

TP-5型半自动胶片判读仪 及其在爆轰测试中的应用

韩立石

(中物院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室 成都523信箱 610003)

摘要 TP-5型半自动胶片判读仪主要用于判读高速电影摄影仪和高速转镜相机的测试结果和数据处理。文中阐述了这种仪器对后者判读的原理、软件功能及判读程序,并列出数据处理的典型结果。根据对多个爆炸事件同时性、爆炸波波形差、炸药爆速以及分幅图形判读和数据处理的实例表明,结果是可靠的,判读程序是合理和适用的。

关键词 胶片分析仪 高速转镜相机 爆轰测试

1 引言

几十年来,由高速转镜相机获取的冲击波物理与爆轰物理的实验测试数据大多用大型工具显微镜判读,然后进行人工处理,其操作过程长,效率低,容易引入人为误差,有必要进行改进、更新。

国内曾生产过KD-9型判读数据处理系统,但要求判读基准与判读信号在同一视场(19mm×30mm)内;后来98J型底片测量仪虽然能对高速相机胶片数据进行判读,但与前者一样,都不具备数据处理功能;再如GP-911B型及GP-912型自动通用胶片判读仪,虽已具备采集数据、处理数据的半自动、自动化功能,但只适用于经纬仪胶片、电影胶片。

现在,国外使用的或国内引进的一些先进设备,固然也不乏实时进行数据采集和处理的全自动系统,但大都只适用于示波器或变相管相机等。对于国内已大量配置的直接获取可见光信息的高速转镜相机,很难相应移植或进行适用性改造。

鉴于高速转镜相机造价低廉,使用与维修简便,测试图象清晰,信息量大,可满足大多数冲击波物理与爆轰物理研究课题的测试精度和量程要求,预见在相当长时间内还将继续发挥其作用。为此,我们决定,先对其陈旧的胶片判读和数据处理方式进行技术改造,而提出半自动胶片判读仪的研制。这里说的半自动,主要指胶片放置、对准、测点选择等还都要人工辅助,这虽然还不够先进,但可大大降低研制成本,况且研制能完全代替人脑控制的智能视觉系统,难度还很大,是一项很艰巨的研究任务。

TP-5型判读仪的专用判读头、判读胶片的类型、判读的程序及数据处理的数学模型、结果打印和绘制波形图以及二维变化轮廓图等技术要求由我所提出,整套系统由汉中华航光学仪器厂研制生产。

2 判读仪的基本结构及其主要性能指标

判读仪的主机如图1所示。系统由胶片测量系统(又称主机)和IBM-PC/XT微机系统组成。主机包括投影头、投影测量箱;IBM-PC/XT微机系统由接口、主机、显示器、宽行打印机、SPL-450绘图仪及软件包组成。

