

文章编号: 1001-1455(2009)01-0090-05

APX-RS 相机在高速摄影中的应用*

赵继波, 文尚刚, 谭多望, 张光升, 傅 华, 李 涛

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 通过分析 APX-RS 数字化相机的性能特点及主要技术指标, 设计了针对高速运动中高速段、中速段及低速段的运动物体飞行姿态拍摄的动态实验, 得到了飞行物体清晰的拍摄图像和准确的运动速度。结果表明, 该相机能较好地记录 $4Ma$ 以内的高速运动物体的飞行过程。

关键词: 爆炸力学; 飞行过程; 动态实验; 数字化相机

中图分类号: O389; TB853.1

国标学科代码: 130 · 3599

文献标志码: A

1 引 言

拍摄高速流逝过程是爆炸、撞击实验研究中最常用的诊断方法之一。高速试验件在着靶前百余微秒的速度和姿态, 着靶后的变形膨胀、破坏和反应产物的飞散等的时间空间信息, 最终要依靠光学设备捕获, 并据此对弹击靶时所产生的力学、物理、化学过程进行直观的综合分析。传统的机械式转镜式高速相机在爆炸实验中的应用已相当广泛, 摄影频率可达到上千万幅频^[1-2], 但相对记录时间较短, 不能给出试验件在较长距离上的运行姿态和击靶过程。利用 Speed Cam VISARIO 数字化相机可成功拍摄到子弹飞行过程及炸药爆炸过程^[3], 但随着研究项目的深入和研究领域的拓展, 该相机的摄影频率、曝光时间和感光度稍显不足。APX-RS 高速数字相机系统在记录时间、摄影频率和曝光时间等方面具有较强的优越性, 适用于在碰撞过程中所产生的产物形成和飞散等过程的研究, 目前被广泛地应用于各种实验中。如常规战斗部的穿甲、弹道及飞行姿态研究中, 就大量使用了 APX-RS 相机, 并取得了预期的效果^[4]。

2 主要技术指标及特点

2.1 技术指标

APX-RS 高速数字相机是通过高速的 CMOS 传感器对运动物体进行记录, 转化为数据存储存在相机本身的存储器里, 然后以人眼能分辨的速度进行回放, 观察高速运动中肉眼观测不到的情况。其主机外观如图 1 所示。

APX-RS 数字化高速系统主要由主机、控制计算机、同步器、电源、控制器等部件组成。其主要的技术特征是采用了高感光灵敏度、高分辨率传感器技术, 具有“重点关注区域”的功能^[5]。

2.2 性能分析

在高速摄影中, 最重要的环节就是减少高速物体的运动模糊, 使拍摄到的图像更接近于物体的真实形状, 这对于后续的分析或运算有重要作用。减少运动模糊的关键是使运动物体在相邻两幅图像的间距时间内运动的距离尽量接近其真实尺寸, 这需要综合考虑物体的运动速度、相机设置的幅频、快门曝光时间等因素。

APX-RS 相机的技术指标表明, 其最常用的幅频范围应设定在 $1\ 000 \sim 20\ 000\ s^{-1}$ 之间。其中 $5\ 000\ s^{-1}$ 的幅频是相机的一个重要参数, 因为在此条件下既可以保证高分辨率, 又可以达到较高的拍摄速度。此时每相邻两幅图像的幅间距时间为 $200\ \mu s$, 对于亚音速的低速范围 ($< 340\ m/s$), 相机可以给出试验件加载区间幅间距小于 $68\ mm$ 范围内的连续运动姿态。如果物体的运行速度介于音速和 3 倍音速之间, 可将相机幅频设置为 $10\ 000\ s^{-1}$ 左右, 此时每相邻两幅图像的幅间距时间为 $100\ \mu s$, 相机可以给出加载区间幅间距为 $34 \sim 100\ mm$ 范围内的连续运动姿态。如物体的运行速度小于 4.5 倍音速, 可将相机幅频设置为 $20\ 000\ s^{-1}$ 左右。此时每相邻两幅图像的幅间距时间为 $50\ \mu s$, 相机可以给出加载区间



