

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.02.020

基于形貌优化法的无轴承开关磁阻电机减振降噪

杨 艳, 朱伟明, 刘泽远, 刘程子

(南京邮电大学自动化学院/人工智能学院, 南京 210023)

摘要: 脉振的径向电磁力作为激励源作用于 12/8 极单绕组宽转子齿无轴承开关磁阻电机 (Bearingless switched reluctance motor with wider rotor teeth, BSRMWR) 的定子齿面并传送到定子轭部及机壳, 会引发较大的振动噪声, 阻碍其推广应用。针对这一问题, 本文从本体结构的角度入手对电机壳体进行优化改进。采用三维多物理场有限元模型, 建立了 BSRMWR 电磁-结构-振动-声场耦合模型。通过对 BSRMWR 电磁场进行瞬态分析, 得到径向电磁力。将模态应变能方法应用于 BSRMWR 的壳体得到电机外壳结构有较大的应变能, 说明电机壳体结构的薄弱。基于此, 通过形貌优化的方法对电机的壳体结构进行优化。结果表明, 采用形貌优化后机壳结构的 BSRMWR, 其振动和噪声均有显著改善。

关键词: BSRMWR; 径向电磁力; 形貌优化; 振动噪声

中图分类号: TM352

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2022)02-0332-09

Vibration and Noise Reduction of Bearingless Switched Reluctance Motor Based on Shape Optimization Method

YANG Yan, ZHU Weiming, LIU Zeyuan, LIU Chengzi

(College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: The radial electromagnetic force of the pulse vibration acts as an excitation source on the stator tooth surface of a 12/8-pole single-winding bearingless switched reluctance motor wider with rotor tooth (BSRMWR) and transmits it to the stator yoke and the stator yoke, which causes a large vibration and noise and hinders its popularization and application. In view of this problem, this paper optimizes and improves the motor housing from the perspective of the body structure. Using the three-dimensional multiphysics finite element model, the electromagnetic-structure-vibration-sound field coupling model of BSRMWR is established. The radial electromagnetic force is obtained by transient analysis of the BSRMWR electromagnetic field. The modal strain energy method is applied to the shell of BSRMWR, and the motor shell structure has a large strain energy, which shows that the motor shell structure is weak. Based on this, the casing structure of the motor is optimized by the method of morphology optimization. The results show that the vibration and noise of the BSRMWR with the chassis structure optimized by the topography are significantly improved.

Key words: BSRMWR; radial electromagnetic force; shape optimization; vibration and noise

开关磁阻电机 (Switched reluctance motor, SRM) 因其结构简单, 容错性和鲁棒性高等优越性能而深受关注^[1], 广泛应用于电动车和航空航天领

域。但是 SRM 双凸极结构导致电机存在较大的振动噪声, 其中电磁噪声是 SRM 噪声的主要来源^[2]。针对这一问题, 从控制策略和本体结构的角度, 国

收稿日期: 2021-07-01; **修订日期:** 2022-03-05

通信作者: 杨艳, 女, 副教授, E-mail: yangyan0405@njupt.edu.cn。

引用格式: 杨艳, 朱伟明, 刘泽远, 等. 基于形貌优化法的无轴承开关磁阻电机减振降噪[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(2): 332-340. YANG Yan, ZHU Weiming, LIU Zeyuan, et al. Vibration and noise reduction of bearingless switched reluctance motor based on shape optimization method[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(2): 332-340.

内外学者进行了大量研究。文献[3]采用十二扇区划分的方法,引入模型预测算法对控制电压进行选择,结果表明该方法有效抑制了SRM转矩脉动,降低了振动噪声。文献[4]采用数字PWM的控制方式实现了两步换相法的主动式减振策略,实验表明该方法具有很好的减振效果。文献[5]通过参数识别的方法,在电流二次和三次谐波的基础上引入变量相位,通过优化求解得出最佳相位角,降低了电机的振动和噪声。文献[6]使用差异进化算法优化相电流波形,降低了径向力谐波幅值,抑制了电机的振动噪声。文献[7]通过智能电流控制法解决了电机的振动问题。文献[8]重点集中在提高SRM低阶固有频率以降低电机振动噪声。文献[9-10]对比了双定子结构电机和传统电机的振动加速度和形变量,得出在相同的功率工作下,采用双定子结构的电机具有更小的形变量和振动加速度。文献[11]提出了新型转子结构,在转子齿上开不同尺寸的矩形窗下得到降低振动噪声最小的结构。文献[12-13]通过优化定转子凸极的倾斜度来抑制电机振动。

无轴承开关磁阻电机(Bearingless switched reluctance motor,BSRM)作为一种特殊的SRM同样面临振动噪声问题,对于此也有相关文献进行了该方面的研究。文献[14]在直接转矩和直接悬浮力控制的基础上,采用超螺旋算法设计了滑膜控制器,有效抑制了转速抖振问题,在一定程度上也降低了电机的振动噪声。文献[15]通过实时控制悬浮绕组电流,对混合定子齿BSRM的振动起到了抑制作用。文献[16-17]通过分析主绕组方波电流控制、最小磁势控制和平均悬浮力控制等策略,指出不同的控制策略对电机振动的抑制效果也不同,其中最小磁势控制是一种利于BSRM减振降噪的控制策略。针对BSRM转子不平衡引发的振动问题,文献[18-19]从转子偏心补偿角度进行了振动方面的深入研究,并取得了一定进展。

