

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208983

# 阵列式破片速度及飞散特性一体化测量系统

周家杰<sup>1</sup> 孔德仁<sup>1</sup> 徐春冬<sup>1</sup> 余益欣<sup>2</sup> 唐亦康<sup>1</sup>

(1.南京理工大学机械工程学院 南京 210094; 2.长春理工大学光电信息科学与工程学院 长春 130022)

**摘要:** 针对常用破片速度及飞散特性测量方法存在的问题,开展了破片速度及飞散特性一体化测量方法的研究,设计了一种阵列式破片速度及飞散特性一体化测量系统。测量系统以断通式梳状靶为阵列单元组建测量靶,基于多路同步计时方法,得到破片飞行时间与着靶位置,结合相关测量原理,获得破片速度与飞散特性。开展了验证试验,结果表明:该系统能实现破片速度及飞散特性的一体化测量,在破片飞散特性测量上,与人工统计的结果相比,破片捕获率及分布密度测量精度都至少提高了3%,飞散角测量误差低于5%,验证了测量系统可行及测量结果可信,为破片速度及飞散特性的一体化测量提供了一种有效的测量手段。

**关键词:** 破片速度;飞散特性;一体化测量;梳状靶;同步计时

**中图分类号:** TJ410.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

## Array-type integrated measurement system for fragment velocity and scatter peculiarity

Zhou Jiajie<sup>1</sup> Kong Deren<sup>1</sup> Xu Chundong<sup>1</sup> Yu Yixin<sup>2</sup> Tang Yikang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Aiming at the problems existing in common measurement methods of fragment velocity and scatter peculiarity, the integrated measurement method of fragment velocity and scatter peculiarity is studied, and an array-type integrated measurement system is designed in this paper. The integrated measurement system takes the comb target as the array element to construct the measurement target. Based on the multi-channel synchronous timing method, the flight time and target location of fragment are obtained. Combined with the correlation measurement principle, the fragment velocity and scatter peculiarity are obtained. The validation test result shows that the system can realize the integrated measurement of fragment velocity and scatter peculiarity. In the measurement of fragment scatter peculiarity, compared with the results of manual statistics, the fragment capture rate and the measurement accuracy of distribution density is improved by at least 3%, and the measurement error of scatter Angle is less than 5%. It verifies the feasibility of the integrated measurement system and the reliability of the measurement results. The system provides an effective measurement method for the integrated measurement of fragment velocity and scatter peculiarity.

**Keywords:** fragment velocity; scatter peculiarity; integrated measurement; comb target; synchronous timing

## 0 引言

破片作为破片战斗部<sup>[1]</sup>的主要毁伤元之一,对其速度与飞散特性的准确测量是评价破片战斗部毁伤威力的前提条件。破片速度<sup>[2]</sup>主要指破片初速及破片在一定距离的存速,破片飞散特性<sup>[3]</sup>主要包括破片飞散角及分布密度。

破片速度及飞散特性的一体化测量方法可分接触式及非接触式两类。在接触式测量方法上,国外学者<sup>[4]</sup>提出将

断通靶与靶板组合,使靶板同时具备速度及飞散特性的测试能力。该方法有一定的实用性,但设备搭建成本高,只能单次使用,且在破片分布密集时,其破片捕获率较低。国内申景田<sup>[5]</sup>等改进了梳状靶的电路结构,使梳状靶能同时测量破片速度和飞散特性。该方法的测量精度较高,但不适合破片散布大的测试,且相应的布线工作量比常规梳状靶的要大。在非接触式测量方法上,国内学者提出了LED多光幕组合测量方法<sup>[6-7]</sup>及激光光幕坐标靶<sup>[8]</sup>用于破片速度

收稿日期:2022-02-09

及飞散特性的测量。该方法的测量精度较高,但在爆炸场中不易防护,不适合威力大、分布密集的破片测试。国内外部分学者采用立体视觉成像的方法对破片速度及飞散特性进行了测量<sup>[9-12]</sup>。该方法布设简单且测量精度较高,但存在测量设备成本高,测试区域有限,密集目标和弱小目标图像处理困难的问题。前述测量方法存在破片捕获率低或测试区域有限的问题,导致所得数据无法全面准确的评价破片战斗部的毁伤威力。

针对现阶段破片速度及飞散特性一体化测量方法存在的不足,研究了一种阵列式破片速度及飞散特性一体化测量系统。论文介绍了一体化测量系统的组成及工作模式,阐述了与系统相配的破片速度及飞散特性测量原理,组建了测量靶,设计了多路同步计时的方法,开展了试验验证,对系统的可行性及测量精度进行了检验。

### 1 系统组成及测量原理

#### 1.1 系统组成架构

常规破片战斗部在指定位置处的分布密度指标为每平方米破片的个数。为提高破片捕获率,将测量靶按分布密度指标要求,分成多个具备相同测试能力的测量单元,结合同步计时方法,构建阵列式破片速度及飞散特性一体化测量系统。

