

# 一种改进型高精度激光三角位移传感器的结构设计研究

曹红超<sup>1,2</sup>, 陈磊<sup>3</sup>, 王波<sup>1,2</sup>, 朱万彬<sup>1</sup>

- 1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林, 长春 130033;
- 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;
- 3. 中国人民解放军理工大学理工学院, 江苏南京 211101

**摘要:**在对传统激光三角位移传感结构分析的基础上,提出了一种新的结构设计方案,推导出了相应的测距方程表达式。并对其进行了理论分析,表明此结构设计方案是可行的,并且在探测器尺寸一定的情况下利用此结构可以大大地提高测量范围。

**关键词:**激光三角位移传感器;测距方程;探测器;测量范围

中图分类号:TN248.1

文献标识码:A

文章编号:0253-2743(2007)06-0014-02

## The study of a new kind structure of high precision laser displacement sensor based on triangulation

CAO Hong-chao<sup>1,2</sup>, CHEN Lei<sup>3</sup>, WANG Bo<sup>1,2</sup>, ZHU Wan-bin<sup>1</sup>

- 1. State Key laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
- 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
- 3. Institute of Science, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China

**Abstract:** A new kind of structure was designed after analyzed the traditional laser displacement sensor, and the distance measuring equation was also given. By analyzing the equation we found that this new structure was really feasible, it can enlarge the measure region in a great deal when the size of the detector is limited.

**Key words:** laser displacement sensor; distance measuring equation; detector measurement region

激光位移传感器因其在测量中的非接触、高精度和测量适用范围广而得到了迅速发展,测量方法多种多样。其中以三角测量法<sup>[1]</sup>最为普遍,但人们似乎更着重于对提高测量精度的研究,而对提高测量范围问题的研究较少。本文对此问题进行了研究提出了一种基于三角测量法的可大大提高测量范围的设计方案,并给出了测距方程,理论分析表明此方案是可行的。

$$x = \frac{ax' \sin \theta_3 \cos \theta_1}{b \sin(\theta_1 + \theta_2) - x' \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)}$$

式中,  $\theta_1$  为激光束光轴与被测面法线之间的夹角;  $\theta_2$  为成像透镜光轴与被测面法线之间的夹角;  $\theta_3$  为探测器光轴与成像透镜光轴之间的夹角。

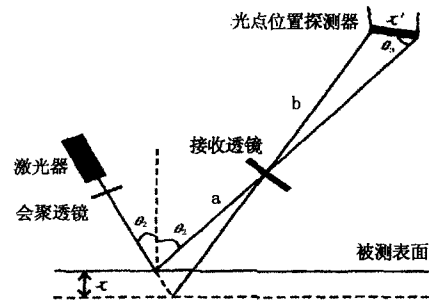


图2 斜射式光路图

以上就是两种最常见的激光三角位移测量法的结构和测量原理,从上面两种结构可以看出当测量距离比较大的时候,入射在目标上的光点经接收透镜成像后有可能打不到探测器上,即在探测器尺寸一定的情况下,测量距离将受到大大的限制。为解决此问题我们对其进行了改进,设计了一种新的结构可以利用较小的探测器尺寸获得较大的测量范围。

## 1 几种常见的三角法测量结构及原理<sup>[2]</sup>

### 1.1 直射式

直射式三角法测量等效光路如图1所示。激光器发出的光线,经会聚透镜聚焦后垂直入射到被测物体表面上,物体移动或表面变化导致入射光点沿入射光轴移动。接收透镜接收来自入射光点处的散射光,并将其成像在光点位置探测器<sup>[3]</sup>(如PSD、CCD)

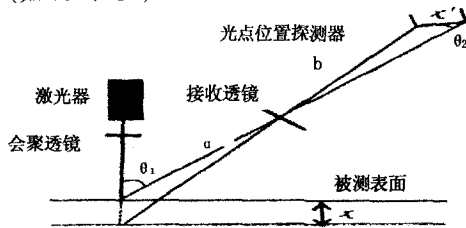


图1 直射式光路图

测量原理:利用相似三角形各边之间的比例关系,按下式可求出被测面的位移:

$$x = \frac{ax' \sin \theta_2}{b \sin \theta_1 - x' \sin(\theta_1 + \theta_2)}$$

式中,  $a$  为激光束光轴和接收光轴的交点到接收透镜前主面的距离;  $b$  为接收透镜后主面到成像面中心点的距离;  $\theta_1$  为激光束光轴与接收透镜光轴之间的夹角;  $\theta_2$  为探测器与接收透镜光轴之间的夹角。

