

无合作目标测量中目标表面后向散射特性的实验研究

陶会荣, 张福民, 曲兴华

(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: 设计并搭建了半球空间内收发同轴的目标表面后向散射特性测量系统, 以 1 550 nm 线偏振、窄线宽激光为光源, 在 $0^{\circ}\sim\pm 60^{\circ}$ 入射角度范围内, 通过对具有不同表面微观形貌(研磨、立铣和平铣加工表面)的典型粗糙度比较样块进行后向散射特性的测量, 探讨了入射光偏振方向、入射方位角、入射角和表面微观形貌的变化对后向散射特性的影响, 分析了这些影响产生的原因, 并分析了后向散射场偏振特性的变化。结果表明这些影响因子均对表面后向散射特性产生规律性影响, 既有共性规律, 也有个性规律。其中, 表面微观形貌又决定着入射方位角、入射角等变量变化时对后向散射场能量分布及偏振性质的改变所产生的影响。这一结果为无合作目标测量领域及其他表面测量特性研究领域提供参考及应用价值。

关键词: 后向散射; 偏振特性; 微观形貌

中图分类号: TH741 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)S-0095-06

Experimental study of backscattering signals from rough targets in non-cooperative laser measurement system

Tao Huirong, Zhang Fumin, Qu Xinghua

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

Abstract: The measurement system of the surface backscattering characteristic was designed and setup in this paper. The send and receive in system was coaxial in hemisphere space. The laser is 1 550 nm linear polarization and narrow linewidth. The backscattering characteristic of grinding, vertical milling and plain milling samples with different surface microstructure was measured at different incidence angles from 0° to $\pm 60^{\circ}$. The effect of the incident light polarization direction, azimuth angle, incidence angle and the surface microstructure on the backscattering was discussed. The reasons of these effects and the change of backscattering characteristic were analyzed. It was found that the incident light polarization direction, azimuth angle, incidence angle and the surface microstructure had regularity effect on the backscattering. They had both the common law, also had individual character. Surface microstructure determined the backscattering energy distribution and polarization characteristic with the change of incidence azimuth and angles. This result shall provide the reference value to the research of cooperation target measurement field and other surface measuring field.

Key words: backscattering; polarization characteristics; microstructure

收稿日期: 2014-10-10; 修订日期: 2014-11-15

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项(51327006); 国家自然科学基金(51105274)

作者简介: 陶会荣(1981-), 女, 博士生, 主要从事激光测量方面的研究。Email: taohuirong@163.com

导师简介: 曲兴华(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光测量方面的研究。Email: quxinghua@tju.edu.cn

0 引言

在现代测量领域,激光技术起着举足轻重的作用,典型的激光干涉法、脉冲法、相位法等激光测距技术广泛应用于工业测量、遥感测绘、科学研究、航空航天等众多领域,然而,现有的激光技术仍然满足不了大空间精密坐标测量方面日益增长的重大需求,脉冲法和相位法均无需合作目标、测量范围大,但其测量精度相对较低,不能满足精密测量的要求;干涉法和由其衍生出的激光跟踪测量方式虽然精度高,但需要反射棱镜或者猫眼等合作目标辅助,经常在现场无法实现^[1];近年来发展起来的连续激光调频测距技术是一种新型激光测距技术,可进行无合作目标测量、测量范围大、精度高,具有显著的优点^[2-3],但该方法目前还不成熟,一些关键瓶颈尚未解决,其中一个关键问题便是激光直接入射到被测目标表面后表面对其影响.在有合作目标的情况下,由于目标表面特性是一定且已知的,因此接收到的回波信号也是稳定且可以预知的,这也是有合作目标的测距系统精度高的主要原因;对于无合作目标的测距系统而言,激光照射到的目标表面未知且千差万别,被测表面的粗糙度、颜色、纹理等都会影响接收到的激光的强度、相位、偏振态等信息,激光入射的角度也会影响接收的回波信号^[4-7].因此文中针对无合作目标测量中需要的后向散射(散射光观测角度为入射方向)信号进行实验研究并讨论.这一结果不仅可以被有效利用于无合作目标测量领域还可延伸到其他表面测量特性领域.

