

doi: 10.7690/bgzdh.2014.11.021

基于高速摄影技术的速度测量方法

刘华宁, 郑宇, 李文彬, 张庆, 姚文进, 刘桂峰
(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘要: 针对目前测速实验中采用锡箔靶或金属网靶测速时存在效率低、劳动强度大、可靠性较差等缺点, 提出一种更高效可靠的高速摄影速度测试方法。以测试单个某型预制破片的靶前速度为例进行高速摄影测速系统组建, 分析了关键参数设置的理论依据以及处理高速摄影结果得到速度的像素点法和等比例缩放方法, 并将计算结果与锡箔靶方法测得的速度值进行了对比, 相对速度差均小于 5 m/s。实例应用表明: 该方法合理可靠, 显著地提高了测速试验的效率, 能够满足实际需求。

关键词: 测速技术; 高速摄影; 系统组建; 图像处理
中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Velocity Measurement Method of Projectiles Based on High-Speed Photography Technology

Liu Huaning, Zheng Yu, Li Wenbin, Zhang Qing, Yao Wenjin, Liu Guifeng
(National Key Laboratory of Fundamental Science on Smart Ammunition Technology,
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In view of the present experiments using the foil-targets or metal mesh targets to measure velocity have the disadvantages of low efficiency, large labor intensity and poor reliability, a more convenient and reliable method of high-speed photography was proposed to measure a type of prefabricated fragment velocity just before the target. This paper discussed the process of forming high-speed photography velocity test system, also the theoretical foundation of key parameters settings and the process of using the pixel point method and scaling method to deal with the result of high-speed photography were demonstrated, and the results were compared with those measured through the traditional methods, errors are less than 5 m/s. The application example shows that the method is reasonable and reliable, significantly improve the efficiency of the velocity measuring experiments, and meet the actual demand.

Keywords: velocimetry; high-speed photography; system construction; image processing

0 引言

传统的锡箔靶和金属网靶均属于接触型测量装置, 每测量一发必须重新接线或更换锡箔靶并进行试触发, 费时费力, 且受到网靶的疏密及锡箔靶的质量的影响, 启动或终止信号未触发的现象时有发生, 测量的可靠性较低^[1-2]。高速摄影相机是用来获取高速飞行物体每一特定时刻空间图像信息的光学仪器, 最大帧频达到 10^4 fps 量级以上。采用该仪器可实现速度的非接触式测量, 与其他测速方法相比, 具有试验布置方便、测量精度高、可靠性强、可重复使用等优点^[3]。目前, 高速摄影已被广泛应用于各类兵器测试领域中, 如水中气泡运动、子弹、炮弹、火箭等物体的运动速度与运动姿态的测量^[4-7]。

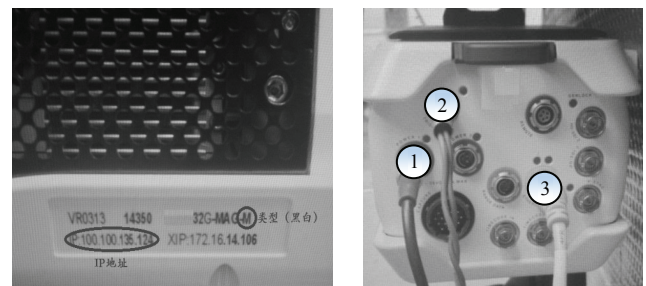
高速摄影在使用过程中, 由于软硬件设置不当, 常出现未捕捉到对象、图像模糊、图像过饱和等现象, 记录的信息无法用于速度计算, 导致测试失败。目前, 缺乏详细的测试方法来为非专业操作人员提

供可行的参考。笔者以单个预制破片的速度测量为例, 详细地阐述了高速摄影测试系统组建和调试过程, 讨论了参数设置的依据和要点, 提出了像素点法和等比例缩放法进行结果处理的方法。

