

文章编号 1004-924X(2003)05-0492-05

以正交衍射光栅为计量标准器的二维微位移工作台

王选择, 郭 军, 谢铁邦

(华中科技大学 机械学院仪器系, 湖北 武汉 430074)

摘要:提出以正交衍射光栅作为 x - y 二维位移工作台计量标准器的思想, 阐述了正交衍射光栅作为大量程二维位置检测传感器的工作原理及光路布置方法, 推导了光栅运动位移与所产生干涉条纹的相移之间的关系。介绍了工作台粗、细两级定位系统的组成结构: 粗定位部分由磁悬浮平面直线电机驱动, 细定位部分采用弹性铰支结构并由压电陶瓷驱动; 通过分别对电机和压电陶瓷驱动范围与定位精度的分析, 提出对工作台精密快速定位的方法。设计了一套对电机与压电陶瓷进行驱动控制和光栅信号进行处理的电路, 并结合实际正交衍射光栅的刻线精度, 计算了工作台位置检测的有效分辨率。最后, 分析了当前几种典型压电陶瓷驱动电路的特点, 提出选用直流放大电源的方式作为本系统高压驱动方法, 并给出了高压驱动电路图。

关键词:二维位移工作台; 正交衍射光栅; 四象限探测器; 压电陶瓷

中图分类号: TG806 **文献标识码:** A

2D Platform with cross diffraction grating as displacement measurement sensor

WANG Xuan-ze, GUO Jun, XIE Tie-bang

(Department of Machinery Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The platform consists of coarse and fine stages, and the coarse stage is driven by a plane linear motor while the fine one by piezoelectric ceramics. The method of fast location control is proposed according to the driving range and precision of motors and piezoelectric ceramics. A circuit was designed to process grating signals to drive motor piezoelectric ceramics. The actual resolution of position measurement was computed from the practical precision of grating grid. Direct current amplification was chosen by analyzing a few high voltage circuits to drive these ceramics.

Key words: 2D displacement platform; cross diffraction grating; four-pin detector; piezoelectric ceramics

1 引言

在半导体光刻、微型机械、精密测量、超精密加工、微型装配、生物细胞操纵和纳米技术等领域, 需要十分精确地定位和非常精细地运动, 因此高性能的超精密定位工作台成为这些领域的技术支持。国外(美国、日本等)在微位移工作台方面

的研究比较多, 技术已经比较成熟, 已研制出工作范围为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 、定位精度达 $\pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$ 的精密工作台^[1]。国内许多单位(如清华大学、浙江大学、哈尔滨工业大学等)也在从事这方面的工作^[2-4], 已研制出行程在几~几十 mm 的一维精密工作台, 定位精度达到 $\pm 0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。但目前国内研制的行程在几十 mm 的二维精密工作台

收稿日期: 2003-04-15; 修订日期: 2003-08-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50175037)

还比较少,而从实际应用来看,小行程、一维的精密工作台存在很大的局限性,难以满足许多领域的需要。为此,研制了一种新型的精密二维位移工作台,利用正交衍射光栅为计量标准器,对工作台两个方向的位移进行实时采集测量,满足了实际工作中大行程与高精度的要求。

2 正交衍射光栅的工作原理

一般的衍射光栅只能检测一个方向的位移,而正交衍射光栅能同时检测两个方向的位移,其工作原理如图 1 所示。由激光器发出的光束进入精细全息光栅,经光栅一次衍射后在光栅法线与 X 向所在平面上形成两束衍射光 $+1(X)$ 、 $-1(X)$,并通过置于两侧的直角棱镜反射,会聚于光栅另一点;发生二次衍射后,产生的 $(-1, -1)(X)$ 级、 $(+1, +1)(X)$ 级两束光沿光栅法线方向传播^[5],形成的干涉条纹进入光电探测器;用同样的方法产生和接收 Y 方向衍射光束产生的干涉条纹。由于 X 或 Y 向干涉条纹所产生的相移与光栅沿 X 或 Y 方向位移成正比,因而通过检测干涉条纹的相移就可以得到 X 或 Y 向的位移^[6]。

