文章编号: 1000-8608(2007) 03-0363-05

## 柔性电热镍微夹钳结构设计及加工测试研究

褚金奎<sup>\* 1,2</sup>、郝秀春<sup>1,2</sup>、关 乐<sup>1,2</sup>、王立鼎<sup>1,2</sup>

(1.大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁大连 116024; 2大连理工大学 辽宁省微纳米技术及系统重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘要:把柔性机构的设计方法 —— 伪刚体法应用于柔性微夹钳的设计中,得到 一种新结构 形式的电热微夹钳,用UV-LIGA方法进行加工制作,并进行动态性能测试,从对称的平面十 杆刚性机构得到其伪刚体模型,对伪刚体模型进行优化并柔性化得到放大 20倍的柔性微夹 钳钳体,通过仿真验证了设计的正确性和可靠性,V形电热驱动器与柔性钳体集成到一起, 形成柔性电热微夹钳.用 SU-8胶做电铸铸模,钛和二氧化硅做牺牲层,铜做种子层,在氨基 磺酸镍电铸液中进行电铸,加工出最小特征尺寸10<sup>μ</sup>m,厚度30<sup>μ</sup>m的电热镍微夹钳.最后对 制作的微夹钳在 0~ 1.5 V 直流电压下进行动态测试.夹持端位移最大可达 24<sup>μ</sup> m.

关键词:柔性机构: 伪刚体法: 微夹钳: UV-LIGA 中图分类号: TH162 文献标识码: A

#### 0 31 言

微夹钳在 MEMS(micro electro-mechanical system)的微操作、微装配领域担当重要角色. 尽 管现在已经有多种微夹钳被制造出来,但对微夹 钳设计方法还缺乏系统的研究.现在的多数微夹 钳是采用静电、压电、形状记忆合金等驱动方式使 夹持端运动并夹持物体:同时由于驱动位移一般 都很小,为满足工作要求必须有放大机构使夹持 端位移放大,放大方式多采用杠杆放大原理.

作为 MEMS器件的微夹钳具备 MEMS产品 的特性,如:加工制作要简单,免于装配等,同时要 能够实现对输入位移的放大,因此柔性机构 [1] 的 结构形式对 M EM S产品设计比较适用 特别是全 柔性机构已扩展到 MEM S应用领域的各个方面. 柔性机构是指在设计中采用大变形柔性元素,而 非全部采用刚性元件的一类机构,能够通过构件 的弹性变形输出全部或部分运动或力. 全柔性机 构一般分为两种:一种是具有集中柔度的全柔性 机构 (lumped compliance compliant mechanism, 简称 LCCM),其特征是用柔性运动副代替了全部 传统运动副:另一种是具有分布柔度的全柔性机 构 (distributed com pliance com pliant mechanism, 简称 DCCM),其特征是整个机构中 并无任何铰链的存在 ,这种柔性相对均衡地分布

在整个机构之中,无论哪种全柔性机构都具有如 下优点: (1)可单片设计以简化结构 免于装配; (2) 无间隙和摩擦,可实现高精度运动;(3) 免于 润滑、避免污染;(4)无磨损,提高寿命.

柔性机构所具有的优点能够满足 MEMS器 件的性能要求,可以借鉴柔性机构的设计方法对 微夹钳进行设计. Mankame等<sup>[2]</sup>用拓扑优化方 法对柔性机构进行设计:Midha等<sup>[3]</sup>对柔性结构 的伪刚体模型进行了详细的介绍. 而对微夹钳的 设计以前多是利用经验式的杠杆放大原理,如 Selius等<sup>[4]</sup>设计的压电驱动的玻璃微夹钳:随着 拓扑优化方法在柔性机构设计上的应用.现在也 有很多学者用拓扑优化方法对微夹钳进行设 ìt <sup>[5 6]</sup>

本文主要工作是把用于柔性机构设计的伪刚 体法应用到设计柔性微夹钳机构的位移放大部 分,采用电热驱动器对其驱动并使二者成为有机 整体:然后对电热微夹钳进行一系列的仿真验算: 最后用 UV-LIGA工艺加工制作微夹钳 并进行 性能测试.

#### 1 伪刚体法

柔性机构的运动大都是通过将弯曲变形限制 在某一范围内的柔性"关节"来实现的,它模仿了 常规铰链的功能、当用扭转弹簧及直线拉压弹簧

收稿日期: 2005-12-10; 修回日期: 2007-03-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50135040, 50475153).