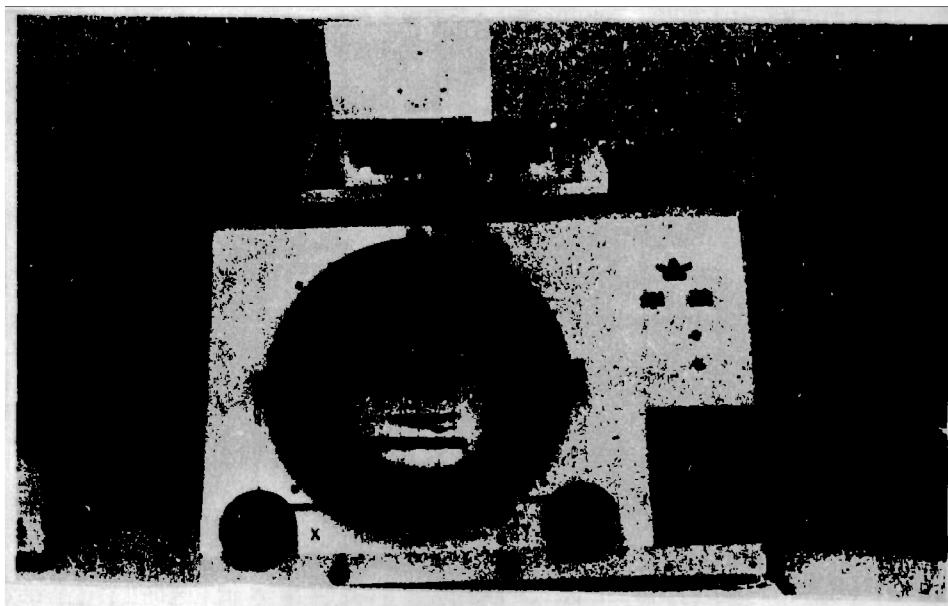


图1 TP-5型判读仪

Fig. 1 Model TP-5 interpretoscope

专用胶片投影头的载片台就象大型工具显微镜的测量台,其不同点是配备一块用于判读胶片上基准移动量的分划板(每隔10mm有1条刻线),此分划板只作前后、左右移动,不作转动,分划线与投影屏上的十字游丝严格平行和垂直。

采样原理 投影头有3个,分别为16mm、35mm和专用胶片的投影头,它将胶片投影放大成像到测量箱的影屏上,两根互相垂直的测丝沿水平、竖直方向移动,带动两个13位光电编码器,当测丝交叉点对准目标时,给一读令,即可进行胶片信息的模-数转换,得到目标位移量的坐标值。码盘的最小测量值为0.004mm,比工具显微镜摇柄分度值0.01mm高,比万能工具显微镜的0.001mm低。

处理功能 采用PC/XT机,有打印、显示、绘图三种输出形式。16mm、35mm胶片投影头配有各种运动分析软件:拍摄参数选择;一般运动分析,可求20多种物理几何参数;系统对测量误差有三种数据平滑方式(加权平滑、五点三次局部平滑、大范围平滑);系统有四种求速度、加速度计算方法(差商法、局部平滑求导法,自然样条函数曲线拟合法、最小二乘曲线拟合法)。专用胶片投影头配有四种类型分析软件:多个爆炸事件的同时性(含台阶法测速)、爆轰波波阵面形状、炸药爆速(含匀速、变速)和分幅二维图形(含对称、不对称变化)的数据采集及其处理;绘图仪能绘出波阵面形状及二维不对称变化轮廓图;对于变速爆速及非对称二维图形,设有三种数据平滑及四种求速度计算方法(这是移用16mm、35mm胶片的分析软件)。

技术指标 投影屏直径 280mm; 坐标示值均方差 $< \pm 0.02\text{mm}$; 角度示值误差 $< \pm 6'$; 输片定位精度 $\leq \pm 0.015\text{mm}$; 输片方式为手动和自动连续输片, 1~20 幅/秒任选定格输片, 并可逆; 输片速度 1~24 幅/秒任选; 投影屏放大率——16mm 胶片为 16 倍, 35mm 和专用胶片的为 8 倍; 片盘容量——16mm 胶片为 60m, 35mm 胶片为 120m; 光源 24V、150W 卤钨灯; 专用投影头的量程范围—— x 方向为 150mm, y 方向为 50mm, 其载片台的转动范围 $\pm 15^\circ$, 物方视场 $19\text{mm} \times 24\text{mm}$ 。

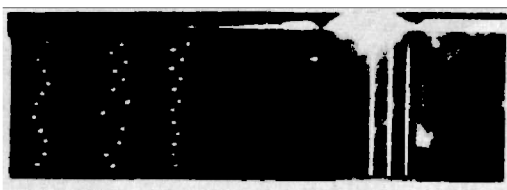
3 判读程序及软件原程序的特点

为了确保四种胶片类型的数据采集及处理的正确性, 我们根据每种胶片的特点, 提出采集数据的程序及处理数据用的数学模型, 然后编制出计算机软件。

不论对那一种胶片, 在判读程序中有两点是共同的: 首先要在显示器上显示出系统比例尺, 即单位系统长度值所代表的胶片长度值; 其次是胶片定位, 把胶片置于载片台上, 压片板压住后, 边观察投影屏上的狭缝像或基准线边旋转底片盘, 就可保证狭缝像或基准线与游丝严格重合。对于本节 3.1~3.3 三种胶片还要判读基准的移动量, 如果判读基准与所判读的信号之间相距在 150mm 以内, 那么只要左右移动(加减块规或旋转手轮)胶片盘就可使所判读的信号进入视场, 此时判读基准已远离视场, 所以必须判读基准的横向移动量, 该值相当于工具显微镜加块规值或手轮旋转值。分两步进行: 先将基准移入视场, 输入基准右方一个标尺刻度值 A (即载片台上分刻板刻度值), 并读出 A 值; 再把信号移入视场后, 又输入一次点信号右边另一个标尺的刻度值 B , 并读出 B 值, 这时已把基准移动量存入计算机中。

