

# 光栅横向位移遥测传感器\*

杨鑫 郭尚旗 张国雄 蒋诚志

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

**摘要** 介绍了一种光栅横向位移遥测传感器,被测位移和光束方向垂直。该系统利用激光光栅的多普勒效应进行测量,采用差动光路结构。理论计算和实验表明,此系统测量范围大、信号质量好、分辨率和测量精度高,并具有很大的景深范围,可应用于具体生产环境中的位移遥测。

**关键词** 光栅多普勒效应 景深 横向位移测量 遥测

## 1 概 述

近年来,国内外许多科研工作者致力于把激光测速技术用于位移测量。如西德物理技术研究院研制成功一种不接触在线测量长度的方法<sup>[1]</sup>,在1mm长度可给出818个脉冲(运动方向与光束夹角为75°),当夹角变小时脉冲数减少,夹角为零时不能工作,故计数当量不稳定造成使用不太方便。中国厦门华侨电子企业研究所用多普勒原理进行长度测量,测量范围为2mm~10m,最小显示值为1mm,精度为0.1%<sup>[2]</sup>。以上方法都是利用散射光进行不接触测量,被测运动和激光束接近于垂直,由于这一特性有别于干涉仪和激光测振仪,所以称之为“横向传感器”。对于一般的散射体,由于表面的散射光信号弱,信噪比低,以及由散射体表面纹理因素引起的信号波动,有时会出现信号淹没或信号不连续现象,影响测量精度。因此目前所能达到的分辨率都在10μm以上,影响了这种技术的推广应用,其根本原因是来自激光器、调制器、外界环境所带来的干扰的噪声。

本文介绍一种光栅横向位移遥测传感器。它是利用衍射光栅的多普勒效应进行测量,产生的多普勒信号与光波长无关,只决定于光栅常数,信号强、信噪比高、抗干扰能力强,使测量系统简化。另外由于光栅的周期性结构,产生的差拍信号是连续的正弦波,减轻了信号处理系统的负担,从而获得高分辨率,易于实现高精度位移遥测。由于信噪比的改善,实现了相位测量,

\* 国家自然科学基金资助项目(5937257)

收稿日期:1998-08-27

修稿日期:1998-10-29

检测距离 2m ~ 50m, 空间分辨率 0.4 $\mu$ m, 比通常的多普勒技术提高了 10 ~ 100 倍。在差动光学系统中引入声光调制器进行分光和频移以实现辨向。

## 2 测量原理

多普勒效应是指波源、接收器、传播介质或中间反射器之间的相对运动所引起的波频率变化, 其公式

$$f = f_0(1 + \frac{V \cos \theta}{u}) \quad (1)$$

其中:  $f_0$  为光源发出的光频率;  $f$  为接收器接收到的光频率;  $V$  为光源与接收器之间的相对运动速度, 相互移近时取 '+', 远离时取 '-';  $u$  为介质中的光速;  $\theta$  为光源与接收器的连线方向与速度方向的夹角。

若以光栅作为运动体, 如如图 1, 则各衍射主极大在  $\theta$  角方向的频移为:

$$\Delta f = f_k - f_0 = \frac{V(\sin i - \sin \theta)}{\lambda} \quad (2)$$

其中:  $i$  为平行光入射;  $\theta$  为衍射角;  $V$  为光栅运动速度;  $\lambda$  为光波长。

将光栅方程  $d(\sin i \pm \sin \theta) = k\lambda$  代入上式, 得到光栅多普勒公式:

$$\Delta f_k = \frac{kV}{d} \quad (3)$$

式中:  $k$  为衍射级次;  $d$  为光栅常数;  $\Delta f_k$  为第  $k$  级衍射主极大所对应的频移值。由公式 (3) 可以看出, 当光栅运动时, 其衍射光束的多普勒频移与入射角、入射光波长无关, 只与衍射级次、光栅运动速度以及栅距有关。其中零级衍射光无频移, 正负一级衍射光频移分别为  $\Delta f_1 = V/d$ ,  $\Delta f_{-1} = -V/d$ 。

对于反射光栅, 具有如下性质:

