

· 光电器件与材料 ·

表面散射特性光学检测的多波长光纤传感器

朱南南, 杨宝磊, 李 丹, 张 骏

(烟台大学光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264005)

摘 要: 论述了一种表面散射特性实时光学检测的光纤传感器。采用 650 nm、1 310 nm 和 1 550 nm 激光作为光源, 对不同表面粗糙度的样品进行了测试和分析。实验结果表明, 采用多波长的复合光源激光光纤传感器能有效地减小测量的非系统误差, 从而极大地提高了其测量精度; 此外, 波长越短, 粗糙度越大, 散射越复杂。

关键词: 表面散射; 光学检测; 实时; 复合光源; 光纤传感器

中图分类号: TP212.4⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-05-0052-03

Multi-wavelength Fiber Sensor for Surface Scattering Characteristics Optical Measuring

ZHU Nan-nan, YANG Bao-lei, LI Dan, ZHANG Jun

(Institute Opto-Electronic Information of Science & Technology, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: A fiber sensor for optical measuring surface scattering characteristics in real time is introduced. The laser with 650 nm, 1 310 nm and 1 550 nm wavelength is taken as the light source to test and analyze the samples with different surface roughness. Experimental results show that measuring non-systematic error can be reduced effectively by using multi-wavelength composite light source laser fiber sensors. And measuring accuracy is improved greatly. Besides, the shorter is the wavelength, the greater is the roughness and scattering status will becomes more complicated.

Key words: surface scattering; optical detection; real time; composite light source; fiber sensor

随着各种超精密仪器的出现, 在光学系统及大型光学工程中对元件表面粗糙度的精确测量提出了越来越高的要求, 传统的测量方法已经不能解决此问题, 光纤传感技术的出现为满足此要求带来了可能性。与传统的测量仪器相比, 光纤传感器具有如下优点: 第一, 测量原理直观, 实验装置结构简单, 处理数据方便; 第二, 可避免实验中测量力大小, 触针损伤等引入误差; 第三, 由于光纤的传感探头细小, 可扭曲到元件内部进行测量, 并能快速和非接触测量, 因此在生产过程中能实现实时在线检测。光散射特性的理论分析和实验研究, 国内外已有不少学者就表面散射特性进行了研究^[1-11]。光散射特性由

光的反射强度和散射强度来表征, 光源照射到元件表面的散射光强包括两部分, 一部分来自洁净元件表面(表面粗糙度产生); 另一部分来自元件表面的污染物。文中重点研究元件表面粗糙度对散射特性的影响, 这种理论也适于元件表面污染物对光散射特性影响的分析。由于在大型光学工程测量中对光学元件表面散射特性的精确测量要求越来越高, 因此利用光纤技术设计了一种新型光纤表面散射特性测量仪多波长光纤传感器, 它不仅具有测量原理简单、数据处理方便和能实现快速和非接触实时在线检测的优点, 还能够有效地减小误差。利用光纤传感器研究光学元件表面散射特性, 对于颗粒污染光

收稿日期: 2014-10-08

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2011FM007)

作者简介: 朱南南(1988-), 女, 山东省德州人, 烟台大学光电信息科学技术学院硕士研究生, 主要从事光传输特性的研究。

学镜面表面洁净度的检测具有十分重要的现实意义。

1 测量原理

根据光的散射理论,假设元件表面的微观粗糙度服从高斯随机分布,不考虑元件表面的吸收,当入射光垂直照射时,元件表面的反射光强度为

$$I = I_0 \exp\left[-\left(\frac{4\pi}{\lambda} R_a\right)^2\right] \quad (1)$$

式中,波长 λ 的入射光强为 I_0 ; R_a 为元件表面轮廓的方均根误差,是评价表面粗糙度的参数之一。式(1)反映了表面粗糙度和光源波长分别与散射光强之间的关系。由于传感器的结构参数、光纤参数、光纤损耗、测量环境以及背景光扰动等非系统误差(记为 $\beta(\lambda)$ ^[11])严重影响了光纤传感系统的检测精度,因此采用双光源进行同时测量,可有效地减小非系统误差。

