

环形行波超声波电机面接触分析及转子结构优化设计^{*}

蒋春容, 薛鑫岩, 赵子龙, 陆旦宏
(南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 考虑转子的柔性变形, 建立了环形行波超声波电机定转子三维面接触模型, 分析了定子的振动、定转子的法向接触以及切向摩擦, 研究了定转子间的面接触特性及电机的转矩-转速特性。结果显示: 由于转子的柔性变形, 定转子间的接触区域形状是不规则的, 接触压力沿径向分布是不均匀的。通过将样机转矩-转速特性的理论计算值与试验测量值进行对比, 验证了三维面接触模型。在此基础上, 基于三维面接触模型, 分析柔性转子结构参数变化对定转子最大接触压力及电机转矩-转速特性的影响, 根据分析结果对转子结构进行优化, 实现了定转子间的最大接触压力明显下降, 并使电机的转矩-转速特性得以明显提升。

关键词: 超声波电机; 环形; 行波; 面接触; 结构优化

中图分类号: TM359.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)05-0039-07

doi: 10.12177/emca.2023.046

Surface Contact Analysis of Ring Type Traveling Wave Ultrasonic Motor and Optimization of the Rotor Structure^{*}

JIANG Chunrong, XUE Xinyan, ZHAO Zilong, LU Danhong
(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Taking the flexibility of rotor into account, a three-dimensional surface contact model of ring type traveling wave ultrasonic motors is developed. The stator vibration, the normal contact and the tangential friction between the stator and rotor are analyzed, and the surface contact mechanism between the stator and rotor and the torque-speed characteristics of the motor are investigated. The results show that owing to the flexibility of the rotor, the shape of contact area between the stator and the rotor is irregular and the contact pressure distribution along the radial direction is inhomogeneous. The three-dimensional surface contact model is validated by comparing the calculated torque-speed characteristics with the measured values of the prototype motor. Based on the three-dimensional surface contact model, the influences of the structural parameters of the flexible rotor on the maximum contact pressure and the torque-speed characteristics of the motor are analyzed. The structure of the rotor is optimized according to the analysis results, which achieves a significant reduction in the maximum contact pressure as well as an obvious improvement of torque-speed characteristics of the motor.

Key words: ultrasonic motor; ring type; traveling wave; surface contact; structure optimization

0 引言

超声波电机是一种新型微特电机, 与传统的

电磁电机相比, 具有结构简单、响应快、低速大转矩、不受电磁场干扰等优点^[1-2], 超声波电机在工业控制、航空航天和医疗器材等领域具有广阔的

收稿日期: 2023-01-05; 收到修改稿日期: 2023-02-23

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51777029); 南京工程学院校级科研基金项目(CKJB202103)

作者简介: 蒋春容(1983—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为超声波电机及驱动控制技术。

应用前景^[3-4]。

环形行波超声波电机是超声波电机中研究和应用较为广泛的。电机通电后,利用压电陶瓷的逆压电效应将电能转换为定子的高频振动,然后通过定转子的接触摩擦将定子的高频振动转化为转子的旋转运动。电机定转子间的接触摩擦状态对电机的输出性能具有关键影响^[5-6]。为了保持定转子间良好的接触状态,并使定转子间的预压力在接触面上分布更为合理,需要转子具有柔性结构从而具备柔性变形能力,即在轴向预压力的作用下,转子发生良好的轴向柔性变形^[7-8]。然而现有对超声波电机接触摩擦问题的研究,往往基于二维线接触模型^[9-13]来进行。在这类模型中,忽略了转子在轴向预压力作用下的柔性变形,认为定转子间的接触压力在径向方向上是均匀分布的,因此,只研究接触压力沿周向的分布情况,从而将定转子的接触摩擦问题简化为线接触问题。实际上,在定转子间轴向预压力的作用下,转子发生柔性变形后,定转子间的接触压力在径向方向上并不是均匀分布的^[14-16],即定转子间的接触实际上是面接触问题,线接触模型并不能反映定转子间真实的接触状态。因此,有研究学者提出了三维面接触模型。刘炯等^[17-18]基于有限元计算软件建立了定转子间三维面接触模型,分析了定子和转子结构参数变化对接触状态和接触应力分布的影响,但该模型只考虑电机未通电状态下定转子的静态接触,无法反映电机通电后定子产生行波运动时定转子的真实接触状态。对于考虑转子的柔性变形,研究电机在通电工作状态下定转子间的面接触特性,但这一方面仍需要做进一步探索。

