

龚祖同 等著
张耀明



高速摄影总论与 间歇式高速摄影

高速摄影之一

高速摄影总论 与间歇式高速摄影

高速摄影之一

龚祖同 张耀明 等 著

科学出版社

1983

内 容 简 介

高速摄影是科学研究和工程技术各个领域中的一种被广泛采用的瞬时记录技术。《高速摄影》是关于高速摄影的专著，全书共分五册：（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》。本册包括总论和间歇式高速摄影两篇，共分十三章。总论叙述了高速摄影的发展历史和应用，以及用信息论观点对高速摄影进行概括的分析。第二篇着重叙述了间歇式高速摄影机的关键部分，省去了那些与普通电影摄影机基本相同的部分，从而使读者对间歇式高速摄影机的原理、性能和应用有一个基本的了解。

本书可供从事高速摄影研究、制造和应用的科研人员、工程技术人员、大专院校师生阅读和参考。

高速摄影总论 与间歇式高速摄影 高速摄影之一

龚祖同 张耀明 等著

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

1983年1月第一版 开本：787×1092 $\frac{1}{4}$
1983年1月第一次印刷 印张：8 $\frac{1}{2}$
印数：0001—2,850 字数：196,000

统一书号：15031·463

本社书号：2919·15—4

定价：1.35元

前 言

高速摄影是记录高速流逝过程的某一瞬时状态或全部历程的强有力手段。高速摄影所获得的大量、准确的时间-空间信息，为研究高速现象的发生机理和运动规律提供了可靠的依据，因此它在科学研究和工程技术的实际领域里（如等离子体、激光脉冲、光-化过程、爆炸、导弹飞行、机械加工、焊接、断裂韧性测试、碰撞、风洞实验、冲击波以及生物力学、医学方面等）得到人们的普遍重视和广泛应用，而且在某些情况下，高速摄影是唯一有效的记录方法。随着生产的发展和科学技术的进步，世界各工业发达国家竞相发展高速摄影技术，而且，一些新的科学技术成果如激光、全息术、计算机等不断被引进到高速摄影领域中来，展现出新的发展图景。

我国从六十年代起自行研制高速摄影机。经过十多年的努力，已经能够自行设计、制造十余种高速摄影机，并在科学研究、工农业生产和国防建设中发挥了重要作用。为了促进我国高速摄影事业的发展，更快地赶超世界先进水平，在中国科学院西安光学精密机械研究所所长龚祖同教授指导下，我们编写了《高速摄影》这部专著，比较系统地介绍了各种类型高速摄影装置的理论、设计、应用与国内外的的发展，供从事高速摄影研究、制造和应用的科研人员、工程技术人员、大专院校师生阅读和参考。

本书共分五册。第一册：《高速摄影总论与间歇式高速摄影》（作者：龚祖同、李景镇、董恒本、张耀明、张林波、

孙延禄、冯俊卿、张耀明主编)；第二册：《光学补偿高速摄影》(作者：乔亚天、顾伯勋、查冠华、郑潮璠、乔亚天主编)；第三册：《转镜式高速摄影》(作者：许家隆、赵积来、余鸿远、张伯珩、许家隆主编)；第四册：《变象管高速摄影》(作者：徐大伦、曹文钦、徐大伦主编)；第五册：《特种高速摄影》(作者：龚祖同、李育林、唐善隆、苗兴华、王云程、陈源、赵葆常、蒋森林、张儒端、夏生杰、夏绍建、张奇、于祖哲、李育林主编)。

本书在编写过程中得到浙江大学、哈尔滨工业大学、南开大学、北京工业学院、北京电影机械研究所等单位的大力协助；还得到中国科学院西安光学精密机械研究所有关研究室的多方面的帮助，特致谢忱。

由于我们水平有限，错误和不足之处在所难免，敬希读者批评指正。

※ ※ ※

第 一 册 说 明

参加本册编写工作的共有七位作者。第一章的作者为龚祖同、董恒本、李景镇；第二章的作者为龚祖同；第三章至第十三章的作者为张耀明、张林波、冯俊卿、孙延禄。

本册在编著过程中得到中国科学院西安光机所第三、第四研究室的许多同志的帮助，并最后由北京电影机械研究所孙延禄同志审阅，在这里一并表示感谢。

张耀明

1980年3月

目 录

前言

第一篇 总 论

第一章 高速摄影的发展及其应用	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 历史概述	3
§ 1.3 高速摄影机类型简介	7
§ 1.3.1 间歇式高速电影摄影机	7
§ 1.3.2 光学补偿式高速电影摄影机	8
§ 1.3.3 鼓轮转镜式高速摄影机	8
§ 1.3.4 转镜式高速摄影机	9
§ 1.3.5 变象管高速摄影机	10
§ 1.3.6 网格高速摄影机	10
§ 1.3.7 克尔盒高速摄影机	11
§ 1.3.8 脉冲高速摄影	11
§ 1.4 应用	12
§ 1.5 2000年的高速摄影	15
第二章 高速摄影信息论	19
§ 2.1 概论	19
§ 2.2 光学系统信息论和空间信息	19
§ 2.3 光学系统的传递函数	22
§ 2.4 摄影光学系统的传递函数	25
§ 2.5 高速摄影的定义和时间信息	31

