

外差干涉测量系统调焦的定心方法的研究

于瀛洁 李鹏生 强锡富
(哈尔滨工业大学机电学院 哈尔滨 150001)

摘要 对光学系统进行调焦和确定旋转工作台的中心(本文称为定心)对许多测量系统来说是一个共性问题。本文结合一外差干涉测量系统,提出了一种简单易行的调焦和定心的方法,并对调焦和定心达到的精度进行了分析。

关键词 外差干涉 调焦 定心

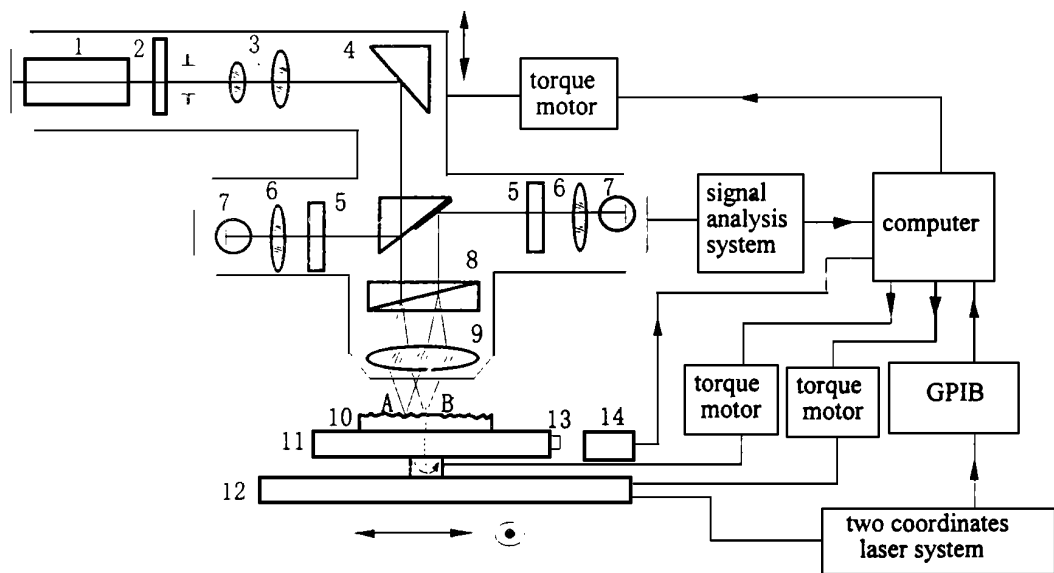
1 引言

大多数用光学非接触法进行测量的系统,在开始测量前都需要对光学系统进行调焦;对于一些具有精密转台的测量系统,往往需要确定转台旋转中心相对于某一标记的位置(本文称为定心)。因此,对光学系统进行调焦和对转台进行定心是一个共性问题。本文针对一用于测量表面粗糙度参数和三维形貌的外差干涉测量系统,提出了一种对光学系统进行调焦和对转台进行定心的方法。

用于测量表面粗糙度参数和三维形貌的外差干涉测量系统如图1所示。由于测量需要,要求对光学系统进行调焦,使被测表面位于物镜的焦平面上;同时需要对转台进行定心,确定其旋转中心相对于被测表面上一个光点的位置。本文针对此测量系统提出了一个采用 CCD 摄像技术进行调焦和定心的方法。

2 调焦和定心方法

图2为调焦和定心所采用的装置示意图。用一块不透光的挡片遮住从光学系统出射的一束光,另一束光射在硫酸纸上。此硫酸纸用一支架张紧支在旋转工作台上,在硫酸纸下面的工作台上放一 CCD 摄像机。射在硫酸纸上的光形成一个光斑,在 CCD 像面上得到这一光斑所成的像。光斑的中心坐标通过质心算法求得^[1]。设某个光斑由 n 个像素组成,每个像素都对应确定的空间坐标 x_i, y_i 及灰度传值 $P(x_i, y_i)$, 则该光斑的质心坐标为



1. laser 2 $\lambda/4$ 3 downside telescope 4 reflector 5 polarizer 6 lens
7 photodetector 8 wollaston prism 9 microscope objective 10 sample
11. rotary table 12 movable table 13 mark 14 proximity switch

