

尺蠖型压电旋转驱动器钳位特性分析

赵宏伟, 吴博达, 杨志刚, 程光明

(吉林大学机械工程学院, 长春, 130025)

摘要: 采用 MSC.Marc 有限元软件的接触分析模块, 对钳位过程中钳位块与转子的微观接触过程进行了研究, 通过对钳位机构与转子间接触力学问题的分析, 以及对转子接触摩擦状况的实验测试, 提出了采用大钳位接触面的钳位机构方案. 实验表明, 采用大钳位接触面的尺蠖型压电驱动器在保证驱动器运动分辨率、运动稳定性的基础上, 其承载能力比小钳位接触面的同类驱动器提高了 2 倍, 大接触面钳位机构不仅有利于降低驱动器的局部磨损, 而且还提高了驱动器的使用寿命.

关键词: 压电旋转驱动器; 钳位特性; 接触

中图分类号: TG156 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)09-1022-04

Clamping Performance for Inchworm-Type Piezoelectric Rotary Actuator

Zhao Hongwei, Wu Boda, Yang Zhigang, Cheng Guangming

(School of Mechanical Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Via contact analysis module of MSC.Marc software, the contact process between the clamping body and rotor is analyzed in micro-scale, and the corresponding mechanical model is established. The working surface of the rotor is tested under the contact-friction condition. The project of the novel actuator with large clamping area is proposed, which ensures the rotary resolution and rotary stability, and improves the loading capability by 2 times compared to the actuator with small one to reduce partial wear and lengthen working life of the actuator.

Keywords: piezoelectric rotary actuator; clamping performance; contact

尺蠖型驱动器^[1]自产生至今已近半个世纪了, 国内外研究人员采用压电元件、磁致伸缩元件等不同动力转换元件开发了形式多样的新型尺蠖驱动器^[2-8]. 由于压电陶瓷材料具有响应迅速、位移分辨率高等优点, 因此以压电元件为动力转换元件的尺蠖型驱动器近年来逐渐占据了主导地位, 并且部分驱动器样机已得到了应用^[9-10]. 钳位机构是尺蠖型压电驱动器的核心元件之一, 其性能的优劣直接关系到驱动器的运动分辨率、承载能力及运动的稳定性^[7], 同时影响驱动器的使用寿命, 而针对钳位机构特性的研究, 目前国内外尚无系统的研究报道.

本文着重分析了尺蠖型压电旋转驱动器钳位机构的特性, 建立了钳位机构力学模型, 采用 MSC.Marc 有限元软件对钳位过程中钳位块与转子的微

观接触过程进行了仿真分析, 并对转子接触摩擦情况进行了实验测试, 所提出的采用大钳位接触面的钳位机构方案经实验测试, 可有效提高驱动器的承载能力, 并且对提高驱动器的使用寿命也具有一定的意义.

1 钳位机构

图 1 为尺蠖型压电旋转驱动器的构成图, 其钳位机构主要由钳位块、平动柔性铰链和压电叠堆构成. 工作中转子直接和钳位块接触, 钳位机构在钳紧转子时起到传递扭矩的作用, 当钳位机构松开时对转子则起到滑动轴承的作用. 设计合理的钳位机构要求转子被钳紧时, 能保证钳紧力大、钳位牢固稳定, 而松开时, 要求能松开彻底, 由钳位过程造成转

子的摆动应尽可能地小。

钳位块与转子接触部分的圆弧半径与转子半径的基本尺寸相同,磨削加工后的转子和钳位面要经过配研,装配中通过预紧单元保证两侧压电叠堆预紧力相当。实验证明,采用这种钳位方式既可以消除压电叠堆元件变形时在工作方向以外产生的附加变形影响,同时由于钳位机构在转子两侧同时钳紧转子,因此又可以保证转子在被钳紧过程中能自动找正回转中心。

