

转镜式高速摄影

高速摄影之三

许家隆 主编

科学出版社

1985

内 容 简 介

高速摄影作为科学研究和工程技术各个领域里一种有效的瞬时记录手段,已得到人们的普遍重视和广泛应用。《高速摄影》是一套关于高速摄影的专著,全套共有五个分册:(1)《高速摄影总论与间歇式高速摄影》;(2)《光学补偿高速摄影》;(3)《转镜式高速摄影》;(4)《变象管高速摄影》;(5)《特种高速摄影》。

本分册为《转镜式高速摄影》。本书在理论和实践的范围内系统地讨论了转镜式高速摄影的基本技术和重点应用,共分为六章:条纹摄影机的基本理论和装置;分幅摄影机的基本理论和装置;高速转镜;高速快门;电控制系统;应用。

本书可供从事高速摄影机研制工作的技术人员参考,也可供高等学校有关专业的师生和使用高速摄影机的有关人员阅读。

转 镜 式 高 速 摄 影

高速摄影之三

许家隆 主编

责任编辑 陈德义

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985年1月第一版	开本:787×1092 1/32
1985年1月第一次印刷	印张:10 插页:1
印数:0001—2,750	字数:227,000

统一书号:15031·620

本社书号:3847·15—4

定 价: 2.40 元

编 者 说 明

《转镜式高速摄影》是集体所撰写的一本专著。第一、二、四、六章由许家隆编写，第三章由余鸿远编写，第五章由赵积来、张伯珩编写，全书由许家隆负责主编工作。

审稿由浙江大学的吴敏达副教授和解兰昌、冯俊卿、黄振华讲师担任，在此表示感谢。

本书的内容一部分来自国内外的文献资料，一部分来自我们的工作实践。编写工作多数是在几年前完成的，随着技术的发展也补充了一些新的成就。由于我们学识浅薄和缺乏经验，书中可能有很多缺点、遗漏甚至错误，诚恳地希望读者斧正。

许家隆

1982年5月

目 录

引言	1
第一章 条纹摄影机的基本理论和装置	6
§ 1.1 反射镜扫描理论	6
§ 1.1.1 反射镜扫描时象的几何轨迹	6
§ 1.1.2 象的扫描速度	9
§ 1.1.3 倾斜反射镜的反射镜扫描	14
§ 1.1.4 倾斜光束的反射镜扫描	22
§ 1.2 条纹摄影机中的反射镜扫描系统	30
§ 1.2.1 在“共面光学系统”中	31
§ 1.2.2 在“空间光学系统”中	34
§ 1.3 胶片安置面的形状和坐标	36
§ 1.4 反射镜旋转中心的坐标和镜面尺寸的确定	42
§ 1.5 旋转反射镜材料、形状和镜面的不平度	48
§ 1.5.1 反射镜的材料和形状	49
§ 1.5.2 镜面的不平度	53
§ 1.6 镜面变形后产生的象散以及镜面变形的观察	57
§ 1.6.1 镜面变形后产生的象散	57
§ 1.6.2 象散的校正和镜面变形的观察	63
§ 1.7 条纹摄影机的时间分辨率	66
§ 1.7.1 条纹摄影机中时间分辨率的计算	67
§ 1.7.2 镜面变形对时间分辨率的影响	72
§ 1.7.3 时间分辨率 τ 与象面上一点的曝光量 ϕ 的关系	82
§ 1.8 测量和测量精度	84
§ 1.8.1 扩展速度的测量及精度	84

