

亚微米级微位移工作台及其微计算机数字闭环控制系统

高 宏 李庆祥 严普强
(清华大学精密仪器系)

摘要: 本文介绍一种单层 $X-Y$ 弹性微动工作台及其微计算机数字闭环控制系统, 采用自适应 $P-PID$ 选择控制算法, 达到了 $\pm 0.03 \mu\text{m}$ 的位置控制精度和优良的动态品质。

一、引 言

由于 VLSI 的出现, 对精密工作台的定位精度和运动速度提出了较高的要求。为了解决定位精度和运动速度的矛盾, 目前的主要趋势是采用粗、精两级定位的方法, 即将作高精度定位用的微动工作台置于作高速运动的粗动工作台上。粗动工作台先作大距离的高速运动, 然后由微动工作台补偿修正粗动工作台的粗定位误差。由于精密和高速两个要求基本上由两个工作台分别实现, 故易于实现高速精密定位。

本文介绍的单层 $X-Y$ 弹性微动工作台、采用电致伸缩微位移器驱动、双频激光干涉仪进行位置测量的微计算机数字闭环控制系统, 经实测证明, 其位置控制精度可达 $\pm 0.03 \mu\text{m}$ 。

二、系统的组成结构

微计算机数字闭环控制系统的结构框图如图 1 所示。系统由微计算机、接口线路、双频激光干涉仪、电致伸缩微位移器及单层 $X-Y$ 弹性微动工作台组成。下面简要介绍以上几部分的功能及原理。

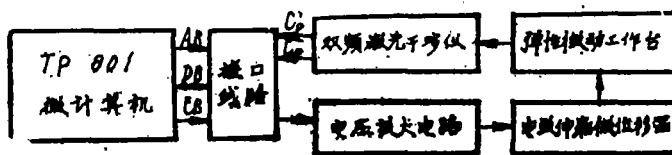


图 1

1. 单层 $X-Y$ 微动工作台及其驱动装置

通常的 $X-Y$ 微动工作台系采用双层结构, 即将作 Y 向运动的工作台置于作 X 向运动的工作台上, 这不仅使整个工作台的结构变的复杂, 尺寸加大, 而且增加了粗动工作台的运动质量, 对提高工作台的运动精度和工作稳定性不利。

为了减小微动工作台的运动质量和高度, 笔者设计出一种单层 $X-Y$ 弹性微动工作台, 仅在一层台面上就实现了 X, Y 两方向的微运动。这种微动台结构紧凑、重量较轻, 可适于各种工作环境。

单层X—Y弹性微动工作台系在一块板材上打孔和开缝，使圆弧切口形成的柔性铰链与所剩余的部分成为一体，而组成两个分别进行X，Y向运动的平行四连杆机构（图2）。当在某一向上的四连杆机构上加一力F时，由于四个柔性铰链的弹性变形，使平移杆产生一位移 δ 。

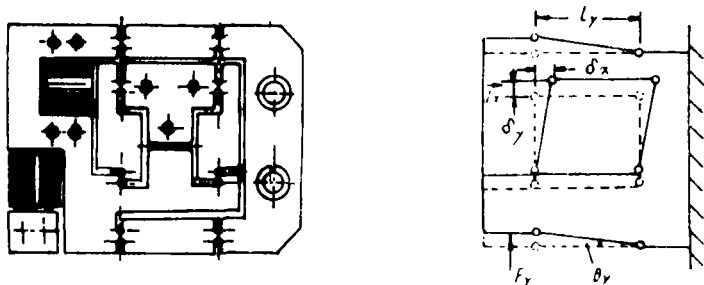


图2

由于这种四连杆机构利用柔性铰链受力后的弹性变形来实现微位移，仅存在弹性材料内部分子之间的内摩擦，且无间隙、不需润滑，不产生噪音，可实现较高的位移分辨率。经实验测定，此弹性微动工作台的位移分辨率优于 $0.01\mu\text{m}$ 、固有频率高于 190Hz 。

