

# 光 纤 速 度 干 涉 仪

谭 深 王世瑛 宗琴香

(国防科技大学应用物理系)

谢 新 军

(湘潭大学物理系)

## 提 要

本文提出了一种用光纤作为延迟臂的新型速度干涉仪——光纤速度干涉仪,用以测量速度随时间的变化。选取不同长度的光纤,可测不同的速度范围。它扩展了测速范围,提高了测量精度。该系统提供两个相位差为 $90^\circ$ 的信号,因而提高了分辨率,并可鉴别加速与减速。

关键词: 速度干涉仪, 光纤传感器, 光纤速度干涉仪。

## 一、引 言

一般的激光 Doppler 测速仪只能测量物体通过光斑瞬时的速度。为了跟踪物体速度随时间的变化,大多采用干涉测量术。

1965年, L. M. Barker 首次报导了利用 michelson 位移干涉仪的激波激光测量工作<sup>[1]</sup>。此干涉仪中条纹计数与物体的位移成正比,条纹频率与速度大小成正比。故当速度大于 200 m/s 时,由于条纹频率过高而受到接收装置频率响应的限制。为降低接收频率,随后出现了 Sandia 速度干涉仪<sup>[2]</sup>和任意反射表面的速度干涉仪——VISAR<sup>[3]</sup>。这两种干涉仪其干涉条纹变化的讯号是反映了速度的变化的,但它们只适用于速度大于 100 m/s 的情况。由于它们均是采用反射镜、标准具等的组合,使光路折迭而达延迟的目的,故当用来测量低速时,为保证一定的精度,必须把延迟臂拉得很长,才能得到几个条纹计数。这样光路结构复杂,调节困难。

我们研制的光纤速度干涉仪,它采用光纤作为延迟臂,大大扩展了测速范围,简化了光路结构,并可提高测量精度。

## 二、光纤速度干涉仪

### 1. 基本原理

图 1 为光纤速度干涉仪系统,从被测物体反射的并带有 Doppler 频移的光,经分束器后,由物镜聚焦耦合到光纤;在光纤前端面反射的非延迟光束与经光纤后端面反射的延迟光束再重新混合,产生干涉条纹,条纹信号由光电倍增管接收,用示波器观察或先用磁带机实

时记录条纹信号波形,再用信号处理机进行处理。

若光纤长为  $l$ ,从后端面反射光相对于前端面反射光延迟时间为  $\tau = \frac{2n_1l}{c}$ ,  $n_1$  为光纤芯轴折射率(这一点下面要仔细讨论)。当待测物体作等速运动时,在光电倍增管上形成稳定的干涉条纹图形,无信号可接收。当物体速度变化时,由物体表面反射光的频率由于 Doppler 效应而变化,这时在接收处两相干光束的相位变化,从而干涉条纹发生变化,这一变化的信号反映了速度的变化,因而可由之得出速度的变化量 Doppler 频移与速度的关系为

$$f_D = \frac{2}{\lambda_0} v_0 \quad (1)$$

若物体的位移可不考虑,则在  $t$  时刻,二光束的相位差  $\Delta\phi$  为

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= k_0 n_1 2l = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 2l = \frac{2\pi}{c} (f_0 + f_D) n_1 2l, \\ \Delta\phi &= \frac{4\pi n_1 l}{c} \left[ f_0 + \frac{2v}{\lambda_0} \right], \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $\lambda_0$ 、 $f_0$  为光源输出光的波长与频率。 $\lambda$  为运动物体反射光的波长。若测量时间很短,  $f_0$  的漂移很小,可忽略其变化。若测量时间内,  $f_0$  的漂移不能不考虑时,可采用稳频技术从而使  $f_0$  保持不变,则有

$$\frac{d\phi}{dv} = \frac{8\pi n_1 l}{c\lambda_0} \quad (3)$$

从  $0 \rightarrow t$  时间内总的相位变化为

$$\phi = \int_{0 \rightarrow t} \frac{8\pi n_1 l}{c\lambda_0} dv = \frac{8\pi n_1 l}{c\lambda_0} [v(t) - v(0)]。$$

