

冲击波研究中运用的激光差分混频技术

胡绍楼 王文林 俞 诚

(1982年6月1日收到)

介绍一种利用激光多谱勒效应连续测量抛射体和靶样品自由面速度变化的装置。它实际上是对位移干涉仪的一种改进,利用空间角度效应使两光束差频减小1—2个量级,因而扩大了测速范围。

该装置适于测量每秒几十米至几百米的速度。它的主要优点是设备简单,装校容易,并且可以灵活地调节量程以适合测量各种不同的速度。在中、低速范围的冲击波研究和其它研究项目中有广泛的用途。

一、引言

利用激光多谱勒效应的干涉仪技术,在最近十几年里得到了巨大的发展。由于它有非常高的空间和时间分辨率;是一种不干扰目标运动的非接触测量技术;又能连续地测量目标运动状态,因而在冲击波研究领域及其它领域中得到广泛的应用,成为最重要的测试手段之一。

本文介绍一种激光差分混频测量技术。让两束光以不同的角度入射在样品表面上。当样品运动时由于运动方向和入射光束夹角不同,反射光产生不同的多谱勒频移。在我们用光电检测系统接收混频讯号时,由于光电倍增管只能响应其差频讯号,而差频讯号的频率正比于运动物体的速度,并取决于两光束入射角。因而很容易调节以适合不同的速度。到目前为止,我们已应用上述仪器测量了每秒几米至几百米范围内的速度。根据我们的实验,认为在中、低速领域内,这是一个相当好的测试方法。

二、原理和装置

当光线垂直入射时,反射光的多谱勒频移

$$\Delta\nu = 2V/\lambda \quad (1)$$

这里 V —样品运动的速度; λ —激光波长

当两束光分别以 θ 和 $\theta + \Delta\theta$ 角入射至运动样品表面时,返回光束的频率可表为:

$$\nu_1(t) = \nu_0 + \frac{2V(t)}{\lambda} \cos\theta \quad (2)$$

$$\nu_2(t) = \nu_0 + \frac{2V(t)}{\lambda} \cos(\theta + \Delta\theta) \quad (3)$$

这两束光经光学混频，即由外差检测器输出它们的差拍频率：

$$\nu_B(t) = \frac{2V(t)}{\lambda} [\cos\theta - \cos(\theta + \Delta\theta)] \quad (4)$$

信号送入示波器记录，得到的条纹数：

$$F(t) = \int_0^t \nu_B(t) dt = \frac{2S(t)}{\lambda} [\cos\theta - \cos(\theta + \Delta\theta)] \quad (5)$$

比较(4)式和(1)式，就可看到，在测试同一速度时，输出的拍频频率将降低 $M = \cos\theta - \cos(\theta + \Delta\theta)$ 倍。显然，可以改变 θ 及 $\Delta\theta$ 而灵活地调节拍频（降低）因子，以便扩大仪器的量程。因此，从原理上说差分混频技术有非常宽广的测速范围。当然，我们也看到，差分混频技术是一种镜面反射测试方法，要求在测试过程中样品表面保持镜面反射，这就注定它不适用于测量很高的速度。另外，如要求 $M > 0.1$ ，就需要 θ 和 $\Delta\theta$ 较大，这又会影响仪器的测量景深。因此，一般认为将 M 控制在 $0.1-0.01$ 之间，使输出约为几十兆赫的信号比较合适。相应仪器的测速量程是每秒几十米到几百米。

