

# 负载刚度对电热微执行器输出性能的影响分析\*

高建忠<sup>†</sup> 赵玉龙 蒋庄德 杨 静

(西安交通大学精密工程研究所, 西安交通大学机械系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

**摘要:** 针对机电系统中电热微执行器和位移放大机构都具有柔性的事实,从理论上分析了作为负载系统的柔性位移放大机构对微执行器输出位移的影响,并用有限元方法对二者的工作性能进行了仿真.结果表明,电热微执行器外接负载的刚度和执行器本身刚度的比值是影响整个组合器件性能的重要因素.最后用深层反应离子刻蚀技术(DRIE)在硅隔离衬底(SOI)上加工了电热微执行器和柔性位移放大机构,并对其进行了测试,测试结果与有限元分析结果符合得很好.

**关键词:** 机电系统; 微执行器; 柔性机构; 深刻蚀

**PACC:** 0710C; 4600

**中图分类号:** TN304

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2006)01-0162-06

## 1 引言

电热微执行器具有输出力大、工作电压低、结构简单、易于用微制造技术加工等优点<sup>[1,2]</sup>,在机电系统(MEMS)中得到了广泛应用<sup>[2~5]</sup>.但是,微执行器的输出位移一般都比较小<sup>[6]</sup>,因此往往需要通过放大机构对其位移进行放大.在实际应用中出现了多种形式的输出位移放大机构,如齿轮机构<sup>[7]</sup>、直线电机<sup>[2]</sup>等.近来,柔性微杠杆机构作为一种位移放大机构得到了重视<sup>[8]</sup>.

柔性杠杆机构是一种依靠机构中柔性梁的弹性变形(拉伸、压缩以及弯曲)来传递位移和力的器件,具有无摩擦、不需润滑、无迟滞、不需要维护等优点<sup>[9]</sup>.而且,这种机构可以制造成平面结构,适合用 MEMS 工艺与微执行器集成加工<sup>[10]</sup>,已经成为扩展 MEMS 微执行器应用领域的一类重要器件.

由于电热微执行器和微杠杆机构都是柔性的,当二者连接在一起时,相当于两个弹簧连接.微杠杆放大机构作为微执行器的负载,其刚度直接影响微执行器的输出,因此,有必要对二者之间的刚度匹配关系进行分析,以指导执行器和柔性放大器件组合机构的设计.

本文从理论上分析了柔性放大机构对微执行器输出的影响和二者刚度之间的关系,并用有限元方法对其进行了仿真.用深层反应离子刻蚀技术(DRIE)在硅隔离衬底(SOI)上加工了电热微执行

器和柔性位移放大机构,并对其进行了测试,给出了仿真和测试结果.

## 2 理论分析

### 2.1 电热微执行器分析

机电系统中应用的电热微执行器有多种形式,如蛇形梁、双梁不对称结构、V型梁结构、冲击结构等<sup>[11]</sup>.其中V型梁形式的热执行器输出力大,而且不存在“冷臂”,比非对称形式的热执行器<sup>[12]</sup>效率高.同时,这种热执行器结构简单,可以组成阵列来增加输出力<sup>[13]</sup>.

V型梁结构的电热执行器结构如图1所示.当在两个固定的锚定点间施加电压时,V型梁中会有

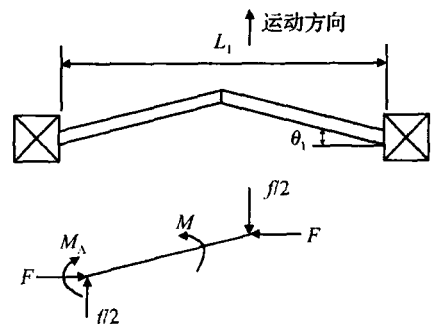


图 1 电热微执行器结构和力学简化模型<sup>[16]</sup>

Fig. 1 Structure and mechanical model of thermal microactuator

\*国家自然科学基金(批准号:50535030,50475085)及国家重点基础研究发展规划(批准号:2004CB619302)资助项目

<sup>†</sup>通信作者. Email: gaojianzhong70@163.com.

