

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0175

基于高速摄影视觉测量的静爆破片运动参数测试方法*

杜博军^{1,2}, 刘泽庆², 王亚林², 许勇², 李乾舞³

(1. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073;

2. 中国人民解放军 63850 部队, 吉林白城 137001;

3. 陆军工程大学石家庄校区, 河北石家庄 050003)

摘要: 为提高静爆试验中破片初速和速度衰减系数解算的可信度, 提出了基于高速摄影视觉测量的静爆破片运动参数测试方法, 该方法主要包括高速摄像机数据采集、视觉测量解算破片轨迹、基于运动模型拟合求解三个步骤。试验证明, 该方法能够准确获取各破片的初速和速度衰减系数, 可信度高, 是一种有效的静爆试验破片运动参数测试方法。

关键词: 高速摄影; 视觉测量; 静爆试验; 破片; 初速; 速度衰减系数

中图分类号: O389 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

破片型战斗部是重要的杀伤战斗部, 它以破片为主要杀伤单元, 在其研制过程中常采用地面静态威力试验(静爆试验)的方式来测试战斗部的威力。破片杀伤战斗部的威力以破片的杀伤能力进行表征, 静爆试验中常需要测定破片的质量、破片总数、破片初速及速度衰减系数、破片飞散角及轴向分布等参数, 有时还需测定破片对特定靶标的穿透能力及爆炸冲击波等参数^[1-2]。破片初速和衰减系数的测试是静爆试验中较为复杂的项目, 目前常采用的测试方法有接触式测量和非接触式测量两种^[3-4]。接触式测量均采用区截式测量原理, 通过测量目标在区截位置上的运动时间实现速度测量, 包括网靶测速和通靶测速等方法^[5-7], 无法实现各破片飞行轨迹与着靶时间的对应, 所以易出现破片着靶时间误读误判的问题, 导致数据获取率低、测量数据可信度不高, 限制了毁伤威力的评价水平。非接触式测量主要是高速摄影单相机测速法和激光光幕法。高速摄影单相机测速法通过摄影方法记录爆炸、破片触靶的时间差, 测量得到的是战斗部破片平均速度, 无法测量破片的速度衰减系数^[8-9]。激光光幕法测量破片通过相距较近的多个光幕靶的时间差, 间接计算速度、速度衰减系数, 但存在数据获取率低、易损坏等不足。

视觉测量是机器视觉技术的重要分支, 能够根据目标的运动图像实现对目标空间位置的测量, 具有实景记录、非接触式测量、测量精度高等特点^[10-11]。高速摄像机拍摄频率较高, 可实现对破片等高速运动目标运动过程的记录。因而, 本文提出基于高速摄影双目视觉测量的静爆破片运动参数测试方法, 采用两台高速摄像机同步记录破片的运动影像, 通过对序列图像的判读、交会计算, 解算出破片的运动轨迹, 并在此基础上, 求解破片初速和速度衰减系数。

1 高速摄影视觉测量原理

静爆试验产生较强的爆炸光, 会使图像产生局部饱和, 不利于对破片的测试。避开爆炸点方向, 在其附近选择一个适当区域, 采用两台高速摄像机同步拍摄破片在该区域内的飞行影像, 通过事后的图像判读和数据处理, 得到破片运动轨迹, 进而求解出破片速度衰减系数和初速。其中, 由两台双目高速摄像机构成的双目视觉测量单元是根据两个摄像机视差来实现对目标的定位^[12]。如图 1 所示, 左侧摄像机

* 收稿日期: 2018-05-24; 修回日期: 2018-12-03

第一作者: 杜博军(1977—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 13500836079@163.com。

坐标为 $o_r x_r y_r z_r$, 图像坐标系为 $O_r X_r Y_r$, 左摄影机物镜后节点到像面主点的垂距 $o_l O_l$ 为主距 f_l ; 右侧摄影机坐标为 $o_r x_r y_r z_r$, 图像坐标系为 $O_r X_r Y_r$, 右摄影机物镜后节点到像面主点的垂距 $o_r O_r$ 为主距 f_r ; 世界坐标为 $O_w X_w Y_w Z_w$ 。

