

基于微制造的多晶硅薄膜型柔性铰链*

张永宇 陈晓阳 赵江铭

(上海大学机电工程与自动化学院 上海 200072)

摘要:将宏机械柔性铰链设计思想应用到硅微机械机构设计中,采用表面硅牺牲层工艺制作了结构层厚度为 $2\ \mu\text{m}$ 的多晶硅薄膜型微机械柔性铰链及在线测试机构,对微米尺度柔性铰链的微机械性能进行了理论和试验研究。以直圆型多晶硅薄膜柔性铰链为例,对其转动刚度采用现有宏机械柔性铰链理论的计算值为 $8\ \text{N}\cdot\mu\text{m}/\text{rad}$,试验测试结果为 $120\ \text{N}\cdot\mu\text{m}/\text{rad}$ 。宏理论计算和微机械测试结果之间的偏差较大,这表明在微尺度效应的影响下,宏机械柔性铰链理论模型不能直接用于薄膜型硅微机械柔性铰链的计算。根据试验数据对宏机械柔性铰链计算公式进行了修正,得到了描述薄膜型硅微机械柔性铰链静态特性的近似经验公式,可满足薄膜型硅微机械柔性铰链的设计与计算。

关键词:微制造 多晶硅 薄膜 柔性铰链 直圆柔性铰链 微机电系统

中图分类号:TH112

0 前言

宏机械柔性铰链作为一种常规尺度上的传动机构,由于可实现无间隙、无摩擦及免润滑传动,具有结构简单、无需装配和永不磨损的优点,已经被广泛应用于精密机械操作、生物医疗器械、光学自动聚焦、微动平台及纳米测量与加工技术领域中的微米、亚微米传动机构和纳米级分辨率的定位机构中^[1]。

随着微电子技术的发展,以半导体制造工艺为基础的微机械制造工艺促使了微型机械电子系统(Micro electro mechanical system, MEMS)的出现。微型机械电子系统是集成电路技术发展的必然结果,是通过 MEMS 制造工艺和集成电路工艺将微传感器、微致动器及微电子处理电路等集成在同一芯片上,以实现片上信号的采集、存储、运算及力和运动的传递与输出等功能,其中的微机械构件特征尺寸一般在数微米到几百微米之间,可以采用硅等半导体材料制作^[2]。

硅微机械的加工与设计与宏机械有所区别,不等同于将宏机械构件按比例缩小到微米级尺寸,这主要表现在宏机构在传递力和运动过程中一些可忽略的因素在微机械传动中起了主要作用,比如在宏机械转动副或滑动副中可以忽略的微摩擦力和表面粘滞力,随着构件尺度减小到微米量级,将会起到主要作用,如果仍然按照宏机械设计规则进行微机构的设计,其传动功能可能无法实现。

微机械机构的输出位移、输出力(矩)一般在微米和微牛顿量级,同时在微机械机构设计中应尽可能避免微摩擦力的产生,这是因为一方面微机械构件之间的摩擦力可能会很大,另一方面磨损产生的微粒可能会使器件的洁净工作环境受到污染。为此,提出了薄膜型微机械柔性铰链的概念,并应用于表面硅微机械机构的设计中去以满足这方面的要求。宏机械柔性铰的加工主要依赖线切割、电火花加工等工艺,机械加工带来的尺寸精度误差及形位误差对铰链的使用性能有较大的影响,而多晶硅薄膜型柔性铰链的制造是采用光刻(光刻精度可达 $0.2\ \mu\text{m}$)、淀积(PVD、CVD)和腐蚀等工艺,能够保证一定的精度。

这里将宏机械柔性铰链的设计思想应用到薄膜型微机械柔性铰链的设计中,通过仿真分析和试验验证,得出了薄膜型直圆柔性铰链的近似计算公式,并以此对其微机械性能进行了分析。

1 多晶硅薄膜型微机械柔性铰链

1.1 微机械柔性铰链的制作

多晶硅薄膜型微机械柔性铰链的制作采用表面硅牺牲层工艺完成。表面硅微机械加工方法是以单晶硅为基底材料,通过对绝缘层、牺牲层、结构层等多层薄膜的淀积和图形光刻加工制备出薄膜微机械机构。在该工艺过程中,器件的结构部分一般是由气相淀积而成的多晶硅薄膜层经图形光刻、腐蚀加工而成,在最后的工艺中释放掉牺牲层后即可得到悬浮于基底之上的微机械机构的形状。图 1 为采用表面硅牺牲层工艺加工而成的两种多晶硅薄膜型

