

文章编号: 1002-2082 (2021) 01-0125-06

# 圆形阵列光电探测系统双目标识别方法

高丰佳<sup>1</sup>, 董涛<sup>1</sup>, 谭林秋<sup>1</sup>, 开百胜<sup>2</sup>

(1. 西安工业大学 陕西省光电测试与仪器技术重点实验室, 陕西 西安 710021;

2. 中国兵器工业集团有限公司 黑龙江北方工具有限公司, 黑龙江 牡丹江 157000)

**摘要:** 针对双弹丸同时着靶情况下的立靶坐标测量问题, 提出一种圆形阵列光电探测系统的双目标识别方法。采用光电探测器件组成1个圆形的探测阵列, 并将3个发光角度均为60°的扇形一字线激光器均匀设置于圆形探测阵列上组成探测光幕。当2发弹丸同时穿过探测光幕时, 会在圆形探测阵列上产生6个弹丸投影, 通过信号处理电路识别6个弹丸投影的中心位置, 最后通过系统弹丸着靶坐标测量公式计算得到2发弹丸的着靶坐标。在对系统测量原理进行论述的基础上, 建立了系统的弹丸着靶坐标测量模型, 并对坐标测量误差进行了分析和仿真。仿真结果显示, 系统在测量靶面为1 m×1 m时的X坐标测量误差标准差最大为2.7 mm, Y坐标测量误差标准差最大为0.6 mm。实验结果表明, 系统在测量靶面为1 m×1 m时的X坐标测量误差标准差为2.22 mm, Y坐标测量误差标准差为1.98 mm。因此, 该文所提出的系统可以有效测量弹径4.5 mm及其以上的双弹丸着靶坐标。

**关键词:** 靶场测试; 弹丸; 着靶坐标; 立靶; 双目标

中图分类号: TN958

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202142.0103005](https://doi.org/10.5768/JAO202142.0103005)

## Dual targets identification method for circular array photoelectric detection system

GAO Fengjia<sup>1</sup>, DONG Tao<sup>1</sup>, TAN Lingqiu<sup>1</sup>, KAI Baisheng<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Province Key Laboratory of Photoelectric Measurement and Instrument Technology, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. Heilongjiang North Tool Co., Ltd., China North Industries Group Corporation Limited, Mudanjiang 157000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of vertical target coordinate measurement when two projectors were touching the target at the same time, a two-target identification method of circular array photoelectric detection system was proposed. A circular detection array was formed by using photodetectors, and three fan-shaped linear lasers with all luminescence angles of 60° were uniformly arranged on circular detection array to form a detection light curtain. When the two projectiles passed through detection light screen at the same time, six projectiles would be generated on the circular detection array. The central position of the six projectiles would be identified through the signal processing circuit. Finally, the target coordinates of two projectiles would be calculated by system projectile hitting coordinate measurement formula. On the basis of the theory of system measurement, the coordinate measurement model of the projectile hitting target was established, and the coordinate measurement error was analyzed and simulated. The simulation results show that the maximum standard deviation of the X coordinate measurement error is 2.7 mm and the maximum standard deviation of the Y coordinate measurement error is 0.6 mm when the target surface is 1 m×1 m. The experimental results show that the standard deviation of X coordinate measurement error is 2.22 mm and Y coordinate measurement

收稿日期: 2020-09-11; 修回日期: 2020-11-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61905187); 陕西省自然科学基金基础研究计划基金项目 (2019JM-601)

作者简介: 高丰佳 (1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事光电靶场测试技术研究。E-mail: [1093788469@qq.com](mailto:1093788469@qq.com)

导师简介: 董涛 (1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事兵器外弹道参数光电测试研究。E-mail: [dongtao80@126.com](mailto:dongtao80@126.com)

error is 1.98 mm when the target surface is  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ . Therefore, the system proposed can effectively measure the target coordinates of double projectors with a projectile diameter of 4.5 mm or above.

