

基于叠栅信号的超精密定位特性研究

范育奇¹, 顾智华¹, 张金龙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] 介绍了一种采用叠栅信号实现超精密定位的定位方法, 首先建立了衍射叠栅信号和相对位移关系的数学模型, 并在 MATLAB 仿真软件的辅助下完成了对其定位特性的研究. 探讨了光栅倾斜对定位精度的影响, 倾斜角越大, 定位点的偏移越大, 为确保高的定位精度, 光栅的倾斜角度必须控制在一定范围之内. 研究发现激光束束径和莫尔信号之间存在一定关系, 当激光束直径为光栅常数的 11 倍及以上时, 激光莫尔信号几乎不受外界干扰的影响, 此时能够达到更高的定位精度. 同时, 分析了不同光栅常数对定位精度、定位行程的影响, 并进而提出了粗光栅与细光栅相结合的两段式复合定位技术, 可使定位装置在较大的行程范围内实现高精度定位. 实验表明, 采用衍射叠栅信号的超精密定位可获得 ± 10 nm 的定位精度.

[关键词] 叠栅信号, 超精密定位, 光栅倾斜, 光栅常数, 定位精度

[中图分类号] TP932 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2015)04-0009-05

Research on Speciality of Ultra-Precision Alignment Based on Moiré Signals

Fan Yuqi¹, Gu Zhihua¹, Zhang Jinlong¹, Liu Jingnan², Yoshihisa Uchida³

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

(3. Department of Intelligent Machinery Engineering, Aichi Institute of Technology, Toyota 470-0392, Japan)

Abstract: A measure to realize ultra-precision position based on Moiré signal is introduced. Firstly a mathematical model is established with respect to the diffraction double gratings and the relative displacement. And then study is conducted about the characteristics of position by using simulation software. Also the impact about position precision made by grating tilted is discussed. The result indicates that the larger tilt angle is the more anchor point offsets. So tilt angle of grating must be controlled in a certain range so that the higher positioning accuracy can be ensured. The relationship between Moiré signals and the laser beam diameter is studied, and it shows that when the laser beam diameter is 11 times more than the grating constant, the signal of laser stacked gate signals is difficult to be interrupted by interference noise. In this case, higher positioning precision is likely to be easily reached. Addition, the influence that different grating constant made on position accuracy and orientation schedule is analyzed, and then a technology of two-stages compound positioning of coarse and fine grating is raised up, which can make the positioning device realize higher position precision in a larger range. The experimental result shows that the fold grating signal can perform positioning accuracy of ± 10 nm.

Key words: Moiré signal, ultra-precision alignment, grating tilted, grating constant, position precision

采用衍射叠栅信号进行超精密定位是目前的一种先进技术, 涉及到激光技术、传感器、精密测量、数据采集与处理、精密驱动、自动控制等多门学科, 有着广泛的应用^[1-7]. 文献[2-3]研究了采用衍射叠栅信号实现超精密定位的定位技术, 建立了精密位移测量的数学模型, 通过计算机仿真对其定位特性进行了研究. 文献[4]、[7]分析了不同的光栅常数对定位精度、定位行程的影响. 本文在传统的精密定位方法的基础上提出了粗光栅与细光栅相结合的两段式复合定位技术, 可使定位装置在较大的行程范围内实现高

收稿日期: 2014-12-14.

基金项目: 国家“863”计划(2005AA303610)、江苏省自然科学基金(BK2009406).

通讯联系人: 张金龙, 教授, 研究方向: 超精密定位及测量技术. E-mail: zjl0310@163.com

精度定位. 实验结果表明, 基于激光叠栅信号的精密定位可在1 mm的信号覆盖范围内获得 ± 10 nm的定位精度.

1 精密定位原理

光栅配置如图1所示, 两片衍射光栅处于平行状态, 当激光束垂直射入两片光栅时, 经两光栅的两次衍射, 形成透射的0次叠栅信号 $U_2(\Delta x, G)_0$, 0次叠栅信号的强度为^[8-9]:

$$U_t(\Delta x, G)_0 = A_2 \int_{-b_2/2 + \Delta x}^{b_2/2 + \Delta x} U_1(x_1, G) dx_1, \quad (1)$$

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

式中, $U_1(x_1, G)$ 为光栅1在激光的照射下衍射形成的0次叠栅信号; A_1 、 A_2 为衍射光栅的衍射系数; $r = [G^2 + (\Delta x + md)^2]^{1/2}$; $\Delta x = x_1 - x_0$ 为光栅1和光栅2之间的相对位移; λ 为激光束波长; $k = 2\pi/\lambda$ 为光波波数; d 为两片光栅的光栅常数; G 为光栅1和光栅2之间的距离; b_1 为光栅1的光栅缝隙宽度; b_2 为光栅2的光栅缝隙宽度; M 为被光束所照射到的光栅条数.

