

利用激光二维散射特征的表面粗糙度测量方法

曾 焱, 徐 晓, 陈万如
(华南理工大学物理科学与技术学院, 广东 广州 510641)

摘 要:从分析激光散射表面粗糙度测量技术和激光在粗糙表面的二维散射特征出发,引入表征二维散射光能量分布的三个特征量,提出一种表面粗糙度测量方法,不仅可以测量表面粗糙度的统计参数,而且可以反映出表面纹理的形貌特征。

关键词:非接触测量;表面粗糙度;激光散射;二维散射特征

中图分类号:TN247 **文献标识码:**A

A Surface Roughness Measurement Using Laser Scattering Two Dimensional Features

ZENG Yan, XU Xiao, CHEN Wan-ru
(School of Physics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: From analysis of the technique of surface roughness measurement using laser scattering and two dimensional features of laser scattering from roughness surface, a surface roughness measurement was presented, three parameters were introduced to denote the two dimensional distribution of light energy features. The method extended can not only measure the surface roughness parameters, but also figure the characteristics of surface topography.

Key words: noncontact measurement; surface roughness; laser scattering; two-dimensional scattering features

1 前 言

非接触表面粗糙度快速检测在现代工业许多领域有着广泛的应用前景。激光散射表面粗糙度测量法是一种非接触测量的有效方法^[1-3],其本质是利用激光照射到表面后散射光强分布与粗糙度参数的对应关系进行测量。

激光散射法具有测量速度快、仪器简单等优点,但是,一方面,由于目前散射测量法只是对少数表面统计参数的测量,不能反映表面形貌特征,测量精度有待提高,另一方面,由于表面粗糙度特征的复杂性和表面光学特性的复杂性,因此,激光散射表面粗糙度测量近年来仍然受到广泛的研究。郑俊丽等介绍了几种激光非接触测量方法的原理和优缺点,并分析了表面粗糙度测量技术的发展趋势^[4]。程传福等从理论上分析了随机表面散射光强的镜面分量与表面高度概率分布的关系,并通过对镜面反射分量的相位恢复实现了表面高度概率的测量^[5]。尼启

良引入标量和矢量两种散射理论,计算了超光滑表面粗糙度均方根值,并用软 X 射线反射率对超光滑表面进行散射测量^[6]。陈淑妍等建立了软 X 射线掠入场表面逆散射模型,并以此进行了表面特征值的测量^[7]。Li 等人研究了多种金属表面的光散射角分布,并利用 BRDF 模型来建立表面高度统计性质与散射光角分布之间的关系^[8]。Dong 等人设计了一个光纤传感器,通过测量表面散射光分布来测量粗糙度参数^[3]。于昊等通过 Beckmann 散射模型探讨了同时测量表面轮廓不平度信息(纵向)和表面横向单位长度峰值个数(横向)信息^[9]。而这些研究都没有涉及散射光强二维分布与粗糙度的关系,也没有涉及散射光分布与表面形貌的关系。

利用激光散射进行粗糙度测量的传统方法都是

作者简介:曾 焱(1963 -),男,硕士,讲师,研究方向为计算机应用,光学及工业工程。E-mail:yzeng@scut.edu.cn
收稿日期:2007-12-04

以散射光能量的一维分布与粗糙度参数的对应关系来进行的,丢失了粗糙表面引起的二维散射信息。本文从激光在随机表面散射特征出发,针对散射光二维分布引入了三个特征值:能量分布径向均值 E_r 和角向方差 D_a 以及分布纵横比 A_r ,既可测量表面粗糙度的统计参数,又可反映表面二维纹理的形貌特征,为实现更为精确的快速非接触表面粗糙度测量提供了一个可行的方法。

2 表面激光散射二维测量

2.1 散射光强一维分布的粗糙度测量方法

当一束光以一定角度照射到物体表面后,由于表面非理想光滑,会发生散射现象。表面粗糙度和散射光强度分布有一定的关系。对于表面粗糙度数值较小的表面,反射光能较强,散射光能较弱;反之,表面粗糙度数值较大的表面,反射光能较弱,散射光能较强。如图1所示,当激光照在粗糙表面时,反射光被散射到周围的空间。

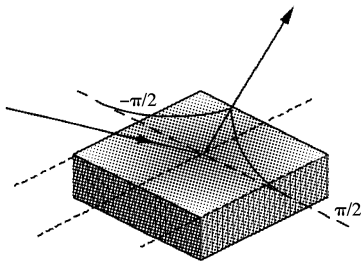


图1 粗糙表面光散射示意图

因此,可以通过测量反射光路上光散射的分布情况,来寻求表面粗糙度与反射光能分布的关系^[1,3,10]。利用一维测量方法,散射光能分布的方差为:

$$S = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} P(\theta) (\theta - \bar{\theta})^2 d\theta \quad (1)$$

