

双定子单转子超声电机转子结构的优化设计

伍旺贤¹, 纪跃波¹, 陈美谦², 王涛¹

(1. 集美大学机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了避免超声电机工作时, 转子也发生振动, 以双定子单转子行波型旋转超声电机为研究对象, 建立了该电机转子的参数化有限元模型, 运用灵敏度分析的方法, 分析了转子的模态频率对各个结构参数的灵敏程度。在此基础上, 运用有限元软件 ANSYS 的结构优化分析工具, 对转子进行了优化设计。优化后的转子的模态频率远离了电机定子的工作频率。

[关键词] 超声电机; 双定子单转子; 频率分离; 参数化设计

[中图分类号] TM 359.9

Optimization Design of Rotor of Ultrasonic Motor with Double Stators and Single Rotor

WU Wang-xian¹, JI Yue-bo¹, CHEN Mei-qian², WANG Tao¹

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Marine Engineering Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In observation of investigating the vibration of the rotor resulted from the running of an ultrasonic motor, an ultrasonic motor with double stators and single rotor was taken as a reference. A parametric finite element model of the rotor of traveling wave ultrasonic motor with double stators and single rotor was built. The sensitivity of rotor's modal frequency to the rotor's structural parameters was calculated based on sensitivity analysis method. ANSYS was further employed for optimization design of the rotor in terms of sensitivity analysis. Results demonstrate that optimization design of the rotor is effective in keeping the modal frequency of rotor out of the working frequency of ultrasonic motor.

Keywords: ultrasonic motor (USM); double stators and single rotor; frequency separation; parametric; optimization design

0 引言

行波型旋转超声电机具有转速低、转矩大、响应速度快、功率密度大等优点, 被广泛应用于航空航天、机器人、生物工程等领域^[1-3]。为了进一步增大旋转超声电机的输出转矩, 同时又不过于增加超声电机的体积, 则在单定子单转子旋转超声电机的基础上设计出了双定子单转子型旋转超声电机^[4]。为了使电机转子产生较大的弹性变形, 以增大定、转子间的接触面积, 减小定、转子间的接触应力, 同时也减小定、转子间的径向滑移, 转子的腹板一般设计得很薄^[5]。若转子的共振频率与

[收稿日期] 2015-08-21

[修回日期] 2015-09-15

[基金项目] 福建省自然科学基金资助项目(2013J01200)

[作者简介] 伍旺贤(1990—), 男, 硕士生, 从事先进机电产品、工艺与装备研究。通信作者: 陈美谦(1972—), 女, 硕士, 副教授, 主要从事电气自动化, 计算机智能监控研究, E-mail: cmq888@163.com。

定子的工作频率相同或在其附近，则电机工作时，转子会发生高频振动且会产生较大的振幅，这样会加剧转子的疲劳破裂，大大减少转子的使用寿命；同时也会影响转子运行的稳定性，加大转子的阻尼损耗。因此需要对电机转子进行合理的设计，使电机转子的模态频率远离电机的工作频率。当转子在定子工作频率 $\pm 2000\text{ Hz}$ 范围内没有共振频率时，可认为定子的振动对转子不产生影响^[6]。文献[7-8]以增大定子和转子间的接触面积，从而减小定子与转子间的接触应力为目的，对旋转型行波超声电机的转子进行了设计；文献[9]基于响应面模型与自适应遗传算法对中空型环形超声电机转子进行了优化设计。但是这些文献都忽略了转子的模态频率是否在电机的工作频率附近，为此，本文以定子直径为60 mm的双定子单转子行波型旋转超声电机为研究对象，以增大电机转子的模态频率与定子的工作频率差为目的，采用有限元法对该电机转子进行优化设计。

1 电机的结构

双定子单转子超声电机结构如图1所示。预压力通过腹板施加在定子基座上，预压力的大小通过调整调节垫片来改变。其工作原理是上、下两个相同的定子夹持中间的转子，在特定频率和相位差的电压信号的激励下，在两个定子中产生行波，同时驱动中间的转子做旋转运动。

该行波型旋转超声电机定子的工作模态为 B_{09} ，通过对定子进行有限元模态分析和谐响应分析^[10]，可得定子的幅频特性曲线，如图2所示，由图2可知定子的 B_{09} 模态的谐振频率为37.650 kHz。

