

转镜原理和转镜相机的发展

李景镇

在高速摄影中，作为传递信息的光子（或者电子）必须随着时间变换其空间位置（相对记录介质而言）。如果仅仅讨论记录介质静止的情况，那就必须对光速进行偏转。偏转的方法有转镜偏转，声光偏转和电光偏转等。从目前的技术水平来看，转镜偏转有着高效率（光能利用率高），高分辨率和宽的光谱范围等优点，这是其它两种方法难以达到的；同时，转镜相机还有着频率高，使用方便，结构紧凑等优点，所以一直到现在仍在发展。参看图 1。

转镜相机有不同的分类方法。从记录的图像来分有分幅相机（两维的），扫描相机（一维的）。从工作方式分，有同步型、等待型和准等待型三种。此外，还有混合型相机，和与其它技术结合起来的特种转镜相机。

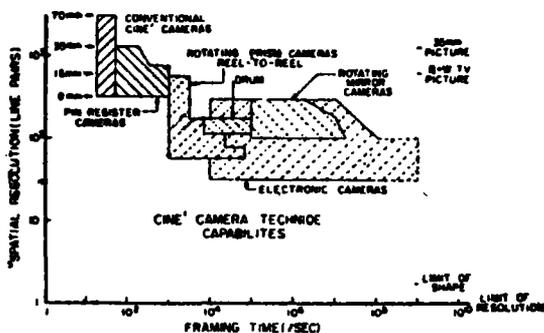


图 1

一、转镜相机的信息量

L. Brillouin^① 用每个画幅的像素数 z 和信息级 K 的自然对数来表示空间信息量 I_s ，

$$I_s = Z \ln K \quad (1)$$

若画幅的面积为 $S(\text{mm}^2)$ 两个方向的空间分辨率相同且为 N (线/毫米)，则(1)式可写成

$$I_s = SN^2 \ln K$$

我们感兴趣的是时间方向的空间信息。若画幅宽度为 B (时间方向)，分辨率为 N ，则

$$I_s = BN \ln K \quad (2)$$

K 表示信息级，对底片而言表示动态范围，对人眼而言可表示能区别开的 200 个灰级和 10₀ 多个色级(色调)^②。在高速摄影中，记录介质是感光底片，测量的要求仅是确定空间位置，只要满足黑白二个信息级就可以了，所以 $\ln K \approx 1$ ，(2)可简化成，

$$I_s = BN \quad (3)$$

H. Schardin 把时间信息量用分幅频率 ν 和品质因数 g 来表示，即

$$I_t = \nu g^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

$g = t_f / t_e$ ， t_f 是分幅时间， t_e 是曝光时间(一般取有效曝光时间)。(4)式是根据画幅数足够大时，时间测量精度正比于 $g\nu\sqrt{\nu}$ 推导来的。一般情况下都把 ν 视为时间信息的标准。

高速相机的信息量等于空间信息和时间信息之积，即

$$I = SN^2 \ln K \nu g^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

仅评价时间方向时，且 $lnK=1$ ， $g=1$ 时，则得信息量的公式为，

$$I = BNv \quad (6)$$

这个公式的含义是每秒钟可记录的线条数。可作为评价高速相机的信息量标准，下面叙述在转镜相机中的应用。

Miller原理是转镜分幅相机的理论基础，参看图2。Miller原理的要点是，

- ①中间象 i_1 成在转镜镜面附近；
- ②光阑成象在排镜L上，当转镜旋转时起到分幅和快门的作用。

高速摄影的先驱一者之一，H.Schardin 曾对转镜分幅相机的信息量进行过仔细研究，推导了著名的 schardin 公式③，

$$I = BNv = \frac{4v}{\lambda} \quad (7)$$

v 表示转镜边缘的线速度， λ 表示平均波长（或者主波长）。可知，转镜分幅相机的信息量只和转镜边缘的线速度和波长为关。对于扫描相机，只要设 $BN=1$ 就可以了；同时我们感兴趣的是时间分辨率 Δt ，所以从(7)式可得扫描相机的最小分辨时间 Δt 应为

$$\Delta t = \frac{1}{v} = \frac{\lambda}{4v} \quad (8)$$

若设 $v=500$ 米/秒， $\lambda=0.5$ 微米，则得 $I=4 \times 10^9$ (线/秒) (对分幅相机)， $\Delta t=0.25 \times 10^{-9}$ 秒(对扫描相机)。H.Schardin 在推导这个公式时，作了好多近似，所以实际系统都低于这个数值。但是美国 Cordin 公司研制 121 相机，采用高强度铍转镜，其边缘线度已达800m/s，其理论信息量达到 6.4×10^9 线/秒。表 1 列出了几种相机的信息量。

表 1

相机	国别	v (fps)	N (lpmm)	B (mm)	I (lps)
Cordin 121	美国	2.5×10^6	30(平均)	38.1	2.86×10^9
AWRE-C ⁵	英国	8×10^5	20	8	1.28×10^9
ZFK-500	中国	5×10^5	26.74(平均)	9	1.2×10^9

二、转镜技术和光学加速

从 Schardin 公式中可以得出提高转镜相机信息量的主要途径是提高转镜边缘线速度的结论；同时，在转镜线速度一定时，可以采用光线在转镜上多次反射的方法使扫描光线加速——光学加速亦是提高信息量的重要途径。近三十年来，好多从事转镜相机研制的专家做了大量工作。

转镜技术

影响转镜极限速度的因素有三个：材料的极限强度、材料的密度和转镜的截面形状。矩

形截面转镜的极限线速度 v 的公式为④

$$v = \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho}} \quad (9)$$

式中 σ 是材料的强度极限, ρ 为材料的密度, $\frac{\sigma}{\rho}$ 可称为比强度, 所以说和材料的比强度有关更确切。

转镜截面形状对转镜边缘极限线速度的影响, B. Brixner⁵ 曾作过仔细地研究。参看图3。图中各种截面形状的转镜镜面尺寸都是一样的。从图中可知, 等腰三角形截面有最高的极限速度, 这是转镜技术的一大进步。七十年代末期美国 cordin 公司研制的 121 型相机, 首先使用了等腰三角形截面的转镜。

