

表面三维形貌测量及其评定的研究

朱健军, 钟 渊, 刘 泊

(哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 对表面三维形貌测量技术展开了较为全面的研究, 测量过程由相移, 采样, 相位提取及数据处理等部分组成. 整个测量系统采用激光为干涉光源, CCD 为图像传感器, 压电陶瓷提供微小位移, 通过图像采集卡将干涉条纹采集到计算机内存. 文中采用上述理论对标准样块进行了测量, 计算机得到表面三维形貌图, 根据建立的基准面分离出粗糙度信息, 并由给出的参数评定数学模型, 编制出合理的软件, 计算出零件表面的三维参数. 最后给出实验结果和分析, 并提出下一步研究工作的设想.

关键词: 三维形貌; 形貌测量; 三维评定

中图分类号: TG502.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2683(2009)01-0043-04

Measurement and Assessment Evaluation of the Three-dimensional Surface Topography

ZHU Jian-jun, ZHONG Yuan, LIU Bo

(School of Measure-control Technology and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China)

Abstract: In this thesis, the author comprehensively composed all-round research on the technology of surface topography measurement. The measure process includes phase-shifting, sample taking, extracting of phase, data handling. The entire measurement system used the laser as the light resource, CCD as the sensor and PZT to provide microscopic translating, the computer sampled image and processed data with high speed. Adopted the theory, the 3-D surface topography of standard specimen was carried out. Then we separated the information of harshness basing on the base level, and made the rational software to calculate the 3-D parameter with the formula of parameters for valuation. Finally, as well as the further experiment was conceived.

Key words: 3-D surface topography; measurement of surface topography; 3-D assessment

零件表面三维形貌检测是获取零件表面形态特征的一种重要手段, 也是记录、比较和复制物体形态特征的基础, 研究零件表面的三维形貌是为了提取形貌中的各种参数和信息, 并对他进行综合性评定.

1 测量原理

本文利用相位扫描技术测量表面三维形貌. 首

先使用干涉显微镜获取被测表面的干涉条纹, 并通过压电晶体驱动参考镜振动获取多幅干涉条纹图像, 通过这系列的干涉条纹解调出来被测表面的高度信息, 从而得到原始形貌图像, 再经过图像滤波等处理技术使轮廓达到一个满意效果, 然后根据数学模型建立基准面提取粗糙度信息, 最后对表面各种参数进行评定^[1]. 其测量系统包括光学部分、CCD 摄像机、图像卡和计算机以及压电陶瓷及其驱动电

收稿日期: 2007-05-09

作者简介: 朱健军 (1983-), 男, 哈尔滨理工大学硕士研究生.

路,如图 1所示.

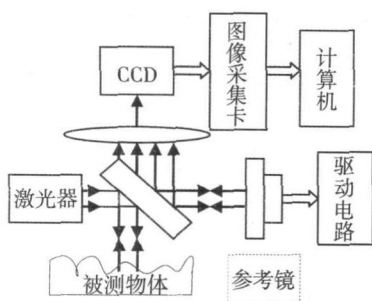


图 1 测量原理图

图 1中,从激光器发出的光经聚光镜后成为平行光,再经分光镜分为两支光束,两光束满足相干光束的条件,在空间相互叠加,产生了可以观察到的干涉条纹.该干涉条纹受被测物表面形状的调制而发生了变形.压电陶瓷驱动参考镜产生几分之一波长量级的光程变化,以改变参考相位,并产生时间序列上的多幅干涉图^[2].

2 测量过程

整个测量过程由相移、采样、相位提取及数据处理等部分组成,测量过程如图 2所示.

