

高精度 X-Y 工作台

李赫钟 刘文铎

摘要：本文阐述了X-Y工作台导向误差因素，双V型滚珠式导轨的直线度、形位误差的测试及数据处理方法，并列出了最终测试结果。

一、前 言

X-Y工作台是由两个互为独立、互为垂直的X-Y导向导轨、传动系统、线值计量有关的装置构成。导向导轨要保证极高的直线精度外工作台还能根据需要沿X、Y两个方向同时或交替的进行工作，其中一层导轨及传动系统要安装在另一导板之上，因此，工作台的重心随运动的行程而变化，这将引起安置在减震平台上的工作台的倾斜，影响工作台的精度及原有状态的重复性。所以，保证导向导轨的运动刚度是至关重要的因素之一。

以分步重复照相机的X-Y工作台为例，考虑到上述诸因素设计并研制出双V型滚珠式X-Y精密工作台。

本文对这种形式工作台的结构、误差因素、关键测试技术及测试结果加以叙述。

二、结 构 设 计

如图1所示，由井字形中滑板2构成X导向的上导轨付及Y导向的下导轨付，上滑板上的导轨付也采用一体结构形式，最底层导轨采用两个分离的V形导轨4牢固地固定在基准平台上，其底部又与减震平台相联接。

这种一体结构的主要出发点是避免联接变形及由此产生的应力，因此能长期保证精度。

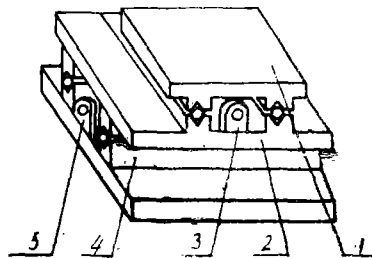


图1 X-Y工作台

双V形导向结构受滑板自重的影响在给定的导向方向能够自位，并受横向约束力的影响使得运动刚度大大加强。另外，每付导轨都采用对称结构，因此，具有正、反向偏转误差小的优点。基准平台与减震平台是用一个中心定位，弹性压紧方式固定在一起，这样避免了

减震平台的调平引起的变形对工作台精度的影响。

计量系统采用了衍射光栅式双光束干涉仪，分别安置在X导向的延长线及Y导向导轨靠近导轨一侧的位置。传动系统的设计主要考虑传动链的振动对台面的影响，尤其Y向传动链的影响。为此将传动链中力矩电机的转子用锥面配合的方式直线固定在Y向丝杆上。

三、运动精度的分析

一般X-Y工作台上有一个平面，如IC制造设备中的干版平面，这个平面在运动过程中造成以下几种误差：

1. 平移误差—工作台移动时与导向轴相垂直方向产生的位移。
2. 滚动误差—工作台绕导向轴回转。
3. 俯仰误差—工作台在包含导向轴的垂直平面内摇摆。
4. 偏转—工作台绕瞬时垂直轴的偏转。

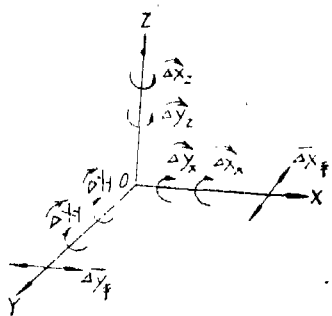


图2 三维坐标系

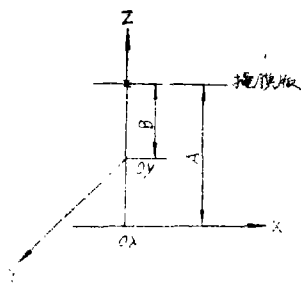


图3 实际座标图

图2是工作面的三维坐标系，X-Y工作台的各种导向误差是独立的因素，分别对工作点造成各种误差。

误差因素规定如下：

(1) X工作台

$\overline{\Delta x_{\text{平}}}$ —y轴平移误差 [A]

$\overrightarrow{\Delta x_x}$ —绕x轴滚动误差 [B]

$\overrightarrow{\Delta x_y}$ —绕y轴俯仰误差 [C]

$\overrightarrow{\Delta x_z}$ —绕z轴偏转误差 [D]