对0次叠栅信号的位移特性进行计算机仿真, 可得到如图2所示的三维图形. 从图中可看出, 叠栅信号的强度受到两片光栅之间的相对位移以及两光栅之间间距的影响, 其变化分别呈现出周期性变化——当相对位移发生改变时, 信号变化周期约为一个光栅常数 d ; 当两光栅间的间距发生变化时, 尤其当 G 为 d^2/λ 的整数倍时, 其强度变化最为明显, 亦即变化幅度最大.

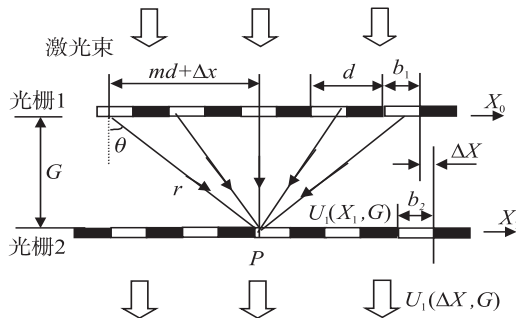


图1 光栅的配置结构

Fig.1 Arrangement of gratings

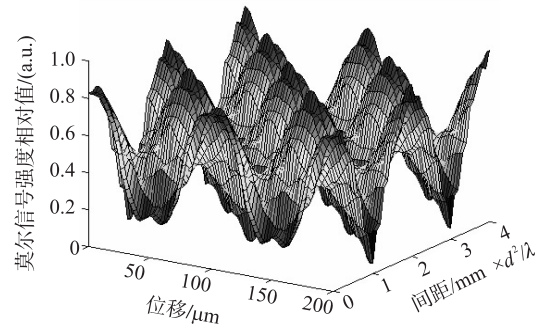


图2 0次叠栅信号的仿真曲线

Fig.2 Simulation curve of 0-th order Moiré signal

精密定位时, 光电传感器将衍射产生的0次叠栅光信号转换为电信号, 并通过微型计算机进行数据采集、处理, 测量出两光栅间相对位移的大小及方向, 并驱动定位机构进行超精密定位. 为得到高的定位精度, 可采用差动叠栅定位方法^[10-13]. 差动叠栅定位装置由两组特殊的衍射光栅构成, 定位时可得到相位相反的两个0次叠栅信号, 将这两个叠栅信号的差(即差动叠栅信号)作为计算机的控制信号. 由于这种控制信号是两个反相信号之差, 因此可将反映位移变化的叠栅信号有效放大一倍, 提高了信号的灵敏度, 同时通过两个反相信号相减可有效消除干扰信号的影响, 进而提高定位精度.

2 光栅倾斜对定位准确度的影响

当第一片光栅以角度 θ 倾斜时, 如图3所示, 经光栅1衍射形成的叠栅信号为

$$U_1(x_1, G) = A_1 \sum_{m=-M}^M \int_{-b_1/2 + md}^{b_1/2 + md} \frac{\cos \theta + \cos(n, r)}{\sqrt{r}} \cdot \exp[-ik(r - \phi)] dx_1, \quad (3)$$

式中, $r = (x_2 - x_1, -z)$; $r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + z^2}$; $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; (n, r) 为向量 n 和 r 所构成的角度; $k\phi$ 为衍射光所对应的相位角, 其关系式为:

$$k\phi = k(a - x_1) \sin \theta, \quad (4)$$

式中, a 为第一光栅的中心至倾斜中心点间的距离, 为常数.

$U_1(x_1, G)$ 经过光栅2的二次衍射, 在光栅2出射处的二次衍射光复振幅为:

$$U_2(\Delta x, \theta) = \int_{-b_2/2 + \Delta x}^{b_2/2 + \Delta x} U_1(x_1 + \theta) \exp\left(i \frac{2\pi n x_1}{d}\right) dx_2, \quad (5)$$

式中, Δx 为 2 片光栅的相对位移; n 为衍射级次. 当 $n=0$ 时, 其 0 次衍射光复振幅为:

$$U_2(\Delta x, \theta) = \int_{-b_2/2 + \Delta x}^{b_2/2 + \Delta x} U_1(x_1 + \theta) dx_2. \quad (6)$$