§ 1.8.2 强度测量	87
§ 1.9 条纹摄影机	87
参考文献	99
第二章 分幅摄影机的基本理论和装置	102
§ 2.1 分幅摄影机设计的理论基础	103
§ 2.1.1 光学共轭和光瞳条件	103
§ 2.1.2 三个主要参数	104
§ 2.1.3 出瞳宽度 a_r 和有效曝光系数 τ_e	114
§ 2.1.4 分幅摄影机中的象移和离焦	120
§ 2.1.5 排透镜架和胶片安置面代替圆半径及坐标位置	126
§ 2.1.6 拍摄频率的不均匀性	139
§ 2.1.7 Schardin 公式和质量评价	142
§ 2.2 分幅摄影机中的等待型扫描系统	145
§ 2.3 多次反射的基本原理	152
§ 2.3.1 光线在楔形间隙内的多次反射	153
§ 2.3.2 光轴在象空间的位置	154
§ 2.3.3 扫描中心的位置	157
§ 2.3.4 焦面的形状	159
§ 2.3.5 象在空间的位置	160
§ 2.3.6 反射镜外形尺寸的计算	161
§ 2.4 分幅摄影机	163
参考文献	180
第三章 高速转镜	182
§ 3.1 概述	182
§ 3.2 转镜支承	185
§ 3.2.1 静压空气轴承	185
§ 3.2.2 静压油膜轴承	186
§ 3.2.3 磁力悬挂	193
§ 3.2.4 滚动轴承	195

§ 3.2.5 三轴承对滚式支承	196
§ 3.3 转镜的驱动	198
§ 3.3.1 电动机通过增速机构驱动	198
§ 3.3.2 高频电动机驱动	202
§ 3.3.3 气动涡轮驱动	204
§ 3.4 转镜	213
§ 3.4.1 镜体材料的选择	213
§ 3.4.2 镜体形状	219
§ 3.4.3 转镜振动	222
§ 3.5 转镜室	225
§ 3.5.1 镜体周围介质的影响	226
§ 3.5.2 密封技术	229
§ 3.5.3 转镜室设计	232
§ 3.6 速度传感器与微调机构	232
§ 3.6.1 速度传感器	233
§ 3.6.2 微调机构	237
参考文献	238
第四章 高速快门	240
§ 4.1 保护性快门	240
§ 4.1.1 机械快门	241
§ 4.1.2 磁电式高速快门	242
§ 4.1.3 爆炸快门	243
§ 4.1.4 改变内全反射性质构成的快门	247
§ 4.1.5 快开快门	248
§ 4.2 克尔盒快门	249
§ 4.3 变象管快门	251
参考文献	252
第五章 电控制系统	253
§ 5.1 概述	253
§ 5.2 速度信号的产生	256

§ 5.3 拍摄速度的自动选择	262
§ 5.4 转镜式高速摄影机的同步控制	276
§ 5.5 转镜旋转速度的测量	287
§ 5.6 各种快门及其控制	293
§ 5.7 转镜驱动系统的控制	297
§ 5.8 电控制系统的可靠性	298
参考文献	299
第六章 应用	300
参考文献	311

引 言

转镜式高速摄影机同间歇式高速电影摄影机、光学补偿式高速摄影机一样,都是采用光学-机械方法去实现高速流逝过程摄影记录的仪器。它是 1939 年 Miller 原理问世之后迅速发展起来的。在此后的二十年中,由于先进的电子学技术、精密的高速机械技术的出现,仪器设计理论和制造工艺的日益完善以及人们对仪器在科学研究、工程技术和国防建设上作用的深刻认识,转镜式高速摄影机获得了前所未有的进展。一些性能良好、结构新颖、用途广泛、工作稳定可靠的摄影机陆续涌现,应用的范围也进一步扩大,成了当时国际高速摄影会议的重要议题。六十年代开始,变象管技术和全息摄影术空前活跃起来,转镜式高速摄影机减慢了它的发展势头。但是,这种传统的高速摄影仪器的改进和提高工作却一直没有停止过。近期的主要工作在扩大光谱波段的记录范围,实现一机多用,提高仪器的分辨率、相对孔径和画幅尺寸,减小仪器的体积和重量,开拓应用领域等。

在《高速摄影》的第一、二分册已经专门介绍了间歇式、光学补偿式高速电影摄影机和鼓轮式摄影机的工作原理,大家可以看到在这几种高速摄影机中,胶片或者是在外力作用下做强迫运动,或者围绕鼓轮一起做圆周运动。在此情况下,摄影机的拍摄频率受到胶片极限加速度或鼓轮材料强度的限制,所以,它们只适用于中低频段的拍摄速度。而转镜式高速摄影机在拍摄过程中胶片始终静止不动,目标象的时-空分布通过反射镜的高速旋转来达到。根据光学上的反射特性,经