图 1 APX-RS 主机外观

Fig. 1 Appearance of APX-RS

* 收稿日期: 2007-07-30; 修回日期: 2008-01-28

作者简介: 赵继波(1977—), 男, 助理研究员。

幅间距为 50~75 mm 范围内的连续运动姿态。因此,在常用的幅频范围内,高速物体连续运动姿态的幅间距最大不超过 100 mm。如果试验件的尺寸较大,像移不会对整体测试结果有直接的影响,幅频较低时即可得到分辨率较高的图像。通常低速运动物体的尺寸较大,根据实验要求可以较准确地提供对应测试区间内加载试验件的速度和加速度数据;如果试验件的尺寸较小,可以对相机的曝光时间加以限制,通过设置相机的电子快门来消除像移。APX-RS 相机所提供的最快快门为 1 μs ,在幅频设置不高于 20 000 s^{-1} 时,合理调节 APX-RS 相机的像素增益,可在无特殊外照明的条件下得到清晰的实验结果。

在 APX-RS 相机的实时影像中,可以沿试验件轨迹方向上直接设置一个长方形待测区域,通过选择合适的幅频/分辨率组合,对感兴趣的部分进行重点拍摄。在选择了分辨率组合功能的条件下,APX-RS 的幅频设置为 10 000 s^{-1} 时其水平方向分辨率可达到 1 024 像素(这往往也是试验件轨迹的主要方向),而垂直方向分辨率不低于 256 像素,在特定针对性拍摄中具有较强的机动灵活性。APX-RS 相机系统能与其他光、电测试系统组成联合测试系统,在常用幅频条件下有 2~6 s 的时间记录范围,相对于撞击试验件运行时间较长的特点,能够方便地观察其击靶前的飞行姿态、在击靶后的侵彻过程以及飞散情况,并且有较高的拍摄速度和分辨率,可以提供清晰的试验件飞行姿态图像和相关数据。

3 实验验证

3.1 实验装置及布局

根据 2.2 节的分析,将物体高速运动按 340、1 000 和 1 500 m/s 的界限分别定义为低速段、中速段和高速段。针对高、中、低三种不同的加载速度,选用了不同质量、不同速度的目标拍摄物。高速段运动物体为带三瓣可分离托块的方形弹珠,利用航炮加载,出口速度为约 1 400 m/s,从正面(利用反光镜)和侧面两个方向观察弹珠与弹托的分离过程;中速段运动物体为步枪子弹,由 56 式半自动步枪发射,出口速度为 700~800 m/s,主要观察在相机采用不同幅频和电子快门条件下子弹射击苹果的状态;低速段运动物体为约 2 kg 的大质量弹体,利用航炮发射,出口速度不高于 100 m/s,主要观

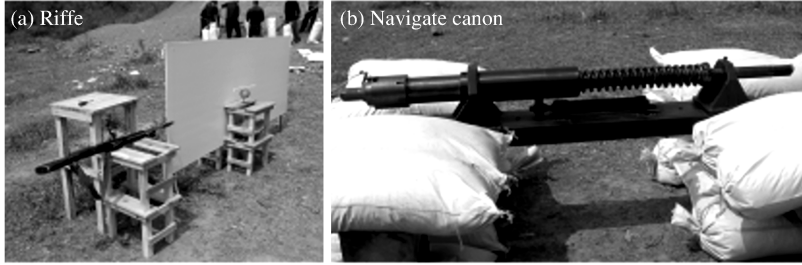


图 2 加载装置
Fig. 2 Loading set

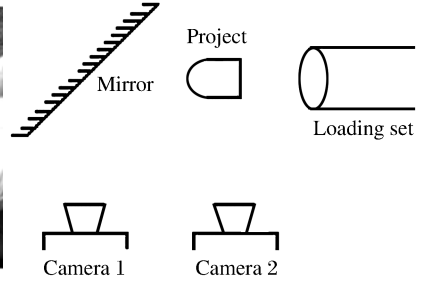


图 3 典型实验布局
Fig. 3 Typical test layout

察其出炮膛后的飞行姿态。相机均布置在试验件运动轨迹的垂直线上,相机距离拍摄目标为约 5 m,标尺刻度为 0.09 m。加载装置和实验布局见图 2~3,在图 3 中相机 1 拍摄高速弹珠的正面飞行过程,相机 2 拍摄弹珠的侧面飞行过程。试验件参数及相机设置参数见表 1, f 为幅频, τ 为曝光时间。其中发射体的速度为理论估算值。