透射的 0 次叠栅信号强度 $I(\Delta x, \theta)$ 为:

$$I(\Delta x, \theta) = |U_2(\Delta x, \theta)|^2. \quad (7)$$

取 $\theta = 0^\circ, 0.05^\circ, 0.1^\circ, 0.15^\circ$ 代入上述关系式中, 进行计算机数值仿真, 可得光栅沿 X 轴方向倾斜时叠栅信号的位移特性曲线, 如图 4 所示, 图中定位点为两反相叠栅信号的交点. 由图可见, 叠栅信号的位移特性相对于 $\theta = 0^\circ$ 时向左偏移, 倾斜角度 θ 越大, 位移特性偏移越大, 且信号的振幅越趋减小. 此时, 定位控制点也随 θ 角增加向左偏移. 因此, 要保证定位装置具有较高的定位精度, 其光栅的倾斜角度一定要控制在合适的范围内.

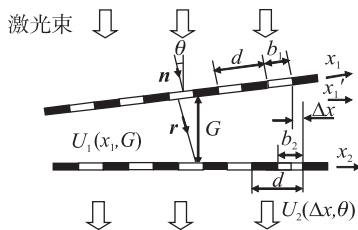


图3 倾斜衍射光栅结构
Fig.3 Structure of inclined diffraction

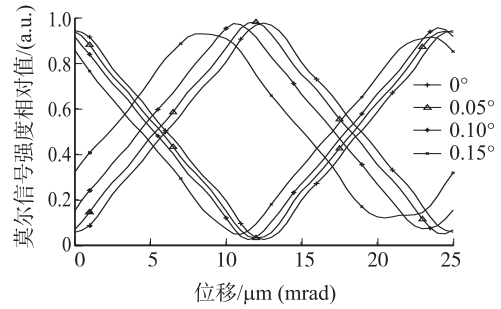


图4 光栅倾斜时叠栅信号位移特性
Fig.4 Change of the Moiré signals with the displacement of inclined diffraction

3 激光束直径和光栅常数对定位准确度的影响

3.1 激光束直径对定位准确度的影响

激光束直径大小对定位精度有着较大的影响. 激光束直径变小, 可减少外来噪声的干扰, 有利于定位精度的提高. 但激光束直径变小, 使衍射产生的叠栅信号的强度相应减弱, 降低了位置检测信号的灵敏度. 因此, 选取合适的激光束直径对定位精度有着重要的作用. 为此, 取光斑覆盖的光栅条数 M 为参变量, 取两片光栅参数为: $d=100 \mu\text{m}$, $b_1/d=0.5$, $b_2/d=0.5$, $G=1 \times d^2/\lambda$, 代入式(1)~(7), 可得叠栅信号随 M 变化的位移特性曲线, 如图 5 所示.

从图中可以得出, 当光栅条数较少时, 叠栅信号强度会随 M 值的减少而变弱, 对定位精度影响较大. 但当 M 值为光栅常数 d 的 11 倍及以上时, 叠栅信号强度较强, 且信号强度受外界干扰噪声影响很小, 几乎保持不变, 可使定位装置获得较高的定位精度.

3.2 光栅常数对定位准确度的影响

根据精密定位的原理可知, 精密驱动机构的工作行程为一个光栅常数的控制范围, 处于精密定位点两侧 $d/2$ 处, 定位点处的差动叠栅信号光强为零. 图 6 为光栅常数 $d=25 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 时对应的差动位移特性曲线. 当光栅常数较小时, 位移特性曲线在精密定位点附近呈现较陡的趋势, 此时检测信号的灵敏度较高, 但定位信号捕捉范围较小; 当光栅常数较大时, 可扩大定位信号的捕捉范围, 但相应的差动叠栅信号曲线变化会变得更平坦, 使得信号的灵敏度较低. 因此, 为了能够在较大的信号捕捉范围内获得高定位精度, 本文提出了一种复合控制技术, 将粗定位与细定位结合起来, 形成两段式复合定位. 粗定位采用粗光栅, 以扩大信号捕捉范围为主; 精定位采用细光栅, 以提高定位精度为主; 这样可使精密定位装置在较大的信号捕捉范围内实现高精度定位.

