

文章编号:1001-5078(2009)08-0840-04

· 激光技术与应用 ·

利用散射辐射分布矩测量表面轮廓均方根斜率

曾 焱, 艾克拜尔江·克然木
(华南理工大学理学院物理系, 广东 广州 510641)

摘要:为了利用激光散射分布测量表面粗糙度参数,从分析高斯粗糙表面非傍轴散射光能量的角分布特征与轮廓均方根斜率之间的关系,得到了利用散射角分布进行粗糙表面横向粗糙度参数的测量方法。提出了散射光的两个特征值:辐射立体角密度矩 $M(\theta)$ 和 $M(\varphi)$,用以表征散射光能量立体角分布情况,并给出了在非傍轴远场条件下的测量和计算方法。实验证明,给出的特征参数能够得到散射光能量立体角分布特征并可用于测量粗糙表面横向形貌参数。

关键词:表面粗糙度;轮廓均方根斜率;非傍轴散射;散射辐射立体角分布;散射辐射分布矩
中图分类号: O434. 11; TN247 **文献标识码:** A

Measurement of root-mean-square slope of profile using the moments of laser scattering distribution

ZENG Yan, Akbarjan KERAM

(Department of Physics, School of Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In order to measure the roughness parameters of surface, from analyzing the relationship between the angle distribution of scattering radiance from Gaussian rough surface and the root-mean-square slope of profile, a new measurement for the horizontal profile parameters of rough surface using laser scattering distribution on solid angle was derived. Two values for scattering light features were presented, which are the moments of solid angle distribution of radiance, $M(\theta)$ and $M(\varphi)$, to represent the laser scattering distribution on solid angle. And the measuring and computing methods were obtained. Experiments proved that the parameters presented can procure the scattering light distribution features on solid angle and can be used for the measurement of the horizontal profile parameters of rough surfaces.

Key words: surface roughness; root-mean-square slope of profile; nonparaxial scattering; solid angle distribution moments of radiance; density of energy distribution

1 引言

光散射法是非接触表面粗糙度测量的方法之一,以往光散射法主要集中于表面形貌纵向参数的测量,很少涉及横向参数^[1-8]。然而,从三维轮廓看,表面粗糙度的横向参数,如轮廓均方根斜率等,也是衡量表面粗糙度的重要参数^[9]。

Beckmann 等人研究了粗糙度高度均方根 σ 与散射角之间的关系,为散射法表面粗糙度测量打下了基础^[1]。由于粗糙表面本身是一个非平稳随机过程,其散射光分布异常复杂^[2],因此,粗糙表面的散射光模式一直是表面检测、表面光学特性表征等

相关领域的研究热点^[2-8]。O'Donnell 等人研究了各种具有典型特征的表面的散射光特点,得到了 Beckmann-Kirchhoff 理论的实验修正^[3]。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^[4]。Dong 等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^[5]。郑俊丽

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 10874047)资助。

作者简介:曾 焱(1963-),男,硕士,讲师,研究方向为光学工程,图像处理与计算机视觉等。E-mail:yzeng@scut.edu.cn

收稿日期:2009-01-20

总结了近年来非接触表面粗糙度检测的各种方法^[6]。Harvey 等研究了非傍轴粗糙表面散射强度与散射角之间的特征^[7]。曾焱等研究给出了利用散射光二维分布特征来测量表面粗糙度的方法^[8]。这些研究为表面横向形貌参数的非接触测量打下了基础。

为了检测表面粗糙度横向统计参数,本文讨论了远场条件下非傍轴散射光能量分布与高斯表面轮廓均方根斜率之间的关系。通过引入反映散射光立体角分布情况的辐射立体角密度矩,给出了利用这两个特征值测量粗糙表面横向轮廓特征统计参数的方法。

2 轮廓均方根斜率与散射立体角分布

2.1 表面横向粗糙度参数与非傍轴表面散射模型

2.1.1 表面粗糙度横向参数^[2]

对于一维表面 $f(x)$, 其轮廓斜率(倾斜函数)为 $f'(x)$, 则倾斜函数相关为:

$$R_f(x_1, x_2) = \langle f'(x_1)f'(x_2) \rangle \quad (1)$$

对于高斯分布表面,式(1)化为:

$$R_f(x_1, x_2) = \sigma^2 \left(\frac{2}{l^2} - \frac{4x^2}{l^4} \right) \exp\left(-\frac{x^2}{l^2} \right) \quad (2)$$

