

表面粗糙度干涉图像处理系统

陈晓梅[†] 任冬梅 李志军

(长城计量测试技术研究所, 北京市, 100095)

Surface Roughness Interferogram Processing System

Chen Xiaomei, Ren Dongmei, Li Zhijun

摘要 介绍了表面粗糙度干涉图像处理系统和该系统以静态干涉图像处理技术对表面粗糙度检测的过程。该系统通过对一帧白光干涉图像的处理, 可对 Ra 值 $\leq 0.2 \mu\text{m}$ 的多刻线样板、试件表面粗糙度绝对、非接触、快速、自动地测量; 该系统通过对白光和纳光二帧干涉图像的联合处理, 以白光定位、纳光定度可对沟槽深度 $H \leq 5 \mu\text{m}$ 的标准单位刻线深度绝对、非接触、准确地测量。

关键词 干涉测量技术 图像处理 粗糙度测量

Abstract This paper introduces surface roughness interferogram processing system and how to use it to measure surface roughness by computer based image processing technology. The system can measure $Ra \leq 0.2 \mu\text{m}$ multi-groove specimen and testing surface by processing a white light interferogram, and measure $H \leq 5 \mu\text{m}$ step height by processing a white interferogram and sodium light interferogram, former for height measurement and later CCD calibration with the advantages of absolute, non-contact, high-speed and automation.

Key words Interferometry, Image processing, Surface measurement

前言

基于光波干涉原理的表面粗糙度干涉测量显微镜具有绝对非接触测量的优点, 量值可溯源到光波波长; 但要进行自动分析与测量来提高检测速度和干涉条纹判读分辨率, 应采用干涉条纹扫描测量技术。此可分为两类: 一类是直接位相测量技术, 如: 相位调制干涉^[1]、锁相干涉^[2]、波面剪切干涉^[3]、移相干涉^[4]等, 特点是数据处理简单快捷, 纵向分辨率较高; 但对环境敏感, 而且测量范围 $< \lambda/2$ 。另一类是静态图像处理技术^[5], 特点是直观、抗外界环境干扰能力强、不受温度变化的影响。虽然纵向分辨率没有直接位相测量技术高, 但经过理论和实验分析可扩大测量范围。

根据波动光学的干涉理论, 单色光干涉图像因其光强呈正弦分布, 而对表面高度偏差 $> \lambda/2$ (半个光波长, 约 $0.3 \mu\text{m}$) 的矩形沟槽深度测量时, 干涉条纹之间的相互重叠, 肉眼和计算机都会把槽深识别为 $< \lambda/2$ (见图 1 (a))。根据白光干涉图像光强分布具有最大和最小极值的特点对表面高度偏差 $> \lambda/2$ 的矩形沟槽深度测量时, 肉眼和计算机皆可从沟底干涉条纹和沟顶

干涉条纹的位置辨别出 $> \lambda/2$ 的槽深 (见图 1 (b))。因此, 我们建立表面粗糙度干涉图像处理系统, 实现 $Ra \geq 0.1 \mu\text{m}$, 刻线深度 $\geq \lambda/2$ 的表面粗糙度的准确测量。该系统突破以往干涉图像处理方法只能对轮廓高度偏差小于 $\lambda/2$ 的被测表面进行测量的限制, 不仅要处理单色光干涉图像, 还要处理白光干涉图像。由于单色光具有确定的波长, 对作为表面粗糙度量值传递标准的单刻线样板和多刻线样板的检测, 宜采用单色光作基准来减小测量不确定度。因此, 所建立的表面粗糙度干涉图像处理系统中, 干涉显微镜应带有白光光源和单色纳光源, 以白光定位、纳光定度。

1 系统的组成和干涉图像的采集

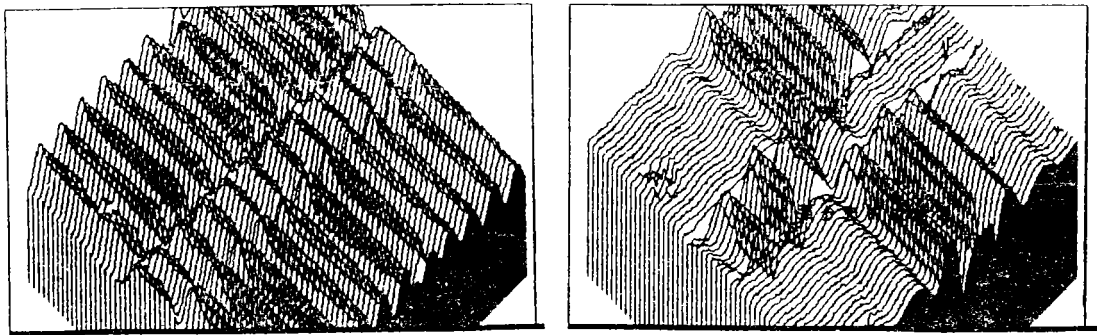
表面粗糙度干涉图像处理系统由干涉显微镜、CCD 摄像机、图像采集卡、图像监视器和计算机系统组成, 如图 2 所示。

