

文章编号: 1001-1455(2005)05-0457-04

# 激光干涉测速中信号光纤的模式色散 对速度测量的影响\*

李泽仁

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 详细分析了测量任意反射面的激光干涉测速系统(VISAR)中信号光纤的模式色散对速度测量的影响,建立了数学分析模型,数值模拟了色散对比度因子与测速系统所使用的条纹常数和被测速度增量之间的关系。研究表明:(1)测速时使用的条纹常数越大,信号光纤模式色散的影响越小;(2)被测速度越大,信号光纤模式色散的影响越大;(3)阶跃折射率光纤的色散影响比剃度折射率光纤大得多。通过本项研究,给出了减小信号光纤模式色散的有效措施,对提高 VISAR 的干涉图对比度及测试精确度具有重要作用。

**关键词:** 爆炸力学;模式色散;理论分析;信号光纤;激光干涉测速

**中图分类号:** O384      **国标学科代码:** 130·35      **文献标志码:** A

## 1 引 言

在激光干涉测速中,使用输入光纤将激光器输出的激光传输到实验装置中的被测点,而包含速度信息的漫反射激光则由信号光纤传输到干涉仪中进行干涉与检测。使用光纤传输输入射激光和反射激光的优点在于克服了受空气扰动的影响、传输路径灵活可变和不受实验条件的限制<sup>[1]</sup>。在使用光纤传输激光的过程中,输入光纤只起传输激光能量的作用,而信号光纤既传输激光能量又传输速度信息,其模式色散将对速度测量产生影响,因此,研究信号光纤模式色散与速度参量之间的关系具有重要意义。

本文中将从理论上深入研究信号光纤的模式色散对速度测量的影响,并给出速度测量中减小这一影响的方法。

## 2 理论分析模型

在激光干涉测速中,当输入光纤将激光传输到实验装置后,光纤探头将从输入光纤射出的激光成像到被测点,而被测点的漫反射激光同样由光纤探头收集,且成像到信号光纤的输入端面上,如图 1 所示。设该被测点的运动速度为  $u(t)$ ,根据 Doppler 效应,则光纤探头收集的漫反射激光的频率

$$f(t) = f_0 \left[ 1 + \frac{u(t)(1 + \cos\theta)}{c} \right] \quad (1)$$

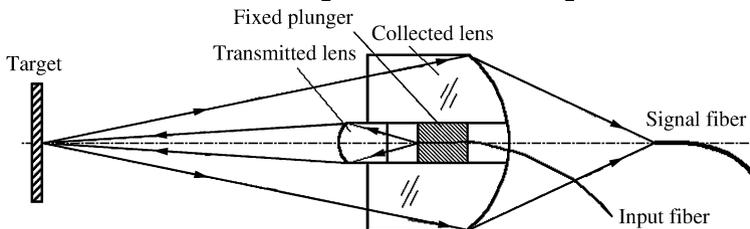


图 1 光纤探头传输与收集激光的示意图

Fig. 1 Schematic of laser transmitted and collected by fiber probe

\* 收稿日期: 2004-11-12; 修回日期: 2005-04-29

作者简介: 李泽仁(1961—),男,博士,研究员,博士生导师。

式中:  $f_0$  是激光原始频率,  $c$  是真空中光速,  $\theta$  是漫反射激光与光纤探头中收集透镜的光轴的夹角。

由于入射到靶上的激光与光轴的夹角非常小, (1) 式中忽略其影响。为了使进入信号光纤的反射激光的频率是唯一的, 通常  $\theta \leq 5^\circ$ , 即  $\cos\theta \approx 1$ , 则有

$$f(t) = f_0 \left[ 1 + \frac{2u(t)}{c} \right] \quad (2)$$

当不考虑信号光纤的模式色散, 即假定进入信号光纤中传输的激光在光纤中所走的光程相等, 则同一时刻从信号光纤射出的激光频率相同, 同为  $f(t)$ , 干涉仪产生的干涉图的强度

$$I(t) = I_0 [1 + A \cos(4\pi\tau u(t)/\lambda_0 + \phi_0)] \quad (3)$$

式中:  $I_0$  是参与干涉的光束的光强,  $A$  是振幅,  $\phi_0$  是干涉图的初位相。即  $u(t) = 0$  时干涉图的位相, 而  $\tau$  是干涉仪中延迟支路与直接支路之间光程的相对延迟时间, 是干涉仪的系统常数。

