

## 《压电驱动与控制技术》专题文章导读

杨志刚

吉林大学机械工程学院

功能材料的利用是现代先进制造技术的主要手段之一。由于功能材料除具有普通材料的硬度、弹塑性等性能之外,还具有接受电场、光场、磁场以及温度场等的作用而形成位移、振动以及变形等机械变化的能力,可以用来构造一些结构特殊、性能优异的机械驱动、控制或执行器件,因而极大地丰富了现代先进制造技术的内容。现已有的功能材料主要有压电晶体、形状记忆合金、磁致伸缩材料等,其中由于压电材料制造历史悠久、技术成熟、成本低、性能稳定而获得了广泛应用,由此逐步开发出以压电器件为核心、以机械结构为主要换能方式、以提供运动驱动或控制能力为目的的一类新型驱动与控制器件,进而发展形成为一门专有新技术。

压电驱动与控制技术是压电学与超声学在机械领域中的应用延伸与发展。压电驱动或控制的主要实现过程是压电能的生成与转换,因而要求作为动力源的压电体提供较大的位移或振动,同是要求转换机构效能较高而结构简单,这给压电驱动与控制技术提出了新的课题。此外压电驱动与控制技术的作用对象通常是一个机电的耦合系统,它的进步也依赖于材料学、电子学、机械力学、实验科学等的发展,因而这是一个多学科交叉的综合研究与工程技术领域。

压电驱动与控制技术近年来获得了长足发展,其中圆环形的行波超声马达、微动精密驱动器、压电送料器等十余类驱动器已经作为产品推向市场,显示了这一领域的光明前景。

在本期《压电驱动与控制技术》专栏中,我们给出了《新型压电精密步进旋转驱动器研究》(第一篇论文名)等 11 篇论文,就压电泵、压电精密驱动以及压电仿生驱动的一些基本理论与技术问题探讨,以此同广大科研人员进行交流、探讨并希望能为提供一些相关技术研究的有益参考。

文章编号 1004-924X(2006)04-0001-04

# 新型压电精密步进旋转驱动器研究

刘建芳<sup>1</sup>,杨树臣<sup>2</sup>,杨志刚<sup>1</sup>,程光明<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 机械学院,吉林 长春 130025; 2. 吉林工程技术师范学院,吉林 长春,130052)

**摘要:**提出了一种新型的压电精密步进旋转驱动器。该驱动器根据仿生运动原理,以压电陶瓷叠堆为动力源,采用定子内侧箝位的方式和薄壁柔性铰链微变形结构,提高了箝位的稳定性和步进旋转的稳定性。通过静力学有限元分析和动力学分析,较深入地研究了该驱动器的运动特性。研究表明,该驱动器具有高频率(40 Hz),较高速度(325  $\mu\text{rad}/\text{s}$ ),大行程( $>360^\circ$ ),高分辨率(1  $\mu\text{rad}/\text{step}$ ),较大驱动力(30  $\text{N}\cdot\text{cm}$ )等特点,提高了压电精密步进旋转驱动器的驱动性能,在精密运动、微操作、光学工程、精密定位等精密工程领域有广阔的应用前景。

**关键词:**步进旋转驱动器;压电陶瓷叠堆;定子内侧箝位;薄壁柔性铰链;有限元分析;分辨率

**中图分类号:**TH703.6 **文献标识码:**A

收稿日期:2005-05-12;修订日期:2006-07-18.

基金项目:国家“863”高科技资助项目(No. 2002AA423150)。

# Study on precision PZT rotary step actuator with inner anchor/loosen

LIU Jian-fang<sup>1</sup>, YANG Zhi-gang<sup>2</sup>, ZHAO Hong-wei, CHENG Guang-ming

(1. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun, 130025, China; 2.)