**Key words:** shooting range test; projectile; impacting coordinate; vertical Target; dual-object

## 引言

在枪、炮、弹的研制和生产中,弹丸着靶密集度是评估武器杀伤效能优劣的重要指标,而武器系统射击密集度的测量一般是通过先对弹丸着靶坐标的测量,进而通过相应密集度公式计算而来的<sup>[1-2]</sup>。对于单发武器和低射频连发武器,其弹丸着靶坐标采用现有的各种自动化测量方法不难进行测量;而对于多管齐射武器和高射频转管武器,在测量其弹丸着靶坐标时,往往存在2发弹丸同时着靶的情况。针对弹丸着靶坐标的测量,传统的方法为木板靶或网靶法,靶板法不能识别重孔,对于连发射击不能识别弹序,且存在费时、费力、人为判读误差较大等问题。目前常用弹丸着靶坐标自动测量方法有声学原理的方法<sup>[3-5]</sup>、多光幕交汇测量法<sup>[6-9]</sup>、半导体器件阵列测量法<sup>[10]</sup>、双CCD交汇测量法<sup>[11-14]</sup>。这些方法都有各自的优点,但都存在在一个共同的问题:当有2发及以上弹丸同时着靶时,现有各种自动化测量设备均存在测量系统复杂的问题。

有研究者提出采用4台高速线阵CCD相机,组成3个测量靶面测量双目标同时着靶情况下的坐标<sup>[15]</sup>,当2发弹丸同时着靶时,通过2发弹丸在3个测量靶面间的成像关系以及弹丸飞行速度约束,得到2发弹丸的着靶坐标。该方法采用较多的CCD相机,不但增加了系统成本,而且使得测量系统较为复杂。另有研究者提出了七光幕阵列测试原理,即在双V形六光幕阵列中增加一个光幕组成七光幕阵列<sup>[16]</sup>,并构建时间序列算法来识别双目标同时着靶,该方法同样具有系统结构复杂的缺点。

针对2发弹丸同时着靶情况下的坐标测量所存在的问题,本文提出一种基于圆形光电探测阵列的双弹丸同时着靶坐标测量方法,建立了系统测量数学模型,给出了弹丸着靶坐标测量公式,并通过软件对坐标测量误差进行了分析和仿真。

## 1 测量原理与模型

图1为基于圆形光电探测阵列的双弹丸同时着靶坐标测量系统总体组成示意图,系统主要由靶架、3个扇形一字线激光器、圆形光电探测阵列

以及相应的信号处理电路组成。3个激光器A、B和C在圆形靶框上均匀分布,其中1个激光器位于靶框正上方,另外2个分别位于靶框左下方和右下方,3个扇形一字线激光器将圆形光电探测阵列分成3段,每一个激光器发出的光线投射到对应位置的光电探测阵列上,激光器的发光波段为780 nm,所以在圆形光电探测阵列的前面设置一个中心波长为780 nm的窄带滤光片,防止其他波段的杂散光线对系统的干扰。

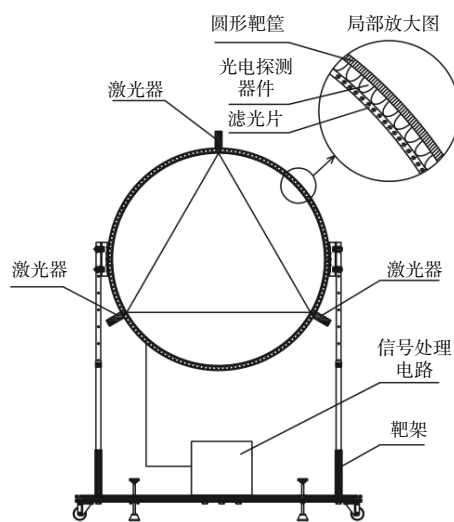


图1 系统总体组成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photoelectricity measurement system

图2为系统弹丸投影示意图,当2发弹丸 $E_1$ 和 $E_2$ 同时穿越探测光幕面时,激光器A通过2个弹丸 $E_1$ 和 $E_2$ 在圆形光电探测阵列上留下投影 $A_1$ 和 $A_2$ ,同样,激光器B通过2个弹丸 $E_1$ 和 $E_2$ 在圆形光电探测阵列上留下投影 $B_1$ 和 $B_2$ ,激光器C通过2个弹丸 $E_1$ 和 $E_2$ 在圆形光电探测阵列上留下投影 $C_1$ 和 $C_2$ ,圆形光电探测阵列对应的信号处理电路识别出6个弹丸投影点 $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $C_1$ 和 $C_2$ 在圆形光电探测阵列上的中心位置。分别连接点A和 $A_1$ 、A和 $A_2$ 、B和 $B_1$ 、B和 $B_2$ 、C和 $C_1$ 、C和 $C_2$ ,形成6条直线 $AA_1$ 、 $AA_2$ 、 $BB_1$ 、 $BB_2$ 、 $CC_1$ 和 $CC_2$ ,6条直线形成的交点中,只有3条直线同时相交的点为真实弹着点,其余交点为虚假弹着点,这样便可以对2发弹丸的着靶坐标进行识别。