因此设计了双波长激光光纤传感表面散射特性检测系统。双波长分别为 λ_1 和 λ_2 ,上述干扰因素对于双光源的影响结果分别记为 $\beta(\lambda_1)$ 和 $\beta(\lambda_2)$,由公式(1)得出

$$I_{\lambda_1}(x) = I_{o-\lambda_1} \exp\left[-\left(\frac{4\pi}{\lambda_1} R_a\right)^2 + \beta(\lambda_1)\right] \quad (2)$$

$$I_{\lambda_2}(x) = I_{o-\lambda_2} \exp\left[-\left(\frac{4\pi}{\lambda_2} R_a\right)^2 + \beta(\lambda_2)\right]$$

由于采用的是同一光纤光路,因此可以认为这种影响是相等的,即 $\beta(\lambda_1) = \beta(\lambda_2)$,则由式(2)可得

$$\frac{I_{\lambda_1}(x)}{I_{\lambda_2}(x)} = \frac{I_{o-\lambda_1} \exp\left[-\left(\frac{4\pi}{\lambda_1} R_a\right)^2 + \beta(\lambda_1)\right]}{I_{o-\lambda_2} \exp\left[-\left(\frac{4\pi}{\lambda_2} R_a\right)^2 + \beta(\lambda_2)\right]} = \frac{I_{o-\lambda_1} \exp\left[\left(\frac{4\pi}{\lambda_2} R_a\right)^2 - \left(\frac{4\pi}{\lambda_1} R_a\right)^2\right]}{I_{o-\lambda_2}} \quad (3)$$

式(3)就是双光源光纤传感器表面粗糙度检测的表达式。可以看出,双光源原理从理论上消除了干扰因素 $\beta(\lambda)$ 的影响。对式(3)取对数,得出表面粗糙度评价参数 R_a 与 $I_{\lambda_1}(x)$ 、 $I_{\lambda_2}(x)$ 的关系如下

$$R_a^2 = \frac{1}{(4\pi)^2 (\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \ln\left[\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} \cdot \frac{I_{o-\lambda_2}}{I_{o-\lambda_1}}\right] \quad (4)$$

通过测量 $I_{\lambda_1}(x)$ 、 $I_{\lambda_2}(x)$ 、 $I_{o-\lambda_1}$ 、 $I_{o-\lambda_2}$ 就可以获得

表面粗糙度 R_a 。

2 实验装置

根据上述分析,设计了多波长表面粗糙度检测光纤传感器,其结构如图1所示。不同波长的激光器1和激光器2发射出光,经耦合装置进入发送光纤,发送光纤出射的光垂直入射到被测样品的表面,光线经被测表面相互作用之后,返回的反射光携带有被测表面的轮廓信息被接收光纤接收,接收光纤中的光信号再分成两个支路分别进入探测器1(光纤耦合硅探测器,型号:DET02AFC,波长范围为400~1100 nm)与探测器2(光纤耦合InGaAs探测器,型号:DET01CFC,波长范围为800~1700 nm)中,由于探测器只允许规定波长范围内的光线通过,所以利用两个探测器可以将两个不同波长的光源分开;然后经探测器将光信号转换为电压信号,再对电信号进行滤波放大预处理,经A/D转换后进入计算机,以电压信号来显示被测样品表面的信息。

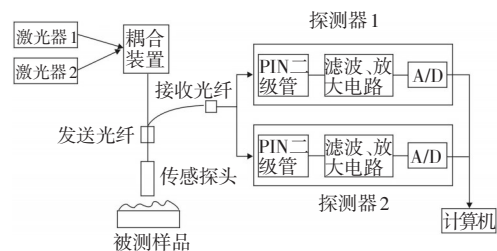


图1 多波长表面粗糙度检测光纤传感器的结构模型

3 传感器的实验研究

为了研究元件表面的散射特性,采用650 nm, 1310 nm和1550 nm的激光波长作为光源,以哈尔滨市精密样板工具厂生产的平磨标准样品(符合GB6060.2-85标准)作为测试样本进行检测,其输出特性曲线如图2所示。

图2为入射光分别以650 nm, 1310 nm和1550 nm三种波长垂直入射到元件表面时,元件表面的散射光强在指定参数下随着工作距离的变化情况。从图2a~图2c中三组图可以看出,以平磨为反射面测得的散射光强随着表面粗糙度的增大而减小,且波长越长,最大散射光强越大,最大散射光

强随着表面粗糙度的增大衰减越快;随着工作距离的增大,各特性曲线的散射光强先增大后减小,且波长越长,前坡线性范围越小,灵敏度越高,后坡线性范围越大,但灵敏度较差;而且特性曲线在峰值区对距离变化不敏感,而对表面粗糙度的变化敏感,因而可以利用在峰值区测得的输出信号来检测元件表面的散射特性。