§ 2.6	全息高速摄影	34
§ 2.7	高速摄影的参数	36
§ 2.8	各式分幅高速摄影的比较	39

第二篇 间歇式高速摄影

第三章	概述	42
§ 3.1	摄影原理	42
§ 3.2	间歇式高速摄影机的一般综述	43
§ 3.2.1	工作原理	43
§ 3.2.2	摄影机发展概况	46
第四章	间歇输片机构的主要技术特性	54
§ 4.1	概述	54
§ 4.2	运动特性	54
§ 4.3	输片准确性	60
§ 4.4	动平衡性能	63
§ 4.5	耐磨性	65
§ 4.6	光特性	67
§ 4.7	结构性	68
第五章	抓片机构	70
§ 5.1	工作原理	70
§ 5.2	抓片机构的类型	71
§ 5.3	抓片机构主要参数的设计	76
§ 5.3.1	图解比较法	76
§ 5.3.2	数学分析法	80
§ 5.4	结构的选择	101
§ 5.4.1	抓片爪	101
§ 5.4.2	定片针	105
§ 5.4.3	片道	107
§ 5.4.4	运动构件的连接	110
第六章	销钉凸轮打片机构	111

§ 6.1	概述	111
§ 6.2	销钉凸轮打片机构的类型	113
§ 6.2.1	双销钉机构	113
§ 6.2.2	多销钉机构	114
§ 6.2.3	销钉凸轮机构	114
§ 6.2.4	凸轮机构	115
§ 6.3	销钉凸轮打片机构的设计	117
§ 6.3.1	设计原则	117
§ 6.3.2	销钉机构的设计	118
§ 6.3.3	凸轮机构的设计	121
§ 6.4	典型的胶片制动机构	130
§ 6.4.1	固定摩擦阻力的胶片制动机构	130
§ 6.4.2	间歇式的胶片制动机构	131
第七章	滚环机构	134
§ 7.1	工作原理	134
§ 7.2	片弯的分析	136
§ 7.2.1	单片弯的理论分析	136
§ 7.2.2	片弯的形成	139
§ 7.2.3	片弯的运行	140
§ 7.2.4	片弯的衰减	141
§ 7.2.5	减小撞击的措施	141
§ 7.3	定片	142
§ 7.4	其它	144
第八章	差相滑轮机构及其它	146
§ 8.1	差相滑轮机构	146
§ 8.1.1	工作原理和基本数学关系	146
§ 8.1.2	胶片的运动特性	155
§ 8.2	其它机构	160
§ 8.2.1	气动拉片	160
§ 8.2.2	脉冲拉片	161

第九章 快门与曝光	163
§ 9.1 快门与曝光的基本概念	163
§ 9.2 快门参数的选择	168
§ 9.3 快门的结构	172
第十章 电控制	176
§10.1 概述	176
§10.2 摄影机的驱动	176
§10.3 计时装置及其它标记	179
§10.4 拍摄频率的显示	181
§10.5 遥控	183
§10.6 加温	183
§10.7 安全保护	184
第十一章 几种典型摄影机	185
§11.1 GS240/35型摄影机	185
§11.2 GV-63E型摄影机	188
§11.3 Photo-Sonics 35mm-4E型摄影机	190
§11.4 Photo-Sonics 16mm-1P型摄影机	193
§11.5 Photo-Sonics 16mm-1W型摄影机	196
§11.6 GSS-35型摄影机	199
§11.7 180型条带式画幅摄影机	203
第十二章 摄影机某些主要性能的讨论	208
§12.1 概述	208
§12.2 摄影频率	208
§12.2.1 间歇输片机构的机械强度	208
§12.2.2 胶片的强度和受力情况	210
§12.3 画幅稳定性	220
§12.3.1 画幅稳定性的评价	221
§12.3.2 画幅稳定性的测试	225
§12.3.3 影响画幅稳定性的因素	227
§12.4 画幅影像分辨率	234

