

文章编号: 0258-7025(2008)Supplement2-0233-04

基于衍射光栅的超精密定位技术研究

张金龙¹ 潘世丽¹ 刘 阳¹ 刘京南² 内田敬久³

¹ 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042

² 东南大学自动化学院, 江苏 南京 210096; ³ 日本爱知工业大学智能机械工学科, 日本 丰田 470-0392

摘要 分析了一种百纳米级位移分辨率的双级衍射光栅测量系统,建立了衍射叠栅(莫阿)信号与对应位移的数学模型,并通过计算机仿真对叠栅信号的位移特性进行了研究。在此基础上设计了一套基于双级衍射光栅的精密定位装置,利用两组衍射光栅,取其透射零次激光叠栅信号的差信号为控制信号,由微机控制实现高精度位置检测及精密自动定位。系统采用的差动光栅技术,极大地提高了位置检测信号的灵敏度及定位精度。通过粗定位和精定位相结合的两段式复合定位,可在高精度定位的同时,缩短定位时间,实现高速高精度定位。实验结果表明,基于衍射光栅的精密定位装置可获得 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 的定位精度,对精密加工工程领域具有重要的实用价值。

关键词 衍射光栅;叠栅信号;差动技术;精密定位;自动控制

中图分类号 TP274+.5 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200835s2.0233

Research on Ultra-Precision Alignment Technique Using Diffracting Gratings

Zhang Jinlong¹ Pan Shili¹ Liu Yang¹ Liu Jingnan² Yoshihisa Uchida³

¹ College of Electrical and Automatic Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210042, China

² Automation College, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China

³ Department of Intelligent Machinery Engineering, Aichi Institute of Technology, Toyoda 470-0392, Japan

Abstract A double diffracting gratings measurement system with the resolution of nanometer order is analyzed. A mathematic model of diffracting Moiré signal and displacement measurement is established. The displacement characteristics of laser Moiré signals are studied by numerical simulation. A precision position device using double diffracting gratings is designed which can achieve precise position measurement and automatic precision alignment by the differential Moiré signal between two laser Moiré sensors. The differential Moiré positioning technique are used, which greatly improves sensitivity of position signals and positioning precision. The compound control system for precision positioning is set up using the coarse alignment and the fine alignment, which achieves the high alignment accuracy and quick alignment speed. The experimental result shows the alignment device using diffracting gratings can perform positioning accuracy of $\pm 0.5 \mu\text{m}$.

Key words diffracting gratings; Moiré signals; differential Moiré technique; precision alignment; automatic control

1 引 言

精密定位技术与许多生产实践密切相关,在精密加工、半导体器件制造、电子产品组装线、高清晰显示器件制作及纳米技术研究开发等领域具有广泛的应用。近年来随着精密定位技术的不断创新,利用激光叠栅信号来检测位置误差,从而实现了高精度定位^[1~9]。本文研究了激光叠栅信号特性,利用衍射光栅设计了一套精密定位装置,该装置可实现高精度位置检测及精密自动定位,取得了亚微米级

的精密定位实验结果。

2 精密定位原理

基于激光叠栅信号的精密定位原理如图 1 所示,两片衍射光栅平行设置,当激光光束垂直入射光栅 1 缝隙上时,由于光栅的衍射形成叠栅信号,由菲涅耳衍射积分公式,可得光栅 2 前面 P 点处在柱坐标下的衍射光复振幅

基金项目:国家 863 计划(2005AA303610)资助项目。

作者简介:张金龙(1965—),男,博士,副教授,主要从事精密测量与控制技术的研究。E-mail: zj10310@163.com

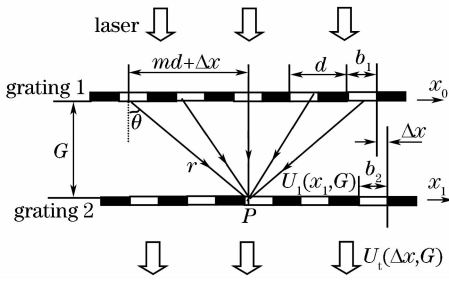


图1 双级衍射光栅结构

Fig. 1 Structure of diffraction double-gratings

$$U_1(P) = \frac{i}{2\lambda} \times \int_{-b_1/2}^{b_1/2} U_0(Q) r^{-1/2} (1 + \cos \theta) \exp(-ikr) dx_0, \quad (1)$$

式中 b_1 为光栅缝隙宽度, 设 $A_1 = \frac{i}{2\lambda} \cdot U_0(Q)$, 则 P 点衍射光复振幅为

$$U_1(P) = A_1 \int_{-b_1/2}^{b_1/2} r^{-1/2} (1 + \cos \theta) \exp(-ikr) dx_0. \quad (2)$$