(1) 零级衍射光在反射方向, 且多普勒频移为零, 见图 2(A);

(2) 光线垂直入射时,  $\pm 1$  级衍射光分居法线两侧, 且与法线夹角相同, 均为  $\theta$ , 见图 2(B);

(3) 若光线从 2(B) 中 -1 级方向入射, 则垂直光栅面方向是 +1 级衍射光, 频移为:  $\Delta f_1 = V/d$ , 零级在反射方向; 反之, 从 2(B) 中 +1 级方向入射, 则垂直光栅面方向是 -1 级衍射光,

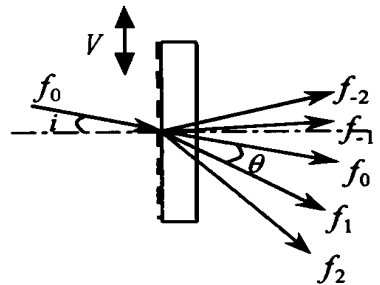


Fig. 1 Grating Doppler effect

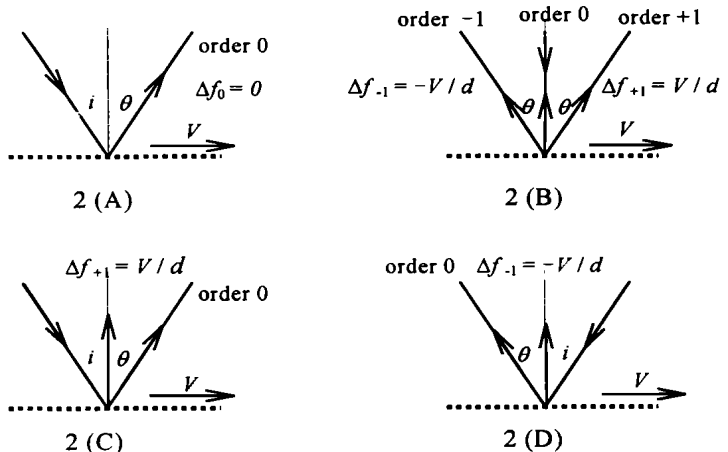


Fig. 2 Frequency shift character of reflection grating

频移为:  $\Delta f_{-1} = -V/d$ , 见图 2(C), 2(D)。

当两束光分别从图 2(C) 和(D) 所示方向入射, 适当调整光学元件, 使参加混频差拍的(C) 中的衍射+ 1 级主极大与(D) 中的衍射- 1 级主极大重合, 并沿光轴方向返回, 则两束衍射光混频后的频差为:

$$\Delta f = \frac{V}{d} - \left(-\frac{V}{d}\right) = \frac{2V}{d} \quad (4)$$

对这一拍频信号的脉冲累积记数, 得到光栅位移  $x$  :

$$N = \int_0^t \Delta f(t) dt = \frac{2}{d} \int_0^t V(t) dt = \frac{2x}{d} \quad (5)$$

$$x = \frac{Nd}{2} \quad (6)$$

公式(6) 给出了利用运动光栅的多普勒效应进行横向位移测量的理论依据。关于位移方向的鉴别, 是通过预制频移的方法实现的。本系统采用声光调制器来达到分光 and 预制频移的目的, 同时也可以有效地抑制光反馈。当激光束入射到声光器件上就如同入射到运动的相位光栅上一样, 发生声光衍射, 同时产生频移。当以布喇格角入射时, 衍射光束将只集中于无频移的 0 级和频移为  $\Omega$  的 1 级衍射光, 二者之间存在着恒定的频差  $\Omega$  ( $\Omega$  为超声波的频率)。