当考虑信号光纤的模式色散时, 如图 2 所示, 虽然进入信号光纤的漫反射激光的频率都相同, 但由于不同入射角的光线在光纤中传播的路程不同, 同一时刻从信号光纤射出并进入干涉腔的漫反射激光的频率不同, 为  $f(t-\tau') \sim f(t)$ , 携带的速度信息为  $u(t-\tau'-\tau/2) \sim u(t-\tau/2)$ 。因此, 干涉图不再同相位, 其强度

$$I(t) = \int_0^\infty I'(t) du = \int_0^\infty I'_0 \left\{ 1 + A \cos \left[ \frac{4\pi\tau u(t)}{\lambda_0} + \phi_0 \right] \right\} du \quad (4)$$

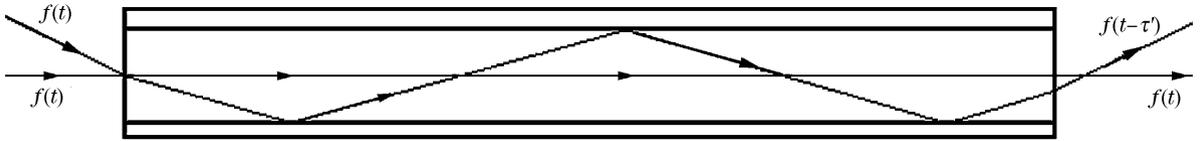


图 2 漫反射激光在信号光纤中的模式色散示意图

Fig. 2 Schematic of the modal dispersion of diffused laser in the signal fiber

设从信号光纤射出的激光强度在  $u(t) \sim u(t) + \Delta u(\tau_m)$  内均匀分布, 即有

$$I'_0 = \begin{cases} I_0/\Delta u(\tau_m) & u(t) - \Delta u(\tau_m)/2 \leq u \leq u(t) + \Delta u(\tau_m)/2 \\ 0 & u < u(t) - \Delta u(\tau_m)/2 \quad \text{or} \quad u > u(t) + \Delta u(\tau_m)/2 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\tau_m$  为信号光纤的模式色散时间。将(5)式代入(4)式, 得

$$I(t) = I_0 \left\{ 1 + \frac{A \sin(2\pi\tau\Delta u(\tau_m)/\lambda_0)}{2\pi\tau\Delta u(\tau_m)/\lambda_0} \cos \left[ \frac{4\pi\tau u(t)}{\lambda_0} + \phi_0 \right] \right\} \quad (6)$$

干涉对比度

$$\Gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = A \left| \frac{\sin(2\pi\tau\Delta u(\tau_m)/\lambda_0)}{2\pi\tau\Delta u(\tau_m)/\lambda_0} \right| = \Gamma_1 \Gamma_2 \quad (7)$$

式中:  $\Gamma_1$  是没有考虑信号光纤的色散时理想干涉图的对比度,  $\Gamma_1 = A$ ;  $\Gamma_2$  是信号光纤的色散引起的干涉对比度的下降, 定义为色散对比度因子

$$\Gamma_2 = \left| \frac{\sin(2\pi\tau\Delta u(\tau_m)/\lambda_0)}{2\pi\tau\Delta u(\tau_m)/\lambda_0} \right| = \left| \frac{\sin(\pi\Delta u(\tau_m)/k_f)}{\pi\Delta u(\tau_m)/k_f} \right| \quad (8)$$

式中:  $\lambda_0$  是激光的波长,  $k_f$  是干涉系统的条纹常数。(8)式表明, 当考虑信号光纤的模式色散时, 干涉图的对比度不但与被测速度有关, 而且与测速时使用的条纹常数有关。

### 3 数值模拟与分析

#### 3.1 色散对比度因子与被测速度的关系

使用(8)式, 模拟计算了  $\Gamma_2$  与速度差  $\Delta u(\tau_m)$  和系统条纹常数的关系, 如图 3 所示。由此可得到如下结果: (1) 测速时, 信号光纤的色散影响程度与使用的条纹常数有关; (2) 色散影响程度与激光干涉测速系统的响应带宽有关。