(2) Y工作台

Y工作台诸误差因素的含义与前类同。分别规定为 $\overline{\Delta Y_{\text{平}}}$ [A']， $\overrightarrow{\Delta Y_y}$ [B']、 $\overrightarrow{\Delta Y_x}$ [C']， $\overrightarrow{\Delta Y_z}$ [D']。

在实际结构中的X-Y工作台是由相互垂直的两层导向平面和工作面构成，如图3所示。

A - X 导向平面至工作面的距离； B - Y 导向平面至工作面距离；分析上述 X - Y 导向误差对 X - Y 坐标方向所造成的误差时为了分析简单起见不去确定误差因素的正、负方向，用量符号来分析总的 \overrightarrow{X} 、 \overrightarrow{Y} 坐标方向造成的误差。

$$\overrightarrow{\Delta X} = \overrightarrow{\Delta Y_{\varphi}} + \overrightarrow{\Delta Y_z \cdot f(R)} + \overrightarrow{\Delta Y_r \cdot B} + \overrightarrow{\Delta X_r \cdot A} \quad (1)$$

$$\overrightarrow{\Delta Y} = \overrightarrow{\Delta X_{\varphi}} + \overrightarrow{\Delta X_z \cdot f(r)} + \overrightarrow{\Delta X_x \cdot A} + \overrightarrow{\Delta Y_x \cdot B} \quad (2)$$

$f(r)$ 、 $f(R)$ —偏转半径即 X 、 Y 工作台的瞬时偏转中心与工作点之间距离，(1)、(2)式中二次微量不包括在内。

$\overrightarrow{\Delta X}$ 、 $\overrightarrow{\Delta Y}$ 的诸误差分析在 X - Y 工作台的设计时提供了设计依据和在加工、测试、装配时可进行综合分析。作者曾发现在一些场合对 $\overrightarrow{\Delta X_x \cdot A}$ 、 $\overrightarrow{\Delta Y_r \cdot B}$ 项误差往往被人们忽略掉，这项误差在 IC 高精度座标工作台来说不容忽略。

四、介绍几种测量方法

在双 V 型滚珠式 X - Y 工作台的加工过程中需要解决 V 型导槽的直线度，每一个 V 型导轨付之间在水平、垂直方向上的形位误差，每一对导轨之间的跨距误差。下面介绍几种测量方法。

1. 直线度的测量方法

如图4所示，反射镜架3中的两个脚钢球最好与实际使用的钢球相一致，镜架的辅助导向面4与 V 型导槽相平行，反射镜面与脚钢球的中心联线相垂直。

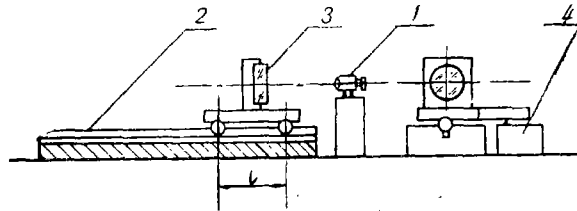


图4 直线度测量装置

- | | |
|----------|------------|
| 1—光电准直光管 | 2— V 型导槽 |
| 3—反射镜架 | 4—辅助导向面 |

测量时镜架从初始位置 ($i=1$) 开始依反射镜架脚间距 l 为移动步距顺次移动反射镜架3至 $i=n$ ，并逐次读出其偏转角度值 θ_i ，则 i 处增减的变位量为 h_i ：