本文以12/8极宽转子齿BSRM(BSRM with wider rotor teeth,BSRMWR)作为研究对象,相比于传统的12/8极BSRM,BSRMWR转子齿的机械角由BSRM的 15° 增加为 30° ,这一改变解决了传统BSRM转矩和悬浮力的耦合问题。然而BSRMWR双凸极结构和开关供电方式并未改变,这一结果也会导致其产生较大的振动和噪声。目前针对BSRMWR振动噪声方面鲜有研究,本文采用三维多物理场分析BSRMWR由于其径向电磁力导致的振动噪声,基于此,利用形貌优化法对BSRMWR壳体进行结构优化。对比分析结果表明,形貌优化可以有效改善BSRMWR的(Noise,vibration

and harshness,NVH)性能,为日后减振降噪方面的设计工作提供参考。

1 BSRMWR结构和悬浮原理

12/8极BSRMWR为三相电机,12个定子齿上各绕有一套集中式绕组,电机结构如图1所示。给电机的定子绕组通电流可在定转子齿极间产生电磁力,该电磁力的切向分量为电机旋转提供转矩 T ;同时,径向电磁力可为电机转子提供悬浮力 F 。

A,B,C 各相齿极4套绕组均可独立控制。其三相电感曲线及其对应的三相工作区间如图2及图3所示:当转子位置 θ 位于 $[-22.5^\circ,-7.5^\circ]$ 时, A 相绕组的线圈电感几乎线性上升,若在图1所示的 $A1,A2,A3,A4$ 定子绕组中通入相同大小的电流即可产生正转矩, B 相绕组的线圈电感几乎不变,若在 $B1,B2,B3,B4$ 定子绕组中按照需要通入不对称电流即能提供悬浮力,即此区间 A 相提供转矩, B 相提供悬浮力。同理,当转子位置位于 $[-7.5^\circ,7.5^\circ]$ 时, C 相处于电感上升区,提供正转矩, A 相处于电感平顶区,提供悬浮力;当转子位置 θ 位于 $[7.5^\circ,22.5^\circ]$ 时, B 相处于电感上升区,提供正转矩, C 相处于电感平顶区,提供悬浮力。

综上所述,BSRMWR采用双相导通原理,即两相绕组同时导通,就可以实现转矩和悬浮力的解耦控制。

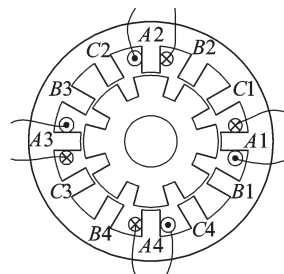


图1 12/8极BSRMWR结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of 12/8-pole BSRMWR structure

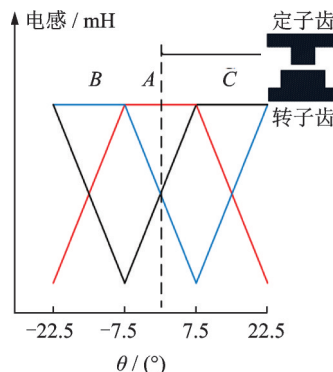


图2 BSRMWR电感曲线图

Fig.2 BSRMWR inductance curve

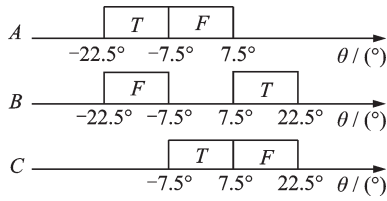


图3 BSRMWR工作区间原理图

Fig.3 Schematic diagram of BSRMWR working range

2 振动分析与质点运动方程

BSRMWR通电相定子极受脉动的径向磁力作用,使壳体结构的定子产生压缩形变而振动。因此,对BSRMWR定子振动特性的研究对降低电机噪声非常重要。

基于质点运动基本理论,推导了BSRMWR定子振动系统由径向电磁力到振动加速度的传递函数。根据牛顿第二定律,质点的二阶运动方程为^[20]

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = F(t) \quad (1)$$

式中: x 为质点的位移, m 为质点质量, r 为阻尼系数, k 为质点的刚度, t 为时间,对式(1)进行拉氏变换,得到质点的位移响应为

$$x(s) = \frac{F(s)}{m} \frac{1}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

式中: $\omega_n = \sqrt{k/m}$ 为无阻尼振荡角频率, $\zeta = r/(2m\omega_n) = r/(2\sqrt{mk})$ 为阻尼比, s 为质点的加速度,其响应为

$$a(s) = s^2 x(s) = \frac{F(s)}{m} \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

由此可得力到加速度的传递函数为

$$H(s) = \frac{a(s)}{F(s)} = \frac{1}{m} \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

从振动的角度看,BSRMWR是一个多自由度振动系统,其固有频率和模态振型有无穷多个。但是在BSRMWR实际运行中,一般只是少数几个振动模态被有效激发,其余模态由于幅值过小而被忽略,故可用多个单自由度振动系统的线性叠加来模拟BSRMWR振动系统。

所以,BSRMWR由径向力到振动加速度的传递函数可表示为

$$H(s) = \frac{a(s)}{F(s)} \approx \sum_i A_i \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta_i \omega_{mi} s + \omega_{mi}^2} \quad (5)$$