基金坝目: 国家日本行子蚕鱼及购买目 (Bolisson, Bonner) 作者简介: 褚金羍\* (1965-), 男,教授,博士生导师, E-mail chujk@ dlut.edu.cn. 刘氏说是2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

来模拟柔性时,柔性机构便可以看成是一个刚性 连杆机构<sup>[7]</sup>.根据这个思路,利用伪刚体的概念, 并用广义运动学方法来研究柔性机构.伪刚体模 型用来简化柔性机构的设计和分析,提供了柔性 梁非线性扭曲的建模方法,使柔性机构和刚性机 构的理论得到统一.Howell等<sup>[8]</sup>提出一种模型, 柔性部分在长度上要比邻近的刚性部分小得多. 这样,可以先按给定的(或已知的)拓扑结构进行 设计.再把该拓扑结构变成一个伪刚体模型.

伪刚体法设计柔性机构的一般步骤:首先,根 据用户要求确定一个相应的刚性机构;再将其转 化为伪刚体机构,用伪刚体机构中的弹性构件模 拟刚性机构中的运动副,而其中的刚性构件将代 表柔性机构中刚性较好的部分,通过分析伪刚体 机构来验证设计要求和约束条件是否满足,如果 不满足,则必须改进伪刚体机构;并且重新进行分 析;然后再将其转化为柔性机构;最后检验该机构



图 1 平面刚体机构 Fig. 1 Planar nigid-body mechanisms



图 3 伪刚体模型 Fig. 3 Pseudo-rigid-body model

将伪刚体机构转化为柔性机构,得到如图 5 所示的微夹钳.

对优化后和柔性化的微夹钳机构进行仿真验 算,其输入位移 ui 与输出位移 ui 的关系见图 6,从 图中可以看出,输出与输入接近线性关系,单侧夹 持端的位移放大倍数为 10左右,能够满足设计和 使用的要求. 是否满足设计要求.这种设计思路可以充分利用 成熟的刚性运动学的知识,而且弹性部分的尺寸 与刚性部分的尺寸相比越小,这种模拟越精确.

#### 2 微夹钳的设计

首先根据微夹钳的运动要求,提出刚性机构 的结构特点:单自由度、结构对称,存在对称输出 构件,并需对其进行类型综合<sup>[9]</sup>.设计微夹钳采 用的刚性机构如图 1所示,这是个对称的平面机 构.取其对称部分来说明其运动机理,运动简图 如图 2所示,当给构件 *AF* 如图示方向的输入位 移,即由位置 *AF* 运动到 *A<sup>'</sup>F<sup>'</sup>*,就会在构件 *R*<sub>3</sub> 的 输出端产生与输入位移方向垂直的输出位移.图 3是其伪刚体模型.为了得到大的输出位移,使放 大倍数达到最大,对伪刚体模型进行优化,得到合 适的杆长、转角及铰链位置.图 4是优化后得到 的机构简图.



图 2 机构运动示意图

Fig. 2 Sketch map of movement of the rigid-body mechanisms



图 4 优化后的柔性机构简图

Fig. 4 Sketch map of compliant mechanisms after optimizing

输入位移,采用 V形电热驱动器来驱动柔性钳体<sup>[10]</sup>,使其夹持端产生放大的输出位移和一定的 夹持力.电热驱动方式与其他的驱动方式比起来 操作简单、驱动电压较小,易于集成,输出的力较 大,响应较快.电热驱动器与柔性微夹钳集成于 一体的柔性电热微夹钳结构如图 7所示,如果夹 持对象没有特殊要求,可以将锚点 1和 3合成一

? **必须要有合适的驱动器来为柔性微夹钳提供** 体,锚点 2和 4合成一体,并适当加大其尺寸,这.



图 5 柔性微夹钳(单位:µm) Fig. 5 Compliant microgripper (unit µm)



图 6 柔性微夹钳的单侧夹持端位移与输入 位移关系

Fig. 6 Relation of the compliant microgripper jaw displacement and input displacement



图 7 柔性电热微夹钳(µm)







Fig. 8

Relation of clamping force and input voltage

样将会使制作和操作变得简单而其输出特性基本 不变.图 8是夹持端的夹持力与输入电压的关 系.