单层X—Y微动工作台的位移驱动装置采用了电子部26所研制的电致伸缩微位移器。电致伸缩微位移器是一种新型的机电转换功能陶瓷器件，它利用形变与电场平方成正比的电致伸缩效应完成微位移的，其表达式为

$$S = ME^2$$

式中

S——应变

E——电场强度

M——电致伸缩系数

利用电致伸缩材料制成的迭层式微位移器，其主要特点是工作电压低、位移量大（在 300V 电压下可产生 $12\mu\text{m}$ 的位移量），控制电路容易设计和制作，由于其体积较小故可方便地

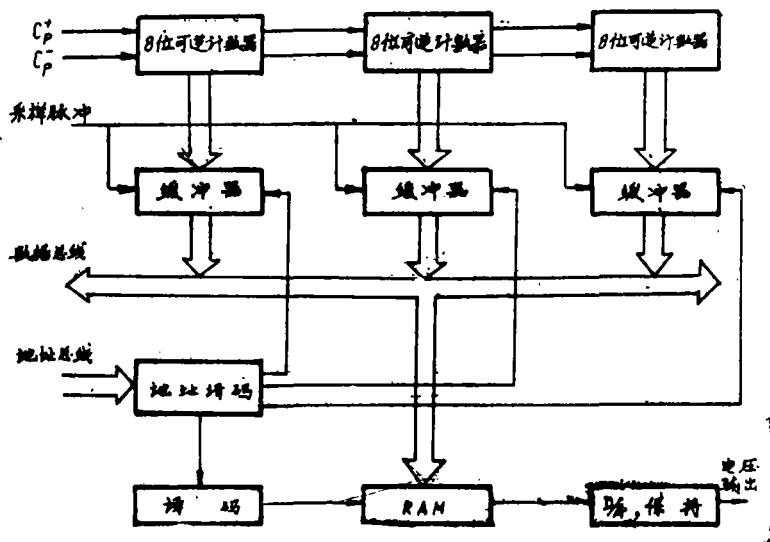


图3

安装在微动工作台内直接进行驱动。

2. 微计算机与接口电路

采用 $TP-801$ 单板计算机作为系统数字控制器, CTC 用于系统采样的定时控制。微计算机的主要工作就是在采样周期内, 对预定位置 and 实际位置进行采样和比较, 经过一定的控制算法处理运算后, 产生数字控制信号并作用于接口线路中的 D/A 转换器。

接口线路的原理如图 3 所示。其主要功能是直接记录双频激光干涉仪所测的代表微动台实际位置的计数脉冲数, 并将其通过数据总线并行输入到微计算机中, 而且还要对微计算机输出的数字控制信号实现数字——模拟转换等。

3. 位置测量装置

位置测量装置采用了测量分辨力为 $0.03\mu\text{m}\left(\frac{\lambda}{20}\right)$ 的双频激光干涉仪, 其最大容许速度为 300mm/s , 因此能够实时地提供微动工作台的准确位置测量值。

三、数字闭环控制系统设计

1. 微动工作台伺服系统传递函数

从电致伸缩微位移器的结构原理看, 由于它采用了形变串联、电气并联的迭层式结构, 所以它相当于一个容量较大的电容器, 其电容量大约为 $2\mu\text{F}$ 。虽然电致伸缩效应的响应速度非常快, 但是因微位移器含有储能元件电容, 所以它的位移瞬态响应速度主要受微位移器等效电容和电压放大电路等效充放电电阻的影响, 即位移过渡过程由电容充放电的过渡过程所决定。因此, 电压放大电路和电致伸缩微位移器共同构成了一阶惯性环节。通过实验测试, 其时间常数 $T_m \approx 60\text{ms}$ 。

弹性微动台可简化为一单自由度的弹簧质量系统, 因其固有频率高达 190Hz , 即微动台的瞬态响应速度很快 (实测上升时间约为 1ms), 所以它对整个伺服系统的瞬态响应影响较小。因此, 在分析伺服系统的传递函数时, 可将微动工作台这个环节忽略掉。

