

文章编号:1000-582x(2001)03-0005-04

基于平面等倾干涉原理的平面度视觉测量系统

王洪¹, 王石刚¹, 薛联², 秦岚²

(1. 上海交通大学机械工程学院, 上海 200030; 2. 重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

摘要: 介绍一种基于平面等倾干涉原理的机器视觉高精度平面度测量系统。它利用等倾干涉原理, 通过 CCD 提取随平面度变化的明暗相交干涉圆环条纹信息, 根据条纹中心不变性和中心对称性, 以开始测量点适当级次条纹中心为参考条纹, 间隔 90° 建立 4 个扇形窗口, 对窗口内条纹信息处理, 得到细化后条纹与参考条纹径向间距, 参照前一测量点干涉条纹径向位置, 得到干涉条纹在各测点的变化量 N 。该 N 值既能反映出半波长整数倍, 又能反映半波长小数倍的测点高度差信息, 利用最小二乘原理, 处理 N 值, 得到极高精度的平面度测量误差。

关键词: 等倾干涉; 条纹跟踪定位; 机器视觉; 最小二乘法

中图分类号: TH 744.3

文献标识码: A

平面等倾干涉仪作为目前计量部门最高精度平面度测量仪器, 广泛地用于高精度的平面度标准件测量^[1]。由于该仪器完全通过人肉眼瞄准和读取模糊的干涉条纹数据, 同时通过手工或配以计算机进行复杂的运算, 得到被测量标准件的平面度误差, 结果使得测量效率和精度很难满足实际检测需要, 成为计量部门的一大难题。大量的研究文献介绍了用于不同场景的干涉条纹图像测量^[2-5]系统, 但没能从图像角度解决小数波长计数问题。为解决高精度条纹计数, 笔者介绍一种新颖的基于平面等倾干涉原理的平面度测试系统, CCD 摄像头用于提取随平面度变化的条纹图像信息, 依据条纹的中心对称原理, 只处理部分选定窗口中的条纹信息, 根据条纹在窗口中的位置和相邻前前一测量点条纹的位置, 得到测量点相对于起测点的条纹变化量, 它反映了测量点和起测点的高度差。该系统不仅能得到整数倍的条纹变化量信息, 同时可得到反映微小倍数的条纹变化量。试验证明, 由于系统解决好了干涉条纹的细分计数等问题, 因而具有非常高的测量速度和精度。

1 系统构成及原理

1.1 系统的构成

测量系统由两大部分组成, 如图 1 所示。

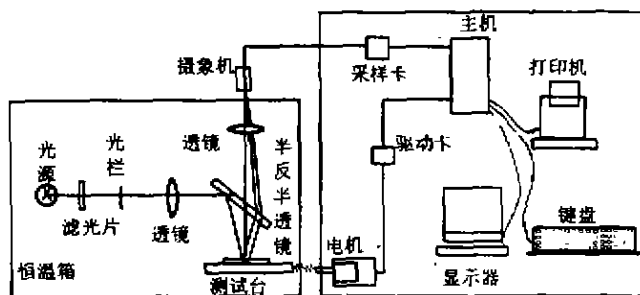


图 1 平面等倾干涉仪系统框图

光学和机械部分由光学成像部分、被测件和标准件的机械夹具及机械传动部分、以及用于等温的恒温箱和光源组成。

计算机图像采集、处理、控制部分, 一是步进电机、驱动器以及控制接口板, 用于机械传动控制; 二是图像采集部分, 它由图像采样卡和 CCD 摄像机和相应软件组成, 保证干涉条纹信息抓取; 三是计算机及相关外围设备软硬件, 所有的控制、存储、处理等工作由它完成。

1.2 平面等倾干涉基本原理

当入射光从一均匀介质以一定的入射角射向另一均匀介质时, 光在另一介质上下表面反射形成两束反

• 收稿日期: 2000-12-05

基金项目: 国家 863 项目资助(863-512-9913-04)

