

同心圆光栅二自由度误差测量系统

朱建忠, 李 宁, 李圣怡

(国防科技大学机电工程及自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 提出了一种基于同心圆光栅莫尔条纹图象处理的超精密二自由度误差测量(TDFM)方法, 介绍了该测量方法的基本原理, 包括同心圆光栅莫尔条纹产生机理、三光栅光学系统原理、影像光学原理以及 CCD 莫尔条纹图象处理的方法。通过实验对实际测量系统进行了分析与标定, 并将测量结果与双频激光干涉仪进行了比较。结果表明该测量方法可实现超精密二自由度的误差在线测量及补偿, 测量精度优于 $0.1\mu\text{m}$ 。

关键词: 同心圆光栅; 莫尔条纹; 图像处理; CCD; 二自由度误差测量

中图分类号: O436.1 文献标识码: A

1 引 言

航空、航天、计算机、集成电路等高技术产业需要大量的精密、超精密零件, 制造这些零件必须有高精度的机床。提高机床精度一般来讲有两种基本方法: 误差防止和误差补偿。误差防止是试图通过设计和制造途径消除可能的误差源。误差补偿涉及机床误差测量以及对机床误差作用的纠正^[1]。

误差防止的典型实例是美国 Lawrence Livermore 国家实验室(LLNL)的大型光学镜面金刚石车床, 采用了高压液体静压轴承, 恒温油喷淋系统, 油温控制在 20 ± 0.0025 , 有效地消除了加工时的热变形, 该机床耗资一亿美元。目前学术界、工程界越来越多的人认识到, 用提高机床本身精度的办法来保证要求日益精密的零件加工精度, 代价是非常高昂的。在检测技术、计算机技术和数控技术飞速发展的带动下, 误差补偿技术已成为一个很有前途的技术发展方向。

误差补偿方法一般分为离线软件补偿与实时在线补偿两种, 离线补偿不仅耗时耗力, 操作烦琐, 而且只能补偿重复性误差; 在线误差补偿方法通过实时在线测量机床系统的误差(包括几何误差、热变形引起的误差、切削力造成的变形以及环境因素等造成的误差), 建立误差的数学模型进行校正^[2]。误差补偿技术的关键在于误差的实时在

线测量。由于采用软件的方法可以提高加工精度, 避免了采用硬件所带来的昂贵代价, 因此这种高精度、低成本的方法对提高国内超精密加工技术水平有着重要的意义。要实现在线测量, 必须要有使用方便、可靠, 精度高、成本低的测量仪器。

本文提出了一种新颖的基于同心圆光栅莫尔条纹图象处理方法的超精密二自由度误差测量(two-degree-of-freedom measurement TDFM)方法, 由此建立的测量系统具有以下特点: 可同时测量两个自由度的误差, 测量精度高、测量范围大, 抗干扰能力强, 可用于在线测量及使用。实验表明该测量方法的两个自由度方向的测量精度在 200mm 的测量范围内均优于 $0.1\mu\text{m}$, 通过进一步的改进, 测量精度有望进一步提高。

2 TDFM 原理

2.1 TDFM 的光学系统设计

基于同心圆光栅莫尔条纹图象处理方法的二自由度误差测量系统(TDFMs)光学设计原理图如图 1 所示。该测量系统由四部分组成: 光源部分、三光栅光学系统部分、影像式光学系统部分和莫尔条纹图象接收部分。测量系统中只有标尺光栅是可以移动的, 其它部分均固定不动。标尺光栅在沿平行于激光光束的 x 方向移动的同时, 可测量出 y, z 两个自由度方向的误差。光源采用 He-Ne 激光, 通过准直透镜后成为准直光, 指示光栅

G_1 和标尺光栅 G 以及光栅 G_2 都是同心圆光栅, 其中 G_1, G_2 为透射式光栅, G 为反射式光栅。三光栅光学系统部分由 G_1, G 以及半透半反镜 P 组