* 国家自然科学基金(50135054)和上海市科技发展基金(0111nm020)资助项目。20050614 收到初稿,20051205 收到修改稿

微机械柔性铰链的光学显微照片,图 1a 所示的是一端由锚与基底固连,另一端与微机构铰接的固定铰,图 1b 所示是两端与微机构铰接,可自由转动的活动铰,结构层的厚度为 $2\ \mu\text{m}$ 。

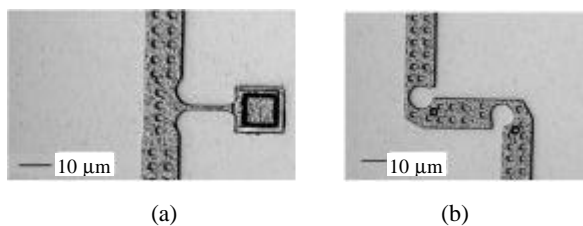


图 1 多晶硅薄膜型微机械柔性铰链光学显微照片

1.2 多晶硅薄膜的力学性能

800 以下时,多晶硅基本上是无塑性、无蠕变的弹性材料^[3]。与不锈钢相比,多晶硅的屈服强度是不锈钢的 3 倍多、密度仅为不锈钢的几分之一,而其弹性模量却接近于不锈钢。多晶硅的这些独特性质使其成为 MEMS 中理想的微机械构件制作材料。然而,微尺度下多晶硅材料又具有一定的脆性,在设计承受冲击载荷的微机械构件时,还需考虑多晶硅的这种脆性断裂行为,对微尺度多晶硅材料的力学特性、热力学特性及热疲劳特性的研究目前还在进行当中。作为微机械构件的多晶硅薄膜可利用气相淀积的方法沉积到单晶硅衬底上,目前已成为表面硅微机械加工中结构层的主要制作材料之一。

多晶硅薄膜与钛合金、不锈钢、铍青铜和铝合金等常用的宏机械柔性铰链加工材料的性能参数比较如表 1 所示。其中,柔性铰链变形量的大小可以用材料屈服强度 s_s 与弹性模量 E 的比值来衡量,该比值越大表示铰链的变形能力越大^[4]。

表 1 硅与其他柔性铰链制作材料的性能参数

材料名称	屈服强度 s_s /GPa	弹性模量 E /GPa	比值 s_s/E
单晶硅	7.00	190.0	0.037 0
多晶硅薄膜	7.00	169.0	0.044 0
钛合金	1.18	117.0	0.010 0
不锈钢	0.48	206.0	0.002 4
铍青铜	0.75	126.0	0.006 0
铝合金	0.28	68.60	0.003 8

从表 1 中可以看出,单晶硅及多晶硅薄膜的 s_s/E 比值要远远大于其他金属材料,这说明硅具有极佳的弹性变形能力,是理想的微机械制造材料。

1.3 多晶硅薄膜型柔性铰在微机械机构中的应用

多晶硅薄膜型微机械柔性铰链在表面硅微机械机构和器件设计中可以有许多应用,比如数字旋转微镜机构中反射镜板与固定锚之间的铰接^[5]、射频开关的驱动机构、微致动器转动副机构等。

作为薄膜型微机械柔性铰在微机械机构设计中的应用实例介绍,以多晶硅冷热臂电热微致动器设计中采用和不采用柔性铰链结构为例子,分别对这两种形式的电热微致动器的静态驱动性能进行了有限元分析。ANSYS 软件模拟分析问题的最小尺寸可达到微米量级,是国际上公认的可适用于 MEMS 仿真分析的软件工具之一^[6],利用该软件仿真的结果如图 2 所示。在相同的驱动电压下,图 2a 是常规的约束端直接固定的冷热臂电热微致动器在 x 轴方向上各部位的输出位移分析结果,图 2b 是约束端采用了柔性铰链结构的冷热臂电热微致动器在 x 轴方向上各部位的输出位移分析结果,从图 2 中可以看出,两种分析结果是不同的。

