

光栅位移激光多普勒遥测技术的研究*

蒋诚志 洪 昕 杨 鑫 陈林才 张晓芳
(天津大学精密仪器与光电子学院, 天津 300072)

摘 要 研究了利用运动光栅的多普勒效应进行切向位移的遥测技术。提出了测量光路, 采用声光调制器作为分光和频移器件并用于鉴向, 实现了 50 m 的远距离光栅位移遥测。达到测量分辨率 $0.8 \mu\text{m}$, 光栅位移 40 mm, 最大累积误差优于 $34 \mu\text{m}$ 。并用理论分析和实验, 证明了远距离目标的焦深及其计算方法, 导出了计算公式。

关键词 多普勒效应, 声光调制, 位移遥测。

1 引 言

源于声学的多普勒效应, 以及 60 年代激光的产生, 相继发展到光学领域, 出现了激光多普勒测速技术(LDA)^[1]。利用被测物体散射光的多普勒频移, 通过鉴频或是鉴相技术可分别得到速度或位移信息。因其输出信号的频率或相位具有与运动速度和位移成线性关系的突出优点, 在测量应用中受到国内外的普遍重视^[2]。多普勒测速技术具有非接触测量、测量范围宽、动态响应快、测量精度高、线性度好等优点。但利用多普勒测速技术进行位移量测量时, 要求信号时间连续性强, 使得该技术的发展受到局限, 尤其对实现位移遥测困难更大。

本文研究了利用光栅的多普勒效应进行切向位移的遥测技术。文中分析了测量焦深的计算方法, 导出了计算公式, 进行了实验验证。理论计算和实验表明该遥测系统具有大的焦深, 能方便地对准目标, 有利于实际应用。

2 测量原理和理论分析

2.1 光栅多普勒频移

设光的入射角为 i , 频率为 f_0 , 波长为 λ , 第 k ($= 0, \pm 1, \pm 2 \dots$) 级衍射光的衍射角为 α_k , 光栅的运动速度为 v , 光栅常数为 d 。根据多普勒效应原理, 第 k 级衍射光的频率 f_k 为

$$f_k = f_0 + \Delta f_k \quad (1)$$

式中 $\Delta f_k = kv/d$ 为衍射光栅的多普勒频移。可见, 光栅的多普勒频移只与栅距 d 、衍射级次 k 和运动速度 v 有关, 与光波长无关。衍射级次越高则频移越大, 零衍射级的频移值为零。光栅的位移测量就是通过差频方法检测衍射光的多普勒频移值实现的。

* 国家自然科学基金项目, No. 59375257。

收稿日期: 1997-04-06; 收到修改稿日期: 1997-09-01

2.2 系统的光路结构和位移测量公式

图 1 所示是利用光栅实现差频拾取差拍信号的位移遥测光路结构。系统由激光器 L, 声光调制器 A, 五角棱镜 C, 两反射镜 M₁、M₂, 准直透镜组 O₁、O₂, 会聚透镜 O₃, 直角棱镜 R, 光电接收器 E 组成。

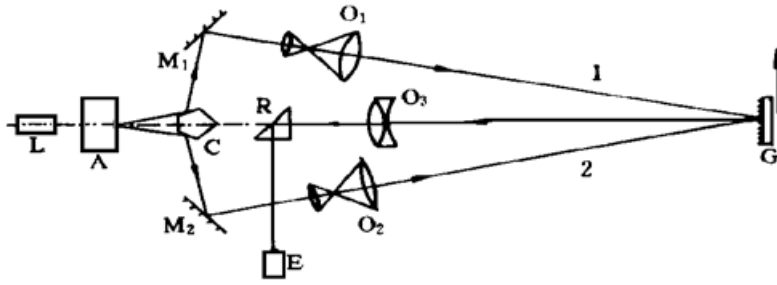


Fig. 1 Schematic diagram of optical measuring system

来自激光器 L 的光束, 以布拉格角入射到声光调制器上, 形成 0 级和 +1 级衍射光, 调节布拉格器件的输入功率, 使得两束光强度近似相等。声光器件的分束角很小, 难以满足遥测分束的要求。

为此, 由五角棱镜 C 进行二次分布, 经反射镜 M₁、M₂, 准直透镜组 O₁、O₂ 将两束光会聚在运动光栅 G 上。调节 M₁ 和 M₂ 的反射角, 使得两束光在 G 上的入射角满足光栅混频条件。此时, 经运动光栅衍射之后, 光束 1 的 0 级与光束 2 的 +1 级主极大重合并沿光轴的方向同路返回, 经 O₃ 聚焦在光电检测器 E 上。根据光栅的衍射方程可得两光夹角应满足的条件

$$d(\sin \theta_1 - \sin \alpha) = 0, \quad d(\sin \theta_2 + \sin \alpha) = \lambda \quad (2)$$