**Abstract:** A new precision rotary PZT actuator was proposed to improve its drive capabilities. Based on the piezoelectric (PZT) technology and the bionical principle, the PZT actuator uses a stator inner anchor/loosen and a distortion structure of thin shelf flexible hinge to improved the stability of anchor/loosen and step rotary. With a characteristic analysis from the finite element method, the results show that the new rotary PZT actuator works with high frequency (40 Hz), high speed (325  $\mu\text{rad/s}$ ), large travel (360°), high resolution (1  $\mu\text{rad/step}$ ) and high torque (30 N·cm) and it will be suitable for application to large travel and high resolution driving device, optics engineering, precision positioning and some micro-manipulation field.

**Key words:** rotary step actuator; piezoelectric element; stator inner anchoring/loosen; thin shelf flexible hinge; finite element analysis; resolution

## 1 引言

压电精密驱动器的最主要特点是具有高的分辨率,即步进驱动时每一步所能达到的最小位移。近年来,随着微/纳米技术的迅猛发展,对驱动精度的要求在纳米级的水平。在光学工程、微电子制造、航空航天、超精密机械制造、微机器人操作、地震测量、生物、医学及遗传工程等技术领域的研究都迫切需要亚微米级、微/纳米级的超精密驱动<sup>[1-2]</sup>。

压电材料在驱动时具有纳米级的稳定输出位移精度,并且具有压电驱动线性好、控制方便、分辨率高、频率响应好、不发热、无磁干扰、无噪声等特点。同时,压电驱动器能满足体积小、重量轻、大功率密度<sup>[3-5]</sup>等要求,因此采用压电驱动能较好地实现超精密驱动的性能。

采用定子内侧箝位结构实现步进旋转运动是一种新的尝试。本文采用 4 片无间隙薄壁柔性铰链结构精确地将压电陶瓷的直线运动转化为旋转运动,在箝位和驱动的作用下实现了高精度步进旋转运动,即一种“箝位一步进一箝位”方式的仿生型运动<sup>[6]</sup>,该结构为进一步了解和研究压电精密旋转驱动器提供了一种新的方法和借鉴。

## 2 总体结构及其工作原理

图 1 为内箝位压电精密步进旋转驱动器的总体结构,主要由定子箝位体、转子、驱动压电陶瓷连接体、箝位压电陶瓷和驱动压电陶瓷组成。定子箝位体结构分上下两部分,即上箝位块和下箝位块,上箝位块和转子上的上转子体接触,而下箝位块和转子上的下转子体接触。转子体通过 4 片均匀分布的薄壁柔性铰链把上、下转子体连接为一体。驱动压电陶瓷安装在驱动压电陶瓷连接体上,连接体的一侧和上转子体接触,另一侧和下转子体接触,连接体上加工有可伸缩变形的柔性铰链。该驱动器的结构及运动原理如下。

(1)初始状态时上箝位压电陶瓷和驱动压电陶瓷处于自由状态,下箝位压电陶瓷(图中未显示,与下箝位块连接)通电箝位,使下箝位块和下转子体箝位到一起固定不动;(2)驱动压电陶瓷通电伸长,由于下转子体不动,所以在连接体的柔性铰链变形下推动上转子体顺时针旋转一个角度  $\theta$ ;(3)上箝位压电陶瓷通电箝位,上箝位体与上转子体箝位固定;(4)下箝位压电陶瓷由箝位变为松开,下转子体和下箝位块分开;(5)驱动压电陶瓷断电松开,下转子体在铰链回弹力的作用下沿顺

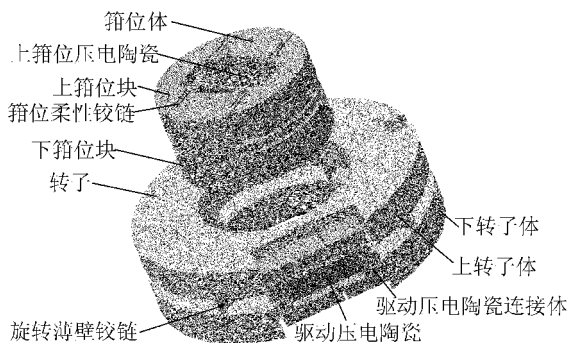


图 1 内箱位型压电精密旋转驱动器总体结构

Fig. 1 Structure of the PZT actuator

时转  $\theta$  角,然后下箱位压电陶瓷重新开始箱位。这样完成了一个步进旋转动作循环,机构沿顺时针方向转动了一步。连续重复上述步骤,即可实现顺时针连续步进旋转。同理可以实现逆时针旋转。

