

小型精密 X—Y 工作台误差的理论分析及补偿

李江国 王立鼎

(中国科学院长春光学精密研究所, 长春 130022)

摘要 从理论上分析了小型精密 X—Y 工作台的各种误差。针对这些误差, 给出一些确实可行的措施来减小机械系统的误差, 用软件对系统的几种误差进行了补偿。在此基础上, 讨论了工作台开环系统及闭环系统的精度。

提出了测量导轨直线性误差的新方案, 使测量方法的原理误差降低到完全可以忽略不计的程度。

关键词: 小型精密 X—Y 工作台; 误差分析; 误差补偿; 导轨直线性测量

1 引言

精密 X—Y 工作台在精密加工、精密测试和精密机械中经常要用到。据报道, 国外已成批生产超精密 X—Y 工作台。在国内, 成都光电所、清华大学、广东工学院和长春光机所等单位都先后开展了对微位移精密 X—Y 工作台的研制工作, 现在, 微位移精密 X—Y 工作台的定位精度可达 $0.05\mu\text{m}$, 定位分辨率可达 $0.01\mu\text{m}$, 行程为几十个微米。

但是, 目前国内行程为几十个毫米的小型精密 X—Y 工作台还没有研制出来, 无论从眼前还是从长远利益来看, 研制小型精密 X—Y 工作台都是非常必要的。

2 小型精密 X—Y 工作台的技术要求

工作台的尺寸:	$30\text{mm} \times 40\text{mm}$
工作台的行程:	X 向 25mm Y 向 40mm
工作台的速度:	$V_{\text{max}} = 4\text{mm/s}$
单坐标重复定位精度:	$\leq 0.25\mu\text{m}$
工作台步距当量:	$\leq 0.1\mu\text{m}$
X—Y 工作台垂直度误差:	$\leq \pm 2''$
导轨直线性:	$\leq 0.25\mu\text{m}/\text{全行程}$

收稿日期: 1995年4月26日

工作台的驱动电路,采样电路和信号放大电路由单片机控制,形成一个相对独立的系统,并易于与 IBM—PC 机及其兼容机通讯,最终实现由 PC 机控制工作台的运动。

工作台的结构和材料选用应能保证在 $1.33 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 真空下正常工作,并能在现有电子束曝光系统中正常使用。

3 工作台的工作原理

3.1 工作台单坐标开环系统原理图(如图 1)

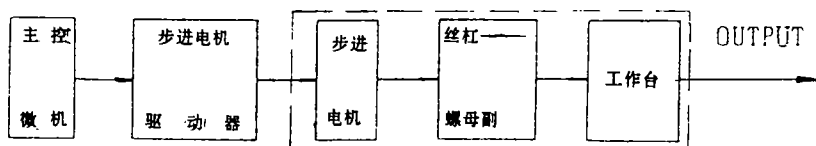


图 1 开环系统原理图

3.2 工作台单坐标闭环系统原理图(如图 2)

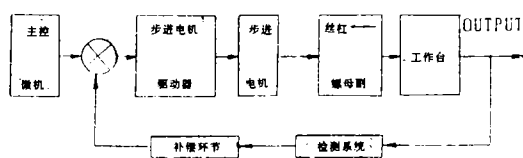


图 2 闭环系统原理图

3.3 工作台控制系统原理图(如图 3)