1 后向散射特性测量方法及装置

1.1 测量方法

在后向散射研究领域通常认为光强是最直观的信息参量,实际上究其本质,光学中的各种效应及各种基本规律仅由几个参量所左右,它们包括传输介质的折射率 n 、光波能量、光波的波长和光波的偏振.其中,传输介质的折射率 n 除了具有自己的固有性外,主要受外界因素的影响,包括入射光波长,外加电场、磁场、力场等,时间以及空间等因素,在文中的研究中,这些影响因素均是固定值,因此可以忽略折射率 n 的变化对光波传输的影响;对于光波波长,在

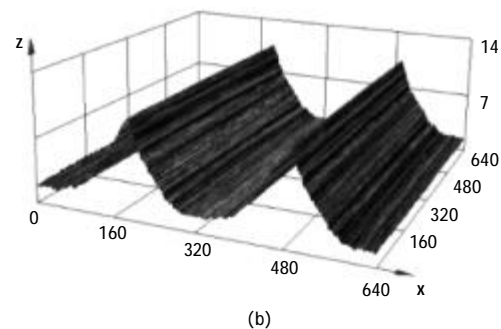
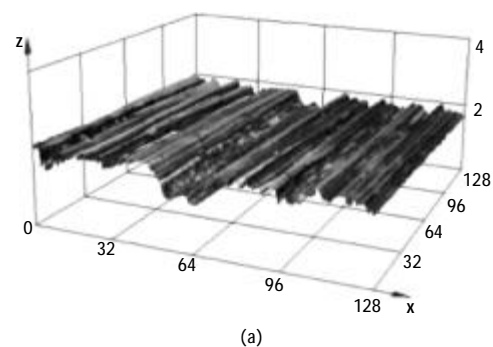
无合作目标测量仪器中其光源通常选取具有窄线宽的红外激光,文中选取波长为 1 550 nm 的光源;偏振特性能体现光波的横波性,在研究激光与介质的相互作用时,应充分考虑偏振效应所引起的一些差异,因此文中除了测量光波能量外,还研究了散射光强的偏振效应,在实验中,选取两种典型偏振方向(s 和 p 线偏振光束入射)来分析这种差异.由于无合作目标测量的环境多为工业现场,测量对象多为金属表面,所以文中选取不同加工方式的金属加工标准粗糙度比较样块作为测量目标,其参数如表 1 所示.

表 1 金属加工样块表面参数

Tab.1 Surface parameters of metal processing samples

Samples	Roughness/ μm	Material	Processing method
S1	0.1	GCr15	Grind
S2	3.2	45 high quality carbon structural steel	Vertical milling
S3	3.2	45 high quality carbon structural steel	Horizontal milling

图 1 为由 OLYMPUS 3D 激光测量显微镜扫描到的目标表面微观形貌,单位为 μm .图 1(a)为研磨样块,图1(b)为立铣样块,图 1(c)为平铣样块.从图中可以看出,由于机械加工方式的原因,每种加工金属表面均会存在一定的纹理,这势必会造成散射



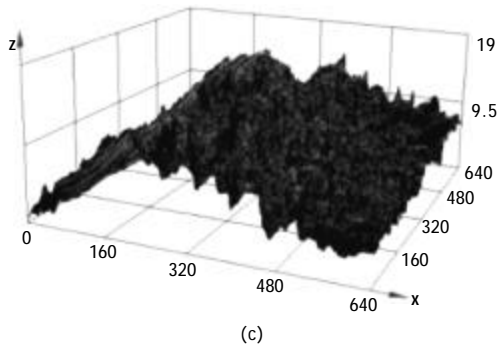


图 1 加工表面微观形貌

Fig.1 Morphology of machined surface

场的不同,因此在测量后向散射强度时文中采取了不同的入射面,坐标定义如图 2 所示,这里定义 xz 、 yz 构成的平面为入射面,当其平行于表面纹理时入射方位角为 0° ,当入射面垂直于表面纹理时入射方位角为 90° 。