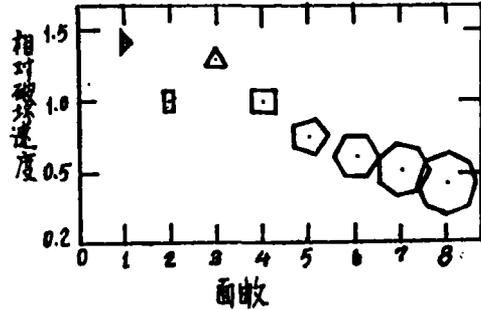


图 3

转镜的变形不影响幅相机的分辨率, 但对扫描相机来说却至关重要。影响转镜变形的

主要因素是比刚度 $\frac{E}{\mu\rho}$ 和截面形状。当转镜旋转时, 平的镜面会产生抛物柱面或其它高次曲线柱面的变形^{6, 7}。对于矩形截面来说, 其镜面的横向变形 Δa 可用抛物柱面近似,

$$\Delta a = 2a\pi^2 \frac{\mu\rho}{E} (y^2 - b^2)n^2 \quad (10)$$

式中, μ 是泊桑比, ρ 是密度, E 是扬氏模量, n 是转镜的速度, b 为镜面时间方向的半宽度。

截面形状对转镜的变形有着极大的影响。A. Frez 和 Y. Portom⁶ 用半解折点匹配方法对多种截面形状转镜的横向变形作了大量的计算和分析工作。综合前人研究的结果, 可以得出这样的结论:

①不同截面形状的转镜, 泊桑比 μ 对转镜的变形 (或者说镜面变形的最大斜率角) 有不同的影响。从图 4 中可知, 只有矩形和正方形截面, 变形和 μ 呈直线关系, 若采用低 μ 值 (例如铍) 变形远多比其它截面为小, 当用钢转镜时 ($\mu = 0.29$), 六面体的变形最小。

②矩形截面的变形可用柱面透镜补偿, 三角形截面的变形不能用柱面透镜补偿;

③对于钢转镜来说, 八面体的表面变形是凸的; 对铍转镜, 五面体、六面体和八面体变形是凸的;

④对于同步扫描转镜来说, 尽可能采用薄的矩形截面的铍转镜; 在不影响通光的情况下, 采用小转镜高转速较为有利。图 4 为不同泊桑比下最大斜率角的绝对值。图中, 1. 三角形;

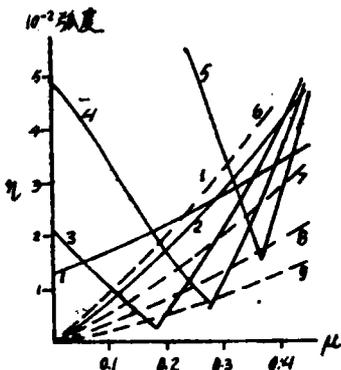


图 4

2. 正方体; 3. 五面体; 4. 六面体; 5. 八面体; 6. 矩形截面 $k = \frac{1}{2}$; 7. 矩形截面 $k = \frac{1}{4}$; 8. 矩形截面 $k = \frac{1}{6.5}$; 9. 矩形截面 $k = \frac{1}{10}$ ($k =$ 长宽比)。

高速转镜技术的另一个重要问题是必须考虑转镜的临界速度。转镜在临界速度下会产生很大的振动，如果转子的速度停滞在临界速度上，转镜轴的挠度要迅速增大，以至达到破坏的程度。设计转镜时，应计算其临界速度，使其临界转速和工作转速相差愈远愈好（至少速度差应大于20%）。从目前来看，用库舒耳方法可以比较精确计算出轴的任一阶临界速度^{8a}，其实验值和计算值仅有5%~10%的差别。这是因为床舒耳方法考虑到了轴颈变化，多支承、多集中质量，回转效应等因素。而其它两种计算方法（单圆盘法，邓柯菜累加法）只能求出转轴的第一阶临界速度，而且不考虑轴的质量（或当作均匀轴），不考虑回转效应，因此误差过大。表2列出了国产几种相机转镜的临界速度计算值和实验值的比较。

表 2

相 机	计 算 值	实 验 值
ZFK-2000型	一阶 $37 \times 10^4 \text{rpm}$ 二阶 $75 \times 10^4 \text{rpm}$	$35 \sim 36 \times 10^4 \text{rpm}$
ZSK-29型	一阶 $16 \times 10^4 \text{rpm}$	$14.5 \times 10^4 \text{rpm}$
轴承试验装置	一阶 $38 \times 10^4 \text{rpm}$	$36 \times 10^4 \text{rpm}$

资料8b（用有限元素法计算转轴的临界转速）一文，计算值和实验值相差甚小（1.3%），但和高度转镜还有差别。

转镜技术的另一个主要问题是转镜的驱动功率。驱动功率大小直接和作用在转镜上的阻力有关。转镜在旋转过程中，所承受的阻力和反射镜截面形状，周围介质和气压有关。日本人 Toyu Yoshizawa 曾作过仔细研究，我国也作过一些实验。图5中，10A，16A，20A，截面是圆形，直径分别为14.14mm，22.62mm，28.28mm；10B，16B，20B，截面是正方形；10C，16C，20C，截面是三角形。正方形和三角形的外接圆分别和圆形的相等。从图中可知，圆截面，直径增加，功率增加不大；其它截面形状，外接圆直径增加，功率迅速增加。同时，当真空度提高时，同一转速所需的功率直线下降；但在同一真空度下，转速提高，驱动功率急剧提高。实验表明，如果反射镜周围介质是氮气，则功率要比是空气时低多。在采用空气透平驱动的情况下，还有一个驱动效率问题。令人遗憾的是，目前尚未看到研究用于高速摄影的喷咀、涡轮效率的文章出现！

