

文章编号: 0258-7025(2005)06-0844-04

# 倒置差动式激光多普勒光栅检波系统

贺顺忠, 李庆民, 蒋诚志, 刘宏利, 高 华, 贺少辉

(天津大学测试计量技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 为了解决物体微小位移或微小振动的超低频高精度检测与装调间的矛盾, 提出一种倒置差动式  $4f$  激光多普勒光栅检波系统。它利用两个相位光栅分别实现频移和混频, 提高了位移测量精度; 且采用  $4f$  结构, 提高了空间相干性, 使装调更为方便; 增设  $\lambda/4$  波片、沃拉斯顿棱镜并与差动放大器结合, 不仅得到识别位移方向的正弦、余弦信号, 而且将  $\pm 1, \pm 3$  级衍射光能量都充分利用, 使多普勒信号强度和信噪比更高。

**关键词** 光学器件; 倒置差动; 激光多普勒; 光栅检波

**中图分类号** TH741.6 **文献标识码** A

## Inverted Differential Grating Demodulation System of Laser Doppler

HE Shun-zhong, LI Qing-min, JIANG Cheng-zhi, LIU Hong-li, GAO Hua, HE Shao-hui

(The National Key Laboratory of Precision Measuring and Testing Technique and Instrument,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** To resolve the contradiction between the measurement of micro-displace or high-accuracy detecting of micro-vibration of ultra-low frequency and the convenience of building and adjusting, a inverted differential  $4f$  grating demodulation system of laser Doppler is put forward. Using two phase gratings to realize frequency shift and mixing, the measurement accuracy is enhanced. Adopting  $4f$  configuration to enhance the spatial coherence, building and adjusting of the system are more convenient. Further more, adding  $\lambda/4$  wave plate and Wollaston lens cooperating with differential amplifier in order to get sin, cos signals judging displacement direction, and that the energy of both  $\pm 1$  and  $\pm 3$  diffraction lights is taken use to improve the intensity and signal to noise ratio (SNR) of Doppler signal.

**Key words** optical devices; inverted differential; laser Doppler; grating demodulation

## 1 引 言

随着工程计量技术的快速发展, 对检波器的要求越来越高, 特别是在微机械加工、检测和动态平衡分析中, 人们越来越重视对物体微小位移和微小振动的超低频测试。目前, 各种检波器(包括国外的 SM-24<sup>[1]</sup>, OM-2, GS-32T, MEMS 等)都远未达到高分辨率、高精度检测的要求, 并且存在着动态范围小, 频带窄, 易受温度及磁场的影响, 而且检波器的固有频率使得 10 Hz 以下的的数据丢失等不足。

激光多普勒测量具有精度高、频带宽、动态响应快、测量范围大、线性度高以及非接触测量等优点, 因此, 将激光多普勒用于高精度、大动态范围振动测量具有明显的优势<sup>[2~8]</sup>。但是, 它从被测物体表面的散射光中所得到的多普勒信号强度、信噪比都很

低。如果用传统的差动测量方法<sup>[9]</sup>, 虽然光强有所增大, 但差拍频率却受到两束光间的夹角和光波长的影响, 测量精度受到限制。如果用传统的光栅多普勒检波方法, 虽然可以解决上述影响, 但是其多普勒信号的频移和混频只用一个光栅完成, 并且只利用了  $\pm 1$  级衍射光能量, 此外, 为实现高精度检测, 其装调较困难, 且多普勒信号也不是很强。

为了解决上述矛盾, 在研究了各种激光多普勒测量技术<sup>[9]</sup>之后, 设计出一种具有两个相位光栅的倒置差动式  $4f$  激光多普勒检波系统<sup>[10]</sup>, 它同时解决了信号强度、测量精度、位移方向识别和装调等问题。实验结果证明其技术指标是满意的。

## 2 测量光路原理

收稿日期: 2004-12-21; 收到修改稿日期: 2005-03-26

作者简介: 贺顺忠(1945—), 男, 河南邵东人, 副教授, 主要从事物理光学、光电子学、激光光电检测技术等方面的研究。

E-mail: hszhong.student@sina.com

### 2.1 矩形相位光栅的多普勒频移和混频

理论证明:当光栅常数为  $d$  的光栅以速度  $v$  沿垂直于光传播方向运动时,其各级衍射光将产生多普勒频移,此频移值为

$$\Delta\nu = m \frac{v}{d}, \quad (1)$$

式中  $m$  为衍射级次,  $m = \pm 1, \pm 2, \dots$ 。可见,衍射光的多普勒频移只与光栅常数  $d$ , 物体的运动速度  $v$  有关。

