

# 高速摄影与数据处理

陈良一 聂玉线

(中国科学院西安光学精密机械研究所)

在工业、军事以及科学研究中,有许多快得使人无法接受的瞬变现象。这种现象可以用高速摄影机拍摄下来,再以慢到人眼可以接受的速度再现出来,从而可供观察或分析用。现代的高速摄影技术已经可以诊断数万亿分之一秒里所发生的事件,它使人们从中得到前所未有的空间信息和时间信息。

## 一、高速摄影机

### 1. 高速电影摄影机

高速电影摄影机所拍摄的胶片很长。长胶片运动限制了摄影频率。间歇式高速电影摄影机依靠抓片机构使胶片在片窗处作间歇运动,实现间歇摄影。这种摄影机的成像质量和画幅稳定性极佳,在体育、生物力学及箭弹发射等运动速度不很高的研究项目中普遍使用。由于摄影过程中抓片机和胶片受到极大的惯性力的影响,每秒钟它只能拍摄几百幅。要想进一步

提高摄影频率,就要用光学补偿式高速电影摄影机。光学补偿器有棱镜式和反射镜式两种。棱镜或反射镜补偿器的旋转使成像光束的偏折正好与胶片的运动同速,从而消除由于胶片在曝光时运动所引起的成像模糊的量。它的摄影频率是每秒几十幅到一万幅,适合于拍摄作高速机械运动的目标。

### 2. 转镜式高速摄影机

转镜式高速摄影机的摄影频率和扫描速度都很高,它的摄影频率可达到 $10^7$ fps(幅/秒),扫描速度可达 $60\text{km/s}$ 。扫描摄影是一种信息连续的记录,它给出目标的位移和时间的关系,从这关系中可求得速度和加速度。转镜式高速摄影机适用研究爆轰、等离子体诊断、力学中的碰撞和断裂、冲击波、电弧等物理过程。表1列出了中国科学院西安光学精密机械研究所生产的几种转镜摄影机的型号及性能。

### 3. 变象管高速摄影机

表 1

型 号	相机分类	驱动方式	主 要 性 能 参 数				
			总幅数	画幅尺寸(mm) <sup>2</sup>	分辨率(pl/mm)	扫描速度	拍摄频率(fps)
ZFD-20	分幅相机	电机	72	9×10	20 以上		$2 \times 10^4$
ZDT-50	分幅相机	电机	110	18×20	20~25		$5 \times 10^4$
ZDK-28	分幅相机	涡轮	81	9×9	28 以上		$5 \times 10^4$
ZSK-29	扫描相机	涡轮				27mm/ $\mu\text{s}$	
ZDF-180	分幅相机	电机	110	12×20	22 以上		$1.8 \times 10^4$ $1 \times 10^4$

上述几种高速摄影机都是利用高速的机械运动来实现高速摄影,摄影频率或多或少地受到机械运动本身的局限。但是,变象管高速摄影机可以有更高的摄影频率和扫描速度,目前它的摄影频率已达 $6 \times 10^8$ fps,图像扫描的时间分辨达 $0.5 \times 10^{-12}$ s。

变象管相机的成像质量不如转镜相机好,

但是它有一系列其他优点足以弥补这一缺点。除了上述的时间分辨率(或摄影频率)极高以外,还有:(1)由于它是以电子束成像,摄影机快门很容易被现象触发来实现“开”“关”;(2)变象管可以给出数值很大的光增益,可以用来拍摄一些低亮度的目标;(3)可以实现波长转换,把X线、红外线等转换成可见光进行显示或摄

影记录；(4)可以实现实时输出,把结果直接显示在电视监视器上或记录在函数记录仪上,或以数字形式打印出来；(5)变象管相机搬运轻巧,使用方便,用 Polariod 片记录时,在几秒钟内就可以得到照片。由于以上这些优点,变象管相机被广泛地用于研究在毫微秒、微微秒级时间间隔内发生的物理现象如核爆炸、磁压缩、激光核聚变、电力放电、弹道学、爆轰物理、光化学、光生物学等。

