

文章编号 1004-924X(2010)01-0175-08

# 三维精密位移系统的设计

王生怀<sup>1,2</sup>, 陈育荣<sup>2</sup>, 王淑珍<sup>1</sup>, 谢铁邦<sup>1</sup>

- (1. 华中科技大学 机械学院 仪器系, 湖北 武汉 430074;
2. 湖北汽车工业学院 机械系, 湖北 十堰 442002)

**摘要:**为满足精密位移的需要,研究开发了一种大行程、纳米级和计量型三维精密位移系统。采用模块化结构设计,即 3 个方向的驱动机构均采用完全相同的设计结构,分别称为 X、Y、Z 向一维工作台。位移系统在 X、Y、Z 3 个方向采用粗、精两级驱动,并分别装有计量光栅。各方向粗驱动采用交流伺服电机配合精密丝杠和直线导轨进行,精驱动采用压电陶瓷微位移器配合柔性铰链进行,每个方向的两级驱动共用一套计量光栅,从而保证了位移系统的大行程、纳米级和计量型。介绍了位移系统的结构设计,分析了位移系统的位移分辨率、计量原理以及它的运动性能。实验表明,在 40 mm 位移行程内,X、Y 和 Z 向工作台两级驱动实际位移与设定位移之差分别不超过 $\pm 0.030$ 、 $\pm 0.028$ 和 $\pm 0.033 \mu\text{m}$ ,验证了位移系统设计的有效性,为位移系统的设计提供了依据。

**关键词:**三维精密位移系统;结构设计;粗、精两级驱动

**中图分类号:**TH703.8 **文献标识码:**A

## Design of 3D precision displacement system

WANG Sheng-huai<sup>1,2</sup>, CHEN Yu-rong<sup>2</sup>, WANG Shu-zhen<sup>1</sup>, XIE Tie-bang<sup>1</sup>

- (1. *Department of Instrumentation, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;*
2. *Mechanical Department, Hubei Automotive Industries Institute, Shiyan 442002, China*)

**Abstract:** A novel 3D precision displacement system of large travel, nanometer level and displacement measurement by itself is developed to satisfy the need of precision displacement. The system is designed with a modular structure, in which the driving mechanisms of three directions adopt the same design structure and calls as X direction, Y direction and Z direction 1D worktables, respectively. The dual-stage actuators of coarse and fine driving have been applied in the precision displacement system in X, Y and Z directions and three sets of metrology gratings are installed in X, Y and Z directions respectively. In every direction, the AC servomotor combining with a precision lead screw and a linear guide is used to actuate the coarse driving, and a piezoelectric micro-displacement actuator combining with a flexure hinge is used to actuate the fine driving and then a set of metrology grating is set for the displacement measurements of the coarse driving and fine driving. Therefore the need of large travel, nanometer level and displacement measurement by itself of the displacement system can be sat-

**收稿日期:**2009-04-08; **修订日期:**2009-04-27.

**基金项目:**国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA042409);国家自然科学基金资助项目(No. 50745020);湖北省教育厅重点资助项目(No. D20092301)

ified. The structure design of the displacement system is introduced and the displacement resolution, measuring principle and the motion performance of this displacement system are also analyzed in details. Experiments indicate that the displacement difference between actual and setting are no more than  $\pm 0.030$ ,  $\pm 0.028$  and  $\pm 0.033 \mu\text{m}$  respectively in X, Y and Z worktables in a range of 40 mm, which verifies the effectiveness of design of the displacement system and provides the theoretical basis for its development.

**Key words:** three dimensional precision displacement system; structure design; coarse and fine driving

## 1 引言

现代科学技术正迅速向微小、超精密领域发展,微纳米技术的兴起,引发了制造、信息、材料、生物、医疗和国防等领域的革命性变化,对社会和人类生活质量产生了巨大影响。许多领域越来越迫切地需要微型系统或微动系统,如生物细胞、聚合物的各种操作,微外科手术,扫描探针显微镜 SPM,光纤对接和微细加工等,因此,精密位移技术已成为前沿科学和工程技术领域的关键技术之一<sup>[1-5]</sup>。一般情况下,精密位移依靠精密工作台来实现,精密工作台主要包括一维、二维和三维工作台。一维、二维精密工作台不能满足精密位移在三维空间的运动要求,因此,三维精密工作台的研究越来越为人们所重视。

