

对称解耦式三自由度并联微动平台的设计

万光继¹, 孙庆龙², 张圣贤¹, 卢志诚¹, 周鹏飞¹, 崔玉国^{1*}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 首信自动化信息技术有限公司, 河北 迁安 064400)

摘要: 为使微定位系统具有较高灵活性, 设计了一种三自由度并联微动平台. 首先, 基于双平行四连杆机构及对称并联结构对台体进行设计, 并进一步设计了辅助测量及承载模块; 然后制作出微动平台实物, 搭建实验系统, 对平台位移及位移耦合进行测试. 结果表明: 在 120 V 的最大驱动电压作用下, 平台 x 、 y 、 θ_z 方向的最大位移分别为 25.96 μm 、25.87 μm 、208 μrad ; 在 x 和 y 方向产生的最大耦合位移分别为 39.73 nm、140.95 nm, 绕 z 轴产生的最大耦合转角为 0.89 μrad .

关键词: 微动平台; 三自由度; 并联结构; 柔性铰链

中图分类号: TN304.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 03-0040-05

微动平台是一种具有纳米级定位精度和位移分辨率、亚毫米级运动行程的微定位装置. 在超精密加工领域, 它可以给刀具提供微纳米级的进给量, 还能通过与其他仪器设备的配合来抑制加工过程中的误差^[1]. 在微机电系统(MEMS)领域, 它在装配过程中可以为微轴、微齿轮等高精度微小零件提供纳米级定位精度^[2]. 在原子力显微镜(AFM)领域, 它提供的纳米级运动精度可以实现微结构表面的三维形貌测量^[3].

压电微动平台是由压电执行器驱动, 通过柔性结构的弹性变形来产生微位移和传递力的微位移机构, 它具有体积小、响应速度快、输出力大、定位精度和位移分辨率高等优点. 压电微动平台在结构上可分为串联式和并联式, 串联式在各运动方向上均通过一个动平台与一组弹性单元体来实现微运动, 而并联式仅通过一个动平台与一组弹性单元体来同时实现各运动方向上的微运动.

Lee 等^[4]设计了一个两自由度微动平台, 它由 2 个完全相同的单自由度平台通过级联方式装配在一起, 平台闭环带宽达 100 Hz, 分辨率小于 50 nm. Kim 等^[5]采用复合平行四连杆机构作为导向机构, 以菱形机构作为放大机构, 设计出一种用于 AFM 系统的两自由度串联微动平台, 其最大输出位移

为 100 μm , 在最大行程时会产生 0.75° 的寄生旋转. Fung 等^[6]设计了一个宏微组合驱动的大行程两自由度精密定位平台, 微动平台由压电执行器驱动, 由两自由度串联式双平行的四连杆机构构成. Syahputra 等^[7]采用双平行四连杆机构作为导向机构设计出了一个两自由度串联微动平台, 平台柔性部分上下对称, 可以很好地抑制热变形所产生的位移误差. 串联式微动平台结构紧凑, 无运动耦合(平台沿某一方向运动时, 不会在另一方向产生寄生位移), 但有效工作台面小, 且内平台预紧相对困难.

Qin 等^[8]通过对称分布的双平行四连杆机构和双圆形柔性铰链相结合的方式, 设计出一种两自由度并联式微动平台, 平台最大水平位移 11.6 μm , 固有频率 665 Hz, 低频时圆形轨迹跟踪误差小于 40 nm. Polit 等^[9]设计出两自由度高带宽压电驱动并联式纳米定位平台, 该平台设计有 2 个轴, 每个轴由双夹梁、平行四边形混合柔性梁和圆形弯曲铰链组成, 平台行程为 15 μm , 分辨率为 1 nm. Lai 等^[10]设计出了结构上解耦的两自由度并联微动平台, 该平台由 2 个柔性机构组成, 两运动方向间的最大静态和动态位移耦合分别低于 0.5% 和 -45 dB. Liu 等^[11]设计了一个两自由度并联柔性结构压电微

收稿日期: 2017-11-06.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51675288).

第一作者: 万光继(1991-), 男, 湖北黄石人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 微/纳米定位. E-mail: 691491697@qq.com

*通信作者: 崔玉国(1971-), 男, 吉林农安人, 教授, 主要研究方向: 微/纳米定位及精密测量. E-mail: cuiyuguo@nbu.edu.cn

动平台, 通过 2 个编码器采集位移信号, 柔性机构连接平台固定部分和运动部分, 利用杠杆原理来放大压电执行器输出的位移, 定位精度为 10 nm. 并联式运动平台有较大的工作台面, 且运动方向上实现微运动的结构参数完全相同, 参数识别简单, 易于定位控制, 但为使位移无耦合, 需要设计相应的解耦机构, 这就使得平台结构相对复杂.