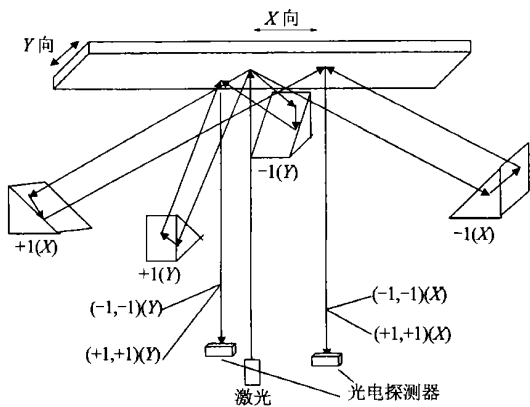


图 1 正交衍射光栅的工作原理

Fig. 1 Measurement principle of the cross diffraction grating

由衍射光栅的性质可知:当光栅常数为 g 的光栅在某个方向产生一个相对位移 d 时,在此方向上形成的 $+1$ 、 -1 级衍射光会发生一定的相移 $+1$ 、 -1 , 其中:

$$+1 = \frac{2d}{g}, \quad -1 = -\frac{2d}{g}, \quad (1)$$

发生二次衍射后,形成的 $(+1, +1)$ 、 $(-1, -1)$ 级衍射光的相移 $+1,+1$ 、 $-1,-1$ 分别为:

$$+1,+1 = \frac{4d}{g}, \quad -1,-1 = -\frac{4d}{g}, \quad (2)$$

令两束二次衍射光的幅值相等且幅度为 1, 则它们在合成处 x 的复振幅表达式为:

$$U(d, x) = U_1(d, x) + U_2(d, x), \quad (3)$$

式中, x 为沿光电阵列面方向的坐标。

两束二次衍射光为近似平面光,假设两束光的倾角为 2 , 并设它们的中心位置为 0, 根据激光的传播特性^[7], 去掉初相位的影响后,两束光的复振幅方程可近似为:

$$U_1(x, d) = \exp[j(\quad +1,+1 + \frac{2xtan}{g})],$$

$$U_2(x, d) = \exp[j(\quad -1,-1 - \frac{2xtan}{g})], \quad (4)$$

其中, λ 为激光波长。其合成光强度分布为:

$$I(x, d) = U(x, d) \times U(x, d)$$

$$= 2 + 2\cos(\frac{8d}{g} + \frac{4xtan}{g}), \quad (5)$$

上式表示当光栅静止时,在光电探测器处形成有明暗相间的干涉条纹,当光栅移动了一个光栅节距时,干涉条纹相位变化 8 , 即 4 个条纹常数。在此基础上,如果光电探测器采用四象限光电阵列,并把光电阵列面置于适当的位置,使光电阵列各相邻两个象限之间接收到的相位相差为 $\frac{\pi}{2} + 2$, 则可以得到四个相差 $\frac{\pi}{2}$ 的光强信号,通过对此 4 个信号的差分、判向、计数与细分处理,就得到了条纹的整体相位变化情况。

3 工作台的结构设计及其驱动方法

为了得到高精度、宽范围的工作台,工作台采用粗定位与细定位结构相结合的方法进行设计,其中粗定位工作台又分为 x 向、 y 向内外两层移动工作台 2、4, 内层随外层的移动而移动。细定位工作台 1 是在一个平面上布置内外两层柔性铰支机构,在压电微位移器驱动下,可产生相互正交的运动。细定位工作台的内层作为目标工作台与正交衍射光栅 5 通过刚性固连在一起,光栅随目标工作台的移动而移动,整个光路结构与光电接收装置布置在工作台下方(图中没有示意),其结构示意图如图 2。

