翼涡固干扰噪声数值模拟的 RANS/NLAS 方法. 2015, 49(9): 141-146. [doi: 10.7652/xjtuxb201509023]
- 朱叶叶, 汲胜昌, 张凡, 等. 电力变压器振动产生机理及影响因素研究. 2015, 49(6): 115-125. [doi: 10.7652/xjtuxb201506019]
- 郝双晖, 王磊, 宋宝玉, 等. 交流伺服系统永磁同步电机电流及位置二级状态观测器设计. 2015, 49(5): 100-107. [doi: 10.7652/xjtuxb201505016]
- 侯明明, 吴九汇, 姜宁. 旋转封闭薄壁球壳辐射噪声的多极展开方法. 2014, 48(7): 102-108. [doi: 10.7652/xjtuxb201407018]

(编辑 葛赵青)