

文章编号 1004-924X(2012)02-0329-08

基于摄像法测量弹丸的空间炸点位置

李翰山*, 雷志勇

(西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要:为了测量了近炸引信对空中目标引炸的炸点位置,提出了采用基于定目标为参照的双面阵相机交汇摄像法来获取高空弹丸炸点三维坐标参数。根据试验测试要求,分析了相机交汇摄像原理与方法,建立了弹丸炸点三维坐标位置计算模型;利用交汇相机的空间几何关系、图像处理技术与模拟目标实际尺寸,研究弹丸炸点相对模拟目标的空间三维坐标算法,并分析了坐标参数修正方法;利用微分法对参数进行误差分析。分析计算显示,坐标误差均小于 40 mm;实弹试验和图像处理显示,相机交汇摄像法可以获得弹丸炸点三维坐标。对四光幕法与摄像法的对比表明,两种方法在高低方向所测数值平均差为 0.158 m,左右方向数值平均差为 0.114 m。

关键词:交汇摄像法;面阵相机;弹丸;近炸引信;炸点位置

中图分类号:TJ430.6;TB872 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122002.0329

Measurement of space burst location for projectile base on photography

LI Han-shan*, LEI Zhi-yong

(School of Electronic Information Engineering,
Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

* Corresponding author, E-mail: lihanshan269@163.com

Abstract: To measure the location parameters for projectile burst on a proximity fuze in high altitude, an intersection imaging method by using two planar array cameras and taking a simulant object as reference was put forward to calculate three coordinate parameters of projectile burst location. According to the request of proximity fuze test, the principle and method of camera intersection imaging were analyzed, and the measuring model of projectile burst location was set up. The relations of space geometric locations of the camera layouts, the technology of image processing and the sizes of objects were analyzed, the spatial three coordination of projectile burst location were calculated, and the parameter modification method was studied. A differential method was employed in analyzing the location errors, and results show that the differential coordinate errors are less than 40 mm. Experiments and image processing were performed, which shows that the planar array camera intersection imaging can obtain the spatial three coordination of projectile burst. Furthermore, the data by proposed method are compared with that of the four screen across system, and their average error is 0.158 m in the high and

收稿日期:2011-08-12;修订日期:2011-10-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61107079);陕西省教育厅专项基金资助项目(No. 2010JK605)

low directions and 0.114 m in right and left directions.

Key words: intersection imaging method; planar array camera; projectile; proximity fuze; burst location

1 引言

引信是武器系统的重要组成部分,它的作用是探测、分辨目标,使炮弹适时起爆,最大限度地发挥它的威力。炮弹接近目标到一定程度时引爆的引信称作近炸引信^[1],它利用自身的发射接收回波信号强度控制内部起爆装置来引爆弹丸^[2]。测量出弹丸中的近炸引信在相对目标头部爆炸位置,将给引信的改进研制提供重要参考依据。对弹丸着靶位置的测量,文献[3-6]提出了四光幕法,四光幕靶由4个光电探测靶组成,其要求弹丸作用光幕时必须垂直光幕穿越,否则正视方向的两维坐标不是同点位置坐标,存在较大误差,且不能获取实际弹丸炸点的三维坐标;文献[7]提出了六光幕法,虽然可以获得光幕区飞行弹丸的飞行偏向角和预定某一平面弹着点坐标,但还是不能获取真实的弹丸中引信近炸炸点真实的空间三维坐标;光纤编码交汇法^[8]、声靶^[9]和线阵 CCD 交汇^[10-11]可以解决低伸弹道弹丸作用某一立靶平面位置的两维坐标,也不能获取高空弹丸炸点三维坐标。利用面阵 CCD 对炸高的测试,文献[12-14]提到了采用建立世界坐标系等方法获取炸点高度,而对于近炸引信中的弹丸炸点相对位置测量,是建立在被击模拟目标高度已知,测量坐标以相对定目标某一位置为中心的立体空间位置,本文介绍一种基于模拟目标实际尺寸,按照相机布置的空间几何结构,基于摄像法的空中弹丸炸点位置参数测量方法。