由(2)式考虑到 $(\theta_1 - \theta_2)/2$ 很小, 可略去, 则得

$$\theta_1 + \theta_2 = 2 \arcsin \lambda/2d \quad (3)$$

根据光电检测器件的平方律检测性质得到交流信号输出, 其频率为两束光的频差。当光栅以速度 v 运动时, 光束 1 的 0 级衍射光不具有多普勒频移, 光束 2 的 +1 级衍射光的频移为 v/d 。因此, 两束光的频差为

$$\Delta f = (v/d) - 0 = v/d \quad (4)$$

对这一拍频信号的脉冲累计计数, 即可得光栅的位移 x

$$N = \int_0^x \Delta f dt = x/d \quad \text{即} \quad x = Nd \quad (5)$$

N 为拍频信号的累计周期数。

2.3 声光调制与方向辨别

在本系统激光多普勒位移测量中是利用声光调制光频分别与相位相差 90° 的信号混频, 从而得到正弦、余弦两路信号实现辨向, 即常说的双相检测法辨向。声光调制器的工作原理是利用声光效应产生布拉格衍射。如图 2 所示, 透明介质中稳定波长的声波可以产生类似移动相位光栅的效应。其各衍射主极大的频率为: $f_k = f_0 + k\Omega$ ($k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$), 这种相位光栅的产生是由于光弹效应导致的折射率变化^[4]。然而由于折射率变化很小, 除了特定的入射角外, 其衍射效率很差。当入射光满足布拉格条件入射时, 即

$$\theta_i = \theta_a = \theta_b, \quad \sin \theta_b = \lambda/2\Lambda \quad (6)$$

式中 θ_b 为布拉格角, Λ 为超声波波长。得到频移 Ω 。衍射光只集中了两个衍射主极大: 0 级和 +1 级, 频率分别为 f_0 和 $f_0 + \Omega$ 。

精确设计电缆传输线的长度, 可以得到两路相位准确相差 90° 频率为 Ω 的信号输出(如图 3 所示), 与经过光电转换后输出的调制多普勒信号进行混频, 得到正弦、余弦两路信号实现辨向。此时相位相差 90° 的两路信号 V_1 、 V_2 和调制多普勒信号 V_f 分别为

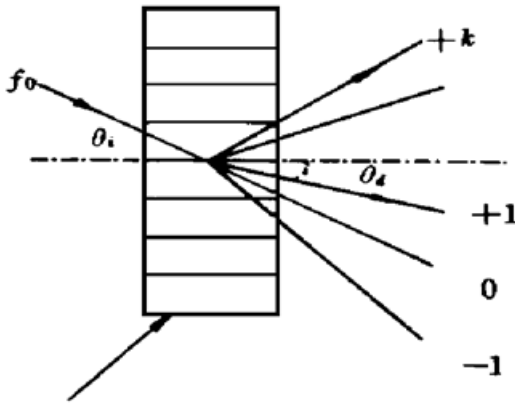


Fig. 2 Diffraction in acousto-optic crystal

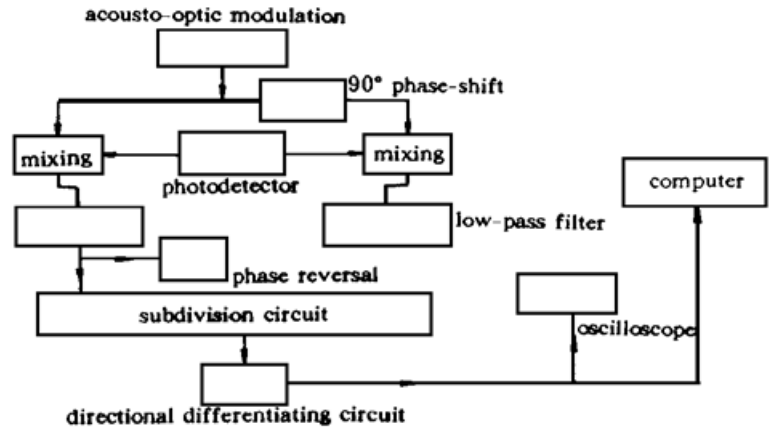


Fig. 3 Schematic diagram of signal processing

$$V_1 = A_1 \cos(2\pi\Omega t), \quad V_2 = A_2 \cos(2\pi\Omega t + \pi/2) \tag{7}$$

$$V_f = B \cos[2\pi(\Omega + \Delta f)t] \tag{8}$$

由此得混频之后的两路信号 V_{h1} 、 V_{h2} 分别为

$$V_{h1} = (A_1 B / 2) \{ \cos 2\pi\Delta f t + \cos [2\pi(2\Omega + \Delta f)t] \} \tag{9}$$

$$V_{h2} = (A_2 B / 2) \{ \sin 2\pi\Delta f t + \cos 2\pi(2\Omega + \Delta f + \pi/2)t \} \tag{10}$$

