

气隙磁密3次谐波对电机振动噪声的影响*

乔鸣忠, 卢希浩, 张弛

(海军工程大学电气工程学院, 湖北武汉 430033)

摘要:针对电机的电磁振动噪声问题,发现了提高电机气隙磁密的正弦性不一定能够降低电机的振动噪声。鉴于此,分析了引起电机振动和噪声的主要力波阶次和频率,并探究了气隙磁密3次谐波与电机振动噪声的具体函数关系。为了分析引起电机振动和噪声的主要力波阶次和频率,在利用解析法的基础上排出力波表,确定了主要噪声源。为了探究气隙磁密3次谐波对电机振动噪声的影响,建立了气隙磁密及径向力波的数学模型,并通过遗传算法求解了电机气隙磁密3次谐波的最佳幅值。分析结果显示,提高气隙磁密正弦性不一定能够降低电机振动噪声,气隙磁密3次谐波在一定范围内存在最优值使得电机振动噪声最小。分析结果为低噪声电机的设计提供了参考依据。

关键词:气隙磁密谐波;永磁同步电机;遗传算法;振动噪声

中图分类号:TM351 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2023)03-092-07

Influence of third order harmonic of air gap flux density on motor vibration and noise

QIAO Mingzhong, LU Xihao, ZHANG Chi

(College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming at the problem of electromagnetic vibration and noise of motor, it was found that improving the sinusoidal characteristic of air gap flux density does not necessarily reduce the vibration and noise of motor. In view of this, the order and frequency of the main force wave causing the vibration and noise of the motor were analyzed, and the specific functional relationship between the third order harmonic of air gap flux density and the vibration and noise of the motor was explored. In order to analyze the order and frequency of the main force wave which caused the vibration and noise of the motor, the force wave table was eliminated based on the analytical method, and the main noise source was determined. In order to explore the influence of the third order harmonic of air gap flux density on motor vibration and noise, the mathematical models of air gap flux density and radial force wave were established, and the optimal amplitude of the third order harmonic of air gap flux density was solved by genetic algorithm. The analysis results show that improving the sinusoidal air gap flux density does not necessarily reduce the vibration noise of the motor, and the third order harmonic of air gap flux density has an optimal value in a certain range to minimize the vibration noise of the motor. The analysis results provide a reference for the design of low noise motor.

Keywords: air gap flux density harmonics; permanent magnet synchronous motor; genetic algorithm; vibration noise

电机是舰艇上的重要设备,不仅数量多,而且应用频繁。电机的振动和噪声对于舰艇的隐身性能及其船员生命力的保障极其重要,因此降低电机的振动和噪声是一项十分重要的课题。

电机的噪声包括电磁噪声、空气动力噪声和机械噪声,其中电磁噪声是最主要的噪声源^[1]。国内外对电机电磁振动的研究方法主要有解析法、有限元法和实验法^[2]。解析法建立了电机气隙磁密以及径向力波的数学模型,能够方便地计算电机所受到的电磁力,并且通过弹性力学方程求解定子的振动变形情况。但采用解析法会简化

很多实际条件,使得计算结果不够准确。在解析法的基础上,有限元法为求解电机的振动噪声提供了新的工具。采用有限元法能够准确得到电机的气隙磁密及电磁力波分布,并且可以查看各个频率下的振动和噪声响应,但有限元法并不能代替解析法对电机的振动噪声进行理论性分析。在进行电机的振动噪声计算时,一般采用两者结合的方式^[3-5]。

在进行普通的电机设计时,通常希望电机的气隙磁密有较高的正弦性,以降低电机的转矩脉动和电机损耗。在设计低噪声电机或者进行电机

* 收稿日期:2021-07-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877212)

作者简介:乔鸣忠(1971—),男,湖北武汉人,教授,博士,博士生导师,E-mail:qiaomingzhong@126.com

的优化设计时,很多研究学者采取了同样的思路。文献[6]进行了转子结构和绕组排布两个方面的设计,提高了电机气隙磁场的正弦性,降低了电机的电磁振动噪声。文献[7]优化了转子隔磁桥结构,使得各阶气隙磁密的幅值下降,提高了气隙磁密的正弦性,同时也改善了电机的振动噪声。文献[8]以气隙磁密谐波畸变率指标为设计依据来设计低噪声电机,实验结果表明,其设计方案能够有效降低电机振动噪声。虽然文献[6-8]均降低了电机的振动噪声,但是没有相关的理论证明提高气隙磁密的正弦性一定能降低电机的振动和噪声。