为满足测量 $Ra \leq 0.2 \mu\text{m}$ 表面粗糙度时取样长度

1996-08-15 收稿

[†] 36 岁 女 高级工程师

读者服务卡索引号: 307



(a) 钠光

(b) 白光

图1 1.1 μm 槽深单刻成样板干涉图像

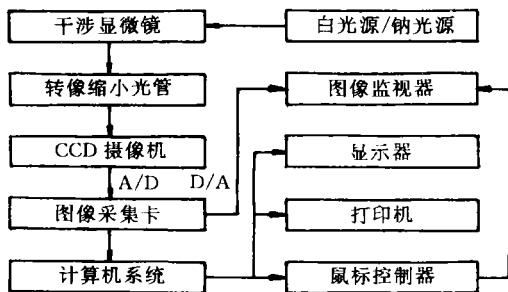


图2

0.25 mm 的要求,将 CCD 摄像机经过转象缩小光管与干涉显微镜观测光筒相连接接收干涉图像。通过监视器监视,调干涉显微镜,使干涉图像清晰,CCD 摄像机摄取干涉图像,由图像采集卡把干涉图像变换成数字量读入计算机,由计算机处理该图像,萃取出干涉条纹的边界线或中心线的坐标值,再根据表面粗糙度国家标准计算出表面粗糙度各参数。

2 干涉图像的处理

首先要采用图像处理技术,对表面粗糙度干涉图像中包含被测表面粗糙信息的干涉条纹边界线或中心线的萃取。包括:

(1) 数字低通滤波来清除图像噪声、平滑图像,使图像灰度趋于均匀。

(2) 为提高系统纵向分辨率和白光定位精度,在纵向图像灰度插值,使图像由 512 (H) × 512 (V) 像素变为 512 (H) × 1024 (V) 像素。

(3) 灰度变换来扩展对比度,增强图像中干涉条纹

的边缘。这不仅改善人对干涉图像视觉效果,更重要的是增强了计算机自动理解和处理干涉图像的能力。

(4) 用阈值分割算法把干涉图像二值化,设图像的灰度阈值为 Gt , 二值化处理的结果是对任一像素的灰度值有

$$\text{若 } g(m,n) \geq Gt, \text{ 则 } g(m,n) = 255$$

$$\text{若 } g(m,n) < Gt, \text{ 则 } g(m,n) = 0$$

根据干涉图像灰度直方图分布的特点,用一种算术平均灰度阈值分割算法^[6],进行二值化分割,然后由二值化图像萃取条纹边界线或中心线。

3 表面粗糙度参数计算

经过图像处理,选取的被测表面的轮廓曲线,以最小二乘中线标准计算出各表面粗糙度 Ra 、 Rq 、 Ry 、 Rz 、 Rp 、 Rv 、 S 和 Sm 等参数值,并显示和打印这些参数测量值、轮廓曲线和 Tp 曲线等。干涉显微镜测量基准是光波波长,因为任意相邻二条干涉条纹的间距是 $\lambda/2$ 。所以,还要标定单位像素坐标代表多少分之波长值。从粗糙表面的白光干涉图像中可测量出大于 $\lambda/2$ 的高度偏差;但因 CCD 器件的光谱响应对光中不同波长谱线是不同的,反映在图像上正、负零级暗条纹之间对应的白光测量波长就与白光平均波长不同,需要用单色光波长来标定。分析如下:

标定原理与用钠光波长通过标准波长对比系统标定干涉滤光片波长的原理相同。同样是在被测试件的位置上,放置一块平晶,只是所要标定的不是干涉滤光片波长,而是白光测量波长。如果 CCD 测量的一个白光条纹间距为 b_w , 任意一个钠光条纹间距为 b_n , 在一个白光条纹间距内,钠光应该有 $(b_w - b_n) / b_n + 1$ 个条纹间距,即

$$((b_w - b_n)/b_n + 1) \cdot (\lambda_n/2) = 1 \cdot (\lambda_w/2) \quad (1)$$

$$\lambda_w/2 = b_w/b_n \cdot \lambda_n/2 \quad (2)$$

其中, $\lambda_n/2$ 为纳光半波长, $\lambda_w/2$ 为白光测量半波长。针对不同干涉条纹间距和方向的纳光干涉图像来标定对应的白光干涉图像, 当画面上干涉条纹数在 6~15 条时, 所标定的白光光波测量半波长为 $0.3628 \mu\text{m}$, 白光测量半波长检定重复性为 $u=s=0.45 \text{ nm}$, 不确定度 $U=3u=1.5 \text{ nm}$ 。数据见表 1。

