

文章编号: 1005-5630(2011)01-0042-04

## 利用光学系统色偏移进行表面粗糙度检测的方法及结构分析\*

吴宇昊, 李湘宁, 孙晶露, 孙 惠

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 利用光学方法对表面粗糙度进行检测以其非接触、高精度、无损伤、测量速度快等特点得到了广泛应用。文中介绍了一种利用多色光的轴向色焦点偏移进行表面粗糙度测量的方法, 该方法基于共聚焦显微系统的基本思想。文章阐述了该方法的基本原理, 并设计了一组光学系统对方法进行分析验证。

**关键词:** 光学设计; 色偏移; 粗糙度检测

**中图分类号:** O 435 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2011.01.010

### The method for measuring surface roughness by chromatic focal shift of optical system and its structure analysis

WU Yuhao, LI Xiangning, SUN Jinglu, SUN Hui

(School of Optical-Electronic and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Measurement of surface roughness with optical methods is widely used now due to its contactless, high precision, non-damage, high measuring speed, etc. This paper introduces a new non-contact method based on the confocal optical system to measure the surface roughness, which uses the principle of chromatic focal shift to measure surface roughness. This paper describes the principle of this new method and designs an optical system to analyze and confirm the feasibility of this method.

**Key words:** optical design; chromatic focal shift; surface roughness measurement

### 引 言

表面粗糙度已成为反映工件质量的重要参数, 传统的表面粗糙度的测量方法主要是利用机械探针, 像 Talysurf 系列<sup>[1]</sup>。由于机械方法容易损害被检测物体表面, 且探头的大小和曲率对测量数据的精度有较大的影响<sup>[2]</sup>, 仿真也不适合于测量硬度低的表面, 因此非接触式无损光学检测方法正逐渐成为粗糙度检测技术未来发展的主要方向。非接触式表面粗糙度检测以其高精度、无损伤、测量速度快等特点得到了广泛的应用。现有的检测方法包括光散射法、干涉法、散斑法、衍射投影法以及超声检测法等<sup>[3,4]</sup>。现介绍一种非接触式光学测量方法, 该方法利用多色光的轴向色焦点偏移进行表面粗糙度测量, 可测量出纳米级别的粗糙度, 具有快速、准确、直观的特点。

\* 收稿日期: 2010-08-05

作者简介: 吴宇昊(1987-), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事光学设计和光学测量方面的研究。

## 1 轴向色偏移检测表面粗糙度的理论依据

### 1.1 表面粗糙度

表面粗糙度是指加工表面上具有较小间距和峰谷所形成的微观不平度表面微观几何形状特性。国际上通用的粗糙度定量评定表面粗糙度的主要参数有轮廓算术平均偏差  $R_a$ 。 $R_a$  是指在取样长度  $L$  (具有表面粗糙度特征的一段基准线长度)内,被测表面的法向截面上,轮廓偏距绝对值的算术平均值<sup>[5]</sup>。其数学表达式为:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |l(x)| dx \quad (1)$$

即只要测出被检表面逐点的绝对高低差,就可利用式(1)得出该面的粗糙度。

### 1.2 色偏移原理

白光经光学系统时,系统对不同波长有不同的焦距,导致一个物点对应着许多不同波长的成像距离,见图 1(a)。同理,当成像距离确定后,不同波长就对应不同距离的物点<sup>[6,7]</sup>。当垂直于光轴的被检测表面因误差存在高低起伏变化时,相当于成像系统的物距在发生变化,每一物距位置只有一种波长与固定位置的像面共轭,只要判别出成像光的波长,就可以推断出物方的物距(即被检表面的高低差)是多少,见图 1(b)。这就是该方法的工作原理。