### 3 运动过程及分析

#### 3.1 箱位运动及其分析

内箱位型压电精密步进旋转驱动器的定子箱位体结构如图 2 所示。上下箱位块均设计有双侧双向薄壁柔性铰链,既减小了箱位时上、下箱位块对箱位效果的干扰(即上箱位时可能导致下箱位体与下转子压紧),又保证了箱位时柔性铰链只沿压电陶瓷伸长的方向变形,而不产生其它方向的变形而导致对转子产生附加转矩。另外,箱位时上、下箱位体要保证分别只与上、下转子体接触,而不和其它部分接触。在实际工作中,由于定子箱位体和转子之间是接触的,没有间隙,或者说间隙很小,因此柔性铰链几乎不产生很大的变形,而仅仅是箱位力的传递。

在步进驱动中,箱位过程是影响步进运动效果关键因素,箱位性能参数主要包括箱位力参数  $F$ ,箱位响应频率参数  $f_1$  和箱位稳定性参数  $S_1$ 。大的箱位力可使箱位牢靠;高的箱位响应频率使箱位灵敏,便于实现高频高速步进运动;箱位稳定性  $S_1$  是指箱位过程对步进运动的影响程度,即不会因箱位冲击而产生附加转矩,从而提高步进重复性精度。

对该箱位系统的静力学和动力学分析可作如下假定:假设单侧箱位块质量为  $M$ ,中间受一恒

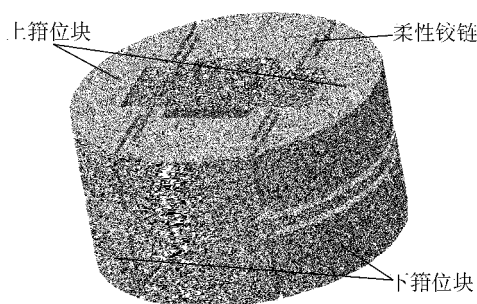


图 2 定子箱位体结构

Fig. 2 Stator structure of the PZT actuator

力  $F_f$ (压电陶瓷伸长产生)作用,由材料力学知识可以推出:在  $F_f$  的作用下箱位块产生的位移量  $s$  为

$$s = F_f l_1 / 48EI, \tag{1}$$

该箱位系统的固有频率为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{48EI}{(M + 34\rho l_2 / 35)l_1^3}}, \tag{2}$$

式中  $EI$ —薄壁铰链截面抗弯曲刚度系数

$M$ —箱位块质量

因此在保证箱位牢靠、刚性满足要求的前提下,最大限度地减小  $M$  的质量,采用  $EI$  合适的材料和结构,将能显著提高系统的固有频率。由于薄壁铰链截面的影响,使系统的抗弯刚度系数  $EI$  引起的抗弯力  $F_e \ll F$ ,从而使  $F$  有效的作用在上、下转子体上,产生的摩擦箱位力  $F_f$  为

$$F_f = K_s \cdot (F - F_e) \approx K_s \cdot F, \tag{3}$$

而产生的箱位力矩  $M_f$  为

$$M_f = F_f \cdot r, \tag{4}$$

式中: $K_s$  为箱位块与转子间的有效静摩擦系数, $r$  为定子半径。在工作过程中,压电陶瓷的预紧力  $F_p$ ,压电陶瓷与箱位块之间的连接牢固程度,箱位块与转子之间的间隙大小都对  $F$  有很大影响。压电驱动陶瓷有很高的响应频率(10 kHz),尽可能提高定子箱位体结构的固有频率可使整个系统的响应频率  $f$  提高。另外,在工作中,箱位系统的实际频率  $f_1$  和转子系统的实际频率  $f_2$  是一致的,所以箱位系统的固有频率和转子系统的固有频率应尽量趋于一致。