一体化测量系统组成如图 1 所示。系统分阵列模块、采集存储模块、控制模块及外触发模块。其中,测量靶由若干个阵列模块组成,阵列模块由若干个阵列单元组成,阵列单元即测量单元。当接收到外触发模块产生的外触发信号时,采集存储模块开始计时,并采集各阵列单元输出的电信号,以测量各着靶破片从起始位置飞至靶面的时间。在接收到控制模块的指令后,采集存储模块将包含破片飞行时间、着靶位置及个数的信息传输给控制模块,由控制模块自动解算出破片速度及飞散特性。为减少破片飞行时间的测量误差,采用断线法作为外触发方式,即将触发线绕于战斗部外壳,当外壳破裂时,触发线断,外触发模块产生外触发信号。

#### 1.2 系统工作模式

根据破片速度及飞散特性的测量要求,将系统工作模式分成了两种。当要求只测破片飞行时间、飞散角及分布密度时,采用工作模式 1,即只在测点处布设一个测量靶。当要求测量破片飞行时间、飞散角、分布密度及破片在一定距离的存速时,采用工作模式 2,即在速度测点前后各布置一个测量靶,构成前靶、后靶的结构形式,如图 2 所示。前后靶靶间距  $D_0$ 。根据试验要求灵活调整。前后靶阵列模块对应的采集存储模块相互独立,但共用一个控制模块。

#### 1.3 破片速度及飞散特性测量原理

##### 1) 坐标系的建立

获取破片速度及飞散特性的重要前提是得到破片着靶点相对于爆心的位置,因此有必要建立爆心坐标系与靶坐标系,将破片着靶点的靶坐标转换成爆心坐标。为控制坐

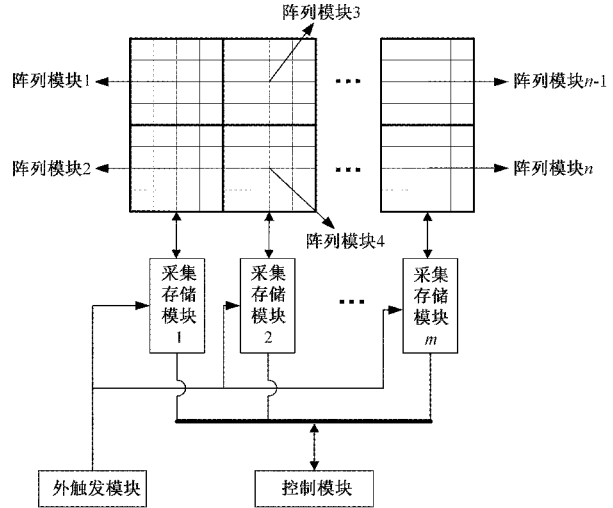


图 1 测量系统组成示意图

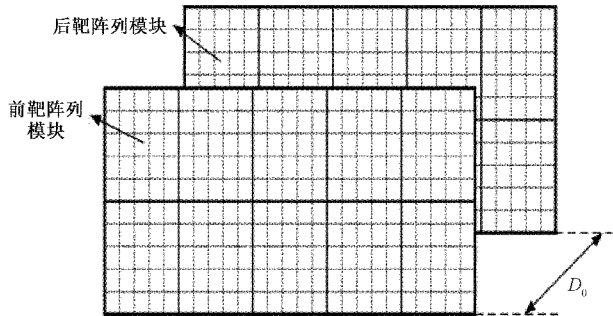


图 2 工作模式 2 的前、后靶构成示意图

标转换的误差,将被着阵列单元的中心坐标作为破片着靶点坐标。

为提高坐标系建立及坐标转换的精度,测量靶靶面为平面。如图 3 所示,爆心坐标系是以爆心为原点建立的柱坐标系,靶坐标系是以测量靶的面向爆心面左下顶点为原点建立的平面直角坐标系。爆心坐标系以竖直向上为  $z$  轴正方向,极轴  $r$  与地面平行,以顺时针方向为极角正方向。靶坐标系以与战斗部轴线平行的靶边作为  $x$  轴,取与战斗部轴线正航向相反的方向作为  $x$  轴正方向,以竖直向上为  $y$  轴正方向。