### 3 光栅横向位移遥测传感器结构

#### 3.1 光学系统

图 3 为光栅横向位移遥测传感器光学系统。

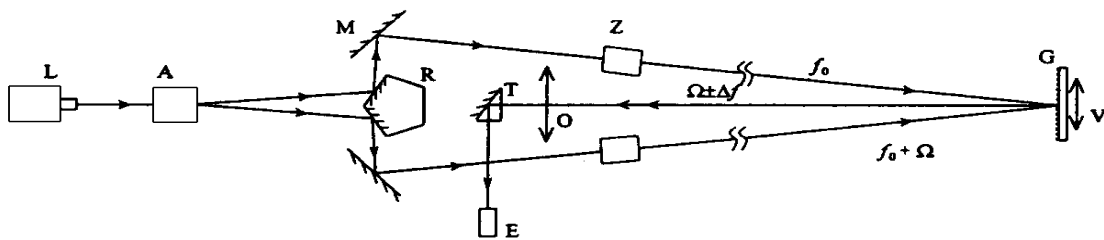


Fig. 3 Optical system of the transducer for lateral remote displacement measurement

来自激光器 L 的频率为  $f_0$  的光束经声光调制器 A 预制频移后分为频率为  $f_0$  和  $f_0 + \Omega$  的两束光, 由于声光器件的分束角很小, 再利用棱镜 R 和平面镜 M 组合(对测量距离较近的系统如 6m, 采用负透镜和大口径成像透镜组合) 进一步分光, 通过准直系统 Z 将测量光束准直会聚于运动光栅 G 上, 产生光栅多普勒信号, 取衍射光栅的+ 1 级衍射主极大和- 1 级衍射主极大进行混频差拍, 并沿光轴方向返回。返回的光束频率为  $\Omega \pm \Delta f$ , 经透镜 O 和直角棱镜 T 缩小折光会聚在光电接收器 E 上。准直系统的应用是为了减少远距离测量中光束的扩散。

由于横向位移遥测传感器采用的是差动光路结构, 则在远距离位移遥测中光束的漂移、附加振动等外界干扰信号带来的影响被有效地消除, 大大改善了信噪比。

#### 3.2 信号处理系统

光电接收器接收到的频率为  $\Omega \pm \Delta f$  的光信号经光电转换后分为两路, 分别与来自声光

驱动电源且相位相差  $\pi/2$  的振荡信号混频, 消去  $\Omega$ , 并经低通滤波放大, 滤去高频干扰信号并输出两路幅值相同、相位相差  $\pi/2$ 、带有多普勒频移  $\Delta f$  的信号。其中一路反相, 得到三路位相差依次为  $\pi/2$  的正弦信号, 再经细分辨向, 通过与微机接口的可逆计数器, 输入到计算机中在程序控制下进行数据处理, 显示打印结果。