表 2 中介绍由中国科学院西安光学精密机械研究所研制成功并已投入使用的几种变象管高速摄影机。

#### 4. 单幅静片高速摄影机

单幅静片高速摄影是利用高速快门准确地在某一瞬间曝光并使曝光控制在极短的时间内,从而记录高速现象某一瞬间的变化。利用光电效应(即电致双折射效应),可以制成克尔盒快门,它的最短曝光时间可达  $10^{-8}$ s。利用固

表 2

型 号	主 要 性 能 参 数						
	工作方式	时间分辨率	空间分辨率	增益	其 它	配 件	应用范围
BWS-5K	扫描	2ps, 5ps, 10ps, 50ps, 100ps	30pl/mm	$4 \times 10^4$	35mm 胶片	配有读数系统	激光核聚变等
BNS-200K	扫描	200ps	15pl/mm		可探测的最小能量密度 $3 \times 10^{-12} \text{J/mm}^2$	配有多通道 数据记录器	激光等离子体, 爆炸,放电
20 型	分幅		8pl/mm		曝光时间 30—40ns		地下核试验
310 型	扫描			$3 \times 10^4$	扫描速度 5mm/ $\mu$ s		爆轰

体中的电致双折射现象,可以制成普克尔盒快门。例如,在磷酸二氢钾晶体的  $x$  轴方向上加电场,使它产生双折射,也可制成高速快门。另外,利用磁光效应可做成法拉第快门,利用光致双折射现象做成光致克尔盒快门等等。

利用瞬时照明方法来得到极短的曝光时间,是高速摄影最早采用的方法,并且一直沿用到今,这是主要的高速摄影方法之一。用火花光源、脉冲氙灯、爆炸光源等都可以得很短的曝光时间,在实际应用中都很有效。瞬间照明法的曝光时间是由光源闪光持续时间决定的,所以要求光源输出的光脉冲强度高,持续时间短。如果光源重复闪光,或使用多个光源依次闪光,则可以得到一幅多重曝光的照片或一组按时间顺序排列的瞬时照片。

## 二、高速摄影在物理研究中的应用

在工程力学中存在碰撞问题,如雨滴对飞机的侵蚀,蒸气透平叶片的侵蚀,用高速射流破碎岩石等等。要研究碰撞问题,首先应在实验室里做模拟试验。有一种模拟方法是:把子弹打

进盛水的容器里,使之在一小孔处形成高速射流,观察高速射流对目标的碰撞过程并研究目标的破坏机理。为此,需要用  $10^6$  fps 以上摄影频率的摄影机进行记录。从中可以得到有关射流、空气冲击波、碰撞后的液体溅流、试样中的应力波及试样中损坏情况的信息。

固体粒子对固体目标的碰撞也是一个很重要的研究课题。例如,直升飞机在起落时从地面上刮起的沙、石会打在螺旋桨上,剥蚀其表面。对此可用高速摄影机来记录,研究其表面的剥蚀过程,测出入射动能、回弹动能、转动动能和接触区域的摩擦系数。

用 2mm 的钨钢球以 150m/s 的速度碰撞到玻璃块上,玻璃产生裂纹,裂纹扩展而破裂,整个过程只需几微秒。用高速摄影可以清楚地记录这个过程,并且可以定量地测量出裂纹及应力波的传播速度。