2005-06-20 收到,2005-08-13 定稿

电流流过,由于焦耳热效应,梁的温度升高,从而使梁产生沿长度方向的膨胀.由于梁两端固定,且具有一定的初始偏转角度  $\alpha_1$ ,因此梁的中部将向图 1 中所示方向运动.

V 型梁的简化力学模型可以看作是受到外载荷作用下的三次超静定钢架结构<sup>[14,15]</sup>.由于钢架左右对称,只选取左半部分进行分析(如图 1 所示).设梁内温度均匀分布,由结构力学和热应力理论可以得到执行器最大输出位移<sup>[16,17]</sup>(即当输出端不受任何外力作用时的输出位移):

$$d_{\max}^A = \frac{\frac{L_1}{2} T \sin \alpha_1}{\left[ \frac{2w}{L_1} \right]^2 + \sin^2 \alpha_1} \cdot \frac{L_1}{2} T \quad (1)$$

式中  $\alpha_1$  是执行器材料的线性热膨胀系数;  $T$  是梁的平均温度变化;  $L_1$ 、 $\alpha_1$  和  $w$  分别是 V 型梁的总长度、初始偏转角度和宽度.

执行器本身的刚度(内部刚度):

$$k_{\text{inner}}^A = \frac{4 \sin^2 \alpha_1 A E}{L_1} \quad (2)$$

式中  $A$  是梁的截面积;  $E$  是材料的弹性模量.

单晶硅具有良好的弹性,直到断裂之前应力和应变关系一直保持良好的线性<sup>[18]</sup>,因此,当 V 型梁的角度在  $0.05 \sim 0.2 \text{ rad}$  之间时,采用如下表达式计算输出执行力  $F_{\text{out}}^A$  的大小<sup>[16]</sup>:

$$F_{\text{out}}^A = k_{\text{inner}}^A d_{\max}^A \quad (3)$$

由上可见,电热微执行器输出端的负载阻力直接影响执行器的位移输出.如果负载的阻力很大,执行器的输出位移将变得很小,不能满足使用要求,因此,必须合理设计执行器的外接负载输入刚度.

### 2.2 负载刚度影响分析

电热微执行器的输出位移一般很小,在几微米到十几微米之间,往往不能满足实际使用要求,因此,常常需要用传动部件进行力和位移的调整.根据能量守恒定理,在传动部件内部无能量损失的情况下,位移和力的乘积保持不变,传动部件可以根据需要对输出力和输出位移的大小进行转化.位移和力的关系可以如图 2 定性表示.执行器输出较小的位移和较大的力经过位移放大机构后,位移得到了放大,但是同时输出的力相应减小.

在 MEMS 领域,柔性机构是一种非常有发展潜力的器件.这主要有两方面原因:一是由于 MEMS 尺度,当器件的面积/体积比增大时,摩擦力占主导地位,这样造成面接触形式的旋转铰链摩擦损失会非常大;二是现有的 MEMS 加工工艺难以制造出精密的旋转运动铰链,而且制造的器件多为单层结构,器件微小,装配困难.因此,无旋转部件的柔性机构

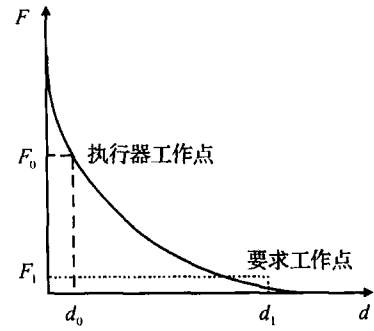


图 2 输出位移和力的调整示意图<sup>[19]</sup>

Fig. 2 Sketch of the transition between force and displacement

是一种最好选择.这种机构替代传统的刚体连接结构,具有无摩擦、无磨损、不需要润滑、无间隙、单层结构以及不需要装配等优点,并适合用 MEMS 制造工艺批量加工.其结构可以任意设计,能够按照不同要求对执行器的输出(位移和力)进行调整.将柔性机构与微执行器集成,可以扩展 MEMS 微执行器件的应用范围<sup>[9]</sup>.