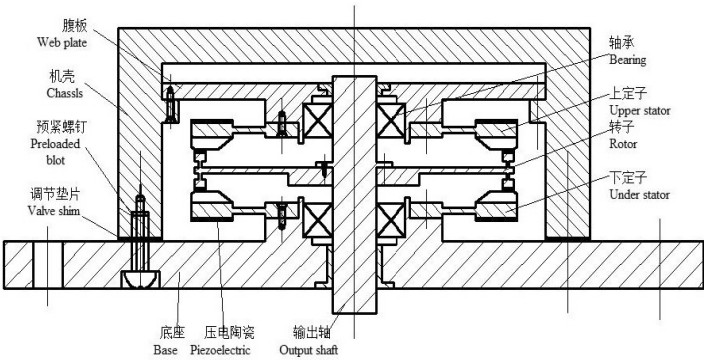


图1 双定子单转子超声波电机结构
Fig.1 The structure of an ultrasonic motor with double stators and single rotor

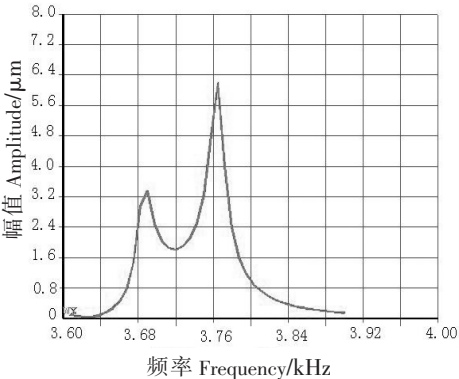


图2 定子的幅值-频率特性
Fig.2 The amplitude-frequency characteristic of the stator

2 电机转子的有限元模型

双定子单转子超声电机转子是一个上下表面关于转子中面对称的圆盘，转子结构的截面图如图3所示。其中 R_3 、 R_4 分别为转子的内径和外径； H_1 为基座的高度； H_b 为腹板的高度； B 和 H_h 分别为柔性环节的宽度和高度； H_d 为黏贴摩擦层区的高度。选定的转子初始结构参数如表1所示。转子材料为硬铝，其弹性模量 $E = 7.3 \times 10^{10}\text{ Pa}$ ，泊松比 $\nu = 0.31$ ，密度 $\rho = 2780\text{ kg/m}^3$ 。

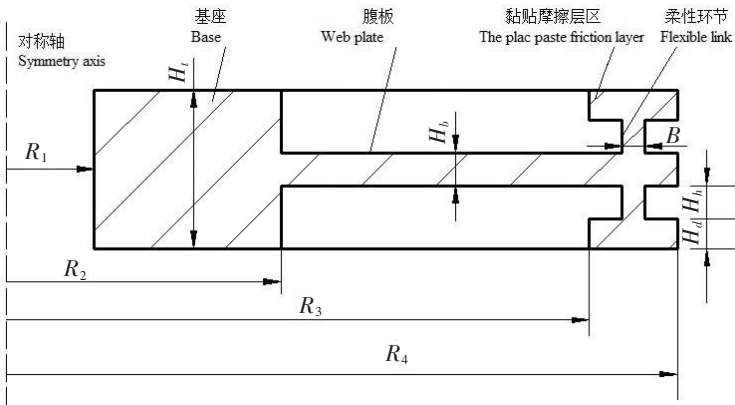


图3 双定子单转子超声电机转子的截面图
Fig.3 The rotor's section view of an ultrasonic motor with double stators and single rotor

根据表 1 中的结构尺寸，通过 ANSYS 参数设计语言（APDL）编程，建立转子的参数化三维有限元模型，如图 4 所示。选用的有限元单元为 SOLID95 三维实体单元，该单元特点是适应复杂的形状且有较高的精确，可提供不同的输出项。

表 1 双定子单转子超声电机转子的基准尺寸
Tab.1 The rotor's reference dimension of an ultrasonic motor with double stators and single rotor

mm									
R_1	R_2	R_3	R_4	H_i	H_b	B	H_h	H_d	
4.0	12.0	27.5	29.5	6.0	1.0	0.5	1.0	1.0	

