

VISAR 测速中的信号丢失 及丢失条纹数的确定*

李泽仁^{a, b} 姚建铨^a

(a. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

(b. 中物院流体物理研究所 成都 523 信箱 610003)

摘要 论述了 VISAR 测速中信号频率与被测速度增量的关系和光电倍增管、数字示波器所能响应的最高速度增量。分析了信号丢失的原因,给出了丢失条纹数的确定方法。最后对 VISAR 应用中如何正确选择条纹常数提出了建议。

关键词 激光测速 信号频率 速度增量 信号丢失 条纹数

中图法分类号 O436.1

1 引言

VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector)^[1] 已成为冲击波和爆轰波物理研究中的重要测量工具,广泛用于材料的状态方程^[2]、断裂特性^[3]、剪切效应^[4]、界面不稳定性^[5] 等研究。当 VISAR 用于冲击波或爆轰波物理实验研究时,常出现信号丢失现象,给研究带来困难。因此,弄清信号丢失的原因,掌握丢失信号条纹数的确定方法,对于 VISAR 在冲击波或爆轰波物理研究领域的推广应用极为重要。

我们将讨论 VISAR 测速中的信号频率、探测器和记录系统的响应带宽与被测速度增量的关系,分析信号丢失的原因,同时给出丢失条纹数的确定方法。

2 信号频率与被测速度增量的关系

VISAR 测速的示意图如图 1,包含了 $t - \tau$ 时刻与 t 时刻多普勒频移的两束相干光,再由光电探测器检测由速度变化而引起的干涉图样变化,进而得到速度。

设 $\nu(t)$ 是 t 时刻反射光的频率, $\nu(t - \tau)$ 是 $t - \tau$ 时刻反射光的频率。则 VISAR 信号的频率

$$\nu_m(t) = \nu(t) - \nu(t - \tau) \quad (1)$$

根据 Doppler 效应, $\nu(t - \tau)$ 和 $\nu(t)$ 与被测速度 $v(t)$ 的关系^[6] 为

$$\nu(t) = \nu_0 [1 + 2v(t)/c] \quad (2)$$

$$\nu(t - \tau) = \nu_0 [1 + 2v(t - \tau)/c] \quad (3)$$

式中: ν_0 是入射激光的频率, c 是光速, τ 是 VISAR 系统中延迟标准具对光束的相对延迟时间。

* 李泽仁:男,1961年1月生,博士研究生,副研究员。

1998-09-08 收到原稿,1998-11-27 收到修改稿。

τ 与标准具的长度 L 和折射率 n 的关系为

$$\tau = \frac{2L}{c} \left(n - \frac{1}{n} \right) \tag{4}$$

将 (2)、(3) 两式代入 (1) 式

$$\nu_m(t) = \frac{2}{\lambda_0} [v(t) - v(t - \tau)] = \frac{2}{\lambda_0} \Delta v(t) \tag{5}$$

