

柱面驱动新型行波超声电机的研究

李有光, 陈在礼, 陈维山, 谢涛, 刘军考

(哈尔滨工业大学机电学院, 150001, 哈尔滨)

摘要: 为增加定转子接触面积,使接触应力分布均匀,从而减少接触区磨损,提高电机的机械性能,利用壳体的非轴对称振动模式,成功地研制出一种柱面驱动新型行波超声电机.在设计的电机结构中,给出了压电陶瓷的极化、分布和驱动方式,运用有限元分析软件 ANSYS 9.0 对定子进行了模态和谐响应分析,并运用振动理论推导了定子齿上的椭圆运动轨迹方程.实验表明,该电机在驱动电压有效值为 150 V、驱动频率为 16.1 kHz 时,堵转转矩为 1.8 N·m,最大空载转速为 64 r/min,说明电机的连续运转性能良好,能够保证定转子之间的良好接触,使电机平稳转动,从而提高了电机的机械输出性能.

关键词: 超声电机;行波;压电陶瓷;柱面驱动

中图分类号: TM356 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)11-1391-03

Novel Traveling Wave Ultrasonic Motor

LI Youguang, CHEN Zaili, CHEN Weishan, XIE Tao, LIU Junkao

(Department of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To increase the contact area and obtain more uniform contact stress distribution within contact surface for reducing wear, a non-axisymmetric vibration model of thin shell is adopted to develop a novel cylinder driving ultrasonic motor, and the structure of the novel motor was designed following the driving mechanism of piezoelectric ceramic. The modal and harmonic response analysis was performed by ANSYS 9.0, and then the elliptic motion locus of the stator was plotted and discussed. Under 150 V driving voltage and at 16.1 kHz resonant frequency, its velocity of free load gets 64 r/min and maximum output load reaches to 1.8 N·m.

Keywords: ultrasonic motor; traveling wave; piezoelectric ceramic; cylinder driving

1942 年, Williams 和 Brown 提出了超声电机的概念^[1], 1981 年日本新生工业公司的总裁指田年生制作了世界上第一台具有实用价值的振动片型超声波马达^[2], 自此超声电机的研究受到了世人的瞩目, 各种新型式的超声电机层出不穷, 例如各种行波型超声电机^[3-4]、复合型超声电机^[5]及多自由度超声电机^[6]. 超声电机的行波马达以其控制性能良好和结构灵活等优点尤为引人注目, 但此类超声电机通常利用的是圆板或圆环的面外弯曲共振模态, 因此不同半径上质点的轴向振幅是不同的. 当转子为刚性时, 定转子之间仅在定子外圆上很少的一部分

接触, 由于接触面积小, 应力集中大, 电机输出的转速、转矩等机械性能的波动也大, 使输出转矩大幅下降, 因此带来了转子与定子之间的磨损和发热. 相关资料表明, 存在径向弯曲的电机的局部接触压力是接触区无径向弯曲效应情况下的 10 倍以上^[7].

有的学者配合定子的径向弯曲效应, 通过采用均压技术的柔性转子结构, 使接触压力沿齿的整个径向均匀分布, 但同时带来的问题是柔性转子刚度过小, 转子转动的同时引起轴向振动, 且在转子边缘部分振幅最大, 从而导致转子产生疲劳破坏. 此外, 当加预紧力时, 可能还会超出其弹性极限使定子破

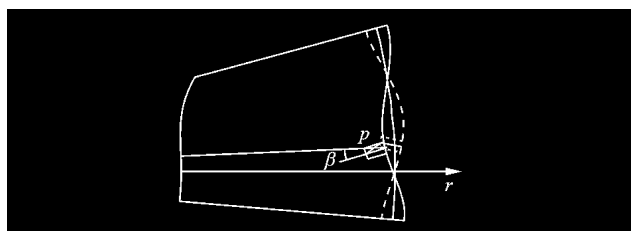
坏^[8]. 本文提出了一种柱面驱动行波超声电机, 它的接触区域是以圆柱面母线为中心的矩形区域, 显著地提高了定转子的接触面积, 减少了接触区应力集中及接触不均匀的状况, 从而降低了接触区域的磨损.

