

# 压电元件驱动的微小夹持器的研制\*

陈建宇 孙麟治

(上海大学精密机械工程系, 上海 201800)

**摘要** 介绍了压电元件驱动的微小夹持器的结构设计, 提出了由层叠式压电元件和柔性铰链组成的夹持器张合量的计算方法, 列出了增大张合量的二种变型结构。

**关键词:** 微小机械; 压电元件; 柔性铰链; 夹持器

## 1 引言

近年来基于大规模集成电路制造技术(IC 工艺)或深层同步辐射光刻(LIGA 工艺)发展起来的微电子机械系统(MEMS)成为很多先进技术国家的研究热点, 制成一些以微米级尺寸为特征的静电马达和微传感器等。

另一方面, 以毫米级尺寸为特征, 采用现代精密机械加工技术制作的微小机械, 例如轮式小车、行走机器人、微型驱动器、可控操作手等, 都有较大进展, 因为这些微小机械具有广泛的应用领域, 例如在生产中遇到的微型宝石轴承、钟表零件、小型片状电路等零件、部件的搬送和装配、核工业管道内的微裂缝检查和维修等。因此这类微小机械也已引起国内外科技界的瞩目, 成为重要研究方向。

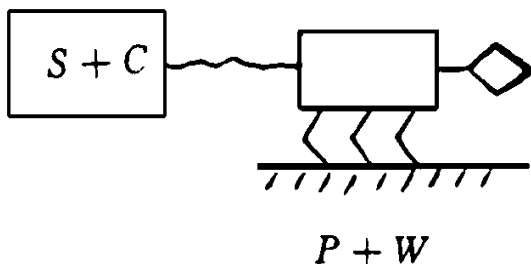


Fig. 1 System of movable micro-robot

微小机械的研究目标之一, 在于开发出具有不同功能的智能化微机器人, 用以满足上述需要。一个行走式的微机器人系统(如图1)通常有四大组成部分: 即驱动能源S、控制器C、行走定位器P和操作器W。操作器通常称为夹持器或抓手, 很显然它是此类实用型机器人中的重要组成。为此, 我们对此进行了一些探索, 制成三种集成型微小夹持器。

## 2 夹持器的结构设计

图2所示的是由 PZT 压电元件1和柔性铰链2组成的集成型微小夹持器。夹持器的驱动器采用 PZT 层叠式压电元件, 安装于夹持器的中央。柔性铰链是其执行机构。实现夹持工作的原理在于控制电源对压电元件施加电压时, 由此激发出的压电元件的推动力和轴向变形, 通过柔性铰链的杠杆放大, 实现夹持器前端抓手的张合动作。

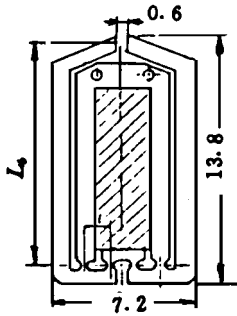


Fig. 2 Integrated flexible hinge gripper

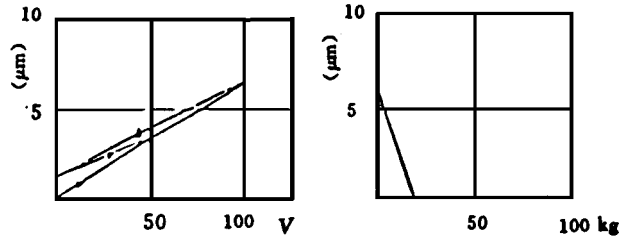


Fig. 3 Characteristic curve of PZT piezo element

PZT 层叠式压电元件由日本 TOKIN 公司提供, 它具有尺寸小、承载能力大、线性度好和驱动电压低等优点。图3示出 NLA-2×3×9 型 PZT 压电元件的变形量和负载力曲线压电元件的频响速度不大于 0.1 ms, 但其变形量不大, 施加 100 V (DC) 电压时, 其无负载变形量仅为 6.5 μm。很显然, 为了获得较大的夹持张合量, 必须寻求一种动作灵敏, 并具有较大放大倍数的执行机构。