2 试验特点及测试原理

在靶场试验中,近炸引信弹丸炸点的空间位置通常是指火炮对预定炮口距离和预定高度的目标射击时,引信点燃弹丸引爆装置而产生爆炸的相对位置。测量时通常采用静态目标进行试验测试,现场测试如图 1 所示,在距离火炮发射炮口距离为 L 处放置被击模拟目标模型,模型与地面的高度为 H 。当火炮发射的弹丸接近被击模拟目标某一范围区域时,引信利用自身的控制起爆装

置点燃弹体内的火药而产生爆炸,利用弹体爆炸产生的破片而毁伤被击目标。在测试系统中,所求的弹丸炸点位置是以被击目标头部中心为原点的相对空间三维坐标,建立的坐标为图 1 中的 xoy 和 $yozy$ 。本测试原理采用双面阵交汇测试方法,A 和 B 两位置为试验时布置的两台面阵相机, K_1 和 K_2 是相机与被击目标的投影位置之间的垂足距离。图像采集与计算处理模块是测试系统捕获弹丸炸点图像与相关参数的计算处理核心,并进行同步图像采集控制等,最后,利用远程计算机进行相关数据的采集与参数计算并显示测量的参数。

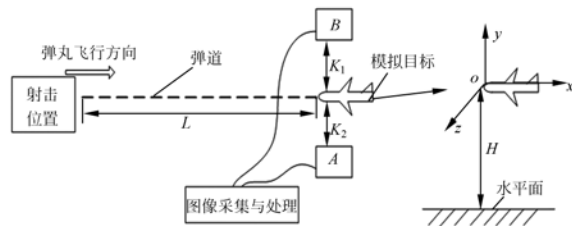


图 1 试验布置示意图

Fig. 1 Sketch map of test

3 摄像法的弹丸炸点测量算法

3.1 相机交汇测量方法

根据试验特点及现场测试原理,由于被击模拟目标的尺寸是已知的,可以通过模拟目标与相机成像的几何关系,确定弹丸炸点在成像图像中的具体位置;再利用两个相机的交汇空间几何结构,确定出弹丸炸点的实际位置。按照图 1 的原理,在被击目标的投影位置且位于弹道两侧布置两台面阵相机,使两台相机的光轴交汇于被击目标头部,并在空间形成交汇,火炮正视被击目标方向的交汇计算原理如图 2 所示;两台相机放置在被击目标投影正下方的两侧,被击目标投影中心 O' 与两相机中心距离分别为 K_1 和 K_2 ,两相机中心的高低差为 ΔH ; O_1 和 O_2 是两相机的镜头光轴中心,两个物镜的焦距分别为 f_1 和 f_2 ,通常选取的两相机光学物镜是一致的,即 $f_1 = f_2 = f$,在物

镜确定条件下,它们的有效视场大小均为 2ω , $A_1 A_2$ 和 $B_1 B_2$ 为两相机的成像面长度 ($A_1 A_2 = B_1 B_2$), ϵ 为相机的光轴 $O_1' O_1''$ 或 $O_2' O_2''$ 与水平线 $O_1 O_2$ 的夹角,面 $ABCD$ 为正视方向的交汇有效作用视场。为了计算出弹丸炸点实际位置,设被击目标头部为坐标原点,即图中的 O ,建立空间坐标系 xoy 和 yoz , xoy 为侧视方向的坐标系, yoz 为火炮发射方向的正视方向坐标系(火炮发射方向), P 点为弹丸炸点垂直投影到光轴正交的平面坐标点,也为正视方向的二维坐标。

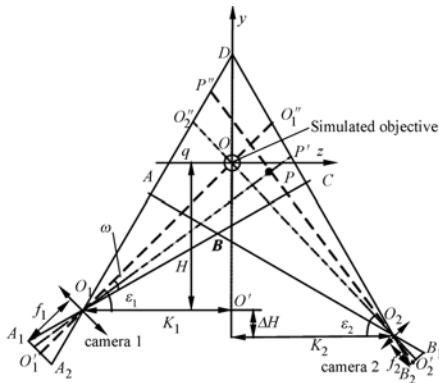


图 2 相机交汇的正视方向坐标计算原理

Fig. 2 Principle of coordinate calculate in face-glance on camera across

根据图 2,可以建立起正视方向的弹丸炸点坐标计算模型。然而,由于弹丸爆炸时刻是由引信对目标的反射回波信号强弱来控制的,因而,飞行弹丸在穿越被击目标前的不同位置引起的反射回波信号的强弱也不同,致使引信的起爆时间产生差异而使同一批量产品在试验中的炸点位置不是唯一的,而是相对被击目标成立体空间散布。为了精确解算弹丸炸点空间三维坐标,需要从以被击目标为中心的正视和侧视两个方向进行求解。

