

高速摄影译文集

I

转镜扫描原理

科学出版社

高速摄影译文集

特種計量原理

.....

高速摄影译文集

I

转镜扫描原理

李 德 熊 译

科 学 出 版 社

1 9 6 5

内 容 简 介

本文集共包括 21 篇论文，主要是选自苏联、美国有关杂志。所选论文可分三部分：前 11 篇介绍了转镜扫描高速摄影机的一些典型的原理和结构；其次 8 篇文章主要介绍了这种摄影机光学系统的设计和计算；最后 2 篇则介绍了反射镜高转速两种不同的获得方法。

本书可供有关专业的科学研究人员、高等院校师生以及设计制造高速摄影机的工程技术人员等阅读。

高 速 摄 影 译 文 集

I

转镜扫描原理

李 德 熊 译

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 117 号

北京市书刊出版业营业许可証出字第 061 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

*

1965 年 4 月第 一 版 开本：850×1168 1/32

1965 年 4 月第一次印刷 印张：6 3/4 插页：1

印数：0001—2,100 字数：175,000

统一书号：15031·182

本社书号：3187·15—4

定价：[科七] 1.20 元

譯 序

許多科学仪器的任务，在于将人类感官的感受能力扩展到依靠感官的本能所无法进行感受的领域中。高速摄影仪器便是这样一类的仪器，它扩展了人眼对高速过程的感受能力。如果认为人眼的视觉残留时间为十分之一秒的话（也就是说，人眼的时间鉴别率为十分之一秒），则应用现代的高速摄影仪器，可以将时间鉴别率提高 10^6 倍，甚至更高。因此，它使人们有可能对现代的许多重要科学技术任务进行细致深入的研究，例如：研究高速燃烧和爆炸过程，研究各种火花和电现象，高速机械运动和动力学的研究，气体动力学的研究，以及核武器和氢武器的试验等等，成为解决这些重要任务广泛应用的有效研究工具。这也就是为什么高速摄影虽是摄影技术中的一门比较年轻的分支，但却得到各国极大的重视，并且在不断满足测量技术所提出的愈来愈苛的要求过程中，得到了极大的发展。

从 1952 年起，每隔二年，先后在华盛顿、巴黎、伦敦、哥隆（Köln）和华盛顿，召开了专门性的国际学术会议，讨论高速摄影的方法、仪器和实际使用中的学术问题，并交流这方面的经验。会后并出版会议学术论文集刊。据报导，第六届国际高速摄影会议系于 1962 年 9 月在荷兰海牙附近的一个小城召开的。第七届会议则将在 1964 年在奥地利的维也纳召开。

苏联是从第三届（1956 年）起才开始参加这一会议的。在这一科学领域中也已有较高的水平。目前苏联已经有 CKC, ФП, СФР, ЖФР, ЛВ, РКС 等型以及利用光电变换器等根据各种不同原理设计制造的、成系列的高速摄影机，拍摄频率由每秒几千幅到上亿幅，可以满足各方面的科学研究的不同需要。

对我国来说，解放前高速摄影是科学技术领域中千百个空白

• • •

点中的一个。新中国成立以来，党领导我們要迅速补齐缺門，建立一个独立完整的現代科学体系，并很快地赶上世界先进水平。这样，无论就高速摄影本身或它为之服务的所有科学部門而言，都要求迅速掌握并发展这样一門科学。

現代的高速摄影机在工作原理和結構形式等方面都是极为不同的*。对于拍摄一张曝光時間极短的高速象片来說，可以用持續時間极短的火花(脉冲)光源来照亮本身不发光或亮度不够的被摄物体；或者用瞬时开闭的无慣性高速快門(Kerr 盒或光电变换器)去控制来自本身发强光的拍摄对象的光綫的通过。但是在多数情况，要研究分析一个高速运动，仅仅依赖于拍摄一张滿意的靜止的照片是不够的，还希望得到一組連續的照片（一組連續的分幅照片，或是不分幅的連續軌迹記錄）。获得連續高速摄影的原理目前主要有下列几类：