成; 影像式光学系统部分由 4 倍放大镜和光栅 G_2 组成; 莫尔条纹图象接收部分则由目镜和 CCD 摄像机组成。

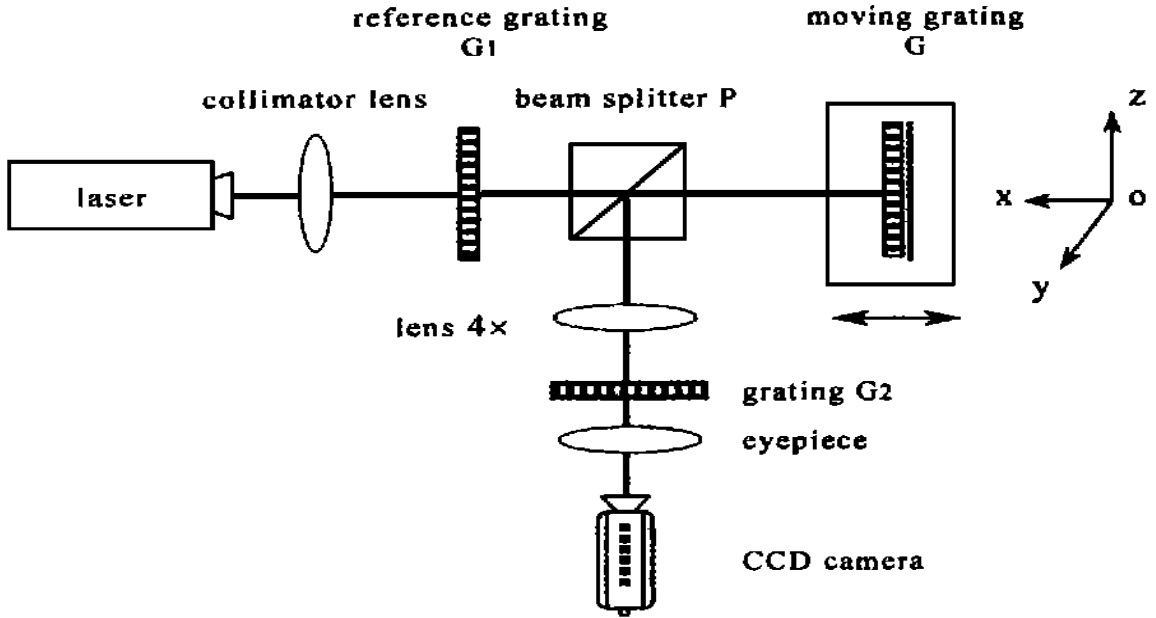


Fig. 1 Optical layout of the two-degree-of-freedom measurement system

准直光束经指示光栅(参考光栅) G_1 入射到反射式标尺光栅(移动光栅) G , 标尺光栅上的高反射刻线作用象一系列一维的针孔相机, 它在指示光栅平面上形成该指示光栅的倒像。三光栅系统的主要优点是可以在反射光栅和指示光栅间隔较大时进行工作, 而且即使在两光栅间隔变化时, 像也精确地重叠在指示光栅上。反射光栅 G 和指示光栅 G_1 中间加入半反射镜 P 的作用是改变光路, 使指示光栅的像 G_1 成象于垂直于入射光的光路上, 便于莫尔条纹接收。在标尺光栅移动过程中, 指示光栅的像 G_1 成像平面固定, 不随 G_1, G 之间的间距变化而变化。指示光栅与标尺光栅栅距相同, 根据光学原理, 可以推证三光栅系统所成的衍射像 G_1 的栅距与 G_1, G 相同^[3]。该像通过由 4 倍放大镜和光栅 G_2 组成的影像式光学系统, 最后在 CCD 摄像机上形成稳定的莫尔条纹。

测量系统中的指示光栅 G_1 、标尺光栅 G 栅距均为 $6\mu\text{m}$, 同心圆圈数分别为 100、200; 光栅 G_2 栅距为 $24\mu\text{m}$, 同心圆圈数为 99。

2.2 同心圆光栅莫尔条纹产生机理

同心圆光栅采用透射系数按余弦规律变化的正弦(振幅)光栅(如图 2 所示)。考虑两片直径相同(记为 D), 只是栅距有微小差别的一维正弦同心圆光栅迭合(迭合时偏心距为 ϵ , 偏心角为 φ), 如图 3 所示, 其中一块记为 G_s , 另一块记为 G_m ;

