

# 单模光纤相移三维轮廓测量术

范 华 田 丰 谭玉山

(西安交通大学机械学院激光红外应用研究所 西安 710049)

**提要** 提出了一种新的计算机图像处理光栅投影三维轮廓测量系统,该系统用一分二单模光纤耦合器产生正弦光强分布的投影光栅场;将光纤一臂绕在压电陶瓷(PZT)环引入相移。将该系统用于实际测量得到了满意的效果。该系统具有结构简单、体积小、重量轻、光栅条纹清晰并且光强正弦分布等优点,有很高的实用价值。

**关键词** 光纤耦合器,相移,轮廓术

非接触光电三维轮廓测量术在实际工程检测中有着广泛的应用。为了获得物体三维信息,通常把一个光栅投射到被测物体表面,由于受物体三维形状调制光栅投影场发生变形,变形光栅场中包含着物体三维形状信息,通过一定处理可解调出表示物体三维形状的相位信息<sup>[1]</sup>。

解调相位的方法主要有两类:一类是用傅里叶变换<sup>[2,3]</sup>,另一类是相移技术<sup>[4]</sup>。傅里叶变换法只需一幅图就可计算出相位,但计算量很大;相移技术是近十年来发展起来的一项新技术,具有精度高、受背景噪声影响小等优点。相移技术的基本思想是通过相移装置人为地引入已知相移量,从而改变光场条纹相位,通过测量投影光栅场中同一点在不同相移量下的光强值来计算该点相位值。

相移技术要求投影光栅场为一正弦分布光场。正弦光栅尤其是高精度正弦光栅制作比较复杂,因此通常人们用两个矩形光栅产生的莫尔条纹投影产生一近似的正弦光场<sup>[5]</sup>,这将带来一定的误差;另外这种结构也比较复杂,体积大、重量重。本文提出用一分二单模光纤耦合器产生正弦光强分布的投影光栅场,由计算机控制压电陶瓷(PZT)晶体引入相移值。该系统结构简单、体积小、重量轻、可自动控制,有较高的实用价值。

## 1 测量原理

### 1.1 相移三维轮廓术原理

当正弦光强分布的光栅场投影到物体表面时,光栅场将变形,变形的光栅场数学表达一般形式为

$$I(x, y) = V(x, y) [A(x, y) + B(x, y) \cos h(x, y)] \quad (1)$$

式中  $V(x, y)$  是一个与物体表面的光学特性有关的物理常数,  $A(x, y)$  为背景光强,  $A(x, y) / B(x, y)$  为条纹对比度,  $h(x, y)$  为光场相位,它是被测物体高度的函数,解调出  $h(x, y)$  即可获得物体的高度信息。用相移器引入相移量  $W$ ,这时

$$I(x, y) = V(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) \cos [h(x, y) + W]\} \quad (2)$$

解相位  $h(x, y)$  至少需要三个方程,我们采用两步相移,取  $W = 0, 2c/3, 4c/3$  代入 (2) 式得

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= V(x, y) \{A(x, y) + B(x, y) \cos [h(x, y) + 0]\} \\ I_2(x, y) &= V(x, y) \left| A(x, y) + B(x, y) \cos \left[ h(x, y) + \frac{2c}{3} \right] \right| \\ I_3(x, y) &= V(x, y) \left| A(x, y) + B(x, y) \cos \left[ h(x, y) + \frac{4c}{3} \right] \right| \end{aligned}$$

解上述联立方程可得

$$h(x, y) = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{3}(I_3 - I_2)}{2I_1 - I_2 - I_3} \quad (3)$$

由 (3) 式可计算出相位值,通过判断分子分母的正负确定  $h(x, y)$  在  $-c$  到  $c$  之间,因此相位图中  $h = \pm c$  处存在间断点,通过判断间断点的值对相位进行去包裹处理,便可得到连续分布的相位图,它含有物体高度信息。

