



行波型超声波电机主要由转子1、摩擦层2、定子3和压电陶瓷4组成，如图1所示。进一步，通过Ansys进行接触仿真分析，根据定子和转子最大接触应力分布图，判断接触应力分布均匀程度，分析4个结构参数即转子腹板厚度 d ，柔性部分高度 h ，柔性部分宽度 a 和定子腹板厚度 k 的变化对接触状态影响趋势和程度，并进行参数优化以达到减小接触区域磨损，和提高电机机械性能的目的。为了使定子更多的能量传递给转子，转子外径通常与定子外径相近^[10-11]，本研究选取定子外径60 mm、内径18 mm，转子外径59 mm、内径18 mm，摩擦片厚度0.5 mm建立行波型超声波电机3D结构模型，如图2所示。

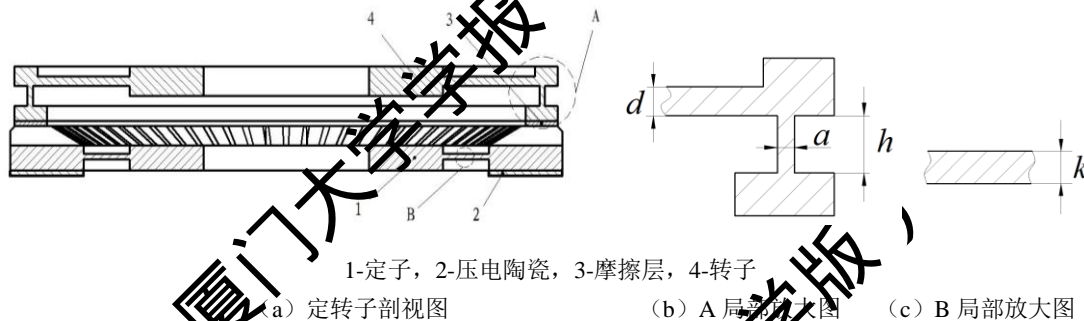


图1 定转子结构图

Fig. 1 Stator and rotor structure diagram

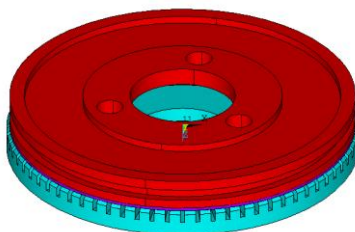


图2 定转子3D结构模型

Fig. 2 3D structure model of stator and rotor

1.2 三维模型生成

应用有限元计算软件Ansys建立超声波电机的接触模型如图2所示。选择三维20节点单元solid95对定子和转子进行网格划分，根据接触面接触对的设置方法将定子表面设置为目标面，将摩擦层与定子接触的下表面设置为接触面，并设定接触对的摩擦系数为 $\mu=0.15$ 。根据电机工作的实际状况，对定子的螺钉孔进行全约束，对转子施加径向约束，使其不能发生平动，在转子的上表面施加预压力 $F=120\text{ N}$ ，使定转子充分接触以传递转矩。由于定子上的压电陶瓷在静电力作用下的作用较小，所以可忽略考虑压电陶瓷对接触应力分布产生的影响，超声电机构件的材料参数如表1所示，各个部分参数的选择如表2所示。

表1 定转子材料主要参数

Tab.1 Main parameters of stator and rotor material



名称	材料	弹性模量 / (10^{10}N m^{-2})	密度 / (kg m^{-3})	泊松比
定子	磷青铜	10.10	8 624	0.37
摩擦层	聚四氟乙烯	0.12	2 500	0.37
转子	硬铝合金	7.30	2 780	0.31

表 2 电机尺寸分析选择表

Tab.2 Analysis table of the size of the motor

d/mm	h/mm	a/mm	k/mm
0.4	1.0	0.3	0.6
0.6	1.4	0.4	1.0
0.8	1.7	0.5	1.4
1.0	2.0	0.6	1.6
1.2	2.3	0.7	
1.4	2.6	0.8	