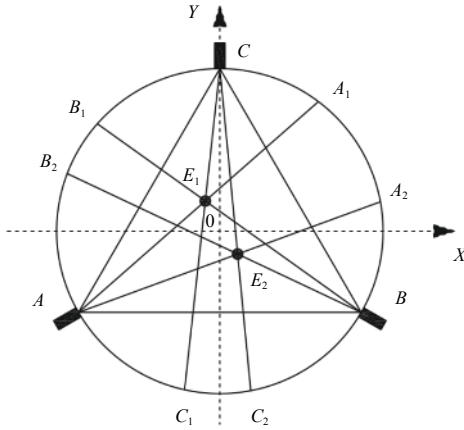


图2 弹丸着靶坐标计算示意图

Fig. 2 Calculation diagram of coordinate for projectiles passing through detection area

以圆形靶框的中心点  $O$  为原点, 以  $X$  轴的正方向为极轴, 建立极坐标系, 圆形半导体光电探测阵列围成的圆半径为  $R$ , 所以激光器发光点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的极坐标分别为  $A(R, 210^\circ)$ 、 $B(R, 330^\circ)$ 、 $C(R, 90^\circ)$ , 6 个弹丸投影点  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $C_1$  和  $C_2$  可通过圆形光电探测阵列对应的信号处理电路识别得到, 设 6 个投影点的极坐标分别为:  $A_1(R, \theta_{A1})$ 、 $A_2(R, \theta_{A2})$ 、 $B_1(R, \theta_{B1})$ 、 $B_2(R, \theta_{B2})$ 、 $C_1(R, \theta_{C1})$  和  $C_2(R, \theta_{C2})$ 。

同样以圆形靶框的中心点  $O$  为原点, 建立直角坐标系  $XOY$ , 则激光器发光点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  对应的直角坐标分别为:  $A(R\cos 210^\circ, R\sin 210^\circ)$ 、 $B(R\cos 330^\circ, R\sin 330^\circ)$  和  $C(R\cos 90^\circ, R\sin 90^\circ)$ , 6 个投影点对应的直角坐标分别为:  $A_1(R\cos \theta_{A1}, R\sin \theta_{A1})$ 、 $A_2(R\cos \theta_{A2}, R\sin \theta_{A2})$ 、 $B_1(R\cos \theta_{B1}, R\sin \theta_{B1})$ 、 $B_2(R\cos \theta_{B2}, R\sin \theta_{B2})$ 、

$C_1(R\cos \theta_{C1}, R\sin \theta_{C1})$  和  $C_2(R\cos \theta_{C2}, R\sin \theta_{C2})$ 。

设弹着点  $E_1$  的极坐标坐标为  $(\rho_1, \theta_1)$ , 弹着点  $E_2$  的极坐标坐标为  $(\rho_2, \theta_2)$ , 则弹着点  $E_1$  的直角坐标为  $(\rho_1 \cos \theta_1, \rho_1 \sin \theta_1)$ , 弹着点  $E_2$  的直角坐标为  $(\rho_2 \cos \theta_2, \rho_2 \sin \theta_2)$ 。

直线  $AA_1$  的两点式方程为

$$\frac{(\rho_1 \sin \theta_1 - R \sin 210^\circ)}{(\rho_1 \cos \theta_1 - R \cos 210^\circ)} = \frac{(R \sin \theta_{A1} - R \sin 210^\circ)}{(R \cos \theta_{A1} - R \cos 210^\circ)} \quad (1)$$

化简得到直线  $AA_1$  的方程为

$$\rho_1 [R \sin(\theta_1 - \theta_{A1}) + R \sin(210^\circ - \theta_1)] = R^2 \sin(210^\circ - \theta_{A1}) \quad (2)$$