## 1.2 单模光纤耦合器产生正弦投影光栅场原理及相移机理

单模光纤芯径很细,约为  $9\mu\text{m}$  左右,一分二单模光纤耦合器两出射端可以看成两点光源,同一激光器发出的光波被光纤耦合器分成两部分,因此这两部分的光是相干的,当两出射端靠近在一起时便构成杨氏干涉装置,在出射光照明空间内的观察屏上将看到杨氏干涉条纹,该条纹场是完全正弦分布的光场,条纹间距为

$$P = \lambda D W \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为激光波长,  $D$  为两光纤出射端沿光轴方向到观察屏的距离,  $W$  为光纤出射端两光纤芯间的距离。我们使用光纤耦合器的分光比为 50:50,这时光纤两出射端射出的光具有相同的振幅,所产生的条纹场具有非常好的条纹对比度。

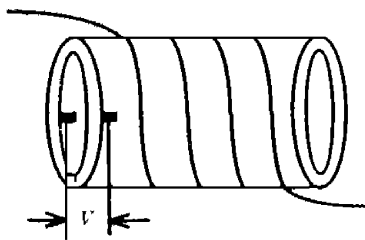


图 1 光纤压电陶瓷相移器

用 PZT 引入相移,如图 1 所示,将单模光纤耦合器的一臂紧紧绕在一个压电陶瓷环上,在压电陶瓷环两极加直流电压  $V$ ,由于 PZT 具有电致伸缩效应,在外加电场作用下 PZT 圆环沿径向扩展将光纤拉长造成光纤弹性形变和折射率变化,使光波相位发生变化,变化的相位为

$$\Delta h = 2ck_0nVNd_{33} \left| 1 - \frac{n^2}{2} [P_{12} - (P_{11} + P_{12}V)] \right|$$

式中  $N$  为光纤匝数,  $n$  为光纤芯折射率,  $d_{33}$  为加压方向的压电系数,  $V$  为泊松比,  $P_{11}$  和  $P_{12}$  为光弹系数

因为  $d_{33}, V, P_{11}$  和  $P_{12}$  都是与 PZT 材料有关的参数,因此对某一选定的 PZT,可以通过改变加在 PZT 上的电压  $V$  来改变光波相位,达到相移目的。

## 1.3 相位与物体高度的关系

三维面形测量系统光路结构如图 2 所示。  $P(X_0, 0, Z_0)$  为投影光纤末端,  $C(0, 0, Z_0)$  为 CCD 摄像机,两者位于同一水平高度,光纤耦合器形成的干涉条纹投影到参考平面,可计算出参考平面各点的相位分布;放入被测物体后,可以计算出被测物体各点的相位分布。物体上  $D$  点与参考面上  $A$  点具有相同相位即  $h_D = h_A$ ,物体上  $D$  点与参考面上的  $B$  点通过成像镜头在 CCD 摄像机靶面上成像于同一点,

$$\overline{AB} = \frac{h_B - h_A}{2cf} = \frac{h_B - h_D}{2cf} = \frac{h_{BD}}{2cf}$$

式中  $f = 1/p$  为投影光栅空间频率,  $h_D$  为物体上的  $D$  点与参考面上  $B$  点的相位差。因为  $\triangle CPD$  与  $\triangle BAD$  相似, 所以

$$Z(x, y) = \frac{Z_0 \overline{AB}}{X_0 (1 + \overline{AB}/X_0)} \quad (5)$$

实际光路中, 光学设计使  $X_0 \gg \overline{AB}$ , 因此

$$Z(x, y) = \frac{Z_0 \overline{AB}}{X_0} = \frac{Z_0}{X_0} \frac{h_D}{2cf} = k h_D \quad (6)$$

式中  $k = \frac{Z_0}{2cfX_0}$  是与光路结构有关系的常数。

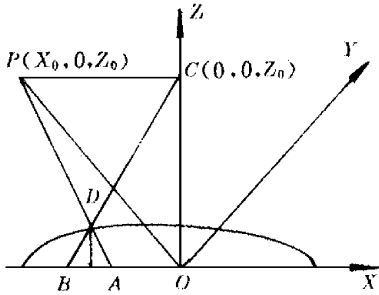


图 2 原理结构示意图

Fig. 2 Configuration schematic diagram

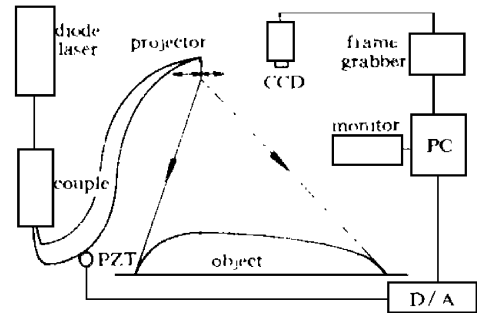


图 3 测量系统结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the measuring system