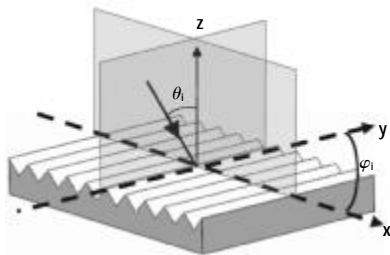


图 2 表面测量坐标系定义

Fig.2 Definition of surface measurement coordinate system

金属对光波具有较高的反射率,致使后向散射能量在随入射角度增大时会迅速衰减,因此主要采集 $\pm 20^\circ$ 范围内的数据,采样间隔为 1° , 20° 之后以 5° 为间隔,该实验测量得到 $0^\circ \sim \pm 60^\circ$ 范围内每个入射角度时的后向散射强度以及每个目标样块在不同偏振光方向入射时的后向散射光强的变化情况.为了更方便的分析研究后向散射强度和入射角度之间的关系,将后向散射强度表示为与入射角度有关的函数^[8]:

$$I_{\text{back}} = I_{\text{back}}(\theta_i) / I_{\text{back}}(\theta_0) \quad (1)$$

式中: $I_{\text{back}}(\theta_i)$ 为入射角度为 θ_i 时后向散射方向的散射强度; $I_{\text{back}}(\theta_0)$ 为垂直入射时的后向散射强度。

1.2 实验装置

为实现文中研究目的,自行设计并搭建了半球空间收发同轴的后向散射特性测量装置,如图 3 所示。

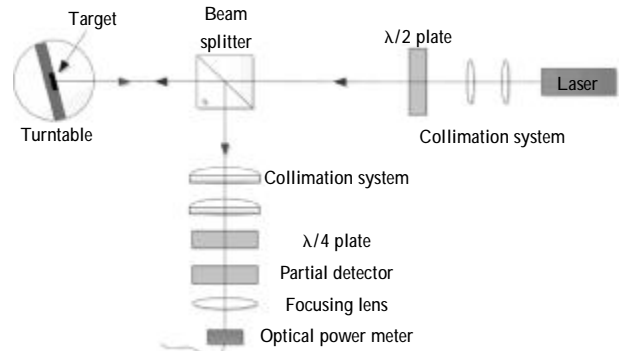


图 3 后向散射特性测量装置示意图

Fig.3 Schematic representation of the apparatus used for experimental backscattering measurements

激光器发出的光经扩束准直系统以后入射到立方分光镜,透过的光分量入射到被测目标表面,与入射光同轴的后向散射光分量再经过分光镜后由光功率计接收送到上位机进行最终的数据处理分析.后向光路由光束准直、检偏和聚焦部分组成.由于激光器发出的光源为线偏振光,因此可将光源的初始偏振态方向调整为 s 方向,通过在入射光路上添加一个 $\lambda/2$ 波片的方式来将入射光偏振态方向改为 p 方向.在接收光路端添加 $\lambda/4$ 波片,可将后向散射光中的椭圆偏振光变为线偏振光,通过旋转检偏器可以测量得到 360° 范围内光强的变化情况.另外为了实验测量不同入射角度下的后向散射情况,将待测目标用自制夹具固定在精密转台轴心上,令目标表面与精密转台的轴心重合,从而可以通过旋转精密转台来控制不同的入射角度。

实验所用激光器为 Rio 公司 1550 nm 的红外激光,经过准直透镜之后的光功率为 10 mW ;接收器采用 Thorlabs 公司的 PM 100 D 光功率计,功率传感探测头型号为 S122C,其对 1550 nm 激光的分辨率为 10 nW 。

2 实验结果与分析

2.1 后向散射光强度变化对比分析

这部分后向散射强度的结果由公式 (1) 计算得到.依据第 2 部分的坐标定义,在此部分的后向散射强度结果分析中曲线 H-S 代表当入射面平行于表面纹理时 ($\phi_1=0^\circ$),以 s 偏振光入射时得到的后向散射强度,曲线 H-P 代表以 p 偏振光入射时得到的后向散射强度;曲线 S-S 代表当入射面垂直于表面纹

