

粗糙表面散射特性对基于 PSD 的激光位移传感器测量精度的影响

陈 浩 郝继贵 薛 彬

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 激光位移传感器的测量是基于目标表面的散射效应, 表面的粗糙度特性直接影响散射测量光斑的光强。为研究粗糙表面对成像光斑光强的影响, 通过构建粗糙表面的散射几何模型, 利用基尔霍夫标量散射的解析理论, 结合遮蔽函数统计模型, 获得被测表面的粗糙特性与成像光斑光强的函数关系。根据传感器中位置敏感探测器 (PSD) 的检测原理, 感光面上成像光斑光强大小将直接影响传感器的测量精度。实验分析了基于 PSD 的位移传感器对标准粗糙度样块的测量数据, 结果表明不同的表面粗糙度将产生不同的测量误差, 表面粗糙度 R_q 值越大散射光斑光强越大, 但伴随遮蔽系数的显著增强, 光斑光强将逐渐被削弱, 而测量误差大小与光强的变化趋势相同, 其中对 $R_q=0.8 \mu\text{m}$ 左右的粗糙表面的测量误差最小。

关键词 测量; 激光位移传感器; 标量散射; 表面粗糙度; 遮蔽效应; 位置敏感探测器

中图分类号 TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0808003

Impact of Rough Surface Scattering Characteristics to Measurement Accuracy of Laser Displacement Sensor Based on Position Sensitive Detector

Chen Hao Zhu Jigui Xue Bin

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract The measurement of laser displacement sensor is based on the scattering effect of the surface, and the roughness characteristics of the target surface directly affects the light intensity of the scattering measurement spot. For the purpose of studying the impact of the roughened surface on the light intensity of the imaging spot, the scattering geometry model of rough surface is built. By using Kirchhoff scalar scattering analytical theory and combining shadowing function statistical model, the functional relationship between the characteristic of the rough surface and the scattering luminous flux is calculated. According to the detection principle of the position sensitive detector (PSD) in the sensor, the light intensity value of imaging spot on the photosensitive surface will directly affect the measurement accuracy of the sensor. Through the analysis of the measurement data of different standard roughness surfaces which are got from the displacement sensor based on PSD, the experimental results show that different surface roughnesses will produce different measurement errors, and when the R_q value of surface roughness is larger, the light intensity of scattering spot becomes larger. But accompanied by significant enhancement of the shadowing coefficient, the light intensity is gradually weakened, and the magnitude of measuring error has the same trend of changes with that of light intensity. For the roughened surface with $R_q=0.8 \mu\text{m}$ the measurement error is the minimum.

Key words measurement; laser displacement sensor; scalar scattering; surface roughness; shadowing effect; position sensitive detector

OCIS codes 120.0280; 120.1880; 120.5820; 120.6660; 140.5670; 230.5160

收稿日期: 2013-01-07; 收到修改稿日期: 2013-04-02

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX04014-092)、国家科技支撑计划(2011BA13B00)

作者简介: 陈 浩(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光电检测方面的研究。E-mail: tochenhaox@163.com

导师简介: 郝继贵(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光及光电测试技术等方面的研究。

E-mail: jigui Zhu@tju.edu.cn

1 引 言

为满足复杂且狭小空间的测量需求,激光位移传感器已逐渐向小型化的趋势发展,因此具有模拟信号输出且处理电路简易的位置敏感探测器(PSD)作为光电检测器件被广泛采用。PSD 的位置检测结果为激光在被测表面散射后成像光斑的重心位置,激光照射在不同粗糙度表面所产生的不同散射特性将直接影响在 PSD 感光面上提取成像光斑位置的准确性。因此,分析不同粗糙度表面的散射特性对深入研究基于 PSD 的激光位移传感器的测量精度意义重大。

