

文章编号 1004-924X(2015)06-1523-07

大面积三角组合光幕弹幕武器密集度的高精度测试

何凯平*, 徐 达, 李 华

(装甲兵工程学院 兵器工程系, 北京 100072)

摘要:提出了一种交叉布置的大面积三角组合光幕的高精度激光靶密集度测试方法,以解决超高射频弹幕武器立靶密集度测试的难题。给出了激光器、激光光束整形系统、激光探测器阵列组成的大面积三角光幕光电开关系统设计方案,分析了双大面积三角光幕测量原理,推导出了三角光幕弹着点坐标解算方法。结合系统采用的探测器输出特性分析了该测试方法的误差,结果显示:当规则靶面区域宽度从 3.6 m 扩展到 10 m 时,最大测试误差从 0.557 mm 变为 0.832 mm,只增加了 0.275 mm,实现了很高的测量精度。模拟射击试验结果表明,采用分辨率为 1.6 mm 的探测器阵列时,X 坐标最大误差为 0.747 mm,Y 坐标最大误差为 0.635 mm,实现了对超高射频弹幕武器立靶密集度的高精度检测。该测试方法具有光幕面积大、测量精度高、安装调试方便的特点。

关键词:激光测量;三角组合光幕;弹幕武器;弹着点坐标解算;立靶密集度

中图分类号:TJ760.6 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152306.1523

High precision measurement for barrage weapon dispersion based on large area triangle composite light-screens

HE Kai-ping*, XU Da, LI Hua

(Department of Arms Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

* Corresponding author, E-mail:hekai ping0403@126.com

Abstract: A high precision laser screen dispersion measurement method based on a large area triangle light-screen composite was presented to solve the difficulty of location dispersion test for super-high firing rate barrage weapons. A design scheme for large area triangle photoelectric switch system composed by a laser, a laser beam shaping system and a laser detector array was given, the measuring principle of double large area triangle light-screens was analyzed, and an algorithm for triangle light-screen impact point coordinates was derived. By combining with the output characteristics of the detection device in the system, the algorithm error was analyzed. The analysis results show that maximum theoretical error increases by 0.275 mm, from 0.557 mm to 0.832 mm when the width of regular target area increases from 3.6 m to 10 m. The results of the test show that when the resolution of detector array is 1.6 mm, the maximum X error of output coordinates is 0.747 mm, and the maximum Y error of output coordinates is 0.635 mm, which shows a high precision measurement for the location dispersion of super-high firing rate barrage weapons. This measurement method is characterized by a larger screen area, higher test precision and easy to install and debug.

收稿日期:2014-12-09;修订日期:2015-01-20.

基金项目:军队科研计划资助项目

Key words: laser measurement; triangle composite light-screen; barrage weapon; impact point coordinate algorithm; barrage weapon dispersion

1 引言

随着导弹飞行速度的提高,典型的弹幕武器如多管超高射频火炮和“金属风暴”的射频越来越高^[1]。由于弹幕武器的射频高、弹着点散布大、短时间发射弹丸数量巨大,其测试系统应具有有效靶面区域大、响应时间极短、数据处理时间短、精度和灵敏度高以及适合野外靶场安装调试等特性。

国内外学者对立靶密集度测试方法进行了广泛研究,这些研究主要集中在声靶、CCD 交汇靶及光电靶等。声靶的抗干扰性能差,测量精度不高且被测火炮射频不能过高,弹丸飞行速度不能过低,因此不适合测量超高射频火炮的立靶密集度。CCD 交汇靶结构简单、测量精度高、自动化程度高,但需要一定的曝光时间,被测弹丸的飞行速度和射频不能过高,且存在一定的漏靶率^[2-5]。根据光源的不同,光电靶又可分为天幕靶和光幕靶。通过多个带靶框结构的天幕靶以一定的几何关系组合能测试弹丸密集度,但结构复杂,难以组建大靶面^[6-8]。光幕靶通常采用激光或红外光幕组合的方式构建光控开关系统进行测量,其靶面直观、易标定、对测试弹丸的飞行速度限制小且灵敏度高,因此在弹幕武器立靶密集度测试领域具有较高的研究价值^[9-10]。