基于以上分析,本文以一台 11 kW 的 Halbach 转子结构电机为研究对象,在解析法的基础上通过排出力波表的形式,确定了引起电机振动和噪声的主要力波频率和阶次。为了说明电机振动噪声与其气隙磁密正弦性无负相关关系,本文将该 Halbach 结构永磁电机与一台参数基本相同的径向充磁结构的永磁同步电机作对比,发现了气隙正弦性好而振动噪声大的现象。为了探究气隙磁密 3 次谐波对电机振动噪声的函数关系,本文建立了 Halbach 结构电机的气隙磁密及径向力波的数学模型,并通过遗传算法求解了电机气隙磁密 3 次谐波的最佳幅值。

1 电磁力计算及分析

1.1 气隙磁密表达式及其拟合函数

电机的气隙磁密主要是径向磁密,切向气隙磁密幅值很小^[9],忽略切向磁密,转子磁势的表达式为:

$$f(\theta, t) = \sum_{\mu} F_{\mu} \cos\left(\mu \frac{\omega_1 t}{p} - \mu\theta\right) \quad (1)$$

式中: μ 为 μ/p 次磁势谐波的极对数, ω_1 为基波电角频率, θ 为空间角度。

考虑转子凸极和定子开槽,气隙长度为 δ 时的磁导为:

$$\lambda(\theta, t) = \mu_0 \left[\frac{\bar{\Lambda}_0}{\delta} + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{\bar{\Lambda}_k}{\delta} \cos k Z_1 \theta \right] \quad (2)$$

式中: μ_0 为真空中的磁导率, $\bar{\Lambda}_0$ 为气隙平均磁导的比磁导, $\bar{\Lambda}_k$ 为 k 次谐波磁导的比磁导, Z_1 为定子槽数。

则同步电机空载时的气隙磁密表达式为:

$$b_{\mu}(\theta, t) = f(\theta, t) \lambda(\theta, t) \quad (3)$$

将式(1)和式(2)代入式(3)中,即可得到空载时具体的气隙磁密表达式。

电机负载时,定子绕组通入对称的三相正弦电流,所产生的电枢反应磁场为:

$$b_v(\theta, t) = \sum_v B_v \cos[\omega_1 t - v\theta - (\varphi + 90^\circ)] \quad (4)$$

将式(3)和式(4)相加,即可得到电机负载时的气隙磁密表达式:

$$\begin{aligned} b(\theta, t) &= b_{\mu}(\theta, t) + b_v(\theta, t) \\ &= \sum_{\mu} B_{\mu} \bar{\Lambda}_0 \cos\left(\mu \frac{\omega_1 t}{p} - \mu\theta\right) + \\ &\quad \sum_{\mu} \sum_k (-1)^{k+1} \frac{1}{2} B_{\mu} \bar{\Lambda}_k \cos\left[\mu \frac{\omega_1 t}{p} - \right. \\ &\quad \left. (\mu \pm k Z_1) \theta\right] + \sum_v B_v \cos[\omega_1 t - \\ &\quad v\theta - (\varphi + 90^\circ)] \end{aligned} \quad (5)$$

以一台舰艇用机泵一体化电机为计算目标,该电机是一台 Halbach 转子结构 20 极 24 槽的永磁同步电机,额定运行功率为 11 kW,额定转速为 1 000 r/min,电机的截面图如图 1 所示。