大行程、高分辨率和位移计量是精密位移对三维精密工作台的 3 个重要指标要求。由于工作台一般要采用粗、精两级驱动方式,因此,工作台存在粗、精两种运动,必须采用不同的驱动和传动元件。由于这两种运动在行程、精度、驱动和传动元件上的差异,对它们的位移检测控制也需要采用不同的传感器来实现,但两种传感器的分辨率、量程不同,粗、精运动分别计量、叠加,测量数据不易连续,不可避免会产生测量误差。目前,能够同时实现大行程和纳米级分辨率检测的传感器主要是激光干涉仪和精密光栅尺。激光干涉仪以激光在真空中的波长为测量基准,可达到纳米级的分辨率,但其使用时对环境温度、湿度、气压、气流波动等方面的要求十分苛刻,且系统构成复杂、成本较高。光栅作为传统的精密测量元件,过去仅用于微米级精度的测量,然而其有众多优点,如结构、光路、电路和数据处理比较简单,结构紧凑、体

积小、成本低、易于仪器化等。随着计算机技术和信号处理技术的进一步发展,通过软件细分技术,可将光栅测量分辨率扩展至纳米级。

现有的三维精密工作台难以兼顾大行程、高分辨率和位移计量这 3 个指标。为此,本文研制了一种新型三维精密位移系统,利用双光栅为计量标准器,对位移系统 3 个方向的位移进行实时采集测量,使三维精密位移系统形成一个闭环运动控制系统,从而满足实际科研和生产中对三维工作台的大行程、高分辨率和自计量的要求。

## 2 精密位移系统的结构设计

为使精密位移系统设计模块化,3 个方向的驱动机构采用了完全一致的设计结构,分别称为 X、Y、Z 向一维工作台。三维精密位移系统在 X、Y、Z 3 个方向采用粗、精两级驱动,并分别装有计量光栅。其中 X、Y 两个方向的驱动机构水平放置且为上下层叠式,Z 方向上的驱动机构垂直放置且安装在整个测量系统底座的立柱上。各方向粗驱动采用交流伺服电机配合精密丝杠和直线导轨进行,精驱动采用压电陶瓷配合柔性铰链进行,每个方向的两级驱动共用一个计量光栅,如图 1 所示。

图 1 中的 X、Y、Z 向一维工作台的结构,如图 2 所示。为了方便精密位移系统的重构,三者的结构设计、驱动方式、计量原理和信号处理完全一样。如图 2 所示,交流伺服电机通过连轴节与精密丝杠连接,精密丝杠通过连接副与柔性铰链底部相连,柔性铰链的两侧通过精密导轨副与一维工作台底座相连,压电陶瓷微位移器安装在柔性铰链上。柔性铰链整体由交流伺服电机带动,其精驱动块由压电陶瓷微位移器驱动。双衍射光栅

系统的主光栅安装在柔性铰链动块底部,指示光栅安装在工作台底座上,半导体激光器和光电接收器分别布置在双光栅的左右两边,形成一个位移检测系统。粗、精两级驱动采用一个检测系统,可有效地避免测量误差。

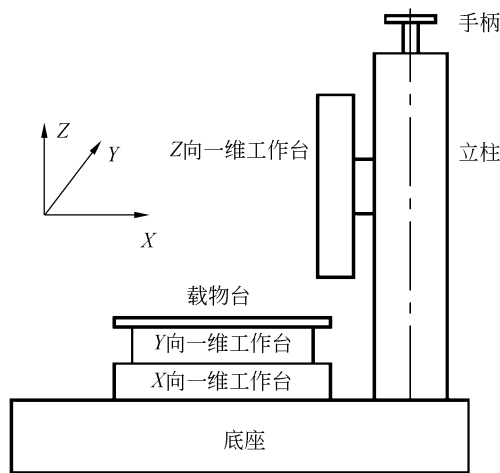


图 1 三维精密位移系统的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of 3D precision displacement system

整个 Y 向工作台安装在 X 向工作台柔性铰链的精驱动块上,载物台则安装在 Y 向工作台柔性铰链的精驱动块上,从而构成整个载物台的粗、精两级驱动。整个 Z 向工作台垂直安装在工作台底座的立柱上,可将被驱动对象安装在 Z 向工作台柔性铰链的精驱动块上,从而构成 Z 向工作台的粗、精两级驱动。