但现有光幕靶存在结构复杂、难以构建大靶面、实现高精度测量等问题,因此本文采用较大功率线激光器组合构成大面积三角光幕光电开关系统,提出了一种开放式大面积三角光幕交汇的高精度密集度测试方法。基于该测试原理构建的密集度测试系统具有有效靶面区域大、结构简单、灵敏度高、测量精度高等特点。

2 光幕组合结构设计

2.1 典型的光幕组合结构

典型的光幕组合结构如图 1 所示。其中图 1(a)采用激光器与光电接收器件点对点的方式组成光幕。该结构坐标计算方法简单,但需要激光管数量巨大,点对点光路对准困难,且受制于激光管的外形尺寸,测量精度低。

图 1(b)为平行光幕组合方案。激光经平行光透镜后形成平行光幕,解决了点对点式光路对准困难的问题,但光学系统较复杂,不易构建大靶面。

图 1(c)为小面积三角光幕组合方案。通过多个三角光幕的无缝叠加组成测量光幕^[11],三角光幕可以比平行光幕扩展的更开,减少了激光器的使用数量,但三角光幕之间的拼接容易出现缝隙或重叠,系统结构稳定性差。

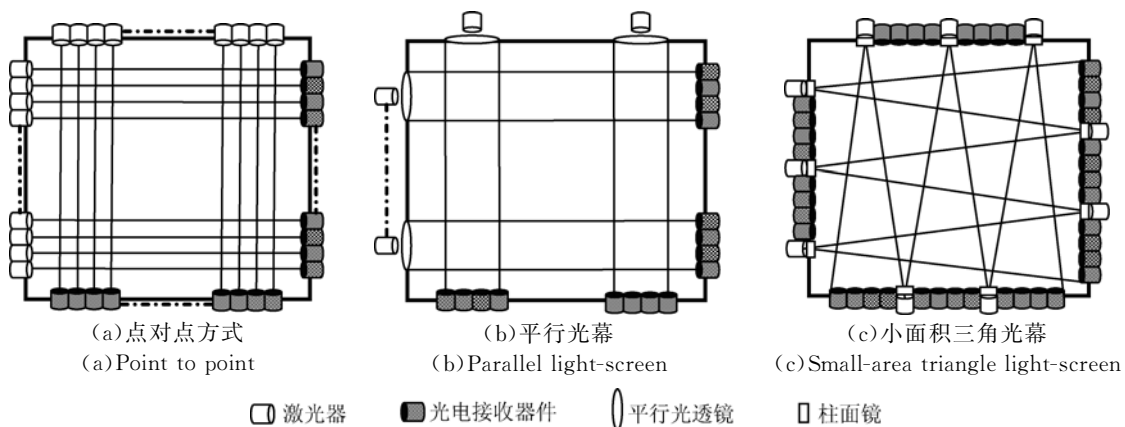


图 1 典型的光幕组合结构

Fig. 1 Representative light-screens

2.2 大面积三角组合光幕设计

图 2 为由激光器、激光整形光学系统、探测器阵列组成的大面积三角光幕光电开关系统。通过整形光学系统对激光进行整形,形成能量均匀分布的线激光^[12],实现了一束线激光对应一条探测器阵列的检测方式。

