

文章编号 1004-924X(2009)02-0333-08

基于体硅工艺的集成式定位平台

王家畴¹, 荣伟彬², 李昕欣¹, 孙立宁², 马立³

- (1. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家重点联合实验室, 上海 200050;
2. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
3. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要:针对纳米定位平台的构型和定位精度问题,采用体硅加工技术成功地研制出了一种基于单晶硅并带有位移检测功能的新型二自由度微型定位平台,定位平台采用侧向平动静电梳齿驱动。利用机电耦合和能量守恒原理分析了静电驱动器的致动机理,对定位平台的主要失效模型、静态和动态特性进行详细建模分析,证明了静电梳齿力电耦合所导致的侧壁不稳定以及驱动器的最大稳定输出位移,给出了平台稳定工作条件下梳齿间隙、梳齿初始交错长度以及复合柔性支撑梁的弹性刚度比之间的关系。动态分析时考虑空气阻尼对平台的影响,给出了平台最大运行速度、位移及动态条件下的临界驱动电压并把分析结果应用于平台闭环控制。实验结果表明:驱动电压 30 V 时,平台稳定输出位移达 10 μm,机械稳定时间仅为 2.5 ms。

关键词:体硅工艺;纳米级定位平台;静电驱动;致动机理;特性分析

中图分类号:TH703.6;TN305 **文献标识码:**A

Integrating positioning X-Y stage based on bulk micromachining

WANG Jia-chou¹, RONG Wei-bin², LI Xin-xin¹, SUN Li-ning², MA Li³

- (1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
2. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
3. School of Mechanical and Electronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: In order to realize the miniaturized nano-positioning stage, a novel 2-DOF Single Crystal Silicon (SCS) nano-positioning micro X-Y stage with the function of displacement detection is successfully developed by using silicon bulk-micromachining; the X-Y stage is driven by an electrostatics comb actuator. The theories of electromechanical coupling and energy conservation are used to analyze electrostatic actuated mechanism, X-Y stage static characteristic and X-Y stage dynamic characteristic. Some failure modes of X-Y stage are also presented and the electromechanical side instability and the stable travel range of comb-drive actuators are investigated. The stable travel range depends on the finger gap spacing, the initial finger overlap and the spring stiffness ratio of the compliant suspension. Additionally, by taking into account the effect of the air damping on the X-Y stage dynamic character-

收稿日期:2008-04-21; **修订日期:**2008-06-26.

基金项目:国家杰出青年基金资助计划项目(No. 50725518); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA04Z315); 长江学者和创新团队发展计划资助项目

istic, the maximum velocity, stable travel range and critical driving voltage are given to an experiment on closed-loop control. The experimental results indicate that the analyzed characteristics are useful in the design and control of the micro X - Y stage. Under 30 V driving voltage, the single-axis displacement output is 10 μm , and the closed-loop step response is only 2.5 ms.

Key words: silicon bulk micromachining; nano-positioning stage; electrostatics comb actuator; actuating mechanism; characteristic analysis

1 引言

近年来,在微电子机械系统(MEMS)领域,由于先进微纳加工技术的不断发展,深度反应离子刻蚀(DRIE)技术的日益成熟^[1],使用体硅微机械技术制作的微型定位平台受到人们的关注。静电梳齿致动器^[2]由于具有工艺集成度好、位移与驱动电压平方成线性关系及易于控制等特点在定位平台中得到广泛应用。Kazuhiro 等人利用深度反应离子刻蚀技术研制了一种基于 SOI 的二自由度定位平台,该平台将电极和引线互连部分集成在 SOI 片子上,把悬臂梁、框架及定位平台集成在衬底上,在减少平台整体尺寸同时大大提高了定位平台的有效使用面积^[3]。Gu 等人利用体硅微加工技术研制出基于单晶硅的二自由度定位平台,采用侧壁沟渠绝缘技术实现不同梳齿电极之间的电绝缘^[4]。静电梳齿致动器作为定位平台的关键组成部分其静态特性和动态特性的好坏直接关系到定位平台工作特性,但大多数文献[5-7]在这方面并没有系统地展开分析。

