

文章编号: 1004-924X(2016)03-0600-09

## 带弹序的弹幕武器立靶密集度测试

武江鹏, 宋 萍\*, 郝创博, 张立群, 彭文家  
(北京理工大学 机电学院, 北京 100081)

**摘要:** 提出一种基于4个线阵TDI-CCD相机组成的三空间靶面结构对多弹丸着靶参数进行测试, 以解决弹幕武器等高射速武器多弹丸同时着靶时的立靶密集度测试难题。测试时, 2个CCD相机在空中交汇形成与预定弹道方向垂直的立靶靶面I; 靶面II和靶面III分别由1个CCD相机的探测面形成, 并分别与靶面I在竖直方向和水平方向上成一定夹角。根据三靶面的空间几何结构、飞行弹丸在4个线阵CCD相机上的成像时间和成像角度, 分析了单发弹丸的着靶坐标、飞行速度和穿靶角度。根据多弹丸在三靶面间的成像位置关系以及弹丸飞行速度约束, 推导出多发弹丸着靶时的时空散布参数, 如弹序、弹丸存速和着靶坐标。仿真和实际试验验证显示测试的多靶面间目标匹配率达到100%。提出的测试方法有效地解决了多发弹丸同时着靶时出现的假目标问题并克服了单CCD立靶测试参数单一等缺点。

**关键词:** 弹幕武器; 三空间立靶; 立靶密集度; 弹序; 多目标时空匹配

**中图分类号:** TJ012.3; TJ760.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162403.0600

## Measurement of vertical target dispersion with target-hitting sequence for barrage weapons

WU Jiang-peng, SONG Ping\*, HAO Chuang-bo, ZHANG Li-qun, PENG Wen-jia  
(School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)  
\* Corresponding author, E-mail: sping2002@bit.edu.cn

**Abstract:** A kind of three space target structure based on four linear TDI-CCD (Time Delay and Integration CCD) cameras is put forward to measure the target-hitting parameters and to obtain the vertical target dispersion for barrage weapons when multiple projectiles hit the target at the same time. With measurement, two CCD cameras intersect to form the vertical target I, and the target surface is perpendicular to the scheduled ballistic direction. Target surface II and III are formed by a CCD camera respectively, and a certain angle between target I and II is formed in vertical direction, which is the same as that between target I and III in horizontal direction. Combined with the geometry of three dimensional target surfaces, the imaging time and imaging angle of the flying projectile on the four linear CCD cameras, the vertical target coordinate and projectile's flying speed are calculated. Meanwhile, based on the relationship of imaging position and the constraint of flying velocity among three target surfaces, the space-time distribute parameters of multiple projectiles are deduced, such as target-hitting sequence, velocity, nutation angle and the target coordinates. Simulation and experiment show that the matching rate of multiple targets among three target surfaces reaches to 100%. The test method effectively eliminates the false target-hitting coordinate when multiple projectiles impact the target simultaneously and calculates precisely multiple projectile parameters all at once.

**Key words:** barrage weapon; three CCD space target surface; vertical target dispersion; target-hitting sequence; multiple target space-time match

## 1 引言

立靶密集度是武器研制和生产交验过程中需要考量的重要战技指标, 能否准确测出武器射击的立靶密集度和立靶准确度等外弹道参数, 对提高武器系统的毁伤效能至关重要<sup>[1]</sup>。目前, 立靶密集度测试主要有靶板法、声学靶和光电靶<sup>[1-2]</sup>。其中: 靶板法在测试结束后常采用人工逐个测量弹孔坐标, 也有对靶板进行数字成像, 然后通过图像处理获取每个弹孔的穿靶坐标。当射击弹丸数量较多时, 弹孔可能重叠导致漏测。声学靶利用声学靶杆或传声器作为敏感元件, 通过测定超音速弹头锥形激波到达每个传感器的时间差对弹着点进行测量, 但声学靶仅能对超音速弹丸进行测试, 抗干扰能力差, 且被测火炮射频不能过高<sup>[3-4]</sup>。光电靶分为激光靶、天幕靶和CCD(Charge Coupled Device)立靶。激光靶主要由激光器和探测器阵列组成, 它根据受飞行弹丸遮挡的到达探测器阵列的激光光束位置计算弹丸越靶坐标<sup>[5]</sup>。受靶架结构尺寸限制, 激光靶无法做到很大的靶面, 且激光靶所测的弹丸参数单一。天幕靶是以天空背景为光源, 多个光幕在一定空域组成光幕阵列立靶, 弹丸穿过光幕时光电探测器会输出相应电脉冲信号, 通过测定所有电脉冲信号的时间来解算弹丸着靶坐标。四组合天幕靶能同时测试弹丸着靶坐标和飞行速度, 但是要求弹道与某一光幕面垂直, 否则存在较大误差, 这在实际测试中难以满足。有学者提出采用六光幕获得弹丸着靶坐标、速度和飞行方向的空间角度共3类5个参数<sup>[6]</sup>。文献[7]在[6]的基础上将六光幕细分, 以解决多管齐射武器的立靶密集度, 但测试方法仅限于距枪口较近且不存在弹丸弹道交叉的情况。更进一步, 文献[8]采用七光幕阵列对双管武器射击立靶密集度测量进行了理论分析和仿真验证。高射速武器如“金属风暴”极有可能出现多个弹丸同时着靶的情况, 有学者提出采用单台彩色线阵CCD相机配合使用3种单色(红、蓝、绿)激光光源的方法。该方法能够测量3发弹丸同时着靶时的密集度<sup>[9]</sup>, 但无法对3发以上弹丸同时着靶的密集度进行测试。