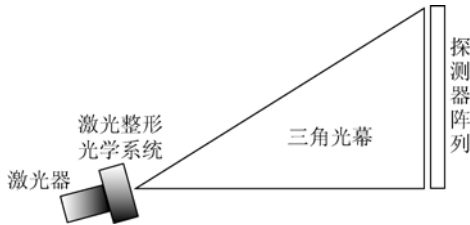


图 2 大面积三角光幕光电开关系统

Fig. 2 Large-area triangle photoelectric switch system

由激光器与探测器阵列组成的三角光幕结构更为“开放”。激光器与检测器件可与有效光幕区域保持一定的距离,提高了射击时靶框的安全性。系统结构如图 3 所示,线激光器 1 与检测阵列 1 组成二维坐标的 X 轴,线激光器 2 与检测阵列 2 组成二维坐标的 Y 轴,以两激光束的垂直交点为坐标原点。两个线激光器的三角光幕重叠区域即为有效靶面,弹丸穿过有效靶面均能测出弹丸坐标,但由于通常靶场测试采用方形规则靶面,因此取有效靶面中最大的正方形区域定为规则靶面区域。

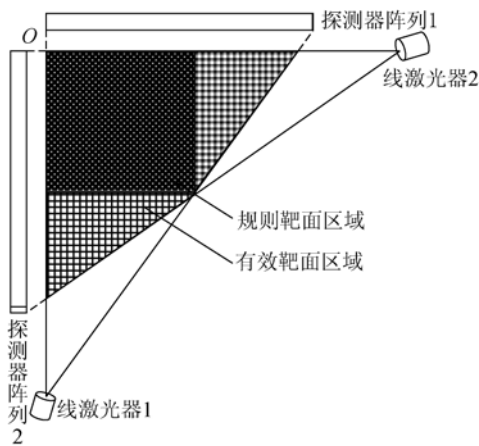


图 3 大面积三角光幕组合结构示意图

Fig. 3 Framework of large-area triangle light-screen

针对射频为 10 万发/分钟,弹长约为 120 mm 的弹丸,令弹丸的最大飞行速度为 1 800 m/s,得出两个主要的过靶时间参数如表 1 所示。弹丸最短过靶时间表示弹丸通过光幕区域的最短时间,说明信号采集系统最短需在 70 μ s 内完成对弹丸

过靶信号的采集。前后弹丸时间间隔表示前后两发弹丸穿过光幕靶的时间间隔,说明系统需在 600 μ s 内完成对一发弹丸过靶信号的存储,即信号采集系统的采集频率最少为 14.2 kHz,在 0.6 ms 内完成一次过靶数据的存储。为了保证测试结果的可靠性,每发弹丸过靶时进行 3 次采集,则信号采集系统的采集频率为 50 kHz。

表 1 弹丸过靶时间参数

Tab. 1 Time parameters for shell through target

参数	量值	参数	量值
弹丸最短过靶时间	70 μ s	前后弹丸时间间隔	600 μ s

结合光幕靶本身的特点可知,采用大面积三角光幕光电开关系统组合进行测试的优点主要有:灵敏度高;受被测弹丸飞行速度与武器射频限制小;结构简单、易构建大靶面;理论测试精度高于探测器阵列分辨率。

3 双大面积三角光幕测量原理

如图 4 所示,以图 3 中激光器 1 的左边缘光线为 Y 轴,激光器 2 的上边缘为 X 轴,两光轴的交点为原点,建立二维直角坐标系。图 4 中的圆 F 代表弹丸的横截面,过激光发射点 Y_L 分别作圆 F 的两条切线交 X 轴于 X_A, X_B ,再过 Y_L 作过圆心 F 的直线交 X 轴与 $X_E, X_A X_B$ 即为弹丸在 X 轴上的遮挡区域。同理, Y 轴上的交点 $Y_A, Y_E, Y_B, Y_A Y_B$ 为弹丸在 Y 轴上的遮挡区域。