对比串联式与并联式微动平台的结构特性可知, 并联式微动平台在结构上更具有优势, 但目前对多自由度(如两平动—转动三自由度)微动平台而言, 如何使平台同时具有结构简单、运动无耦合、热变形误差小、易于集成传感器等优点还是个难点.

本文以结构简单、紧凑、工作台面大、无位移耦合、可抵消热变形、易于集成电容式位移传感器为目标, 来设计沿 x 、 y 轴平动, 绕 z 轴转动的三自由度微动平台, 并对所设计平台的位移及位移耦合特性进行测试.

1 平台结构设计

1.1 台体设计

鉴于对称并联的柔性结构可抑制热变形所产生的位移误差, 且具有较大的工作台面. 故本文采用对称并联结构, 并考虑平台不产生位移耦合, 压电执行器不受扭矩与弯矩作用, 平台可集成电容式位移传感器的基础上, 基于所选取的直梁形柔性铰链及双平行四连杆机构, 来设计可实现沿 x 与 y 方向平动、绕 z 轴转动的 $x-y-\theta_z$ 三自由度微动平台. 所设计的微动平台主要由定平台、动平台、驱动单元及辅助单元构成(图 1). 其中, 定平台与动平台通过相互独立的驱动单元(3 个)与辅助单元(3 个)连接, 驱动单元与辅助单元在压电执行器的运动方向上完全对称. 本文所设计的微动平台将导向机构和解耦机构有效地整合于驱动单元和辅助单元中, 使得结构更加紧凑、工作台面更大.

图 2 为驱动单元结构示意图, 它主要由直梁形柔性铰链(1)、(2)与刚性连接部(1)、(2)构成. 4 个直梁形柔性铰链(1)构成的双平行四连杆机构作为导向机构, 2 个直梁形柔性铰链(1)与对称分布的辅助单元中 2 个直梁形柔性铰链(2)组成的双平行四连杆机构作为解耦机构. 驱动单元分别通过刚性连

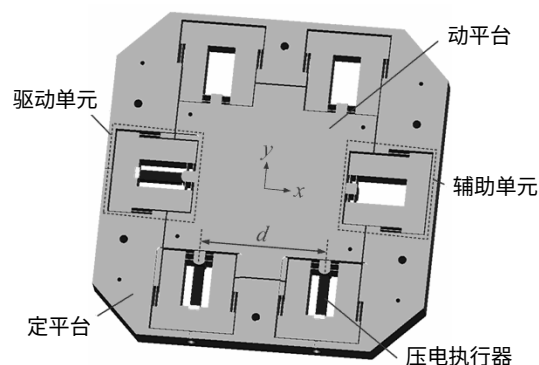


图 1 台体结构

接部(1)、直梁形柔性铰链(2)与动平台、定平台相结合. 为避免压电执行器在预紧过程中受到预紧螺钉的扭矩作用, 在刚性连接部(2)上设计出与预紧垫片宽度相同的凹槽, 在通过螺钉预紧过程中可以有效地消除预紧过程对于压电执行器的扭矩作用. 同时, 将压电执行器与刚性连接部(1)的接触面设计成圆弧面来消除压电执行器的弯矩与剪切力.

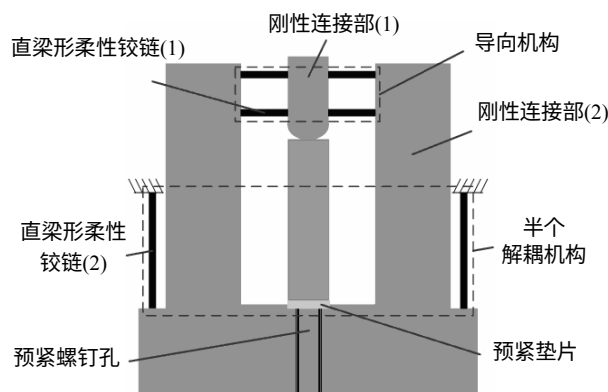


图 2 驱动单元结构示意图

微动平台沿 x 与 y 方向平动、绕 z 轴转动的实现过程如下: 对位于驱动单元中的压电执行器施加驱动电压, 通过 x 方向(或 y 方向)驱动单元及辅助单元中的导向机构输出压电执行器的位移, 从而实现微动平台沿 x 方向(或 y 方向)的水平运动; 与此同时, 通过在 y 方向(或 x 方向)对称分布的驱动单元与辅助单元中解耦机构来消除耦合位移. 对位于 y 方向两驱动单元中的压电执行器施加不同的驱动电压, 通过 y 方向驱动单元及辅助单元中的导向机构输出 2 个压电执行器各自的位移, 从而实现平台绕 z 轴的转动; 与此同时, 微动平台 x 、 y 方向的驱动单元与辅助单元中的直梁形柔性铰链

(2)起到旋转时的导向与解耦作用.