本文提出了一种基于单晶硅(SCS)的,集结构、驱动和检测于一体的新型二自由度微型定位平台,平台采用侧向平动静电梳齿驱动。利用力电耦合原理对静电驱动器的致动机理、输出位移、失效形式和失效条件进行了详细分析研究,为定位平台的结构设计提供理论依据,同时考虑了空气阻尼的影响,利用能量守恒原理对驱动器的最大运行速率、最大过冲位移等动态特性进行分析,为定位平台的有效控制提供了理论参考。

2 定位平台结构

集成式纳米级定位平台的结构示意图如图 1 所示,定位平台主要由作为衬底的 Pyrex7740 玻璃和作为结构层的单晶硅组成。首先利用硅微机

械加工技术在单晶硅上加工出定位平台的结构和位移传感器,然后利用硅-玻璃阳极键合工艺把结构层的硅和玻璃衬底键合在一起^[8]。

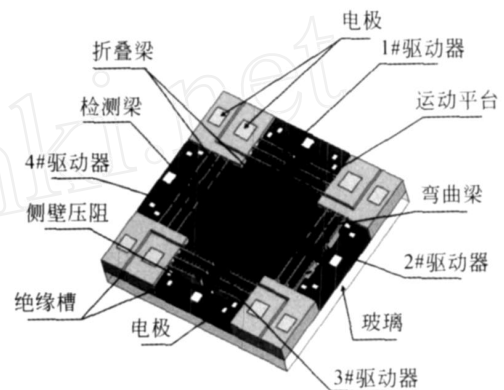
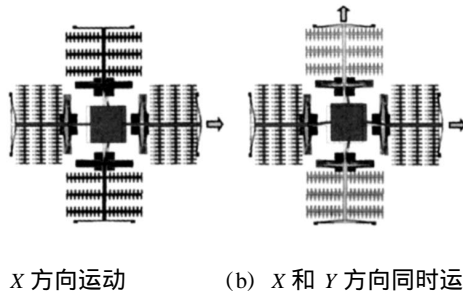


图 1 定位平台结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of X - Y stage

定位平台的结构层主要由以下 5 个部分组成:运动平台、折叠梁、柔性弯曲梁、侧向平动梳齿静电驱动器和检测梁,其中检测梁也是位移传感器的主要弹性检测元件。运动平台由 4 对柔性弯曲梁、折叠梁和弹性检测梁支撑,悬浮在整个运动平台中心位置,其中柔性弯曲梁用来连接运动平台和折叠梁;静电驱动器位于折叠梁和弹性检测梁之间,采用侧向平动驱动方式。定位平台通过 4 对静电驱动器分别实现运动平台沿 X 、 $-X$ 、 Y 、 $-Y$ 方向运动;检测梁采用两端固支结构,分别位于每一组静电驱动器的末端,运动平台一旦有位移动变化,检测梁在相应的运动方向上将会发生等值形变。同时,通过优化柔性弯曲梁和折叠梁的结构尺寸实现运动平台 X 和 Y 方向上的自解耦。图 2 是定位平台的运动模式示意图。



(a) X 方向运动 (b) X 和 Y 方向同时运动
(a) Motion in X-direction (b) Motion in X and Y directions
图 2 定位平台运动模式示意图

Fig.2 Driving mechanism of micro X-Y stage

3 静电致动器致动机理

如图 3 所示,令梳齿的初始重叠长度为 L_0 ,梳齿之间的间隙为 g ,梳齿的宽度和厚度分别为 b 和 h ,动齿头部到定齿根部的距离为 L_s ,定齿顶部到动齿根部的距离为 L_r 。

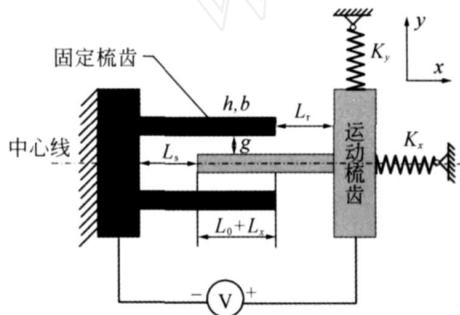


图 3 静电驱动器结构示意图

Fig.3 Scheme of electrostatics comb finger actuator

为了便于分析,忽略梳齿边缘效应对梳齿电容的影响,则梳齿驱动器各梳齿之间总电容量 C :

$$C = \epsilon_0 h \left[\frac{n(L_0 + L_s)}{g - L_y} + \frac{n(L_0 + L_s)}{g + L_y} + \frac{nb}{L_s - L_x} + \frac{(n+1)b}{L_r - L_x} \right] \quad (1)$$