如图 3 所示,极轴  $r$  与测量靶的交点  $B$  在靶坐标系原点的正上方,设交点  $B$  的靶纵坐标为  $y_0$ ,当爆高为  $H$  及靶坐标系原点  $O$  离地高度为  $H_1$  时,则:

$$y_0 = H - H_1 \tag{1}$$

式中: $H$  及  $H_1$  可通过试验大纲或现场测量直接获取。

如图 3 所示,设爆心  $A$  在测量靶上的投影点  $A'$  的靶坐标为  $(x_{A'}, y_{A'})$ ,爆心坐标为  $(r_{A'}, \varphi_{A'}, z_{A'})$ ,则两种坐标的转换关系为:

$$r_{A'} = \sqrt{AB^2 - x_{A'}^2} = \sqrt{OA^2 - y_0^2 - x_{A'}^2} = R \tag{2}$$

$$\varphi_{A'} = \arctan(x_{A'}/R) \tag{3}$$

$$z_{A'} = y_{A'} - y_0 = y_0 - y_0 = 0 \tag{4}$$

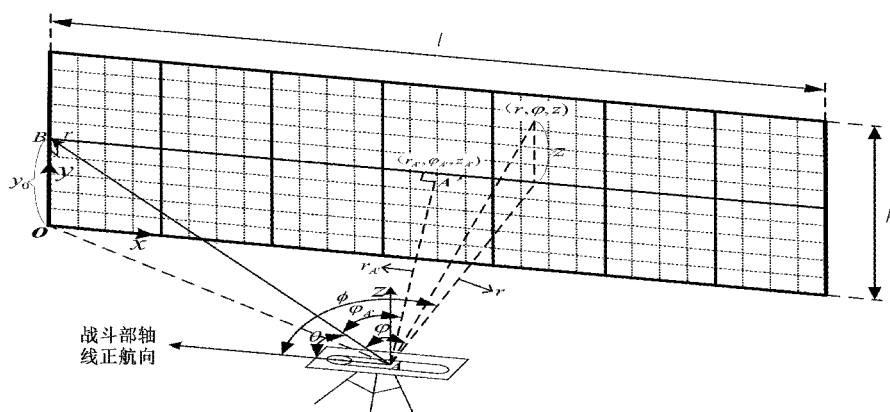


图3 坐标系建立示意图

式中:  $OA$  为两坐标系原点的距离, 可通过现场测量直接获得;  $R$  为测试距离, 由测试大纲获得。在通过试验大纲或现场测量获得  $OA, R$  及  $y_0$  后, 可通过式(2)逆推得到  $x_{A'}$ 。

若阵列单元中心的靶坐标为  $(x, y)$ , 爆心坐标为  $(r, \varphi, z)$ , 则两种坐标有以下转换关系:

$$r = \sqrt{r_{A'}^2 + (x - x_{A'})^2} \quad (5)$$

$$\varphi = \varphi_{A'} + \arctan[(x - x_{A'})/r_{A'}] \quad (6)$$

$$z = y - y_{A'} = y - y_0 \quad (7)$$

当采用工作模式2时, 前、后靶各自建立坐标系, 相应建立方法与转换关系不变。

## 2) 破片速度测量原理

### (1) 工作模式1的速度获取

对于已知速度衰减规律的破片, 可将工作模式1测得的破片飞至靶的时间及距离代入相应速度衰减公式, 计算得到破片初速或破片到靶的存速。破片飞至靶的时间  $t$  直接由采集存储模块的计时值获得。破片在运动过程中受

到重力及空气阻力的共同作用, 而常用破片的质量很小, 导致受到的重力远远小于空气阻力, 此时可忽略重力对破片运动的影响, 因此, 可认为破片运动轨迹为直线<sup>[13]</sup>。破片起始位置与爆心接近, 且两者的距离远小于破片飞至靶的距离, 因此可将爆心至破片着靶点的距离作为破片飞至靶的距离  $s$ :

$$s = \sqrt{r^2 + z^2} = \sqrt{R^2 + (x - x_{A'})^2 + (y - y_0)^2} \quad (8)$$

式中:  $R$  为测试距离;  $x, y$  为破片着靶点的靶坐标;  $x_{A'}$  为爆心  $A$  在测量靶上的投影点  $A'$  的靶横坐标;  $y_0$  为极轴  $r$  与测量靶的交点  $B$  的靶纵坐标。

### (2) 工作模式2的速度获取

工作模式2通过定距测时原理获取速度, 获取流程如图4所示。由前后靶对应采集存储模块的计时值相减获得破片在前后靶之间的飞行时间。采用前后靶靶间距  $D_0$  作为破片在前后靶之间的飞行距离。

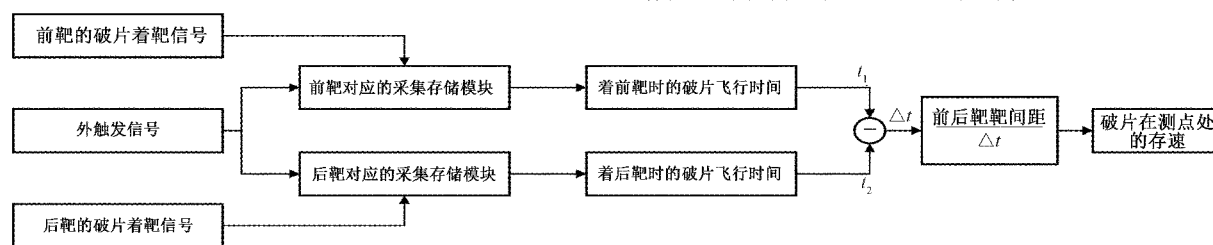


图4 工作模式2的破片速度获取流程

### 3) 破片飞散特性测量原理

两种工作模式都根据着靶破片的位置, 计算对应轴向角, 统计各轴向角对应的破片个数, 按定义计算飞散角及分布密度。计算时, 将阵列单元中心点与爆心的连线在战斗部轴线所在水平面的投影与轴线正航向之间的夹角作为轴向角。