§12.4.1	摄影物镜分辨率的理论值·····	234
§12.4.2	摄影物镜目视分辨率·····	237
§12.4.3	静态摄影分辨率·····	238
§12.4.4	动态摄影分辨率·····	240
§12.5	动平衡·····	244
第十三章	应用及其技术·····	251
§13.1	应用·····	251
§13.1.1	在军事技术方面的应用·····	251
§13.1.2	在工农业生产中的应用·····	255
§13.1.3	在科学技术研究方面的应用·····	259
§13.1.4	在教学训练方面的应用·····	261
§13.1.5	在其它方面的应用·····	261
§13.2	摄影技术·····	264
附录	间歇式高速摄影机部分产品·····	269

第一篇 总 论

第一章 高速摄影的发展及其应用

§ 1.1 引 言

“高速摄影”有两个含意：从摄影机方面来说，摄影速度很高或曝光时间很短；从摄影对象方面来说，对象的运动、变化速度很高。

工具是人类器官的延长，人类借助显微镜能够看见微小的物体，借助望远镜能够看见遥远的目标，而利用高速摄影机能够记录下高速运动物体的某一瞬间状态或全部运动过程，从而能够（间接地）看清瞬息万变的高速运动物体。

光线进入眼睛并引起视觉，以及光线中断后视觉消失，两者都需要一定的时间。如果在夜间我们对着明亮的灯泡看一下，再闭上眼睛，那么在闭眼的一刹那，我们会感到眼里并不是一团漆黑，而是有一个灯泡的亮点。这说明，眼睛的视觉神经在受到光线的刺激并引起视觉之后，即使光线中断了，视觉仍然能够暂时地保留在眼中，眼睛的这一特性叫做“视觉暂留”。“视觉暂留”时间的长短，和光线的强度、波长等因素有关，在一般情况下，约为十分之一秒。这一特性，有利亦有弊。比如，每个人毫无例外地要频繁地眨眼睛的，如果没有“视觉暂留”这一特性，在眨眼的瞬间，眼前将是漆黑一团，而且每分钟要“黑”十几次到二十次，这不但要影响工作和学习，而且眼睛也难以忍受如此频繁的明暗刺激。事实上，由于“视觉暂留”的作用，我们几乎觉察不到眨眼瞬间的黑暗。又如，电影拷贝是由一幅幅彼此分离的画幅组成的，放映时，是逐幅分别投影到银幕上的，而且在

改换画幅时，放映机的遮光器遮住光线，银幕上是黑的。但是，因为每次遮断光线的时间低于“视觉暂留”时间，所以我们的眼睛全然感觉不到银幕变黑的瞬间，而认为银幕上始终是有画面的，而另一方面，“视觉暂留”的存在，使我们看不清、甚至看不到高速运动的物体。转动起来的电风扇，我们看不清每个叶片，分辨不出每个叶片在各个瞬间所处的位置和形状，只能看到一个似有若无的圆盘。这是因为在“视觉暂留”时间内，人眼所看到的景物，在位置和形状上发生着迅速的变化，形成一幅幅很不相同的画面并连续不断地映入眼帘，在视网膜上重叠在一起，造成视觉模糊。

在人类世界乃至广阔无垠的宇宙，有大量的人为的或自然的高速运动物体和现象。从宏观的宇宙飞船，到微观的基本粒子，从速度为每秒数米的体育运动，到每秒数十万公里的光辐射，从不露形迹的冲击波，到烟火弥漫的核爆炸……，都是瞬息万变或瞬间即逝的事物。它们不但有很高的运动、变化速度，有的还因为不发光、受其它因素的屏蔽或干扰等，更增加了观察的困难。我们固然可以利用其它测试手段（如测速仪、定位仪、各种传感器等）了解它们的某些特性，但毕竟是不直观的，不全面的，况且，在有些情况下是行不通的。例如在宇航试验中，发动机的巨大噪音往往使数据传感器失灵。高速摄影方法则能够排除许多干扰直观而形象地反映高速流逝过程的时间-空间特性。

高速电影摄影机是高速摄影机中最常用的一种。它的基本工作原理是，以较高的摄影频率拍摄，而以较低的放映频率放映，在银幕上延缓高速流逝过程的进程。普通电影摄影机的摄影频率为24幅/秒，放映机的放映频率也规定为24幅/秒，因此我们在银幕上所看到的事物的运动速度与其实际速度是一样的。比如，一位运动员跑完一百米距离共用10秒钟

