

线激光平行检测阵列弹幕武器弹着点测试方法

何凯平, 徐 达, 李 华

(装甲兵工程学院 兵器工程系, 北京 100072)

摘 要: 针对弹幕武器的立靶密集度测试难题, 提出了一种基于线激光平行检测阵列组合的测试方法。研究了在平行检测阵列结构下实现弹丸定位的测量原理, 推导了弹着点坐标解算公式, 给出了弹着点坐标解算的程序流程, 并分析了检测阵列精度导致的输出误差, 研究了坐标计算误差与坐标位置及靶面大小的分布关系。当规则靶面面积从 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 扩展到 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 时, 排除极小部分高误差区域后的 x 坐标固有误差绝对值从 1.56 mm 变成 5 mm , 增加了 3.44 mm , y 坐标测量固有误差为 2 mm 。对规则靶面面积为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样机的模拟坐标测试结果表明, 当采用的阵列精度为 1.6 mm 时, x 坐标最大误差为 3.6 mm , y 坐标最大误差为 2.8 mm 。该测试方法有效光幕面积大、测量精度高、布靶难度小。
关键词: 测量; 线激光; 平行检测阵列; 弹幕武器密集度; 误差分析

中图分类号: TJ012.3; TP206 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1017004

Measuring method for barrage weapons dispersion by line laser parallel detector array

He Kaiping, Xu Da, Li Hua

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

Abstract: A high precision laser screen dispersion measurement method based on the line laser parallel detector array composite was presented to solve the difficulty of barrage weapons location dispersion test. The principle of measuring shell coordinate based on line laser parallel detector array composite was researched. Impact points coordinate algorithm was derived and the impact points coordinate algorithm flow chart was presented. Algorithm errors caused by laser detector array precision was analyzed, coordinate errors distribution of coordinates positions and target area were researched. The analysis results indicate that maximum theoretical x negative innate errors increases by 3.44 mm , from 1.56 mm to 5 mm and the maximum y innate errors was 2 mm when the regular target area increased from $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ to $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ unless small area with high errors. Tests have done with the proto whose target area was $1\text{ m}\times 1\text{ m}$, the results show that the maximum x errors was 3.6 mm , and the maximum y errors was 2.8 mm when the precision of detector array was 1.6 mm . This measuring method has the advantages of high measuring precision, easy to construct large target area, easy to install.

Key words: measurement; line laser; parallel detector array; barrage weapons dispersion; error analysis

收稿日期: 2016-02-05; 修订日期: 2016-03-03

基金项目: 军队科研计划

作者简介: 何凯平(1989-), 男, 博士生, 主要从事兵器测试技术方面的研究。Email: hekaiping19890403@126.com

导师简介: 徐达(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事兵器测试技术、武器系统智能化技术等方面的研究。Email: zxyxd@sina.com

0 引言

随着导弹突防速度的不断提高,用于导弹近程防御的弹幕武器近年来也得到飞速发展,弹幕武器的射频越来越高^[1],给弹幕武器射击密集度测试技术提出了更高的要求。由于弹幕武器射频高、弹着点散布范围大、短时间发射万发以上弹丸,要求其测试系统有效靶面面积大、对被测弹丸飞行速度范围限制小、对被测火炮射击频率限制小、精度高并适合野外靶场安装调试,弹幕武器的密集度测试已经成为国内外靶场光电测试领域的研究热点之一。

国内外学者针对武器密集度测试方法进行了广泛研究,在靶场光电测试领域也取得了一定的应用,主要有声电定位靶、CCD 交汇靶、光幕靶等。其中声电定位靶使用方便,但抗干扰性能较差,测量精度不高且被测武器射频不能过高。CCD 交汇靶测量安全性好,易布置,但 CCD 需要一定的曝光时间,被测弹丸飞行速度不能过高^[2-5]。光幕靶灵敏度高,对被测弹丸的飞行速度与火炮射频限制小,且靶面直观,在弹幕武器密集度测试领域具有较高的研究价值。光幕靶又可分为天幕靶和光栅光幕靶。采用自然光为光源的天幕靶由于灵敏度较低,通常用于弹丸飞行速度的测量,在弹着点测量中应用较少。而通过多台带靶框结构的光幕靶组成一定几何关系的光幕阵列能够实现对立靶密集度的高精度测量,但光幕结构复杂,难以组建大靶面^[6-8]。光栅光幕靶通过光幕与光电接收器件组合构建光控开关系统。现有光栅光幕靶的光幕组合方式主要有点对点式、平行光幕式以及小范围三角光幕拼接等光幕组合结构,构建大靶面需要激光器和光学镜头过多,安装校准难度大,工作可靠性低^[9-11]。

