

文章编号:1002-2082(2020)02-0282-06

# 基于激光阴影照相系统的研究

史元元, 冯斌, 张文博, 胡磊, 杨曼曼

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710032)

**摘要:** 针对目前高速弹丸飞行参数测量系统采用被动光源存在的光源能量利用率低、对环境敏感等问题, 研究了一种组合式主动激光阴影照相系统。在对系统理论分析的基础上建立了高速弹丸的空间位置模型和 2 种测速模型。搭建了激光阴影照相系统试验平台, 对系统设计的合理性进行了检验。试验结果表明: 2 种测速模型都能实现对弹丸飞行速度的测量, 并且 2 种方法的对比误差比较小; 弹丸空间位置在 X 轴方向的均方差为 0.795 mm, 在 Z 轴方向的均方差为 0.496 mm。与纸靶的测量结果相比, 偏离程度在 1 mm 范围内; 该系统能够实现对弹丸飞行参数的测量。

**关键词:** 武器系统与工程; 激光阴影照相; 测速模型; 测量误差

中图分类号: TN7; TJ410.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0201008

## Research on laser shadow photography system

SHI Yuanyuan, FENG Bin, ZHANG Wenbo, XU Lei, YANG Manman

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low energy utilization and environmental sensitivity of passive light source adopted in high-speed projectile flight parameter measurement system, a combined active laser shadow photography system was studied. Based on the theoretical analysis of the system, the space position model and two velocity measurement models of high-speed projectile were established. The experimental platform of laser shadow photography system was built and the rationality of the system design was tested. The test results show that the both models can measure the flight speed of projectile, and the comparison error between the two methods is small. The mean square deviation of the projectile space position in X-axis is 0.795 mm and that in Z-axis is 0.496 mm. Compared with the results of paper target, the deviation degree is within 1 mm, and the system can measure the flight parameters of the projectile.

**Key words:** weapon system and engineering; laser shadow photography; velocity measurement model; measurement error

## 引言

在武器弹药测试领域, 高速弹丸的飞行速度、空间位置、飞行姿态等是其需要测量的重要参数, 特别是在高新武器的研制和测试阶段, 精确地获取弹丸的飞行参数完成对武器弹药系统的评估非常重要<sup>[1-3]</sup>。目前, 高新武器呈现出高速度、高精确、高损害等新的特点, 传统的高速摄影机、光电经纬仪等非接触式测量系统已经不能适应新型武器弹药的测试需求<sup>[4-6]</sup>。高速 CCD 相机因其具有分

辨率高、响应快等优点已经成为一种记录弹丸飞行参数的主要设备<sup>[7]</sup>。将高速 CCD 相机和激光光源相结合可以“冻结”高速弹丸, 在一帧图像上留下同一个弹丸的多个阴影图像<sup>[8]</sup>。目前多采用相机一直曝光, 被动式激光光源间隔闪烁的方法来获取一个弹丸的多个阴影图像, 但是这种方法会产生光能量利用率低、光照不均匀、光路难调节等现象<sup>[9-12]</sup>。为了解决利用被动式光源测量存在的问题, 本文将研究基于高速 CCD 相机的激光阴影照

收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2019-12-19

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2017GY-026)

作者简介: 史元元 (1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事光电测试计量技术及仪器研究。E-mail: syyx4@163.com

相系统, 采用了一种组合式主动激光光源进行照明, 利用时序控制装置控制激光器闪烁和相机曝光而实现对高速弹丸的“冷冻”, 进而获取弹丸的阴影图像<sup>[13-15]</sup>。文中主要研究了系统的构成和工作原理, 建立了弹丸空间位置和飞行速度的数理模型, 并搭建了激光阴影照相系统的测试模型; 其测试结果表明该系统能够满足对高速弹丸运动参数的测量。

## 1 系统组成和工作原理

### 1.1 系统的结构组成

基于激光阴影照相技术的测速系统主要包含5个组成部分, 如图1所示。在激光阴影照相系统的前端放置有光幕靶测速及触发装置, 它是由两对红外发射装置和接收装置组成, 其中相对靠近枪口的红外光幕I同时起着触发作用。当弹丸穿过红外光幕I时, 输出的触发信号控制时序装置控制CCD相机和激光器光源在相应的时间段内曝光和闪烁, 实现对弹丸飞行姿态的捕捉。2台CCD相机拍摄的弹丸图像存储在上位机里, 最后通过相关图像算法处理后得到弹丸的飞行参数。