粗糙表面散射特性分析是基于双向反射分布函数^[1-4],构建双向反射分布函数主要通过解析法和统计模型法。在基于基尔霍夫积分定理的矢量散射理论和标量散射理论的解析方法评定表面粗糙度参量的影响时,通过构建粗糙表面几何模型,可建立表面参数与反射光强度的函数关系^[5]。矢量散射理论通过对散射光偏振特性的分析提取其中包含的相关粗糙度信息,理论研究侧重于散射光的偏振相关性。标量散射理论是已知表面粗糙度参数求其散射场强分布,通过对散射表面光斑内任意两点的散射光相干叠加完成全积分,精确简化后得出散射光强分布函数^[6-7]。标量散射理论直观、简洁地表达出表面粗糙度参数与散射光强的函数关系,为分析粗糙表面散射特性与激光位移传感器的测量精度提供理论基础。统计模型法是利用应用统计学原理,精炼出与表面散射特性相关的一多变量函数作为近似双向反射分布函数^[8]。统计模型法在建模过程中虽忽略了被测粗糙表面的具体参数,但引用遮蔽函数的统计模型切合粗糙表面的具体形貌变化,进一步细化粗糙表面的散射光强分布。结合标量散射理论和遮蔽函数的概念,可以更加准确地描述不同粗糙度表面的散射特性,提高工程中的应用价值。

本文基于标量散射解析理论,结合统计建模法中遮蔽效应的函数模型,建立表面粗糙度与散射光斑光强的具体函数关系;根据 PSD 光斑检测原理,分析光斑光强对 PSD 检测误差的影响;通过基于 PSD 的激光位移器获取不同粗糙度表面的测量数据,评价表面粗糙度对传感器测量精度的影响。

2 粗糙表面对散射光光强的影响

2.1 标量散射解析理论

激光位移传感器在测量原理上是基于粗糙表面

的散射效应,研究粗糙表面上散射光分布的标量理论模型是建立在标量衍射理论基础上的^[9]。传感器测量时激光照射粗糙表面,取单位照射面积,设被照射粗糙表面的随机起伏服从高斯分布并且用 $z = z(x, y)$ 表示。在图 1 所示的坐标系中,入射面在 yOz 平面内,入射角为 θ_0 ,散射角为 (θ, φ) ,其中 φ 为方位角。

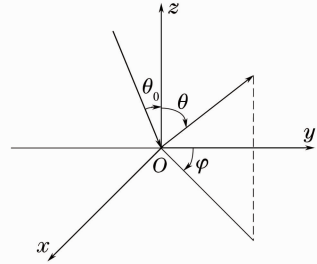


图 1 激光散射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser scattering

如图 2 所示,对于粗糙表面 z ,设观察点 P_0 的坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,被照射表面上一点 P_1 的坐标为 (x_1, y_1, z_1) ,基于基尔霍夫理论和边界条件,观察点 P_0 处的光振幅可用照明区域 Σ 上的波动用菲涅耳-基尔霍夫衍射公式表达为

$$u_{(P_0)} = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} \frac{\exp[jk(r_{21} + r_{01})]}{r_{01}} \left[\frac{\cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}_{01}) - \cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}_{21})}{2} \right] ds, \quad (1)$$

式中 λ 是入射光波长; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, 为波数; r_{01} 表示为 P_0 指向 P_1 的矢量 \mathbf{r}_{01} 的长度; r_{21} 为照明区域上任一点 P_1 与原点坐标的光程差,它等于线段 \overline{AB} 的长度; $\cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}_{01})$ 代表 P_1 点的外法线 \mathbf{n} 与 \mathbf{r}_{01} 之间夹角的余弦; $\cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}_{21})$ 代表 \mathbf{n} 与从点 A 指向点 B 的矢量 \mathbf{r}_{21} 的夹角余弦。

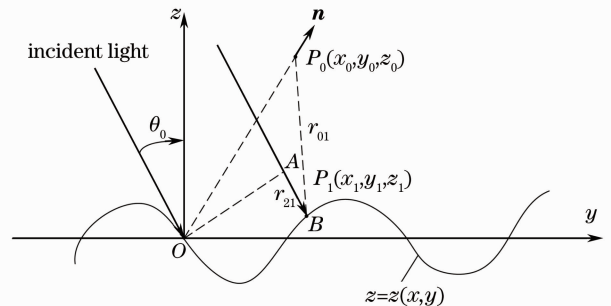


图 2 标量散射模型

Fig. 2 Model of scalar scattering

根据标量散射理论模型,由(1)式可得散射光强分布表达式

$$I_{(p,q)} = |A|^2 F^2 \exp[-g^2 R(0,0)] \iint_{\Sigma} \exp[g^2 R(x,y)] \cdot \exp[-j(px+qy)] dx dy, \quad (2)$$