式中, ϵ_0 为空气介电常数, n 为梳齿电极的总对数, L_y 为运动梳齿沿着固定梳齿方向运动的位移, L_x 为运动梳齿沿 X 方向上的位移。

假设驱动器在工作过程中动齿电极不发生偏转,即 $L_y = 0$,且初始条件下 $L_r = L_s = L$,则式(1)可以改写成:

$$C = \epsilon_0 h \left[\frac{2n(L_0 + L_s)}{g} + \frac{(2n+1)b}{L - L_x} \right] \quad (2)$$

当在驱动梳齿和固定梳齿之间施加驱动电压

V 时,梳齿电容中存储的电场能 E :

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{\epsilon_0 h}{2} \left[\frac{2n(L_0 + L_s)}{g} + \frac{(2n+1)b}{L - L_x} \right] V^2 \quad (3)$$

假设梳齿在静电力 F_{ex} 作用下沿 X 方向运动的位移为 x ,则由能量守恒定理可得:

$$F_{ex}x - \frac{dE}{dx}x = 0 \quad (4)$$

把式(3)代入式(4)可以计算出梳齿沿 X 方向上的静电力表达式:

$$F_{ex} = \frac{dE}{dx} = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC}{dx} = n_0 V^2 \frac{h}{g} + \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{bh_0 V^2}{(L - L_x)^2} \quad (5)$$

在结构设计中,由于 $L - L_x \gg b$,为了简化计算,将式(5)中的第二项忽略,得式(6):

$$F_{ex} = \frac{n_0 h}{g} V^2 \quad (6)$$

从式(6)可知,静电力的大小与梳齿重叠长度的长短无关,同梳齿对数和梳齿的厚度成正比,同梳齿间的间隙成反比。假设平动梳齿一侧系统的弹性系数为 k_x ,由胡克定律 $F_{ex} = k_x \cdot x$,可推导出梳齿驱动器输出位移与驱动电压的关系表达式:

$$L_x = \frac{n_0 h}{k_x g} V^2 \quad (7)$$

从式(7)可知,输出位移的大小同相邻两个梳齿之间交错部分的长度无关,同梳齿的对数、梳齿厚度以及驱动电压的平方成正比,同弹性系数和梳齿间隙成反比。电压一定时,为了提高驱动效率,应尽量降低运动梳齿一侧系统弹性系数 k_x ,减小梳齿之间的间隙 g ,增大驱动梳齿厚度 h ,增加梳齿对数 n 。从式(5)可知,增大平动梳齿与固定梳齿两侧非交错部分的长度 L_r 和 L_s 可以降低梳齿前端面对对应面之间静电力的影响,提高梳齿驱动的线性度。

4 平台静态特性分析

理论上,梳齿两侧的静电驱动力大小相等、方向相反,可以相互抵消,从而保证运动梳齿沿着相邻两个固定梳齿之间的轴线运动,如图 3 所示。但器件在实际加工过程中,由于掩模版的制造误差、光刻精度和结构释放过程中的刻蚀误差等原

因,以及驱动器在工作过程中受到外界环境的影响,都会使运动梳齿偏离轴向运动,导致梳齿两侧的静电力失去平衡。驱动梳齿偏离轴线中心运动主要表现为两种形式:(1)运动梳齿沿固定梳齿方向平动;(2)运动梳齿既有沿固定梳齿方向平动,又有梳齿本身微小转动。在这两种情况下,如果驱动器沿 Y 方向上的弹性系数不能保持运动梳齿在相邻两个固定梳齿之间处于平衡状态,运动梳齿最终将与驱动梳齿黏附在一起 (Pull-in),它们之间的摩擦力将阻止运动梳齿进一步向前运动。下面分别对平动梳齿静电致动器侧向失稳的两种情况进行理论分析研究。

