

loped to research shock initiation of explosives under divergent wave loading. The main characteristics of the signal of explosive initiation under detonator loading resemble to those obtained in experiments under planar wave loading, but with lower amplitude and higher noises for heterogeneous explosives.

一个测量气炮弹丸速度的激光测量装置

史有程 刘凤琴

(1984年1月10日收到)

研制了一种测量气炮弹丸飞行速度的测速装置。此种方法属非接触测量, 不干扰试件。测量精度优于千分之五, 测速范围从每秒几米到每秒一千四百米。该系统操作简单、稳定可靠。

一、引言

气炮的弹速是研究高速冲击现象的一项重要参数。采用金属探针测量弹速的方法早已得到广泛的应用, 但这种方法每测量一次就需要更换新的探针, 而且可能会影响飞行体的飞行姿态^[1]。为了克服金属探针法测速的上述缺点, 我们研制了一个激光测量系统。经两年多来的工作, 该系统现已成功地用于气炮实验中。实践证明, 该系统具有操作简便、稳定可靠、精度较高、测速范围宽, 且不干扰试件等优点。

二、激光测量弹丸飞行速度系统的原理及其光路

众所周知, 激光的单色性好, 光束细, 它照在PIN光敏器件上就能产生光电信号。设有相距为 s 的两束光, 分别照在两个PIN光电器件上, 当弹丸飞过时将依次遮断这两束光, 则能给出两个光电信号, 若测出这两个光电信号的时间间隔为 t , 则弹丸的平均飞行速度为

$$\bar{v} = s/t \quad (1)$$

我们研制的系统见图1。采用He-Ni激光器发出的连续光作为光源。该光束经三分之一分光镜I和二分之一分光镜II及全反射镜III形成强度相等的三束光束, 而光束I经反射镜IV和

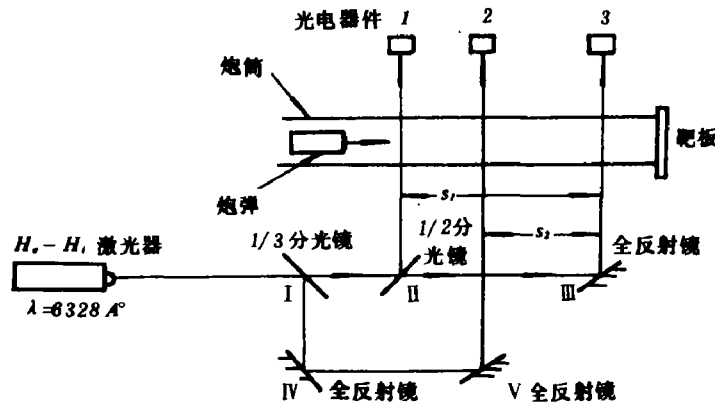


图1 激光探针法测速原理图

V插在光束II和III之间。通过调节分光镜及反射镜，尽量使三束光相互平行且与弹丸飞行方向垂直相交。设光束II和III之间的距离为 s_1 ，光束I与III之间的距离为 s_2 ，常态时三束光分别照在三个光电器件上，当弹丸飞过时将依次遮断每一束光，并产生相应的光电脉冲。由记时器记录下弹丸途经 s_1 ， s_2 的时间间隔 t_1 ， t_2 则有

$$\bar{v}_1 = \frac{s_1}{t_1} \quad \bar{v}_2 = \frac{s_2}{t_2}$$

为了提高测试的可靠性和数据相互校核之目的，故同时测两组数据。

三、两束光之间距离的测量及其计算

从前面的测速公式中可见，我们测的是平均弹速。为了尽可能保证所测的平均弹速接近弹丸击靶时的弹速，则三束光之间的距离就不能选的太大，且第三束光靠近靶板。本系统中 s_1 约为2 cm， s_2 约为1.3 cm。在给定的距离中，我们以两种模型——无穷长等截面气室一维不定常流和准静态等熵膨胀——近似计算表明，弹丸到达炮口处所受推力而影响弹速的误差比测量系统的误差约小二倍。所以，我们可以把测得的平均弹速当作弹丸击靶时的速度。由于光束之间距离较小，要提高测试精度就必须提高光束之间距离的测量精度。具体作法如下

