

激光三角位移计接收光功率与被测表面倾斜 的关系及倾斜角测量*

庄葆华 王少清* 蒋诚志 张吉华 张文伟

(天津大学精密仪器系, 天津 300072)

提要 以激光在粗糙物体表面的散射理论为基础, 详细讨论了被测表面倾斜与激光三角位移计接收光功率的关系, 在此基础上提出了在测位移的同时测量该倾斜角的方法。给出了计算机模拟及实测的结果。

关键词 位移测量, 激光三角法, 光散射, 倾斜角测量

1 引 言

由于半导体激光器和新型光电位置检测元件(如 CCD 阵列和 PSD 器件等)的发展, 使得以经典的光学三角法为基本原理的激光三角位移计在测量头小型化、测量高精度和高速度等方面得到了长足的进展。这种小型化的位移计可方便地用于多种场合下的高精度位移测量, 其中尤以在三坐标测量机上取代传统的接触式测头以及动态位移的非接触测量的应用方面具有广阔的前景^[1,2]。但目前仍有很多影响其测量精度的因素, 如被测表面的颜色、材料、粗糙度、光学性质和表面倾斜等。前四种因素产生的误差原则上可通过标定的方法使其减少或消除, 而表面倾斜的影响则需要在测量中同时知道被测表面的倾斜角度才能对其误差加以修正。目前尚无较好的方法能在测量位移的同时获得倾斜角的信息。本文拟在光散射的理论基础上详细讨论物体表面倾斜与激光三角位移计接收透镜接收到的光功率的关系, 提出了一种在测量位移的同时测量倾斜角的方法, 给出了计算机模拟及实测结果。

2 光学三角法测位移原理

图 1 示出激光单光点单接收三角法测位移的原理图。半导体激光器 LD 发出的激光经会聚透镜 L_1 聚焦后垂直入射到被测物体表面上。表面的散射光由接收透镜 L_2 接收并成像于光电位置检测元件的光敏面上。被测物体表面的位移 x 引起光敏面上成像光点产生位移 x' 。通常为了安装方便, 光敏面与接收透镜的光轴垂直。通过简单的运算可得到物体位移 x 与像光点位移

* 国家自然科学基金、天津市自然科学基金资助。

** 山东建筑材料工业学院, 济南 250022。

收稿日期: 1994 年 11 月 1 日; 收到修改稿日期: 1995 年 2 月 9 日

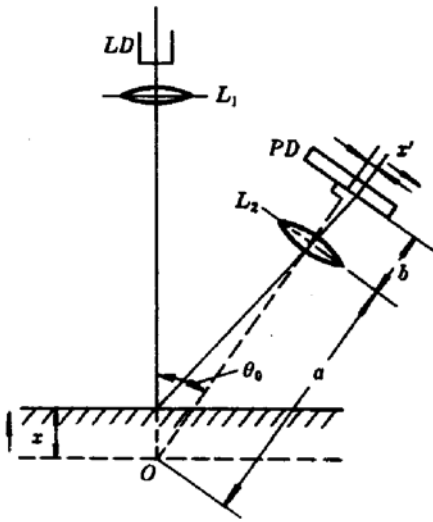


Fig. 1 Schematic diagram of optical triangulation for displacement measurement

x' 的关系式为^[1]

$$x = \frac{ax'}{b \sin \theta_0 - x' \cos \theta_0} \quad (1)$$

式中 θ_0 为投射光轴与接收光轴的夹角。

光电位置测元件 PD 将像光点位移量转换为电量输出,测得 PD 的输出信号即可求得被测物体的位移。

3 接收透镜接收光功率与被测表面倾斜角的关系

当被测表面上入射光点处的法线与入射光方向不重合时称被测表面发生了倾斜。随着倾斜角的不同,散射光场的空间分布也将发生变化,从而使接收透镜的接收光功率发生变化。物体表面的光散射是一个十分复杂的问题,与表面的粗糙度及物体的复折射率均有关^[3]。由于在应用中被测表面通常较为粗糙,为了使问题得以简化,且不失一般性,可假设被测表面为理想的漫散射表面,其散射光的空间分布用朗伯定律表示为^[4]

$$I = I_0 \cos \phi \quad (2)$$

如图 2 所示, ϕ 为散射光方向与入射光点处表面法线 n 之间的夹角, I 为 ϕ 方向单位立体角单位时间散射的光能量, I_0 为 n 方向单位立体角单位时间散射的光能量。据朗伯定律还可知,理想漫散射表面的散射光场的空间分布与入射光的入射方向无关,仅由散射面法线的空间取向所定。