3.1 多个爆炸事件的同时性

尽管用同一个起爆系统、同一台相机狭缝扫描摄影, 但由于事件结构的差异, 会在相机胶片上分辨出各事件在时-空上的差异(通常高速相机的时间分辨率为 10^{-8}s , 空间分辨率为 $20 \mu\text{m}$)。图 2 是判读同时性用的胶片图。



1. 信号像 2. 起始信号 3. 狭缝像

图 2 判读同时性用的胶片

Fig. 2 Film for interpret synchronization

1. Signal image; 2. Initial signal; 3. Slit image

根据胶片上的数据, 求解 n 个点信号的同时差 t 。其数学模型

$$t = \Delta t \pm t_0 \quad (1)$$

式中 Δt 为时间极差, 即

$$\Delta t = (x_{i \max} - x_{i \min}) / V_s \quad (2)$$

其中: $x_{i \max}$ 、 $x_{i \min}$ 分别为某信号距离判读基准的最大、最小值, 单位为 10^{-3}m ; V_s 为相机狭缝像在胶片面上的扫描速度, 单位为 km/s , 由人机对话输入计算机; 时间 t 的单位为 10^{-8}s , t_0 为时间均方差, 即

$$t_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_0 - x_i)^2 / (n-1) / V_s} \quad (3)$$

式中: x_i 为 i 点信号距离判读基准的值; x_0 为 n 个点信号距离判读基准的长度值之平均值,

x_1, x_0 的单位为 10^{-3}m 即

$$x_0 = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n \quad (4)$$

判读程序:人机对话输入 V_0 、狭缝像数、狭缝像间距、选定以起始信号还是以狭缝像为判读基准。

判读基准移动量完成后,即可使十字游丝与判读信号前沿重合,每重合一个信号,即读取一个坐标值。每列狭缝可包含 100 个点信号。按下计算机键盘的 Q 键即可进行下一条狭缝的点信号判读。

如果同一视场内的信号已判读完,还有视场外的信号未判读,例如第四条狭缝的信号,那么只要把视场外信号移入视场后,再一次输入点信号右方一标尺的刻度值,就可重复以上判读程序。

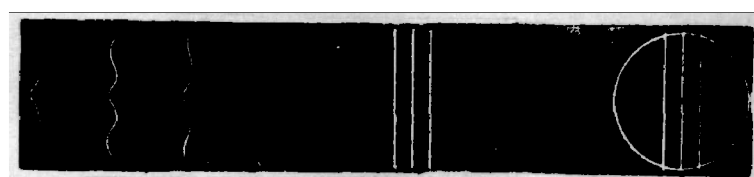
为了把每条狭缝的点信号归化为第 1 狭缝(起始信号规定排列在该狭缝上),在计算中设有减去狭缝像间距的功能,测量第 n 条狭缝的点信号时减去 $(n-1)b$,其中 b 为狭缝像间距,单位为 mm。

接着就把采集的数据组织成数据文件存盘,进行数据处理,并打印出式(1)~(4)中的每个参数及 t 值。

3.2 爆轰波波阵面形状

当炸药被引爆后,由于传爆机理及装药结构的差异,爆轰波传递到炸药表面时引起时空差异,运用高时空分辨率的狭缝扫描相机就能把差异揭示出来。

图 3 是判读爆轰波波阵面形状用的胶片示意图。该胶片中每条狭缝所切取的波形是独立的,不必象同时性胶片中要归化为第 1 条狭缝,所以以狭缝像为判读基准时,计算机中不设置减去狭缝像间距的功能。由于已用人机对话输入狭缝数、狭缝像间距,所以判读时各以自己对应的狭缝像为判读基准。然而以起始信号为基准时,由于起始信号位于第 1 条狭缝,所以在判读第 n 条波形时,就没有减去狭缝像间距 $(n-1)b$ 的功能。