本文考虑转子的柔性变形,利用有限元计算软件 ANSYS 建立定转子三维面接触模型,分析电机通电后定子产生行波运动情况下定转子间的面接触特性,并基于三维面接触模型研究转子结构参数变化对接触特性和电机输出性能的影响,优化柔性转子的结构参数,从而改善定转子间的接触状态和电机的输出性能。

1 定转子三维面接触模型及分析

考虑到定转子接触摩擦问题的复杂性,为简化分析,做如下假设:

- (1) 电机工作在稳定运行状态。
- (2) 忽略定转子间的接触对定子行波运动的影响。
- (3) 忽略轴承的摩擦损耗。

1.1 定子的振动

给压电陶瓷通电后,定子激发行波运动。考虑到定子和转子的圆环结构,采用静止不动的柱坐标系 $(\hat{r}, \hat{\theta}, \hat{z})$,定子中性面的轴向位移 w 随时间 t 变化的关系可表示为

$$w(\hat{\theta}, t) = A \cos(\omega t + n\hat{\theta}) \quad (1)$$

式中: A 为轴向振动的振幅; ω 为振动的角频率; n 为定子行波的波峰数。

为简化分析,可采用固定在定子行波波峰上的旋转柱坐标系 (r, θ, z) ,并有:

$$\begin{cases} r = \hat{r} \\ \theta = \hat{\theta} + \frac{\omega}{n}t \\ z = \hat{z} \end{cases} \quad (2)$$

在旋转柱坐标系下,式(1)可转化为

$$w(\theta) = A \cos(n\theta) \quad (3)$$

1.2 定转子间的接触

未通电前,环形行波超声波电机定转子间的接触如图 1 所示。摩擦材料粘贴在转子下表面,并与定子齿表面接触。为保持转子的柔性变形能力,转子内支撑板很薄,并在转子与定子接触的部分设计了“工”字形结构,轴向预压力施加在转子内侧部位的上表面。对转子的“工”字形结构进行放大(如图 1 所示),其中, a 和 h 分别为“工”字形结构中间竖板的宽度和高度, c 为竖板中线离转子下表面左侧边缘的距离, b 为转子下表面摩

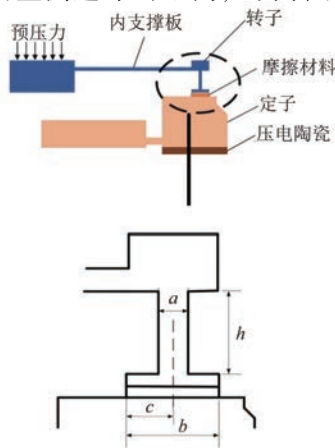


图 1 定转子的接触及转子结构示意图

擦材料与定子接触部分的径向宽度。采用实验室研制的样机进行研究,样机柔性转子的结构参数 $a=0.4\text{ mm}, h=2.0\text{ mm}, b=2.0\text{ mm}, c=1.0\text{ mm}$ 。

定子激发出行波运动后,定转子在波峰附近区域接触。由于转子的柔性变形,定转子间的接触区域和接触压力分布变得复杂,为分析定转子间的面接触特性,采用有限元分析软件 ANSYS 建立三维有限元面接触模型,如图 2 所示。为了考虑转子的柔性变形,模型中建立了完整的转子结构。由于定子中性面行波运动方程已知,在模型中忽略定子中性面以下的部分,只考虑中性面及其以上的部分。模型中样机的材料参数及运动参数如表 1 所示。选择八节点六面体单元 SOLID185 对定子、转子和摩擦材料进行网格划分,划分单元数分别为 151 344、171 360 和 1 440。定转子之间的接触属于面与面接触问题,考虑到定子的硬度远大于摩擦材料的硬度,因此将定子齿表面定义为目标面,赋予目标单元 TARGE170,摩擦材料下表面定义为接触面,赋予接触单元 CONTA173。为了使模型符合超声波电机样机的实际运行情况,施加如下边界条件:(1) 在转子内侧部位上表面施加轴向预压力;(2) 耦合转子内侧部位上表面各点轴向位移;(3) 给定子中性面施加位移载荷,使中性面作如式(3)所示的运动,代替压电陶瓷的激振作用;(4) 定子中性面内间隔 90° 的四个节点施加径向和周向位移约束,使定子不发生 (r, θ) 平面的平移运动或周向旋转运动。

