

# 激光照明狭缝高速摄影系统及其应用\*

黄文云<sup>1,3</sup>, 黄鑫淼<sup>2</sup>, 刘君华<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 华东交通大学土木工程学院, 江西 南昌 330013;

3. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 为解决常规武器靶场全天候测量弹丸运动姿态问题, 利用激光技术和双镜头狭缝相机, 研制了一套改进型激光照明狭缝高速同步摄影系统。简述了系统的结构、技术指标与基本功能。阐明了常规弹丸速度测量原理, 讨论了速度测量的数据处理方法, 给出了动能子弹极限速度的定量数据, 并对速度数据的不确定度进行了分析。结果表明: 系统性能可靠, 测试精度高, 实现了常规靶场全天候测量。

关键词: 摄影测量与摇感技术; 狭缝相机; 速度测试; 不确定度; 弹丸

中图分类号: O389; TB853 国标学科代码: 420°2020 文献标志码: A

## 1 引言

双镜头狭缝相机由于其操作简单、摄影结果直观、后期处理方便, 已广泛应用于各种高速瞬变现象的测试及分析。在常规武器低伸弹道和大射角抛物线弹道试验中, 许多测试目标的速度高达上千米每秒, 甚至几千米每秒, 而且外弹道的初始弹道段和终点弹道段都有强烈的目标自闪光和烟雾, 对利用自然照明进行摄影的狭缝摄影机影响极大, 有时甚至导致摄影失败。为此, 我们采用狭缝相机配以静态激光光源组成激光照明狭缝高速摄影系统, 并进行了系统的实弹试验, 证实了激光照明狭缝高速摄影系统不仅能克服自然照明对狭缝摄影的制约, 而且降低了目标自闪光的干扰, 抑制了烟雾对摄影系统的影响, 既可对弹丸(包括火箭弹)的飞行姿态(章动角、章动周期及其速度)、着靶姿态(攻角及着靶速度)等参数进行记录和测量, 又可测量飞行弹丸转速曲线等<sup>[1]</sup>。

本文中以弹丸速度测量为例, 介绍了激光照明狭缝高速摄影系统组成、性能指标、主要用途及摄影原理, 并对速度数据的不确定度进行了分析。

## 2 系统组成

激光照明狭缝摄影系统主要由双镜头狭缝同步相机、激光照明光源、狭缝摄影控制器、激光启动靶及三脚支架等五部分组成<sup>[2]</sup>。

### 2.1 双镜头狭缝相机

双镜头狭缝同步相机的结构原理如图1所示, 它主要由相机主体、光学镜头、调焦系统、暗盒装置、胶卷盘、狭缝体、胶卷卡紧装置、直流电机、取景装置、快门装置、时标系统及支架等组成<sup>[2]</sup>。