针对现有光幕靶弹着点测量方法靶框结构复杂、难以实现大靶面高精度测量等问题,提出了一种基于线激光平行检测阵列的组合式结构,旨在构建一种有效光幕面积大、测量精度高、布靶难度小的测试方法,实现对弹幕武器射击弹着点的高精度的测量。

1 光幕结构设计及系统关键参数分析

1.1 光幕结构设计

光幕组合结构如图 1 所示,线激光器 1 与光电检测器阵列 1、线激光器 2 与阵列 2 分别组成一

个大面积三角光幕光电开关系统,两光电检测器阵列垂直于地面,两个三角光幕的光幕重叠区域即为有效靶面区域,将有效靶面的中正方形区域定为规则靶面区域。

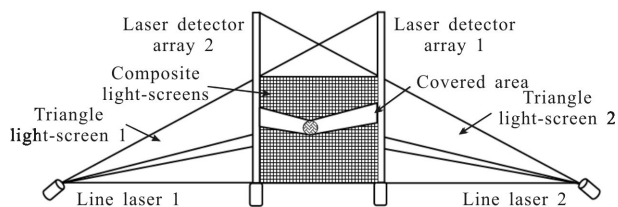


图 1 线激光平行检测阵列结构

Fig.1 Framework of line laser parallel detector array

图 2 为光幕结构俯视图,线激光器与相距较远的光电检测阵列组成检测光幕。带靶框的光电检测器阵列底座的宽度为 50 mm,检测阵列的通光狭缝设在内侧,加上光幕厚度约 15 mm,使得两光幕距离很近,高速弹丸穿过两个光幕上的落点可等效为一个点。

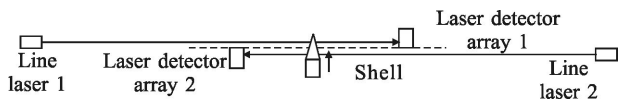


图 2 光幕组合结构俯视图

Fig.2 Overlooked scheme of light-screen composite

1.2 系统关键参数分析

典型过靶弹丸参数如表 1 所示。弹丸最短过靶时间说明信号采集系统需能在 70.6 μs 内完成对弹丸过靶信号的采集,考虑到确保测试结果的可靠性,每发弹丸过靶信号进行三次采样,则所需信号采集频率最低为 42 kHz。弹丸时间间隔表示系统需能在 600 μs 内完成对一发弹丸过靶信号的存储,以保证前后两发弹丸的信号不相互干扰。

表 1 典型过靶弹丸参数

Tab.1 Parameters of typical projectile passing through the target

Parameters	Value	Parameters	Value
Speed	1 000–1 800 m/s	Interval	600 μs
Rate	100 thousands/min	Distance	1.08 m
Projectile	127 mm	Duration	70.6–127 μs

图 3 为最大功率 1 W、发散角 30°的线激光器在与激光发射点垂直距离 20 m 远处，从线光斑中点向两侧各 6 m 内的光功率分布情况。中心点功率为 1.2 MW，两侧功率较低为 0.7 MW，而用同一光功率计测得正午太阳光强为 0.3 MW。通过构建光阑以及滤光片，结合信号采集系统进行采集实验，在 20 m 远的距离上能够稳定地完成光幕遮挡信号的检测，光电检测能力满足构建大靶面的条件。