表 1 试验件和相机的参数

Table 1 Parameters of the object and the camera

发射物	试验件			相机	
	m/kg	l/mm	$v/(\text{m}/\text{s})$	f/s^{-1}	$\tau/\mu\text{s}$
弹体	2	280	100	5 000	20
				20 000	5
子弹			730	20 000	2
				5 000	10
弹珠	0.027	14	1 400	20 000	2

3.2 实验结果及分析

3.2.1 高速段运动物体拍摄结果

弹珠出炮口的运动状态和飞行姿态见图 4~5 所示,时间由相机触发时刻开始计算。

3.2.2 中速段运动物体拍摄结果

拍摄子弹的飞行过程,采用不同的幅频和曝光时间,验证电子快门削弱物体运动动态模糊和在场外使用该相机的照明条件。实验结果见图 6 所示。

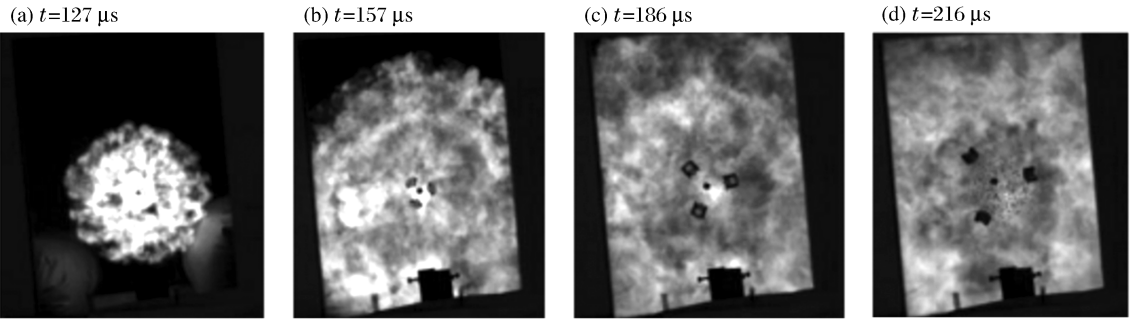


图 4 弹珠正面摄影

Fig. 4 Photograph of the hoodle front face

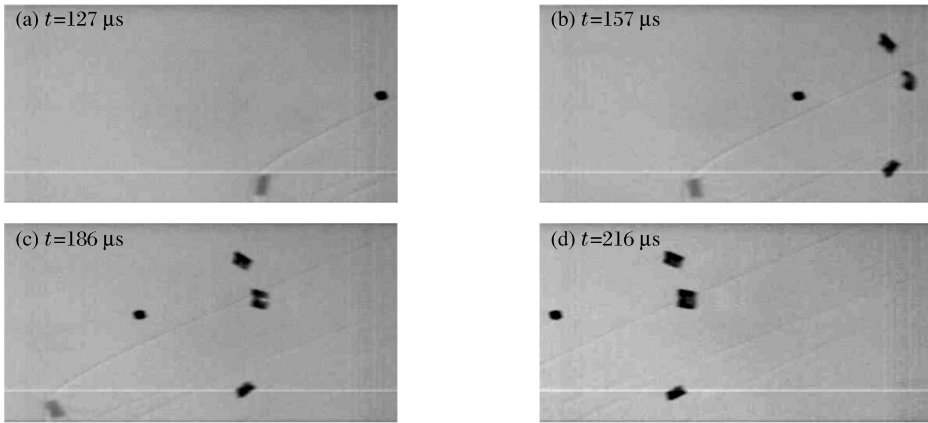


图 5 弹珠侧面摄影

Fig. 5 Photograph of the hoodle side face

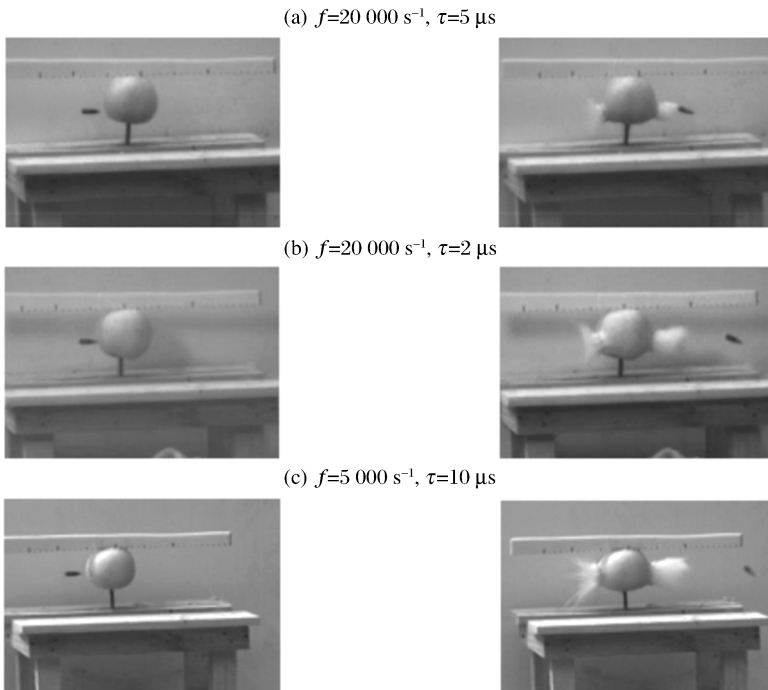


图 6 子弹飞行过程

Fig. 6 Aviation course of the bullet

3.2.3 低速段运动物体拍摄结果

主要记录弹体出膛后的飞行姿态。实验结果见图 7 所示,时间由相机触发时刻开始计算。

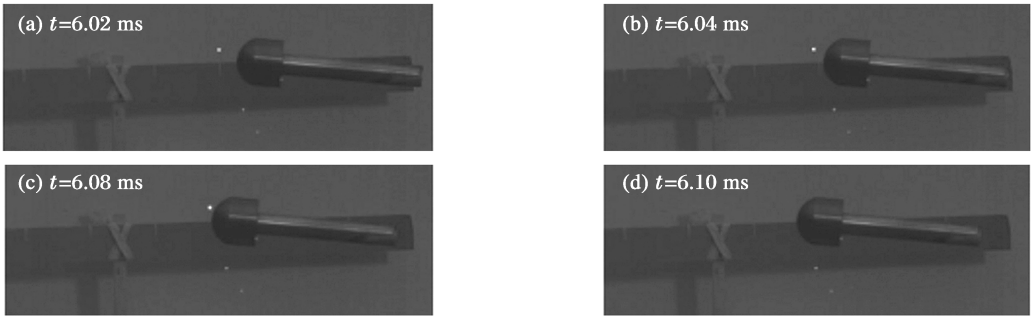


图 7 弹体飞行姿态