随着武器射速的不断提高, 火炮身管冲击载荷

所带来的弱相关误差对立靶密集度的影响已不能被忽略。为了准确分析速射武器的射击性能, 需要记录带弹序的立靶密集度序列<sup>[10]</sup>。由于天幕靶只能获取弹丸的越靶时间信息, 而CCD立靶可以获得弹丸的越靶时间和飞行弹丸在相机上的成像像素位置。为了测试立靶密集度、弹速和弹序等弹道参数, 和天幕靶相比, CCD光电立靶能减少光幕个数, 例如单个CCD立靶即可完成弹丸的着靶坐标测量, 而天幕靶至少需要4个光幕协同才能完成测试<sup>[11]</sup>, 因此采用CCD立靶能降低布靶误差对测试精度的影响。随着CCD相机像素分辨率越来越高, 像元尺寸越来越小, 每个像元对应的空间分辨率也越高, 同时亚像素级图像处理算法也能有效提高测量精度。本文采用4个线阵TDI-CCD相机组成三空间立靶靶面, 多发弹丸由于在三靶面间的飞行距离不同, 故在相机成像时间上分离, 利用多靶面间弹丸在相机上的成像角度投影和弹丸飞行速度约束进行多目标时空匹配, 获得多弹丸飞行弹道的时空散布参数。

## 2 单发弹丸立靶参数测试

### 2.1 单CCD靶面弹丸立靶坐标解算

CCD相机交汇定位原理, 如图1所示。两台相机的光轴正交且结构和性能参数一致, 弹丸从有效靶面上任意一点 $A(x, y)$ 穿过, 以CCD<sub>1</sub>光学系统光心为坐标原点建立直角坐标系, CCD<sub>1</sub>和CCD<sub>2</sub>之间的基线距离为 $l$ , CCD<sub>1</sub>、CCD<sub>2</sub>的光轴与基线的夹角都为 $\gamma$ 。

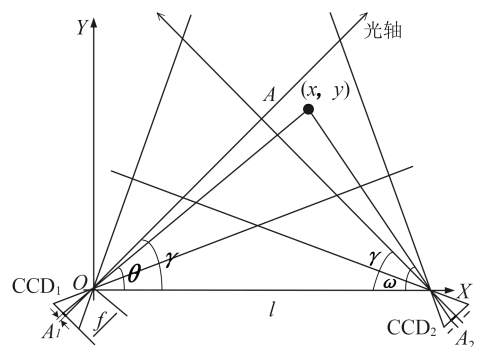


图1 双CCD相机交汇弹丸立靶坐标测量

Fig. 1 Dual-CCD cameras intersection measuring principle

弹丸立靶坐标 $A$ 计算如下<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} x = \frac{l \cdot \tan \omega}{\tan \theta + \tan \omega} \\ y = \frac{l \cdot \tan \omega \tan \theta}{\tan \theta + \tan \omega} \end{cases}, \quad (1)$$

$$\theta = \gamma + \arctan \frac{A_1}{f}, \quad \omega = \gamma - \arctan \frac{A_2}{f}, \quad (2)$$

式中： $\theta$ 和 $\omega$ 为弹丸在CCD<sub>1</sub>、CCD<sub>2</sub>相机上的成像角度， $f$ 为光学系统主距， $A_1$ 、 $A_2$ 分别为弹丸在CCD<sub>1</sub>和CCD<sub>2</sub>中成像像素位置到像面中心的距离，规定以像面主点为零点，左正右负。

## 2.2 空间三靶面弹丸立靶参数测试

### 2.2.1 弹丸垂直入射靶面 I

空间三靶面对弹丸立靶参数测试如图2所示，CCD<sub>1</sub>和CCD<sub>2</sub>相机的探测面在空中交汇形成靶面 I，其与预定弹道方向垂直。CCD<sub>3</sub>相机的探测面形成靶面 II，其与靶面 I 在竖直方向上夹角为 $\alpha$ 。当弹丸越过靶面 II 时，测试系统仅能得到CCD<sub>3</sub>相机上的弹丸越靶像素位置以及越靶图像帧计数。同理，CCD<sub>4</sub>相机的探测面形成靶面 III，其与靶面 I 在水平方向上夹角为 $\beta$ 。以靶面 I 的水平方向为 X 轴，竖直方向为 Y 轴，Z 轴与预定弹道方向平行，建立如图2所示坐标系。

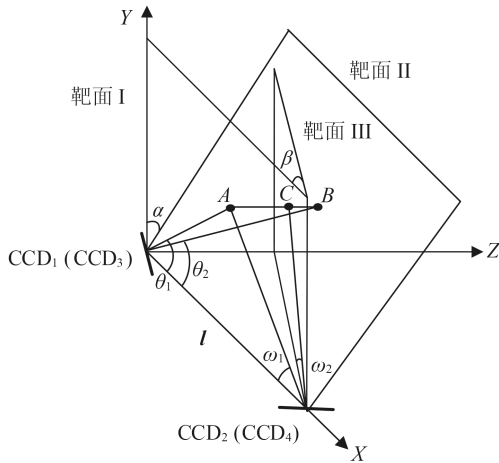


图2 4个CCD相机三靶面立靶参数测试

Fig. 2 Vertical target parameters testing based on three target surfaces formed by four CCD cameras