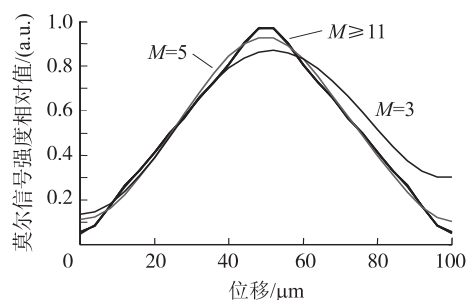


图5 光斑对叠栅信号的影响

Fig.5 Influence of diffraction spot on Moiré signal

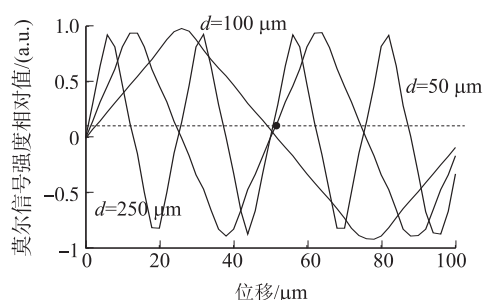


图6 不同光栅常数的差动叠栅信号曲线

Fig.6 Curve of differential Moiré signals with different grating constant

4 实验研究

应用激光叠栅信号构建的精密定位实验台如图7所示. 实验所用激光光源为半导体激光, 功率1.8 MW, 波长 $\lambda=633\text{ nm}$, 两片衍射光栅间的间距设置为 $G=1\text{ mm}$. 精密定位台设置粗定位和微定位两套定位机构. 粗定位机构是由具有高精度的步进电机与具有精密滚珠的丝杠机构组成的, 其作用是进行粗定位, 当微型计算机发出一个脉冲时, 对应的步进电机旋转 0.36° , 进而驱动粗动台相应移动 $0.2\text{ }\mu\text{m}$. 微定位机构的作用则是进行精定位, 在本文中使用了压电陶瓷进行精密驱动. 定位时, 当激光器发出的激光束经过分光镜垂直透过光栅副, 产生透射的0次叠栅信号, 在光电二极管的作用下转换为电流信号, 经由电流/电压转换、放大、滤波等信号处理, 最后由A/D转换器将模拟信号转换成数字信号输入计算机, 计算机依据所接收到的信号判断信号的大小、极性, 进而给步进电机发出相应的驱动脉冲信号, 使步进电机通过丝杠机构驱动粗动台运动, 达到粗定位的定位精度. 粗定位完成后, 工控机再根据细光栅产生的叠栅信号发出相应的驱动信号, 精密驱动压电陶瓷微动台运动, 实现精定位. 图8所示为精密定位的实验结果, 粗定位精度为 $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$, 精定位精度为 $\pm 10\text{ nm}$, 工作行程为 1 mm .

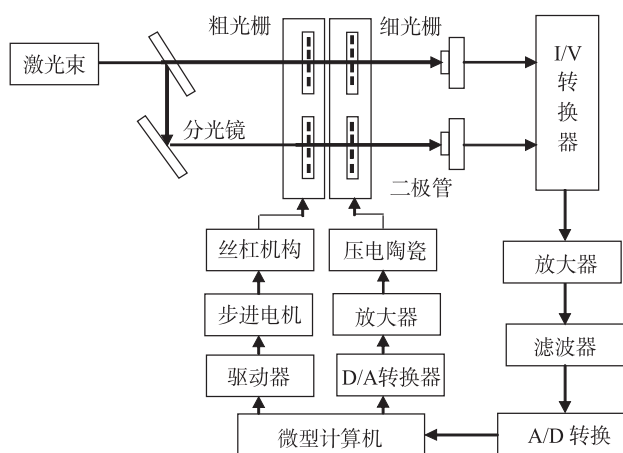
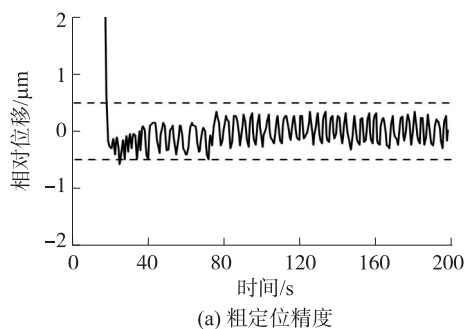
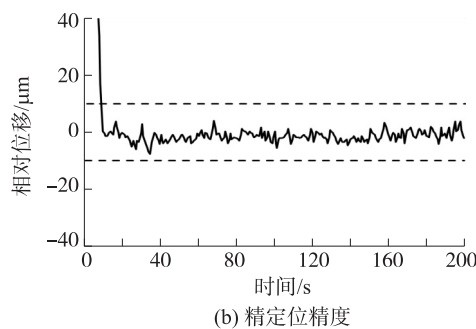