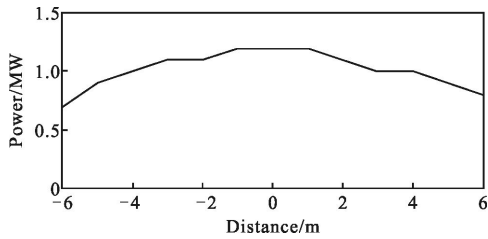


图 3 线激光光斑光功率分布
Fig.3 Distribution of optical power of line laser light spot

2 线激光平行检测阵列结构测量原理

如图 4 所示, AP 、 BQ 表示光电检测器件阵列, K 、 J 为两个线激光发射点。以线激光器与光电检测阵列底端所在水平线为 x 轴, 两光电检测阵列中间位置为 y 轴, 建立直角坐标系。 KD 和 JG 为过激光器和弹丸中心的线, KC 、 KE 、 JF 、 JH 为过激光发射点、靶框及弹丸表面的切线。当有弹丸穿过光幕时, 线激光被遮挡, 对应检测阵列被遮光部分的通道信号发生变化, 采集信号的变化情况, 并将通道信号转换成位置信号, 即可求得被遮光区域在检测阵列上的位置。因此, 结合靶框结构即可推出坐标计算数学模型, 求得弹着点坐标。

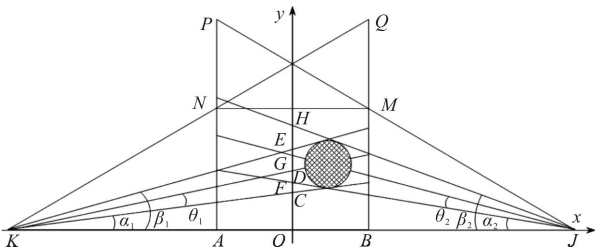


图 4 弹着点坐标解算
Fig.4 Hitting point coordinate algorithm

令激光器发射点到坐标原点的距离 $OK=OJ=l$, 两检测阵列的垂直距离 $AB=h$, $OC=a$, $OE=b$, $OF=c$, $OH=d$ 。可得角 θ_1 和角 θ_2 的表达式为:

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{1}{2} \left(\arctan \frac{b}{l} - \arctan \frac{a}{l} \right) \\ \theta_2 = \frac{1}{2} \left(\arctan \frac{d}{l} - \arctan \frac{c}{l} \right) \end{cases} \quad (1)$$

又有:

$$OD = a + CD = a + \frac{\sqrt{a^2 + l^2} \sin \theta_1}{\cos \left(\theta_1 + \arctan \frac{a}{l} \right)} \quad (2)$$

$$OG = c + EG = c + \frac{\sqrt{c^2 + l^2} \sin \theta_2}{\cos \left(\theta_2 + \arctan \frac{c}{l} \right)} \quad (3)$$

可得弹着点坐标 (x, y) 的计算公式为:

$$\begin{cases} x = \frac{\left[c + \frac{\sqrt{c^2 + l^2} \sin \theta_2}{\cos \left(\theta_2 + \arctan \frac{c}{l} \right)} - a - \frac{\sqrt{a^2 + l^2} \sin \theta_1}{\cos \left(\theta_1 + \arctan \frac{a}{l} \right)} \right] l}{\left[a + \frac{\sqrt{a^2 + l^2} \sin \theta_1}{\cos \left(\theta_1 + \arctan \frac{a}{l} \right)} \right] + \left[c + \frac{\sqrt{c^2 + l^2} \sin \theta_2}{\cos \left(\theta_2 + \arctan \frac{c}{l} \right)} \right]} \\ y = \frac{2 \left[a + \frac{\sqrt{a^2 + l^2} \sin \theta_1}{\cos \left(\theta_1 + \arctan \frac{a}{l} \right)} \right] \cdot \left[c + \frac{\sqrt{c^2 + l^2} \sin \theta_2}{\cos \left(\theta_2 + \arctan \frac{c}{l} \right)} \right]}{\left[a + \frac{\sqrt{a^2 + l^2} \sin \theta_1}{\cos \left(\theta_1 + \arctan \frac{a}{l} \right)} \right] + \left[c + \frac{\sqrt{c^2 + l^2} \sin \theta_2}{\cos \left(\theta_2 + \arctan \frac{c}{l} \right)} \right]} \end{cases} \quad (4)$$

由于光电检测器件阵列位置信号是从靶框上获得的, 因此, a 、 b 、 c 、 d 为阵列输出位置信号通过比例关系换算成 y 轴上的位置信号。由于光电检测器件阵列由带一点光敏面积的光电二极管排列组成, 有一定的输出精度, 因此, 下文将主要分析光电检测器件阵列输出精度对测量误差的影响。