靶面 I 作为主探测靶面，用于对穿靶弹丸进行立靶坐标解算，而靶面 II 和靶面 III 作为辅助探测靶面，它们的主要作用是将多弹丸进行成像分离、弹丸速度的求解以及与靶面 I 匹配进行弹序的求解。下面以单发弹丸立靶参数测试为例说明，弹丸穿过靶面 I 的坐标为点 A，点 A 与 CCD<sub>1</sub>和

CCD<sub>2</sub>相机光心的连线与 X 轴的夹角(成像角度)分别为 $\theta_1$ 和 $\omega_1$ ，弹丸越过靶面 II 的坐标点 B 在 CCD<sub>3</sub>相机上的成像角度为 $\theta_2$ ，越过靶面 III 的坐标点 C 在 CCD<sub>4</sub>相机上的成像角度为 $\omega_2$ 。若弹丸垂直入射靶面 I，根据三靶面空间几何结构，可以得到弹丸在 4 个相机中成像角度的关系：

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} \\ \cos \beta = \frac{\tan \omega_2}{\tan \omega_1} \end{cases}. \quad (3)$$

测试时 4 个线阵相机被同步触发并以相同帧频采集图像进行目标捕获，根据弹丸在每个相机的成像所在帧计数以及采集帧频可以获得弹丸在 3 个靶面间的飞行时间：

$$t_1 = \frac{n_2 - n_1}{F}, \quad t_2 = \frac{n_3 - n_1}{F}, \quad (4)$$

式中： $t_1$ 、 $t_2$ 分别为弹丸从点 A 飞行到点 B、点 C 的时延， $F$ 为线阵相机的图像采集帧频， $n_1$ 、 $n_2$ 和 $n_3$ 分别为弹丸在靶面 I、靶面 II 和靶面 III 中相机上的成像所在帧计数。根据靶面 I 两个相机双目交汇解算的弹丸立靶坐标  $A(x_a, y_a)$ ，可以计算出弹丸越靶的平均飞行速度：

$$\bar{v} = \left( \frac{AB}{t_1} + \frac{AC}{t_2} \right) / 2 = \left( \frac{y_a \cdot \tan \alpha}{t_1} + \frac{(l - x_a) \tan \beta}{t_2} \right) / 2. \quad (5)$$

### 2.2.2 弹丸斜入射靶面 I

立靶测试时，尽管炮口瞄准立靶靶面 I 的中心射击，但由于是空气弹道，且存在弹丸跳角，弹丸着靶时呈一定的散布特性，即不能保证所有弹丸都垂直入射立靶 I。假设弹丸着靶时的飞行方向与预定弹道夹角为 $\varphi$ (方位角 $\varphi_x$ ，俯仰角 $\varphi_y$ )，如图3所示。则弹丸穿过 3 个靶面时的飞行直线方程如下：

$$\frac{x - x_a}{\cos \varphi_x \sin \varphi_y} = \frac{y - y_a}{\sin \varphi_y} = \frac{z}{\cos \varphi_x \cos \varphi_y}. \quad (6)$$

靶面 II 和靶面 III 在图3所示直角坐标系下的方程如式(7)和式(8)：

$$y \cdot \sin \alpha + z \cdot \cos \alpha = 0, \quad (7)$$

$$(x - l) \cdot \sin \beta + z \cdot \cos \beta = 0, \quad (8)$$

结合式(6)~(8)推出弹丸越过靶面 II 的坐标：

$$\begin{cases} x_b = x_a - \frac{y_a \sin \alpha \cos \varphi_y \sin \varphi_x}{\sin \alpha \sin \varphi_y + \cos \alpha \cos \varphi_x \cos \varphi_y} \\ y_b = \frac{y_a \cos \alpha \cos \varphi_x \cos \varphi_y}{\sin \alpha \sin \varphi_y + \cos \alpha \cos \varphi_x \cos \varphi_y} \\ z_b = - \frac{y_a \sin \alpha \cos \varphi_x \cos \varphi_y}{\sin \alpha \sin \varphi_y + \cos \alpha \cos \varphi_x \cos \varphi_y} \end{cases}, \quad (9)$$