当破片着靶点的靶坐标为  $(x, y)$ , 爆心坐标为  $(r, \varphi, z)$  时, 则该破片对应轴向角  $\phi$  为:

$$\phi = \theta + \varphi = 90^\circ + \arctan[(x - x_{A'})/R] \quad (9)$$

式中:  $\theta$  表示爆心坐标系的极轴与战斗部轴线正航向之间

的夹角;  $x_{A'}$  为爆心  $A$  在测量靶上的投影点  $A'$  的靶横坐标;  $R$  为测试距离。

### (1) 破片飞散角计算方法

破片飞散角是除去测量靶两端各占总数5%的破片, 中间占总数90%的破片对应的飞散区域以爆心为圆心所形成的的圆心角, 即从测量靶的一侧开始, 靶上95%破片对应轴向角减去5%破片对应轴向角的值:

$$\Omega = \phi_{0.95} - \phi_{0.05} \quad (10)$$

式中:  $\Omega$  为破片飞散角;  $\phi_{0.05}$  与  $\phi_{0.95}$  分别为5%及95%破片对应轴向角。

(2) 破片分布密度计算方法

破片分布密度是指在一定爆心距处,任意两轴向角之间,单位面积上的破片数。分布密度计算式如下:

$$\rho = N_{\phi_{选1} \phi_{选2}} / S_{\phi_{选1} \phi_{选2}} \quad (11)$$

式中: $\rho$  表示破片分布密度; $N_{\phi_{选1} \phi_{选2}}$ 、 $S_{\phi_{选1} \phi_{选2}}$  分别表示选定的两个轴向角  $\phi_{选1}$  与  $\phi_{选2}$  之间的着靶破片数及靶面面积。

2 系统设计

2.1 测量靶的设计

如图 5(a)所示,阵列单元采用断通式梳状靶作为传感元件;如图 5(b)所示,阵列模块由若干个阵列单元拼接构成;如图 5(c)所示,由若干个阵列模块拼接组成了测量靶。

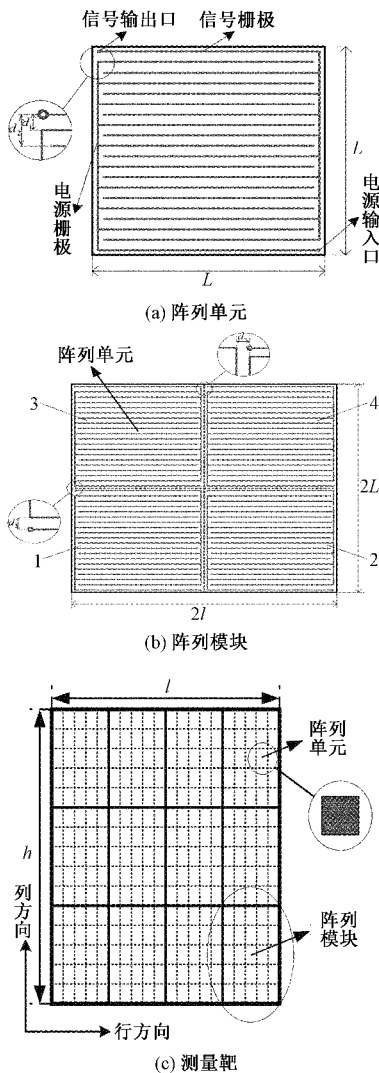


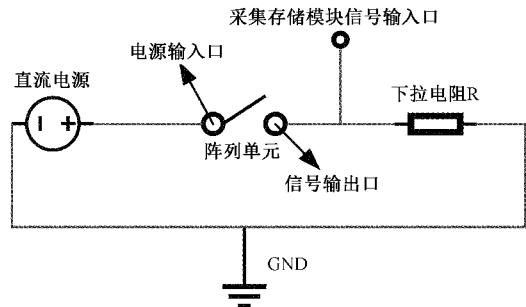
图 5 测量靶设计示意图

1) 阵列单元设计

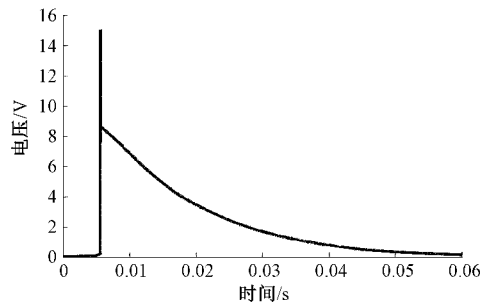
阵列单元的栅极分为信号栅极与电源栅极。为确保阵列单元各点的破片分辨率相同,使同种栅极的最小间距