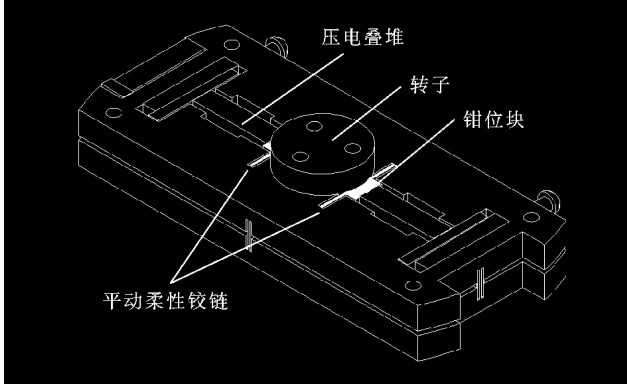


图1 柔性铰链钳位机构

2 钳位机构力学模型

用于钳位的压电叠堆是在预紧之后工作的,施加预紧力阶段,柔性铰链和压电叠堆的受力分别为 F_1 和 F_2 , 则

$$F_1 = K_H \delta_H \quad (1)$$

$$F_2 = K_S \xi_S \quad (2)$$

式中: K_H 为柔性铰链等效弯曲刚度; δ_H 为柔性铰链预紧位移; K_S 为压电叠堆等效刚度; ξ_S 为压电叠堆被压缩量。

根据力学原理,应有 $F_1 = F_2$, 此时

$$\xi_S = \frac{K_H}{K_S} \delta_H \quad (3)$$

压电叠堆被压缩后的长度为

$$L_1 = L - \frac{K_H}{K_S} \delta_H \quad (4)$$

式中: L 为压电叠堆的原始长度。当经过预紧的钳位压电叠堆被施加电压时,柔性铰链的最后输出总位移为

$$\delta_t = L_{SV} + \delta_H \quad (5)$$

式中: L_{SV} 为压电叠堆的伸长量。

柔性铰链受到压电叠堆的作用力为

$$F_t = K_H \delta_t = K_H (L_{SV} + \delta_H) \quad (6)$$

进而可以得到此时压电叠堆的实际伸长量

$$L_s = \frac{F_t}{K_H} - \delta_H \quad (7)$$

对式(1)~式(7)进行整理后得到

$$F_t = \frac{K_S K_H}{K_H + K_S} \left[L_0 + \left(1 + \frac{K_H}{K_S} \right) \delta_H \right] \quad (8)$$

$$\delta_t = \frac{K_S}{K_H + K_S} \left[L_0 + \left(1 + \frac{K_H}{K_S} \right) \delta_H \right] \quad (9)$$

式中: L_0 为压电叠堆在相应电压作用下的自由伸长量。相对于转子,钳位系统的等效总刚度为

$$K_t = K_H + K_S \quad (10)$$

在驱动器实际工作中,当转子被双侧钳位机构同时钳紧时,钳紧状态稳定的条件是钳位机构对转子的摩擦力矩(动力矩)应大于转子此时的负载力矩^[8](阻力矩),即

$$2\mu FR \geq M_0 + M_{ex} \quad (11)$$

式中: μ 为驱动器钳位机构与转子间的摩擦系数; F 为单侧钳位块施加给转子的正压力; R 为转子的半径; M_0 为驱动器转子的固有载荷; M_{ex} 为驱动器承受的外部载荷。

3 钳位过程微观接触分析

转子和定子钳位面间的接触,是尺蠖型压电驱动器工作过程的一个重要环节,也是较为复杂的力学过程,并具有很大的随机性,因此难以通过实验手段进行测试。但是,对于这一过程的分析研究又是设计、调试驱动器不可缺少的环节。本文通过有限元仿真方法研究了转子和定子钳位面间的微观接触问题,在仿真分析中,模拟驱动器实际工作过程,即转子外侧对称的钳位机构同时钳紧转子,摩擦模型为库仑摩擦,摩擦系数为 0.5。分析中假设钳位机构为刚体,转子材料为 45# 钢,被划分成 692 个 4 节点的平面应变单元。有限元仿真分析结果如图 2 所示。

