

脉冲激光测速装置*

唐贵琛 李绳式 吴兆庆

(中国科学院上海光机所)

脉冲激光测速装置, 是适应高速测量的需要而研制的。本文以小口径步枪弹丸速度测量为例, 描述了脉冲激光测速的原理和实验结果。显然, 不难将它推广到其他的高速测量上。

脉冲激光测速, 是基于光学多普勒效应。光学中的多普勒效应, 与声学中的不同, 不论是光源相对于接收器运动, 还是接收器相对于光源运动, 只要接收器——光源视线与其运动方向相一致时, 其多普勒频率均是

$$\Delta\nu = \nu - \nu_0 = \nu_0 \left(\pm \frac{v}{c} \right) = \pm \frac{v}{\lambda_0} \quad (1)$$

正负号视二者相对运动的背、向而定。公式

(1)中忽略了二级小量 $\left(\frac{v}{c}\right)^2$ 项。

如果光不是由运动着的物体发出, 而是由接收器旁边的光源射向运动着的物体, 接收器是接收其反射或散射回来的光。那末, 就相当于以速度 v 运动着的物体, 被加速一倍一样。如图1所示, 假定物体以速度 $v = \frac{ds}{dt}$

运动, 则表示运动了 ds 的距离, 用了 dt 的时间。但是, 现在的条件, 不是物体发光, 而是光对着它射过去。当光反射或散射回来时, 同样是 dt , 但光却少走了 $2ds$ 的距离, 即相当于发光的物体运动了 $2ds$, 因此, 物体的运动速度也相当于 $v' = 2ds/dt = 2v$ 。在这种情况下, 多普勒频率即为

$$\Delta\nu = 2 \frac{v}{\lambda_0} \quad (2)$$

多普勒频率对应的多普勒波长是

$$\Delta\lambda = \frac{2v\lambda_0}{c} \quad (3)$$

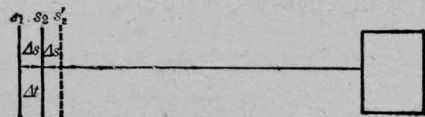


图1 $\Delta\nu = 2 \frac{v}{\lambda}$ 例解

我们不论是测出频率差 $\Delta\nu$, 还是测出波长差 $\Delta\lambda$, 均能计算出运动着的物体的速度或冲击波的速度。

我们用上述多普勒原理, 测量了小口径步枪弹丸的飞行速度。其装置如图2所示。

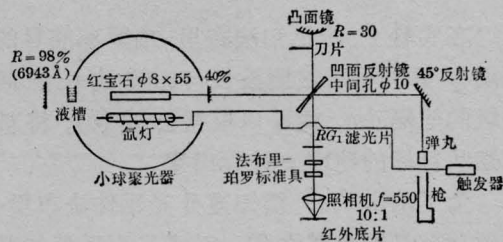


图2 脉冲测速装置

激光器是染料调Q的红宝石激光器。染料调Q的好处是激光输出的谱线窄, 以法布里-珀罗标准具作分光仪器, 通常是一组干涉环。激光脉冲通过凹面聚光镜未镀膜的部分, 再经过普通材料的 45° 全反射镜, 与飞行弹丸相碰。当光被散射回来时, 被凹面镜聚集到法布里-珀罗标准具上。形成的干涉环, 用照相的方法记录下来, 激光的一小部分, 作为比较波长, 这部分光, 被凹面镜的背面反射

* 收稿日期: 1978年4月10日。

到凸面反射镜上。发散的反射光，一半被刀口挡住，因此，在照相底片上，只有半面有干涉环。这样一来，被测波长和比较波长就是可以区别开来了。

适当的选择法布里-珀罗标准具的间隔(事先要估计被测速度 v 的大小)，能使被测波长落到比较波长相邻两环的中间，这样便于测量，并能提高测量精度。多光束干涉的基本公式是

$$2t \cos \theta = m\lambda$$

或
$$v = mc/2t \cos \theta$$

当 θ 不是很大的时候， $\cos \theta \approx 1$ ，上式微分得

$$dv = \frac{c}{2t} dm \quad (4)$$

由公式(2)和公式(4)，可得

$$v = \frac{c\lambda}{4t} dm \quad (5)$$

式中， t 是标准具的间隔， dm 是级间隔的分数。当 $dm=1/2$ 的时候，就表示被测波长正好落在比较波长相邻两环的中间。这时由公式(5)得

$$t = \frac{c\lambda}{8v} \quad (6)$$

在实验上，若已知法布里-珀罗标准具的间隔 t ，并测得了被测波长与比较波长的同一级的间隔 dm ，就可以根据公式(5)，将被测运动目标的速度 v 计算出来。

为了求出 dm ，须知道分光元件法布里-珀罗标准具的色散性质。对多光束干涉的基本公式 $2t \cos \theta = m\lambda$ 微分，可得其角色散：

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{1}{2t} \frac{m}{\sin \theta} \quad (7)$$

由公式(7)可知，法布里-珀罗标准具的“角色散”，是 θ 的函数，即 $\theta \rightarrow 0$ 时“角色散”最大，不同的 θ 值， $d\theta/d\lambda$ 也随之不同。从而，波长变化相同时($d\lambda = \text{常数}$)， $d\theta$ 随 θ 而变。因为在照相底片上，“线色散”等于 $f d\theta$ (f 是照相物镜焦距)，所以，干涉环之间不是等间隔的，靠近中心变疏，远离中心变密，如图3所示。

