

文章编号 1004-924X(2005)03-0305-06

压电型步进精密旋转驱动器

赵宏伟, 刘建芳, 华顺明, 刘国嵩, 程光明, 吴博达
(吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要:提出了一种将压电叠堆驱动元件应用到精密旋转驱动器上的研究方案。在对驱动器机械结构及旋转运动工作原理进行分析的基础上,建立了以压电叠堆为驱动元件的旋转驱动数学模型,采用有限元分析软件对机械结构进行了分析,并从旋转运动分辨率、运动稳定性等方面对所设计加工的样机进行了实验研究。实验结果表明设计的结构具有分辨率高、行程大和运行稳定等优点,克服了目前精密驱动机构存在的位移最小分辨率和大行程共存性不好的问题。

关键词:旋转驱动;压电叠堆;有限元分析;柔性铰链

中图分类号:TN384;TH703.6 **文献标识码:**A

Piezoelectric-type stepping precision rotary actuator

ZHAO Hong-wei, LIU Jian-fang, HUA Shun-ming,
LIU Guo-song, CHENG Guang-ming, WU Bo-da

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: A new research scheme applying PZT stack into precision rotary actuator is proposed. Based on the analysis of the main mechanical structure and rotary working principle of the actuator, a mathematical model using PZT stack as actuator element is set up, and the mechanical structure is analyzed by finite element analysis software. Experiments of rotary resolution and moving stability on the prototype are conducted. The results show that the designed actuator has the advantage of high rotary resolution and large rotary angle, overcoming the coexisting problem between the moving resolution and large moving range of precision actuator.

Key words: rotary actuation; piezoelectric stack; finite element analysis; flexible hinge

1 引言

由于压电陶瓷元件具有响应迅速、出

力大、位移分辨率高、机电转换率高以及结构紧凑等优点,国内外研究人员已利用其开发了相当多的微小型精密驱动机构^[1-8],并在精密加工、精密光学、微机电系统、航

空航天技术以及生物医学工程等领域展现出广阔的应用前景^[6-8]。但是目前研究开发的精密驱动机构往往存在着驱动位移最小分辨率和足够大的运动行程不能兼顾的问题^[9-10],阻碍了压电驱动器更好地应用到实际工程当中。

结合压电陶瓷材料的优点以及其线性性好的特点,本文设计开发了一种新型的压电型精密旋转驱动器,利用压电叠堆元件作为电-机械转换机构,通过柔性铰链实现对转子的箝位和驱动作用。此外,由于转子无绕线结构,使得驱动器可以在任意位置启动,并实现在整个圆周上的大行程旋转。设计、开发了驱动器样机,并从旋转运动行程、旋转分辨率以及驱动器运动稳定性等方面进行了实验研究。

2 结构原理

图 1 所示为压电驱动型精密旋转驱动器的样机。由柔性铰链实现精密旋转运动的导向和弹性回复作用,同时将上下两层结构联系在一起;此外上下两层结构各通过一组柔性铰链实现对转轴的箝位作用,所有柔性铰链的机械加工采用线切割方式完成。为得到较大的变形量、同时保证较好的回弹性,需要材料的 σ/E 尽可能的大,样机采用工程中用作弹簧钢的 65 Mn,其泊松比 $\delta=0.288$;弹性模量 $E=2 \times 10^{11}$ GPa;密度 $\rho=7.854 \times 10^3$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

工作中,底层通过 4 个螺纹孔固定在驱动器壳体上,上层为转动层,转动层与固定层之间以柔性铰链连接。驱动压电叠堆通过图示的驱动转换机构作用到上层,从而当其带电伸长时,能推动上层机构旋转一微小角度;当其断电回缩时,上层机构在连接上、下两层的柔性铰链的弹性回复作用下,恢复到原始位置。

当开始工作时,在电源时序电压信号

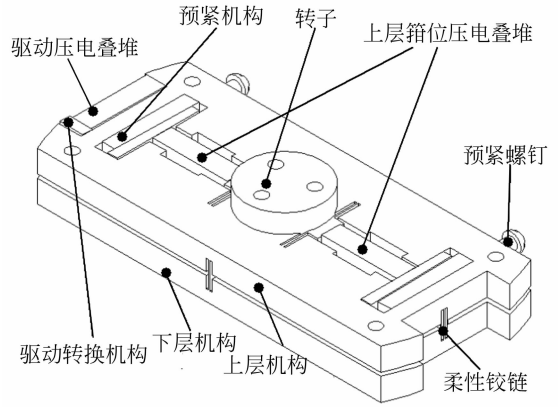


图 1 精密旋转驱动器机械结构

Fig. 1 Mechanism of precision rotary actuator

的作用下,上层的箝位机构先钳紧转子;随后驱动叠堆在时序电压作用下马上受电伸长,转子上层箝位机构的带动下转动一微小角度;底层箝位机构随之钳紧转子;上层箝位机构松开;驱动叠堆断电回缩;最后,底层钳位机构松开,这就完成了驱动器一个驱动周期的动作。当电源连续供电时,驱动器转子就会有连续的旋转运动输出。