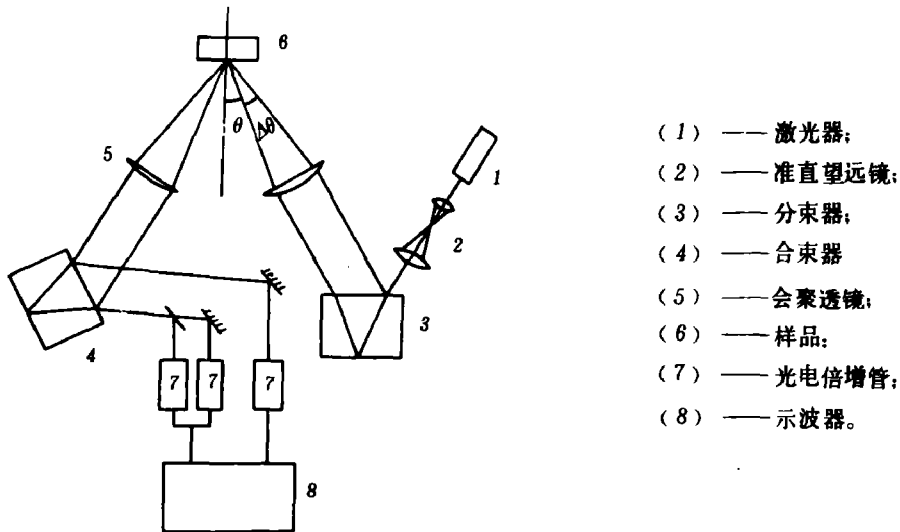


图1 差分混频测速装置

我们目前调试装置如图1所示。光源采用一般的氩—氟激光器，通过发射望远镜将输出发射角减小约一个量级，达到 10^{-4} 弧度。分束器与合束器均采用 $\phi 100 \times 100$ 的平面平行平晶，材料 K_9 。之所以选择平晶，是因为它调节灵活，并且在调节光束间距的过程中可保持两光束平行（这对输出信号有相当严重的影响，见下面的讨论）。平晶上表面镀部份反射的介质膜，下表面镀全反射铝膜。会聚透镜属消耗物品，我们采用的是市售的聚光镜，可根据市场情况和要求的 θ 及 $\Delta\theta$ 角度选购。合束器倾向分束器一边，而不是对称放置，是为了让两束光都各

通过平晶一次，以求得两光束强度基本平衡，也可使两光束近于零程差干涉，这时干涉条纹的对比度较好，同时降低了对激光相干长度的要求。在我们的装置中，常采用三个光电倍增管进行记录，其中之一，用作光强监测。另两支管子叠加输入示波器，这样可使信号幅度加倍，而噪声是随机变量，只增加 $\sqrt{2}$ 倍，因而提高了信噪比。

三、应用实例

我们在前段时间曾使用激光差分混频装置测量一种简易火炮中弹丸的加速过程，以及当冲击波压力在3万巴左右时，纯铁和45#钢样品中弹塑性波自由面速度随时间变化的过程。结果如图2，图3，图4所示。