以上述理论为基础研究接收透镜接收光功率。如称由投射光轴和接收透镜光轴构成的平面为测量入射面,实验与理论分析均说明,被测表面法线在测量入射面内的倾斜对位移测量的影响最大,下面就以此种情况进行讨论。

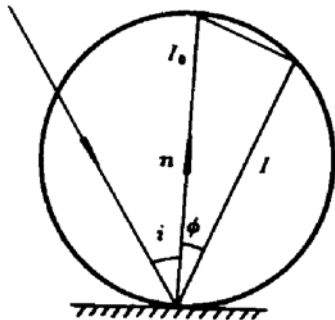


Fig. 2 Schematic diagram of Lambertian model

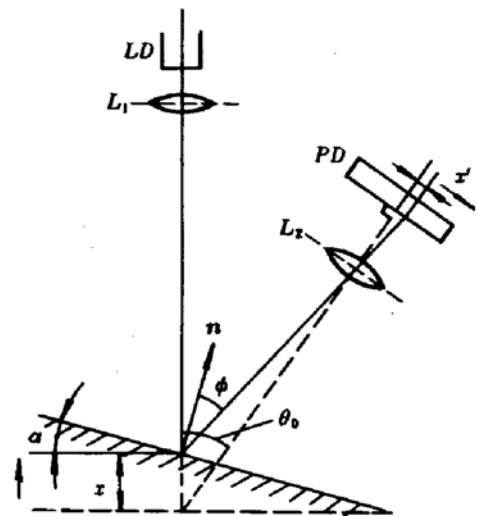


Fig. 3 Geometry of the laser beam in the displacement measurement of an inclination surface

接收光功率 P 的基本计算式为

$$P = I\Omega_D \quad (3)$$

式中 I 为接收透镜所对应的接收光强, Ω_D 为接收透镜所对应的立体角。由于接收透镜口径小可认为接收光强在 Ω_D 的立体角内是均匀的。

如图 3 所示, 当被测表面倾斜角为 α , 并且有位移 x , 根据式(2), ϕ 可近似等于 $\theta_0 - \alpha$, 则

$$I = I_0 \cos(\theta_0 - \alpha) \quad (4)$$

接收透镜所对应的立体角

$$\Omega_D = \pi R^2 / r^2 \quad (5)$$

式中 r 是在表面有倾斜及位移时, 投射光点到透镜中心点的距离, 当 R/r 很小时可近似为

$$r = a - x \cos \theta_0 \quad (6)$$

经计算整理后可得到接收光功率的计算式

$$P = I_0 \frac{\pi R^2}{a^2} \left(1 + 2 \frac{x}{a} \cos \theta_0 \right) \cos(\theta_0 - \alpha) \quad (7)$$

从上式可知接收光功率有如下的变化规律:

(1) 当倾斜角 α 一定时, 接收光功率 P 随被测表面位移呈线性变化关系; (2) 当被测表面的位置一定时, 接收光功率 P 随倾斜角 α 的变化规律为: 当 $\alpha < \theta_0$ 时, P 随 α 增大而增大; 当 $\alpha > \theta_0$ 时, P 随 α 增大而减小, 当 $\alpha = \theta_0$ 时, P 取极大值。

图 4 与图 5 示出其计算机模拟的结果。其中 θ_0 取 30° , $a = 53 \text{ mm}$, $R = 5 \text{ mm}$ 。图 5 的 11 条曲线是在 α 为 $\pm 25^\circ$ 范围内依次由下至上间隔 5° 。

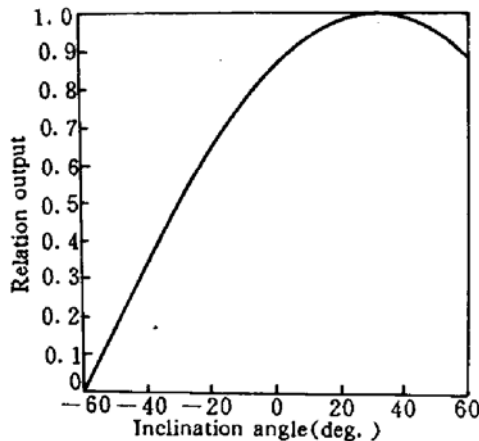


Fig. 4 Signal power versus inclination angle α
(displacement $x = 0$)