因此,均方根斜率(root-mean-square slope) Δ_q 为:

$$\begin{aligned} \Delta_q &= \sqrt{\langle |f'(x)|^2 \rangle} \\ &= \sqrt{R_f(0)} = \frac{\sqrt{2}\sigma}{l} \end{aligned} \quad (3)$$

2.1.2 非傍轴散射光辐射密度

经典的 Beckmann-Kirchhoff 理论满足夫琅和费衍射条件,因此,适用于较小的入射和反射角情况。当入射角和反射角较大时,需要对经典 Beckmann-Kirchhoff 理论进行修正^[7]。图 1 给出了粗糙表面非傍轴光散射的示意图。

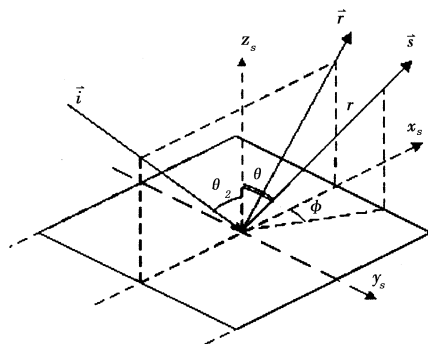


图 1 粗糙表面光反射与散射

如图 1 所示,当准直激光入射到粗糙表面时,沿反射方向 \vec{r} 会产生反射光,在任意散射方向 \vec{s} 有散射光分布。其中, θ 和 φ 是散射方向的极坐标。一

般地,可定义选定表面上单位立体角的辐射密度^[7](radiant power per unit solid angle on collected surface)为:

$$I(\theta, \varphi) = \frac{\partial P}{\partial \omega} \quad (4)$$

其中, P 为光功率; ω 散射方向立体角。

在非傍轴条件下,不满足夫琅和费衍射条件。利用 Beckmann-Kirchhoff 标量散射理论可以证明,高斯粗糙度分布表面的散射光辐射密度为:

$$I(\theta, \varphi) = K\pi l_c^2 \cos\theta \exp(-g) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{g^m}{m! m} \exp\left(\frac{v_{xy}^2 l_c^2}{4m} \right) \quad (5)$$

这里, l_c 为粗糙表面纵向分布的相关长度或自协方差长度(autocovariance length); K 是一个归一化因子; g 为一个由表面粗糙度均方根、入射角和散射角决定的相位因子; v_{xy} 为一几何因子。

在粗糙度较大的情况 ($\sigma_s/\lambda > 3.0$) 下,散射光辐射密度二阶近似为:

$$I(\theta, \varphi) = \frac{K\pi l_c^2 \cos\theta}{v_z^2 \sigma_s^2} \exp\left(\frac{v_{xy}^2 l_c^2}{4v_z^2 \sigma_s^2} \right) \quad (6)$$

由此可见,非傍轴条件下散射光辐射密度与散射表面粗糙度以及观察立体角密切相关。

结合式(3)、式(6),对于高斯表面,散射光辐射密度与均方根斜率的关系为:

$$I(\theta, \varphi) = \frac{2K\pi \cos\theta}{v_z^2 \Delta_q^2} \exp\left(\frac{v_{xy}^2}{2v_z^2 \Delta_q^2} \right) \quad (7)$$

据此,即可以根据散射光分布测量高斯粗糙表面的均方根斜率。

2.2 散射光强立体角分布密度测量方法

为了反映散射光角分布特征,引入辐射立体角分布矩,在远场条件下给出利用二维光强分布统计辐射立体角分布矩的方法,由此得到利用散射光能量分布特征测量表面形貌参数的新方法。

2.2.1 计算能量立体角分布密度

要正确表征散射光能量分布特征,首先按照文献^[8]的方法对散射光强分布图像归一化,得到散射光辐射能量密度分布 $P(x, y)$, 然后确定散射光辐射能量密度的中心 (E_x, E_y) 。在确定了参考原点后,以 $P(x, y)$ 的长轴作为 x 轴,即可进一步计算激光散射能量立体角分布 $I(\theta, \varphi)$ 。

