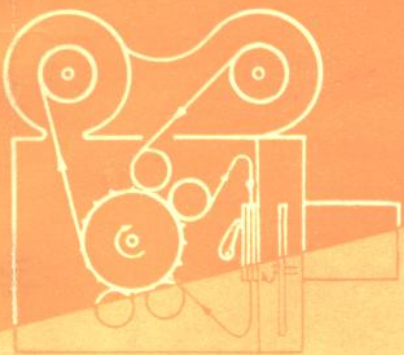
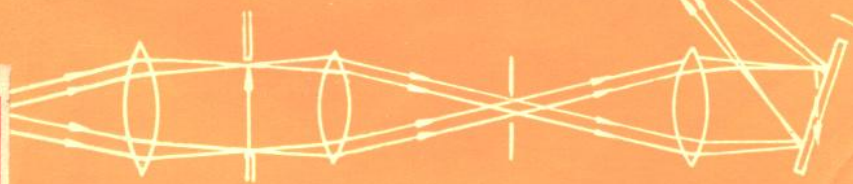




李德熊 编著

高速摄影



科学出版社

高 速 摄 影

李 德 熊 编 著

科学出版社

1976

内 容 简 介

高速摄影是研究高速流逝过程的一种重要方法，它广泛地应用于解决许多现代的科学研究、国防和工农业生产实践中的问题。

本书是科普读物，向读者一般地介绍高速摄影的原理、高速摄影机的结构和应用。

本书可供广大工农兵、知识青年阅读，亦可供从事与高速流逝过程有关以及从事光学仪器生产的同志参考。

高 速 摄 影

李 德 熊 编 著

*

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

*

1976年12月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1976年12月第一次印刷 印张：4 1/8

印数：0001—39,280 字数：79,000

统一书号：15031·135

本社书号：739·15—4

定 价： 0.30 元

毛主席语录

人的认识物质，就是认识物质的运动形式，因为除了运动的物质以外，世界上什么也没有，而物质的运动则必取一定的形式。对于物质的每一种运动形式，必须注意它和其他各种运动形式的共同点。但是，尤其重要的，成为我们认识事物的基础的东西，则是必须注意它的特殊点，就是说，注意它和其他运动形式的质的区别。只有注意了这一点，才有可能区别事物。

目 录

引子	(1)
一 高速摄影在科学技术中的应用	(11)
二 单张高速现象照片的获得	(29)
1. 短暂闪光(即瞬时闪光)的产生	(29)
2. 高速快门	(35)
三 高速过程的连续记录	(41)
四 重复单次摄影	(49)
五 高速电影摄影	(55)
1. 胶片连续运动的高速电影摄影机	(56)
2. 鼓轮式高速摄影机	(64)
六 转镜扫描型高速摄影	(68)
1. 基本原理	(68)
2. 同步问题和“等待”型摄影机	(74)
3. 保护快门	(79)
4. 拍摄频率的进一步提高	(83)
七 网格高速摄影	(89)
八 几种特殊的高速摄影方法	(98)
1. 高速立体摄影	(98)
2. 高速 X 光摄影	(107)
3. 高速显微摄影	(109)
4. 高速阴影摄影和干涉摄影	(111)
5. 高速偏振摄影	(116)
6. 高速光谱摄影	(117)
结束语	(120)

引 子

翻开《人民画报》，世界各国乒乓健儿一幅幅挥拍击球的矫健英姿映入眼帘，顿时把我们又重新带回到了首都体育馆内充满友谊而又激荡人心的沸腾境地。我们真要衷心感谢摄影记者们，他们怀着饱满的政治热情，用他们手中的美妙武器——摄影机，精确地记录下了这些令人难忘的友谊交往的镜头，让世界人民之间紧密团结的深厚情谊永远凝记在这些画面上。

请看这个镜头(图 1)，运动员凌厉攻球的一刹那，一下子被凝固住了。那小小银球停留在半空中，好象正在选择一个最合适的着落点。而在另一个画面上(图 2)，摄影记者却又

