

旋转棱镜在主动式几何光学测量法中的应用

谭卫军 陈桂林

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要 几何光学方法是一类重要的测量方法, 与光电技术相结合, 它具有精度高、响应快、可实现现场实时控制和非接触等优点。但它一直受到照明和成像系统的双重散焦问题的困扰, 它不仅使系统测量精度和范围受到限制, 甚至在大范围时可能使系统完全失效。本文提出一种利用旋转棱镜对光束进行变换方法, 它能使平行光(或高斯光)在一较大的空间范围内保持优越的聚焦性能(或近似当光线处理), 可使系统在保证高精度的同时提高测量范围。

关键词: 几何光学; 旋转棱镜; 无衍射特性; 散焦; 光束变换

1 引言

几何光学方法是一类重要的非接触测量方法。它可用于长度、位移、距离、厚度、直径及三维尺寸等几何量的测量, 在现代化的工业生产中得到广泛的应用。由于近年来高质量新型光源(尤其是激光)和位置探测器(如 PSD 和 CCD)的不断发展和改善, 使得以经典光学三角法为基本原理的各种测量法的性能得到不断提高, 测量精度、动态范围、灵敏度、响应时间都有较大改善。但由于被测目标几何特性和光学系统特性, 尤其是散焦问题的影响, 其性能的进一步提高受到限制。如厚度测量中的光学三角法和物体表面的扫描成像法, 都存在这类问题。

旋转棱镜是近年来得到广泛应用的一种光学部件。它优越的光束和能量变换特性使它在激光打孔方面得到迅速推广。这主要是利用它的使能量高度集中的性能, 但它同时有着优越的光线和能量转换性能, 使它在几何测量方面有着一定的应用前景。但以前这一优良特性并未被充分运用。

鉴于此, 考虑到几何光学成像对光源的要求, 我们把旋转棱镜引入到入射光路中, 利用它的无衍射特性减小散焦来提高测量范围。同时, 激光散斑噪声对测量精度造成的限制也因物方光斑尺寸减小而有相应减小, 精度有所提高。

2 旋转棱镜的光束变换特性

2.1 单个旋转棱镜的光束变换特性

旋转棱镜又称轴棱镜,它是一种锥形光学部件,具有与球面透镜完全不同的会聚和发散光束的作用。旋转棱镜有正负两种类型,其截面分别如图 1(a、b)、(c)所示。旋转棱镜之所以得到广泛的应用是因为它对平行光(或高斯光)的变换作用。下面主要分析棱镜的性能。

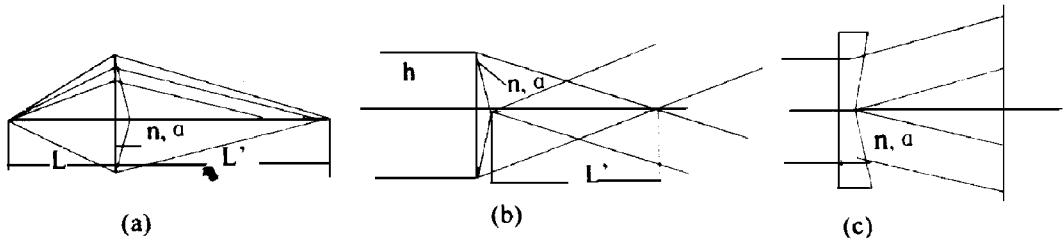


Fig 1 Beam transforming properties by axicon

如图 1 所示,从正棱镜轴线上一点光源发出的光线通过该部件后以等偏角与光轴相交。根据折射定律易知,同一点光源物方孔径角相同的光线通过正棱镜后以等偏角在光轴上相交于一点。不同孔径角入射的光线在轴线上形成一条焦线;与此类似,一束平行光通过该棱镜后也会在光轴上形成连续的细线^[1]。当轴锥角很小时,不计棱镜的厚度,焦线的长度为:

$$L = \frac{h}{(n-1)\alpha} \quad (1)$$

h 为入射光的半径, n 为棱镜折射率, α 为棱角。在聚焦区 L 内,出射光线相互重叠产生干涉,形成细小的聚焦光斑场,在一个大的准直范围内具有相对大的光功率分布,其场分布为:

$$U(r, z, t) = J_0(\alpha r) \exp[i(bz - \omega t)] \quad (2)$$

式中 r 为位置坐标, J_0 为第一类零阶贝塞尔函数, $r^2 = x^2 + y^2$, $a^2 + b^2 = k^2 = (\omega/c)^2$ 由于上式中振幅部分只是 r 的函数,与传播方向坐标无关,即在垂直于轴的横平面上光强不随传输距离而改变,此现象即所谓“无衍射”特性^[2],如图 2(a)所示。其光强 $I^{[3]}$ 为

$$I(r, z) = \frac{4\pi I_0 h \sin \beta}{\lambda \cos^2 \beta} J_0^2\left(\frac{2\pi r \sin \beta}{\lambda}\right) \quad (3)$$

式中 I_0 为入射平面光的光强, β 为偏向角,满足:

$$n \sin \alpha = \sin(\alpha + \beta) \quad (4)$$

n 为棱镜折射率。根据贝塞尔函数的特性,可得光束中心光斑的半径为:

$$r = \frac{4.81\lambda}{2\pi(n-1)\alpha} \quad (5)$$

它集中了全部能量的绝大部分,一般能达到 84% 以上,镀增透膜后可达 92% 甚至更高^[2]。在聚焦区以外 ($z > L$), 出射光束不再交叠,形成发散的环状光束,光强急剧下降,如图 2(b)所示。

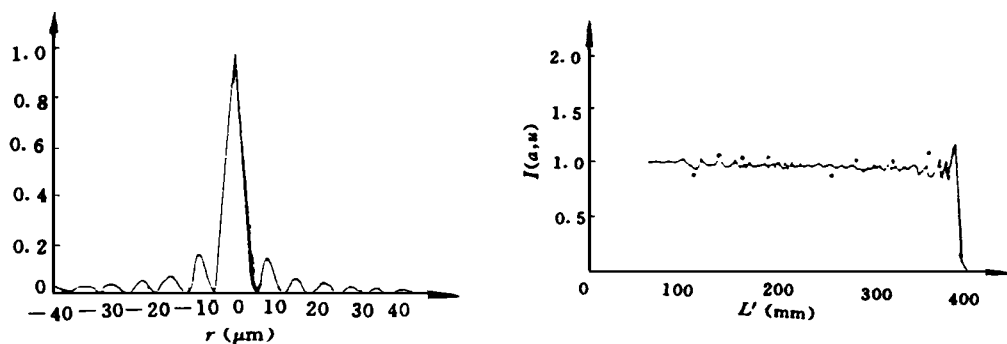


Fig 2 (a) Radial intensity distribution

(b) Axial intensity distribution

2.2 组合旋转棱镜的光束变换特性

若将正负旋转棱镜组合, 或将旋转棱镜和球面透镜组合, 可使它的用途进一步扩展。

如图 3 所示, 在单个旋转棱镜前加一个凸透镜, 可将平行光束变成细圆环, 同时图 3(A) 还能形成与图 2(b) 类似的聚焦细线。将棱角不同的一正一负两个旋转棱镜如图 4 中那样组合时, 其效果与单个正旋转棱镜近似, 只是聚焦范围向后移动, 移动的距离与两棱镜之间的距离有关, 这有利于有效利用棱镜后的空间能量。