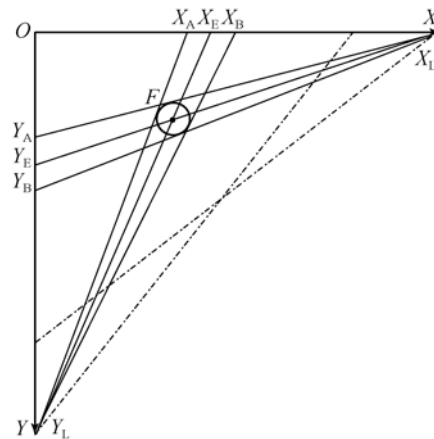


图 4 弹着点坐标解算

Fig. 4 Impact point coordinate algorithm

以弹丸的中心在靶上的坐标为弹着点位置,通过求直线 $Y_L X_E$ 与 $X_L X_E$ 交点的方式确定弹丸中心的坐标。设线激光器距离坐标原点的距离为 L ,即点 Y_L 的坐标为 $(0, L)$,设点 X_E 的坐标为 $(X_E, 0)$,同理点 X_L 的坐标为 $(L, 0)$,设点 Y_E 的坐标为 $(0, Y_E)$,则过点 Y_L, X_E 和点 X_L, Y_E 的直线方程为:

$$\begin{cases} X = -\frac{L}{OX_E} Y + L \\ X = -\frac{L}{OY_E} Y + L \end{cases} \quad (1)$$

解式(1)中的方程组即可得弹丸的弹着点坐标 (X, Y) ,但在式(1)中还存在 OX_E, OY_E 两个变量的表达式有待讨论。如图 5 所示,令 $\angle OY_L X_A = \alpha$, $\angle OY_L X_B = \beta$, $\angle X_A Y_L X_B = \theta$, OX_A 的长度为 a , OX_B 的长度为 b , a, b 可由检测阵列输出信号获得。

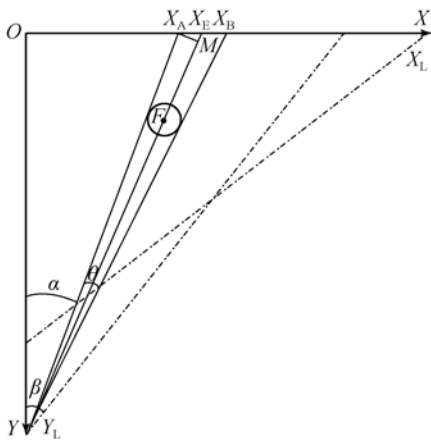


图 5 OX_E 的计算
Fig. 5 Calculation of OX_E

过 X_A 作 $Y_L X_E$ 的垂线 $X_A M$,则有:

$$X_A X_E = \frac{X_A M}{\cos\left[\frac{\theta}{2} + \arctan \frac{a}{L}\right]}, \quad (2)$$

可得:

$$OX_E = a + X_A X_E = a + \frac{\sqrt{a^2 + L^2} \cdot \sin \frac{\theta}{2}}{\cos\left[\frac{\theta}{2} + \arctan \frac{a}{L}\right]}, \quad (3)$$

$$\frac{\theta}{2} = \frac{\beta - \alpha}{2} = \frac{1}{2} \left[\arctan \frac{b}{L} - \arctan \frac{a}{L} \right], \quad (4)$$

其中: a, b 为 X 轴检测阵列的输出信号 ($b > a$)。

同理通过 Y 轴上探测器阵列输出的 a, b 可以求得 Y 轴上的 OY_E ,结合式(1)可得到弹丸坐标的表达式为:

$$\begin{cases} X = \frac{(L^2 - L \cdot OY_E) \cdot OX_E}{L^2 - OX_E \cdot OY_E} \\ Y = \frac{(L^2 - L \cdot OX_E) \cdot OY_E}{L^2 - OX_E \cdot OY_E} \end{cases} \quad (5)$$