式中: λ_0 是激光的原始波长, $\Delta v(\tau)$ 是 $t - \tau \sim t$ 时间内的速度增量。

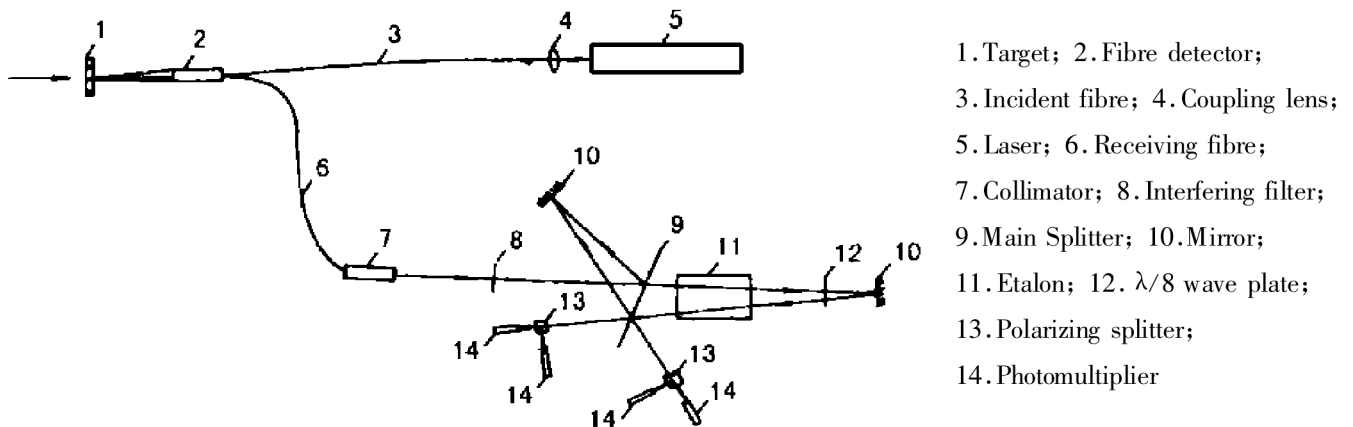


图 1 VISAR 测速示意图
Fig. 1 The diagram of velocity measurement by VISAR

(5) 式表明, 当 λ_0 一定时, VISAR 的信号频率只与 $t - \tau \sim t$ 时间内的速度增量有关。但是, 对于不同的测量档, 标准具的长度 L 不同, 因而 τ 也不同, 对应的频率也不同。

设在 $t - \tau \sim t$ 时间内加速度为常数, 且为 $a(t - \tau/2)$, 则有

$$\Delta v(\tau) = v(t) - v(t - \tau) = a(t - \tau/2) \cdot \tau \tag{6}$$

$$\nu_m(t) = \frac{2}{\lambda_0} \Delta v(\tau) = \frac{a(t - \tau/2)}{k} \tag{7}$$

其中

$$k = \lambda_0 / (2\tau) \tag{8}$$

k 称为 VISAR 的条纹常数, 即每个信号条纹所对应的速度, 由设计参数确定。(8) 式表明, 在 VISAR 测速中, 信号频率 $\nu_m(t)$ 与被测物体的加速度 $a(t - \tau/2)$ 成正比, 与测试系统中使用的条纹常数成反比。

以我们研制的 JSG-2 VISAR 为例, 用不同的条纹常数档测量不同加速度 $a(t)$ 时, VISAR 的信号频率见表 1。

表 1 VISAR 的信号频率

| $k / (\text{m/s})$ | Signal frequency of VISAR | | | | | |
|--------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | $a / (\text{Gm/s}^2)$ | | | | | |
| | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| 298.04 | 167.8 | 335.5 | 503.3 | 671.0 | 838.8 | 1006.6 |
| 372.46 | 134.3 | 268.5 | 402.7 | 537.0 | 671.2 | 805.4 |
| 894.22 | 55.9 | 111.8 | 167.7 | 223.6 | 279.6 | 335.4 |
| 2234.78 | 22.5 | 44.7 | 67.1 | 89.4 | 111.9 | 134.2 |

3 光电倍增管与记录系统的频率响应

对于 VISAR 系统,通常选用光电倍增管监测由速度变化而引起的干涉图的强度变化,而光电倍增管的输出信号则由示波器记录。因此,VISAR 系统的响应频率由光电倍增管或示波器的响应带宽决定

$$\nu_s = \min(\nu_p, \nu_o) \quad (9)$$

对于 JSG-2 VISAR,使用 GDB-55 光电倍增管,其标称上升时间为 2.5ns。如果再考虑分压线路等的影响,光电倍增管单元(包含电子线路)的上升时间 $t_r \geq 3.0\text{ns}$,则它的响应带宽

$$\nu_p \approx \frac{0.33}{t_r} \leq 110\text{MHz} \quad (10)$$

在目前的 VISAR 测速中,光电倍增管的输出信号通常使用数字示波器记录,其记录方式有两种:一种只使用一个通道记录信号,最高采样速度为 2GHz,即每隔 0.5ns 采一个点;另一种使用四个通道记录,每一通道的最高采样速度为 500MHz,即每隔 2.0ns 采一个点。由于 VISAR 的信号为余弦函数,采样一个完整的条纹(一个周期信号)至少需要五个点。因此,对于不同的记录方式,数字示波器的响应带宽

$$\nu_o = \begin{cases} 400\text{MHz} \\ 100\text{MHz} \end{cases} \quad (11)$$

综合(10)和(11)式,JSG-2 VISAR 系统的响应带宽

$$\nu_s \leq 100\text{MHz} \quad (12)$$

可得到 JSG-2 VISAR 的响应周期 $T=10\text{ns}$ 。

美国 VALYN International 公司生产的 VLNV-04-C VISAR 的光电倍增管响应带宽 330MHz 以上,优于我们的 VISAR 系统。