Fig. 7 Aviation attitude of the warhead

3.2.4 速度计算

实验拍摄到的图像均能反映拍摄物体的真实形状,对于速度分析运算有重要作用。从拍摄图像中可以看出,图 4 的影像能很清晰地分辨出炮口焰的扩散、弹珠及其弹托的分离过程、弹珠的飞行姿态;从图 5 的结果可以较容易地分辨出弹珠前面的冲击波;图 6 中未出现子弹的动态模糊问题;图 7 中可以清晰地观察弹体的姿态及少量高温火药渣的飞散。实验结果说明,本款高速相机可很好地记录高速运动物体的飞行过程和姿态,根据图像分析软件和放大比可计算拍摄物的速度。

测速时选用一定的幅频来拍摄,如果测量用的基准长度(即拍摄目标长)为 L_0 ,基准长度所占的像素数为 N_0 ,则每个像素表示的长度即放大比为

$$\beta = \frac{L_0}{N_0} \tag{1}$$

假定在 Δt 时间间隔内,物体运动了 Δx ,则运动距离所占的像素为

$$N = \frac{\Delta x}{L_0} N_0 \tag{2}$$

运动速度的表达式为(用像素数来计算)

$$v = \frac{NL_0}{N_0 \Delta t} \tag{3}$$

在实际测量中,不考虑基准长度的设计误差和 Δx 误差,只考虑在拍摄图像中,判读基准长度和运动距离所占的像素数时的误差对测量结果的影响。

假定判读 N_0 和 N 时,分别产生 ΔN_0 和 ΔN 的误差,则

$$v' = \frac{(N \pm \Delta N)L_0}{(N_0 \pm \Delta N_0)\Delta t} \tag{4}$$

测速误差为

$$\vartheta \approx \left| \frac{\frac{\Delta N_0}{N_0} - \frac{\Delta N}{N}}{1 + \frac{\Delta N_0}{N_0}} \right| \tag{5}$$