### 1.2 斜射式

图2为斜射式三角测量原理图。激光器发出的光与被测面的法线方向成一定角度入射到被测面上,同样用接收透镜接收光点在被测面的散射光或反射光。

利用相似三角形的比例关系,则物体表面沿法线方向的移动距离为

## 2 改进型三角法测量结构及位移表达式的推导

为了获得较大的测量范围,在接收透镜像方空间平行于透镜主光轴的地方安装了一平面全反射镜,其结构如图3所示

### 2.1 位移表达式的理论推导

在图3中令  $CD = x$   $BC = L$   $BD = L_0$   $FM = y$   $AE = d$   
 $FO = a$   $OD = f$   $FG = L'$   $\angle FOM = \theta_0$   $\angle OFP = \theta_1$   
 $\angle BDO = \theta_2$   $\angle ABC = \theta_3$   $\angle BCA = \theta'$

需特别说明的是:  $x$  是被测面上光点在探测器平面上的位移,  $L_0$  是探测器的有效长度,  $f$  是接收透镜的焦距。  $FD$  是接收透镜的光轴,它与平面全反射镜平行,  $AE$  是平面镜的法线。所以,  $\angle OAE = \angle EAC = \frac{\pi}{2} - \theta_0$  从而得  $\angle BAC = \frac{\pi}{2} - \angle EAC = \theta_0$

对  $\triangle ABC$  利用面积公式有:

$$\frac{1}{2} | AB \| AC \| \sin \angle BAC = \frac{1}{2} | AC \| BC \| \sin \angle BCA$$

$$\text{即: } \frac{1}{2} | AB \| AC \| \sin \theta_0 = \frac{1}{2} | AC \| BC \| \sin \theta' \quad (1)$$

在  $\triangle ABC$  中  $\angle ABC + \angle BCA + \angle BAC = \pi \Rightarrow$   
因镜面平行于接收透镜主光轴所以  $\theta_3 = \pi - \theta_2$ ,

$$\theta' = \pi - (\theta_0 + \theta_3) = \theta_2 - \theta_0 \quad (2)$$

$$\text{又 } | AB | = f - (d \operatorname{ctg} \theta_0 + L_0 \cos \theta_2) \quad (3)$$

联立以上各式推出:

$$\begin{aligned} | BC | &= \frac{[f - (d \operatorname{ctg} \theta_0 + L_0 \cos \theta_2)] \sin \theta_0}{\sin \theta'} \\ &= \frac{[f - (d \operatorname{ctg} \theta_0 + L_0 \cos \theta_2)] \sin \theta_0}{\sin[\pi - (\theta_0 + \theta_3)]} \\ &= \frac{[f - (d \operatorname{ctg} \theta_0 + L_0 \cos \theta_2)] \sin \theta_0}{\sin(\theta_2 - \theta_0)} \end{aligned} \quad (4)$$

由  $\triangle OFG \sim \triangle OAE$  得

$$\frac{| FG |}{| AE |} = \frac{| FO |}{| OE |} \Leftrightarrow \frac{d}{L'} = \frac{d \operatorname{ctg} \theta_0}{a} \quad (5)$$

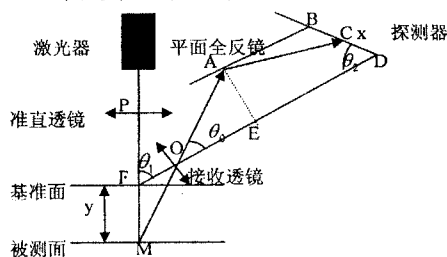


图3 改进型系统结构

作  $FG$  垂直于透镜光轴  $FD$ 。对  $\triangle OFM$  利用三角形面积公式有:

$$\frac{1}{2} | FM \| FC \| \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_1) + \frac{1}{2} | FG \| FO \| \sin \frac{\pi}{2} = \frac{1}{2} | OF \| FM \| \sin(\pi - \theta_1)$$

即

$$\frac{1}{2} y L' \sin(\frac{\pi}{2} - \theta_1) + \frac{1}{2} L' a = \frac{1}{2} a y \sin(\pi - \theta_1) \Rightarrow L' = \frac{a y \sin \theta_1}{y \cos \theta_1 + a} \quad (6)$$

$$\text{由(5)和(6)式联立} \Rightarrow \operatorname{tg} \theta_0 = \frac{y \sin \theta_1}{y \cos \theta_1 + a} \quad (7)$$

$$\text{又 } | BC | + | CD | = | BD | \Leftrightarrow | BC | + x = L_0 \text{ 且 } L_0 = \frac{d}{\sin \theta_2} \quad (8)$$

联立以上各式得

$$x = \frac{[2 d \sin \theta_2 \cos \theta_1 - f \sin \theta_1 \sin \theta_2] y + 2 d a \sin \theta_2}{\sin \theta_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) y + a \sin^2 \theta_2} \quad (9)$$

若令

$$\begin{aligned} A &= \sin \theta_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \\ B &= a \sin^2 \theta_2 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} C &= 2 d \sin \theta_2 \cos \theta_1 - f \sin \theta_1 \sin \theta_2 \\ D &= 2 a d \sin \theta_2 \end{aligned}$$