#### 3 UV-LIGA加工

采用 UV-LIGA工艺来加工电热微夹钳<sup>[11]</sup>. 根据微夹钳特征和加工的实际条件,工艺流程如 图 9所示,首先对 100晶向单晶硅片进行清洗 氧 化,溅射钛和铜,厚度为 100 nm/400 nm;然后是 铸模加工,铸模加工要经过以下工艺过程;前处理 - 涂胶- 前烘- 曝光- 曝光后烘- 显影- 清 洗和干燥. 虽然 SU-8光刻胶被广泛应用于 M EM S领域,但是其工艺参数在发表的文献中不 尽相同,SU-8胶的涂胶方法仍没有标准化,本文 具体参数见表 1. 图 10为 SU-8胶铸模结构的显 微图片,台阶仪测得铸模厚度 60<sup>µ</sup>m:最后进行电 铸,选用氨基磺酸镍电铸液来电铸镍<sup>[10]</sup>,电铸液 配比和电铸条件如表 2所示.电铸时间 4 h:电铸 完成后.采用 SU-8胶的去胶液 PG去除 SU-8胶. 在  $85^{\circ}$  去胶液中浸泡 2 h 左右可使胶去除干净, 铸层厚度 30<sup>µ</sup> m.图 11为电铸后去除 SU-8胶后的 显微图片.



| 表 | 1 | SU-8铸模加工工艺条件 |
|---|---|--------------|
|   |   |              |

| Tab. 1 | Process | conditions of | SU-8 mold | building |
|--------|---------|---------------|-----------|----------|
|--------|---------|---------------|-----------|----------|

|         |                                | 0             |
|---------|--------------------------------|---------------|
| 步骤      | 参数                             | 设备和化学试剂       |
| 预热      | 50 ℃                           | 热板            |
|         | 匀胶机以 300 r/min启动,              |               |
| 涂胶      | 18 s内加速到 1 500                 | KW-4A型台式匀胶机   |
|         | r/min,并保持 30 s                 |               |
| 松弛      | 5 min                          |               |
| ىلىغ كى | 65 ℃: 20 min                   | ++ + <b>-</b> |
| 則烘      | 95 °C: 48 min                  | 热权            |
| 松弛      | 3 h                            |               |
| 曝光      | 紫外光剂量: 300 m J/cm <sup>2</sup> | BGJ-3型曝光机     |
| 后烘      | 85 ℃: 20 min                   | 热板            |
| 松弛      | 3 h                            |               |
| 显影      | 浸泡并搅动 6 min                    | PGM E A       |
| 漂洗      | 10 min                         | IPA和 DIwater  |

注: 光刻胶为 SU-8 2075,粘度为 1.5 Pate



图 10 SU-8铸模结构 Fig. 10 SU-8 mold

表 2 镍电铸液的工艺条件

| Tab. 2 | Process conditions | of Ni | electroplating | bath |
|--------|--------------------|-------|----------------|------|
|--------|--------------------|-------|----------------|------|

| 配比                       | 操作条件                         |
|--------------------------|------------------------------|
| 氨基磺酸镍(600g/L)            | р H(3.5~ 4.0)                |
| 氯化镍(5g/L)                | 温度 (56℃)                     |
| 硼酸(35g/L)                | 电流密度(2.5 A/dm <sup>2</sup> ) |
| 十二烷基硫酸钠 (0.05~ 0.3 g /L) | 占空比 (2°10)                   |
|                          | 频率 (1000 Hz)                 |



- 图 11 去 SU-8胶后的电铸结构图
- Fig. 11 Electroplated microgripper after removing SU-8

### 4 微夹钳的性能测试

装的立体显微操作系统下实现的,测试原理如图 12所示.将微夹钳放在显微镜下,并在电极间加 直流电压,微夹钳的动作被 CCD摄像机记录,夹 钳的位移就通过夹持端距离的变化反映出来,夹 持端距离变化通过所记录的图片在软件分析下得 到.微夹钳的典型实验结果是在一系列的驱动电 压下,得到不同的夹持端位移.随着驱动电压的 增大,夹持端位移也相应增大,直到微夹钳的驱动 梁达到其熔点.施加 1.5 V 直流驱动电压时,夹 持端位移可达 24<sup>μ</sup> m.图 13是在 1.5 V 直流电压 施加后,整个微夹钳的变化情况.实验中分别测 得微夹钳在 0.5 1.0和 1.5 V 驱动电压下夹持端 位移的变化,实验曲线如图 14所示.实验的重复 性好. 镍微夹钳的响应时间快,为 0.2 s左右.