像点坐标 (X, Y) 和摄像机坐标系坐标 (x, y, z) 之间的关系为:

$$z \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

同一目标在左右两个摄像机坐标系中的坐标 (x_l, y_l, z_l) 、 (x_r, y_r, z_r) 之间有如下转换关系:

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{lr} \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{lr} \quad (2)$$

式中: \mathbf{R}_{lr} 为右摄像机坐标系旋转至左摄像机坐标系的旋转矩阵, \mathbf{T}_{lr} 为左摄像机在右摄像机坐标系中的坐标向量, 且有:

$$\mathbf{R}_{lr} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_{lr} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}。$$

根据式 (1)、(2) 可得目标在左侧摄像机坐标系中的坐标:

$$\begin{cases} x_l = z_l X_l / f_l \\ y_l = z_l Y_l / f_l \\ z_l = \frac{f_l(f_r t_x - X_r t_z)}{X_r(r_7 X_l + r_3 Y_l + f_l r_9) - f_r(r_1 X_l + r_2 Y_l + f_l r_3)} = \frac{f_l(f_r t_y - Y_r t_z)}{Y_r(r_7 X_l + r_3 Y_l + f_l r_9) - f_r(r_4 X_l + r_5 Y_l + f_l r_6)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: (X_l, Y_l) 、 (X_r, Y_r) 分别为目标在左、右摄影机图像上的坐标。

目标的世界坐标 (X_w, Y_w, Z_w) 和左摄像机坐标 (x_l, y_l, z_l) 之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \mathbf{R}_l^{-1} \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} + \mathbf{T}_l \quad (4)$$

式中: \mathbf{R}_l 为左摄像机坐标系旋转至世界坐标系的旋转矩阵, \mathbf{T}_l 为左摄像机在世界坐标系中的坐标向量。

2 高速摄影视觉测量方案

高速摄影视觉测试方案的核心设备是数字化高速摄像机, 采用两台一组的方式进行同步拍摄, 测试方案主要包括图像采集、事后解算两个过程, 事后解算又包含标定计算、轨迹解算和运动参数解算三个环节。

2.1 图像采集

图像采集是指对破片在测试区域内运动的过程进行同步序列影像获取的过程。在图像采集前, 应确定避开爆心的测试区域(比如: 某方向上距离爆心 5~10 m 处的区域), 在此设立用于标定摄像机参数的标杆组。标杆头部作为控制点, 布设后测量其世界坐标。标杆数量应大于 4 根, 以满足最低标定解算条件。两台数字化高速摄像机布置在 100 m 左右的两个方向上, 交会角度在 60°~120°之间。两台摄像机均进行适当防护, 采取反射方式成像, 将摄像机本体隐藏在掩体内, 降低破片损坏摄像机的概率。合理设置镜头焦距、光圈、曝光时间等参数, 保证视场内标杆、破片等清晰成像。较高的拍摄频率, 可以获得更多的序列图像, 从而解算出破片更多时刻的位置信息, 有利于后续数据的拟合计算。通常采取

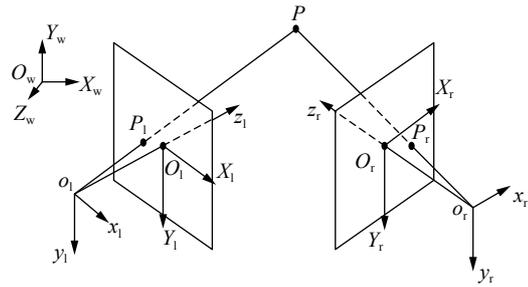


图 1 双目视觉测量模型

Fig. 1 Stereo vision measurement model

2 000 s⁻¹ 以上的频率拍摄。静爆试验时, 采用遥控、自动触发等手段, 控制两台高速摄像机采用凝视方式同步记录图像即可。

2.2 标定计算

标定解算是确定两台高速摄像机内外参数的过程。选择某台高速摄像机拍摄的一帧图像, 判读每个标杆的像面坐标, 并根据输入的对应世界坐标, 采用基于遗传模拟退火等相机标定方法^[13] 分别求解两个摄像机的旋转矩阵、平移矩阵、主距及镜头畸变系数, 再求解出两个摄像机的相对姿态、位置参数^[14]。