提高转镜的速度尚需考虑转镜镜体的加工质量（对称性）和动平衡的精度。美

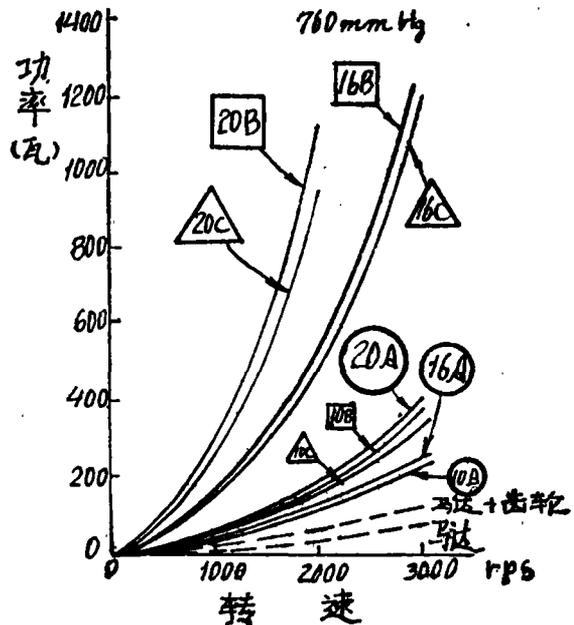


图 5

国 Cordin公司的动平衡精度达到 $(0.3\sim 0.9)\times 10^{-3}g\cdot cm$ 。

转镜是高速转镜机的核心，转镜技术所包括的极限速度、横向变形、临界转速、驱动功率和其它方面的进一步完善和发展是提高转镜相机性能的关键。

光学加速

采用光线在转镜上的多次反射，能使反射光束的扫描速度成倍地增大。这时的 Schardin公式要作相应修改，即

$$BNv = k \frac{4v}{\lambda} \quad (11)$$

式中 k 为光线加速的倍数。到目前为止，苏联^{10,11}，美国¹²，法国在光学加速方面做了大量工作，且有研制出来的样机。

图 6 示出了苏联人研制的 JIB-1 型相机的光学加速器的原理图。击射光束 A' 的角速度 Ω 和转镜的角速度 ω 有下列关系。

$$\Omega = 2k\omega \quad (12)$$

k 为反射次数，即加速倍数，JIB-1 型相机的最高拍频是 3.33×10^7 fps (画幅直径 5mm) 转镜的速度是 6×10^4 rpm。缺点是扫描速度变化大，画幅象的几何位置是个锥面，还有象旋(在曝光时间里，象绕画幅中心的旋转)，这些对获得优良的象质是不利的。

图 7 是法国人研制的二倍光学加速器($k=2$)的原理图，当转镜旋转 α 角时，出射光线旋

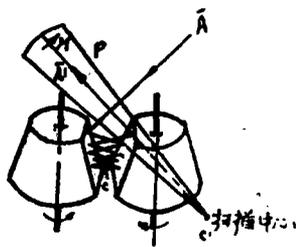


图 6 对转式 10 倍光学加速器原理图

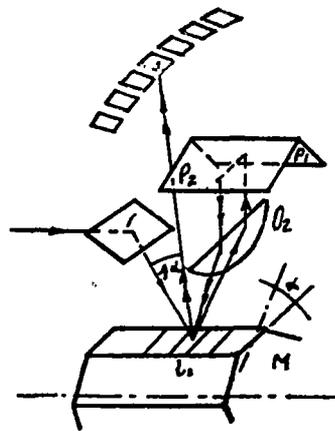


图 7 二倍光学加速器原理图

转 4α 。所达到的指标是 $v = 10^7$ fps, $B = 6$ mm, $N = 50$ lp/mm 所以总的信息量是 3×10^9 lps, 而转镜的速度是 9×10^3 rps。

图 8 是美国 300 型相机。光束经过主物镜 (Camera Objective lens) 后，分两路，最后成像在两个平底片面上 (film plate)，光学加速器是一个九面体转镜 (nonagonal Rotating mirror)、一个高质量透镜 (50 mmf/1.2 lens) 和四面体反射镜 (Tetrahedron Reflectors) 组成，这台相机的最高拍频是 4.5×10^6 fps，此时转镜的速度是 10416 rps。采用了消视差光阑，平的底片面是这个相机的另外两个特点¹²。

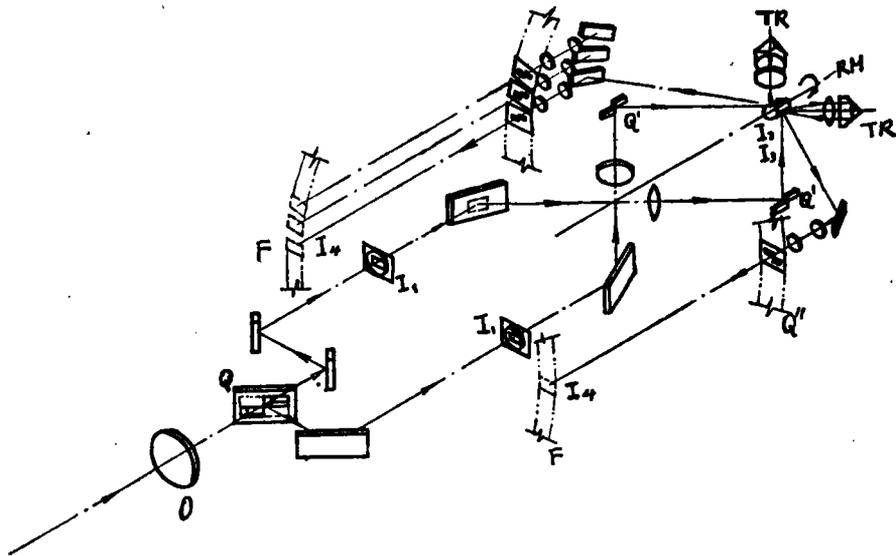


图8 美国300型光学系原理图

三、转镜相机计算原理

转镜相机的计算理论和方法经历过作图法，解析计算法和电子计算机的最优方案自动选择法。近三十年中，苏联学者 A. C. Дубовик^{14,15,16}，美国学者 W. C. Davis¹⁷，E. A. Igel¹⁸，J. M. Kelly¹⁹ 等人都做了大量工作。我国科学工作者也作了大量工作。^{4,20,21,22,23} 转镜镜面的变换方程，最佳镜面尺寸的计算，焦面曲线的计算和近似和像质的综合方法是转镜相机计算理论的主要内容。而计算的结果主要有转镜的位置和大小，片架的位置座标和大小，排镜架的位置座标和大小（扫描相机没有），球罩中心座标（有的相机没球罩）和中间像的中心座标（扫描相机没有），同时还要给出成像的质量指标。

镜面变换方程

所谓镜面变换方程是指入射光线和反射光线的关系方程^{10,21,22,24}。我们讨论最一般的情况，即转镜有一定的厚度，镜面和转轴有一定的距离且斜交，而仪器的光轴不和转轴垂直也就是通常所说的斜入射、倾斜镜面的厚转镜的情况。所设如图9所示。转镜绕 oz 轴旋转，镜面法线与 oz 轴成 ν 角，光轴 A 在平行于 yo 的平面内，与 z 轴成 γ 角， A 的方向角为 α, β, γ ；点 s 是交点且在 xoy 平面内，向量 \bar{l} 确定了点 s 相对于转轴的位置，与 oy 轴的负方向成 ξ 角；向量 \bar{n} 垂直于镜面，确定了镜面相对于转轴的位置，镜面法线的方向角分别为 μ, ψ, ν ；向量 \bar{B} 确定了物的位置，垂直 A 且平行于 yo 平面；向量 $\bar{\rho}$ 指 SS' ， φ 角为镜面的旋转角。偏差建立一柱坐标系，原点在 S 点上，轴和 oz 轴平行，则径向向量 ρ_{xy} 可推导为

$$\begin{aligned} \rho_{xy} &= 2l \sin^2 \nu \cos(\varphi + \xi) + 2R \sin \nu \\ &= \rho \sin \nu \end{aligned} \quad (13)$$