时间，摄影机从运动员起跑开拍，到终点撞线为止，共摄下 $24 \times 10 = 240$ 张画幅。当用 24 幅/秒的频率放映时，从起跑到撞线，共放映 $240 \div 24 = 10$ 秒钟，即银幕上的运动速度与实际速度相一致。如果摄影速度与放映速度不一样，银幕上就会出现反常现象。在上述例子中，若摄影频率为 240 幅/秒，放映频率为 24 幅/秒，从银幕上看，运动员跑完全程共用了 100 秒时间，即比实际速度慢了 10 倍。摄影频率与放映频率之比越大，时间延缓的程度也越大。我们在电影里经常看到的慢动作镜头，就是用这种摄影方法产生的效果。但是普通电影摄影机的摄影频率，最高不超过 50~60 幅/秒，每幅曝光时间不短于 $1/1000$ 秒，而近代各种类型的高速摄影机，摄影频率可高达每秒几百幅到几十亿幅，曝光时间可短至微秒 (10^{-6} 秒) 到微微秒 (10^{-12} 秒)，并继续向更高的水平发展。

这里应该说明的是，高速摄影机的类型是多种多样的，其结构、性能和用途各有千秋。并不是所有的高速摄影机都能摄下大量的、可在放映机上连续放映的画幅。一般地说，摄影频率越高，所能得到的画幅总数越是有限。在解决一些实际问题的时候，往往只需要拍摄几张或几十张画幅就够了，然后用专门的判读设备对摄影结果逐幅进行分析、测量。更先进的方法是将高速摄影技术与计算技术相结合，从而能够既迅速又准确地获得所需要的数据。

§ 1.2 历史概述

世界上第一台摄影装置出现于 1839 年。摄影技术由于能够逼真地反映事物的外貌，很自然地诱使人们用这一技术来拍摄高速运动的目标。1851 年，英国人 Fox Talbot 用持续时间很短的电火花进行照明，对一张迅速旋转的报纸进行拍

照，尽管干版是不灵敏的，仍然获得了较清楚的照片。这一成就说明了高速摄影并不是多么奥秘的事情。科学的发生和发展，一开始就是由生产决定的。Talbot的实验虽然开辟了高速摄影的历史，但由于当时的社会生产对高速摄影没有迫切的要求，而且当时的科学技术水平也提供不出发展高速摄影所必需的物质条件，所以 Talbot 的工作长期没有受到重视。就以感光材料而言，用当时的“珂罗酊湿版法”制出的玻璃干版，在一般照明条件下，需曝光数秒钟以上，二十年后，1871年发明了“溴化银明胶干版法”，干版的曝光时间降低到几十分之一秒，才为拍摄运动目标提供了起码的物质条件。1872年，美国人 E. Maybridge 为了研究赛马的腿部运动，沿着跑道将24台摄影机排成一排，依次打开各台摄影机的快门，摄下了24张很清晰的照片。Maybridge是从一位法国医生和生理学家E. J. Marey所进行的类似的研究中得到启发的，而当Marey读了Maybridge上述工作的报道后，很受鼓舞，他进一步研究如何在一台摄影机内的单张底板上做多次曝光。他在摄影机的镜头前面装上一个手摇圆盘，圆盘边缘有许多孔，以此做为快门，在一张不动的底片上获得了较多的、彼此有重叠的象。后来，为了避免象的过分重叠，他又采用过旋转镜头或在镜头前安装反射镜的方法，但图象较模糊。他的另一个方案是狭缝扫描方法，用于研究一维的连贯现象，用火花闪光进行照明。1878年，Marey在摄影机中装上能够间歇转动的摄影底板，避免了图象的重叠和模糊。1881年该摄影机又发展为研究鸟类运动的“摄影枪”，“枪”上装有可拆卸的胶片盒，摄影频率为12幅/秒，曝光时间为 $1/720$ 秒。以后随着新的感光材料的出现，“摄影枪”的摄影频率提高到20幅/秒，曝光时间减少到 $1/2000$ 秒，曾用于研究飞行昆虫的翅膀的运动。Marey在他的晚年还进行

了高速显微摄影的研究，拍摄了纤毛虫的运动情况。

以上所谈到的是人们在高速摄影领域内最初的一些研究活动。仅从以上事实就可以看出：第一，几乎在摄影机出现的同时，人们就注意到用它来研究高速运动的物体，而且到上个世纪末，已经提出一些目前仍在沿用的原理和方法；第二，高速摄影的发展，与社会生产的需要、与其它科技领域的发展息息相关，后一点在以后的发展中尤为明显。