式中 $A = \frac{1}{j\lambda r} \exp(jkr)$,

$$F = \frac{1 - \sin \theta_0 \sin \theta \sin \varphi + \cos \theta_0 \cos \theta}{\cos \theta_0 + \cos \theta}, \quad g = \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \theta_0 + \cos \theta),$$

$$p = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta_0 \sin \varphi, \quad q = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \theta \cos \varphi - \sin \theta_0), \quad R(0,0) = R_q^2. \quad (3)$$

式中 r 是 P_0 点到坐标原点的距离; R_q 为表面粗糙度均方根高度; $R(x,y)$ 为表面形貌的自相关函数。

激光位移传感器是基于直射式激光三角测量原理,在镜反射方向上的反射光按照原路返回,因此检测目标表面位置主要依靠散射光。依据雷诺判据,按照散射角度分布的散射光强为

$$I_{SB}(\theta_0; \theta, \varphi) = k^2 |A|^2 \cos \theta_0 \int \frac{(1 - \sin \theta_0 \sin \theta)^2}{\cos \theta_0} W(p,q) d\omega_s, \quad (4)$$

式中 $W(p,q)$ 表示被测粗糙表面的功率谱密度函数。

直射式激光三角法中入射光方向与散射光测量方向在同一平面内,同时根据激光位移传感器的结构布局^[10],如图 3 所示,(4)式左侧的光通量 I_{SB} 参数取值为 $\theta_0 = 0^\circ, \theta = 42^\circ, \varphi = 0^\circ$,因而可将其简化为

$$I_{SB} = k^2 |A|^2 \int W(p,q) d\omega_s. \quad (5)$$

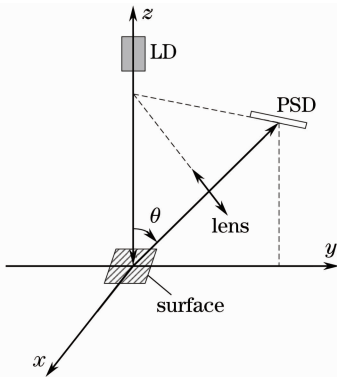


图 3 传感器结构布局示意图

Fig. 3 Layout diagram of sensor structure

在一维位移测量中 $p = 0$, 因而 $W(p,q)$ 可用 $W(q)$ 来代替,以表示粗糙表面的一维功率谱信息。同时假设激光三角法测量系统中在成像物镜的横向角度宽度 Δ_1 范围内接收到的粗糙表面散射光全部成像到 PSD 的感光面上,对(4)式简化得出感光面上的光强为

$$I_{SB} = k |A|^2 W(q) \Delta_1. \quad (6)$$

依据粗糙表面参数的统计学定义,可得表面均方根粗糙度 R_q 为

$$R_q^2 = \int_0^{\infty} W(q) dq. \quad (7)$$

由(7)式可见,表面粗糙度特性 R_q 是对表面功

率谱密度的量化,同时(6)式建立了表面功率谱密度与光强的关系,激光照射在不同粗糙度特性的表面将产生不同光强的散射光斑^[11-13],表面粗糙度 R_q 值越大,PSD 感光面上成像光斑的光强 I_{SB} 越强。

2.2 遮蔽函数统计模型

测量时激光垂直照射在粗糙表面上,当表面粗糙度增大到一定程度时,散射光必将产生遮蔽效应,从而削弱散射光强。如图 4 所示,散射光 1、2 未发生遮挡,而散射光 3 发生遮挡,同时粗糙表面功率谱系数越大,粗糙表面微观形貌变化越剧烈,散射光被遮挡的概率就越大。

