

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0137-03

四自由度的位移测量

何瑾, 左保军, 范志刚, 李宏

(哈尔滨工业大学测控系 308#, 黑龙江 哈尔滨 150001)

董密林, 邱俊文, 桂兵, 徐红

(中国航空工业空气动力研究院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 采用全息透镜作为分光元件,利用其 ± 1 级衍射汇聚(发散)光束的焦点在非涅耳近似条件下不随入射光的线位移而移动的原理,将线位移和角位移的测量分开。利用两片高精度的位置敏感探测器(PSD)(面阵),准直 He-Ne 激光束为基准,采用互相垂直的布局,实现了目标靶的四自由度实时测量。结构合理,测试头体积小、重量轻,便于安装;测量精度高,角位移的分辨力为 $1''$,线位移分辨力为 $1\ \mu\text{m}$ 。该系统亦适用于诸如机床导轨、大尺寸零件安装等多自由度的准直和微小偏移量的测量。

关键词 精密工程测量; 激光; 全息透镜; 位置敏感探测器; 四自由度

中图分类号 TH822

文献标识码 A

Measurement of Four Degree-of-Freedom Displacement

HE Jin, ZUO Bao-jun, FAN Zhi-gang, LI Hong

(Department of Automation Measurement and Control Engineering, HIT, Harbin, Heilongjian 150001, China)

DONG Mi-lin, QIU Jun-wen, GUI Bing, XU Hong

(The Aerodynamic Academy of Chinese Aviation Industry, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract In this system, a holographic lens was used as splitter. As the focus spot of the ± 1 degree diffracted convergent (divergent) beams did not move with the linear movement of the incident beam under the Fresnel approximate conditions, the measurements of linear displacement and angle displacement were separated. Two PSD (Position Sensitive Detector) were used as detectors, and He-Ne laser beam was used as datum. Then four degree-of-freedom measurement of the target could be finished. The configuration design is reasonable. The volume of testing head is small. The weight is light, and it's convenient to be fixed. The measuring precision is high. The experiments prove that the stabilization of linear shift can reach $1\ \mu\text{m}$, and angle shift can reach $1''$. The system can be used to collimate other devices with multi degree-of-freedom and measure the minute shifts, such as the guide rail of machine tool and the assembling of large parts and so on.

Key words precision engineering measurement; laser; holographic lens; PSD (position sensitive detector); four degree-of-freedom

1 引言

目前,在国内外相继研制的多自由度位移测量系统中,大多采用多激光束进行,在光路中加多个分光元件,将单一激光束分为多激光束作为测量基准,采用的测试原理和一般准直仪的测量原理相同,利用每一束激光所带的位移信息来测量出各自

自由度位移的偏差。这种简单的分光方法所分出的光束的独立性不好,作为测量基准时,其相对位置精度难以保证,而且,多元件的采用使得测试系统的可动部分不易小型化。近年来出现的双目视觉法六自由度测量系统,虽然结构简单,但标定复杂。因此,急需采用新型检测元件、新的手段和方法进行多自由度力或者多自由度位移测量系统。

作者简介: 何瑾(1949.10-),女,天津市人,副教授,硕士,主要从事光电仪器的设计、温度的测试与控制等方面的研究。
E-mail:hjhit@yahoo.com.cn

2 位置敏感探测器的测量原理

位置敏感探测器(PSD)是一种新型的基于横向光电效应的半导体位置敏感探测器。由于具有高灵敏度、高分辨率、响应速度快和前置放大电路简单等优点,正逐渐引起人们的重视。它广泛应用在对位置坐标的精确测量上,如:兵器制导和跟踪、工业自动控制或大尺寸零件安装等技术领域。

当一束光线以不同的光亮度投射到 $p-n$ 结上的光敏区域时,这种光电效应非常明显。事实上,当光的亮度被确定以后,电子-空穴对的分离调整着空间上少子的扩散,但仅仅处于 $p-n$ 结相反的一个很小的区域内。这种不均匀状态产生了一个电场,方向平行于半导体 $p-n$ 结。 $p-n$ 结的多子能够平行于 $p-n$ 结移动,并且流过被照亮的区域。利用这种特性,可以使传感器单一的或者同时多个的对光点位置进行测量。PSD 是一种非分割型器件,它的作用是将光源照射在光敏感面上的光斑强度和位移量转化成电信号,当采用差分方式输出时,光斑强度的影响可基本去除,因此,只要精心设计激光光斑的大小,便可高精度地将光斑的位移量转化成电信号。