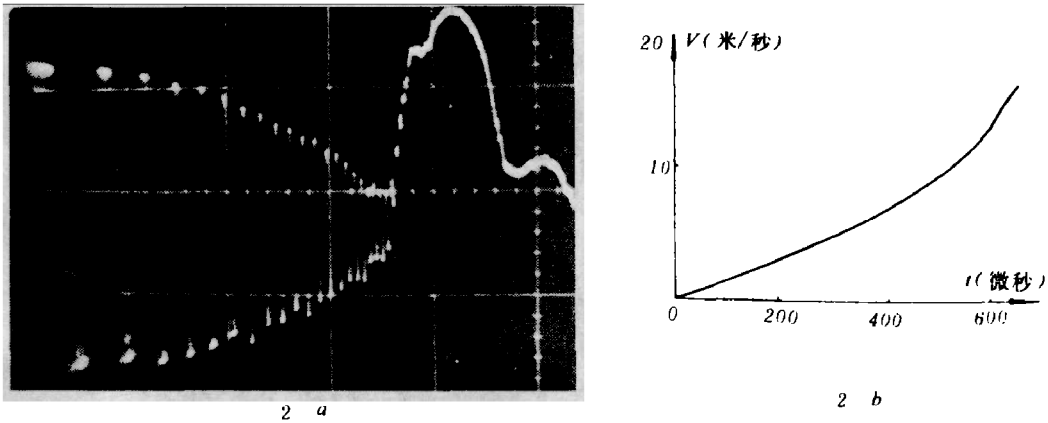


图2 火炮弹丸速度 扫速：100微秒/格

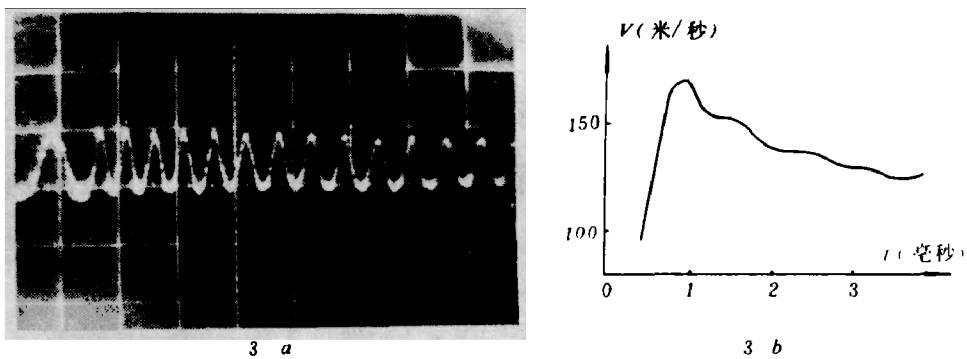


图3 钢样品自由面速度。样品厚20毫米，压力3万巴，扫速0.5微秒/格

四、讨论

(1)由图1可以看到，在测试点接受多普勒频移的两束光，当混频时，一束光因通过平

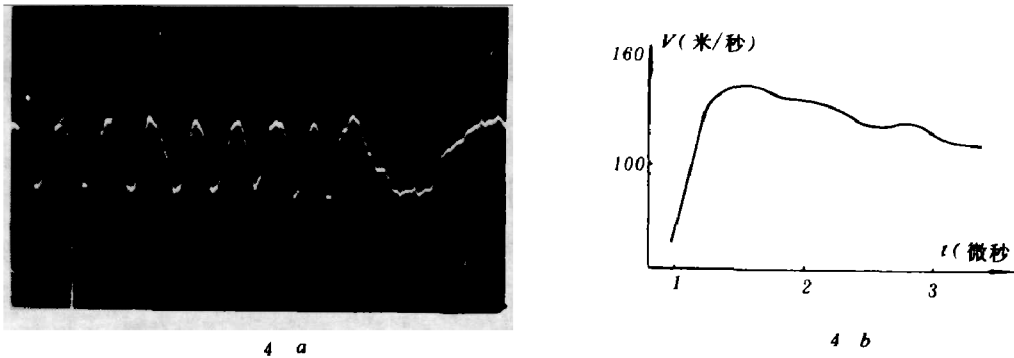


图4 铁样品自由面。样品厚40毫米，压力3万巴，扫速0.5微秒/格

晶内部而有延迟，所以两束光的频率可分别表示为：

$$\nu_1(t) = \nu_0 + \frac{2V(t)}{\lambda} \cos \theta \quad (6)$$

$$\nu_2(t) = \nu_0 + \frac{V(t-\tau)}{\lambda} \cos(\theta + \Delta\theta) \quad (7)$$

输出拍频：

$$\begin{aligned} \nu_B(t) &= \frac{2}{\lambda} V(t) \cos \theta - \frac{2}{\lambda} V(t-\tau) \cos(\theta + \Delta\theta) \\ &= \frac{2}{\lambda} V(t) \cos \theta - \frac{2}{\lambda} V(t-\tau) [\cos \theta - \cos \theta + \cos(\theta + \Delta\theta)] \\ &= \frac{2}{\lambda} [V(t) - V(t-\tau)] \cos \theta - \frac{2}{\lambda} V(t-\tau) [\cos \theta - \cos(\theta + \Delta\theta)] \end{aligned}$$

到 t 时刻产生的条纹数为：

$$\begin{aligned} F(t) &= \int_0^t \nu_B(t) dt = \frac{2}{\lambda} \cos \theta \int_0^t [V(t) - V(t-\tau)] dt \\ &\quad + \frac{2}{\lambda} [\cos \theta - \cos(\theta + \Delta\theta)] \int_0^t V(t-\tau) dt \end{aligned}$$

就是说，差分混频装置的输出包含两部分信号，前项是速度干涉仪信号，后项是位移干涉仪信号。即：

$$F(t) = \frac{2\tau}{\lambda} V(t) \cos \theta + \frac{2}{\lambda} S(t) [\cos \theta - \cos(\theta + \Delta\theta)] \quad (8)$$