1 柱面驱动超声电机的运行机理

对于周向封闭的圆柱薄壳, 沿径向非轴对称振动的驻波方程可表示为

$$w_1 = A \sin(n\theta) \sin(\omega t) \quad (1)$$

式中: A 为振幅; n 为沿周向的波数; ω 为振动的角频率. 为简化起见, 图 1 中只画出了整个圆周的一部分和一个齿来说明柱面驱动的机理.



p : 齿顶中点; β : 齿的转角; r : 曲面半径方向

图1 柱面超声电机的驱动原理

假设齿有足够的刚度, 在任何时刻都与所在点的驻波切线保持垂直, p 沿周向的位移为

$$\Delta V_{p1} = L\beta \quad (2)$$

其中

$$\tan\beta \approx \frac{1}{r} A n \cos(n\theta) \sin(\omega t) \quad (3)$$

式中: L 为齿顶中点到中性层的距离. 由式(2)、式(3)可以得到

$$\Delta V_{p1} = \frac{L}{r} A n \cos(n\theta) \sin(\omega t) \quad (4)$$

p 沿径向的位移可以表示为

$$\Delta W_{p1} \approx w_1 \quad (5)$$

设与驻波方程式(1)在时间及空间上的相位分别相差 ϕ , ψ 的驻波方程为

$$w_2 = A \sin[n(\theta + \psi)] \sin[\omega(t + \phi)] \quad (6)$$

$$\Delta V_{p2} = \frac{L}{r} A n \cos[n(\theta + \psi)] \sin[\omega(t + \phi)] \quad (7)$$

$$\Delta W_{p2} = A \sin[n(\theta + \psi)] \sin[\omega(t + \phi)] \quad (8)$$

由式(1)和式(6)代表的两列驻波叠加后, p 点的运动轨迹就可以认为分别是式(4)与式(7)、式(5)与式(8)相加后形成的轨迹, 即

$$\Delta W_p = \Delta W_{p1} + \Delta W_{p2} \quad (9)$$

$$\Delta V_p = \Delta V_{p1} + \Delta V_{p2} \quad (10)$$

这种叠加能使 p 点形成椭圆运动轨迹的条件是

$$\phi = \frac{2\pi}{4n} p \quad p = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \quad (11)$$

$$\phi = \frac{2\pi}{4\omega} q \quad q = \pm 1, \pm 3, \pm 5 \quad (12)$$

由式(9)和式(10)可以得出 p 点的椭圆轨迹方程

$$\left(\frac{\Delta W_p}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_p}{AnL/r}\right)^2 = 1 \quad (13)$$

2 柱面驱动超声电机的结构

柱面驱动超声电机的结构如图 2 所示, 定子材料为 45 号钢. 考虑到压电陶瓷若加工成圆弧曲面会使加工工艺复杂, 成本提高, 所以用正多边形去拟合一个外圆柱面. 超声电机的结构是在定子外表面沿圆周方向均布 28 个矩型平面, 在平面上粘有片式压电陶瓷 PZT-4(四川压电与声光研究所提供), 面和面之间是过渡圆弧曲面, 定子内表面为内圆柱面, 并在内圆柱面上均布 72 个起位移放大作用的定子齿.

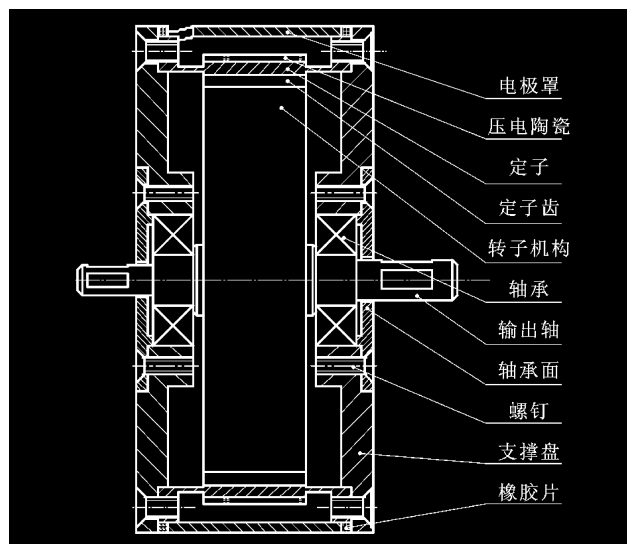


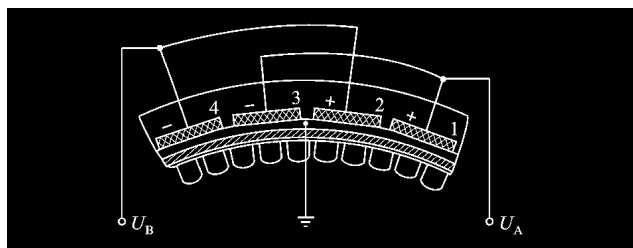
图2 柱面驱动超声电机的结构

定子的主要结构参数: 基体厚度为 2.5 mm, 内径为 81 mm, 齿高为 2.5 mm, 齿宽为 2.56 mm. 压电陶瓷的长度为 20 mm, 宽度为 8.2 mm, 厚度为 1.2 mm. 定子内部和齿接触的区域为转子机构, 转子机构采用胀套形式, 可微调定转子之间的接触力. 为了在轴向固定定子, 同时在能够承受扭矩的前提下不影响定子的振动模态, 在定子两侧端面上设计有薄壁结构的弹性环节和法兰结构, 但由于结构限制而没有采用摩擦材料.