$$h_i = l \operatorname{tg} \theta_i \quad (\text{mm}) \quad (3)$$

图5中折线部分为 h_i 的积分曲线，直线部分为起点 $i=0$ 、 $h_0=0$ 的点和 $i=n$ 、

$\sum_{i=0}^n h_i$ 的点联接的直线。

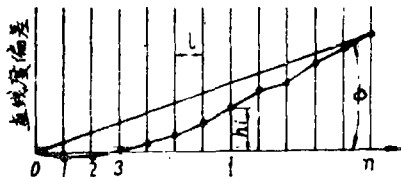


图5 直线度的计算说明

折线上的每一点与直线之间的垂直距离即为直线度偏差。

坐标的偏转角 ϕ 为

$$\phi = \text{tg}^{-1}(\sum h_i / nl) \approx 0 \tag{4}$$

因此，可以认为：

$$\sec \phi \approx 1$$

则任意测量点*i*上的直线度偏差 y_i 的计算公式为：

$$y_i = \sum_{i=1}^i h_i - \frac{i}{n} \sum_{i=1}^n h_i \tag{5}$$

$$X_i = i \cdot l \tag{6}$$

表1、表2列出了中滑板中6*V型导槽的直线度测量数据处理方法。

表1 6* 水平方向不直度

名称 序号	测量值	平移坐标	累积角值	角度偏差	线值偏差
	θ_i "	$\theta_i = 0$	$\sum_{i=1}^n \theta_i$	$\sum_{i=1}^i \theta_i - \frac{i}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i$	$y_i = l \cdot \Delta \theta_i (\mu m)$
0				0	0
1	8.20	0	0	0.72	0.14
2	7.15	1.05	1.05	0.39	0.08
3	7.20	1.00	2.05	0.11	0.02
4	7.85	0.35	2.40	0.48	0.96
5	7.90	0.30	2.70	0.90	0.18
6	7.00	1.20	3.90	0.42	0.08
7	7.05	1.15	5.05	0	0

表2 6* 垂直方向不直度

名称 序号	测量值	平移坐标	累积角值	角度偏差	线值偏差
	θ_i "	$\theta_i = 0$	$\sum_{i=1}^n \theta_i$	$\sum_{i=1}^i \theta_i - \frac{i}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i$	$y_i = l \cdot \Delta \theta_i (\mu m)$
0				0	0
1	2.30	0	0	-0.14	-0.03
2	2.25	0.05	0.05	-0.23	-0.05
3	2.90	-0.60	-0.55	-0.97	-0.19
4	1.80	0.50	-0.05	-0.61	-0.12
5	2.75	-0.45	-0.50	-1.20	-0.24
6	2.50	-0.20	-0.70	-1.54	-0.31
7	2.60	-0.30	1.00	0	0

为了计算方便把(3)、(5)式改写成

$$h_i = l \operatorname{tg} \theta_i \approx l \cdot \theta_i \quad [\theta_i \ll 1]$$

则(5)式可改写成:

$$\begin{aligned} y_i &= \sum_{i=1}^i h_i - \frac{i}{n} \sum_{i=1}^n h_i \\ &= \sum_{i=1}^i l \theta_i - \frac{i}{n} \sum_{i=1}^n l \theta_i \\ &= l \left[\sum_{i=1}^i \theta_i - \frac{i}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{表中 } \Delta \theta_i = \sum_{i=1}^i \theta_i - \frac{i}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i$$

选用测量节距 l 要适中, l 选小了测量点就多, 能够较好地反映出被测件的不直度。但每一部位的疏忽误差将累积到其后的误差可能性就增多, l 选大了缩短了测量时间、误差累积的几率减少了, 但不能很好地反映被测件的不直度误差。 l 一般不宜过大。中滑板中 5[#]、7[#]、8[#] V 型导槽的测量结果均小于 $0.5 \mu\text{m}$ 。

2. 形位误差测量

如图 6 以中滑板为例, 每一根 V 型导槽除了上述水平方向, 垂直方向的直线度要求之外对每一导轨付之间的平行度、扭曲度、跨距误差, X - Y 运动平面的平行度, X - Y 之间垂直的度等都非常严格。在制造工艺上是一个很大的难题。下面介绍若干测量方法。

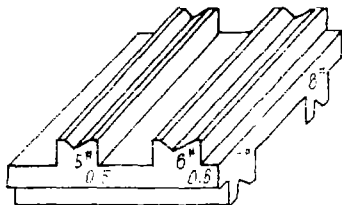


图 6 中滑板

(1) 平行度、扭曲度的测量

如图 7 所示, 两台光电自准平行光管 1、2 和大平晶 5 置于被测件的两端, 反射镜架、补助支点 6、7 的要求同前, 只是钢球支点间的跨距根据需要进行调整。

首先读取光管 1、2 对平晶的读数值 α_1 、 α_2 再次读取反射镜架在 6 和 7 位置上的读数值 β_1 、 β_2 , 则两个 V 型导槽的夹角 δ 为

$$\delta = (\alpha_1 - \beta_1) - (\alpha_2 - \beta_2) \quad (\text{rad}) \quad (8)$$