过旋转反射镜反射后的光线扫描速度可以加倍,而反射镜的迴转半径又很小(通常不大于2厘米),允许高速旋转,故利用反射镜扫描的方法能够达到 10^7 幅/秒的拍摄频率或50公里/秒左右的扫描速度。这样的拍摄频率要比16毫米棱镜补偿式高速摄影机高一千倍,比16毫米间歇式高速电影摄影机高一万倍;如果与网格摄影机相比,可以有比较高的分辨率和图象分析观察的方便性;与变象管摄影机相比,能有更好的象质和更多的画幅数,而且能进行彩色的记录。表1^[1]所列举的是几种主要类型摄影机的当前最高性能参数,由此可以看出,转镜式高速摄影机的综合性能指标要高于其它类型的高速摄影机。正是这个原因,它一直受到人们的高度重视,并在高速摄影仪器中占据重要的地位。

表1 高速摄影机的性能参数

高速摄影机 类型	拍摄频率 (幅/秒)	画幅数	分辨率 (对线/毫米)	画幅尺寸 (毫米)	最大信息速率 (比特/秒)
间歇式 16毫米	500~1000	>1000	50	9.9×7.2	1.782×10^8
棱镜补偿式 16毫米	12000	>1000	24×28	9.9×7.2	5.748×10^8
转镜式	25×10^6	130	30×68	3.81×11.2	2.17×10^{12}
	1×10^6	26	30×68	38×64	4.96×10^{12}
	2.5×10^6	26	24×30	36×60	3.88×10^{12}
变象管	600×10^6	16	—	7.5×15	1.8×10^{12}

转镜式高速摄影机根据记录在胶片上的图象形式的不同又可分两类^[2]:一类叫作条纹(或扫描)摄影机,一类叫作分幅摄影机。

条纹摄影机记录在胶片上的不是一幅一幅完整的独立照片,而是狭缝范围内被摄目标的连续变化过程。这种摄影的

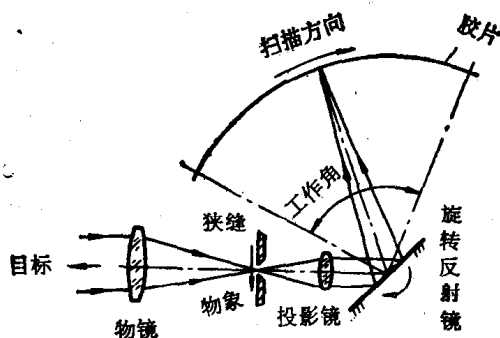


图1 条纹摄影的光学原理

光学原理如图1所示。目标通过物镜成象在狭缝面上，狭缝面上除一条很窄的缝隙(以下称之狭缝，缝宽一般在0.02毫米左右)可以通光外，象的其余部分均被狭缝面上不透光的区域所遮拦。位于狭缝上的象又由投影镜和旋转反射镜反射成象到胶片上。这里，狭缝面置于视场光栏位置，它在象方与胶片面相共轭，在物方与目标相共轭。由于反射镜的旋转轴与狭缝的长度方向平行，所以，当反射镜旋转时，狭缝象就在胶片长度方向上平行移动形成条纹式记录。条纹摄影可以把狭缝上那部分目标的传播速度和方向记录下来，而不能记录狭缝以外的点的任何信息。因此，这种摄影主要是用来拍摄圆对称的目标；或者用来观察狭缝上目标各点动作的同步性。

如要形象地记录目标的完整发展过程，研究某些不对称的高速流逝的物理现象以及目标各部分的相互作用，就要采用分幅摄影技术。分幅摄影的光学原理见图2。被摄目标通过物镜成象在视场光栏平面上，再由场镜二次成象到旋转反射镜的镜面附近，得中间象，排透镜又把中间象(严格地说，应是中间象被反射镜所成的镜面象)成到胶片面上。当反射镜旋转时，反射光线相继扫过一系列排透镜，胶片上就得到与排