### 1.3 共聚焦原理

为了能得到准确的物像共轭关系,测量光路利用了共聚焦系统的工作原理。共聚焦系统通常采用单色光(激光)作为光源,以激光共聚焦显微镜(见图 2)为例<sup>[8]</sup>,在这个光路中,只有在焦平面的光才能穿过探测针孔,焦平面以外区域射来的光线在探测小孔平面是离焦的,不能通过小孔。由于照明针孔与探测针孔相对于物镜焦平面是共轭的,焦平面上的点分别在照明针孔与探测针孔同时聚焦,焦平面以外的点不会在探测针孔处成像。因此,对于确定的波长,共聚焦光路可以确保物像方具有唯一的共轭关系。

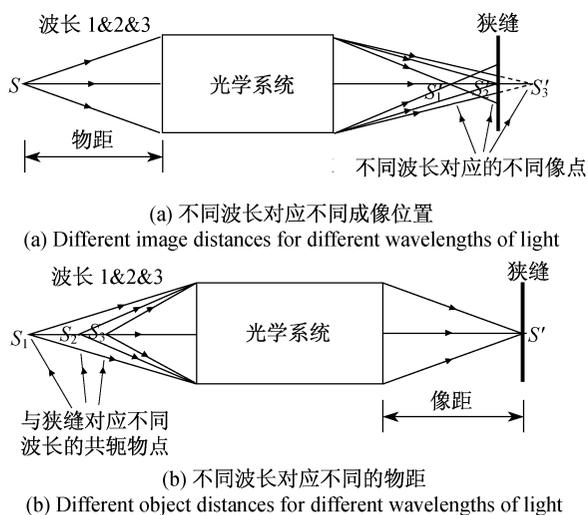


图 1 轴向色焦点偏移示意图

Fig. 1 Schematic diagram of axial chromatic focal shift

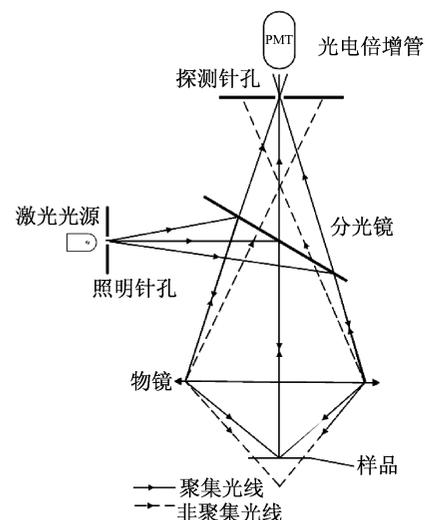


图 2 激光扫描共聚焦显微镜示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser scanning confocal microscope

## 2 系统结构

由于系统是利用轴向色焦点偏移来构成多波长的共轭关系,所以光源采用白色光源。此外,为了提高测量效率,共聚焦光路中的小孔被狭缝所替代,因此,每一次共轭成像所反映的是狭缝区域内的表面状况。再通过扫描获取整个被测面的表面状况。

系统主要由色差产生系统和波长识别系统两部分光学系统组成。测量的基本光路图如图 3 所示,白色光源 S 发出一束白色光经过照明光学系统  $L_1$ ,变为平行光。经过分光镜后,被无限筒长物镜  $L_2$  聚焦在被检测物体上。图 3 表示系统在被检测物体表面的三个不同高度位置对应的三种波长色偏移,被物体表面反射后经过色差产生系统  $L_3$  后,都可以通过狭缝。通过狭缝的光经过波长识别系统,最终被 CCD 采集。当被检测物体表面因表面误差存在起伏变化时,光学成像系统的物距也相应的存在变化,与之对应的只有特定波长的光能通过狭缝。因此,只要判别出通过狭缝光的波长,就可以确定物距(或者被测点高度)是多少。实际应用中可选取主波长的物距作为基准,其他波长的物距与基准物距的偏差就构成了被检测物体表面的粗糙情况。因为系统是逐行扫描获得的是 2D 的测量数据,这样就可以计算轮廓算术平均偏差  $R_a$ 、轮廓最大高度  $R_z$  等参数,只要对被检测物体在垂直方向上实行一维扫描即可获得被检测物体的面状范围内的表面粗糙度情况,输出的是 3D 测量数据,可以计算被扫描面的平面度等三维参数。