3 压电陶瓷分布及驱动方式

定子的振动模态选择为(7,0), 其中 7 代表沿圆周方向的波数, 0 代表沿轴向的节圆数. 为了能产生

空间上的相位差($1/4$ 波长)和时间上的相位差($1/4$ 周期)这两列驻波,压电陶瓷的驱动及沿圆周的空间布置如图 3 所示.压电陶瓷片的空间位置分布关系为:沿圆周方向均布有 28 片压电陶瓷,每片压电陶瓷的标号从 1 到 28 沿逆时针方向依次递增,图 3 中只标出了前 4 片,并按图 3 所示“+”、“-”依次循环来确定陶瓷片的极化方向.设一路电压信号为 $u_A = U \sin(\omega t)$,另一路电压信号为 $u_B = U \cos(\omega t)$,压电陶瓷片的驱动关系是在奇数片的压电陶瓷上施加 u_A ,在偶数片的压电陶瓷上则施加 u_B .



+, -: 压电陶瓷片的极化方向

图 3 压电陶瓷的分布及驱动示意图

4 柱面驱动超声电机的有限元分析

本文通过有限元分析软件 ANSYS 9.0 的 APDL 语言,对定子及粘在其上的压电陶瓷整体进行参数化实体建模,并进行了分析.实体模型采用 SOLID227 单元类型进行网格划分,为了获得(7,0)阶模态的谐振频率及振型,首先进行模态分析,为避免分析过程中压电陶瓷片的压电效应的影响,把每片压电陶瓷的两电极进行短路处理,模态提取采用 Block Lanczos 法,得到电机(7,0)阶模态的固有频率 $f_1 = 17.259$ kHz,振型如图 4 所示.定子的主要结构尺寸:壳体内半径为 40.5 mm,壳体外正 28 棱柱内切圆半径为 43 mm,齿数为 72 个,齿高为 2.5 mm,齿宽为 2.56 mm.

采用瞬态分析来验证行波的形成,即定子齿的运动轨迹,对两路压电陶瓷片施加频率为 17.3 kHz、有效值为 100 V 且相位差为 90° 的正弦周期信号.图 5 所示为在一个振动周期(1.597 ~ 1.655 ms)中齿顶点的运动轨迹,其中 V_x 代表选定齿中心的切向位移, V_y 代表径向位移.

5 样机及实验测试

用阻抗分析仪(4294A)测量了两路压电陶瓷的输入阻抗特性,由测出的数据可知两列驻波的串联谐振频率分别为 $f_1 = 16.1$ kHz 和 $f_2 = 16.04$ kHz,