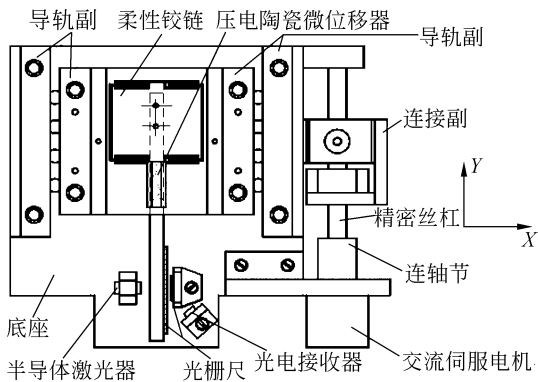


图 2 X、Y、Z 向一维工作台结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of 1D worktable in X, Y, Z direction

为了说明图 2 中连接副的详细结构,截取图 2 中与连接副相关的一部分,并作剖面图,分别如图 3 的(a)、(b)图所示。

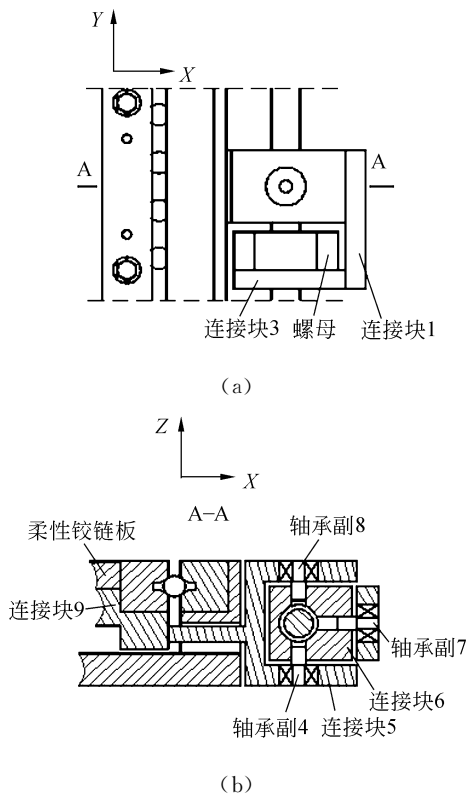


图 3 连接副结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of connect sets

在图 3(a)中,精密丝杠与螺母连接,组成丝杠螺母传动副。螺母与连接块 1,连接块 1 与连接块 3 组成刚性连接。在图 3(b)中,连接块 6 在 X 方向通过轴承副 7 与连接块 3 连接,在 Z 方向通过轴承副 4、8 与连接块 5 连接。连接块 6 在 Y 方向上的圆孔大于丝杠直径,使丝杠在 X 向和 Y 向有一定的摆动量。连接块 5 与连接块 9 组成刚性连接,连接块 9 则与柔性铰链组成刚性连接。当交流伺服电机通过连轴器带动精密丝杠转动时,构成了一维工作台的粗驱动。采用这种传动结构,精密丝杠可绕 X 方向和 Z 方向做一定转动,避免丝杠的扰动传递到工作台面上。

精密位移系统要达到纳米级定位精度,就要求机械导向机构摩擦力小、移动分辨率高、驱动力小、传动简单。柔性铰链机构具有结构紧凑、体积小、无机械摩擦、无间隙、无需润滑、运动灵敏度高、具有较高的分辨率的特点,因此,在能束加工、

超精密加工和检测、微操作系统等具有纳米级定位分辨率的设备中得到了广泛应用。

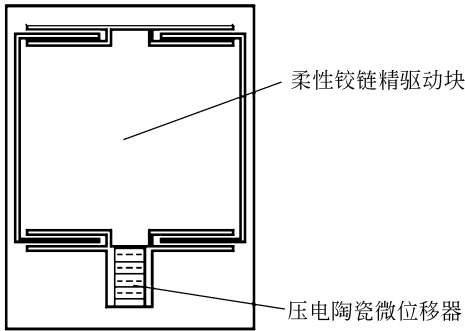


图 4 柔性铰链机构结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of flexure hinge mechanism

本文设计的柔性铰链机构如图 4 所示,该机构由整体线切割的方法,在一块弹簧钢板上切割而成,由于采用了左右对称结构,位移平行性较好。柔性铰链的粗驱动由交流伺服电机驱动;精驱动则由压电陶瓷微位移器驱动。柔性铰链机构精驱动块也为图 2 中一维工作台的工作台面。