本文所设计的柔性微杠杆机构如图 3(a) 所示.它与电热微执行器连接相当于在微执行器的输出端接入了一个弹簧.而执行器本身也具有一定刚度,因此,可以将二者的连接结构简化为如图 3(b) 所示的模型.

电热微执行器的驱动性能可以用最大输出位移  $d_{\max}^A$  和内部刚度  $k_{\text{inner}}^A$  来表征.最大输出位移是当执行器不受外力作用时的输出位移,如公式(1)所示.内部刚度是由电热微执行器的拓扑结构和几何尺寸确定的固有特性,见公式(2).由于外力的作用,执行器的输出位移会有一定损失(如图 3(b)),此时的净输出位移为:

$$d_{\text{out}}^A = d_{\max}^A - F_{\text{out}}^A / k_{\text{inner}}^A \quad (4)$$

式中  $F_{\text{out}}^A$  和  $d_{\text{out}}^A$  分别是执行器有负载时的输出力  $F_{\text{in}}^L$  和输出位移  $d_{\text{in}}^L$ ,分别等于位移放大机构的输入力和输入位移,即

$$F_{\text{out}}^A = F_{\text{in}}^L, \quad d_{\text{out}}^A = d_{\text{in}}^L \quad (5)$$

设负载系统的输入刚度为  $k_{\text{in}}^L$ ,则有

$$F_{\text{out}}^A = F_{\text{in}}^L = d_{\text{in}}^L k_{\text{in}}^L = d_{\text{out}}^A k_{\text{in}}^L \quad (6)$$

代入(4)式得:

$$d_{\text{out}}^A = \frac{1}{1+r} d_{\max}^A \quad (7)$$

式中  $r$  是负载系统和执行器的刚度比值,  $r = k_{\text{in}}^L / k_{\text{inner}}^A$ .

由以上分析可见,负载系统与执行器的刚度极大地影响系统的性能.如果负载系统刚度超过执行器内部刚度过多,系统将不能有效输出位移.

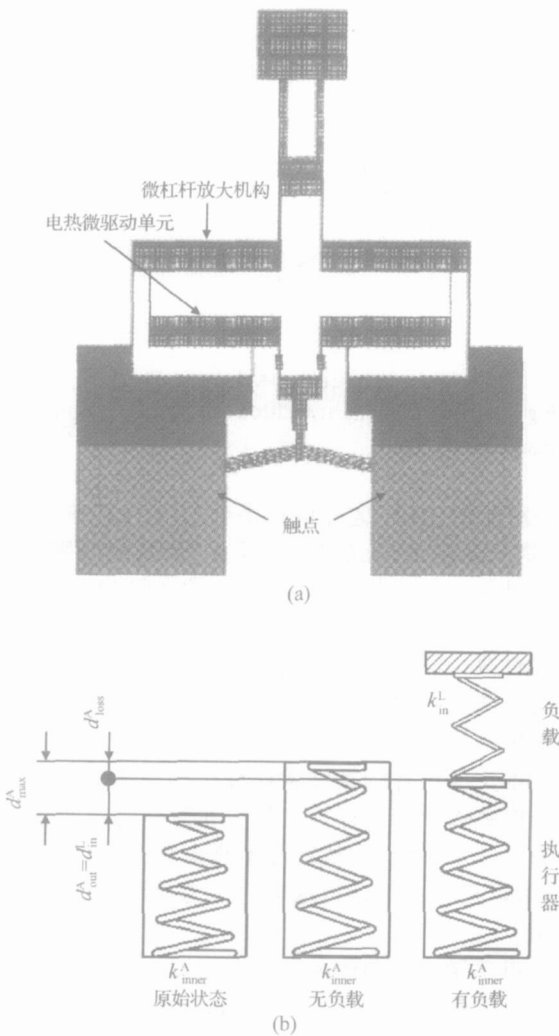


图3 柔性组合结构和等效模型 (a) 柔性微杠杆机构版图照片;  
(b) 合成结构简化模型

Fig. 3 Combined structure (a) and its equivalent model (b)