2 结果与分析

通过不同结构参数对接触状态的影响, 实现对超声电机的优化设计。

2.1 转子腹板厚度和柔性部分宽度的影响分析

取柔性部分宽度 a 和转子腹板厚度 d 为变量, 设定柔性部分高度为 $h=2\text{ mm}$, 定子腹板厚度为 $k=0.6\text{ mm}$ 。

接触面最大应力如图 3 和 4 所示。

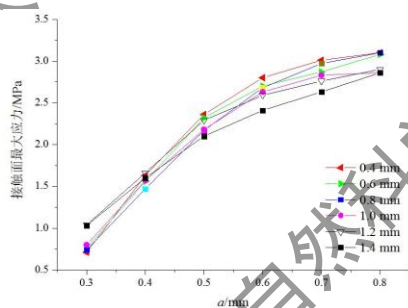


图 3 不同转子腹板厚度下柔性部分宽度与接触面最大应力关系图

Fig. 3 Relationship between width of flexible link and maximum contact stress under different rotor web thickness

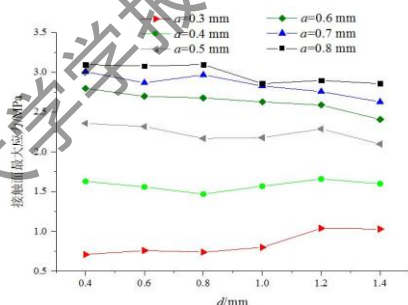




图4 不同柔性部分宽度下转子腹板厚度与接触面最大应力关系图

Fig. 4 Relationship between rotor web thickness and maximum contact stress under different flexible link widths

由图3和4可以得到以下结论:

1) 由图3可以得到, 定子腹板厚度不变时, 随着柔性部分宽度变大, 最大接触应力变大, 且变化趋势明显。其原因是在相同预压力下柔性部分宽度变大, 形变量变小, 定转子之间的接触面积减小, 故接触应力相应增大。

2) 由图4中可以得到, 随着转子腹板厚度变大, 最大接触应力呈无规律起伏变化, 且变化趋势不明显。其原因是在相同预压力下转子腹板厚度变大, 形变量增大, 但对接触面积影响较小, 故接触应力变化不明显。

进一步, 分析得到如图5所示的在不同柔性部分宽度下接触应力分布情况, 由此可以看出, 柔性部分宽度变大, 接触面积减小, 接触应力分布逐渐集中, 使超声电机磨损加剧。

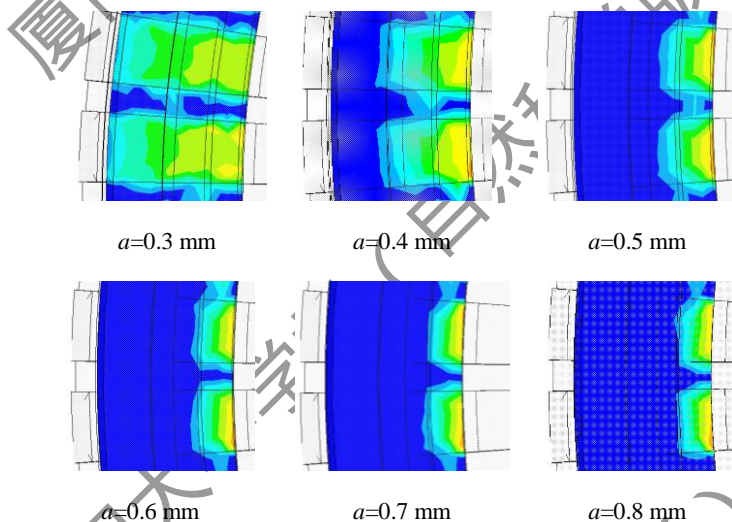


图5 柔性部分宽度变化(0.3~0.8)接触应力分布图

Fig. 5 Contact stress distribution of different flexible link widths

2.2 转子柔性部分宽度与高度的影响分析

取柔性部分宽度 a 和高度 h 为变量, 设定转子腹板厚度为 $d=1$ mm, 定子腹板厚度为 $k=0.6$ mm。接触面最大接触应力结果如图6和7所示。

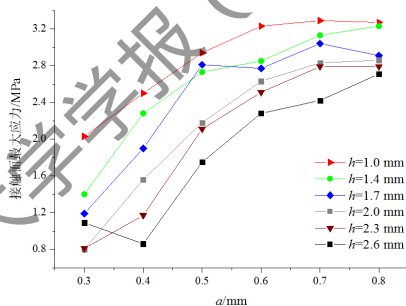


图6 不同柔性部分宽度下柔性部分宽度与接触面最大应力关系图



Fig. 6 Relationship between width of flexible link and maximum contact stress under different flexible link widths