侧视方向的每台相机可以获得自己的炸点位置图像,根据成像原理,侧视方向图像代表某一距离条件下垂直光轴平面的二维坐标,而不是炸点的真实位置,要想获得炸点的空间位置,需要侧视和正视两方面进行联立求解。根据测试条件,利用被击目标已知尺寸参量(长度或某一位置的直径),确定侧视方向的炸点平面位置。图 3 为侧向相机获得弹丸炸点图像示意图,假设定目标实际长为 l_a ,有效靶面为 $q \times q$ 。

根据图 3,从正视图来看,在视场角 2ω 作用

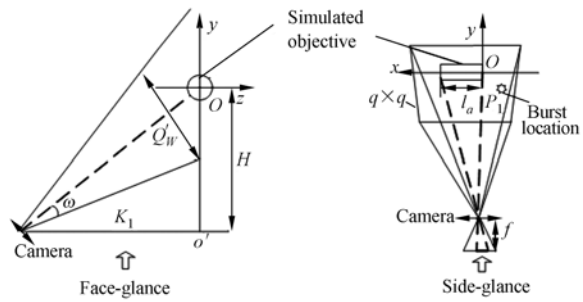


图 3 侧向相机布置示意图

Fig. 3 Layout sketch of side-glance camera

下,其有效视场宽度可用 Q_w' 表示, Q_w' 可通过物镜与实测相对距离以及镜头参数计算。在侧视图图中,假设 P_1 点为相机获得的弹丸在图像中炸点位置,其坐标为 $P_1(x', y')$ 。分别对被击目标与炸点进行图像处理得到被击目标头部在图像中的像素位置坐标为 (M_x, M_y) ;假设被击目标长度所占像素数为 n_m ,弹丸炸点起始位置的像素坐标为 (D_x, D_y) ,则炸点 P_1 相对被击目标头部中心的图像位置二维坐标 (x', y') 为:

$$x' = \frac{(D_x - M_x) \cdot l_a}{n_m}, \quad (1)$$

$$y' = \frac{(D_y - M_y) \cdot l_a}{n_m}, \quad (2)$$

由式(1)和(2)可知, x' 和 y' 并非为实际炸点的位置坐标,仅是两个相机独立获得的图像位置坐标,为了确定出弹丸实际炸点坐标仍需要进行修正处理。因此,根据相机交汇的正向二维坐标和单个侧向相机图像处理的炸点像素位置二维坐标,结合弹丸炸点的空间几何关系,可以解算出某一发弹丸在有效靶面区域内的弹丸炸点三维坐标 (x, y, z) 。

3.2 交汇相机的弹丸炸点正视二维坐标计算

对于正视方向的两维坐标可以利用弹丸炸点投影与垂直交汇的平面计算。根据摄像原理与单相机测量弹丸炸点原理,利用相机 1 与相机 2 拍摄同一弹丸爆炸瞬间与被击目标共有的图像,由式(1)和式(2)分别求得两幅图像中弹丸炸点相对被击目标头部的两维坐标为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) ,即为相机 1 和相机 2 获得的图像平面坐标。由图 2 可知, O_1 和 O_2 两点相对 O 点的坐标分别为 $(-K_1, -H)$ 和 $(K_2, -H - \Delta H)$,直线 $O_1 P'$ 和 $O_2 P''$ 的方程如下:

$$z = \frac{(H + \Delta H + y_2 \cdot \cos \epsilon_2)(K_1 - y_1 \sin \epsilon_1)}{z^*} - \frac{\Delta H[(K_1 - y_1 \sin \epsilon_1) + (H + y_1 \cos \epsilon_1)](K_2 - y_2 \sin \epsilon_2)}{z^*}, \quad (3)$$

$$y = \frac{H + y_1 \cdot \cos \epsilon_1}{K_1 - y_1 \cdot \sin \epsilon_1} \cdot \left[\frac{(H + \Delta H + y_2 \cdot \cos \epsilon_2)(L_1 - y_1 \sin \epsilon_1)}{z^*} - \frac{\Delta H[(K_1 - y_1 \sin \epsilon_1) + (H + y_1 \cos \epsilon_1)](K_2 - y_2 \sin \epsilon_2)}{z^*} + K_1 \right] - H, \quad (4)$$