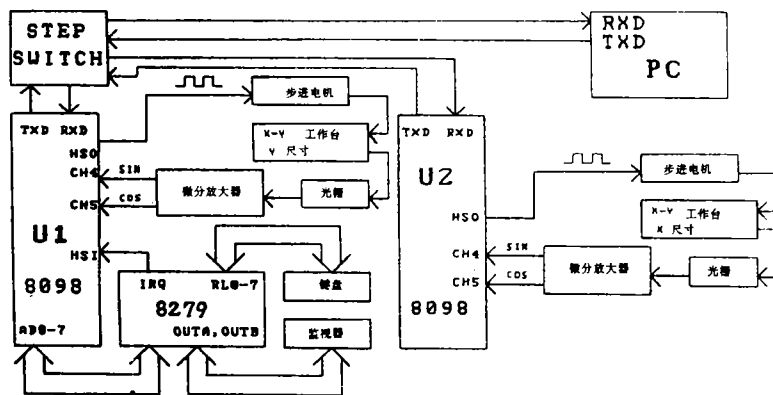


图 3 控制系统原理图

3.4 工作台的工作原理

单片机根据给定的位移计算工作台的目标位置,然后通过 HSO 口发一脉冲,驱动步进电机带动工作台运动,之后通过检测工作台的位置,经信号放大、误差补偿之后,单片机计算出工作台的真正位置,将其与目标位置比较,若发现工作台已到目标位置,则停止发脉冲,工作台定位完毕;若发现工作台还没到目标位置,则继续发脉冲,重复上述过程,直到工作台到目标位置为止。

表 1 工作台精度一览表

开环系统精度	电机的步距精度	δ_{10}	$\pm 5'$	
	64 细分后电机的步距精度	δ_{11}	$\pm 22'' (\pm 0.017 \mu\text{m})$	
	丝杠—螺母副周期公差	δ_{12}	$0.5 \mu\text{m}$	
	丝杠—螺母副在全长上的累积公差	δ_{13}	$1 \mu\text{m}$	
	丝杠的轴向窜动	δ_{14}	$0.1 \mu\text{m}$	
	导轨直线性(X 向和 Y 向)	δ_{15}	$0.25 \mu\text{m}/\text{全行程}$	
	导轨的垂直度	δ_{16}	$\pm 2''$	
	正反向运动轨迹不重合度	δ_{17}	$0.8 \mu\text{m}$	
	空回	δ_{18}	$0.1 \mu\text{m}$	
	单片机量化误差	δ_{19}	$\pm 0.039 \mu\text{m}$	
	精度	单坐标重复定位精度(X 向和 Y 向)	Δ_{11}	$3.96 \mu\text{m}$
		任意方向上的重复定位精度	Δ_{12}	$7.09 \mu\text{m}$
		单坐标定位精度	Δ_{13}	$1.03 \mu\text{m}$
		加工任意直线的直线性	Δ_{14}	$1.81 \mu\text{m}$
		任意方向上的定位精度	Δ_{15}	$2.17 \mu\text{m}$
		加工圆图形时的不圆度误差	Δ_{16}	$1.68 \mu\text{m}$
	闭环系统精度	检测系统误差	δ_j	$0.2 \mu\text{m}$
		正反行程不重合度误差	δ_{17}'	$0.1 \mu\text{m}$
		单坐标重复定位精度	Δ_{B1}	$0.2 \mu\text{m}$
任意方向上的重复定位精度		Δ_{B2}	$0.64 \mu\text{m}$	
单坐标位置精度		Δ_{B3}	$0.20 \mu\text{m}$	
加工任意直线的直线性		Δ_{B4}	$0.64 \mu\text{m}$	
精度	任意方向上的位置精度	Δ_{B5}	$1.02 \mu\text{m}$	
	加工圆图形时的不圆度	Δ_{B6}	$0.45 \mu\text{m}$	

4 工作台的误差和精度分析结果(如表1)

5 软件补偿方法

5.1 莫尔条纹细分中相位误差的软件补偿方法

5.1.1 补偿原理

在用 A/D 细分方法对莫尔条纹进行细分时,由于光电器件的安装和调试水平的限制,往往使得光电器件之间距与要求的间距不一样。这样,输出的正弦和余弦信号之间便产生了相位误差 β 。 β 可以控制在 $\pm 5^\circ$ 以内。

计算分析表明:不采取任何措施, β 角可以使光栅尺的精度降低两个位移当量,在本课题中,相当于 $0.2 \mu\text{m}$ 。这对精密检测元件是不允许的,必须予以补偿。