图 3 为采用有限元分析软件 Ansys 对该箱位结构进行有限元分析的结果变形图。分析中建立结构的有限元模型,采用三维四面体单元 SOLID45 对实体模型进行单元划分,有限元网格

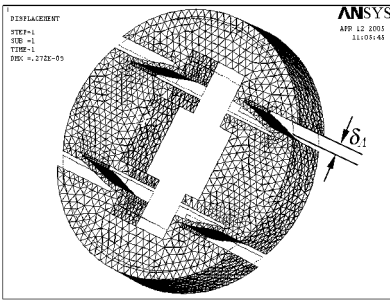


图 3 定子箱位体结构的有限元变形分析

Fig. 3 FEM displacement of stator mechanism

模型共有 502 21 个节点, 361 18 个单元, 其中柔性铰链与定子箱位体连接端简化成固支, 箱位体采用具有高弹性模量的弹簧钢材料。分析得到系统的固有频率  $\omega_b$  和位移  $\delta_A$ , 在有限元分析中得到了与理论分析近似的结果。

### 3.2 旋转运动及其分析

图 4 为转子的结构图。转子是由上转子体、下转子体及通过圆周均布的四片薄壁柔性铰链连接为一起的整体结构, 此铰链结构能保证上、下转子体绕转子中心旋转。驱动压电陶瓷连接体一侧与上转子体接触, 另一侧与下转子体接触, 连接体上有变形铰链结构, 当压电陶瓷通电伸长时, 则左侧对上转子体施加推力, 右侧对下转子体施加推力。四片薄壁柔性铰链和连接体上的柔性铰链在驱动压电陶瓷回缩时起到弹性回复作用, 除此之外连接体结构还能起到对驱动陶瓷的安装预紧和保护作用。转子与定子配合的表面精度要求较高, 因此在原始状态下转子能在自由转动的前提下力求间隙最小。转子是驱动器的运动部件和动力输出装置, 其运动参数包括步距角参数  $\Delta\theta$ 、有效推力参数  $F_e$  和频率参数  $\omega_n$ 。步距角和结构尺寸、铰链刚度、压电陶瓷的变形量有关。其步距角大小可按下式计算:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta l}{\sqrt{\left(\frac{t}{2}\right)^2 + l_B^2}} \frac{180^\circ}{\pi}, \quad (5)$$

式中  $\Delta\theta$ —距角( $^\circ$ )

$\Delta l$ —压电陶瓷伸长量(m)

$t$ —陶瓷长度(m)

$l_B$ —陶瓷中心到铰链中心距离(m)

上、下转子体是否绕转子中心轴进行微角度旋转运动是该系统能否进行步进旋转运动的关键

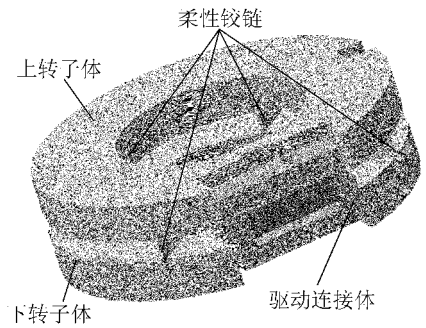


图 4 转子结构图

Fig. 4 Structure of the actuator

因素和前提条件, 通过对转子进行静力学有限元分析可以进行验证。图 5 为对转子结构进行分析的模型结果图。在分析过程中, 以图 5 所示的下转子体为固定侧进行约束, 对驱动压电陶瓷的左侧接触面施加力  $F$ , 从图中可以清楚地看到驱动后的薄壁柔性铰链的变形效果及上转子体旋转位移  $\delta$ 。另外通过对分布在转子圆周上的多个点进行有限元分析得出: 变形后各点仍以较高的精度分布在变形前所在的圆周上, 这充分说明转子体结构的变形是绕着转子中心轴进行的。在有限元分析中, 施加不同的力  $F$ , 得到了不同的旋转位移量  $\delta$ 。各参数之间关系为:

$$F_e = F - F_w = (K_s + K_R) \cdot \delta, \quad (6)$$

式中:  $F$ —压电陶瓷产生的推力

$F_w$ —有效输出载荷

$K_s$ —连接体薄壁铰链的当量弹性系数

$K_R$ —转子薄壁铰链的当量弹性系数

$\delta$ —转子的旋转变形位移量

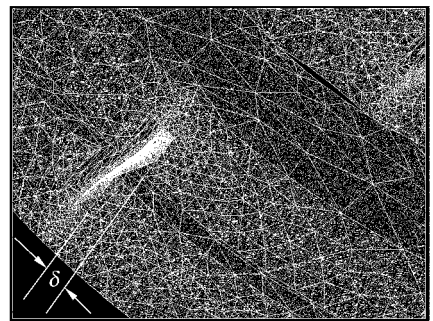


图 5 转子结构微动旋转的有限元分析

Fig. 5 FEM distortion of the actuator

步进旋转驱动过程是一个较复杂的过程, 涉及到压电陶瓷的响应时间, 输出载荷的加速度变

化,内部能量损耗等,所以这里采用了当量弹性系数  $K_S$ 、 $K_R$ 、有效推力  $F_e$ 、有效输出载荷  $F_W$  等对系统进行有效描述。转子运动时,驱动压电陶瓷应具有与箝位部分相同的运动频率,所以,为了提高整体系统的频率,应尽可能地提高转子系统本身的固有频率。但转子部分与定子箝位体部分是不同的,定子箝位系统的固有频率一旦设计完成,是一个固定不变的量,而直线动子系统的固有频率则随着输出载荷的变化而变化,是一个变化的量。由材料力学和振动力学知识可以得出:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_S + K_R}{M + M_W} + \frac{2F_0}{(M + M_W)e}}, \quad (7)$$

式中  $M$ —上转子体和连接体的有效质量  
 $M_W$ —外部载荷物体质量  
 $F_0$ —施加在压电陶瓷上的预紧力  
 $e$ —转子运动的振幅

在转子设计中,在满足强度条件和步进位移量的前提下,应尽量提高薄壁柔性铰链的等效弹性系数  $K_S$  和  $K_R$ ,减小转子和连接体的质量  $M$ ,使系统具有良好的动态性能。

### 4 压电旋转驱动器控制系统研究

控制系统中,需要采用与驱动原理一致的控制信号,整个实验系统如图 6 所示。PC 机作为整个系统的核心来控制其运动状态。PC 发出的数字信号经 3 路 D/A 转换成模拟信号并通过 3 路放大装置进行放大。3 路经放大的电源按给定的时序对 2 个箝位压电陶瓷和 1 个驱动压电陶瓷进行协调控制。在控制系统回路中,由于压电陶瓷为电容性器件,为使其实现快速伸缩的性能,必须针对压电叠堆设计出高频完全放电回路,使压电叠堆在断电时其内部存储的电量能够迅速彻底放掉。另外,系统中安装了激光精密位移测量装置,对系统结构产生的位移进行准确的测量,并送入 PC 进行详细处理。

驱动所用的电源信号时序关系对整个系统的动作至关重要,它直接影响系统的运动效果。3 路时序信号的相位关系如图 7 所示。第 1、3 路为箝位压电陶瓷通电信号,第 2 路为驱动压电陶瓷通电信号。时序信号为梯形信号,这样可消除电源信号的上升沿和下降沿因突变而产生的冲击噪声,并且对压电驱动元件起到保护作用,提高压电