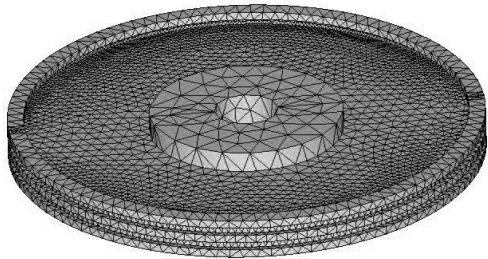


图 4 双定子单转子超声电机转子的有限元模型
Fig.4 A finite element model for the rotor in an ultrasonic motor with double stators and single rotor ultrasonic

3 转子结构参数的灵敏度分析及选择

转子的振动模态取决于转子的结构形式、尺寸、材料等多方面的因素^[11]。因此，在转子材料一定的情况下，通过改变转子结构的尺寸参数，会得到不同的设计方案，对设计方案进行对比，从而得到最优的结构参数。转子的结构参数很多，各个结构参数对转子模态频率的影响程度并不相同。为此，可采用灵敏度分析的方法来分析转子的模态频率对各结构参数的敏感程度，根据灵敏度调整和修改那些对模态频率影响大的结构参数，这样可避免结构设计的盲目性，从而提高设计的效率。

基于有限元法的灵敏度分析可采用全局差分法、半解析法和数值解析法^[12]。本文采用全局差分法来进行灵敏度分析。全局差分法是有限元法求解灵敏度较早的方法^[13]，这种方法是将有限元程序当作“黑匣子”，通过两次有限元计算得到转子模态频率对一个设计变量的灵敏度。若转子的设计变量为 d_1, d_2, \dots, d_n ，由转子的有限元模型可得其 i 阶对应的特征方程：

$$K(d_1, d_2, \dots, d_n) \varphi_i(d_1, d_2, \dots, d_n) - \omega_i^2 M(d_1, d_2, \dots, d_n) \varphi_i(d_1, d_2, \dots, d_n) = 0, \tag{1}$$

式中： $\varphi_i(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 为按质量归一化的第 i 阶的振型， ω_i 为第 i 阶的模态频率， $K(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 为转子的刚度矩阵， $M(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 为转子的质量矩阵。

假设某个设计变量 Δd ，则按式（1）做如下的有限元计算：

$$\begin{aligned} &K(d_1 + \Delta d_1, d_2, \dots, d_n) \varphi_i(d_1 + \Delta d_1, d_2, \dots, d_n) - \omega_i^2(d_1 + \Delta d_1, d_2, \dots, d_n) \times \\ &\quad M(d_1 + \Delta d_1, d_2, \dots, d_n) \varphi_i(d_1 + \Delta d_1, d_2, \dots, d_n) = 0; \\ &K(d_1, d_2 + \Delta d_2, \dots, d_n) \varphi_i(d_1, d_2 + \Delta d_2, \dots, d_n) - \omega_i^2(d_1, d_2 + \Delta d_2, \dots, d_n) \times \\ &\quad M(d_1, d_2 + \Delta d_2, \dots, d_n) \varphi_i(d_1, d_2 + \Delta d_2, \dots, d_n) = 0; \\ &\quad \dots \\ &K(d_1, d_2, \dots, d_n + \Delta d_n) \varphi_i(d_1, d_2, \dots, d_n + \Delta d_n) - \omega_i^2(d_1, d_2, \dots, d_n + \Delta d_n) \times \\ &\quad M(d_1, d_2, \dots, d_n + \Delta d) \varphi_i(d_1, d_2, \dots, d_n + \Delta d) = 0. \end{aligned}$$

然后，计算转子的模态频率对各设计变量的灵敏度：

$$\begin{aligned} S_{d_1} &= \partial \omega_i / \partial d_1 = (\omega_i(d_1 + \Delta d_1, d_2, \dots, d_n) - \omega_i(d_1, d_2, \dots, d_n)) / \Delta d; \\ S_{d_2} &= \partial \omega_i / \partial d_2 = (\omega_i(d_1, d_2 + \Delta d_2, \dots, d_n) - \omega_i(d_1, d_2, \dots, d_n)) / \Delta d; \\ &\quad \dots \\ S_{d_n} &= \partial \omega_i / \partial d_n = (\omega_i(d_1, d_2, \dots, d_n + \Delta d_n) - \omega_i(d_1, d_2, \dots, d_n)) / \Delta d. \end{aligned}$$