### 3 精密位移系统的位移分辨率

工作台的粗驱动由交流伺服电机经联轴节带动精密丝杠来执行,其中交流伺服电机的细分数为 10 000,精密丝杠的导程为 2 mm,工作台由粗驱动可实现的理论分辨率为  $0.2 \mu\text{m}$ 。

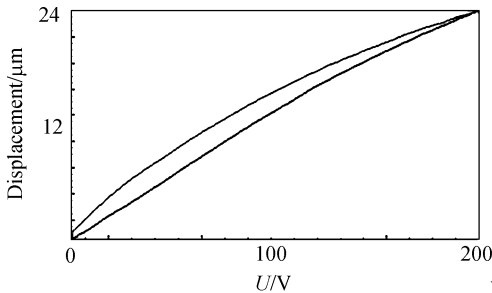


图 5 实测压电微位移器电压位移曲线

Fig. 5 Measured displacement curves of PZT micro-displacement actuator

三维精密位移系统中一路微驱动机构压电微位移器的电压位移曲线如图 5 所示,电压加载为  $0 \sim 200 \sim 0 \text{ V}$ ,下方所示曲线为  $0 \sim 200 \text{ V}$ ,上方为  $200 \sim 0 \text{ V}$ 。图中呈现一定误差的迟滞曲线。位移量由工作台自带的光栅计量系统采集,电压

由自行研制的高压驱动电路加载。对于 16 位 D/A 芯片,采用单极性的正向驱动电压并进行放大,因此在  $24 \mu\text{m}$  范围内,压电微位移器理论位移分辨率为  $24 \mu\text{m}/65\,535 = 0.366 \text{ nm}$ 。

驱动过程中,微米级以上的位移由交流伺服电机带动精密丝杠来进行,整个丝杠的可驱动长度为 50 mm,微米级以下的位移由压电陶瓷微位移器带动弹性铰支的可动部分来进行。考虑到精密丝杠的加工误差和压电陶瓷微位移器的非线性,还需对工作台的实际位移进行检测,以便进一步修正实际位移相对设定位移的偏差。

### 4 精密位移系统的自计量原理

为满足三维精密位移系统的计量要求,设计了一种双光栅计量系统。光栅采用衍射光栅,计量系统基本原理如图 6 所示<sup>[6]</sup>。当光栅常数相同,刻线平行的两个透射式衍射光栅平行放置时,如果单色平行光对主光栅  $G_1$  的入射角为  $\alpha$ ,从  $G_1$  产生的第  $p$  级衍射光经过指示光栅  $G_2$  后产生  $q$  级衍射光,则从光栅组合出射的这一衍射光束的等级序列就可表示为  $(p, q)$ 。如果从光栅组合出射的两束衍射光,等级序列之和相等,即  $p_1 + q_1 = p_2 + q_2 = r$ ,则它们将以相同方向出射,相当于单光栅的第  $r$  级方向的出射光。

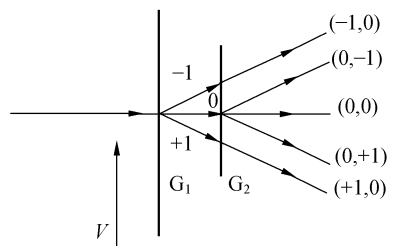


图 6 双衍射光栅计量系统测量原理

Fig. 6 Measurement principle of displacement system with double diffractive gratings

在双衍射光栅计量系统中,单色平行光对主光栅  $G_1$  的入射角为 0,  $(p_1, q_1) = (-1, 0)$  和  $(p_2, q_2) = (0, -1)$  两束光将以相同方向出射,相当于单光栅的第  $r$  级  $-1$  级方向的出射光。当两个光栅不完全平行时,  $(p_1, q_1)$  和  $(p_2, q_2)$  两束光之间会有一个会聚角,从而发生干涉现象,其强度将由此方向上  $(p_1, q_1)$  和  $(p_2, q_2)$  两束光干涉的结果