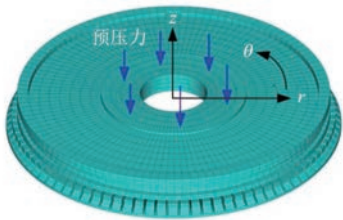


图 2 三维有限元面接触模型

通过求解三维面接触模型,可得定转子间的接触情况。图 3 给出了定子和转子的轴向变形情况。在定子中性面上施加如式(3)所示的轴向位移后,定子上形成了 9 个周波,如图 3(a)所示,与压电陶瓷的激振效果一致,说明给定子中性面施加轴向位移代替压电陶瓷的激振作用是可行的。

表 1 样机的材料参数及运动参数

参数名称	参数值
定子弹性模量/($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)	10.1×10^{10}
定子密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	8 624
定子泊松比	0.373
转子弹性模量/($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)	7.3×10^{10}
转子密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 780
转子泊松比	0.31
摩擦材料弹性模量/($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)	1.15×10^9
摩擦材料密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 500
摩擦材料泊松比	0.38
轴向预压力/N	250
定子振幅 $A/\mu\text{m}$	2.0
定子行波波峰数 n	9

在预压力作用下,柔性转子发生轴向变形,如图 3(b)所示,转子内侧部位有较大的轴向位移,而外侧部位由于与定子接触,其轴向位移很有限。

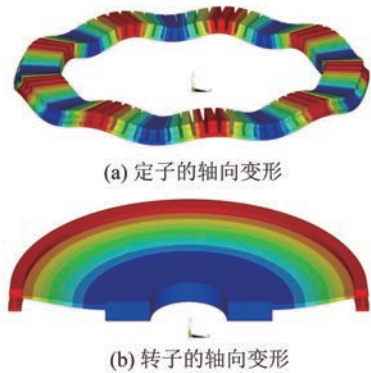


图 3 定转子轴向变形

图 4 给出了定转子的接触区域及接触压力分布情况。由图 4(a)可见,定转子在靠近定子波峰附近接触,形成了 9 个接触区,9 个接触区的形状相似。由于转子的柔性变形,接触区的形状是不规则的,且倾向于在内侧接触。在接触区内侧,周向接触长度占比达到 100%,即为连续接触,而在接触区外侧,周向接触长度占比仅为 35%,内外侧周向接触长度差异较大。各个波长内的接触压力分布相似,因此,取一个波长为代表,分析接触压力分布的情况。定子上共有 9 个波峰,每个波长沿周向覆盖的角度为 40° ,因此,取周向角度在 $-20^\circ\sim20^\circ$ 之间的一个波长为代表,分析接触压力分布,并以 $P(r, \theta)$ 代表不同位置的接触压

力,结果如图 4(b)所示。在定转子接触区,接触压力大于零,在定子齿表面与摩擦材料分离的区域,接触压力等于零。沿周向方向(θ 方向)看,在定子波峰位置,接触压力值最大,离波峰位置越远,接触压力值越小。沿径向方向(r 方向)看,接触压力沿径向分布不均匀,靠近接触区的内径处接触压力较大,靠近接触区的外径处接触压力减小。定转子接触区不规则的接触形状以及径向上不均匀的接触压力分布,在以往二维线接触模型中均未能反映。