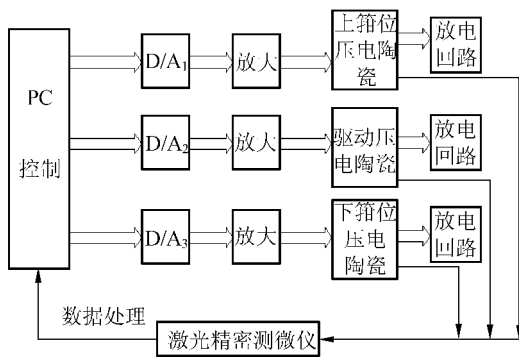


图 6 压电旋转驱动器的控制原理图

Fig. 6 Principle of control system

陶瓷的使用寿命。在控制信号的设计方面,应充分考虑各部分的时序分配,如图 7 所示:把一个周期  $T$  分为 6 等分,每等分  $t = T/6$ ,电源信号的上升沿和下降沿分别占  $\Delta t$ ,  $\Delta t \approx t/4$ 。箝位电压信号的平均低电平(断电)时间为  $2t = T/3$ ,平均高电平(通电)时间为  $4t = 2T/3$ ,驱动电压信号的高电平和低电平时间是相等的,分别占  $T/2$ ,左右箝位电压信号的时序相差  $3t$ 。

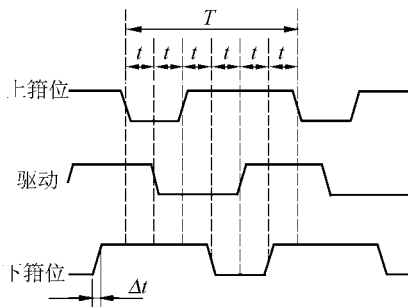


图 7 控制时序

Fig. 7 Sequence control system

### 5 压电旋转驱动器控制实验研究

#### 5.1 试验装置和仪器

图 8 为研制的压电步进旋转驱动器内部结构的实物照片,图 9 为该驱动器的整体测量系统。测量中用到的仪器有:JPC 型集成精密信号发生器,LC2400A 型非接触精密激光测微仪,HPC 系列压电陶瓷驱动电源,精密气浮隔振台等。测量中将激光测微仪的激光焦点照射到运动体的表面上并调到稳定状态,通过屏幕上显示的

数据可得到旋转位移的大小。

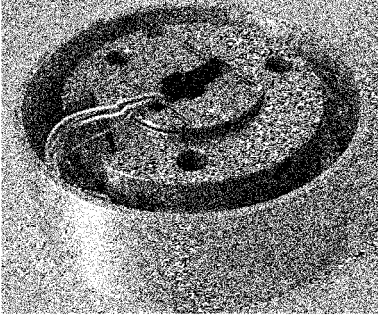


图 8 压电旋转驱动器的内部结构

Fig. 8 Inner structure of PZT actuator

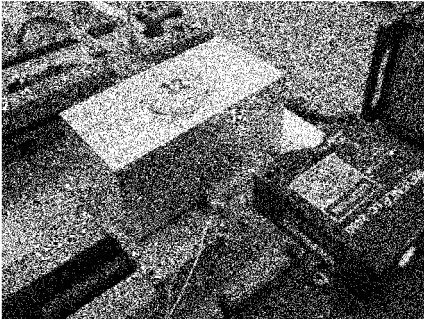


图 9 实验装置

Fig. 9 Experiment device

## 5.2 分辨率测量

分辨率是指步进运动时每一步所能达到的最小步长,是精密驱动器的一个重要指标。图 10 是对该驱动器进行分辨率测量的曲线图,可以看出,驱动电压 5 V 时得到其分辨率值大约为  $1 \mu\text{rad}$ 。而大于 5 V 时分辨率值增大,低于 5 V 时,无角位移输出。因此在驱动电压 5 V 时得到的数值即为该驱动器的最大分辨率,5 V 驱动电压就称为截止驱动电压。

## 5.3 箝位力及箝位稳定性测量

图 11 为箝位力  $F_f$  的测量曲线。通过测量得出系统的箝位摩擦力  $F_f$  达到 240 N,以钢和钢材料之间的摩擦系数 0.27 计算,AE0505D16 压电叠堆加 100 V 电压时产生了 900 N 的推力。