1. 波形像(有中点) 2. 起始信号 3. 狭缝像 4. 静态像(有中点)

图 3 判读爆轰波波阵面形状用的胶片示意图

Fig. 3 Film for interpreting detonation waveform

1. Waveform image (with midpoint); 2. Initial signal; 3. Slit image; 4. Static image (with midpoint)

由于被摄物相对于相机像面的不平行度影响,会引起物像比失真,为了尽量减小这种失真,把物像分为上、下两部分,在物体上人为地加有中点标志,所以物像比有上、下之分,而物的长度用人机对话输入。

由于相机扫描方向与狭缝的不垂直度影响,会使物像中点有偏移量,判读时,在把波形移入判读仪视场后,只要预先输入偏移量,系统中就可自动查找波形中点,即十字游丝沿波形上、下移动,若系统显示读第 1 条波形的上半部,说明中点已找到。

判读完上半部波形后按 Q 键,系统即开始读下半部波形,上、下波形共判读 100 个点。该程序中也设有解决视场外波形判读的功能。

根据爆轰波形测试的要求是求出波形上某点离开起始信号或狭缝像的时间值及该点的物方纵坐标值,并画出其实际波形图。所以数学模型为:

$$t_i = x_i / V_s, (10^{-6}\text{s}) \quad (5)$$

式中 x_i 为波形上某点离开判读基准的长度值,单位为 10^{-3}m 。波形极差:

$$\Delta x_i = (x_{i\max} - x_{i\min}) / V_s, (10^{-6}\text{s}) \quad (6)$$

波形上某点的纵坐标长度值 l_{i1}, l_{i2}

$$l_{i1} = y_{i1} \times \beta_1 \quad l_{i2} = y_{i2} \times \beta_2 \quad (7)$$

式中: y_{i1}, y_{i2} 分别为上、下部波形上某点离开横轴的长度值(10^{-3}m); β_1, β_2 分别为上、下部的物像比。

当处理数据、打印数据结束后,即用绘图仪绘出实际波形图。由于 t 轴、 l 轴所取的坐标比例可能不合适,所以系统中有一个校正坐标比例的功能。

3.3 炸药爆速

图 4 是用高速狭缝扫描相机获得的装药表面爆轰波传播的轨迹,在胶片上就可判读出轨迹上某一点切线的斜率,可按下式求出炸药中爆轰传播的速度或瞬时爆速

$$D_s = V_s \beta \text{tg}\alpha, (\text{km/s}) \quad (8)$$

式中: β 为物像比; $\text{tg}\alpha$ 是波形上某点的切线的斜率。对于匀速爆轰, $\text{tg}\alpha$ 由最小二乘法得到

$$\text{tg}\alpha = (n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i) / [n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \quad (9)$$

式中: x_i, y_i 是波形上某点的坐标值,由判读仪沿着波形前沿逐点判读。当判读完物像比后即可进行此项判读,判读是从爆轰终点开始到始点结束。该程序中也增设了视场外波形的判读功能。



图 4 爆轰轨迹

Fig. 4 Detonation wave locus

当计算机把数据处理完后即打印出爆速、斜率及其角度,但目前未设置绘制爆轰波传播轨迹的功能。

3.4 分幅图形

由高速分幅相机拍摄的物体二维变化过程,往往需要知道某一个断面(对称变化)或某一个方位(不对称变化)的变化量、变化速度及加速度,如果用工具显微镜去判读,由于每判一个画幅,即要重新确定与前一幅相同的判读基准及判读断面或方位,所以只判读部分数据。而用 TP-5 型判读,就可实现全方位的判读。