透镜数目相同的照片。在此，每一个排透镜就象是一架照象机，相互间以一定的时间间隔依次进行拍摄。由于反射镜的高速旋转，使得来自目标的光线在每一个排透镜上一闪而过，起了光学快门的作用。这些照片在时间和空间上都是彼此独立的，每一幅照片反映了目标在某一瞬时的实际形象，相邻的照片就反映了目标的变化过程。我们根据这些照片，就可以得到现象的结构随时间而变化的规律、目标不同部位的温度

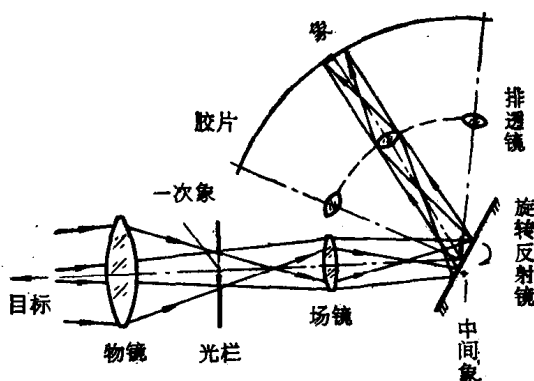


图2 分幅摄影的光学原理

变化和其它的物理参数。

在对拍摄的照片进行观察分析时，我们还可以把它直接地或经过适当的改制，以放慢几万倍、甚至几十万倍的速度放映出来。譬如：以每秒 1.2×10^6 幅的频率去拍摄，再以每秒 24 幅的频率进行放映，这样，时间就延长了 5 万倍，这种时间的延长可以和光学、电子学的放大相比拟，所以也有人称高速摄影为“时间放大术”。经过放大，人们就可以从容不迫地观察到高速运动目标的瞬时现象。

转镜式高速摄影机是一种综合性的光、机、电互为一体的摄影仪器。为了把高速流逝过程清晰地、不失时机地记录到胶

片上, 我们不但要设计符合使用条件的象质良好的光学系统和总体结构, 精密的高速运动的转镜装置, 能使仪器各部分按预定程序协调动作的电控制系统, 还要有减少杂光干扰、保护拍摄成果的先进结构的快门以及保证仪器正常工作、方便使用所必需的光机电附属设备。

参 考 文 献

- [1] S. J. Nebeker, Techniques and Applications of Rotating Mirror Cameras, Proc. of the 13-th Intern. Congress on High Speed Photography and photonics, Tokyo, 1978, 57—67.
- [2] R. F. Saxe, High-Speed Photography, London, 1966.

第一章 条纹摄影机的基本理论和装置

条纹摄影机是转镜式高速摄影机中比较简单的一种。这种简单只反映在光学系统以及与光学系统有关的机械结构上。除此之外，象电控制系统、旋转反射镜系统和快门系统都与分幅摄影机有同样的要求，特别是反射镜扫描理论也完全适用于分幅摄影机。所以，条纹摄影机的基本理论是整个转镜式高速摄影机设计的基础。

§ 1.1 反射镜扫描理论

旋转反射镜对于转镜式高速摄影机的重要性与棱镜补偿式高速摄影机中旋转棱镜相当。如果我们了解到旋转棱镜在仪器中的作用以及它对成象规律的影响，也就了解了棱镜补偿式高速摄影机的关键；同样，只要掌握了旋转反射镜的扫描特性，也就容易理解转镜式高速摄影机的主要问题以及解决这些问题的方法。因此，首先必须详细讨论反射镜扫描时的一些理论问题，例如象的几何轨迹和象的扫描速度等。至于反射镜在高速旋转条件下的变形与带来的影响将在 § 1.6, 1.7 专门介绍。

§ 1.1.1 反射镜扫描时象的几何轨迹

假如反射镜是一个没有厚度的几何平面；或者旋转轴位于反射镜的镜面上，那末，在反射镜旋转过程中，经镜面反射

后的扫描象就始终沿着圆柱面做匀速运动,这是用几何光学知识可以得到证明的问题。但是,在转镜式高速摄影机中采用的反射镜都有一定的厚度;根据反射镜高速旋转(高于500转/秒)所提出的动平衡要求,也不允许旋转轴偏离镜体的重心^[1]。为此,必须讨论在上述条件下反射镜扫描时象的运动规律,才能得出符合实际的结果。