这是一个正柱面方程，其准线是巴斯加蜗线。从另一方面又可得出，

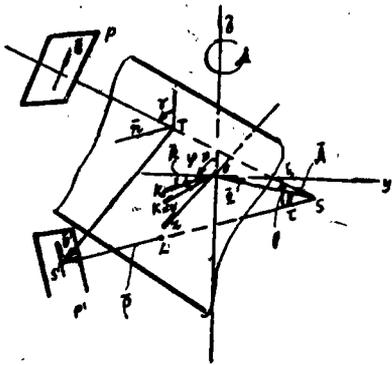


图 9

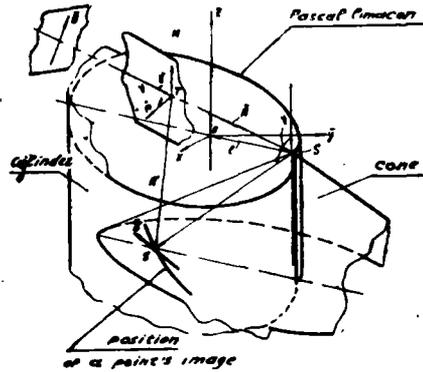


图 10

$$\begin{cases} \rho_{xy} = Z_p^2 \operatorname{tg}^2 v \\ z_p = 2l \sin v \cos v \cos(\varphi + \xi) + 2R \cos v \end{cases} \quad (14)$$

这是一个锥顶在S点的锥面方程，锥顶平面角为 $2v$ ，其轴平行于 oz 轴，通过方程(13),(14)可以看出，一般情况下的厚转镜扫描，象点 S' 的轨迹是一个复杂的空间曲线，这个曲线可用其准线为巴斯加蜗线外支的正柱面和底为巴斯加蜗线的正锥面相交，参看图10。

像空间中 $\overline{A'}$, $\overline{B'}$ 的位置。利用座标系统变换(旋转和平移)—— σ 矩阵和反射定律—— P 矩阵，可得出镜面变换方程——变换矩阵 M 来，

$$M = \sigma^{-1} P \sigma = \begin{pmatrix} 1 - \sin^2 v \sin^2 \varphi, & \sin^2 v \sin 2\varphi, & -\sin 2v \sin \varphi \\ \sin^2 v \sin 2\varphi, & 1 - 2\sin^2 v \cos^2 \varphi, & \sin 2v \cos \varphi \\ -\sin 2v \sin \varphi, & \sin 2v \cos \varphi, & -\cos 2v \end{pmatrix} \quad (15)$$

$\overline{A'}$, $\overline{B'}$ 可以方便地从 $\overline{A'} = M\overline{A}$, $\overline{B'} = M\overline{B}$ 求出，即

$$\overline{A'} = \begin{pmatrix} \sin^2 v \sin \gamma \sin 2\varphi + \sin 2v \sin \varphi \cos \gamma \\ (1 - 2\sin^2 v \cos^2 \varphi) \sin \gamma - \sin 2v \cos \varphi \cos \gamma \\ \sin 2v \cos \varphi \sin \gamma + \cos 2v \cos \gamma \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\overline{B'} = \begin{pmatrix} \sin^2 v \sin 2\varphi \cos \gamma - \sin 2v \sin \varphi \sin \gamma \\ (1 - 2\sin^2 v \cos^2 \varphi) \cos \gamma + \sin 2v \cos \varphi \sin \gamma \\ \sin 2v \cos \varphi \cos \gamma - \cos 2v \sin \gamma \end{pmatrix} \quad (17)$$

从方程(17)中可知，转镜旋转过程中 $\overline{B'}$ 在 P' 平面上绕中心点旋转，这这就产生了像旋(η 为像旋角)这有害于成像质量。

$$\cos \eta = \frac{(1 - 2\sin^2 v \cos^2 \varphi) \sin 2v \cos \varphi - \frac{1}{2} \sin^2 v \sin^2 2\varphi \sin^2 \varphi}{(1 - \sin^2 2v \cos^2 \varphi)^{\frac{1}{2}}} - \cos 2v (1 - \sin^2 v \cos^2 \varphi)^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

可知，若 $v = 90^\circ$ ，则 $\cos \eta = 1$, $\eta = 0^\circ$ ，无象旋。实际并非这么复杂，大都是些特例：垂直入射($v = \gamma = 90^\circ$)，斜入射($v = 90^\circ$)，倾斜反射镜($\gamma = 90^\circ$)等三种情况。其中以垂直入

射应用最广 ($\gamma = \nu = 90^\circ$)。若建立光轴为 x 轴、 y 轴过中间像面中点的坐标系，而转镜的旋转中心 $O(x_0, y_0)$ ，物空间坐标为 x, y ，象空间坐标为 x', y' 则镜面变换方程的简化形式是，

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos 2\varphi & -\sin 2\varphi & 2\varepsilon \cos^2 \varphi \\ -\sin 2\varphi & \cos 2\varphi & \varepsilon \sin \varphi \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

式中 $\varepsilon = x_0 + y_0 \operatorname{tg} \varphi + r \operatorname{sec} \varphi$ ，其中 r 是转镜的半厚。用这个方程能方便地求出任一物方点经过转镜反射后的象方点坐标来²¹。

最佳镜面尺寸计算

我们讨论正入射的情况，以分幅相机为例。点物经厚转镜反射后，象点的轨迹是巴斯加蜗线，不再是一点。在曝光时间里，这就在沿光轴方向产生离焦，在垂直光轴方向产生像移。若建立图 11 所示的坐标系，则像移 Δl 和离焦 Δa 可分别表示为，

$$\begin{cases} dl = 2(x_0 + r \cos \varphi) d\varphi \\ da = 2(y_0 + r \sin \varphi - h) d\varphi \end{cases} \quad (20)$$

$d\varphi$ 是曝光时间所对应的转镜转角。

转镜的旋转中心就可根据工作角范围内象移离焦的物平方和 (或者代数和) 分别取最小值 (或为零) 的原则来确定 x_0, y_0 ^{17, 18}。结果是一致，即

$$\begin{cases} x_0 = \frac{-r(\sin \varphi_k - \sin \varphi_0)}{\varphi_k - \varphi_0} \\ y_0 = \frac{r(\cos \varphi_k - \cos \varphi_0)}{\varphi_k - \varphi_0} \end{cases} \quad (21)$$