其中：

$$z^* = (H + \Delta H + y_2 \cos \epsilon_2)(K_1 - y_1 \sin \epsilon_1) + (H + y_1 \cos \epsilon_1)(K_2 - y_2 \sin \epsilon_2)$$

根据式(3)和(4)中可获得弹丸炸点的空间正视图两维坐标 (z, y) ，而对于弹丸炸点的第三维坐标 x ，还需要根据坐标 (z, y) 进行修正计算。

3.3 弹丸炸点侧向第三维坐标参数修正计算

根据两侧相机获取的弹丸炸点图像，按照空间几何关系，进行对 x 坐标参数修正。以相机 1 为例分析，图 4 为相机 1 在侧视方向观测的弹丸

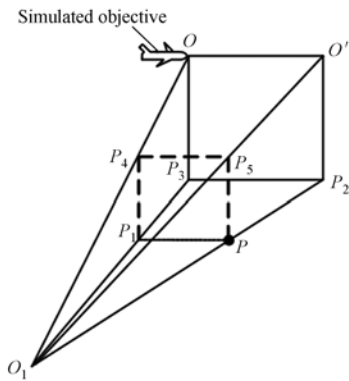


图 4 侧视空间几何关系
Fig. 4 Spatial geometry relation of side-glance

炸点位置空间几何关系， P 点为实际弹丸炸点，其投影到面 OO_1P_3 为 P_1 ， O_1 为相机 1 的光学镜头中心，其坐标为 $O_1(-K_1, -H)$ ，通过式(1)和(2)，在相机 1 中可计算出弹丸炸点在侧向方向的图像坐标为 x_1 ，即 P_2P_3 长度。从图 4 中可知， OO' 和 P_2P_3 等距，即 $P_2P_3 = OO' = x_1$ ，面 OO_1P_3 和面 $O'O_1P_2$ 的夹角 $\angle OO_1O'$ ，有：

$$\tan \angle OO_1O' = \frac{x_1}{\sqrt{H^2 + K_1^2}}, \quad (5)$$

从图 4 可知， PP_1 参数值为实际弹丸炸点的侧向坐标长度。在 $\triangle OO_1P_3$ 中， $P_3O \perp OO_1$ ， $P_1P_4 \perp OO_1$ ，从正视方向观测， P_2 投影到面 OO_1P_3 的点为 P_3 ，根据正视方向几何关系可以确定 P_1 点坐标，即有 $P(y, z) = P_1(y, z)$ 。图 5 为相机 1 与

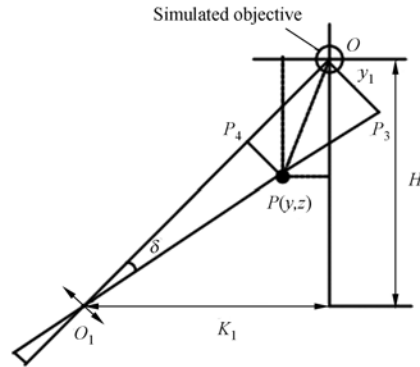


图 5 相机 1 炸点正视空间几何关系
Fig. 5 Spatial geometry relation of face-glance

炸点在正视空间的几何位置关系，根据图 5 空间几何关系，有：

$$O_1P_4 = \frac{\sqrt{H^2 + K_1^2}}{\sqrt{y_1^2 + H^2 + K_1^2}} \cdot \sqrt{(-H - y)^2 + (-K_1 - z)^2}, \quad (6)$$

由式(6)，结合图 4 的空间几何关系， $\triangle O_1P_4P_5 \sim \triangle O_1OO'$ ，记 $x_{camera1}$ 为相机 1 与正视方向坐标结合获得的第三维坐标，则有：

$$x_{camera1} = \frac{\sqrt{(-H - y)^2 + (-K_1 - z)^2}}{\sqrt{y_1^2 + H^2 + K_1^2}} \cdot x_1, \quad (7)$$