4.1 梳齿平移失效模型

假设驱动器在运动过程中运动梳齿与固定梳齿相互之间保持平行,如图 4 所示。这种情况下

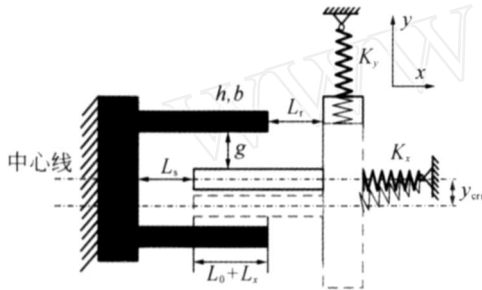


图 4 梳齿偏移示意图

Fig. 4 Sketch of comb finger transverse motion

驱动器总的能量 W 是平动位移 y 的函数:

$$W(y) = \frac{k_y y^2}{2} - \frac{n_0 h V^2}{2} \times \left(\frac{L_0 + L_x}{g - y} + \frac{L_0 + L_x}{g + y} + \frac{b}{L_s - L_x} + \frac{b}{L_r - L_x} \right) \quad (8)$$

总能量 W 对位移 y 的一阶导数,可以求出梳齿驱动器沿 Y 方向上总的作用力 F_y :

$$F_y = \frac{dW(y)}{dy} = k_y y - \frac{n_0 h V^2 (L_0 + L_x)}{2} \times \left(\frac{1}{(g - y)^2} - \frac{1}{(g + y)^2} \right) \quad (9)$$

从式(9)推导出静电梳齿驱动器平衡的条件是 $F_y = 0$,即:

$$k_y y = \frac{n_0 h V^2 (L_0 + L_x)}{2} \left(\frac{1}{(g - y)^2} - \frac{1}{(g + y)^2} \right) \quad (10)$$

在 $y = 0$ 处,对式(10)右边项对 y 求一阶导,得^[9]:

$$k_e = \frac{2 n_0 h V^2 (L_0 + L_x)}{g^3} \quad (11)$$

式中, k_e 可以看成由梳齿侧向静电力产生了一个“负”的等效刚度,运动梳齿两侧静电力保持平衡的临界条件是 $k_y = k_e$,当静电驱动器满足式(12)时,驱动器总会处于平稳工作状态。

$$k_y > k_e \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可以求出静电驱动器的临界驱动电压表达式:

$$V_{cri} = \sqrt{\frac{k_y g^3}{2 n_0 h (L_0 + L_x)}} \quad (13)$$

由式(7)、式(11)以及式(12)可以计算出驱动器平稳工作时所能输出的最大位移 $L_{x,max}$ 为:

$$L_{x,max} = -\frac{L_0}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{L_0^2 + \frac{2k_x}{k_x} g^2} \quad (14)$$

从式(14)也知,静电驱动器沿运动方向上的刚度越小或沿与运动方向垂直方向上的刚度越大,即静电驱动器的刚度比越大,静电驱动器平稳工作时输出的位移越大;初始梳齿重叠长度越长驱动器平稳工作时所能输出的位移范围越小,如图 5 所示。

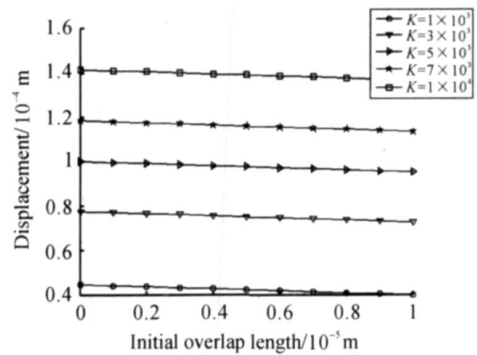


图 5 梳齿重叠长度及刚度比与输出位移的关系

Fig. 5 Relationship between stiffness ratios and initial overlap lengths of comb finger with displacements

因此设计时梳齿初始重叠长度不宜过长;同时梳齿间隙越大,静电驱动器输出的位移也越大,梳齿间隙同位移的关系曲线如图 6 所示。但是从式(7)可知,间隙越大驱动效率越低,因此在设计中应该综合考虑。