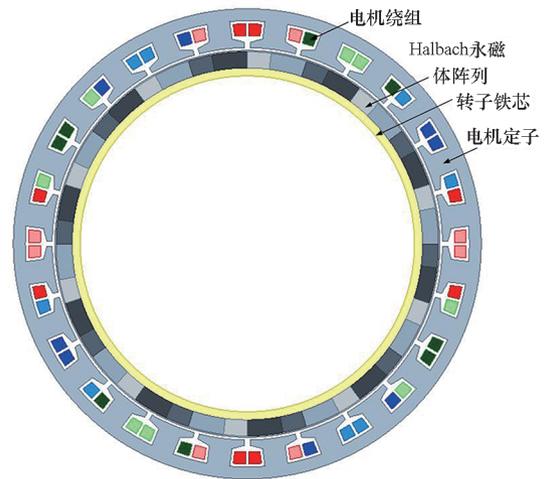


图1 Halbach 永磁同步电机截面图

Fig.1 Section of Halbach permanent magnet synchronous motor

经过有限元仿真,得到电机在额定状况运行时的空间气隙磁密如图 2 所示。

在图 2 中,仅仅得到了电机的气隙磁密波形图,对于电机气隙磁密的函数表达式,可以通过正弦函数拟合算法来解决^[10]。

周期信号在满足狄利克雷条件时,其电机空间气隙磁密波形可以认为是由各种谐波叠加而成,可表示成如下形式:

$$b(x) = C + \sum_{h=1}^H [A_h \cos(2h\pi f'x) + B_h \sin(2h\pi f'x)] + n(t) \quad (6)$$

式中, x 为圆周上的距离, H 为最高谐波次数, C 为

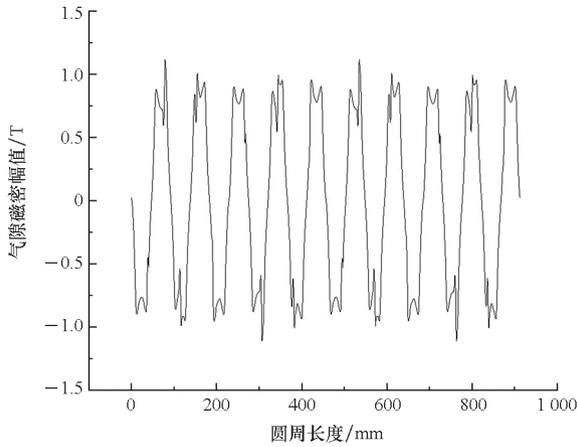


图 2 电机的气隙磁密波形图

Fig. 2 Air gap magnetic density waveform of motor

直流分量, A_h 和 B_h 分别为 h 次谐波的同相正交幅值, f' 为信号的基波频率, $n(t)$ 是零均方差为 e^2 的宽带噪声。则 h 次谐波的相位和幅值分别为:

$$Q_h = \begin{cases} \arctan\left(-\frac{B_h}{A_h}\right) & A_h \geq 0 \\ \arctan\left(-\frac{B_h}{A_h}\right) + \pi & A_h < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$D_h = \sqrt{A_h^2 + B_h^2} \quad (8)$$

A_h 和 B_h 可以通过遗传算法来估计其参数的初值,组成初始解向量。通过高斯-牛顿迭代法逼近加权最小二乘拟合方差,通过多次迭代,最终求得各次谐波的同相正交幅值^[11]。

取最高谐波次数 H 为 8,通过正弦函数拟合算法,可以得到空间气隙磁密函数表达式为:

$$\begin{aligned} b(x) = & 0.9557 \sin(0.06886x + 3.07) + \\ & 0.1404 \sin(0.2066x + 3.046) + \\ & 0.09668 \sin(0.3443x - 0.1839) + \\ & 0.05896 \sin(0.4819x - 0.1564) + \\ & 0.03612 \sin(0.7571x - 2.925) + \\ & 0.03436 \sin(0.09641x - 1.657) + \\ & 0.0325 \sin(0.2346x + 0.75) + \\ & 0.03081 \sin(0.3997x + 0.5978) \end{aligned} \quad (9)$$

计算结果显示,输入与输出误差的平方和为 2.87,多重测定系数为 0.994,证明了正弦函数拟合效果良好^[12]。

1.2 电磁力波分析

忽略切向磁密,电机的径向力密度表达式可由麦克斯韦定律求得,即:

$$p_n(\theta, t) = \frac{b^2(\theta, t)}{2\mu_0} \quad (10)$$

其中: $p_n(\theta, t)$ 为径向电磁力密度; μ_0 为真空磁导率,大小为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m。

不考虑时间变量,将式(5)代入式(10)中,就可以得到电机空间径向力密度的展开式。负载时,电磁力波的频率为 2 倍定子电流频率的整数倍^[13-16]。其中,有两类径向力波引起的振动和噪声需要注意:

一类是 2 倍定子电流频率(333.3 Hz)下的力波。该频率下的振动噪声是由于气隙磁密中的基波磁场所产生的,该电机的基波空间极对数为 10,所以力波的空间阶数为 20 阶,属于高阶力波,虽然该力波幅值较大,但是对电机振动和噪声的影响比较小。