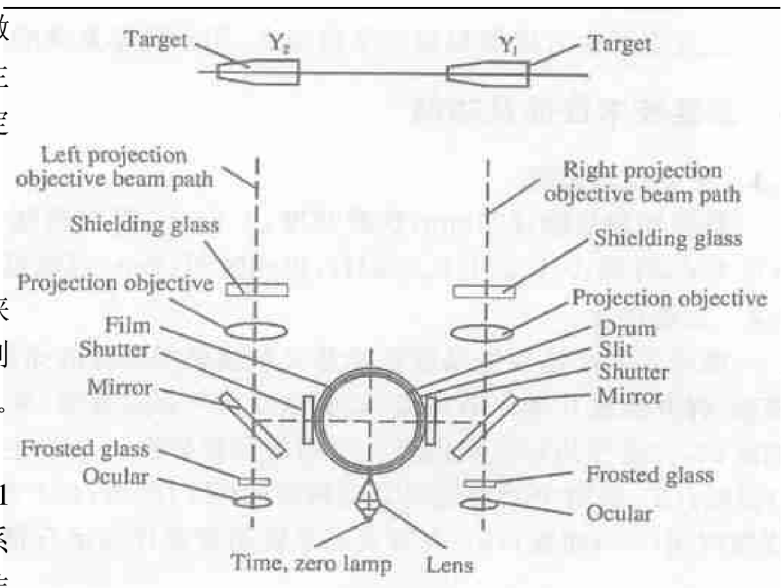


图1 双镜头狭缝相机结构原理

Fig.1 Principle of the dual-lens streak camera

\* 收稿日期: 2003-12-30; 修回日期: 2004-08-02

作者简介: 黄文云(1956—), 男, 博士, 高级工程师。

## 2.2 激光照明光源

激光照明光源主要由激光头、储能网络及控制箱等组成,为摄影系统提供全天候摄影光源,用以降低飞行体自闪光和其它杂光及烟雾的干扰。激光头为一台带有瞄准镜红宝石的激光器。储能网络由电感器和电容器等组成,为激光头提供能量。控制箱由靶信号接口、充电控制电路及弱电控制单元等组成,完成系统启动及控制<sup>[3]</sup>。

## 2.3 狭缝摄影控制器

狭缝摄影控制器以 PC104-386 为中央控制中心,外配控制逻辑电路、驱动电路、接口电路、显示电路、电机调速电路等。由时间标志系统、快门延时系统、电机调速系统、电源系统、键盘输入部分、显示部分等组成。用于完成电机调速、电机测速,实时胶片线速度显示,电机正/反转设置及启动/停止控制,快门和闪光灯的定时开启和关闭,实施时标、零点信号的打印,检测行程开关状态和步进电机位置状态,进行参数设置及与中心控制站进行双向通讯等。控制器结构原理如图 2 所示<sup>[4]</sup>。

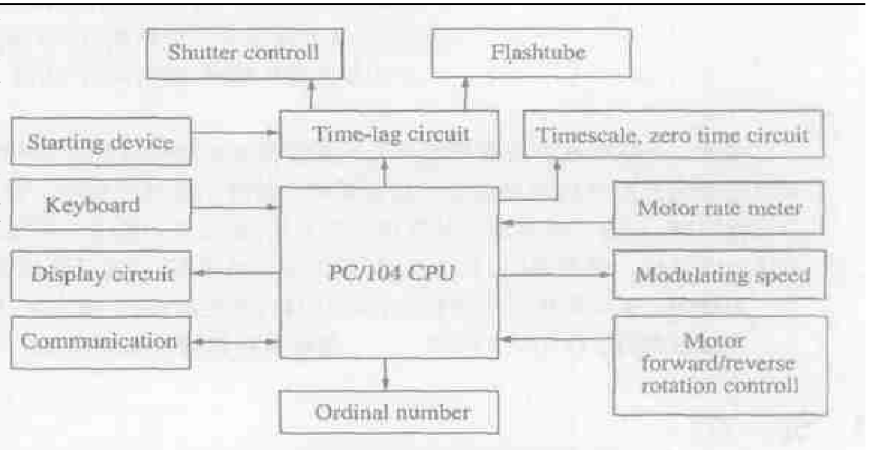


图 2 狭缝摄影电路控制原理框图

Fig. 2 Schematic drawing of the control of streak photography

## 2.4 激光启动靶

激光启动靶由半导体激光器、驱动电路、分光镜、柱面镜、原向反射屏、球面反射镜、主光电探测器、参考光电探测器、信号处理电路、转盘等组成。为靶场设备提供启动基准信号,或用作全天候飞行器速度测试装置<sup>[5]</sup>。

## 2.5 三角支架

三角支架由万向器和钢支架等组成,用于摄影系统的方位调节。

# 3 主要技术性能及功能

## 3.1 主要技术指标

摄影物镜焦距: 200mm; 狭缝宽度: 0.8mm; 额定转速: 4000r/min; 稳速精度:  $\leq \pm 1\%$ ; 摄影视场:  $2 \times 0.4\text{m}^2$ ; 时频: 0.5、2、4、8、20kHz; 出光时间: 8ms; 延时范围: (1 ~ 199)ms  $\pm 0.1\text{ms}$ 。

## 3.2 主要功能

激光照明高速狭缝摄影系统是为常规靶场配置的光测设备,用于常规弹丸或破片的空间姿态、着靶姿态、弹丸或破片爆炸破坏面积、引信发火与爆点深度、装药安全性、侵彻破坏效果、飞行器尾翼性能等的测试,为型号的研制提供真实可信的实验数据。系统主要功能是: (1) 提供初始弹道段速度时间( $v-t$ )曲线; (2) 提供中间弹道段章动角时间( $\beta-t$ )曲线; (3) 提供转速时间( $\omega-t$ )曲线; (4) 提供终点弹道段攻角时间( $\delta-t$ )曲线; (5) 观察武器系统重要部件的运行情况和损伤程度。