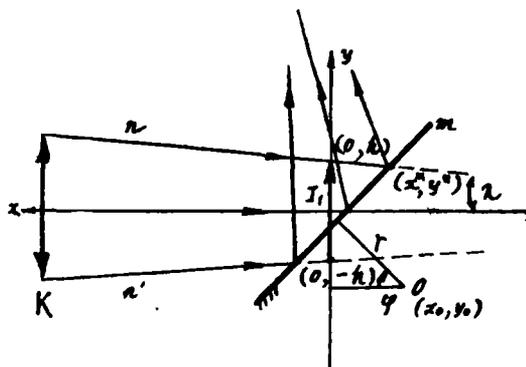


图 11

式中 φ_0, φ_k 分别为起拍和终拍角的一半。

一般说来像移对象质影响严重，所以 x_0 要根据上式求。由于离焦对象质影响不大，所以应根据“镜面尺寸尽可能小”的原则来确定 y_0 ，参看图 11 可推导出

$$\begin{cases} y_0 = -(x_0 \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg}^2 \lambda + r \sin \varphi \operatorname{sec}^2 \lambda + h \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \lambda) \\ L = \frac{\operatorname{sec} \varphi (x_0 \operatorname{tg} \lambda - y_0 + h) - r(\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \lambda)}{1 + \operatorname{tg} \lambda \operatorname{tg} \varphi} \end{cases} \quad (22)$$

h 是中间象的半高， L 是转镜镜面的半宽。

第十三届国际高速摄影和光子学会议上，苏联人 V.V. Trofimenko 提出了一种新的广义记算方法，可用电子计算机计算，可对很多参数作合理的选择确定，可使相机达到高的成像质量，高的信息量和尽可能大相对孔径²⁰。下面对这一方法作一简介。参看图 12 (采用原著的符号系统)。图中 O_r 是转镜的旋转中心， o_i 是中间象中心， δ 是起拍角之半， α 是入射光轴与 x 轴的夹角， φ 是转镜的转角，其它所设如图。可得离焦 Δg 和象移 ΔC 的另外一种形式，

$$\begin{cases} \Delta C = \xi [L \cos \alpha - R \cos (\delta + \varphi)] \\ \Delta g = \xi [L \sin \alpha + R \sin (\delta + \varphi)] \end{cases} \quad (23)$$

ΔC 在工作角 φ_k 内符号有变化, 为此可求F函数的最小值,

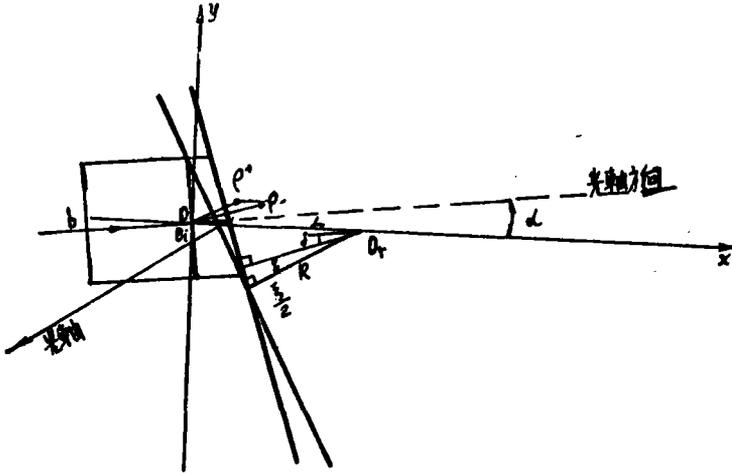


图 12

$$\int_0^{\varphi_k} [L \cos \sigma - k \cos(\delta + \varphi)]^2 d\varphi$$

积分后可得

$$F = aL^2 \cos^2 \alpha + bLR \cos \alpha \cos\left(\delta + \frac{\varphi_k}{2}\right) + CR^2 + dR^2 \cos(2\delta + \varphi_k)$$

此处 a, b, c, d 是确定的系数, R 是转镜的半厚 (内切圆半径) $L = \overline{OO_r}$ 。函数 F 的最小值可用有限参数变化法求出, 这和多变量的函数求最小值一样。 δ, L, R, α 应确定其变化范围:

$$\frac{1}{2} \arctg\left(\frac{r}{t}\right) \leq \delta \leq \frac{\pi}{6}, \quad (r \text{ 是场镜半径, } t \text{ 是场镜到反射点的距离})$$

$$0 \leq \alpha \leq 2\pi,$$

$$0 \leq L \leq L_1, \quad (\text{据结构定})$$

$$R \geq C(\delta, \alpha, L), \quad (C \text{ 是确定多面体形状的函数})$$

通过有限参数的变化, 求出 L, R, α, δ 的最佳匹配来——多参数的最佳匹配是这个方法的独到之处, 是转镜相机计算一大进步。

焦面计算和近似

从方程(13)、(14)、(15)、(16)不难得出这样的结论:

- ①, 垂直入射时 ($R \neq 0, \nu = \gamma = 90^\circ$), 焦面是准线为巴斯加幅线的正柱面;
 - ②, 斜入射 ($R \neq 0, \nu \neq 0$), 或者倾倾斜反射镜 ($R \neq 0, \gamma \neq 90^\circ$), 焦面是巴斯加蜗线为底的锥面;
 - ③, 最一般的情况 ($R \neq 0, \gamma \neq 90^\circ, \nu \neq 90^\circ$), 焦面是一个复杂的空间曲面。
- 这些焦面一是难以加工, 二是锥面还难以放底片, 所以一般用圆柱面, 平面代替 (第一

种情况的焦面可用程控机床加工),

近似焦面的理论, 目前看来有下面三种:

(一), 工作角内, 焦面和代替焦面之间的离焦量之和 (或者平方和) 为最小的原则^{21, 22},

(二), 从拍频的均匀性出当, 希望光学快门在排镜上的扫描速度是常量²³。

(三), 从象质考虑, 希望在工作角范围内仪器光轴和排镜光轴的夹角尽可能小²³。

一般情况下, 三种方法中的任何二种都不能同时满足, 仅在特殊的情况下前两者可以同时满足²³。

各种方法都可借助计算机, 用有限参数变化的方法求得最合理的参数匹配。

象质综合

一般摄影机的象质仅受镜头象差, 衍射极限和底片的影响, 而转镜高速相机, 则受更多因素的影响:

(1) 衍射模糊量²⁷ $\sigma_d = k\lambda A$ 。k 与扫描光阑的形状和状态有关, λ 为平均波长或者主波长, A 是孔径数。

(2) 象差所造成的模糊量 σ_a , 对于长焦距的转镜相机系统, 色差和二级光谱要认真考虑。

(3) 象移所造成的模糊量 σ_c 。

(4) 离焦和代替图离焦所造成的模糊量 σ_g 。

(5) 象旋所造成的模糊量 σ_r (随视场增大而加大)。

(6) 底片本身固有的模糊量 σ_f 。

(7) 目标运动造成的模糊量 σ_m 。

根据误差理论, 可用平均误差积累定律进行综合, 比较符合实验值²¹, 即

$$\sigma^2 = \sigma_d^2 + \sigma_a^2 + \sigma_c^2 + \sigma_g^2 + \sigma_r^2 + \sigma_f^2 + \sigma_m^2 \quad (24)$$

