

二维精密定位工件台数控系统的研究

李树秋

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

摘要 X-Y 二维精密定位工件台是以光栅干涉仪为位置检测元件的精密定位系统, 其数控系统是以 8031 单片机作为位置控制的闭环系统。本文在对系统深入分析的基础上, 设计了数控系统的硬件, 用 Turbo C、8088 汇编语言及 MCS51 汇编语言编制了相应的软件, 采用细分方法提高了系统的分辨率, 并对如何提高系统精度做了详细的讨论。结果表明, 数控系统达到了预定的精度。

关键词: 数控系统; 细分; 工件台; 精密定位

1 二维精密定位工件台及数控系统的构成

1.1 二维精密定位工件台的机械结构

X, Y 二维精密定位工件台由两个小台子构成, 一个台子 (X 路上台) 放在另一个较大一点的台子 (Y 路下台) 上, 两路电机通过丝杠、导轨带动工件台移动而达到定位目的, 每路台子都带有测量位置信号的光栅干涉仪, 干涉仪的光信号由两路相互正交的传感器接收。整个台子放在可以起到防振作用的大理石平台上, 这样就大大降低了来自外界的干扰。

如图 1, 工作台的最大行程为 $120 \times 120 \text{mm}^2$, 运动导轨在整个行程范围内的最大直线度误差小于 $0.5''$, 因此整个系统的机械精度是很高的。

1.2 位置测量的光栅干涉仪

工件台的位置测量采用光栅干涉仪, 其原理如图 2 所示, 干涉仪中采用的光栅为 625 对线/mm, 则每个条纹代表的移动距离为 $0.8 \mu\text{m}$ 。

采用这种结构的光栅干涉仪有以下优点:

- (1) 简单、可靠、方便, 技术成熟;
- (2) 信号的输出满足电子学细分及可逆计数器的要求;
- (3) 灵敏度高;
- (4) 光栅与分光镜之间的间隙大, 便于调整;
- (5) 等光程干涉, 对温度、振动、所压等的变化不敏感。

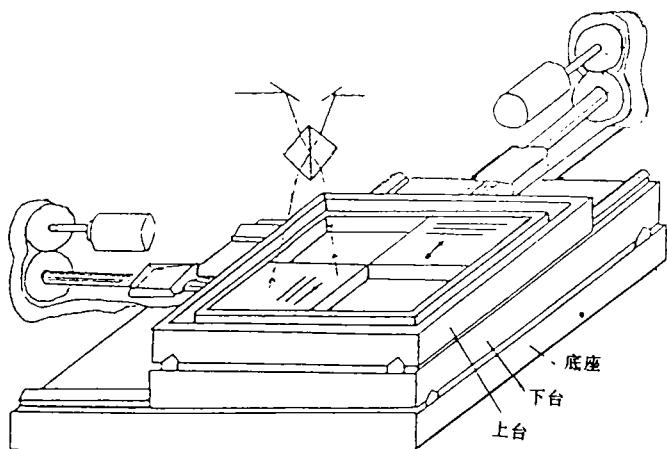


图 1 工件台机械结构示意图

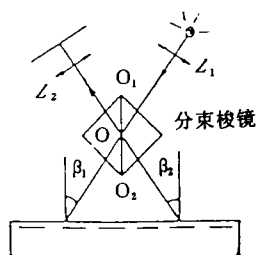


图 2 光栅干涉仪原理示意图

1.3 系统硬件简介

数控部分采用主从分布式计算机系统。整个系统由 IBM/PC 主机及两个 8031 单片机构成，主机通过接口向从机发送命令及数据信息，具体控制由 8031 单片机执行，同时单片机向主机发送位置信息并由监视器显示出来。

1.4 两维精密定位工件台数控系统的特点

工件台最终的定位精度是 $0.01\mu\text{m}$ ，系统要达到如此高的定位精度，除了对机械加工的高要求外，整个系统都要具有较高的水平才能达到这个指标，其中包括电机的选择、数控装置的好坏、算法、调速系统等。为了实现这么高的目标，本系统采用了许多提高精度的方法，具体如下：

- (1) 用软件方法提高前置放大器的精度；
- (2) 采用了单片机细分方法提高检测分辨率；
- (3) 电机的驱动采用 PWM 方式；
- (4) 采用主从分布式计算机系统提高系统的执行速度；
- (5) 采用闭环系统提高系统的测量精度；
- (6) 采用高质量电机以提高系统的性能；
- (7) 采用压电陶瓷补偿和定位以达到较高的定位精度。