# 4 系统工作原理

激光狭缝摄影系统分单台工作方式和多台工作方式,本文中仅以单台工作方式为例阐明其工作原理。在弹丸或破片发射前,首先由控制器键盘输入预置参数,摄影控制器控制双镜头狭缝相机提前启动,达到预定转速时弹丸或破片发射;当弹丸或破片飞越激光启动靶时,激光启动靶输出断通信号使光电隔离抗干扰装置的闪光灯闪光;光电耦合电路利用闪光灯的光产生电脉冲触发照明激光器,使激光器

开始泵浦, 经过预定延时后, 激光器输出光脉冲照亮视场, 这时弹丸或破片也刚好进入视场, 激光束将弹丸或破片投影到阴影屏上; 随后, 运动的弹丸或破片以速度  $v_1$  和  $v_2$  从上向下由两套物镜系统先后成像后, 其影像以速度  $v_1'$  和  $v_2'$  依次进入两个狭缝后从头至尾移动, 胶片以相近的速度连续感光, 在胶片上形成两个完整的弹丸或破片的影像。利用胶片判读仪对影像进行处理, 便可获得飞行弹丸或破片的空间姿态: 章动角(偏航角)、章动周期、飞行速度、转速或转角, 着靶姿态: 攻角(俯仰角或高低角)和着靶速度等参数, 并能定性地观察弹丸或破片的外部特征以及零部件工作可靠性<sup>[2]</sup>。以上过程如图 3 所示。

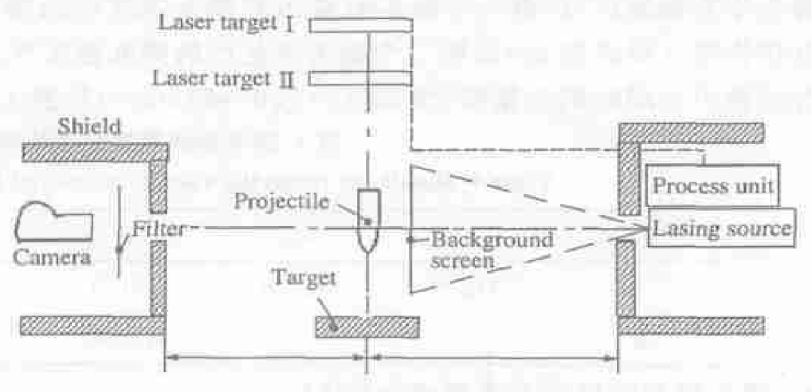


图 3 系统工作原理示意图  
Fig.3 Schematic view of the working system

### 5 在动能子弹极限速度实验中的应用

#### 5.1 摄影测量原理及现场布置

用激光狭缝高速摄影系统测量动能子弹极限速度现场布置如图 3 所示, 其摄影测量原理如下。火炮射击前, 先让电机驱动转鼓外表面的胶片运动速度达到预定值  $v_f$ , 即

$$v_f \approx vf / (a - f) \tag{1}$$

式中:  $v$  为弹丸飞行速度预计值,  $f$  为镜头焦距,  $a$  为物距<sup>[6]</sup>。在弹丸飞过激光启动靶时, 激光启动靶给出一个信号, 经一段延迟时间  $t_d$  后, 由狭缝相机电控仪打开快门, 并启动时标以预置的频率  $f_c$  闪亮。当弹丸进入狭缝相机视场时, 其影像将被胶片前的狭缝光阑依次切割为狭长的连续小单元, 并分时曝光在胶片上。这些依次连续曝光的小单元组合成弹丸的整体图像记录。从快门打开起, 到转鼓旋转一周(胶片已全部曝光完毕)时关闭快门, 并停止时标灯闪光。此时在胶片上即记录了弹丸经过两个视场的两个潜影, 经冲洗后就得出带有时标点和弹丸影像的底片, 如图 4 所示。