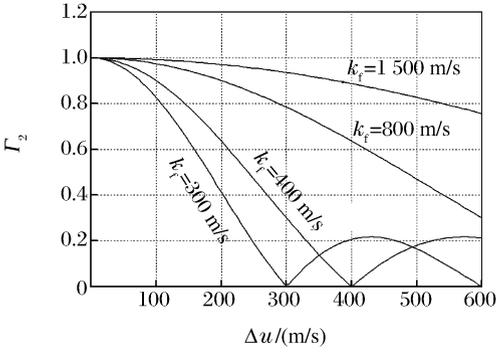


图 3  $\Gamma$  随  $\Delta u$  的变化曲线

Fig. 3 The variable curves between  $\Gamma$  and  $\Delta u$

阶跃折射率多模光纤

$$\tau_m = \frac{n_1 l_{sig}}{c} \left( \frac{n_1}{\sqrt{n_1^2 - NA_c^2}} - 1 \right) \tag{11}$$

梯度折射率多模光纤

$$\tau_m = \begin{cases} \frac{n'_1 l_{sig}}{c} \left( \frac{\alpha_n - 2}{\alpha_n + 2} \right) \delta_n & \alpha_n \neq 2 \\ \frac{n'_1 l_{sig}}{c} \frac{\delta_n^2}{2} & \alpha_n = 2 \end{cases} \tag{12}$$

式中： $n_1$ 是阶跃光纤芯的折射率， $NA_c$ 是其数值孔径， $n'_1$ 是梯度折射率光纤的中心折射率， $\alpha_n$ 是光纤剖面指数， $\delta_n$ 是相对折射率差， $c$ 是光速常数， $l_{sig}$ 是光纤长度。以我们研制的激光干涉测速系统为例，将  $n_1 = 1.453$ 、 $NA_c = 0.37$ 、 $n'_1 = 1.475$ 、 $\alpha_n = 2.22$  及  $\delta_n = 0.01$  代入(11)及(12)式，得到

$$\tau_m = \begin{cases} 165 l_{sig} \text{ ps/m} & \text{阶跃折射率多模光纤} \\ 2.57 l_{sig} \text{ ps/m} & \text{梯度折射率多模光纤} \end{cases} \tag{13}$$

使用(13)式，模拟计算  $\tau_m$  与光纤长度的关系，如图 4 所示。使用(13)式，计算了  $\Gamma_2$  与光纤长度和记录信号频率的关系，如图 5 所示。

