

超高速相机与底片系统的光度性能

谭显祥

(1984年5月30日收到)

本文叙述了转镜式高速扫描相机和变象管扫描相机的光度性能,计算了上述两类相机最终象面上象的照度;以及选择何种灵敏度底片才能得到可供测量的合适黑密度图象。

一、前言

在爆炸过程的研究中,往往需要时间分辨为亚微秒至亚毫微秒的观测手段,超高速转镜相机和变象管相机具有这种观测能力,因而得到了广泛的应用。转镜相机,主要是在爆炸现象研究的基础上发展起来的。当前,性能优良的转镜相机,其主要技术指标如下:

扫描相机:扫描速度可达 $20\text{mm}/\mu\text{s}$, 技术时间分辨本领近 2ns , 对底片的相对孔径约 $1/10$ 。

分幅相机:最高摄影频率 $2.5 \times 10^7 f/\text{sec}$, 时间分辨本领约 40ns , 画幅尺寸 $5 \times 10\text{mm}^2$, 画幅数约 40。

除此而外,转镜式相机还具有好的空间分辨率,比较完善的与被摄对象同步技术,使用安全可靠等。目前,人们正在发展它的各种应用技术,特别是与阴影仪、纹影仪、显微镜、光谱装置以及莫尔条纹技术结合起来,并采用彩色摄影方法,成功地获得了多种应用结果。但是,这类相机的技术性能,在没有原理性突破以前,难以进一步提高;而且,它的物理光力低,不能适应记录弱光过程的需要。现今,被摄对象发展速度已大大提高,同时,需要记录的光谱已从可见光扩展到红外线、紫外线和 X 射线波段,且发光强度往往很弱。这就促使了以光电转换技术为基础的变象管相机的发展和应用。这两种超高速相机在大多数场合下均采用底片记录,为了发挥它们和底片组成的记录系统的技术潜力,有必要了解整个系统的光度性能。所谓光度性能,是指一定亮度的被摄物体在相机最终象面上象的照度、曝光量以及需要何种灵敏度底片方能得到具有一定黑密度的清晰图象。下面将分别讨论上述问题。

二、转镜式扫描相机的光度性能

当被摄物体位于有限距离 l 时,从应用光学基本公式可求得转镜扫描相机最终象面上照度 E 的计算式

$$E = \frac{1}{4} \pi B k \left(\frac{D}{f'} \right)^2 \left(\frac{l + f'}{l} \right)^2 \cdot \frac{1}{\beta^2} \quad (1)$$

上式中 B 为被摄物体的亮度, k 为相机光学系统的透过率, 一般约为 0.6; D/f' 为相机第一物镜的相对孔径约 1/5, 物距 l 一般取 $-10m$ (按应用光学规定, 它应取负号); f'_1 为第一物镜焦距, 常用焦距为 $1m$; β 为第二物镜放大倍率, 一般为 2 倍。用上述数据代入 (1) 得: $E/B = 0.004$ 。这就是说, 在转镜扫描相机中, 因为光学系统收集光能量的立体角很小, 因此被摄物体光能量的利用率很低。

爆炸过程研究中, 被摄物体的发光特性往往接近于绝对黑体。例如, 炸药爆炸产物表面的空气冲击波辐射特性就可以用黑体辐射来处理, 其温度经测量约为 $8000K$ 。我们也经常遇到比 $8000K$ 更低的辐射温度。至于更高辐射温度的处理, 方法是一样的。已知辐射温度后, 按照辐射定律, 便可求出被摄物体的亮度。下面以辐射温度 $8000K$, $6000K$, $4000K$ 作为计算实例。先求出亮度 B , 然后按 (1) 式求得相机象面上的辐射照度数值和辐射曝光量 (设曝光时间为 $5 \times 10^{-9}s$)。如果照度、曝光量等单位仍需要采用光度学单位, 则需将以瓦为单位的能流 $\phi(\lambda, T)$ 换算成流明为单位的光流 F , 即

$$F = K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda, T) V(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

上式中 K_m 为光功当量最大值, 系从标准流明辐射体求出, 其值为 $683lm/W$; $V(\lambda)$ 为人眼的相对视觉函数值; λ_1, λ_2 是可见光的波段范围。

改写 (2) 后得

$$F = \frac{K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda, T) V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \phi(\lambda, T) d\lambda} \int_0^{\infty} \phi(\lambda, T) d\lambda$$