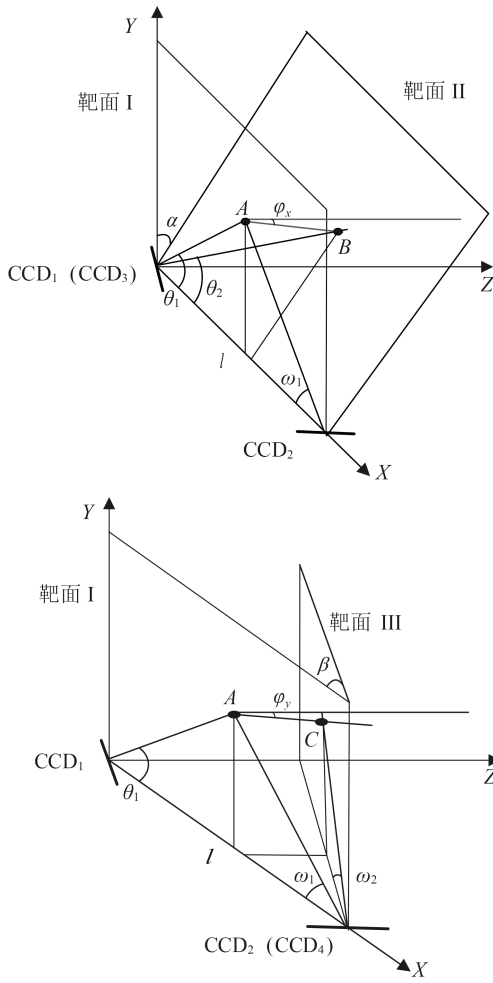


图 3 弹丸飞行方向与预定弹道存在夹角的情形

Fig. 3 Situations when there is a small angle between the projectile flying direction and scheduled ballistic

结合式(6)~(8)推出弹丸越过靶面 III 的坐标:

$$\begin{cases} x_c = \frac{x_a \cos \beta \cos \varphi_x + l \sin \beta \sin \varphi_x}{\sin \beta \sin \varphi_x + \cos \beta \cos \varphi_x} \\ y_c = x_a + \frac{l \sin \beta \sin \varphi_x - x_a \sin \beta \sin \varphi_y}{\sin \beta \sin \varphi_x \cos \varphi_y + \cos \beta \cos \varphi_x \cos \varphi_y} \\ z_c = \frac{l \sin \beta \cos \varphi_y - x_a \sin \beta \cos \varphi_x}{\sin \beta \sin \varphi_x + \cos \beta \cos \varphi_x} \end{cases} \quad (10)$$

根据弹丸在 CCD<sub>3</sub> 和 CCD<sub>4</sub> 相机上的成像角度以及靶面几何结构可以得出:

$$\tan \theta_2 = \frac{y_b}{x_b \cos \alpha}, \quad (11)$$

$$\tan \omega_2 = \frac{y_c \cos \beta}{l - x_c}. \quad (12)$$

由式(9)~(12)可以求出弹丸飞行的方向角  $\varphi_x$  和俯仰角  $\varphi_y$ , 继而可以解算出弹丸越过靶面 II 和靶面 III 的真实坐标。然后根据弹丸在三靶面的着靶坐

标以及飞行时间求出飞行速度:

$$\bar{v} = \left( \frac{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + z_b^2}}{t_1} + \frac{\sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2 + z_c^2}}{t_2} \right) / 2 \quad (13)$$

式中:  $t_1$ 、 $t_2$  利用式(4)求出。测试过程中只需准确处理出弹丸在 4 个 CCD 相机上的成像像素位置以及所在帧计数, 结合三靶面结构参数即可计算出弹丸的立靶坐标、飞行速度和飞行方向。

### 3 多弹丸空间立靶密集度参数测试

#### 3.1 多弹丸在三靶面间成像规律

对于不齐至弹丸, 如单发弹丸或连发弹丸, 由靶面 I 直接进行着靶坐标计算, 按照弹丸射击的时间顺序, 从靶面 II 和靶面 III 找出对应的成像像素以及成像时间, 继而计算弹丸越靶的速度和方向。随着武器射速的提高, 很有可能出现多发弹丸同时着靶的情况。以两发弹丸同时到达靶面 I 为例进行多发弹丸齐至时立靶相关参数的计算分析。

CCD 上成像无遮挡的情形如图 4(a) 所示, CCD<sub>1</sub> 和 CCD<sub>2</sub> 可分别得到两个成像角度值, 根据双目交汇原理可以解算出 4 个目标, 其中 2 个为虚假目标。由于弹丸空间散布的随机性, 两发弹丸可能竖直方向上齐至, 如图 4(b) 所示, 有可能水平方向上齐至, 如图 4(c) 所示, 也有可能出现弹丸成像相互遮挡, 如图 4(d) 所示。靶面 II 与靶面 I 在竖直方向上存在夹角, 竖直方向上齐至的弹丸到达靶面 II 的飞行距离不同, 从而在靶面 II 中 CCD<sub>3</sub> 相机上成像时间分离, 同理靶面 III 与靶面 I 在水平方向上存在夹角, 水平方向上齐至的弹丸由于飞行距离不同在 CCD<sub>4</sub> 相机的成像时间上分离。因此如图 5 所示, 对于在靶面 I 同时着靶的多发弹丸, 无论是水平方向、竖直方向还是斜向齐至弹丸, 由于它们在 3 个靶面间的飞行距离不同, 将在靶面 II 或靶面 III 中的相机成像时间上分离开。

靶面 I 中, 两个 CCD 相机所有像元与各自镜头光心确定的射线均相交, 如图 4 所示。多发同时着靶的弹丸在一个 CCD 上成像重叠或遮挡, 在另一个相机上成像必定分离。对于  $n$  发同时着靶的弹丸, 双目交汇最少将解算出  $n$  个目标(所有弹丸在其中一个相机上成像重叠在一起), 最多将解算出  $n^2$  个目标<sup>[12]</sup>(所有弹丸成像没有像素重叠)。多发弹丸成像相互遮挡仅是特殊情况,  $n$  发同时着靶弹丸的真实坐标必定包含在双目交汇求解出的  $n \sim n^2$  个坐标内。