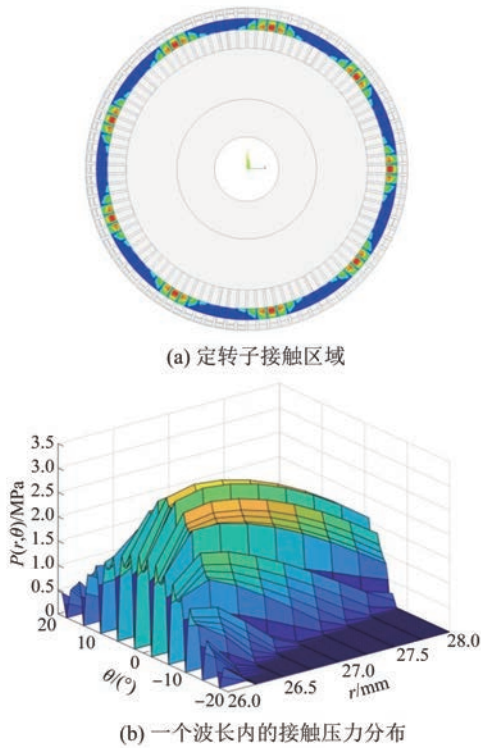


图 4 接触区域及接触压力分布

1.3 定转子间的摩擦

根据有限元模型求得接触压力分布 $P(r, \theta)$ 后,可计算切向摩擦力以及电机的输出转矩-转速特性。根据库伦摩擦定律,转子上的切向摩擦应力与接触压力之间的关系为

$$f_t(r, \theta) = \mu_d P(r, \theta) \text{sign}(v_{\text{rel}}) \quad (4)$$

式中: μ_d 为摩擦材料与定子之间的动摩擦系数; sign 为符号函数。

sign 符号函数定义为

$$\text{sign}(v_{\text{rel}}) = \begin{cases} 1, & v_{\text{rel}} > 0 \\ 0, & v_{\text{rel}} = 0 \\ -1, & v_{\text{rel}} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

v_{rel} 为定子齿表面质点与转子之间的相对线速度,即:

$$v_{\text{rel}} = v_s(\theta) - v_r \quad (6)$$

式中: v_r 为定转子平均接触半径处转子质点的切向线速度; $v_s(\theta)$ 为定转子平均接触半径处定子齿表面质点的切向线速度。

根据弹性体振动理论,由式(3)可推导得到:

$$v_s(\theta) = \frac{n A a_1 \omega}{r_{\text{av}}} \cos(n\theta) \quad (7)$$

式中: a_1 为定子齿表面质点至中性面的距离; r_{av} 为定转子平均接触半径。

设定转子接触区内半径和外半径分别为 r_{in} 和 r_{out} ,则有:

$$r_{\text{av}} = \frac{r_{\text{in}} + r_{\text{out}}}{2} \quad (8)$$

忽略损耗,可求得转子输出的转矩为

$$T_m = n \int_{-\theta_0}^{\theta_0} \int_{r_{\text{in}}}^{r_{\text{out}}} f_t(r, \theta) r^2 \frac{\pi}{180^\circ} dr d\theta \quad (9)$$

式中: θ_0 为半个波长覆盖的角度, $\theta_0 = 20^\circ$ 。

根据式(4)~式(9)计算样机的输出转矩-转速特性。为了验证理论计算结果,对样机的转矩-转速特性进行测量,测量平台示意图如图 5 所示。由信号发生器产生两路相位相差 90° 的交流信号,经功率放大器放大后提供给样机作为驱动电压。样机的转矩和转速值由转矩转速传感器测量。采用磁粉制动器作为负载,可编程电源给磁粉制动器供电,通过改变可编程电源输出电流的大小,可以实现负载大小的调节。样机工作频率为 41 kHz,正常工作时施加幅值为 200 V 的正弦驱动电压,定子振幅为 $2.0 \mu\text{m}$ 。分别测量了预压力为 250 N 和 300 N 时的转矩-转速特性,测量值和理论计算值如图 6 所示。图 6 中, N 为转子转速,其理论值可由转子切向线速度 v_r 计算得到, $N = 60 v_r / (2\pi r_{\text{av}})$ 。需要说明的是,当样机的预压力由 250 N 变化为 300 N 时,需要利用三维有限元面接触模型重新计算面接触压力分布,进而求得转矩-转速特性。由图 6 可知,计算值与测量值基本吻合,说明了三维面接触模型的有效性。误差产生的主要原因是模型中忽略了定转子接触对定子振动产生的影响,认为定子行波运动的波形及振幅不因定转子的接触而变化。