4 误差分析

4.1 OX_E 的输出误差

如图 6 所示,弹丸具有一定的尺寸,会遮挡住一段区域。

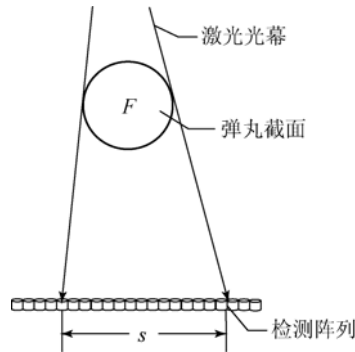


图 6 弹丸投影示意图
Fig. 6 Schematic diagram of bullet shadow

在不考虑其它因素的情况下估算弹丸位置检测精度:设探测器阵列传感器的分辨率为 l ,弹丸横截面的圆心为 F ,弹丸在检测阵列上的投影长度为 s ,则弹丸可以遮挡的检测阵列传感器数 n 为 s/l 或 $(s/l) + 1$ 。设弹丸投影遮挡区域被探测器阵列分辨率 l 整除的倍数为 $s//l$,假定入射光束投射到线接收阵列上的一半长度时,输出信号有效,则弹丸位置的检测精度可表示为:

$$\varphi = \frac{1}{2} l + \frac{1}{2} [s - (s//l) \cdot l], \quad (6)$$

根据弹丸在光幕中位置的不同, $s_1 - (s_1//l) \cdot l$ 的最大值接近 l ,最小值为 0。因此,在不考虑其它因素的情况下, φ 的取值为:

$$\frac{1}{2} l \leq \varphi < l, \quad (7)$$

令

$$\eta = \frac{\sqrt{a^2 + L^2} \cdot \sin \frac{\theta}{2}}{\cos\left[\frac{\theta}{2} + \arctan \frac{a}{L}\right]}. \quad (8)$$

弹丸直径相对于靶框长度 L 来说很小,因此 θ 很小, a, b 的输出误差导致的 θ 误差值可以忽略。而在式(8)中, $\sqrt{a^2+L^2}$ 的误差依然为 φ , 由于 θ 很小, $\sin(\theta/2)$ 远小于 $\cos(\theta/2+\arctan a/L)$ 的值, 设其比值为 n 。因此, η 的输出误差为 $\varphi \times n$, 则 OX_E 的计算误差为:

$$\Delta OX_E = \varphi + \varphi \times n \quad (9)$$

由对称性同理可得 Y 轴上 OY_E 的误差。上述计算中, 假设光束投射到线接收阵列上探测器单个像素的一半长度时才产生有效信号。而事实上, 探测器的灵敏度很高, 单个接收像素内并不是超过一半的光敏面接收到光才有信号输出, 所以实际误差值会小于上述计算值。

4.2 坐标计算误差

坐标算法流程如图 7 所示。用 mm 作单位时, $10\ 000\ \text{mm} \times 10\ 000\ \text{mm}$ 的矩阵运算数据过于庞大, 故采用 cm 作单位。当弹丸穿过靶面区域时会分别在 X 轴和 Y 轴遮挡一段探测器阵列, 被遮挡阵列两端与坐标原点距离为两组 a, b 值。取被测弹丸直径为 $40\ \text{mm}$, 由投影关系可知, 弹丸投影长度最小为 $20\ \text{mm}$, 最大约为 $100\ \text{mm}$, 即:

$$20 \leq (b-a) \leq 100 \quad (10)$$

由于光幕结构具有对称性, 当探测器的阵列分辨率为 $1.6\ \text{mm}$ 时, 根据 4.1 节中的分析结论, 取 OX_E 的输出误差为 $1\ \text{mm}$, 再任意定一组 a, b 的值。通过计算可得出坐标误差与另一组 a, b 值的误差关系分布。