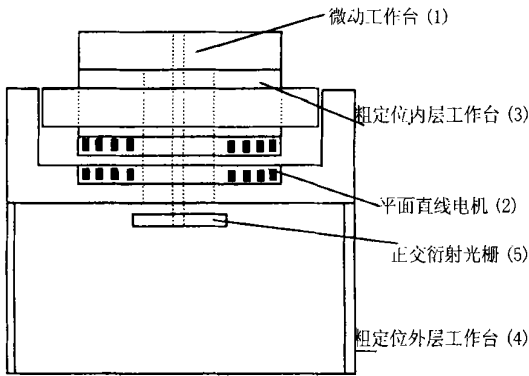


图 2 工作台总体结构示意图

Fig. 2 Structure sketch map of the platform

粗定位采用磁悬浮平面直线电机 3 驱动,直线电机定子嵌入经研磨的表面,它们之间由薄油层支撑。直线电机的定位误差小于 $10\ \mu\text{m}$,其最高速度达 $50\ \text{mm/s}$,采用无丝杠驱动,工作台振动小。

细定位工作台如图 3 所示:在弹性钢板上通过刻蚀在外层形成由铰支结构 3 与基座 1 相连的 Y 向运动工作台 2,由压电微位移器 5 驱动;在内层形成由铰支结构 6 与 Y 向运动工作台相连的 X 向运动工作台 7,由压电微位移器 4 驱动。X 向运动工作台 7 即为目标工作台。压电微位移器的驱动范围为 $20\ \mu\text{m}$,理论分辨率小于 $1\ \text{nm}$ 。

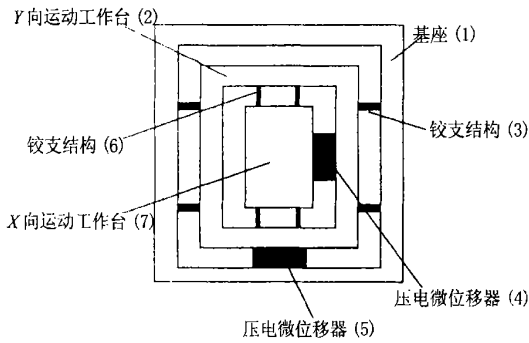


图 3 微动工作台结构图

Fig. 3 Structure map of fine stage

工作台定位时,首先驱动平面直线电机进行粗定位,然后再驱动压电微位移器进行精确定位。考虑到电机定位精度小于 $10\ \mu\text{m}$ 和压电微位移器在粗定位过程中处于无伸展状态,让工作台粗定位在距目标位置为 $-10\ \mu\text{m}$ 附近,这样,保证工作台粗定位在距目标位置 $(-20, 0)\ \mu\text{m}$ 的范围

内,然后通过 D/A 转换启动高压驱动器,并根据压电微位移器伸展量与加载高压近似成线性的关系以及工作台距目标位置的残差值调整 D/A 转换量,驱动压电微位移器精密定位。

4 系统控制与信号处理电路

系统总体控制框图如图 4,计算机通过打印口与工作台专用电路板通讯,完成启动和读取光栅尺计数值;启动和读取 A/D 转换值;通过 I/O 或 D/A 给电机驱动器发驱动信号;通过 D/A 控制高压驱动器的输出等功能。

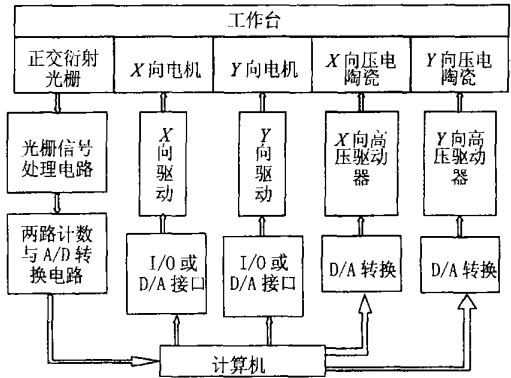


图 4 系统控制框图

Fig. 4 System control chart

4.1 光栅信号处理电路

专用电路板用单片机 AT89C2051 和 GAL16V8 完成对光栅信号的计数与辨向处理^[8],采用高精度的 AD 采样芯片 AD674 完成对光栅条纹信号差分后的两路正、余弦信号的采集与转换,送入计算机进行软件细分处理。对 X 或 Y 每一个方向而言,四象限光电探测器的 4 路信号处理电路如图 5 所示。