其中 $K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda, T) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda / \int_0^{\infty} \phi(\lambda, T) d\lambda$ 的值为人眼对辐射的敏感效率, 以 A 记之。 A 值可根据不同的辐射温度, 用数值积分方法求得, 在文献 [1] 中可以查到。它的单位为 lm/W 。

$$\therefore F = A \int_0^{\infty} \phi(\lambda, T) d\lambda \quad (3)$$

由上式便可方便地将辐射能单位换算成光度单位。表 1 即为以上数据的计算结果。

表 1、不同黑体辐射温度的象面照度和曝光量

辐射温度 (K)	8000	6000	4000
物面辐射亮度 ($W/cm^2 \cdot sr$)	7398.2	2339.8	461.8
象面辐射照度 (W/cm^2)	28.1	8.9	1.74
相应的光照度 (lx)	2419×10^4	825.9×10^4	98.5×10^4
辐射曝光量 (erg/cm^2)	1.4	0.4	0.087
相应的光度曝光量 (lx·s)	0.12	0.041	0.0048

实验工作中, 常可用 $25Din$ 至 $38Din$ 底片作为记录材料。为了使底片上图象便于测量, 图象黑密度需要达到 1.8 左右 (包括灰雾密度), 表 2 列出了几种常用底片得到 1.8 黑密度所

需的曝光量*。

表 2、几种常用底片获得 1.8D 所需的曝光量

底片型号	国产航高 I	国产 1032 流光片	进口 2485 片
显影液型号	D-72	G 115	D-857
显影时间 (min)	8	12	6 (显影温度 35℃)
感光度 (<i>Din</i>)	26	30	32
γ 值 (反差系数)	1.43	1.6	1.45
产生 1.8D 所需的曝光量 ($lx \cdot s$)	0.047	0.018	0.007

* 上表中各种底片的特性曲线是由靳天琪、周慧娟同志提供的。

表2所列数据是在曝光时间为二十分之一秒感光仪上测得的。当曝光时间降至 10^{-8} s 以下时,可能产生曝光量的倒易律失效。根据我们初步实验结果,某些底片在 10^{-8} s 情况下感光度会降低一倍(即减少 3 *Din*),同时反差系数 γ 值也会有所损失。国外商品底片(例如何达产品),在说明书中一般给出秒级至 10^{-6} s 范围内的倒易律失效数据,计算时可作为参考。

比较表1和表2数据,可以看出:如果被摄物体有 8000K 黑体辐射温度,则对上述高性能的转镜扫描相机,使用 26 *Din* 底片即可获得合适黑密度图象。如果低于 4000 K,则现有常规底片(包括进口 2485 片,该底片名义为 36 *Din*,但因过期使用,实际只有 32 *Din*)均不能获得供测量用的合适黑密度图象。

必需指出的是:上述高性能转镜式扫描相机,其物理光力相对而言是很高的,因此对底片感光度的要求比较低。国外某些转镜式扫描相机,虽然扫描速度很高,但物理光力很低,在多数情况下难以记录到讯号。从相机设计来看,牺牲相机的物理光力来提高扫描速度,往往不足取。用(1)式计算象面照度时,还需知道相机光学系统的透过率 k ,此值可以用光电方法测出。鉴于所有转镜式相机的光学系统大同小异,因此在做光度估算时,若无透过率值,可参考表3所列 G.S.J 型相机的数据。

表 3、G.S.J 型转镜相机的透过率

相机种类	第一物镜焦距 (mm)	透过率
分幅相机	$f'_1 = 210$	0.40
	$f'_1 = 750$	0.44
	$f'_1 = 2000$	0.39
扫描相机	$f'_1 = 210$	0.53
	$f'_1 = 750$	0.58
	$f'_1 = 2000$	0.52

下面用一个实例说明高速摄影系统的光度特性。我们考察一个爆炸实验, 实验装置如图1所示: $\phi 200$ 平面波发生器驱动飞片, 实验样品与飞片紧贴。样品自由表面速度约为 $1\text{ mm}/\mu\text{s}$, 并涂硝酸钡粉末。长度约为 15 m 的光纤 (其有效直径为 0.06 m.m , 数值孔径为 0.17) 一端置于样品表面硝酸钡下, 另一端放在 SJZ-15型转镜扫描相机的狭缝处。相机的扫描速度为 $6\text{ m m}/\mu\text{s}$, 使用 2485片记录讯号, 并用 857 配方高温显影底片。当样品自由面速度为 1