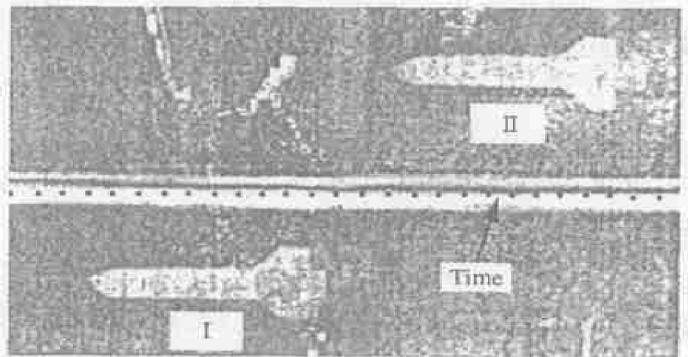


图 4 弹丸在胶片上的两个影像和对应时间  
Fig.4 Two photographic images of the projectile on the film and their corresponding time

#### 5.2 极根速度的判读与处理

图 4 是采用激光狭缝摄影机进行弹丸飞行速度测量的一次实际拍摄的图像。利用 GP-99 判读仪对图 4 进行判读, 可以求出与影像 I 对应的弹丸速度  $v_1$ 、弹丸飞过两个镜头间距的速度  $v_2$  及与影像 II 对应的弹丸速度  $v_3$ <sup>[2]</sup>

$$v_1 = L / (n_1 T), \quad v_2 = l / (\Delta t), \quad v_3 = L / (n_2 T) \tag{2}$$

式中:  $L$  为实弹长度;  $T$  为时标周期;  $l$  为两个镜头间的距离;  $n_1$ 、 $n_2$  分别为影像 I、II 的弹长所对应的时标周期个数;  $\Delta t$  为飞行弹丸经过两个镜头间距的时间。

由图 3、图 4 可见, 采用双镜头高速狭缝同步摄影技术, 通过对摄影图像的判读, 可以得到运动目标飞行过程测量的一系列数据。一般地, 可以采用以炮口线到第一台激光靶之间的距离作为基线长测量弹丸出炮口的初速  $v_0$ ; 以两台激光靶之间的距离作为基线长测量弹丸飞越两台激光靶的第 2 段速度

$v_6$ ;以第一台激光靶到狭缝相机第一个镜头视场中心的距离作为基线长测量弹丸运动的第 3 段速度  $v_3$ ;以弹长作为基线长,以第一个镜头测量出的弹丸速度作为第 4 段速度  $v_4$ ;以弹丸通过两个镜头之间的速度作为第 5 段速度  $v_5$ ;以第二个镜头测量出的弹丸速度作为第 6 段速度  $v_6$ 。由上述测量得到的弹丸飞行过程中不同时刻的速度(预报值为 790~830m/s)如表 1 所示<sup>[7]</sup>。

表 1 激光狭缝相机测量的弹丸速度  
Table 1 Results of projectile velocity measured by the laser streak camera m/s

影像	$v_0$	$v_6$	$v_3$	$v_4$	$v_5$	$v_6$
I	813.0	812.3	811.0	809.7	808.4	824.4
II			822.4	815.7	822.4	807.1

### 5.3 弹丸速度数据的不确定度分析<sup>[6,8]</sup>

弹丸速度数据的不确定度通常是指弹丸速度在某个量值范围内不能肯定的程度,一般用极限误差表示。弹丸速度数据的不确定度包括两部分:弹丸本身的散布和测速误差。在常规武器靶场试验中,弹丸速度的散布一般采用概率误差  $\hat{E}_v$  表示速度的散布,即采用公式

$$\hat{E}_v = 0.6745 \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} \quad (3)$$

式中: $v_i$  为瞬时速度, $\bar{v}$  为平均速度。但是,弹丸速度数据的不确定度还应计入测量过程中系统误差的影响。文献[6]提供的不确定度合成公式为

$$U_v = K_v \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta v_i}{K_i}\right)^2 + \sum_{j=1}^m \sigma_j^2} \quad (4)$$

式中: $\Delta v_i$  为由物理数学方法计算出的误差, $\sigma_j$  为用统计方法得到的误差。若将各种误差的置信系数  $K_v$ 、 $K_i$  均取为 3,则(4)式可写成

$$U_v = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta v_i)^2 + \sum_{j=1}^m (3\sigma_j)^2} \quad (5)$$