4 信号丢失的原因及丢失信号条纹数的确定

4.1 信号丢失的原因

在 VISAR 测速中,当信号频率 ν_m 大于系统的响应带宽 ν_s 时,将引起信号丢失,只有当 $\nu_s > \nu_m$ 时,信号才能不失真地记录下来。

导致 $\nu_m > \nu_s$ 的原因有两种。一种是被测速度增量太大,即使选择最大条纹常数档测量,信号频率也高于系统的响应带宽,信号丢失不可避免。例如,当用 VISAR 测量金属材料在高压冲击或爆轰作用下弹-塑性变形时,系统常常无法响应。另一种情况是被测物体的速度增量不太大,但测量中使用的条纹常数较小,使信号频率太高,同样引起信号的丢失。

以 JSG-2 VISAR 为例,其响应带宽 $\nu_s = 100\text{MHz}$,由(5)式可求得允许的速度增量

$$\Delta v(\tau) = \frac{\lambda_0}{2} \nu_s = 25.73\text{m/s}, \text{ 响应周期 } T(T=$$

10ns)内的速度变化量 $\Delta v(T)$,见表 2。

$$\Delta v(T) = \Delta v(\tau) \cdot \frac{T}{\tau} \quad (13)$$

表 2 不同条纹常数 k 对应的 $\Delta v(T)$

Table 2 Different fringe constant k vs $\Delta v(T)$

| $k / (\text{m/s})$ | τ / ns | $\Delta v / (\text{m/s})$ |
|--------------------|--------------------|---------------------------|
| 298.04 | 0.854 | 301.29 |
| 372.46 | 0.690 | 372.90 |
| 894.22 | 0.287 | 896.52 |
| 2234.78 | 0.115 | 2237.39 |

上面的分析表明,当用 JSG-2 VISAR 测速时,当速度增量 $\Delta v(\tau) > 25.73\text{m/s}$ 或在一个周期时间 10.0ns 内速度变化 $\Delta v(T)$ 大于表 2 中所列值时,信号将丢失。

4.2 丢失信号条纹数的确定

前面的分析指出,对于 JSG-2 VISAR,由于光电倍增管单元的上升时间较慢,系统的响应带宽只有 100MHz ,即使使用最大条纹常数档测速,不丢失信号所允许的速度增量 $\Delta v(T) = 2300\text{m/s}$ ($T = 10.0\text{ns}$)。但是,当 VISAR 测量出现信号丢失时,可以用双精度测量等方法将被丢失的信号条纹数找出,从而给出完整的速度历史。

4.2.1 双灵敏度同时测速,确定被丢失的条纹数

双灵敏度同时测速是指实验中同时用两个条纹常数档测量同一物体的运动速度。被测物体的速度 $v(t)$ 与 VISAR 信号的条纹数 $F(t)$ 有如下关系

$$v(t) = kF(t) \quad (14)$$

当用条纹常数分别为 k_1 和 k_2 的两个档同时测量 $v(t)$ 时,则有

$$v(t) = k_1 F_1(t) \quad (15)$$

$$v(t) = k_2 F_2(t) \quad (16)$$

假设测量中两档丢失的信号条纹数分别为 N_1 、 N_2 ,实际测得的速度为 $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$,则有