如果两束频率稍有不同的光以光栅的  $\pm 1$  级衍射角准确对称地入射到此光栅上时,则它们相应级次的衍射光就会重合并产生光混频,如图 1 所示。光束 1(+1) 的(+1, -1, -3) 级衍射光分别与光束 2(-1) 的(+3, +1, -1) 级重合(因相位光栅单元的相位差取成  $\pi$ , 所以,只有奇数级次),它们的差频都为

$$\Delta f = 2 \frac{v}{d}. \quad (2)$$

可见,由混频后所得到的差频与两光束间的夹角和光波长无关,消除了传统差动方法的影响。

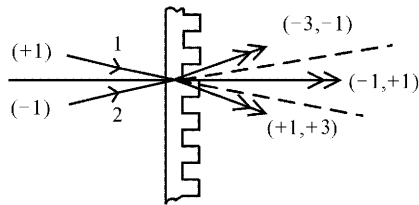


图 1 光栅混频原理

Fig. 1 Principle of the grating frequency mixing

### 2.2 光栅多普勒检波原理

图 2 所示为检波器的光路原理图。此系统由运动光栅  $G_1$  (与被测物体相连), 固定光栅  $G_2$ , 透镜  $L_1 \sim L_3$ , 光阑  $D$ ,  $\lambda/4$  波片  $B$ , 沃拉斯顿棱镜  $W$ , 以及光电探测器  $E_1 \sim E_6$  和差动放大器  $C$  组成。其中,  $G_1, L_1, L_2, G_2$  组成  $4f$  系统。

倒置差动系统的最显著特点是:采用由两个相位光栅和透镜组成的  $4f$  系统, 分别实现频移和混频, 使信号差频与两束光间的夹角和光波长无关, 提高了测量精度; 使  $\pm 1$  级衍射光在  $L_1$  和  $L_2$  之间相互平行, 提高了空间相干性<sup>[11]</sup>; 并且装调更方便; 采用  $\lambda/4$  波片、沃拉斯顿棱镜和差动放大器等, 不仅能识别位移方向, 而且还能利用  $\pm 1, \pm 3$  级衍射光的能量, 使多普勒信号的强度和信噪比更大。

当一束频率为  $f_0$  的激光照射到以切向速度  $v$  运动或振动的光栅  $G_1$  上时, 其各级衍射光将产生频移, 它们经透镜  $L_1$  可分别聚焦在后焦面上。为了

能同时检测位移方向, 在后焦面上设置一双孔光阑, 且在其中一孔处设置  $\lambda/4$  波片, 使  $\pm 1$  级衍射光分别聚焦在两个圆孔处(其像点分别为  $S_-, S_+$ ),  $\lambda/4$  波片使一个孔的光变成圆偏振光(将其快轴与入射光矢量成  $45^\circ$  角时)。  $S_-, S_+$  的光再经透镜  $L_2$  作用后,  $\pm 1$  级衍射光(其偏振态一个为圆偏振光, 另一个为线偏振光), 以  $\pm 1$  级衍射角入射到光栅  $G_2$  上, 这样,  $+1$  级衍射的  $3, 1, -1$  级衍射光就分别与  $-1$  级衍射光的  $1, -1, 3$  级重合, 从而实现了混频。它们的差频都为  $2v/d$ 。此后, 各混频光经透镜  $L_3$ , 沃拉斯顿棱镜(使其主截面平行于  $\lambda/4$  波片的主截面), 分出偏振方向相互垂直的合成光 ( $S, P$ ), 并分别聚焦在  $E_1 \sim E_6$  光电接收器上。然后由差动放大器作用, 得到等强度的、相位差  $\pi/2$  的正弦、余弦电信号。最后, 这些信号分别经滤波、数据采集和 A/D 转换后输入计算机并计算出不同位移方向的位移值, 或振动的振幅和相应的频率等。