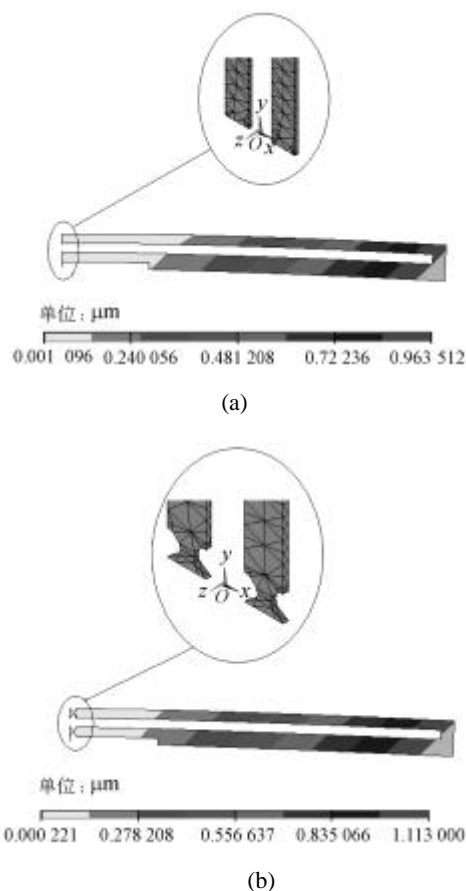


图 2 多晶硅薄膜冷热臂电热微致动器仿真结果

多晶硅薄膜型冷热臂电热微致动器是由两根称为冷臂和热臂的多晶硅微梁组成,末端由锚固定使整个结构悬于半导体基片之上。多晶硅梁自身兼作加热器,其电阻率由工艺过程中的掺杂步骤决定。当以两锚为固定电极通以直流电压时,热臂宽度小于冷臂,因而其电阻值较大,通电时发热量大于冷臂,使得热臂的热膨胀伸长量大于冷臂,由此产生的热应力分布不均使得机构在顶点处产生最大位移或力输出。

仿真分析中所用到的致动器结构尺寸和相关的材料参数有：致动器冷臂和热臂长 $l=600\ \mu\text{m}$ ，热臂宽度 $b_h=15\ \mu\text{m}$ ，冷臂宽度 $b_c=25\ \mu\text{m}$ ，薄膜厚度 $d=2\ \mu\text{m}$ ，直圆柔性铰最小宽度 $b_{\min}=5\ \mu\text{m}$ ，直圆柔性铰切割半径 $R=5\ \mu\text{m}$ ，直圆柔性铰宽度 $b=15\ \mu\text{m}$ ，多晶硅薄膜弹性模量 $E=169\ \text{GPa}$ ，泊松比 $\nu=0.22$ ，多晶硅电阻率 $r=2.3 \times 10^{-11}\ \Omega \cdot \mu\text{m}$ ，多晶硅热膨胀系数 $\alpha=2.9 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$ ，多晶硅热导率 $I=150 \times 10^6\ \text{W}/(\mu\text{m} \cdot \text{K})$ 。

根据以上参数分别对这两种结构形式的电热微致动器性能进行仿真分析，结果如表 2 所示。

表 2 两种结构的多晶硅冷热臂电热微致动器性能对比

	约束端直接固定	约束端为柔性铰结构
最大输出位移 $y/\mu\text{m}$	1.08	1.25
最高温度 $t_{\max}/^\circ\text{C}$	935	935
最大弯矩 $M_{\max}/(\text{N} \cdot \mu\text{m})$	1.19	0.96
最大切应力 t_{\min}/TPa	3.79	3.9

设定驱动电压为 5 V、空载情况下，约束端采用柔性铰链机构的电热微致动器的输出位移大于约束端直接固定的形式，而且所承受的弯矩也相对较小。

通过以上分析，不难看出，采用柔性铰链的冷热臂电热微致动器的性能要优于另外一种形式，这说明结合多晶硅薄膜的一些独特特性，薄膜型微机械柔性铰链具有很好的特性，适合在表面硅微机械机构和器件设计中采用。