1) 重复单次摄影——即將若干个单次摄影的装置組合起来（例如 Cranz-Schardin 型火花摄影机组或是 Kerr 盒組），按先后次序順序拍摄同一高速現象。这种方法的特点是拍摄頻率可以不必恆定，在一个摄影系列中可以根据过程的特性而加以調整，而缺点則在于仪器的設備費用随着所需幅面的数目而成比例地增加，实际常由于受空間的限制而数目有限。

2) 高速电影摄影——为了达到較高拍摄頻率，在这类高速摄影机里底片是連續不断地匀速移动的，因此必須要有使物象在曝光時間內相对于底片无相对运动的补偿装置（例如在民主德国 Pentazet 型摄影机里应用旋轉反射鏡环，在苏联 CKC-1 型摄影机里应用旋轉稜鏡）。这类摄影机的特点是可以得到能直接放映的数量較多的画面，但拍摄頻率不能太高，一般到 2×10^4 幅/秒（也可以用橫向分列的办法提高拍摄頻率，例如 Pentazet 中分成五列，可达 4×10^4 幅/秒，但这时拍得的結果已不能直接用于放映）。

在这种摄影机的基础上，进一步提高拍摄頻率的是所謂“鼓輪

* 关于高速摄影的一般介绍，可参看“Приборы и техника эксперимента”，1960，№ 5，3—15。

摄影机”，即只有一段接成环形的底片，安装在一个旋轉鼓輪的外表面或內表面上。这样可大为提高鼓輪（即底片）的运动速度，但这时由于底片长度有限，因此，也就限制了总的画面数目。

3) 轉鏡扫描型高速摄影——在这类原理的仪器里，底片保持固定不动，而用光学的方法（旋轉反射鏡）使成象光束以极高的速度沿着底片跑动（扫描）。由于光学的方法可以“放大”（加速）光綫的运动速度（利用反射特性），因此这种方法可达到 10^6 — 10^7 幅/秒以上的拍摄頻率。

4) 光柵高速摄影——有时也称做“无画面法”高速摄影。这种摄影机的基本原理是利用光柵将画面分成很多独立的以一定形状分布的单元（例如許多平行的綫条或許多小点），因此曝光时底片上只有某些单元部分感光。連續摄影时画面相对于底片依次向某一方向移过一个单元寬，使先后画面相岔地迭合在一张底片上，直到底片全部均已曝光为止。

这种原理的特点是，由于每拍摄一个画面以后，物象相对于底片只需移过一个单元的寬度而不是整个画面的寬度，因此可以达到极高的拍摄頻率（达 10^5 幅/秒以上），同时拍摄頻率与画面大小无关，但是所得到的結果必須经过用同样的光柵来分象的手續才能得到完整的画面概念。

5) 应用光电轉換器*——将螢光屏分割成若干部分，先后成象。

关于高速摄影的外文論文，經常散見于各种有关杂志中。但是，目前国内有关这方面的中文資料，除了有英国 G. A. Jones 于 1952 年所編的“高速摄影学”一书的中譯本外，別的就很少看到了。因此使有关这方面的教学、研究和使用的工作者感到一定的不便。譯者不避拙陋，选择了这样一些論文，目的就想为下列三方面的同志提供一些最初步的中文參考資料：

1) 为有关专业的师生提供一些教学參考文献；

* 参看“Journal of SMPTE”, Vol. 68 (1959), No. 1, 1—5.

2) 为研究、設計和制造这类仪器的同志介紹一些典型的原理和設計計算的方法;

3) 为使用这类仪器的同志进一步了解仪器的結構和影响拍摄結果的原理誤差提供一些考虑的綫索。

譯者把自己选择的范围限制在“轉鏡扫描”这一种原理以內, 因为考虑到关于高速电影摄影尚有 A. A. Сахаров 所編 “Высокоскоростная киносъемка”, 1950. 一书, 而这两种原理似乎是目前較为大家所迫切需要了解的。論文主要选自 “Proceedings of the Third International Congress on High-Speed Photography” 和苏联科学院所出 “Успехи научной фотографии” 第六卷(为苏联第一次全国高速摄影与电影會議的报告專輯), 以及 “Journal of Society of Motion Picture and Television Engineering”, “Journal of Scientific Instruments” 和 “Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии” 三种杂志各期。所选的 21 篇論文大致可以分成三部分。前 11 篇介紹了轉鏡扫描高速摄影机的一些典型的原理和結構; 关于这方面的文章是最多的。其次的 8 篇文章主要介紹了这种摄影机光学系統的設計和計算。最后 2 篇則介紹了反射鏡高轉速两种不同的获得方法。