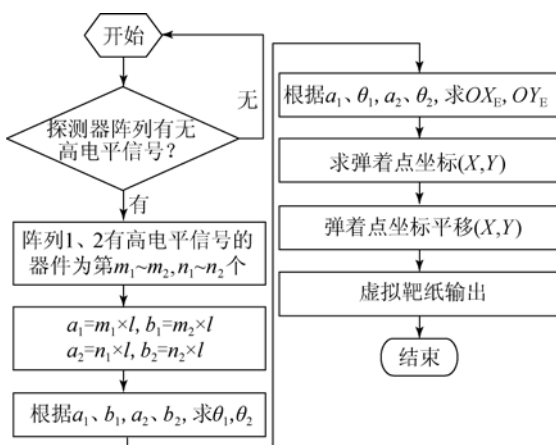


图 7 坐标算法流程图

Fig. 7 Flow chart of coordinate algorithm

设激光器与坐标原点的距离为 L , 有效靶面靠近探测器阵列一侧的长度为 d 。则当 $L=6\ \text{m}$,

$d=3.6\ \text{m}$ 时, 其误差分布与 a, b 的关系如图 8 所示; 当 $L=10\ \text{m}, d=6\ \text{m}$ 时, 其误差分布与 a, b 的关系如图 9 所示; 当 $L=16.67\ \text{m}, d=10\ \text{m}$ 时, 其误差分布与 a, b 的关系如图 10 所示。由于测试结构是对称的, 因此 Y 轴上的理论误差与 X 轴相同。

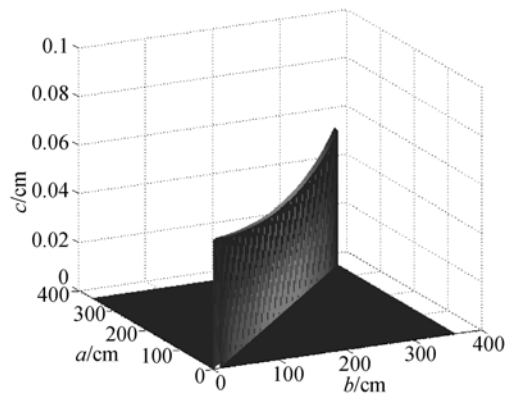


图 8 $L=6\ \text{m}, d=3.6\ \text{m}$ 时 X 轴的误差分布
Fig. 8 X axis errors for $L=6\ \text{m}$ and $d=3.6\ \text{m}$

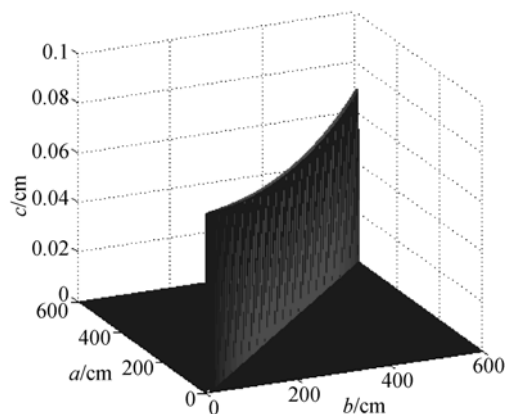


图 9 $L=10\ \text{m}, d=6\ \text{m}$ 时 X 轴的误差分布
Fig. 9 X axis errors for $L=10\ \text{m}$ and $d=6\ \text{m}$

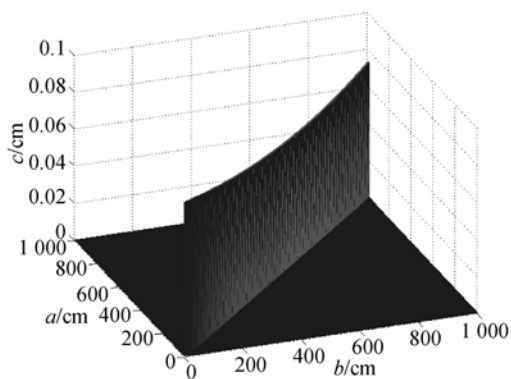


图 10 $L=16.67\ \text{m}, d=10\ \text{m}$ 时 X 轴的误差分布
Fig. 10 X axis errors for $L=16.67\ \text{m}$ and $d=10\ \text{m}$