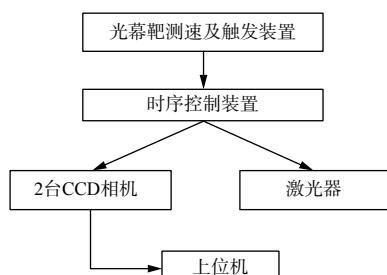


图1 激光阴影照相系统框图

Fig. 1 Block diagram of laser shadow photography system

### 1.2 系统的工作原理

基于激光阴影照相系统工作原理图如图2所示, 弹丸穿过红外光幕I时输出一个代表弹丸穿过靶面的脉冲信号, 穿过光幕II时, 也会输出一个脉冲信号, 根据2个光幕之间的距离和2个脉冲信号的时间间隔就可以计算出弹丸的飞行速度。而在弹丸穿过光幕I时, 输出的脉冲信号同时也是时序控制装置的触发信号, 当控制装置收到触发信号时启动2台正交CCD相机和激光器, 时序控制装置通过控制2台正交CCD相机的曝光时间和激光器的闪烁时间间隔来实现对弹丸

飞行姿态的捕获。当激光器停止闪烁后, 2台正交CCD相机将不再曝光, 此时在每台CCD相机上捕获了至少2幅弹丸阴影图像。将拍摄到的图像传送至上位机, 利用图像处理和相关算法可得到弹丸的实时空间位置, 根据弹丸在阴影图像中的位置以及激光器的闪烁时间来计算弹丸的飞行速度。

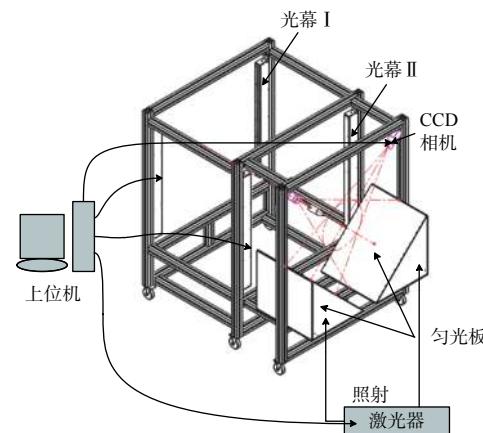


图2 激光阴影照相系统工作原理图

Fig. 2 Working principle of laser shadow photography system

## 2 弹丸空间位置求解模型

以弹丸的质心为弹丸空间位置, 设弹丸质心为P, 当弹丸穿过CCD相机有效视场时, 在左右2台相机上分别留下质心P的像点为 $P_1$ 、 $P_2$ , 其空间关系图如图3所示。

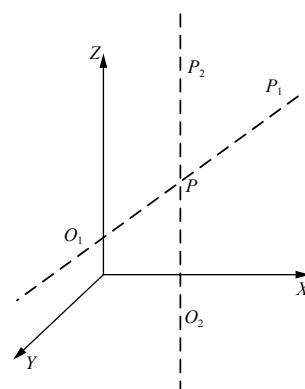


图3 弹丸空间位置关系图

Fig. 3 Relation diagram of projectile spatial position

假设质心点P在基准坐标系下的坐标为 $P(x, y, z)$ , 其像点在基准坐标系下的坐标分别为

$P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 。图中  $O_1$ 、 $O_2$  两个固定点为相机主点, 其坐标分别为  $O_1(x_{o1}, y_{o1}, z_{o1})$ 、 $O_2(x_{o2}, y_{o2}, z_{o2})$ , 则根据图 3 中的空间关系, 弹丸的空间位置  $P$  为 2 条射线  $O_1P_1$  和  $O_2P_2$  的交点。

结合图 3 根据空间直线方程的表达形式, 选用两点式方程对弹丸的空间位置进行求解, 则射线  $O_1P_1$  的直线方程为

$$\frac{x - x_1}{x_1 - x_{o1}} = \frac{y - y_1}{y_1 - y_{o1}} = \frac{z - z_1}{z_1 - z_{o1}} \quad (1)$$

射线  $O_2P_2$  的直线方程为

$$\frac{x - x_2}{x_2 - x_{o2}} = \frac{y - y_2}{y_2 - y_{o2}} = \frac{z - z_2}{z_2 - z_{o2}} \quad (2)$$