3 固有误差分析

3.1 光电检测器件阵列输出误差

如图 5 所示, 弹丸会同时遮挡住一段区域。设探测器阵列传感器的精度为 σ , F 为弹丸横截面的圆

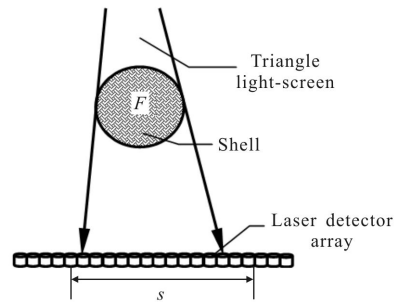


图 5 弹丸投影示意图
Fig.5 Schematic diagram of bullet shadow

心,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/σ 或 $(s/\sigma)+1$ 。设弹丸投影遮挡区域被探测器阵列精度 σ 整除的倍数为 $s//\sigma$,假定入射光束投射到线接收阵列上的一半长度时,才有有效信号输出,则位置检测精度可表示为^[11]:

$$\varphi = \frac{1}{2} \sigma + \frac{1}{2} [s - (s//\sigma) \cdot \sigma] \quad (5)$$

在扇形光幕中,根据弹丸在光幕中位置的不同, $s - (s//\sigma) \cdot \sigma$ 的最大值可以接近 σ ,最小值为 0,因此, φ 的取值范围为:

$$\frac{1}{2} \sigma \leq \varphi < \sigma \quad (6)$$

在不考虑其他因素的情况下, a 、 b 的误差为 φ 。将 a 、 b 值代入公式(1),并设

$$\eta = \frac{\sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sin \frac{\theta}{2}}{\cos \left(\frac{\theta}{2} + \arctan \frac{a}{l} \right)} \quad (7)$$

在实际测量中,弹丸直径相对于激光器与坐标原点的距离 l 来说很小,因此 θ 的值很小, a 、 b 值的输出误差导致的误差值可以忽略。而在公式(7)中, $\sqrt{a^2 + b^2}$ 的误差依然为 φ ,由于 θ 的值很小, $\sin(\theta/2)$ 远小于 $\cos(\theta/2 + \arctan a/l)$ 的值,设其比值为 n ,故其比值也极小。因此 η 的输出误差为 $\varphi \times n$,则公式(1)中 OD 的计算误差为:

$$\Delta OD \approx \varphi \quad (8)$$

由对称性同理可得公式(2)中 EG 上检测器件的计算误差。在上述计算中是假设光束投射到线接收阵列上光电检测器件单个像素的一半长度时,才有信号,事实上,光电检测器件的灵敏度很高,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,所以实际误差值还会小于上述计算值。

由上述分析可以看出,光电检测器件的输出精度会导致 a 、 b 、 c 、 d 的输出误差,需要进一步研究,得出测试方法的固有误差大小。

3.2 坐标计算固有误差

坐标算法的流程如图 6 所示,当弹丸穿过靶面区域时会分别在 x 轴和 y 轴遮挡一段激光,遮挡投影与坐标原点距离为 a 、 b 值。取被测弹丸直径为 40 mm,固定 c 、 d 的值,以及激光器与原点的距离 l 和两检测阵列的距离 h ,可得误差与靶面结构尺寸及弹着点位置的关系分布。当光电检测阵列精度 $\sigma=1.6$ mm

时,由上节结论可知,取 ΔOD 的计算误差:

$$\varphi = 1 \text{ mm} \quad (9)$$

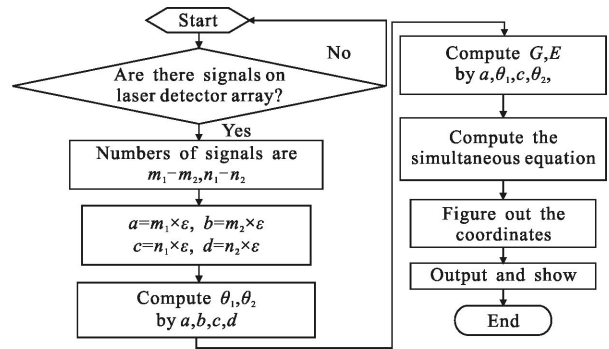


图 6 坐标算法流程图

Fig.6 Coordinate algorithm flow chart

根据公式(1)~(4)可得 x 、 y 坐标测量误差分布如图 7~12 所示。

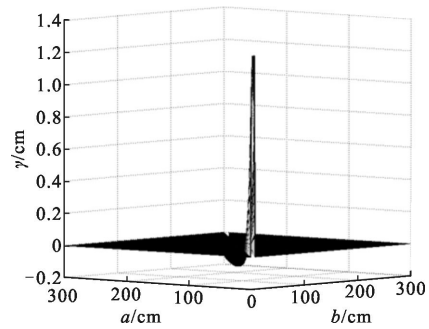


图 7 $l=5$ m, $h=3$ m 时的 x 坐标误差

Fig.7 x errors for $l=5$ m, $h=3$ m

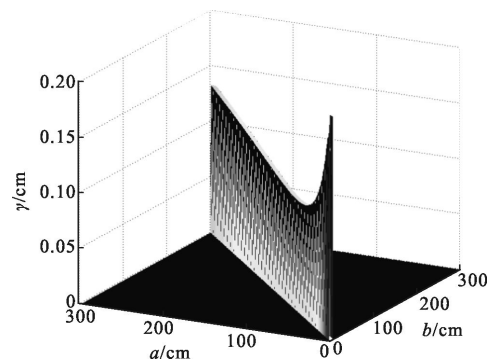


图 8 $l=5$ m, $h=3$ m 时的 y 坐标误差

Fig.8 y errors for $l=5$ m, $h=3$ m

图 7、图 9、图 11 为三种不同靶面面积下, x 坐标的输出误差分布情况。在图 7 中,靶面的大部分区域 x 坐标输出误差都为负值,负值误差绝对值最大的值为 1.56 mm,说明大部分靶面区域 x 坐标输出误差

绝对值都小于 1.56 mm,具有很高的理论测量精度。而在靠近靶面坐标原点附近,输出误差最大为12.5 mm,而误差大于 2 mm 的靶面分布在从原点开始,面积为 83 mm×83 mm 的区域。

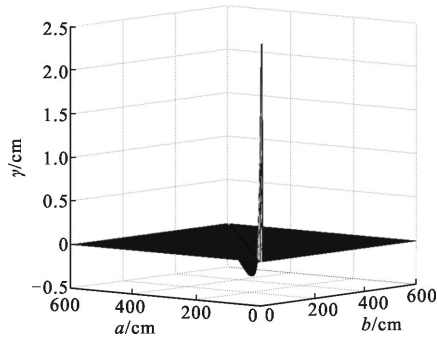


图 9 $l=10\text{ m}$, $h=6\text{ m}$ 时的 x 坐标误差
Fig.9 x errors for $l=10\text{ m}$, $h=6\text{ m}$

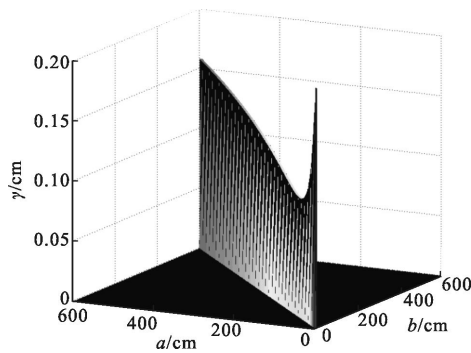


图 10 $l=10\text{ m}$, $h=6\text{ m}$ 时的 y 坐标误差
Fig.10 y errors for $l=10\text{ m}$, $h=6\text{ m}$

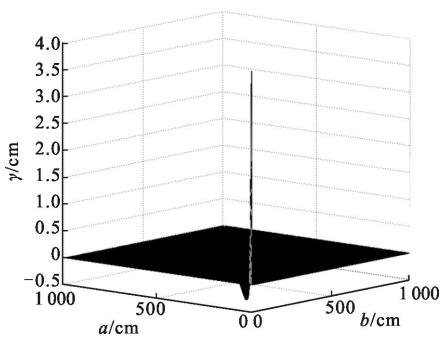


图 11 $l=16\text{ m}$, $h=10\text{ m}$ 时的 x 坐标误差
Fig.11 x errors for $l=16\text{ m}$, $h=10\text{ m}$

图 9 中 x 坐标负值误差的绝对值最大数为 3.12 mm,靠近靶面坐标原点位置的误差较大,最大值为 24.95 mm,而误差大于 3 mm 的靶面分布在从原点开始的 93 mm×93 mm 的区域。