一般情况下， τ 小于 1 毫微秒，我们检测的速度也较低，前一项可以忽略。但在所测速度较高时须加修正。尤其是起始的信号条纹，此时位移 $s(t)$ 较小，前一项有相当的影响，须用叠代法进行处理。将来也可以改变合束器，避开这个问题。

(2) 实现光混频的外差检测时，两光束一定要平行而共线地输入检测器。如果两光束不平行，输出将受到严重影响，这一般称为外差检测的方向特性。对于我们所讨论的远场光，即入射至检测器的光可作平面波处理的情况，检测器的输出电流可表示为⁽¹⁾：

$$I_{\text{出}} = A \frac{E_1^2 + E_2^2}{2} - A E_1 E_2 \cos[2\pi \nu_B(t)t - \phi] \sin\left(\frac{bl}{2}\right) / \frac{bl}{2} \quad (9)$$

$$\text{而 } b = -2\pi \left(\frac{\sin \alpha_1}{\lambda_1} - \frac{\sin \alpha_2}{\lambda_2} \right)$$

其中: A 是与检测器性质有关的常数; l 是检测器上受光表面的直径; E_1 、 E_2 为两光束幅度; λ_1 、 λ_2 为两光束波长; α_1 、 α_2 为两光束对检测器轴线的夹角。可见, 输出电流的交流部分受到方向特性函数 $\sin(bl/2)/(bl/2)$ 的控制, 并且容易证明, 当两光束夹角 $\alpha_1 - \alpha_2$ 约为 0.4×10^{-4} 弧度时, 交流项幅度即下降 50%。因此, 实现本装置测试时, 调节两光束平行而共线地输入检测器是至关重要的。我们也注意到, 在样品运动过程中, 因失焦而使两光束产生夹角, 也会降低输出信号的幅度。但实践证明, 本装置的测量景深不小于几毫米。这对一般的波剖面测试, 已经是足够的了。

(3) 前面已经指出, 差分混频测试技术是对位移干涉仪的一种改进, 由此扩大了位移干涉仪的测速量程。我们认为它的主要优点是设备简单, 装校容易。利用拍频因子灵活可调的优点, 可根据测试样品的速度, 把拍频控制在几十兆赫范围内, 这不仅降低了对光电检测系统的要求, 使干涉仪技术可以测量更高的速度, 而且使输出信号避开了几百兆赫这个区段, 即避开了激光器纵模间隔产生干扰的频率, 因而是相当有利的。

和位移干涉仪比较, 它的缺点是: 由于引入了角度测量等项误差, 精度比位移干涉仪低, 目前约为 3~5%。测量景深也较小。另外, 空间分辨率比位移干涉仪低。这很容易从(5)式看出, 每条纹代表的位移量由 $\lambda/2$ 变成 $\lambda/2[\cos\theta - \cos(\theta + \Delta\theta)]$, 所以可以认为降低拍频实际上是以降低空间分辨率为代价的。但是应指出, 空间分辨率仍为 10^{-3} 毫米量级, 优于一般光电测试技术。

总之, 差分混频装置不失为一种很好的位移—时间检测器, 在中低速范围的冲击波研究及其它研究领域中有广泛的用途。

参 考 文 献

- [1] Corcoran V. J., *J. Appl. Phys.* 36(6), (1965), 1819.

A LASER DIFFERENTIAL MIXING METHOD IN SHOCK WAVE EXPERIMENTS

Hu Shaolou Wang Wenlin Yu cheng

Abstract

A device is described in this paper for continuously measuring projectile velocities and free surface velocities of target samples by means of Doppler effect. It is actually a modification of the shift interferometer. In order to extend the range of velocity measurement, the space angle effect has been used to reduce the differential frequency of the two light beams by 1 ~ 2 order of magnitude.

The device is suited to measure surface velocities from a few meters per second to about a few hundred meters per second. It has several advantages, such as simplicity in construction, easiness for assembling and adjusting, quick adjustment of its measurement range for various velocities. It can be widely used in shock wave and other research work for measuring low and medium velocities.