如表 2 所示,对比 3 种靶面面积时的误差极值,靶面长度扩展了约 3 倍,而其理论误差只增加了 0.275 mm,具有很好的靶面可扩展性。

表 2 不同靶面面积的误差极值

Tab. 2 Extreme errors of different target areas

L/m	d/m	最大误差/mm	最小误差/mm
6	3.6	0.557	0.437
10	6	0.720	0.605
16.67	10	0.832	0.680

5 试验验证

试验装置的结构示意图如图 3 所示,图中正方形规则靶面区域即为标定纸的位置。结构参数如下:线激光器与坐标原点的距离 $L=2.73$ m,探测器阵列与光幕之间的距离均为 0.2 m,有效靶面靠近探测器阵列一侧的长度 $d=1.58$ m,探测器阵列的长度为 1.7 m,规则靶面面积为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$,两个线激光器的发散角为 30° ,线激光器功率可调,最大功率为 1 W,精度为 1.6 mm。

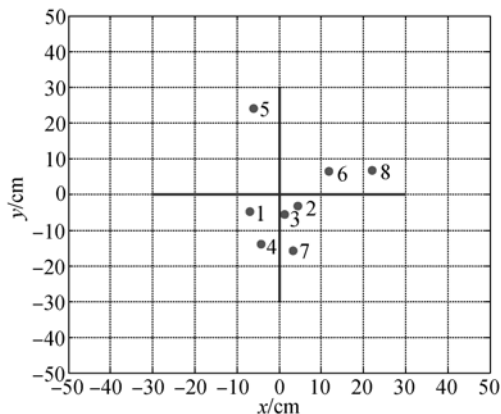


图 11 坐标测试试验结果

Fig. 11 Results of shooting test

参考文献:

- [1] 于海龙, 芮筱亭, 王国平, 等. “金属风暴”武器射击精度影响因素分析[J]. 南京理工大学学报, 2010, 34(4): 524-527.
YU H L, RI X T, WANG G P, *et al.*. Analysis of factors influencing firing precision of metal storm weapons [J]. *Journal of Nanjing University of Science and*

Technology, 2010, 34(4): 524-527. (in Chinese)

实验取 8 次测试结果,由于规则靶面区域的坐标原点在左上角,而标定纸的坐标原点在中心点故将计算结果平移(50 cm, 50 cm)后得到的坐标分布情况,如图 11 所示。表 3 为物体落在标定纸上的坐标值与测量值的对比,得出 X 轴的最大误差为 0.747 mm, Y 轴的最大误差为 0.635 mm。

受人工测量误差以及原理样机结构安装误差等因素的影响,测量误差略大于理论误差,但总体上与理论分析结果接近,验证了误差分析的结果。

表 3 坐标测量误差

Tab. 3 Measurement errors of coordinate (mm)

弹序	标定坐标		输出坐标		误差	
	x	y	x	y	$ \Delta x $	$ \Delta y $
1	-70	-45	-70.179	-45.432	0.179	0.432
2	40	-35	40.546	-35.635	0.546	0.635
3	11	-55	11.279	-55.633	0.279	0.633
4	-40	-140	-39.725	-139.526	0.275	0.474
5	-65	240	-64.522	239.653	0.478	0.347
6	115	65	115.632	65.426	0.632	0.426
7	35	-155	34.253	-154.630	0.747	0.370
8	220	70	220.351	69.370	0.351	0.630

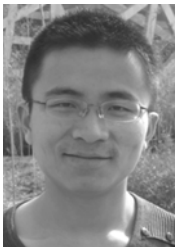
6 结论

本文给出了大面积三角组合光幕光电开关系统的构建方法,提出了一种新型高精度大面积激光立靶密集度测试方法,该方法结构简单,有效测试靶面大。当采用分辨率为 1.6 mm 的探测器阵列,有效光幕的边缘长度从 3.6 m 增加到 10 m 时,测量误差只增加了 0.275 mm,均小于探测器的阵列分辨率,实现了很高的测量精度。下一步将研究测试结构的安装误差、弹丸非直角入射时对测量误差的影响,并进行实弹射击验证。