图 12 测试系统示意图 Fig. 12 Sketch of test system



图 13 1.5 V 电压驱动 后微夹钳的位移变化 Fig. 13 Motion of the microgripper at 1.5 V voltage



366

? **1994 2014 Cliffic Academic : Souriar** Piectronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

#### 367

#### 5 结 论

本文将柔性机构设计的伪刚体法用于电热柔 性微夹钳的设计中,得到了放大倍数 20倍的柔性 微夹钳,通过仿真验证设计正确、可靠.用 UV-LIGA工艺制作了最小特征尺寸 10<sup>µ</sup> m,厚度 为 30<sup>µ</sup> m的电热镍微夹钳,并进行了性能测试,在 1.5 V 电压下,微夹钳的位移为 24<sup>µ</sup> m,接近理论 计算值.

#### 参考文献:

- M ID HA A. On the nomenclature, classification, and abstractions of compliant mechanisms [J]. ASME J Mech Des, 1994, 116(1): 270-279
- [2] MANKAME N D, ANANTHASURESH G K. Topology optimization for synthesis of contact-aided compliant mechanisms using regularized contact modeling [J]. Comput and Struct, 2004, 82(4): 1267-1290
- [3] MIDHA A, HOWELL L L, NORTON T W. Limit positions of compliant mechanisms using the pseudo-rigid-body model concept [J]. Mech and Mach Theory, 2000, 35(1): 99-115
- [4] SELIUS R, WURMUS H, HARNISCH A. Microgrippers created in microstructurable glass [J].
   Microsyst Technol, 1997, 4 32–34

- [5] O H Youung-seok, LEE Woo-ho, SKIDMO RE G D. Design, optimization, and experiments of compliant microgripper [C] // 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress. Washington D C [s n], 2003
- [6] 郝秀春,褚金奎,王立鼎. 微夹钳的拓扑优化设计 [J]. 机械科学与技术,2004,23(11): 1304-1311
- [7] HOWELL L L. A method for the design of compliant mechanisms with small-length flexural pivots [J]. JMech Des, 1994, 16(1): 280-290
- [8] HOWELL L L, MIDHA A. Parametric deflection approximations for end-loaded, large-deflection beams in compliant mechanisms [J]. J Mech Des, 1995, 17(1): 156-165
- [9] 褚金奎.平面连杆机构结构特征及尺度特征的研究 [D].北京:北京航空航天大学,1992
- [10] QUE L, PARK J S, GIANCHIANDANI Y B. Bent-beam electrothermal actuators Part , Single beam and cascaded devices [J]. JMicroelectromech Syst, 2001, 63(5): 247-254
- [11] HO Chien-hung, CHIN Kan-ping, YANG Chii-rong, et al. Ultrathick SU-8 mold formation and removal, and its application to the fabrication of LIGA-like micromotors with embedded roots
  [J]. Sensors and Actuators A, 2002, 102(3): 103-138

# Research on design, fabrication and performance testing of compliant electrothermal nickel microgripper

CHU Jin  $kui^{*1,2}$ , HAO Xiu  $chun^{1,2}$ , GUAN Le<sup>1,2</sup>, WANG Li ding<sup>1,2</sup>

- (1.Key Lab · for Precis. & Non tradit · Mach · Technol · of Minist · of Edu · , Dalian Univ · of Technol · , Dalian 116024, China;
  - 2.Key Lab. for Micro Mano Technol. and Syst. of Liaoning Prov. , Dalian Univ. of Technol. , Dalian 116024, China )

**Abstract** Pseudo-rigid-body method which is one of compliant mechanisms design methods was used to design compliant microgripper, and a new electrothermal microgripper was obtained. The electrothermal microgripper was fabricated with UV-LIGA process, as well as simulated and tested. The pseudo-rigid-body model was created from a symmetrical planar 10-bar linkage. The microgripper form was obtained through optimizing the pseudo-rigid-body model and making the hinge flexibility. This part can generate the desired output displacement, and can magnify the input displacement up to 20 times. V-shaped electrothermal actuator was attached to actuate the microgripper. During the UV-LIGA process, titanium layer and silicon dioxide were used as a sacrificial layer, copper layer was used as a seed layer, and UV-LIGA process was performed by nickel electroplating in a nickel-sulfamate-based solution with SU-8 mold. Finally, a smallest feature size of  $10^{\mu}$  m,  $30^{\mu}$  m thick nickel electrothermal microgripper was fabricated. Dynamic performance of the nickel microgripper was tested within 0-1. 5 V voltage range. The maximum displacement between two jaws of up to  $24^{\mu}$  m was recorded for this nickel microgripper.

Key 1994-20 10 compliant mechanisms: pseudo-rigid-body method, microgripper: UV-LICA