1.2 测量及承载模块设计

图 3 所示为平台测量/承载模块, 它由传感器安装体、测量/承载体、传感器调节套筒构成. 其中, 传感器安装体、测量/承载体分别固定于定平台和动平台, 电容式传感器通过塑料螺钉固定于传感器调节套筒中, 而传感器调节套筒通过螺纹与传感器安装体相连接. 微动平台在运动过程中, 带动与动平台固定连接的测量/承载体产生位移, 该位移由电容式位移传感器所测得.

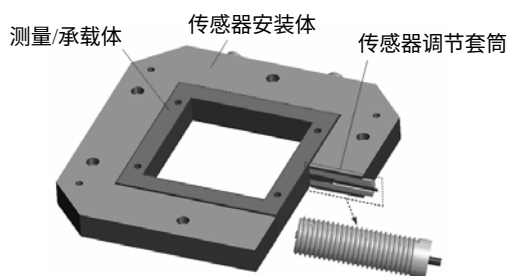


图 3 测量/承载模块

平台的整体结构如图 4 所示. 鉴于铝合金 7075 具有密度小、弹性高、强度高、易于加工、耐磨性好等优良的机械性能, 故本文采用该材料来设计微动平台.

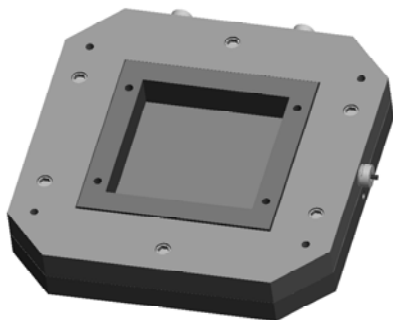


图 4 整体结构

2 平台位移及位移耦合特性测试

压电微动平台位移及位移耦合特性测试系统如图 5 所示. 测试系统由计算机、包含 D/A 和 A/D 转换器多功能数据卡、执行器驱动电源、压电执行器、微动平台和电容式位移传感器组成. 系统各仪器参数如下: 电源输出电压的纹波为 5 mV, 线性度为 0.1%, 输出电压范围为 ± 150 V; 电容式位移传感器测量范围为 0~1 mm, 线性度为 0.5 μm , 分辨率为 0.75 nm; 多功能数据卡上 D/A 和 A/D 转换器

的分辨率为 16 位, 采样频率为 $100 \text{ kS} \cdot (\text{s} \cdot \text{ch})^{-1}$.

实验测试过程如下: 计算机输出一组数字电压信号, 经 D/A 转换后, 生成一组模拟电压信号波形, 控制压电执行器驱动电源, 驱动电源的输出电压使压电执行器产生微位移, 同时, 微动平台在执行器作用下也产生微位移, 该微位移由电容式位移传感器测得, 并经过 A/D 转换后送入计算机; 同时, 垂直于运动方向的耦合位移同样被该方向的电容式位移传感器测得, 并将所测得的位移耦合信号经 A/D 转换后送入到计算机内.

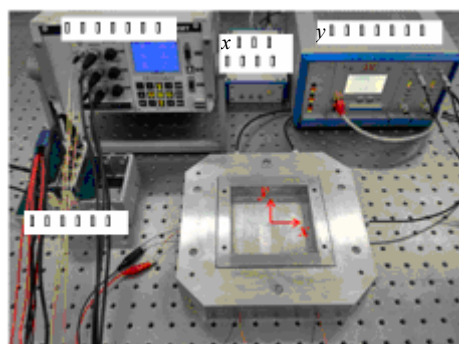


图 5 平台位移测试实验系统

2.1 x 方向位移及位移耦合测试

对平台 x 方向驱动单元中的压电执行器施加 0 V~120 V~0 V 的三角波电压, 重复 20 次测量, 由图 6 的测量结果可知, 平台输出位移具有很好的一致性, 最大输出位移为 25.96 μm .

