

光栅衍射多普勒效应位移测量的 理论分析和实验结果

蒋诚志 陈林才 徐可欣

(天津大学精密仪器工程系, 天津 300072)

提 要

本文研究了一种利用光栅衍射的多普勒效应进行位移测量的新方法。文中进行了光路结构和测量原理的理论分析, 得出测量公式, 证明了用光栅拾取多路差拍信号的相位关系。实验结果表明, 它具有高的信号质量, 可有效地用于位移的精密测量。

关键词 多普勒效应, 衍射光栅, 差拍, 透射率函数。

1 引 言

激光多普勒测量由于它具有精度高、线性度好、动态响应快、测量范围大等重要优点, 近年来有很大的发展, 从开始应用于流速测量至今已逐步引入到固体的运动速度测量中来, 并在研究扩大其应用领域^[1~3]。其中用于固体的切向位移测量还是一个正在研究发展中的课题。在一般的多普勒测速应用中, 其多普勒信号是从被测物的散射光中获得, 信号弱, 信噪比低。本文报道的衍射光栅多普勒效应位移测量方法, 是以光栅为运动体和散射体, 散射光方向是光栅衍射的主极大方向, 因此其多普勒信号取决于光栅常数, 得到的差频正弦信号具有很高的信噪比。同时利用光栅混频, 配以偏振分光镜, 能简单有效地多路获取辨向信号, 且多路信号间有准确的相位关系, 移相准确稳定, 这对提高多普勒效应位移测量方法的精度有重要意义。

2 测量原理和理论分析

观察如图1所示光栅移动的多普勒效应。设光栅的运动速度为 v , 光的入射角为 ϑ , 频率为 f_0 , 波长为 λ , 第 k 级衍射光的衍射角为 α_k , 频率为 f_k 。则根据多普勒效应原理^[4], 在 α_k 方向上接收的衍射光的频率为

$$f_k = f_0 + (v/\lambda)(\sin \vartheta + \sin \alpha_k), \quad (1)$$

将光栅方程代入, 可得各衍射级的光频率为

$$f_k = f_0 + (kv/g) = f_0 + \Delta f_k, \quad \Delta f_k = (kv/g), \quad (2)$$

式中 Δf_k 为光栅衍射的多普勒频移; g 为光栅栅距, k 为衍射级次, $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。可见, 光栅衍射的多普勒频移值, 取决于光栅的移动速度。光栅栅距和衍射级次, 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.

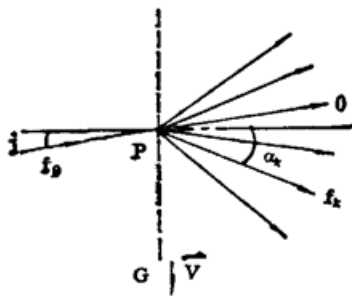


Fig. 1 Doppler effect of grating

图 2 是利用光栅实现差频拾取差拍信号的位移测量光路. 选用相同栅距的常用振幅光栅 G_1 、 G_2 组成双光栅测量系统, 光栅 G_1 的移动产生多普勒信号, 经两个相同的透镜 L_1 、 L_2 和空间滤波光阑 D , 选择 ± 1 衍射级作为测量信号光束, 并投射到光栅 G_2 上进行差拍. 由 (2) 式, ± 1 级衍射光束的频率为

$$\left. \begin{aligned} f_{+1} &= f_0 + (v/g), \\ f_{-1} &= f_0 - (v/g). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其衍射角 $\alpha_{\pm 1}$ 由光栅方程求得, 它们经 L_1 、 L_2 以同样角度 $\alpha_{\pm 1}$ 会聚于光栅 G_2 , 经衍射将出现如图所示的两种频率, 不同衍射级的同方向干涉叠加, 形成多路差拍信号, 但它们有相同的拍频率 Δf