激光脉冲与固体的相互作用是在很短的时间里发生的。用高速摄影技术可以研究 Q 开关或非 Q 开关激光脉冲对玻璃、聚合物和晶体作用产生的破坏机理。

高速摄影可以记录激光的发射在时间上的变化,从而研究激光器内部的振荡过程和激光发射的横模形式过程。

在研究气体动力学、凝聚态动力学、脉冲等离子体动力学、燃爆、爆轰、电火花、电爆炸金属丝、爆炸箔、脉冲光源、脉冲激光等各种高速物理过程中,如果没有高速摄影技术,工作将是很困难的。炸药爆轰波的速度或爆轰波出药柱端面的波形,可以利用爆轰波头上高温高压下的自发光作为光信息并用狭缝扫描高速摄影机来记录。利用激光在高速运动界面上反射产生的多普勒频移,可以研究爆轰物理实验中的自由面位移-时间变化,速度-时间变化,以及波结构、层裂、自由面微量物质的喷射等现象,还可以直接测量冲击波后粒子的运动速度。若将高速扫描相机配上光谱装置,就可以用来研究快速发光过程的光谱特性。

利用高速摄影,可以直接看到等离子体的产生、发展和崩溃整个变化过程的宏观图像,可以验证所设计的磁场位形,获取等离子体平衡及不稳定性的直接信息,可以在照片上测得预电离、主压缩前半周、磁流体振荡和旋转漂移等过程的时间。

### 三、摄影数据处理

高速摄影所获得的连续图像,记载着某个时间内各个时间点上的被测量现象的各种信息。分析这些信息,是高速摄影测量的最终目的。所谓定性分析,就是用电影放映机放映高速摄影胶片,这样就把高速现象大大放慢之后再再现出来。这种时间放大测量,是其他测量方法难以替代的。

更为重要的是定量分析,它是将高速摄影图像信息数字化,经过细致的数学处理,获得准确的被测量现象的物理数据,再根据物理定律分析这些数据,从而了解它们的本质。

高速摄影信息中包含着大量的由测量环境、测量仪器以及高速现象本身的特性所造成的各种不可避免的误差,而且高速摄影测量的信息量极大,所以在实验中必须考虑数据采集

分析的精度与效率,同时必须适当地选择数据处理的方法。对于超高速摄影,由于拍摄的画幅数量小,所以还应该有特殊考虑。

#### 1. 图像检测装置

从高速摄影图像中采集数字信息的一类仪器,叫做图像检测装置,或判读仪。早期的图像检测是用光机式的 X-Y 仪与电传打印机来完成图像判读与数据记录的。微电脑的发展大大促进了图像检测的自动化。最近几年出现了各种型号的运动分析仪,这些仪器不仅可以自动采集数据,还可以把一些基本运动参数如速度、加速度、功、能等计算出来,并自动给出某些运动曲线。日本 NAC 公司制造的 MOVIAS-100 型和我国新近研制成的 TP-III 型运动分析仪,都具有这样的功能。

读数精度是判读仪的一个主要指标。影像仪器屏幕上点坐标的最小读数是 0.05mm,换算到影片上,最小读数值为 0.002mm,接近常用的工具显微镜。上述几种判读仪已达到这一水平,可以满足一般的工程摄影测量的需要。

#### 2. 判读方法

在摄影测量中,判读方法的选择直接影响分析精度。当画面在判读仪上逐幅运动时,点坐标的输出值中必然包含了画面不稳定而产生的跳动量。这种跳动量有时比点坐标本身的输入误差还要大若干倍。消除这一误差的方法是在画面上选一个不参与运动的基准点,将各个测量点的坐标值与基准点的坐标之差作为测量点的坐标值进行计算,利用相对坐标变换的方法消除走片误差。

#### 3. 数据处理技术

从摄影胶片上测得的坐标值总是带有随机误差,因而需要借助近似计算方法消除测量误差。另一方面,摄影测量所揭示的高速现象本身的数学模型往往是未知的,所以也必须用数学方法对数据进行拟合或回归,以寻求被测量现象的最佳数学模型。由于被测对象不同,摄影条件不同等原因,各种摄影测量都需要选择各自不同的数据处理方法或处理程序。这里列出几种通常所用的数据处理方法。

(1) 测量数据的修匀: 它包括局部修匀; 加权局部修匀; 有限项傅里叶级数整体修匀(所取项数, 也需通过试算而定); 概率整体修匀(该方法适用于曲线变化比较复杂的情况); 各种方法的组合使用。