3 理论分析

对于压电材料,当温度低于居里温度时表现出压电特性。在电场作用下,对单层压电陶瓷片而言,有

$$S=dE, \quad (1)$$

式中: S 为应变, $S=\Delta l/l$; d 为压电常数 (m/V); E 为电场强度 (V/m)。

$$d=\frac{S}{E}=\frac{\Delta l}{l} \times \frac{b}{U}, \quad (2)$$

式中: Δl 为压电陶瓷片所用方向施加电压后变形量 (m); l 为压电陶瓷片在所用方向上长度 (m); b 为压电陶瓷片的厚度 (m); U 为外界施加电压 (V)。

当 $b=l$ 时,有

$$\Delta l=d \times U, \quad (3)$$

由于单层的压电陶瓷片变形量很小,为了满足实际工作中位移、速度及承载等方面的需要,往往采用压电叠堆元件,构成压电叠堆的各层压电片之间在机械上串联、在电学上并联,因此在电压 U 作用下,压电叠堆总的变形量为各层压电片变形量之和

$$\Delta L = n \times \Delta l, \quad (4)$$

式中: ΔL 为压电叠堆总的变形量(m); n 为压电叠堆中单层压电陶瓷片层数。

由式(4)有

$$\Delta L = n \times d \times U, \quad (5)$$

此外,压电叠堆材料在实际工作中通常应用各层压电陶瓷片的纵向方向的逆压电效应实现微位移动作,故此时恰有 $b=l$,起作用的压电常数为 d_{33} ,则有

$$\Delta L = n \times d_{33} \times U, \quad (6)$$

样机选用 TOKIN 公司的 AE0505D16 型压电叠堆作为驱动元件,其压电常数 $d_{33} = 635 \times 10^{-12} (\text{m} \cdot \text{V}^{-1})$,压电片单层厚度 $l = 110 \mu\text{m}$,压电片层数 $n = 130$,据此由式(6),当 $U = 100 \text{ V}$ 时

$$\begin{aligned} \Delta L &= 130 \times 635 \times 10^{-12} \times 100 (\text{m}) \\ &= 8.255 \times 10^{-6} (\text{m}) \end{aligned}$$

同理以其他驱动电压进行计算最后得到图 2 中下面的计算结果曲线。针对理论计算结果,通过对压电叠堆空载状态下进行电压-伸长量试验考证。测试采用的电

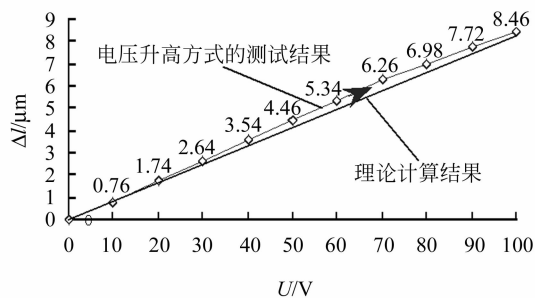


图 2 压电叠堆电压-伸长量关系曲线

Fig. 2 Relationship between voltage and elongation

压值见图 2,结果如图 2 中的测试曲线。从中可见,理论计算结果同驱动电压逐渐升高的试验测试结果基本接近,且线性性很好,这对保证驱动器开环工作状态下的可控性具有重要意义。