1 高速摄影测试系统组成及功能

1.1 典型产品介绍

常见的典型的高速摄影机主机, 如图 1 所示。



(a) 侧面信息

(b) 背面接口

图 1 高速摄影主机信息与接口

收稿日期: 2014-07-08; 修回日期: 2014-08-12

基金项目: 中国博士后科学基金(20100480686)

作者简介: 刘华宁(1989—), 男, 福建人, 硕士, 从弹药结构设计与相关测试技术研究。

需要关注它的 2 个面，其侧面包含了主机类型（彩色 C 或者黑白 M）以及 IP 地址等，其中 IP 地址关系到摄影机与计算机实现互联的问题，是最重要的一个信息。其背面带有多个标准化接口，常用的接口有 3 个，分别是电源线接口 1、触发线接口 2 以及网线接口 3。

1.2 系统组成与功能

1.2.1 高速摄影机本体组成

高速摄影机本体主要由主机、镜头、云台与三脚架以及电源线、触发线、网线等组成。其中，云台是用于连接主机和三脚架的部件；三脚架用于支撑整个高速摄影机，同时能够实现高速摄影机的左右倾斜与水平旋转、高低升降与俯仰，如图 2(a)所示；图 2(b)所示，电源线 1 为高速摄影机提供直流电源；触发线 2 为高速摄影机开始存储图像提供启动信号；网线 3 用于连接高速摄影机和计算机，并将计算机软件设置信息输入电脑，试验结束后通过网线将临时存储的图像信息下载到计算机。

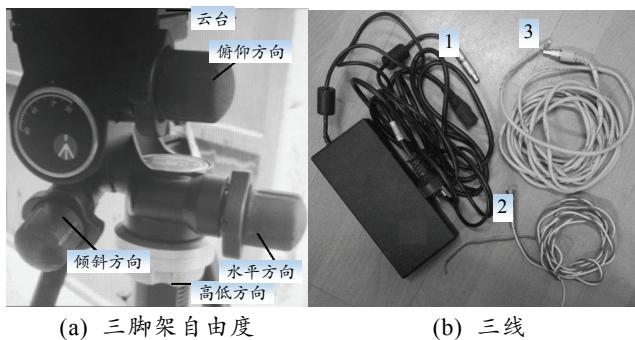


图 2 高速摄影机三脚架与常备接线

1.2.2 控制系统

控制系统主要由计算机和与高速摄影机配套的软件组成。通过高速摄影机控制软件界面 (phantom camera control, PCC) 在计算机上实现相关拍摄参数的设置，同时，待触发和图像信息下载存储、播放等也是在上面实现的。值得注意的是，计算机仅在试验前设置和试验后存储时需要使用，当进行试验时计算机并不需要放置在试验现场。

1.2.3 辅助设备

标杆用于标定距离，为实现图上距离向实际距离的转换提供相应的比例尺；背景布在弹道方向提供简单且与飞行物色彩对比鲜明的背景，便于被测物体观察和后续的计算；防弹玻璃用于防护镜头和主机免受试验过程中崩落物体的损坏，其厚度和数量由现场布置距离、冲击波强度、崩落物的速度等决定。此外，还有线滚子、排插等。

2 高速摄影布置与调试过程

2.1 场地布置

试验前的场地布置是非常重要的环节，关系到能否拍摄到对象以及拍摄结果的质量。图 3 所示为常见的高速摄影测试场地布置的示意图。

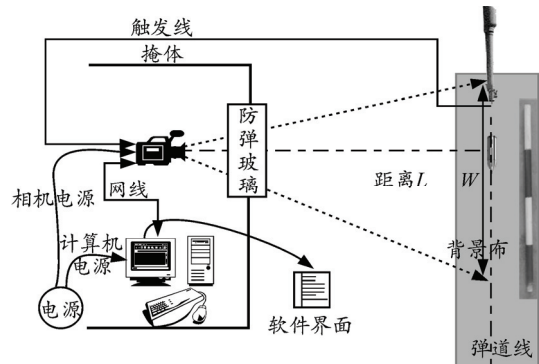


图 3 测试场地布置

先要确定掩体放置的位置与弹道方向之间的距离 L ，它关系到高速摄影机所能拍摄的最大视场。依据是：1) 掩体固定不动，需要对试验时高速摄影机的安全性进行评估，若满足安全要求，则试验在一定的视场和角度情况下进行；2) 可以移动，则在满足高速摄影机安全性的前提下，可以自由地调整距离 L 和方位，以获得最佳的拍摄视场和视角。