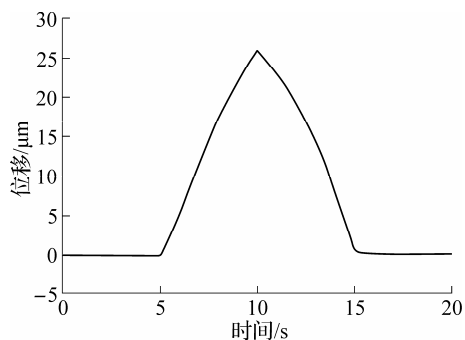


图 6 平台 x 方向位移测量结果

同时, 测得平台 y_1 、 y_2 方向的耦合位移如图 7 所示. 由图可知, 平台耦合位移的最大值分别为 180.7 nm 和 101.2 nm, 从而可以得到 y 方向的耦合位移和耦合转角分别为 140.95 nm 和 0.89 μrad . 微动平台产生耦合位移的原因主要是在安装压电执行器的过程中, 执行器的输出位移方向偏离了驱动单元的对称中心线.

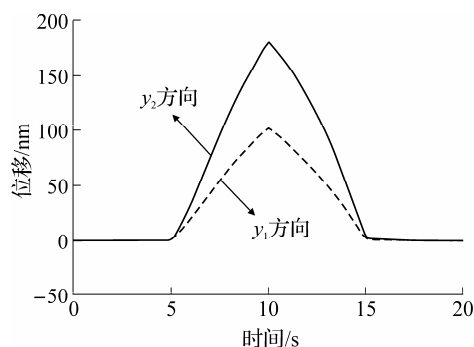


图7 平台y方向耦合位移

2.2 y方向位移及位移耦合测试

对平台y方向驱动单元中的压电执行器施加0V~120V~0V的三角波电压, 重复20次测量, 由图8的测量结果可知, 平台输出位移也具有很好的一致性, 最大输出位移为25.87 μm 。

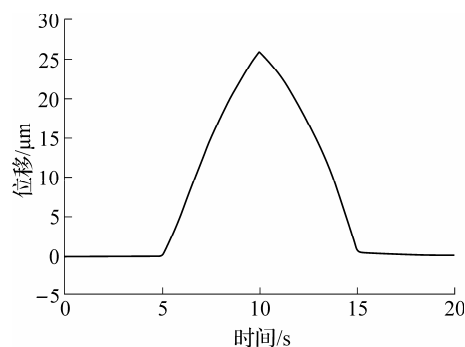


图8 平台y方向位移测量结果

同时, 测得平台x方向的耦合位移如图9所示, 由图可知, 平台耦合位移的最大值为39.73 nm。微动平台产生耦合位移的其中一个原因是由于y方向上的2个压电执行器的输出位移特性不一致, 而另一方面是由于在安装压电执行器的过程中, 执行器的输出位移方向偏离了驱动单元的对称中心线。

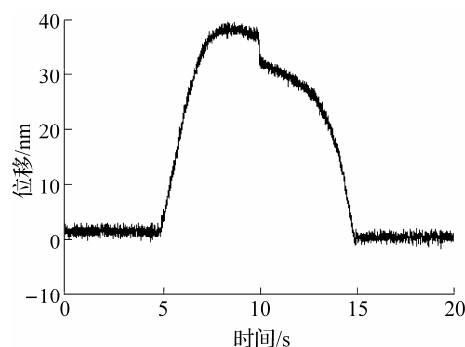


图9 平台x方向耦合位移

2.3 θ_z 方向位移及位移耦合特性测试

在测量平台转角时, 为获得其最大转角, 应对y方向上2个驱动单元中某个压电执行器施加电压幅值最大的梯形波电压, 而对另1个压电执行器不施加电压。但是为了保证平台在转动过程中, 2个压电执行器始终处于受预紧力作用的状态, 需要对另1个压电执行器施加幅值较小的梯形波电压。平台 y_1 、 y_2 方向的输出位移通过2个电容式传感器测得, 重复20次测量, 平台 y_1 、 y_2 方向的输出位移平均值波形如图10所示。根据 y_1 、 y_2 方向的输出位移, 可以计算得到微动平台转角范围(图11)。由该图可知, 微动平台转动角度的最大值为208 μrad 。