补偿后的位移计算公式为:

$$C = E \cos \beta / (F + E \sin \beta)$$

式中, C 为经补偿后的位移, β 为相位误差, E 为 $\sin \alpha$ 曲线上的实测值(如图 4), F 为 $\cos(\alpha + \beta)$ 曲线上的实测值(如图 4)。

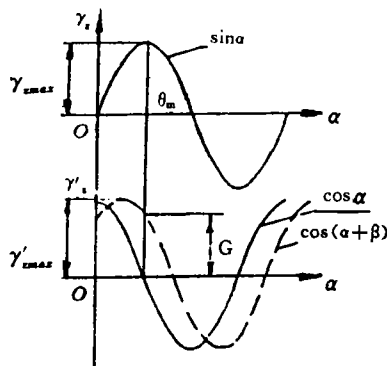


图 4 莫尔条纹细分中的信号转换

5.1.2 β 的计算

找出与 γ_{max} 对应的 θ_m 及 G 值。事先根据式 $\beta' = \arccos G$ ($\beta' = -20^\circ \sim 20^\circ$) 列出 β' 与 G 值对应表。再根据 G 值求出 β' 。

则 $\beta = \beta' - 90$

5.1.3 相位误差补偿的原理框图(如图 5)

5.2 工作台正行程轨迹不重合误差的软件补偿方法

我们的课题的工作台其正行程轨迹不重合误差为 $0.8\mu m$, 这项误差用机械方法来减小非常困难。而对精密 X-Y 工作台来说用软件使两副导轨互相利用对方的微运动来补偿自身的正反向运动轨迹不重合误差, 实现起来很方便。

5.2.1 软件补偿的基本原理(如图 6)

假定某一瞬时工作台沿 X 正向运动, 轨迹上的一点为 A_x , 当 X 轨做反向运动时, A_x 点便跳到了反向运动轨迹 S'_x 上 A_y 点。为了弥补轨迹不重合误差, 需要让 A_y 点回到 A_x