G_s 上刻有 N 个圆, G_m 上刻有 $(N-1)$ 个圆。(即 G_s 栅距为 $\frac{D}{N}$, G_m 栅距为 $\frac{D}{N-1}$)。用强度为 I_0 的平面光波照射这两片光栅时, 以指示光栅 G_1 圆心为原点建立坐标系, 透射强度为:

$$I(r/R, \theta) = \frac{I_0}{4} + \frac{I_0}{4} \cos[2\pi N(r/R - \frac{\epsilon}{R} \cos(\theta - \varphi))] + \frac{I_0}{4} \cos[2\pi(N-1)r/R] + \frac{I_0}{8} \cos[2\pi(2N-1)r/R - N \frac{\epsilon}{R} \cos(\theta - \varphi)] + \frac{I_0}{8} \cos[2\pi(r/R - N \frac{\epsilon}{R} \cos(\theta - \varphi))] \quad (1)$$

公式(1)是透射强度的空间极坐标分布函数, 式中 $(r/R, \theta)$ 为空间点的极径和幅角。右边第 1 项是均匀透射率, 第 2、3 项保持了原有两片光栅的周期结构, 第 4 项是和频项, 其空间频率是相迭合的两块光栅空间频率之和, 第 5 项是差频项, 其空间频率是相迭合的两块光栅空间频率之差。由第 5 项生成的莫尔条纹是我们所需要的, 而第 2、3、4 项则是干扰项^[4]。相叠合的两块光栅具有较接近的空间频率, 第 5 项具有明显较低的频率, 采用空间频域滤波或空间域卷积的办法, 很容易将差频项从其它各项中分离出来。图 3 显示了圈数较少时的同心圆光栅及迭合生成的莫尔条纹形状。

在测量系统中做到两片光栅直径相同节距有微小差别这一点是通过影像式光学系统来实现的: 由 4 倍放大镜将指示光栅像 G_1 放大, 在指示光栅放大像 G_1'' 的成像位置上放置光栅 G_2 与之迭合生成莫尔条纹。上述调整通过微调装置实现。莫尔条纹图象接收部分除目镜和 CCD 摄象机之外还包括光阑、滤光片等光学元件。