同理, 可得直线  $AA_2$  的方程为

$$\rho_1 [R \sin(\theta_1 - \theta_{A2}) + R \sin(210^\circ - \theta_1)] = R^2 \sin(210^\circ - \theta_{A2}) \quad (3)$$

直线  $BB_1$  的两点式方程为

$$\frac{(\rho_1 \sin \theta_1 - R \sin 330^\circ)}{(\rho_1 \cos \theta_1 - R \cos 330^\circ)} = \frac{(R \sin \theta_{B1} - R \sin 330^\circ)}{(R \cos \theta_{B1} - R \cos 330^\circ)} \quad (4)$$

化简得到直线  $BB_1$  的方程为

$$\rho_1 [R \sin(\theta_1 - \theta_{B1}) + R \sin(330^\circ - \theta_1)] = R^2 \sin(330^\circ - \theta_{B1}) \quad (5)$$

同理, 可得直线  $BB_2$  的方程为

$$\rho_1 [R \sin(\theta_1 - \theta_{B2}) + R \sin(330^\circ - \theta_1)] = R^2 \sin(330^\circ - \theta_{B2}) \quad (6)$$

联立直线  $AA_1$  和直线  $BB_1$  的方程得:

$$\begin{cases} \rho_1 [R \sin(\theta_1 - \theta_{A1}) + R \sin(210^\circ - \theta_1)] = R^2 \sin(210^\circ - \theta_{A1}) \\ \rho_1 [R \sin(\theta_1 - \theta_{B1}) + R \sin(330^\circ - \theta_1)] = R^2 \sin(330^\circ - \theta_{B1}) \end{cases} \quad (7)$$

两式相除并化简得:

$$\frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} = \tan \theta_1 = \frac{\sin(210^\circ - \theta_{A1})(\sin \theta_{B1} - \sin 330^\circ) + \sin(330^\circ - \theta_{B1})(\sin 210^\circ - \sin \theta_{A1})}{\sin(210^\circ - \theta_{A1})(\cos \theta_{B1} - \cos 330^\circ) + \sin(330^\circ - \theta_{B1})(\cos 210^\circ - \cos \theta_{A1})} \quad (8)$$

所以弹着点  $E_1$  的极角  $\theta_1$  为

$$\theta_1 = \arctan \frac{\sin(210^\circ - \theta_{A1})(\sin \theta_{B1} - \sin 330^\circ) + \sin(330^\circ - \theta_{B1})(\sin 210^\circ - \sin \theta_{A1})}{\sin(210^\circ - \theta_{A1})(\cos \theta_{B1} - \cos 330^\circ) + \sin(330^\circ - \theta_{B1})(\cos 210^\circ - \cos \theta_{A1})} \quad (9)$$

将其带入公式(2)直线  $AA_1$  的方程可得:

$$\rho_1 = \frac{R \sin(210^\circ - \theta_{A1})}{\sin(\theta_1 - \theta_{A1}) + \sin(210^\circ - \theta_1)} = \frac{R \sin(330^\circ - \theta_{B1})}{\sin(\theta_1 - \theta_{B1}) + \sin(330^\circ - \theta_1)} \quad (10)$$

所以弹着点  $E_1$  的直角坐标系坐标为

$$X_{E1} = \frac{R \sin(210^\circ - \theta_{A1})}{\sin(\theta_1 - \theta_{A1}) + \sin(210^\circ - \theta_1)} \times \cos \theta_1 = \frac{R \sin(330^\circ - \theta_{B1})}{\sin(\theta_1 - \theta_{B1}) + \sin(330^\circ - \theta_1)} \times \cos \theta_1 \quad (11)$$

$$Y_{E1} = \frac{R \sin(210^\circ - \theta_{A1})}{\sin(\theta_1 - \theta_{A1}) + \sin(210^\circ - \theta_1)} \times \sin \theta_1 = \frac{R \sin(330^\circ - \theta_{B1})}{\sin(\theta_1 - \theta_{B1}) + \sin(330^\circ - \theta_1)} \times \sin \theta_1 \quad (12)$$