式中: ω_{mi} 为模态*i*对应的固有频率, ζ_i 为模态*i*对应的阻尼比, A_i 为电机模态*i*对应的增益。

3 BSRMWR声学理论分析

BSRMWR有限元模型网格尺寸较小,网格数量较多,考虑到采用声学仿真软件LMS Virtual.lab中声学边界元法对面网格进行积分计算会增大计算量,故采用有限元法并利用自动匹配层(Automatic matched layer, AML)求解声学Helmholtz方程来计算BSRMWR声学响应^[21-22]。

为了描述BSRMWR的声辐射问题,引入AML层 Ω_{AML} 作为其边界条件, Ω_{AML} 区域作为吸声区域。在声场中通过增加边界层来衰减声波能量,其辐射空间频域的Helmholtz方程为

$$\begin{aligned} \eta_x \eta_y \eta_z \left(\frac{j\omega}{c} \right)^2 \hat{p} &= \eta_y \eta_z \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\eta_x} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} \right) - \\ \eta_x \eta_z \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\eta_y} \frac{\partial \hat{p}}{\partial y} \right) &- \eta_x \eta_y \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\eta_z} \frac{\partial \hat{p}}{\partial z} \right) = \\ \left(\frac{j\omega}{c_0} \right)^2 \left(1 + \frac{\sigma_x}{j\omega} \right) \left(1 + \frac{\sigma_y}{j\omega} \right) \left(1 + \frac{\sigma_z}{j\omega} \right) \hat{p} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: c 为声波在流体中的声速; $\hat{p} = \int_{-\infty}^{+\infty} p e^{-j\omega t} dt$ 为声压的傅里叶变换; ω 为角频率; σ_i 表示声波在 x, y 和 z 三个方向的衰减系数; η 表示衰减效率,衰减效率和衰减系数的关系满足 $\eta_i = 1 + \frac{\sigma_i}{j\omega}$ 。

在介质流体(空气)中,BSRMWR径向电磁力作为激励力作用于定子并传递到壳体向外辐射噪声,对噪声分析的过程即求解Helmholtz波动方程的过程。

4 BSRMWR径向电磁力分析

径向悬浮力是相对的两个定子极单边径向磁力之差,受力对象是转子。国内外众多学者研究表明电磁振动噪声的主要原因是作用在电机定子上的单边磁力^[23-25],故本文主要研究BSRMWR径向电磁力。

BSRMWR绕组采用的外电路是不对称半桥,结合电机的工作原理,在JMAG电磁仿真软件中搭建工作电路。其中仿真工况转速为额定转速20 000 r/min,导通相电流 $i=12$ A。表1给出了12/8极BSRMWR样机的主要参数,其电磁仿真模型及径向电磁力与其FFT分析分别如图4及图5所示。

由图5可知,BSRMWR直流分量为75 N,该直流分量并不会引起定子振动。在2 666、5 333、10 666、13 333和18 666 Hz等频率处力波幅值相对较大,均可能引起定子较大的振动响应。

表 1 BSRMWR 模型主要参数
Table 1 Main parameters of BSRMWR model

参数	值
定子轭厚/mm	6.1
转子轭厚/mm	7.65
定子齿高/mm	16.5
转子齿高/mm	7
气隙长度/mm	0.25
定子极弧度数/(°)	15
轴径/mm	20
叠片长度/mm	55

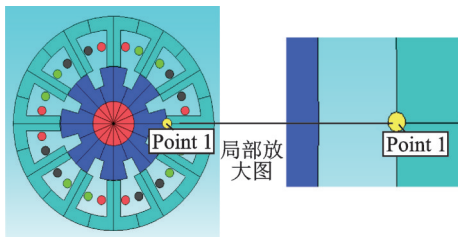
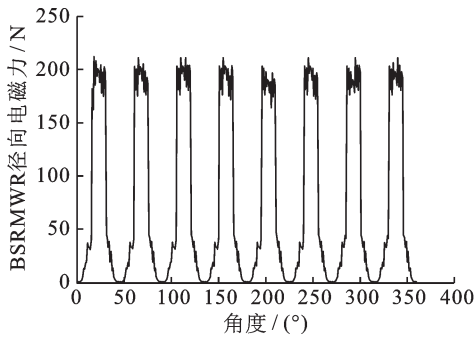
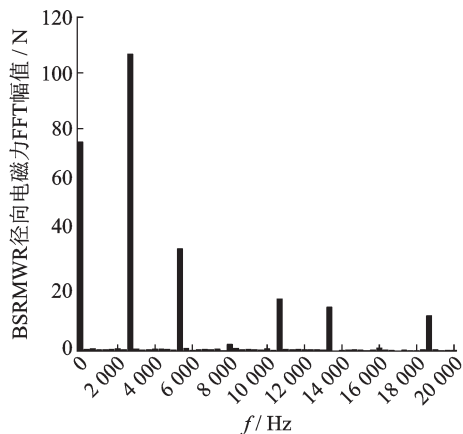