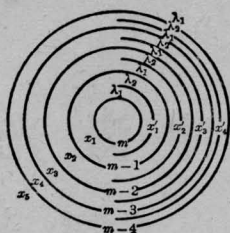


图3 干涉环

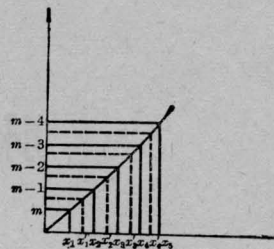


图4 色散曲线

综上所述，为了求出 dm ，应该作一条干涉级——干涉环直线距离曲线，或叫“色散曲线”，如图4所示。从曲线上就可查出每一级的 dm 。但是，这种方法，每测一组数，都要做一条曲线，比较麻烦。因此，在实际应用中，往往用下面简便的近似方法。

虽然色散曲线本身不是一条直线，可是从图上可以看出，在靠近中心几级的一段范围内，任意相邻两点之间变化不是很大，我们可以近似地把相邻两点之间的曲线，看成是直线，于是就有

$$dm = \frac{dm}{(m-n) - [m - (n+1)]} = \frac{X'_n - X_n}{X_{n+1} - X_n}$$

同理有

$$dm = \frac{X'_n - X_n}{X'_n - X'_{n-1}}$$

由于“线色散”毕竟不是直线，所以前者偏大，后者偏小。用二者的算术平均值，则有

$$dm = \frac{2(X'_n - X_n)}{(X_{n+1} - X_n) + (X'_n - X'_{n-1})} \quad (8)$$

实验中，我们就是用(8)式来处理数据的。

应用上述原理和装置，我们测量了小口径步枪弹丸的飞行速度。拍摄的干涉环照片如图5，图5(a)是静态照片(即子弹不飞行)，(b)是动态照片。

应用上述数据处理方法，测得的子弹飞行速度列于表1中。

我们还采用了电学测量法，以便比较我们用干涉法测得的结果。电学法测量子弹飞行速度很简单，使子弹穿断两根已知距离 Δl

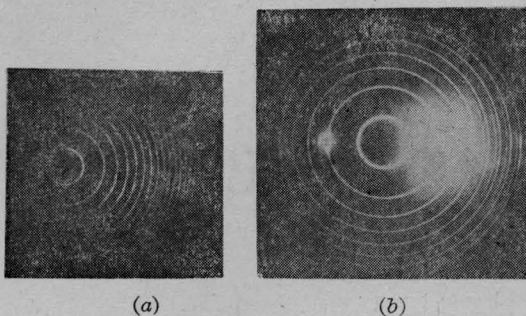


图5 干涉仪照片

的细铜丝，从而提供两个电信号，从频率计上读出这两个信号的时间间隔 Δt ， $\bar{v}_{\text{电}} = \Delta l / \Delta t$ (平均速度)。测得的结果也列于表1中。

表1

序号	编号	$\bar{v}_{\text{光}}$ (米/秒)	$\bar{v}_{\text{电}}$ (米/秒)	$\bar{v}_{\text{光}}$ 平均误差	$\bar{v}_{\text{光}} \bar{v}_{\text{电}}$ 相对误差
1	85-7	453	410	3.5%	11%
2	810-7	424	356	7.3%	17%
3	810-11	435	376	8.5%	18%
4	810-5	458	386	5.3%	19%

表1中， $\bar{v}_{\text{光}}$ 和 $\bar{v}_{\text{电}}$ 是同一枪的结果 ($\bar{v}_{\text{光}}$ 是若干环测量的平均结果)。

实验是采用被动的方法，使子弹和激光同步的。预先用示波器测量出从触发氙灯到激光输出的时间，通常为450微秒。我们用的同步方法是，子弹一到枪口就破坏一根横在枪口处的细铜丝，从而使触发器输出一个信号触发氙灯。所以，子弹是飞行约450微秒的时刻与激光相遇的。显然，在同步精度要求高的实验中，用预电离点灯的方式，或者用锁模——选脉冲的方式等等，那是更合适的，后者的精度可达 10^{-8} 秒。

特别应该指出的是，电学法测量速度，由于受到细铜丝的弹性等因素的影响，是偏小的，是不很准确的。但是该法证实了我们应用公式(2)或(3)测速是正确的。

脉冲测速的优点，是可测较高的速度，精度高，特别是能抗电子干扰和其他辐射干扰。显然，当目标速度很高时，不用法布里-珀罗标准具，而用光栅光谱仪分光，那是更合适的。

“B型激光能量计”暂定为国家激光能量标准

中国计量科学研究院于1978年11月27日至12月2日在北京召开了B型激光能量计(量程: 0.5~40焦耳, 准确度 $\pm 2\%$) 鉴定会, 有研究所、学校、工厂32个单位共40名代表参加了会议。

全体代表听取了计量院关于B型能量计的技术报告、审阅了技术资料、考查了实验装置。大家以认真负责的态度和实事求是精神, 进行了深入广泛的讨论, 会议组成的技术组对该能量计电校准重复性进行了实测复查, 结果符合原定技术指标。此外, 还

用两个B型能量计(1#B、4#B)对致玻璃激光器输出进行实测, 考核结果也很满意。为了进一步适应激光技术的发展, 统一全国激光能量测定标准, 与会代表同意中国计量科学研究院研制的“B型激光能量计”暂定为国家激光能量标准, 可以进行传递。

大家认为, B型能量计有待进一步完善, 提高计量精度。代表们还建议, 在可能的条件下, 尽快召开激光能量计比对会, 以促进我国激光计量工作的不断发展。

表1 B型激光能量计技术指标

工作波长	0.3~10 微米
准确度	$\pm 2\%$
重复性	$\pm 0.4\%$
能量密度	30 焦耳/厘米 ² (对毫秒级的激光脉冲, 测量上限为40焦耳)