同理可得相机 2 的坐标 $x_{camera2}$ ， $x_{camera1}$ 和 $x_{camera2}$ 即为计算的 ox 方向坐标 x 。如果布置的所有参数严格对称则 $x_{camera1} = x_{camera2}$ ，但由于试验布置做不到严格一致，两台相机所获得的坐标有一定的误差，通常取两者的平均值为最终测量值，即 $x = (x_{camera1} + x_{camera2})/2$ 。通过计算分析，根据式(3)、(4)和(7)，可求解出以被击目标为中心的空弹丸炸点坐标 (x, y, z) 。

4 误差与试验分析

4.1 误差分析

在测量中，影响炸点三维坐标参量的因素很

多,如两相机布置的距离,两相机的高低差,图像处理中的像素差等,都是引起测量误差的来源。交汇的两个角度 ϵ_1 和 ϵ_2 可以利用 17 位高精度角度编码器在室内标定,距离 K_1 、 K_2 在布置时利用

高精度激光测距仪测量,角度误差接近 0.003° ,距离误差可为测距仪精度,即精度为 0.3 mm 。取 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 45^\circ$,且对称分布,即 $K_1 = K_2$, $\Delta H = 0$,对式(3)、(4)和(7)进行全微分运算,有:

$$|dz| = \left| \frac{2\sqrt{2}H(y_1 - y_2)(2H^2 - y_1 y_2) - 4\sqrt{2}H^3(y_1 - y_2)}{(2H^2 - y_1 y_2)^2} dH \right| + \left| \frac{\sqrt{2}H^2(2H^2 - y_1 y_2) - \sqrt{2}H^2(y_1 - y_2)y_2}{(2H^2 - y_1 y_2)^2} dy_1 \right| + \left| \frac{\sqrt{2}H^2(y_1 - y_2)y_1 - \sqrt{2}H^2(2H^2 - y_1 y_2)}{(2H^2 - y_1 y_2)^2} dy_2 \right|, \quad (8)$$

$$|dy| = \left| \left[\frac{-2\sqrt{2}y_2}{(\sqrt{2}H - y_2)^2} \left(H - \frac{\sqrt{2}(y_1 - y_2)H^2}{2H^2 - y_1 y_2} \right) + \frac{\sqrt{2}H + y_2}{\sqrt{2}H - y_2} \left(1 - \frac{2\sqrt{2}H(y_1 - y_2)(2H^2 - y_1 y_2) - 4\sqrt{2}H^3(y_1 - y_2)}{(2H^2 - y_1 y_2)^2} - 1 \right) \right] dH \right| + \left| \left[\frac{\sqrt{2}H + y_2}{\sqrt{2}H - y_2} \cdot \frac{\sqrt{2}H^2(2H^2 - y_1 y_2) + \sqrt{2}H^2(y_1 - y_2)y_2}{(2H^2 - y_1 y_2)^2} \right] dy_1 \right| + \left| \left[\frac{2\sqrt{2}H}{(\sqrt{2}H - y_2)^2} \left(H - \frac{\sqrt{2}(y_1 - y_2)H^2}{2H^2 - y_1 y_2} \right) + \frac{\sqrt{2}H + y_2}{\sqrt{2}H - y_2} \cdot \frac{\sqrt{2}H^2(y_1 - y_2)y_1 - \sqrt{2}H^2(2H^2 - y_1 y_2)}{(2H^2 - y_1 y_2)^2} \right] dy_2 \right|, \quad (9)$$

$$|dx| = \left| \frac{\sqrt{(H-y)^2 + (K_1-z)^2}}{\sqrt{H^2 + K_1^2}} dx_1 \right| + \left| \frac{x_1}{\sqrt{H^2 + K_1^2}} \cdot \frac{y}{\sqrt{(H-y)^2 + (K_1-z)^2}} dy \right| + \left| \frac{x_1}{\sqrt{H^2 + K_1^2}} \cdot \frac{z}{\sqrt{(H-y)^2 + (K_1-z)^2}} dz \right|. \quad (10)$$

对式(8)、式(9)和式(10),采用定性分析,假设 $H = 35\text{ m}$, $dy_1 = 0.005\text{ m}$, $dy_2 = 0.005\text{ m}$, $dH = 0.005\text{ m}$, y_1 和 y_2 在 $-5 \sim 5\text{ m}$ 内变化,经计算,左右偏差 z 的误差小于 10 mm ,高低方向 y 的误差小于 40 mm , x 前后方向误差小于 40 mm 。