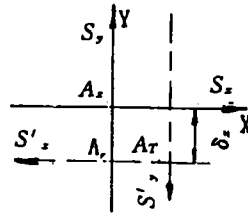


图 6 轨迹不重合误差补偿

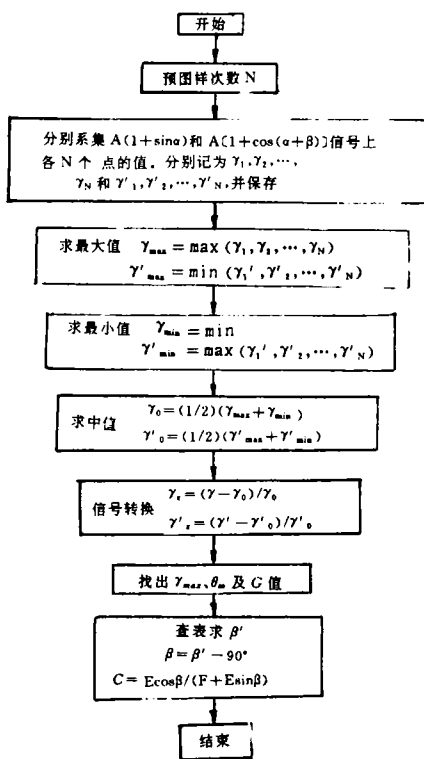


图 5 相位误差补偿及其后的位移计算

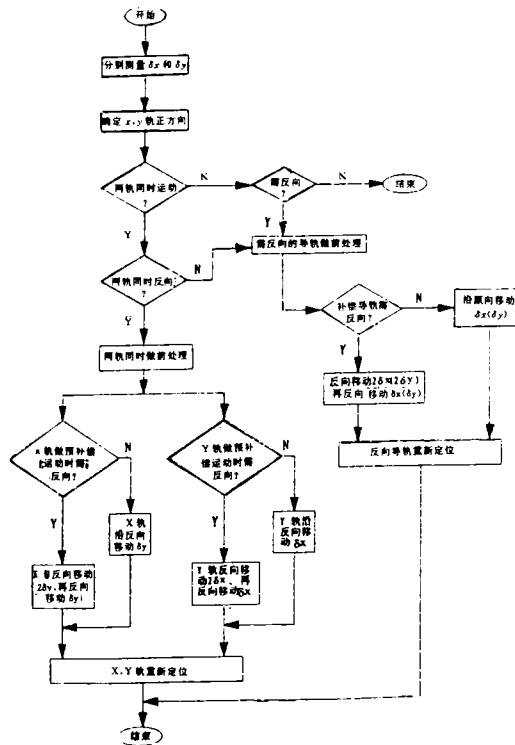


图 7 工作台正行程轨迹不重合误差的软件补偿框图

点, 从图 6 中可以看出, 只要让 y 轨沿 y 正向移动 δ_x 即可 (δ_x 为 X 向的轨迹不重合误差)。

5.2.2 软件补偿框图(如图 7)

5.3 用软件选择工作台合理的速度-加速度曲线

一般来讲,要走的位移不是莫尔条纹周期($10\mu\text{m}$)的整数倍,将位移值除以莫尔条纹周期,得整数部分 a 和余数 b 。在进行位移 a 的过程中,令工作台全速前进,而在运动 b 的过程中,用半速前进。这样,虽然多了一次加速度,但加速度的值减小一半,从而减小了对丝杠-螺母副的冲击,提高了定位精度。

6 用电感仪测量滑动导轨的直线性误差的方法

6.1 传统的测量方案(如图 8)

6.2 新测量方案(如图 9)

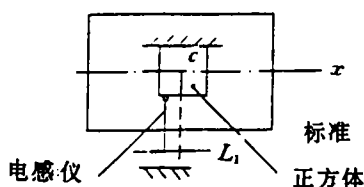


图 8 传统的测量方案

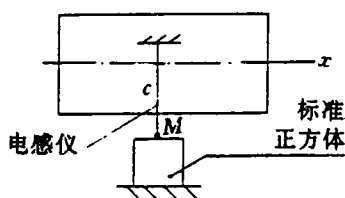


图 9 新的测量方案

新方案与传统的方案相比,其原理误差小到完全可以忽略不计的程度。在实际应用中,建议采用新方案。

7 结 论

将 β 角控制在 $\pm 10^\circ$ 以内,经软件补偿后,可以将 β 角对光栅尺的精度影响降低到一个位移当量之内,即 $0.1\mu\text{m}$ 。计量光栅经相位误差补偿后,考虑到量化误差和 β 角的影响,综合检测精度为 $0.2\mu\text{m}$ 。经预补偿和预处理措施后,可以将误差集中到工作台正常区域之外,从而达到消除误差的目的。

参 考 文 献

- [1] 林 东编,计算机控制技术,哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,19~21
- [2] 张 彤,王作斌,微型计算机在莫尔条纹信号细分中的应用. 光学机械,1985,(2):43~48
- [3] 王因明,光学计量仪器设计(上). 北京:机械工业出版社,1983
- [4] 毛英泰主编,误差理论与精度分析. 北京:国防工业出版社,1983
- [5] 荆 涛,压电陶瓷微位移驱动器在精密工件台上的应用研究. 光学精密工程,1994,2(4),64-68
- [6] 刘复华,8098 单片机及其应用系统设计. 北京:清华大学出版社
- [7] 易明锐,集成运算放大器分析与设计. 科学出版社

Theoretical Analysis and Compensation of Errors of Miniature Fine X—Y Worktable

Li Jianguo, Wang Liding

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,*
Chinese Academy of sciences, Changchun 130022)

Abstract

In theory, all kinds of errors of The Miniature Fine X—Y Worktable are analyzed. Being aimed at these errors, some feasible measurements of reducing the mechanical system errors are raised in this paper; some errors are compensated by using software. On the basis of them, the precision of the open—loop and loop—locked system is discussed. Specially, a new way of measuring slideway straightness is raised, it reduces the principle error in the measurement way to the degree that can be ignored completely.

Key words: Miniature fine X—Y worktable, Error analysis, Error compensation, Slide-way straightness measurement