采用柔性铰链作为其执行机构的原因, 在于它能将驱动和执行二部分功能集成为一体, 并且结构简单、无外摩擦、无间隙、动作灵敏和容易制造等优点。

## 3 柔性铰链夹持器的变形力和张合量计算

从结构原理可知, 柔性铰链结构的轴向 ( $X$  向) 变形, 直接影响夹持器抓手的张合量。PZT 压电元件的变形量随所施加的电压与承受的负载力而变化, 亦即存在下列关系式:

$$z = f(F_z, V) \quad (1)$$

对于图2所示的单级柔性铰链机构, 铰链的弹性变形反力以及夹持力的反力  $F_y$  同时作用于 PZT 压电元件上, 成为 PZT 的负载。从图3所示压电元件的特性曲线, 可知 PZT 元件的实际变形量  $z_{\text{real}}$  将会小于零负载时的最大变形量, 即

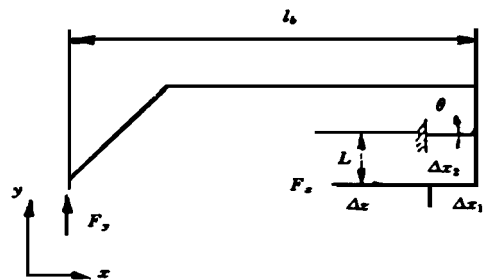


Fig. 4 Schematic force diagram of side structure

$z_{\text{real}} \quad z_{\text{max}}$

由于夹持器呈对称分布结构,分析时为简化起见,可按单侧结构进行计算,其受力简图如图4

按静力平衡和力矩平衡关系,得出下列方程组:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= x_1 \cdot K_{c1} \\ F_x &= x_2 \cdot K_{c2} \\ \theta &= \frac{z - x_1 - x_2}{l} \\ \theta &= \frac{F_x l - F_y \cdot l_b}{K_{\theta 1} + K_{\theta 2}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

令  $\frac{l}{K_{c1}} + \frac{l}{K_{c2}} = A, K_{\theta} = K_{\theta 1} + K_{\theta 2}$ , 则

$$\theta = \frac{z \cdot l - F_y \cdot l_b \cdot A}{l^2 + K_{\theta} \cdot A} \quad (3)$$

由于  $y = l_b \cdot \theta$  则夹持器的张合量(单侧)为

$$y = \frac{z \cdot l \cdot l_b}{l^2 + K_{\theta} \cdot A} - \frac{F_y \cdot l_b^2 \cdot A}{l^2 + K_{\theta} \cdot A} \quad (4)$$

当夹持一给定物体时,上式可简化为如下关系式

$$y = B \cdot z - C \quad (5)$$

式中

$$B = \frac{l \cdot l_b}{l^2 + K_{\theta} \cdot A} \quad (6)$$

$$C = \frac{F_y \cdot l_b^2 \cdot A}{l^2 + K_{\theta} \cdot A} \quad (7)$$

其中  $B$  是一个常数,表示柔性铰链机构的放大倍数。 $C$  是一随  $F_y$  变化的值,但对于夹持一给定物体时,  $F_y$  为固定值,所以  $C$  也是常数。

层叠式压电元件由多层压电晶体片组成。相邻两片压电晶体极化方向相反,共用一个电极,其电场方向也相反所以位移方向相同。多个晶体片并联起来,每一片工作在相同的电压下,总位移即为全部压电晶体片应变量的总和。若在  $Z$  方向,每一层晶体的厚度为  $t$ , 则应变量为

$$t = S_{33} \cdot T_3 \cdot t + d_{33} \cdot E_z t \quad (8)$$

如在  $Z$  方向受  $F_z$  力作用下,且压电晶体的截面积为  $S$ ,外加电压为  $V$ ,即应力  $T_3$  和电学参量  $E_z$  为

$$T_3 = F_z / S$$

$$E_z = V / t$$

代入上式并从公式(2)可得出  $n$  层压电晶体片组成的层叠式压电元件的总变形量为:

$$\left. \begin{aligned} z &= -\frac{S_{33} \cdot F_z \cdot t_z}{S} + n \cdot d_{33} \cdot V \\ \theta &= \frac{Z - F_x \cdot A}{l} \\ F_x &= \frac{\theta \cdot K_\theta + F_y \cdot l_b}{l} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中  $S_{33}$  —— 弹性柔顺常数,  $d_{33}$  —— 压电常数