譯文的第九篇为魏順根、侯洵譯校的; 第四和十九两篇則曾参考了有关同志的譯稿。譯者对此表示衷心謝意。由于譯者外文和业务水平限制, 选择的面是比較狹的, 已选譯的論文也不一定尽都恰当, 特別是譯文中, 一定还有很多錯誤或粗糙的地方, 希望讀者指正。

目 录

譯序.....	(v)
鉴别率为 10^{-8} 秒的简单的象扫描摄影机(記时仪)	
..... B. Brixner (1)	
ФП-22 型高速电影摄影机.....Л. А. Самуров (7)	
高速电影摄影时的一些同步方法(使用 ФП-22 型摄影机的 經驗)	С. Р. Жуковский (19)
СФР 型超高速摄影记录装置	В. Б. Ликоренко (27)
高速立体摄影和电影放映.....	
.....В. В. Гарнов, А. С. Дубовик (37)	
一种高速轉鏡分幅摄影机	В. Brixner (43)
一种新的分幅摄影机.....	М. С. Kurtz (53)
多次反射時間放大仪.....	
...А. С. Дубовик, П. В. Кевлишвили, Г. Л. Шнирман (61)	
ЖЛВ-1 型高速等待型時間放大仪	
.....Г. Л. Шнирман, А. С. Дубовик, П. В. Кевлишвили, А. Б. Граниг, И. А. Королев (71)	
光学加速器和超高速电影摄影机的新原理.....	
.....Л. А. Самуров (80)	
旋轉反射鏡摄影机的理論和設計.....	
.....Н. Edels, D. Whittaker (91)	
研究电弧放电的轉鏡扫描摄影机的設計和結構.....	
.....М. McChesney, M. Coltman (102)	
旋轉反射鏡分幅摄影机中最大画幅頻率和鉴别率之間的关 系.....	Н. Schardin (114)
反射鏡扫描的時間放大仪和摄影記时仪发展中的一些問題	

.....	Г. Л. Шнирман (118)
反射鏡扫描的基本理論	А. С. Дубовик (129)
反射鏡扫描的一些理論問題	А. С. Дубовик (145)
象轉移時間放大儀中的象移	А. С. Дубовик (157)
象轉移時間放大儀的計算	
.....	А. С. Дубовик, А. Б. Граниг (168)
关于象轉移時間放大儀中扫描中心位置的确定和拍摄頻率 的不均匀性	А. С. Дубовик, А. Б. Граниг (185)
磁力悬挂高速轉子	А. Е. Huston (196)
用于高速摄影記錄裝置中的小型透平发动机	
.....	С. Н. Сидоров (203)

鉴别率为 10^{-8} 秒的简单的象 扫描摄影机(计时仪)

B. Brixner

摘 要

本文介绍一种结构简单使用方便的象扫描摄影机的设计。这种摄影机无论安置在普通的桌子上、光具座上或是专门设计的架子上均可应用。这种摄影机的主要部分是光学传递部分，它包括一个将由象点来的光线改变成平行光束的准直仪透镜，一个使这些光束在一圆弧上扫描的旋转反射镜，以及一个对无穷远调焦的用以接受反射光束的盒形相机。扫描光束构成沿底片平面移动的象，同时这些象均处于聚焦的清晰度之内。准直仪透镜的目标可以就是所要研究的对象也可以是它的象，它的范围可以方便地用一个狭缝来限制。摄影机系按最大扫描速度为 2—10 毫米/微秒以及口径为由 $f/2.5$ 至 $f/10.0$ 来设计的。在用以研究爆炸现象中不难得到 10^{-8} 秒的时间鉴别率。