作者简介: 王洪(1966-), 男, 重庆市人, 上海交通大学博士生。主要研究领域为图像测量、机电控制。

射光(如图2)。由于两束反射光具有相干光的特征,因而在空间产生干涉现象,相同入射角的光形成同一级干涉条纹(如图3)。

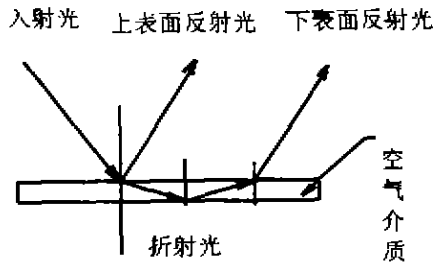


图2 等倾干涉原理

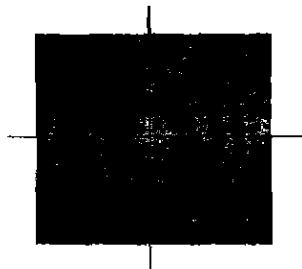


图3 等倾干涉条纹图

如果两束反射光的波面振幅分别为:

$$A_1(x, y) = a_1(x, y)e^{-i\varphi_1(x, y)} \quad (1)$$

$$A_2(x, y) = a_2(x, y)e^{-i\varphi_2(x, y)} \quad (2)$$

则两波面在空间干涉后光强分布是:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y)\cos\varphi(x, y) \quad (3)$$

其中:

$$a(x, y) = a_1^2(x, y) + a_2^2(x, y)$$

$$b(x, y) = 2a_1(x, y) \cdot a_2(x, y)$$

$$\varphi = \varphi_1(x, y) - \varphi_2(x, y)$$

当两束反射光的光强相等时,形成的干涉条纹的强度与光程差之间关系为:

$$I(\Delta) = \frac{I_{\max}}{2} \left(1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta) \right) \quad (4)$$

其中: I_{\max} —干涉条纹最大光强; Δ —两束反射光的光程差; λ —入射光波的波长。

由几何光学理论知,光程差与反射层介质厚度关系为:

$$\Delta = 2h \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \quad (5)$$

其中: h 为测量点介质层厚度, n 为介质的折射率, i 为入射光的入射角。

该测量系统利用等倾干涉原理,通过测量与入射角 i 直接相关的干涉条纹变化,进而推断出空气层厚度 h 的变化,得到被测量标准件表面的平面度。

1.3 系统光学成像原理

如图1所示,He-Ne激光器发出的淡黄色、波长为6328埃单色光,经过光栏的作用成为点光源,光栏同时也起到调节视场亮度的作用。点光源发出的光射到

聚光镜1上,经聚光镜的折射投到半反半透镜上,光经反射后射向放于被检测工件上面的标准平晶某一点,光穿过标准平晶后,在平晶与被测量工件间的空气层上、下两表面反射,形成两束相干的反射光,在 CCD 的成像物面上形成等倾干涉条纹。等倾干涉条纹经过摄像头光学系统的作用,在 CCD 的成像面上出现明暗相交的等倾干涉条纹。干涉条纹经图象采集卡采集,计算机处理,得到被测量点与起始测量点空气层厚度高差。当被测工件上各点顺次通过光照区斑点,CCD 视场中反映为不断变化的干涉圆环直径,这些直径反映各测量点的空气层厚度与起测点之差,对这些测量点高度差进行处理,得到被测量面的平面度。

2 干涉条纹信息窗口尺提取及条纹位置跟踪

2.1 窗口尺

光学系统形成的等倾干涉条纹是一系列同心圆环。CCD 摄像头采集到光学系统形成的干涉条纹后,根据干涉条纹图像的中央对称性,相同直径处的同心圆环其灰度值是相等的,为提高处理速度,用窗口作为冗余信息的屏蔽认为选定窗口部分(黑色区域内)条纹信号为有用信号,进行处理。窗口是这样建立的:在 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 四轴坐标上,以 30° 的扇区为界,根据干涉条纹的间距情况选择适当的扇形内外径,取窗口内外径间距为 $1.5d$,中央弧线为参考基准线, d 是相邻条纹间的象素点个数,建立四个窗口,窗口沿径向的中央线是参考基准线。沿着条纹的径向以象素为最小度量单位,因而可通过定位细化后的干涉条纹在窗口上的位置,精确判断出干涉条纹直径的大小(图4)。