式中  $\theta_1$  如公式(9)所示。

同样联立直线  $AA_2$  和  $BB_2$  的方程得:

$$\begin{cases} \rho_2 [R \sin(\theta_2 - \theta_{A2}) + R \sin(210^\circ - \theta_2)] = R^2 \sin(210^\circ - \theta_{A2}) \\ \rho_2 [R \sin(\theta_2 - \theta_{B2}) + R \sin(330^\circ - \theta_2)] = R^2 \sin(330^\circ - \theta_{B2}) \end{cases} \quad (13)$$

解方程组(13)可得弹着点  $E_2$  的直角坐标系坐

标为

$$X_{E_2} = \frac{R \sin(210^\circ - \theta_{A_2})}{\sin(\theta_2 - \theta_{A_2}) + \sin(210^\circ - \theta_2)} \times \cos \theta_2 = \frac{R \sin(330^\circ - \theta_{B_2})}{\sin(\theta_2 - \theta_{B_2}) + \sin(330^\circ - \theta_2)} \times \cos \theta_2 \quad (14)$$

$$Y_{E_2} = \frac{R \sin(210^\circ - \theta_{A_2})}{\sin(\theta_2 - \theta_{A_2}) + \sin(210^\circ - \theta_2)} \times \sin \theta_2 = \frac{R \sin(330^\circ - \theta_{B_2})}{\sin(\theta_2 - \theta_{B_2}) + \sin(330^\circ - \theta_2)} \times \sin \theta_2 \quad (15)$$

其中:

$$\theta_2 = \arctan \frac{\sin(210^\circ - \theta_{A_2})(\sin \theta_{B_2} - \sin 330^\circ) + \sin(330^\circ - \theta_{B_2})(\sin 210^\circ - \sin \theta_{A_2})}{\sin(210^\circ - \theta_{A_2})(\cos \theta_{B_2} - \cos 330^\circ) + \sin(330^\circ - \theta_{B_2})(\cos 210^\circ - \cos \theta_{A_2})} \quad (16)$$

## 2 坐标测量误差分析和仿真

由点  $E_1$  的直角坐标  $(X_{E_1}, Y_{E_1})$  中的  $X_{E_1}$  与  $Y_{E_1}$  的公式可以看出,  $X_{E_1}$  与  $Y_{E_1}$  分别是自变量  $R$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_{A_1}$  的函数, 因此  $X_{E_1}$  与  $Y_{E_1}$  的测量误差标准差  $\sigma_{X_{E_1}}$  与  $\sigma_{Y_{E_1}}$  分别为

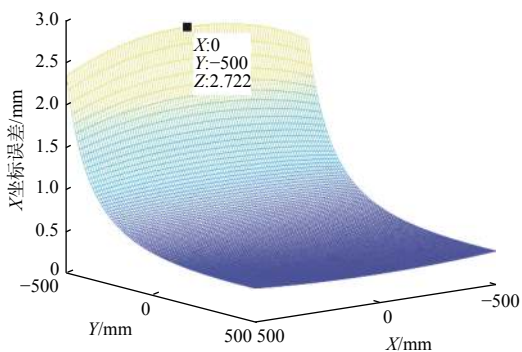
$$\sigma_{X_{E_1}}^2 = \left( \frac{\partial X_{E_1}}{\partial R} \Delta R \right)^2 + \left( \frac{\partial X_{E_1}}{\partial \theta_{A_1}} \Delta \theta_{A_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial X_{E_1}}{\partial \theta_{B_1}} \Delta \theta_{B_1} \right)^2 \quad (17)$$

$$\sigma_{Y_{E_1}}^2 = \left( \frac{\partial Y_{E_1}}{\partial R} \Delta R \right)^2 + \left( \frac{\partial Y_{E_1}}{\partial \theta_{A_1}} \Delta \theta_{A_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial Y_{E_1}}{\partial \theta_{B_1}} \Delta \theta_{B_1} \right)^2 \quad (18)$$