在硅板的底层表面上以胶合的方式制成两片均匀的 $P-N$ 电阻层,在 $P-N$ 层间注入离子而产生 i 层,即本征层,以便降低其晶体的缺陷和 $P-N$ 层的物质不纯净度,并使电极间的电阻得到控制。在 P 层表面电阻层分别设置输出电极(面阵为四个输出电极),当入射光斑与四电极的间距发生变化时,四个输出极的输出电流也将随之变化而变化。因而在应用过程中,当一束具有一定强度的光照射到 PSD 敏感面上时,由半导体内部载流子浓度梯度的变化产生横向光电效应,致使 PSD 在同一面上的不同电极之间出现电压差,这些电极之间便有电流流过。这种电压和电流随着光斑位置变化而变化的现象既是半导体的横向光电效应。正是基于这一效应,实现了 PSD 的对位置坐标的测量。二维 PSD 可实现对入射光斑二维位置移动的测试。将坐标原点设在器件的中心点,而器件工作在反偏及小信号条件下,则具有如下的关系

$$V_x = (X_2 + Y_2) - (X_1 + Y_1) / (X_1 + X_2 + Y_1 + Y_2) \quad (1)$$

$$V_y = (X_1 + Y_2) - (X_2 + Y_1) / (X_1 + X_2 + Y_1 + Y_2) \quad (2)$$

其中 X_1, X_2, Y_1, Y_2 分别为 PSD 四端电极输出的信号。 V_x, V_y 为光点入射点随位置坐标变化的输出信号。该信号仅与入射光斑的位置有关,而与入射角、光强度、光斑尺寸无关。在测量时,激光需要垂直照在 PSD 上,以便在 PSD 上形成一个激光圆形斑点,

斑点的要求是直径 1 mm。

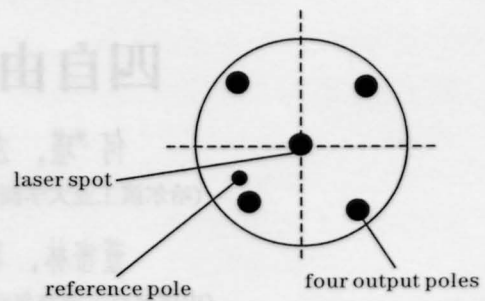


图 1 面阵 PSD 输出电极示意图

Fig.1 The diagram of PSD array output poles

本装置采用了两片面阵 PSD 探测器,分别用来检测通过全息透镜的透射、衍射激光束的位移。即分别对应线位移、角位移的测量。在本系统中,对四个电极分别配置前置放大电路和采样保持电路,并使电路参数尽可能对称,以便消除共模干扰。数据输入通道采用 VXI 总线模块(HP 公司的 1415 模块和 1503 模块)。在上述条件下经测试,角位移的分辨力为 $1''$,线位移分辨力为 $1 \mu\text{m}$ 。

在动态测试系统中,需要对四个电极分别配置前置放大电路和模拟量加减运算电路以及除法器,以便提高测试数据的运算速度。数据输入通道采用 HP 公司的 1432 模块,该模块为每个通道分别配置 AD 转换器,采样速率为 640K,经测试,在采样周期为 1 ms 时,角位移的测试精度在 $2''$ 以内,线位移测试精度在 $2 \mu\text{m}$ 以内。

3 PSD 在四自由度力测量中的应用

在本测量系统中,将全息透镜用作分光透镜。离轴正弦型全息透镜可以看作正弦光栅,利用其 0

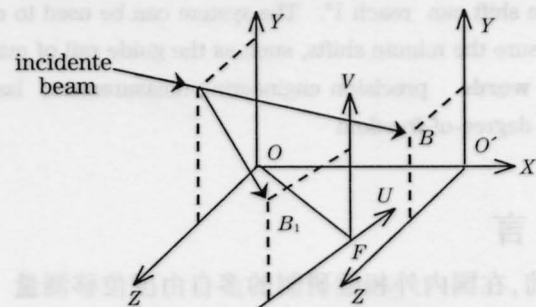


图 2 激光束与测量系统的坐标系。YOZ:全息透镜平面;YO'Z:线位移测量 PSD 平面;UFV:角位移测量 PSD 平面

Fig.2 Coordinates of incident laser and measuring system. YOZ: the plane of holographic lens; YO'Z: the plane of first detect for linear shift measuring; UFV: the plane of the second detect for angle shift measuring