决定。

当主光栅在图 6 所示方向发生移动时,干涉条纹也相应会产生一定的移动量,当光栅移动了一个光栅节距时,干涉条纹相位变化  $2\pi$ ,即 1 个条纹常数。通过检测条纹的相位变化,就能得到光栅的位移,即:

$$\Delta y = \Delta \theta d / (2\pi), \quad (1)$$

式中,  $\Delta y$  为光栅位移,  $\Delta \theta$  为干涉条纹相位变化,  $d$  为光栅常数。

采用光电接收器获取干涉条纹的相位变化量,通过相应的处理计算即可得到工作台的移动量<sup>[7-9]</sup>。干涉条纹光电转换信号的获取是先通过对放置在干涉条纹区域的几个光电接收阵列光电转换信号的差分、放大等处理,得到相差恒定为  $\pi/2$  的两路正弦信号,然后再对这两路信号进行细分、辨向、计数等求出条纹的相位变化。衍射光栅为 1 000 gr/mm,光栅常数为  $1 \mu\text{m}$ ,当干涉条纹移动一个周期时对应的主光栅位移量为  $1 \mu\text{m}$ ,这对于工作台的要求来说远远不够,还需要对条纹信号进行进一步的细分。细分首先采用硬件进行,由正弦信号  $U_{\sin}$ 、 $U_{\cos}$  得到周期为原正弦信号周期四分之一的方波信号  $A_1$  和  $A_2$ ,其一路代表光栅前进,一路代表光栅后退。这样,一个方波脉冲信号就代表了干涉条纹移动了  $1/4$  个周期,通过对方波脉冲进行计数,即可得出光栅的移动量,并可以辨别光栅的移动方向。细分电路对干涉条纹整周期信号进行四细分,计数器可对超过  $1/4$  周期的条纹移动进行计数,对于 1 000 gr/mm 的衍射光栅而言,四细分后的分辨率为 250 nm,但干涉条纹最后一个移动信号往往不足  $1/4$  周期,且分辨率不够,故还需要对四分之一周期的信号进行软件细分处理。通过采集  $U_{\sin}$ 、 $U_{\cos}$ ,得干涉条纹信号的瞬时相位角:

$$\theta = \arctan \left| \frac{U_{\sin}}{U_{\cos}} \right|, \quad (2)$$

根据计数值  $N$  和瞬时相位角,可得到条纹移动数:

$$k = N + \theta / (2\pi), \quad (3)$$

从而光栅位移与条纹移动之间的关系为:

$$\Delta y = (N + \frac{\theta}{2\pi}) d, \quad (4)$$

光栅计量系统工作原理如图 7 所示,四象限光电管接收光电条纹,分别两两进行差分 and 放大运算后,一路整形、GAL 细分、单片机辨向计数,另一路 AD 转换,然后经计算机将 GAL 四细分的大计数值和 AD 转换后软件进一步细分的小计数值整合处理,得到光栅的整个计量值。这样,经过软件细分处理后,光栅计量系统的测量分辨率可达纳米级,从而满足工作台的位移测量要求。

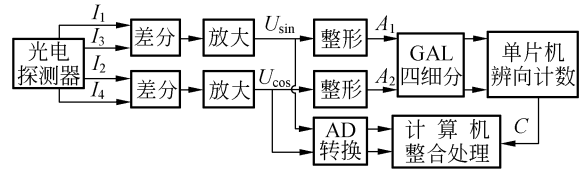


图 7 光栅计量系统工作原理框图

Fig. 7 Working principle diagram of grating metrology system

## 5 精密位移系统的运动性能分析

对精密位移系统的运动性能分析,主要分成粗、精驱动两个方面进行讨论<sup>[10]</sup>。

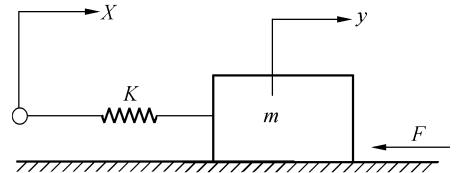


图 8 一维工作台粗驱动系统简化模型

Fig. 8 Simplified model of coarse driving system of 1D worktable

图 8 为一维工作台粗驱动系统简化模型,  $m$  为工作面的运动质量,  $K$  为传动系统的刚度,  $F$  为滚动导轨之间的摩擦力,  $x$  为交流伺服电机经联轴器、精密丝杠和连接副的输入位移,  $y$  为工作面的实际输出位移。当工作台静止时  $F$  取值  $F_s$ ,当工作台运动时,  $F$  取值  $F_m$ ,且  $F_s > F_m$ ,即:

$$F = \begin{cases} F_s & (v=0) \\ F_m & (v>0) \end{cases}, \quad (5)$$

当输入位移  $x < F_s/K$  时,粗驱动不产生运动,即输出位移  $y=0$ ,相应的平衡方程为:

$$F = Kx, \quad (6)$$

相应的临界点为:

$$F_s = Kx_s, \quad (7)$$

式中  $x_s$  为临界位移点位移。

当输入位移大于临界位移时 ( $x > x_s$ ), 工作台开始运动, 传动系统的运动方程为  $my^{(2)} = (x - y)K - F_m$ , 令  $\omega^2 = K/m$ , 则:

$$y^{(2)} + \omega^2 y = \omega^2 x - F_m/m, \quad (x > x_s), \quad (8)$$

解式 8, 得微分方程的解:

$$y = A \sin(\omega t + \varphi) + x - F_m/K, \quad (x > x_s), \quad (9)$$

式中  $A, \varphi$  为积分常数, 当初始条件  $t=0$  时,  $y=0, y^{(1)}=0, x=x_s$ , 可得  $A = -\Delta F/K, \varphi = \pi/2$ , 其中  $\Delta F = F_s - F_m$ , 从而得出一维工作台粗驱动的位移输出为:

$$y = -\frac{\Delta F}{K} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) + x - \frac{F_m}{K}, \quad (x > x_s). \quad (10)$$

上式实质是粗驱动系统在无阻尼情况下的位移阶跃响应。实际上导轨间存在着粘性阻尼, 振动的振幅将逐渐衰减, 过一定时向后, 系统达到稳态, 即  $y = x - F_m/K$ , 联合  $\Delta F = F_s - F_m$  和  $F_s = Kx_s$ , 可得:

$$y = (x - x_s) + \Delta F/K, \quad (11)$$

当  $x \rightarrow x_s$  时, 可得粗驱动系统的最小位移输出, 即粗驱动系统的位移分辨率:

$$y_{\min} = \Delta F/K, \quad (12)$$

由式 12 可见, 粗驱动系统的最小位移分辨率主要受静、动摩擦力之差  $\Delta F$  和传动系统刚度  $K$  的影响, 减小动、静摩擦力之差和提高传动环节的刚度是提高工作台位移分辨率的主要措施。考虑到滚动导轨的结构比较复杂, 制造困难, 抗震性差, 对脏物非常敏感, 而且静动摩擦力之差不是一个常数, 另外易受相对滑动速度、导轨材料及导轨面润滑条件等因素的影响, 因此不适于做一维工作台精驱动。

基于上述分析, 本文一维工作台的精驱动采用了柔性铰链机构, 其结构为左右对称, 取其中一半, 工作原理如图 9 所示。压电陶瓷微位移器在驱动电压作用下产生的力  $F$ , 施加到柔性铰链的可动部分  $m$  上, 与其相连的梁  $a, c, d, f$  发生弹性变形, 使可动部分  $m$  产生微小位移  $\Delta y$ 。由于柔性铰链仅利用受力后的弹性变形来实现微位移, 故仅存在弹性材料内部分子之间的内摩擦, 而且没有间隙, 因此可以达到极高的分辨率。

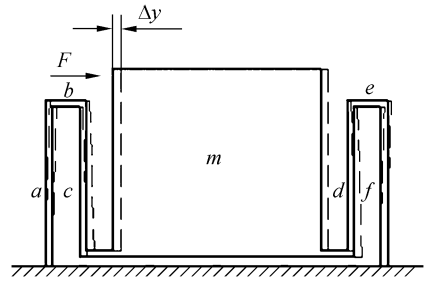


图 9 柔性铰链的工作原理

Fig. 9 Work principle of flexure hinge

柔性铰链的传动系统可简化为图 10 的模型,  $K_t$  为压电陶瓷微位移器的刚度,  $K$  为柔性铰链变形梁的刚度,  $m$  为柔性铰链的可动部分的质量,  $\mu$  为阻尼系数。压电陶瓷微位移器输入位移为  $x$  时, 可动部分输出位移为  $y$ , 力平衡方程为:

$$my^{(2)} + \mu y^{(1)} + (K + K_t)y = K_t x, \quad (13)$$

由上式可得精驱动系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{K_t \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2}, \quad (14)$$

式中:  $K_x = K_t/(K_t + K)$ ,  $\omega_n = \sqrt{(K + K_t)/m}$  为精驱动系统的无阻尼自然频率,  $\xi = \mu/(2m\omega_n)$  为阻尼比。