由此得出

$$z = \frac{n \cdot d_{33} \cdot V}{l + \frac{S_{33} \cdot t_z \cdot K_\theta}{(l^2 + K_\theta \cdot A)S}} - \frac{S_{33} \cdot t_z \cdot F_y \cdot l \cdot l_b}{(l^2 + K_\theta \cdot A)S + S_{33} \cdot t_z \cdot K_\theta} \quad (10)$$

设

$$D = \frac{1}{1 + \frac{S_{33} \cdot t_z \cdot K_\theta}{(l^2 + K_\theta \cdot A)S}} \quad 1$$

$$E = \frac{S_{33} \cdot F_y \cdot l_b \cdot l \cdot t_z}{(l^2 + K_\theta \cdot A)S + S_{33} \cdot K_\theta \cdot t_z}$$

因此, 夹持器在夹持给定物体时, 压电元件的变形量有如下关系式

$$z = D \cdot n \cdot d_{33} \cdot V - E \quad (11)$$

从上式可以看出, 由于  $D < 1$ , 这说明用于驱动柔性铰链机构的压电元件, 不可能工作在最大变形状态  $Z_{\max}$  之下, 总是要受到铰链机构反作用力的影响而有一定的收缩量。

将(11)式代入(5)式, 得出夹持器的单侧张合量  $y$  与压电常数  $d_{33}$  和与施加电压  $V$  的关系式为

$$\begin{aligned} y &= B \cdot z - C = B \cdot D \cdot n \cdot d_{33} \cdot V - (B \cdot E + C) \\ &= M \cdot n \cdot d_{33} \cdot V - N \end{aligned} \quad (12)$$

式中

$$M = B \cdot D = \frac{l \cdot l_b}{l^2 + K_\theta \cdot A} \cdot \frac{1}{1 + \frac{S_{33} \cdot t_z \cdot K_\theta}{(l^2 + K_\theta \cdot A) \cdot S}}$$

$$N = B \cdot E + C = \frac{l \cdot l_b}{l^2 + K_\theta \cdot A} \cdot \frac{S_{33} \cdot F_y \cdot l_b \cdot l \cdot t_z}{(l^2 + K_\theta \cdot A)S + S_{33} \cdot K_\theta \cdot t_z} + \frac{A \cdot F_y \cdot l_b^2}{l^2 + K_\theta \cdot A}$$

所以, 夹持器钳口的总张合量  $2 \cdot \Delta y$  是施加电压的线性函数, 变化压电元件的施加电压, 就可以控制夹持器的张合量, 但是压电元件不可能以最大变形量驱动柔性铰链。

Table 1

size of hinge	No1	No2
radius $R$ (mm)	0.3	0.3
hinge width $T$ (mm)	0.3	0.3
link width $H$ (mm)	0.9	0.9
hinge thickness $B$ (mm)	2	2
distance between links $l$ (mm)	1.45	1.45
operate lever length $l_b$ (mm)	13.4	13.4
Characteristics of material		
shear stiffness $K_{dy}$	54365 N/mm	
torsion stiffness $K_{QZ}$	1639.1 N/mm	
tension stiffness $K_{\alpha}$	149107.9 N/mm	

今以表1所列的设计参数为例,从公式(12)计算出单级绞链在空载  $F_y = 0$  时的放大倍数为:

$$M = \frac{l \cdot l_b}{l^2 + K_{\theta} \cdot A} \cdot \frac{1}{1 + \frac{S_{33} \cdot l_z \cdot K_{\theta}}{(l^2 + K_{\theta} \cdot A) \cdot S}} = 9.05 \times 0.96 = 8.7$$