由上述分析, 电压放大电路、电致伸缩微位移器和弹性微动台构成的微位移伺服系统可用一个一阶惯性环节来近似。通过信号处理机对伺服系统的实验分析, 证明了伺服系统的传递函数是一阶惯性环节的结论, 实测的时间常数 $T_m \approx 60\text{ms}$ 。

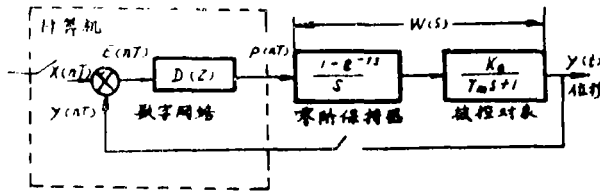


图 4

图 4 所示的系统控制框图中的比较环节和具有调节器功能的数字校正网络都是由计算机完成, 其已传递函数为 $D(Z)$ 。 T_m 是伺服系统的时间常数, $T_m = 60\text{ms}$, K_0 是伺服系统增益, $K_0 = 1.4\mu\text{m/V}$, 对于这种数字随动控制系统, 其输出 $y(t)$ 的精度等于或接近于反馈通道上测量元件 (即双频激光位置测量装置) 的测量精度。

2. 采用 P (比例) 控制器提高系统响应速度

对微量工作台伺服系统的传递函数

$$W(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \cdot \frac{K_a}{T_m s + 1} \quad (1)$$

进行Z变换, 得

$$W(Z) = \frac{K_a(1 - e^{-T/T_m})Z^{-1}}{1 - e^{-T/T_m}Z^{-1}} \quad (2)$$

式中 T 为采样周期。

由 $W(Z)$ 可推出 $D(Z) = K_a$ 时的闭环系统 Z 传递函数 (K_a 为比例控制器比例系数)

$$\begin{aligned} W_c(Z) &= \frac{D(Z)W(Z)}{1 + D(Z)W(Z)} \\ &= \frac{K(1 - e^{-T/T_m})Z^{-1}}{1 - [(K+1)e^{-T/T_m} - K]Z^{-1}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $K = K_a \cdot K_s$, 为闭环系统开环增益。

从上式看出, 闭环系统在实轴上只有一个单极点, 所以系统在单位冲激作用下的输出为

$$y(n) = da^{n-1} \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} d &= K(1 - e^{-T/T_m}) \\ a &= (K+1)e^{-T/T_m} - K \end{aligned}$$

式中 a 就是闭环系统 Z 传递函数 $W_c(Z)$ 在实轴上的极点。

从式 (4) 可以看出, 当极点 a 在单位圆内 ($a < 1$) 时, 输出序列 $y(n)$ 是收敛的, 而且 $|a|$ 越小, $y(n)$ 衰减越快。特别是在 $a = 0$ 时, $y(n)$ 的过渡过程在一拍 (即一个采样周期) 后就立即结束。这说明, 若把闭环系统的极点配置在 Z 平面的原点上时, 闭环系统具有最快的瞬态响应速度。

由式 (3) 看出, 闭环极点的位置实际上是由伺服系统增益 K_s , 控制算法增益 K_a 和计算机采样周期 T 所决定。虽然设计时使闭环系统的极点落在 Z 平面的原点上, 但是实际的极点会在坐标原点左右晃动, 导致输出过渡过程的加长。其原因是连续部分的参数 K_s 不可能不受环境的影响, 另一方面、控制算式增益 K_a 的偏差也会使闭环系统的极点偏离原点。

通过对系统的计算机仿真, 得出了图 5 所示的在 $T_m = 60\text{ms}$, $K_s = 1.4\mu\text{m/v}$ 和 $T = 8\text{ms}$ 条件下, 闭环系统的极点位置及阶跃响应随控制算式增益 K_a 变化的情况。当 $K_a > 7$ 时, 系