箝位稳定性是指当箝位完成后,给驱动压电陶瓷一个脉冲时对箝位端产生的影响程度,可用产生的微位移量  $\sigma$  表示,表 1 是通过多次测量从直接测得的弦长转化为弧度的数据。

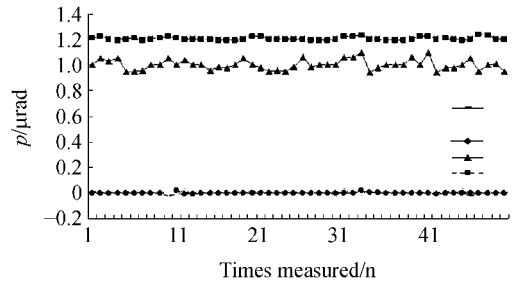


图 10 分辨率测量

Fig. 10 Resolution test

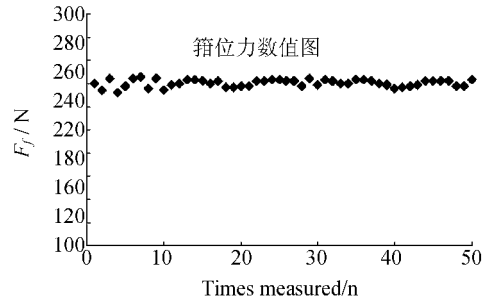


图 11 箝位力测量

Fig. 11 Clamp force test

表 1 箝位稳定性数据表

Tab. 1 Clamp stability data

次数 $n$	位移 $\sigma(\mu\text{rad})$
1	0.02
2	0.03
3	0.04
4	0.02
5	0.02
6	0.04
7	0.02
8	0.02
9	0.04
10	0.02

从表中可以看出,箝位稳定性测量值  $\sigma$  的平均值低于  $0.03 \mu\text{rad}$ ,较好地实现了箝位稳定。

## 5.4 步进旋转速度测量

步进旋转速度是衡量该驱动器的一个重要指标,驱动器的速度由驱动电压和步进频率决定。其关系如图 12 所示,图中给出了几种典型频率的速度曲线,从图中可以看出,驱动器在无外加载荷的情况下,步进频率 40 Hz 时速度达到  $325 \mu\text{rad/s}$ ,实现了较高速、精密运动,并且根据需要可适

当调节频率和驱动电压来满足各种速度要求。另外,压电陶瓷闭环上升曲线的斜率是上升的,而图中速度-电压曲线的斜率随电压的升高逐渐降低,产生这种现象的原因是当电压升高时,压电陶瓷位移量的增大导致柔性铰链的变形增大,从而产生附加载荷所致。

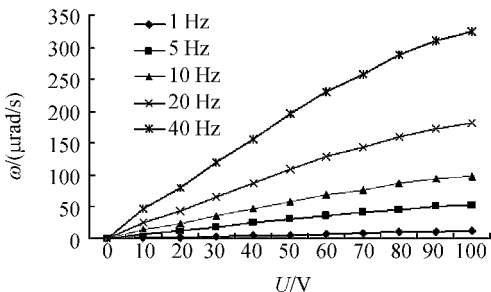


图 12 步进转速测量  
Fig. 12 Voltage-velocity curve

### 5.5 步距稳定性测量

步距稳定性是指实际步距与理论步距之间的误差比的平均值,可用下式表示为:

$$\eta_s = \sum_{i=1}^n (|S_{pi} - S_{ti}| / S_{ti}) / n, \quad (8)$$

式中,  $\eta_s$ —步距稳定性系数

$S_{pi}$ —实际步距量

$S_{ti}$ —理论步距量

$n$ —测量次数

测量中,得到各种电压下的  $\eta_s$  值,大约为: 1.2‰—1.3‰。如图 13 所示,通过  $\eta_s - V$  曲线可看出系统的运动状态是稳定的。