在驱动压电叠堆伸长 ΔL 作用下,上层机构会旋转 $\Delta\theta$ 的角度;如果此时转子被上层箝位机构箝紧,转子会被箝位机构带动随上层机构旋转 $\Delta\theta$ 的角度

$$\Delta\theta = \Delta L / L_{en} \times 10^6, \quad (7)$$

式中: $\Delta\theta$ 为转子单步旋转角度(μrad); L_{en} 为压电叠堆伸长方向轴线到转子回转中心的距离(m)。

参照 65 Mn 材料性能参数,以实际工作状态下底层 4 个螺纹孔作为约束条件,以压电叠堆在相应电压作用下伸长量的实验测试结果作为位移激励,激励位置在驱动压电叠堆作用位置处;应用 CATIA 软件有限元分析模块对主体机械结构进行了静力学分析。图 3 是以 100 V 电压下压电叠堆实际伸长量为位移激励的机械结构变形图。从中除可以发现上层机构相对于底层产生了明显的相对转动运动外,还通过仿真计算得到了箝位机构内侧参考节点的相应位移值。分析图中列出该节点 X、Y、Z 3 个方向的静态位移数值可知,在模拟实际工况的约束、激励情况下,箝位机构参考节点的位移以 X 方向的分量最为显著,而在该节点位置 X 方向的运动恰为带动转子进行的旋转运动,满足设计要求。

采用相同有限元静力学分析方法,在以相应电压下压电叠堆实际伸长量为位移激励下(其数值列于表 1 叠堆伸长列)得到该参考节点的沿 X 方向位移分量数值,列于表 1 参考节点列。表 1 中试验值列是试验测试得到的在对应驱动电压下,测量标杆上距转子回转中心距离 10 mm 处(与参考节点所在位置相当)随转子转过的单步线位移。

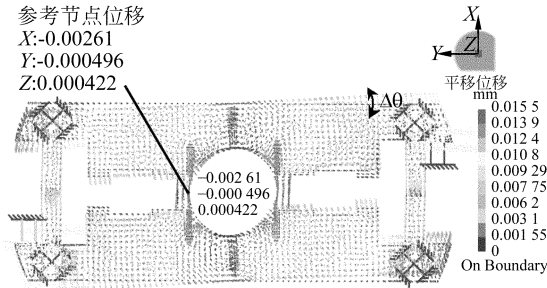


图 3 机械结构有限元位移

Fig. 3 FEM displacement of mechanism

表 1 理论分析和试验考证结果

Tab. 1 Results of computing and testing

电压 U/V	叠堆伸长 $\Delta l/\mu\text{m}$	参考节点 $\Delta l_{SF}/\mu\text{m}$	试验值 $\Delta S_C/\mu\text{m}$
0	0	0	0
10	0.76	0.234	0.09
20	1.74	0.536	0.32
30	2.64	0.814	0.56
40	3.54	1.092	0.85
50	4.46	1.376	1.11
60	5.34	1.648	1.44
70	6.26	1.932	1.7
80	6.98	2.154	1.96
90	7.72	2.382	2.17
100	8.46	2.610	2.45

从表 1 中所列的参考节点和试验值的数据可以看出:试验结果与仿真结果基本接近,且试验结果均偏小于理论分析结果,这种偏差除取决于系统建模仿真精度外,主要来源于实际工作中转子和定子轴孔间的微动摩擦,因为仿真分析过程并没有将这种摩擦考虑在内。

4 试验研究

对试制的驱动器样机在室温环境下从旋转运动分辨率、运动稳定性等方面进行了实验研究。压电叠堆在时序电压作用下,带动转子转动,转子上连接的测量标杆转过的弦长被激光测量头拾取,测得的位移被激光测位仪按可调的比例转换成电压

信号传入多功能傅里叶分析仪。激光测位仪测得的转子转动的微小线位移被离线换算成相应的角位移。

4.1 驱动器旋转运动试验研究

室温环境下,在驱动电压频率为 1 Hz 时,使驱动器转子每次转动 10 步,测得线位移经离线计算得到相关角位移。相应的驱动电压与转子旋转角位移如图 4 所示。试验测得在 100 V 电压作用下单步旋转最大角位移为 $212.14 \mu\text{rad}$,此时对应旋转速度为 $212.14 \mu\text{rad/s}$ 。此外,图 4 中其他 5 组实验数据线性性均较好,且能明显看出步距。

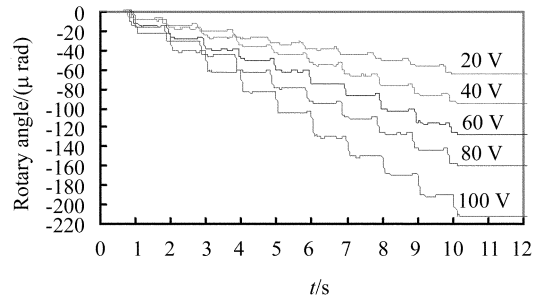


图 4 驱动电压-转角对应曲线

Fig. 4 Relationship between voltage and rotary angle

4.2 驱动器运动稳定性与分辨率

经多次试验发现,由于转子自身无电器元件,使得转子可在任意位置启动开始精密旋转运动,并能完成连续 360° 的旋转运动。图 5 是空载状态下对转子处于不同静态位置时启动,测得的数据经计算转换为相应角位移绘成的 1~5 组试验曲线,其中 1#、2#、3#、4# 组转子的静态启动位置分别相差 90° ; 5# 为随意的启动位置。这 5 组数据的线性拟和方程分别为