从 Fox Talbot 的实验，到二次世界大战前，几乎在一个世纪中，尽管高速摄影机仍在发展，但没有做为一种成熟而必备的工具得到社会公认。二次世界大战的爆发，激起了有关国家军火工业的迅速发展。做为武器研究的一个重要工具，高速摄影机受到了重视。例如，美国的 Fastax 牌高速电影摄影机，1934年由贝尔电话实验室研制出来（当时称 BTL 摄影机），用来对继电器和其它电接触器件的工作情况进行研究。当时没有任何一家厂商愿意投产，原因是没有销路，无利可图。而1942年，某公司应原子能研究部门的要求，试产了20台，很快被抢购一空，以致该公司为了进一步批量生产，将任务由实验车间转移到工厂。以后又对摄影机做了改进，不但能近摄，还可用于弹道研究。战争期间，高速摄影技术在美、英、德、苏联有了较快的发展，从事有关研究的，主要是军事机关和军火生产单位，研究成果很少公开。

进入本世纪50年代，随着核技术、火箭、导弹技术的发展，对高速摄影提出了更多、更高的要求。为适应这种形势，一些国家先后成立了专门的学术机构（如英国的“高速摄影协会”、苏联的“科学摄影与电影摄影委员会高速摄影组”等），组织和协调高速摄影的研究工作，加快了研究步伐。

由各国单干走向国际交流，开始于1952年。在美国“电影电视工程师协会”(SMPTE)第72届会议上，专门分出两天时间就高速摄影技术问题进行专题讨论。尽管参与这次讨论的仅限于北约组织国家，迟迟在两年之后才公布会议论文，但它却是以后更大范围的国际交流的开端，做为高速摄影发展的里程碑载入史册。1954年，开始邀请更多的国家参加会议，正式命名为“第二届国际高速摄影会议”。以后每两年或三年举行一次。从1978年的第十三届会议，易名为“国际高速摄影与光子学会议”。与会国家由最初的几个增加到二十多个，会议的论文由最初的几十篇增加到二百多篇。

就国际范围内来看，从战后到现在，高速摄影技术经历了一个从保密到公开，从军用遍及民用，从较低的速度到超高速，从可见光到红外、紫外、X射线，从研究宏观物体到微观物体等发展过程。在高速摄影技术比较先进的美国、英国、苏联、法国，传统的光学-机械式高速摄影机（如间歇式、棱镜补偿式、转镜式高速摄影机）已经基本定型和商品化了，在近十年中，这类摄影机在性能上没有重大突破。但随着新的电子元件及光学元件的出现，这类摄影机仍在不断改进。电子-光学式高速摄影机，即变象管高速摄影机是目前高速摄影领域内最活跃的技术，它在分幅频率和时间分辨率方面有很大的潜力，能够适应研究激光超短脉冲、激光等离子体和激光核聚变的需要。近代高速摄影技术发展的另一特色是纯技术研究与应用研究处于并驾齐驱的局面，这是高速摄影技术日臻成熟并渗透到各科技领域的必然结果。高速摄影机解决实际问题的能力，吸引着越来越多的“外行”将其引入到自己的工作中，结合其它技术加以应用和改造。这不但扩大了高速摄影的应用范围，必将反过来推动高速摄影

的进一步发展。最近一些年来发展起来的全息干涉法、散斑摄影法、莫尔形貌法等等，不断地充实了记录高速流逝过程的手段，而这些方法已经不能简单地用“摄影”一词来描述，而应该纳入“光子学”这个新兴学科的范围内。“光子学”是论述光子的发射、特性和效应的，特别是论述把光子作为信息载体的探测、记录和测量系统，可以想见，随着光子学的发展，将赋予传统的高速摄影以新的活力和内容，促进高速摄影的深入发展。

在我国，解放前高速摄影是一项空白。1958年开始研制，1962年成立了专门的研究所。此外，在一些高等院校、工厂、研究单位也陆续开展了高速摄影机的研究、试制工作。1965年，我国应邀首次参加国际高速摄影会议。在1974年和1979年，还分别召开了第一、二届全国高速摄影学术会议。目前我国已经能够自制十余种类型的高速摄影机，有的已接近或达到世界先进水平，它们在科学研究、经济建设和国防建设中发挥了应有的作用。

§ 1.3 高速摄影机类型简介

§ 1.3.1 间歇式高速电影摄影机

其结构与工作原理与普通电影摄影机相似，但运转速度大幅度地提高了。摄影时，胶片在输片机构带动下做间歇运动，即：在曝光的瞬间，片道中的胶片静止不动；曝光后，叶子板快门遮断光路，胶片在输片机构作用下移动一个画幅距，再行曝光，如此周而复始。这类摄影机的优点是成象质量高、结构简单。特别是使用16毫米或超8毫米胶片时，在小型化方面潜力很大，以便安装到火箭、卫星上。如1973年美国报道了一种使用超8毫米胶片的间歇式高速摄影机、摄