如果在位移放大的同时,还要求具有一定的力的输出,则执行器的输出可以用输出能量来表征.在静态下,电热微执行器的输出能量为:

$$E_{\text{out}}^A = \frac{1}{2} k_{\text{in}}^L d_{\text{in}}^L{}^2 \quad (8)$$

将(7)式代入(8)式得

$$E_{\text{out}}^A(r) = \frac{r}{(1+r)^2} \left[ \frac{1}{2} k_{\text{out}}^A d_{\text{max}}^A{}^2 \right] \quad (9)$$

由公式(9)可以看出,对于具有一定内部刚度的热执行器,当刚度比  $r=1$ ,即二者刚度相“匹配”的时候,输出能量达到最大,最大值为

$$E_{\text{max}}^A = \frac{1}{4} k_{\text{out}}^A d_{\text{max}}^A{}^2 \quad (10)$$

此时可以充分利用电热执行器的输出能力.如果  $r < 1$ ,执行器能力未得到充分利用;而当  $r > 1$ ,能量损失较大,也不利于输出.因此,对于由两个以上

柔性机构,必须合理设计它们的刚度,以使其性能充分发挥.

### 3 有限元仿真

用有限元分析软件 ANSYS 对电热微执行器的输出特性,包括最大输出位移以及有力作用下的位移、内部刚度、放大机构的输入特性(输入刚度),以及二者的组合结构的特性进行了仿真分析.图4(a),(b),(c)分别给出了电热微执行器、放大机构和组合机构的仿真分析曲线.

由图4(a)可以看出,在一定的输入电压作用下,电热微执行器的输出位移随着所受到外力的增大而衰减,在较低的电压下,当外力增加到一定程度,将不能实现位移输出,甚至会产生负的位移(图中没有画出).因此在设计电热型微执行器的时候必须要考虑其本身刚度所能够进行有效输出所能够施加的外力的极限.由图中还可以看出,执行器的位移输出是输入电压二次函数,这是由电热微执行器的原理决定的<sup>[17]</sup>.

图4(b)是一种微杠杆结构的位移放大装置的性能仿真曲线.在输入端施加不同的驱动力,计算输入端和输出端位移.输入特性曲线的斜率的倒数对应放大机构的输入刚度.根据本设计的仿真结果,其输入刚度为  $68094 \text{ N/m}$ .

图4(c)是二者组合后进行仿真的结果,可以看到,在最高工作电压下,执行器的无负载位移为  $4.24 \mu\text{m}$ ,而在推动微杠杆位移放大机构时,位移衰减至  $1.53 \mu\text{m}$ ,减小了  $64\%$ .

实际上,位移的减小一方面是由于负载刚度的影响,另一方面还受到热量传递过程的影响.电热微执行器的输入是电能(电压和电流).电能通过材料的焦耳热效应转变成热能,最后由于热应力现象,利用机构特定的位移约束条件转变成机械能(位移输出或力输出或两者).这是一个非保守的过程,因为在电能转变成热能后,热量将向周围环境散失.散热的形式主要有三种:传导、对流和辐射.热传导主要通过热执行器与衬底连接的锚定点进行,放大机构的接入对其影响很小.通过对流散失的热量可以忽略<sup>[20]</sup>,而热辐射散失的热量与发热物体暴露的表面积有关.因为微杠杆位移放大机构与电热微执行器是用同一层单晶硅加工而成,增加了热量散失的通道,也即增加了能量的损失,降低了执行器的效率,从而减小了输出位移.此外,由于杠杆放大机构是一种静不定结构,温度的升高会产生热应力,造成机构变形.有限元分析结果表明,在本文所设计结构的约束条件下,整个机构的位移将损失约  $1.2 \mu\text{m}$ .