表 1

画面条纹数	b_w 像素	b_n 像素	$\lambda_w/2 \mu\text{m}$
15	82.8	67.4	0.3624
14	88.8	72.3	0.3623
12	98.9	80.3	0.3633
11	98.9	91.9	0.3630
10	113.1	106.3	0.3630
8	130.8	119.4	0.3634
7	160.6	130.7	0.3625
6	184.7	150.4	0.3623

因所标定的白光测量波长具有一定的误差, 该表面粗糙度干涉图像处理系统, 通过对白光干涉图像和单色光干涉图像的联合处理, 对标准单刻线样板的刻线深度绝对测量。由白光干涉图像标定出沟顶到沟底距离的像素数进行刻线深度的粗测, 纳光干涉图像标定出像素值, 并进行刻线深度的精测。在干涉条纹方向和宽窄调好不变的情况下, 对被检单刻线样板同时摄取白光和纳光二帧干涉图像。

4 技术指标和测量不确定度的对比

4.1 系统纵向分辨率分析

系统的纵向分辨率是由图像采集电路采集的像素数决定的。数字图像采集电路的像素数为 $512 \text{ (H)} \times 512 \text{ (V)}$ 个, 插值细分后为 $512 \text{ (H)} \times 1024 \text{ (V)}$ 。设读取的条纹间距为 D , 它根据画面上的条纹数而定。 $D=1024/N$, (其中 N 为条纹数), 则纵向分辨率 Δ 为

$$\Delta = (\lambda/2)/D = \lambda \times N / (2 \times 1024) \quad (3)$$

以画面上 5~6 条条纹为例分析, 系统纵向分辨率为 $0.002 \mu\text{m}$ 。当画面上有 10~11 条条纹时, 系统纵向分辨率则为 $0.003 \mu\text{m}$ 。当画面上有 20 条条纹时, 系统分辨率则为 $0.006 \mu\text{m}$ 。

4.2 系统测量不确定度分析

系统测量不确定度包括: ①基准光波半波长的检定误差 Δ_1 ; ②横向分辨率产生的误差 $\Delta_2 = \Delta b$; ③瞄准定位和瞄准定度误差 Δ_3 。所以, 测量不确定度表达式

$$U = (\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2)^{1/2} \quad (4)$$

干涉图像处理系统测量不确定度针对白光测量波长为基准, 测量多刻线样板 (U_{mgs})、精细表面粗糙度试件 (U_{srt}) 和白光定位钠光定度测量标准单刻线样板 (U_{sgs}) 以及人眼测量 (U_{man}) 时的不确定度分析结果列入表 2。

表 2 μm

画面上条纹数	U_{man}	U_{mgs}	U_{srt}	U_{sgs}
5~6	0.042	0.004	0.006	0.003
10~11	0.050	0.006	0.008	0.005
20	0.050	0.010		

4.3 对画面上干涉条纹为 5~6 条时, 系统测量不确定度的评定

把系统测量不确定度分为二部分: ①系统误差 U_s ——光波半波长检定误差; ②随机误差 U_r ——横向分辨率产生的误差、瞄准定位误差和瞄准定度误差。随机误差可通过对标准刻线样板不同位置、每次测量时对干涉条纹方向和条纹间距进行调整, 从而在每次都重新定位和定度的情况下多次测量, 测出系统测量重复性, 得到单次测量的实验标准偏差 s , 则随机误差 $U_r=3s$ 。

(1) 以白光测量波长为基准, 测量多刻线样板的随机误差 U_r ,

用 RaO 大约 $0.074 \mu\text{m}$ 的多刻线样板测量, 在样板不同位置上测量 10 次, Rai 的测量值分别为 $0.074, 0.076, 0.075, 0.076, 0.077, 0.075, 0.075, 0.074, 0.076, 0.075 \mu\text{m}$; Ra 平均值为 $0.076 \mu\text{m}$; 实验标准偏差 $s=0.001 \mu\text{m}$, 则 $U_r=0.003 \mu\text{m}$ 。

因为以白光测量波长检定误差 $U_s=0.0015$ 。所以, 以白光测量波长为基准测量多刻线样板时, 系统测量不确定度为

$$U = (U_r^2 + U_s^2)^{1/2} = (0.003^2 + 0.0015^2)^{1/2} = 0.004 \mu\text{m}$$

(2) 白光定位、钠光定度测量标准单刻线样板的随机误差 U_r ,

用刻线深度 H 大约为 $0.60 \mu\text{m}$ 的标准单刻线样板测量, 每次测量时都对干涉条纹方向和条纹间距进行调整, 从而使每次都重新定位和定度。共测量 10 次, 各测量值为 $0.601, 0.601, 0.603, 0.603, 0.602, 0.603, 0.603, 0.604, 0.602, 0.601 \mu\text{m}$; H 平均值为 $0.602 \mu\text{m}$; 标准偏差为 $s=0.001 \mu\text{m}$; $U_r=0.003 \mu\text{m}$ 。