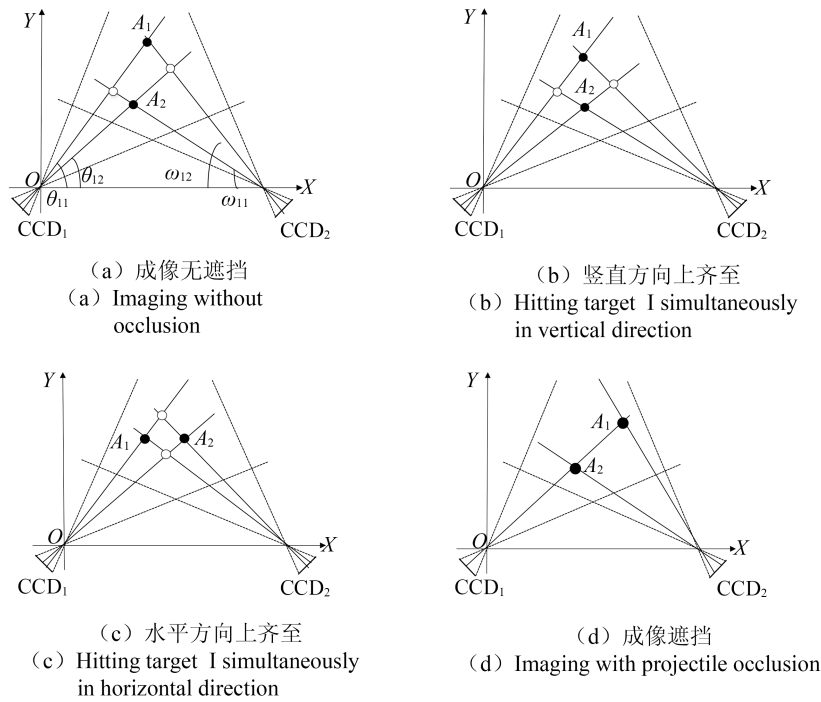


图 4 两发弹丸同时着靶时的成像关系

Fig. 4 Images when two projectiles hitting target I at the same time

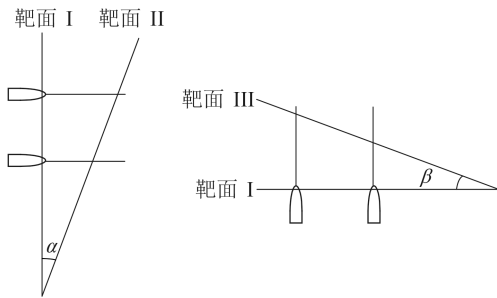


图 5 两发弹丸在三靶面间成像时间上分离图

Fig. 5 Imaging separation in time series for two projectiles among three target surfaces

弹丸成像出现遮挡，只是求解的假目标个数减少，即在后续的3个靶面间弹丸成像角度匹配过程中剔除的假目标个数减少，并不影响真实弹丸的成像角度投影和匹配过程。

### 3.2 多弹丸成像角度投影匹配及假目标剔除

从靶面 I 到靶面 II 的飞行距离为  $S_1$ ，飞行时间为  $t_1$ ；从靶面 I 到靶面 III 的距离为  $S_2$ ，飞行时间为  $t_2$ 。根据靶面结构参数，需满足如下三靶面间的飞行速度约束关系：

$$\begin{cases} v_1 = \frac{S_1}{t_1} = \frac{y_a \cdot \tan \alpha}{t_1} \\ v_2 = \frac{S_2}{t_2} = \frac{(l - x_a) \cdot \tan \beta}{t_2} \\ v_1 = v_2 \end{cases} \quad (14)$$

其中： $l$ 为靶面 I 的基线距离， $(x_a, y_a)$ 为弹丸在靶面 I 的着靶坐标。如图6所示，两发弹丸同时在靶面 I 着靶， $CCD_1$ 和 $CCD_2$ 相机可分别得到两发弹丸的成像角度值，记为 $\theta_{11}$ 、 $\theta_{12}$ 和 $\omega_{11}$ 、 $\omega_{12}$ ，弹丸越靶时间记为 $t_0$ ，双目交汇对应的4个坐标组合分别为 $A_1(\theta_{11}, \omega_{11})$ 、 $A_2(\theta_{12}, \omega_{12})$ 、 $A_3(\theta_{11}, \omega_{12})$ 和 $A_4(\theta_{12}, \omega_{11})$ 。

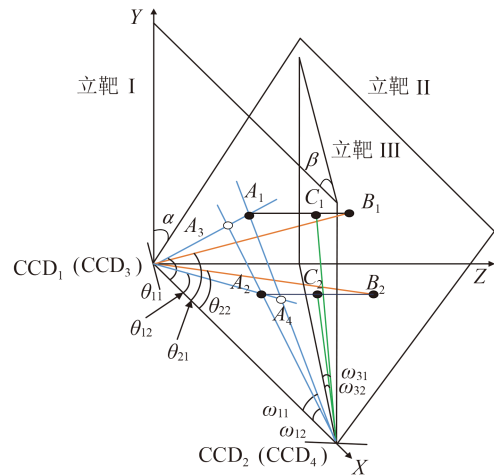


图 6 两发弹丸同时着靶时的散布参数计算示意图  
Fig. 6 Schematic of dispersion parameters when two projectiles hitting target simultaneously