将(1)和(2)式写成线性方程的形式:

$$\begin{cases} (z_1 - z_{o1})x - (x_1 - x_{o1})z = x_1(z_1 - z_{o1}) - z_1(x_1 - x_{o1}) \\ (z_1 - z_{o1})y - (y_1 - y_{o1})z = y_1(z_1 - z_{o1}) - z_1(y_1 - y_{o1}) \\ (z_2 - z_{o2})x - (x_2 - x_{o2})z = x_2(z_2 - z_{o2}) - z_2(x_2 - x_{o2}) \\ (z_2 - z_{o2})y - (y_2 - y_{o2})z = y_2(z_2 - z_{o2}) - z_2(y_2 - y_{o2}) \end{cases} \quad (3)$$

将(3)式写成一般矩阵的形式:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由(3)式可以看出, 该方程组的方程数有 4 个, 未知数有 3 个, 方程的个数大于未知数的个数, 故该方程组是一个矛盾方程组, 利用最小二乘法求解得到弹丸的近似空间位置  $P(x, y, z)$ 。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 A_{i1}^2 & \sum_{i=1}^4 A_{i1}A_{i2} & \sum_{i=1}^4 A_{i1}A_{i3} \\ \sum_{i=1}^4 A_{i1}A_{i2} & \sum_{i=1}^4 A_{i2}^2 & \sum_{i=1}^4 A_{i2}A_{i3} \\ \sum_{i=1}^4 A_{i1}A_{i3} & \sum_{i=1}^4 A_{i2}A_{i3} & \sum_{i=1}^4 A_{i3}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} & A_{41} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} & A_{42} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} & A_{43} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 3 弹丸速度求解模型

弹丸速度是分析武器和弹药性能的一个重要指标, 目前弹丸飞行速度主要采用间接法进行测量, 即速度通过距离和时间的比值来表达。在理论研究过程中, 只有弹丸沿着弹道线方向做匀速运动时, 才能将平均速度当作弹丸穿过某点的瞬时速度。但地球上的飞行物体都会受到地心引力和空气阻力的影响, 弹丸发射后由于受到这 2 个力的作用, 实际弹丸的飞行速度呈减速且飞行轨迹呈抛物线。为了简化理论模型, 假设弹丸不受地心引力和空气阻力的影响, 弹丸则沿着弹道线方向做匀速运动, 且轨迹与地面平行。

在该系统中获取弹丸速度的方法主要有 2 种: 1) 通过光幕靶测速及触发装置获取弹丸穿过 2 个光幕的平均速度; 2) 根据 CCD 相机拍摄到弹丸阴影图像和激光器闪烁的时间间隔计算弹丸在 CCD 有效视场范围内的平均速度。

#### 3.1 红外光幕靶测速模型

红外光幕靶用于测速时, 2 个光幕和弹道之间的几何关系如图 4 所示。光幕 I 和光幕 II 两个探测平面相互平行且垂直于弹道轨迹。设 2 个光幕之间的距离为  $S$ , 弹丸穿过光幕 I 和光幕 II 的时间分别为  $t_1, t_2$ , 则弹丸速度可由公式(6)计算

得到。

$$V = \frac{S}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

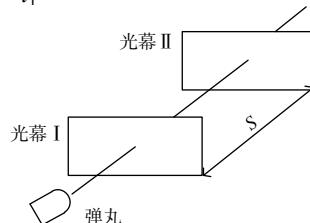


图 4 光幕靶测速示意图

Fig. 4 Schematic diagram of velocity measurement on light screen target

#### 3.2 激光阴影照相测速模型

假设弹丸分别在 2 个正交 CCD 相机的视场上留下了 3 个阴影图像, 将代表 3 个弹丸空间位置的点抽象成平面图, 如图 5 所示。

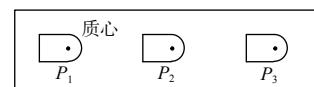


图 5 弹丸阴影图像

Fig. 5 Projectile shadow image

利用空间 2 点的距离公式和速度公式, 可以求出弹丸在相机有效视场范围内的平均速度, 现假

设激光器的闪烁间隔为  $T$ 、 $P_1, P_3$  两个点的空间三维坐标分别为  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $P_3(x_3, y_3, z_3)$ , 则  $P_1, P_3$  两点间的速度可由公式(7)进行计算得到。