2.3 轨迹解算

轨迹解算是通过对两台高速摄像机拍摄的同步影像进行判读, 再交会计算出每个破片运动序列时刻空间坐标的过程。轨迹解算过程为: 首先, 通过对每张图像的判读, 可以自动提取出破片及其干扰目标的像面坐标; 其次, 对序列图像上的目标进行影像轨迹关联; 再次, 利用核线匹配的方法, 将两台高速摄像机拍摄的破片影像轨迹进行匹配; 最后, 交会计算每个破片通过该区域序列时刻对应的坐标。

在轨迹解算的每个环节, 都在一定程度去除了干扰目标, 但由于静爆试验的特殊性, 大量无效目标仍未完全去除。比如: 有些破片在未进入区域内已碰撞变向, 属于无效破片。还有些土块、木屑等干扰目标被当作有效目标等。为了获取真正需要的破片轨迹, 还需对轨迹进行有效性判别。轨迹有效性判别主要采取以下三个原则:

(1) 坐标数原则。如该破片轨迹解算得到的坐标数量小于判别值, 如小于 5 个点, 则判别该轨迹无效;

(2) 运动方向原则。不考虑时间信息, 利用三维坐标拟合空间直线, 如直线与静爆点坐标距离大于判别值, 则认为该轨迹无效。如直线拟合残差统计值过大, 则按照 5 σ 原则剔除后, 再次拟合。再次拟合后残差统计值仍大于判别值, 或者坐标数量小于判别值, 则认为该轨迹无效。对判别有效的轨迹, 也通过该步骤将异常坐标值剔除, 用拟合值代替原坐标形成新的轨迹文件;

(3) 速度区间原则。按照直线拟合结果, 结合对应时间信息, 求取破片速度。采样时刻的平均速度、最大速度、最小速度均应位于合理区间, 否则认为该轨迹无效。

2.4 运动参数解算

在解算公共视场内破片局部轨迹的基础上, 利用获得的时空关系数据和其运动规律建立运动参数解算模型, 获取破片初速和速度衰减系数的测量结果。对于每个得到的破片轨迹, 均可得到其对应的初速和速度衰减系数。

3 破片运动参数解算模型

破片获得初速后在空气中飞行, 由于破片飞行的时间很短, 距离很小, 故可近似地认为破片弹道是直线。破片的运动符合以下假设^[14]:

(1) 忽略受到的重力作用, 破片只在空气阻力的作用下做减速运动;

(2) 忽略破片旋转带来的影响, 认为空气阻力系数不发生变化, 空气阻力作用于破片质心;

(3) 忽略静爆瞬间空气气温变化对空气密度的影响。

破片在空气阻力的作用下做减速运动, 运动微分方程^[15] 为:

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} C_x \rho s v^2 \quad (5)$$

式中: m 为破片质量, C_x 为破片迎面阻力系数, ρ 为当地空气密度, s 为破片垂直于飞行方向上的迎风面积, t 为破片飞行时间, v 为破片瞬时速度。

对 (5) 积分可得:

$$\begin{cases} v(x) = v_0 e^{-\alpha x} \\ \alpha = \frac{C_x \rho s}{2m} \end{cases} \quad (6)$$

式中: x 为破片在某一时刻距离爆炸点的距离, $v(x)$ 对应于 x 距离时的破片速度, α 为速度衰减系数。速度衰减系数 α 的数值越小, 破片飞行过程中的速度损失越小; 反之, 破片速度损失则大, 破片速度衰减得就越快。