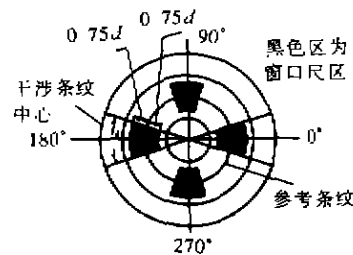


图4 窗口尺示意图

2.2 干涉条纹跟踪技术

2.2.1 跟踪问题的提出

以条纹变化量为测量对象的干涉条纹图象测量系统,随着被测量的变化,条纹的变化方向多是单方向的,同时它们忽略了非整数倍的条纹变化量(有的测量中也没有必要要求那么高精度)测量,且采用下面的公式计算被测量随条纹的变化值:

$$\Delta d = N \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

其中 N 是干涉条纹的变化值, 在研究中, 大都没有详细给出得到 N 值的方法。而在实际运用中, 不管干涉条纹的形成是基于怎样的光学成像原理, 在通过测量条纹的变化量而得到被测量参数的系统中, 怎样得到不仅反映整数倍条纹变化量而且得到包含小数倍条纹变化量的 N 值是非常重要和必须讲清楚的, 它是该类测量系统的关键。

2.2.2 干涉条纹图像的预处理

干涉条纹的灰度沿干涉圆环中心直径方向成余弦分布, 在相邻的条纹之间没有明显的界限, 因此条纹相对于参考基准的位置确定非常困难, 必须首先对干涉条纹图像进行预处理, 最终得到细化的条纹位置。窗口中的干涉条纹图像, 含有不同的灰度信息和噪声, 为便于条纹定位, 必须先进行去噪^[3]和条纹细化处理^{*}。笔者采用常规处理方法去噪, 进行条纹细化时, 对窗口中的条纹, 沿径向以灰度值极大部分区条纹的中心位置像素位置连线为细化的条纹位置, 图5外围弧段为经过细化后的干涉条纹在窗口中的位置, 内弧线为参考的基准线, 从该图可以判断出 N_2 的值。

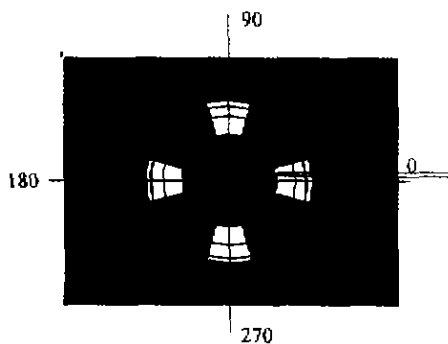


图5 细化后的干涉条纹和基准参考线图

2.2.3 条纹位置跟踪细节

条纹位置跟踪就是得到条纹变化量 N 的过程。测量开始, 首先建立窗口尺参考坐标。调节光学系统, 使成像系统所形成的干涉条纹位置基本在监视器屏幕的中心位置, 同时调出适当的干涉条纹级次数(一般4~6条)。运行找条纹中心位置的程序, 可以得到条纹的中心位置坐标, 同时把这点作为坐标中心。对窗口中条纹信息进行处理, 得到细化后的条纹。

精确得到干涉条纹随被测点的变化而产生的条纹变化量 N 是本文的关键。本测量系统把干涉条纹的变化量 N 分成两部分: 与半波长整数倍对应的条纹变化值 N_1 和与半波长非整数倍对应的条纹变化值 N_2 。 N_2 的值直接由细化后的干涉条纹在窗口尺中的坐标位置决定, 而 N_1 的值由本次测量点和紧邻的前一测量点干涉条纹在窗口中的位置关系决定。每个被测点相对

于起始被测点的条纹变化量 N 为 N_1 和 N_2 两部分的加权和, 即:
$$N = N_1 + N_2/d \quad (7)$$
 其中 d 为相邻干涉条纹间的像素点数, N 反映了被测点对起始测量点的高差信息。

窗口尺中的原始干涉条纹信息经去噪声、细化等处理, 条纹已经定位于窗口尺, 根据条纹在窗口尺中的位置判定 N_1 和 N_2 的值。 N_1 和 N_2 在起始测量点值均为0, 约定条纹在窗口尺参考基准线左边则表明空气层厚度变化值为正, N_2 的符号为正; 条纹在窗口尺参考基准线右边则表明空气层厚度变化值为负, N_2 的符号为负。同时约定每次都选最邻近窗口尺参考基准线的干涉条纹为判断条纹, N_2 的值为所选的判断条纹与窗口参考基准线的径向距离。同一条纹在窗口参考基准线的左边, 认为对应点空气层相对于右边位置空气层厚度变厚, 变厚的量与条纹离窗口参考基准线的距离 N_2 的值成正比。随着空气层厚度的较大变化, 即当窗口尺参考基准线左边的条纹继续往左移动, 在窗口右边新的条纹渐渐出现并向窗口参考基准线方向移动, 当右边的条纹距离窗口参考基准线的距离小于左边条纹离窗口参考基准线的距离时, 右边条纹改为判断条纹, 此时 N_1 的值增加1。同理, 如果被测量的点使空气层厚度变薄, 当前一测点的判断条纹在窗口参考基准线的右边, 而紧邻下一测点判断条纹在窗口参考基准线的左边, 则 N_1 的值减一。注意 N_1 发生变化的必要条件是: 窗口中必须要有两条干涉条纹分别位于窗口参考基准线两边。得到 N_1 和 N_2 的值后, 求加权和可得到 N 值。