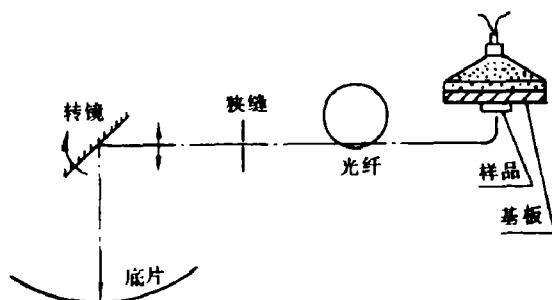


图1 光纤实验装置

$\text{mm}/\mu\text{s}$ 左右时, 硝酸钡空气隙发光亮度约为 $1 \times 10^7\text{ sb}$, 大致相当于 6000 K 黑体的亮度。所用光纤的光能损失为 $5\text{ db}/\text{km}$, 因此在 15 m 内的光能损失可忽略不计。转镜相机第二物镜的透过率和反射镜的反射率均约为 0.8 。因为光纤的数值孔径大于相机对底片的相对孔径, 故光度计算以后者为准。SJZ-15型扫描相机对底片的相对孔径为 $1/10$, 于是按应用光学公式, 象面上的照度 E 为

$$E = \frac{1}{4} \pi B k \left(\frac{D}{f'} \right)^2 = \frac{1}{4} \times 3.14 \times 10^5 \times 0.8^2 \left(\frac{1}{10} \right)^2 \approx 5 \times 10^6 (\text{lx})$$

相机狭缝宽度为 0.02 mm , 第二物镜放大二倍, 底片上象的扫速为 $6\text{ m m}/\mu\text{s}$, 故曝光时间 $t = (0.02 \times 2) / 6 \approx 7 (\text{ns})$ 。故底片上象的曝光量 H 为

$$H = E \cdot t = 5 \times 10^6 \times 7 \times 10^{-9} = 0.035 (\text{lx} \cdot \text{s})$$

此值与表2数据对比可知, 用2485片记录到光讯号是完全可能的。实验结果也得到了可供测量的讯号。但需注意的是: 由于光纤直径小, 安装时更应小心地使光纤端面与狭缝平面重合; 如果倾斜安装, 很可能在底片上得不到具有足够黑密度的记录信号。

三、变象管扫描相机的光度性能

变象管扫描相机的结构原理如图2所示。被摄物体 O 经物镜1成象在狭缝2上, 再经第二物镜3将狭缝成象在变象管的光阴面4上, 后者把光学象变成相应的电子图象。光阴极发射的光电子经加速网栅5, 聚焦电极6, 阳极7和扫描偏转板8, 打在萤光屏9上, 获得可见光图象。此图象的记录可分 A 、 B 、 C 三种典型情况。 A : 光学透镜10将萤光屏上图象直接成象在底片11上。 B : 把萤光屏图象经双近贴象增强器12增强后, 通过纤维面板将图象

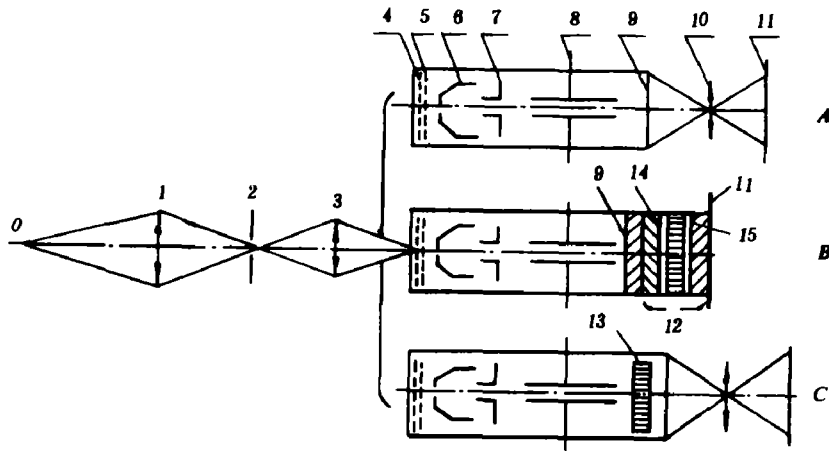


图2 变象管相机结构原理及三种记录方式

记录在底片上。C: 在变象管内安置微通道板13, 电子扫描图象经它增强后, 打在萤光屏上, 其后再用光学透镜记录。由以上可见, 变象管扫描相机的光学系统和转镜扫描相机大体相同。因此, 有关变象管光阴极上的照度和被摄物体亮度之间的关系, 可按上节所述方法处理; 两者之间的差异, 在于变象管光阴极至记录底片间的光增益的不同。下面将分别讨论变象管相机不同记录状况的光增益。

1. 变象管本身的光子增益

设单位面积光阴极上入射的光子数为 N_p , 光阴极面积为 S , 则单位面积萤光屏上能产生的光子数 N_p' , 取决于光阴极的量子效率 σ , 光阴极与阳极之间的电压 V , 以及萤光屏的发光效率 η 等。

$$\text{即 } N_p' = N_p \frac{S}{S'} \cdot \frac{\gamma \sigma V \eta}{h\nu} \quad (4)$$

$$\text{或 } G = \frac{N_p'}{N_p} = \frac{S}{S'} \cdot \frac{\gamma \sigma V \eta}{h\nu} \quad (5)$$