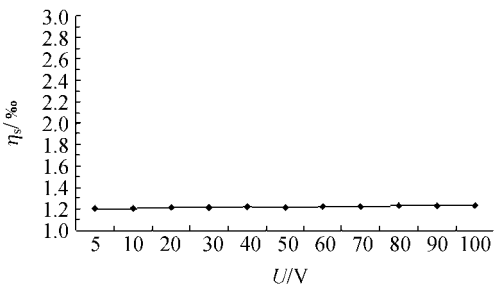


图 13 步距稳定性曲线

Fig. 13 Stability of step displacement

### 5.6 转矩测量

输出扭矩是衡量压电驱动器的一个重要指标。图 14 为输出角位移量大小和输出扭矩之间的关系图,从图中可以看出,在同一电压下,在一定的载荷范围内,力对位移的影响不明显,超过一定的外载荷,则位移有轻微的下降趋势。实验中,在 100 V 电压下,外载荷  $M < 30 \text{ N} \cdot \text{cm}$  的情况下,载荷变化对位移的影响不明显,但超过一定载荷后,输出位移急速下降,这是因为当达到一定的输出载荷时,箝位力不足以承担驱动压电陶瓷对箝位端产生的反作用力,这时出现步进紊乱所致。由图中曲线可以看出,在  $M < 30 \text{ N} \cdot \text{cm}$  时,角位移输出是比较稳定的。

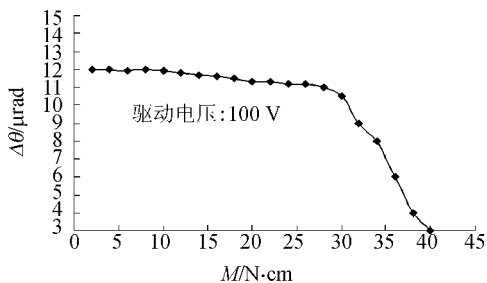


图 14 转矩测量

Fig. 14 Run torque test

## 6 结 论

(1) 压电精密步进旋转驱动器具有高频率 (40 Hz)、高分辨率 ( $1 \mu\text{rad}$ )、较大驱动转矩 ( $30 \text{ N} \cdot \text{cm}$ )、较高驱动速度 ( $325 \mu\text{rad/s}$ ) 和任意角度旋转等特性。

(2) 薄壁柔性铰链定子箝位体结构工作频率高、箝位牢固、工作可靠,解决了高频和箝位牢固之间的矛盾。

(3) 利用定子内箝位方式和薄壁柔性铰链结构实现步进旋转驱动为该类型驱动器的设计提供了一种可借鉴的方法。

## 参考文献:

- [1] BEXELL M, JOHANSSON S. Characteristics of piezoelectric miniature motor [J]. *Sensors Actuators*, 1999, 75: 118-130.
- [2] PAROS J M, WEISBORD L. How to design flexure hinges [J]. *Machine Design*, 1965: 151-156.
- [3] 刘品宽, 孙立宁. 新型二维纳米级微动工作台的动力学分析[J]. *光学 精密工程*, 2002, 10(4): 143-146.
- [4] FRANK J, KOOPMANN G H, CHEN W CH. Design and performance of a high force piezoelectric inchworm actuator [C]. *SPIE*, 1999, 3668: 717-723.
- [5] 杨志刚, 李军. 具有柔性铰链的差式微位移放大机构的受力分析[J]. *压电与声光*, 2000, 17(1): 57-61.  
YANG ZH G, LI J. Analytic solution of a differential action microscopic magnifying mechanism with flexure hinges [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2000, 17(1): 57-61.
- [6] 张福学, 王丽坤. 现代压电学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.  
ZHANG F X, WANG L K. *Modern piezoelectricity*[M]. Beijing: Science Publishing Company. 2001. (in Chinese)

作者简介: 刘建芳(1975—), 男, 吉林大学工学博士研究生, 主要研究方向为精密机械与微小机械, 压电驱动与控制技术, 曾承担国家 863 计划子项目“步进式压电精密驱动器的研究”, 发表论文 13 篇。E-mail: ljfshx2356@yahoo.com.cn