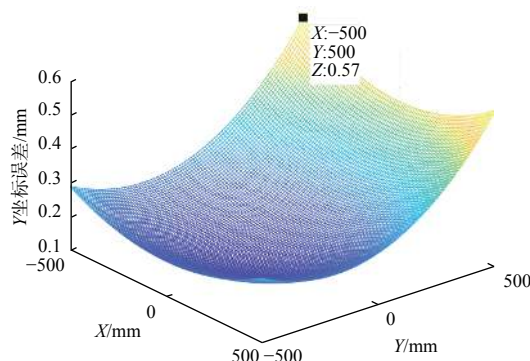
式中,  $\Delta R = (R/1000)$  mm 是圆的半径  $R$  的误差,  $\partial X_{E_1}/\partial R$ 、 $\partial Y_{E_1}/\partial R$  分别为  $X_{E_1}$ 、 $Y_{E_1}$  对求  $R$  偏导所得到的误差传递系数;  $\Delta \theta_{A_1} = (1/2\pi R) \times 2\pi$  是  $A_1$  点极坐标的角度误差,  $\partial X_{E_1}/\partial \theta_{A_1}$ 、 $\partial Y_{E_1}/\partial \theta_{A_1}$  分别为  $X_{E_1}$ 、 $Y_{E_1}$  对  $\theta_{A_1}$  求偏导所得到的误差传递系数;  $\Delta \theta_{B_1} = (1/2\pi R) \times 2\pi$  是  $B_1$  点极坐标的角度误差,  $\partial X_{E_1}/\partial \theta_{B_1}$ 、 $\partial Y_{E_1}/\partial \theta_{B_1}$  分别为  $X_{E_1}$ 、 $Y_{E_1}$  对  $\theta_{B_1}$  求偏导所得到的误差传递系数。

当半径  $R$  的值为 1.5 m 时, 以  $O$  点为原点取圆形正中心  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  的靶面进行仿真, 取  $\Delta R = 1\text{ mm}$ ,  $\Delta \theta_{A_1} = 0.001^\circ$  以及  $\Delta \theta_{B_1} = 0.001^\circ$ , 则如图 3 所示, 该图为弹丸穿过探测幕面时的弹丸着靶坐标测量误差分布图, 图 3(a) 为  $X$  坐标测量误差的变化分布图; 图 3(b) 为  $Y$  坐标测量误差的变化分布图。

1) 从图 3(a) 中可以看出,  $X$  坐标测量误差只随  $Y$  坐标的增加而减小, 与  $X$  坐标值的变化无关;



(a) 系统  $X$  坐标测量误差分布



(b) 系统  $Y$  坐标测量误差分布

图 3 圆形阵列光电探测系统  $X$  和  $Y$  坐标测量误差分布

Fig. 3 Error distribution of coordinates  $X$  and  $Y$  based on circular array photoelectricity detection system

$X$  坐标测量误差关于坐标  $X=0$  对称; 在靶面为  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  时,  $X$  坐标测量误差标准差最大为 2.722 mm。

2) 从图 3(b) 中可以看出,  $Y$  坐标测量误差关于坐标  $X=0$  对称, 距坐标  $X=0$  越远,  $Y$  坐标测量误差越大;  $Y$  坐标测量误差关于坐标  $Y=-170$  对称, 距坐标  $X=0$  越远,  $Y$  坐标测量误差越大; 在靶面为  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  时,  $Y$  坐标测量误差标准差最大为 0.57 mm。

## 3 实验与结果分析

为验证系统在双弹丸同时着靶状态下的坐标测量功能及测量精度, 用 2 根带磁性的钢棒模拟 2 发弹丸, 将 2 根钢棒同时吸附于表面粘贴有坐标纸的钢板上的任意位置, 如图 4 所示。本文所提双弹丸同时着靶坐标测量系统的 3 个激光器组成的探测光幕和纸靶的测量靶面平行且距离较近, 约为 10 mm, 所以 2 个模拟弹丸均可进入由 3 个激光器和圆形的光电探测阵列组成的探测光幕, 并且通过 3 个激光器在圆形的光电探测阵列上形成 6 个模拟弹丸的投影, 采用圆形光电探测阵列对 6 个弹丸投影信号进行光电转换, 并进一步通过信号处理电路对 6 个弹丸投影在圆形光电探测阵列



上的中心位置进行识别,最后通过系统弹丸着靶坐标测量公式(11)、(12)、(14)和(15)计算得到每一组 2 个模拟弹丸的坐标,测量 5 组共 10 发,实验数据如表 1 所示。



图 4 模拟 2 发弹丸同时着靶装置  
Fig. 4 Experimental figure of two projectiles passing through detection area at same time

表 1 模拟双弹丸同时着靶坐标测量实验数据  
Table 1 Experimental data on measuring simulation of dual targets impacting coordinate