当激光光束所覆盖的光栅条数为 $2M+1$ 时, 可得 P 点的衍射光复振幅 $U_1(x_1, G)$ 为

$$U_1(x_1, G) = A_1 \sum_{m=-M}^M \times \int_{-b_1/2}^{b_1/2} r^{-1/2} (1 + \cos \theta) \cdot \exp(-ikr) dx_0, \quad (3)$$

由图 1 可知 $\cos \theta = G/r$, 代入(3) 式得

$$U_1(x_1, G) = A_1 \sum_{m=-M}^M \times \int_{-b_1/2}^{b_1/2} r^{-1/2} (1 + G/r) \cdot \exp(-ikr) dx_0, \quad (4)$$

式中 $r = [G^2 + (\Delta x + md)^2]^{1/2}$, $\Delta x = x_1 - x_0$ 为两片光栅之间的相对位移, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为激光波长, d 为光栅常数, G 为两光栅间距, b_1 为第一片光栅的光栅缝隙宽度。

经光栅 1 衍射形成的衍射光 $U_1(x_1, G)$, 再经光栅 2 二次衍射, 设光栅 2 的透光特性函数为 $T(x_1 - \Delta x)$, 则在光栅 2 处的二次衍射光复振幅为

$$U'_1(x_1, G) = U_1(x_1, G) \cdot T(x_1 - \Delta x), \quad (5)$$

在光栅 2 出射的远处(距离为 z_0 处), 第 n 级衍射光的复振幅可由夫琅和费衍射公式计算, 其大小为

$$U_t(\Delta x, G)_n = \frac{1}{i\lambda z_0} \cdot \exp(ikz_0) \exp\left(i \frac{kx_0^2}{2z_0}\right) \times \int U'_1(x_1, G) \cdot \exp(-i2\pi f_x x_1) dx_1, \quad (6)$$

令 $A_t = \frac{1}{i\lambda z_0} \cdot \exp(ikz_0) \cdot \exp\left(i \frac{kx_0^2}{2z_0}\right)$, 并由傅里叶光

学理论可得知空间频率 $f_x = n/d$, 则有

$$U_t(\Delta x, G)_n = A_t \int U(x_1, G) T(x_1 - \Delta x) \cdot \exp\left(-i \frac{2\pi n x_1}{d}\right) dx_1 = A_t \int_{-b_2/2+\Delta x}^{b_2/2+\Delta x} U_1(x_1, G) \cdot \exp\left(-i \frac{2\pi n x_1}{d}\right) dx_1, \quad (7)$$

式中 n 为衍射级次, b_2 为第二片光栅的光栅缝隙宽度。当 $n = 0$ 时, 由激光衍射理论可知, 其光强最强, 其 0 次衍射光复振幅为

$$U_t(\Delta x, G)_0 = A_t \int_{-b_2/2+\Delta x}^{b_2/2+\Delta x} U_1(x_1, G) dx_1. \quad (8)$$

两光栅之间的间距 G 可由菲涅耳公式得, 其大小为

$$G = m \frac{d^2}{\lambda}, \quad (9)$$

式中 m 为非负的整数。当两光栅间隙满足(9)式时, 光栅衍射产生的叠栅条纹信号最强。

对(8)式采用高斯数值积分法和牛顿迭代法进行计算机数值运算和分析, 并将仿真计算得到的数据再采用 MATLAB 工具进行显示, 如图 2 所示。由图可见, 叠栅信号强度随两片光栅的相对位移呈周期性变化, 同时也随两光栅的间距呈周期性变化, 特别是当光栅距离 G 为 d^2/λ 的整数倍时, 光强幅度变化最大。这说明经双光栅衍射后的 0 次光光强变化具有稳定的规律性, 且 0 次光在各级衍射光中光强最强, 非常适合于精密位移测量及控制。

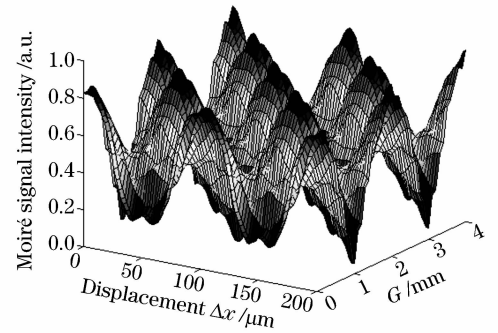


图2 0次叠栅信号的仿真

Fig. 2 Simulation curve of 0th order Moiré signal

依据上述关系, 通过光电二极管将透射的 0 次叠栅光转换为电信号, 并由计算机检测 0 次叠栅光信号强度, 从而确定两片光栅间的相对位移 Δx 。

3 精密定位控制系统

依据上述原理设计的精密定位系统如图 3 所示, 系统由激光器、分光镜、定位台、光电二极管、信号处理电路、工业控制计算机、步进电机、机械驱动机构等组成。定位时, 激光器发出的激光束经过分