2 用于两维精密定位系统的主从分布式计算机系统

主从结构是一种在分布式计算机系统中多机互连的常用结构，它具有结构简单、符合实际要求等特点。

2.1 硬件结构

本系统采用 IBM/PC-386 为主机，两个 8031 单片机为从机，分别控制 X、Y 两个方向的运动，从机之间的通讯通过串行口完成。

2.2 通信协议

MCS-51 单片机中的异步通信串行接口可方便地构成双机或多机串行通讯接口，其特殊功能寄存器 SCON（字节地址为 98H），格式如下：

SM0	SM1	SM2	REN	TB8	RB8	TI	RI
-----	-----	-----	-----	-----	-----	----	----

SM2 为多机通信标志位。若 SM2=1，表示置多机通信功能。这时出现两种可能情况：接收到的第 9 位数据为 1 时，数据才装入 SBUF，置 RI=1 并向 CPU 发中断。如果接收到的第 9 位数据为 0，则不产生中断标志，信息被抛弃。若 SM2=0，则不管接收到的数据是 0 还是 1 都产生中断标志，数据装入 SBUF，根据这个功能，可实现 MCS-51 的串行通信。

IBM-PC 的串行口并不支持多机通信，如果采用 IBM-PC 主机与一个 8031 单片机通信，此单片机再与另外两具控制工件台运动的单片机通信，就增加了硬件开销。为此我们设法使奇偶校验位充当多机通信标志位。这样在数据传递后不能进行奇偶校验。

奇偶校验位是为了防止通信干扰而设置的，当一帧数据中有奇数位被干扰而发生变化时可以发现，从理论上讲可以发现 50% 的出错可能性。这些干扰一般是外界来的，而工件台的工作条件不允许出现外部干扰，否则将严重影响精度。所以将奇偶校验位用于多机通信是可行的。

设置多机通信的状态字如下：

(1) IBM-PC 机发送的命令帧：

0	0	D5	D4	D3	D2	D1	D0
---	---	----	----	----	----	----	----

因为采用奇偶标志位作多机通信标志位，所以命令中的“1”的个数必须固定是奇数个或偶数个。由于我们采用“奇校验”方式，所以命令帧中有偶数个“1”。这样奇偶校验位一定是“1”，我们正是利用这个奇偶标与位“1”做多机通信标识位。因为只有两个从机，所以从机地址 D3 D2 D1 D0 设为 0001 和 0010，分别代表两个 8031 从计算机。在命令帧中，D5 D4 表意义如下：

D5 D4=01：要求从机给主机传递数据；

D5 D4=10：要求从机接收主机的数据。

(2) 从机向主机返回的命令帧：

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
----	----	----	----	----	----	----	----

其中：

D7, D6：从机状态位；

D5, D4：从机接收的命令；

D3、D2、D1、D0：从机地址；

D7, D6 为 01 时表示从机接收或发送就绪;

D5, D4 的设置与 IBM-PC 机发送给从机的命令帧的设置完全相同;

D₃D₂D₁D₀ 为从机地址, 与 IBM-PC 机发送给从机的命令帧中所代表的地址相同。

根据以上说明, 就可实现一个 IBM-PC 机与多个 8031 单片机的通讯。为此我们用 8088 汇编语言和 8031 汇编语言编写了通信子程序。

实验证明采用这种结构是可行的, 并得到了很好的结果。

3 光栅干涉仪信号的处理

3.1 光栅干涉仪位置信号的前置放大器

光电接收器接收到的位置信号要经前置放大器放大后才能整形并送入计数器计数。

本实验的位置信号前置放大器采用二级运算放大器放大。

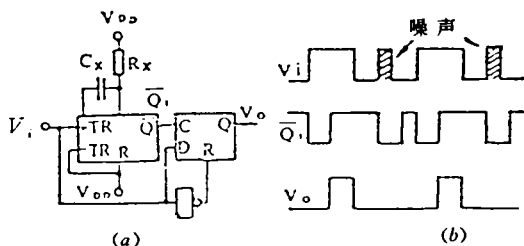


图 3 噪声消除电路

则无法保证精度, 对此我们采用图 3 的处理方法。

由于噪声脉冲的宽度较窄, 而以脉冲形式出现的数字信号都具有一定的宽度。因此, 只要将单稳态电路的输出脉冲宽度调节到大于噪声脉冲的宽度小于数据脉冲的宽度, 电路能在输出端得到消去噪声的数据信号。

