

## Modeling and Performance Analysis of Electrothermal Actuating Microgripper with Flexure Hinge \*

SHEN Xue-jin<sup>\*</sup>, WANG Xu, QI Wei-jun, LI Ke-wei, WU Wen-lei  
(Department of Mechanical Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The Microgripper, which is typical microactuator, is one of important research contents in MEMS. The electrothermal-actuating silicon microgripper with flexure hinges is taken as the research object, and the model of the superfluous system with two unknown variables is established. The formula of the microgripper's output displacement is deduced. And the microgripper's behavior is studied on the basis of theoretical analysis. The analytical results show that the microgripper's output displacement is directly proportional to the radius of the flexure hinge. And about the microgripper's output displacement under different applied voltages, the trend of test results is accordant with one of theoretical results, that is, the microgripper's output displacement increases linearly with rising of the input voltage on the whole.

**Key words:** MEMS; microgripper; V-shape beam electrothermal actuator; flexure hinge  
EEACC: 7230; 7320 G

## 基于柔性铰链支承的热驱动硅微机械手的力学模型及性能分析 \*

沈雪瑾<sup>\*</sup>, 王旭, 戚伟俊, 李科委, 吴文蕾

(上海大学机械自动化系, 上海 200072)

**摘要:** 微机械手是一种典型的微型执行器, 是微型机电系统 (MEMS) 的重要研究内容之一。以基于柔性铰链的电热驱动硅微机械手为研究对象, 建立了微夹钳的二次超静定力学模型, 导出了钳口处输出位移的解析式, 并在此基础上对硅微机械手的性能进行了分析。分析表明, 微夹钳的输出位移与柔性铰链切割半径成正比, 切割半径越大, 输出位移越大; 对各加载电压下的微夹钳输出位移, 其试验和理论结果的变化趋势一致, 即微夹钳输出位移随输入电压的增加基本呈线性增加。

**关键词:** 微型机电系统; 微机械手; V型梁电热致动器; 柔性铰链

**中图分类号:** TH112; TN305

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-1699(2008)02-0284-04

完整的微型机电系统 (MEMS) 是由微传感器、微执行器、信号处理与控制电路、通讯接口和电源等部件组成的机电一体化微型器件系统。微机械手是一种典型的微型执行器, 是微型机电系统的重要研究内容之一, 它在微机械零件的制作和装配、生物工程以及光学等领域均有着广泛的应用前景, 近年来发展迅速, 已成为国内外 MEMS 研究领域的一个前沿课题。

目前, 国内外正在研究的微机械手多种多样, 根据能量供给和驱动方式, 微机械手的研究类型主要有: 静电驱动式微机械手、电热驱动式微机械手、压

电驱动式微机械手、电磁驱动式微机械手、吸附式微机械手和光捕获微机械手。本文将 V 型梁电热致动器<sup>[1-5]</sup>为动力源、经与柔性铰链<sup>[6]</sup>支承的微夹钳<sup>[7]</sup>集成而构成的自主式硅微机械手 (图 1) 作为研

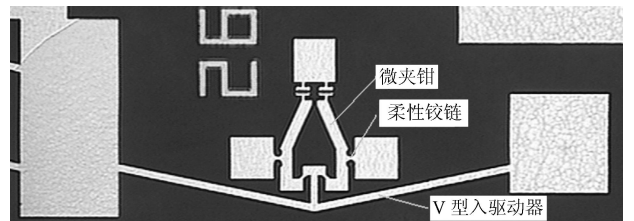


图 1 V 型梁电热驱动硅微机械手

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目资助 (50135040); 上海市教委重点学科科研项目资助 (970104)

**收稿日期:** 2007-09-30 **修改日期:** 2008-01-02

研究对象,建立相关的力学模型,并进行相应的性能分析研究。

### 1 简化力学分析模型

#### 1.1 问题简化

图 1 所示的微夹钳可以简化成图 2 所示的力学模型,其中 P 为 V 型梁电热致动器施加在微夹钳上的驱动力。

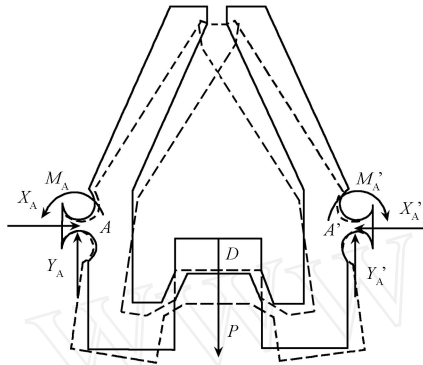


图 2 微夹钳的简化力学模型

#### 1.2 分析求解

根据微夹钳的结构对称性,取微夹钳的左半部分为研究对象,并解除固定柔性铰链处的约束可得图 3 所示受力分析示意图,由受力平衡可得:

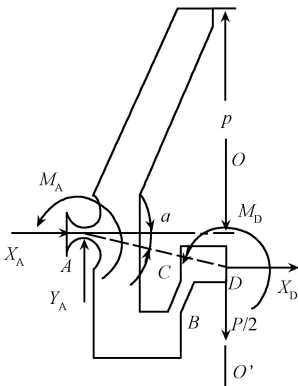


图 3 静定基受力分析示意图

$$\begin{cases} X_A + X_D = 0 \\ Y_A - \frac{P}{2} = 0 \\ M_A + M_D + X_D l_{AD} \sin - \frac{P}{2} l_{AD} \cos = 0 \end{cases} \quad (1)$$

此问题为二次超静定问题。取中间质量块为研究对象,对其进行受力分析,如图 4 所示。由受力平衡可得式(2):

$$\begin{cases} X_C + X_D = 0 \\ Y_C - \frac{P}{2} = 0 \\ M_D - M_C - \frac{P}{2} m - \frac{n}{2} X_D = 0 \end{cases} \quad (2)$$

为了简化计算,在求解过程中将可动柔性铰链 BC 简化为杆件进行求解其变形,受力如图 5 所示。C 端在轴  $y_1$  上的最大变形为:

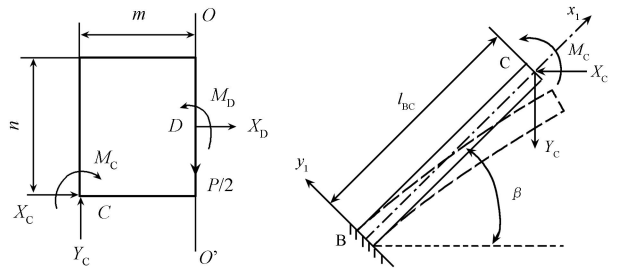


图 4 中间质量块受力分析示意图

图 5 可动柔性铰链简化受力分析示意图

$$c = \frac{M_C l_{BC}^2}{2EI} + \frac{P_y l_{BC}^3}{3EI} \quad (3)$$

最大转角发生在 C 面上,即

$$c = \frac{M_C l_{BC}}{EI} + \frac{P_y l_{BC}^2}{2EI} \quad (4)$$

式中  $P_y = X_C \cdot \sin - Y_C \cdot \cos$ , E 为杨氏弹性模量, I 为 BC 梁的横截面惯性矩。

工程上一般采用 Paros 模型对直圆型柔性铰链(如图 6 所示)的柔度(或转动刚度)进行设计和计算<sup>[6]</sup>,即,式(5):

$$\frac{\phi}{M_A} = \frac{3}{2EhR^2} \frac{1}{2 + \frac{t}{2R}} \left\{ \left[ \frac{1 + \frac{t}{2R}}{2} + \frac{3 + 2\frac{t}{2R} + \frac{t^2}{4R^2}}{(2 + \frac{t}{2R})^2} \right] \times \left[ \sqrt{1 - (1 + \frac{t}{2R})^2} \right] + \left[ \frac{6(1 + \frac{t}{2R})}{(2 + \frac{t}{2R})^{\frac{3}{2}}} \right] \times \left[ \arctan \left( \frac{2 + \frac{t}{2R}}{\sqrt{1 - (1 + \frac{t}{2R})^2}} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

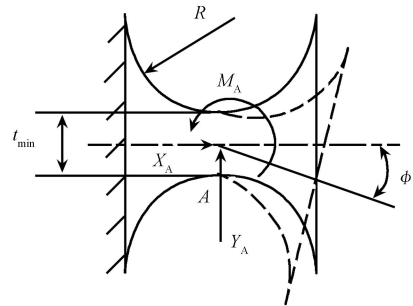


图 6 直圆型柔性铰链变形示意图

式中,  $\phi$  为固定柔性铰链的转角, h 为柔性铰链厚度,  $t_{min}$  为柔性铰链的最小宽度, R 为柔性铰链的切割半径,  $t = t_{min} + 2R$ ,  $\frac{t}{2R} = \frac{t_{min}}{2R} + 1$ ,  $\frac{t}{2R} = t / (2R)$ 。