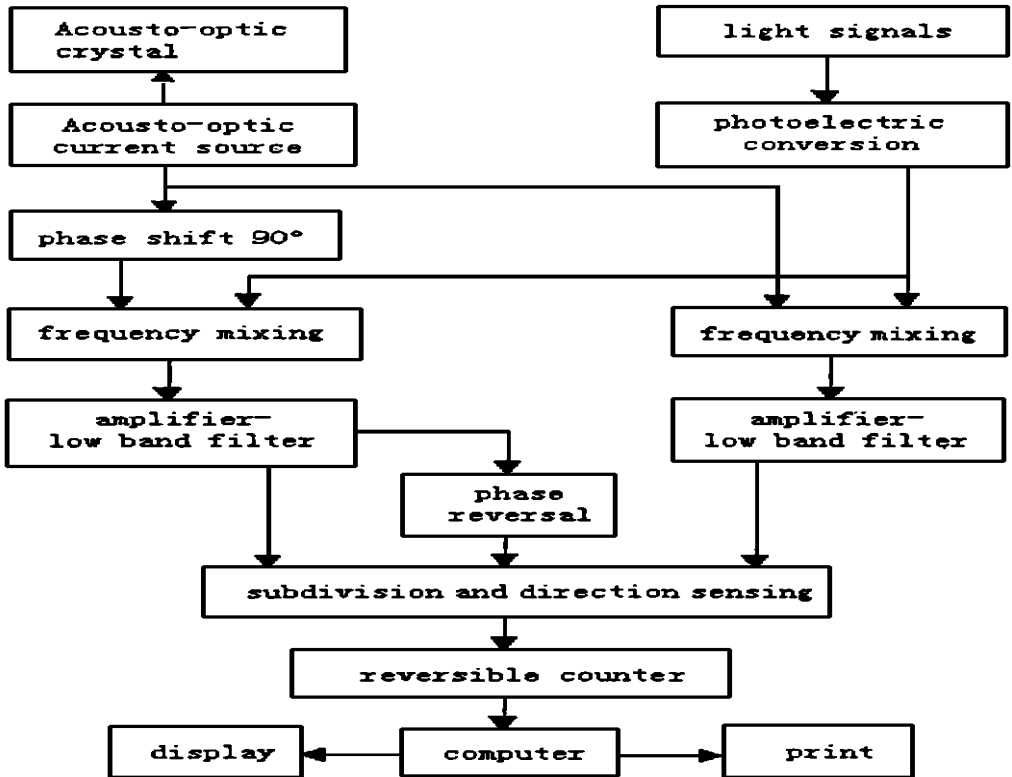


Fig. 4 Signal processing system

## 4 实验研究

### 4.1 精度比对实验

为了对系统的测量精度作出估计, 采用分辨率为  $1\mu\text{m}$  的光栅数显表进行比对实验。比有时使数显表测杆与被测物(光栅)运动方向在同一条直线上, 以减小阿贝误差的影响。被测光栅运动时, 数显表显示其位移量, 同时计算机拾取计数脉冲, 处理后显示打印结果, 经比对得出测量误差如图 5 所示:

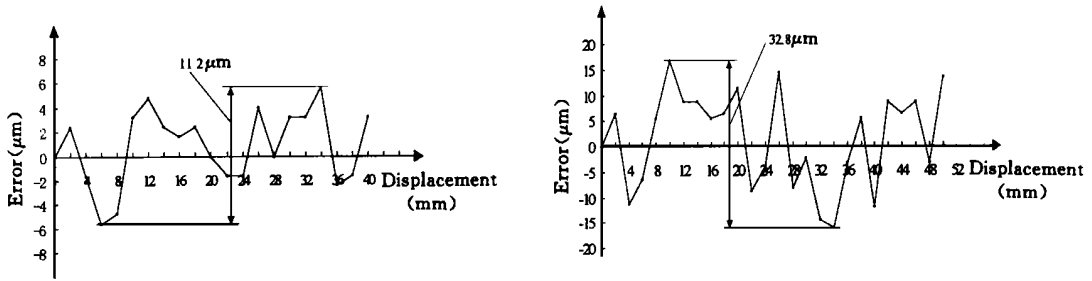


Fig. 5 Experiment results

## 4.2 焦深范围实验

两束测量光束由于光强并不完全相等,加之光学元件象差的影响,在远距离测量中很难保证光束准确重合到光栅面上;另外在光栅横向运动过程中运动方向与光栅面若存在夹角也会出现轴向偏离。而本系统的焦深范围很大,即对运动体在相交点前后离焦不敏感,这使得对准目标十分容易;另外,光栅面与运动方向的夹角(即倾斜)在运动过程造成的离焦也成为不敏感的因素。因此在测量的焦深范围内也不影响系统的测量准确性。

图 6 为针对不同光路结构的焦深范围实验结果:

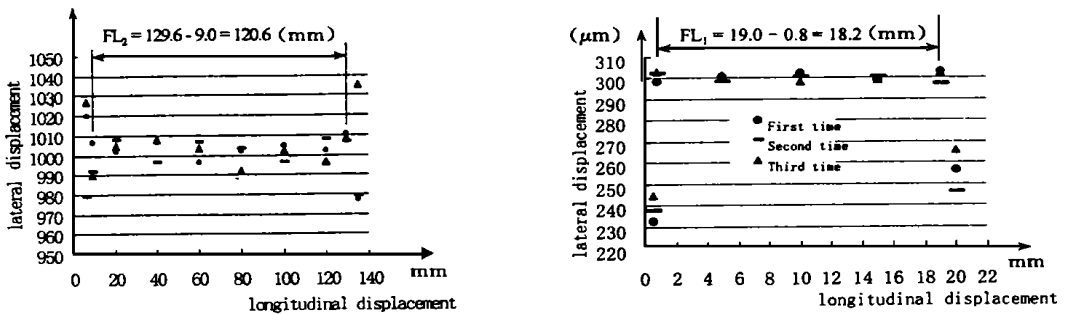


Fig. 6 Experiment results of focal depth

图中横坐标表示光栅的纵向位移,即光栅沿光轴方向的位移(在每一个位置测三次光栅的横向位移);纵坐标表示光栅的横向位移,即光栅沿垂直光轴方向的位移(图 6(a)中光栅每次移动  $1000\mu\text{m}$ ,图 6(b)中光栅每次移动  $300\mu\text{m}$ ):  $FL_1, FL_2$  分别为其焦深范围。