由于声光调制信号的频率 $\Omega = 40 \text{ MHz}$ ，经低通滤波处理得

$$V_{h1}' = K_1 \cos(2\pi\Delta f t), \quad V_{h2}' = K_2 \sin(2\pi\Delta f t) \tag{11}$$

信号处理系统(见图 3)由移相、混频、低通滤波、细分辨向、数据处理及显示部分组成。

2.4 焦深计算

由图 1 可知被测目标(光栅)应准确位于两光束相交点上。实验表明:当目标偏离交点较大时,信号质量明显下降。因此本系统存在一个能实现准确测量的焦深区间,不同的测量目标的计算如下:

2.4.1 散射体目标

设被测量目标为任意散射表面时,根据光学外差原理,散射光差拍信号的频差及相位差都将对检测器的输出电流产生影响。如果检测器表面上的差拍信号的相位变化大,则总输出会大大减小。如图 4 所示,若被测物偏离两光交点位置 A ,移至位置 B , AB 距离为 D ,两束光在 B 位置物体上的交点相距为 t ,则

$$t = 2D \tan \theta \tag{12}$$

设平行光轴返回的两束散射光经成像透镜会聚于光电接收器上的 C 点,光程差为零的主极大。散射角为 α 的光束经成像透镜聚焦于光电接收器上的 C' 点,到 C' 点两条光束的光程差为

$$\delta = t \sin \alpha = 2D \tan \theta \sin \alpha \tag{13}$$

则 C 点为干涉主极大的条件为

$$\delta = 2D \tan \theta \sin \alpha = k\lambda \tag{14}$$

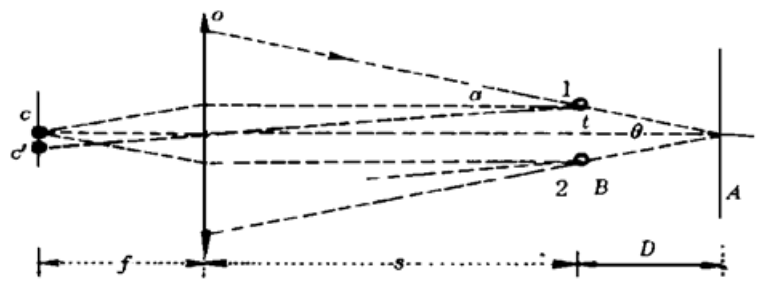


Fig. 4 Schematic diagram of focal depth analysis

条纹宽度 e 为

$$e = f' \tan \alpha = f' (\lambda / 2D \tan \theta) \tag{15}$$

为使光电检测器能准确检测到多普勒信号，至少应使第 1 级亮纹位于光电检测器的边缘外，即 $e \geq b$ ，则得焦深

$$D \leq (f' \lambda) / (2b \tan \theta) \tag{16}$$

式中， b 是光电检测器半宽度。

2.4.2 光栅目标

如图 1 所示，以光栅作为被测目标时，由于它具有衍射光方向确定的优点，此时图 4 中的衍射角 α 决定于激光束发散角 ω 和准直透镜系统的视角放大率 Γ ，则有

$$\sin \alpha = \alpha = \omega / 2\Gamma \tag{17}$$

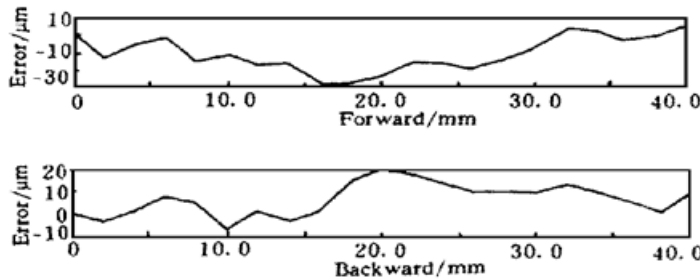
同样
$$\delta = 2D \tan \theta \sin \alpha = 2D \omega \tan \theta / 2\Gamma \leq \lambda \tag{18}$$

则
$$D \leq (\lambda \Gamma) / (\omega \tan \theta) \tag{19}$$

本系统: $\Gamma = 2.5$, $\omega = 1.3 \times 10^{-3}$ rad, $\tan \theta = 0.02$, $\lambda = 0.6328 \times 10^{-3}$ mm, 得 $D \leq 60.85$ mm, 则得到焦深为 $2D = 121.7$ mm。实验数据验证了理论分析所导出的焦深计算公式。