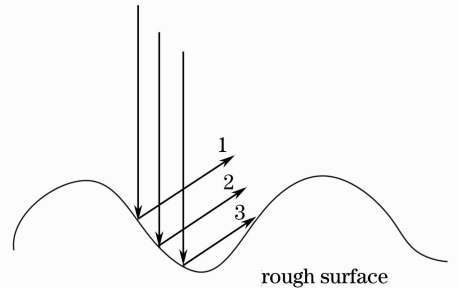


图 4 散射光遮蔽效应示意图

Fig. 4 Scattered light shadowing effect diagram

根据统计学原理,在垂直入射条件下,遮蔽函数表示给定粗糙度的表面散射光未被遮挡的概率。遮蔽函数 $S(\theta, R_q)$ 与散射角 θ 和粗糙表面均方根高度 R_q 直接相关,其表达式为

$$S(\theta, R_q) = \frac{2\nu \sqrt{\pi}}{2\nu \sqrt{\pi} + \exp(-\nu^2) - \nu \sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(\nu)},$$

$$\nu = \frac{|\cot \theta|}{\sqrt{2} R_q}, \quad (8)$$

式中 $\operatorname{erfc}(\nu)$ 为余误差函数, ν 是与散射矢量和粗糙表面均方根相关的量。(8)式中散射角 θ 在测量系

统中为定值,所以遮蔽函数 $S(R_q)$ 与表面粗糙度值之间函数曲线如图 5 所示。因此,最终感光面上接收到的光斑光强可由(6)式演化为

$$I_{SB} = k |A|^2 |W(q)\Delta_1 \cdot S(R_q)|. \quad (9)$$

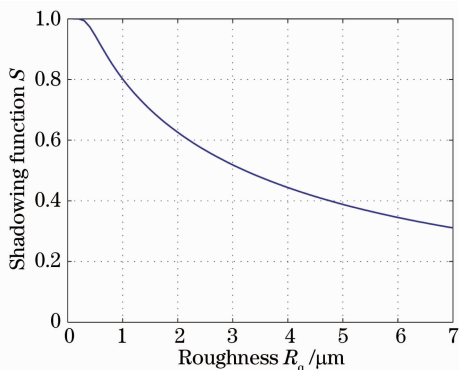


图 5 遮蔽函数曲线

Fig. 5 Shadowing function curve

由此可见,在标量散射理论推导中表面粗糙度 R_q 值越大,PSD 感光面上的成像光斑光强越强,但遮蔽效应明显增强,成像光斑的光强将被削弱。(9)式中 $W(q)$ 与 $S(R_q)$ 都是与表面粗糙度相关的函数,它们共同作用,影响传感器的测量精度。根据(2)式,假定所有参数 θ_0 、 θ 、 φ 、 R_q 均为 0,即单位面积垂直入射光全部按原方向返回,简化后的光强表达式即为原始入射光强 I_0 :

$$I_0 = |A|^2 \iint_{\Sigma} \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} y\right) dx dy. \quad (10)$$

现将散射光强作归一化处理,即定义此方向上的散射率 f_{SB} 为

$$f_{SB} = I_{SB}/I_0, \quad (11)$$

可见,散射率 f_{SB} 数值一定小于 1。将测量系统中激光波长、成像物镜的横向角度宽度等固定的参数代入(11)式中,以描绘表面粗糙度和遮蔽效应共同影响下散射率的变化曲线,如图 6 所示。

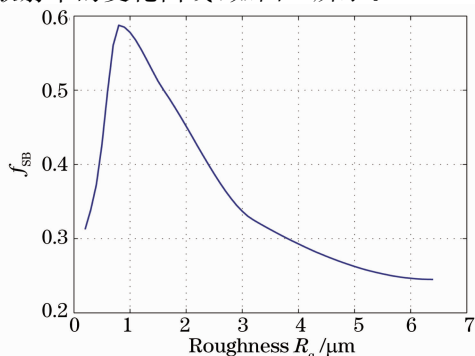


图 6 散射率变化曲线

Fig. 6 Curve of scattering change

由此可见,以固定光强照射在粗糙表面,根据其散射率的变化可知散射光强变化情况。图 6 中在 R_q 值靠近 1 时,散射率最高,但 R_q 值是根据统计学规律得出的估计值,实际表面粗糙度与散射光强的关系还需后续实验加以验证。测量系统中 PSD 将光斑的光强转化为与其成正比且与光斑位置相关的电流信号输出,下面将简要分析散射光斑光强对基于 PSD 的激光位移传感器测量精度的影响。