钠光波长检定误差为 $U_s < 0.001$ 。所以, 白光定位

纳光度测量标准单刻线样板时,系统测量不确定度为

$$U = (U_1^2 + U_3^2)^{1/2} = (0.003^2 + 0.001^2)^{1/2} = 0.003 \mu\text{m}$$

4.4 系统与其它仪器测量表面粗糙度结果的比对

系统对多刻线样板 Ra 测量结果与泰勒索夫 6 型轮廓仪测量结果对比,如表 3 所示。

系统对单刻线样板刻线深度 H 测量结果与计量院单刻线样板检定装置的测量结果对比,见表 4。

表 3 μm

样板编号	泰勒索夫 6 轮廓仪	图像系统测量结果
	取样长度 0.80 mm (轮廓被滤波)	取样长度 0.25 mm (轮廓无滤波)
94197	0.210	0.231
93189	0.084	0.088
93207	0.069	0.076
93203	0.049	0.052
#13	0.015	0.013
#12	0.025	0.024

表 4 μm

样板编号	计量院检测结果	图像系统精测结果
92390	4.75	4.753
92466	1.12	1.109
92437	0.62	0.601
92306	0.14	0.141

5 结论

经过现有条件下的比对测量和对系统技术精度指标的测试分析,达到的技术指标是:测量范围为 $Ra \leq 0.2 \mu\text{m}$,刻线深度 $\leq 5 \mu\text{m}$;以画面上 5~6 条干涉条纹为例分析,纵向分辨率为 $0.002 \mu\text{m}$,测量不确定度平均为 $0.004 \mu\text{m}$;当画面上有 10~11 条条纹时,系统纵向分辨率为 $0.004 \mu\text{m}$,测量不确定度平均为 $0.007 \mu\text{m}$;当画面上有 20 条条纹时,系统纵向分辨率为 $0.007 \mu\text{m}$,测量不确定度约为 $0.010 \mu\text{m}$ 。

参考文献

- Osami Sasaki & Hirokazu Okazaki. Sinusoidal phase modulating interferometry for surface profile measurement. Appl. Opt. 1986, 15 (18): 3317~3140
- Takamasa Suzuki, Osami Sasaki & Takeo Maruyama. Phase locked laser diode interferometry for surface profile measurement. Appl. Opt. 1989, 28 (20): 4407~4410
- Makosch G & Drollinger B. Surface profile measurement with a scanning differential ac interferometer. Appl. Opt. 1984, 23 (20): 4544
- Prettyjohns K N. Charge-coupled device image acquisition for digital phase measurement interferometry. Opt. Eng. 1984, 23 (4): 371
- 李金泉, 藤村貞夫. 畫像處理を用いた表面粗さの測定. 計測自動御學會輪文集, 1985, 21 (12)
- 陈晓梅. 表面粗糙度干涉图像处理中的阈值选优. 光学学报, 1994, 14 (11): 1183

(上接第 6 页)

在一个支架上,探头端面与石英玻璃之间有 1 mm 距离,并且对准这个小孔进行非接触式爆燃温度测量。获得的爆震燃烧温度变化曲线见图 3。

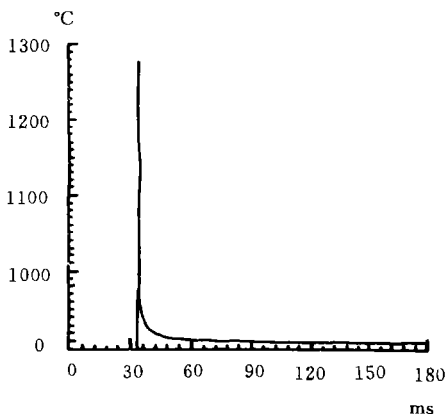


图 3 爆震燃烧温度—时间曲线

快速比色光纤测温系统测出的爆燃温度变化曲线,为研究飞机发动机的科学工作者提供了非常重要的试验数据。了解了燃烧过程中温度变化情况,促进了新型发动机研究进程。另外,这一测温系统还可广泛用于离心浇造、高频加热、陶瓷烧结等热加工领域的测温中,是一种多用途的新型测温装置。

参考文献

- 吉野新治等. 传感器电路设计手册. 北京: 中国计量出版社, 1989
- 刘瑞复. 光纤传感器及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1987
- 由富恩等. 辐射测温仪原理及其检定. 北京: 中国计量出版社, 1990