

采用光栅混频、偏振移相的多普勒 位移测量技术的研究*

洪 昕 张德芬 蒋诚志 陈林才 张海翔

(天津大学精仪与光电子学院 天津 300072)

提要 研究了利用运动光栅作散射体的激光多普勒效应进行远距离目标横向位移的检测技术。采用光栅混频、偏振移相的光路设计,进行了测量原理分析,从理论上给出了在其方向辨别中的偏振移相方法。

关键词 光栅混频,偏振移相,多普勒效应,横向位移

1 引言

激光多普勒测量技术早期主要用来测量气体和液体的流动速度^[1],近年来由于该技术所具有的许多重要优点,也开始用于固体的运动参数测量^[2]。衍射光栅的多普勒效应信号强、信噪比高、抗干扰能力强,而且其多普勒频移与光的波长无关^[3],因此光栅多普勒方法容易实现遥测,特别对于在车间条件下精密机械的横向位移遥测具有重要意义。此外,这种方法还可用于机械振动、应变等的远距离测量。

本文研究利用反射光栅的多普勒信号,实现横向位移遥测的光栅测量系统。采用光栅混频将衍射主极大的±1级进行差拍,配合光学偏振移相的辨向方法,得到与被测位移具有线性关系的信号相位输出。测量系统全光路结构对称,使它们具有完全相同的空气不均匀影响,可有效减弱大气扰动对测量精度的影响。实验结果表明该测量方法测量精度高、重复性好,可用于生产环境中的远距离精密测量。

2 原理和理论分析

2.1 光栅的多普勒效应

光栅移动时衍射光束的多普勒效应如图1所示。设光的入射角为*i*,频率为*f*₀,波长为λ,第*k*(*k* = 0, ±1, ±2, …)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*g*。根据多普勒效应原理,第*k*级衍射光的频率*f*_{*k*}为

$$f_k = f_0 + \Delta f_k = f_0 + k \frac{v}{g}$$

* 国家自然科学基金资助项目(No. 59375257)。

$$\Delta f_k = k \frac{v}{g} \quad (1)$$

式中, Δf_k 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 g , 衍射级次 k 和它的运动速度 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。

2.2 光栅混频

为实现差动多普勒测量, 采用光栅混频获得差拍信号。图 1 中调整入射角使得(1)光的 +1, +3, -1 级分别与(2)光的 -1, +1, -3 级重合, 即得三对混频光束(+1, -1), (+3, +1), (-3, -1)用于测量。

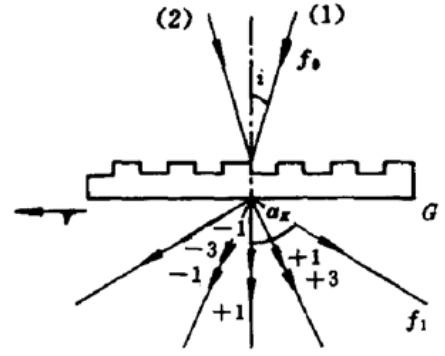


图 1 光栅多普勒效应
Fig. 1 Doppler effect of grating

由傅里叶光学, 将一维振幅光栅的透过率函数表示为

$$g(x) = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{2} (e^{inpx} + e^{-inpx}) \quad (2)$$

$$a_n = \frac{2}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \quad p = \frac{\pi}{a} \quad a = \frac{g}{2}$$

设入射到前向运动光栅的光束为 $E_i = \exp(i\omega t)$, 经此光栅衍射之后的光场函数为

$$E_t(x) = g(x')E_i = \frac{1}{2}e^{i\omega t} + \frac{a_1}{2}[e^{i(\omega t + px')} + e^{i(\omega t - px')}] + \frac{a_2}{2}[e^{i(\omega t + 2px')} + e^{i(\omega t - 2px')}] + \dots + \frac{a_n}{2}[e^{i(\omega t + npx')} + e^{i(\omega t - npx')}] + \dots \quad (3)$$

可得 ± 1 级衍射光的光场为
$$\frac{a_1}{2}[e^{i(\omega t + px')} + e^{i(\omega t - px')}] \quad (4)$$