3 PSD 检测精度分析

PSD 作为激光位移传感器的光斑位置检测器件,在原理上基于横向光电效应,当光斑照射在 P 层时,在结电场的作用下空穴向 P 层移动而电子向 N 层移动,结果在横向出现电势差,P 层的光生空穴在横向电场的作用下离开照射区域形成两侧的光生电流。经典的 Lucovsky 方程给出了光生电流的发生函数,同时在边界条件的限制下,Noorlag^[15] 得出了函数代表光通量的解,将 PSD 的坐标原点设置在一电极上,如图 7 所示,从而得出与光强 I_{SB} 成正比的 PSD 的光生电流 I 简化表达式为^[16]

$$\begin{cases} I = I_1 + I_2 \\ I_1 = I \left(1 - \frac{x}{l}\right), \\ I_2 = I \frac{x}{l} \end{cases} \quad (12)$$

式中 I_1 和 I_2 为一维 PSD 两极输出电流, x 为 PSD 感光面上的光斑位置, l 为感光面的长度。

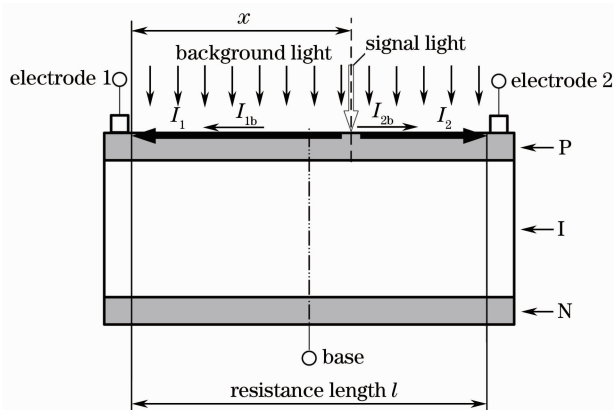


图 7 PSD 检测原理图

Fig. 7 Principle of PSD test

检测过程中存在背景光对 PSD 检测精度造成很大影响,假设背景光是覆盖在 PSD 敏感面的大光斑,根据(12)式有背景光光斑的两极输出电流为

$$\begin{cases} I_{1b} = I_b \left(1 - \frac{x_b}{l}\right) \\ I_{2b} = I_b \frac{x_b}{l} \end{cases}, \quad (13)$$

而此时信号光和背景光共同作用下 PSD 的实际检测光斑位置 x_s 为

$$x_s = \frac{I + I_b}{I} x - \frac{I_b}{I} x_b. \quad (14)$$

设信噪比 $k = I/I_b$, 则(14)式变为

$$x_s = \frac{k+1}{k} x - \frac{1}{k} x_b, \quad (15)$$

从而位置检测误差为

$$\Delta x = |x_s - x| = |x - x_b|/k. \quad (16)$$

由(16)式可知, PSD 感光面上光斑光强的增加有利于减小提取光斑的位置误差。标量散射定理的结果表明不同粗糙度特性的表面将产生不同光强的散射光斑,但在遮蔽函数作用下光斑总的光生电流 I 逐渐减弱,因而信噪比 k 将叠加被测粗糙表面的实际遮蔽系数。(16)式中随着 R_q 值的进一步增大,信噪比 k 将更小,检测误差 Δx 增大。因此粗糙度对传感器测量精度的影响并非线性的,而对于基于

PSD 的激光位移传感器,在测量不同粗糙度表面时将产生不同光强的光斑,最终位置检测误差还需结合实验予以评定。

4 测量实验

4.1 静态光强检测

静态位置检测是评价激光位移传感器测量稳定性的关键,也是评价传感器整体性能的关键。激光位移传感器进行测量实验之前首先应稳定激光的光强,在实际测量过程中光斑光强的瞬时剧烈变化将引起 PSD 较大的检测误差^[17-19]。待激光光强相对稳定后,对不同粗糙度表面的标准样块进行静态测量,获取不同粗糙度表面散射光成像光斑的静态位置误差。精密零件的表面常常以磨削为加工手段,因此标准粗糙度样块首先选择经平磨工艺处理的样块,不同表面光斑位置检测误差结果如图 8 所示,实验采用标准粗糙度模板作为被测表面。实验过程中造成 PSD 光斑位置检测误差主要有两方面因素:测量所用激光的不稳定照射造成成像光斑光强的随机变化和空间复杂频率背景光叠加在有用测量光斑上。