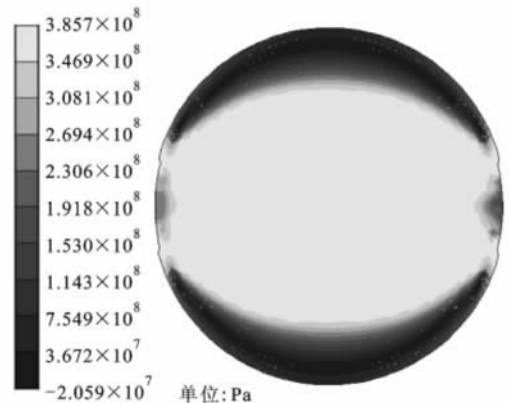
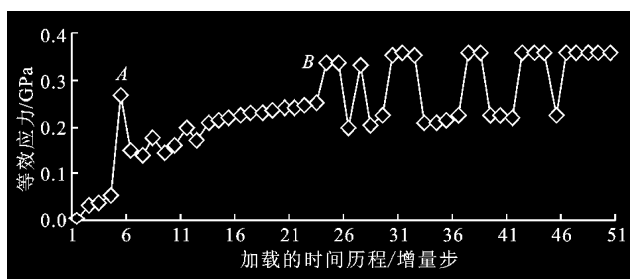


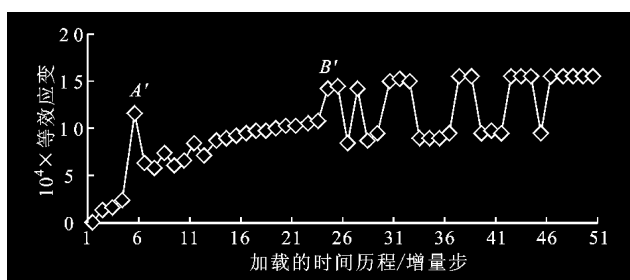
图2 转子被钳紧状态下的应力分布等值云图

从图2中可以看出,钳位压电叠堆在100 V的驱动电压下伸长量毫无损失,转子被稳定地钳紧后,其内部最大等效应力为 3.857×10^8 Pa,且在材料的许用应力范围之内。

图3列出了与钳位面接触的参考节点在转子被钳紧过程中,其等效应力和等效弹性应变的时间历程曲线。通过对图中所列数据的分析,可知转子在被钳紧的过程中,参考节点的等效应力逐渐增加,当增加到某一确定值(B点处)后就基本稳定,此时钳位状态也基本稳定。同时可以看出,参考节点的等效应力和等效应变随时间的变化趋势完全一致,且等效弹性应变值很小,说明在钳位块钳紧转子的整个过程中,转子自身只是发生了微小的弹性变形,而未发生塑性变形,这对保证转子工作过程中的圆柱度不被破坏是至关重要的。由于摩擦的存在,钳位面与转子之间不单纯是正应力作用,这也是其应力(或应变)在钳位稳定后出现跳跃的原因之一。此外,在钳位块开始与转子接触的瞬间,参考节点无论是等效应力还是等效弹性应变均出现了跳跃(见图中的A点和A'点),这主要是由钳位块与转子开始接触时的冲击造成的。



(a)等效应力时间历程曲线



(b)等效弹性应变时间历程曲线

A、A': 钳位冲击造成的跃动点; B、B' 稳定钳紧标志点

图3 转子参考节点的仿真结果

转子与定子间的接触属于微动接触,尽管转子与定子接触面的加工精度较高,但仍会存在凹凸不平的加工痕迹。工作中,粗糙度高的表面会对粗糙度低的表面产生压痕或划痕,进而生成磨屑、加剧磨

损。实验发现,在大载荷、高驱动电压下,转子与定子钳位面间的磨损会加剧,在驱动器装配时,定子钳位面与转子间的接触状态也是造成接触体表面形貌被破坏的原因。此外,机械加工后的转子和定子内部存在一定的残余应力,在驱动器工作的过程中,残余应力不断释放也是造成接触面磨损的一个原因。通过电镜对转子工作后的表面形貌进行实验测试,测试结果如图4所示。从图中可见,转子在工作一段时间后,表面会存在多处划痕,这些划痕是由转子与定子钳位面接触过程的微动磨损造成的,这种划痕通常与转子的运动方向平行。另外,由于磨屑的存在及多次装配的共同作用,也造成了转子表面不同程度的划痕,这种划痕往往与转子轴线方向平行或呈一定的夹角。