1. 测量光电器件之间的距离

系统中已将三个光电管固定在一个固定架上，光电管的受光面为圆，其直径约1 mm。为了减少弹丸遮光时间，也就是为了提高信号的前沿上升时间，我们在光电管的受光面上加上一约0.2 mm宽的光缝，而后在读数显微镜上多次测量之后算出 s_1' 和 s_2' 的值。其结果是

$$s_1' = 19.686 \pm 0.0016 \text{ (mm)} \quad (2)$$

$$s_2' = 12.561 \pm 0.0017 \text{ (mm)} \quad (3)$$

2. 测量三束光离开分光镜后之间的距离

我们采用遮光法测量三束光之间的距离。其作法是将每一束光调到对应的光电二极管上，这时各光电管产生的电流以微安表指示。在三束光前固定一千分尺，移动千分尺可测出电流

强度与相对位置的关系曲线。各束光电流在其峰值一半附近随距离的变化成线性关系，而且其斜率基本一致。如此我们测出每一束光强度的一半处的相对位置，以它算出光束之间的距离

$$s_1^* = 19.465 \pm 0.021 (mm) \quad (4)$$

$$s_2^* = 12.080 \pm 0.028 (mm) \quad (5)$$

3. 弹丸飞行时实际遮光处两束光之间距离的计算

在前面的计算中，假定了三束光彼此是相互平行的，但实际上很难做到这一点。因为很难使 $s_1' = s_1^*$ ， $s_2' = s_2^*$ 。所以，我们只好通过几何作图法计算出弹丸实际遮光处相应光束间的距离。这种几何关系见图 2，故得

$$s_1 = s_1^* + (s_1' - s_1^*) \frac{115 + 144 + 57}{635} = 19.575 (mm) \quad (6)$$

$$s_2 = s_2^* + (s_2' - s_2^*) \frac{115 + 144 + 57}{635} = 12.319 (mm) \quad (7)$$

故 s_1 ， s_2 的测量误差为

$$\Delta s_1' = 0.011 (mm) \quad (8)$$

$$\Delta s_2' = 0.014 (mm) \quad (9)$$

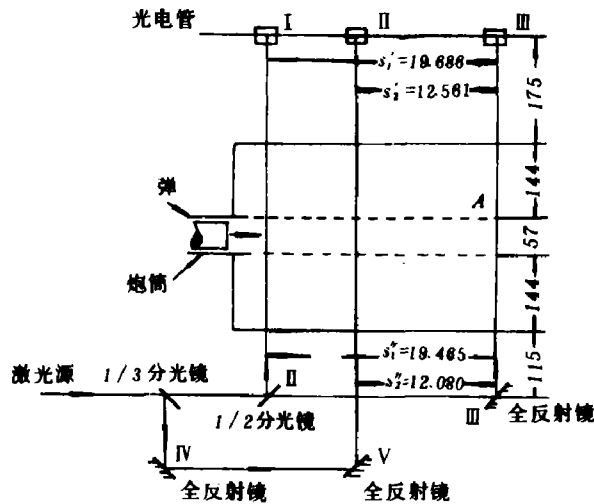


图 2 光路计算几何图

从计算的几何图可见，只有 115 mm 和 175 mm 两个数是现场测量的，其余都是机械加工给出的，若测量引进 2 mm 的误差，则 s_1 ， s_2 的计算误差为