如图 1 所示,设成像面与 x_s 垂直,在远场条件下,散射点到成像面的距离为 r ,当 $r \gg dx$ 且 $r \gg dy$ 时,成像面观测点的面积微分为 $ds = r^2 d\theta d\varphi$, 则散射光能量的角分布密度式(4)可化为:

$$I(\theta, \varphi) = \frac{\partial P}{\partial \omega} = \frac{\partial P}{\partial \theta \partial \varphi} = \frac{r^2 dP}{ds} \quad (8)$$

另一方面, 散射光成像为一个点阵 $I(x, y)$, 设观测点距光强分布中心的 (E_x, E_y) 的距离为 (x_0, y_0) , 则可以通过选定的窗口 (dx, dy) 的光强统计出 $I(\theta, \varphi)$:

$$I(\theta, \varphi) = \frac{r^2 dP}{ds} = \frac{r^2 \sum_{x=x_0}^{x_0+dx} \sum_{y=y_0}^{y_0+dy} p(x, y)}{dxdy} \quad (9)$$

2.2.2 辐射立体角分布矩

为了反映光辐射的立体角分布特征, 我们引入辐射立体角分布矩 (solid angle distribution moments of radiance):

$$M(\theta) = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} I(\theta, \varphi) \theta d\theta}{\iint_{\Omega} I(\theta, \varphi) d\theta d\varphi} \quad (10)$$

$$M(\varphi) = \frac{\int_{-\pi}^{\pi} I(\theta, \varphi) \varphi d\varphi}{\iint_{\Omega} I(\theta, \varphi) d\theta d\varphi} \quad (11)$$

其中, Ω 为散射成像的整个立体角。

由于成像在一个平面上, 且图像采集用 CCD 摄像头, 因此, 须将上述球坐标换算为成像面上的离散统计形式。在远场条件下, 有:

$$M(\theta) = \frac{\sum_x y p(x, y)}{\sum_x \sum_y p(x, y)} \quad (12)$$

$$M(\varphi) = \frac{\sum_y x p(x, y)}{\sum_x \sum_y p(x, y)} \quad (13)$$

$M(\theta)$ 和 $M(\varphi)$ 分别反映了散射光能沿 θ 和 φ 方向分布的加权离散程度。由上面分析可以看到, 辐射能量的角分布特征由斜率方差确定。由此, 我们可以用已知粗糙度参数值的工件做标准模块, 测量 $M(\theta)$ 和 $M(\varphi)$, 并把测量结果存储起来作为参照, 建立其对应关系, 从而实现利用光散射法测量表面横向形貌参数。

3 实验与分析

光路如图 2 所示。

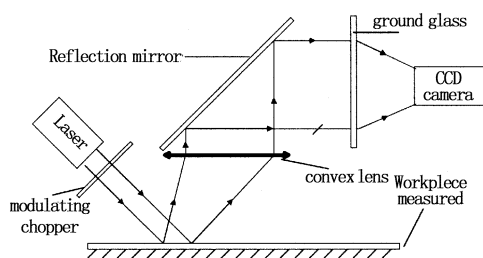


图 2 测试光路图

半导体激光器发出的功率 5 mW, 中心波长 650 nm 的平行光, 经过斩波器后, 聚焦到被测工件的表面。反射散射光经过凸透镜, 变成平行光, 被 45° 放置的反透镜反射后, 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。

六块车削后经过抛光具有不同粗糙度的金属工件做为试件, 利用 Taylorsurf - 6 型表面轮廓仪测试各试件的基本粗糙度参数。试件 R_q 在 $[0.92, 2.05]$ 范围内, 基本满足 Beckmann 条件。非傍轴散射入射角为 45°, 在散射成像面上成像如图 3 所示。