2 试验研究

宏机械柔性铰链研究进行的比较多，但深入研究还不够，到目前为止还缺乏完全精确解。以直圆柔性铰链为例，在工程上一般是采用 PAROS^[7]模型进行设计和计算的，即

$$\frac{a_z}{M_z} = \frac{3}{2EhR^2} \frac{1}{2b+b^2} \left\{ \left[\frac{1+b}{g^2} + \frac{3+2b+b^2}{g(2b+b^2)} \right] \times \sqrt{1-(1+b-g^2)} + \frac{\alpha(1+b)}{(2b+b^2)^{\frac{3}{2}}} \times \arctan \left(\sqrt{\frac{2+b}{b}} \frac{g-b}{\sqrt{1-(1+b-g^2)}} \right) \right\} \quad (1)$$

式中 M_z ——弯矩
 a_z ——转角
 E ——弹性模量
 h ——铰链高度
 R ——切割半径
 b_{\min} ——铰链最小宽度

$$b = b_{\min} + 2R$$

$$b = b_{\min} / (2R)$$

$$g = b / (2R)$$

反映柔性铰链性能的参数主要有绕 z 轴的转动刚度 k_z (或柔度)，铰链所能承受的最大力矩 M_{\max} 及铰链绕 z 轴最大转角 q_{\max} 。仍以直圆柔性铰链为例，以表面硅微机械工艺制作的直圆柔性铰链为薄膜结构，铰链高度即为薄膜层的厚度，一般在 $0.5 \sim 2.0\ \mu\text{m}$ 之间，可在工艺过程中通过控制多晶硅层的淀积厚度得到，如图 3 所示。

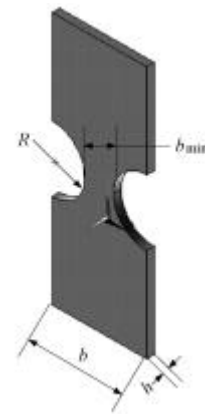


图 3 薄膜型直圆柔性铰链

采用式(1)对多晶硅薄膜型直圆柔性铰链的转动刚度进行了理论计算，为验证宏机械 PAROS 模型是否适用于薄膜型微机械柔性铰链的计算，设计制作了多晶硅薄膜型直圆柔性铰及在线试验装置，如图 4 所示。

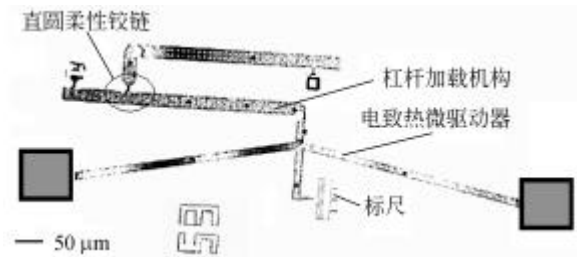


图 4 薄膜型直圆柔性铰链试验装置光学显微照片

该在线集成试验装置采用表面硅牺牲层加工工艺将直圆柔性铰链、测试机构及电致热微驱动器集成制作在一起，整个结构层的厚度均为 $2\ \mu\text{m}$ 。测试机构是由 V 形梁电致热微驱动器、多晶硅梁杠杆加载机构和标尺读数装置组成。当微驱动器通以直流电压时，在顶点处产生驱动力，驱动力的大小可以根据所建立的热驱动器的静态力学模型由输出位移的变化量间接得出^[8]，该驱动力经杠杆加载机构放大后形成弯矩施加到直圆柔性铰链上。由标尺读数

装置读出微驱动器的输出位移, 再根据杠杆的实际尺寸经过几何换算可得到直圆柔性铰链的转角的变化量, 测得铰链所承受的弯矩和转角大小就可计算出转动刚度。

要进行测试的薄膜型直圆柔性铰的结构参数如下: 宽度为 $25 \mu\text{m}$, 高度为 $2 \mu\text{m}$, 最小宽度为 $3 \mu\text{m}$, 切割半径为 $11 \mu\text{m}$ 。