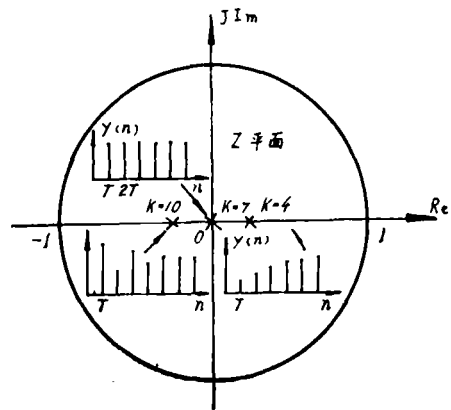


图 5

统的阶跃响应出现超调, 过渡过程时间加上, 而当 $K_a < 7$ 时, 系统的过渡过程时间虽然也将增加, 但系统的响应却是单调的。因此, 在实际设计控制系统时, 应把闭环系统的极点从原点往右移一些, 这样做虽然加长了过渡过程时间, 但是使能闭环系统更趋稳定, 因而也容易满足其它质量指标。事实上, 即使过渡过程需要几拍时间, 但是在采样周期很短的情况下, 所需的绝对时间也不会太长。

3. 采用PID控制器提高系统稳态精度

为了提高控制系统的稳态精度，在系统中加入了PID数字调节器。根据计算机的逻辑判断功能，采用了图6所示的自适应P—PID选择控制算法框图。当微动工作台的实际位置和预定位置的误差|E|大于某一阈值α时，用P（比例）算法，以改善系统的动态品质。当|E|小于α时，用PID算法，提高系统稳态精度。

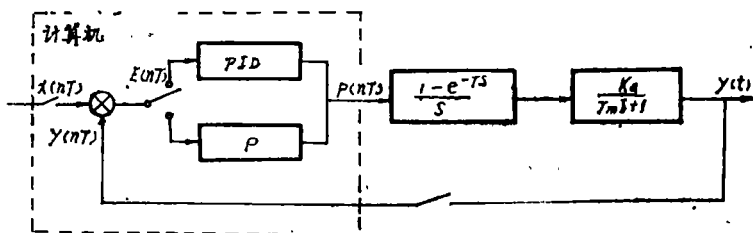


图6

设 P_k 为数字调节器输出量， E_k 为输入量。当比例系数 K_p 、积分时间常数 T_i 和微分时间常数 T_d 确定后，可得增量形式的离散PID算法

$$P_k = P_{k-1} + K_p \left[(E_k - E_{k-1}) + \frac{T}{T_i} E_k + \frac{T_d}{T} (E_k - 2E_{k-1} + E_{k-2}) \right]$$

式中 T 为计算机采样周期。

在微计算机控制程序中用到的实际算法为：

$$P_k = \begin{cases} AE_k + Q_{k-1} & |E_k| \leq \alpha \\ K_d E_k & |E_k| > \alpha \end{cases}$$

式中

$$Q_k = P_k - BE_k + CE_{k-1}$$

$$A = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right)$$

$$B = K_p \left(1 + 2 \frac{T_d}{T} \right)$$

$$C = K_p \frac{T_d}{T}$$

初值取 $Q_{k-1} = 0$ 、 $E_{k-1} = 0$ 。算法程序在每一步中要计算 E_k 、 P_k 、 Q_k ，其中的 Q_k 用于下一步计算 P_k 。

由于PID的计算机数字校正是用和式和差分来逼近积分与导数，所以只有在采样周期 T 比伺服系统的时间常数 T_m 小很多时，误差才不致于太大。虽然减小采样周期也有利于数字控制系统的稳定性和动态品质，但是受到控制算法运算时间和D/A输出线性范围的限制。综合考虑各种因素，选 $T = 8\text{ms}$ 。经现场实验调整后，控制算法最终选用的其它参数为：

$$K_d = 4, K_p = 0.5, T_i = 40\text{ms}, T_d = 16\text{ms}$$

四、系统控制软件

整个系统程序由主程序、中断服务子程序、控制算法子程序和乘法子程序组成。

主程序控制系统的启动运行，对系统接口、系统状态，系统参数区和数据区进行初始化，并发出定时 8ms，开放中断后等待定时中断。

中断服务子程序响应中断后，立即调用控制算法子程序，对系统预定位置信号 X_k 和实际位置反馈信号 Y_k 进行采样并计算其差值 E_k ，然后根据 $|E_k|$ 的大小，自适应地选择控制算法，并输出数字控制信号作用于零阶保持器 (D/A)。此后计算 Q_k ，将 E_k 送 E_{k-1} ，返回主程序后等待定时中断。系统控制程序的运行流程见图 7。