另一类是主极磁场 μ 对极谐波和一阶齿谐波磁场($v = p \pm Z_1$)所产生的低阶次力波,该低阶次力波是引起电机振动噪声的主要原因。该力波可以通过排出表 1 的形式来确定。

表 1 力波表

Tab. 1 Force wave table

v	μ						
	i	0	-1	+1	-2	+2	-3
r	10	-2	22	-14	34	-26	
0	10			-4			
1	30					-4	
2	50						

注: $\mu = (2r+1)p$, $v = \left(\frac{6i}{d} + 1\right)p$, 当 $n = \mu + v$ 时, $f = 2(r+1)f_1$; 当 $n = \mu - v$ 时, $f = 2rf_1$, f_1 为定子电流频率(166.7 Hz), 每极每相槽数 $q = b + c/d$ 。

由力波表分析可知,引起振动和噪声的力波主要有两个:其中一个由 10 对极的主极磁场和 -14 对极的齿谐波磁场相互作用所形成,另一个由 30 对极的主极磁场和 34 对极的齿谐波磁场相互作用所形成。两种力波的阶数均为 -4 阶,频率均为 2 倍的定子电流频率,即 333.3 Hz。

2 3 次谐波对电磁力的影响

在第 1 节中,已经得到了空间气隙磁密的函数表达式(9)和电磁力密度的表达式(10)。首先对圆周长度的自变量进行归一化处理,然后对空间电磁力密度函数进行快速傅里叶变换,得到电磁力密度幅值关于空间阶数的关系,如图 3 所示。

根据第 1 节的分析可知,引起电机振动噪声的主要力波阶次为 -4 阶力波,由图 3 可知该力波幅值为 10173.5 N/m²。影响该力波幅值的谐波磁场有 4 类:10 对极的主极磁场、-14 对极的

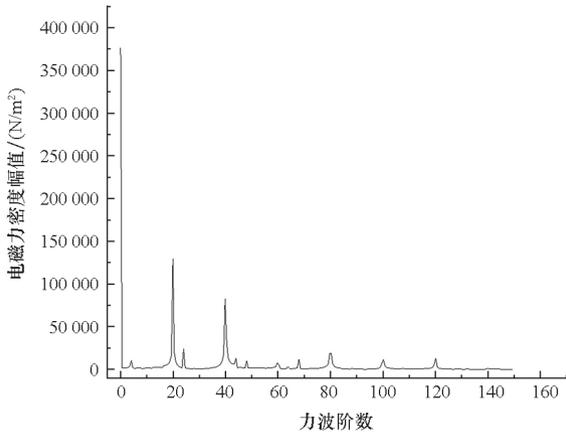


图3 电磁力密度的快速傅里叶变换

Fig. 3 Fast Fourier transform of electromagnetic force density

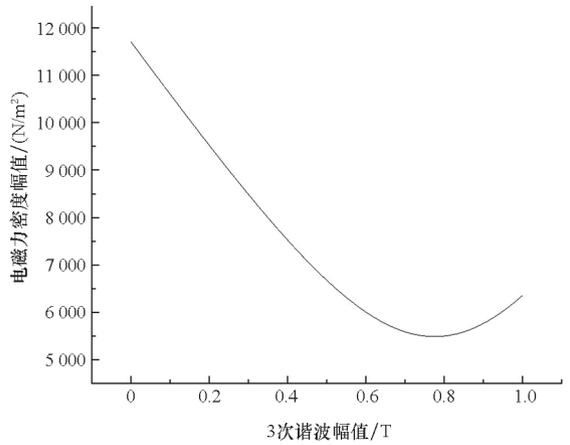


图4 力密度幅值关于3次谐波幅值的曲线

Fig. 4 The curve of force density amplitude with respect to the third harmonic amplitude

齿谐波磁场、30对极的主极磁场、34对极的齿谐波磁场。其中,10对极的主极磁场在电机设计和优化过程中需保持不变,-14对极的齿谐波磁场和34对极的齿谐波磁场幅值较小且不易改变其幅值,对该力波幅值影响较小。