当  $v(0) = 0$  时,就有

$$\phi = \frac{8\pi n_1 l}{c\lambda_0} v(t)。 \quad (4)$$

又因  $\phi = 2\pi N(t)$ ,  $N(t)$  是  $0 \rightarrow t$  时间条纹变化数,故(4)式可表示为

$$N(t) = \frac{4n_1 l}{c\lambda_0} v(t), \quad (5)$$

也就是

$$v(t) = \frac{c\lambda_0}{4n_1 l} N(t)。$$

若用延迟时间表示

$$v(t) = \frac{\lambda_0}{2\tau} N(t), \quad (6)$$

故测出  $N(t)$  就可知道物体的速度  $v(t)$  了。

## 2. 光纤的选择

本干涉仪是以光纤为延迟臂,由之获得速度信息的,与普通速度干涉仪相比,增加了光

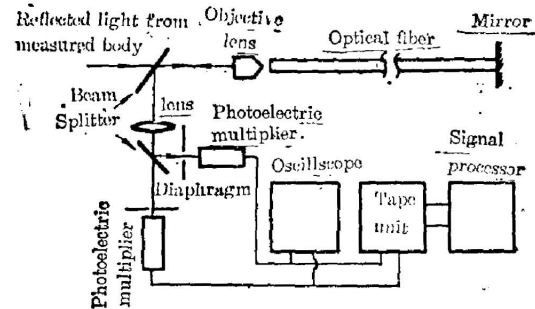


Fig. 1 The system of optical fiber velocity interferometer

损耗与多模的影响问题。光损耗直接影响信号的强度,在现有条件下,从提高光纤对光能的耦合效率来提高信号的强度。多模影响的问题,根据光纤理论,不同模式一般是有不同传播常数  $\beta_{mn}$  的,这就是模间色散,传播常数就是每单位长度的相移,所以不同模式的  $\Delta\phi_{mn}$  与延迟时间  $\tau_{mn}$  是不相同的,这样就使干涉条纹紊乱,而不能得到正确结果。多模光纤在光能耦合效率上是可以的,但必须要求不同模式的  $\beta_{mn}$  相同或差别很小。这一点阶跃型折射率光纤是作不到的,而渐变型折射率光纤中,当  $n(r)$  为抛物线型时,模间色散很小<sup>[4]</sup>。不同模式的  $\beta_{mn}$  的差别也小,而且光纤内传播模式越少(愈细)时,  $\beta_{mn}$  就越接近  $k_0 n(0)$ 。实际光纤模间色散总是存在的,理论分析指出<sup>[5]</sup>,在抛物线型折射率光纤中,最长和最短光程之间每单位长度的群延时差为

$$\Delta\tau = \frac{n(0)}{c} \left[ \frac{(1-\Delta)^{3/2}}{(1-\Delta)^{1/2}} - 1 \right]. \quad (7)$$

我们所使用的抛物线型折射率光纤(有称为自聚焦光纤)的参数为:芯直径  $(2a) = 50 \mu\text{m}$ , 长  $l = 51 \text{m}$ ,  $n(0) = n_1 = 1.4705$ ,  $n(a) = 1.457$ ,  $\Delta = \frac{n_1 - n(a)}{n_1} = 1\%$ , 则  $\Delta\tau \approx 0.75 \text{m}\mu\text{s}/\text{km}$ 。而每单位长度延时  $\frac{\tau}{2l}$  就用  $\frac{n_1}{c}$  来计算的话,其值为

$$\frac{\tau}{2l} = \frac{n_1}{c} \approx 5 \times 10^{-6} \text{s}/\text{km}.$$

则最大相对误差为

$$\Delta\tau / \frac{\tau}{2l} \approx 1.5 \times 10^{-4}.$$

可见误差是很小的,故可令  $\tau = \frac{2n_1 l}{c}$ ,  $\beta = \frac{2n}{\lambda_0} n_1$ 。前面所用  $\Delta\phi = k_0 n_1 2l$  就是这样来的。同时,又对光斑质量进行观察,发现它比阶跃型折射率光纤的光斑质量好,这与理论也是符合的,综合考虑后决定采用自聚焦光纤,