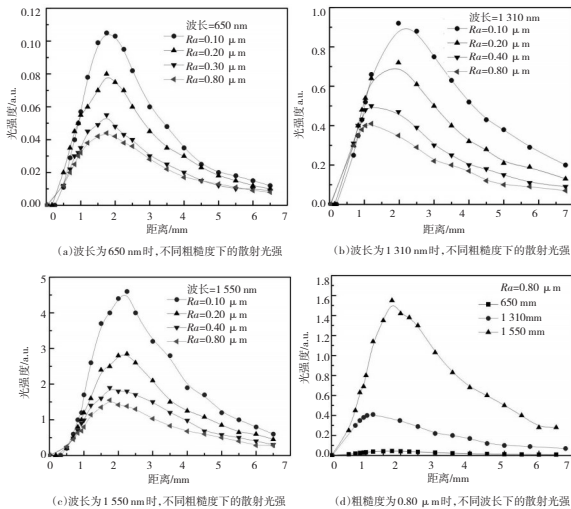


图2 平磨表面的散射光强度在指定的参数下随工作距离变化情况

图2d给出了不同波长、相同表面粗糙度 $Ra=0.80\ \mu\text{m}$ 平磨样品的光纤传感器测量结果。从图2中可以看出,表面粗糙度为 $Ra=0.80\ \mu\text{m}$, 光学检测的波长越长,测得的散射光强越大;随着工作距离增大,散射光强先增大后减小,波长越长,曲线衰减的越快,650 nm 波长下的散射光强衰减最小。在同一波长下,表面粗糙度越大,传感器输出曲线的前坡斜率较小,灵敏度较低。在一定表面粗糙度范围内,传感器输出曲线对不同波长的光源敏感。因此,在工程测量中要根据具体情况来选择光源的工作波长。

4 结论

通过对平磨标准样品表面散射特性的研究,可以看出,多波长复合光源表面粗糙度光纤传感器能有效地减小测量误差,提高测量精度;且元件表面的

散射特性不仅与表面粗糙度有关,还与入射波长有关,波长越短,粗糙度越大,散射情况越复杂,因此在测量中还要注意入射波长的选取,这对于以后颗粒污染镜面表面洁净度检测的研究具有十分重要的应用价值。

参考文献

- [1] FENG Ming-shen, SUI Cheng-hua. Study on two wavelength fiber sensor for measuring surface roughness[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2004, 21(6):873-878.
- [2] XU Jian-qiang, LIU Yu-qin. Study on fiber sensor for measuring surface roughness[J]. Metrology Journal, 2002, 23(4):280-281.
- [3] LI Ya-fei. Study on a new reflective optical fiber sensor[J]. Chinese Journal of scientific instrument, 2005, 26(10): 1097-1099.
- [4] 徐晓梅. 反射式强度调制型光纤传感孔内表面粗糙度检测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [5] 郭瑞鹏. 基于激光散射的在线检测表面特性参数的理论分析和实验研究[D]. 上海:上海交通大学, 2011.
- [6] 李丽娟. 目标激光散射特性在钢板表面微观轮廓精度测量中的应用研究[D]. 长春:长春理工大学, 2005.
- [7] SPYAK P R, WOLFE W L. Scattering from particulate-contaminated mirrors. Part 1: theory and experiment for polystyrene spheres and $l = 0.6328\text{mm}$ [J]. Optical Engineering, 1992, 31(8):1746-1756.
- [8] SPYAK P R, WOLFE W L. Scattering from particulate-contaminated mirrors. Part 2: theory and experiment for dust and $l = 0.6328\text{mm}$ [J]. Optical Engineering, 1992, 31(8): 1757-1763.
- [9] SPYAK P R, WOLFE W L. Scattering from particulate-contaminated mirrors. Part 3: theory and experiment for dust and $l = 10.6\text{mm}$ [J]. Optical Engineering, 1992, 31(8): 1764-1774.
- [10] SPYAK P R, WOLFE W L. Scattering from particulate-contaminated mirrors. Part 4: properties of scatter from dust for visible to far-infrared wavelengths [J]. Optical Engineering, 1992, 31(8):1775-1784.
- [11] KERKER M. The scattering of light and other electromagnetic radiation [M]. New York, Academic Press: 1969.