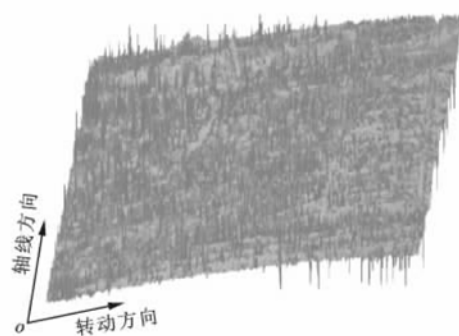


图4 转子工作后的表面形貌

由于尺蠖型压电旋转驱动器的钳位机理是直接摩擦钳位,因此转子与定子钳位面间的摩擦是驱动器正常工作必不可少的条件,采用适合的方式在保证转子与定子间的直接摩擦钳位效果不被削弱的情况下,尽可能小地降低磨损,是保证驱动器工作稳定性和寿命的有效措施。本文采用润滑油来改变转子与定子钳位面间的磨损状况,实验发现,润滑油未对驱动器的输出性能造成不良影响^[11]。

4 钳位机构对承载能力的影响

对于尺蠖型压电旋转驱动器,当其稳定运行时所能承载的最大扭矩为它的承载能力。针对图1所示的驱动器样机,对其不同载荷下的输出特性进行了实验测试。实验环境温度为25℃,在测量标杆上经滑轮牵引一定质量的砝码进行实验,力臂为100 mm,驱动信号频率为1 Hz,得到的不同载荷条件下的驱动电压与输出转角关系的实验曲线如图5所示。其中,单步转角 $\Delta\theta$ 为驱动器转子在一个时序信号激励下转过的角度,驱动电压 U 为施加给驱动

压电叠堆的电压值。

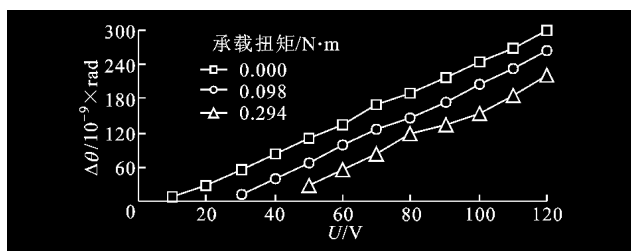


图5 小钳位面条件下驱动器的输出特性

从图5所列的各组曲线中可以看出,各组数据的线性关系都比较好,平行度也较高,充分说明驱动器运行稳定,但随着外部载荷的增加,在相同驱动电压下,驱动器转子的旋转角度有所减小,能够使转子启动的临界电压值升高,曲线整体上有向右、向下移动的趋势。根据实验测定的结果,设计开发的尺蠖型压电旋转驱动器样机在稳定运行状态下,其最大承载能力为0.147 N·m。

影响驱动器承载能力的因素主要有钳位机构、驱动机构及转动机构,适当改变驱动机构及扭转柔性铰链的结构尺寸,可以得到不同的输出特性,但会对驱动器的动态性能造成负面影响^[11]。本文针对不同钳位机构对驱动器承载能力的影响进行了分析比较(见图6),按照该形式开发的驱动器样机与图1所示的结构原理基本相同,显著的差异在于大大增加了图6所示结构的有效钳位面积。

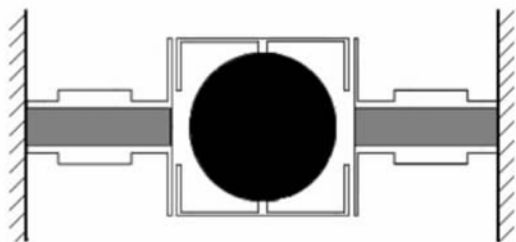


图6 大钳位面柔性铰链钳位机构

针对图6所示钳位机构的驱动器样机,在实验条件与图5相同的情况下,对其承载能力进行了实验测试,测得的不同载荷条件下的输出特性曲线如图7所示。从图5、图7中可以看出,由于钳位面的增大,导致直接钳位摩擦力的增加,造成驱动器在不同载荷条件下,临界驱动电压有所升高。在载荷为0.98 N·m的情况下,图5所示的临界驱动电压为30 V,而图7则需要50 V才能使驱动器开始运转。同时,在保证基本运动特性的前提下,采用图6所示结构形式的驱动器可使承载能力提高到0.294 N·m,较图1所示结构提高了2倍,充分说明前述有关