驱动器失稳时,运动梳齿沿固定梳齿方向运

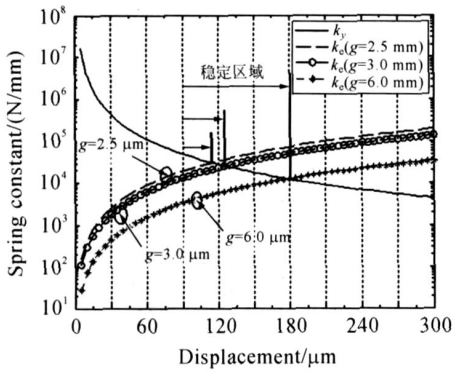


图 6 弹性系数同输出位移关系曲线

Fig. 6 Relationship between spring constants and displacements

动的最大平动位移可以通过对式(10)的平衡方程求解得出:

$$\begin{cases} y_1 = 0 \\ y_{2,3} = \pm \sqrt{\beta^2 - V} \sqrt{\frac{2_0 gh(L_0 + L_x)}{k_y}} \end{cases} \quad (15)$$

从上式可见,当 $y_1 = 0$ 时,运动梳齿沿侧面的平动位移等于零,因此驱动器运行在稳定状态; y_2 和 y_3 分别为运动梳齿从固定梳齿中心线位置向上或向下移动的最大位移,即驱动器失稳前的最大偏移位移,当运动梳齿的偏移量达到 y_2 或者 y_3 时,外界的轻微干扰都会使运动梳齿与固定梳齿发生 Pull-in 现象,迅速黏附在一起。式(15)也表明,驱动器失稳的临界位移是 k_y 的函数,如图 7 所示。因此具体设计过程中可以通过优化 k_y 达到控制临界位移的目的。

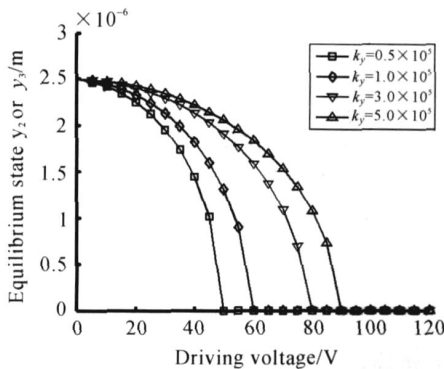


图 7 梳齿偏移位移同驱动电压关系曲线

Fig. 7 Relationship between equilibrium state (y_2 or y_3) of misaligned comb drive and driving voltage

4.2 梳齿平移偏转失效模型

静电驱动器在驱动过程中由于外界条件的影 响或者本身结构上存在的缺陷,实际驱动过程中会产生平动偏移和微小的转动偏转,其分析结构示意图如图 8 所示。为了简化分析,假设运动梳

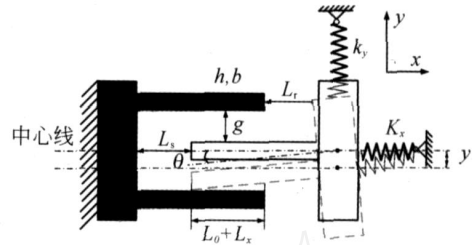


图 8 梳齿横向偏转示意图

Fig. 8 Sketch of comb finger transverse rotation

齿与固定梳齿两侧壁的电场线互相平行并且垂直于固定梳齿电极,进而可以忽略电场边缘效应的作用,在实际设计中 L_r 和 L_s 都较大,固定梳齿末端与运动梳齿根部以及固定梳齿顶端与运动梳齿根部的电容也可忽略不计,故梳齿间的总电容为:

$$C_{total}(y, \theta) = n_0 h \int_0^{L_0+L_x} \left[\frac{1}{g + (y + l \sin \theta)} + \frac{1}{g - (y + l \sin \theta)} \right] dl, \quad (16)$$

对上式积分:

$$C_{total}(y, \theta) = \frac{n_0 h}{\sin \theta} \left[\ln \frac{g + y}{g + (y + \frac{L_0 + L_x}{\cos \theta} \sin \theta)} - \ln \frac{g - y}{g - (y + \frac{L_0 + L_x}{\cos \theta} \sin \theta)} \right]. \quad (17)$$