如果光电接收器阵列的各光敏单元也是离散的,式(1)转换为:

$$S_n = \sum_i (i - \bar{i})^2 P(i) \quad (2)$$

其中, $\bar{i} = \sum_i i P(i)$, $P(i) = \frac{I(i)}{\sum_i I(i)}$ 。

S_n 描述了被测表面的散射光能分布情况,可称为“光学散射特征值”,作为光散射法测量表面粗糙度的特征物理量。用已知表面粗糙度参数的试件作为表面粗糙度标准样块。测得对应的 S_n 值,即可建立 $S_n - R_a$ 关系曲线。从而实现利用光散射法测量工件表面粗糙度。

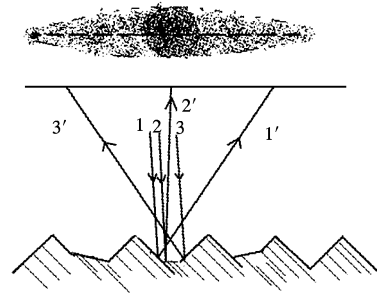


图2 激光在粗糙表面的散射及散射光分布示意图

从上述分析可知,这样测量的仅仅是在光反射路径上垂直于入射光切线的一维散射光强分布。应用这种计算方法是考虑到表面的微观形貌分布在很大的程度上具有纹理一致性。如图2所示,图中,1, 2, 3 是入射的平行光,1', 2', 3' 分别是对应的反射光。假设表面的微观形貌在垂直图2的方向上与图中相类似,即在垂直图的方向上具有一致性。这样,散射光呈长条的带状。而且,一致性越明显,粗糙度值(R_a)越大时,光带越长、越细, S_n 值也越大。

然而,并不是所有的粗糙表面都具纹理一致性。以往的研究针对研磨试件、平磨试件和刨削试件有不同的 $R_a - S_n$ 对应,即各种不同的表面加工方法得到的一致性不一样。当这种一致性不存在时,散射光不再呈带状,随机表面在各个方向上分布在统计意义上相同时,将呈圆斑状分布。这样,只取一维的信息来处理,测量就不能全面反映表面粗糙度的真实情况。

可见,传统的散射法测量忽视了散射光强的二维分布情况,不能全面的反映实际的表面粗糙度信息,因此,可以考虑通过对散射光强的二维分布模式的研究,找出更为有效与精确的测量方法。

2.2 散射光强二维分布的粗糙度测量方法

为了获得散射光的二维能量分布情况,我们采用面阵 CCD,在光强分布上采用二维分布统计,并类似一维散射测量方法,引入三个特征量:能量分布径向(radius)均值 E_r ,角(angle)方差 D_a 以及分布纵横比 A_r ,表征二维散射光分布,由此得到二维散射测量方法。

1) 确定能量分布中心

首先确定光能量分布的中心点,无论径向分布还是角向分布都以这一点为参考点。把光强的分布图归一化以后,看成是能量分布随机变量的联合概率密度函数。假设原图像表示为 $I(x, y)$,对图像进行归一化,得到光能量分布密度:

$$P(x, y) = \frac{I(x, y)}{\sum_x \sum_y I(x, y)} \quad (3)$$

光强分布的中心点为 (E_x, E_y) :

$$\begin{aligned} E_x &= E[xP_x(x, y)] \\ &= \sum_{y_0} \left[\sum_x xP(x | y_0) \right] P(y_0) \end{aligned} \quad (4)$$

其中:

$$P(x | y_0) = \frac{P(x, y = y_0)}{\sum_x P(x, y = y_0)} \quad (5)$$

$$P(y_0) = \frac{\sum_x P(x, y = y_0)}{\sum_x \sum_y P(x, y)} = \sum_x P(x, y = y_0) \quad (6)$$

相类似,有:

$$\begin{aligned} E_y &= E[yP_y(x, y)] \\ &= \sum_{x_0} \left[\sum_y yP(y | x_0) \right] P(x_0) \end{aligned} \quad (7)$$