再从公式(12),空载时  $F_y = 0, N = 0$

并以  $l_z = 9 \text{ mm}, S = 2 \times 3 = 6 \text{ mm}^2, K_{\theta} = 2 \times 1639.1 \text{ N/mm},$

$$A = 2/149107.9 \text{ mm}^2/\text{N}$$

$$S_{33} = 18.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$$

$$d_{33} = 995 \times 10^{-12} \text{ m/V}$$

$$n = 65$$

等数值代入,得出

$$D = 0.96$$

$$z = D \cdot n \cdot d_{33} \cdot V = 0.96 \times 65 \times 995 \times 10^{-6} \times 100 = 6.2 (\mu\text{m})$$

$$y = B \cdot D \cdot n \cdot d_{33} \cdot V = 9.05 \times 6.2 = 56 (\mu\text{m})$$

由此得出空载张含量为  $2 y = 112 (\mu\text{m})$

再从公式(2)可以计算出柔性绞链空载变形所需的变形力为

$$2 F_x = 2 \frac{K_{\theta 1} + K_{\theta 2}}{l^2} \times z = 2 \times \frac{1639.1 \times 2}{1.45^2} \times 0.0062 = 19.3 (\text{N})$$

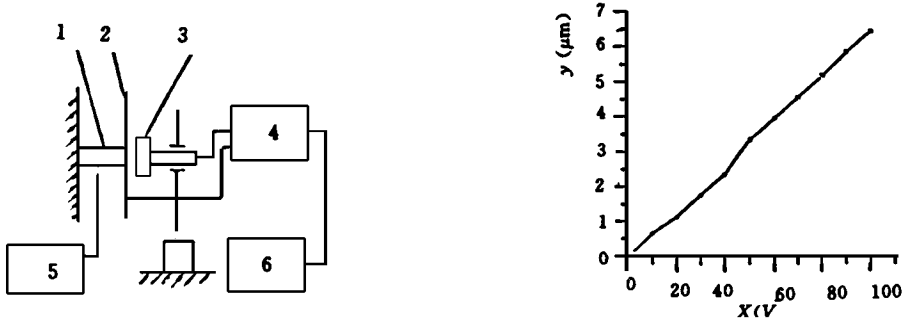
## 4 实验和结果分析

用线切割制成的集成型单级绞链夹持器的轮廓尺寸为13.8(长)×7.2(宽)×2(厚)。NLA 2×3×9型压电元件的技术特性见表2。

我们曾用 DWY-2型振动位移仪在图5所示的装置上,对压电元件进行了非接触变形量实验。实验曲线表明,空载时,对压电元件施加100 V(DC)电压,PZT 的最大变形量为6.47  $\mu\text{m}$ 。

Table 2

dimension $a \times b \times c$	$2 \times 3 \times 9$
maximum voltage V	100
deformation $\mu\text{m}/100\text{V}$	$6.5 \pm 10\%$
maximum load $\text{kg}/100\text{V}$	$21 \text{ kg} \pm 20$
isolate resistance $\text{M}\Omega$	500
capacitance nF	197
number of layer n	65
distance between layers $\mu\text{m}$	115



1 piezoelectric element 2 metalpice 3 probe  
4 oscillator 5 power 6 measuring meter

Fig. 5 Experiment and result of PZT deformation

用 MDT-690 型压电控制器对夹持器施加 100 V (DC) 电压时, 夹持器的张合量为  $84 \mu\text{m}$ , 施加 130 V (DC) 电压时, 夹持器的张合量为  $99 \mu\text{m}$ 。

上述结果表明, 夹持器工作时, 由于绞链机构对压电元件的弹性变形反力较大, 压电元件的实际伸长变形量不大, 不可以获得计算值。

为此研制了两种复合型的绞链夹持器

(a) 剪刀型夹持器, 即是在单级绞链机构的外壁上叠加了图示剪刀机构, 由此增大放大倍数。

其中  $L = 1.2 \text{ mm}$ ,  $L_b = 9.3 \text{ mm}$ ,  $R_1 = 1 \text{ mm}$ ,  $R_2 = 3.8 \text{ mm}$  夹持器的轮廓尺寸为  $16 \times 7.6 \times 2.6$  (长  $\times$  宽  $\times$  厚) 实验表明, 此种夹持器在施加 100 V 电压时的张合量可达  $211 \mu\text{m}$ , 施加 130 V 电压时, 夹持器的张合量为  $245 \mu\text{m}$ 。