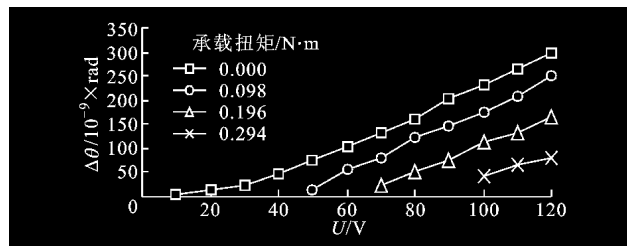


图7 大钳位面条件下驱动器的输出特性

大钳位面钳位机构可提高驱动器性能的理论分析的合理性。此外,由于该方案中钳位块与转子大面积接触,因此有效地避免了转子与钳位块间的局部磨损,更有利于提高驱动器的使用寿命。

5 结 论

钳位机构是尺蠖型压电旋转驱动器的重要元件,本文着重分析了钳位机构的特性,建立了钳位机构力学模型。采用MSC.Marc有限元软件对钳位过程中钳位块与转子的微观接触过程进行了仿真分析,并对转子接触摩擦情况进行了实验测试,提出了利用润滑油改善钳位块与转子的接触摩擦性能的方案。通过对钳位性能的分析,提出采用大钳位接触面增大摩擦系数的方法来设计钳位机构,实验测试表明,该方案可有效地提高驱动器的承载能力,并且对提高驱动器的使用寿命具有一定的意义。

参考文献:

- [1] Stibitz G R. Incremental feed mechanisms: USA, 3138749 [P]. 1964-07-01.
- [2] Miesner J E, Teter J P. Piezoelectric-magnetostrictive resonant inchworm motor[J]. SPIE Proceedings, 1994 (2190): 520-527.
- [3] Kim S C, Kim S H. Precise rotary motor by inchworm motion using dual wrap belts[J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(5): 2546-2550.
- [4] Kim J, Kim J D, Choi S B. A hybrid inchworm linear motor[J]. Mechatronics, 2002, 12(5): 525-542.
- [5] Li Jian, Ramin S, Javad D, et al. Design and development of a new piezoelectric linear inchworm actuator [J]. Mechatronics, 2005, 15(6): 651-681.
- [6] 赵宏伟, 刘建芳, 华顺明, 等. 压电型步进精密旋转驱动器[J]. 光学精密工程, 2005, 13(3): 305-310. Zhao Hongwei, Liu Jianfang, Hua Shunming, et al. Piezoelectric-type stepping precision rotary actuator [J]. Optics and Precision Engineering, 2005, 13(3): 305-310.
- [7] 赵宏伟, 吴博达, 程光明, 等. 基于压电驱动的精密步

- 进旋转电机[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 166-171.
- Zhao Hongwei, Wu Boda, Cheng Guangming, et al. Precise stepping rotary motor based on piezoelectric actuation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 166-171.
- [8] 赵宏伟, 吴博达, 程光明, 等. 高精度压电步进直线驱动器[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006, 36(3): 350-354.
- Zhao Hongwei, Wu Boda, Cheng Guangming, et al. Ultra-precision piezoelectric stepping linear actuator [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(3): 350-354.
- [9] Okazaki Y, Mishima N, Ashida K. Microfactory concept history and developments[J]. Transactions of the ASME: Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(4): 837-844.
- [10] Richard J C. Nanoscale measurements and manipulation[J]. Journal of Vacuum Science and Technology: B, 2004, 22(4): 1609-1635.
- [11] 赵宏伟. 尺蠖型压电驱动器基础理论与试验研究[D]. 长春: 吉林大学机械工程学院, 2006.
- (编辑 管咏梅)