由于转动角度 $\ll 1$,所以 $\sin \theta \approx \theta$, $\cos \theta \approx 1$, 式(17)可以化简为:

$$C_{total}(y, \theta) = \frac{n_0 h}{\theta} \left[\ln \frac{(g + y)(g - (y + (L_0 + L_x) \theta))}{(g - y)(g + (y + (L_0 + L_x) \theta))} \right]. \quad (18)$$

故静电驱动器总的能量为:

$$W(y, \theta) = \frac{k_y y^2}{2} + \frac{k}{2} - \frac{n_0 h}{2} \times \left[\ln \frac{(g + y)(g - (y + (L_0 + L_x) \theta))}{(g - y)(g + (y + (L_0 + L_x) \theta))} \right] V^2. \quad (19)$$

由式(19)可以推导出静电驱动器梳齿转矩和梳齿两侧静电力平衡条件,分别为:

$$k_y y = \frac{n_0 h V^2 (2y + L_0 + L_x)}{2} \times \left[\frac{1}{(g-y)(g+y+L_0+L_x)} - \frac{1}{(g+y)(g-y-L_0-L_x)} \right], \quad (20)$$

$$k = \frac{n_0 h V^2}{2^2} \left[\ln \frac{(g-y)(g+y+L_0+L_x)}{(g+y)(g-y-L_0-L_x)} - \frac{2g^2(L_0+L_x)}{g^2 - (y+L_0+L_x)^2} \right]. \quad (21)$$

式(20)和式(21)均为非线性平衡方程,只能通过数值方法来求解。通过这些平衡方程,可以对其进行定量分析,当驱动位移和运动梳齿偏移量一定的条件下,计算出驱动梳齿最大的允许偏转角度。

5 平台动态特性分析

与静态分析不同, MEMS 微定位平台的动态特性分析需要考虑运动的空气阻尼效应、惯性作用以及外部加速度等情况。静态特性分析给出静电驱动器特性的定量说明去指导平台结构设计,但无法描述由于阻尼等作用而导致的运动细节。动态特性研究可以反映出平台运动的实时情况,对运动情况的分析更为准确细致。对定位平台在运行中的最大速度、惯性作用下的最大过冲位移以及瞬态驱动条件下的 Pull-in 现象的分析如下。

5.1 平台最大速度分析

假设定位平台在驱动电压作用下沿 x 方向运动了 x_0 位移,根据理论力学中能量守恒原理可知:

$$\frac{1}{2} m v_{\max}^2 = \int_0^{x_0} (F_{\text{elec}} - F_k - F_{\text{couette}}) dx, \quad (22)$$

式中, m 为定位平台运动部分的有效质量, v_{\max} 为平台所能达到的最大速度。由参考文献[10]可知,阻尼力是位移 x 和速度 v 的函数:

$$F_{\text{couette}} = - \frac{\Delta_{\text{overlap}}}{h} v_x = f(x, v). \quad (23)$$

把式(20)和式(6)代入式(22)可得:

$$\frac{1}{2} m v_{\max}^2 = \frac{n_0 h V^2}{g} x_0 - \frac{k_x}{2} x_0^2 - \frac{1}{2} (2n-1) \frac{h v_{\max}^2 x_0^2}{g}. \quad (24)$$

故平台的最大速度为:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2n_0 h x_0 V^2 - k_x g x_0^2}{n m g + (2n-1) h x_0^2}}. \quad (25)$$

从式(25)可以看出,在考虑阻尼作用下,平台的最大输出速度比不考虑阻尼作用下的小得多,如果不考虑滑膜阻尼的作用,平台最大速度为:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2n_0 h x_0 V^2 - k_x g x_0^2}{m g}}. \quad (26)$$

阻尼对平台的作用等效于间接增大的平台运动部分的有效质量,平台有效质量增加部分的表达式为:

$$m = \frac{(2n-1) g h x_0^2}{g}. \quad (27)$$

5.2 平台位移过冲分析

当阻尼效应的作用比较微弱时,平台在阶跃电压驱动下不会在平衡位置立即稳定下来。由运动学原理可知,平台在运动过程中当静电力与平台运动方向上的弹性恢复力达到平衡之前,平台一直处于加速运动状态,即当静电力与弹性恢复力大小相等的瞬间,平台达到最大运动速度。随后,平台在惯性作用下冲过平衡位置继续运动。在接下来的运动过程中,由于静电力不再起主要作用,故运动平台主要在克服弹性恢复力和阻尼力做功,直到运动平台的速度从最大值减到零,此刻平台达到最大运动位移。因此,由能量守恒原理可得:

$$\frac{1}{2} m v_{\max}^2 = \int_0^x (F_k + F_{\text{couette}}) dx. \quad (28)$$