如图 5a 所示, 由 PAROS 宏机械直圆柔性铰链理论模型直接计算该薄膜型直圆柔性铰链的弯矩和转角可得到一条变化关系曲线, 与试验测得的关系曲线对比。图 5 中由试验测得关系曲线为近似直线, 其斜率即是该薄膜型直圆柔性铰链的转动刚度。根据试验结果得到的该铰链转动刚度为 $120 \text{ N} \cdot \mu\text{m}/\text{rad}$, 由宏机械柔性铰链理论公式计算所得的转动刚度为 $8 \text{ N} \cdot \mu\text{m}/\text{rad}$ 。由此可见, PAROS 宏机械柔性铰链理论公式计算所得的转动刚度要远小于试验测试值, 试验值与宏机械理论设计值之间存在偏差。

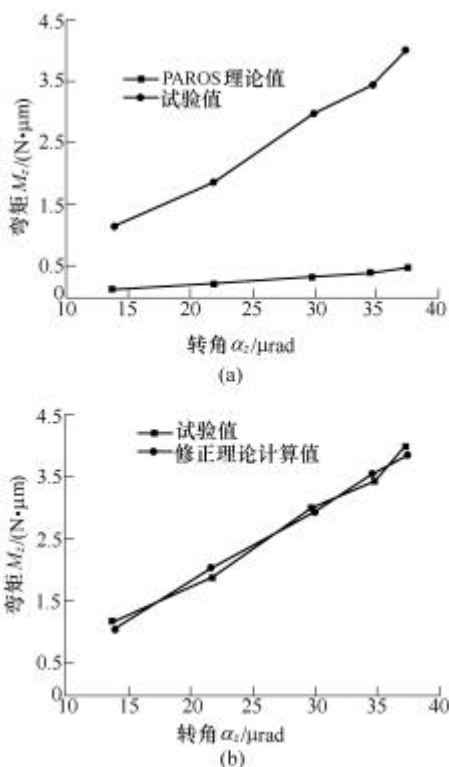


图 5 多晶硅薄膜型柔性铰转动刚度试验与理论计算结果

当薄膜型直圆柔性铰链的结构参数确定时, 从理论模型中可以看出, 柔度的大小仅受到弹性模量的影响, 这说明薄膜型微机械柔性铰链由于受尺度效应的影响而使得试验值与宏理论计算值之间产生偏差。此外, 微机械试验测试方法与试验过程中的误差、电致热微驱动器的微尺度热力学特性的影响

均会导致试验结果与理论值之间的偏差^[9]。

以上分析说明宏机械柔性铰链理论设计方法应用到微机械设计中有一定偏差。为此, 根据试验数据对 PAROS 宏机械柔性铰链理论模型进行修正得到如下适用于薄膜型直圆柔性铰链设计的近似经验公式

$$\frac{a_z + 0.0006}{M_z} = \frac{21}{EhR^2} \frac{1}{2b + b^2} \left\{ \left[\frac{1+b}{g^2} + \frac{3+2b+b^2}{g(2b+b^2)} \right] \times \sqrt{1 - (1+b-g)^2} + \frac{\alpha(1+b)}{(2b+b^2)^{3/2}} \times \arctan \left(\frac{\sqrt{\frac{2+b}{b}} \frac{(g-b)}{\sqrt{1 - (1+b-g)^2}}}{\sqrt{1 - (1+b-g)^2}} \right) \right\} \quad (2)$$

采用此修正公式重新计算薄膜柔性铰的柔度, 得到转矩与转角的关系曲线, 如图 5b 所示。由此说明, 该近似经验公式可用于薄膜型直圆柔性铰链的设计与计算。

3 薄膜型微机械柔性铰链的力学性能

根据上面的近似经验公式可进一步得到多晶硅薄膜型直圆柔性铰链的转动刚度 k_z 随铰链最小宽度 b_{\min} 等参数的变化关系, 如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 随着铰链最小宽度 b_{\min} 的增加, 转动刚度 k_z 是逐渐增大的; 在薄膜厚度 d 和铰链最小宽度 b_{\min} 均不变的情况下, 转动刚度随切割半径减小而增大, 在切割半径 R 和铰链最小宽度 b_{\min} 均不变的情况下, 转动刚度会随着薄膜厚度增大而增大。