幅间隔是用电子元件控制的,可以认为其精确相等,所测量的时间为准确的运动时间,测速的误差来自对运动距离测量的误差。如果是人工判读,考虑 N_0 的测量有 1~4 个像素的误差, N 的测量有 1~3 个像素的误差,由此可以计算出测量误差。如拍摄距离为 5 m,测量时间分别为 0.5 ms 和 50 μ s 时大质量弹丸和小质量弹珠的平均速度,则其测速误差分别为约 0.85% 和 4.4%,测试精度和结果的可信度较高,能满足实验要求。

表 2 是根据拍摄图像计算得到的发射体运动速度,其中 f 表示幅频, β 表示放大比,即每个像素代表物面上的长度。 ΔP 表示目标物飞行过程中隔 10 幅图像运动的像素数, \bar{v} 表示在 10 幅图像内的平均速度, δ 表示与理论估算值的相对误差的绝对值。

从表 2 中的结果可以看出,利用相机记录结果计算得到的运动物体的速度值与理论估算值相差不大。误差基本控制在 3.5% 以内,说明本次实验测量的数据是准确的,APX-RS 相机能用于 4Ma 以下的高速运动物体的记录。

表 2 目标物的光测速度
Table 2 Velocities of objects measured by the camera

发射物	f/s^{-1}	β	ΔP	$\bar{v}/(m/s)$	$\delta/(\%)$
弹体	5 000	0.001 45	126	101.7	1.70
子弹	20 000	0.001 34 ¹⁾	252	752.2	3.04
弹珠	20 000	0.001 75	355	1 380.6	1.39

1)由预先设定的标尺求得。

4 结 语

作为高速流逝过程的重要光学测试手段,APX-RS 相机对于高速碰撞、冲击过程的产生、产物的形成和飞散等全过程研究尤为适用。与传统的等待式转镜分幅相机相结合后,同时运用多种光测系统,将拓宽高速摄影测试系统的测量范围,可应用于常规武器实验研究中。

参考文献:

- [1] 谭显祥. 光学高速摄影测试技术[M]. 北京:科学出版社,1992:1-5.
- [2] 李剑,畅里华,谭显祥. FJZ-1000 型超高速转镜分幅相机及其应用[J]. 爆炸与冲击,2005,25(6):574-576.
LI Jian, CHANG Li-hua, TAN Xian-xiang. Model 1000 ultra-high speed rotating mirror framing camera and applications[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(6):574-576.
- [3] 肖正飞,李剑,刘宁文,等. Speed Cam VISARIO 高速数字相机在爆炸试验中的应用[J]. 爆轰波与冲击波,2005(4):155-158.
- [4] Adamas L. White sands targets camera upgrades[EB/OL]. 2008-06-08[2009-02-24]. <http://www.advancedimagingpro.com/publication/bio.jsp?id=20&publd=3>.
- [5] Photron. FASTCAM-APX RS hardware manual[Z]. San Diego, USA: Photron, 2004.

Application of APX-RS digital camera to high-speed photography

ZHAO Ji-bo*, WEN Shang-gang, TAN Duo-wang,
ZHANG Guang-sheng, FU Hua, LI Tao

(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: By analyzing the performances and primary technical parameters of the APX-RS digital camera, the dynamic test was designed to shoot the aviation attitudes of the moving object in the three phases of high, medium, low speeds and to obtain its clear images and accurate motion velocities. Experimental results show that this camera can record effectively the aviation course of a high-speed moving object with any velocity less than 4 Mach number. This camera is helpful in the research field of explosion and shock.

Key words: mechanics of explosion; aviation course; dynamic test; APX-RS digital camera

* Corresponding author: ZHAO Ji-bo
Telephone: 86-816-2481143

E-mail address: abcdef_z@163.com