图 4 BSRMWR 电磁仿真模型
Fig.4 BSRMWR electromagnetic simulation model



(a) Radial electromagnetic force of BSRMWR



(b) FFT analysis of radial electromagnetic force of BSRMWR

图 5 BSRMWR 径向电磁力及其 FFT 分析

Fig.5 BSRMWR radial electromagnetic force and its FFT analysis

5 BSRMWR 壳体应变能分析

BSRMWR 模态应变能是指利用刚度和振型

计算出反应模态情况的一种物理量,能精确映射出 BSRMWR 局部实际受力后的变化情况,有效分析电机壳体的刚度,在振动噪声分析方面有指导作用。

为了分析 BSRMWR 壳体的刚度情况,利用 Hypermesh 建立电机壳体的有限元网格模型,如图 6 所示。

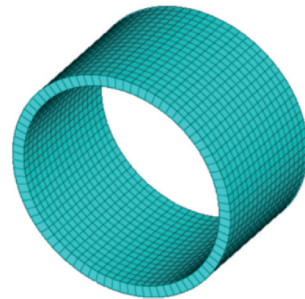


图 6 BSRMWR 壳体网格模型
Fig.6 BSRMWR shell mesh model

图 7 所示为整个电机定子网格模型。这里模拟壳单元的网格尺寸为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。为了模拟电机壳单元和定子实体单元之间的柔性连接,这里采用 RBE3 单元进行连接。材料属性见表 2。

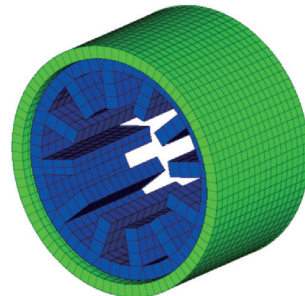


图 7 BSRMWR 网格模型
Fig.7 BSRMWR grid model

表 2 材料属性

Table 2 Material properties

名称	弹性模量/Pa	泊松比	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
定子铁心	2e11	0.3	7 860
定子外壳	1.2e11	0.25	7 340

模态应变能可以有效反映电机壳体结构的刚度,如图 8 所示为 BSRMWR 壳体第二、三、四、五阶振型的应变能云图。由图 8 可知:BSRMWR 壳体在不同的模态阶数下有不同的周向振型。各阶不同的振型对应着不同的应变能。区域的模态应变能越高,说明该区域越容易被激振,其结构刚度越弱^[26]。局部刚度不足容易引发较大的振动噪声,因此电机壳体结构有待优化。

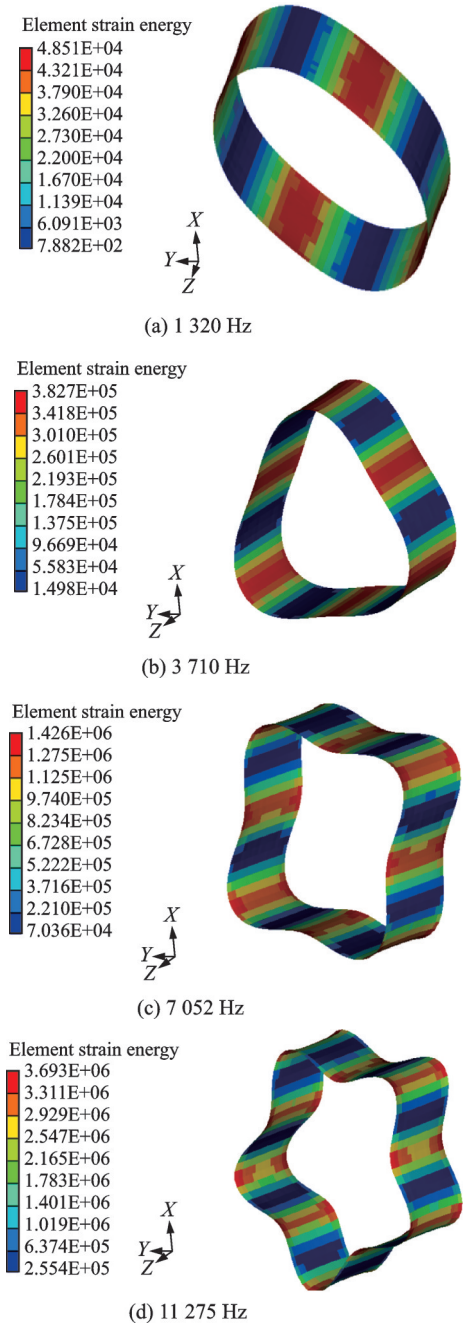


图8 BSRMWR壳体应变能分析
Fig.8 Strain energy analysis of BSRMWR shell

6 BSRMWR 振动噪声分析

对BSRMWR辐射噪声进行分析前,需要对电机进行振动特性分析。将JMAG中径向电磁力结果通过LMS Virtual.lab软件加载至电机定子齿作为振动位移响应的输入,对BSRMWR进行频响分析。

为了观测电机振动响应的特性,鉴于篇幅有限,这里选取了图9所示的3个具有代表性的位置A,B,C三处作为振动观测点,获得其表面振动响应结果,如图10所示。由图10可知,径向电磁力作用于定子齿,故定子齿处有较大的振动。同时结合图5(b),在径向电磁力幅值较大的频率处,其振动幅值也会较