图 11 中 x 坐标负值误差的最大绝对值为 5 mm,靠近靶面坐标原点位置的误差较大,而误差大于 4 mm 的靶面分布在从原点开始,面积为 98 mm×98 mm 的区域。可以看出大输出误差范围在光幕内非常小的一个区域。

图 8、10、12 为三种不同靶面面积情况下, y 坐标的输出误差。在三种不同的靶面面积下 y 坐标的最小输出误差均为 1 mm,最大输出误差均为约 2 mm;输出误差呈相似分布,可以看出该测试方法的 y 坐标输出误差小,且最大误差不随靶面面积扩大而增大。

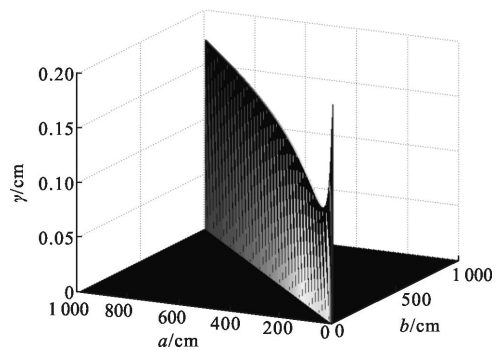


图 12 $l=16\text{ m}$, $h=10\text{ m}$ 时的 y 坐标误差
Fig.12 y errors for $l=16\text{ m}$, $h=10\text{ m}$

表 2 为三种不同靶面面积的误差对比,随着靶面的扩大, x 坐标的误差值有所增大,有效靶面从 3 m×3 m 增加到 10 m×10 m 时, x 坐标大部分区域最大误差从 1.56 mm 增加到 5 mm, y 坐标的最大误差为 2 mm。表明在组建大面积测试靶时,也能够保证较高的测量精度,能够构建大靶面,且误差较高的部分相对于靶面面积很小,可以根据误差分析结果对测试结果进行单独修正,提高测量精度。

表 2 不同靶面面积时的误差最大值

Tab.2 Maximum errors of different target areas

l/m	h/m	x maximum negative errors/mm	x maximum errors/mm	y maximum errors/mm
5	3	-1.56	12.5	2
10	6	-3.12	24.95	2
16	10	-5	40	2

4 模拟实验验证

实验原理样机的基本结构参数为:光电检测器件阵列的宽度为 50 mm,两线激光器的距离为 7 m,

与坐标原点的距离相等,均为 $l=3.5\text{ m}$,两光电检测器件阵列的距离 $h=1\text{ m}$,有效靶面面积为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$,两线激光器发散角为 30° ,有效发散角即照射在光电检测器件阵列上的部分 $\theta_1=\theta_2=\arctan 1/3$,线激光器功率可调,最大功率为 1 W ,光电检测器件阵列的长度 $L=1.34\text{ m}$,输出精度为 $\sigma=1.6\text{ mm}$ 。

通过直径 40 mm 的圆柱形橡皮条在不同位置遮挡光幕模拟弹丸过靶情况进行实验验证,考虑到不同靶面区域误差情况不同,实验选取的坐标测量验证点平均分布在靶框各个区域。从采集到的数据中选取了九次过靶时的通道数据,并同时将所有测得的弹着点平移 $(0,-500\text{ mm})$,得出坐标分布情况如图 13 所示。

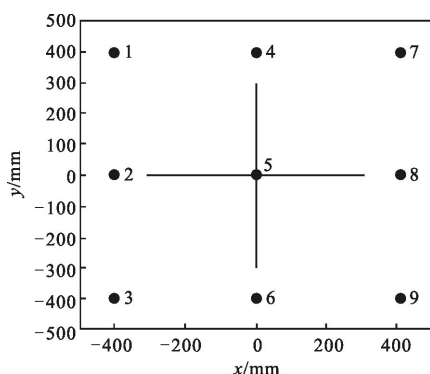


图 13 仿真射击实验结果

Fig.13 Test results of simulative shooting

表 3 为模拟弹丸在靶纸上的坐标与系统测得的坐标值对比。可以看出, x 坐标测量值最大误差 3.6 mm , y 坐标最大误差为 2.8 mm 。由于人工测量误差以及测试结构安装误差等因素影响,实验得到的误差值大于理论分析所得的误差,但与理论分析结果接近。