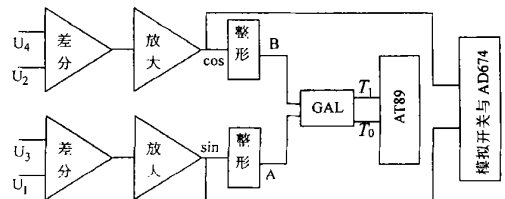


图 5 光栅信号处理电路原理图

Fig. 5 Schematic graph of grating signal process

采用 50 mm × 50 mm (即工作台的工作范围) 光栅常数为 1/1 200 mm 的正交衍射光栅尺,其 4 倍频脉冲分辨率 r 计算如下:

$$r = \frac{d}{4 \times 4} = \frac{1}{1\,200 \times 4 \times 4} \text{ mm} = 5.208 \times 10^{-8} \text{ m}, \quad (6)$$

结合实际信号的有效性,进一步通过 A/D 转换并用软件对正弦信号 \sin 在 1/4 周期内进行 5 细分,则可使工作台分辨率提高到 10 nm 左右。

4.2 高压驱动电路

系统利用压电陶瓷作为压电微位移器,压电陶瓷的驱动电源一般可分为电压控制型和电荷控

制型两种^[9]。电压型驱动电源主要有两种形式:一种是基于直流变换器原理的开关式,这种驱动方式电源功率损耗小、效率高、体积小,但电源输出纹波较大,频响范围也较窄;另一种是直流放大式,其特点是频响范围较宽,然而这与输出精度高又相矛盾。从发展趋势看,这种电源应用前景较为广阔。电荷控制型驱动电源可以改善压电陶瓷的迟滞和蠕变,但由于压电陶瓷的内阻很高,因此充电电流小,响应时间长,更适合于静态或对频响要求不高的场合。根据本系统的要求,笔者采用了直流放大电源的方式,其电路原理如图 6 所示。