经过混频光栅之后, 同理可得
$$E_s = E g(x') \quad (5)$$

根据光电接收元件的平方律检波性, 可得其光电流中的交流信号为

$$I_{(+1, -)} = \frac{2}{\pi^4} \cos \frac{4\pi}{g} l$$

$$I_{(+3, +)} = \frac{2}{3\pi^4} \cos\left(\frac{4\pi}{g} l + \pi\right) \quad (6)$$

$$I_{(-3, -)} = \frac{2}{3\pi^4} \cos\left(\frac{4\pi}{g} l + \pi\right)$$

式中 l 为光栅位移。由公式可见, $I_{(+3, +)} = I_{(-3, -)}$ 且是同相信号, 它们和 $I_{(+1, -)}$ 是相位差 π 的反相信号。因此将它们输入差动放大器, 可得到消去直流分量的交流信号。

2.3 偏振移相

光栅多普勒测量可方便地采用光学移相技术获得相位差 90° 的二相信号用于辨向和测量。考察图 2 采用 $1/4$ 波片和渥拉斯顿棱镜分离偏振光, 分光镜混频。在具有频移 $-\Delta f$ 的 -1 级的光路中设置 $1/4$ 波片, 两光束通过半透反射镜和两个偏振分光镜 W_1, W_2 (渥拉斯顿棱镜), 分别由四个光电池 E_1, E_2, E_3, E_4 接收, 输出 $\pm \sin$ 和 $\pm \cos$ 信号, 经差动放大器消去直流分量获得相位差 90° 的二相信号。 ± 1 级衍射光的

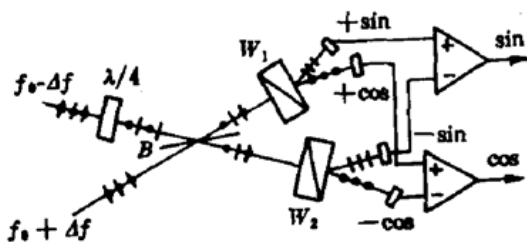


图 2 偏振移相原理

Fig. 2 Principle of polarization phase-shift

光振动可表示为:

$$\begin{cases} E_1 = A_1 \cos(2\pi f_1 t) \\ E_2 = A_2 \cos(2\pi f_2 t) \end{cases} \quad (7)$$

1/4 波片使光束中两相互垂直的偏振光产生 $\lambda/4$ 光程差或相位差 $\phi = \pi/2$, 则经不同路径到达分光镜时, 各光束的光振动为

$$\begin{cases} E_1 = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) \\ E_{2//} = A_2 \cos\left(2\pi f_2 t + \phi_2 + \frac{\pi}{2}\right) = A_2 \sin(2\pi f_2 t + \phi_2) \\ E_{2\perp} = A_2 \cos(2\pi f_2 t + \phi_2) \end{cases} \quad (8)$$

根据光电检测器的平方律检波性质, 有

$$\begin{aligned} I(t)_{//} &= [A_2 \sin(2\pi f_2 t + \phi_2) + A_1 \cos(2\pi f_1 t + \phi_1)]^2 \\ I(t)_{\perp} &= [A_2 \cos(2\pi f_2 t + \phi_2) + A_1 \cos(2\pi f_1 t + \phi_1)]^2 \end{aligned} \quad (9)$$

由于光波的频率很高 (10^4 Hz), 光电检测器无法感知光频, 将其作为直流分量则上式可写成

$$\begin{aligned} I(t)_{//} &= I_A + A_1 A_2 \sin[2\pi(f_1 - f_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] \\ I(t)_{\perp} &= I_A + A_1 A_2 \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] \end{aligned} \quad (10)$$

由上两式可见, 经 1/4 波片后的光束叠加, 可获得相位差 90° 的二相信号。

3 光栅混频、偏振移相的多普勒位移测量系统

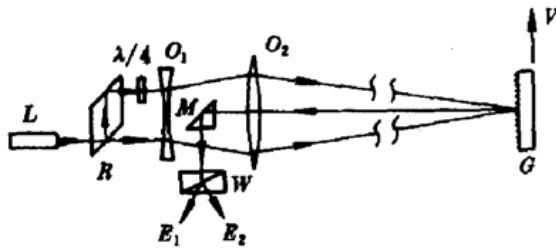


图 3 测量系统原理

Fig. 3 Measurement system

图 3 所示是光栅混频、偏振移相的横向位移遥测系统的光路结构。该系统由激光器 L , 分光棱镜 R , 1/4 波片 B , 辅助透镜 O_1 , 成像透镜 O_2 , 反射光栅 G , 反射棱镜 M , 渥拉斯顿棱镜 W 以及光电接收器 E_1 和 E_2 等组成。