表 3 坐标测量误差(单位: mm)

Tab.3 Errors of coordinate measurement(Unit:mm)

	Standardization		Output coordinate		Errors	
	x	y	x	y	$ \Delta x $	$ \Delta y $
1	-400	400	-397.7	398.1	2.3	1.9
2	-400	0	-397.6	2.1	2.4	2.1
3	-400	-400	-403.5	-398.4	3.5	1.6
4	0	400	1.1	397.2	1.1	2.8
5	0	0	-2.0	2.3	2.0	2.3
6	0	-400	-3.1	-397.5	3.1	2.5
7	400	400	396.5	401.6	3.5	1.6
8	400	0	402.3	2.8	2.3	2.8
9	400	-400	403.6	-398.7	3.6	1.3

5 结论

针对现有光幕靶测量方法结构复杂、难以构建大靶面的问题,提出了一种有效靶面大、布靶难度小、测量精度高的弹幕武器弹着点测量方法。通过不同靶面面积坐标测试误差仿真,验证了构建高精度大靶面激光靶的理论可行性,以及靶面可扩展性,当有效靶面从 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 增加到 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 时, x 坐标大部分区域最大误差从 1.56 mm 增加到 5 mm , y 坐标的最大误差为 2 mm 。为激光靶测量误差修正提供了理论支撑。并进行了原理样机实验验证,当有效靶面为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 时, x 坐标测量值最大误差 3.6 mm , y 坐标最大误差为 2.8 mm ,验证了测量原理的可行性。

参考文献:

- [1] Cai Haichao, Sun Shengchun. Research on the relationship between hit probability and fire rate of metal storm weapon [J]. *Command Control & Simulation*, 2008, 30(1): 51-53. (in Chinese)
蔡海超, 孙胜春. 金属风暴武器射速与命中概率关系研究 [J]. 指挥控制与仿真, 2008, 30(1): 51-53.
- [2] Zhang Ning, Shen Xiangheng. Verification method for measuring accuracy of shape center location of target by using CCD camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 279-284. (in Chinese)
张宁, 沈湘衡. 采用 CCD 相机测量目标靶形心位置精度的方法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 279-284.
- [3] Li Hanshan, Lei Zhiyong. Measurement of space burst location for projectile base on photography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 329-336. (in Chinese)
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.
- [4] Peng Chen, Chen Qian, Qian Weixian. Miss distance error analysis and modification for infrared tracking and measuring system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2178-2184. (in Chinese)
彭晨, 陈钱, 钱惟贤. 红外跟踪测量系统的脱靶量误差分析与修正 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2178-2184.
- [5] Dong Tao, Hua Dengxin, Li Yan, et al. Method for measuring dispersion of three projectiles impacting simultaneously [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(11): 1329-1333. (in Chinese)
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.
- [6] Ni Jinping, Lu Hongwei, Tian Hui, 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)
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.
- [7] Li Hanshan, Lei Zhiyong. Measurement of projectile burst coordinates by using multi-screen optical method and its error analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32 (2): 0212003. (in Chinese)
李翰山, 雷致勇. 多幕光学法测量弹丸炸点坐标及误差分析[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0212003.
- [8] Tian Hui, Jiao Mingxing, Ni Jinping, 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)
田会, 焦明星, 倪晋平, 等. 多管齐射武器弹幕参量的细分光幕阵列测试方法 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 507–512.
- [9] Li Hanshan, Lei Zhiyong. Time calculation method base on wavelet analysis in vertical target measurement system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1774–1778. (in Chinese)
李翰山, 雷志勇. 采用小波分析法的立靶测量系统时间计算方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1774–1778.
- [10] Li Hanshan, Lei Zhiyong. Research on detection sensitivity and acquirement rate of sky-screen [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2509–2514. (in Chinese)
李翰山, 雷志勇. 天幕靶探测灵敏度与捕获率研究 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2509–2514.
- [11] He Kaiping, Xu Da, Li Hua. High precision measurement for barrage weapon dispersion based on large area triangle composite light-screens[J]. *Opt Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1523–1529. (in Chinese)
何凯平, 徐达, 李华. 大面积三角组合光幕弹幕武器密集度的高精度测试[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(6): 1523–1529.