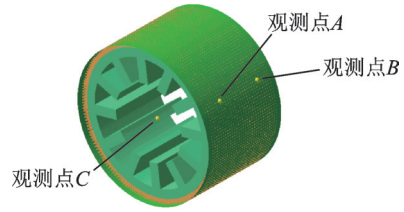


图9 BSRMWR振动观测点
Fig.9 BSRMWR vibration observation points

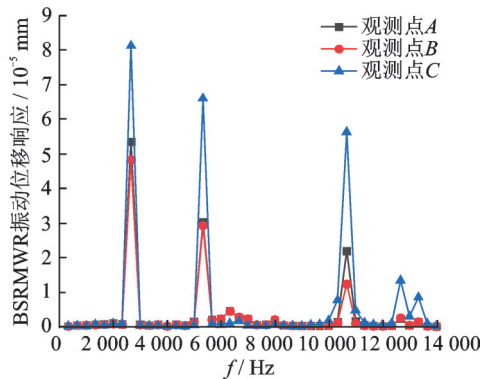


图10 BSRMWR振动响应
Fig.10 BSRMWR vibration response

大。在电机外壳上,以观测点A为例,当频率为2660、5318、10637 Hz时,振动位移响应取得较大峰值,分别为 5.34×10^{-5} 、 3.03×10^{-5} 、 2.19×10^{-5} mm。

为了分析BSRMWR在径向电磁力作用下声源的辐射能力,将BSRMWR振动响应计算结果作为声学响应的输入条件。图11(a)及图11(b)所示分别为BSRMWR的声学网格模型和声学有限元模型。

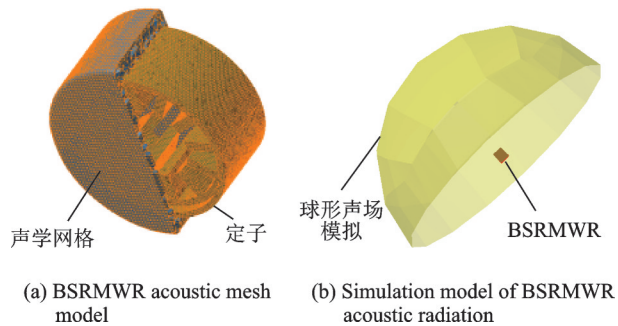


图11 BSRMWR声学仿真模型

Fig.11 BSRMWR acoustic simulation model

声功率可以反映声源的辐射能力,它只和声源有关,与观测点的位置无关,它是声源的一个物理属性。因此,前文在振动响应分析中选取的3个较为代表性的振动观测点,在声功率分析中声功率的大小与该观测点无关。

图12所示为BSRMWR的声功率,由图可知:在振动大的频率处同样也会出现声功率峰值,在2660、5318、10637 Hz频率处同样也会出现声功率峰值时,声功率分别为58.73、61.44、73.27 W。

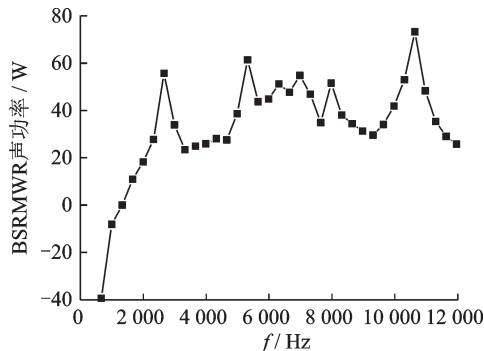


图 12 BSRMWR 声功率

Fig.12 BSRMWR sound power

7 BSRMWR 形貌优化设计

形貌优化是一种结构形状优化方法,其主要优化方案是在板壳类结构中优选行之有效的加强筋分布。此方法已被广泛应用于薄壁类零件的加强筋优化设计和改善各种冲压件机械性能,具有结构轻量化和改善应力集中的特点。

结构优化设计的数学模型由 3 部分组成:设计变量、目标函数和约束条件^[27]。可用式(7)和式(8)表述其数学模型^[28]

最小化函数

$$f(X)=f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (7)$$

约束条件为

$$\begin{cases} g_j(X) \leq 0 & j=1, 2, \dots, m \\ h_k(X) \leq 0 & k=1, 2, \dots, m_k \\ x_i^l \leq x_i \leq x_i^u & i=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (8)$$

式中: $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为形貌优化设计变量, $f(X)$ 为目标函数, $g(X)$ 和 $h(X)$ 为不等式约束, x_i^l 为变量的上限, x_i^u 为变量的下限。

对 BSRMWR 外壳进行形貌优化的过程即在设计区域由节点的扰动形成加强筋,达到提高结构固有频率的要求。如图 13 所示即为 BSRMWR 形貌优化流程。

在 BSRMWR 外壳作为研究对象的形貌优化中,电机外壳的形变量在优化设计迭代过程中不断变化,故这里将其作为设计变量。

由于结构的固有频率越低,越容易被外界激励源激励,所以考虑更多的是低阶模态对振动的影响。一般地说,当一阶模态频率得到提高后,后续模态频率也会有相应的提高,为了提高结构固有频率,这里以一阶固有频率作为优化目标。

考虑到电机壳体的加工工艺,在仿真优化软件 Optistruct 中调整加强筋参数时,工程上起筋宽度一般设置为网格单元平均尺寸的 1.5~2 倍,起筋角通常设为 60~75°。故这里以加强筋的尺寸作为约束条件,起筋宽度最小为 4 mm,起筋角度为 60°,起