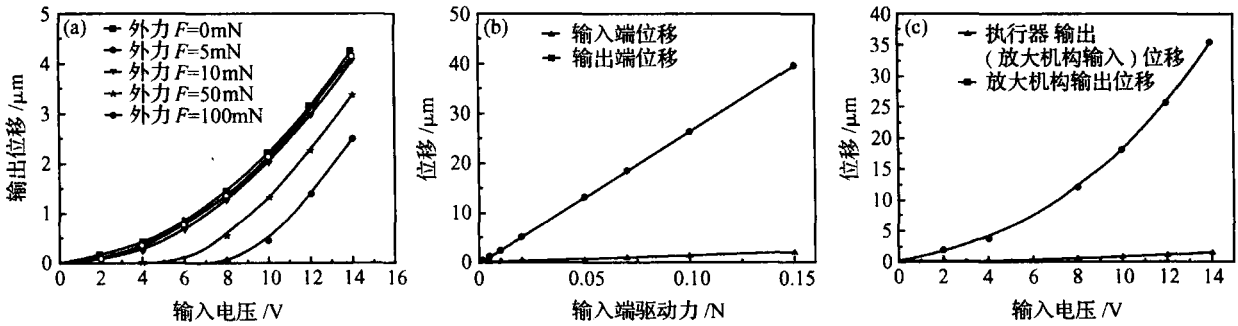


图 4 有限元仿真分析结果  
Fig. 4 Results of FEM simulation

### 4 加工和测试

为了测试验证以上分析结果,用深层反应离子刻蚀技术(DRIE)在硅隔离衬底(SOI)上成功制备了电热微执行器和执行器——微杠杆位移放大组合机构.加工工艺流程如下<sup>[2]</sup>:

直径 100mm,厚 450 $\mu$ m 的高掺杂单晶硅片——单面生长氧化膜(1 $\mu$ m)——两片氧化后的硅片键合(氧化层面相对)——将一片硅片减薄到 50 $\mu$ m,形成 SOI 硅片——淀积 Cr(5nm)/Au(360nm)——涂胶,光刻,刻蚀 Cr/Au 形成电路引线——涂胶,光刻,用 DRIE 工艺刻蚀结构——划片成 8mm  $\times$  8mm 芯片——氢氟酸溶液(HF)中除去两层单晶硅之间的部分二氧化硅层,释放机构.加工后的器件如图 5 所示.

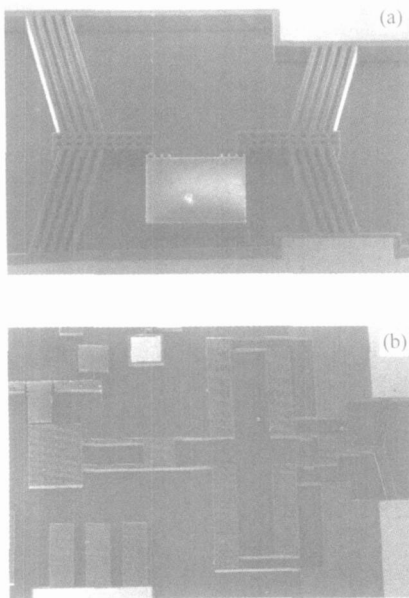


图 5 加工后的器件 SEM 图 (a)电热微执行器;(b)组合柔性结构  
Fig. 5 SEM photographs of fabricated devices

测试在带有标尺的显微镜下进行.首先对微执行器在没有外力作用下的性能进行测试,得到的位移随电压变化曲线如图 6 和图 7 所示.