### 3. 加速与减速的鉴别

在干涉仪中,只记录一个信号或相位差为  $180^\circ$  的两个信号时,在光强最大或最小时,输出光强的可鉴别变化并不伴随条纹的微小变化,若用分束器将输出光分为两个光强相等的光束,然后用两个小孔光栏分别选择同一个条纹,并由两个光电倍增管接收,用示波器观察利萨如图形,通过调整光栏的位置以获得两个相位差  $90^\circ$  的信号,由这两个信号就可解决上述问题,因为一个或另一个总是处在良好的分辨率范围内。同时由两个信号的相位关系可鉴别加速与减速。加速时,一个信号超前另一个  $90^\circ$ ,减速时,它落后于另一个  $90^\circ$ 。利用两个信号的利萨如图还可提高测量精度。对应一个条纹变化时,光点在示波器上扫过一圈,若两个信号分别由  $x = A \cos \theta$  与  $y = B \sin \theta$  表示,则  $\theta = \arctg \left( \frac{y}{x} \frac{A}{B} \right)$ 。故一个条纹对应  $\theta = 360^\circ$ 。相位角变化  $\theta$  度时,速度大小为  $\Delta v = \frac{\lambda_0}{2\tau} \frac{\theta}{360}$ ,而  $\theta$  可精确到  $10^\circ$ ,条纹变化数就可精确到  $\frac{1}{36}$  个。用信号处理机后还可提高。

## 三、模拟实验

通过给稳频 He-Ne 激光管的压电陶瓷加调制电压,改变输出光束的频率来模拟速度的

变化, 频率变化( $\Delta\nu$ )与模拟速度之间的关系为  $\Delta\nu = \frac{2}{\lambda_0} v_0$ 。

### 1. 实验中仪器及相应参数

自聚焦光纤  $2a = 50 \mu\text{m}$ ,  $n(0) = 1.4705$ , 长  $l$ , 光源腔长  $L = 17.0 \text{ cm}$ , 变化一个模式的电压  $V_0$  为  $90 \text{ V}$ 。调制电压频率为  $310 \text{ Hz}$ 。

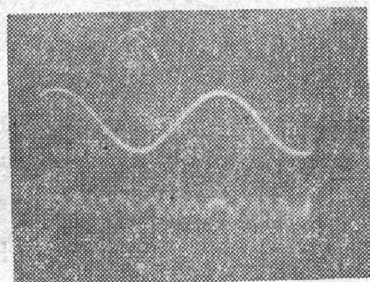


Fig. 2 The wave shapes of modulation voltage and one signal

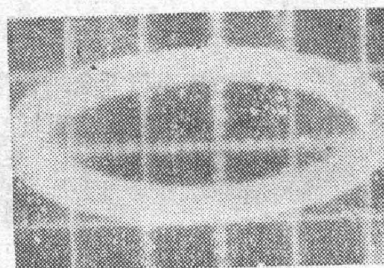


Fig. 3 Lissajou's figure

### 2. 实验结果

图 2 所示为调制电压与一个信号的波形, 图 3 为观察到的利萨如图形, 图 4 为相位差  $90^\circ$  的两个信号, 其中平坦部分的中点为压电陶瓷的回头点, 因压电陶瓷伸长或缩短时, 相应于输出光频率的增高或降低, 即在回头点两侧频率变化方向相反, 对应于模拟速度的增加或减小。从图 4 中可以看出: 在左边上一个信号滞后下一个信号  $90^\circ$ , 而在右边则相反。

对不同的调制电压  $V$  所对应的频率变化为  $\Delta\nu = \frac{c/2L}{90} V$ , 模拟速度为  $v_{\text{模拟}} = \frac{\lambda_0}{2} \Delta\nu$ 。而根据所测条纹变化数  $N$  可得  $v_{\text{测}}$ , 两者比较见表 1:

由表 1 可看出  $v_{\text{模拟}}$  与  $v_{\text{测}}$  基本符合, 其误差来源于  $U$  的测量与条纹数的精度, 特别是后者影响较大。

模拟结果说明本文思想的正确, 并可得出指定光纤中变化一个条纹对应的速度变化, 为该干涉仪定标。

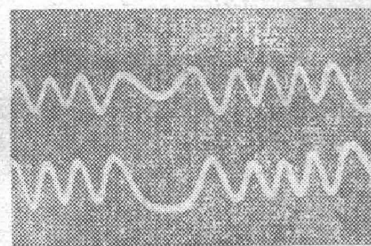


Fig. 4 Two signals (the phase difference between them is  $90^\circ$ )

Table 1. The comparison of analog velocity and measurement velocity at different voltage

$U$ (V)	$v_a$ (m/s)	$N$	$v_m$ (m/s)
110.0	341	8.9	339
80.0	248	6.5	248
60.0	186	4.8	183
40.0	124	3.2	122

### 四、扬声器振动速度的测量

用本文所说的光纤速度干涉仪对长沙电声器材厂生产的湘江牌 5 W、10 吋、8 Ω 电动扬声器作了其振动速度的测量。实验中将 XFK-1 型宽频带信号发生器与 10 W 扩音机联接来驱动扬声器，构成待测运动物体。所用光纤参数为  $2a=50 \mu\text{m}$ 、 $l=51 \text{ m}$ 、 $n_1=1.4705$  一个条纹对应的速度变化就是  $\frac{\lambda_0}{2\tau}$ ，其值为 0.63 m/s。因而  $v(t) = \frac{\lambda_0}{2\tau} N(t) = \frac{\lambda_0}{2\tau} \frac{\theta(t)}{360} = \frac{0.63}{360} \theta(t) \text{ m/s}$ 。由  $v(t)$  可算知扬声器纸盆的位移。各数据见下：

表 2 为 530 Hz 的调制电压取不同幅度时，扬声器纸盆对应的峰值振动速度。这种不大于 2 m/s 的速度，精度可达 2%。图 5 表示峰值调制电压幅度的变化关系。随着电压幅度的增大，峰值速度的增大渐减慢。这是由于当电压小时，扬声器的音圈全部处于永久磁铁的磁场中，纸盆的阻尼也小，当电压增大时，音圈就有一部分处在永久磁铁之外了，纸盆阻尼也增大，从而使纸盆的振动力减小，这就出现图中情况。

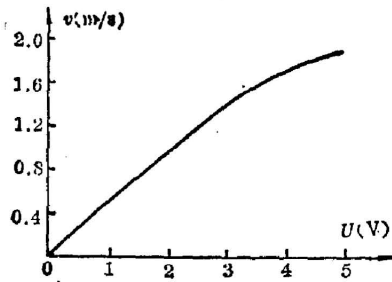


Fig. 5 Velocity as a function of voltage

由图 6 可见驱动信号频率为 530 Hz 时，速度  $v$  与电压  $U$  同相位，位移则比速度滞后  $90^\circ$ 。但  $v$  与  $U$  的这种相位关系随信号频率不同而有所变化，这是因为扬声器是一个电感性负载与一个电阻负载的串联，故相位关系与频率有关。