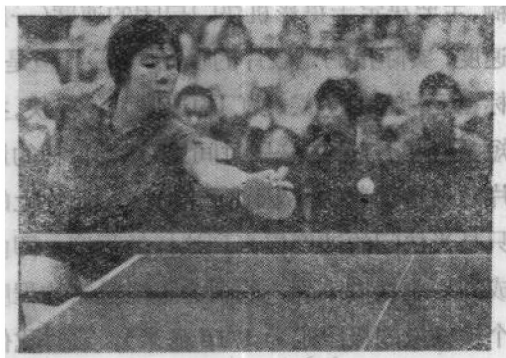


图 1

故意把银球拍摄成一段白色的纱带,让人真切地体会其“风驰电掣”的迅驰境界。

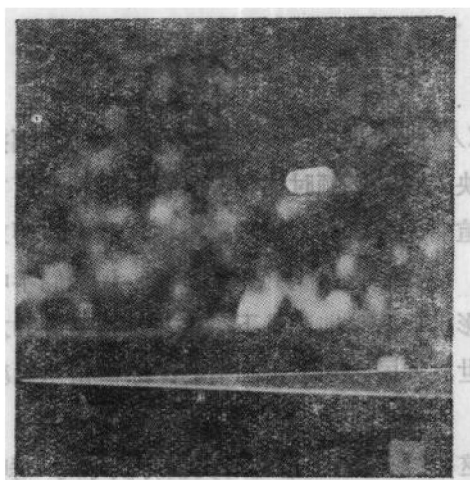


图 2

同样一个在飞驰中的乒乓球的镜头,照片上表现出轮廓清晰或模糊,主要决定于摄影机快门启闭的速度(一般人们所说的快门速度,实际指的是胶片的曝光时间)。但是,当我们拍摄的目标在运动着的时候,快门的速度无论多快,打开的时间无论多短,在快门打开的这段时间里,运动目标的影象相对于感光胶片总是移动着的。因此严格说来,照片上的象总是模糊的。只是当快门的速度提高到这样的程度:即由于目标运动而造成的影象模糊小到人的视力不能觉察的程度(有的书上把这个模糊量的极限定为 $1/10$ 毫米),这时我们就认为这是一张轮廓清晰的照片。

这样，自然可以得出一个结论：即拍摄的运动目标速度愈高，愈是需要提高快门的速度（缩短曝光时间）。下表是吴印咸同志写的《怎样正确估计曝光》^①一书中的“动体摄影表”。

动 体 摄 影 表

运 动 物 体	物 距 (米)	不同运动方向的曝光时间(秒)		
				
步行的人、一般劳动操作	8	1/40	1/80	1/120
慢行的自行车	8	1/60	1/120	1/180
快行的自行车、赛跑	8	1/80	1/150	1/250
球赛或运动、汽车、快速的劳动操作	8	1/240	1/500	1/700
游泳、跳水	8	—	1/600	1/800
跑马	8	1/300	1/750	1/950
轮船	8—30	1/120	1/240	1/360
火车	8—30	1/150	1/300	1/450
特快汽车和火车	8—30	1/300	1/600	1/900
飞机起飞或降落	8—30	—	1/600	1/800

表中所列举的曝光时间，指的是最长的允许曝光时间。它除了决定于运动物体的速度之外，还同运动物体和摄影机之间的距离以及它们之间的方向有关。因为造成影象模糊的是摄影机镜头在胶片上所造运动物体的影象，而不是运动物体本身，所以我们要考虑的是这个影象沿着胶片运动的速度。运

① 吴印咸：《怎样正确估计曝光》上海人民美术出版社，1963年版。

动物体离摄影机愈近，成的影象愈大，它的速度相应也愈大，曝光时间就需要进一步缩短。当物体运动的方向与胶片平面不平行时，它的影象沿着胶片运动的速度相应地就要打个折扣，一般说来需乘上它们之间所成角度的余弦。这就是为什么在表中需要对不同运动方向列出不同的曝光时间的缘故。

运动物体在胶片上的影象的速度，除了决定于上面所说的几个因素之外，还与摄影机镜头的焦距有关。表中的曝光时间适用于一般摄影爱好者和新闻摄影的相机。对于焦距特别长的摄影机来说，在其它条件均相同的情况下，曝光时间还应适当缩短。

普通摄影机的快门速度，中心式的最短可以达到 $1/1000$ 秒，卷帘式(帘幕式)的可以达到 $1/2000$ 秒。对照上表来看，完全可以满足一般动体摄影的需要。

人眼能够觉察影象模糊的最小值，决定于人眼的空间鉴别率(简称为鉴别率)。所谓人眼的空间鉴别率，指的是：人的眼睛能够区分两个相邻物点的能力。我们知道，人眼所以能够区分两个相邻的物点，是由于这两个物点分别成象在眼睛网膜的不同部位上，刺激了不同的视觉细胞。打个比喻来说，人的眼睛就好象是一架照相机。水晶体是成象用的镜头，而由千百万个视神经末梢所组成的网膜则就是感光用的底片。只有当底片上分隔开的不同的银盐颗粒分别接受由不同物点来的光线，最后才能表现为分离的象点。人眼网膜接受物象的情形就与上述底片的情形相类似。这样，当落到网膜上的两个相邻物点的象之间的距离小于某一极限值时，人的