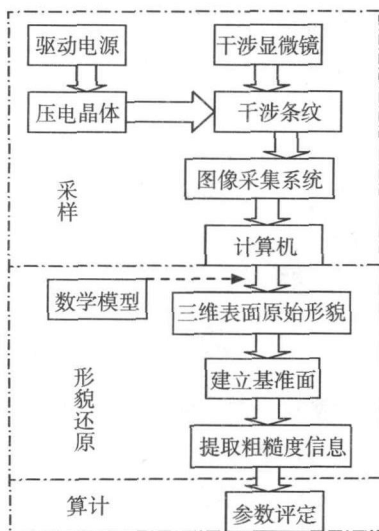


图 2 测量过程示意图

2.1 采样

实验采用线性连续式相移,其相位值的解算方法是根据正弦函数的性质设计的.由于 CCD 面阵探测器所探测到的光强值不可避免地存在误差;在等

间距满周期采样情况下,相位计算的误差最小,也就是具有最强的抗噪声能力.故干涉显微镜采集干涉条纹需要连续等间隔采集,并自动保存到计算机中.为了进一步降低噪声,提高测量精确度,可对多个周期进行采样做累加平均计算.

采样频率由压电陶瓷的振动频率和图像采集卡的采集速率确定,具体关系如下:采样频率 = 图像采集卡采集速率 / 压电陶瓷振动频率.

实验的压电陶瓷振动频率设计为 0.5 Hz,而图像采集卡的采集速率为 12 帧 / s,故采样频率为 24 帧 / s.

2.2 形貌还原

干涉场中的光强分布可表示为

$$I(x, y, t) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)}\cos[\Phi(x, y) + \delta(t)]$$

对 p 个周期的测量数据进行处理,利用被检表面相位恢复表面形貌的数学模型为

$$z(x, y) = \frac{1}{2K} \tan^{-1} \frac{\sum_{i=1}^{n \cdot p} I(x, y, li) \sin 2k li}{\sum_{i=1}^{n \cdot p} I(x, y, li) \cos 2k li}$$

式中: $k = 2\pi / \lambda$; $l = \lambda / 2n$; n 为一周期内采样点数, λ 为光源波长.

2.3 基准面的建立

用 $z(x, y)$ 表示三维表面轮廓, $z_1(x, y)$ 表示评定基准, $z_2(x, y)$ 表示表面粗糙度,用 w_0 表示表面粗糙度与评定基准的分界频率^[3],有

$$z(x, y) = z_1(x, y) + z_2(x, y)$$

其中: $z_1(x, y) = \eta'(x, y) + \eta''(x, y) + \zeta(x, y)$; $z_2(x, y) = \eta(x, y)$. $\eta(x, y)$, $\eta'(x, y)$, $\eta''(x, y)$, $\zeta(x, y)$ 分别表示表面粗糙度、波度、形状误差和多尺度成分,把低于分界频率 w_0 的信号部分 (即是评定基准面) 滤除掉,剩余部分的信号就是三维表面的粗糙度信息,也是评定表面三维形貌的重要信息.

2.4 参数评定

3D 参数目前仍处于研究探讨阶段,尚未有正式的国家或国际标准,但已经大量出现在论文文献中.

工程表面的 3D 形貌是复杂的,每个参数仅能描述形貌的一个方面.按不同的表征特性将参数分为四类,分别是:幅度参数、综合空间参数、空间参数和功能参数,考虑到“参数爆炸”的原因,共给出了 15 个评定参数.3D 形貌的表征参数均用“S”表示^[4].

幅度参数计算公式如下:

1) 表面形貌的均方根偏差 S_q 为

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{N l_x l_y} \iint_A z^2(x, y) dx dy} = \sqrt{\frac{1}{M N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^2(x_i, y_j)}$$

式中: $z(x, y)$ 为残差表面; l_x, l_y 为采用区域的边长; M, N 为在采样区域内 x 向和 y 向的离散采样点数。

2) 表面十点高度 S_z 为

$$S_z = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^5 |n_{si}| + \sum_{i=1}^5 |n_{vi}| \right]$$

3) 表面高度分布的偏斜度 S_{sk} 为

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \iint_A z^3(x, y) p(z) \approx \frac{1}{M N S_q^3} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^3(x_i, y_j)$$

表面高度对称分布,则偏斜度为零。若表面的分布在低于基准面的一边有大的“尖峰”, $S_{sk} < 0$; 相反,表面分布在基准面之上有很大的“尖峰”, $S_{sk} > 0$ 。

4) 表面高度分度的峭度 S_{ku} 为

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \iint_A z^4(x, y) p(z) dx dy \approx \frac{1}{M N S_q^4} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M z^4(x_i, y_j)$$