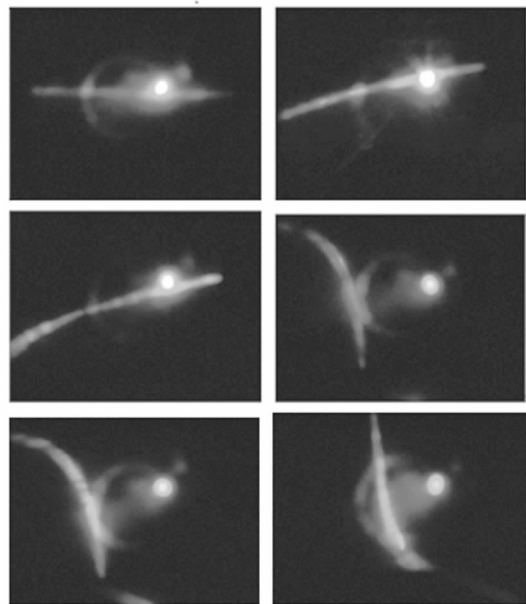


图 3 不同粗糙度表面的非傍轴散射成像图

利用所建立的模型, 对各试件测量的数据汇总如表 1 所示。

表 1 轮廓均方根斜率与辐射立体角分布矩

序号	Δ_q	$M(\theta)$	$M(\varphi)$
1	0.11	2.7	28.4
2	0.13	3.3	31.0
3	0.15	3.6	32.0
4	0.77	12.5	32.2
5	0.78	14.2	36.4
6	0.80	15.3	38.4
7	0.81	15.4	40.4
8	0.84	16.3	41.0

其中, Δ_q 为利用 Taylorsurf - 6 型表面轮廓仪测试的结果, $M(\theta)$ 和 $M(\varphi)$ 为利用本文设计的方法测试计算的结果。

上列参数的趋势图如图 4 所示。

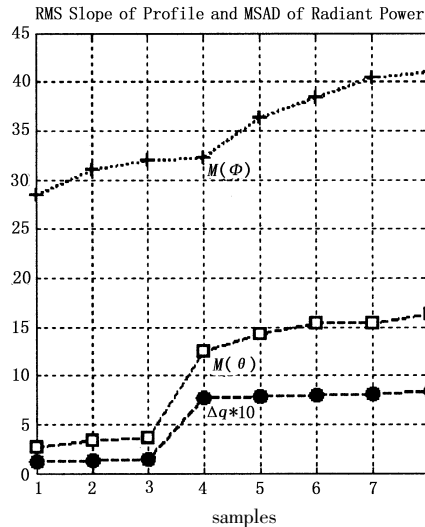


图4 轮廓均方根斜率与辐射立体角分布矩对照图

其中,为了在相近的数量级上体现出参量的趋势,对 Δ_q 扩大了十倍画出曲线。

可以看到,辐射立体角分布矩(Moments of Solid Angle Distribution(MSAD) of Radiance)与轮廓均方根斜率(Root-Mean-Square Slope of Profile)具有较好的一致性。对于后五个试件, Δ_q 的变动较小,但 $M(\theta)$ 和 $M(\varphi)$ 体现出了非线性的较大变化。

4 结论

激光非傍轴表面散射辐射能量分布与表面横向轮廓参数有关,而辐射立体角分布矩反映了散射空间分布特征。在远场条件下,利用散射平面成像的可以统计出散射辐射分布特征并用于测量高斯表面粗糙度的横向统计参数—轮廓均方根斜率。

致谢:感谢湘潭江麓精密机械有限公司提供粗糙度测试试件与测试设备。

参考文献:

- [1] P Beckmann, A Spizzichino. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces [M]. New York: Pergamon Press, 1963.
- [2] L Tsang, J A Kong, K H Ding. Scattering of electromagnetic waves; Theories and Applications [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2000: 389 - 417.
- [3] K A O'Donnell, E R Mendez. Experimental study of scattering from characterized random surfaces [J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science, and Vision, 1987, 4(7): 1194 - 1205.
- [4] Li H, Torrance K E. An experimental study of the correlation between surface roughness and light scattering for rough metallic surfaces [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5878: 1 - 15.
- [5] Dong L, Xiang Y, Wang A, et al. The study of surface roughness measuring by laser optical fiber sensor [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5634: 524 - 532.
- [6] 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.
- [7] J E Harvey, A Krywonos, C L Vernold. Modified Beckmann-Kirchhoff scattering model for rough surfaces with large incident and scattering angles [J]. Opt. Eng., 2007, 46(7): 1 - 10.
- [8] 曾焱, 徐晓, 陈万如. 利用激光二维散射特征的表面粗糙度测量方法 [J]. 激光与红外, 2008, 38(6): 544 - 547.
- [9] Persson B N J, Albohr O, Tartaglino U, et al. On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion [J]. J. Phys. Condens. Matter, 2005, 17: R1.