理时($\varphi_i=90^\circ$)以 s 偏振光入射得到的后向散射强度为, 曲线 S-P 代表 p 偏振光入射时得到的后向散射强度。

(1) 入射方位角不同时的结果对比分析

图 4 为粗糙度 $Ra=0.1\ \mu\text{m}$ 、加工方式为研磨的标准粗糙度样块在 0° 方位角和 90° 方位角下测得的结果。从图中结果拟合曲线中可以看出明显的规律与差别, 首先, 从后向散射能量的形态分布来看, 后向散射能量峰值均出现在垂直入射角度处, 回波能量在半球空间内以 0° 为分界, 两端呈对称分布; 而在 0° 方位角入射时, 在 $\pm 3^\circ$ 入射角时回波能量已迅速趋近于 0, 在 90° 方位角入射时, 后向散射能量变化趋缓, 在入射角大于 $\pm 20^\circ$ 之后回波能量才缓慢趋近于 0; 从后向散射能量的大小来看, $\varphi_i=90^\circ$ 时的回波能量峰值要比 $\varphi_i=0^\circ$ 时的峰值高出 3 倍, 且在能量趋近于 0 之前一直高于 $\varphi_i=0^\circ$ 时的后向回波能量。实验测得的立铣加工样块 ($Ra=3.2\ \mu\text{m}$) 和平铣加工样块 ($Ra=3.2\ \mu\text{m}$) 也有着可分析的规律与差别。

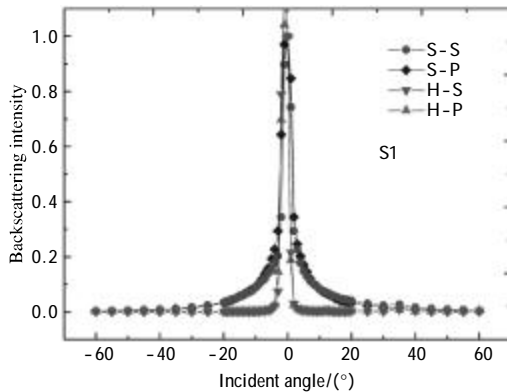


图 4 研磨样块 ($Ra=0.1\ \mu\text{m}$) 后向散射强度

Fig.4 Backscattering intensity of grind sample ($Ra=0.1\ \mu\text{m}$)

(2) 粗糙度相同纹理不同时结果对比分析

粗糙度相同而加工纹理不同时对后向散射能量分布也产生了很大的影响, 立铣加工样块 ($Ra=3.2\ \mu\text{m}$) 和平铣加工样块 ($Ra=3.2\ \mu\text{m}$) 的后向回波能量在同样的测量条件下产生了明显不同的分布, 如图 5 和图 6 所示。对于立铣加工的表面, $\varphi_i=0^\circ$ 时后向散射能量分布以 0° 为中心呈对称分布, 且和研磨样块一样在 $\pm 3^\circ$ 入射角时回波能量已迅速趋近于 0, 以 0° 为中心呈尖峰状; 而 $\varphi_i=90^\circ$ 时后向散射能量分布参差不齐, 无明显规律, 优点是在大的入射角度时仍能测量得到可利用的后向散射能量; 对于平铣加工的表面, 要比立铣的结果有规律, 后向散射能量形态分布

基本上呈对称分布, 能量大小均在 $\pm 20^\circ$ 之后才逐渐趋近于 0, 所不同的是, 在 $\varphi_i=90^\circ$ 时后向回波能量峰值变小, 分布形态变宽, 而不是呈尖峰状。

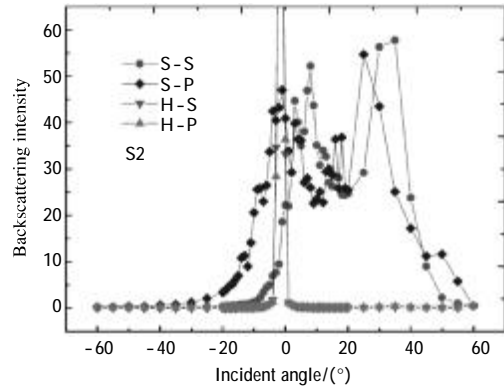


图 5 立铣样块 ($Ra=3.2\ \mu\text{m}$) 后向散射强度

Fig.5 Backscattering intensity of vertical milling sample ($Ra=3.2\ \mu\text{m}$)

