

文章编号: 0253-2239(2003)11-1375-4

# 一种可用于离面位移测量的光路的优化设计\*

贺顺忠 姚 欣 蒋诚志 陈林才 刘金凤

(天津大学测试计量技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 为了实现对复杂三维物体表面轮廓、小空间内物体的纵向位移或振动等测量,有必要研制高分辨力、非接触的光学检测系统。由于激光多普勒技术具有动态响应快、线性度好、非接触、测量精度高等特点而优先被用于复杂三维物体离面位移的测量。但是物体表面散射光的多普勒信号非常微弱,因此解决信号的强度、信噪比则是实现测量的关键。研究了激光多普勒技术及散射光相位的无规变化的统计规律,设计出一种空间分辨力很高的参考光路,将它用于固体离面位移测量效果很好,其相对误差为 0.3%。

**关键词:** 光学测量; 激光多普勒参考光路; 离面位移测量; 空间分辨力

中图分类号: TB96 文献标识码: A

## 1 引 言

近年来随着科学技术的快速发展,人们越来越重视对复杂三维物体表面轮廓(如特形旋转体轮廓或其表面轮廓损伤)以及某些小空间内物体的纵向位移或振动等的检测。这些检测要求空间分辨力高、非接触、智能化等。在众多方法中<sup>[1~3]</sup>,激光多普勒技术由于具有精度高、动态响应快、非接触、线性度好等优点而被人们优先选用。目前它已成功地实现了对精密量块的离面位移测量<sup>[4]</sup>。但这里所用的光栅参考方法其空间分辨力低(即在被测运动体上光斑直径约 2 mm,较大),无法解决表面复杂的三维物体表面(如表面有蜂窝状细微结构)轮廓以及表面粗糙的非金属物体的纵向位移或振动测量。对此作者研究了激光多普勒参考光技术<sup>[5]</sup>以及物体表面散射光相位的无规变化的统计规律或平均效应,设计出实用的参考光路和测量系统。实验证明,将它用于磨刀石的离面位移测量效果令人满意。

## 2 测量原理

### 2.1 测量光路原理

如图 1 所示为物体离面位移测量用光路,它由激光器 L,波片  $G_1 \sim G_3$ ,声光调制器 A,反射镜  $M_1 \sim M_4$ ,透镜  $L_1 \sim L_5$ ,偏振棱镜  $R_1$ ,直角棱镜  $R_2$ ,

光阑 O,光电接收器  $D_1$ 、 $D_2$  等组成。此光路具有抗干扰、抑制噪声能力强、空间分辨力高、被测物体的散射光能利用率高等优点。

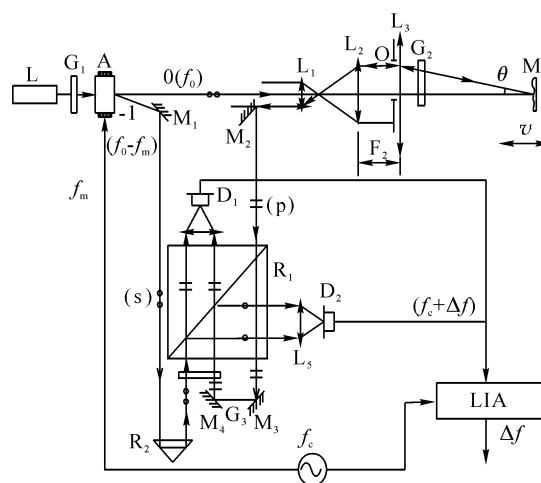


Fig. 1 Optical measuring system

从激光器 L 发出的频率为  $f_0$  的激光以布拉格角入射到声光调制器 A (其调制频率为  $f_c = 40$  MHz,以提高抗干扰、抑制噪声的能力)上,输出频率为  $f_0$  的 0 级和频率为  $(f_0 - f_c)$  的 -1 级衍射光。其中 0 级的衍射光经透镜  $L_1$ 、 $L_2$  扩束准直又由位于  $L_2$  后焦面上的  $L_3$  镜聚焦在运动物体表面上形成一个直径很小的光斑(得到高的分辨力)并被散射。1/4 波片  $G_2$  使入射线偏振光变成圆偏振光( $G_2$  快轴与入射光矢量成  $45^\circ$ ),又使散射的圆偏振光变成光矢量转过  $90^\circ$  的线偏振光。然后再经  $L_3 \sim L_1$ 、 $M_2 \sim M_4$ 、 $R_1$  作用与由  $M_1$  镜、 $R_2$  棱镜反射的 -1 级衍射光一起入射到半波片  $G_3$  上(其快轴与 -1 级衍