3 计算 E_r 、 D_a 和 A_r

在确定了参考原点后,就可以进一步计算激光能量径向分布均值 E_r 、角分布方差 D_a 以及纵横比 A_r 参数。

$$\begin{aligned} E_r &= \sum_x \sum_y rP(x, y) \\ &= \sum_x \sum_y \sqrt{(x - E_x)^2 + (y - E_y)^2} \times P(x, y) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} D_a &= \sum_x \sum_y \arctan^2 \left(\frac{y - E_y}{x - E_x} \right) \times P(x, y) - \\ &\quad \left(\sum_x \sum_y \arctan \left(\frac{y - E_y}{x - E_x} \right) \times P(x, y) \right)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$A_r = \frac{\sqrt{(x_t - E_x)^2 + (y_t - E_y)^2}}{\sqrt{(x_p - E_x)^2 + (y_p - E_y)^2}} \quad (10)$$

基于提高计算速度的考虑,纵横比算法采用阈值最大最小比方法,即式(10)中 (x_t, y_t) 与 (x_p, y_p) 分别代表区某一能量密度阈值,例如 70% 最大值时的最大和最小分布位置。

参数 E_r 反映了散射光能径向分布的离散程度,它与表面不平高度相对应;而参数 D_a 同样反映了光能角向分布离散程度,它既与表面粗糙度有关又与表面形貌有关; A_r 则反映了光能分布的二维差异,它表明了微观形貌的一致性, A_r 越大,则表面在入射光斑尺度上垂直于最大散射方向具有切削纹理, A_r 越接近于 1 时,则表明在入射光斑尺度上表面的各向同性越好。因此,这三个参数相结合就可以在测量不同表面粗糙度的统计值的同时,反映出粗糙表面的形貌特征。实际应用中,我们可以用已知粗糙度参数值的工件做标准模块,测量对应的 E_r 、 D_a 和 A_r ,并把测量结果存储起来作为参照,建立其函数关系,从而实现利

用光散射法测量表面粗糙度。

4 实验与分析

光路如图 3 所示。

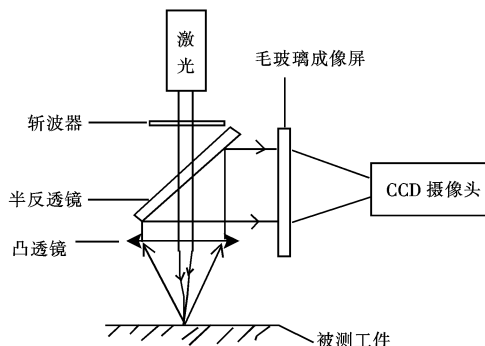


图3 测量光路图

半导体激光器发出的功率 5mW, 中心波长 650nm 的平行光, 经过斩波器后, 通过半反镜, 再经过凸透镜, 聚焦到被测工件的表面。反射散射光再经过凸透镜, 变成平行光, 被 45° 放置的半反透镜反射后, 在毛玻璃成像屏上成像。CCD 摄像头则把毛玻璃上的成像实时的抓拍下来, 再送到计算机处理。