在电机设计和优化过程中,3次谐波磁场即30对极的磁场在气隙磁密中幅值较大,而且不同的电机设计使得该谐波的幅值差别也很大。基于此,有必要探究3次谐波对于-4阶电磁力密度幅值的具体影响。

将空间气隙磁密函数式(9)中的3次谐波的幅值设为自变量 A_3 ,并将其代入电磁力密度表达式(10),得到空间电磁力密度幅值关于 A_3 与 x 的函数关系,其表达式如下:

$$p_n(A_3, x) = \frac{b^2(A_3, x)}{2\mu_0} \quad (11)$$

对自变量 x 进行归一化处理,然后对式(11)进行快速傅里叶分解,得到电磁力密度幅值关于空间阶数的函数。取空间阶数为4阶,即可得到-4阶力密度幅值关于3次谐波幅值 A_3 的函数关系如下:

$$F(A_3) = f_{\text{FFT}}[p_n(A_3, x)]|_{(k=4)} \quad (12)$$

-4阶力波幅值关于3次谐波幅值 A_3 的函数图像,即式(12)所对应的函数图像如图4所示。

从图4中可以看出,随着3次谐波幅值的增加,电磁力密度幅值先减小后增大,并且存在最佳3次谐波幅值使得电磁力密度幅值最小。

另外,该函数曲线还证明了气隙磁密的正弦性与电机振动噪声的大小没有负相关的关系,有可能出现气隙正弦性很好而振动噪声性能很差的情况。

3 遗传算法求解最佳幅值

3.1 遗传算法原理

第2节中得到了-4阶力波幅值关于3次谐波幅值 A_3 的函数关系,并且该函数存在一个 A_3 ,使得 $F(A_3)$ 为最小值。 $F(A_3)$ 函数十分复杂,使用一般的数学方法难以进行求解,但使用遗传算法可以很容易得到目标结果。

遗传算法是模拟生物在自然环境中的遗传和进化的过程而形成的自适应全局优化搜索算法^[17-18]。简单而言,遗传算法,即一个种群代表一组问题的解,使用群体搜索技术,不断对种群进行选择、交叉和变异等一系列遗传操作来使种群进化,最终新种群中将包含问题的最优解。

3.2 算法具体实现步骤

3.2.1 适应度函数

适应度即个体适应环境的能力,在遗传算法中用来评价个体的优劣,通常适应度高的个体更接近于问题的最优解。

适应度的目标函数不受连续可微分的条件约束,任意集合都可以作为其定义域。它作为遗传选择操作中的选择标准,直接影响了算法性能。

在本问题中,需要求解的是力密度幅值的最小值,因此在式(12)的基础上可构造适应度函数为:

$$f_{\text{fit}}(A_3) = -f_{\text{FFT}}[p_n(A_3, x)]|_{(f=4)} \quad (13)$$

3.2.2 选择算子

根据个体的适应度选择适应度高的个体,使其保留到下一代的操作称为选择操作。

基于各个个体被选择的概率与其适应度大小成正比的思想,Holland提出“轮盘赌法”^[19]。该

方法是一种基于比例的选择,若某个个体的自适应度为 $f_{fit}(i)$,种群大小为 N_p ,则该个体被选中的概率为:

$$p_i = f_{fit}(i) / \sum_{i=1}^{N_p} f_{fit}(i) \quad i = 1, 2, \dots, N_p \quad (14)$$

3.2.3 交叉和变异算子

交叉操作首先要从交配池中随机确定一组需要交配的个体,然后根据其位串长度 L ,以特定的交叉概率 P_c ,随机选取一个或多个片段交换其染色体,使其组成一对新的个体。

变异操作是对种群中的每一个个体,以特定的变异概率 P_m 将一个或多个基因座上的基因值改变为其他等位基因值。本问题选取的基因为二进制基因,发生变异时,相应的基因值取反^[20-21]。

3.2.4 参数确定

本问题所采取的适应度函数为式(13),遗传选择方法为“轮盘赌法”,初始化种群的数目 $N_p = 50$,染色体的二进制编码长度即位串的长度 $L = 20$,交叉概率 $P_c = 0.8$,变异概率 $P_m = 0.1$,终止进化代数 $G = 100$ 。

4 计算结果及振动实测

4.1 遗传算法计算结果

图 5 为适应度进化曲线,从图中可以看出,随着迭代次数的增加,目标函数值逐渐收敛,最终计算结果为:当 $A_3 = 0.776 \text{ T}$ 时 $F(A_3)$ 取得最小值。