$d_2$  为异种栅极最小间距  $d_1$  的两倍。为不漏测着阵列单元的破片, $d_1$  不大于测试破片最小尺寸的一半。为灵活拼接阵列单元,采用正方形作为阵列单元测量面的形状,测量面的边长  $L$  由破片飞散角测试允许的误差确定。阵列单元的数量由破片分布密度的指标而定。为提高阵列单元的防水防潮性能,采用纳米防水涂层喷涂于表面。

阵列单元的工作原理及相应破片着靶信号如图 6 所示,阵列单元可等效为开关。破片着靶前,开关处于断开状态,信号输出口的电位因下拉为低;破片着靶时,开关闭合,信号输出口的电位被直流电源拉高;破片着靶后,开关再次断开,信号输出口的电位变低。由此可知,阵列单元因破片着靶产生的电信号为一类正脉冲信号。为提高信号的信噪比,直流电源由采集存储模块提供。



(a) 阵列单元的工作原理



(b) 破片着靶信号

图 6 阵列单元的工作原理及输出

2) 阵列模块设计

阵列模块是由阵列单元按  $m \times n$  阵列拼接而成, $m$  与  $n$  分别表示列方向与行方向的阵列单元个数。图 5(b)所示为阵列单元按  $2 \times 2$  阵列拼接成的阵列模块。设计阵列模块时,可将多个阵列单元布设在一张 PCB 电路板上,以此 PCB 电路板作为阵列模块。为不漏测着阵列模块的破片,相邻阵列单元间距最小的两个栅极的种类互异,且间距最小值  $d_3$  满足  $d_3 = d_2$ 。为减少现场的布线量,以 PCB 布线的方式在阵列模块背爆心面走线,使一个阵列模块只引出一根多芯线。图 5(b)中的 1,2,3,4 表示阵列单元在阵列模块中的序号。阵列单元的位置与序号的对应关系为:

$$k = (a + 1)n + b \quad (12)$$

式中: $k$  为阵列单元的序号, $a, b$  分别为阵列单元的行、列

位置,  $1 \leq a \leq m, 1 \leq b \leq n$ ,  $a$  与  $b$  的最小值分别对应阵列模块面向爆心面最下边一行及最左边一列。

### 3) 测量靶设计

测量靶是由阵列模块按  $i \times j$  阵列拼接而成, 构建的形状为一字形,  $i$  与  $j$  分别表示列方向与行方向的阵列模块个数。测量靶的列宽为  $l = j \times n \times L$ , 行高为  $h = i \times m \times L$ , 列宽与行高可根据测试要求灵活改变。阵列模块的位置与序号的对应关系与阵列单元的一致。图 7 为测量靶的典型布场。由图 7 可知, 测量靶对应的轴向角范围为  $\varphi_1 \sim \varphi_2$ , 且  $0^\circ < \varphi_1 < \varphi_2 < 180^\circ$ , 该范围可根据试验要求灵活改变, 即系统的测试区域不受限。考虑到测量靶工程安装的可操作性, 以阵列模块为基本安装单元, 采用框架结构安装测量靶。为降低线被破片击断的概率, 将线布置于框架之后。

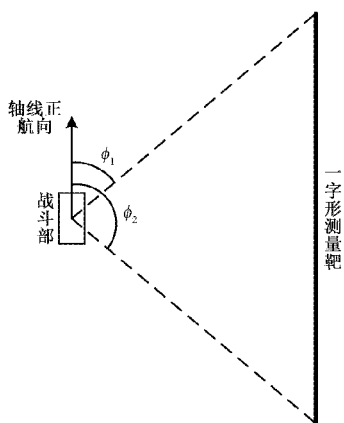


图 7 一字形测量靶典型布场示意

## 2.2 同步计时逻辑设计

当测量靶包含的阵列模块个数为  $e$ , 阵列模块包含的阵列单元个数为  $f$  时, 则测量靶共包含  $e \times f$  个阵列单元。只需可靠记录  $e \times f$  个阵列单元输出的电信号, 即可分辨破片着靶的时序关系及位置, 因此采集存储模块应具备高精度地多路并行信号采集及多路同步计时的能力。相比

于 MCU 等主控芯片, FPGA 的最大优势在于多路并行处理能力, 及能够利用自身的工作时钟实现计时, 因此选用 FPGA 作为主控芯片。

### 1) 采集逻辑设计

实现同步计时的前提是可靠的采集信号。为不漏测同时着不同阵列单元的破片, 将 FPGA I/O 引脚与阵列单元的信号输出口一一相连, 以同步采集各阵列单元的电信号。采用该连接方式时, 可通过定义 FPGA I/O 引脚, 间接对阵列单元的位置进行记录。当采集到某阵列单元的破片着靶信号时, 只要还未到采集结束时间, 就继续采集该阵列单元的信号, 以不漏测先后着该阵列单元的多枚破片。采集结束时间由破片速度的指标与测点位置而定。理论上讲, 通过该采集逻辑, 系统能具备比靶板法更高的破片捕获率。