$$V = \frac{S}{t} = \frac{S}{2T} \quad (7)$$

式中  $S = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2}$ 。

#### 4 试验分析

整个测试试验系统如图 6 所示, 为了验证该系统的可行性和测试结果的正确性, 搭建实验样机进行了模拟测试, 并在系统后竖立一个垂直于弹道线的纸靶。整个系统的结构框架参数为: 长  $\times$  宽  $\times$  高 = 1 300 mm  $\times$  500 mm  $\times$  1 300 mm, 红外光幕测速及触发装置中 2 个光幕前后相距  $S=1\ 500\ mm$ 。



图 6 系统测试试验图

Fig. 6 Diagram of system test

弹丸的飞行速度主要通过上述章节提出的 2 种方法来测量, 对于弹丸目标的识别, 本文采用了 Pytorch 深度学习框架, 由于一帧图像上捕捉同一弹丸的 2 个阴影图像, 就能计算弹丸的飞行速度, 所以在进行测量时利用时序控制激光器进行 2 次闪烁。随机选取 2 张弹丸目标的识别结果, 如图 7 所示。飞行速度试验结果的数据及对比如表 1 所示。



图 7 弹丸飞行速度目标识别结果

Fig. 7 Target recognition results of projectile flight velocity

表 1 弹丸飞行速度数据对比

Table 1 Comparisons of projectile flight velocity data

序号	方法1/(m/s)	方法2/(m/s)	误差 $ \Delta V /(m/s)$
1	80.5	80.1	0.4
2	83.2	82.7	0.5
3	87.5	87.2	0.3
4	84.7	84.4	0.3
5	86.3	86.1	0.2
6	82.5	81.9	0.6
7	83.9	83.6	0.3
8	85.1	84.6	0.5
9	84.2	83.8	0.4
10	86.2	85.9	0.3

在测量弹丸的空间位置时, 激光器进行 1 次闪烁就可以满足弹丸空间位置坐标计算。随机进行 10 次试验, 选取了 2 张弹丸目标的识别结果, 如图 8 所示。系统输出弹丸的空间坐标和坐标靶纸读取的弹丸坐标对比结果, 如表 2 所示。

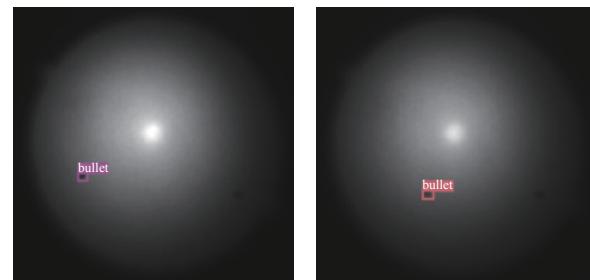


图 8 弹丸空间位置目标识别结果

Fig. 8 Target recognition results of projectile spatial position

表 2 弹丸空间位置结果对比

Table 2 Comparison of projectile spatial position results

序号	测量坐标/mm	靶纸坐标/mm	误差 $ \Delta /mm$
1	(840.3, 261.4, 491.6)	(843.2, 500, 488.9)	(2.9, 2.7)
2	(802.8, 260.1, 543.5)	(805.1, 500, 545.1)	(2.3, 1.6)
3	(810.6, 267.5, 549.4)	(807.9, 500, 551.4)	(2.7, 2.0)
4	(705.2, 265.4, 425.3)	(708.4, 500, 423.8)	(3.2, 1.5)
5	(767.1, 270.3, 500.2)	(765.5, 500, 501.6)	(1.6, 1.4)
6	(732.7, 268.4, 353.7)	(730.3, 500, 354.6)	(2.4, 0.9)
7	(723.9, 265.1, 185.1)	(727.0, 500, 186.9)	(3.1, 1.8)
8	(718.8, 254.3, 256.3)	(722.2, 500, 257.5)	(3.4, 1.2)
9	(743.4, 269.3, 279.1)	(740.9, 500, 278.1)	(2.5, 1.0)
10	(703.2, 266.7, 434.7)	(703.8, 500, 436.3)	(0.6, 1.6)