由于转子结构参数 d_i 相差很大，则可用相对灵敏度来表示，其相对灵敏度可表示为

$$S_{d_j}^R = (\partial \omega_i / \omega_i) / (\partial d_i / d_i) = (d_i / \omega_i) \partial \omega_i / \partial d_i.$$

由于黏贴摩擦层区的宽度由与转子相接触的定子齿宽决定，则转子的结构参数 R_4 与 R_3 不能改变。

对转子的其他各个结构参数分别增加2%，求解转子的模态频率对结构参数的灵敏度，如图5所示。

由图5可知转子的模态频率对结构参数 R_1 、 R_2 、 H_b 、 H_d 、 B 、 H_h 的相对灵敏度较大，则选这些参数作为转子的优化设计变量。

4 转子结构的优化设计

利用有限元软件 ANSYS 中的零阶方法对转子结构进行优化^[14]，优化过程为：

- 1) 建立转子的初始的参数化有限元模型，进行静力学分析，提取转子的总的体积。
 - 2) 对转子进行模态分析，并手动提取（* Get, freqn, mode, n, freq）在定子 B_{09} 模态频率（37.650 kHz）左右的转子的两个模态频率。
 - 3) 生成优化分析的文件。
 - 4) 进入优化分析模块，把生成的优化分析文件导入 ANSYS 中，并且指定设计变量（DVS），同时设定其变动范围： R_1 （2.5 ~ 8 mm）， R_2 （11 ~ 23.5 mm）， H_b （0.3 ~ 2 mm）， H_d （0.4 ~ 2 mm）、 B （0.3 ~ 1.5 mm）、 H_h （0.4 ~ 3 mm）；指定其状态变量及其范围：状态变量有两个 SV_1 、 SV_2 ，分别为定子工作频率左侧和右侧的转子共振频率。 SV_1 设定其上线为 35.650 kHz，不设定其下限， SV_2 设定其下限为 39.650 kHz，不设定其上限；指定目标函数（OBJ）为静力学分析中得到转子的体积（VOLUME），目标函数的作用是在优化迭代分析过程中，在符合约束条件的情况下尽量减小转子的体积，并设定其容差为 0.01。
 - 5) 选择优化分析工具，本文选择“子问题近似法”，并指定最大循环次数为 30 次，指定优化分析控制方式，本文选择输出所有系列进行优化分析。
- 程序经过 15 次的优化迭代，找到了符合要求的转子的结构尺寸，其中第 12 个序列数为最优。转子优化后的尺寸如表 2 所示，优化前后的目标函数及转态变量如表 3 所示。从表 3 可以看出，优化后左、右转子的两个共振频率远离了电机的工作频率，优化后转子的体积比优化前略有增加。

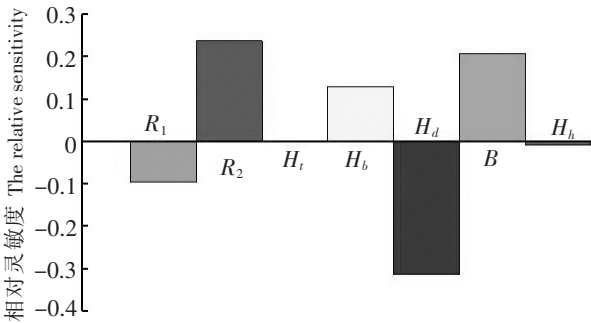


图5 转子模态频率对转子结构参数的相对灵敏度

Fig.5 The sensitivity of the rotor’s modal frequency to its structural parameters

表 2 转子优化后的结构参数

Tab.2 The structural parameters of an optimized rotor

mm								
R_1	R_2	R_3	R_4	H_t	H_b	B	H_h	H_d
6.52	18.83	27.50	29.50	6.00	1.15	1.37	1.92	1.18

表 3 转子的目标函数和转态变量

Tab.3 The objective function and status variables of rotor

状态 Status	OBJ(转子体积 Rotor’s volume/ m^3)	SV_1/Hz	SV_2/Hz
优化前 Before optimization	5.58×10^{-6}	37504	37723
优化后 After optimization	6.86×10^{-6}	35486	41875

转子各个参数优化迭代的寻优的过程如图6所示。转子在定子工作频率左右的两个模态频率值随迭代次数 n 的变化情况如图7所示。由图6、图7可见在第12个序列中，转子的两个频率都远离定子