当判读完物像比后,引入幅间隔时间,确定判读画幅的行数及画幅数,并规定每行画

幅数相同,每幅的断面数或方位数也一并输入。

先判读基准点坐标,以每幅中网格线交点像为基准点(各画幅的基准点必同)。用投影屏上一条固定刻线与网格中的某条线重合(各画幅的重合线条均同),再用一条游丝与需判读的断面重合,在以后的判读中此游丝不允许动,保证了每张画幅判读的是同一断面。对于非对称判读,应用投影屏上一条刻线(屏可转动)与所测的方位重合,基准点也应在这条线上,投影屏固定不动(除非是判读另一个方位);当判读下一幅时,基准点仍要与此刻线(或与此平行的其它刻线)重合。并要求每张画幅判读的三个点都在这条刻线上,保证了每张画幅判读的是同一方位。

根据幅间的图形变化量及幅间隔时间可求出变化速度及加速度。对于某一个断面的变化速度,其数学模型:

$$\begin{aligned}
 \text{瞬时速度 } V_i &= (\Delta x_i / \Delta t_i) \beta \text{ 或 } V_i = (\Delta y_i / \Delta t_i) \beta, \quad (\text{km/s}) \\
 \text{平均速度 } \bar{V} &= (\sum \Delta x_i / \sum \Delta t_i) \beta \text{ 或 } \bar{V} = (\sum \Delta y_i / \sum \Delta t_i) \beta, \quad (\text{km/s}) \\
 \text{瞬时加速度 } a_i &= \Delta V_i / \Delta t_i, \quad (\text{km/s}^2) \\
 \text{平均加速度 } \bar{a} &= \sum \Delta V_i / \sum \Delta t_i, \quad (\text{km/s}^2)
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

式中: $\Delta x_i, \Delta y_i$ 分别为相邻两幅间横轴、纵轴方向变化量; Δt_i 为幅间隔时间; ΔV_i 为相邻两幅速度变化量。

4 典型数据处理结果

4.1 多个事件同时性

被判读的胶片如图 2 所示,结果如表 1 和表 2(两种判读仪的数据对比)。

表 1 以狭缝像为判读基准的同时性

Table 1 Synchronization on the basis of slit image

仪器型号	TP-5	JJL-2	相对误差 ^{a)}
$t_e / (\mu\text{s})$	± 1.702593	± 1.702936	0
$\Delta t / (\mu\text{s})$	4.787417	4.798333	0.2%

表 2 以起始信号为判读基准的同时性

Table 2 Synchronization on the basis of initial signal

仪器型号	TP-5	JJL-2	相对误差 ^{a)}
$t_e / (\mu\text{s})$	± 1.698086	± 1.700653	0
$\Delta t / (\mu\text{s})$	4.785813	4.794	0.2%

注:a)表 1、表 2、表 3 和表 4 中的“相对误差”是以 JJL-2 型大型工具显微镜数据为基准,各有关数值取三位有效数字的计算结果。

4.2 爆轰波波阵面形状

被判读的胶片如图 5 所示。处理的结果如表 3。



图 5 炸药爆轰波波阵面形状

Fig. 5 Detonation waveform

图 6、图 7 分别用 TP-5 型与 JJL-2 型所得数据画出的波形图。

表3 爆轰波波形差 Δt Table 3 Detonation waveform deviation Δt

仪器型号	TP-5	JJL-2	相对误差 ^{a)}
物像比	5.395	5.399	0
$t_{max}/\mu s$	1.658	1.635	1%
$t_{min}/\mu s$	0.225	0.225	0
$\Delta t/\mu s$	1.43	1.41	1%

a)同表1。

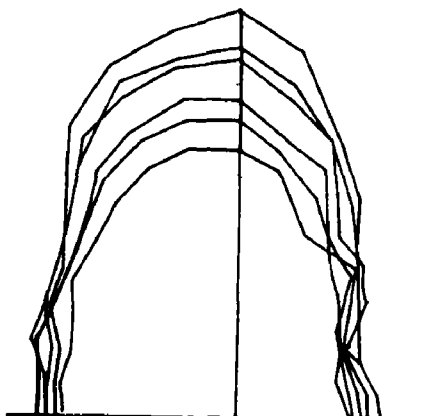


图6 用TP-5型得的数据由绘图仪绘制的
Fig. 6 Profile drawn by plotting instrument using
TP-5 type interpretoscope