将弹丸速度的误差换算成极限误差  $\Delta v$ ,将(3)式中由贝塞尔公式计算出的弹丸速度的散布换算为极限误差  $3\hat{\sigma}_v$ ,由(5)式可得

$$U_v = \sqrt{(\Delta v)^2 + (3\hat{\sigma}_v)^2} \quad (6)$$

(6)式即为弹丸速度数据不确定度的计算公式。若用狭缝同步摄影机测速,则有

$$\Delta v = \bar{v} (|\Delta L|/L + |\Delta T|/T) \quad (7)$$

由于弹丸速度总体数学期望的无偏估计就是其子样数据的算术平均值,因此可由表 1 计算出弹丸平均速度

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i = \frac{1}{10} (824.4 + 822.4 + 815.7 + 813.0 + 811.0 + 812.3 + 808.4 + 807.1 + 809.7 + 822.4) = 814.6 \text{ m/s}$$

由贝塞尔公式,得

$$\hat{\sigma}_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2} = 6.31 \text{ m/s}$$

故

$$\hat{E}_v = 0.6745 \hat{\sigma}_v = 4.26 \text{ m/s}$$

由(7)式,得

$$\Delta v = \bar{v} (|\Delta L|/L + |\Delta T|/T) = 1.26 \text{ m/s}$$

将以上数据代入(6)式,由于  $(3\hat{\sigma}_v)^2 \gg (\Delta v)^2$ ,得到弹丸速度数据的不确定度

$$U_v = \sqrt{(\Delta v)^2 + (3\hat{\sigma}_v)^2} \approx \pm 20 \text{ m/s}$$

所以, 弹丸初速度数据的不确定度约为  $\pm 20\text{m/s}$ 。

## 6 结 论

(1) 通过多次靶场实弹试验, 证明了激光狭缝摄影系统工作正常、可靠, 胶片图像清晰, 零点、时标等点阵信息清楚, 为常规靶场全天候测试弹丸或破片的飞行姿态、着靶姿态提供了先进、便捷、可靠和实用的测试方法, 提高了靶场的测试能力。

(2) 狭缝同步摄影法为测量同一弹丸在其飞行轨迹上的速度衰减值提供了技术途径。

## 参考文献:

- [1] 黄文云. 激光狭缝摄影胶片图像信息判读处理技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
- [2] 李贵. XF-82型双镜头狭缝同步摄影机使用说明书[R]. 西安: 中国兵器工业第二〇三研究所, 1985.
- [3] 静态激光器使用说明书[R]. 西安: 中国兵器工业第二〇三研究所, 2001.
- [4] XF-2000型狭缝高速摄影机控制箱使用说明书[R]. 西安: 中国兵器工业第二〇三研究所, 2001.
- [5] 激光启动靶使用说明书[R]. 西安: 中国兵器工业第二〇三研究所, 2003.
- [6] 刘世平. 弹丸速度测量与数据处理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1994: 32—49; 197—199.
- [7] GP-99型胶片判读仪使用说明书[Z]. 西安: 中科院西安光机所, 2002.
- [8] 谭显祥. 高速扫描相机时间测量不确定度分析[J]. 光子学报, 2002, 31(4): 1387—1390.  
TAN Xian-xiang. The uncertainty analysis of the measurement results of high speed rotating mirror streak camera[J]. Acta Photonics Sinica, 2002, 31(4): 1387—1390.

## Application of a high speed streak synchronized camera system with laser illumination

HUANG Wen-yun<sup>1,3\*</sup>, HUANG Xin-miao<sup>2</sup>, LIU Jun-hua<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University,  
Xi'an 710049, Shaanxi, China;

2. College of Civil Engineering, East China Jiaotong University,  
Nanchang 330013, Jiangxi, China;

3. The Third Research Institute of Engineering Corps, General Staff PLA,  
Luoyang 471023, Henan, China)

**Abstract:** To measure the moving posture of the projectile in an all-weather shooting range for conventional weapon, an improved high speed streak camera system was developed by the usage of laser illumination and dual-lens photographic technique. The structure, technical parameter and fundamental function of the system has been briefly explained. The measurement of bullet velocity is described in detail. The velocity data are presented, and the uncertainty of the measurement is analyzed.

**Key words:** photogrammetry and remote sensing technique; streak camera; velocity measurement; uncertainty; projectile

---

\* Corresponding author: HUANG Wen-yun

E-mail address: hwy1bh2003@yahoo.com.cn

Telephone: 0379-5986478