眼睛就不再能区分它们，而把它们看成一个点了。这个极限值的距离，就是人眼的空间鉴别率，一般用它对水晶体（“镜头”的节点）的夹角（也就是眼睛对两个物点的张角）来表示。这个角度的大小一般是用实验测得的。实验表明，它同物点的亮度大小、物点和背景的衬度大小以及物点成象在网膜的那个部位有关。眼睛直视物点（也就是说，物点位在眼轴上）的鉴别率要比斜视物点的鉴别率高得多。随着斜视角度的增加，眼睛的鉴别率显著地下降。同样，白天、黄昏和黑夜相比，人眼的鉴别率也显著地由高到低。一般说来，当物点所受照度足够时，人眼视轴方向的鉴别率大致约为 1 分。这样一个角度就大体相当于在明视距离^①（250 毫米）上观看十分之一毫米左右的一段间隔。这也就是我们前面所提到的模糊量的极限。

人眼观察物体还有一个特性，就是视觉暂留（亦称视觉残留）。也就是说，当所观看的物体已经除去以后，它的影象在我们的视觉上并不立刻消失，而要延留一个很短暂的时刻。这样，当我们观看一个以一定频率闪烁的目标，如果这个目标的闪烁周期比眼睛的视觉暂留时间为短的时候，我们就发现不

① 人眼能够看清不同距离的物体，是依靠水晶体周围的肌肉收缩，使水晶体的曲率改变，将物象成在网膜上。这种动作叫做调节。正常人的眼睛，当肌肉放松时，无限远的物体正好成象在网膜上，并且可以不用费劲地从无限远调节到 250 毫米左右。我们就称无限远为明视远点，250 毫米为明视近点。因为物体放得愈近，物体对眼睛的张角就愈大，可辨别的细节也就愈小。因此，一般人在阅读或操作时，常把被观察物体放在明视近点，这个距离就叫做明视距离。

了这个目标的泯灭,而把它看成一个始终亮着的目标。当我们观看电影时,我们所以能把一个一个断续地放映到银幕上去的电影画面看成一个连续不断的动作,而发现不了它的间断,就是利用了眼睛的视觉暂留这个特性。眼睛的视觉暂留时间的长短,与网膜所接受的照度大小有关。在正常的照明条件下,人眼的视觉暂留时间大约为十分之一秒。也就是说,当我们观察运动过程时,先看到的东西还末“褪掉”,后来的现象又已映入眼帘。在十分之一秒内所发生的现象,它们在视觉上是重叠起来的。如用照相机来作比喻的话,眼睛这个“照相机”的最短曝光时间不能短于十分之一秒。我们把这段时间叫做人眼视觉的时间鉴别率^①。

毛主席教导我们说：“我们的眼力不够,应该借助于望远镜和显微镜。马克思主义的方法就是政治上军事上的望远镜和显微镜”。这里用的是比喻的方法,说明只要努力学习马列著作和毛主席著作,积极参加斗争实践,努力改造世界观,就能够不断提高识别真假马克思主义的能力,区分正确路线与错误路线、正确观点与错误观点。

① 空间鉴别率指的是对静止的物体分辨其最小细节的能力。人眼的空间鉴别率限制了人眼觉察细小物体的可能。人眼的时间鉴别率指的是对运动的物体“截取”(分辨)最小时间间隔内的变化的能力,它限制了人眼观察高速运动物体的可能。因为当用人眼这部照相机拍录运动物体时,所录下的照片是运动物体在时间鉴别率(0.1秒)这段时间间隔内的整个变化过程。如果照片上所记录的运动物体的移动量(它等于物体运动速度乘时间鉴别率)大于人眼的空间鉴别率(0.1毫米),人眼就能觉察出来,结果看到的是轮廓模糊的物体。所以,人眼能够看清楚的运动物体,它的运动速度被人眼的时间鉴别率限于很低的程度(每秒1毫米到几毫米)。

就其直接意义来说，望远镜和显微镜这两种现代的科学仪器，确实把人眼认识自然的能力提高到了一个惊人的倍数。举例来说，一台直径 10 米的光学望远镜，它的空间鉴别率要超过人眼 1000 倍；同时，用以观察天体的亮度，则被放大了 10^6 倍。一台电子显微镜能把人眼观察细微物体的能力提高 10^6 倍。