应用象扫描摄影机来研究爆炸现象在近年来有很大的发展。由于越过底片范围的象的最大速度高达 10 毫米/微秒，即用底片移动式摄影机所不能达到的大小，就需要采用旋转反射镜。最普通的摄影机设计是用一个多面旋转反射镜将一个狭缝的象沿圆柱形焦面扫描，以给出一张一个座标为时间、一个座标为空间的记录。在这种设计中，狭缝、二次成象透镜、旋转反射镜轴以及底片架之间的位置需要准确和固定不变。这种型式的摄影机中，扫描速度从底片一端至另一端的变化可达 10%。精确延时和点火回路的发展使得起爆和旋转反射镜面之间有可能取得协调。这就使

得摄影机中可以采用很短的窄条底片，并且为下面所述的简单設計鋪平了道路。

摄影机的光学系統

为了对本文所述的摄影机有一个全面的了解，首先需考虑所采用的透鏡，一个普通的正光摄影物鏡的最重要的設計特点。摄影正光性的发展过程已有 100 多年，并且已經达到很高的完善程度。在这方面发展的主要努力方向在于增大口径、視場角，减小象面弯曲，和增加整个画面內的象的清晰度。这些特性对所述象扫描摄影机是最为需要的，因此对設計來說在透鏡口径和焦距方面有很大的选择可能是十分有利的。另外，已有很多种精密的軟片和干板的架子，因此使摄影乳剂能够容易地和精确地保持在与透鏡軸垂直的焦平面內。

現在我們来討論图 1 中的光学示意图。图中包括一个摄影物鏡透鏡 L 和一个位于該透鏡主焦点上的平坦底片平面 F 。我們看到射到透鏡上的各平行光束不管它的方向如何均为透鏡折向底片平面上的焦点，如 I_A 、 I_B 和 I_C 。由于透鏡設計者的成就，在透鏡質量很高时，所有的象將具有十分优良并且接近于相同的清晰程度。如果这一盒形相机繞一位于透鏡节点平面內且与光軸垂直的枢軸

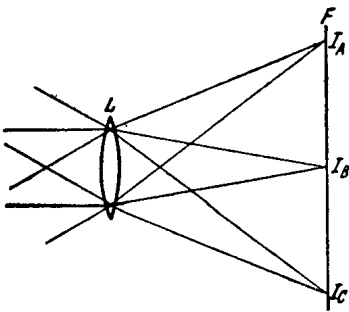


图 1 盒形相机对射到透鏡上的平行光束的光学作用

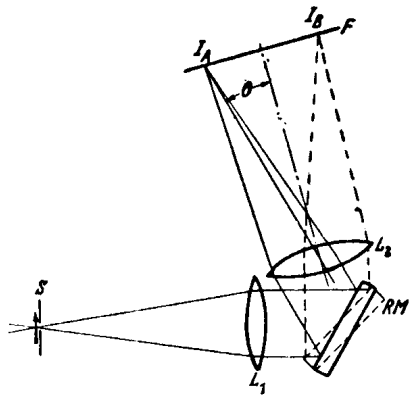


图 2 旋转反射镜象扫描摄影机光学原理图

旋轉，則象將沿底片掃描，這樣便得到一個十分簡單但是可用的象掃描攝影機。代替盒形相機的旋轉，我們可以用一旋轉反射鏡而得到更高的掃描速度。

圖 2 表示攝影機的光學原理圖，攝影機有狹縫 S ，使每一象點來的光束變成平行光束的攝影物鏡 L_1 ，和將這些平行光束反射到透鏡 L_2 去的旋轉反射鏡 RM ，平行光束經 L_2 後聚焦於底片平面 F 。當旋轉反射鏡 RM 繞其軸旋轉時，可看到象從 I_A 移到 I_B 等等，於是按所示方向掃過底片，同時在所有各點均保持在焦平面內。對這一系統來說唯一嚴格要求的是將透鏡精確地聚焦於狹縫和焦平面。透鏡軸綫应当在圖面內，反射鏡軸則垂直於該平面，但這些方面的誤差只是引起了余弦的修正，這個修正對小角度時可忽略不計。這些誤差在對靜態或動態情況下得到的試驗負片進行檢查以後可很容易發現和校正。對透鏡和旋轉反射鏡的側向位置無嚴格要求，只要避免光束過於昏暗即可。