掩体位置确定以后，安装好防弹玻璃，在掩体内架设三脚架，使三脚架支开角度适中，姿态协调平稳，云台座高度略低于防弹玻璃的位置。接着将安装好镜头的主机通过云台固定在三脚架上，将电源线插到对应的孔内，接通电源，此时，背面的电源指示灯亮起，侧面的散热风扇开始工作，视为高速摄影机已开机。打开计算机，连接计算机和高速摄影机间的网线。最后，将触发线的 Q9 头一端连接到高速摄影机，开放的一端拉到炮口位置，并在需要关注的弹道方向和区间内架设背景布（通常为白色）。至此，高速摄影机相关的试验布置初步完成。

2.2 高速摄影的调试

2.2.1 局域网组建

对于初次使用的电脑，连好网线以后其实并未实现计算机与高速摄影机之间的真正连接，必须重新配置“本地连接属性”里的“TCP/IPv4”，将其设置成最后一位与高速摄影机 IP 地址不同其余均相同的值，如笔者介绍的高速摄影机 IP：100.100.136.124，将计算机的 IP 地址改为：100.100.136.X， $X \neq 124$ 即可。配置好以后，两者之间的局域网组建完成，通过 PCC 操作界面可以实现高速摄影机的参数设置。

2.2.2 视场与清晰度调节

预先将曝光时间设置到较高值，以便图像有足够的亮度。根据不同的试验所关注的弹道区间的不同，通过调节分辨率 Resolution(宽度值×高度值)来控制拍摄视图的长度和宽度，通常在弹道方向上的数值尽可能高些，从而提高像素点法计算速度时的精度以及观察时的清晰度。通过调节三脚架水平方向的旋钮，使所需要拍摄的弹道区间包含在视图内；调节高度方向旋钮，使弹道线位于视图中心；调节左右倾斜旋钮使得视图摆正，即理论弹道线在视图中水平。

将标杆放置在弹道线上，调节镜头的对焦旋钮进行手动对焦，所关注的焦点是飞行物，因此要对焦到弹道线上的标杆，使其最清晰为止，不必关注周围的事物是否清晰。

2.2.3 帧频与曝光时间调节

帧频的大小决定了飞行物体经过视场的短暂时间内，高速摄影机能够保存图像的有效帧数。帧数的计算公式为：

$$N = f \cdot \frac{w}{v_p} \quad (1)$$

式中： N 为弹道区间内有效帧数， p ； f 为帧频，pps或fps； w 为视图内的弹道区间宽度，m； v_p 为飞行物的速度，m/s；

其中，帧频 f 与图像的大小 A 和高速摄影机的存储速度 C 之间的关系为：

$$f = C / A \quad (2)$$

式中：存储速度 C ，表示每秒的存储容量，Mbit/s，它是高速摄影机的一项性能参数，是固定值；图像大小 A ，单位Mbpp与分辨率 R 相关， $A=R \times \text{位深}/8$ 。

因此，在 w 和 v_p 一定的情况下，帧频 f 越大，计算时的有效帧数就越多。但受到分辨率 R 和仪器的存储速度 C 的制约，帧频 f 不可能无限增大。所以有2种思路：一是分辨率优先原则，若此时 $N \geq 5$ 则便于进行速度计算；二是帧频优先原则，使有效帧数最大化，然后再将分辨率设置到合适的大小。