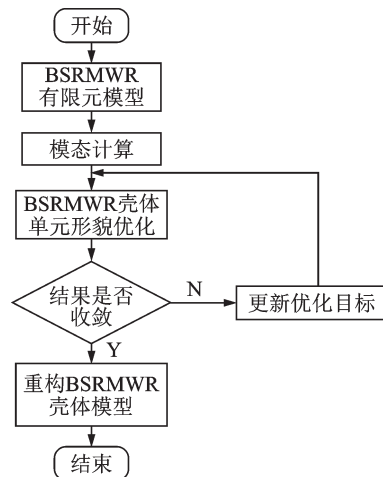


图 13 BSRMWR 形貌优化流程

Fig.13 Topography optimization process of BSRMWR

筋高度为 3 mm,通过优化软件迭代计算多次,得到如图 14 所示外壳形貌优化云图。图中颜色深浅表示 BSRMWR 电机壳体结构需要重构的区域。

根据形貌优化云图,对电机壳体的曲面进行结构改进,如图 15 所示。图 16 为改进后电机壳体模型,对改进后的电机模型进行结构模态分析,图 16

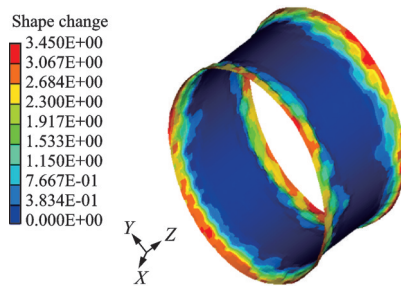


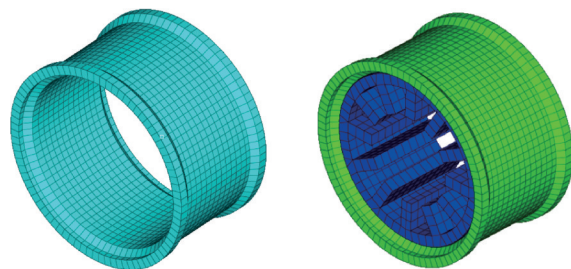
图 14 BSRMWR 壳体形貌优化云图

Fig.14 Topography optimization cloud map of BSRMWR shell



图 15 BSRMWR 优化后壳体

Fig.15 BSRMWR optimized shell



(a) Shell FEM after optimization (b) FEM model after optimization

图 16 BSRMWR 优化后有限元模型

Fig.16 FEM after BSRMWR optimization

(a)给出了BSRMWR改进后的壳体有限元网格模型,图16(b)为改进后整个电机定子有限元网格模型。以1阶模态频率为例,改进前1阶模态频率为2 549 Hz,改进后1阶模态频率为2 879 Hz,频率提高了13%,这说明优化后的模型显著提高了低阶模态频率,结构刚度得以提升。

对改进前后的BSRMWR模型进行基于模式的振动噪声分析。以图9中的振动观测点A为例,对比分析了相同观测点位置下优化前后BSRMWR的振动位移响应曲线,如图17所示。由图17可知,在振动较大的频率处振动位移得到了明显的抑制。在频率为2 660、5 318、10 637 Hz处,振动位移响应优化前后分别降低了约85%、40%和80%。

图18对比了优化前后BSRMWR在噪声抑制方面取得的效果。由图18可知,当频率为2 660、5 318、10 637 Hz时,声压级分别降低了4.3、4.9、5.7 dB,这在工程方面效果较为理想。

为进一步分析BSRMWR单位时间内由于振

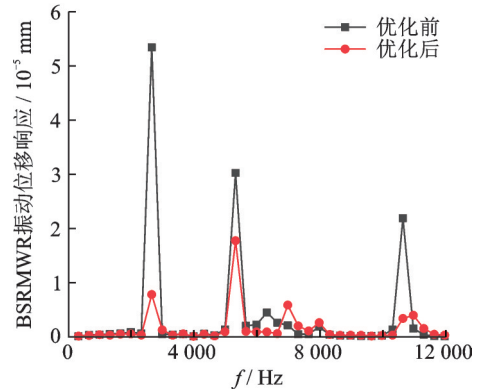


图17 BSRMWR优化前后振动位移响应

Fig.17 Vibration displacement response before and after optimization of BSRMWR

动引发的声波产生的声能量,图19给出了BSRMWR优化前后的声功率,发现形貌优化的方案在噪声抑制方面取得了较好效果。在频率为2 660、5 318、10 637 Hz时,声功率分别降低了约7%、8%和15%。