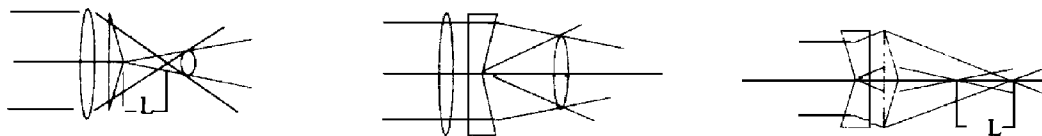


Fig 3 (a) Positive axicon with lens

(b) Negative axicon with lens

Fig 4 Two axicons combined

再将棱镜相同的正负旋转棱镜组合, 可构成一种新型的环形光束扩束器, 如图 5 所示。平行光束通过该组合系统后, 变换成准直的环形光束; 它的光场特性与单个正旋转棱镜类似。反之, 亦可将准直的环形光束变成实心的平行光束。调节两棱镜的间隔, 可使出射光束半径连续变化, 但环的宽度仍保持不变。该系统在对光束实行变换过程中能量损失很小, 可应用于将非稳腔激光器、管状固体激光器输出的环状光束变成实心平行光束和作为高功率管状固体激光放大系统中的扩束器。再在二棱镜前加一凸透镜, 可将平行光束变成细圆环, 它与直接将一个凸透镜加在一正旋转棱镜前有相似的效果, 如图 6 所示。它们都具有优良的几何特性和能量特

性^{[4][5]}。

3 应用举例

几何光学成像法在很多测量方法中得到应用。下面仅以光学三角法位移计和单点光束扫描成像法为例来说明旋转棱镜在光路中的应用。

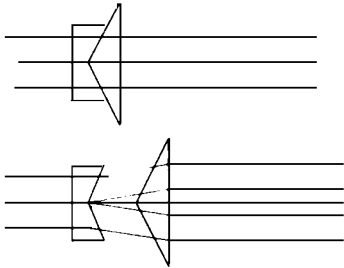


Fig 5 The axicon beam expander

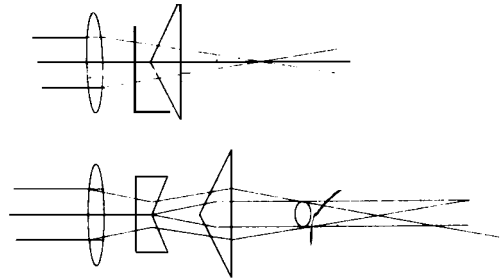


Fig 6 Changing ring diameters by combining axicons and lens

3.1 光学三角法位移计

光学三角法是一种非干涉测量法。它最广泛的用途是微位移的测量,以及基于位移测量的有关几何尺寸的测量。

光学三角法测量原理如图 7(a) 所示,被测目标放在一参考平台上,一束准直度很好的光入射到目标表面上形成一个光斑,它的一部分散射光通过成像系统位置探测器上成像。同样,入射光与参考平面的交点也在探测器上成像于一点,根据透镜的成像关系可计算出与像点偏移相对应的被测目标的位移。

从理论上讲,三角法是一种比较理想的位移测量方法。但经典的简单光学三角法的测量范围与分辨率之间是互相矛盾的。要分辨率高势必牺牲测量范围,反之亦然。经理论计算,测量范围和分辨率之间有如下约束关系^[6]:

$$r_z = 4\delta_z^2/\lambda \quad (6)$$

其中, r_z 是测量范围,而 δ_z 是 Z 方向的分辨率。设 $\delta_z = 5 \mu\text{m}$, $\lambda = 6000 \text{ \AA}$, 则 $r_z < 0.2 \text{ mm}$ 。这样的性能是不能满足工业测量要求的,必须设法予以改善。这正是采用旋转棱镜要达到的目的。