高斯表面的峭度为 3, 形貌高度分布集中在中心的表面 $S_{ku} > 3$, 而一个分散的高度分布表面其 $S_{ku} < 3$ 。

综合参数计算公式如下:

1) 表面的均方根斜率 $S_{\Delta q}$ 为

$S_{\Delta q}$ 表示采样区域内表面斜率的 RMS 值。

$$S_{\Delta q} = \sqrt{\frac{1}{N l_x l_y} \iint_A \left(\left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right)^{1/2} dx dy}$$

其中,

$$\rho(x, y) \Big|_{\substack{x=x_i \\ y=y_j}} = \left[\left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \Big|_{\substack{x=x_i \\ y=y_j}}$$

2) 表面算术平均顶点曲率 S_{sc} 为

$$S_{sc} = - \frac{1}{2} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z(x, y)}{\partial y^2} \right] \Big|_{\text{for-any-sum it}}$$

式中: n 为顶点的数目。 S_{sc} 对顶点的定义和采样间隔的变化都是敏感的。

3) 表面的展开界面面积比率为 S_{dr} , 理论上, 界面元素的面积为

$$dA = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2} dx dy$$

表面总的展开界面面积为

$$A = \iint_A dA$$

那么, 展开的界面面积比率由下式给出:

$$S_{dr} = \frac{A - (M - 1)(N - 1)\Delta x \Delta y}{(M - 1)(N - 1)\Delta x \Delta y} \times 100\%$$

由于篇幅限制其他参数不再列举公式, 以下给出它们的定义和表示符号。幅度参数包括: 表面的展开界面面积比率 S_{dr} 、最速衰减自相关长度 S_{al} 、表面峰顶密度 S_{ds} 、表面的结构形状比率 S_{tr} 、表面的纹理方向 S_{td} 和纹理方向指数 S_{tdi} ; 功能参数包括: 表面支承指数 S_{bi} 、中心液体滞留指数 S_{ci} 和谷区液体滞留指数 S_{vi} 。

3 实验结果分析

实验对 $Ra = 0.0125 \mu\text{m}$, $Ra = 0.025 \mu\text{m}$ 和 $Ra = 0.05 \mu\text{m}$ 的平磨标准样块分别进行了测量; 以下给出 $Ra = 0.0125 \mu\text{m}$ 的测量结果。

测量系统的图像采集软件如图 3 所示。

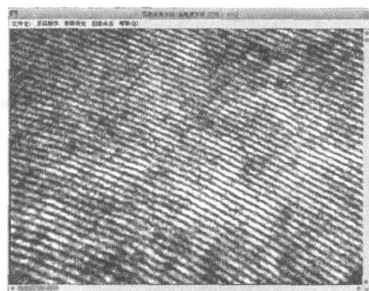


图 3 干涉条纹采集系统

干涉条纹在参考镜的振动下作周期性的振动, 对 p 个周期的干涉条纹图像进行采集并保存到计算机中。

对采集到的干涉条纹进行数据处理, 根据数学模型还原其三维形貌如图 4 所示, 建立基准面如图 5 所示, 提取粗糙度表面如图 6 所示。三维坐标的 x 轴和 y 轴表示的是采样的区域, z 坐标表示的是表面的高度值。