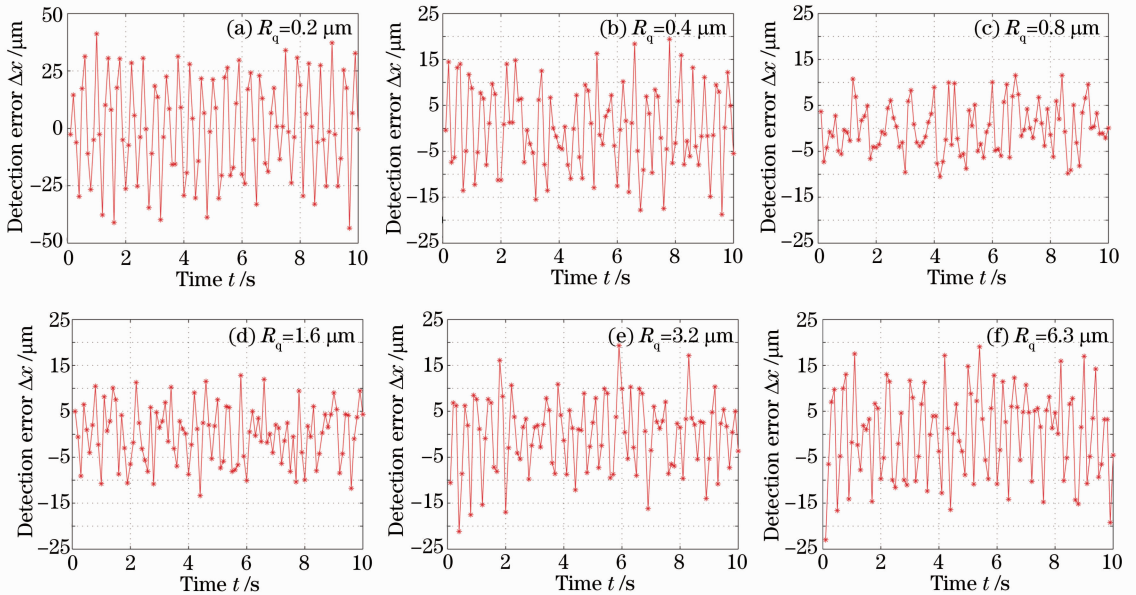


图 8 不同粗糙表面静态检测误差分布图

Fig. 8 Static detection error distribution of different rough surfaces

PSD 同样可作为光斑光强探测器,将等时间间隔内不同粗糙度表面采样的成像光斑光强平均值和

上述测量得出的光斑位置偏差数据列入表 1,并绘制成图。

表 1 不同粗糙表面检测结果

Table 1 Detection results of different roughness surfaces

Roughness $R_q/\mu\text{m}$	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3
Intensity L/V	0.25	0.59	1.57	1.35	0.8	0.63
Error $\Delta x/\mu\text{m}$	22.86	9.13	5.42	6.37	7.97	10.19

由图 9 所示的光强曲线图和图 10 所示的误差曲线图可知,激光照射在粗糙度 $R_q=0.8 \mu\text{m}$ 左右时散射成像光斑的光强最强,测量误差最小。分析产生上述现象的原因主要有以下三个方面:1)当系统测量粗糙度 R_q 值较小的表面时,标量散射的光分量较少,因而成像光斑光强较弱;2)当系统测量粗糙度 R_q 值较大的表面时,遮蔽效应的影响显著,以固定角度接收的散射光分量同样较少,成像光斑光强较弱;3)当系统测量粗糙度 $R_q=0.8 \mu\text{m}$ 左右的