从表 1 可知, 利用激光阴影照相技术的测速方法能够实现对飞行弹丸的测量, 且与传统测速方法对比误差较小。在激光阴影照相系统后面竖立纸靶时, 纸靶平面与  $Y=500\text{ mm}$  的平面重合, 因此在表 2 中仅对  $X$  轴和  $Z$  轴方向的误差进行分析。从表 2 的数据可知弹丸空间位置的偏移误差最大不超过  $3.5\text{ mm}$ 。在  $X$  轴方向的均方差为  $0.795\text{ mm}$ ; 在  $Z$  轴方向的均方差为  $0.496\text{ mm}$ 。均方差不超过  $1\text{ mm}$ , 说明采用该系统的测量值与真值(靶纸测量值)非常接近, 进一步证明该系统能够满足对弹丸的测试要求。

## 5 结论

本文研究了用于测量弹丸运动参数的激光阴影照相系统, 该系统由激光器、高分辨率 CCD 相机、匀光板、箱体结构等构成。根据系统的工作原理, 建立了弹丸空间位置模型和 2 种测速模型。在理论基础上, 搭建试验装置完成了对该系统的可行性测试。通过随机 10 次的对比试验, 其测量误差最大偏差为  $3.4\text{ mm}$ 。在  $X$  轴和  $Z$  轴的均方差不超过  $1\text{ mm}$ , 误差的偏离程度非常低。证明了该系统可以克服被动式光源存在的光路难调节、光照不均匀的问题, 实现对弹丸飞行参数的测量。

## 参考文献:

- [1] SUN Qiangfei. Research on the measurement method of projectile motion posture parameters based on high-speed imaging technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2018.  
孙强飞. 基于高速成像技术的弹丸运动位姿参数测量方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [2] HUA Daozhu. Research on large area high speed nonlinear optical microscopic imaging technology and its application[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.  
华道柱. 大面积高速非线性光学显微成像技术以及应用的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [3] ZHU Yunchao. Research on laser target recognition technology[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2016.  
朱云超. 激光立靶目标快速识别技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2016.
- [4] YEGOROV A D, YEGOROV V A, YEGOROV S A. Dynamic range of CCD photosensors for atomic-emission analyzers[J]. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2019, 86(3): 443-448.
- [5] GUO Qiang, WANG Yuxi, CHEN Hongwei, et al. The principle and application of high speed single pixel imaging technology[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2017, 18(9): 1261-1268.
- [6] DU Huimin, GU Wenning, ZHANG Xia. Efficient implementation of deep learning classification algorithm based on FPGA[J]. *Computer Engineering&Design*, 2019, 40(12): 3425-3430.  
杜慧敏, 顾文宁, 张霞. 基于FPGA的深度学习分类算法高效实现[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(12): 3425-3430.
- [7] REN S, GIRSHICK R, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [8] AKSHATA K, JOEL V, SARA S, et al. Precision characterization of the TESS CCD detectors: quantum efficiency, charge blooming and undershoot effects[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 160: 46-55.
- [9] KOZLITIN I A. The restoration of input parameters of an exterior ballistic solution by the results of body movement trajectory measurement[J]. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2018, 10(2): 226-236.
- [10] SUN Zhenya. Research on key technologies of high integration modular CCD imaging system[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optical Precision Machinery and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019.  
孙振亚. 高集成度模块化CCD成像系统关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
- [11] AMORESE A, LANGINI C, DELLEA G, et al. Enhanced spatial resolution of commercial soft X-ray CCD detectors by single-photon centroid reconstruction[J]. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A*, 2019, 935: 227-231.
- [12] YANG Dongxu. Research on ASIC technology in high-speed data transmission system and scientific-level CCD imaging system[D]. Hefei: China University of Science and Technology, 2018.  
杨东旭. 专用集成电路技术在高速数据传输系统与科学级CCD成像系统中的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.

- [ 13 ] LIU Shenggang. Development of image acquisition system for high-speed sequences laser shadow imaging system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2016.  
刘胜刚. 高速八序列激光阴影成像仪图像采集系统的开发[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [ 14 ] ZHOU D, LUO Z, FANG M, et al. Numerical calculation of particle movement in sound wave fields and experimental verification through high-speed photography[J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 2245-2250.
- [ 15 ] ZHANG Yi. Design and implementation of a universal test system for scientific-level CCD controllers[D]. Hefei: China University of Science and Technology, 2019.  
张毅. 面向科学级CCD控制器的通用测试系统的设计与实现[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.