最后编制合理的软件来计算三维表面的各种参数, 软件界面如图 7 所示。

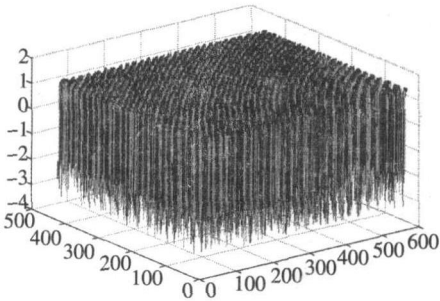


图 4 $Ra=0.0125\text{ }\mu\text{m}$ 表面原始三维形貌

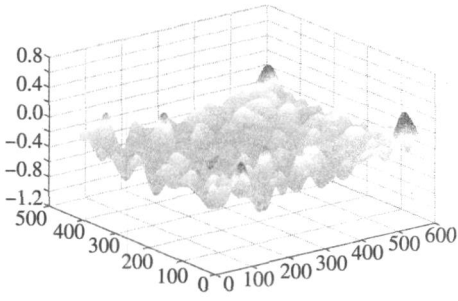


图 5 $Ra=0.0125\text{ }\mu\text{m}$ 表面基准面

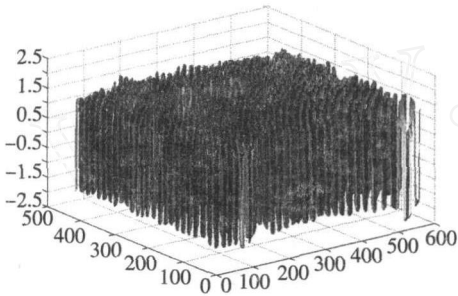


图 6 $Ra=0.0125\text{ }\mu\text{m}$ 粗糙度表面

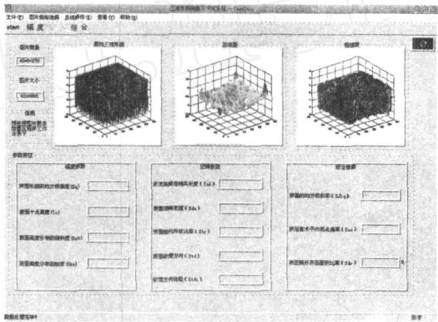


图 7 表面三维形貌测量及其评定系统软件界面

实验对最主要的幅度参数和空间参数计行了计算.以往对表面的评定仅限于二维参数,以下参数的评定都是三维参数,三维参数尚未有正式的国家或国际标准.二维参数与三维参数只有 S_q 和 Ra 具有

可比性,代表的意义相近.

以下列出 $Ra=0.0125\text{ }\mu\text{m}$ 和 $Ra=0.025\text{ }\mu\text{m}$ 两个标准样块的测量结果,数据如表 1 所示.

表 1 $Ra=0.0125\text{ }\mu\text{m}$ 和 $Ra=0.025\text{ }\mu\text{m}$ 幅度参数和空间参数

标准平磨样块	幅度参数				综合参数		
	表面形貌的均方根偏差 (S_q) / μm	表面十点高度 (S_z) / μm	表面高度分布的偏斜度 (S_{sk})	表面高度分度的峭度 (S_{ku})	表面均方根斜率 ($S_{\Delta q}$)	表面算数平均顶点曲率 (S_{sc})	表面展开界面面积比率 (S_{dr}) / (%)
$Ra=0.0125$	0.014 1	0.019 4	0.157 0	1.186 4	2.085 6	0.140 2	109.144 4
$Ra=0.0250$	0.026 3	0.028 1	0.142 5	1.193 5	2.532 4	0.162 3	116.268 1

从表格数据可知 $Ra=0.012$, 幅度 $5\text{ }\mu\text{m}$, 表面测得 $S_q=0.0141\text{ }\mu\text{m}$, $Ra=0.025\text{ }\mu\text{m}$, 表面测得 $S_q=0.0263\text{ }\mu\text{m}$, 由此看来, 测量具有一定的精确度和可靠性.

4 结 语

采用干涉条纹扫描测量技术测量表面三维形貌, 方法易于实现, 数据处理简单快捷, 测量精确度高, 是一种具有先进性和实用性的方法.

3D 参数目前仍处于研究探讨阶段, 三维表面的参数评定是一种探索性的研究, 对一个表面进行全面的 3D 参数评定以及尝试, 建立一种标准是今后

的重点研究方向.

参 考 文 献:

[1] 杨国光. 近代光学测试技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2004.

[2] 李成贵, 李行善. 三维表面微观形貌的测量方法 [J]. 宇航计测技术, 2000, 20 (4): 2 - 10.

[3] 李 杰, 丁宣浩. 一种改进的小波阈值消噪方法 [J]. 广西工学院学报, 2006, 22 (3): 157 - 160.

[4] 李成贵, 董 申. 三维表面微观形貌的表征参数和方法 [J]. 宇航计测技术, 1999, 19 (6): 33 - 43.

(编辑: 付长纓)