光镜被分成两束,垂直透过光栅副,产生透射的 0 次叠栅信号,由光电二极管转换为电信号,并经 I/V 转换、放大、滤波、A/D 转换等处理后,再输入工业控制计算机,计算机根据检测到的 0 次叠栅信号大小和极性发出相应的驱动脉冲信号,使步进电机细步驱动微动台达到所要求的位置精度范围,实现精密定位。当系统受到扰动,反映位置变化的叠栅信号曲线偏离设定的误差范围,工控机便会发出相应的控制脉冲进行自动复位,使位置偏差始终控制在所要求的精度范围内,整个定位过程由计算机实时检测控制完成。

3.1 精密定位台

精密定位台是定位装置的关键部件,系统设有粗动台和微动台两种。粗动台和微动台分别内嵌一块刻有光栅的玻璃,如图 3(b)所示,两玻璃上部 A 点处各设置四组光栅,下部 B 点处设置两组光栅,光栅组 1-2,3-4,5-6 两两相对构成差动光栅结构,光栅组 1-2,5-6 检测两平面上上下对应点的水平位置偏差,光栅组 3-4 检测垂直位置偏差。

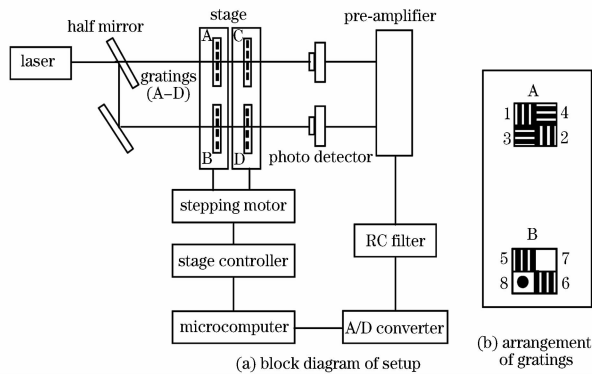


图 3 精密平面定位装置

Fig. 3 Apparatus of precision plane alignment system

精密定位时,先通过粗动台进行粗定位,粗定位位置为上下、左右定位偏差范围各 $\pm d/2$ (d 为光栅常数),再由微动台进行微控,这样不仅使精密定位装置达到高精度,而且大大缩短定位时间,实现高速高精度定位控制。粗动台采用高精度丝杠传动机构,实现 x, y, z 三个方向的直线移动;微动台的机械传动采用脉冲细分式驱动步进电机,并通过高精度阿基米德螺旋线凸轮将细分后步进电机的微小角度转化为微米级的线性位移,以满足定位控制的需要。最终的定位误差将主要依靠计算机闭环控制作用来消除,尽量减少对机械传动部分本身加工精度的依赖。

3.2 差动叠栅技术

在差动光栅结构中,两组光栅分别错开 $+d/4$

和 $-d/4$,当激光经过这两组光栅时,可以获得相位相差 180° 的两个叠栅信号 I_1 和 I_2 ,取两个叠栅信号的差值(即差动叠栅信号)为检测控制信号。图 4 为实验测得的叠栅信号和差动叠栅信号,可以看出,差动叠栅信号将反映位移变化的光强值有效地放大了一倍,特别是在定位点附近差动叠栅信号的变化率很陡,微小位移便会导致大的光强变化,极大地提高了位置检测信号的灵敏度,且在定位点附近光强变化与光栅移动的位移量成线性关系,可以定量地获得位置偏差的大小及位置偏离的方向。此外,由于差动叠栅技术取的是两组叠栅信号的差值,因此可以有效地消除干扰信号的影响,具有很高的信噪比,有利于定位精度的提高。