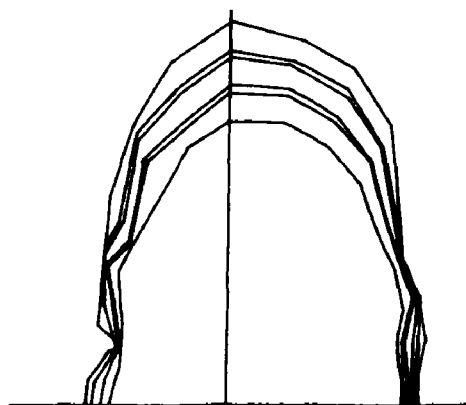


图7 用JJL-2型得的数据由人工绘制的
Fig. 7 Profile drawn by manual using
JJL-2 type toolmaker's microscope

4.3 应力波传播速度

图8是雷管爆炸后在K₉光学玻璃中产生的应力波匀速传播过程,其传播速度D,如表4。

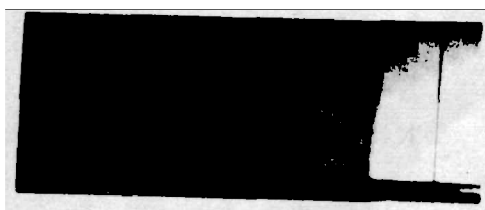


图8 应力波的传播状态
Fig. 8 Stress wave propagation

表4 应力波速度

Table 4 Stress wave velocity

仪器型号	TP-5	JJL-2	相对误差 ^{a)}
物像比	4.106	4.105	0.2%
t_{ga}	0.538	0.541	0.5%
$D_0/(km/s)$	6.097	6.129	2%

注:a)同表1。

4.4 分幅图形数据

4.4.1 非对称变化

图9是强激光辐照Ly12-Al靶产生的汽化羽,判读6幅,在图中幅号为7,10,13,16,19,22。基准点是中间一条网格线(垂直方向)与倒数第2条网格线(水平方向)的交点。第7幅看作为后几幅图形变化的起点,幅间隔时间为6 μs 。表5、6分别为第5、第6方位上的相邻两幅之间的变化速度(加速度数据未列)。

数据处理中进行的平滑以及每幅图形面积、面积变化量、重心均未列出数据。

图10、11分别用差商法的数据、加权平滑后绘图仪画汽化羽的轮廓图。

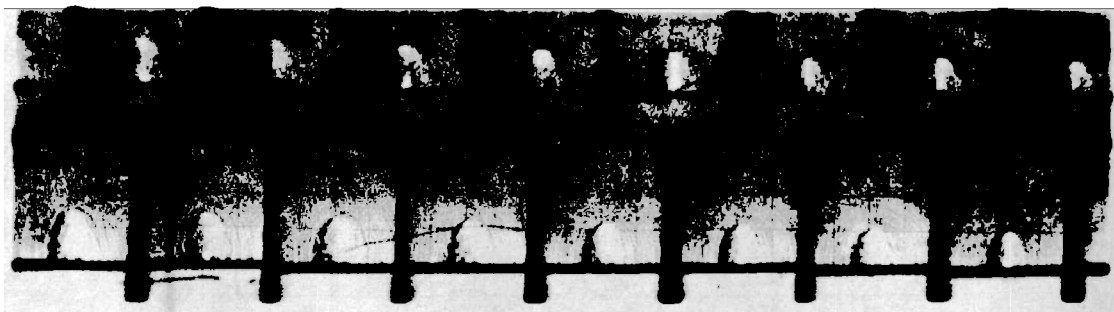


图 9 汽化羽的扩张过程

Fig. 9 Expanding procedure of the vapor plume

表 5 第 5 方位的变化速度(方位角 39.44573 度)

Table 5 Fifth azimuthal varied velocity (azimuthal angle 39.44573°)

幅 号		7	10	13	16	19	22
速度 /(km/s)	差商法	0	0.0154	0.0148	0.0041	0.0063	0.0145
	局部求导	0	0.0167	0.0107	0.0043	0.0042	0.0145
	自然样条	0	0.0118	0.0183	0.0052	0.0121	0.0104