(b) 双层绞链夹持器, 即是在单级绞链机构的外臂上面添加了第二层刚性绞链机构。

其中  $L = 1.6 \text{ mm}$ ,  $L_b = 7.67 \text{ mm}$ ,  $R_3 = 2 \text{ mm}$ ,  $R_4 = 12.2 \text{ mm}$  夹持器的轮廓尺寸为  $15.2$  (长)  $\times 9.8$  (宽)  $\times 3$  (高)。实验得出, 在施加 100 V 电压时, 夹持器的张合量为  $101 \mu\text{m}$ , 施加 130 V 电压时的张合量为  $112 \mu\text{m}$ 。

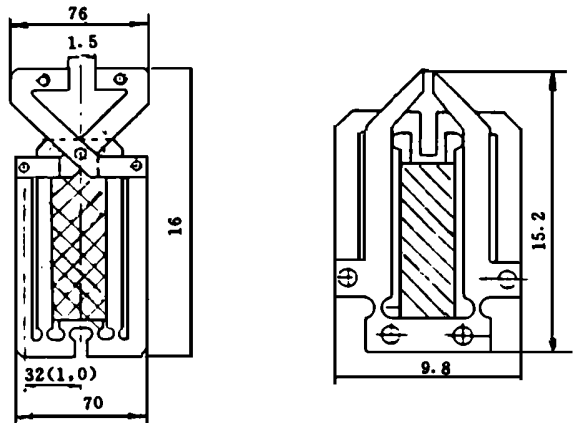


Fig. 6 Scissor gripper and two layer hinge gripper

夹持器的夹持性能实验见图7, 图中显示, 当由 MDT-690型压电驱动控制器对夹持器施加 100 V DC 电压时, 夹持器的钳口可以夹持6~12克重物, 动作灵活, 夹持器自重3克。



Fig. 7 Experiment of the integrated flexible hinge gripper

## 5 结 论

(1) 由 PZT 压电元件和柔性铰链组成的集成型单级铰链夹持器具有结构简单、可控张合量、无摩擦、无间隙和容易制作等优点。

(2) 单级铰链机构的放大倍数, 受到尺寸限制, 不能很大, 为了获得较大的张合量, 可考虑采用复合机构增加放大倍数。

(3) 集成型微小夹持器的体积受压单元件的尺寸及其特性制约。为了进一步减小夹持器必须寻找更小尺寸的压电元件。

(4) 文内列出了单级柔性铰链夹持器的变形量及其变形力的计算公式。

## 参 考 文 献

- [1] Hayashi T. Introduction to Actual Micromachine (Millimachine). Journal of JSPE, 1994, **60**(3): 331 ~ 332
- [2] LIST of TOKIN Company Piezoelectric Element Product.
- [3] Paros J M, Weisbord L. How to Design Flexure Hinges. Machine Design, 1965, **37**(27): 151 ~ 156
- [4] Sun Linzhi, Chen Jianyu, Sun Ping. The Design of Milli-grippers using Piezo Electric Actuator as well as Electro-Magnetic Force. Proceedings of MHS, 1995: 199 ~ 204

## Study of Milli-gripper Using Piezo-electric Actuator

Chen Jianyu, Sun Linzhi

(*Dept. of Prec. Mech. Eng. Shanghai Uni. Shanghai 201800*)

### Abstract

In this paper, the design of structure of milli-gripper using piezo-electric actuator is presented, the calculating method of deformation of gripper to be integrated by PZT piezo-electric actuator and flexible hinge is described. Two modified structures of grippers for enlarging deformation also are introduced.

**Keywords:** Milli-machine, Piezo element, Flexible hinge, Gripper.

陈建宇 男, 1970年3月生, 上海大学精密机械系研究生毕业, 工学硕士, 从事微机械研究, 受上海市教委重点学科建设资助研制成功微小夹持器, 发表过微小机械研究现状和发展趋势等论文。