通常而言, 多个破片同时着一个阵列单元或多个破片先后着同一个点的概率极小, 因此不考虑这两种情况的信号采集。

### 2) 计时逻辑设计

为便于辨识外触发信号, 采用 TTL 脉冲作为外触发信号的输出形式。由图 6(b) 得, 阵列单元产生的破片着靶信号具有上升快下降慢的特征, 而快速变化的上升沿阶段能更清晰的表征破片着靶信号。为提高测时精度, 将外触发信号的上升沿作为各路计时启动的信号, 将采集到的各破片着靶信号的上升沿作为各破片飞行时间计时停止的信号。

多路同步计时的逻辑如图 8 所示。通过例化计时模块, 使各路都对一个计时器, 以实现各路独立计时的目的。为不漏计着靶破片的飞行时间, 每采集到一个破片着靶信号的上升沿就计一个时间间隔并存储, 且当信号采集未结束前, 各路计时器不停止计时。若某路在计时结束前未采集到破片着靶信号, 则计时值存储为 0, 以便控制模块剔除无效数据。着靶破片的个数记为采集到的破片着靶信号个数。

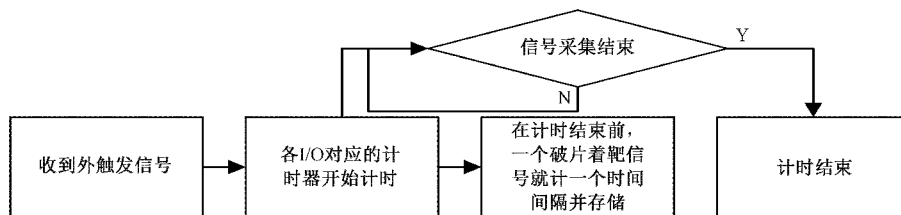
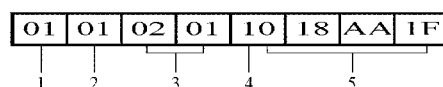


图 8 多路同步计时逻辑图

为便于采集存储模块与控制模块之间的通信, 及不漏存有用信息, 将各着靶破片的计时结果及位置信息转为多字节数据, 数据字节数可根据试验要求改变。图 9 为 8 字节编码数据的示意, 含义为第 1 个着阵列单元的破片的飞行时间包含 1616415 个 FPGA 工作时钟, 且该阵列单元位于与采集存储模块 1 相连的阵列模块 1 的第 2 行第 1 列位置。



1-采集存储模块的序号; 2-阵列模块的序号;  
3-阵列单元的位置; 4-破片着阵列单元的序号; 5-计时结果

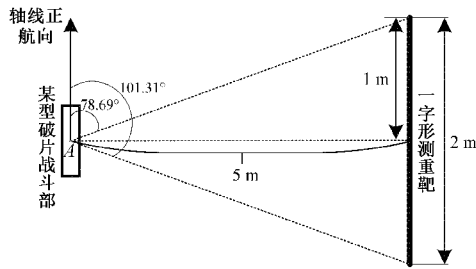
图 9 8 字节编码数据示意图

### 3 试验验证

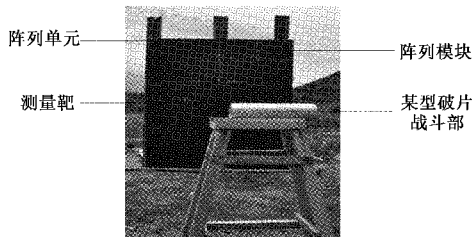
#### 3.1 试验布置

##### 1) 战斗部试验

为验证一体化测量系统的可行性及测量精度,将系统应用到某型破片战斗部静爆试验中。采用一体化测量系统的工作模式 1 对轴向角  $78.69^\circ \sim 101.31^\circ$  范围内的破片速度及飞散特性进行测试,试验布场如图 10 所示。战斗部卧式放置于弹架上,爆高为 1.5 m,在离爆心于地面投影点的 5 m 处,布置宽 2 m、高 3 m 的测量靶。测量靶垂直于地面,由阵列模块按  $6 \times 4$  阵列拼接而成。阵列模块的尺寸为  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ,由阵列单元按  $5 \times 5$  阵列拼接而成。阵列单元的尺寸为  $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ ,异种栅极的最小间距  $d_1$  为 3 mm。试验共开展 2 次。