对不同分光形式的光路结构,作者理论推导得到的公式为:

(1) 负透镜和大口径成像透镜组合: 激光束发散角  $\omega = 1.3 \times 10^{-3} \text{ rad}$ ; 衍射角  $\text{tg}\theta = 0.02$ ; 激光波长  $\lambda = 0.6328 \times 10^{-3} \text{ mm}$ ; 负透镜角放大率  $\times$  成像透镜放大率  $r_1 r_2 = 2.6$

$$\text{景深 } 2D = \frac{2\lambda}{\text{tg}\theta \cdot r_1 \cdot r_2} = \frac{2 \times 0.6328 \times 10^{-3}}{0.02 \times 1.3 \times 10^{-3} \times 2.6} = 18.7(\text{mm})$$

(2) 棱镜和平面镜组合: 激光束发散角  $\omega = 1.3 \times 10^{-3} \text{ rad}$ ; 衍射角  $\text{tg}\theta = 0.02$ ; 激光波长  $\lambda = 0.6328 \times 10^{-3} \text{ mm}$ ; 准直系统(倒置望远镜系统)视角放大率  $\Gamma = 2.5$

$$\text{景深 } 2D = \frac{2\lambda \cdot \Gamma}{\omega \cdot \text{tg}\theta} = \frac{2 \times 0.6328 \times 10^{-3} \times 2.5}{1.3 \times 10^{-3} \times 0.02} = 121.7(\text{mm})$$

以上实验结果表明,本横向位移遥测传感器具有很高的测量精度,且重复性很好。通过对焦深的实验及与理论推导值的比较,可以看出系统具有很大的焦深范围,使得在位移遥测中对

运动体在相交点前后的离焦以及光栅面与运动方向的夹角(即倾斜)在运动过程中造成的离焦不敏感, 十分容易对准目标, 且不影响系统的测量精度。

## 5 结 束 语

利用光栅的多普勒效应进行横向位移遥测, 具有较高的分辨力和测量精度, 有很大的实用性, 尤其可用于远距离精度测量中。如果进一步开拓一般散射体的多普勒测量, 还可实现桥梁、建筑物等的变形遥测, 有广阔的发展前景。

### 参 考 文 献

- 1 方仲彦译. 不接触测量材料长度的方法. 仪表工业, 1987, (5): 5
- 2 刘长润. 激光多普勒测长. 激光杂志, 1991, 12(3): 128 ~ 131
- 3 Tai A M, Aleksoff C C. Appl Opt, 1984, 23(14): 2282
- 4 Drain L E. The laser Doppler technique. New York: John Wiley, 1980: 36 ~ 45

## A Transducer for Lateral Remote Displacement Measurement Based on Grating Laser Doppler Effect

YANG Xin, GUO Shang-Qi, ZHANG Guo-Xiong, JIANG Cheng-Zhi  
(Precision Instruments and Optoelectronic Engineering Institute,  
Tianjin University, Tianjin 3000721)

### Abstract

A transducer for lateral remote displacement measurement based on grating laser Doppler effect is introduced. The direction of movement is allowed to be perpendicular to the bisector laser beams. The measuring principle of this system is based on grating Doppler effect. A differential optical structure is accepted. The results of experiments and theoretical analysis show that this system gives wide measurement range, high quality signals with high resolution and accuracy, and wide range of focal depth. All of these make it very useful in the practice.

**Key words:** Grating Doppler effect, Focal depth, Lateral displacement measurement, Remote measurement

杨 鑫 女, 1972年生, 博士研究生。