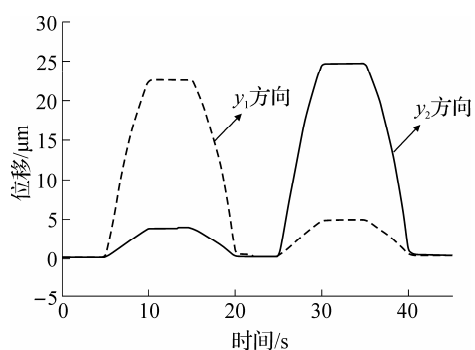
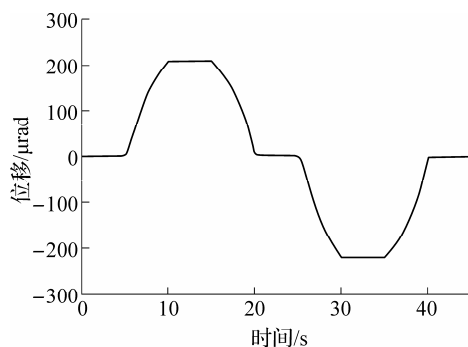
图10 平台 θ_z 方向位移测量结果

图11 平台的转角测量结果

3 结论

本文设计了一种能够沿x、y轴平动, 绕z轴转动的并联柔性结构微动平台, 其结构简单紧凑, 工作台面大, 运动解耦, 可抵消热变形, 易于集成位移传感器。通过实验对位移及位移耦合特性进行测试, 结果表明: 当最大驱动电压为120V时, 平台沿x、y、 θ_z 方向的最大位移分别为25.96 μm 、25.87 μm 、208 μrad , 最大耦合位移分别为39.73 nm、140.95 nm、0.89 μrad 。

参考文献:

- [1] 王海涛, 李世杰, 张艳蕊. 基于压电陶瓷的微进给平台的实验研究[J]. 机械设计与制造, 2015, 38(7):30-32.
- [2] 赵兴玉, 冯晓梅, 武一民, 等. 面向MEMS制造的高速精密定位平台的动力学仿真和结构设计[J]. 机械工程学报, 2006, 42(8):114-119.
- [3] Salapaka S M, Salapaka M V. Scanning probe microscopy[J]. Control Systems IEEE, 2008, 28(2):65- 83.
- [4] Lee J W, Li Y C, Chen K S. Design and control of a cascaded piezoelectric actuated two-degrees-of-freedom positioning compliant stage[J]. Precision Engineering, 2016, 45:374-386.
- [5] Kim D M, Lee D Y, Gweon D G. A new nano-accuracy AFM system for minimizing Abbe errors and the evaluation of its measuring uncertainty[J]. Ultramicroscopy, 2007, 107:322-328.
- [6] Fung R F, Hsu Y L, Huang M S. System identification of a dual-stage XY precision positioning table[J]. Precision Engineering, 2009, 33:71-80.
- [7] Syahputra H P, Ko T J, Chung B M. Development of 2-axis hybrid positioning system for precision contouring on micro-milling operation[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(2):691-697.
- [8] Qin Y D, Shirinzadeh B, Tian Y L. Design issues in a decoupled XY stage: Static and dynamics modeling, hysteresis compensation, and tracking control[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 194:95-105.
- [9] Polit S, Dong J Y. Development of a high-bandwidth XY nanopositioning stage for high-rate micro-/nanomanufacturing[J]. IEEE ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(4):724-733.
- [10] Lai L J, Gu G Y, Zhu L M. Design and control of a decoupled two degree of freedom translational parallel micro-positioning stage[J]. Review of Scientific Instruments, 2012; 83:045105.
- [11] Liu P B, Yan P, Zhang Z. Modeling and control of a novel X-Y parallel piezoelectric-actuator driven nanopositioner [J]. ISA Transactions, 2015, 56:145-154.

Design of a 3-DOF parallel micro-positioning stage with symmetrical and decoupling structure

WAN Guang-ji¹, SUN Qing-long², ZHANG Sheng-xian¹, LU Zhi-cheng¹, ZHOU Peng-fei¹, CUI Yu-guo^{1*}

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Shouxin Automation Information Technology Co., Ltd., Qian'an 064400, China)

Abstract: In order to make the micro-positioning system more flexible, a 3-DOF parallel micro-positioning stage is designed. Firstly, the stage is designed based on double parallel four-bar linkage and symmetrical parallel structure, the auxiliary measurement and bearing module is also designed. Then, the micro-positioning stage is fabricated and the experimental system is built to test the displacement and the coupling displacement of the stage. The results show that the maximum displacements of the stage in x , y and θ_z directions are 25.96 μm , 25.87 μm and 208 μrad respectively under the maximum driving voltage of 120 V, and the maximum coupling displacements in x and y directions are 39.73 nm and 140.95 nm, respectively, and the maximum coupling angle around the z -axis is 0.89 μrad .

Key words: micro-positioning stage; 3-DOF; parallel structure; flexible hinge

(责任编辑 章践立)