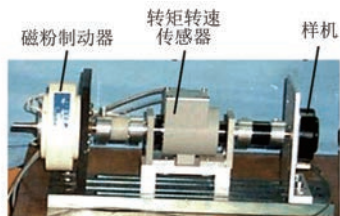


图5 试验测量平台

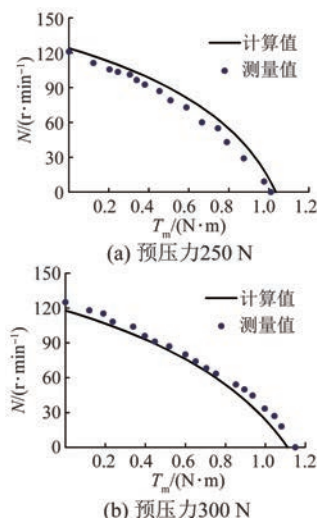


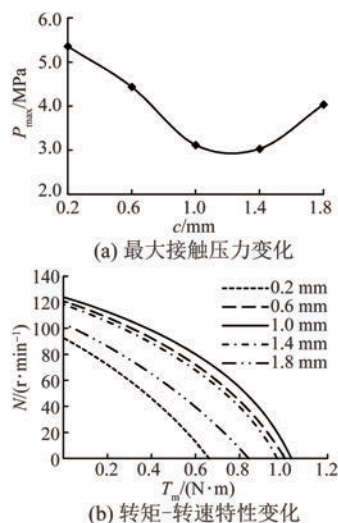
图6 转矩-转速特性计算值和测量值

2 转子结构优化设计

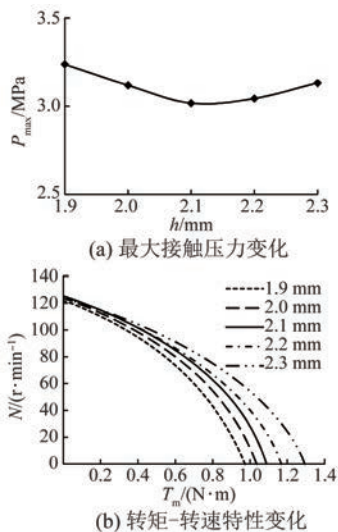
当柔性转子的结构参数发生变化,定转子间的接触状态也会随之改变,进而影响电机的输出性能。为了减小接触面磨损以延长电机寿命,应使最大接触压力 $P_{\max}$ 尽可能小,同时要尽可能提升电机的输出转矩-转速特性。本节以表1的参数为基准,考虑定转子间施加 250 N 的轴向预压力,从减小最大接触压力并提升电机转矩-转速特性的角度进行研究,并通过定转子三维面接触分析来优化图1所示的样机柔性转子的四个结构参数 a 、 h 、 b 和 c 。

首先,改变“工”字形结构中间竖板的位置,即改变 c 的取值,使竖板从内侧逐渐向外侧移动,利用三维面接触模型计算得到 c 取不同值时接触表面上最大接触压力 $P_{\max}$ 的变化以及电机的转矩-转速特性,如图7所示,当竖板从内侧向外侧移动时, c 的取值由 0.2 mm 逐渐增大到 1.8 mm,最大接触压力先减小而后增大,而电机的转矩-转速特性也是先提升而后降低,在 c 的取值为

1.0 mm 时,最大接触压力达到一个较小的值,且转矩-转速特性最佳,因此可选取 c 为 1.0 mm,此时竖板在中间位置。

图7 c 取不同值时电机的性能变化

然后,改变 h 的取值,并保持 $a=0.4$ mm、 $b=2.0$ mm、 $c=1.0$ mm 不变,计算得到 h 取不同值时接触表面上最大接触压力的变化以及电机的转矩-转速特性。如图8所示,随着 h 从 1.9 mm 逐渐增大到 2.3 mm,最大接触压力先减小后增大,在 h 为 2.1 mm 时,最大接触压力达到最小值,电机的转矩-转速特性则随着 h 的增大逐渐提升。虽然 h 增大对提升电机转矩-转速特性有利,但同时也会使最大接触压力变大,从而加剧接触面上的磨损情况。因此,综合考虑磨损和转矩-转速特

图8 h 取不同值时电机的性能变化

性的折中,将 h 取 2.2 mm,此时,与 h 取 2.1 mm 时相比,最大接触压力略有增加,转矩-转速特性也有所提升。再改变 b 的取值,并保持 $a = 0.4$ mm、 $h = 2.2$ mm、 $c = 1.0$ mm 不变,计算得到 b 取不同值时接触表面上最大接触压力的变化以及电机的转矩-转速特性。如图 9 所示,当 b 取 3.0 mm 时,最大接触压力达到最小值,并且转矩-转速特性也是最优的,因此,将 b 取值为 3.0 mm。