\* 国家教委博士点基金资助课题。

E-mail: hszhong@sina.com

收稿日期:2002-07-29; 收到修改稿日期:2002-08-26

射光矢量成  $22.5^\circ$ , 最后再经  $R_1$  作用在其透射、反射方向上分别得到两个分量如图 2 所示 ( $s$  为垂直偏振,  $p$  为平行偏振)。并由  $L_4$ 、 $L_5$  聚焦在  $D_1$ 、 $D_2$  光敏面上差拍输出频率为  $(f_c + \Delta f)$  的光电信号。调整  $R_2$  位置使两路光程尽可能相等。调整  $G_1$  可使两束光强度尽可能接近。设置光阑  $O$  是为了接收到被测运动物体调制的频移信号。

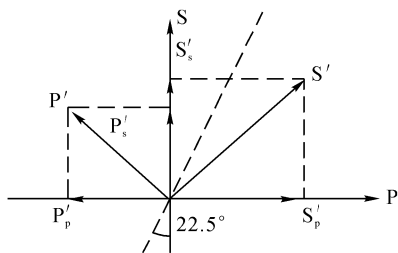


Fig. 2 Polarization resolution

## 2.2 多普勒信号的拾取及处理原理

从  $D_1$ 、 $D_2$  输出的光电信号经差分放大后与参考信号(频率为  $f_c$ )一起送入锁相放大器拾取多普勒信号  $\Delta f$ 。根据激光多普勒技术<sup>[6]</sup>, 差拍信号的频移  $\Delta f$  与运动物体速度  $v$  有以下关系:

$$\Delta f = \frac{v}{\lambda} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \approx \frac{2v}{\lambda}, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为激光波长,  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为入射光线、散射光线与物体运动方向间夹角。如果对所拾取的多普勒信号进行脉冲累计计数  $N$  则可得运动物体的位移  $x$  ( $d\tau$  为时间微分变量), 即

$$N = \int_0^t \Delta f d\tau = \int_0^t \frac{2v}{\lambda} d\tau = \frac{2}{\lambda} \int_0^t v d\tau = \frac{2}{\lambda} x. \quad (2)$$

因此

$$x = N\lambda/2. \quad (3)$$

事实上为了实现脉冲计数还须对信号进行处理, 即对所拾取的多普勒信号先进行采样、模数转换变成数字信号, 再用数字滤波器对它进行滤波处理, 最后整形、细分后再对脉冲累计计数而得到物体位移。

## 3 参考光路设计

为了解决表面复杂的三维物体(表面粗糙或具有细微结构)的离面位移测量, 关键是减少或削弱散射光相位无规变化的平均作用(它将导致干涉效应的消失, 照射光斑越大平均效应越强)。直接的办法是使光束聚焦在被测物体上(一定距离处), 并且在一定量的离面位移中保持很小的尺寸及变化(这同时还可得到大的散射光能), 即应使光路具有高的空

间分辨力。但是焦斑尺寸与位移量(或焦深)、焦斑位置(或工作距离)是相互制约的, 为此采用图 3 所示的光学测量头来解决。此光路是参考光路中最重要的部分, 直接决定所接收到的多普勒信号的多少。根据实际需要, 即需要考虑被测物体的大小(常大于 60 mm)、安装、位移 ( $> 3$  mm) 和测量精度等, 对光路提出以下技术指标: 工作距离 250 mm, 轴向位移量 0~5 mm, 焦斑直径 0.05 mm。通常选用 He-Ne 激光器作光源 ( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ), 其输出光在  $L_1$  镜上的光斑直径约 2 mm, 现选光阑  $O$  的直径也为 2 mm, 进行以下估算。

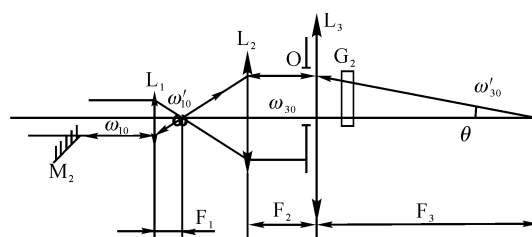


Fig. 3 Structure of optical head

根据高斯光束聚焦理论<sup>[7]</sup>, 当入射的高斯光束束腰处在透镜  $L_3$  上时, 其像方束腰半径为

$$\omega'_{30} = \frac{d_{30}}{\sqrt{1 + (f_3/F_3)^2}} \approx \frac{2}{\sqrt{1 + (2 \times 10^4/250)^2}} = 25 \times 10^{-3} \text{ mm} = 25 \mu\text{m},$$

式中  $F_3$  为透镜  $L_3$  的焦距,  $L_3$  物方共焦等效参量:  $f_3 = \pi\omega_{30}^2/\lambda = 5 \times 4 \times 10^3 \text{ mm}$ , 其像方共焦等效参量

$$f'_3 = \frac{\pi(\omega'_{30})^2}{\lambda} \approx 5 \times 25^2 = 3125 \mu\text{m} \approx 3 \text{ mm}$$