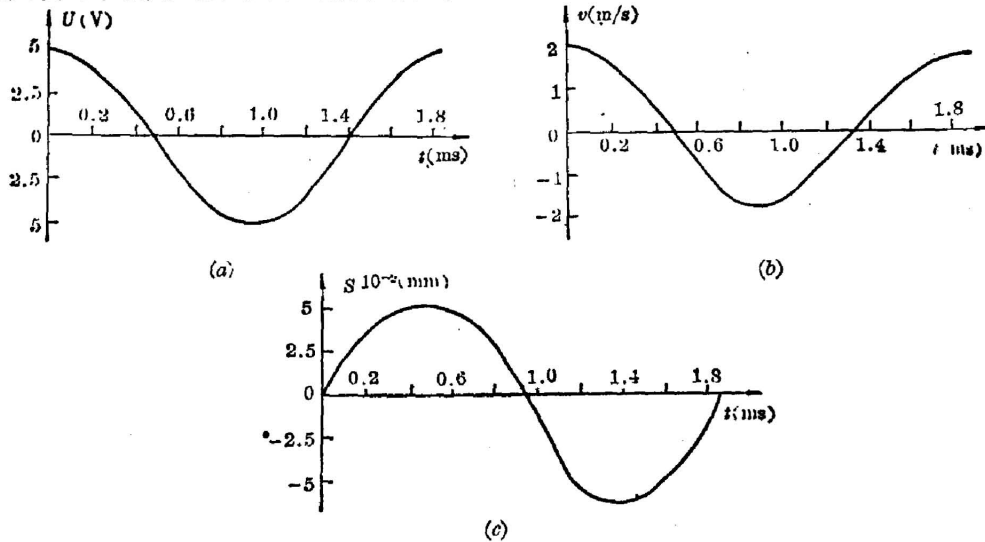


Fig. 6 Voltage, velocity, displacement as a function of time (530 Hz)

Table 2 Velocity at different voltage (530 Hz)

$U(\text{V})$	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
$v(\text{m/s})$	0.49	0.93	1.41	1.63	1.84

我们对扬声器的频率特性作了测量如图 7。驱动信号幅度为 5 V。速度因信号频率而变的关系说明扬声器振动灵敏度的最高度在 530 Hz 附近, 这与扬声器传统的消声室法测得结论一致。

上述振动速度、位移随时间、频率的变化曲线可为扬声器的非线性失真等特性分析提供定量的依据。

光纤速度干涉仪不仅测过范围广, 分辨率及精度高, 还有结构简单、调节方便等优点, 且可用于碰撞及飞靶等漫反射表面速度的测量。

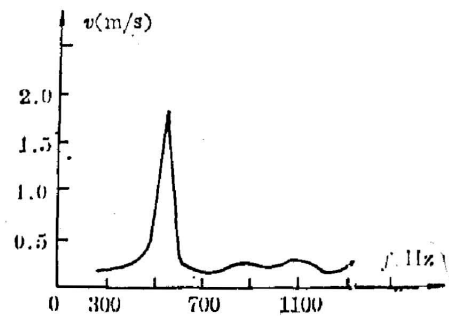


Fig. 7

### 参 考 文 献

- [1] L. M. Barker, R. E. Hollenbach; *Rev. Sci. Instr.*, 1965, **36**, No. 11 (Nov), 1617.
- [2] L. M. Barker, B. M. Butcher *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1966, **37**, No. 5 (Apr), 1989.
- [3] L. M. Barker, R. E. Hollenbach; *J. Appl. Phys.*, 1972, **43**, No. 12 (Nov), 4669.
- [4] 叶培大等;《光波导技术基本理论》, (人民邮电出版社, 北京, 1981), 第四章。
- [5] 兰信钜, 黄国标等;《激光技术》, (湖南科学出版社, 1981), 第八章。

## Optical fiber velocity interferometer

TAN SHEN, WANG SHIYING AND SONG QINXIANG

(Department of Applied Physics, National Defence University of Technology)

XIE XINJUN

(Department of Physics, Xiang Tan University)

(Received 5 November 1986; revised 28 November 1986)

### Abstract

In this paper we report a new type of velocity interferometer, optical fiber velocity interferometer, which uses optical fiber as the delay arm. It can be used more conveniently and accurately to measure velocities in different ranges varying in time by choosing different lengths of optical fiber according to the range of velocity and required measurement accuracy. This system provides two signals with phase difference of  $90^\circ$ , therefore, it gives higher resolving power and can distinguish acceleration or deceleration.

**Key Words:** velocity interferometer, optical sensor; optical fiber velocity interferometer.