$$\Delta s_1^* = (s_1' - s_1^*) \times (2 / 635) = 0.0007 (mm) \quad (10)$$

$$\Delta s_2^* = (s_2' - s_2^*) \times (2 / 635) = 0.0015 (mm) \quad (11)$$

四、电子线路及器件、仪器的选择

由于激光经折射及反射被等分成三束，而且又在光电二极管的受光面上做了光缝，再加

上其他各种损耗,照在光电器件上的激光引起的电脉冲幅度很小,为了有效地启动和关闭计时仪器,我们采用了三级脉冲放大和一级施密特转换电路,其电子线路图见图3。

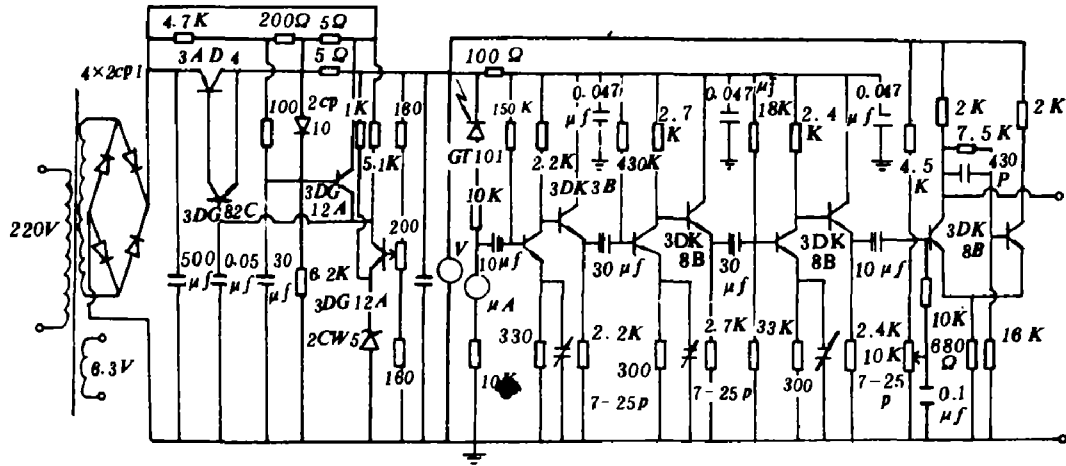


图3 激光探针测速电子线路原理图

该线路的电压放大倍数 $k_v \approx 100$,响应上升时间 $t_r \approx 40ns$;输入阻抗 $R_{in} \approx 30k\Omega$;输出阻抗 $R_o < 2K\Omega$ 。本系统的两束光之间的最小距离约 $13mm$,最高弹度以 $1400m/s$,若要求时间分辨率为 0.1% ,则仪器的响应时间应优于 $t = 13 \times 10^{-3}(m) / 1400(m/s) \times 10^3 = 10ns$ 。因此,我们选用的光敏器件为GT101型Ⅲ光电管,响应时间 $< 1ns$;计时仪器为E₃₂₄,频率计配E₃₂₄₁时间插件,精度为 $10ns$;激光源为He-Ne激光管QJH-260($2mW$);激光电源为HG-2A。

五、防震措施

由于光敏元件的受光面很小,若在驱动弹丸时,因震动使光电管引起毫秒级的位移,则会导致系统误动。为了解决这一问题,我们将整个激光测试系统固定在一块钢性的平板上,该平板利用四根弹簧悬挂在与炮体隔离的防震架上。这样做之后,本系统在实际使用中从未出现过数据丢失的现象。

六、误差分析⁽³⁾

整个测速装置的测速误差可分为如下部份:(1)测量距离引起的误差;(2)光电信号启动和关闭计时器引起的误差;(3)计时器本身的误差;(4)传输线路所引起的误差。现分述如下

1. 测量距离所带来的误差

前面已对 s_1 , s_2 的测量误差和计算误差作了计算,现再对所使用的测量工具所引起的误差进行计算。光电管前面的光缝是用读数显微镜测量的,其最小读数可达 $0.01mm$,因而精度优于 $0.01(mm) / 50(mm) = 2 \times 10^{-4}$;光束离开分光镜处的距离是用千分尺测量的,其最

小读数为 0.01 mm , 因而精度优于 $0.01(\text{mm})/75(\text{mm}) = 1.3 \times 10^{-4}$ 。所以由于测量工具所引进的距离测量误差分别为

$$\Delta s_1'' = \sqrt{(19.686 \times 2 \times 10^{-4})^2 + (19.465 \times 1.3 \times 10^{-4})^2} = 0.005(\text{mm}) \quad (12)$$

$$\Delta s_2'' = \sqrt{(12.561 \times 2 \times 10^{-4})^2 + (12.08 \times 1.3 \times 10^{-4})^2} = 0.003(\text{mm}) \quad (13)$$