在本实验中, 工件台移动的最大速度 5mm/s 由此可计算出位置信号的最大频率:

$$f_{\max} = 5000/0.8 = 6250\text{Hz}$$

具体实现时, 调节 R_x 、 C_x 使之滤掉大于 10kHz 的脉冲信号。

3.3 可逆计数器的设计

由于 X-Y 两维精密定位工件台的每一路都必须能沿着两个方向移动, 所以必须设计可逆计数器。

可逆计数器采用 6 片 74LS190 可逆十进制计数器级连。

下面将详细讨论 74LS190 up/down 端的控制和过零点的控制实现。

3.2 噪声消除电路

在实验过程中发现, 当电机转动时, 由于抖动、杂光、光源不稳等因素的影响, 导致前置放大器的输出信号有轻微的抖动和毛刺, 并不是理想的正、余弦波形, 经施密特触发器整形后的信号可能包含有频率很高的尖峰脉冲, 这种噪声必须消除, 否

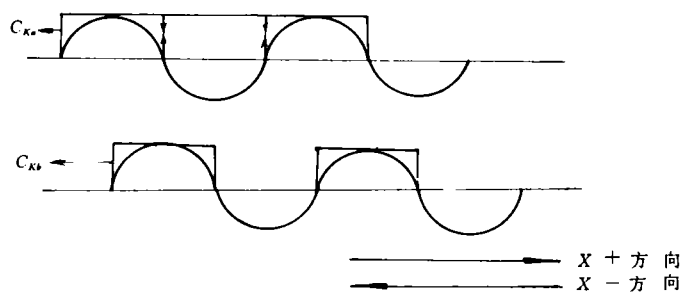


图 4 二路正交位置信号

(1) 74LS190 up/down 端的控制:

图 4 是二路相互正交的位置信号, 从图中可以看到, 当工件台沿 X_+ 方向移动时, C_{ka} 路每个脉冲的上升沿所对应的 C_{kb} 路信号均为逻辑“0”, 当沿 X_- 方向移动时, C_{ka} 路每个脉冲的上升沿所对应的 C_{kb} 路信号均为逻辑“1”, 由此可以判断工件台的移动方向。

(2) 过绝对零点的中断实现:

74LS190-6 的借位端接 8031 的 INT1, 所以工件台每次经过绝对零点时都产生中断, 由中断处理程序对工件台的运行方向加以控制、辨别。

(3) X 方向移动过程中由于各种原因而反方向抖动的处理:

从图 3-4 中可看到, 工件台沿 X 方向移动过程中, C_{ka} 的下降沿所对应的 C_{kb} 为逻辑“1”, 如果此时由于各种原因导致工件台反方向移动 (X_- 方向), 当处于 CD 区间时并不影响程序的运行, 一旦经过 C 点, 则计数值应减 1, 而 74LS190 的 up/down 端仍为“0”, 计数器仍为“加计数”状态, 并且 CD 区间 C_{ka} 无上升沿, 所以此时大数 (计数值) 比实际值多 1, 因此必须对大数作减 1 处理。方法是由 T_0 中断处理。

当反方向移动 (X 方向) 在 BC 段时, 对计数值也没影响, 一旦经过 B 点, 则脉冲的上升沿使计数值减 1, 所以此时的计数值与实际值相差半个脉冲, 故必须对它进行改正, 具体实现采用 INT₀ 中断处理。

另外还设计了可实时显示当前移动距离的数显电路。

4 单片机细分系统

二维精密定位工件台最终要达到 $0.01\mu\text{m}$ 的定位精度, 所以必须使系统分辨率高于 $0.01\mu\text{m}$ 。而光栅干涉仪每个周期为 $0.8\mu\text{m}$, 离 $0.01\mu\text{m}$ 的要求还差得很远。本实验采用单片机 160 细分方法使分辨率达到 $0.005\mu\text{m}$ 。

4.1 单片机细分原理

单片机细分是根据两路正交的莫尔条纹信号的幅度和相位关系, 通过幅度值来计算位移, 达到细分目的。

经放大后相互正交的莫尔条纹信号为:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= A\sin\theta \\ u_2 &= B\cos\theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

如果正弦、余弦信号是理想信号, 那么 (1) 式便是细分的计算依据。

假定 $A=B$ 则:

$$(A\sin\theta)/(B\cos\theta) = \text{tg}\theta \quad (2)$$

(2) 式既消除了两路信号幅度同时波动的影响, 又隐含了确定的相位信息。

单片机通过 A/D 转换电路采集正弦、余弦两路信号的幅值, 计算相角 $\theta = \arctg\theta$ 从而确定位移。令 n 代表细分数, T_n 代表某一相角 θ 所对应的细分值, 则:

$$T_n = \frac{n}{2\pi} \arctg\theta, \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (3)$$