由于 D/A 转换部分是单字节 8 位，为了在数字校正计算中保证精度，采用了双字节有符号位的 2 的补码形式。为防止在误差计算和控制算法的运算中出现溢出，先把各输入量衰减 $\frac{1}{8}$ ，经控制算法运算后，将计算的 P_k 放大 8 倍作为数字控制量输出。

五、系统实验结果

使用双频激光干涉仪实际测试，结果表明，系统达到的位置控制精度为 $\pm 0.03\mu\text{m}$ ，在 $\pm 3\mu\text{m}$ 行程上的最大定位时间为 64 毫秒。

六、结 论

1. 单层 X—Y 弹性微动工作台及其位移驱动装置，是一种位移分辨力高、结构简单、整体性强、容易实现电控的微动工作台系统。
2. 自适应 P—PID 选择控制算法是一种算法简单、具有良好快速性和准确性的控制算法，尤其适用于微计算机控制、电致伸缩微位移器驱动的微位移系统中。

参 考 文 献

[1] Fredric E.Scire, Rev.Sci.Instrum.,1978,49,12(Dec.),1735
 [2] 戴世宗, 数字随动系统, 科学出版社, (1976)

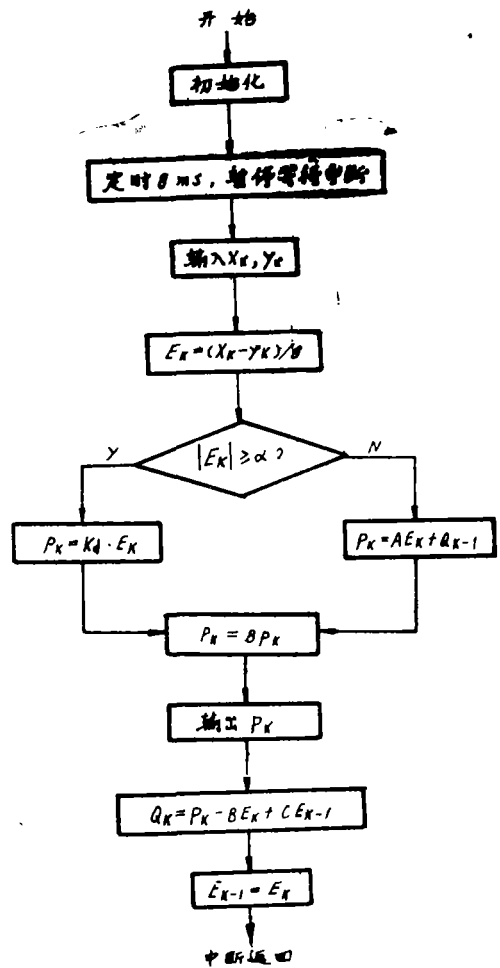


图 7

Computer-Controlled Micropositioning Stage with Submicrometre Accuracy

Gao Hong, Li Qingxiang, Yan Puqiang

Abstract

A micropositioning flex stage and its computer closed-loop control system have been developed for microfabrication and micromasurement. It is designed that only a single table moves on an X-Y plane. The stage is driven by an electrostrictive positioner. Positioning of the stage is carried out with a closed-loop control system using a double frequency laser interferometer measurement device. A $\pm 0.03 \mu\text{m}$ positioning accuracy, repeatability, and 64 ms move time for a $\pm 3 \mu\text{m}$ step is achieved.