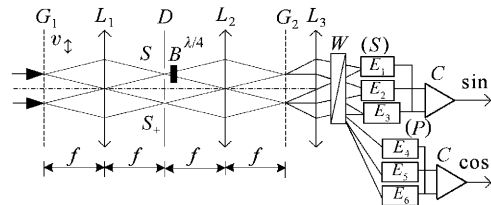


图 2 光栅多普勒检波系统原理图

Fig. 2 Principle of grating Doppler demodulator

### 3 振动测量信号

当物体的运动为简谐振动时, 其位移、速度分别为

$$\begin{aligned} x(t) &= A \cos \omega t = A \cos 2\pi \Omega t, \\ v(t) &= \dot{x}(t) = A \omega \cos(\omega t + \pi/2), \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\Omega$  为物体振动的频率,  $A$  为振幅,  $\omega$  为角频率。可见, 物体运动速度是变速的。当位移最大时, 速度为零; 位移为零时, 速度最大; 其他位置速度均在最小与最大值之间变化, 并且在一个振动周期中速度均变化两次。

因此, 光电接收器输出的交流信号为

$$\begin{aligned} i_1(t) = i_4(t) &= 2 \sqrt{I_3 I_{-1}} \cos \left[ \frac{4\pi}{d} \int_0^t v(t) dt \right] = \\ &= 2 \sqrt{I_3 I_{-1}} \cos \left[ \frac{4\pi}{d} x(t) \right] = \\ &= 2 \sqrt{I_3 I_{-1}} \cos \left[ \frac{4\pi}{d} A \cos \omega t \right], \\ i_2(t) = i_5(t) &= 2 \sqrt{I_1 I_{-1}} \cos \left[ \frac{4\pi}{d} A \cos \omega t \right], \end{aligned} \quad (4)$$

$$i_3(t) = i_6(t) = 2 \sqrt{I_1 I_3} \cos \left[ \frac{4\pi}{d} A \cos \omega t \right].$$

式中  $I_{-3}, I_{-1}, I_1$  为 +1 级的三个衍射光强,  $I_{-1}, I_1, I_3$  为 -1 级的三个衍射光强。可见,振动的差拍波为相位调制信号。其相应的多普勒信号波形将有疏密变化,其中密区对应速度最大,疏区对应速度最小,并且在一个振动周期中有两次疏密变化,即振动周期是信号周期的两倍。显然,两次相邻疏密变化的时间为振动周期的一半。因此,振动体的振幅  $A$  为

$$A = \frac{1}{2} \int_0^{T/2} v(t) dt = \frac{d}{4} \int_0^{T/2} \Delta f dt = \frac{d}{4} (N + \epsilon). \quad (5)$$

式中  $(N + \epsilon)$  为半个振动周期中的拍频次数,  $N$  为整数,  $\epsilon$  为小数。可见,振幅测量精度只由光栅制作质量和计数误差决定。

表 1 振动频率和振幅的实验数据

Table 1 Data of the experiment of oscillation frequency and amplitude

No.	Frequency of comparative value /Hz	Frequency of measurement value /Hz	Amplitude of comparative value / $\mu\text{m}$	Amplitude of measurement value / $\mu\text{m}$
1	1.00	1.01	2500.00	2510.28
2	2.00	2.02	1000.30	1008.08
3	3.00	2.97	930.00	927.03
4	4.00	3.96	740.00	734.89
5	5.00	5.05	500.27	504.27
6	6.00	6.08	350.30	353.00
7	7.00	7.06	220.40	222.10
8	8.00	8.07	150.00	151.20
9	9.00	8.91	82.34	82.97
10	10.00	10.08	50.50	50.33

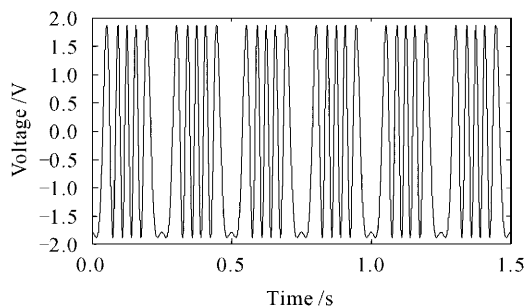


图 3 差拍波形图

Fig. 3 Waveshape of the beat signal

由表 1 数据可得,系统的频率测量误差为 1%, 振幅测量误差为 0.8%。

## 5 结 论

采用由两个相位光栅和透镜组成的 4f 差动检

## 4 实验结果

采用图 2 所示装置进行振动原理实验,其中 He-Ne 激光器输出功率 6 mW,透射型相位光栅的光栅常数  $d=20 \mu\text{m}$ 。振动源采用丹麦生产的振动设备(激振器:4089;功放:2706;信号发生器:1027);数据采集、处理基于 NI 公司的 Labview;采集卡用 DAQ-PCI6023E,实验所测得的频率振幅数据列于表 1 中(其中每一频率、振幅均测 10 次并取平均值)。