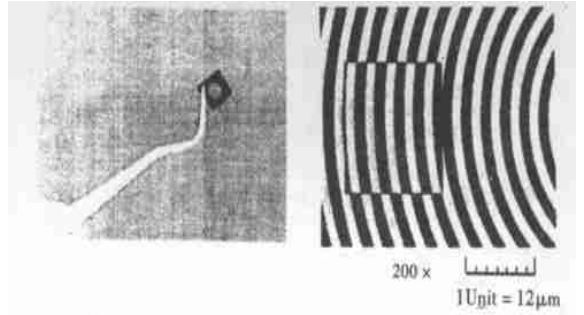


Fig. 2 Concentric-circle grating

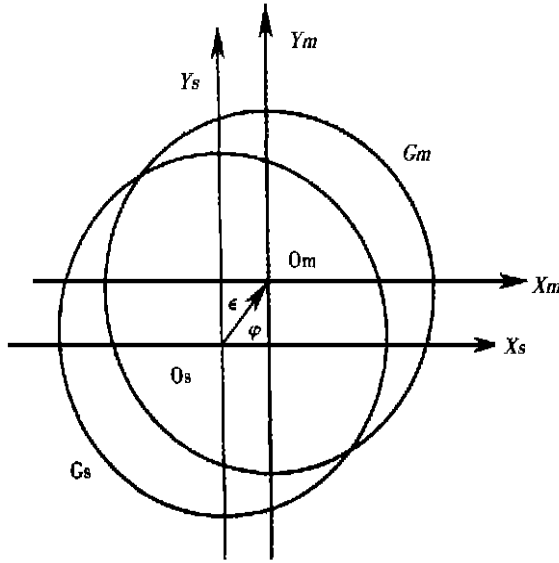


Fig. 3 G_s and G_m overlapping $N/(N-1) = 10/9$

莫尔条纹经目镜放大后被 CCD 摄像机所捕捉, 实际测量系统由 CCD 摄像机所捕捉的莫尔条纹图像如图 4 所示。

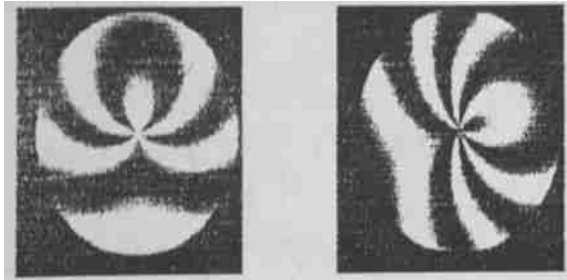
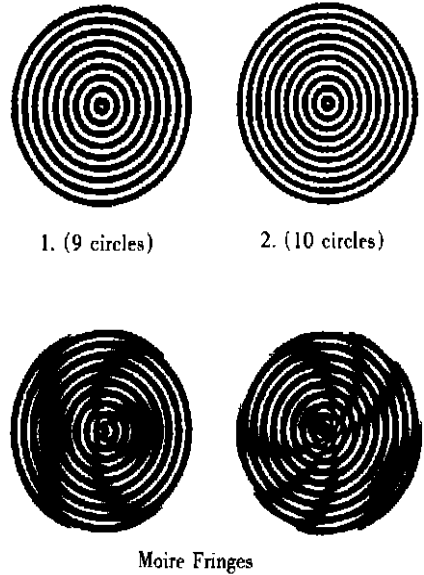


Fig. 4 Moire fringe images

莫尔条纹图像所蕴涵的以极坐标形式表示的两维信息(偏心距 ϵ 与偏心角 φ), 可以通过下列 Fourier 变换公式求得^[5]:

$$\Psi_w(\theta) = \tan^{-1} \frac{I(\frac{Ri}{n}, \theta) \sin \frac{2\pi i}{n}}{I(\frac{Ri}{n}, \theta) \cos \frac{2\pi i}{n}} \quad (2)$$

$$\Psi(\theta) = 2\pi m + \Psi_w(\theta),$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots (m \text{ 为条纹级次}) \quad (3)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \Psi(\frac{2\pi i}{n}, \theta) \sin \frac{2\pi i}{n}}{\sum_{i=0}^{n-1} \Psi(\frac{2\pi i}{n}, \theta) \cos \frac{2\pi i}{n}} \quad (4)$$

$$\epsilon = \frac{R}{\pi V n} \left[\left(\sum_{i=0}^{n-1} \Psi(\frac{2\pi i}{n}) \cos(\frac{2\pi i}{n}) \right)^2 + \left(\sum_{i=0}^{n-1} \Psi(\frac{2\pi i}{n}) \sin(\frac{2\pi i}{n}) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: N 为光栅同心圆圈数, R 为光栅半径, n 为 Fourier 变换常数, θ 为图象像素点的幅角。将极坐标形式转化为直角坐标形式, 便可得到 y, z 两个自由度方向的误差。

2.3 莫尔条纹图象处理

从上述 Fourier 变换公式(4)、(5)可以看出计算二维误差的方法实际上可起到低通滤波器的作用,这种自滤波的功能可有效地抑制 CCD 莫尔条纹图象的高频噪声成分,使图象处理的算法在一定程度上得到简化。莫尔条纹图象处理过程包括两部分:莫尔圆的特征参数提取,特征参数指莫尔圆的圆心以及半径三个参量;莫尔条纹图象的两自由度方向的误差计算。我们编制的莫尔条纹图象处理软件可实现下列功能:

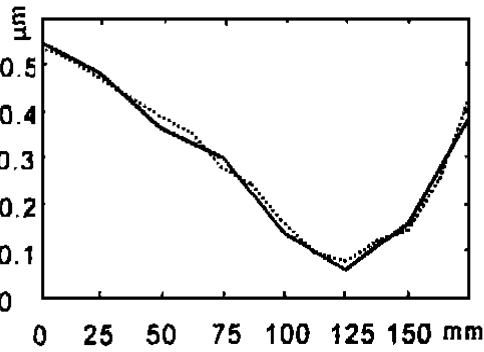
- 在测量过程中实时监测莫尔条纹的变化。
- 莫尔条纹图像预处理,包括直方图均衡,图像增强,图像锐化,边缘检测,轮廓细化,二值处理等过程,最终用最小二乘法实现对莫尔圆的圆心与半径的识别。由于莫尔圆在所采集到的一系列莫尔条纹图像中位置固定,这一过程可以离线处