距离与速度的关系可以写为 x 、 t 的微分方程 $v(t) = \frac{dx}{dt}$, 代入式 (6) 可得

$$e^{\alpha x} dx = v_0 dt \quad (7)$$

积分后可得

$$\int_0^x e^{\alpha x} dx = \int_0^T v_0 dt \quad (8)$$

整理可得

$$v_0 = \frac{e^{\alpha x} - 1}{\alpha t} \quad (9)$$

根据式 (9) 做进一步推导可得:

$$x(t) = \frac{1}{\alpha} \ln(\alpha v_0 t + 1) \quad (10)$$

式 (10) 表明了时间、距离与初速、衰减系数之间的关系。

利用其他手段, 可以获取弹体静爆前坐标和爆炸时刻, 结合获得的破片运动轨迹, 可以用式 (10) 解算得到速度和速度衰减系数, 但这并不是最佳的解算方法。主要原因是无法确定破片对应弹体的具体位置, 而利用弹体质心位置代替的做法会引入一定误差。为了更精确地解算两个参数, 采取间接解算的方法。

第一, 将轨迹的第一个时刻点作为相对时刻, 其位置作为相对起始位置, 则有

$$\begin{cases} v_1 = v_0 e^{-\alpha X'} \\ \int_{X'}^X e^{\alpha x} dx = \int_{T_1}^t v_0 dt \end{cases} \quad (11)$$

式中: T_1 为破片轨迹第一个数据点对应的时刻, X' 为 T_1 时刻该破片与爆炸点的距离, v_1 对应于 T_1 时刻该破片的速度。

可推导出

$$x(t) - X' = \frac{1}{\alpha} \ln(\alpha v_1 (t - T_1) + 1) \quad (12)$$

式 (12) 可等效为:

$$s_{tr} = \frac{1}{\alpha} \ln(\alpha v t_r + 1) \quad (13)$$

式中: s_{tr} 为破片相对于 T_1 时刻坐标的距离, t_r 为相对于 T_1 时刻的时间差。利用获取得到的破片轨迹数据, 可以根据式 (13) 拟合得到速度 v_1 和速度衰减系数 α 。

第二, 利用轨迹数据, 拟合得到破片直线运动方程。计算弹体质心至该直线的垂足坐标, 以垂足坐标作为破片运动的起始点。在此基础上, 计算轨迹第一个数据点与垂足间距离即为 X_1 。

第三, 将速度 v_1 、速度衰减系数 α 、距离 X_1 代入式 (11), 解算得到初速 v_0 。

4 试验验证

4.1 测量效果验证

结合某项静爆试验, 对本方法进行测试效果验证。如图 2 所示, 标杆组距爆心平均距离 10~15 m, 两相机距离标杆组均为 60 m, 交会角为 60°。高速摄像机镜头焦距约为 165 mm, 图像分辨率为 1 280×

800 像素, 像元尺寸为 20 μm , 拍摄频率为 5 000 s^{-1} 。双相机横向公共视场约为 10 m, 纵向公共视场约为 5 m, 单像元空间分辨率约为 7 mm。实际测量得到 128 条有效的破片轨迹, 其中某破片的轨迹数据如表 1 所示, 按照式 (13) 进行拟合, 拟合结果为图 3。

根据拟合结果得到的方程, 求得该破片测量轨迹第一时刻速度 v_1 为 901 m/s, 衰减系数 α 为 0.018 16。求取炸点到拟合直线的垂足坐标, 并计算第一时刻对应距离 x_1 为 11.331 6 m, 将 x_1 、 α 、 v_1 代入式 (11), 即可得到初速 $v_0=1\ 106.864\ \text{m/s}$ 。从图 2 可以看出曲线拟合残差很小, 拟合效果较好。测量得到的初速和速度衰减系数在合理范围之内。