$$\Delta f = f_{+1} - f_{-1} = (2v/g), \quad (4)$$

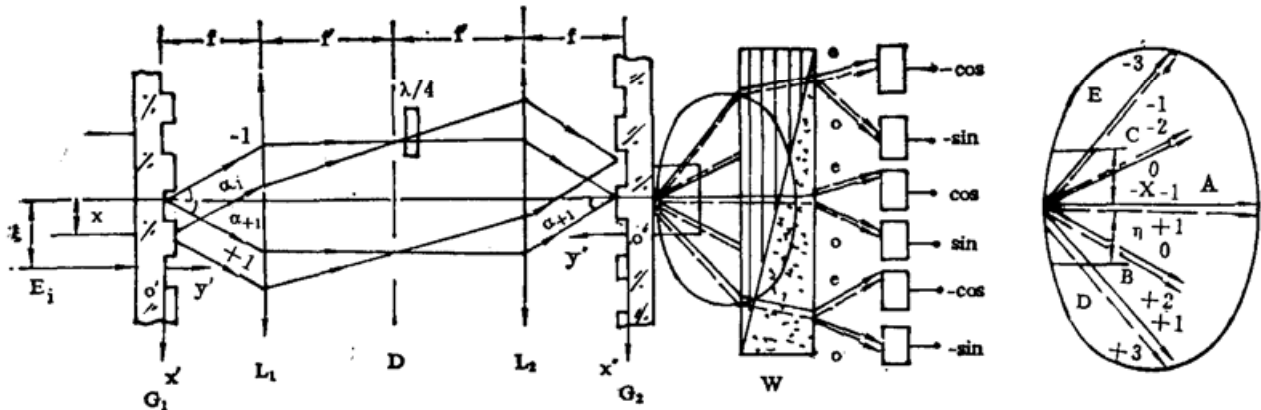


Fig. 2 Grating displacement measuring system

这一拍频信号的脉冲累计计数, 即可得光栅 G_1 的位移 x . 光电池接收的光电信号为

$$I(t) = c_1 + c_2 \cos \left[2\pi \int_0^t \Delta f(t) dt \right] = c_1 + c_2 \cos(4\pi/g)x. \quad (5)$$

在实现测量时, 采用了傅里叶方法, 求出各路干涉拍信号间的相位关系, 从而合理选择反相信号, 有效地实现差动放大. 由图 2 光路, 一维振幅光栅的透率函数可表示为级数和的形式

$$\left. \begin{aligned} g(x) &= \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{2} (e^{inpx} + e^{-inpx}), \\ a_n &= (2/n\pi) \sin(n\pi/2), \quad p = (\pi/a), \quad a = (g/2), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 g 为栅距. 设 x 处入射的光束为 $E_i = \exp(i\omega t)$, 经 G_1 后 x 处光场函数为

$$\begin{aligned} E_I(x) &= g(x') E_i = \left[\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{2} (e^{inpx'} + e^{-inpx'}) \right] e^{i\omega t} \\ &= \frac{1}{2} e^{i\omega t} + \frac{a_1}{2} [e^{i(\omega t + px')} + e^{i(\omega t - px')}] \\ &\quad + \frac{a_2}{2} [e^{i(\omega t + 2px')} + e^{i(\omega t - 2px')}] + \dots \\ &\quad + \frac{a_n}{2} [e^{i(\omega t + npx')} + e^{i(\omega t - npx')}] + \dots \end{aligned} \quad (7)$$

根据透镜的傅里叶变换性质, $E_I(x)$ 的 ± 1 级衍射光经 L_1 、 L_2 两次变换后至光栅 G_2 的光场为 $E_{II}(-x)$ 即

$$E_{II}(-x) = E_I(x) = \frac{a_1}{2} [e^{i(\omega t + px')} + e^{i(\omega t - px')}] \quad (8)$$

经 G_2 后的光场函数为 E_s

$$E_s = E_{II}(-x) \cdot g(x'') \\ = \frac{a_1}{2} [e^{i(\omega t + px')} + e^{i(\omega t - px')}] \cdot \left[\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{2} (e^{inpx''} + e^{-inpx''}) \right]$$

注意到 $x'' = -\eta - x$, $x' = x - \xi$, 代入上式, 则

$$E_s = \frac{a_1}{2} [e^{i(\omega t - px'' - p\xi - p\eta)} + e^{i(\omega t + px'' + p\xi + p\eta)}] \cdot \left[\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{2} (e^{inpx''} + e^{-inpx''}) \right] \\ = \frac{a_1^2}{4} \{ e^{i[\omega t + p(\xi + \eta)]} + e^{i[\omega t - p(\xi + \eta)]} \} \\ + \left\{ \frac{a_1}{4} e^{i[\omega t + px'' + p(\xi + \eta)]} + \frac{a_1 a_2}{4} e^{i[\omega t + px'' - p(\xi + \eta)]} \right\} \\ + \left\{ \frac{a_1}{4} e^{i[\omega t - px'' - p(\xi + \eta)]} + \frac{a_1 a_2}{4} e^{i[\omega t - px'' + p(\xi + \eta)]} \right\} \\ + \left\{ \frac{a_1^2}{4} e^{i[\omega t + 2px'' + p(\xi + \eta)]} + \frac{a_1 a_3}{4} e^{i[\omega t + 2px'' - p(\xi + \eta)]} \right\} \\ + \left\{ \frac{a_1^2}{4} e^{i[\omega t - 2px'' - p(\xi + \eta)]} + \frac{a_1 a_3}{4} e^{i[\omega t - 2px'' + p(\xi + \eta)]} \right\} + \dots \quad (9)$$

式中各个括号内包含了传播方向相同的二束平面波的干涉叠加. 因此干涉叠加的光强, 可由式(6)中的 a_n 值代入求得. 本系统选择在 A 、 D 、 E 三个方向上接收其干涉拍光电信号, 可求得其光电流中的交流信号为

$$\left. \begin{aligned} \tilde{I}_A &= 2 \cdot \frac{a_1^2}{4} \cdot \frac{a_1^2}{4} \cos[2p(\xi + \eta)] \\ &= \frac{2}{\pi^4} \cos\left[\frac{4\pi}{g}(\xi + \eta)\right], \\ \tilde{I}_D - \tilde{I}_E &= 2 \cdot \frac{a_1^2}{4} \cdot \frac{a_1 a_3}{4} \cos[2p(\xi + \eta)] \\ &= \frac{2}{3\pi^4} \cos\left[\frac{4\pi}{g}(\xi + \eta) + \pi\right], \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由上式可见, \tilde{I}_D 和 \tilde{I}_E 是同相信号, 它们和 \tilde{I}_A 是相位差 π 的反相信号. 这样 $(\tilde{I}_D + \tilde{I}_E)$ 和 \tilde{I}_A 输入差动放大器, 就可得到消去直流分量的正弦信号.