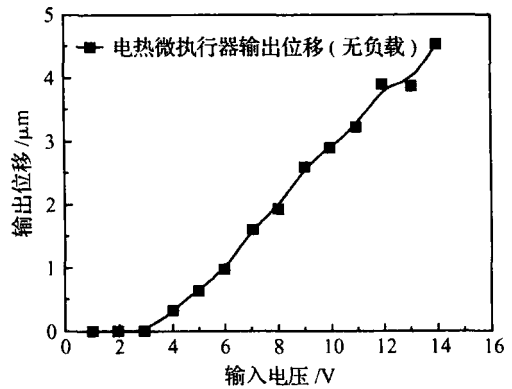


图 6 电热微执行器测试曲线  
Fig. 6 Test results of thermal microactuator

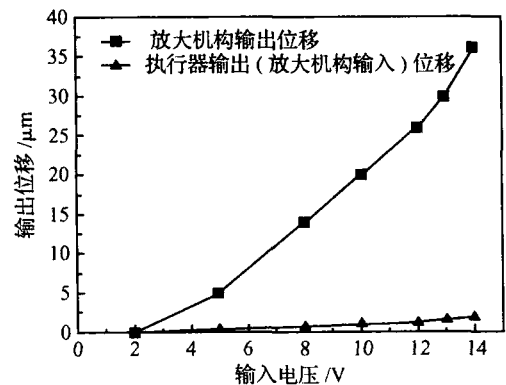


图 7 组合结构测试曲线  
Fig. 7 Test results of combined structure

对于组合机构,测试了放大机构输出位移和电压的关系,以及在有负载情况下的微执行器的输出位移和电压的关系曲线,如图 6 和图 7 所示.

由图 6 中可以看出,执行器实际测试无负载输出位移与仿真结果存在误差,误差的来源一方面是测试时的读数误差,此外,也有加工时的尺寸误差以

及仿真时所用材料属性如弹性模量的误差等.但是,执行器位移输出的基本变化趋势与仿真结果是类似的.

图 7 的测试结果与仿真结果符合很好.

## 5 结论

本文通过理论分析和有限元仿真,研究了当电热微执行器驱动放大机构时,作为负载的位移放大机构的刚度对输出性能的影响.用 DRIE 技术在 SOI 衬底上加工了样机,并进行了测试.分析和测试结果表明,作为柔性机构,微执行器和放大机构的刚度比值对于由二者组合而成的机构的性能具有重要影响.随着 MEMS 技术的不断发展,各种组合的执行机构将得到越来越多的应用,对它们之间的刚度匹配关系进行深入研究和理解,对于执行机构的设计和优化具有重要意义.