理。

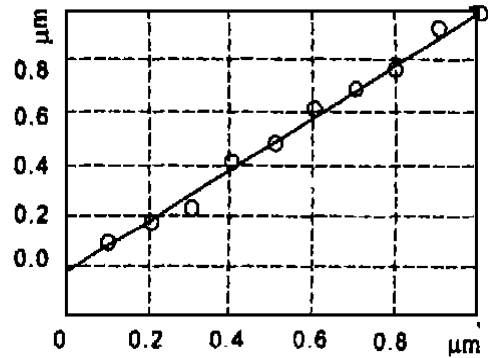
· 在标尺光栅 G 移动过程中根据外部定时器所发出的定时信号对莫尔条纹图象进行采样,在一个采样周期内(0.4s)完成采样图象的 y、z 两自由度方向的误差复现工作。

3 测量结果

二自由度误差测量的工作首先用本系统和 HP 双频激光干涉仪进行了比较,结果显示非常吻合。之后用超精密压电陶瓷二维微动平台对该系统进行标定,图 5 展示了 z 方向误差的比较以及标定的情况,结果表明其测量精度优于 0.1 μm 。



—laser interferometer.....TDFM



linearit calibration

Fig. 5 Error measurement comparison and linearit calibration

4 结 论

基于同心圆光栅莫尔条纹图象处理的超精密二自由度误差测量(TDFM)方法是一种新颖的误差测量方法,可实现两自由度误差的在线测量,测量范围大,精度高,数据处理速度快。由于属于光学非接触测量,避免了传统测量方法中常见的机械或电磁方面的干扰。通过实验表明该测量方法

的两个自由度方向的测量精度在 200mm 的测量范围内优于 0.1 μm 。它本身的这些优点使其可用于超精密过程的误差测量与补偿工作,有很好的应用前景。

进一步的工作包括提高该测量系统的精度,比如选用高分辨率的 CCD 摄像机和高质量的图象采集卡,优化光学系统以及改善莫尔条纹图象处理算法等,使测量精度进一步提高,并最终将该测量系统用于在线补偿。

参考文献:

[1] 倪军.数控机床误差补偿研究的回顾与展望[J].中国机械工程,1997,8(1):29-33.
 [2] Ni J, Huang P S, Wu S M. A Multi-degree-of-freedom measuring system for CMM geometric errors[J]. Journal of Engineering for Industr, 1992, 114(8): 362-369.
 [3] 郑立.三光栅系统[J].光学仪器,1982,4(1),35-42.
 [4] 黄恩令等.同心环形光栅莫尔条纹的机理[J].光电子.激光,1992,3(4):193-200.
 [5] Park Yoon-Chang, Kim Seung-Woo. Optical measurement of spindle radial motion b Moiré technique of concentric-circle gratings[J]. Int J Mach Tools Manufact, 1994, 34(7): 1019-1030.

A two-degree-of-freedom measuring system based on concentric-circle gratings

ZHU Jian-zhong, LI Ning, LI Sheng-i

*(Department of Mechatronical Engineering and Instrument,
National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)*

Abstract: A method is presented for ultra-precision two-degree-of-freedom measurement (TDFM) based on image processing of interferential fringes in real time, which are generated by three concentric-circle gratings and captured by CCD (Charge coupled Device) camera. The basic measuring principles are described in this paper including the generation of Moiré fringes of concentric-circle gratings, three-gratings system, imaging optics, and the method of image processing. The actual measuring system is analyzed and calibrated through experiments and the measurement results are compared with laser interferometer system. Test shows that this system can be adopted to on-line measurement and compensation of ultra-precision process. It has a long measuring range of 200mm and can measure two dimensional error components at the same time with an accuracy of better than $0.1\mu\text{m}$.

Key words: concentric-circle grating; Moiré fringe; image processing; CCD; two-degree-of-freedom measurement(TDFM)

作者简介: 朱建忠(1968-),男。国防科学技术大学机电工程及自动化学院讲师、博士,主要从事超精密加工、在线检测与误差补偿技术研究。

李圣怡(1946-),男。国防科学技术大学机电工程及自动化学院院长,博士生导师。