此外,由于被测目标表面和光学系统特性的影响,像面上存在光强的随机起伏,而降低了系统性能。这其中的一个最主要的原因就是照明、成像光束的散焦问题,它会使像点的光强分布发生一定成度的非线性畸变,甚至使系统完全不能工作,因此散焦问题必须予以改善。由于以上原因的存在,像点的中心位置的确定会产生一点的误差,记此误差为 δ 则有:

$$\delta = (w/n)^{1/2} \quad (7)$$

其中, w 为聚焦后光线的腰宽, n 为像点纵向跨过的光敏像元数。当 n 增大时, δ 减小。虽然我们

采用的是一维探测器,但若采用纵向光敏宽度大的探测器,并使像点纵向扩展也有利的。同时,光线聚焦深度(即有效测量范围)为:

$$r_z = w / \theta \quad (w = \lambda / \theta) \quad (8)$$

式中 θ 为入射光线发散角。从以上两式中可以看到,当 n 增大时, w 可相应增大,则聚焦深度增大而精度不会降低。采用旋转棱镜时, w 会大大减小,但由于这时光束的无衍射特性, θ 减小更大,基本上接近于零, r_z 反而变大,完全能达到提高测量范围的要求。

为此,我们把旋转棱镜引入照明光路。在此,我们采用的是一正一负两个旋转棱镜。根据前文的分析,一个正的旋转棱镜可以在一较大的范围内形成大小和能量分布都不变的光斑,但是,由于该范围紧跟在棱镜之后,使其有效范围不能很好地利用^[7]。为此,采用如图中的结构安排。除此之外,它还能对棱镜的锥角的位置进行灵活控制,使其加工和生产都比较容易。

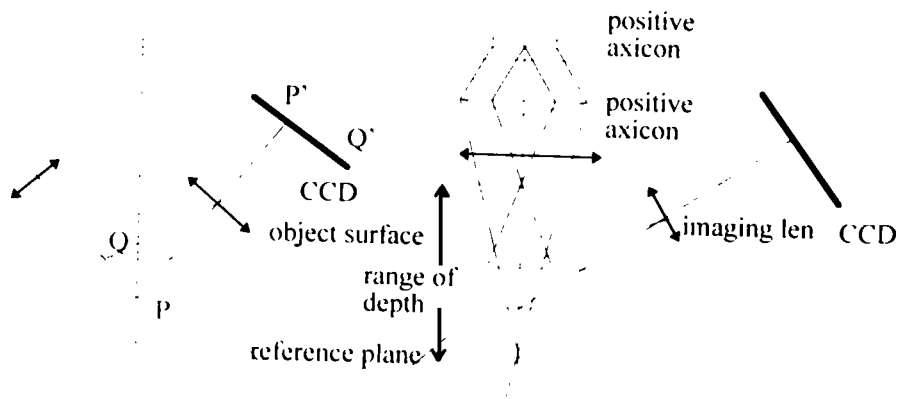


Fig 7 (a) Principle of optical triangulation

(b) Application of axicon in optical triangulation

3.2 单点扫描成像系统

把旋转棱镜产生的聚焦范围大而尺寸微小的圆形光斑应用到扫描成像系统里面,可以得到逐点扫描成像系统。

光学原理如图 8 所示^[3]。平行光经旋转棱镜后在源平面上产生贝塞尔光斑,此光斑经透镜 L_1 作傅立叶变换,在平面 M 上形成一细圆环,光束扫描通过旋转 M 来完成。透镜 L_2 将 J_0 成像在它的焦面上,最后透镜 L_3 把跟随 M 变换的光线在样品平面上重组起来。随着平面镜 M 的旋转可以依次对样品上的不同位置进行研究。由于样品上的圆形光斑尺寸非常微小,可近似看作一个点,从而达到逐点扫描的目的。如果能使平面镜 M 同时进行二维旋转,则可完成二维光束扫描,对整个样品平面进行研究。