2.2.4 曝光时间与光圈设置

曝光时间是一项极其重要的参数，直接关系到图像质量，与试验现场的光线强度、拍摄对象特性等有关。曝光时间过长，飞行物体会形成严重的拖影，图像模糊；曝光时间太短，图像亮度低，无法辨别研究对象。拖影长度 L_s 与速度 v_p 、曝光时间 T_E 之间的关系：

$$L_s = v_p \cdot T_E \quad (3)$$

式(3)表明对于高速飞行物，曝光时间需要尽可能减小，从而使拖影的大小远小于飞行物自身的尺寸大小，不影响计算分析。

当拍摄中间弹道的过程时，由于炮口火焰的影响，若使用大光圈且曝光时间太长，极易照成图像的过饱和，导致视图发白，看不清飞行弹丸，如图4(a)所示，反之则能清晰地看见运动在跑口火焰之前的飞行弹丸，如图4(b)所示。

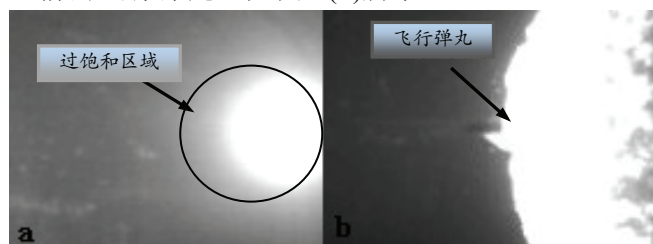


图 4 炮口附近图像过饱和的现象

对于不含有强光的拍摄过程，在拖影满足要求的前提下，曝光时间可以适当调高。同时，尽量采用小的光圈来增大景深，提高拍摄质量，以软件操作界面的预览窗口内图形清晰，亮度充足为准；当拍摄过程带有强光时，可先在大光圈和曝光时间较长的条件下进行之前的调试工作，最后将光圈和曝光时间尽可能调小，直至恰好能看清预览窗口中的图像。此时，图像亮度很低，但试验时的强光足以弥补亮度的不足，且不容易造成图像过饱和。值得注意的是光圈的大小和数值 F 是相反的，数值 F 越大表示光圈越小。

此外，还可以通过设置二次曝光时间 EDR 来避免过饱和现象，即外界光强过高时，不以原有曝光时间为准，而是以二次曝光时间为准，EDR 一般取原曝光时间的 1/3。

2.2.5 触发方式与类型

从触发线的角度，常见的启动信号的触发方式有：手动通/断触发；炮口线断触发；爆炸电离通触发等。小型试验时，若人员可以留在试验场地附近，或者试验装置不方便接线时，则可用手动触发方式；大型试验，危险程度较高，试验过程中人员不能停留在现场时，则多采用炮口断触发方式。

从高速摄影机保存数据的角度，触发的类型通常有：前触发、后触发和中间触发方式。前触发也称为同步触发。高速摄影相机从启动信号开始，保存的是之后所能保存的最长时间 Δt 内发生的试验现象。如炮口断触发后，保存下来的是弹丸出炮口之后的过程。后触发时，高速摄影相机从启动信号

开始,保存的是往前计算 Δt 时间内发生的试验现象,通常手动触发时采用后触发的存储方式。后触发情况下启动信号开始时刻,飞行物必须已经进入预定的拍摄视场并完成整个作用过程,则触发是有效的。中间触发时,高速摄影相机从启动信号开始,保存的是往前计算 Δt_1 时间内发生的试验现象和往后计算 Δt_2 时间内的试验现象,两者之和为最大储存时间 Δt 。

2.2.6 标定与试触发

标定过程指的是在理论弹道线上放置足够长的已知长度的标杆,然后手动触发高速摄影拍摄并保存一张标杆的静止图像。通过标杆的图上距离和实际长度便可以得到转换的比例尺,为计算飞行距离提供参考。标定工作结束后,高速摄影机将不能再调节方位、焦距等,只能调整曝光时间和光圈的大小,来满足最终测试时的环境状况。

在触发方式和类型选定之后,通过断开或接通触发线来测试高速摄影机触发是否正常。若触发正常,则选中待触发按钮,使仪器处于待触发状态,至此整个调试过程完毕。

3 对比试验

3.1 高速摄影结果处理

1) 像素点法:

该方法在 PCC 软件上完成,取 t_0 时刻图像中破片的位置为初始位置 l_0 , t_1 时刻图像中破片的位置为终止位置 l_1 。由介于 l_0 和 l_1 之间标杆的标定图像,通过“Calibrate”得到图像上单位长度与像素点之间的比例尺 S_p , m/pix。然后计算出 l_0 和 l_1 之间像素点的数量 n , 乘上比例尺便可以得到破片飞行的实际距离 Δl , 除以时间间隔 (t_1-t_0) , 可以计算出破片飞行的平均速度 v_{p2} , 计算公式如下:

$$v_{p2} = \frac{S_p \cdot n}{t_1 - t_0} \quad (4)$$

2) 等比例缩放法:

通过将相同尺寸的标定图像、破片初始位置图像以及选定的终止位置图像黏贴到 AutoCad 中,然后利用软件的“缩放”功能,以标杆的图上距离为参考距离,输入标杆的实际距离后将图像整体缩放至实际尺寸。最后,可测量出破片初始位置与终止位置间的距离 Δl , 除以间隔时间可计算出速度 v_{p2} 。

3.2 结果对比分析

为了验证高速摄影测速的可行性,以测量单个预制破片的靶前速度为例,拍摄参数: $T_E=2 \mu s$;

$F=1.8$; $f=2\ 000$ pps; 分辨率: $1\ 920 \times 800$; 采用手动后触发。将高速摄影测试结果与锡箔靶测速结果进行了对比。如图 5 所示,分别是高速摄影和锡箔靶测试的布置情况。



(a) 高速摄影测速 (b) 锡箔靶测速

图 5 测试场地布置

试验采用 14.5 mm 的枪发射 $8.5\text{ mm} \times 8.5\text{ mm} \times 6.5\text{ mm}$ 方形破片,发射装药量能使破片达到的理论初速介于 $520 \sim 540\text{ m/s}$ 之间。实验结果见表 1。

表 1 试验结果对比

破片 编号	测试的速度			相对速度差 Δv_p	
	锡箔靶 v_{p1}	高速摄影 v_{p2}			
1	517.8	515.2	513.7	2.6	4.1
2	536.7	538.6	540.6	1.9	3.9

v_{p2} 的第一、二列分别是像素点法和等比例缩放法的计算结果,2 种方法的计算结果吻合,与锡箔靶测速得到的结果也吻合较好,相对测速差值小于 5 m/s 。

4 结束语

结果表明:高速摄影技术能够可靠地应用于单个破片、弹丸等高速飞行物体的速度测量,且该方法显著提高了试验的效率,并实现了试验器材的可重复利用。笔者提出了关键参数的设置依据以及速度计算的像素点法、等比例缩放法,方法简单、实用。这一通用的高速摄影测速方法对于提高非专业人员的试验水平具有一定的借鉴和推广意义,今后,笔者还将进一步探讨更高帧频的高速摄影机用于弹药壳体膨胀、爆轰传播速度测试的技术和方法。

参考文献:

[1] 任远华, 李克明. 一种测试杀伤破片平均飞散速度的新型仪器[J]. 兵工自动化, 1982, 1(1): 82-88.
 [2] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993: 87-88.
 [3] 郭泽成, 陈明, 张飞猛. 半约束期弹丸膛内运动姿态测试方法[J]. 兵工自动化, 2013, 32(3): 72-75.
 [4] 张建生, 吕青, 孙传东, 等. 高速摄影技术对水中气泡运动规律的研究[J]. 光子学报, 2000, 29(10): 952-955.
 [5] 畅里华. 电炮加载下靶板的高速摄影技术研究[J]. 应用光学, 2008, 29(1): 27-30.
 [6] 唐孝容, 高宁, 郝建中, 等. 高速摄影技术在常规战斗部实验中的应用[J]. 弹箭与制导, 2010, 30(3): 105-107.
 [7] 汪斌, 张光升, 高宁, 等. 高速摄影技术在水下爆炸气泡脉动研究中的应用[J]. 含能材料, 2010, 18(1): 102-106.