掃描速度和畸變的計算

象在底片上的掃描速度按公式 $4\pi f \sec^2\theta \times \varphi$ 來計算，式中 f 為攝影機的透鏡的焦距， θ 為主光綫與透鏡軸間的夾角，而 φ 則為反射鏡的速度，以每秒轉數計。由公式可見掃描速度在底片中心（光軸與之相交點）達最小值，并向兩邊增大。當 θ 為 10° 時，掃描速度增大 3%， θ 為 10° 是這一設計的攝影機的实际角度。

狹縫象的長度在其沿底片掃描時是變化的，并由公式 $I_0 \sec\theta$ 所決定，式中 I_0 為底片中心處的狹縫象的長度，在一般用途中透鏡是綫性的。其結果為桶狀畸變，當 θ 為 10° 時狹縫象的長度將增大 $1\frac{1}{2}\%$ 。如果 L_1 和 L_2 （圖 2）的光軸是平行的，則一個同樣角尺寸（即離軸為 10° ）的柵格的靜態象當然會是直綫性的。

上述時間和空間上的畸變在大多數測量中一般並不考慮，但是如果需要較高的精確度，則可很容易對誤差加以修正。上述攝影機現應用於離軸最大為 5° 的情形，因此時間和空間上的畸變相應地要小於 1% 和 $\frac{1}{2}\%$ 。

摄影机的结构

按上述光学原理设计的旋转反射镜象扫描摄影机的结构如图3所示。摄影机盒的侧面已取去以便显示出各组成部分的布置。左上方的圆筒中为准直仪透镜。在此处它是一个焦距十分长的可变焦透镜，因此狭缝可放在几米以外的目标处。准直仪透镜的正下方可以看到一个斜的稜镜，用来使由一平面透射光栅所构成的光谱对准中心。这个光栅可用以将摄影机改成一个象扫描的摄谱仪。旋转反射镜位于相机左端的小室内，反射镜的尺寸为 $\frac{1}{2} \times 2 \times 2$ 吋，由一个 M-B 研磨机透平 (M-B Products Company, Detroit, Michigan, U. S. A.) 来驱动，可达每秒 500 转。其后是安装在隔壁上的 20 吋 $f/5.6$ 的摄影透镜，带有透镜间快门。在最右边的 4×5 吋的底片架是用在一般固定式摄影机 (metal view camera) 中的通用式样。箱盒顶部安有一个螺管线圈，用以远距离控制释放快门。

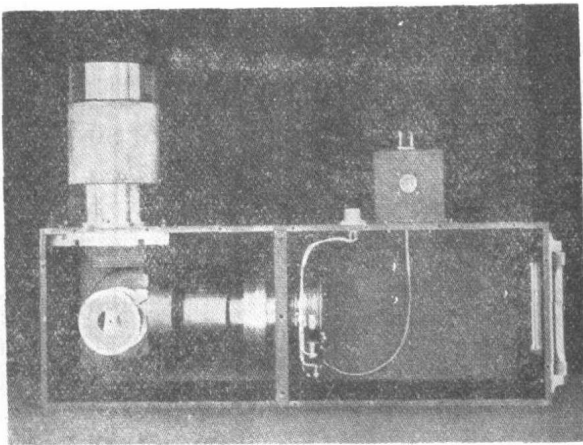


图3 焦距 20 吋和口径 $f/10$ 的简化旋转反射镜象扫描摄影机的内部照片图

同步器系安装在对着反射镜轴和透平室的端部。这一装置的主要部分是一个有 0.006 吋宽的辐向长孔的圆盘。这一圆盘安装

在反射鏡軸的端部，并可相對於反射鏡調節它的相位，一個光源和固定狹縫安裝在圓盤的一邊，而在其另一邊則是一個光電倍增管。在圓盤每轉一轉中，當狹縫和長孔位於一條綫上時，即可得到一個電壓脈沖，用以使爆炸起爆電流的輸出達到同步。整個攝影機可以繞准直儀透鏡旋轉，因此在目標處的狹縫可以很容易地規正成與底片上的象的掃描方向相垂直。