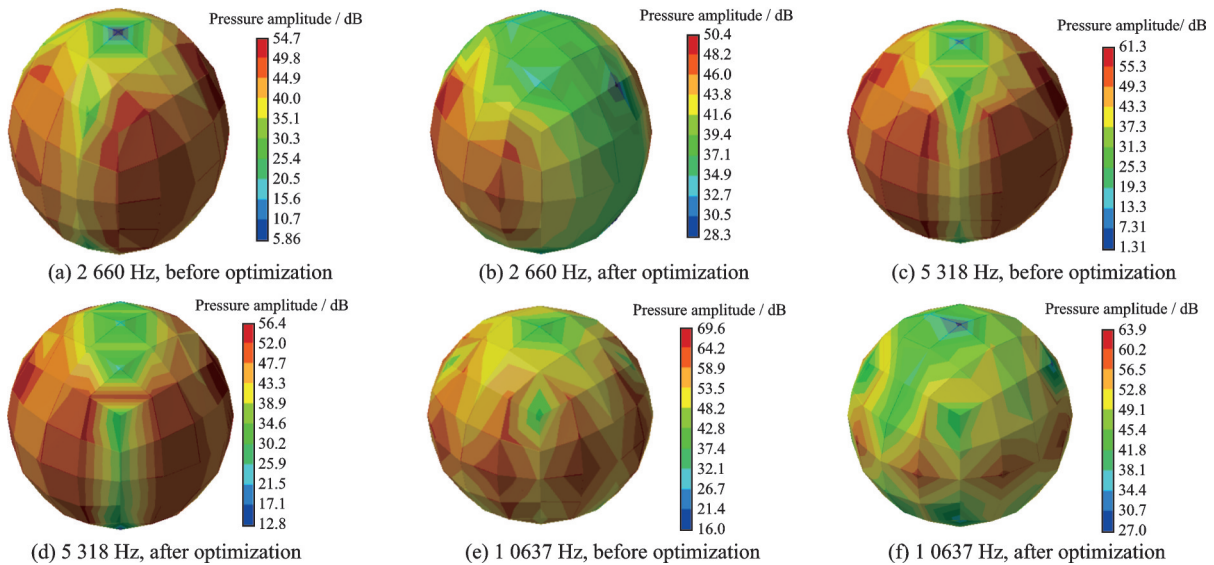


图18 BSRMWR声压云图优化前后对比

Fig.18 Comparison of BSRMWR sound pressure cloud map before and after optimization

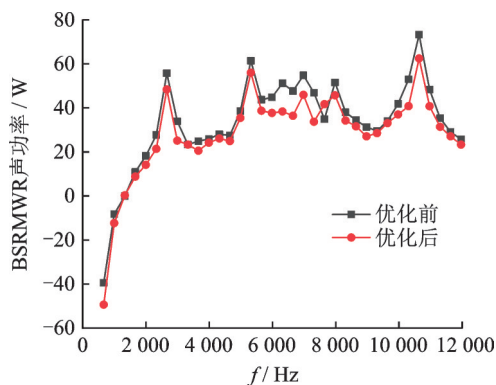


图19 BSRMWR优化前后声功率

Fig.19 Sound power before and after BSRMWR optimization

8 结 论

本文研究了BSRMWR在径向电磁力作用下的振动噪声,针对BSRMWR振动噪声较大的问题,利用工程应用中的形貌优化来对电机壳体进行改进。通过优化前后对比分析可以得到如下结论:

(1)在同样的径向电磁力下,形貌优化后BSRMWR的振动位移响应有明显改善。在径向电磁力幅值所对应的频率处振动幅值降低了 2.55×10^{-5} mm。同时,声学响应特性也取得了显著的抑制效果,声压级平均降低了约5 dB。

(2)从工艺角度考虑,优化后的电机模型外壳结构为凸起的加强筋,具有较好的工艺性。

(3)本文以一阶模态频率作为优化目标,后续模态频率也得到了相应的提高,初步取得了较为理想的效果。基于此进一步研究以多阶模态频率作为优化目标是未来的一个研究方向。

参考文献:

- [1] 耿涛, 庞瀚文, 孙建忠. 开关磁阻电机的定子振动分析[J]. 微电机, 2019, 52(11): 42-46, 92.
GENG Tao, PANG Hanwen, SUN Jianzhong. Stator vibration analysis of switched reluctance motor[J]. Micromotors, 2019, 52(11): 42-46, 92.
- [2] 张慧英, 汪旭东, 高彩霞. 减小开关磁阻电机转矩脉动、噪声和振动方法研究综述[J]. 微电机, 2009, 42(8): 65-68.
ZHANG Huiying, WANG Xudong, GAO Caixia. A review of methods for reducing torque ripple, noise and vibration of switched reluctance motors[J]. Micromotor, 2009, 42(8): 65-68.
- [3] 颜宁, 曹鑫, 张蕾, 等. 基于直接转矩控制的开关磁阻电机模型预测控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5446-5453.
YAN Ning, CAO Xin, ZHANG Lei, et al. Model predictive control method of switched reluctance motor based on direct torque control[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2017, 37(18): 5446-5453.
- [4] MAKINO H, KOSAKA T, MATSUI N. Digital PWM-control-based active vibration cancellation for switched reluctance motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 4521-4530.
- [5] 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.
- [6] CONG M, QU L, MITRA R, et al. Vibration and torque ripple reduction of switched reluctance motors through current profile optimization[C]//Proceedings of 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). [S.l.]: IEEE, 2016.
- [7] CHAI J Y, LIAW C M. Reduction of speed ripple and vibration for switched reluctance motor drive via intelligent current profiling[J]. Electric Power Applications Iet, 2010, 4(5): 380-396.
- [8] 吴建华. 基于物理模型开关磁阻电机定子模态和固有频率的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004(8): 112-117.
WU Jianhua. Research on stator mode and natural frequency of switched reluctance motor based on physical model[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2004(8): 112-117.
- [9] ISFAHANI A H, FAHIMI B. Comparison of mechanical vibration between a double-stator switched reluctance machine and a conventional switched reluctance machine[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 293-296.
- [10] ISFAHANI A H, FAHIMI B. Vibration analysis of a double-stator switched reluctance machine[C]//Proceedings of 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). [S.l.]: IEEE, 2018.
- [11] ELAMIN M, YASA Y, SOZER Y, et al. Effects of windows in stator and rotor poles of switched reluctance motors in reducing noise and vibration[C]// Proceedings of 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). [S.l.]: IEEE, 2017.
- [12] 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.
- [13] GAN C, WU J, SHEN M, et al. Investigation of skewing effects on the vibration reduction of three-phase switched reluctance motors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(9): 1-9.
- [14] 孙玉坤, 林文威, 袁野, 等. 磁悬浮开关磁阻电机二阶滑模直接转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(10): 67-76, 86.
SUN Yukun, LIN Wenwei, YUAN Ye, et al. Second-order sliding mode direct torque control of magnetically levitation switched reluctance motor[J]. Journal of Electrical Machines and Control, 2018, 22(10): 67-76, 86.
- [15] 李鹏, 杨艳, 吴旭. 混合定子齿无轴承开关磁阻电机定子振动特性研究[J]. 微电机, 2017, 50(4): 11-16.
LI Peng, YANG Yan, WU Xu. Research on stator vibration characteristics of bearingless switched reluctance motor with hybrid stator teeth[J]. Micromotor, 2017, 50(4): 11-16.
- [16] 杨艳. 无轴承开关磁阻电机的减振控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5910-5917.
YANG Yan. Vibration reduction control strategy of bearingless switched reluctance motor[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2014, 34(33): 5910-5917.
- [17] 杨艳, 邓智泉, 张倩影, 等. 控制策略对无轴承开关磁阻电机定子振动的影响[J]. 航空学报, 2010, 31(10): 2010-2017.
YANG Yan, DENG Zhiquan, ZHANG Qianying, et al. The influence of control strategy on the stator vibra-