当然, 若镜面平行于转轴, 则 $\sigma_r = 0$, 而扫描相机 $\sigma_c = 0$ 。有时把 $\sigma_c^2 + \sigma_g^2 + \sigma_r^2 = \sigma_{RM}^2$ 中的 σ_{RM} 视为转镜相机所固定的模糊量——转镜模糊量。

转镜相机的象质, 由只计算轴上点而发展为还计算轴外点²¹, 这是画幅增大的必然趋势。

转镜相机的传递函数, 研究的不多, 今后应该加强。苏联人做过开创性研究和实验²⁷, 目前中国也有人研究²⁸, 但由于要考虑的因素太多, 所以距实用阶段还有较大的距离。

四, 转镜相机的种类、水平和渗透

同步分幅相机

大画幅、高信息量和宽的光谱范围是其发展方向。从总信息量来看, 目前达到世界最高水平的是美国Cordin公司研制的121型相机, 参看图13。这台相机的最高拍频 2.5×10^6

fps, 最大画幅尺寸 $64 \times 38 \text{mm}^2$ 记录的画幅数为26幅。采用 $35.6 \times 23.9 \text{mm}^2$ 的等腰三角形截面尺寸。透平可达 10^4 rps。曝光时间分为 $\frac{1}{2}$ 分幅时间和 $\frac{1}{4}$ 分幅时间两种。动达照相分

分辨率，画幅中心为 40 lp/mm，边视场为 20 lp/mm。

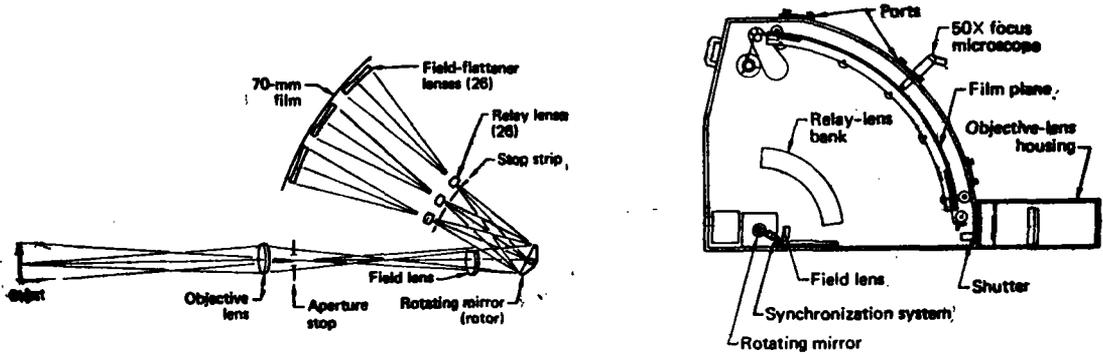


图 13 左为光路图，右为结构图

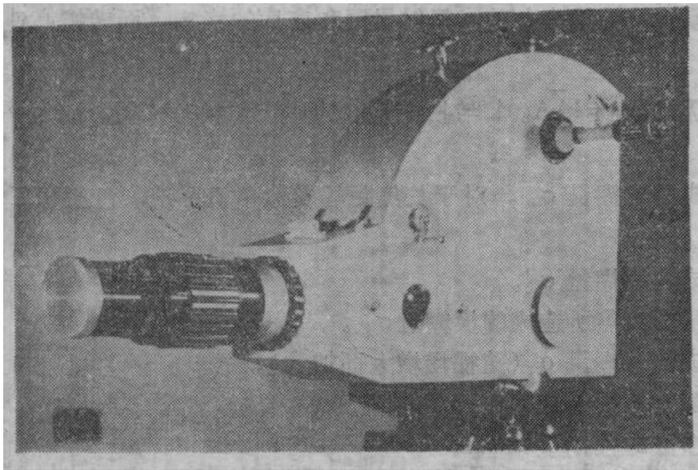


图 14 zsk-29超高速转镜扫描相机的外形图

同步扫描相机

我国最近研制成功的 ZSK-29 型扫描相机，有较高的性能指标，鉴定结果表明，该相机接近国际上同类相机的先进水平，参看图14。时间分辨率的测算值达到 $1.46 \times 10^{-8} \text{sec}$ ，最高扫描速度 $27 \text{mm}/\mu\text{s}$ ，有较好的象质，最高照相分辨率可达 33 lp/mm；有七档转镜速度可供选用，最高可达 $42 \times 10^4 \text{rpm}$ ，最大有效相对孔径 $f/7.75$ ，电控系统产生的拍摄起点分散性（同步精度）不大于 $\pm 10 \text{mm}$ 。这台相机的三个特色是：采用光刻缝盘，缝宽阶梯可调，结构简单使用方便；有打零信号装置，可与其它测试仪器同步；有三种尺寸的铍转镜以供选：矩形截面 $46 \times 43 \times 8 \text{mm}$ ，矩形截面 $20.5 \times 43 \times 8 \text{mm}$ （已提供使用），三角形截面 $13.5 \times 43 \text{mm}$ 。

等待型相机

关于等待理论，A.СДУБОВИК曾作过仔细研究^{14,15}。等待角 γ 为

$$\gamma = \frac{720^\circ}{m} \quad (25)$$

式中 m 是多面体的面数。通常采用一路进光或者二路进光，采用三面体和四面体为多。最近

的主要发展，不仅等待方式增多，分光路的方法已发展有三种方式，

- (1) 分波前法，即分割光阑为 2 部份；
- (2) 分振幅法³¹，即半透半反形成两路光；
- (3)，并行系统法³²。

应该说，分振幅法有更大的优越性，是等待相机的一大进步。图 15 是采用分振幅法的 phc-4 型相机，这台相机可分幅，可扫描，是一种两用相机，——这是发展方向之一。最高分幅频率 5.92×10^6 fps，最高扫描速度是 $3\text{mm}/\mu\text{s}$ 。