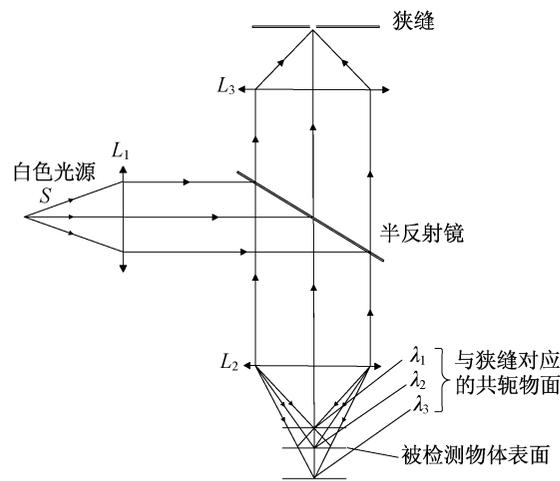


图 3 轴向色偏移检测原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of optical measurement set-up based on the principle of axial chromatic focal shift

## 3 模拟仿真

为了分析检测精度,现设计了相应的光学系统,并利用 Zemax 软件进行了分析。

### 3.1 色差产生系统的设计

设计系统的线视场为 1mm,物方数值孔径为 0.45,光源的波长为 436~700nm 的白光。设计系统时,除了满足单色光的像差校正外,对于色差应尽量使其与波长成线性关系。图 4 为系统的近轴色差与物距的对应关系,可以看到物距与波长之间存在着近乎线性的单调关系。

### 3.2 分光光学系统的设计

分光光学系统为一色散系统,不同颜色的光通过该系统将被转向为某一固定方向。假设所有波长的光恰好通过狭缝中的一点[图 1(b)],各种波长以各自方向成像将在面阵 CCD 上形成垂直方向的展开的像点。设计的最终目的是使得不同波长的光在垂直方向上存在成像差异且满足像点位置与波长一一对应的线性光关系。通过观察像差图[图 5(a)]和点列图[图 5(b)]可以得知该系统使得选取的三个代表波长大小与成像位置之间满足了设计要求。因此,只要看到 CCD 面上的成像,就可以识别出相应的波长,进而可以推算出被检测物体在水平方向上的粗糙度。