$$v(t) = k_1 N_1 + u_1(t) \quad (17)$$

$$v(t) = k_2 N_2 + u_2(t) \quad (18)$$

由于记录仪器的补偿作用, N_1 、 N_2 只能是整数^[7],因此联解(17)~(18)式,可得 N_1 、 N_2 的最小整数解,即为丢失的条纹数。

4.2.2 用已知位移确定丢失的条纹数

当 VISAR 系统不具有双灵敏功能时,可借助已知的靶板位移量,确定被丢失的条纹数 N 。

设物体在 Δt 内的位移 Δs 已知,则有

$$v(t) = kN + u(t) \quad (19)$$

$$\Delta s = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} v(t) dt = \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} [kN + u(t)] dt \quad (20)$$

$$N = \frac{\Delta s - \int_{t_1}^{t_1+\Delta t} u(t) dt}{k \Delta t} \quad (21)$$

上式中, t_1 、 Δt 可用探针或其它方法测出。

4.2.3 利用理论预估的速度曲线确定丢失的条纹数

设理论预估的被测速度剖面如图 2。由于信号丢失,速度剖面的实测值比理论值小,如图 3。则在何处丢失条纹可以由信号的位相关系精确确定。

由于只丢失整数个条纹,比较理论与实验曲线,通过取整即可确定 N 。例如, $v_A = 2050\text{m/s}$, $u_A = 590\text{m/s}$,由于有

$$v_A \approx kN + u_A \quad (22)$$

当 $k = 300\text{m/s}$ 时, N 只能取 5,而 $v_A = 2050\text{m/s}$ 与 $kN + u_A = 2090\text{m/s}$ 之差 40m/s 应是理论预估误差。值得指出,此方法要求理论预估具有一定的精度,其误差应小于条纹常数值的一半。