弹丸越过靶面 II, 在 CCD<sub>3</sub> 相机上的成像角度分别为  $\theta_{21}$  和  $\theta_{22}$ , 对应的越靶时间分别为  $t_{11}$  和  $t_{12}$ ; 弹丸越过靶面 III, 在 CCD<sub>4</sub> 相机上的成像角度分别为  $\omega_{31}$  和  $\omega_{32}$ , 对应的越靶时间分别为  $t_{21}$  和  $t_{22}$ 。将靶面 II 和靶面 III 的成像角度按照式(3)向靶面 I 进行成像角度投影, 并和靶面 I 的弹丸成像角度进行匹配。再根据靶面 I 求取的弹丸着靶坐标以及约束条件式(14)解出弹丸从靶面 I 飞行到靶面 II 和靶面 III 的瞬时速度, 若速度不相等则认为是假目标。两个弹丸同时穿过靶面 I 时的假目标剔除过程如表 1 所示。表 1 显示, 只有两个坐标组合  $A_1(\theta_{11}, \omega_{11})$ 、 $A_2(\theta_{12}, \omega_{12})$  满足约束条件, 按照式(5)可以计算出目标穿靶时的近似瞬时速度。根据式(9)~(13)

可以更精确地计算出弹丸的飞行速度和飞行方向。

### 3.3 带弹序的多弹丸立靶密集度参数解算

4个 CCD 相机被同步触发进行图像采集, 以捕获多发高速飞行弹丸。带弹序的多发弹丸空间立靶密集度解算过程如下:

(1) 对采集的线阵序列图像进行拼接后, 计算出 4 个 CCD 相机中弹丸的成像像素位置和成像帧计数, 并求出弹丸在靶面上的成像角度以及成像时间。

(2) 根据双目交汇解算出靶面 I 中两个 CCD 中所有弹丸坐标(包含虚假坐标)。同时, 根据目标在 CCD 相机上的成像时间统计出同时着靶和非同时着靶的弹丸坐标。

表 1 假目标剔除过程

Tab. 1 Process of eliminating false projectiles

靶面 I 坐标点及越靶时间	靶面 II 成像角度投影及越靶时间	靶面 III 成像角度投影及越靶时间	假目标剔除
$A_1(\theta_{11}, \omega_{11}), t_0$	$\theta_{11} = f_1(\theta_{21}), t_{11}$	$\omega_{11} = f_2(\omega_{31}), t_{21}$	$v_1 = v_2$ , 真目标
$A_2(\theta_{12}, \omega_{12}), t_0$	$\theta_{12} = f_1(\theta_{22}), t_{12}$	$\omega_{12} = f_2(\omega_{32}), t_{22}$	$v_1 = v_2$ , 真目标
$A_3(\theta_{11}, \omega_{12}), t_0$	$\theta_{11} = f_1(\theta_{21}), t_{11}$	$\omega_{12} = f_2(\omega_{32}), t_{22}$	$v_1 \neq v_2$ , 假目标
$A_4(\theta_{12}, \omega_{11}), t_0$	$\theta_{12} = f_1(\theta_{22}), t_{12}$	$\omega_{11} = f_2(\omega_{31}), t_{21}$	$v_1 \neq v_2$ , 假目标

(3) 将靶面 II 和靶面 III 中的弹丸成像角度分别投影到靶面 I 进行角度匹配。因为弹丸先穿过靶面 I, 再穿过靶面 II 或靶面 III, 所以靶面 II 和靶面 III 中目标成像角度所对应的时间必须大于所匹配的靶面 I 目标成像角度的时间, 即满足弹丸越靶时间的先后顺序。

(4) 对于非同时着靶的弹丸, 依据弹丸在三靶面间的成像时间和成像角度计算弹丸的瞬时着靶速度。同时, 计算出所有非同时着靶弹丸到达立靶的平均速度。

(5) 对于同时着靶的多发弹丸, 根据三靶面间飞行速度的约束关系, 将假目标剔除掉。

(6) 非同时着靶的弹丸占大多数, 且同一组试验中弹丸速度差异较小<sup>[13]</sup>, 根据所有非同时着靶弹丸的平均速度对剩余的同时着靶弹丸进一步剔除筛选。

(7) 根据弹丸与预定弹道方向不平行的计算理论, 可以进一步精确解算多弹丸越过靶面 I 时的方向角和俯仰角。

(8) 根据以上计算, 获得所有弹丸的立靶散布参数, 如弹序、立靶坐标、立靶速度和弹丸飞行方向。

## 4 测试方法仿真

假设立靶距火炮炮口的距离  $D$  为 1 000 m, 根据射击弹丸散布误差和靶距确定靶面尺寸。文献[13]中测定的高射速火炮的方位密集度和俯仰密集度分别为 0.6 mrad 和 1.1 mrad, 仿真中假设弹丸的散布误差  $\sigma_j = 1.2$  mrad, 则距炮口  $D$  处的靶面射击散布为

$$\sigma_x = D \cdot \tan \sigma_j = 1.2 \text{ m}. \quad (15)$$

因为  $\sigma_x$  是统计量, 且弹丸散布服从正态分布, 为确落在靶上, 根据概率统计理论有<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} p(\mu - 3\sigma_x < X \leq \mu - 3\sigma_x) = 0.997 \\ p(\mu - 3.9\sigma_x < X \leq \mu - 3.9\sigma_x) = 1.0 \end{cases} \quad (16)$$