由于 $\arctg\theta$ 在 $0 \sim 2\pi$ 范围内为多值函数, 所以要把 T_n 处理成单值函数。

单片机根据 $A\sin\theta$ 和 $B\cos\theta$ 的正负号判断 θ 所在象限, 确定象限细分常数。每个象限都按

I 象限的方法处理, 求出 I 象限的细分值, 如上该象限的细分常数, 便可求出该角的细分值。

若 $T_{n,1}$ 代表第 I 象限细分值, D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 分别代表 I、II、III、IV 象限细分常数, 则有下列表达式:

$$T_{n,1} = \frac{n}{2\pi} \arctg \frac{A \sin \theta}{B \cos \theta} \quad (4)$$

$$T_n = T_{n,1} + D_k \quad (5)$$

$$D_k = \begin{cases} 0 & k=1 \\ n/4 & k=2 \\ n/2 & k=3 \\ 3n/4 & k=4 \end{cases} \quad (6)$$

由于 $\theta \rightarrow \pi/2$, $\text{tg}\theta \rightarrow \infty$, 单片机不能正确运算, 如图 (2), 为此把 I 象限分成 $0 \sim \pi/4$, $\pi/4 \sim \pi/2$ 两个区间, 分二种情况:

$$\left. \begin{aligned} (1) 0 \leq \theta \leq \pi/4 \text{ 时} \\ T_{n,1} = \frac{n}{2\pi} \arctg \frac{A \sin \theta}{B \cos \theta} \\ (2) \pi/4 < \theta \leq \pi/2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$T_{n,1} = n/4 - n/2\pi \cdot \arctg \frac{B \cos \theta}{A \sin \theta} \quad (8)$$

这就是单片机细分的理论基础。

4.2 单片机细分的软硬件结构

由于 8031 单片机乘除法功能不强, 且字间乘除要编程序, 执行时间长, 故此我们采用查表的方法计算细分。

4.3 单片机细分的误差分析

在位置测量系统中, 由于光敏元件的非线性及灵敏度、温度特性、暗电流不一致、线性电路的漂移和失真, 以及装调误差等原因, 都会造成信号不纯, 引起细分误差。A/D 转换电路亦存在非线性失真、温度漂移、量化误差等。此外漏电流也会造成波形失真。这些对细分的精度都会有影响。

下面分别对影响细分精度的主要几点情况进行讨论:

(1) 正交与否对细分的影响。

分析和实验表明, 在诸误差中, 信号不正交对细分影响最大。

如果有 $\Delta\theta$ 偏离正交, 且当 $|\Delta\theta| \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{360}{160} = 1.125^\circ$ 时,

误差 $|e| \leq 1/2$ 细分值。

(2) 信号幅度及直流漂移对细分的影响。

细分是根据式 (2) 包含的相位信息来决定的, 由于是对两路信号求商, 所以它能抵消两路信号幅度同时波动的影响, 而且由于电路的对称性, 单独一路发生波动的可能性不大。如果有直流漂移时会影响细分精度。

4.4 消除直流分量的软件处理

由于直流漂移会对细分精度产生影响, 所以我们利用程控放大器的原理, 用软件方法对之消除。

具体软件是这样实现的, 设当前采样值为 S_2 , 上一次采样值为 S_1 , 并设一标志位 f_1 表示当前信号所处的状态是上升还是下降。 $f_1=1$, 表示上升, $f_1=0$ 表示下降。则有:

a $f_1=0$ 且 $S_2>S_1$ 时 $S_1 \rightarrow P_{\min}$, $1 \rightarrow f_1$;

b $f_1=1$ 且 $S_2<S_1$ 时 $S_1 \rightarrow P_{\max}$, $0 \rightarrow f_1$;