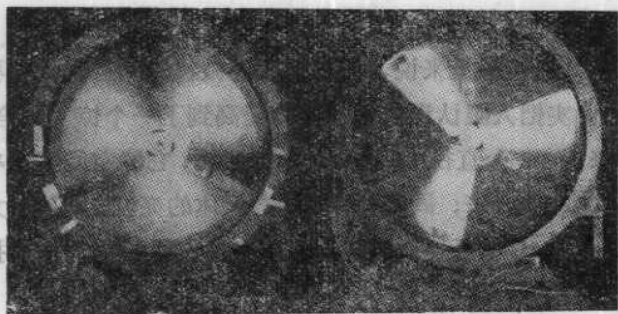
那么如何才能将人眼感受高速现象的能力提高一个异常的倍数呢？

摄影技术帮助我们解决了这个问题。曝光时间为 $1/1000$ 秒的照片，就是从高速运动的过程中“切割”出了 $1/1000$ 秒长的一段历程。因此，当我们观察一张用这样短的曝光时间所拍摄的照片时，等于把人眼的时间鉴别率提高了一百倍。

但是毫秒级的曝光时间还远远不能满足研究许多高速过程的需要。举例来说，小口径高射炮弹出口的初速超过每秒 800 米。在曝光时间 $1/1000$ 秒这么短的一段时间里，炮弹已经飞过了 0.8 米这么长的一段距离，它有好几个炮弹那么长。显然，用这样长的曝光时间不可能摄得炮弹飞行时影象清晰的照片。

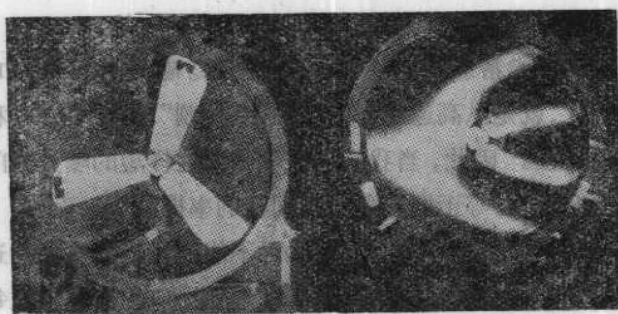
为了更形象地来说明这个问题，我们来比较一下图 3 中的几幅照片。这是用不同曝光时间拍摄的一架高速旋转电扇的照片。

我们知道，在拍摄本身不发强光的物体时，照片的曝光时间除了可以用快门的开启和关闭来控制它的长短外，还可



(a)

(b)



(c)

(d)

图 3

以用控制所拍物体的照明光源来改变。图 3 中的前面三张照片就是用不同的闪光灯照明下拍摄的。(a) 是用发光时间约为 $1/75$ 秒的闪光泡所拍摄的；(b) 是用发光时间约为 $1/5000$ 秒的快速闪光泡所拍摄的；(c) 则是用发光时间为 $1/500000$ 秒的微秒电子闪光泡所拍摄的照片。从这三幅照片可以看出拍摄高速现象时曝光时间长短对影象清晰度的影响，曝光时间越短，影象越清晰。(d) 是在普通灯光照明下用曝光时间

为 $1/1000$ 秒的卷帘快门所拍摄的同一电扇的照片。

摄影机中所采用的快门,按其布置在摄影机中的位置,大致可分成镜头快门和焦面快门两类。所谓镜头快门,就是布置在镜头的几组透镜之间或镜头附近的快门,常见的中心式快门就是其中的一种。这种快门的特点是:只要打开一点,胶片的整个幅面就全部同时见光。所谓焦面快门,就是快门布置在胶片(镜头的聚焦平面)附近。这种快门的特点是:快门在那里打开,就只有那里的胶片见光。

卷帘快门是焦面快门。它的特点是整幅照片不是在一个 $1/1000$ 秒内拍摄下来的。当快门工作时,快门上允许光线通过的狭缝从胶片幅面的一边逐渐移到另一边,使胶片逐条地曝光。这段时间要比曝光时间($1/1000$ 秒)大好多倍。因此用焦面快门拍下的高速照片,实际上是前后许多不同瞬间(高速过程许多不同位相)的狭条照片的组合。于是,在图 3(d)中我们看到,高速旋转电扇的扇叶被歪曲成了一条“热带鱼”。

要想正确地反映高速过程,就需要同时解决既快又不变形两个问题。高速摄影技术就是为了解决这样一个任务而发展起来的。

高速摄影扩展了人眼对高速过程的感受能力,它使人们有可能对现代的许多重要科学技术部门进行细致深入的研究。因此,高速摄影技术已经成为科学研究和工农业生产中广泛应用的有效手段和工具。同时,几十年来,随着科学技术的发展,这种重要的研究工具也在帮助人们深入窥探各种高