## 参考文献

- [ 1 ] Que L , Park J S , Gianchandani Y B. Bent-beam electro-thermal actuators for high force applications. Proc of the IEEE MEMS Conference , Orlando FL , 1999 :31
- [ 2 ] Maloney J M , Schreiber D S , DeVoe D L. Large-force electro-thermal linear micromotors. J Micromech Microeng , 2004 , 14 (2) :226
- [ 3 ] Lee C C , Hsu W. Optimization of an electro-thermally and laterally driven microactuator. Microsystem Technologies , 2003 , (9) :331
- [ 4 ] Yang J P , Deng X C , Chong T C. An electro-thermal bimorph-based microactuator for precise track-positioning of optical disk drives. J Micromech Microeng , 2005 , 15(5) :958
- [ 5 ] Nguyen N T , Ho S S , Low C N. A polymeric microgripper with integrated thermal actuators. J Micromech Microeng , 2004 , 14(7) :969
- [ 6 ] Pany C S , Hsu W. An electro-thermally and laterally driven polysilicon microactuator. J Micromech Microeng , 1997 , 7(1) :7
- [ 7 ] Legtenberg R , Berenschot E , Elwenspoek M , et al. Electrostatic microactuators with integrated gear linkages for mechanical power transmission. IEEE MEMS Workshop , 1996 :204
- [ 8 ] Su X P S , Yang H S. Design of compliant microleverage mechanisms. Sensors and Actuators A , 2001 , 87(3) :146
- [ 9 ] Lobontiu N. Compliant mechanism design of flexure hinges. Boca Raton , FL :CRC , 2003
- [ 10 ] Kota S , Hetrick J , Li Z , et al. Tailoring unconventional actuators using compliant transmissions : design methods and applications. IEEE/ ASME Trans Mechatronics , 1999 , 4(4) :396
- [ 11 ] Kuang Y N , Huang Q A. Advance in microactuators based on thermal expansion effect. Journal of Electron Devices , 1999 , 22(3) :162 (in Chinese) [匡一宁 , 黄庆安. 基于热膨胀效应的微执行器进展. 电子器件 , 1999 , 22(3) :162]
- [ 12 ] Huang Q A , Lee N K S. Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator. J Micromech Microeng , 1999 , 9(1) :64
- [ 13 ] Hickey R , Sameoto D , Hubbard T , et al. Time and frequency response of two-arm micromachined thermal actuators. J Micromech Microeng , 2003 , 13(1) :40
- [ 14 ] Yamagata Y , Higuchi T , Nakamura N , et al. A micromobile mechanism using thermal expansion and its theoretical analysis. IEEE Micro-Electro-Mechanical System Workshop , San Diego , CA , 1994 :142
- [ 15 ] Huang Q A , Zhang B , Kuang Y N , et al. Macromodel for polysilicon thermal actuator array. Chinese Journal of Semiconductors , 2000 , 21(9) :904 (in Chinese) [黄庆安 , 章彬 , 匡一宁 , 等. 多晶硅热执行器阵列的宏模型. 半导体学报 , 2000 , 21(9) :904]
- [ 16 ] Que L , Park J S , Gianchandani Y B. Bent-beam electrothermal actuators-part : single beam and cascaded devices. J Microelectromech Syst , 2001 , 10(2) :247
- [ 17 ] Gao J Z , Zhao Y L , Chen X N , et al. Response analysis of MEMS thermal microactuators based on MATLAB/SIMULINK. 3rd International Symposium on Instrumentation Science and Technology , Xi 'an , China , 2004 , 13 :0555
- [ 18 ] Petersen K E. Silicon as a mechanical material. Proc IEEE , 1982 , 70(5) :420
- [ 19 ] Kota S , Hetrick J , Li Z , et al. Tailoring unconventional actuators using compliant transmissions : design methods and applications. IEEE/ ASME Trans Mechatronics , 1999 , 4(4) :396
- [ 20 ] Lott C D , McLain T W , Harb J N , et al. Thermal modeling of a surface-micromachined linear thermomechanical actuator. International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems , 2001 :370

## Effect of Load Stiffness on the Output of Thermal Microactuators<sup>\*</sup>

Gao Jianzhong<sup>†</sup>, Zhao Yulong, Jiang Zhuangde, and Yang Jing

(*State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Institute of Precision Engineering,  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

**Abstract :** Due to the fact that micro-electromechanical systems (MEMS) based thermal microactuators and displacement amplification mechanisms are all compatible, the stiffness match between these two components is important to consider to achieve adequate output in the design phase. First, the effect of load stiffness on microactuators is theoretically analyzed. The finite element method (FEM) is then used to simulate the performance of both thermal actuators and compatible amplifiers. It is shown that the stiffness ratio between microactuators and compatible transmissions significantly influences the performance of the combined mechanism. Prototypes are fabricated on an SOI substrate with deep reaction ion etching (DRIE) technology and then are tested. Experimental results coincide well with the theoretical predictions.

**Key words :** micro-electromechanical systems; microactuators; compliant mechanisms; DRIE

**PACC :** 0710C; 4600

**Article ID :** 0253-4177(2006)01-0162-06

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 50535030, 50475085) and the State Key Development Program for Basic Research of China (No. 2004CB619302)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: gaojianzhong70@163.com

Received 20 June 2005, revised manuscript received 13 August 2005

© 2006 Chinese Institute of Electronics