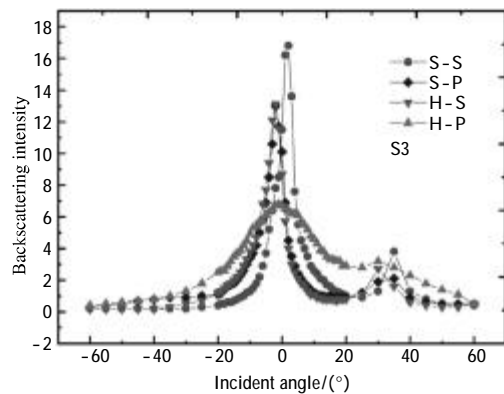


图 6 平铣样块 ($Ra=3.2\ \mu\text{m}$) 后向散射强度

Fig.6 Backscattering intensity of horizontal milling sample ($Ra=3.2\ \mu\text{m}$)

综合以上分析, 不同方位角入射和不同加工方式产生的以上影响, 究其本质是表面微观形貌的不同所造成的, 表面的沟槽、凹凸形貌结构使入射光在介质表面产生了不同的遮挡和阴影效应, 从而影响了后向散射光的能量分布, 如果表面形貌是有规律的, 则后向散射光能量也是有规律可循的, 反之, 则是不可预知的。

(3) 入射光偏振方向不同时结果对比分析

从上述三种样块的测量结果来看, 在相同的测量条件下, 入射光偏振方向的不同也会对后向散射光能量分布产生影响, s 光入射时的后向散射强度峰值均比 p 光入射时的峰值要大。对于平铣加工的表面 ($Ra=3.2\ \mu\text{m}$), 入射光偏振方向不仅影响到了后向散射光强的大小, 还影响到了后向散射能量分布的

形态。下面将进一步对比分析 s、p 光入射后表面的退偏性质对其后向散射光强的影响情况。

2.2 后向散射光偏振性质变化对比分析

同一目标表面,在不同偏振方向入射光入射时随检偏器绕透光轴旋转测得的后向散射光强度的变化如图 7~9 所示。从极大和极小值位置来看,立铣样块(Ra=1.6 μm)和平铣样块(Ra=3.2 μm)与入射线偏振光的振动方向基本一致,而研磨样块(Ra=0.1 μm)在 s 光入射后其极大极小值位置发生了偏移,说明其 s、p 分量发生了位相差;从退偏度来看,当入射角度为 10° 时,研磨样块和平铣样块产生骤然退偏现象,光强迅速减小,而立铣样块随入射角的增大缓慢退偏,这说明光与介质发生作用后产生的退偏现象与介质表面粗糙度无关,其主要取决于表面微观形貌导致的多次散射叠加的结果,当然,具有相同规律微观形貌的表面偏振成分产生的影响会随粗糙度

的增大而增大。进一步分析,入射光 s、p 分量的绝大部分都具有较固定的位相差,后向散射中的完全偏振成分即由它们经多次散射后形成,非偏振成分由其余部分叠加后形成,当入射角度增大时,在单位面元内多次散射的现象增加,一方面造成回波方向叠加能量的减弱,另一方面即造成非偏振成分的增多。