所以

$$\Delta s_1 = \sqrt{\Delta S_1'^2 + \Delta S_1''^2 + \Delta S_1'''^2} = 0.012(\text{mm}) \quad (14)$$

$$\Delta s_2 = \sqrt{\Delta S_2'^2 + \Delta S_2''^2 + \Delta S_2'''^2} = 0.014(\text{mm}) \quad (15)$$

2. 光电信号启动和关闭计时器引进的时间间隔测量误差

(a). 在该系统中, 光电管是经过 35 cm 的双芯电线接到线路上, 其双芯线的电容为 7 pf (考虑到其它分佈电容取 10 pf), 负载电阻是 $10 \text{ K} \Omega$, 因而光电信号的时间常数为

$$\tau = RC = 10^4 \times 10 \times 10^{-12} = 0.1(\mu\text{s}) \quad (16)$$

电阻的误差为 5% , 电容的误差为 4% , 所以 τ 的相对误差为

$$\frac{\Delta \tau'}{\tau} = \sqrt{(5\%)^2 + (4\%)^2} = 6.4\% \quad (17)$$

当 τ 确定之后, 由于切割电平的波动而带来测量的时差计算如下

取施密特门坎电平为输入电平的一半, 则

$$\frac{u}{u_0} = 1 - e^{-t/\tau} = 0.5$$

所以

$$t = \tau \times \ln 2 = 0.6931 \tau$$

经测试, 输入给施密特电路的电脉冲幅度为 8.4 V , 则门电压确定为 4.2 V , 按最大误差的线路计算, 门电压波动为 $\pm 0.5 \text{ V}$ 。因而, 由于门电压波动带来的时差 Δt_1 为

$$4.7(\text{V}) = 8.4(1 - e^{-t_1/\tau})(\text{V})$$

$$3.7(\text{V}) = 8.4(1 - e^{-t_2/\tau})(\text{V})$$

$$\Delta t_1 = |t_1 - t_2| = \tau \ln(4.7/3.7) = 0.0239(\mu\text{s}) \quad (18)$$

由于 τ 的波动而引进的测量时差为

$$\Delta \tau = \Delta \tau' \ln 2 = \tau \times 6.4\% \times \ln 2 = 0.0044(\mu\text{s}).$$

Δt_1 和 $\Delta \tau$ 分别如图 4 和图 5 所示。

前面的计算只考虑 u_0 为阶跃电压的情况。实际上并非如此, u_0 的建立是由于弹丸遮光所引起的, 从测量可见, u_0 的变化是与弹丸遮光的距离成线性关系 (特别是 u_0 的一半附近), 为了

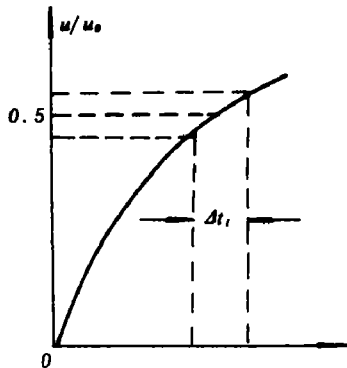


图4 切割电平波动引起的时差

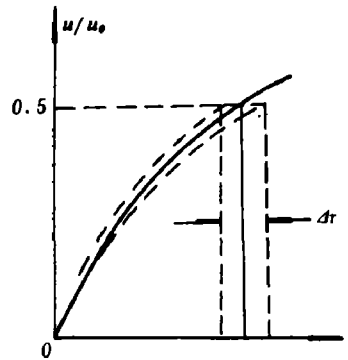


图5 时间常数τ波动引起时差

简化计算，我们按线性考虑。由此引进的时差按两方面来考虑：其一是因测量光缝的误差所带来的时差；其二是因切割电平的波动所带来的时差。设因测量光缝的误差所带来的时差为 Δt_2 则

$$\Delta t_2 = \frac{0.2 (mm)}{v} \times \frac{C\sigma_s}{0.2 (mm)} = \frac{C\sigma_s}{v} \quad (19)$$

设因切割电平的波动而带来的时差为 Δt_3 ，则

$$\Delta t_3 = \frac{0.2 (mm)}{v} \times \frac{1.0 (V)}{8.4 (V)} = \frac{1 (mm)}{42v} \quad (20)$$