的工作频率 (37.650 kHz)。

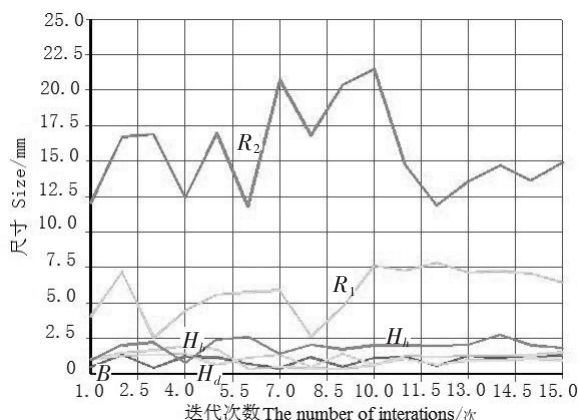


图 6 转子各个参数优化迭代过程

Fig.6 The iteration process for rotor's parameters

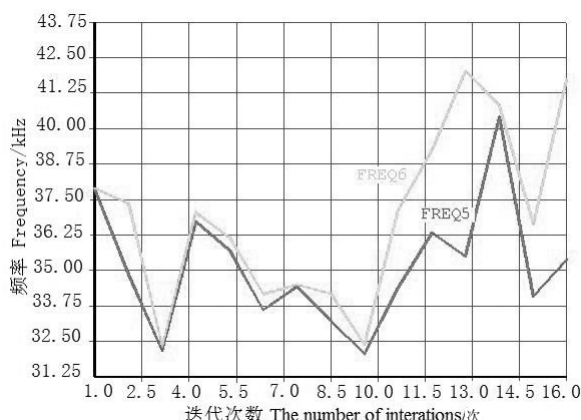


图 7 转子模态频率随迭代次数的变化过程

Fig.7 Variation of the rotor's modal frequency with the number of iterations

5 结束语

本文以双定子单转子行波型旋转超声电机为研究对象,以使转子的模态频率远离定子的的工作频率为约束条件,以使转子的体积最小化为目标函数。在灵敏度分析的基础上,对参数化建模的转子进行了优化设计,优化设计结果达到了预期目标。该种优化方法的效率高,计算精度高,可靠性好,且通用性强,可用于超声电机其他模块的优化设计中。

[参考文献]

- [1] 胡敏强,金龙,顾菊萍. 超声电机原理与设计. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] BEKIROGLU E. Ultrasonic, motors; their models, controls and application. *Journal of Electroceramics*, 2008, 20(3/4): 277-286.
- [3] 李小牛,周盛强,姚志远,等. 超声电机在磁悬浮飞轮锁紧装置中的应用. *振动、测试与诊断*, 2013, 33(4): 555-559.
- [4] RAJAGOBALAN R, TOORU N. A new method of improving the torque of a travelling wave ultrasonic motor//*Proceedings of the 1999 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics*. Atlanta, USA: IEEE, 1999: 109-113.
- [5] 赵淳生. 超声电机技术与应用. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] 曾劲松,陈超,赵淳生. 解决超声电机定子模态混叠的有效方法. *压电与声光*, 2006, 28(6): 722-724.
- [7] 莫岳平,胡敏强. 行波超声波电动机转子的设计. *微特电机*, 2002(2): 9-13.
- [8] 纪跃波,王涛. 双定子单转子旋转型行波超声电动机转子的优化设计. *维特电机*, 2015, 43(6): 33-36.
- [9] 牛子杰,孙志俊. 基于响应面模型与自适应遗传算法的中空型行波超声电机柔性转子结构优化. *中国电机工程学报*, 2014, 34(30): 5378-5385.
- [10] 伍旺贤,纪跃波. 行波型旋转超声电机定子振动特性仿真. *集美大学学报 (自然科学版)*, 2015, 20(4): 292-296.
- [11] 陈超,曾劲松,朱华,等. 微型行波超声电机定子的参数优化设计. *中国机械工程*, 2009, 20(5): 68-72.
- [12] 梁醒培,王辉. 基于有限元法的结构优化设计—原理与工程应用. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [13] HAFTKA R T, ADELMAN H M. Recent development in structural sensitivity analysis. *Structural optimization*, 1989(1): 137-151.
- [14] 段进,倪栋,王国业. ANSYS10.0 结构分析从入门到精通. 北京: 兵器工业出版社, 2006.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)