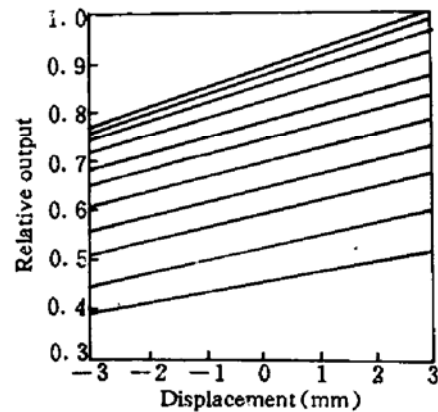


Fig. 5 Signal power is related
to displacement x

用天津大学精密仪器工程系非接触光电传感器教研组研制的激光三角位移计进行实测。图 6 示出实测结果, 实验结果与理论计算基本吻合。所存在的差别是接收光功率的极大值未出现在 $\alpha = \theta_0 (= 30^\circ)$ 处, 而是出现于 $\theta_0 \approx 15^\circ$ 处。作者认为其主要原因是实测表面为非理论漫散射面, 因而在其散射光场中有部分镜面反射光存在, 以致当被测表面倾斜约 15° 时, 镜面反射光进入接收透镜, 使得其接收光功率达到极大值。图 6 中的纵坐标以接收光电器件 PSD 的输出光电流经 I/V 转换的电压值代表光功率值。激光三角位移计的基本结构尺寸为 $\theta_0 = 30^\circ$, $a = 55 \text{ mm}$, $R = 5 \text{ mm}$, 其测量范围为 $\pm 3 \text{ mm}$ (可扩至 $\pm 5 \text{ mm}$), 分辨率为 $1 \mu\text{m}$ 。

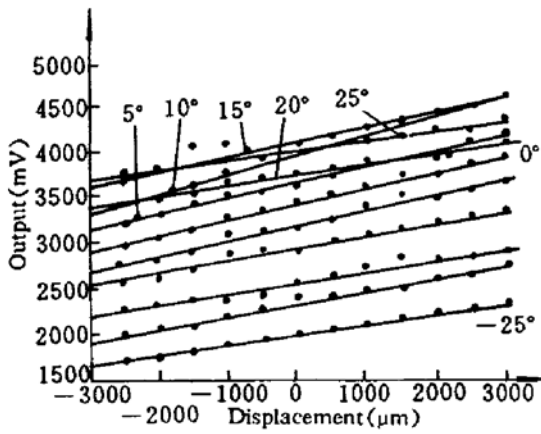


Fig. 6 Experimental curves show that the signal power is related to inclination angle α and displacement x (signal power is indicated by the output of the PSD)

4 测量表面倾斜角的方法

4.1 测量表面倾斜角的必要性

实际上由于漫散射表面的光强分布以朗伯模型来描述,在接收透镜口径上所接收的光功率并不是均匀的。这就使得光电接收面上的像光斑的光能质心相对其几何中心产生偏移。由于光电检测元件(如 PSD)检测的是投射到其上的光斑的光能质心的位置,而不是其几何中心的位置,使测量结果与式(1)的计算结果有一偏差量。这是表面倾斜带来误差的主要原因之一。图 7 是以日本某公司生产的激光三角位移计的测量误差实测曲线。图中 9 条曲线为在 $\alpha = \pm 40^\circ$ 范围内,依次由下至上间隔 10° 。由图示曲线看出测量误差受倾斜角的影响很大。

为了提高测量精度可对实测结果进行修正,或根据被测表面的法线方向回转测量头使得投射光轴与被测表面法线的偏离在一允许的范围,即应实时发出法向跟踪信号。上述两种提高精度的方法均需测量位移量的同时能测量出表面的倾斜角。