入射激光束经棱镜分成相互平行的两束, 经负透镜 O_1 和成像透镜 O_2 , 将两光束会聚于和被测目标相连结的运动反射光栅 G 上。 G 在这里同时用作产生多普勒频移和混频器件。调节辅助透镜使得 (1) 光和 (2) 光在光栅上相交时的入射角满足混频条件, 即当光栅垂直于光轴方向运动时, $\theta = \sin^{-1} \frac{\lambda}{g}$, 使得经光栅 G 衍射后的 (1) 光的 +1 级和 (2) 光的 -1 级相互叠加干涉沿光轴同方向返回, 得到混频差拍信号。

由反射光栅的多普勒效应的分析可知混频后的拍频为

$$\Delta f = \left(f_0 + \frac{v}{g}\right) - \left(f_0 - \frac{v}{g}\right) = 2 \frac{v}{g} \quad (11)$$

这一拍频信号的脉冲累计计数即可得光栅 G 的位移 x

$$N = \int_0^t \Delta f dt = 2 \frac{x}{g} \quad x = N \frac{g}{2} \quad (12)$$

图 3 中在光束 (1) 上设置的 1/4 波片和渥拉斯顿棱镜用作偏振移相元件, 产生 90° 相位差的 \sin 和 \cos 信号, 送后继的信号处理电路和计算机运算系统, 以辨别运动方向和位移值测量计数, 其计数和处理逻辑如图 4 所示。

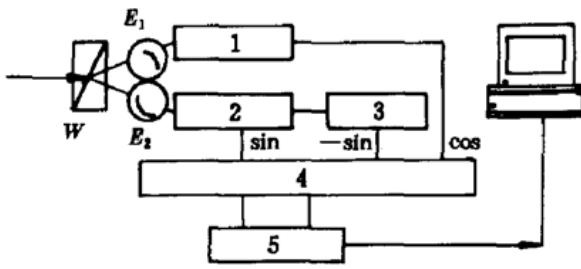


图 4 信号处理

1, 2: 滤波放大; 3: 180 移相; 4: 细分电路; 5: 辨向电路

Fig. 4 Signal processing

1, 2: filter and amplifier; 3: 180-degree phase shift

4: subdivision circuit; 5: directional differentiating circuit

4 实验结果和结论

本测量系统使用磁起偏氦氖激光器, 功率约为 1.5 mW, 功率稳定度 $\leq 5\%$ 。实验表明, 在距离目标 6 m 处, 被测物在轴向偏离 ± 9 mm 范围内, 能高精度地实现光栅的横向位移测量。且随着被测目标距离的加大, 景深增加, 因此光学系统很容易对准被测目标。使用反射振幅光栅和反射片光栅的实验表明, 片光栅的 ± 1 级衍射光的能量强, 可以获得更高的信噪比, 有利于大的检测距离。本系统经光路和 20 倍电路细分, 计数脉冲当量为 $0.4 \mu\text{m}$ 。采用微机系统进行数据处理。光栅横向位移测量的精度比对实验是用分辨力为 $1 \mu\text{m}$ 的 sony 光栅数显表进行的, 在远离 6 m 处测量误差曲线如图 5 所示。由数据可知, 在位移 20 mm 范围内, 测量累积误差为 $4 \mu\text{m}$, 最大累积误差为 $11.2 \mu\text{m}$ 。光栅横向位移的测量精度及景深测量数据见表 1, 表 2。表中“数显表示值”表示光栅每次移动 $100 \mu\text{m}$ 总位移为 20 mm 的标准显示值。表中实测值为比时光栅正向和反向位移时的显示值。影响测量结果的因素较多, 主要有电路细分带来的误差, 温度波动造成栅距变化而产生的误差; 另外, 由于实验装置机械结构的稳定性, 光学元件参数的误差都是影响测量误差的因素。