级透射光束和 1 级衍射的汇聚光束所携带的信息进行测量(1 级发散光束被弃掉)。

以全息透镜中心为坐标原点 O 建立坐标系(如图 2 所示), 准直光束以方向角 $\alpha+\Delta\alpha, \beta+\Delta\beta, \gamma+\Delta\gamma$

入射到全息透镜上时, 在非涅耳近似条件下($\Delta\alpha \approx \Delta\beta \approx \Delta\gamma \approx 0$), 且仅考虑光束所带位置信息, 略去时间因子, 则透过全息透镜的透射光束可以表示为

$$E_T = C(A^2 + B^2) \text{Dexp}[jk(x \cos \alpha + y \cos \beta + z \cos \gamma)] + ABCD \text{exp} \left[-jk \left(\frac{x^2 + y^2 - 2xy_F}{2F} - x \cos \alpha - y \cos \beta - z \cos \gamma \right) \right] + ABCD \text{exp} \left[jk \left(\frac{x^2 + y^2 - 2xy_F}{2F} - x \cos \alpha - y \cos \beta - z \cos \gamma \right) \right] \quad (3)$$

式中 A 为参考光振幅; B 为物光光波振幅; C 是全息透镜透射系数; D 为照明光振幅; $F = (x_F^2 + z_F^2)^{1/2}$ 是全息透镜的焦距; $x \cos \alpha, y \cos \beta, z \cos \gamma$ 是照明光波的方向余弦。

(3)式中的第一项是照明光束的继续, 其光束重心在二维 PSD#1 上的偏移就是激光束与靶标在 Y, Z 方向上的位移, 即

$$\Delta Y \approx Y_B; \quad \Delta Z \approx Z_B \quad (4)$$

第二项和第三项保存了原物光的信息, 并且互为共轭光, 一为汇聚光束, 一为发散光。本系统选择使用汇聚光束。则该汇聚光束沿任意方向的线位移和绕 X 轴的转动(改变 γ 角)不会改变全息透镜焦点的相对位置, 仅当其与靶标有绕 Y, Z 轴转动(改变 α, β 角)时, 焦点才会移动。则焦点位置的变化与 α, β 角的改变有关, 即

$$\Delta \alpha \approx V_B / Z_F \quad (5)$$

$$\Delta \beta \approx U_B / (X_F^2 + Z_F^2)^{1/2} \quad (6)$$

式中 X_F, Z_F 是 F 点在 YOZ 坐标系中的坐标值。利用全息透镜和两个二维 PSD 可以测量四自由度的位移量。

对激光器出射的激光束首先进行光束整形——准直扩束, 保证激光束的束状稳定; 对整形后的激光束给予漂移补偿, 保证激光束的束心和能量重心的稳定。全息透镜作为该系统的关键部件,

其制作质量的好坏将对整个系统的测量精度起到巨大的作用。系统要求的全息透镜是正弦型平面光栅, 分成的光束只有三束, 光强比例为 1:2:1。若为一般光栅, 则分成的光束可能会多于三束, 那么不仅降低了 0 级和 +1 级光束的能量, 而且造成杂散光, 使得光束所携带的信息准确性降低。合理和精确的光路设计为整个系统设计奠定了基础, 提供了保证。

4 结 论

本装置采用激光器为基准光源, 一束激光便可实现四自由度位移的测量, 结构简单、调试方便、光路及电路体积小、重量轻、测量精度高, 在风洞天平静态/动态校验台的应用中, 以安装调试方便、零点校准简便、测试精度高(角位移的分辨力为 $1''$, 线位移分辨力为 $1 \mu\text{m}$)等特征获得好评。并因此有很大的推广价值。

参 考 文 献

- 1 孙长库等. 全息透镜分光法五自由度测试系统. 天津大学学报, 1998, 31(2): 220~224
- 2 J. K. Pavuluri et al.. A high Precision, Six Degree-of-freedom Single, Noncontact, Optical Sensor Suitable for Assembly Automation. Proc. of National Science Foundation Design and Manufacturing Conference, Charlotte, NC, 1999