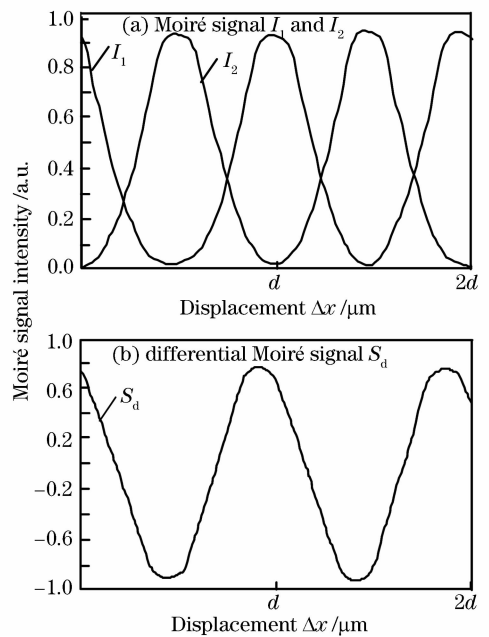


图 4 差动叠栅信号系统曲线

Fig. 4 Curve of differential Moiré signal system

差动叠栅信号随两光栅的相对位移呈周期性变化,在一个位移周期内,差动信号为零处设置为定位点,此时位移偏差为零,微动台的控制范围为精密定位点两侧 $\pm d/2$ 。

4 精密定位实验

实验所用激光光源为 He-Ne 激光,功率 1.8 mW,波长 633 nm,所用光栅的光栅常数 $100 \mu\text{m}$,两光栅之间的间距为 0.1 mm,驱动精密装置的电脉冲经 10000 细分后的单位脉冲最小移动距离为 $0.2 \mu\text{m}$,系统根据设定的脉冲频率由工控机自动控制移动至定位目标点。定位曲线如图 5 所示,定位误差带处于 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 内,则定位精度为

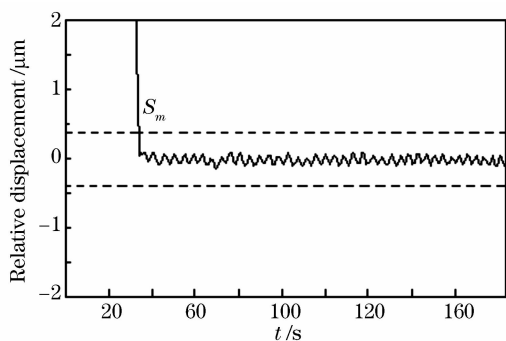


图 5 精密定位曲线

Fig. 5 Precision positioning curve

±0.5 μm。

5 结 论

研究分析了一种百纳米级位移分辨率的双级衍射光栅测量系统,建立了衍射叠栅信号与对应位移的数学模型,并通过计算机仿真对叠栅信号的位移特性进行了研究。在此基础上设计了一套基于双级衍射光栅的精密定位装置,以透射 0 次激光叠栅信号为控制信号,可实现高精度位置检测及精密自动定位;采用的差动光栅技术可有效提高位置检测信号的灵敏度及定位精度。实验结果表明,基于衍射光栅的精密定位装置可获得 ±0.5 μm 的定位精度,对精密加工工程领域具有重要的实用价值。

参 考 文 献

- 1 A. K. Kanjilal, R. Narain, R. Sharma *et al.*. Automatic mask alignment without a microscope [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1995, **44**(3):806~809
- 2 M. Akihito, H. Furuhashi. Influences of the inclination of gratings on the alignment accuracies in moiré alignment systems [J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2002, **139**(2):46~51
- 3 G. Bouwhuis, Wittelock. Automatic alignment technique for optical projection printing [J]. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 1979, **ED-26**(4):732~736
- 4 J. Itoh, T. Kanayama. Optical heterodyne detection of mask to wafer displacement for fine alignment [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1986, **25**(8):684~686
- 5 B. P. Singh, T. Goto, R. Sharma *et al.*. Tracking and dynamic control of the angular alignment position in a photolithographic mask aligner by Moiré interference technique [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, **66**(3):2685~2660
- 6 J. N. Liu, H. Furuhashi, H. Y. Uchida. Automatic mask alignment in the θ direction using Moiré sensors [J]. *Nanotechnology*, 1995, **6**(4):135~138
- 7 J. N. Liu, H. Furuhashi. Precision position control system using moiré signals [C]. Proceedings of the 1995 IEEE IECON Conference, Orlando, USA, 1995. 968~972
- 8 K. Hara, T. Nomura, S. Kimura *et al.*. An alignment technique using diffracted moiré signals [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1989, **B7**(6):1977~1979
- 9 Y. Uchida, S. Hattori, T. Nomura. An automatic mask alignment technique using moiré interference [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1987, **B5**(1):244~247
- 10 L. Z. Zhou, H. Furuhashi, Y. Uchida. Sensing characteristics of a precision aligner using moiré gratings for precision alignment system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **B10**(4):257~262