由整体结构的对称性可知微夹钳 D 点处的 x 方向位移为 0, y 方向位移为 V 型梁电热致动器的输出位移  $d_0$ , 所以可得变形协调方程如下:

$$l_{AD} \phi \sin - c \sin - \frac{n}{2} c = 0 \quad (6)$$

$$l_{AD} \phi \cos + c \cos + m c = d_0 \quad (7)$$

式中  $l_{AD}$  为对称截面中心点到固定柔性铰链的距离。

求解由式(1) ~ (7) 组成的联立方程组可得出:

$$\phi = \frac{l_{BC}^3 (n \cos \alpha - 2m \sin \alpha) (n \cos \alpha - 2m \sin \alpha + 2l_{AD} \sin(\alpha + \beta))}{J} P + \frac{8EI (3n^2 + 2l_{BC} \sin(3n + 2l_{BC} \sin \alpha) + 6l_{AD} \sin(n + l_{BC} \sin \alpha))}{J} d_0 \quad (8)$$

式中

$$J = 4l_{BC}^3 \sin(n \cos \alpha - 2m \sin \alpha) - 8EI (2R \sin(6m(n + l_{BC} \sin \alpha) + l_{BC} \cos(3n + 4l_{BC} \sin \alpha)) + l_{AD}(-6m \sin(n - 4R \sin \alpha + l_{BC} \sin \alpha) - \cos(3n^2 + l_{BC}(3 \sin(n - 4R \sin \alpha) + 2 \sin(3n + 2l_{BC} \sin \alpha) + 4l_{BC} \sin^2)) - 6l_{AD} \sin(2m \sin \alpha + \cos(n + l_{BC}(\sin \alpha + \sin \beta)))) \quad (9)$$

$$= \frac{3}{2EhR^2} \frac{1}{2 + \frac{2}{R^2}} \left\{ \left[ \frac{1 + \frac{2}{R^2}}{2} + \frac{3 + 2 + \frac{2}{R^2}}{(2 + \frac{2}{R^2})^2} \right] \left[ \sqrt{1 - (1 + \frac{2}{R^2})^2} \right] + \left[ \frac{6(1 + \frac{2}{R^2})}{(2 + \frac{2}{R^2})^2} \right] \left[ \arctan \left( \frac{\sqrt{1 - (1 + \frac{2}{R^2})^2}}{\sqrt{1 - (1 + \frac{2}{R^2})^2}} \right) \right] \right\} \quad (10)$$

由图 2、3 可以看出,微夹钳钳口处  $x$  方向的输出位移为  $d = \phi$ , 其中  $d_0$  为微夹钳钳口处至固定柔性铰链中心线的垂直距离。故由式(8) 得微夹钳的输出位移为:

$$d = \frac{l_{BC}^3 (n \cos \alpha - 2m \sin \alpha) (n \cos \alpha - 2m \sin \alpha + 2l_{AD} \sin(\alpha + \beta))}{J} P + \frac{8EI (3n^2 + 2l_{BC} \sin(3n + 2l_{BC} \sin \alpha) + 6l_{AD} \sin(n + l_{BC} \sin \alpha))}{J} d_0 \quad (11)$$

式中,  $d_0 = \frac{Al^3 T \sin \alpha}{12I_V \cos^2 \alpha + Al^2 \sin^2 \alpha} - \frac{Pl^3}{2E(12I_V \cos^2 \alpha + Al^2 \sin^2 \alpha)}$ <sup>[8]</sup>,  $l$ 、 $A$ 、 $I_V$  和  $T$  分别为 V 型梁电热致动器斜梁的梁长、倾角、横截面积、横截面惯性矩和温升,  $\alpha$  为硅材料的热膨胀系数。

## 2 性能分析

令  $l_{AD} = 77.8 \mu\text{m}$ ,  $m = 23 \mu\text{m}$ ,  $n = 18 \mu\text{m}$ ,  $l_{BC} = 14.5 \mu\text{m}$ ,  $E = 120 \text{ GPa}$ ,  $\alpha = 0.32 \text{ rad}$ ,  $\beta = \pi/4 \text{ rad}$ ,  $R = 9 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 113 \mu\text{m}$ , 对 V 型梁热驱动微夹钳的性能参数, 即输出位移分析如下。

当  $P = 17.2 \text{ mN}$ ,  $d_0 = 0.56 \mu\text{m}$  时, 由式(9)、(10)和(11) 计算可得到图 7 所示的微夹钳钳口处  $x$  方向输出位移  $d$  与柔性铰链切割半径  $R$  之间的关系图。从图中可以看出, 微夹钳的输出位移与固定柔性铰链的切割半径成正比, 切割半径越大, 输出位移越大。