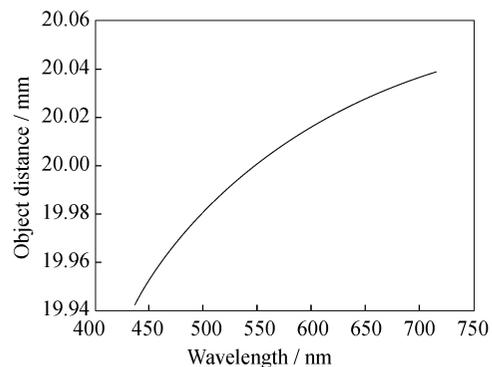


图 4 色差产生系统物距与波长的关系示意图

Fig. 4 Relations diagram between the object distance and the wavelength

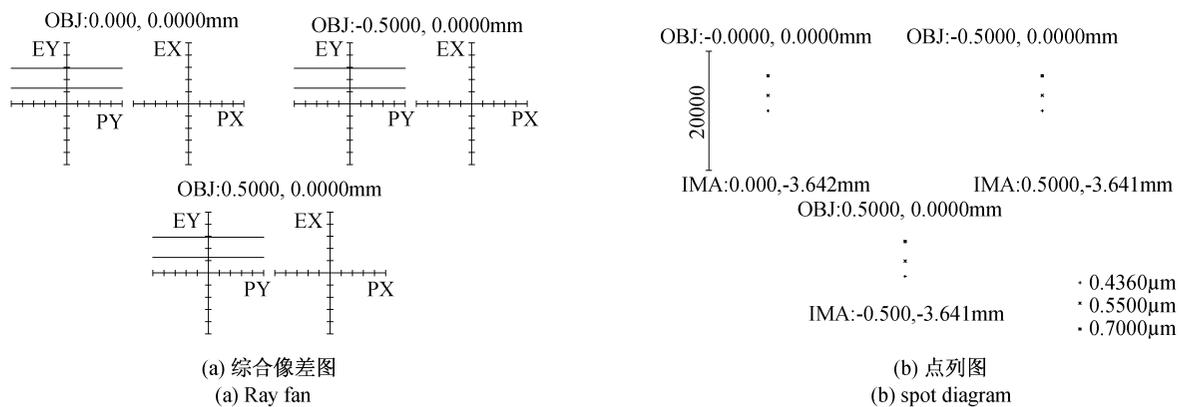


图5 分光光学系统的综合像差图与点列图

Fig. 5 Ray fan and spot diagram of light-splitting optical system

### 3.3 设计精度分析

因为设计波长范围为 436~700nm, 所以从图 5(b) 中得到像点垂直距离之间的最大差值  $\Delta l$  大约是 5830 $\mu\text{m}$ , 从表 1 中可测出在该波长范围内最大物距差值  $d$  是 93.4 $\mu\text{m}$ 。假设面阵 CCD 的像素尺寸大小  $\phi$  为 5 $\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ , 为了估算把 CCD 的像素单元作为测量系统的最小基准单位, 那么该方法在 436~700nm 的波长范围内的精度  $\Phi$  按照下面等式可以计算出:

$$\frac{\Phi}{\phi} = \frac{d}{\Delta l} \quad (2)$$

把数值代入式(2), 可以推算出这种结构测量粗糙度的最小精度  $\Phi$  大约为 80nm。以上是根据设计结果进行的理论精度分析, 在实际应用中测量精度可能达不到这么高, 因为 CCD 噪音以及软件仿真的局限性会影响到测量结果。文中主要目的是首先介绍利用轴向色焦点偏移测量粗糙度的新方法, 然后通过设计一个光学系统用软件来仿真分析该方法的可行性。

## 4 结论

现有的表面粗糙度测量技术精度已经能够达到纳米级别, 文中介绍了一种区别于其他测量原理的新方法, 并根据原理设计出符合测试要求的光学系统, 经过计算机模拟仿真可以达到纳米级别。该方法的优点在于能够对线状范围内的物体进行非接触式在线实时测量, 利用几何光学中简单的多色光的轴向色偏移原理, 具有简单的测量结构。模拟结果表明该方法具有测量表面粗糙度的可行性, 在测量表面粗糙度方面有着广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 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): 147-150.
- [2] TAY C J, QUAN C G. A parametric study on surface roughness evaluation of semi-conductor wafers by laser scattering[J]. *Optik*, 2003, 114(1): 1-6.
- [3] 王 真, 郭天太, 周义偲, 等. 表面粗糙度的高精度非接触式测量[J]. 机械工程师, 2009, 4: 66-67.
- [4] 刘 斌, 冯其波, 匡萃方. 表面粗糙度测量方法综述[J]. 光学仪器, 2004, 26(5): 54-58.
- [5] 王 晶, 洪海涛, 邹志华. 基于光学色差传感器的表面粗糙度测量[J]. 仪表技术与传感器, 2006, 10: 4-5.
- [6] SMITH W J. Modern Optical Engineering[M]. 3rd ed. Carisbad: McGraw-Hill, 2000: 72-73.
- [7] 李湘宁. 工程光学[M]. 2版. 北京: 科技出版社, 2010.
- [8] 韩 卓, 陈晓燕, 马道荣, 等. 激光扫描共聚焦显微镜实验技术与应用[J]. 科技信息, 2009, 19: 27-28.