4.2 试验

根据测试试验要求,按照图 1 的布置方式进行对某型号弹丸炸点位置参数测量。试验条件:火炮发射点与被击目标水平距离约 800 m ,被击目标悬挂高度为 27.2 m ,被击模拟目标长度为 4.72 m 。在试验中采用外触发同步触发指令获得弹丸炸点图像,由于相机采集需要一定的曝光时间,使得相机采集到的弹丸爆炸火光在相机的感光面上成像面积较大,图 6 为某次试验采集到某型号弹丸的炸点图像。为了精确计算与读取弹丸炸点位置,将相机采集到的弹丸炸点图像进行边缘检测等处理,图 7 为弹丸炸点与被击模拟目标图像处理结果。

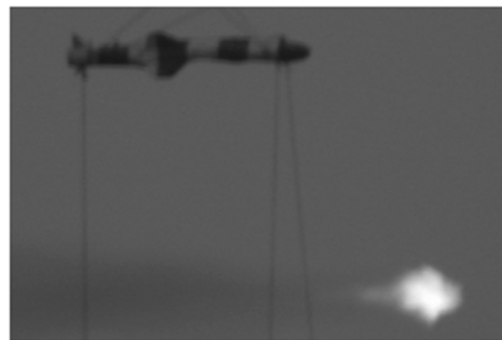


图 6 某次试验获取的弹丸炸点图像

Fig. 6 Projectile burst location image in one test

根据火炮发射与弹丸爆炸的特点,通常以弹丸飞行方向为基准,选择离炮口发射点最近的炸点图像最边沿点为真正弹丸炸点起始位置。由弹丸炸点起始点,根据现场布置的交汇相机空间几何关系,按照上述计算原理,计算飞行弹丸实际炸点位置。图 7 中, A 点为图像处理计算出的被击目标头部中心像素坐标点为 $(550, 358)$, B 为被击

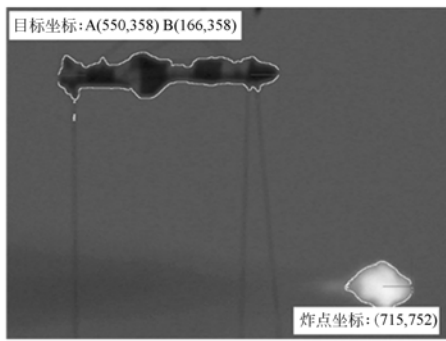


图 7 图像处理结果图

Fig. 7 Image processing result of projectile burst

目标尾部像素坐标点为(166,358),弹丸炸点起始像素坐标为(715,752),坐标数据均为平面图像像素位置坐标,因此,定目标总长度的像素差为 384 个像素,起始炸点在高低方向上的像素差为 394 个像素,在射击方向的像素差为 165 个像素,按照公式(1)和(2)可计算出单一相机在该侧视方向的两个坐标为(-2.03 m,-5.08 m),同理也可以获得另一相机的坐标。根据侧向相机获得的坐标,再结合式(3)、(4)、(7)的计算原理,可计算出当前弹丸炸点的实际三维坐标。

通过四光幕交汇测试系统(简称光幕法)和本相机交汇测试系统(简称摄像法)测量了同一组引信产品,获得的一组测量对比数据如表 1。

表 1 试验数据

Tab. 1 Data of test (m)

序号	摄像法			光幕法		误差	
	x	y	z	y_d	z_d	$ \Delta y $	$ \Delta z $
1	-1.33	-4.87	-2.24	-5.01	-2.06	0.14	0.18
2	-0.98	-4.51	-2.70	-4.76	-2.63	0.25	0.07
3	-2.37	-3.92	-3.12	-4.08	-3.04	0.16	0.08
4	-1.92	-4.78	-2.57	-4.93	-2.46	0.15	0.11
5	-1.88	-3.99	-2.08	-4.17	-1.91	0.18	0.17
6	-3.25	-3.82	-1.86	-3.96	-1.81	0.14	0.05
7	0.81	-4.36	-2.31	-4.45	-2.17	0.09	0.14