该系统在物体或其表面的精细光学性质的研究方面有着重要价值。也可应用于二维表面成像仪中,这种成像仪具有很高的分辨率。

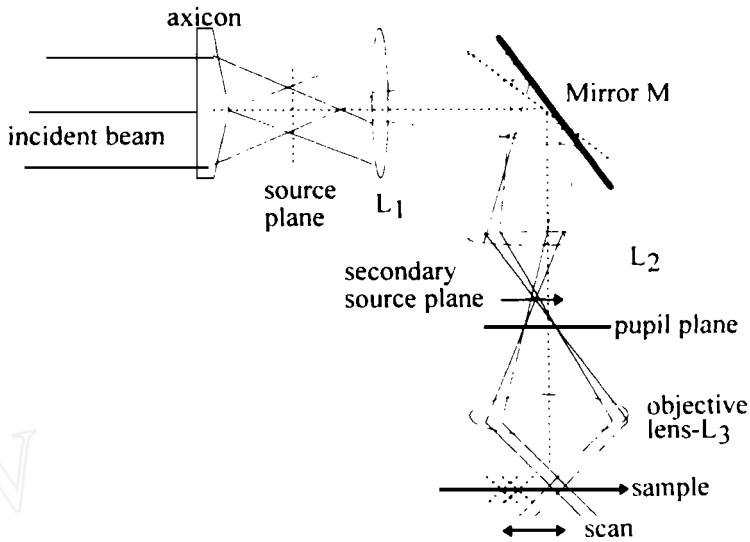


Fig 8 Principle of scanner point by point

4 结论和展望

利用旋转棱镜对平行光(或高斯光)的变换特性,可大大减小光线散焦造成的不良影响,在不损害精度的同时提高测量范围。我们已初步把它应用到光学三角法位移计中,使它的性能较以前有很大改进,在测量范围扩大的同时使精度得到大的提高。如果进一步试验还有望提高。

同时,此建议也被另外一些同事赞同,并预计用到一些几何测量仪器中,估计会对仪器性能有较大提高。这种方法目前国内很少有人使用,希望得到广泛推广。

参 考 文 献

- [1] Mcloed J H. The Axicon: a New Type of Optical Element J Opt Soc Am, 1954, **44**: 592~ 597
- [2] 蔡邦维等 旋转棱镜对激光束的变换特性 中国激光, 1994, **A21**(1): 21~ 25
- [3] Arimoto R, etc Imaging Properties of Axicon in a Scanning Optical System. Appl Opt, 1992, **31**(31): 6653 ~ 6657
- [4] Roux M, etc Linear, Annular and Radial Focusing with Axicons and Applications to Laser Machining Appl Opt, 1978, **17**(10): 1532~ 1536
- [5] Belanger P A, etc Ring Pattern of Lens-axicon Illuminated by a Gaussian Beam. Appl Opt 1978, **17**(7): 1080~ 1086
- [6] Cielo P. etc Improvement of Subpixel Resolution in Triangulation Ranging by A stigmatic Spot Projector and Wide-aperture Line Array Imaging Opt & Laser Tech, 1982, **20**(1): 19~ 24
- [7] Bickel G, etc Triangulation of Expanded Range of Depth. Opt Eng, 1985, **24**(6): 975~ 977

Application of Axicon in Active Geometric Optical Measurements

Tan Weijun, Chen Guilin

(*Shanghai Inst. of Tech. Phys., Academia Sinica, Shanghai 200083*)

Abstract

Conventional geometric optics method is a kind of important measurement methods. Combined with optoelectronic techniques, it has advantages of high precision, quick response, easiness to real-time control and noncontact. But its function is liable to be ruined by the defocusness of both the illuminating and imaging systems, which limit the measurement accuracy of the system and even make the system disable when sometimes the range extends. It is presented in this paper a method to transform the beam by an axicon. It makes parallel beam (or Gaussian beam) have very good properties of field and energy arrangement in a relatively large depth which improves the system's measurement range without loss of precision. Two simple examples are given to demonstrate its application.

Keywords: Geometric optics, Axicon, Nondiffraction, Defocusness, Beam transformation

谭卫军 男, 1972 年出生, 湖北黄冈人。1995 年 7 月毕业于武汉大学物理系传感专业, 1995 年 9 月至今在中国科学院上海技术物理研究所攻读光电子学硕士学位。