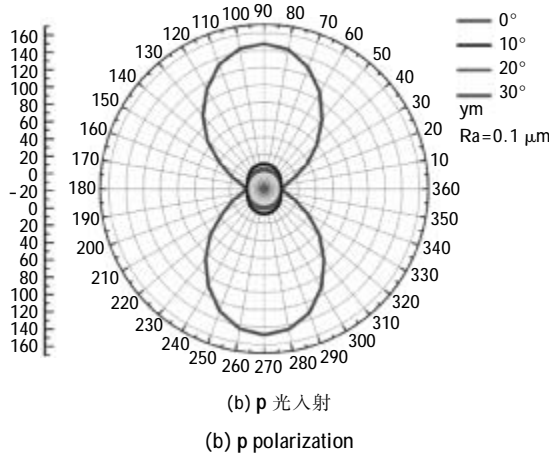
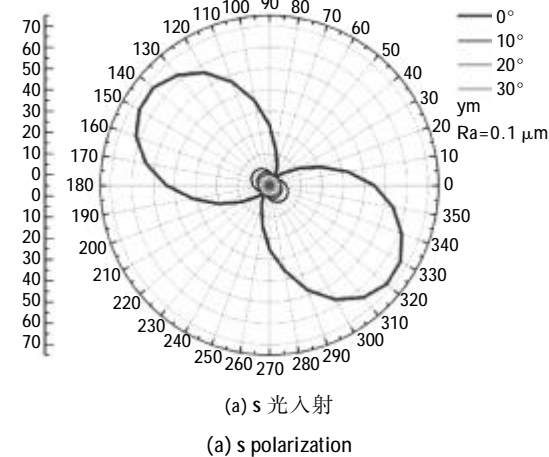


图 7 研磨样块在不同偏振光入射下的后向散射强度

Fig.7 Backscattering intensity of grind sample for different polarization of the incident light

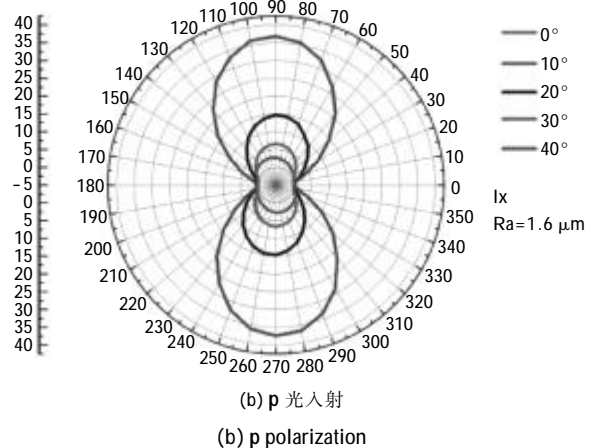
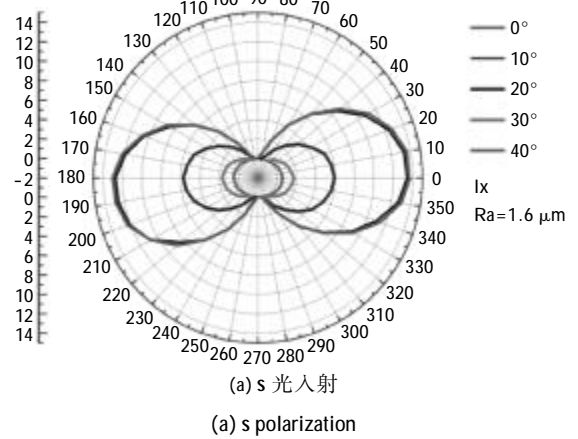
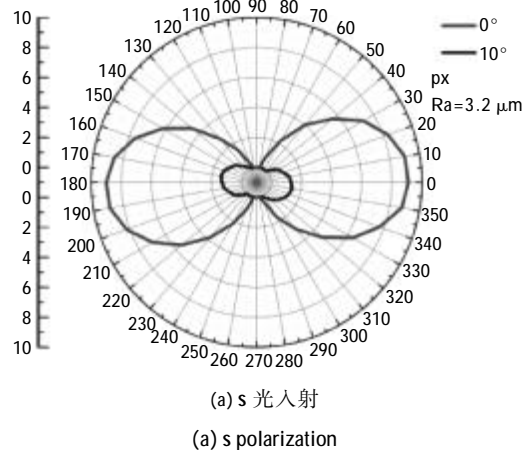


图 8 立铣样块在不同偏振光入射下的后向散射强度

Fig.8 Backscattering intensity of vertical milling sample for different polarization of the incident light