表 6 第 6 方位的变化速度(方位角 49.88897 度)

Table 6 Sixth azimuthal varied velocity (azimuthal angle 49.88897°)

幅 号		7	10	13	16	19	22
速度 /(km/s)	差商法	0	0.0230	0.0351	0.0304	0.0058	0.0188
	局部求导	0	0.0267	0.0283	0.0220	0.0084	0.0188
	自然样条	0	0.0130	0.0404	0.0371	0.0084	0.0158

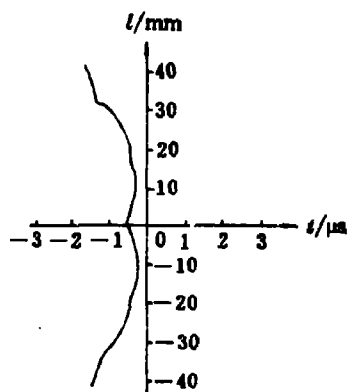


图 10 差商后汽化羽的轮廓图
Fig. 10 Pattern under divided difference

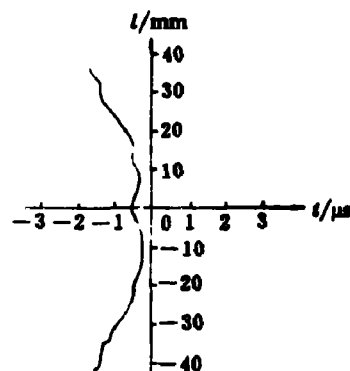


图 11 加权平滑后汽化羽的轮廓图
Fig. 11 Pattern under weighted smooth

4.4.2 对称变化

就以图 9 为例,判读 x 向断面的变化,下面数据是以倒数第 2 条网格线(水平方向)为一个断面,基准点仍是此条线与中间一条网格线的交点。表 7 列出相邻两幅之间变化量、瞬时速度、瞬时加速度(物像比为 3.037)

表 7 x 向断面的变化量、瞬时速度,瞬时加速度

Table 7 Magnitude of change, instantaneous velocity and acceleration of x section

幅号	$\Delta x_i / (\text{mm})$	$\Delta t / (\mu\text{s})$	$V_i / (\text{km/s})$	$\Delta V_i / (\text{km/s})$	$a_i / (\text{km/s}^2)$
7	0	0	0	0	0
10	0.257	6	0.130	0.130	0.022
13	0.140	6	0.071	-0.059	-0.010
16	0.265	6	0.134	0.063	0.011
19	0.163	6	0.082	-0.052	-0.009
22	0.148	6	0.075	-0.008	-0.001

5 建 议

应用 TP-5 型判读的胶片,为了使主观误差减少到最低程度,要求胶片上基准线、点、网格线、静态物像清晰可辨,图形前沿的模糊度在相机分辨率极限以内。

致谢:这项工程由谭显祥副所长负责指导完成的,成文时又得到中国工程物理研究院张寿齐副总工程师的指导。

参 考 文 献

- 1 华航光学仪器厂, TP-5 型运动分析仪说明书, 1992.
- 2 韩立石, 专用胶片判读头对胶片数据判读处理的要求. (内部通讯), 1991.

SEMI-AUTOMATION INTERPRETOSCOPE MODEL TP-5 AND ITS APPLICATIONS ON DETONATION EXPERIMENT

Han Lishi

(Laboratory for Shock wave and Detonation Physics Research, Southwest Institute of Fluid Physics,
P. O. Box 523, Chengdu, Sichuan 610003, P. R. China)

ABSTRACT Model TP-5 interpretoscope is used to interpret data obtained by high-speed cine-camera and ultraspeed rotating-mirror camera. This paper will introduce the principles by which how the TP-5 interprets data obtained by ultraspeed rotating mirror camera, the functions of the software and the interpretive program. At the same time the result from interpretoscope will be shown. From the interpretive results of the synchronization deviation of several explosive events, waveform deviation of the detonation wave, explosive speed and separate pictures it is shown that the result is reliable, and the interpretive program is useful.

KEY WORDS film motion analysis system, high-speed rotating-mirror camera, detonation parameter