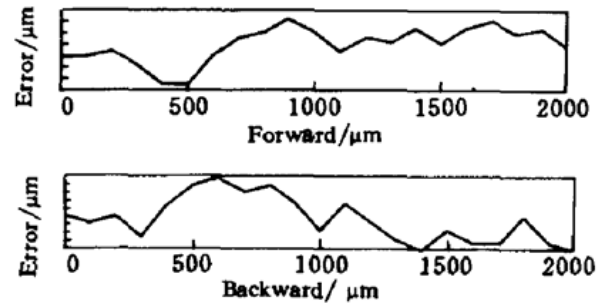


图 5 误差曲线

Fig. 5 Error curves

表 1 光栅横向位移的测量精度 (μm) (测量距离: 6 m)

Table 1 Precision of the lateral displacement-measurement the measurement distance is 6 meters

indication of digital meter	forward result	backward result	indication of digital meter	forward result	backward result
0.0	0.0	0.0	1100.0	96.8	103.2
100.0	100.0	99.2	1200.0	102.4	97.6
200.0	100.8	100.8	1300.0	99.2	97.6
300.0	97.6	97.6	1400.0	102.4	99.2
400.0	96.8	104.0	1500.0	97.6	102.4
500.0	100.0	102.4	1600.0	102.4	98.4
600.0	104.8	100.8	1700.0	101.6	100.0
700.0	103.2	98.4	1800.0	97.6	103.2
800.0	100.8	100.8	1900.0	100.8	96.8
900.0	102.4	97.6	2000.0	96.8	99.2
1000.0	97.6	96.8			
			maximum accumulating error	11.2	8.8

表 2 景深测量(测量距离:6 m)

Table 2 Image field measurement

axial position of grating/mm	five results by measuring the grating lateral displacement 300 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$					range of field depth	field depth/mm
	direction of movement	1	2	3	4	5	
0.2	forward	235.2	233.6	209.6	232.8	238.4	beyond field depth
	backward	306.3	308.0	310.3	316.0	291.3	
0.5	forward	232.8	221.6	237.6	239.2	240.0	beyond field depth
	backward	297.6	303.2	300.0	302.6	298.4	
0.8	forward	299.2	298.4	303.2	302.4	296.8	bound of field depth
	backward	298.4	302.4	301.6	299.2	300.8	
10	forward	300.8	302.4	299.2	298.4	302.4	within field depth
	backward	302.6	302.4	299.2	299.2	300.8	
19	forward	296.0	303.2	302.4	299.2	298.4	bound of field depth
	backward	299.2	303.2	302.4	297.6	299.2	
20	forward	256.8	244.8	265.6	246.4	236.8	beyond field depth
	backward	303.2	296.0	300.8	298.4	299.2	
20.5	forward	200.8	247.2	233.6	236.0	233.6	beyond field depth
	backward	290.4	268.0	254.3	293.6	282.4	

19-0.8=18.2

实验表明该测量系统具有强的抗干扰能力,可以在车间条件下测量,适当改变光路结构和采用大口径光学系统可以实现 2~50 m 的机械结构位移应变振动等的高精度遥测。

参 考 文 献

- 1 L. E. Drain. The Laser Doppler Technique. New York: John Wiley, 1980, 36~45
- 2 G. Ulbers. Ein Laser-Interferometer zur photoelektrischen Bewegungsfernmessung in beiden Lateralkoordinaten, Dissertation. 1981. T. U. Hannover
- 3 Chengzhi Jiang, Fang Cheng, Lincai Chen. Study on remote measurement technique of displacement or velocity by laser Doppler effect. *Proc. SPIE*, 1994, 2358: 93~100

Study of Laser-Doppler Displacement-measuring Technique by Polarization Phase-shifting and Grating Produced Frequency Beat

Hong Xin Zhang Defen Jiang Chengzhi Chen Lincai Zhang Haixiang

(Department of Precision Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract This paper studied the lateral displacement-measurement technique by using the laser Doppler effect of the moving grating which acted as a scatterer. The measurement principle was described by analyzing the optical system in which the grating was chosen to produce beat frequency while the polarization was used to obtain phase-shift. The direction identification principle using polarization phase-shift was also analyzed.

Key words grating produced beat frequency, polarization phase-shift, laser Doppler effect, lateral displacement