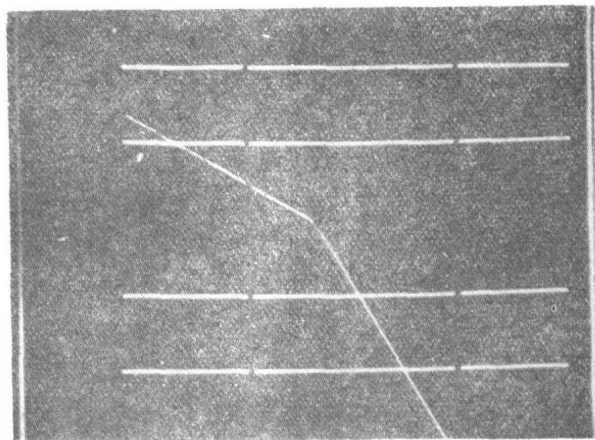


圖 4 用簡化象掃描攝影機得到的記錄的照片圖樣品

圖 4 中的照片是為測量衝擊速度而取得的記錄樣品*。邊上垂直方向的直綫記錄了掃描的方向。四條水平軌迹記錄了衝擊波到達一個金屬板的表面的相對時間。這些參考直綫中的間斷是用以確定象的放大倍數的依據。那條斜綫是衝擊和自由表面速度的記錄。

結 論

上述簡單象掃描攝影機是一個十分有價值的研究爆炸的工具，儘管它有明顯的局限性。自從 1948 年制成第一架以來已有幾種不同的型式，其中最流行的一種（如上述）已實際應用了五年。

* Walsh, J. M. and Christian, R. H., Phys. Rev., 97, 1544, 1955.

摄影机是按最大扫描速度为 2—10 毫米/微秒以及口径由 $f/2.5$ 至 $f/10.0$ 设计的。在用以研究爆炸现象中不难得到 10^{-8} 秒的时间鉴别率。尽管在透镜设计上水平的提高，在大口径透镜的情形时，在理论鉴别率和实际鉴别率之间仍有一个相当大的距离。在上述 $f/10$ 摄影机中得到了一个相当地接近理论鉴别率的接近值。这种摄影机的高光学效率和易于操作大概是它之所以流行的主要原因。

(译自: Proceedings of the Third International Congress
on High-Speed Photography, 1957, 289—293)

ΦΠ-22 型高速电影摄影机

Л. А. Самуров

以很大的頻率在电影胶片上进行拍摄的摄影机，已經知道有很多种构造^[1]，但是实质上这些摄影机都不是电影摄影机，因为利用它們所拍得的影片不可能放映。

电影的摄制要求胶片上的画面以一定的間距順序排成一行。通常在胶片移动的摄影机中，为了想得到大的拍摄頻率，画面在高度上剧烈縮小，同时在寬度上也用各种光学方法加以分割。画面布置成几排，就不可能在銀幕上观看所摄制的影片。此外，专家们早已得出結論，研究快速消逝的过程，单凭观察个别靜止的象不能够得出关于所发生的現象的完整概念，只有能够事后观看到所摄下的运动中的过程的电影摄影，才能以取得新的知識。

我們所設制的摄影机^[2]的特点是，以每秒达 100000 幅的頻率摄制的影片，可以直接放映。摄影时用 8 毫米寬的窄电影胶片，画面尺寸为 3.6×4.8 毫米。摄影机有一組拍摄頻率，从每秒 5000 幅到每秒 100000 幅。每一次拍摄可得到拍摄頻率实际上为不变的 7600 个画面，并且胶片上的鉴别率达到 40 綫/毫米。摄影机配备有同步器，既可以拍摄本身发光的物体，也可以拍摄自身不发光的物体。

1. ΦΠ-22 型摄影机的光学原理图

这种摄影机是一种只有一个公共入射光瞳的多物鏡摄影机。类似的原理图早已有人作出过，例如伦美塔尔公司的摄影机^[3]和 BЧК-2 型摄影机^[4]。但是这里所介紹的原理图与它們有很大的不同，它可用以設制長時間电影摄影的摄影机。