其焦深<sup>[4]</sup>:

$$2 \times z'_{30} = 2 \times f'_3 \approx 2 \times 3 = 6 \text{ mm},$$

相应  $z'_{30}$  处的光斑半径

$$\omega'_3(z'_{30}) = \sqrt{2}\omega'_{30} = \sqrt{2} \times 25 \approx 35 \mu\text{m}.$$

由以上计算知, 物体离面位移 0~5 mm 时, 光斑大小变化不大, 符合设计要求。

为了扩束成直径约 4 mm 的光束, 现将透镜  $L_1$  的焦距取为  $F_1 = 10 \text{ mm}$ , 此时透镜  $L_2$  的焦距应为

$$F_2 = \frac{\omega_{20}}{\omega_{10}} F_1 \approx \frac{2}{1} \times 10 = 20 \text{ mm}.$$

透镜  $L_1$  对入射光束聚焦后的束腰半径  $\omega'_{10}$  为

$$\omega'_{10} = \frac{F_1 \lambda}{\pi\omega_1(L)} \approx \frac{6}{3 \times 1} = 2 \mu\text{m},$$

式中  $\omega_1(L)$  为入射光束在  $L_1$  镜上的光斑半径 (1 mm)。焦深  $2f'_1 = 2 \frac{\pi(\omega'_{10})^2}{\lambda} = 40 \mu\text{m}$ 。

最后还要对以上所计算的透镜消像差, 主要消

球差。

由以上计算可知,利用  $L_2$ 、 $L_3$  扩大了只用  $L_1$  时的工作距离和位移量,而焦斑尺寸还足够小,因此光头的的设计合理地解决了三参量的取值。

下面用几何光学<sup>[8]</sup>分析一下物体作 3 mm 离面位移时对偏振棱镜入射光方向的影响。分析光路如图 4 所示。

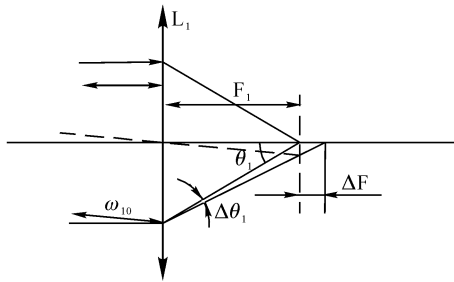


Fig. 4 Defocusing optics

( $L_2 \sim L_3$ ) 系统的横向放大率为

$$\beta = \frac{l'_3}{l_2} = \frac{250}{20} = 12.5,$$

轴向放大率为

$$\alpha = \frac{\Delta x'}{\Delta x} = \beta^2 \approx 156,$$

$$\Delta x = \frac{\Delta x'}{\beta^2} = \frac{3}{156} \approx 0.02 \text{ mm} = 20 \mu\text{m}.$$

式中  $l_2$ 、 $l'_3$  分别为透镜  $L_2$  的物方束腰物距和透镜  $L_3$  像方束腰像距;  $\Delta x'$ 、 $\Delta x$  分别为  $L_3$  镜像方轴向离焦量和  $L_2$  镜物方轴向的离焦量。离焦量  $\Delta x$  (即图 4 中的  $\Delta F$ ) 将引起  $L_1$  镜出射光方向的变化如图 4 所示。 $\tan \theta_1 \approx \theta_1 \approx \omega_{10}/F_1$ , 两边微分

$$\Delta \theta_1 = \frac{\omega_{10}}{F_1^2} \Delta F = \frac{1}{10^2} \times 0.02 = 2 \times 10^{-4} \text{ rad} \approx 1'.$$

可见物体的轴向位移不会影响  $R_1$  入射光的方向,从而确保了  $R_1$  能正常发挥作用。

此外,再分析一下光阑 O 的作用。由图 3 知它可让光轴上半部的光作测量。其目的是为了能获得多普勒频移信号(否则由于光轴两侧光束的差动将无多普勒频移信号),但这时各入射光线、散射光线的方向不一致,因而引起频移有一定的变化,即引起频移误差。为了减少此误差,我们用光阑 O 对它们加以限制,其直径取 2 mm,由图 3 知产生  $\Delta f$  最大误差的光线角为  $\theta$ ;  $\tan \theta = 2/150 = 0.008$ ,  $\theta \approx 30'$ ,  $\cos \theta = \cos 30' \approx 1$ 。可见所接收到的多普勒频移

$$\Delta f = \frac{v}{\lambda} (1 + \cos \theta) = \frac{2v}{\lambda},$$

其近似程度是非常高的。但信号强度却降低很多。

为此在光路中除用光头在被测体上聚焦成一个很小光斑(以提高散射光能)外,还用 1/4 波片  $G_2$ 、半波片  $G_1$  和  $G_3$ <sup>[5]</sup>、偏振棱镜  $R_1$  以及低噪声高灵敏度光电接收器  $D_1$ 、 $D_2$  等充分发挥通过光阑 O 的散射光的效率,得到尽可能大的多普勒差拍信号。特别是在电路上采用了锁相放大器确保多普勒信号的拾取。