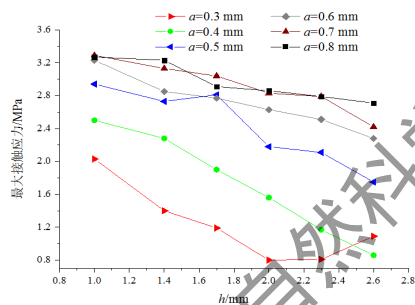


图 7 不同柔性部分宽度下柔性部分高度与接触面最大应力关系图

Fig. 7 Relationship between height of flexible link and maximum contact stress under different flexible link widths

由图 6 和 7 可以得到以下结论:

1) 由图 6 可以得到, 随着柔性部分宽度变大, 最大接触应力变大, 结论与 2.1 相同;

2) 由图 7 中可以得到, 随着转柔性部分高度变大, 最大接触应力变小, 且最大应力曲线逐渐呈现转折趋势。其原因是在相同预压力下柔性部分高度变大, 形变量增变, 接触面积变大, 且当 $a=0.3 \text{ mm}$ 时, 柔性部分高度出现最优解为 $h=2.0 \text{ mm}$ 。

进一步, 分析得到如图 8 所示在不同柔性部分的高度下接触应力分布情况, 由此可以看出, 柔性部分高度变大, 接触应力分布逐渐分散, 定子和转子接触均匀, 增加超声电机使用寿命。

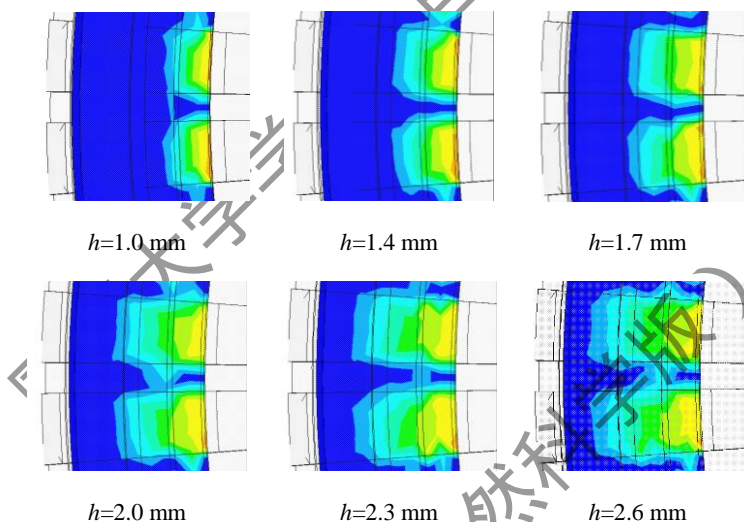


图 8 柔性部分高度变化(1.0-2.6)对应接触状态图

Fig. 8 Contact stress distribution of different flexible link heights

2.3 定子腹板厚度与转子沟槽筋板厚度对定、转子的接触影响分析

取柔性部分宽度 a 和定子腹板厚度 k 为变量, 设定转子腹板厚度为 $d=1 \text{ mm}$, 柔性部分高度 $h=2 \text{ mm}$ 。

接触面最大应力结果如图 9 所示。

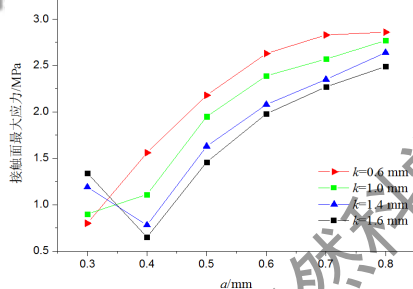


图9 不同定子腹板厚度下柔性部分宽度与接触面最大应力关系图

Fig. 9 Relationship between flexible link width and maximum contact stress under different stator web thickness

由图9可以得到以下结论:

1) 在相同柔性部分宽度情况下定子腹板厚度变大, 最大接触应力变小, 且变化趋势明显。其原因是相同预压力作用下定子腹板厚度变大, 定子形变量减小, 接触面积变大, 使定子和转子接触更均匀。