3 实验和结论

本测量系统使用偏振稳频氦-氖激光器，功率为 0.7 mW，功率稳定在 1% 以内。实验结



果: 在 50 m 处测量光栅位移的误差曲线和焦深范围分别如图 5 所示和表 1、表 2 所列。光栅切向移动 40 mm，最大累积误差优于 34 μm 。在距离目标 50 m 远处，被测物在轴向偏离 ± 50 mm 范围内能高精度地实现光栅的切向位移测量，且随着被测目标距离的加大，焦深增加。因此光学系统易对准被测目标。本系统经 20 倍电路细分，计数脉冲当量为 0.8 μm ，采用系统机进行数据处理。光栅横向位移测量的精度比对实验采用分辨率为 1 μm 的 SONY 光栅数显表进行。

Fig. 5 Error curves of the grating displacement measurement at the distance of 50 meters

Table 1. Focal depth measurement

axial position of grating/mm	five measured values by measuring the grate lateral displacement 1000 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$					range of focal depth	focal depth/mm
	displacement forward	1	2	3	4		
0.0	forward	1010.0	1007.0	1004.8	998.4	1006.0	in focal depth
	backward	1007.2	1002.4	990.4	994.4	1004.0	
50.0	forward	1002.4	1006.4	995.2	1002.4	998.4	in focal depth
	backward	1004.8	1008.0	992.8	1006.4	996.8	
100.0	forward	1004.8	1010.4	990.4	1008.0	1006.4	in focal depth
	backward	1002.4	1008.8	1012.0	992.0	996.8	

Table 2. Measurement result of grating displacement moving forward and backward

indication of digital meter	forward measured value	backward measured value	indication of digital meter	forward measured value	backward measured value
0.0	0.0	0.0	22000.0	2008.0	1998.0
2000.0	1987.2	1997.0	24000.0	1999.2	1996.0
4000.0	2007.2	2004.0	26000.0	1997.6	1997.0
6000.0	2004.0	2007.0	28000.0	2004.0	2000.0
8000.0	1986.4	1998.0	30000.0	2006.4	2000.0
10000.0	2004.0	1988.0	32000.0	2012.0	2003.0
12000.0	1994.4	2008.0	34000.0	1999.2	1997.0
14000.0	2000.8	1996.0	36000.0	1994.4	1994.0
16000.0	1988.0	2004.0	38000.0	2002.4	1995.0
18000.0	2000.8	2014.0	40000.0	2005.6	2008.0
20000.0	2004.0	2004.0	max accumulating error	33.6	26.0

结 论 1) 利用光栅衍射的多普勒效应, 可有效地实现其切向位移的高精度远距离测量, 还可应用于反射光栅连接目标物的位移应变及其它运动参数测量。2) 该测量系统具有大的焦深, 测量中容易对准目标。随着测量距离的加大, 光栅栅距的增加, 准直透镜角放大率的加大, 系统的焦深增加, 有利于实际应用。3) 改变光栅栅距或相应的光学元件还可实现 50 m 以上距离的光栅位移测量。采用十字光栅可进行二维位移测量。4) 光栅的差频信号可以由 ±1 衍射级或 0、1 衍射级进行。采用 0、1 级进行差频是在同样光学系统尺寸下, 增加测量距离的一种有效方法。5) 空气漂移是造成测量误差的重要原因, 本系统采用全对称入射和衍射光路可有效消除测量误差, 在全对称光束中增设相同的准直系统可大幅度改善光束质量, 能保证实现大的检测距离。

参 考 文 献

- [1] L. E. Drain. *The Laser Doppler Technique*. New York: John Wiley, 1980. 36~ 45
 [2] Chengzhi Jiang, Lincai Chen *et al.*. Study on remote measurement technique of displacement of velocity by laser Doppler effect. *Proc. SPIE*, 1994, **2358**: 93~ 100
 [3] 盛建芳. 激光多普勒效应调制法光栅位移遥测技术的研究. 天津大学研究生论文, 1996
 [4] Leo Bademian. Acousto-optical laser recording. *Opt. Engng.*, 1981, **20**(1): 143~ 149

Study on Remote Measurement Technique of Grating Displacement Utilizing Laser Doppler Effect

Jiang Chengzhi Hong Xin Yang Xin Chen Lincai Zhang Xiaofang
 (College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)
 (Received 6 April 1997; revised 1 September 1997)

Abstract A remote measurement system of solid surface displacement by laser Doppler effect of grating which was used to produce beat frequency is discussed. An acousto-optical system could be conveniently adjusted. The displacement measurement at the remote distance of 50 meters was realized.

Key words Doppler effect, acousto-optical modulation, remote measurement of displacement.