图7 精密定位工作台

Fig.7 Stage of precision alignment



(a) 粗定位精度



(b) 精定位精度

图8 精密定位实验结果

Fig.8 Result of precision alignment

5 结论

本文研究了采用衍射叠栅信号实现超精密定位的技术, 建立了精密位移测量的数学模型, 通过计算机仿真对定位特性进行了研究. 探讨了定位精度受光栅倾斜角度的影响程度, 定位点的偏移随倾斜角的增大而相应变大, 因此要实现高的定位精度, 必须将光栅的倾斜角控制在一定的范围内. 分析了不同光栅

常数对定位准确度的影响,进而提出了一种粗光栅与细光栅相结合的两段式复合定位技术,可使定位装置在较大的信号捕捉范围内实现高精度定位.此外,还探索了叠栅信号强度受激光束直径的影响程度,当激光束的束径达到光栅周期 d 的11倍及以上时,外界干扰噪声对莫尔信号的影响最小,有利于定位精度的提高.

[参考文献](References)

- [1] 陈希,楼平,余水宝,等.基于莫尔条纹的光纤惯性式振动传感器系统[J].光电子·激光,2014,25(1):13-19.
CHEN X, LOU P, YU S B, et al. Moiré fringe based fiber optic inertial vibration sensor system[J]. Journal of optoelectronics · laser, 2014, 25(1): 13-19. (in Chinese)
- [2] GORDON J A, NOVOTNY D R. Simultaneous imaging and precision alignment of two mm wave antennas based on polarization-selective machine-vision[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2012, 61(11): 3 065-3 071.
- [3] ZHANG J L, YANG A K, LIU J N. Study on compound ultra-precision alignment technique[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2007, 28(10): 1 741-1 745.
- [4] AMTHOR A, ZSCHAECK S, AMENT C. High precision position control using an adaptive friction compensation approach[J]. IEEE transactions on automatic control, 2010, 55(1): 274-278.
- [5] 杨川,赵强,张志.智能控制在超精密定位中的应用研究[J].仪器仪表学报,2009(6):1 218-1 223.
YANG C, ZHAO Q, ZHANG Z. Application research on intelligent control system in ultra-precision positioning system[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2009(6): 1 218-1 223. (in Chinese)
- [6] SUWADA T, SATOH M, TELADA S, et al. Experimental investigation on focusing characteristics of a He-Ne laser using circular Fresnel zone plate for high-precision alignment of linear accelerators[J]. Review of scientific instruments, 2012, 83(5): 053301.
- [7] CONG S, LIANG Y. PID-like neural network nonlinear adaptive control for uncertain multivariable motion control systems[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2009, 56(10): 3 872-3 879.
- [8] 朱维斌,朱善安,叶树亮,等.基于相位跟踪原理的超精密定位平台研究[J].仪器仪表学报,2012,33(10):2 301-2 306.
ZHU W B, ZHU S A, YE S L, et al. Research on ultra-precision positioning platform based on phase tracking[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2012, 33(10): 2 301-2 306. (in Chinese)
- [9] 张金龙,徐慧,刘京南,等.反射式超精密定位智能控制系统的研究[J].光电子·激光,2011,22(8):1 203-1 206.
ZHANG J L, XU H, LIU J N, et al. Research on intelligent control system with reflective ultra-precision positioning[J]. Journal of optoelectronics · laser, 2011, 22(8): 1 203-1 206. (in Chinese)
- [10] 王一刚,蒋刚毅,郁梅,等.基于光照分离模型的显微图像清晰度判定[J].光电子·激光,2013,24(11):2 226-2 232.
WANG Y G, JIANG G Y, YU M, et al. A micro-image definition assessment method based on illumination eliminated model[J]. Journal of optoelectronics · laser, 2013, 24(11): 2 226-2 232. (in Chinese)
- [11] ZHAO S W, CHEUNG N C, GAN W C, et al. High-precision position control of a linear-switched reluctance motor using a self-tuning regulator[J]. IEEE transactions on power electronics, 2010, 25(11): 2 820-2 827.
- [12] 邢德奎,达飞鹏,张虎.圆形目标精密定位方法的研究与应用[J].仪器仪表学报,2009(12):2 593-2 598.
Xing D K, Da F P, Zhang H. Research and application of locating of circular target with high accuracy[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2009(12): 2 593-2 598. (in Chinese)
- [13] ZHANG J L, XU H, LIU J N, et al. PID control based on fuzzy neural network for precision angular alignment[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2012, 33(3): 549-554.

[责任编辑:严海琳]