把式(6)和式(20)代入式(28)得:

$$x = \sqrt{\frac{m g v_{\max}^2}{n k_x g + (2n-1) h v_{\max}^2}}. \quad (29)$$

由于轻度阻尼效应不会影响平台的最终输出位移,由式(14)可推导出平台在外部阶跃驱动信号的驱动下,平台稳定工作的最大输出位移表达式为:

$$L_{x, \text{step}} = \frac{1}{2} \sqrt{L_0^2 + \frac{2k_y}{k_x} g^2 - \frac{L_0}{2}} - x. \quad (30)$$

5.3 平台稳定性分析

由式(30)可知,由于过冲现象,平台在阶跃信号驱动下的最大稳定输出位移要比静态条件下小,结合式(7),可以求出平台稳定工作时的最大临界驱动电压表达式:

$$V_{\text{cri,step}} = \sqrt{\frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_0^2 + \frac{2k_x}{k_x} g^2 - \frac{L_0}{2}}{n_0 h}} - \frac{m g v_{\text{max}}^2}{k_x g + (2n-1) h v_{\text{max}}^2}} k_x g \quad (31)$$

从式(31)可知,式(32)可以等效地看成平台克服过冲位移所需要消耗的驱动电压:

$$V_{\text{couette}}^2 = \frac{\frac{m g v_{\text{max}}^2}{k_x g + (2n-1) h v_{\text{max}}^2} k_x g}{n_0 h} \quad (32)$$

把式(32)代入式(31)可以简化为:

$$V_{\text{cri,step}} = \sqrt{V_{\text{cri}}^2 - V_{\text{couette}}^2} \quad (33)$$

从式(32)可知,平台在瞬时驱动条件下,临界驱动电压的大小与空气阻尼粘滞系数、平台的厚度、梳齿间隙、平台的最大运动速度以及柔性支撑梁的刚度都有关系。由式(33)可知,在实际瞬态控制中,应避免静电驱动器的驱动电压大于 $V_{\text{cri,step}}$ 。

5.4 实验分析

利用上述分析结果指导定位平台的闭环控制实验研究,采用单神经元自适应 PID 控制算法对定位平台进行位置控制,控制过程中静电驱动器的最大临界电压由式(33)界定。平台在 30 V 驱动电压作用下的闭环阶跃曲线如图 9 所示,平台的稳定输出位移为 10 μm ,机械稳定时间约 2.5 ms。

参考文献:

- [1] TANG W C, NGU YEN T H, HOWE R T. Laterally driven polysilicon resonant microstructures[J]. *Sensors Actuators*, 1989, 20:25-32.
- [2] 程保罗,李昕欣,王跃林,等. 带有静电自检测功能的高灵敏度加速度传感器[J]. *半导体学报*, 2005, 26(3):547-553.
CHENG B L, LI X X, WANG Y L, et al.. High performance accelerometers with advanced bulk micromachining technology [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2005, 26(3):547-553. (in Chinese)
- [3] KAZUHIRO T, MA KOTO M, HIRO YU KI F, et al.. A high fill-factor comb-driven XY-stage with topological layer switches architecture [J]. *IEICE Electronics Express*, 2006, 3(9):197-202.
- [4] GU L, LI X X, BAO H F, et al.. Single-wafer-processed nano-positioning XY-stages with trench side-