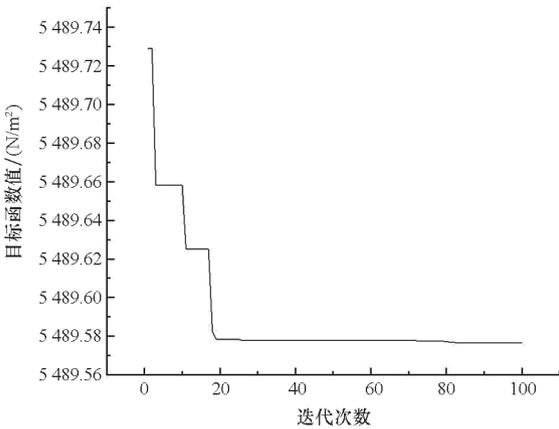


图 5 适应度进化曲线

Fig. 5 Evolution curve of fitness

虽然 $A_3 = 0.776 \text{ T}$ 时能够使得电机的振动噪声降低,但在进行电机设计时不仅要考虑振动噪声,还要注意其转矩脉动、电机铁耗以及永磁体的高效利用。一般电机的 3 次谐波不宜取得过大,在电机设计和优化中需要综合考虑。

4.2 电机振动仿真与实测

根据第 2 节和第 3 节的计算和分析,得到了 Halbach 结构电机气隙磁密 3 次谐波与 -4 阶力密度幅值的具体关系。现引入另一台电机,该电机除转子结构外,其余参数与本文分析的 Halbach 结构电机完全相同,其截面图如图 6 所示。

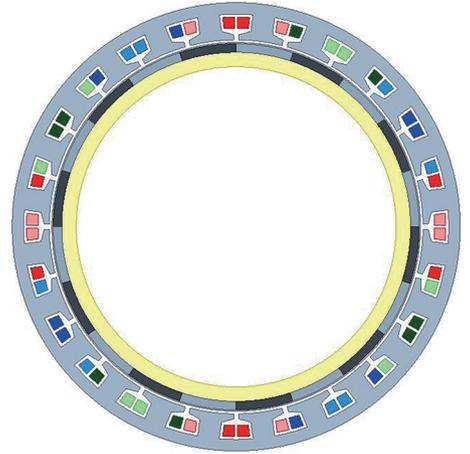


图 6 径向充磁结构永磁同步电机截面图

Fig. 6 Cross section of permanent magnet synchronous motor for radial magnetizing structure

两台电机在额定功率时气隙磁密的傅里叶分解如图 7 所示。从图 7 中可以看出,两台电机气隙磁密的主要差别在 3 次谐波幅值上, Halbach 结构电机的 3 次谐波幅值较小,气隙正弦度较高。

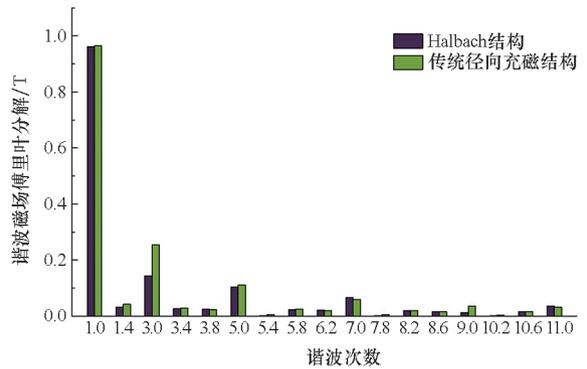


图 7 两台电机在额定功率时的气隙磁密

Fig. 7 Air gap magnetic density of two motors at rated power

对两台电机进行电机振动的仿真, -4 阶力波作用下的定子的总变形情况仿真结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出, Halbach 结构电机相比于径向充磁结构电机,其定子总变形量高出 9.21%。从图 9 中可以看出, Halbach 结构电机在 333.3 Hz 时的振动加速度响应也要高于径向充磁结构电机。 Halbach 结构电机的 3 次谐波含量小,气隙正弦度高,但振动噪声高于径向充磁结构