Fig. 1 Schematic of the heterodyne interference measurement system

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i P(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n P(x_i, y_i)} \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i P(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n P(x_i, y_i)}$$

\bar{x} 和 \bar{y} 是计算机内存图像数的质心坐标, 通过一定的当量换算可折算成实际图像光斑中心的
空间坐标, 同时也可求出光斑半径, 根据测出的光斑半径和中心位置, 用下文所述方法进行调
焦和定心。

2.1 确定放大倍率

为了达到调焦和定心的目的, 首先必须对 CCD 摄像机的
放大倍率进行标定。具体标定方法是:

- (1) 在硫酸纸上打一小孔, 并精确测量此孔大小;
- (2) 用图2中所示的挡片遮住射向表面的两束光;
- (3) 用 CCD 对小孔成像, 计算小孔成像的大小, 得出
CCD 上一个像素相当于被测尺寸的大小。

2.2 调焦方法

采用图2所示装置。考虑到激光光束的高斯型分布, 它
通过物镜后在其焦面上光点直径最小, 在离焦时光点直径
会变大, 其值为

$$d = d_0 \sqrt{1 + \left(\frac{4\lambda}{\pi d_0^2 Z}\right)^2} \quad (1)$$

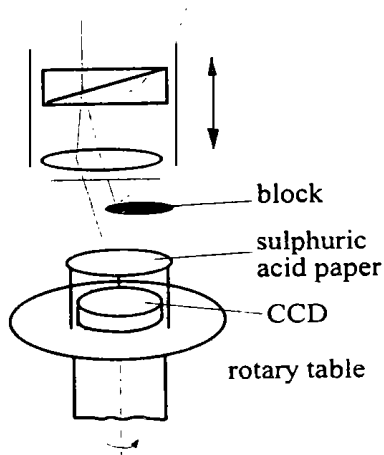


Fig. 2 Schematic of the equipment
for focusing and detem ining
center

式中 d_0 为激光束的最小直径; Z 为离焦距离, λ 为激光波长。因此, 当上下调整光学系统时, 硫酸纸上光点的大小发生变化。通过成像系统的标定, 已得出了光点成像的放大关系, 因此, 通过 CCD 所成图像进行图像处理, 就可计算出光点的实际直径。上下调整光学系统, 并实时观察计算出的光点直径大小, 调整到光点直径最小为止, 此时说明硫酸纸面处于物镜的焦平面上。在对工件表面进行测量时, 应调整工件位置使其被测表面位于与硫酸纸等高的位置, 即位于物镜的焦平面上。

2.3 定心方法

仍采用图2所示装置。调整 CCD 的方位使 CCD 的横列与一气浮导轨移动方向平行, 使 CCD 的纵列与另一个导轨移动方向平行。连续旋转工作台, 当射在硫酸纸上的光点不位于工作台旋转中心时, 光点中心的轨迹是以旋转中心为中心的圆。在工作台旋转过程中, 用 CCD 摄像系统测出光点的中心偏离扫描圆中心的距离, 用双坐标激光测量系统控制移动步距, 用计算机控制导轨的移动, 不断调整旋转工作台的位置, 直到光点扫描圆为一点为止。这时, 说明光点位于旋转工作台的中心, 用双坐标激光测量系统记住此位置, 而此位置即为光点所在位置。当工作台沿气浮导轨移动时, 工作台旋转中心相对于此光点的坐标通过双坐标激光系统的测量就可确定, 达到了定心的目的。