平行度误差 h 为

$$h = \delta \cdot l \quad (\mu\text{m})$$

l —镜架两个脚钢球间距离, 测量中读取光管的 0° — 90° 两个方向上的读数值并进行上述计算可获得平行度, 扭曲度的误差。

3. 跨距误差的测量

图 8 所示, L 形测量架 5 的底部 A 、 B 处各固定一个钢球, 微动块 2 用一个平行弹簧桥

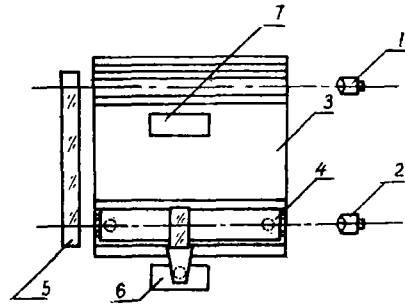


图 7

1, 2—光电自准光管 3—被测件 4—反射镜架 5—平晶 6, 7—补助支点

固定在 L 形测量架 C 处，其底部也固定一个钢球，微动块的侧面安装电感测头 4。以 AB 为轴心线，让 C 点上下反复摆动读出电感测头的读数 δ_1 ，再把测量架转动 180° 重复上述测量得 δ_2 。

再把与其对应的另一付 V 型导槽重复上述测量得 δ_3 、 δ_4 则跨距差 Δ 为

$$\Delta = \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} - \frac{\delta_3 - \delta_4}{2}$$

上述误差项中的直线度、平行度、扭曲度、跨距误差的测量是同时进行，根据测得的数据及误差的方向判断修磨的方法。对 V 型导槽来说在保证两个平面的平面度的前题下修磨导槽的 V 型角度、塔差的方法反复进行测量和修磨加工。测量时特别注意温度的影响。

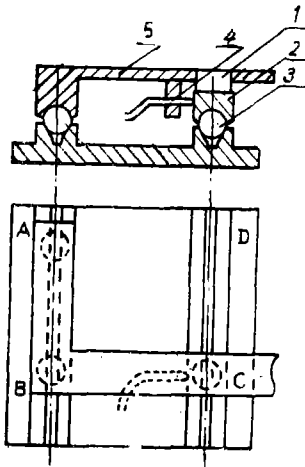


图 8 跨距测量装置

五、X-Y 工作台的精度

安装后的 X-Y 工作台进行了总的精度测量，结果为

X 轴： $0.5'' (+0.25'' - -0.25'')$

Y 轴： $0.5'' (+0.25'' - -0.25'')$

正、反向误差 $\leq \pm 0.1''$

另外，X-Y 工作台在电机驱动状态下用笔记录仪记录动态的角偏摆误差，其结果与上述结果一致。

在 X-Y 导向轴和各轴的测长系统是相互独立的工作台，台面的偏摆对轴线上的测长精度影响不大，如 $1'$ 的角偏摆大约影响 $0.01\mu\text{m}$ 左右。但是用于分步工作台的情况就截然不同，其边缘不能满足阿贝原则，因此 $1'$ 的角偏摆对边缘产生 $2\mu\text{m}$ 的误差。

因此，制造高精度的 X-Y 工作台减少角偏摆误差的影响显得非常重要。

六、结 束 语

在高精度 X-Y 工作台的制造过程中修磨技巧、测量方法、数据处理及装配措施等对实

现最终的精度起着关键性的作用。尤其测量方法及数据处理显得更为重要。对称的V型结构形式，由两个平面自然形成V型导向面这给加工和测量带来很大的方便。

本文由刘承烈、杨厚民同志审阅并提出了宝贵意见特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 重庆大学；国外数控测量机及其应用译文，1977年6月。
- [2] 岡田正思；高精度XYステージ，精密機械，1985，1，No.1, 105.
- [3] 森茂夫；超精密位置決めメカニズム，精密機械，1985，1，No.1, 98.
- [4] 山本健太郎等；オートユリソータ法による真直度測定の精度，昭和57年精機学会秋集大会论文集，第1分册114.

X-Y Platform with High Precision

Li Hezhong Liu Wenduo

Abstract

In this paper factors of guide deviation on X-Y platform, the methods of measuring and date-processing on the linearity of double V-shape rolling-boll track and the shape-position deviation are explained. fined measuring results are listed.