## 4 实验结果及结论

利用上述所设计的参考光路,信号拾取及处理系统对 250 mm 处磨刀石(铬刚玉,双面粒度 100/180)进行 5 mm 的离面位移(轴向)测量(此位移量由显微镜千分尺控制和计量),光源采用 25 mW 的 He-Ne 激光器,其测量值列于表 1 中。

Table 1 Measurement results of longitudinal displacement

(Unit:  $\mu\text{m}$ )

$x_i$	$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$	$(\Delta x_i)^2$	$x_i$	$\Delta x_i = x_i - \bar{x}$	$(\Delta x_i)^2$
4982	-19	361	5016	15	225
4987	-14	196	5010	9	81
5003	2	4	5000	-1	1
5015	14	196	4995	-6	36
5020	19	361	4980	-21	441

$$\bar{x} = 5001 \mu\text{m},$$

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x_i)^2}{N-1}} = \sqrt{\frac{1902}{9}} \approx 14 \mu\text{m},$$

$$\frac{\sigma(x)}{\bar{x}} \times 100\% = \frac{14}{5001} \times 100\% \approx$$

$$0.28\% \approx 0.3\%.$$

实验结果表明所设计的高分辨力 ( $\omega'_{30} = 25 \mu\text{m}$ ; 离面位移 0~5 mm,  $25 \mu\text{m} \leq \omega'_{30} \leq 35 \mu\text{m}$ , 很小) 参考光路是令人满意的。此测量系统可用于复杂三维物体离面位移测量或特形旋转体表面损伤或轮廓的测量。

## 参 考 文 献

- 1 He Shunzhong, Liu Yanyu, Jiang Chenzhi *et al.*. Study on signals of in-plane displacement measurement utilizing laser Doppler effect. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23** (1): 71~74 (in Chinese)
- 2 Hong Xin, He Shunzhong, Jiang Chenzhi *et al.*. Remote displacement measurement of solid scattering surface utilizing laser Doppler effect. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(1): 118~121 (in Chinese)

- 3 Jiang Chenzhi, Chen Lincai, Xu Kexin. Theoretical analysis and experimental result of a displacement measuring system using grating Doppler effect. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1992, **12**(8):755~758 (in Chinese)
- 4 Zhang Xiaofang, He Shuzhong, Jiang Chengzhi. A reference optical structure using in laser Doppler longitudinal displacement measurement. *Chin. J. Scientif. Instrument* (仪器仪表学报), 2001, **22**(3):287~291 (in Chinese)
- 5 Drain L E. *The Laser Doppler Technique* (激光多普勒技术). Transl. Wang Shikang. Beijing: Tsinghua University Press, 1980. 50~51, 105~107 (in Chinese)
- 6 Zhou Bingkun. *Principles of Laser* (激光原理). Beijing: National Defence Industry Press, 1980. 348~349, 357~358 (in Chinese)
- 7 Wei Guanghui, Zhu Baoliang. *Laser Beam Optics* (激光束光学). Beijing: Beijing Industrial College Press, 1988. 135~137 (in Chinese)
- 8 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics* (工程光学). Beijing: Machinery Industry Press, 1999. 21~25, 187 (in Chinese)

## Optimization of Optical System Capable of Off-Surface Displacement Measurement

He Shunzhong Yao Xin Jiang Chengzhi Chen Lincai Liu Jinfeng  
(The National Key Lab of Precision Measuring and Testing Technique and Instrument,  
Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 29 July 2002; revised 26 August 2002)

**Abstract:** To achieve the measurement for complicated three-dimensional object surface outline and the longitudinal displacement or vibration of object within a small space, it's necessary to develop optical detection system with high resolution and non-contact. Laser Doppler technology is preferentially applied in longitudinal displacement measurement of complex three-dimensional object because it has high accuracy, quick dynamic response, good linearity, great measuring range and is noncontact. However, the signal got from the scattered light of object measured is faint, so improving the intensity and signal-to-noise ratio of the signal are pivotal. Laser Doppler technique and statistic law of random changing of scattered light phase are studied and a reference optics with high spatial resolution is designed. The measurement result is satisfying when the system is applied to the off-surface displacement measurement, with a relative error of 0.3%.

**Key words:** optical measurement; laser Doppler reference optical system; off-surface displacement measurement; spatial resolution