电机。该实验结论与第2节所得出的结论一致,一定程度上验证了理论的正确性。

5 结论

本文以一台 11 kW 的 Halbach 结构的永磁电机为研究对象,建立了永磁同步电机气隙磁密和电磁力波的解析模型,在此基础上确定了引起电机振动噪声的主要力波分量。为了探究 3 次谐波与振动噪声的关系,建立了 -4 阶电磁力密度幅值关于 3 次谐波幅值的数学模型,得到了具体的函数图像,并通过遗传算法求解了最佳 3 次谐波幅值使得电机的振动噪声最小,实验与理论分析一致。基于此,得到如下结论:

1) 电机的振动噪声并不取决于其气隙磁密的正弦性,进行低噪声电机的设计和优化时,应该从降低电磁力密度出发。

2) 对于本文所研究的 Halbach 结构电机,随着 3 次气隙磁密谐波的增加, -4 阶力波先减小后增大,3 次气隙磁密为 0.776 1 T 时使得力密度幅值最小。

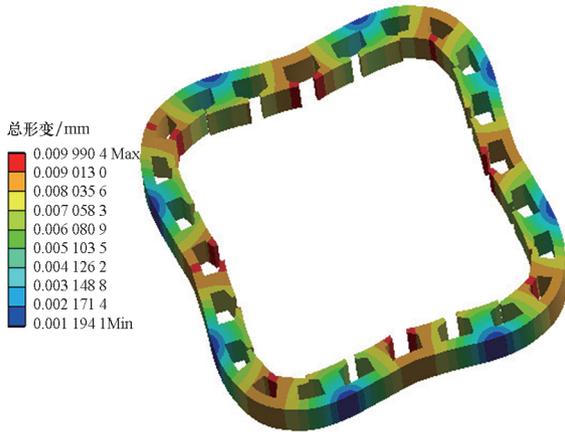
3) 本文仅对电机的振动噪声求出了最佳 3 次谐波幅值,在进行电机设计时不仅要考虑振动噪声,还要注意其转矩脉动、电机铁耗以及永磁体的高效利用,图 4 所示的函数关系可为电机设计提供参考。

致谢

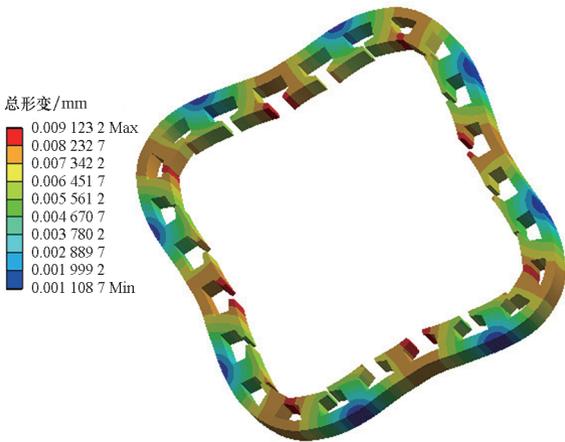
电机的振动信号测量工作是在海军工程大学蒋超和彭威博士的帮助下完成的,特此致谢!

参考文献 (References)

- [1] SUN T, KIM J, LEE G, et al. Effect of pole and slot combination on noise and vibration in permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 1038 - 1041.
- [2] 李全峰, 黄苏融, 黄厚佳. 不等极弧结构永磁同步电机噪声和转矩特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(11): 2210 - 2217.
LI Q F, HUANG S R, HUANG H J. Noise and torque characteristics of permanent magnet synchronous motor with unequal pole arc structure[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2018, 52(11): 2210 - 2217. (in Chinese)
- [3] LI J, SONG X G, CHO Y. Comparison of 12/8 and 6/4 switched reluctance motor; noise and vibration aspects [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11): 4131 - 4134.
- [4] KUROISHI M, SAITO A. Effects of magnetostriction on electromagnetic motor vibration at sideband frequencies [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(2): 1 - 8.
- [5] YANG H D, CHEN Y S. Influence of radial force harmonics with low mode number on electromagnetic vibration of PMSM [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(1): 38 - 45.
- [6] SALON S, ERGENE L T. Design and construction of a low-