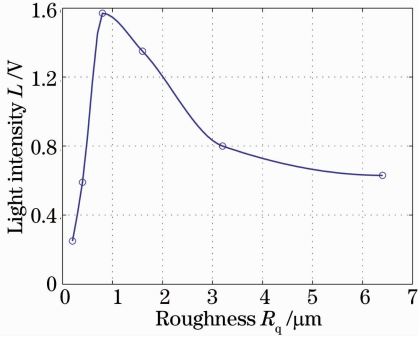


图 9 不同粗糙表面散射光强曲线图
Fig. 9 Scattering intensity curves of different rough surfaces

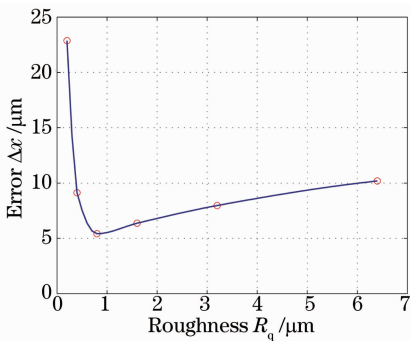


图 10 不同粗糙表面测量误差曲线图
Fig. 10 Measurement error curves of different rough surfaces

表面时,表面反射光中散射光较多,同时遮蔽效应影响较小,因而成像光斑光强较大且集中、轮廓清晰等条件构成 PSD 最佳检测环境。

4.2 不同加工表面光强检测

常见的金属加工手段除磨削之外,还包括车、铣和镗。针对上述几种类型的加工表面,在相同表面粗糙度 R_q 值前提下对比其散射光强,如图 11 所示。由图可知,磨削加工的粗糙表面反射光强最强,其次分别为车、镗、铣。由于加工方式的不同,造成粗糙表面微观形貌的分布也不相同,从而影响散射光强的分布,但其粗糙度值影响光强的变化趋势却不尽相同,散射光强值相差不大,因此在相同粗糙度值前提下加工方式对传感器精度影响不大。

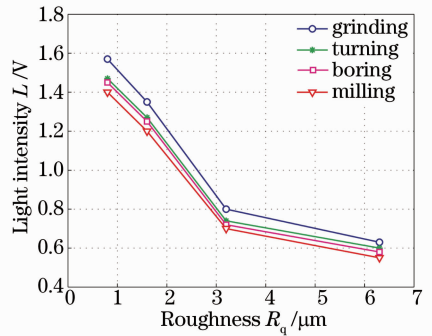


图 11 不同加工表面光强曲线图
Fig. 11 Intensity curves of different machined surfaces

4.3 位移比较测量

激光位移传感器测量不同粗糙度表面的位移,其测量准确性也有所不同。实验采用德国米铍 ILD1700-20LL 系列超高精度激光位移传感器的位移测量结果作为测量基准,基于 PSD 的激光位移传感器的位移测量结果与基准进行比较,以评价不同粗糙度表面对位移测量精度的影响,比较测量结果如表 2 所示。

表 2 比较测量结果

Table 2 Comparison measurement results

Roughness $R_q / \mu\text{m}$	Light intensity L/V	Reference $x_s / \mu\text{m}$	Measurement $x_c / \mu\text{m}$	Error $ \Delta x / \mu\text{m}$
0.2	0.25	100.21	94.78	5.43
0.4	0.59	99.65	97.85	1.8
0.8	1.57	98.83	99.23	0.4
1.6	1.35	100.34	99.38	0.96
3.2	0.8	101.45	99.37	2.08
6.3	0.63	100.18	102.96	2.78

分析位移比较测量实验表 2 中的数据可知不同粗糙度表面位移检测误差不同,与静态位置检测结

论相同,在粗糙度值 $R_q=0.8 \mu\text{m}$ 附近的粗糙表面位移检测误差最小。

5 结 论

基于 PSD 的激光位移传感器虽满足小型化应用需求,但其测量对象表面的粗糙程度直接影响测量精度。本文首先结合激光位移传感器的结构分布参数对标量散射理论进行分解和简化,指出表面粗糙度特性是决定散射光斑光强的关键因素,同时运用统计学中的遮蔽函数,进一步细化粗糙表面的散射光强函数;其次从 PSD 的检测原理出发,分析得出光斑的光强直接影响传感器的测量误差。实验通过对一系列标准粗糙度表面进行测量,数据分析结果表明 $R_q=0.8\ \mu\text{m}$ 左右的粗糙表面散射光强最强且传感器检测误差最小,获得了理论分析中标量散射和遮蔽效应共同影响传感器测量精度的实际结果,同时实验证明不同加工方式获得的相同粗糙度的表面散射光强变化不明显,为进一步分析基于 PSD 的激光位移传感器测量精度的影响因素奠定了基础。