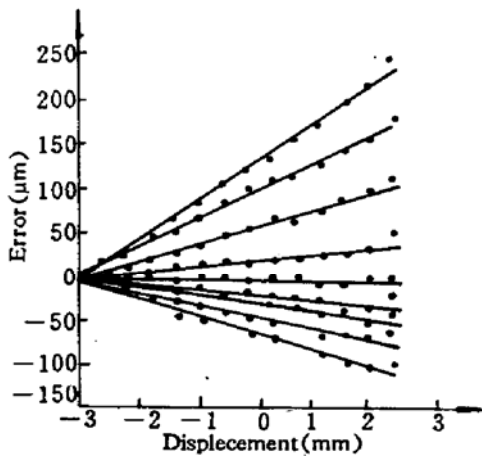


Fig. 7 Displacement measurement error is related to the inclination angle α and displacement x

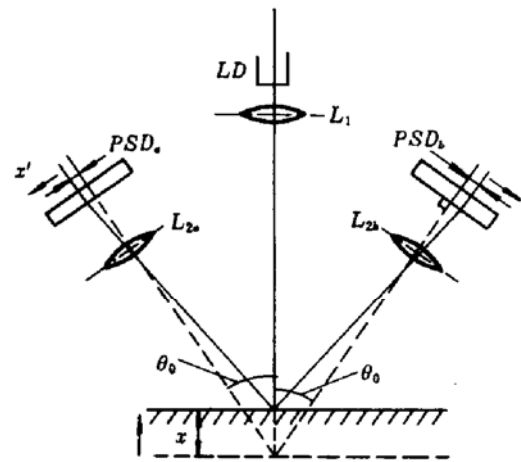


Fig. 8 Schematic diagram of a double-optical-triangulation measurement system

4.2 表面倾斜角测量方法

式(7)表明,接收透镜的接收光功率与位移及倾斜角两者有关。仅用一个接收器是无法测量表面倾斜角的,作者给出一种双三角接收法,即如图 8 所示对称安排的光电接收装置。当被测表面相对其中一个接收装置的倾斜角为 α 时,相对另一个接收装置的倾斜角为 $-\alpha$ 。根据式(7),两个接收装置的接收光功率分别为

$$P_1 = \pi I_0 \frac{R^2}{a^2} \left(1 + \frac{2x}{a} \cos \theta_0 \right) \cos(\theta_0 - \alpha) \quad (8)$$

$$P_2 = \pi I_0 \frac{R^2}{a^2} \left(1 + \frac{2x}{a} \cos \theta_0 \right) \cos(\theta_0 + \alpha) \quad (9)$$

两式相除并整理可得

$$\alpha = \text{tg}^{-1}[(P_1 - P_2)/(P_1 + P_2)\text{tg}\theta_0] \quad (10)$$

以本科研组研制的激光三角双接收位移测量仪对被测表面倾斜角进行实测,经分段非线性修正后的实测曲线示于图 9。图中实线为位移量 $x = 0$ 时的测量曲线,其余各点为 $x = -3, -2, -1, 1, 2, 3$ mm 时的测量值。

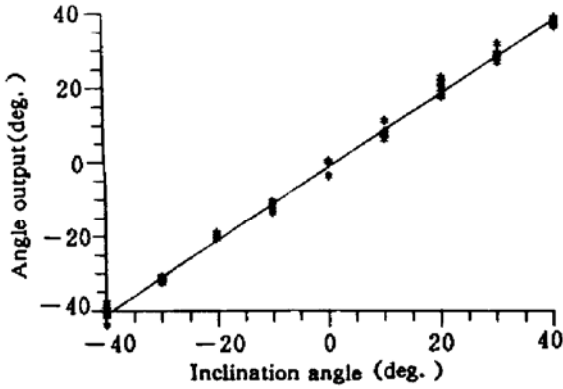


Fig. 9 Experimental curve of the inclination angle α measured by a double-optical-triangulation method