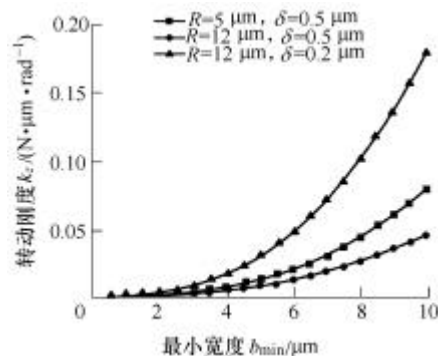


图 6 薄膜型直圆柔性铰链转动刚度随结构参数的变化关系

薄膜型直圆柔性铰链所承受的最大弯矩可采用式(3)计算^[10], 即

$$M_{\max} = \frac{db_{\min}^2}{6[S]} \quad (3)$$

式中 $[s]$ ——许用应力

多晶硅薄膜型直圆柔性铰链最大弯矩与结构参数的变化关系如图7所示。

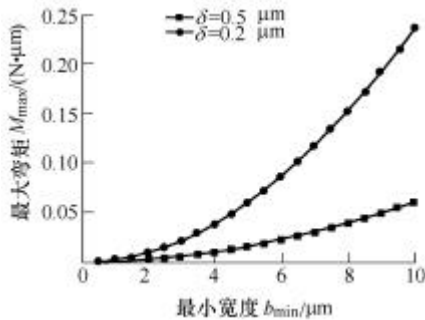


图7 薄膜型直圆柔性铰链最大弯矩随结构参数的变化关系

从图7可以看出,薄膜型直圆柔性铰链所承受的最大弯矩 M_{\max} 是随铰链最小宽度 b_{\min} 增大而逐渐增大的;在铰链最小宽度 b_{\min} 不变的情况下,随着薄膜厚度 d 的增加,铰链所能承受的最大弯矩随之增大。薄膜型直圆柔性铰链的最大角位移为

$$q_{\max} = \frac{M_{\max}}{k_z} \quad (4)$$

计算出铰链的最大弯矩和转动刚度后,代入式(4)即可得到铰链变形的最大角位移 q_{\max} ,薄膜型直圆柔性铰链所承受的最大弯矩与转动刚度的变化关系如图8所示。

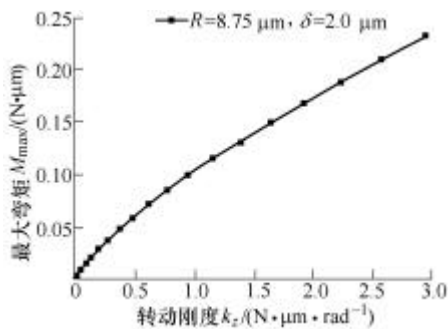


图8 薄膜型直圆柔性铰链最大弯矩随转动刚度的变化关系

从图8可看出,薄膜型直圆柔性铰链所承受的最大弯矩 M_{\max} 是随铰链转动刚度 k_z 增大而逐渐增大的,两者近似成二次平方根关系。

4 结论

(1) 硅材料具有很好的力学特性,以多晶硅为结构层的薄膜型微机械柔性铰链可应用到硅微机械机构设计中,以避免微摩擦力的产生,同时可免于润滑。薄膜型微机械柔性铰链具有一定的转动刚度,可满足

微机械运动副摆动范围小、输出精度高的要求。

(2) 通过对多晶硅薄膜型柔性铰链理论与试验研究表明,因尺度效应影响,宏机械柔性铰链模型计算结果与试验值之间有偏差。利用试验数据对PAROS宏机械柔性铰链理论模型进行修正,得到了适用于薄膜型柔性铰链设计的近似经验公式。以此经验公式为依据,分析了多晶硅薄膜型柔性铰链的机械特性。该理论和试验研究工作对薄膜型微机械柔性铰的设计和计算奠定了一定基础,对于微机械设计理论的形成和发展具有一定的意义。

(3) 如何对薄膜型微机械柔性铰链进行结构参数优化设计,比如铰链最小宽度与薄膜厚度比值的最优化设计,使微机械柔性铰链达到最佳转动刚度和较高的输出精度,是需进一步研究的工作。

(4) 随着微机械尺度的减小,当薄膜厚度小于亚微米或更小时,微尺度效应影响将会显著增加,在该尺度下微机械的一些驱动机理将与宏尺度得到的理论有根本的不同,需要新理论、新方法解决。