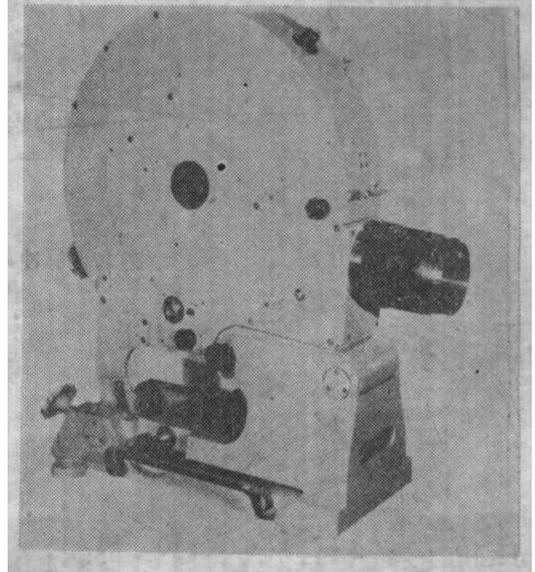
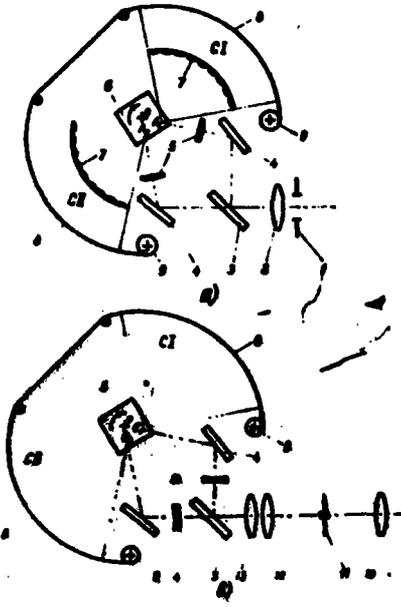


图 15 左为光路图，右为外形图

分幅扫描同时记录相机

美国的 200 型就是这种相机³³，

³⁴。参看图 16

图中有一块透光缝的全反射玻璃（标志 2），8 是转镜，15 是扫描部分底片面，12 是分幅部份的底片面。

这台相机最大扫描速度 $6.9\text{mm}/\mu\text{s}$ ，最大孔径比 $f/11.2$ ，最大分幅频率 5.5×10^6 fps，最大有效孔径比 $f/11.2$ ，画幅尺寸是 $0.4 \times 0.5''$ 。这台相机还可作瞬时光谱记录。分幅、扫描同时记录，便于对照测量。

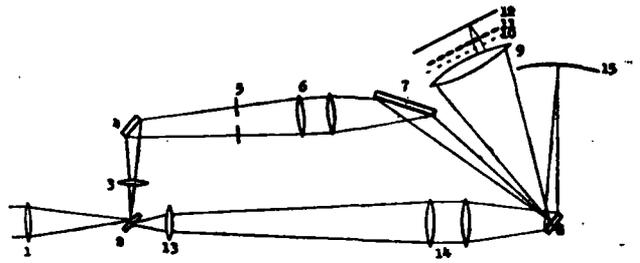


图 16 200 型相机原理图

脉冲马达转镜相机

这是一种“主动同步”相机，与等待型和同步型都有区别。英国 Hadland 公司的 A.E. Huston 研制这种类型的相机，参看图 17。

转镜是靠脉冲马达加速，起动时间为 $100\mu\text{s}$ 。铝合金转镜是转子，定子是空心线圈，用脉冲触发 S.G 击穿，定子电容放电。加速时间和所需转速有关。例如转镜速度要求 $1 \times 10^4 \text{rpm}$ ，加速时间是 $500\mu\text{s}$ 。最高分幅频率可达 $2.4 \times 10^6 \text{fps}$ ；可作扫描相机用，最高扫描速度可达 $1\text{mm}/\mu\text{s}$ 。

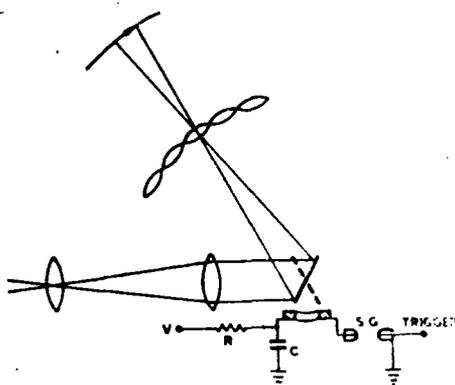


图 17 脉冲马达相机

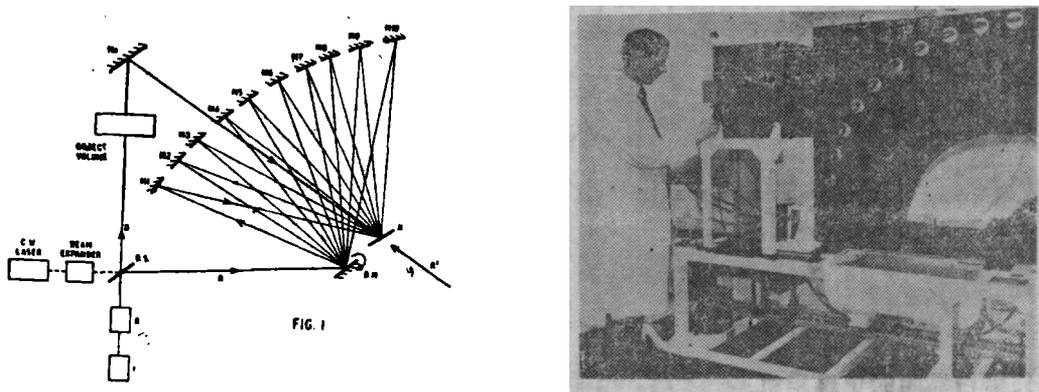


图 18 左为光路图，右为外形图

转镜全息相机

多幅高速全息摄影的关键问题之一是如何分幅。英国人 M.A. lowe 所研制的高速全息相机是转镜分幅的。参看图 18，图中 RM 是转镜， M_1-M_{10} 是固定反射镜，H 是底片，R 是参考光，Objective Volume 是被摄物体，L 是 Q 开关红宝石激光器，B 是扩束器。多幅的取得是靠参考光束的角度编码，相邻两参考光束的夹角约为 9° 。红宝石激光器所产生的脉冲宽度 30ns ，脉冲间隔 $20 \sim 5\mu\text{s}$ ，所以相应的分幅频率是 $5 \times 10^4 \text{fps}$ 到 $2 \times 10^6 \text{fps}$ 。

转镜式网格相机

从理论上说，转镜式网格相机的信息量可以做的很大很大。若网格象是由网格线组成，则总的信息量 I 为

$$I = BNv = m \frac{4v}{\lambda} \quad (26)$$

式中 m 是网格线的条数。可知总信息量是 Schardin 极限的 m 倍。目前世界上分幅频率最

高的相机是美国LLL实验室的R. Katibjian二年前所研制的分幅型变象管相机，频率可达 8×10^6 fps，画幅大小是 2.5×2.5 mm，但画幅数只有3幅，目前正向5幅努力⁴¹。图9所给出的苏联学者研制的FKR-2转镜式网格相机，最高拍频 1.5×10^6 fps，等效16mm标准画幅的分辨率为28lpmm，而画幅数可达200多张，而达到这个指标是十年前的事情。这就是苏联学者和中国学者³⁰仍在不断继续研究这类相机的原因。