则(9)式最终简化为

$$y = \frac{Bx - D}{C - Ax} \quad (11)$$

此既是测量位移的最终表达式需要说明的是一旦系统结构确定(10)式中的  $a d f \theta_1 \theta_2$  各参量均为定值。

### 3 理论分析

#### 3.1 分辨率<sup>[4]</sup>

在(10)式中对  $x$  求导可得

$$\frac{d_y}{d_x} = \frac{BC - AD}{(C - Ax)^2} \quad (12)$$

当  $x = 0$  时,  $\frac{d_y}{d_x} = \frac{BC - AD}{C^2}$ ; 当  $x = \frac{C}{A}$  时,  $\frac{d_y}{d_x} = \infty$ , 即分辨率

是非线性的。

#### 3.2 测量范围

因为在探测器尺寸  $L_0$  一定的情况下, 镜面到接收透镜主轴的距离  $d$  有如下的关系  $L_0 = \frac{d}{\sin \theta_2}$  由此可见, 当  $\theta_2 =$

$\frac{\pi}{2}$  时探测器的尺寸最小, 即  $L_0 = d$ 。而且此时探测器所在的面正好是接收透镜的焦平面。下面就  $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$  的情况进行讨论, (9) 式可以化简整理为

$$y = \frac{ax - 2da}{2d \cos \theta_1 - f \sin \theta_1 - x \cos \theta_1} \quad (13)$$

当  $x = 0$ , 即被测面上的光斑正好成像在探测器的边缘上时, 这时测量范围应达到最大值, 在此条件下上式变为

$$\begin{aligned} y &= \frac{2da}{f \sin \theta_1 - 2d \cos \theta_1} \\ &= \frac{2da}{\sqrt{f^2 + 4d^2} \sin(\theta_1 - \varphi)} \end{aligned} \quad \text{其中 } \varphi = \operatorname{arctg} \frac{2d}{f} \quad (14)$$

由(14)式可见适当的选取  $d$  与  $f$  的值, 可以使测量范围可以很大, 理论上当  $\theta_1 = \varphi$  时  $y \rightarrow \infty$  即测量范围可以无穷大, 但是实际上由于被测表面对激光束的散射<sup>[5,6]</sup>以及激光束在传播过程中的衰减使得测量范围受到大大的限制。

#### 3.3 精度

在传统的直射式激光位移三角测量法中, 为了解决由于离焦造成的精度下降的问题  $\theta_1$  和  $\theta_2$  需满足 Scheimpflug 条件<sup>[(7-8)]</sup>, 即

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \beta \operatorname{tg} \theta_2$$

其中  $\beta$  是横向放大率,  $\theta_1$  和  $\theta_2$  所代表的物理含义和图(1)中所示的相同。在图(3)中所示的改进型结构中由于全反射平面镜的加入使得准确调焦位置只有一个, 其它的像点处于不同程度的离焦状态, 从而影响了测量的精度。为此在设计时可以使探测器完全处于接收透镜的焦平面上即令  $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$ , 此时虽然不满足 Scheimpflug 条件, 但可以保证不同位置上的光斑都能成像于探测器平面上。且由于测量范围比较大时, 接收透镜<sup>[9]</sup>所接收的是近似轴外斜平行光束, 因此对测量精度的影响不会很大。

总之, 以上的理论分析表明该改进型的结构设计方案是完全可行的, 与传统的结构相比在不增大探测器尺寸的情况下, 适当的选择各参数可以大大地提高测量范围, 而且有望实现系统结构的小型化。另外本文给出的位移表达式对以后设计适用于大范围测量的激光位移传感器具有重要的指导意义。

#### 参考文献

- [1] Zhuang B H. Non-contact measurement of scratch on air craft skins [J]. Applied Laser, 1997, 17(2): 49-53.
- [2] 冯俊艳, 冯其波, 匡萃方. 高精度激光三角位移传感器的技术现状[J]. 应用光学. Applied Optics May, 2004, 25(3): 33-36.
- [3] 陈琳. 基于激光测距的三坐标测量系统研究[J]. 光学仪器, 2002, 24(2): 7-12.
- [4] 金国藩, 李景镇. 激光测量学[M]. 北京: 科学出版社, 1998, 656-657.
- [5] 戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002, 144-151.
- [6] [苏] A. C. 巴特拉柯夫编著. 张华忠译, 姚建铨校[M]. 北京: 电子工业出版社, 1989, 105-110.
- [7] 邹振书等. 非接触测量激光光学探头[J]. 光学精密工程, 1997, 5(3): 83-89.
- [8] 孙长库, 叶华声. 激光测量技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001, 129-131.
- [9] 来新民等. 透镜形式对激光位移传感器精度影响的研究[J]. 天津大学学报, 1999, 32(1): 81-84.