图 3 所示为由实验所观测到的差拍波形,采样频率 1 kHz,振动频率 2 Hz,振幅 25  $\mu\text{m}$ 。可见,在一个振动周期中出现两次疏密变化。

波系统,消除了两束差动光间的夹角和光波长的影响;解决了高精度检测与装调之间的矛盾,实现了位移方向的辨别,提高了多普勒信号强度、信噪比等。实验结果表明:其振幅、频率测量误差分别为 0.8%, 1%(而传统的光栅检波误差在 5%左右)。进一步实验还可得出其可测频率范围为 0.5~500 Hz,振幅范围:1  $\mu\text{m}$ ~6 mm。

## 参 考 文 献

- 1 Fu Qingfeng, Zhou Ming. The development of seismic wave demodulation [J]. *Petroleum Machine*, 2000, 14(2): 25~27  
付清锋,周明. 地震检波器的进展 [J]. *石油仪器*, 2000, 14(2): 25~27
- 2 He Shunzhong, Liu Jinfeng, Jiang Chengzhi et al.. Study on Doppler signal of outline measurement of revolving object surface [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, 31(2): 215~218  
贺顺忠,刘金凤,蒋诚志等. 旋转体表面轮廓测量的激光多普勒信号研究 [J]. *中国激光*, 2004, 31(2): 215~218
- 3 He Shunzhong, Yao Xin, Jiang Chengzhi et al.. Optimization

- of optical system capable of off-surface displacement measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1375~1378
- 贺顺忠, 姚欣, 蒋诚志等. 一种可用于离面位移测量的光路的优化设计 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1375~1378
- 4 Hong Xin, He Shunzhong, Jiang Chengzhi *et al.*. Remote displacement measurement of solid scattering surface utilizing laser Doppler effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 118~121
- 洪昕, 贺顺忠, 蒋诚志等. 用激光多普勒效应远距离测量固体散射表面的位移 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 118~121
- 5 Zhang Xiaoyuan, Hong Xin, He Shunzhong *et al.*. Study on measurement technique of scattering-surface displacement utilizing laser Doppler effect [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(8): 751~755
- 张宵元, 洪昕, 贺顺忠等. 散射面位移激光多普勒测量技术的研究 [J]. *中国激光*, 2000, **A27**(8): 751~755
- 6 Zhang Xiaofang, Wang Baoguang, Jiang Chengzhi *et al.*. A reference optical system of laser Doppler longitudinal displacement measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **B10**(2): 97~101
- 7 Shunzhong He, Xin Yao, Chengzhi Jiang. Design of differential optical system of in-plane remote displacement measurement [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(3): 145~146
- 8 He Shunzhong, Liu Yanyu, Jiang Chengzhi *et al.*. Study on signals of in-plane displacement measurement utilizing laser Doppler effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 71~74
- 贺顺忠, 刘彦宇, 蒋诚志等. 面内位移测量的激光多普勒信号研究 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 71~74
- 9 L. E. Drain. Wang Shikang, Shen Xiong, Zhou Zuoyuan transl.. *The Laser Doppler Technique* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1980. 50~59
- L. E. Drain 著. 王仕康, 沈熊, 周作元译. *激光多普勒技术* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1980. 50~89
- 10 A. C. Batpakof. Zhang Hua transl.. *Laser Measurement System* [M]. Beijing: Electric Industrial Press, 1989. 174~177
- A. C. 巴特拉柯夫著. 张华忠译. *激光测量系统* [M]. 北京: 电子工业出版社, 1989. 174~177
- 11 M. J. Beesley, Cao Qiusheng transl.. *Laser and the Application* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1976. 33~34
- M. J. 比斯利, 曹秋生译. *激光及其应用* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1976. 33~34