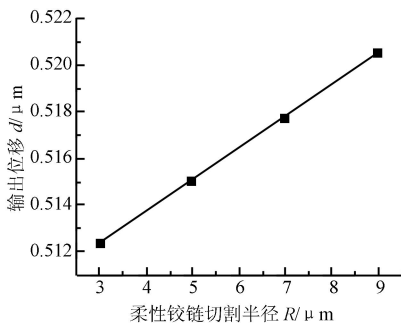


图 7 微夹钳输出位移与柔性铰链切割半径的关系

从式(11) 可看出, 要增加 V 型梁电热致动器的输出位移  $d_0$ , 可通过增加其斜梁的温升  $T$  来实

现, 进而达到加大微夹钳的输出位移  $d$ , 扩大自主式硅微机械手的张合范围。而温升  $T$  又随着输入电压的增加而增加, 故可通过增大电压来提高微夹钳的位移输出。输入电压与 V 型梁电热致动器的输出位移  $d_0$  和微夹钳的输出位移  $d$  之间的相互关系可由试验获得<sup>[8]</sup>, 图 8 给出了微夹钳钳口处  $x$  方向的输出位移与输入电压的关系, 从中可以看出理论计算值和试验结果呈同一变化趋势, 即微夹钳输出位移随输入电压的增加基本呈线性增加。

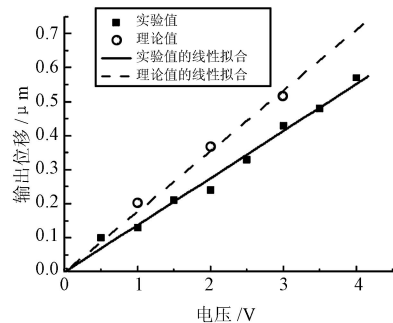


图 8 微夹钳输出位移与电压的关系

## 3 结论

针对以 V 型梁电热致动器作为动力源、经与柔性铰链支承的微夹钳集成而构成的自主式硅微机械手, 建立了微夹钳的二次超静定力学模型, 导出了钳

口处  $x$  向输出位移  $d$  的解析式。分析表明,微夹钳的输出位移与柔性铰链切割半径成正比,切割半径越大,输出位移越大。

同时基于柔性铰链支承的热驱动硅微机械手的试验部分测试参数,用所建分析模型进行了分析计算,对比试验实测值与理论计算值可知,它们的变化趋势一致,即微夹钳输出位移随输入电压的增加基本呈线性增加。

#### 参考文献:

- [1] Yogesh B Gianchandani, Khalil Najafi. Bent-Beam Strain Sensors[J]. Journal of Micro Electro Mechanical Systems, 1996, 5(1): 52-58.
- [2] Long Que. Bent-Beam Electrothermal Actuators-Part :Single Beam and Cascaded Devices[J]. Journal of MicroElectroMechanical Systems, 2001, 10(2): 247-254.
- [3] Jae-sung Park, Larry Chu, Andrew D Oliver, et al. Bent-Beam Electrothermal Actuators-part II: Linear and Rotary Microengines[J]. Journal of MicroElectroMechanical Systems, 2001, 10(2): 255-262.
- [4] Que L, Park J S, Gianchandani Y B. Bent-Beam Electro-Thermal Actuators for High Force Applications[C]//12th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Orlando, 1999, 31-36.
- [5] 陈贤祥,彭春荣,白强. 热驱动微型电场传感器[J]. 中国机械工程,2005,16(增刊): 161-163.
- [6] Paros J M, Weisboro L. How to Design Flexure Hinges[J]. Machine Design, 1965, 37 (27): 151-157.
- [7] Lu J., Song H., et al. The Tong-Type Micromanipulator for Sensors and Actuators[C]// Proc. 4<sup>th</sup> Colloque Franco-Sino Workshop, Saint-Etienne, 1997, 109-113.
- [8] 王旭. 基于柔性铰链支撑的热驱动微夹钳性能研究[D]. 上海大学,2007.



沈雪瑾(1963-),女,博士,上海大学机电工程与自动化学院副教授,主要研究方向为 MEMS 机械性能分析、摩擦学、人机系统学等,曾先后负责和参加国家自然科学基金、国防科工委项目以及省部级项目等十余项课题的研究工作,已发表论文四十余篇,其中多数被三大检索系统收录,shenxj@shu.edu.cn.