3 误差分析

3.1 CCD 摄像机放大关系标定误差

在硫酸纸上加工一小孔, 经计量仪器测量其直径为 D , 计量仪器的测量精度为 $\pm \Delta D$ 。用 CCD 对此小孔成像, 在 CCD 像面上小孔的直径方向共占 k 个像素, 则 CCD 像面上一个像素对应的被测尺寸大小为

$$x = \frac{D}{k} \quad (2)$$

x 为像素当量。CCD 的不确定度为1个像素, 则像素当量误差为

$$\Delta x = \frac{D + \Delta D}{k} - \frac{D - \Delta D}{k + 1} \quad (3)$$

3.2 调焦误差

调焦是通过测量光点直径大小并进行比较来实现的。CCD 测量的不确定度为1个像素, 对应被测量光点直径的不确定度为

$$\Delta d = 2x \quad (4)$$

此变化对应到光点所处平面偏离物镜焦面的距离 Z , 由式(1)有

$$Z = \pm \frac{\pi d_0^2}{4\lambda} \sqrt{\left(\frac{d_0 + \Delta d}{d_0}\right)^2 - 1} \quad (5)$$

3.3 定心误差

定心是通过光点中心逼近光点扫描圆中心实现的。采用质心法确定光斑的中心, 其中心位置的分辨力可达 $\frac{1}{10}$ 像素。设双坐标激光测量系统的定位精度为 x , 若 $x < \frac{1}{10}$ 像素当量, 则判断

到光点中心离扫描圆中心两个坐标方向相差在 $\frac{1}{10}$ 像素当量以内时就可以停止了; 若 $x > \frac{1}{10}$ 像素当量, 则判断到光点中心离扫描圆中心两个坐标方向相差在 x 以内时就可以停止了。因此, 在两个气浮导轨移动方向上定心误差均为 $\pm (x \text{ 和 } \frac{1}{10} \text{ 像素当量中较大者})$ 。

4 测量结果及分析

4.1 标定结果

在硫酸纸上用电火花加工法加工一小孔, 用苏联 - 21型万能显微镜采用影像法测量其直径为 $D = 0.112\text{mm}$, 测量精度为 $\Delta D = \pm 3\mu\text{m}$ 。用 CCD 对其成像, 直径方向共占 $k = 490$ 个像素, 采用的 CCD 为 MTV - 1881EX, 像面尺寸为 $6.5 \times 4.8\text{mm}$, 则由式(2)可得 CCD 摄像机的像素当量为 $x = \frac{112}{495} = 0.226\mu\text{m}$, 由式(3)得像素当量误差为 $\Delta x = \frac{112+3}{495-1} - \frac{112-3}{495+1} = 0.013\mu\text{m}$ 。

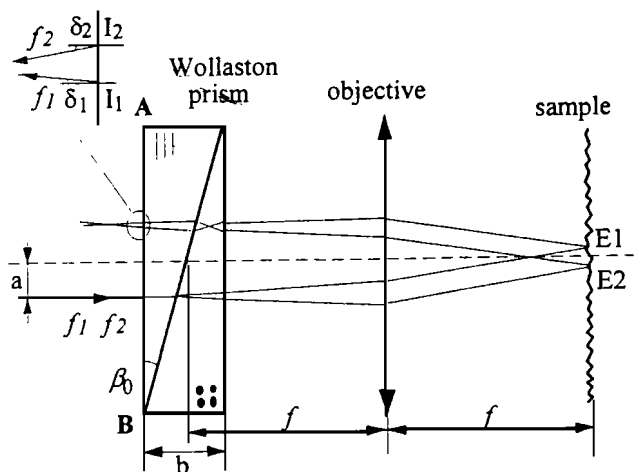
4.2 调焦误差

当光点位于物镜焦平面时的直径 $d_0 = 2\mu\text{m}$, 由于 CCD 测量不确定度所带来的测量光点直径误差由式(4)为 $\Delta d = 2 \times 0.226 = 0.452\mu\text{m}$, 对应的离焦量由式(5)为 $Z = \pm 3.519\mu\text{m}$ 。当被测表面离焦时, 会引起四方面的影响:

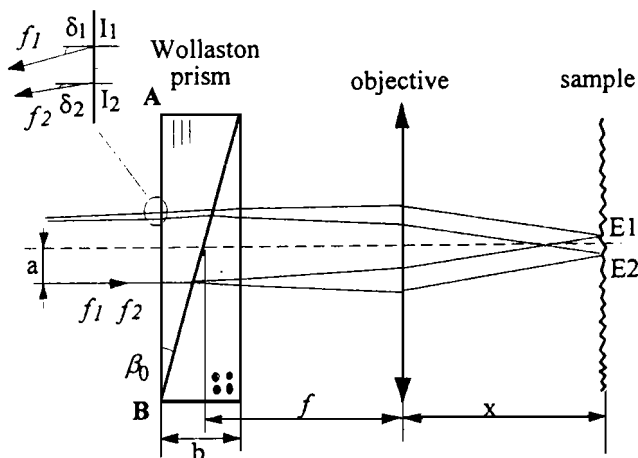
- (1) 使被测表面上光点直径变大, 影响测量系统的横向分辨力;
- (2) 离焦使两束相干光的光程差发生变化。由于本测量系统采用的是相对测量法, 而此光程差是一系统误差, 因此, 离焦引起的光程差的变化不会影响测量结果;
- (3) 使被测表面上光点间隔发生变化;
- (4) 使从 Wollaston 棱镜出射的光束间隔和方向发生变化, 影响到相干光束的重合率。

下面用具体数据(3)、(4)的影响进行分析。

图3为当光束经 Wollaston 棱镜、物镜和被测表面的光路图。为分析简便, 在二维空间进行



a) when the measured surface is on the focal plane



b) when the measured surface is not on the focal plane

Fig 3 Schematic of optical system

分析。设频率为 f_1 的光在 Wollaston 棱镜第一块棱镜中为寻常光, 在第二块中为非寻常光; 频率为 f_2 的光在 Wollaston 棱镜第一块棱镜中为非寻常光, 在第二块中为寻常光。Wollaston 棱镜材料对寻常光和非寻常光的主折射率分别为 $n_o = 1.65563$ 、 $n_e = 1.48514$, 空气的折射率为 $n_a = 1.00027$ 。图3中 $b = 5\text{mm}$, $a = 2\text{mm}$, $f = 18\text{mm}$ 。如图3a), 当被测表面位于物镜焦平面上时, 经计算, 被测表面上光点间隔 $|E_1E_2| = 676.4\mu\text{m}$, 出射处光束间隔 $|I_1I_2| = 26.1\mu\text{m}$, 两束光出射角分别为 $\delta_1 = 10.402^\circ$ 、 $\delta_2 = 10.420^\circ$ 。在图1中, 检偏器离 Wollaston 棱镜 AB 面的距离为 50mm , 则从 Wollaston 棱镜返回后重新会合一处的两相干光束的间隔约为 0.276mm , 光束的直径为 4.8mm , 因此, 相干光的不重合率为 5.8% 。

当被测表面离焦时, 如图3(b)所示, 取 $x = f + Z = 18 + 0.0023 = 18.0023\text{mm}$ (0.0023mm 为调焦误差)。计算得, 被测表面上光点间隔 $|E_1E_2| = 785.5\mu\text{m}$, 出射处光束间隔 $|I_1I_2| = 78.8\mu\text{m}$, 两束光出射角分别为 $\delta_1 = 0.098^\circ$ 、 $\delta_2 = 0.097^\circ$ 。则从 Wollaston 棱镜返回后重新会合一处的两相干光束的间隔约为 0.079mm , 光束的直径为 4.8mm , 因此, 相干光的不重合率为 1.6% 。当被测表面负离焦时, 计算结果类似。

从上述分析和计算结果可得出以下结论:

(1) 当被测表面离焦时, 被测表面上光点间隔发生了变化, 但其值在测量系统要求范围内。由于光点间隔数值是系统测量所必需的, 因此要求测量前对其进行精确测量, 这样, 离焦所引起的光点间隔变化不会对测量带来影响。

(2) 被测表面离焦时, 会影响到相干光束的重合率。本测量系统用光电元件接收干涉信号, 所需要的值是所转换出的电信号的相位, 因此, 当被测表面离焦时引起的相干光束重合率的变化不会对测量带来影响。

(3) 为了提高测量系统的横向分辨力, 应尽量减小调焦误差。

4.3 定心误差

气浮导轨的坐标位置采用双坐标激光测量系统进行测量, 其两个方向的定位精度为 $0.1\mu\text{m}$, $\frac{1}{10}$ 像素当量为 $x = 0.023\mu\text{m}$, 因此定心误差为 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 。下面分析此定心误差是否满足本测量系统测量表面质量的要求。