$$1\#: \Delta\theta = 2.5833 U - 15.995$$

$$R^2 = 0.9982$$

$$2\#: \Delta\theta = 2.6373 U - 18.203$$

$$R^2 = 0.9991$$

$$3\#: \Delta\theta = 2.6227 U - 18.074$$

$$R^2=0.999\ 2$$

$$4\#:\ \Delta\theta=2.617\ U-16.834$$

$$R^2=0.998\ 4$$

$$5\#:\ \Delta\theta=2.6828\ U-19.835$$

$$R^2=0.998\ 8$$

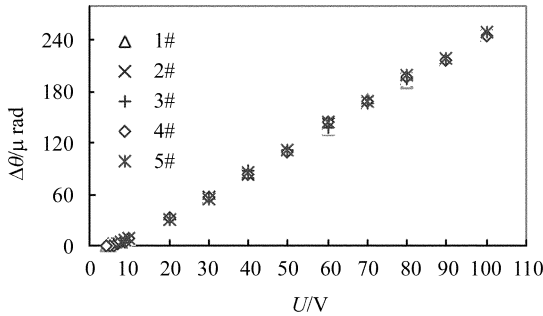


图 5 驱动电压-运动稳定性曲线
Fig.5 Voltage vs rotary stability

各个拟合方程的可靠度 R^2 均接近于 1,说明各方程线性性很好。据此,如果忽略压电元件和机械结构的非线性因素,可以得出转子的单步旋转角度是驱动电压的线性函数,即应有

$$\Delta\theta=\xi U+\theta_0, \quad (8)$$

式中: $\Delta\theta$ 为转子单步旋转角度(μrad); ξ 为拟合方程的斜率($\mu\text{rad}/\text{V}$); U 为驱动电压(V); θ_0 为拟合方程的截距(μrad)。

为了进一步分析驱动器运行的稳定性,定义了拟合方程斜率和截距的偏差率如下:

$$\eta_\xi=\frac{|\xi|_{\max}-|\xi|_{\min}}{|\xi|_{\text{aver}}}\times 100\%, \quad (9)$$

式中: η_ξ 为拟合方程斜率偏差率(无量纲); $|\xi_{\max}|$ 为各组拟合方程中斜率绝对值的最大值($\mu\text{rad}/\text{V}$); $|\xi_{\min}|$ 为各组拟合方程中斜率绝对值的最小值($\mu\text{rad}/\text{V}$); ξ_{aver} 为各组拟合方程中斜率绝对值的平均值($\mu\text{rad}/\text{V}$)。

$$\eta_{\theta_0}=\frac{|\theta_0|_{\max}-|\theta_0|_{\min}}{|\theta_0|_{\text{aver}}}\times 100\%, \quad (10)$$

式中: η_{θ_0} 为拟合方程截距偏差率(无量纲); $|\theta_0|_{\max}$ 为各组拟合方程中截距绝对值的最大

大值(μrad); $|\theta_0|_{\min}$ 为各组拟合方程中截距绝对值的最小值(μrad); $|\theta_0|_{\text{aver}}$ 为各组拟合方程中截距绝对值的平均值(μrad)。

根据式(9)、(10),并代入上述 5 组拟合方程的相应数据可得

$$\eta_\xi=3.785\%$$

$$\eta_{\theta_0}=21.587\%$$

分析这 2 类偏差率数据可知,系统旋转运动状态较为稳定,这一点在拟和方程斜率的偏差率 η_ξ 值上得到充分的体现,但拟和方程截距的偏差率 η_{θ_0} 相对较高,这主要是由于低电压下驱动器转子输出位移的重复性相对较差造成的。而这种重复性相对较差在很大程度上受制于测试系统的精度和外界的干扰,如图 6,在低电压驱动下转子位移输出量较小,而此时测试系统拾取的静态信号的跳动量相比于高驱动电压输出大位移时变得相对明显了。