组别	编号	纸靶坐标		光电立靶坐标		测量误差	
		$x_0/\text{mm}$	$y_0/\text{mm}$	$x_1/\text{mm}$	$y_1/\text{mm}$	$\Delta x/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$
1	1	-104	160	-102.1	161.3	1.9	1.3
	2	78	215	78.4	215.6	0.4	0.6
2	3	303	198	301.5	195.1	-1.5	-2.9
	4	163	248	164	251.3	1	3.3
3	5	22	-184	21	-183	-1	1
	6	-128	39	-125.9	42.1	2.1	3.1
4	7	-130	-115	-129.3	-113.2	0.7	1.8
	8	108	-18	106.4	-20.2	-1.6	-2.2
5	9	182	98	179.4	100.4	-2.6	2.4
	10	202	264	201.3	265.4	-0.7	1.4
6	11	-30	-21.7	-27	-20.1	3	1.6
	12	322	386	323.9	385.4	1.9	-0.6
7	13	-22	-200	-25.1	-199.6	-3.1	0.4
	14	-202	102	-200.6	100.9	1.4	-1.1
8	15	-183	-13	-186.4	-12.9	-3.4	0.1
	16	-228	265	-224.3	263.7	3.7	-1.3
9	17	117	215	116.4	216.6	-0.6	1.6
	18	-195	-18	-197.2	-17.2	-2.2	0.8
10	19	-56	-311	-55.9	-310.6	0.1	0.4
	20	-143	-76	-144	-78.4	-1.0	-2.4
最大值						3.7	3.3
最小值						-3.4	-2.9

从表 1 中实际测量结果可以看出,本文提出的

基于圆形光电探测阵列的双弹丸同时着靶立靶坐标测量系统功能正常,所述双弹丸信号处理方法有效。表 1 中得出的  $x$  坐标测量误差的绝对值最大为 3.7 mm,  $y$  坐标测量误差的绝对值最大为 3.3 mm;但是,纸板坐标测量过程中会存在弹孔识别误差与卷尺读数误差,其均属于随机误差,本实验中认为弹孔识别误差小于  $\pm 0.5$  mm,卷尺读数误差小于  $\pm 0.5$  mm。因此,最终可以得到  $x$  坐标测量误差的绝对值最大为 4.7 mm,  $y$  坐标测量误差的绝对值最大为 4.3 mm;  $x$  坐标测量误差标准差  $\sigma_x$  和  $y$  坐标测量误差标准差  $\sigma_y$  分别为 2.22 mm 和 1.98 mm。

4 结论

本文提出并研究了基于圆形阵列的双弹丸同时着靶坐标测量方法,采用 3 个发光角度均为  $60^\circ$  的扇形一字线激光器和圆形光电探测阵列形成系统测量探测幕面,当有 2 发弹丸同时穿越该测量探测幕面时,会在圆形光电探测阵列上留下 6 个弹丸投影,通过信号处理电路进行识别,得到 6 个弹丸投影在圆形光电探测阵列上的中心位置,根据系统参数以及弹丸投影的中心位置,推导了双弹丸着靶坐标测量公式,并通过软件对坐标测量误差进行了分析和仿真,结果表明,当有双弹丸穿越  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  的探测幕面时,本系统的  $X$  坐标测量误差标准差最大为 2.7 mm,  $Y$  坐标测量误差标准差最大为 0.6 mm。通过带有磁性的 2 根钢棒模拟双弹丸同时着靶,对所提系统进行了模拟实验验证。结果证明,本文所提的双弹丸测量方法可行,10 组 20 发的  $X$  坐标测量误差标准差  $\sigma_x$  和  $Y$  坐标测量误差标准差  $\sigma_y$  分别为 2.22 mm 和 1.98 mm。仿真与实验数据均证明本文所提出的系统可以有效测量弹径 4.5 mm 及其以上的双弹丸着靶坐标。该系统同样适用于单发弹丸的着靶坐标测量。

参考文献:

[1] NI Jinping. Technology and application of measurement of the light screen array[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.  
倪晋平. 光幕阵列测试技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.  
[2] China ordnance industrial standardization research institute. GJB3196.18—1998 Test methods of cartridge. Part 18: firing accuracy and dispersion test[S]. Beijing:Com-