为了辨别光栅移动的方向和信号的细分, 图 2 中的 $\lambda/4$ 波片和偏振分光镜 W 用来实现移相, 以获得多路相位差依次相差 90° 的信号. 其原理如图 3 所示, 六路信号组成 $\pm \sin$ 和 $\pm \cos$ 四种相位, 分别由 $E_{1\sim 3}$ 和 $E_{4\sim 6}$ 接收, 经差动放大后输入计数显示线路.

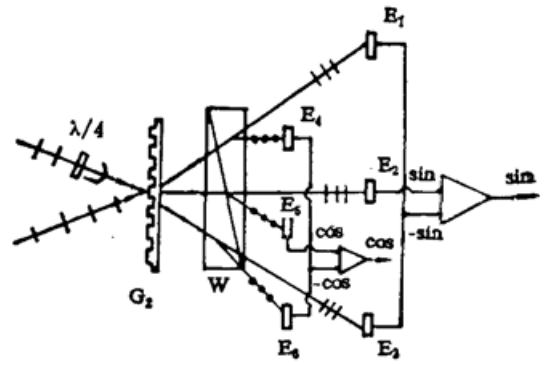


Fig. 3 Phase shifting principle

3 实验结果

本实验使用发射偏振光的氦-氖激光器, 功率小于 2 mW. 实验证明使用偏振光可以提高

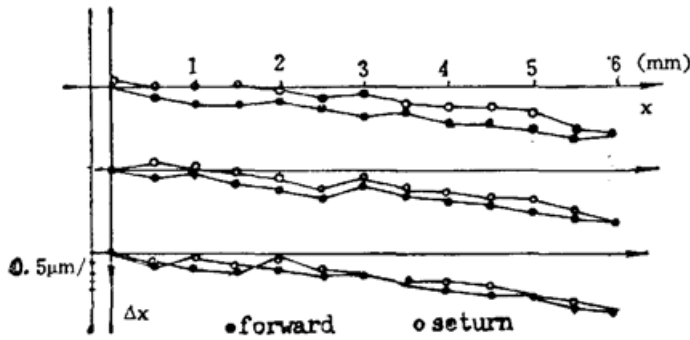


Fig. 4 Measurement result

o 光及 e 光分量的稳定性, 有利于提高测量精度; 位移测量使用常用的 50 line/mm 黑白振幅光栅进行, 能获得很好的信噪比. 精度比对实验以阿贝线纹比较仪为基准进行, 系统经 20 倍电子学细分后测量分辨力为 $0.5 \mu\text{m}$. 测量结果如图 4 所示, 6 mm 内正反多次测量, 重复性误差小于 $1.5 \mu\text{m}$; 使用黑白振幅光栅和矩形槽相位

光栅的实验比较表明, 相位光栅由于能使 ± 1 级衍射光有更高的光强, 可以获得更高的信噪比.

参 考 文 献

- [1] F. Hock, Berührungslose, Optisch-Photoelektrische Erfassung von Schnelle und Relativbewegungen an Oberflächen von hochbelasteten Arbeitsmaschinen; *Sonder-forschungsbereich 121*, Arbeits- und Ergebnisbericht; T. U. Hannover 1982
- [2] A. M. Tai, C. C. Aleksoff, *Appl. Opt.*, 1984, **23**(14): 2282
- [3] F. Hock, Photoelektrische Messung der Änderung von Längen oder Winkelposition mit Hilfe von Beugungsgittern, *Dissertation*, 1977, T. U. Stuttgart
- [4] L. E. Drain The Laser Doppler Technique, New York: John Wiley & Sons, 1980; 36~45
- [5] 蒋诚志, 陈材才, 侯丽健. 散射体激光多普勒效应光栅测量系统的研究. *仪器仪表学报* 1991, **12**(3): 258~264

Theoretical analysis and experimental result of a displacement measuring system using grating Doppler effect

JIANG CHENGZHI CHEN LINCAI XU KEXIN

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

(Received 17 June 1991; revised 14 October 1991)

Abstract

This paper discusses a new method for measuring displacement using grating Doppler effect. The measuring principle is analyzed theoretically. As a result, the measuring formula and the phase relationship between the received beat signals have been derived. The experimental results show that this system gives good signals with high signal-to-noise ratio and can be easily used in precision measurements.

Key words Doppler effect, diffraction grating, beat, transmissivity function.