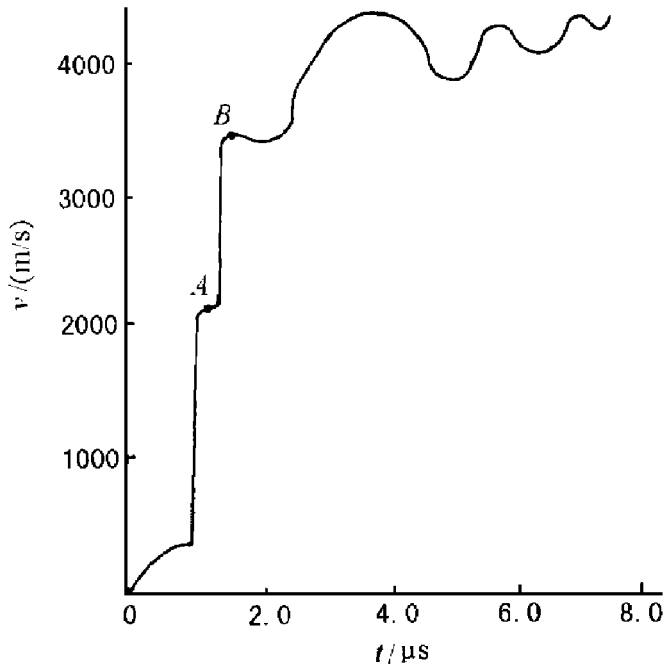


图 2 理论预估的速度剖面
Fig.2 The velocity history of theoretical calculation

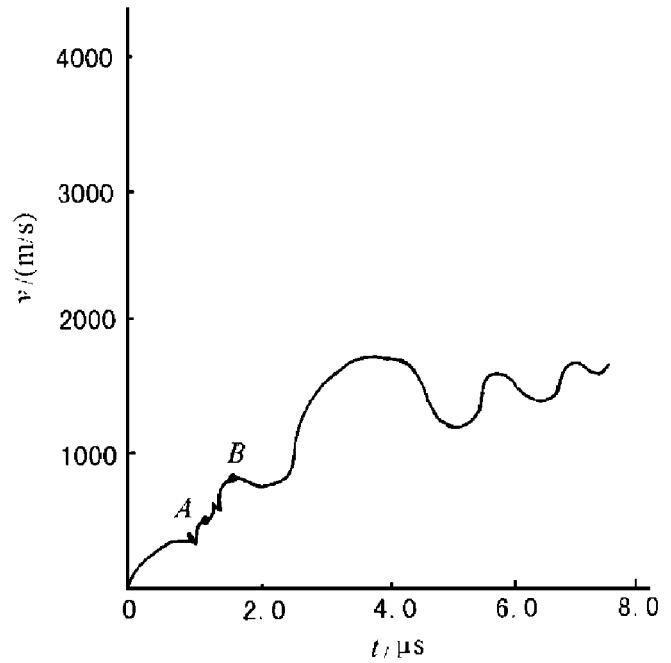


图 3 实测的速度剖面
Fig.3 The velocity history measured by experiment

4.3 条纹常数的选择原则

在 VISAR 测速中, 条纹常数的大小, 即 VISAR 系统中使用何种长度的标准具, 应由实验要求确定。

(1) 保证所测速度具有较高的精度。由 (14) 式得相对测速误差 $|\Delta v/v_{\max}|$ 与条纹数误差 ΔF 的关系

$$\left| \frac{\Delta v}{v_{\max}} \right| = \frac{\Delta F}{F_{\max}} \quad (23)$$

假设一个条纹可取 10 个数据点, 即 $\Delta F = 0.1$ 。当要求 $|\Delta v/v_{\max}| \leq 5\%$, 则 $F_{\max} \geq 2$; 当要求 $|\Delta v/v_{\max}| \leq 2.5\%$ 时, $F_{\max} \geq 4$ 。因此, 测速时选择的条纹常数应使信号有 2~4 个条纹。

(2) 当要求记录整个信号波形时, 则要选用条纹常数大的测量档, 使信号频率较小。

(3) 当要求有较高的速度分辨率时, 则要使用条纹常数较小的测量档。

总之, 在 VISAR 测速中, 选择合适的条纹常数至关重要, 而且要由实验来决定。已知被测速度的大致变化趋势, 对选择合适条纹常数具有参考价值。

参 考 文 献

- 1 Barker L M, Hollenbach R E. Laser Interferometer for Measuring High Velocities of Any Reflecting Surface. J Appl Phys, 1972, 43(11): 4669 ~ 4675
- 2 Courchinoux R, Chapron P, Elias P. Particle Velocity Profiles Measured by LDI through a LiF Window in Loading-Unloading Experiments. In: Schmidt S C, et al, eds. Shock Compression of Condensed Matter-1991. Amsterdam: North-Holland Physics Publishing, 1992. 771 ~ 774
- 3 Wise J L. Refractive Index and Equation of State of a Shock-compressed Aqueous Solution of Zinc Chloride. In: Asay J

- R, et al, eds. Shock Waves in Condensed Matter-1983. Amsterdam: North-Holland Physics Publishing, 1984. 317 ~ 320
- 4 Kim K S, et al. A Combined Normal and Transverse-displacement Interferometer with an Application to Impact of y-cut. J Appl Phys, 1997, 48(10): 4132 ~ 4139
- 5 Chabildas L C, et al. A Velocity Interferometer Technique to Determine Shear-wave Particle Velocity. J Appl Phys, 1979, 50(8): 5196 ~ 5201
- 6 Barker L M, Hollenbach R E. Shock-wave Studies of PMMA, Fused Silica, and Sapphire. J Appl Phys, 1970, 41(10): 4208 ~ 4226
- 7 Hensing W H. Velocity Sensing Interferometer (VISAR) Modification. Rev Sci Instrum, 1979, 50(1): 73 ~ 78

SIGNAL LOSS AND DETERMINATION OF LOST FRINGE NUMBER IN VISAR APPLICATION

Li Zeren^{a,b}, Yao Jinaquan^a

(a. College of Precision Instrument and Photonics, Tianjin University, Tianjin, 370002)

(b. Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 523, Chengdu, 610003)

ABSTRACT The relation between signal frequency and measured velocity variation and the largest velocity variation, which can be responded by photomultiplier and digital oscilloscope in the VISAR application are discussed. In this paper the reason of signal loss is analysed and the method of calculating the lost fringe number is described. The suggestion how to select fringe constant when VISAR is used to measure the velocity history in shock or explosion compression experiments is also given.

KEY WORDS VISAR, signal frequency, velocity variation, signal loss, fringe number