## 2 实验测量系统

实验测量系统如图 3 所示。它由正弦光场投影光路和计算机图像处理系统两部分组成; 带尾纤的半导体激光器发出的光被光纤耦合器分成光强相等的两束光, 投射到被测物体表面, 光纤出射端两光纤芯间的距离可以进行微调从而可改变杨氏条纹间距, 得到所需空间频率的正弦投影光栅场。受被测物体表面调制而变形的光栅场被 CCD 摄像机摄取并经图像板量化成数字图像, 由计算机进行处理, 所使用的图像板的分辨率是  $512 \times 512 \times 8 \text{ bit}$ 。实验中选  $Z_0 = 600 \text{ mm}$ ,  $X_0 = 350 \text{ mm}$ 。

## 3 测量结果与讨论

用本文所述的测量系统对计算机上使用的鼠标器的表面形状进行了测量, 被测鼠标器如图 4(a) 所示。图 4(b) 是测得的包裹相位图, 图 4(c) 是去包裹相位图。图 5 是计算机重建的三维图。

从公式 (6) 可看到本测量方法沿物体高度方向的测量精度与投影光栅条纹的间距有关, 由于摄像机和图像板分辨率的限制及电噪声和外界环境干扰等因素的影响, 本测量系统测量精度约为  $1/30$  个投影条纹间距。为考查本系统测量精度, 进行了以下测量, 一是对参考平面即高度为 0 的平面上宽 60 mm, 长 60 mm 的一块区域进行测量, 选用投影条纹间距为  $p = 1 \text{ mm}$ , 测量结果平均值为 0.03 mm。另一是对长 60 mm, 宽 60 mm, 在高度为 30 mm 位置上的标准平面进行测量, 选用投影条纹间距  $p = 2 \text{ mm}$ , 测量结果平均值为 29.95 mm, 可见测量精度是很高的, 可以满足通常物体的测量要求, 若要更高的测量精度可通过进一步提高投影光栅频率来实现, 但受到摄像机和图像板分辨率的限制 (使用的摄像机为 MINTRON1881, 图像板为



图 4 测量结果。(a) 被测物体; (b) 包裹相位图; (c) 去包裹相位图

Fig. 4 Measured results. (a) specimen; (b) wrapped map; (c) unwrapped map



图 5 重建三维形状

Fig. 5 Reconstructed shape

MVP32,其分辨率为  $512 \times 512 \times 8$  bit),若采用更高分辨率的摄像机和图像板如  $1024 \times 1024 \times 8$  bit,则测量精度可进一步提高,但系统成本也将大幅度增加

### 参 考 文 献

- 1 M. Halioua, H. C. Liu. Optical three-dimensional sensing by phase measuring profilometry. *Optics and Lasers in Engineering*, 1989, **11**(3): 185~ 215
- 2 M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~ 3982
- 3 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~ 160
- 4 K. Creath. Phase shifting speckle interferometry. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(18): 3053~ 3058
- 5 Zhao Hong, Chen Wenyi, Tan Yushan. Three-dimensional contouring by using quasi-sine characteristic of Moire pattern. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(8): 834~ 837 (in Chinese)

## Three-dimensional Profilometry Using a Single Mode Optical Fiber Phase-shifting Method

Fan Hua Tian Feng Tan Yushan

(Institute of Laser & Infrared Applications, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract** In this paper, a novel three-dimensional profilometric measurement system based on a computer aided image processing technique is presented. This system consists of a single mode optical fiber coupler with phase shifting as the grating projector. A piezoelectric (PZT) cylinder wrapped by one arm of the optical fiber coupler is utilized to introduce phase shift. Results have been obtained in the practical measurement with this measuring system. This system, owing to the advantages of quite simple optical configuration, extremely small size and light weight, high visibility and sinusoidal intensity distribution, would find high practical value in applications.

**Key words** optical fiber coupler, phase shift, profilometry