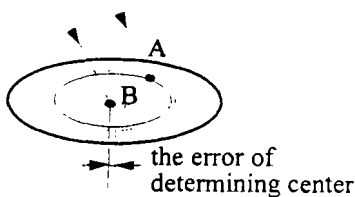


Fig 4 Schematic of scanning along a circle

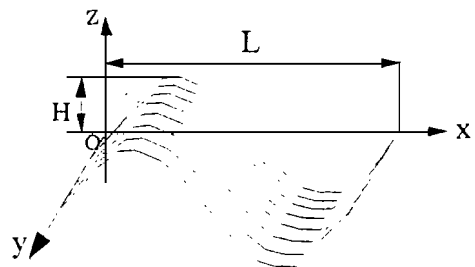


Fig 5 The supposed profile

用图1所示的外差干涉系统测量表面粗糙度参数时,采用的方法是圆扫描法,如图4所示。在测量中,使被测量表面上一个光点B位于旋转工作台的中心,当工作台旋转时,另一个光点A绕其做圆周扫描。这样,被扫描过的点相对于光点B所在位置的相对高度就可测出,经过数据处理就可计算出表面粗糙度有关参数。如果有定心误差,当工作台旋转时,光点B也会绕旋转中心以定心误差为半径做圆周扫描。因此,测量的参考位置就发生了变化,引起相对高度测量误差。为了讨论方便,我们设被测表面为一正弦波表面,如图5所示,并设旋转台中心位于坐标原点O。表面方程为:

$$z = H \sin\left(\frac{2\pi}{L}x\right)$$

当直径为 d 的光点射在此正弦波表面上时,它反映的高度是光斑所处位置的平均高度。当没有定心误差时,光点处于坐标原点,它所在位置的高度为零;当有定心误差时,在测量中,工作台旋转时,参考光点B所在位置高度发生变化,此变化直接引入测量值当中,带来测量误差。测量系统的光点直径 $d = 2\mu\text{m}$,从系统测量范围 $\nabla 12 \sim \nabla 14$ 各等级中取出典型值^[2],来计算一下当有定心误差时,光点B位于圆周上各扫描位置时的高度最大变化,即引入测量值中的最大误差。计算结果如表1所示。

Table 1 The calculation results of the maximum error

the order of roughness in old standard	H (μm)	L (m)	maximum error (nm)
$\nabla 12$	0.05	20	1.5
$\nabla 13$	0.025	14	1.1
$\nabla 14$	0.01	10	0.6

从上述计算结果来看,用文中所提出的方法所实现的定心精度能够满足用外差干涉测量系统测量表面质量的要求。

5 结 论

文中给出了用CCD进行调焦的定心的具体方法,并对所能达到的精度进行了分析。从分析结果可看出,此方法是方便可行的,同时此方法也可用到其它光学系统和精密转台的调焦和定心中,可以通过提高CCD摄像机的分辨力、标定精度及改变物面与CCD摄像机的相互位置关系等,来提高调焦和定心的精度,以满足测量要求。

参 考 文 献

- 1 王庆有,孙学珠主编 CCD应用技术 天津:天津大学出版社,1993
- 2 吴松青编著.表面粗糙度应用指南 北京:机械工业出版社,1992

Research on Focusing and Determining Center for Heterodyne Interference System

YU Ying-Jie, LI Peng-Sheng, QIANG Xi-Fu
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract

To focus in optical system and to determine the center of rotary table are common problems in many measurement systems. The paper puts forward a method to focus and to determine the center of the rotary table combining a heterodyne interference measurement system. Then it analyses the accuracy of focusing and determining center and gives the results of an experiment.

Key words: Heterodyne interference, Focus, Determine center

于瀛洁 女, 1969年5月出生, 1996年3月哈尔滨工业大学精密仪器专业硕士研究生毕业, 现为精密仪器专业博士研究生, 主要从事激光检测方面的研究工作。