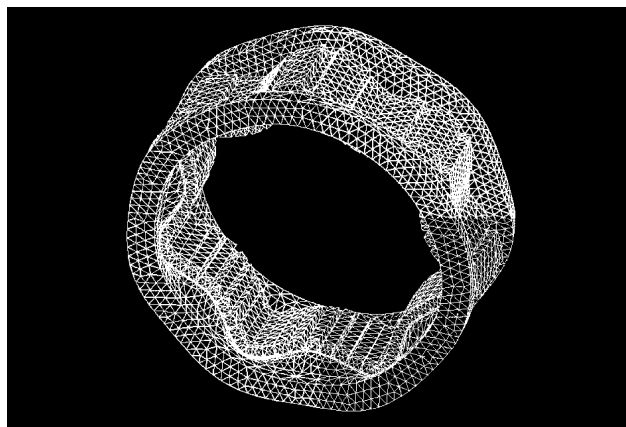


图 4 定子的(7,0)阶模态振型

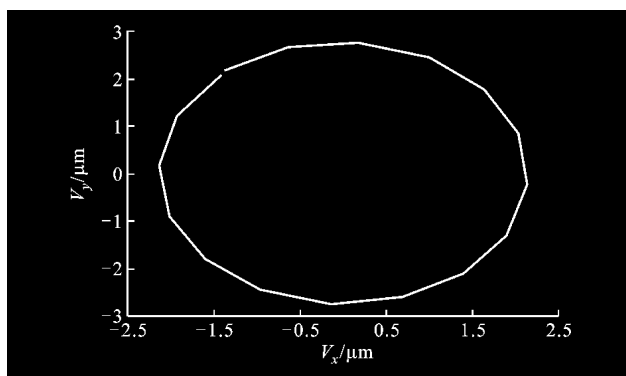


图 5 齿顶点的运动轨迹

可见实际值要小于仿真值.定义相对误差 $\epsilon_i = (f_i - f_i)/f_i$,则 $\epsilon_1 = 7.2\%$, $\epsilon_2 = 7.6\%$,其中 f_i 表示阻抗分析仪实测的串联谐振频率.误差主要来自仿真时采用的材料特性参数,它与实际的材料特性参数并非完全一致,压电陶瓷粘结时会产生位置偏差,不同压电陶瓷片的各项参数也均有差异,但这些误差都很小,因此理论和实验的一致性较好.图 6 给出了在电压有效值为 150 V、相位差为 90° 时,电机的转矩和转速随频率变化的关系曲线,由图可见电机的堵转转矩为 $1.8 \text{ N} \cdot \text{m}$.

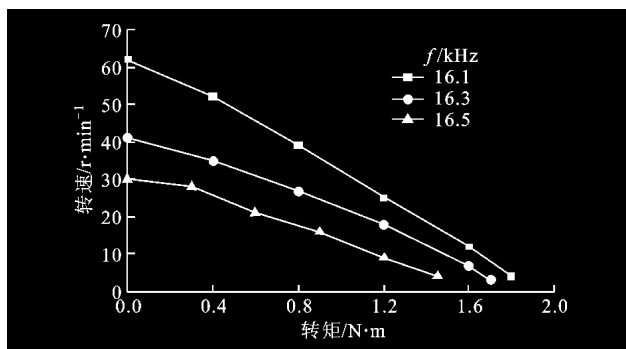


图 6 电机转矩和转速的关系曲线

6 结 论

本文采用新型驱动机理,设计了行波超声电机的结构及压电陶瓷的分布和驱动方式,通过运动学理论分析了齿的椭圆轨迹的形成机理.采用有限元软件 ANSYS 9.0 对定子进行了模态及瞬态分析,得到了齿顶的椭圆运动轨迹.实验表明,超声电机接触区的摩擦均匀,定转子间的接触面积比圆板和圆环电机的大,这不仅提高了定子振动能量的利用率,而且在驱动频率为 16.1 kHz、驱动电压有效值为 150 V 时,可使超声电机的堵转转矩达到 $1.8 \text{ N} \cdot \text{m}$,最大空载转速达 64 r/min,证明超声电机的连续运转性能良好.

参考文献:

- [1] WILLIAMS A, BROWN W. Piezoelectric motor: US, 2439499 [P]. 1942-04-13.
- [2] 上羽贞行,富川义郎.超声波电机理论与应用 [M]. 杨志刚,译.上海:上海科学技术出版社,1998.
- [3] 陈维山.行波超声波电动机的理论及实验研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电学院,1996.
- [4] TAKASHI M. Finite-element analysis of the rotor/stator contact in a ring-type ultrasonic motor [J]. IEEE Trans on UFFC, 1992, 39(6): 668-674.
- [5] CHU Xiangcheng, MA Long, LI Longtu. A disk-pivot structure micro piezoelectric actuator using vibration mode B11 [J]. Ultrasonics, 2006, 44 (1): e561-e564.
- [6] 程光明,曾平,杨志刚,等.二自由度压电马达的振动分析 [J]. 压电与声光, 2000, 22(2): 131-133.
CHENG Guangming, ZENG Ping, YANG Zhigang, et al. Vibration analysis of two-freedom piezoelectric motor's vibrator [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2000, 22(2): 131-133.
- [7] MINOTTI P. Micromachined traveling wave motors: three dimensional mechanical optimization and miniaturization limits evaluation [J]. Jpn J Appl Phys, 1997, 36(11): 7009-7018.
- [8] 徐志科,胡敏强,金龙,等.大直径行波型超声电机的优化 [J]. 微电机, 2005, 38(3): 16-19.
XU Zhike, HU Minqiang, JIN Long, et al. The optimization design of traveling wave type ultrasonic motor with large diameter [J]. Micromotors, 2005, 38(3): 16-19.

(编辑 管咏梅)