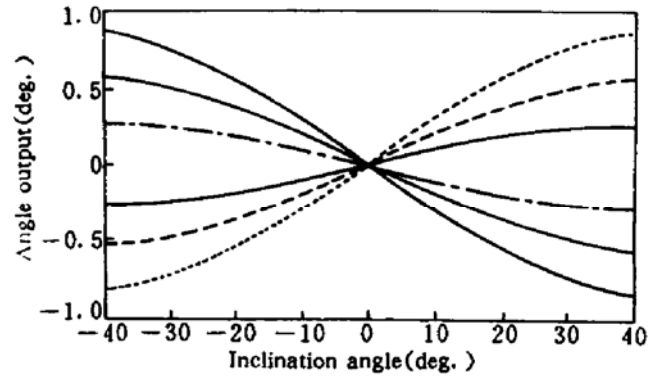


Fig. 10 Angle deviation versus the inclination angle α

影响表面倾斜角测量精度的因素很多。由式(8)与(9)分析可知,两接收器的结构相对于投射光轴不对称是主要因素。以两接收光路对投射光轴的夹角 θ_0 不相同为例进行了计算机模拟分析。图 10 示出当两夹角不相同的数值分别为 $1.5^\circ, 1.0^\circ, 0.5^\circ, -0.5^\circ, -1.0^\circ, -1.5^\circ$ 时被测表面倾斜角与角度测量误差关系曲线。由于结构不对称使得在位移量不同时对倾斜角测量带来测量值的分散,图 9 示出了在位移量为 ± 3 mm 范围内,在倾斜角为 $\pm 40^\circ$ 时,其分散值约为 $\pm 2^\circ$ 。

5 减少或消除被测表面倾斜的影响

当激光三角位移计的结构为单接收方式时,正确选择测量头的安装方向,使测量入射面与倾斜回转轴平行,这将可减少倾斜影响。不过这种方法在测量曲面轮廓时有诸多不便。

当采用双接收方式时可在测量位移的同时测出倾斜角。为此,(1)以实时测出的倾斜角而发出法向跟踪信号,测量头的回转装置带动测量头回转,使其投射光轴与被测表面法线夹角不超过 $\pm 10^\circ$ 时,测量误差在位移量 ± 3 mm 及倾斜角 $\pm 40^\circ$ 范围内降至 $\pm 30 \mu\text{m}$ (见图 7);(2)当不采用测量头回转装置,即测量头的测量过程中不回转时,可用所测倾斜角的数值来确定修正模型,以此对测量值进行修正。这种方法可以明显地提高测量精度。图 11 示出了在修正后尚残留的测量误差,其范围在 ± 0.04 mm 之内。

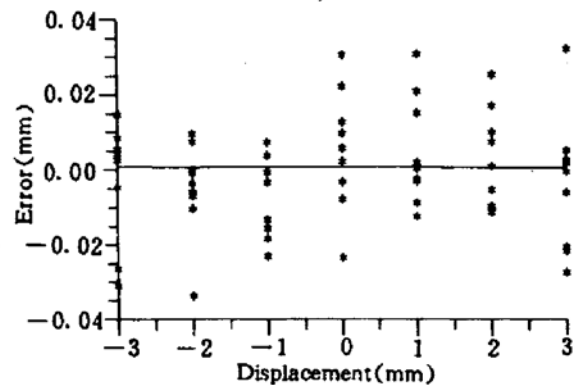


Fig. 11 Experimental results of the displacement measurement error distribution after error correction

致谢 感谢李真教授、孟庆宜硕士为本项研究所做的大量有价值的实验工作。

参 考 文 献

- 1 W. Stevenson. The use of laser triangulation probes in coordinate measuring machines for part tolerance inspection and reverse engineering. *SPIE*, 1992, 1821:406~414
- 2 庄葆华,张吉华. 激光三角测距法及其在汽车行业测量中的应用. *汽车技术*, 1993, (11):28
- 3 P. Beokmann, A. Spizzichino. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. London; Pergamon press, 1963. 17~67
- 4 M. 玻恩, E. 沃耳夫. 光学原理. 北京: 科学出版社, 1978. 242

Dependence of the Received Light Power of a Laser Triangulation Displacement Sensor on the Testing Surface Inclination and the Inclination Angle Measurement

Zhuang Baohua Wang Shaoqing Jiang Chengzhi Zhang Jihua Zhang Wenwei
(*Department of Precision Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072*)

Abstract The testing surface inclination will result in the large measuring error in the displacement measurement using commercial laser triangulation sensors. In this paper, according to the theory of light scattering from rough surfaces, the relationship between the received light power of the laser triangulation sensor and the testing surface inclination is discussed in detail. A method which can be used to measure the inclination angle and the displacement of the testing surface at the same time is given. Depending on the measurement of the inclination angle the measuring error of the displacement can be corrected or minimized. A computer simulation and experimental results are presented.

Key words displacement measurement, laser triangulation displacement sensor, inclination angle measurement, light scattering