因此靶幅为  $8\sigma_x$  时可保证全部弹丸穿过立靶, 靶面尺寸设定为 10 m × 10 m。

50 发模拟弹丸随机分布在有效测试靶面内, 且时间轴上随机分布在 300 ms 之内, 弹丸的飞行速度为  $1\,000 \pm 50$  m/s, 飞行角度散布在 1.2 mrad 内, 设其中若干个弹丸同时越过靶面 I, 生成的模拟目标时空散布如图 7 所示。设靶面 II、靶面 III 与靶面 I 在水平方向上、竖直方向上夹角为  $30^\circ$ , 依据模

拟目标运动参数及靶面结构参数推算出模拟目标在4个CCD相机上的成像角度和成像时间,类似于测试时4个相机捕获到的目标参数。按照多发弹丸

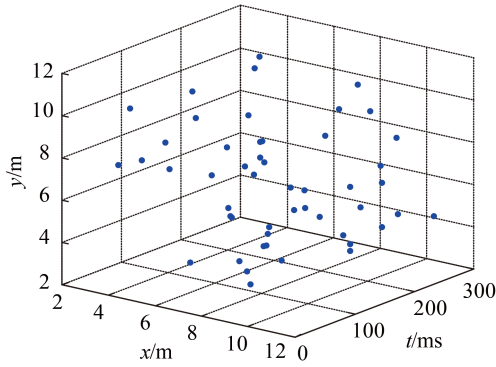


图7 50个模拟目标的时空散布图

Fig. 7 Space-time scatter diagram of fifty simulate targets

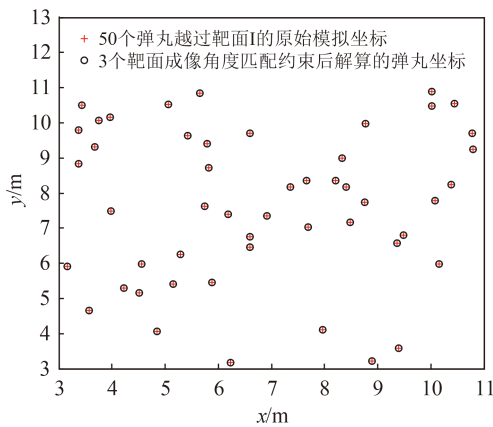


图8 50个模拟目标的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of fifty projectiles

空间立靶密集度解算过程进行多发弹丸时空散布参数计算,仿真结果如图8所示,结果表明解算出的目标与生成的模拟目标能够完全匹配上。

## 5 实验验证

按图2所示的靶面结构布设光电测试系统, CCD<sub>1</sub>和CCD<sub>3</sub>相机的采集卡连接到一个无线触发器, CCD<sub>2</sub>和CCD<sub>4</sub>相机采集卡连接到另一个无线触发器,通过火焰探测器探测炮口火焰,无线触发4个相机进行图像采集。靶面结构参数如下:立靶基线长为12.7 m,相机仰角为30°,靶面Ⅱ、靶面Ⅲ与靶面Ⅰ的夹角都为30°。TDI-CCD相机分辨率为12 000 pixel,线阵最高帧频为90 kHz,256级TDI积分级数。由于模拟目标速度较慢,故将相机

线扫描频率定为5 kHz,128行TDI积分级数,模拟目标是直径为15 mm长为12 mm的圆柱体铝块。4个线阵相机同步触发进行目标捕获,将采集的线阵图像按顺序拼接,经过图像降噪、背景滤除、目标边缘轮廓提取以及亚像素级弹丸质心定位<sup>[15]</sup>,得到所有弹丸的像素位置和帧计数,依据成像角度投影和靶面间飞行速度约束进行多弹丸立靶散布参数的解算。

图9所示为含6个目标的图像部分放大截图,图中黑色椭圆内为两个同时着靶的模拟目标,其在越过靶面Ⅱ和靶面Ⅲ时已经在时间上分离开。虽然TDI-CCD相机要求线扫描频率与目标运动速度同步,最大误差为±2%,但是立靶的靶面厚度不均匀,离相机近处靶面厚度较小,所需帧频较大。而立靶测量只需目标的图像位置信息,为了提高高速弱小目标的捕获率和识别率,一般采集帧频

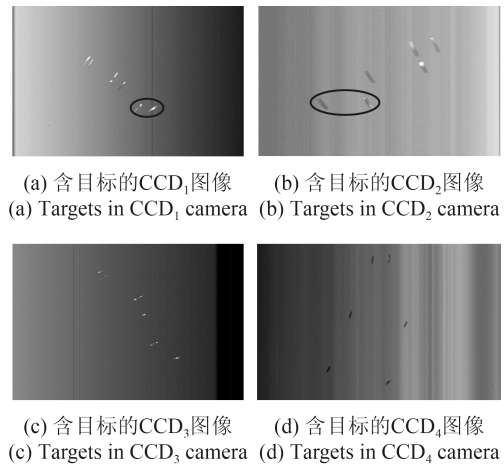


图9 4个CCD相机捕获的6个模拟飞行目标

Fig. 9 Six targets captured by four CCD cameras

表2 三靶面目标匹配解算

Tab. 2 Target matching calculation for three target surfaces

目标在靶面 I 成 像帧/Frame	成像坐标/m		目标速度 m·s <sup>-1</sup>	真(T)假(F) 目标
	x	y		
5 059	7.54	1.99	6.58	T
5 086	7.64	2.04	6.85	T
5 196	7.26	2.15	6.54	T
5 258	7.53	2.30	6.72	T
5 437	7.63	2.48	6.49	T
5 437	7.17	2.45	7.20	F
5 437	7.34	2.38	7.29	F
5 437	7.46	2.55	6.66	T