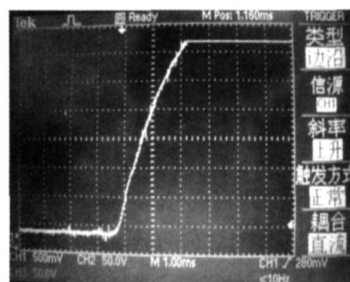


图 9 单神经元 PID 位移阶跃曲线

Fig. 9 Step response of single neuron adaptive PID control

6 结论

静电梳齿致动器是目前 MEMS 领域应用最为广泛的微型致动器。致动器的静态特性和动态特性的好坏直接关系到定位平台工作特性。本文利用力电耦合原理对静电致动器的致动机理、输出位移、失效形式和失效条件进行了详细地建模分析,为定位平台的结构设计提供了理论依据,同时考虑空气阻尼的影响,利用能量守恒原理对致动器的最大运行速率、最大过冲位移等动态特性进行分析,最后将分析结果应用到平台的闭环实验中。实验结果表明:驱动电压 30 V 时平台稳定输出位移达 10 μm ,机械稳定时间仅 2.5 ms。

wall micromachining technology [J]. *J. Micromech. Microeng*, 2006, 16:1349-1357.

- [5] KIM CH HE, JEONG H M, JEON J U, et al.. Silicon micro xy-stage with a large area shuttle and no-etching holes for SPM-Based data storage [J]. *Journal of Microelectromechanical System*, 2003, 12(4):470-478.
- [6] LEE C S B, HAN S, MACDONALD N C. Single crystal silicon (SCS) XY-stage fabricated by DRIE and IR alignment [C]. *Proceedings of the 2000 IEEE Conference on MEMS*, No. 00CH3608.
- [7] CHEN H K, YONG K K. Micro XY-stage using silicon on a glass substrate [J]. *J. Micromech. Microeng*, 2002, 12(2):103-107.
- [8] 王家畴,荣伟彬,李昕欣,等. 基于体硅工艺的定位平台制作工艺分析[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(4):636-641.
WANG J CH, RONG W B, LI X X, et al.. Fabri-

- cation process analysis for nano-positioning stage based on silicon bulk micromachining [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4):636-641. (in Chinese)
- [9] ZHOU G Y, DOWD P. Tilted folded-beam suspension for extending the stable travel rang of comb-drive actuators [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2003, 13:178-183.
- [10] BAO M H. *Micro Mechanical Transducers: Pressure Sensors, Accelerometers and Gyroscopes* [M]. New York: Elsevier, 2000.
- [11] 赵宏伟, 吴博达, 华顺明, 等. 尺蠖型压电直线驱动器的动态特性[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(6): 873-877.
- ZHAO H W, WU B D, HUA S H M, *et al.*. Dynamic performance of inchworm-type piezoelectric linear actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6):873-877. (in Chinese)

作者简介:



王家涛(1979 -),男,福建闽侯人,工学博士,助理研究员,主要从事 MEMS 工艺、微纳米定位及操作的研究。E-mail: jiatiao_wang @163.com



孙立宁(1964 -),男,辽宁复县人,工学博士,教授,博士生导师,长江学者,主要从事纳米级微驱动及微操作机器人、高速高精度机构、工业机器人技术、并联机器人、医疗机器人、微小型机器人、仿人手臂及机器人机构与控制方面的研究。E-mail: lnsun @ hit. edu. cn



荣伟彬(1972 -),男,黑龙江人,工学博士,教授,博士生导师,主要从事纳米微驱动机器人及微操作机器人的研究。E-mail: rwb @hit. edu. cn



马立(1977 -),女,黑龙江人,工学博士,讲师,主要从事微操作机器人技术方面的研究。E-mail: malian @ shu. edu. cn



李昕欣(1965 -),男,辽宁辽阳人,工学博士,研究员,博士生导师,主要从事集成微纳电子机械系统、微电子和微纳机械集成技术以及微传感器技术等方面的研究。E-mail: xxli @ mail. sim. ac. cn

下期预告

油液在线监测系统中磨粒识别技术

李绍成¹, 左洪福², 张艳彬³

- (1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016; 3. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210046)

针对磨损状态监测要求,构建了基于显微图像分析的油液在线监测系统。根据系统光路特点,对磨粒图像进行了基于彩色特征的转换,并通过与背景图像的差值处理来快速提取磨粒目标。基于最小二乘支持向量机设计了磨粒两类分类器,并利用粒子群优化算法对最小二乘支持向量机模型中的参数进行了优化选取。在此基础上,根据磨粒识别体系,设计了磨粒综合分类器。最后,利用铁谱分析技术对系统性能和识别效果进行了检验,结果表明系统的识别精度达到 95% 以上。本系统具有较高的识别精度,满足磨粒在线监测要求。