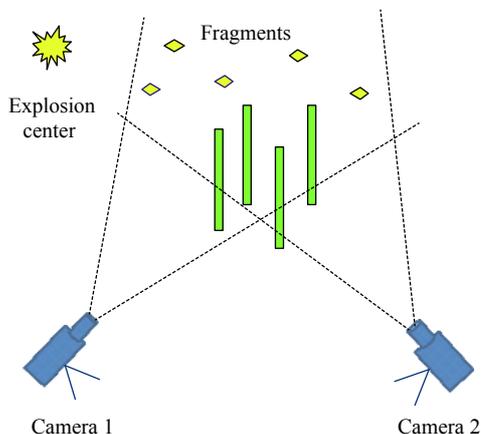


图 2 测试方案布站示意图

Fig. 2 Field test layout schematic

4.2 测量精度验证

为了验证本文方法的初速测量精度, 以破片模拟发射器发射的破片作为测量目标, 采用本文方法和雷达测量方法进行对比测量, 得到破片的初速测量结果对比如表 2 所示。

从多次测量结果可以看出, 本文方法结果与雷达测量结果的测量差均小于 2 m/s, 最大相对误差为 0.127%, 说明测量精度较高。

5 结束语

本文提出了基于高速摄影视觉测量的静爆破片运动参数测试方法, 给出了双目视觉测量的方案, 并研究了基于轨迹拟合的破片运动参数解算模型, 实现了对破片初速和速度衰减系数的求解。同已有方法相比, 该方法获得了更多的破片

表 1 破片轨迹数据数

Table 1 Fragment trajectory data

序号	相对时间/s	X_p/m	Y_p/m	Z_p/m
1	0.000 0	-1.543	-1.739	11.091
2	0.000 2	-1.548	-1.766	11.270
3	0.000 4	-1.582	-1.790	11.445
4	0.000 6	-1.617	-1.815	11.620
5	0.000 8	-1.625	-1.843	11.799
6	0.001 0	-1.662	-1.873	11.964
7	0.001 2	-1.700	-1.897	12.138
8	0.001 4	-1.724	-1.922	12.310
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
70	0.013 8	-3.280	-3.333	22.059

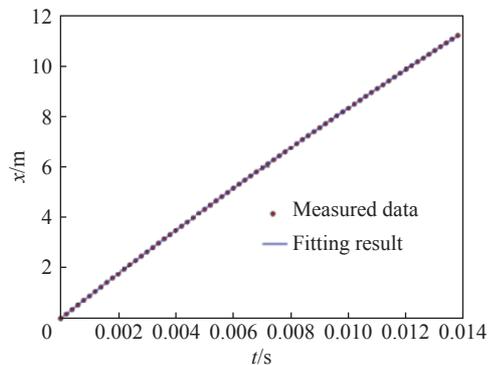


图 3 某破片轨迹拟合结果

Fig. 3 Fitting result of fragment trajectory

表 2 破片初速测量结果对比

Table 2 Measuring results of fragments initial velocity

序号	破片初速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			相对误差/%
	雷达结果	本文结果	测量差	
1	1 247.134	1 248.026	0.892	0.072
2	1 259.958	1 261.512	1.554	0.123
3	1 244.799	1 246.479	1.680	0.135
4	1 258.652	1 260.044	1.392	0.111
5	1 248.419	1 248.962	0.543	0.043
6	1 248.159	1 249.028	0.869	0.070
7	1 254.402	1 255.992	1.590	0.127
8	1 252.940	1 253.645	0.705	0.056
9	1 243.181	1 244.091	0.910	0.073
10	1 253.706	1 255.206	1.500	0.120
11	1 253.890	1 254.460	0.570	0.045

运动数据,能够解算破片对应的初速和速度衰减系数,更适合用于弹丸毁伤能力评估。方法的局限性在于,两台高速摄像设备只能测量某一个方向破片的运动情况,如果需要测量几个典型方向的情况,需要增加多台套图像采集设备。该方法受高速摄像机成像能力的限制,其视场大小与破片尺寸探测能力形成矛盾,实际应用中应注意适当选取摄影参数。

参考文献:

- [1] 周旭. 导弹毁伤效能试验与评估 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [2] 方洋旺. 机载导弹武器系统作战效能评估 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [3] 马光勇, 罗兴柏, 张玉令. 国内破片速度测试技术研究近况及发展趋势 [J]. *四川兵工学报*, 2009, 30(9): 125–127. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0707.2009.09.041.
MA Guangyong, LUO Xingbai, ZHANG Yuling. Review of domestic fragment velocity measurement method and its trend [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2009, 30(9): 125–127. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0707.2009.09.041.
- [4] 李丽萍, 孔德仁, 易春林, 等. 战斗部破片速度测量方法综述 [J]. *测控技术*, 2014, 33(11): 5–7, 13. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8829.2014.11.002.
LI Liping, KONG Deren, YI Chunlin, et al. Review of method to measure the velocity of warhead fragments [J]. *Measurement and Control Technology*, 2014, 33(11): 5–7, 13. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8829.2014.11.002.
- [5] 陈乐. 破片测速与数据采集系统关键技术研究 [D]: 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [6] 项续章, 刘雁安. 战斗部破片通靶测速法 [J]. *兵工学报*, 1990(3): 64–69.
XIANG Xuzhang, LIU Yanan. Velocity measurement of warhead fragment by through target [J]. *Acta Armamentarii*, 1990(3): 64–69.
- [7] YIN G, ZHAO H, FENG Q, et al. Velocity measurement of warhead fragments of parallel net target [C] // 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics (ICEOE). IEEE, 2011, 4: V4-26-V4-28.
- [8] 李良威, 娄国伟. 高速摄影法测量弹丸的破片速度 [J]. *高速摄影与光子学*, 1991, 20(4): 438–442.
LI Liangwei, LOU Guowei. The measurement of projectile fragments' velocity by high speed photograph [J]. *High Speed Photography and Photonics*, 1991, 20(4): 438–442.
- [9] 刘华宁, 郑宇, 李文彬, 等. 基于高速摄影技术的速度测量方法 [J]. *兵工自动化*, 2014, 33(11): 71–74. DOI: 10.7690/bgzd.2014.11.021.
LIU Huaning, ZHENG Yu, LI Wen-bin, et al. Velocity measurement method of projectiles based on high-speed photography technology [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2014, 33(11): 71–74. DOI: 10.7690/bgzd.2014.11.021.
- [10] 陈诚. 基于双目视觉的运动目标跟踪算法研究与应用 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [11] GENOVESE K, CASALETTO L, RAYAS J A, et al. Stereo-digital image correlation (DIC) measurements with a single camera using a biprism [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(3): 278–285. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2012.10.001.
- [12] 马德颂, 张正友. 计算机视觉: 计算理论与算法基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [13] 刘泽庆, 张玉荣, 赵建新, 等. 靶场静爆试验测速高速相机标定方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016(16): 221–229. DOI: 10.3788/LOP53.111501.
LIU Zeqing, ZHANG Yurong, ZHAO Jianxin, et al. High speed camera calibration for velocity measurement in range static explosion experiment [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016(16): 221–229. DOI: 10.3788/LOP53.111501.
- [14] 张广军. 机器视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [15] 张玉令, 罗兴柏, 马光勇, 等. 弹药破片飞行速度实验研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2011(6): 83–84, 88. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2011.06.024.
ZHANG Yuling, LUO Xingbai, MA Guangyong, et al. Experimental study on flight velocity of ammunition fragments [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011(6): 83–84, 88. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9728.2011.06.024.

A test method of motion parameters of static explosion based on high-speed photography

DU Bojun^{1,2}, LIU Zeqing², WANG Yalin², XU Yong², LI Qianwu³

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology,

Changsha 410073, Hunan, China;

2. Unit 63850 of PLA, Baicheng 137001, Jilin, China;

3. Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, Hebei, China)

Abstract: In order to increase the reliability to obtain fragments' velocities and velocity attenuation coefficients in static explosion experiments, a vision-measurement method based on high-speed photography is proposed in this paper. We use high speed cameras to acquire images and visually solve the fragment trajectory. A kinematic model is then applied to fit fragments' initial velocities and velocity attenuation coefficients. Experimental results show that the test method is valid which can considerably increase the accuracy of the data.

Keywords: high-speed photography; vision measurement; static explosion test; fragment; initial velocity; velocity attenuation coefficient

(责任编辑 王小飞)