略大于目标飞行速度, 即图9中表现的目标图像被拉伸。图像处理过程中, 一个相机所采集的目标在 $\pm 5$  frame 出现即为同时着靶的目标, 同时可以根据 $CCD_1$ 和 $CCD_2$ 首个目标出现的帧数进行同步触发误差的消除。表2为模拟目标立靶参数测试结果。

## 6 结论

弹幕武器具有射速高、弹着点散布大的特点, 测试系统应满足有效测试靶面大、响应时间短、目标捕获率高、测试精度和灵敏度高以及适合野外靶场快速安装调试等特性。基于4个TDI-CCD相机构成的空间三CCD立靶靶面, 本文提出一种对多

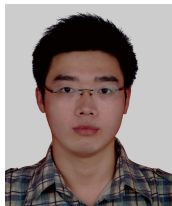
发弹丸的立靶密集度等相关弹道散布参数的测试方法, 该方法能够有效解决多弹丸同时着靶时单靶面无法剔除假目标的难题。本文方法通过主探测面和两个辅助探测面间的弹丸成像角度投影、成像时间进行匹配融合, 通过不同靶面间的飞行速度约束进行假目标剔除, 解算出带弹序的空间立靶密集度, 同时能够给出多弹丸的立靶存速。仿真和模拟试验结果表明测试方法可行, 能够用于单发、连发以及多发同步弹丸的综合测试。系统布设方便, 易于工程化, 可为新型高射速武器的研制提供理论和试验依据。

## 参考文献:

- [1] 倪晋平, 辛彬, 冯斌. 室外用立靶密集度参数测量技术研究进展[J]. 西安工业大学学报, 2013, 33(4): 259-267.  
NI J P, XIN B, FENG B. Progress of research on the measuring firing accuracy and dispersion in outfield test[J]. *Journal of Xi'an Technology University*, 2013, 33(4): 259-267. (in Chinese)
- [2] 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. 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)
- [3] 王宝元, 衡刚, 周发明, 等. 火炮立靶密集度测量方法[J]. 测试技术学报, 2011, 25(6): 529-535.  
WANG B Y, HENG G, ZHOU F M, *et al.*. The measurement methods for vertical target dispersion of gun[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2011, 25(6): 529-535. (in Chinese)
- [4] PINEZIEH J D, HELLER J, LU T. Ballistic projectile tracking using CW doppler radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(3): 1302-1311.
- [5] 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.  
HE K P, XU D, LI H. High precision measurement for barrage weapon dispersion based on large area triangle composite light-screens[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1523-1529. (in Chinese)
- [6] 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.  
NI J P, YANG L, TIAN H. Measurement principle for two kinds of six-light-screen array composed by a large area light screen[J]. *Opto-Electronic Engineering*. 2008, 35(2): 6-11. (in Chinese)
- [7] 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.  
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)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 朱凯, 王军, 薄煜明. 速射火炮立靶密集度序列建模[J]. 弹道学报, 2014, 26(3): 32-36.  
ZHU K, WANG J, BO Y M. Modeling of vertical target density sequence of rapid-fire gun[J]. *Journal of ballistics*. 2014, 26(3): 32-36. (in Chinese)

- [11] 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)
- [12] 武江鹏, 宋萍, 郝创博, 等. 多弹丸时空散布参数测试方法仿真研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(10): 1967-1974.  
WU J P, SONG P, HAO CH B, *et al.*. Simulation of measuring method for space-time distributed parameters of multiple projectiles[J]. *Acta Armamentarii*. 2015, 36(10): 1967-1974. (in Chinese)
- [13] 李笑娟, 徐向毅. 高速射火炮带弹序立靶密集度测试技术研究与实践[J]. 火炮发射与控制学报, 2011, 9(3): 71-73.  
LI X J, XU X Y. Study and practice of vertical target density test technology with target-hitting sequence calculation[J]. *Journal of gun Launch & Control*, 2011, 9(3): 71-73. (in Chinese)
- [14] 黄土亮, 田福庆. 舰炮试验与鉴定[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.  
HUANG SH L, TIAN F Q. *Naval Gun Test And Evaluation*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [15] 王林波, 王延杰, 邸男, 等. 基于集合特征的圆形标志点亚像素中心定位[J]. 液晶与显示, 2014, 29(6): 1003-1009.  
WANG L B, WANG Y J, DI N, *et al.*. Subpixel location of circle target center based on geometric features[J], *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(6): 1003-1009. (in Chinese)

#### 作者简介:



武江鹏(1987-), 男, 山西运城人, 博士研究生, 2010年于华北电力大学获得学士学位, 主要从事目标识别和图像处理方面的研究。E-mail: wjp62795@126.com



宋萍(1972-), 女, 山东莱州人, 教授, 博士生导师, 2002年于北京理工大学获得博士学位, 主要从事感知与测控技术方面的研究。E-mail: sping2002@bit.edu.cn