参 考 文 献

- Liu Jianbin, Wu Jian. Light scattering of spatial target[J]. J Astronautics, 2006, 27(4): 802-805.
刘建斌, 吴健. 空间目标的光散射研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(4): 802-805.
- R L Cook, K E Torrance. A reflectance model for computer graphics[J]. ACM Trans Graphics, 1982, 1(1): 7-24.
- L B Wolff. Diffuse reflectance model for smooth dielectric surface[J]. J Opt Soc Am A, 1994, 11(11): 2956-2968.
- G J Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection[J]. Computer Graphics, 1992, 26(2): 265-272.
- Ni Qiliang, Chen Bo. Measurement of surface roughness by scattering method[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(2): 151-154.
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.
- Hou Haihong, Fan Zhengxiu, Shao Jianda, *et al.*. Scalar scattering theory of optical surfaces[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(11): 35-38.
侯海虹, 范正修, 邵建达, 等. 光学表面的标量散射理论[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(11): 35-38.
- Li Yingle, Li Jin, Wang Mingjun, *et al.*. Investigation of scattering for uniformly anisotropic dielectric sphere[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0429002.
李应乐, 李瑾, 王明军, 等. 均匀各向异性介电球散射的解析研究[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0429002.
- Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinhua, *et al.*. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(8): 897-901.
吴振森, 谢东辉, 谢品华, 等. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法[J]. 光学学报, 2002, 22(8): 897-901.
- Qiang Xifu, Zhu Yucong. A research in measurement of surface roughness by scattering of laser beam[J]. J Harbin Institute of Technology, 1985, (5): 1-9.
强锡富, 朱郁葱. 激光散射测量表面粗糙度的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1985, (5): 1-9.
- Zhou Liping, Cao Yiping. Design of pocket laser measuring device based on PSD[J]. Tool Engineering, 2006, 40(9): 70-72.
周力萍, 曹益平. 基于 PSD 的小型激光测头的设计[J]. 工具技术, 2006, 40(9): 70-72.
- Huang Zhanhua, Cai Huaiyu, Li Heqiao, *et al.*. Analysis for error in triangulation laser measurement system and an elimination method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2002, 29(3): 58-61.
黄战华, 蔡怀宇, 李贺桥, 等. 三角法激光测量系统的误差分析及消除方法[J]. 光电工程, 2002, 29(3): 58-61.
- Zeng Yan, Xu Xiao, Chen Wanru. A surface roughness measurement using laser scattering in two-dimensional features[J]. Laser & Infrared, 2002, 38(6): 544-547.
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, 2002, 38(6): 544-547.
- Huang Chenggong, Wu Junhui, Zhao Linfeng, *et al.*. A 3D measuring technique of laser scattering characteristic data for surface[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0708004.
黄成功, 吴军辉, 赵琳峰, 等. 一种表面激光散射特性数据三位测量方法[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0708004.
- Huang Chaojun, Liu Yafeng, Yin Jiwu, *et al.*. Inversion parameters of shadowing function and optimization of BRDF statistical modeling on target surface[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(5): 883-886.
黄朝军, 刘亚锋, 尹继武, 等. 目标表面遮蔽函数参数的反演与 BRDF 统计建模的优化[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 883-886.
- Noorlag D J W. Lateral-Photoeffect Position-Sensitive Detectors [D]. Delft: Delft University, 1982. 70-78.
- Yuan Hongxing, He Anzhi, Li Zhenhua, *et al.*. Relation study of position characteristic of PSD with lightspot and background[J]. J. Southeast University, 1999, 29(2): 145-149.
袁红星, 贺安之, 李振华, 等. PSD 位置特性与光斑及背景的关系研究[J]. 东南大学学报, 1999, 29(2): 145-149.
- Shang Hongyan, Zhang Guangjun. Analysis of the response characteristics of position sensitive detector under different modes of light source[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(1): 93-96.
尚鸿雁, 张广军. 不同光源模式下位置敏感探测器响应特性分析[J]. 光电工程, 2005, 32(1): 93-96.
- Ding Xiaokun, Liu Tiegeng, Song Dianyou. Impact of accuracy of laser spot quality in laser triangulation long-term continuous measuring based on PSD[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0208006.
丁小昆, 刘铁根, 宋殿友. 激光光斑质量对基于 PSD 的激光三角法长时间连续测量精度的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0208006.
- He Yuanxing, Li Xinyang. Influence of threshold method on calculation results of far-field spot quality[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1208001.
贺元兴, 李新阳. 阈值法对激光远场焦斑质量测量和计算的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1208001.

栏目编辑:何卓铭