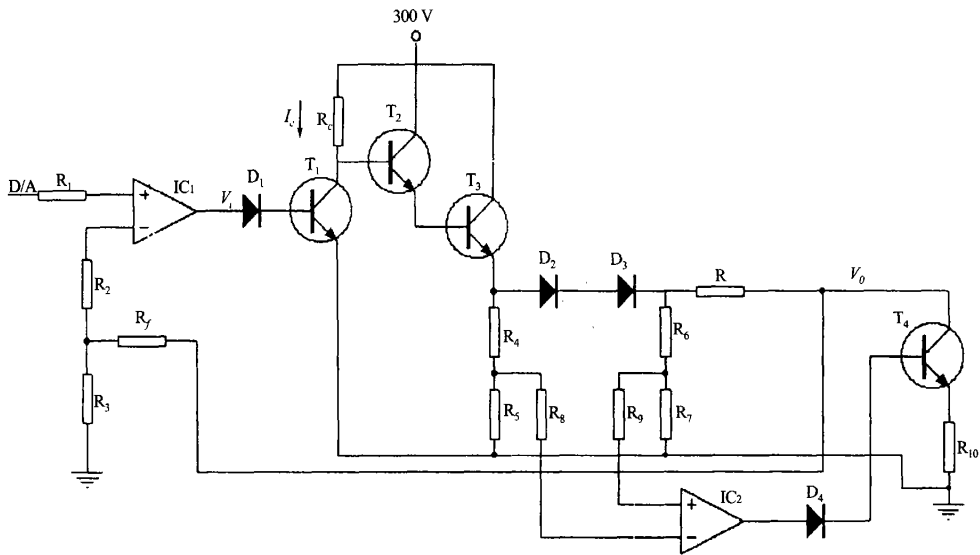


图 6 高压驱动电路

Fig. 6 High voltage driving circuit

5 结束语

介绍了一种以正交衍射光栅为计量标准器的二维微位移工作台,阐述了正交衍射光栅的工作原理及其光路布置结构。介绍了 X-Y 二维位移工作台的结构设计及驱动方法;此外,给出了光栅

信号的处理电路及系统的精度指标,微定位工作台的驱动方法和对光栅信号的处理与计数方法,给出了工作台的精度指标和工作量程。

与传统的激光干涉仪相比较,利用正交衍射光栅作为计量标准器极大地降低了成本,同时减少了系统的阿贝误差,也提高了整个工作台抗干扰的能力。

参考文献:

[1] HOLMES M, HOCKEN R, TRUMPER D. The long-range scanning stage: a novel platform for scanned-probe microscopy[J]. *Precision Engineering*, 2000, (24): 191-209.
 [2] 米凤文,戴旭涵,沈亦兵. 精密工作台定位控制系统的设计与研究[J]. *光学仪器*, 1999, 20(5): 18-22.
 MI F W, DAI X H, SHEN Y B. Design and research on the precision worktables positioning control system[J]. *Optical*

- Instruments*, 1999,20(5):18-22. (in Chinese)
- [3] 李江国,王立鼎. 小型精密 X-Y 工作台误差的理论分析及补偿[J]. 光学 精密工程,1995,3(4):87-92.
LI J G, WANG L D. Theoretical analysis and compensation of errors of miniature fine X-Y worktable[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995,3(4):87-92. (in Chinese)
- [4] 王立松,苏宝库,董申,等. 大行程高精度级定位工作台的控制方法研究[J]. 机械设计与制造,2001,4:71-72.
WANG L S, SU B K, DONG SH, *et al.* The research of the large travel and high precision two-level table [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2001,4:71-72. (in Chinese)
- [5] TRAUNTEUT A T. Technology and applications of grating interferometers in high-precision measurement[J]. *Precision Engineering*, 1992,14(3):147-154.
- [6] 蒋向前,肖少军,谢铁邦,等. 光栅技术在纳米测量中的应用[J]. 仪器仪表学报,1995,16(1):374-378.
JIANG X Q, XIAO SH J, XIE T B, *et al.* Application of grating in nanometer measurement [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1995,16(1):374-378. (in Chinese)
- [7] 邓开发,陈洪,是度芳,等. 激光技术与应用[M]. 长沙:国防科技大学出版,2001.
DENG K F, CHEN H, SHI D F, *et al.* *Laser technology and application* [M]. Changsha: National Defence University of Science and Technology, 2001. (in Chinese)
- [8] 许慧斌,张小波,宾鸿赞. 基于 PC 总线的位置测量与电机控制卡[J]. 电子与自动化,1999,28(3):14-17.
XU H B, ZHANG X B, BIN H Z. PC-bus based position measuring and motor control I/O card [J]. *Electronics & Automation*, 1999,28(3):14-17. (in Chinese)
- [9] 冯晓光,赵万生,栗岩,等. 压电陶瓷微位移器驱动电源及减小其纹波的方法[J]. 压电与声光,1997,19(1):35-38.
FENG X G, ZHAO W SH, LI Y, *et al.* Power supply for piezoelectric actuators and a method of abating ripple voltage [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 1997,19(1):35-38. (in Chinese)

作者简介:王选择(1971-),男,湖北天门人,三峡大学讲师、华中科技大学在读博士,从事精密测量与传感技术方面的研究工作,在国内外学术期刊和会议上发表论文十余篇。E-mail: wangxz-cn@sohu.com.