Δt_2 和 Δt_3 分别如图6和图7所示。

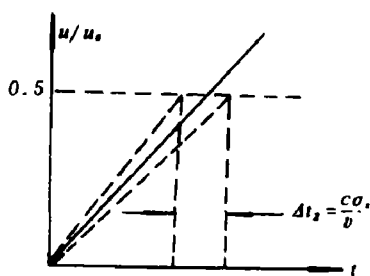


图6 测量光缝距离误差引进的时差

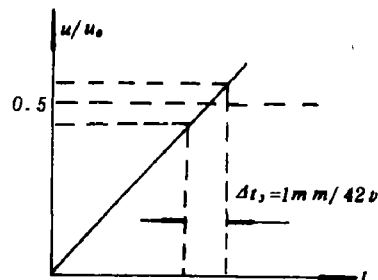


图7 切割电平的波动带来的时差

所以，由于信号前沿而带来的总时差为

$$\Delta t = \sqrt{\Delta \tau^2 + \Delta t_1^2 + \Delta t_2^2 + \Delta t_3^2} \quad (21)$$

根据(21)式，对几个典型速度的列表计算结果见表1。

(b). 施密特输出信号启动和关闭记时器所引进的时差。施密特的输出负载 $R_H < 2 K\Omega$ 。

表1

弹速 (mm/μs)	Δt (μs)	Δt_1 (μs)	$\Delta t_2 = \frac{C\sigma}{v}$ (μs)	$\Delta t_3 = \frac{0.2(m m)}{8.4 v}$ (μs)	$\Delta t = \sqrt{\Delta t^2 + \Delta t_1^2 + \Delta t_2^2 + \Delta t_3^2}$ (μs)
0.05	0.0044	0.0239	0.1020	0.4762	0.4876
0.10	"	"	0.0510	0.2381	0.2447
0.30	"	"	0.0170	0.0794	0.0848
0.50	"	"	0.0102	0.0476	0.0544
0.70	"	"	0.0073	0.0340	0.0424
1.00	"	"	0.0051	0.0238	0.0344
1.50	"	"	0.0034	0.0159	0.0292

传输电缆的电容为 62.7 pf ，故时间常数 $\tau = R \cdot C = 0.125 \mu\text{s}$ ，信号幅度为 14.5 V ，时间间隔测量仪的启动和关闭电平选为 6 V ，与前面计算方法相同。设信号上升到 6 V 时，所需的时间为 t ，则

$$6(V) = 14.5(1 - e^{-t/\tau})(V)$$

$$t = \tau \cdot \ln \frac{14.5}{8.5} = 0.0668(\mu\text{s}) \quad (22)$$

由于 R 和 C 的误差所带来的时差为 Δt_1 ，则

$$\Delta t_1 = t \times 6.4\% = 0.0043(\mu\text{s}) \quad (23)$$

据测量，输入给时间间隔测量仪的电压波动为 0.1 V ，设因此而带来的时差为 Δt_2 ，则

$$\Delta t_2 = t \cdot \ln \frac{6.1}{5.9} = 0.0022(\mu\text{s}) \quad (24)$$

所以此项误差为

$$\Delta t = \sqrt{\Delta t_1^2 + \Delta t_2^2} = 0.0048(\mu\text{s}) \quad (25)$$

3. 计时器本身的计时误差

时间间隔的测量最终是以计数器计数来实现的。计数器本身时标的准确度为 3×10^{-8} ，稳定度为 10^{-9} 量级，这两项指标都很高，故可忽略不计。我们测量中用的是 10 ns 时标，取误差为正负一个字即 $\Delta t = 20(\text{ns})$ 。