- tion of bearingless switched reluctance motor[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(10): 2010-2017.
- [18] 陈杰, 邓智泉, 杨艳. 无轴承开关磁阻电机质量偏心振动补偿[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(18): 13-20.
CHEN Jie, DENG Zhiquan, YANG Yan. Mass eccentric vibration compensation of bearingless switched reluctance motor[J]. *Transactions of the China Electrotechnical Society*, 2016, 31(18): 13-20.
- [19] 李雪林, 孙玉坤, 陈佳驹. 基于自抗扰控制器和坐标变换的BSRM转子不平衡振动补偿控制[J]. *现代电子技术*, 2017(19): 153-157.
LI Xuelin, SUN Yukun, CHEN Jiaju. BSRM rotor unbalance vibration compensation control based on active disturbance rejection controller and coordinate transformation [J]. *Modern Electronic Technology*, 2017(19): 153-157.
- [20] 孙剑波. 开关磁阻电机的减振降噪和低转矩脉动研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
SUN Jianbo. Research on switched reluctance motor's vibration reduction, noise reduction and low torque ripple[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [21] 李增刚, 詹福良. *Virtual. Lab Acoustics声学仿真计算高级应用实例*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [22] 詹福良, 李增刚. *Virtual. Lab Acoustic声学仿真计算从入门到精通*[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.
- [23] 方源, 章桐, 于蓬, 等. 切向电磁力对电动车动力总成振动噪声的影响分析[J]. *电机与控制学报*, 2016, 20(5): 90-95.
FANG Yuan, ZHANG Tong, YU Peng, et al. Analysis of the influence of tangential electromagnetic force on vibration and noise of electric vehicle powertrain[J]. *Journal of Electrical Machines and Control*, 2016, 20(5): 90-95.
- [24] 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 Xiaohua, HUANG Surong, LI Liangzi. Calculation and analysis of vibration and noise of permanent magnet synchronous motors for electric vehicles [J]. *Journal of Electrical Machines and Control*, 2013, 17(8): 37-42.
- [25] 韩雪岩, 李春雷, 张新刚, 等. 永磁辅助同步磁阻电机振动噪声准解析计算及影响因素分析[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(11): 1-8.
HAN Xueyan, LI Chunlei, ZHANG Xingang, et al. Quasi-analytical calculation of vibration and noise of permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor and analysis of influencing factors[J]. *Journal of Electrical Machines and Control*, 2020, 24(11): 1-8.
- [26] 周权, 包伟, 徐艳平. 基于动刚度和模态应变能的某车NVH性能改善研究[J]. *汽车科技*, 2013(6): 56-62.
ZHOU Quan, BAO Wei, XU Yanping. Research on NVH performance improvement of a vehicle based on dynamic stiffness and modal strain energy [J]. *Automotive Technology*, 2013(6): 56-62.
- [27] 张胜兰, 郑冬黎, 郝琪. 基于HyperWorks的结构优化设计技术[M]. 机械工业出版社, 2007.
- [28] 刘志恩, 王亚磊, 柴鹏飞, 等. 挖掘机驾驶室低频结构噪声分析与优化[J]. *应用声学*, 2021, 40(2): 182-187.
LIU Zhien, WANG Yalei, CHAI Pengfei, et al. Analysis and optimization of low-frequency structural noise in the excavator cab [J]. *Applied Acoustics*, 2021, 40(2): 182-187.

(编辑: 孙静)