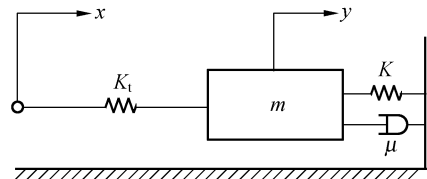


图 10 一维工作台精驱动传动系统简化模型

Fig. 10 Simplified model of fine driving system of 1D worktable

由于柔性铰链的阻尼比很小, 根据传递函数  $G(s)$ , 可求出柔性铰链精驱动系统在阶跃位移输入  $x$  条件下的输出  $y(t)$ :

$$y(t) = \frac{K_t x}{K + K_t} \left\{ 1 - \frac{e^{-\xi \omega_n t}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin[\omega_d t + \arctan(\sqrt{1 - \xi^2}/\xi)] \right\}, \quad (15)$$

式中:  $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$  为阻尼自然频率,  $t \geq 0$ 。当系统达到稳态后, 其输出位移为:

$$y(t) = \frac{K_t x}{K + K_t}. \quad (16)$$

从式 16 可得,  $K$  和  $K_1$  都是系统的固有参数,所以输出位移随输入位移的变化是惟一确定的,不受初始条件及其他因素的影响。这表明柔性铰链系统可以获得稳定的高分辨率和运动精度。

由公式 15 还可以看出,图 9 所示的一维工作台精驱动系统的瞬态阶跃响应是以阻尼自然频率为  $\omega_d$  的衰减振荡,工作台精驱动位移达到稳态的时间与系统无阻尼自然频率  $\omega_n$  成反比变化,即  $\omega_n$  的值越大,工作台的瞬态响应速度就越快。由于压电陶瓷微位移器的刚度  $K_1$  远大于柔性铰链变形梁的刚度  $K$ ,即  $K_1 \gg K$  时,公式 16 简化为:

$$y(t) = x, \quad (17)$$

此时,柔性铰链机构变成直接驱动机构,且仍为二阶系统,输出位移完全被输入位移所约束,只要输入位移稳定,输出即不产生振荡。系统瞬态响应的上升时间为:

$$t_p = \pi / (\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}), \quad (18)$$

可见,欲提高一维工作台精驱动响应速度,在设计柔性铰链时,应尽量提高系统的固有频率。

## 6 位移系统实物与实验

三维精密位移系统的实物原型如图 11 所示。

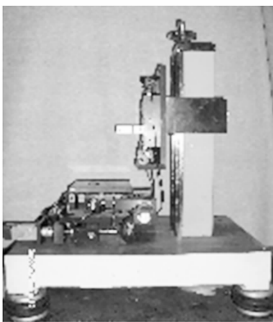


图 11 三维精密位移系统的原型

Fig. 11 Prototype of 3D precision displacement system

为检验三维精密位移系统的粗、精两级驱动的有效性,分别对 3 个方向的工作台在 1、4、10 和 40 mm 进行两级驱动,采用工作台自带的光栅进行位移计量,取实际位移值和设定位移之差进行比对,其中 X 向工作台的测量结果如表 1 所示。

表 1 实际位移与设定位移之差

Tab. 1 Displacement difference between actual and setting

位移差/ $\mu\text{m}$	设定位置值/mm				
	1	4	10	40	
1	0.028	0.012	-0.030	0.023	
2	0.025	-0.023	0.023	0.019	
3	-0.021	-0.021	0.021	0.025	
实 验 次 数	4	0.014	0.011	0.015	-0.019
5	-0.018	0.029	-0.018	-0.028	
6	-0.025	-0.025	-0.024	-0.021	
7	0.013	-0.024	0.027	0.030	
8	0.021	0.012	-0.028	0.021	
9	0.027	0.024	0.030	0.011	
10	-0.026	0.024	0.021	0.017	

从表中可以看出,在 40 mm 的行程内, X 向工作台两级驱动实际位移与设定位移的最大示值误差均不超过  $\pm 0.030 \mu\text{m}$ 。由于三维精密位移系统采用结构化设计, Y 向和 Z 向的两级驱动实际位移与设定位移的最大示值误差均与 X 向比较接近。采用与表 1 同样的实验可得,在 40 mm 的行程内, Y 向不超过  $\pm 0.028 \mu\text{m}$ , Z 向不超过  $\pm 0.033 \mu\text{m}$ 。