设 Δ 为直流漂移量, 则有:

$$\Delta = |255 - P_{\max} - P_{\min}|/2$$

4.5 滤波器设计

为了防止由于随机干扰和误检测而引起的失真, 可采用程序判断滤波。为了节省程序执行的时间, 本实验采用限幅滤波的方法, 其原理是这样的: 把两次相邻的采样值进行相减, 求其增量 (以绝对值表示), 如果小于或等于 ΔY , 则取本次采样值, 如果大于 ΔY , 则仍取上次采样值为本次采样值, 即:

$$|Y_n - Y_{n-1}| \leq \Delta Y \text{ 则取本次采样值}$$

$$|Y_n - Y_{n-1}| > \Delta Y, \text{ 则 } Y_n = Y_{n-1} \text{ 取上次采样值}$$

式中: Y_n 为第 n 次采样值

Y_{n-1} 第 $n-1$ 次采样值

设 D_n 为第 n 次的细分值, 为了能进一步提高精度, 我们再加一次限幅滤波即:

$$D_n - D_{n-1} = 0; \text{ 本次细分值有效不变}$$

$$D_n - D_{n-1} = 1; \text{ 本次细分值有效, } D_n = D_{n-1}$$

$$D_n - D_{n-1} > 1; \text{ 本次细分有效 } D_n = (D_n + D_{n-1})/2$$

(9)

5 微机精化补偿方法的讨论

5.1 影响精度的主要因素

- (1) 电子学处理部分的优劣;
- (2) 负载条件;
- (3) 电机轴转一圈工件台的移动距离;
- (4) 摆动的影响;
- (5) 绝对零点的建立。

为了提高系统的定位精度, 保证绝对零点的精确性是非常必要的, 对于 0.01 微米的定位精度来说, 零点定位不准确是不能容忍的, 一般说来应将绝对零点建立在前端以免工作过程中需要判别绝对位移的正负。

本系统在工件台前后两端各有一限位开关, 每次工作时, X 、 Y 两维都反方向运动, 到达限位开关后即到达零点, 但由于弹性形变及间隙等原因, 以此为零点误差必然较大, 而且重复性不好。为了减小误差, 我们并不把工件台到达限位开关后的位置作为零点, 而是在此点的基础上, 电机反向移动一个距离, 这样就减小了间隙的影响。

5.2 微加精化补偿方法的探讨

将测量系统的可测长度 H_n 分成 n 等分, 分别测出等分点 $X_0, X_1, \dots, X_i, X_{i+1}, \dots, X_n$ 处的测量误差值 $\delta_0, \delta_1, \delta_i, \delta_{i+1}, \dots, \delta_n$, 当测量值 X 满足条件:

$$X_i \leq X \leq X_{i+1} (i = 1, 2, \dots, n - 1)$$

时，则其对应的测量误差近似认为是恒值 δ'_i 且：

$$\delta'_i = (\delta_i + \delta_{i+1})/2$$

并以此进行补偿，如图5所示。这种方法适用于误差曲线变化比较平缓的测量系统，而光栅对局部的刻线误差具有好的平均效应，符合这一条件，所以对光栅系统利用等分矩形法进行精化补偿，可使 X_i 的等分间隔长度不必选得很细就能获得的较好的补偿效果。

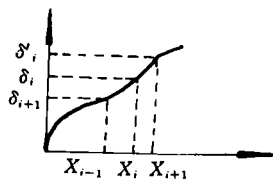


图5 等分矩形法求解

6 系统调试结果及误差分析

本系统只从事粗定位（即电机定位）工作，精定位（压电陶瓷定位）工作另有论文发表。

本系统设计中，运用 C 语言及汇编语言编制了相应的程序，主机（IBM-PC）向各从机发送命令及数据信息，每路从机单独控制一个方向的台子移动。执行过程是：从机接到命令后，首先控制 X 方向台子移动并达到要求的精度然后控制 Y 方向台子移动也达到预定的精度。

实验表明，单路定位的精度小于一个脉冲当量，即 $0.8\mu\text{m}$ 。图6是根据大量测量结果绘制的误差分布曲线。

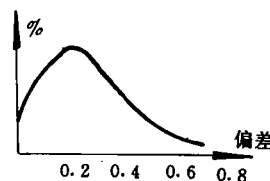


图6 误差分布示意图

Study NC on System for the Use of X-Y 2-Dimension Precision Position Workpieces Stage

Li Shuqiu

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun130021)

Abstract

X-Y 2-dimension precise positioning workpieces stage is a system, it's position detecting component is the grating interferometer. The NC system is a close loop system, it's position control unit is 8031 single chip micro-computer.

Based on making a through analysis, this thesis have designed the system's hardware, programmed the Software with Turbo C, 8088 assembly language and MCS-51 assembly language, improved the resolution with interpolation method, and analysed how to improve the system precision. the result show that positioning precision $< 1\mu\text{m}$.

Key Words: NC system, Interpolation, Workpieces stage, Precise position