(a) Halbach 结构
(a) Halbach structure



(b) 径向充磁结构
(b) Radial magnetizing structure

图 8 -4 阶力波作用下的定子总变形

Fig.8 Total deformation of stator under -4 order force wave

对两台电机进行电机振动的实测,图 9 为两台电机振动实测对比的频谱图。

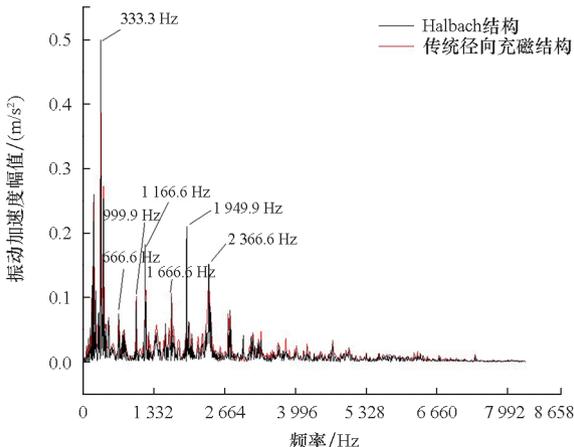


图 9 两台电机振动实测

Fig.9 Vibration measurement of two motors

- vibration low-leakage field motor [C]//Proceedings of International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2014: 464-469.
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] 王伟, 黄开胜, 胡弼, 等. 基于永磁体优化 PMSM 力波与模态分析[J]. 微电机, 2019, 52(7): 6-12.
WANG W, HUANG K S, HU B, et al. Analysis of force wave and modal of permanent magnet synchronous motor based on permanent magnets optimization[J]. Micromotors, 2019, 52(7): 6-12. (in Chinese)
- [9] 陈永校. 电机噪声的分析和控制[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.
CHEN Y X. Analysis and control of motor noise [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1987. (in Chinese)
- [10] 陈建军, 任勇峰, 甄国涌. CPU/GPU 并行加速的多谐波正弦拟合算法[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2013, 34(6): 636-641.
CHEN J J, REN Y F, ZHEN G Y. Parallel processing for accelerated multi-harmonic sine fitting algorithm with CPU/GPU [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2013, 34(6): 636-641. (in Chinese)
- [11] 乐美龙. 基于正交正弦函数基的数值拟合方法[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(4): 522-526.
LE M L. Numerical method for matching the graphical results by resolving the data into orthogonal sine wavelets [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2001, 35(4): 522-526. (in Chinese)
- [12] 屈文星, 刘浩, 秦楚, 等. 基于 MATLAB 傅里叶曲线拟合的天线跟踪精度评估方法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(12): 91-95.
QU W X, LIU H, QIN C, et al. Antenna tracking accuracy evaluation method based on MATLAB Fourier curve fitting[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(12): 91-95. (in Chinese)
- [13] FODOREAN D, HUSAR C, IRIMIA C. Noise and vibration behavior evaluation of DC motor and PMSM in electric traction application[C]//Proceedings of International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2016: 1184-1189.
- [14] 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): 7304-7317, 7445.
WANG K, SUN H Y, ZHANG L F, et al. An overview of rotor pole optimization techniques for permanent magnet synchronous machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7304-7317, 7445. (in Chinese)
- [15] 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. (in Chinese)
- [16] 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. (in Chinese)
- [17] 包子阳, 余继周, 杨杉. 智能优化算法及其 MATLAB 实例[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2018.
BAO Z Y, YU J Z, YANG S. Intelligent optimization algorithm and its MATLAB example[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018. (in Chinese)
- [18] 郁磊, 史峰, 王辉, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
YU L, SHI F, WANG H, et al. Analysis of 30 cases of MATLAB intelligent algorithm [M]. 2nd ed. Beijing: Beihang University Press, 2015. (in Chinese)
- [19] 吉林林. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(2): 69-73.
JI G L. Survey on genetic algorithm [J]. Computer Applications and Software, 2004, 21(2): 69-73. (in Chinese)
- [20] 吴贯锋, 徐扬, 常文静, 等. 基于 OpenMP 的并行遗传算法求解 SAT 问题[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(2): 428-435.
WU G F, XU Y, CHANG W J, et al. Parallel genetic algorithm for SAT problems based on OpenMP[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(2): 428-435. (in Chinese)
- [21] 崔家瑞, 周静怡, 张波, 等. 采用改进自适应遗传算法实现 FTU 优化配置[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(1): 220-225.
CUI J R, ZHOU J Y, ZHANG B, et al. Optimal allocation of FTU based on improved adaptive genetic algorithm [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(1): 220-225. (in Chinese)