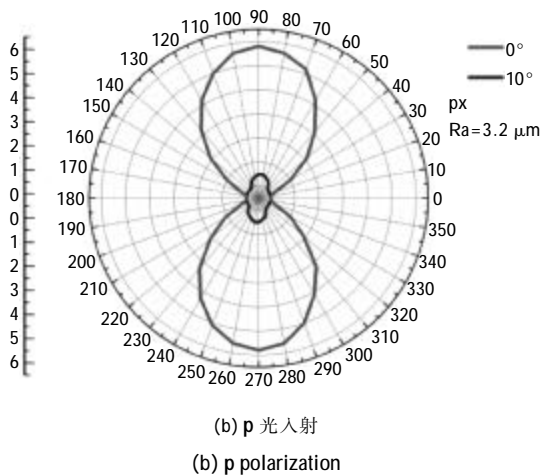


图 9 平铣样块在不同偏振光入射下的后向散射强度

Fig.9 Backscattering intensity of horizontal milling sample for different polarization of the incident light

3 结 论

实验利用收发同轴后向散射特性测量系统,以 1550 nm 线偏振激光为光源,测量了研磨($Ra=0.1\ \mu\text{m}$)、立铣($Ra=1.6\ \mu\text{m}$ 、 $3.2\ \mu\text{m}$)和平铣($Ra=3.2\ \mu\text{m}$)加工方式下标准粗糙度比较样块表面的后向散射特性.通过对后向散射场多维度信息的对比分析,得出入射光偏振方向、入射角度、入射方位角及表面微观形貌均对后向散射场强度分布产生规律性影响.其中,入射光偏振方向决定着后向散射场中偏振成分的振动方向;入射角度对后向散射场的峰值位置和偏振特性起决定性作用;入射方位角决定着同一表面后向散射场的形态分布;表面微观形貌决定着不同表面后向散射分量的大小及形态分布.也可以在已知表面信息的情况下来判断能测角度,或在进一步分析构建表面信息和测量精度之间的函数关系之后推导出误差补偿系数,对削弱甚至消除复杂的表面漫反射场所导致的低精度具有重要意义。

参考文献:

- [1] Gao Feng, Guo Weizhong, Song Qingyu, et al. Current development of heavy-duty manufacturing equipments [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 (19): 92-107. (in Chinese)
高峰, 郭为忠, 宋清玉, 等. 重型制造装备国内外研究与发展[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 92-107.
- [2] Kakuma S, Katase Y. Frequency scanning interferometry immune to length drift using a pair of vertical-cavity surface-emitting laser diodes [J]. Optical Review, 2012, 19 (6): 376-380.
- [3] Deng Chen, Zhao Jiguang, Du Xiaoping, et al. Transmitting power of FM/CW lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 304-307. (in Chinese)
邓陈, 赵继广, 杜小平, 等. FM/CW 激光雷达发射功率的研究[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 304-307.
- [4] Tang Kun, Zou Jiwei, Jiang Tao, et al. IR polarization properties of a target and its background [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5): 611-614. (in Chinese)
唐坤, 邹继伟, 姜涛, 等. 目标与背景的红外偏振特性研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 611-614.
- [5] Wang Mingjun, Wu Zhensen, Li Yingle, et al. Computation and analysis on the laser scattering echo energy from whole dimension target under complex environment [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(1): 66-69. (in Chinese)
王明军, 吴振森, 李应乐, 等. 复杂背景下大尺寸目标激光散射回波能量的计算 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 66-69.
- [6] Kotlyar V V, Stafeev S S, Liu Y, et al. Analysis of the shape of a subwavelength focal spot for the linearly polarized light[J]. Applied optics, 2013, 52(3): 330-339.
- [7] Clark J, Robson S. Accuracy of measurements made with a Cyrax 2500 laser scanner against surfaces of known colour [J]. Survey Review, 2004, 37(294): 626-638.
- [8] Renau J, Collinson J A. Measurements of electromagnetic back-scattering from known, rough surfaces*[J]. Bell System Technical Journal, 1965, 44(10): 2203-2226.