(a) 布场示意



(b) 实际布场图

图 10 试验布场图

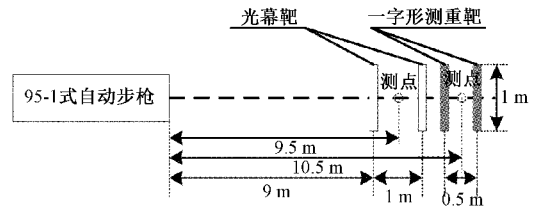
##### 2) 枪械试验

考虑到战斗部试验难以准确检验一体化测量系统的测速精度,开展了枪械试验。枪械采用 95-1 式自动步枪,弹丸弹径为 5.8 mm,通过一体化测量系统的工作模式 2 及光幕靶对弹速进行测量,对比测速结果,以检验一体化测量系统的测速精度。试验布场如图 11 所示,光幕靶的测点离枪口 9.5 m,前后靶距为 1 m,一体化测量系统的测点距为 10.5 m,靶距为 0.5 m。测量靶垂直于地面布置,高宽都为 1 m 且底边离地 0.8 m。前后靶都由阵列模块按  $4 \times 4$  阵列拼接而成。阵列模块的尺寸为  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ ,由阵列单元按  $2 \times 2$  阵列拼接而成。阵列单元的尺寸为  $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$ ,异种栅极的最小间距  $d_1$  为 2 mm。共开展 5 次试验,且每次试验的火线高度为 1 m。

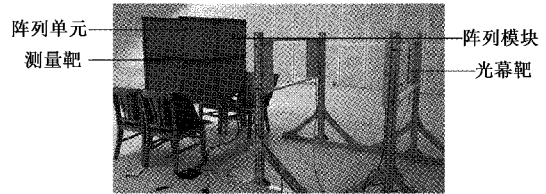
#### 3.2 结果及分析

##### 1) 战斗部试验的结果及分析

战斗部以 6 mm 球形钨破片作为预制破片,将破片飞



(a) 布场示意



(b) 实际布场图

图 11 试验布场图

行时间及飞行距离代入相应速度衰减式<sup>[14]</sup>中,可获得破片到靶的速度。破片着靶数与速度在轴向角上的分布如图 12 及 13 所示。图 13 的破片速度指各轴向角的速度均值。破片分布密度对应的爆心距为 5 m,轴向角范围为  $78.69^\circ \sim 101.31^\circ$ ,靶面面积为  $6 \text{ m}^2$ 。由图 13 计算破片在轴向角范围内的速度平均值。为检验系统在飞散特性上的测量精度,人工统计测量靶的破片穿孔,将穿孔作为破片的着靶点,采用与一体化测量系统相同的破片飞散特性计算方法,获得破片飞散角及分布密度,并计算与系统测量结果的相对误差。测量结果及误差如表 1 所示。由图

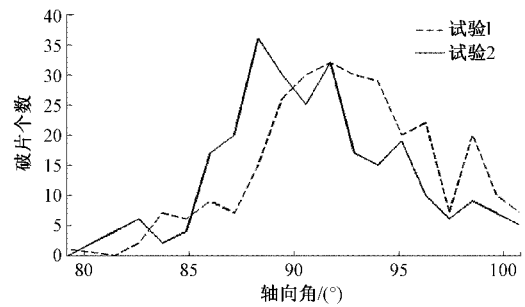


图 12 破片着靶数在轴向角上的分布图

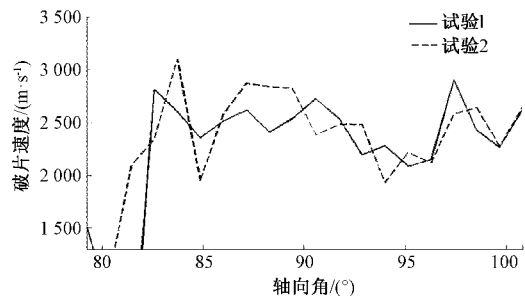


图 13 破片速度在轴向角上的分布图

(1)两次试验获得的破片个数及速度在轴向角上的分布基本一致,说明一体化测量系统具有较好的重复性;

表1 战斗部试验结果

试验次序	着靶破片数			分布密度/(个/m <sup>2</sup> )			飞散角/(°)			平均速度/ (m·s <sup>-1</sup> )
	测量系统	人工统计	相对误差/%	测量系统	人工统计	相对误差/%	测量系统	人工统计	相对误差/%	
1	280	270	3.70	46.70	45.00	3.78	14.79	15.31	-3.40	2 419.3
2	264	251	5.18	44.00	41.83	5.19	13.67	14.25	-4.07	2 463.9

(2)在破片个数与分布密度的测量上,相比于人工统计结果,测量系统的测量结果都偏大,究其原因在于一个破片穿孔不一定只是一个破片的着靶点,导致人工统计结果比实际值小,而一体化测量系统是通过破片着靶信号来辨识破片着靶,只要后续过孔的破片使异种栅极接通,就会记录该着靶破片,因此,一体化测量系统的破片捕获率与分布密度测量精度更高,由测量结果可知,两者至少提高了3%;