2) 随着柔性部分宽度变大, 最大接触应力变大, 结论与2.1相同, 但柔性部分宽度会出现最优值($a=0.4$ mm)。

2.4 定子腹板厚度与柔性部分高度对接触影响分析

取柔性部分高度 h 和定子腹板厚度 k 为变量, 设定转子腹板厚度为 $d=1$ mm, 柔性部分宽度为 $a=0.5$ mm。接触面最大应力结果如图10所示。

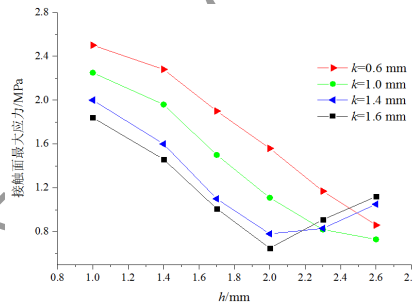


图10 不同定子腹板厚度下转子柔性部分高度与最大接触应力关系图

Fig. 10 Relationship between rotor flexible link height and maximum contact stress under different stator web thicknesses

由图10可以得到定子腹板厚度变大, 接触更均匀, 结论与2.3相同; 柔性部分高度变大, 最大接触应力减小, 且会出现最优值 ($h=2.0$ mm)。

3. 结论

本研究根据对超声电机整体结构4个主要尺寸参数的仿真分析, 可以得出电机定子和转子腹板厚度的变化, 对电机最大接触应力影响较小, 柔性部分宽度和高度对最大接触应力影响较大, 且柔性部分高度存在对应最优解, 柔性部分宽度越小, 接触越均匀。故设计时定子腹板厚度应为 $k=1.6$ mm, 转子腹板厚度为 $d=1$ mm, 进一步, 根据定子腹板厚度对柔性部分尺寸进行优化设计, 分别为柔性部分高度 $h=2$ mm, 柔性部分宽度 $a=0.4$ mm, 从而得到定转子最优结构尺寸, 提高电机机械性能, 降低工作时电机的磨损, 从而增



参考文献

- [1] 陈超, 赵淳生. 旋转型行波超声电机中三维接触机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21):149-155.
- [2] 罗辞勇, 卢斌, 张帆,等. 超声波电动机发展现状及应用[J]. 微特电机, 2011, 39(11):70-74.
- [3] 白东哲, 叶旭明, 王树逵, 等.超声波电机理论及应用[M].沈阳: 东北大学出版社, 2005:1-2.
- [4] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M].北京: 科学出版社, 2007:6-8.
- [5] 陈超, 赵淳生. 柔性转子对行波超声波电动机性能的影响[J]. 机械工程学报, 2008, 44(3):152-159.
- [6] 牛子杰, 孙志峻, 陈超,等. 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[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30):5378-5385.
- [7] 伍旺贤. 多定子旋转超声波电机建模与仿真研究[D]. 厦门: 集美大学, 2016:46-48.
- [8] 莫岳平, 胡敏强, 顾菊平,等. 行波超声波电动机转子的设计[J]. 微特电机, 2002, 30(2):9-10.
- [9] 胡敏强, 金龙, 顾菊平. 超声波电机原理与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [10] 陈超,赵淳生.柔性转子对行波超声波电动机性能的影响[J].机械工程学报,2008(3):152-159.
- [11]王光庆. 行波型超声波电机的若干关键问题研究[D].杭州: 浙江大学,2006:105-106.

Contact analysis of stator and rotor of traveling wave rotating ultrasonic motor

LIU Jiong, JI Yuebo*, ZHAO Binwu

(School of Mechanical and Energy Engineering, Ji Mei University, Xiamen 361021, China)



Abstract: In order to improve the mechanical performance of the traveling wave type ultrasonic motor, according to the overall structural characteristics of the ultrasonic motor, the main four parameters affecting the mechanical performance of the motor, namely the thickness of the rotor web, the thickness of the stator web, the width and height of the flexible part, are established on the basis of the vibration analysis theory. The motor analysis model is based on Ansys software simulation analysis. Under the same boundary conditions, the influence of each influence parameter on the contact stress distribution of the motor contact surface is optimized. The structural parameters are optimized to make the contact stress of the stator and rotor evenly distributed. The analysis shows that under the same pre-stress conditions, The thickness of the rotor web has the least influence on the contact stress distribution, while the width and thickness of the flexible part have the greatest influence. The optimal structural design parameters are the rotor web thickness of 1 mm, the flexible part height of 2 mm, and the flexible part width of 0.4 mm. The stator web has a thickness of 1.6 mm.

Key words: ultrasonic motor; contact analysis; flexible rotor; contact stress; finite element