(2) 求导: 由于摄影测量中, 位置坐标与时间的测量值都带有误差。根据误差传递理论, 即使位移( $\Delta x$ )很小, 但由于  $\Delta t$  也很小, 所以比值 ( $\Delta x/\Delta t$ ) 也会很大, 尤其是  $\Delta x/(\Delta t)^2$  会更

大。用含有误差的  $\Delta x$  与  $\Delta t$  求导, 将会造成很大误差, 甚至失去求导的意义。摄影测量中, 求导方法有: 三点差商求导, 局部平滑求导, 多项式拟合求导, 自然样条函数求导。使用时应加以选择。

目前, 计算机已经用于高速摄影测量的数据处理。我国已经陆续研制出适用于多种物理的、工程的高速摄影测量数据处理的软件包。在应用中也已经取得了满意的结果。

## 用激光制作高 $T_c$ 超导薄膜

贝尔业务公司研究部 (Bellcore) 的科学家们发展了一种利用脉冲准分子激光在基片上制作超导薄膜的新工艺。据称, 这种工艺十分可靠而简单, 因此这种新材料在电子学方面的商业应用是指日可待的。

这种工艺, 利用 Lambda Physik 公司的准分子激光器产生的能量为  $1-2\text{J}/\text{cm}^2$  的 248nm 脉冲光束蒸发超导材料的三种成分——钇、钡和铜, 蒸气流在一个真空中沉积在一块基片上, 形成一薄层, 把得到的薄膜在高温下烘烤而生成化合物。Bellcore 报道, 该薄膜在 83K 显示零电阻因而可以用便宜的液氮很容易得到超导态。IBM 和 Stanford 的研究工作者用其它方法 (例如电子枪) 也已经制成超导薄膜, 但是 Bellcore 的科学家们声称, 这种激光法更为可靠。“明天你就能用这种工艺建立起一条装配线。”这项工作的领导者 Venky Venkatesan 说, “它可以被做成任意的形状和式样。” Venkatesan 又说, 激光法优于其它方法在于它能同时蒸发三种成分, 每次都能以正确的比例产生正确形状的蒸气流。而其它方法需要三个电子枪来蒸发不同的材料, 因为不同的材料蒸发所需的温度很不相同。这样就产生了三股分开的蒸气流, 因此只有少数基片获得有正确成分比例的薄膜。

Venkatesan 说, 这种“叠合蒸发法”非常可

靠, 不需要优异的监测仪器来确保膜层沉积的正确比例。并且这种薄膜经适当的处理后不脆裂。“它们在退火和镀膜以后在化学上非常稳定,” Venkatesan 说, “它们象陶瓷那样坚硬。在严格考虑了把薄膜并入到装置结构中去的各种要求之后, 我认为这些薄膜是极其令人满意的。这种薄膜最终将成为光计算机的元件, 光计算机用光而不是用电流执行运算。“从光电子学的观点来考虑, 存在着若干吸引人的用途。这种薄膜可以用光学方法来触发, 从超导态变到正常态。你还能制造出无电阻的晶体管。” Venkatesan 说。

这种新的沉积技术是在超导领域中一系列迅速的进展中的最新进展。当这种新材料在最近的美物理学会特别会议上宣布的时候, 人们推测会有一个革命性的进展, 使这种材料将开发出更小更快的电子装置。在把超导应用的期望变成现实的进程中, Bellcore 的研究工作者们似乎迈出了重要的一步。

Bellcore 的一位研究经理 John Rowell 说, Bellcore 不打算申请这种工艺方法的专利, 因为这种方法以前已经用于制作其它材料的薄膜。Bellcore 计划在 Applied Physics Journal 即将出版的一期中发表这个工艺的详细情况。

(朱振和根据“Lasers & Optronics”

1987 年第 8 期第 42 页)