早在1917年, Bonasse 已经对此做过阐述^[1]。此后又有不少学者专门讨论过这方面的问题^[2-6]。归纳起来,大致有两种数学分析方法:一种是利用极坐标系统,它可以形象地表达反射镜扫描时象的几何轨迹,并且由此来比较象面位置与记录圆弧之间的差别也较为方便;另一种是利用直角坐标系统,这是大家比较熟悉和习惯的方法。两种方法都能得到相同的结果,只是表达的方式不同而已。下面就以直角坐标系统来讨论反射镜扫描时象的几何轨迹。

在图1.1中,设直角坐标系统的 x 轴为入射光学系统的光轴; $m-m$ 为旋转反射镜的镜面; $o(x_0, y_0)$ 为反射镜的旋转中心; r 为反射镜转轴到镜面的垂直距离; h 是象的半宽

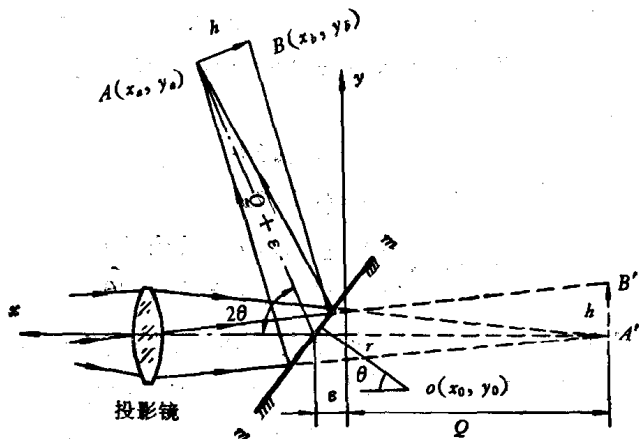


图 1.1 反射镜扫描时象的轨迹

度; θ 为镜面法线与 x 轴的夹角.

根据光学上的反射原理, 镜面 $m-m$ 可以看作是没有反射镜时象点 A' (或 B') 与实际象点 A (或 B) 成等距离的点的轨迹, 由此可得 $A(x_a, y_a)$ 的轨迹方程

$$x_a^2 + y_a^2 - 2\epsilon x + 2\epsilon Q - Q^2 = 0 \quad (1.1)$$

其中
$$y_a = (x_a - \epsilon) \operatorname{tg} 2\theta \quad (1.2)$$

$$\epsilon = x_0 + y_0 \operatorname{tg} \theta + r \sec \theta \quad (1.3)$$

为了应用方便, 可把轴上象点 A 和边缘象点 B 写成参数方程的形式

$$\begin{aligned} A(x_a, y_a) & \begin{cases} x_a = 2\epsilon \cos^2 \theta + Q \cos 2\theta \\ y_a = (\epsilon + Q) \sin 2\theta \end{cases} \\ B(x_b, y_b) & \begin{cases} x_b = 2\epsilon \cos^2 \theta + Q \cos 2\theta - h \sin 2\theta \\ y_b = (\epsilon + Q) \sin 2\theta + h \cos 2\theta \end{cases} \end{aligned} \quad (1.4)$$

公式 (1.4) 是一组超越函数方程. 如果用极坐标表示, 可以清楚地看出, 在反射镜旋转过程中象点的位置沿着 Pascal 蜗线移动, 其值取决于反射镜的转角 θ .

当 (1.3) 式中 $\epsilon = 0$ 时, 即在反射镜旋转过程中镜面始终迴绕着坐标原点, 这只有在 $r = 0$ 时才有可能, 于是方程 (1.4) 简化为

$$\begin{aligned} A(x_a, y_a) & \begin{cases} x_a = Q \cos 2\theta \\ y_a = Q \sin 2\theta \end{cases} \\ B(x_b, y_b) & \begin{cases} x_b = Q \cos 2\theta - h \sin 2\theta \\ y_b = Q \sin 2\theta + h \cos 2\theta \end{cases} \end{aligned} \quad (1.5)$$

方程 (1.5) 说明, 当反射镜的厚度为零时, 轴上象点 A 的几何轨迹是以坐标原点为圆心, Q 为半径的圆; 边缘象点 B 的几何轨迹是以坐标原点为圆心, $(Q^2 + h^2)^{1/2}$ 为半径的圆. 假如反射镜有一定厚度, 象点的运动轨迹就不可能是圆.