3 测试结果

用该测试系统对一长度为220 mm的研磨平尺平面度进行测量, 用北京量具厂生产的长为210 mm的长平晶为标准。测量点间隔5 mm, 得到 N_1 和 N_2 的计数值(见表1)。用最小二乘方法处理上述值, 得到被测

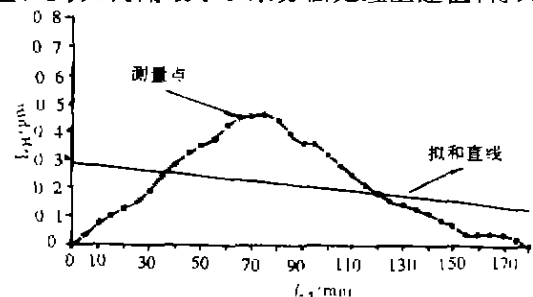


图6 误差曲线

* 张成递, 研磨平尺检定规程, 中国测试计量技术研究院测试员讲义

量件的平面度误差为 $0.28 \mu\text{m}$, 如图 6, 图中 L_H 为与起始测量点的高差, L_O 为距离起始测量点的距离。

表 1 测量点的 N_1 和 N_2 值

		距离 /mm													
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
N_2		0	15	36	50	65	-75	-55	-30	-8	10	23	37	58	
N_1		0	0	0	0	0	1*	1	1	1	1	1	1	1	
		距离 /mm													
		65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	
N_2		75	-75	-70	68	43	30	29	10	-10	-22	-45	-60	-75	
N_1		1	2*	2	1*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		距离 /mm													
		130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180			
N_2		71	61	55	43	47	35	21	18	18	10	0			
N_1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			

4 结论

提出了窗口尺干涉条纹跟踪测量方法, 该法不仅能准确得到整数倍的干涉条纹变化量, 而且能得到常规方法所不能得到的小数倍干涉条纹变化量, 因而大大提高了检测精度, 使检测精度从 $\lambda/10$ 提高到 $\lambda/100$ 。同时也使检测速度从 45 min/件 上升到 1 min/件 。最为深远的是给出了条纹跟踪的一种普遍适用方法, 随着 CCD 硬件设备的降价, 必将有广泛的市场应用前景。

参考文献:

- [1] 道克刚. 计算机图像检测在干涉测量中的应用[J]. 现代计量测试, 1999, (3): 17-22.
- [2] 周恕义, 郭敏贤, 金国藩. 采用图像处理技术的高精度干涉计量系统[J]. 仪器仪表学报, 1993, 14(1): 81-84.
- [3] 李介谷. 计算机视觉的理论及应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1991.
- [4] 肖国宏, 黄丽清. 用计算机细分干涉条纹技术的研究[J]. 激光杂志, 1999, 24(1): 53.
- [5] 王文生. 用泰曼干涉仪实时自动测厚度变化[J]. 仪器仪表学报, 1989, 10(1): 43-45.

Machine Vision Aided Testing System for Flatness Based on Equal Inclination Interference Theory

WANG Hong¹, WANG Shi-gang¹, XUE Lian², QIN Lan²

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: An approach is described on the automated tracking of interference circle fringe to get the flatness accurately based on the Equal Inclination Interference Theory (EIIT). The system, based on the theory of EIIT, can be applied to grasp the changing fringe information, which is white alternating with black through the CCD camera. Following the basic principle of fringes image centro-symmetric, we create some windows, process only the interference fringes information in the windows. According to the position of the processed interference fringe and the position of the last adjacent interference fringe in the windows, the interference fringe variation value N from the starting measured point is received, it implies the changed altitude value from the starting measurement point. This method allows us not only get the fringe information of the half-wavelength integer multiple but also denote those of the half-wavelength decimal multiple. The system is proved to be effective experimentally. It is useful in metrology department for the high-precision flatness standard unit.

Key words: equal inclination interference; machine vision; fringes tracking; weighted least square method

(责任编辑 张小强)