参 考 文 献

- [1] YI B J. Design and experiment of a 3-DOF parallel micromechanism utilizing flexure hinges[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(4): 604-612.
- [2] 章吉良, 杨春生. 微机电系统及其相关技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.
- [3] 徐泰然. MEMS和微系统—设计与制造[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [4] 于靖军. 基于动力学性能的全柔性机构优化设计[J]. 机械工程学报, 2003, 39(8): 32-36.
- [5] CHUNG S W. Measurements of a fabricated micro mirror using a lateral-effect position-sensitive photodiode[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 45(6): 861-865.
- [6] 李德胜. MEMS技术及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002.
- [7] PAROS J M, WEISBORO L. How to design flexure hinges[J]. Machine Design, 1965, 37(27): 151-157.
- [8] 张永宇, 沈雪瑾, 赵江铭, 等. 热致动硅微夹钳实验研究[J]. 中国机械工程, 2005, 16(增刊): 132-134.
- [9] 张永宇, 沈雪瑾, 陈晓阳. V型电致热微驱动器的力学特性分析[J]. 微纳电子技术, 2003, 40(z1): 80-84.
- [10] 吴鹰飞, 周兆英. 柔性铰链的计算和分析[J]. 机械设计

与研究, 2002, 18(3): 29-30.

POLYSILICON THIN FILM FLEXURE HINGE FABRICATED USING SURFACE MICROMACHINING TECHNOLOGY

ZHANG Yongyu CHEN Xiaoyang
ZHAO Jiangming

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072)

Abstract: The structural style of steel flexure hinge is applied to design of silicon micromachining structures. Polysilicon thin film flexure hinges and the on line testing device are fabricated using surface micromachining process, and the thickness of structure layer is 2 μm . Character of polysilicon thin film

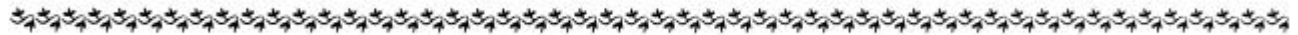
flexure hinge is researched and tested. Take right circular polysilicon thin film flexure hinge as an example, the rotational stiffness calculated using the macro theory is 8 $\text{N}\cdot\mu\text{m}/\text{rad}$ and the tested result is 120 $\text{N}\cdot\mu\text{m}/\text{rad}$. Through theory analysis and measurements, it is found that the macroscopic machine model of flexure hinge could not be applied for the design of micromachining thin film flexure hinge properly because of the size-effect. According to experimental data, the formula used in macroscopic machine is modified to meet the design and calculation of micromachining thin film flexure hinge.

Key words: Micromachine Polysilicon Thin film

Flexure hinge Right circular hinge MEMS

作者简介: 张永宇, 男, 1970 年出生, 博士研究生, 工程师。主要研究方向为微机电系统(MEMS)及 MEMS 微致动器。

E-mail: zyongyu@sohu.com



(上接第 192 页)

- [4] YODA IKEN V The RTLinux manifesto. <http://www.rtlinux.org>.
- [5] SHA L, RAJKUMAR R, LEHOCZKY J P. Priority inheritance protocols: An approach to real-time synchroniz ation[J], IEEE Tran. on Computers, 1990, 39(9): 1 175-1 185.
- [6] 陈友东, 樊锐, 陈五一, 等. 基于 RT-Linux 的开放式数控系统研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(16): 1 419-1 422.

OPEN ARCHITECTURE CNC CONTROLLER BASED ON THE COMPONENT TECHNOLOGY

CHEN Youdong CHEN Wuyi WANG Tianmiao
(School of Mechanical Engineering, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract: A modular, reconfigurable, interoperable, scalable

CNC controller architecture is proposed and implemented that provided a way for rapid customization and development of a new CNC controller by combining the advantages from the PC, RT-Linux and real time component. After reviewing the real time performance of the component available, such as CORBA, COM/DCOM, the component that can be used to the real time control is presented. The components and their interfaces of a base CNC controller are given, and the controllers' architecture is presented. A virtual module system that is used to communicate and schedule the components is put forward. The configuration system is realized by using the key techniques such as configuration file and software synthesis. Finally the system prototype was implemented on the RT-Linux.

Key word: Component Open architecture

Computer numerical control

作者简介: 陈友东, 男, 1973 年出生, 博士后。主要研究方向为开放式数控系统和嵌入式机电控制。

E-mail: youdongchen@sohu.com