## 7 结 论

研究开发了一种大行程、纳米级和计量型的三维精密位移系统,介绍了位移系统的结构设计以及粗、精两级驱动工作原理,分析了位移系统的位移分辨率,位移系统的计量原理以及位移系统的运动性能。

与传统的精密工作台采用激光干涉仪作为工作台位移计量手段相比较,利用双光栅作为计量标准器,降低了系统成本,减少了位移系统的阿贝误差,也提高了整个位移系统的抗干扰能力和独立性。所开发的位移系统在 X、Y、Z 3 个方向分别具有 0.366 nm 的理论位移分辨率。在 40 mm 位移范围,采用自带的光栅系统进行位移计量, X、Y 和 Z 向工作台两级驱动实际位移与设定位移的最大示值误差分别不超过  $\pm 0.030$ 、 $\pm 0.028$  和  $\pm 0.033 \mu\text{m}$ 。考虑到压电陶瓷微位移器驱动电源的纹波性对位移精驱动的影响,若采用纹波性更小的驱动电源,则可进一步减小两级驱动实际位移与设定位移之间的差值。

## 参考文献:

- [1] HOLMES M, HOCKEN R, TRUMPER D. The long range scanning stage: a novel platform for scanned probe microscopy [J]. *Prec. Eng.*, 2000, 24:191-209.
- [2] WANG X Z, DONG X H, GUO J, *et al.*. Two-dimensional displacement sensing using a cross diffraction grating scheme [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2004, 6(1):106-111.
- [3] 孟兆新, 胡乃文. 三维精密定位工作台的控制系统的研究[J]. *电机与控制学报*, 2005, 9(2):148-150.
- MENG Z X, HU N W. The study on control system of 3D precision positioning stage [J]. *Electric Machines and Control*, 2005, 9(2):148-150. (in Chinese)
- [4] 马立, 荣伟彬, 孙立宁. 三维纳米级微动工作台的设计与分析[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6):1017-1024.
- MA L, RONG W B, SUN L N. Design and analysis of a novel 3-DOF nanopositioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):1017-1024. (in Chinese)
- [5] 李蓓智, 杨永金, 杨建国, 等. 精密微位移工作台的设计与性能分析[J]. *机械设计与研究*, 2008, 24(4):41-44.
- LI B Z, YANG Y J, YANG J G, *et al.*. Design and performance analysis on precise micro-displacement working table [J]. *Machine Design and Research*, 2008, 24(4):41-44. (in Chinese)
- [6] 王生怀, 谢铁邦, 王选择. 大行程纳米级二维位移工作台[J]. *机械设计与制造*, 2008, 8:133-135.
- WANG S H, XIE T B, WANG X Z. 2D displacement platform with large travel and nanometer resolution [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2008, 8:133-135. (in Chinese)
- [7] 杨进堂. 用移相比相法动态测量莫尔条纹细分误差[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(2):104-108.
- YANG J T. Moire fringe subdivided error measured by using the comparison phase method of phase shift [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(2):104-108. (in Chinese)
- [8] CHEN Y R, YANG X D, WANG X Z. A new arrangement method for photoelectric cells and its application [J]. *SPIE*, 2006, 6357:635741.
- [9] 王淑珍, 谢铁邦, 常素萍, 等. 四象限光电探测器用于表面形貌测量的研究[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(19):2348-2351.
- WANG S Z, XIE T B, CHANG S P, *et al.*. Study on Four-quadrant Optoelectronic Detector in Surface Topography Measurement [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(19):2348-2351. (in Chinese)
- [10] 李庆祥, 王东生, 李玉和. 现代精密仪器设计[M]. 第一版. 北京:清华大学出版社, 2004:172-176.
- LI Q X, WANG D S, LI Y H. *Design of Modern Precision Instrument* [M]. First edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2004:172-176. (in Chinese)

## 作者简介:



王生怀(1979—),男,湖北人,博士研究生,讲师,主要研究方向为精密测量与精密仪器、表面形貌测量与评定的研究。E-mail: shwangkb@163.com



陈育荣(1964—),男,湖北人,博士,教授,主要研究方向为精密仪器、长度计量及相关标准的理论研究。E-mail: themenneu@sina.com



王淑珍(1971—),女,河南人,博士研究生,主要研究方向为测试技术及仪器。E-mail: ly\_wsz@163.com

## 导师简介:



谢铁邦(1944—),男,广东人,教授、博士生导师,主要研究方向为测试技术及仪器。E-mail: xietb@mail.hust.edu.cn