- mission of Science, Technology and Industry for National Defense, 2006.
- 中国兵器工业标准化研究所.GJB3196.18—1998枪弹实验方法第18部分: 射击密集度[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2006.
- [ 3 ] FENG Bin, SHI Xiuhua. Studies of acoustic target with two equilateral triangle arrays[J]. *Applied Acoustics Appl Acoust*, 2012, 31(2): 140-144.
- 冯斌, 石秀华. 双三角阵声靶测试系统研究[J]. *应用声学*, 2012, 31(2): 140-144.
- [ 4 ] WANG Yulong, LU Xiaoxi, ZHANG Yahui, et al. A robust estimation method of acoustic test for impact point coordinate[J]. *Modern Electronics Technique*, 2020, 43(9): 25-28, 32.
- 王玉龙, 卢小汐, 张亚辉, 等. 一种声学测试弹着点坐标的稳健估计方法[J]. *现代电子技术*, 2020, 43(9): 25-28, 32.
- [ 5 ] DEYAO L, JUNBO W U, HANWEN W U. The projectile demonstration of acoustics measurement of falling point on the sea[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2016, 30(6): 512-516.
- [ 6 ] CHEN D, NI J. Pulse compression-based improvement on the estimation accuracy of time interval between two trigger signals in light screen array[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 158: 675-683.
- [ 7 ] LI H. Research on space target detection ability calculation method and spectral filtering technology in sky-screen's photoelectric system[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2016, 58(5): 1035-1041.
- [ 8 ] ZHAO D, ZHOU H, LIU J, et al. High-precision velocity measuring system for projectiles based on retroreflective laser screen[J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(6): 544-548.
- [ 9 ] NI Jinping, YANG Lei, TIAN Hui. Measurement principle for two kinds of six-light-screen array composed by large area lightscreen[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(2): 6-11.
- 倪晋平, 杨雷, 田会. 基于大靶面光幕靶的两类六光幕阵列测量原理[J]. *光电工程*, 2008, 35(2): 6-11.
- [ 10 ] TIAN Hui, NI Jinping. Research on measuring method for terminal trajectory of the flying projectile parameters by nine-light-screens-array[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(5): 17-23.
- 田会, 倪晋平. 九光幕阵列测量终点弹道弹丸飞行参数方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(5): 17-23.
- [ 11 ] LIU Ji, SU Ninggang, WU Jinhui, et al. Development status of photographic detection technology for measuring projectile coordinates[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(12): 224-230.
- 刘吉, 苏凝钢, 武锦辉, 等. 光电弹着点坐标检测技术的发展现状[J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(12): 224-230.
- [ 12 ] MA Weihong, NI Jinping. Light source validity evaluation in CCD vertical target measurement system based on image analysis[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(4): 599-603.
- 马卫红, 倪晋平. CCD立靶光源适用性的图像判定技术[J]. *应用光学*, 2013, 34(4): 599-603.
- [ 13 ] CHEN X, TANG J Y. A study of automatic calibration in dual linear-CCD camera intersection measuring system[J]. *Advanced Materials Research*, 2008, 571: 219-223.
- [ 14 ] GAO Xing, SU Jiangang, ZHANG Guangming. Position analysis of CCD camera for object missing distance in intersectant measurement[J]. *Journal of Applied Optics*, 2000, 21(5): 40-43.
- 高昕, 苏建刚, 张光明. CCD摄像机交汇测量目标脱靶量布站分析[J]. *应用光学*, 2000, 21(5): 40-43.
- [ 15 ] WU Jiangpeng, SONG Ping, HAO Chuangbo, et al. Measurement of vertical target dispersion with target-hitting sequence for barrage weapons[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(3): 600-608.
- 武江鹏, 宋萍, 郝创博, 等. 带弹序的弹幕武器立靶密集度测试[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(3): 600-608.
- [ 16 ] NI Jinping, LU Hongwei, TIAN Hui. Research on a method of measuring the impact location dispersion of double barrel cannon based on the seven-light-screen array[J]. *Acta Armamentarii*, 2013(4): 16-23.
- 倪晋平, 卢红伟, 田会. 七光幕阵列测试双管武器立靶密集度方法研究[J]. *兵工学报*, 2013(4): 16-23.