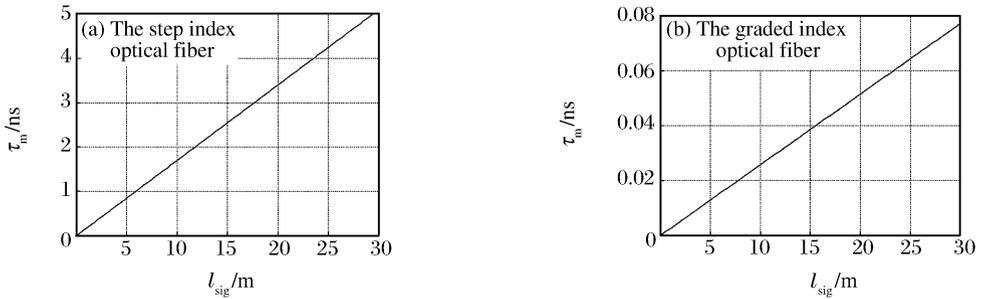


图 4 信号光纤的色散时间与光纤长度的关系

Fig. 4 The relation between dispersion time of signal fiber and its length

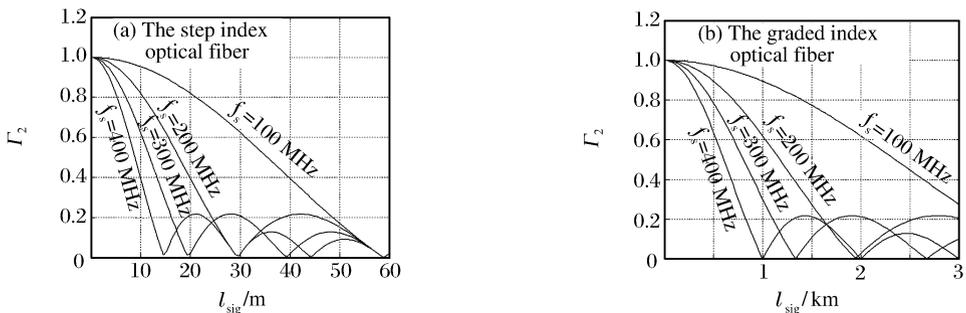


图 5 色散对比度因子与光纤长度的关系

Fig. 5 The relation between contrast factor and fiber length

### 3.2 色散对比度因子与光纤的关系

$\Delta u(\tau_m)$ 不但与信号光纤的模式色散时间  $\tau_m$  有关，而且也是被测点的加速度  $a(t)$  的函数，因为

$$\Delta u(\tau_m) = a(t)\tau_m = k_f f_s(t)\tau_m \tag{9}$$

$$\Gamma_2 = \left| \frac{\sin(\pi f_s(t)\tau_m)}{\pi f_s(t)\tau_m} \right| \tag{10}$$

式中： $f_s(t)$ 是记录信号的频率。信号光纤的色散时间  $\tau_m$  与光纤的结构、长度和参数有关<sup>[2]</sup>，总的来说，阶跃折射率光纤比梯度折射率光纤的色散时间大得多，且有

数字计算表明,为了减小信号光纤模式色散的影响,一是尽量减小光纤长度,二是使用梯度折射率光纤。值得指出,以上分析结果都假定光纤是直的,实际应用中,光纤都要弯曲,使模式色散的影响减小,因此,在激光干涉测速的实际中,信号光纤的模式色散对测速的影响比以上分析要小。

## 4 结 论

深入分析了激光干涉测速中信号光纤的模式色散对速度测量的影响。研究表明:

- (1) 测速时使用的条纹常数越大,色散对比度因子  $\Gamma_2$  越大,信号光纤模式色散的影响越小;
- (2) 当条纹常数一定时,被测速度越大,信号光纤模式色散的影响越大(信号光纤的长度是一定的),当用  $k_f=300$  m/s 的条纹常数档测速时,  $\Delta u(\tau_m) > 200$  m/s,  $\Gamma_2 < 0.4$ ,已基本不能测速;
- (3) 被测目标的加速度越大,信号光纤模式色散的影响越大;
- (4) 阶跃折射率光纤的影响比大得多,当使用阶跃折射率光纤作为信号光纤时,尽管由于实验应用中光纤的弯曲使模式色散的影响降低,也必须考虑光纤模式色散的影响,特别是在实验装置距激光干涉测速系统较远的情况下,如果不考虑模式色散的影响,有可能得不到实验信号。

## 参考文献:

- [1] 李泽仁,李幼平,马如超,等. 光纤传输速度干涉仪[J]. 爆炸与冲击,1994,14(2):175-181.  
LI Ze-ren, LI You-pin, MA Ru-chao, et al. Velocity interferometer with fiber transmission[J]. Explosion and Shock Waves, 1994,14(2):175-181.
- [2] 王延衡. 光纤通信技术基础[M]. 天津:天津大学出版社,1990.

## The influence of the modal dispersion of signal fiber on velocity measurement in VISAR applications

LI Ze-ren \*

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang 621900, Sichuan, China)

**Abstract:** The influence of the modal dispersion of a signal fiber on velocity measurement in VISAR is theoretically analyzed and discussed in detail. A mathematical analysis model about the interfering contrast decreased by modal dispersion is set up. The dispersion contrast factor varied with fringe constants and velocity increment is calculated. The results show: (1) the larger the fringe constants, the smaller the influence of the modal dispersion of a signal fiber; (2) the larger the measured velocity, the larger the influence of the modal dispersion; (3) the influence of the modal dispersion of a multi-mode step-index fiber is larger than one of a multimode graded-index fiber. After this research, the efficient methods that decrease the influence of the modal dispersion of a signal fiber is put forward. This play an important role in improving interfering contrast and measuring precision in VISAR.

**Key words:** mechanics of explosion; modal dispersion; theoretical analysis; signal fiber; VISAR

---

\* Corresponding author: LI Ze-ren  
E-mail address: zeren109@21cn.com  
Telephone: 0816-2490294