(3)在破片飞散角的测量上,相比于人工统计结果,测量系统的测量误差低于5%,能满足常规飞散角的测量误差要求,因此,一体化测量系统能可靠测量破片飞散角;

(4)在破片速度的测量上,两次测速均值接近,说明系统测速稳定,结果基本可信。

#### 2) 枪械试验的结果及分析

根据定距测时原理,结合一体化测量系统及光幕靶测得的飞行时间,获得每次试验的弹丸飞行速度。为检验测量系统的测速精度,计算系统与光幕靶测速结果的相对误差。具体结果如表2所示。考虑到95-1式自动步枪的理论初速为930 m/s,有效射程为400 m<sup>[15]</sup>,而测量系统与光幕靶的测点距分别为10.5 m及9.5 m,远小于有效射程,则两者的测速值应接近理论初速,且系统测速值偏小。由表可知,测量系统与光幕靶的测速值接近930 m/s,且测量系统的测速值偏小,但相对误差绝对值低于1.5%,这符合弹丸的速度衰减规律,说明一体化测量系统的测速精度较高。

表2 枪械试验结果

试验次序	测量系统测速结果/(m·s <sup>-1</sup> )	光幕靶测速结果/(m·s <sup>-1</sup> )	相对误差/%
1	892.37	903.64	-1.25
2	891.90	900.44	-0.95
3	888.71	898.78	-1.12
4	897.35	906.23	-0.98
5	886.89	896.39	-1.06

## 4 结 论

论文针对现阶段破片速度及飞散特性测量方法存在的破片捕获率较低、测试区域有限的问题,开展了破片速度及飞散特性一体化测量方法研究,设计了一种阵列式破

片速度及飞散特性一体化测量系统。该系统的测量靶由梳状靶组建而成,基于FPGA的多路同步采集及计时能力,实现了破片速度及飞散特性的自动获取,通过某型破片战斗部静爆试验及枪械试验验证了一体化测量系统可行及测量结果可信。与立体视觉成像法相比,该系统的优势在于测试区域不受限且设备成本低。与靶板法相比,该系统的破片捕获率及分布密度测量精度更高。该系统简易可行,为破片速度及飞散特性的一体化测量提供了一种有效的接触式电测手段。

## 参考文献

- [1] 付建平,郭光全,冯顺山,等.杀爆战斗部对地面目标毁伤威力的评估方法及应用[J].兵工学报,2016,37(S1):7-12.
- [2] 石志彬,高敏,杨锁吕,等.瞄准式战斗部杀伤装置结构设计研究[J].兵工学报,2013,192(3):373-377.
- [3] 李茂,高圣智,侯海量,等.圆柱形装药驱动轴向预制破片飞散特性[J].国防科技大学学报,2021,43(2):141-147.
- [4] 武江鹏,乔明军,闫振纲,等.战斗部破片场参数测试技术发展综述[J].兵器装备工程学报,2019,40(5):105-109.
- [5] 申景田,苏健军,姬建荣,等.一种测量破片群着靶位置和时间装置[J].宇航计测技术,2019,39(S1):86-90.
- [6] 董涛,倪晋平.基于天幕靶的六光幕立靶测量原理[J].应用光学,2011,187(5):913-916.
- [7] 田会,倪晋平.一体化结构四组合光幕阵列测量研究[J].仪器仪表学报,2014,35(2):320-32.
- [8] 陈宇轩,张斌,褚文博.大靶面激光光幕测速系统灵敏度研究[J].国外电子测量技术,2020,303(2):1-4.
- [9] 王鑫,王向军.靶场远程监测自动评估系统及弹落点定位研究[J].电子测量与仪器学报,2017,31(10):1667-1672.
- [10] 杜博军,刘泽庆,王亚林,等.基于高速摄影视觉测量的静爆破片运动参数测试方法[J].爆炸与冲击,2019,39(9):114-120.
- [11] XUAN Y A. Axial distribution characteristics of fragments of the warhead with a hollow core[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 122: 10-22.

- [12] 冯明驰,刘景林,李成南,等.一种多焦距动态立体视觉 SLAM[J].仪器仪表学报,2021,42(11):200-209.
- [13] 李丽萍.破片战斗部毁伤威力测试关键技术研究[D].南京:南京理工大学,2017.
- [14] 张华丽.典型破片速度衰减规律实验研究[D].南京:南京理工大学,2015.
- [15] 王瑞.自动步枪内弹道随机仿真试验与分析[D].太

原:中北大学,2018.

#### 作者简介

周家杰,博士研究生,主要研究方向为动态参量测试。

E-mail:316101002450@njust.edu.cn

孔德仁,工学博士,教授,主要研究方向为动态参量测试与计量、现代传感器技术及系统、测控技术及仪器等。

E-mail:dcrenkong@hotmail.com