§ 1.1.2 象的扫描速度

设参数 $x_0 = -2.2$, $y_0 = -0.5$, $r = 4$, 利用公式 (1.3) 可以算出在不同 θ 情况下镜面与 x 轴的截距 ε , 其值见表 1.1. 图 1.2 是按表中数值绘成的 ε 变化曲线. 由此可见, 随着反射镜的旋转, 轴上主光线反射点的位置会沿着光轴移动, 并且是非线性的. 这就意味着不同的转镜角位置, 轴上主光线经镜面反射后的光路长度——扫描半径不是一个常数. 扫描半径的不同, 标志着象的扫描速度的不同, 通常称它为扫描速度的不均匀性. 这种不均匀性会导致分析上的误差, 所以必须作出精确的计算, 以便对测量值进行修正.

表 1.1 ε 值

θ (度)	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
ε (毫米)	1.78	1.77	1.78	1.82	1.88	1.96	2.07	2.20	2.38	2.60

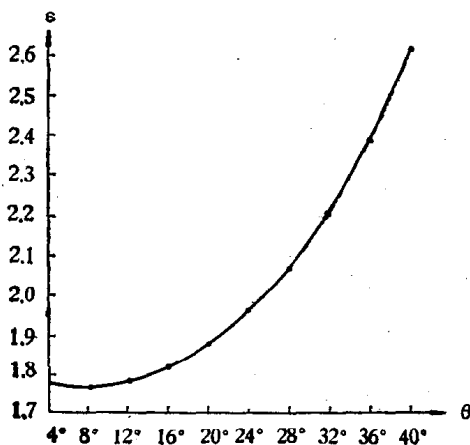


图 1.2 ε - θ 曲线

象的扫描速度可分两种情况来讨论：一种是计算象在实际轨迹上的扫描速度；另一种是计算象在记录面，即胶片面代替圆上的扫描速度。这是因为在实际仪器中，胶片往往并不放在超越曲面上，而是安置在代替圆上，所以，在代替圆上度量象的扫描速度更为符合分析的需要。

一、象在超越曲线上的扫描速度 V

很清楚，象在超越曲线上的扫描速度可表示为

$$V = \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1.6)$$

而
$$\frac{\partial s}{\partial \theta} = \left[\left(\frac{\partial x}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \theta} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (1.7)$$

式中 $\partial \theta / \partial t = \omega$ 为反射镜的角速度(弧度/秒)。

根据图 1.1 和公式 (1.3) 及 (1.4)，B 点的 $\partial x / \partial \theta$ ， $\partial y / \partial \theta$ 分别为

$$\frac{\partial x_b}{\partial \theta} = 2[(y_0 - h) \cos 2\theta - (x_0 + Q) \sin 2\theta - r \sin \theta]$$

$$\frac{\partial y_b}{\partial \theta} = 2[(x_0 + Q) \cos 2\theta + (y_0 - h) \sin 2\theta + r \cos \theta]$$

将 $\partial x_b / \partial \theta$ ， $\partial y_b / \partial \theta$ 代入 (1.6)，(1.7) 式中，得到 B 点在超越曲线上的扫描速度为

$$V_b = 2[(x_0 + Q)^2 + (y_0 - h)^2 + r^2 + 2r(x_0 + Q) \cos \theta + 2r(y_0 - h) \sin \theta]^{1/2} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1.8)$$

同理，轴上点 A 的扫描速度为

$$V_a = 2[(x_0 + Q)^2 + y_0^2 + r^2 + 2r(x_0 + Q) \cos \theta + 2ry_0 \sin \theta]^{1/2} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1.9)$$

二、象在胶片代替圆上的扫描速度 V_r

下面我们只讨论轴上象点，并变换图 1.1 中的直角坐标