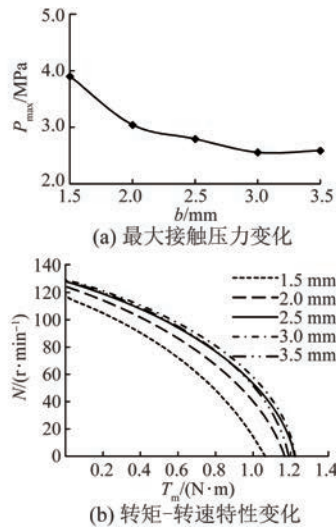


图 9 b 取不同值时电机的性能变化

最后,改变 a 的取值,并保持 $b = 3.0$ mm、 $h = 2.2$ mm、 $c = 1.0$ mm 不变,计算得到 a 取不同值时接触表面上最大接触压力的变化以及电机的转矩-转速特性,如图 10 所示,随着 a 从 0.3 mm 逐渐增大到 0.7 mm,最大接触压力逐渐增大,而电机的转矩-转速特性在 a 取 0.4 mm 时为最优。与

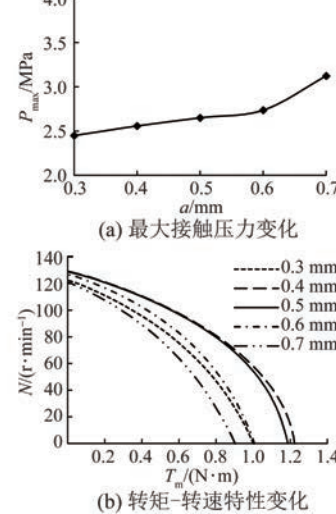


图 10 a 取不同值时电机的性能变化

a 取 0.3 mm 时相比, a 取 0.4 mm 时最大接触压力仅增加了 4.4%,而转矩-转速特性却得以明显提升,因此,取 a 的值为 0.4 mm。

3 电机特性对比分析

柔性转子优化前后结构参数对比如表 2 所示。优化后定转子接触区域及接触压力分布如图 11 所示。对比图 4 和图 11 可见,优化前,定转子偏向于在内侧接触,且内、外侧沿周向的接触长度有较大差异;优化后,定转子接触区域更集中于定子波峰附近,且内、外侧沿周向的接触长度更均衡,从而更有利于提高电机输出性能。定转子最大接触压力由优化前的 3.12 MPa 下降到优化后的 2.56 MPa,降幅达到 18%,从而有利于减小接触面的磨损。再对比优化前后电机的转矩-转速特性,如图 12 所示,柔性转子结构优化后,电机的转矩-转速特性得以明显提升,说明转子结构优化是有效的。