4. 传输线路的误差

经测试脉冲放大器的前沿上升时间为 40 ns ，按前沿是线性考虑，由此而带来的时差为

$$\Delta t = 40 \times \frac{1}{8.4 v} = 5(\text{ns}) \quad (26)$$

根据以上计算，测速精度的计算见表 2。

表-2

弹速 v ($\frac{m}{ms}$)	s_1 (mm)	Δs_1 (mm)	$\sigma_{s1} = \frac{\Delta s_1}{s_1}$ %	$t_1 = \frac{s_1}{v}$ (μs)	Δt_1^* (μs)	Δt_1^{**} (μs)	计算机 本身引 进的时差 Δt_3 (μs)	传输线 延迟引 进的时差 Δt_4 (μs)	Δt^{***} (μs)	$\sigma_{t2} = \frac{\Delta t}{t_1}$ %	测量精度 $\frac{\Delta D_1}{D_1} = \frac{\Delta t}{t_1} \sqrt{\sigma_{t1}^2 + \sigma_{t2}^2}$ %	s_2 (mm)	Δs_2 (mm)	$\sigma_{s2} = \frac{\Delta s_2}{s_2}$ %	$t_2 = \frac{s_2}{v}$ (μs)	$\sigma_{t2} = \frac{\Delta t}{t_2}$ %	测量精度 $\frac{\Delta D_2}{D_2} = \frac{\Delta t}{t_2} \sqrt{\sigma_{t1}^2 + \sigma_{t2}^2}$ %
0.05	19.575	0.012	0.0613	391.500	0.4876	0.0048	0.0200	0.0050	0.4881	0.1247	0.1390	12.319	0.014	0.1136	246.300	0.1981	0.2284
0.10	"	"	"	195.750	0.2447	"	"	"	0.2456	0.1255	0.1397	"	"	"	123.190	0.1994	0.2295
0.30	"	"	"	65.250	0.0848	"	"	"	0.0847	0.1339	0.1527	"	"	"	41.0633	0.2063	0.2355
0.50	"	"	"	39.150	0.0544	"	"	"	0.0584	0.1491	0.1612	"	"	"	24.6380	0.2370	0.2628
0.70	"	"	"	27.9843	0.0424	"	"	"	0.0474	0.1695	0.1802	"	"	"	17.5986	0.2693	0.2923
1.00	"	"	"	19.575	0.0344	"	"	"	0.0404	0.2063	0.2152	"	"	"	12.3190	0.3279	0.3470
1.50	"	"	"	13.050	0.0292	"	"	"	0.0361	0.2764	0.2831	"	"	"	8.2127	0.4396	0.4540

* 为信号前沿和切割电平波动所引进的时差(见表1)。

** 为施密特输出电压波动引进的时差(见公式(25))

*** $\Delta t = \sqrt{\Delta t_1^2 + \Delta t_2^2 + \Delta t_3^2}$

本系统在研制过程中得到组内一些同志的帮助。林俊德同志在系统的抗震、误差计算和测量精度等一些重要技术问题上提出了许多有益的建议,在此谨致谢意。

参 考 文 献

- (1) Wasley, R. J., et al., UCRL-51098 (1971)。
- (2) 复旦大学物理系编, 半导体线路, 上海人民出版社(1972), 312。
- (3) 肖明耀编, 实验误差估计与数据处理, 科学出版社(1978)。

A LASER SYSTEM FOR MEASURING THE PROJECTILE VELOCITY IN GAS GUN

Shi Youcheng Liu Fengqin

Abstract

A laser system for measuring the projectile velocity in gas gun is developed. It belongs to the non-touch type system, does not disturb the test object, and has a measuring accuracy better than 0.5%. The velocity measurable range is from several meters per second to 1.4 kilometers per second. This system is stable, reliable and quite simple in operation.

材料动态力学性能实验的一个 数据处理系统

田兰桥 白以龙

(1985年7月30日收到)

本文给出了用分段霍普金森压杆进行材料动态力学性能实验的一个数据采集及处理系统。实验中由应变传感器得到的信号由2MHz的A/D变换器记录下来,并存入磁带机,然后把信号通过A/D接口送入微处理机,最后经过计算机处理给出数据表形式的打印结果,并直接由绘图机画出实验材料的 $\sigma \sim \epsilon \sim \dot{\epsilon}$ 关系曲线。这种方法比过去所用的示波器照相法要快得多,而且提高了精度。

在材料动态力学性质的实验研究中有大量的数据采集和处理工作。过去的方法是观察者用眼睛或读数放大镜读出数据,再记录在纸上,多次机械的重复才可采集到一组数据。显而