四光幕交汇测试系统布置靶距中心距离被击目标投影大于 30 m,四光幕平行光幕靶距为 11.7 m。四光幕测量原理参见文献[3]和[5],其测量左右和高低偏差的倾斜光幕通常置于弹丸爆

炸前,即四光幕所获的坐标参数是弹丸穿越倾斜光幕的交汇点瞬间位置,而不是弹丸实际炸点,当弹丸穿越 4 个光幕之后,并接近模拟目标某一位置时才使产品作用产生爆炸,因此,四光幕所测量的高低数值与实际炸点数值偏差比较大,其主要原因是在高低方向由于弹丸自身重力等因素的影响,使弹丸不是直线飞行。从表 1 中可以看出,弹丸炸点位于被击目标中心下方,通过计算,光幕法与摄像法在 y 方向所测数值平均差为 0.158 m, z 方向数值平均差为 0.114 m,两者的差值大于理论计算数值,主要原因是四光幕法中的坐标参数未修正,所测数值仅为弹丸未炸前穿过光幕的交汇点,并非炸点真实位置,因而两者的误差偏大。通过数据对比,相机交汇测试系统不仅实现了弹丸炸点正视方向的两维坐标测量,同时还可以计算出弹丸炸点位置的侧向第三维坐标,弥补了传统四光幕交汇测试系统的不足。

5 结 论

根据引信试验测试需求,研究了双目相机交汇测量弹丸炸点的三维坐标计算方法。通过两个相机光轴交汇于被击目标头部中心,推算了弹丸作用于定目标的正视方向的两维坐标,以及利用所获得的两维坐标结合侧视方向的图像处理结果,推导计算出了弹丸炸点相对被击目标头部中心的实际三维坐标,并进行了理论误差分析。进行了试验,对比了四光幕法与摄像法得到的结果,在高低方向所测数值平均差为 0.158 m,左右方向数值平均差为 0.114 m,验证了测试方法的可行性。由于弹丸炸点位置的多样性,特别是研制初期,常常出现弹丸早炸、晚炸或不炸的现象,论文提出的测试方法仅用于视场范围内的测量,对于不在视场范围内的弹丸炸早或晚炸的炸点位置测量,还有一定的局限性,特别是弹丸穿越目标区域不炸的情况,双目相机交汇法也将采集不到弹丸炸点图像,导致测试系统计算不出数据。本方法解决了常规弹丸炸点三维坐标测量问题,可为各类近炸引信的研制提供故障诊断、改进等重要依据。

参考文献:

- [1] 王德. 激光引信及其发展现状[J]. 长春光学精密机械学院学报, 2001, 24(1): 61-65.
WANG D. Laser fuzes and thier development situation[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2001, 24(1): 61-65. (in Chinese)
- [2] 何振才. 引信空炸炸点精确控制技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
HE ZH C. *Precision control technology of air burst point on fuze*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2006. (in Chinese)
- [3] 倪晋平, 崔长青, 田会, 等. 四光幕交汇立靶测试系统及纸靶校准方法[J]. 西安工业学院学报, 2004, 24(4): 139-144.
NI J P, CUI CH Q, TIAN H, *et al.*. Four screens target measuring system and calibration with paper target sheet [J]. *Journal of Xi'an Institute of Technology*, 2004, 24(4): 139-144. (in Chinese)
- [4] 刘群华, 施焯芳, 阎秉先, 等. 红外光幕靶测速系统和精度分析[J]. 光子学报, 2004, 33(11): 1409-1412.
LIU Q H, SHI W F, YAN B X, *et al.*. The infrared light screen system and accuracy analysis [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(11): 1409-1412. (in Chinese)
- [5] 李翰山, 雷志勇, 王泽民. 两种天幕靶光幕交汇测量系统分析[J]. 弹道学报, 2010, 22(1): 29-32.
LI H SH, LEI ZH Y, WANG Z M. Analysis of two type sky-screens across screen fire measuring system[J]. *Journal of Ballistics*, 2010, 22(1): 29-32. (in Chinese)
- [6] 李翰山, 袁朝辉, 雷志勇. 探测光幕中的高速弹丸红外辐射特性分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 777-781.
LI H SH, YUAN ZH H, LEI ZH Y. Infrared radiation characteristics analysis of high velocity projectile in detection screen[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 777-781. (in Chinese)
- [7] 曾光宇, 马瑛. 立靶精度测量系统研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(1): 345-346.
ZENG G Y, MA Y. Studies on measuring system of erecting target[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(1): 345-346. (in Chinese)
- [8] 冯斌, 倪晋平, 杨雷. 六光幕结构立靶坐标测量原理[J]. 弹道学报, 2008, 20(1): 59-61.
FENG B, NI J P, YANG L. Principle of measuring impacting position of vertical target of site light screens[J]. *Journal of Ballistics*, 2008, 20(1): 59-61. (in Chinese)
- [9] 张飞猛, 马春茂. 对空射击声学靶脱靶量测试系统的精度分析[J]. 兵工学报, 2000, 21(1): 23-27.
ZHANG F M, MA CH M. Accuracy analysis for the measuring system of target deviation for projectiles shooting an acoustic target [J]. *Acta Armamentarii*, 2000, 21(1): 23-27. (in Chinese)
- [10] 刘亚雄, 张云, 熊仁生. 线阵 CCD 弹丸坐标测量系统的畸变测试方法分析[J]. 光子学报, 1996, 25(6): 550-554.
LIU Y X, ZHANG Y, XIONG R SH. The testing method analysis about the distortion of projectile coordinate measuring system with linear CCD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, 25(6): 550-554. (in Chinese)
- [11] 雷志勇, 姜寿山. 线阵 CCD 技术及其在靶场测试中的应用[J]. 西安工业学院学报, 2002, 22(3): 220-224.
LEI ZH Y, JIANG SH SH. Linear CCD technology and its application in target measurement[J]. *Journal of Xi'an Institute of Technology*, 2002, 22(3): 220-224. (in Chinese)
- [12] 周承仙, 王高, 李仰军, 等. 基于非对称双 CCD 交汇的信号弹高度测量方法[J]. 测试技术学报, 2009, 23(3): 240-244.
ZHOU CH X, WANG G, LI Y J, *et al.*. Research on method of height measurement for signal flare based on asymmetric dual-CCD intersection [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2009, 23(3): 240-244. (in Chinese)
- [13] 艾莉莉, 袁峰, 丁振良. 应用线阵 CCD 的空间目标外姿态测量系统[J]. 光学精密工程, 2008, 16(1): 161-165.

AI L L, YUAN F, DING ZH L. An exterior attitude measurement system for spatial object based on linear CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (1):161-165. (in Chinese)

[14] 沈湘衡, 杨亮, 贺庚贤. 光电测量设备光学系统的像面照度均匀性检测[J]. *光学精密工程*, 2008, 16

(12):2531-2536.

SHEN X H, YANG L, HE G X, *et al.*. Measurement of image plane illumination non-uniformity of optical system in photoelectric equipment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (12): 2531-2536. (in Chinese)

作者简介:



李翰山(1978—),男,广西上林人,博士,副教授,2004年于西安工业大学获得硕士学位,2010年于西北工业大学获得博士学位,主要从事靶场测试技术、光电检测与测控技术等方面的研究。Email: lihanshan269@163.com



雷志勇(1962—),男,陕西西安人,硕士,教授,1985年于西安电子科技大学获得学士学位,2002年于南京理工大学获得硕士学位,主要从事计算机辅助设计、动态目标测试、图像处理与信息融合等方面的研究。Email: leizy888@163.com

●下期预告

谱学显微光束线光斑水平漂移分析与检测

马 磊^{1,2}, 卢启鹏¹, 彭忠琦¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

上海光源建设了国内首条软 X 射线谱学显微光束线站,其分光装置是一台变包含角平面光栅单色仪。为保证光束线站整体性能,分析了单色仪在波长扫描过程中影响谱学显微光束线光斑水平漂移的各个因素,推导出各因素与光斑水平漂移的传递关系,结合具体要求进行误差分配;针对光斑水平角漂移重复精度的检测,采用自准直原理,构建测试系统。利用该系统,完成了谱学显微光束线站光斑水平漂移重复精度的离线检测,结果为 0.67",满足设计指标 1"的要求。上海光源对安装调试后的束线进行了总体性能测试,结果均满足谱学显微设计和使用要求。由此表明,对谱学显微光束线光斑水平漂移误差来源分析以及检测方法的研究,有效保证了束线性能的实现。