- [2] 周承仙, 李仰军, 武锦辉, 等. 弹丸速度及弹着点坐标测量系统研究[J]. 弹道学报, 2008, 20(1): 55-58.
ZHOU CH X, LI Y J, WU J H, *et al.*. Measuring system of velocity and impact point coordinate of projectiles [J]. *Journal of Ballistics*, 2008, 20(1): 55-58. (in Chinese)
- [3] 李翰山, 雷志勇. 基于摄像法测量弹丸的空间炸点

- 位置[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 329-336.
- LI H SH, LEI ZH Y. Measurement of space burst location for projectile based on photography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 329-336. (in Chinese).
- [4] 张旭光, 孙巍, 韩广良, 等. 一种弹孔自动识别算法的研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 747-753.
- ZHANG X G, SUN W, HAN G L, *et al.*. An automatic recognition algorithm for bullet holes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 747-753. (in Chinese)
- [5] 董涛, 华灯鑫, 李言, 等. 用于三发弹丸同时着靶的密集度测量方法[J]. 光子学报, 2013, 42(11): 1329-1333.
- DONG T, HUA D X, LI Y, *et al.*. Method for measuring dispersion of three projectiles impacting simultaneously [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(11): 1329-1333. (in Chinese)
- [6] 王向军, 韩双来. 弹落点坐标测量系统的快速校准方法及精度分析[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 686-689.
- WANG X J, HAN SH L. A high speed camera calibration method in coordinate measurement of bomb-fall and its precision analysis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 686-689. (in Chinese)
- [7] 于纪言, 李永新, 王晓鸣. 单列光源反射式光幕靶检测弹着点[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1354-1360.
- YU J Y, LI Y X, WANG X M, *et al.*. Measurement of impact points using reflective light screen target of single column light source [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1354-1360. (in Chinese)
- [8] 韦宏强, 王劲松, 冯进良, 等. 基于激光靶的战斗部破片群速度测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(10): 2225-2229.
- WEI H Q, WANG J S, FENG J L, *et al.*. Measurement method for velocity of warhead fragments based on laser screen [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(10): 2225-2229. (in Chinese)
- [9] 田会, 焦明星, 倪晋平, 等. 多管齐射武器弹幕参数的细分光幕阵列测试方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 507-512.
- TIAN H, JIAO M X, NI J P, *et al.*. Divided screen array measurement method of projectile-curtain parameter for multibarrel volleyed weapons [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 507-512. (in Chinese)
- [10] 倪晋平, 卢红伟, 田会, 等. 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, 34(4): 398-405.
- NI J P, LU H W, TIAN H, *et al.*. 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, 34(4): 398-405. (in Chinese)
- [11] 张智谔, 徐达, 罗建华, 等. 一种大面积抗干扰高射频激光光幕靶设计[J]. 光学技术, 2009, 35(3): 464-466.
- ZHANG ZH Q, XU D, LUO J H, *et al.*. A new design used in large area laser screen for gun of high firing frequency [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(3): 464-466. (in Chinese)
- [12] 黄坤, 何平安, 范若, 等. 线激光束均匀化整形方法研究[J]. 红外与激光工程, 2009, 30(3): 523-526.
- HUANG K, HE P A, FAN R, *et al.*. Uniformization shaping method of line laser beam [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 30(3): 523-526. (in Chinese).

作者简介:



何凯平(1989—),男,江西新余人,博士研究生,2010于长沙理工大学获得学士学位,2012年于装甲兵工程学院获得硕士学位,主要从事靶场光电测试技术方面的研究。E-mail: hekaiping0403@126.com

导师简介:



徐达(1969—),男,辽宁丹东人,博士,教授,博士生导师,1989、1992年于装甲兵工程学院分别获得学士、硕士学位,1997年于南京理工大学获得博士学位,2001年从清华大学博士后出站,主要从事光电测试技术、兵器测试技术等方面的研究。E-mail: 382329885@qq.com