转镜式高速焦平面快门相机，参看资料37，38。**转镜——鼓轮式相机**，参看资料39。

转镜式扫描光谱仪。参看资料40。

此外还有高速记录系统。

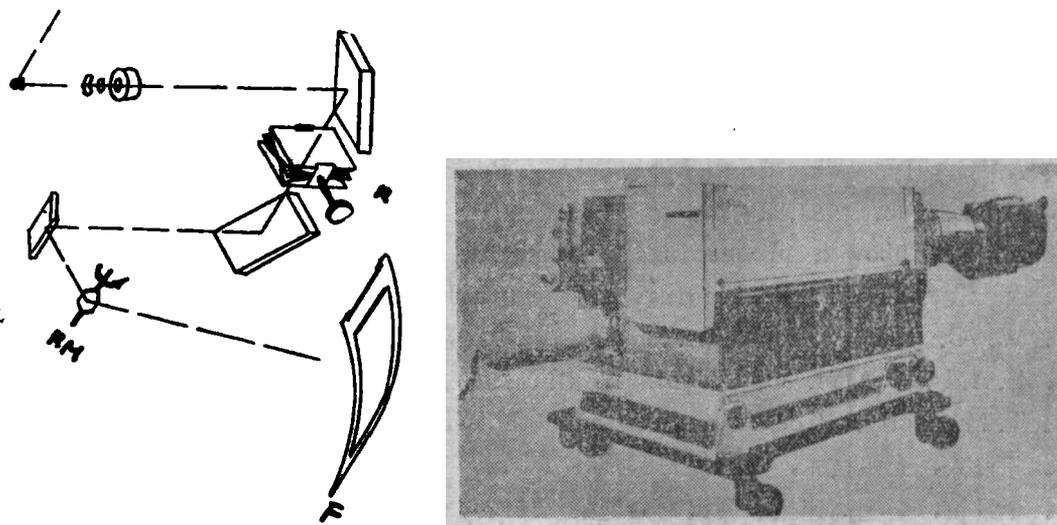


图19 左为光路图，右为外形图

五、发展趋势

1, 转镜边缘线速度的提高，应从下面三个方面着手：提高原有材料（钢、铍、钛）的比强度，研究更为合理的截面形状，探索有更高比强度的材料。

2, 找出更为合理的等待系统，光学加速器系统，及其它可提高信息量的系统和原理。

3, 进一步完善计算方法，找出转镜相机更为合理的判据，可用电子计算机自动设计，以求出最合理的参数匹配。

4, 信息处理系统应与转镜相机相结合，以得到更好的象质，记录系统也要得到相应的发展。

5, 大画幅，高分辨率，高拍摄频率，宽光谱区段仍是今后努力的方向。

参 考 文 献

1. L. Brillouin, Appl. phys., 22(1951), P1108
2. 荆其诚等四人编著，色度学(1979), P39
3. H. Schardin, proceedings of the 3th ICHSP P316-318, 1956,

4. 陈俊人, 光机技术, 1, 1972, P3.
5. B. Brixner, Rev. Sci. Inst., 30(11), 1959, P1046.
6. A. Frez, Y. Portom, Appl. Opt., vol. 5, N05, 1966, P727-
7. T. E. Holland & W. C. Davis, J. Opt. Soc. Am., 48, P365~(1958)
- 8a. 李燕萍, 内部报告
- 8b. 徐兴, 浙江大学学报, 第一期, 1980, P71
9. 陈玉祥, 高速摄影和光子学, 1980, 1, P29-
10. Л. А. Самуров, успехи вручной Фотографии, Том V (1959), P121
11. А. С. Дубовик, П. В. Кевлишвили, Г. П. Шнирман, ЖНИПФК, Том 4 (1959), вып. 1, P12
12. Edward D. Hartfield, Proceedings of the 8th ICHSP (1968). P147,
13. J. P. Tenaud, Proceedings of the 10 th ICHSP, P64-
14. А. С. Дубовик, фотографическая Регистрация Высокоскоростных Процессов, 1964, (有中译本)
15. A. S. Dubovik, proceedings of the 5 th ICHSP, P91~
16. A. S. Dubovik, Proceedings of the 8th ICHSP, P121
17. W. C. Davis, Appl. Opt., vol. 3, N011, 1964.
18. E. A. Igel, Appl. Opt., vol. 4, N09, 1965.
19. T. M. Kelly, Proceedings of the 6 th ICHSP, P72
20. 陈俊人, 光机技术, 1977, 1-2, P85
21. 李景镇, 全国高速摄影会议论文选集 (1978), P26,
22. 许家隆, 光机技术, 1978, 第一期, P38-
23. 许家隆, 光机技术, 1978, 第一期, P28-
24. W. Brouwer, Matrix Methods in Optical Instrument Design, 1969, P1-P7
25. V. V. Trofimenko, Proceedings of the 13th ICHSP & Photonics, P248
26. 李景镇, 关于等速曲线和无离焦曲线在转镜扫描记录中同时实现可能性的研究 (内部报告, 1979)
27. Т. Н. Белинская ЖНИПФК, 1963, N01, P42
28. 毛信强, 浙江大学学报, 1980, 第一期, P83-
29. L. L. Shaw, J. B. Sonderman, L. G. Seppala, Proceedings of the 13th ICHSP & Photonics, P218,-
30. A. S. Dubovik, A. B. Granigg, proceedings of the 8th ICHSP, P128-
31. A. D. Daragan, B. G. Belov, Proceedings of the 13 th ICHSP & Photonics, P237
32. С. И. Белинская, ..., Proceedings of the 13 th ICHSP & Photonics P242
33. L. R. Teeple, SMPTE, vol. 70, N0 12, 1961, P969,
34. C. H. Bagley, Proceedings of the 6th ICHSP P26,
35. M. A. Lowe, Proceedings of the 9th ICHSP, P26-
36. Tsu-Tung Kung, (龚祖同), Proceedings of the 13th ICHSP & Photonics,

P812,

37. J. S. Jacobs, Proceeding of the 5 th ICHSP P335
38. J. S. Jacobs, Proceedings of the 6 th ICHSP, P57~
39. T. Uyemura, Proceedings of the 13 th ICHSP & Photonics, P2-
40. 陈俊人, 全国高速摄影会议论文选集 (1978) P160,
41. R. Kalibjian, Droceedings of the 13th ICHSP & Photonics, P447