速现象的过程中得到了极大的发展。目前,就其原理和结构来说,高速摄影本身种类就很繁多。有的按时间鉴别率或拍摄频率来划分,划分的区间也各不相同。将拍摄频率在 10^2 幅/秒以下的相机称为普通相机, 10^2 — 10^3 幅/秒的称为快速相机, 10^3 — 4×10^4 幅/秒的称为次高速相机, 4×10^4 幅/秒以上的称为高速相机。有的则按工作原理来分类,将相机分成胶片断续运动和连续运动的;以及分幅摄影和不分幅摄影(狭缝扫描)的等;或更进一步细分成若干类(例如分成间歇式高速电影摄影机、棱镜补偿式高速电影摄影机、高速转镜分幅摄影机、高速转镜扫描摄影机、网格高速摄影机、变象管高速摄影机、克尔盒高速摄影机、鼓轮高速摄影机等)。有的提出了更为繁复的分类方法,包括各种摄影原理、曝光方法和扫描方法(机械法、电气法、光学法、光电法等等)。有的则兼用了工作原理和拍摄频率作为分类的依据。总之,对于高速摄影的分类方法,还众说纷纭。

应用高速摄影来记录的高速过程,有的只要求拍得一张曝光时间极短的照片,有的则要求把所研究对象在时间上的变化过程记录下来。后者就是连续高速摄影。它要求以一定的时间间隔拍摄一连串曝光时间极短的照片,或者将高速过程的轨迹连续地记录下来。要完成这些任务,方法可以是各式各样的。下面我们准备逐个地向读者介绍。

在没有涉及高速摄影技术本身以前,我们先来看一看高速摄影在各种科学技术领域里的应用。

一 高速摄影在科学技术中的应用

在这一章里,我们想通过一些简单的介绍,使读者对高速摄影这种科学研究方法的作用有一个大致的了解。

高速摄影是摄影技术的一个专门的分支。它的出现首先是为了满足弹道学方面所提出的要求(1884年布拉格物理研究所的马赫教授用电火花照明拍摄飞行的弹丸),直到今天,它仍和军事技术保持着密切的联系。同时用于测量高速现象短时间内的变化。已经在很多科学研究范围和生产中占据了重要的位置。我们举一些典型的例子来加以说明。

读者也许已经看过《定向爆破筑坝》这部科教影片了。这部影片向我们通俗而又形象地介绍了爆破的规律。在这部影片里既巧妙地运用了电影所具有的特技处理,同时也借助了高速摄影的特殊摄影技术。

“这部影片有一个采用高速摄影和技巧印片方法纪录山岩爆破的镜头,生活中一闪即逝的爆破瞬间,在银幕上变成了粉碎的小石块恢复成山峦原状的慢动作,鲜明地展示了爆炸后飞石掷抛的运动路线。这为观众理解人工控制爆破方向,提供了形象的根据”。(摘自1975年5月16日人民日报)

通过这部影片,我们看到了高速摄影两方面的作用:第一,它是一种有效的科技教育的手段。利用高速摄影技术,我

们能够更好地向工农兵普及科学知识和推广先进技术；第二，高速摄影为科学研究工作提供了揭示高速现象实质的手段。

高速摄影在爆炸研究中已经是一种熟知的研究工具了。几十年来，在研究高速燃烧和爆炸过程、研究空气和水中激波的传播，土壤和建设工程中的爆炸作用等课题中，高速摄影技术发挥了很大的作用，它在一定程度上促成了爆炸物在许多技术部门中的应用。

经过无产阶级文化大革命和批林批孔运动，批判了修正主义路线，我国广大科研人员坚持科学研究为无产阶级政治服务，为工农兵服务，与生产劳动相结合，坚持开门办科研，不断取得新的成就。定向爆破筑坝、定向爆破造田就是我国科研人员和贫下中农相结合，将爆破技术推广应用于治山治水、搬山造田，使爆破力学的研究取得了可喜的新成就，为我国山区、丘陵地区农田基本建设闯出了一条新路子。定向爆破将为普及大寨县作出贡献。图 4 就是一张定向爆破试验的照片。

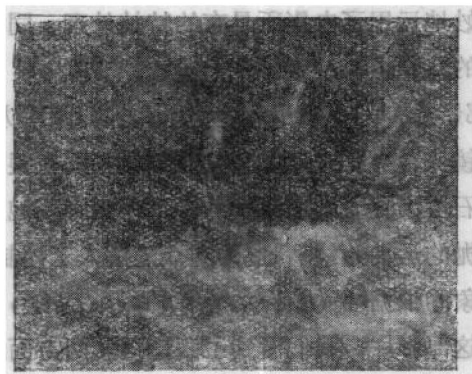


图 4