这里, 由于需要讨论对比测量具有纹理特征情况, 所以, 暂未利用标准粗糙度试件进行参数定标, 而是选定较为特殊的一些试件进行测量。

试件 1, 2 是具有切削纹理的金属工件, 粗糙度不同。试件 3 切削后经过研磨的金属工件。试件 4, 5 是研磨后经过抛光的金属工件。

其散射图拍摄后, 采用多帧平均去除噪声, 散射图样如图 4 所示。

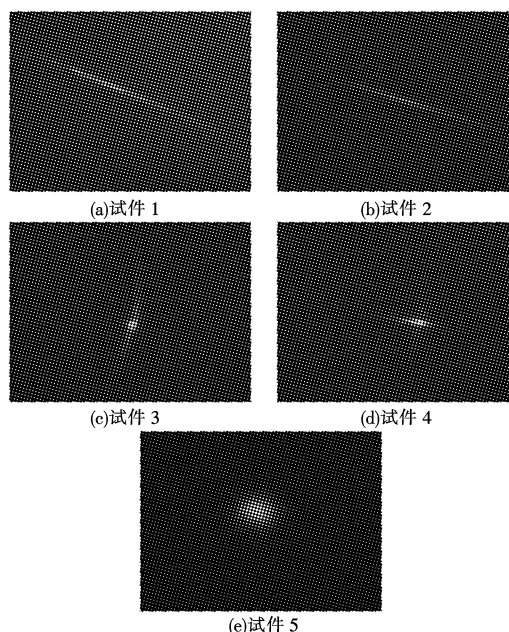


图4 不同粗糙度试件的散射图样

试件 1~5 散射光能量三维分布图如图 5 所示。

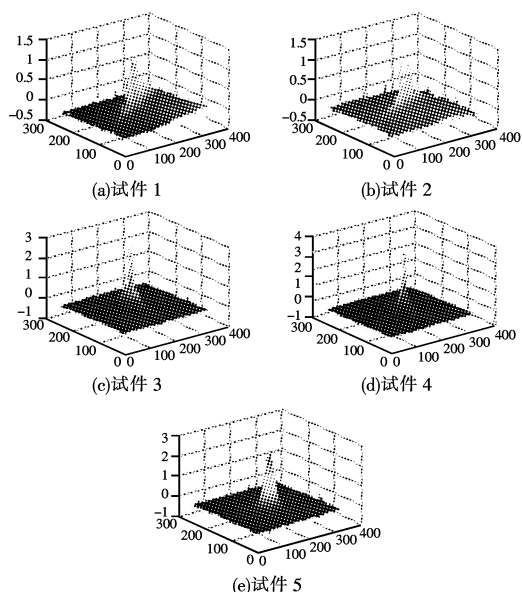


图 5 散射光能量三维分布图

利用所建立的数学模型,对各试件测量的数据统计如表 1 所示。

表 1 粗糙度统计参数

参数	试件 1	试件 2	试件 3	试件 4	试件 5
R_a	0.063	0.051	0.034	0.024	0.030
E_r	62.7	56.6	35.1	23.6	25.4
D_a	1.00	0.79	0.69	0.19	0.32
A_r	31.36	12.45	5.23	1.64	1.12

其中, A_r 为取阈值为最大能量密度的 70% 计算。

上列参数的趋势图如图 6 所示。

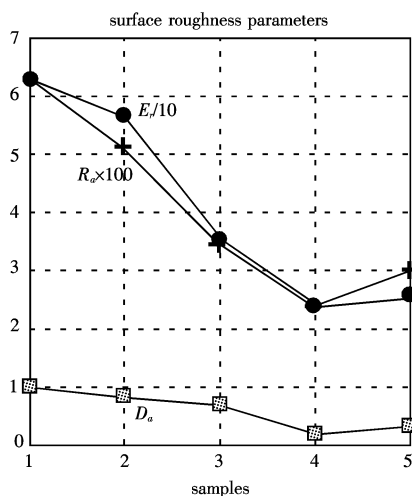


图 6 表面粗糙度参数对照

可以看到,径向均值 E_r 与表面轮廓算术平均偏

差 R_a 具有较好的一致性,这与传统的光学散射法测量结果相一致。而角方差 D_a 在总体趋势上与粗糙度参数相同,另一方面也与表面纹理特征有关,当表面存在划痕或切削纹理时, D_a 会同时增大。

能量分布纵横比 A_r 表征了表面划痕或切削纹理分布的状况。 A_r 越大,则表面在入射光斑尺度上存在明显的划痕或切削纹理, A_r 趋于 1 时,则纹理各向同性越好。

5 结 论

引入散射光二维能量分布径向均值 E_r 、角向方差 D_a 以及分布纵横比 A_r ,得到散射光的能量二维分布情况,改进了传统粗糙度激光散射测量方法,既可以测量表面粗糙度的统计信息,又可以反映出表面形貌特征。

参考文献:

- [1] Stover J C, Serati S A. Calculation of surface statistics from light scatter[J]. Opt. Eng., 1984, 23(4):406-412.
- [2] Wang S H, Quan C, Tay C J, et al. Surface roughness measurement in the submicrometer range using laser scattering[J]. Opt. Eng., 2000, 39(6):1597-1601.
- [3] Dong L, Xiang Y, Wang A, et al. The study of surface roughness measuring by laser optical fiber sensor[C]//Proceedings of SPIE, 2005, 5634:524-532.
- [4] 郑俊丽,赵学增,周莉莉. 表面粗糙度的激光非接触检测方法[J]. 激光与红外, 2005, 35(3):148-150.
- [5] 程传福,元东平,滕树云,等. 光散射的镜面反射分量与随机表面高度分布的表征[J]. 中国科学(G 辑), 2003, 33(3):249-256.
- [6] 尼启良,陈波. 散射法表面粗糙度测量[J]. 光学精密工程, 2001, 9(2):151-154.
- [7] 陈淑妍,齐立红,陈波. 光学散射法表面特征的测量与分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1):82-85.
- [8] Li H, Torrance K E. An experimental study of the correlation between surface roughness and light scattering for rough metallic surfaces[C]//Proceedings of SPIE, 2005, 5878:1-15.
- [9] 于昊,王劲松,刘广文. 表面粗糙度二维信息同步测量方法[J]. 科学技术与工程, 2005(2):110-112.
- [10] 王世华,周肇飞. 表面粗糙度 R_a 和光学散射特征值 S_n 关系的研究[J]. 成都科技大学学报, 1996, (6):1-4, 11.