为了作简单估算, 这里只考虑光阴极的峰值响应辐射和萤光屏的峰值辐射。(5)式中的 $h\nu$ 即为萤光屏峰值辐射的光子能量。通常情况下选用 P_{11} 萤光屏, 主要发射 4500\AA 的兰光。故 $h\nu \approx 2.75\text{eV}$, γ 系加速网栅5对光电子的透过率, 一般取 $\gamma \approx 0.6^{[2]}$, S' 为萤光屏上与光阴极面积 S 相应的发光面积, N_p'/N_p 即为变象管的光子增益 G 。在典型的S-20光极限变象管中, $\sigma = 0.1$, $V = 20\text{kV}$, $\eta = 0.1$, $S/S' = 1$ 。代入(5)得 $G \approx 44$, 即典型变象管本身的光子增益约为44。

2. 变象管输出图象由光学透镜—底片系统接收 (图2A)

输出图象由光学透镜—底片系统接收时, 如前述, 因光学透镜聚光孔径角小, 它的能量耦合效率一般只有3%左右。因此, 底片上的照度 E' 与变象管光阴极面上的照度 E 之间有如下关系:

$$E' = E \times 44 \times 0.03 = 1.3E$$

即变象管的光增益和萤光屏上图象记录透镜所造成的光损失互相抵销。显然, 这种图象记录

方式,不能用于弱光高速过程摄影,而且变象管扫描速度也不可能很高,否则底片上难以得到合适黑密度图象。

3. 变象管输出图象由双近贴象增强器—底片系统接收 (图2B)

变象管输出图象由纤维面板以1:1的比例耦合到象增强器12上,设光纤的数值孔径为1(故名义耦合效率为100%);并设象增强器的光阴极14,萤光屏15的性能与变象管相同,则由象增强器萤光屏上输出的单位面积光子数 N_p^* 为

$$N_p^* = N_p \frac{\sigma^2 \gamma T A V V' \eta^2}{(h\nu)^2}$$

$$\text{或 } G = \frac{N_p^*}{N_p} = \frac{\sigma^2 \gamma T A V V' \eta^2}{(h\nu)^2} \quad (6)$$

(6)式中, T 为象增强器光阴极发射的光电子入射到微通道板的有效系数,一般 $T=0.6^{[2]}$, A 为微通道板的电子倍增系数,可做到 $10^4 \cdot V'$ 为微通道板输出端与萤光屏之间的电压, $V' \approx 1KV$ 。其它符号意义和数值同前。于是由(6)式得 $G \approx 1 \times 10^6$ 。

4. 变象管内部安置微通道板,萤光屏输出图象仍用光学透镜—底片系统接收 (图2C)

按上述类似计算方法,得到

$$G = \frac{N_p'}{N_p} = \frac{\sigma \gamma T A U \eta}{h\nu} \quad (7)$$

(7)式中 U 为微通道板输出端与变象管萤光屏之间的电压,典型值约为 $3kV$,将各数值代入(7)式得 $G \approx 4 \times 10^4$ 。考虑到后面记录光学系统耦合到底片上的效率为3%,则变象管光阴极至底片间的光增益为 1×10^3 。

5. 两种超高速扫描相机的简单比较

由以上计算结果可知,变象管扫描相机因记录系统不同,自光阴极至底片间的光增益差异可达六个量级。底片和图象输出萤光屏之间最好采用接触印相的方式。如果图2A改用接触印相方式记录,则底片上的光能立即可提高40倍左右,相当于底片感光灵敏度提高 $15Din$ 。当采用图2A记录方式时,两种超高速扫描相机的光度性能相近。而在图2B、C接收记录方式时,由于变象管扫描相机的光增益高达 $10^3 \sim 10^6$ 倍,因而它的其它技术性能可相应地提高。例如时间分辨本领或扫描速度已相应提高4个量级。所以,研究亚毫微秒或亚微微秒时间分辨的快速过程时,变象管扫描相机几乎是唯一的手段。同时,由于发展了输出图象准实时数据处理系统,从而大大缩短了底片数据处理工作的时间,而转镜扫描相机数字化记录工作,至今毫无进展。

参 考 文 献

- (1) A. B. 巴甫洛夫著,光电装置,国防工业出版社,27。
 (2) Tsuchiya, Y., *Picosecond*, 14(1983)。

A PHOTOMETRIC STUDY ON ULTRA-HIGH SPEED CAMERAS AND ITS FILM SYSTEM

Tan Xianxiang

Abstract

The photometric properties of ultra-high speed rotating-mirror streak camera and image converter streak camera are described in this paper. The illumination of these two kinds of cameras on the final image surface are calculated, and what kind of films needed to get the suitable density image for measuring is also given.