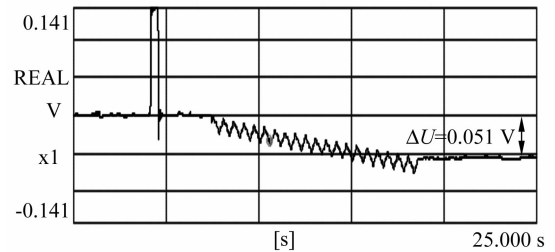


图 6 驱动电压 4 V 下转子 20 步转过的线位移
Fig.6 Linear displacement of rotor for 20 steps and 4 V

驱动器在运行过程中,由于动子和定子轴孔间的摩擦是无法消除的,所以必然存在一个使驱动器能够稳定运行的最小驱动电压值,而在这一电压作用下,动子单步旋转的角度就是驱动器的旋转运动分辨率。图 6 是驱动器在能使其稳定运行的最小驱动电压为 4 V 的情况下,转子连续旋转 20 步带动测量标杆所转过的线位移。

根据试验条件,可计算出此时转子单步转过的角度(驱动器的旋转分辨率)

$$\Delta\theta = \frac{0.051 \text{ V} \times 10 \frac{\mu\text{m}}{\text{V}}}{100 \times 10^{-3} \text{ m}} \times \frac{1}{20} = 0.255 \mu\text{rad}$$

试验条件:环境温度 25 °C,测量标杆上测试点距转子回转中心距离 100 mm,测得的线位移每 10 μm 转换成 1 V 电压值送入傅里叶分析仪。

5 结 论

研究开发的新型精密旋转驱动器,通过压电叠堆元件将电能转换成机械运动,

对设计的机械结构进行了运动原理和有限元仿真分析;并试制了样机,对样机性能进行了实验测试,理论分析结果与试验测试结果基本相符。实验结果表明,所设计的旋转驱动器具有结构紧凑、分辨率高(可达 0.255 μrad)及运动稳定等优点;同时,转子没有线圈缠绕,使得驱动器可以在任意位置启动,并可连续旋转 360°,在精密工程的有关领域具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] LIU Y T, FUNG R F, HUANG T K. Dynamic response of a precision positioning table impacted by a soft-mounted piezoelectric actuator[J]. *Precision Engineering*, 2004, 28(3): 252-260.
- [2] TENZER P E, MRAD R B. On amplification in inchworm precision positioners[J]. *Mechatronics*, 2004, 14: 515-531.
- [3] KIM S C, KIM S H. Precise rotary actuator by inchworm motion using dual wrap belts[J]. *Review of Science Instruments*, 1999, 70(5): 2546-2550.
- [4] AWABDY B A, AHIH W C, AUSLANDER D M. Nanometer positioning of a linear motion stage under static loads[J]. *IEEE Trans Mechatronics*, 1998, 3(2): 113-119.
- [5] SHIM J Y, GWEON D G. Piezo-driven metrological multiaxis nanopositioner[J]. *Review of Science Instruments*, 2001, 72(11): 4183-4187.
- [6] 吴一辉, 王立鼎, 马建旭. 新型微变位致动器的发展与应用[J]. *光学精密工程*, 1996, 4(2): 7-13.
WU Y H, WANG L D, MA J X. Develop and applications of new micro-motion actuators[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1996, 4(2): 7-13. (in Chinese)
- [7] 孙立宁, 荣伟彬, 曲东升, 等. 基于微操作的大行程高分辨率旋转微驱动器的研究[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(6): 7-13.
SUN L N, RONG W B, QU D SH, et al. Research on a large travel and high resolution rotary micro driver based on micro-manipulation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(6): 7-13. (in Chinese)
- [8] ZHANG B, ZHU Z. Developing a linear piezomotor with nanometer resolution and high stiffness[J]. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 1997, 2(1): 22-29.
- [9] GAO P, SWEI SH M, YUAN ZH. A new piezodrived precision micropositioning stage utilizing flexure hinges[J]. *Nanotechnology*, 1999, 10: 394-398.
- [10] SHAMOTO E, MORIWAKI T. Development of a "walking drive" ultraprecision positioner[J]. *Precision Engineering*, 1997, 20(2): 85-92.

作者简介:赵宏伟(1976—),男,吉林九台人,助教、博士研究生,主要研究方向为压电驱动控制技术和机械系统动力学及加工精度,参予承担国家 863 项目 1 项、国家自然科学基金项目 1 项、其它省部级科研项目 3 项。已发表论文 6 篇,其中 EI 收录 2 篇,申报专利 1 项。E-mail: hweizhao@sohu.com