表 2 转子优化前后结构参数对比					mm
项目	a	h	b	c	
优化前	0.4	2.0	2.0	1.0	
优化后	0.4	2.2	3.0	1.0	

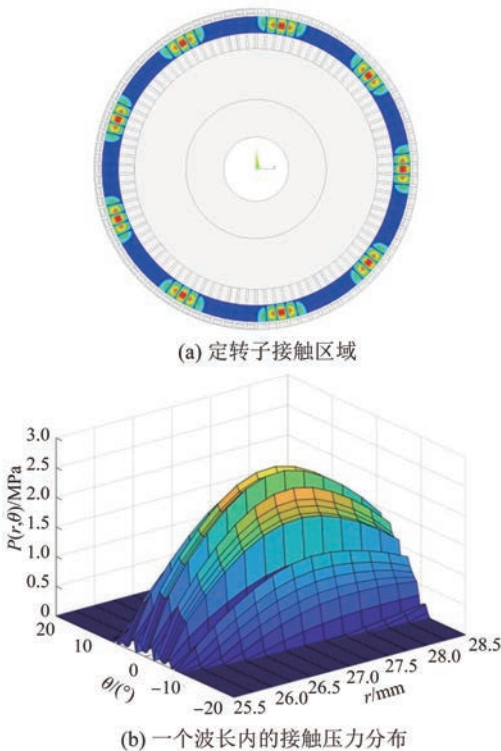


图 11 转子结构优化后接触区域及接触压力分布

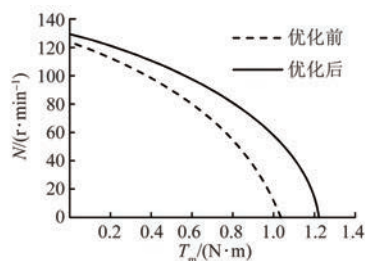


图 12 转子结构优化前后电机转矩-转速特性对比

4 结 语

本文考虑了转子的柔性变形,建立了定转子三维有限元面接触模型,分析定子产生行波运动情况下定转子间的面接触特性,基于所得到的面接触压力分布计算电机的转矩-转速特性。分析和计算结果表明:定转子间的接触区域形状是不规则的,接触压力沿径向分布是不均匀的。通过样机转矩-转速特性试验测量值和理论计算值的对比,验证了三维面接触模型。基于三维面接触模型,分析了柔性转子结构参数变化情况下,定转子间最大接触压力及电机转矩-转速特性的变化,从而对转子结构进行优化。计算结果表明,转子结构优化后,定转子间的最大接触压力明显下降,电机的转矩-转速特性也得以明显提升。

【参 考 文 献】

[1] 蒋春容, 夏凯, 陆旦宏. 基于 ANSYS 的径向驻波型超声波电机设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(4): 54.

[2] 郑伟, 黄伟彬, 周景亮, 等. 基于可编程逻辑控制器的超声电机测试系统设计[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(1): 123.

[3] 郑炬矩, 孙志峻, 闫鹤, 等. 运用中空超声电机的血管介入手术机器人系统[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(5): 976.

[4] 李文婷, 龙兆芝, 范佳威, 等. 基于多层 PCB 罗氏线圈的精密冲击电流测量装置[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 138.

[5] 徐志钮, 郭一帆, 李先锋, 等. 机械缺陷对 GIS 外壳振动影响[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 156.

[6] ZHANG Q, PIAO S, CHEN H. A theoretical model of the intermittent contact of piezoelectric actuator based on Greenwood-Williamson theory [J]. Ultrasonics, 2021, 114(1): 106428.

[7] 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.

[8] CHEN H, NIE R, HAN W, et al. Improvement mechanism of energy conversion efficiency in ultrasonic motor with flexible rotor[J]. Ultrasonics, 2022, 120: 106659.

[9] SATTEL T, HAGEDORN P, SCHMIDT J. The contact problem in ultrasonic traveling-wave motors [J]. Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME, 2010, 77(3): 1.

[10] RENTERIA-MARQUEZ I A, RENTERIA-MARQUEZ A, TSENG B T L. A novel contact model of piezoelectric traveling wave rotary ultrasonic motors with the finite volume method [J]. Ultrasonics, 2018, 90: 5.

[11] CHEN N, FAN D. A teeth-discretized electromechanical model of a traveling-wave ultrasonic motor [J]. Mechanical Sciences, 2020, 11(2): 257.

[12] JIANG C, WU X, LU D, et al. Contact modeling and performance evaluation of ring type traveling wave ultrasonic motors considering stator teeth [J]. Ultrasonics, 2021, 117: 106518.

[13] 柳江, 滕杨磊, 王政皓, 等. 超声电机变摩擦三向接触模型的输出特性分析[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 115.

[14] FRANGI A, CORIGLIANO A, BINCI M, et al. Finite element modelling of a rotating piezoelectric ultrasonic motor [J]. Ultrasonics, 2005, 43(9): 747.

[15] RADI B, EI HAMI A. The study of the dynamic contact in ultrasonic motor[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34(12): 3767.

[16] REN W, YANG L, MA C, et al. Output performance simulation and contact analysis of traveling wave rotary ultrasonic motor based on ADINA [J]. Computers and Structures, 2019, 216: 15.

[17] 刘炯, 纪跃波, 陈美谦, 等. 行波型旋转超声电机定转子驱动接触间隙分析[J]. 微电机, 2020, 53(3): 11.

[18] 刘炯, 纪跃波, 赵彬伍. 行波型旋转超声电机定子和转子接触分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2019, 58(1): 145.