

特种电影摄影

〔苏〕尼·尼·库德拉绍夫 著

孙延禄 译

中国电影出版社

1986 北京

Н. Н. Кудряшов

СПЕЦИАЛЬНЫЕ КИНОСЪЕМКИ

МОСКВА «ИСКУССТВО» 1979

内 容 说 明

本书为专门讲述特种电影摄影技术的专业书籍。特种电影摄影包括快速摄影、高速摄影、慢速摄影、逐格和延时摄影、显微摄影、宏观摄影、红外线与紫外线等不可见光摄影、水下摄影以及在光学不均匀介质中的摄影等。书中介绍了进行这些特种电影摄影的方法和有关设备。该书主要供电影制片厂、电视台及各种研究机构中需要应用特种电影摄影的有关人员阅读参考。

责任编辑：巩 智

封面设计：纪斯亮

特种电影摄影

〔苏〕尼·尼·库德拉绍夫 著

孙延祿 译

*

中国电影出版社出版

北京市人民文学印刷厂印刷 新华书店发行

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：9¹/₂ 字数：200,000

1986年12月第1版北京第1次印刷 印数：1—3,000册

统一书号：15061·208 定价：2.35元

目 录

作者的话	1
第一章 快速和高速电影摄影	1
第二章 超高速电影摄影	26
第三章 带时间间隔的逐格电影摄影	48
第四章 小型物体的大比例电影摄影(宏观电影摄影)	60
第五章 显微电影摄影	76
第六章 红外线电影摄影	96
第七章 紫外线和光致发光电影摄影	116
第八章 X射线电影摄影	129
第九章 偏振光电影摄影	149
第十章 拍摄透明介质中的光学不均匀性	165
第十一章 在低照度情况下的电影摄影	180
第十二章 远距离电影摄影	196
第十三章 在严酷气候条件下拍摄电影	217
第十四章 利用光导纤维、内窥镜和潜望镜拍摄难进入的 地点	221
第十五章 外科手术的电影摄影	228
第十六章 水下电影摄影	238
第十七章 航空电影摄影	256
第十八章 测量用电影摄影	276
第十九章 科学电影摄影所得资料的分析	291
第二十章 从发光屏幕上拍摄电影	298
结束语	306

第 一 章

快速和高速电影摄影

快速和高速电影摄影指的是摄影频率高于标准放映频率(24格/秒)的电影摄影。由于摄影频率高于放映频率,所以在银幕上看到的是减慢的运动。

银幕上减慢的运动倍率 k 取决于摄影频率 n_c 大于放映频率 n_{np} 的程度:

$$k = \frac{n_c}{n_{np}} \quad (1-1)$$

例如,当摄影频率为 600 格/秒而放映却用标准频率 24 格/秒时,那么我们在银幕上所看到的将是减慢 $600/24 = 25$ 倍的运动,换言之,实际持续时间为一秒的过程在银幕上将持续二十五秒的时间。

由于快速和高速摄影延长了银幕上的再现时间,所以,人们可以应用它来仔细观察直接用肉眼所不能观测到的物体的高速运动和短暂的物理过程。

必要的减慢倍率和摄影频率的计算

试验证明,要想在银幕上仔细观看运动的物体,必须使其速度不大于 1 米/秒,而实际运动过程的持续时间不少于三秒。

从这一前提出发,如果知道物体运动的实际速度和短暂过程的持续时间,就可算出必要的减慢倍率和摄影频率。必要的运动减慢倍率是一个没有单位名称的数,它只告诉人们,为了能在银

幕上详细观察被摄物体的快速运动或变化，其在银幕上的运动速度应减慢多少倍，或运动过程持续时间应延长多少倍。

必要的运动减慢倍率可按下式求出：

$$k = \frac{v}{v_0} \quad (1-2)$$

式中， v ——物体的实际线速度； v_0 ——银幕上物体影象的线速度。

假设，银幕上影象运动的速度为 1 米/秒，则：

$$k = \frac{v}{1} = v \quad (1-3)$$

换言之，必要的运动减慢倍率等于以每秒若干米为单位所表示的物体实际运动速度的数值。

例 1：圆锯锯齿的线速度是 75 米/秒。为了观察圆锯齿切削木材的过程，必须使锯齿在银幕上的速度等于 1 米/秒。因此：

$$k = \frac{75}{1} = 75$$

快速过程在银幕上持续时间的必要延长倍率①可用下式表示：

$$k = \frac{t_0}{t} \quad (1-4)$$

式中， t_0 ——拍下的过程在银幕上持续的时间； t ——所观察过程的实际持续时间。

由于在银幕上仔细观察所拍摄的过程或现象需要 3 秒，则式 (1-4) 可写成：

$$k = \frac{3}{t} \quad (1-5)$$

例 2：飞鸟的翅膀每秒振动五次（振动一次需 0.2 秒）。为了仔细观察其翅膀的振动，必须使每次振动在银幕上延长到 3 秒，即：

① 即运动减慢倍率。——译注

$$k = \frac{3}{0.2} = 15$$

复杂的物体运动或比例大的影象需要更大的减慢倍率。

在求得必要的减慢倍率后，摄影频率可按式求出：

$$n_0 = n_{np} \cdot k \quad (1-6)$$

式中， n_0 ——摄影频率； n_{np} ——影片放映频率； k ——必要的减慢倍率。

因为有声影片的放映频率为 24 格/秒，所以公式 (1-6) 可写成如下形式：

$$n_0 = 24 \cdot k \quad (1-7)$$

为了对快速和高速摄影所拍摄的资料进行科学分析，常采用慢速放映，这样可以相应地减慢摄影频率。有声影片的标准放映频率为 24 格/秒。

为了在有声电影中表现圆锯切削木材的过程(见例 1)，需要如下的摄影频率：

$$n_0 = 24 \cdot 75 = 1,800 \text{ 格/秒}$$

而为了表现飞鸟翅膀的运动(见例 2)，需要的摄影频率是：

$$n_0 = 24 \cdot 15 = 360 \text{ 格/秒}$$

为在影片中表现某些现象和过程，可根据公式 (1-3) 和 (1-5) 求得必要的减慢倍率和根据公式 (1-7) 求得摄影频率，这些数值列于表 1-1 内。

拍摄模型时必要减慢倍率的计算

有时需要在银幕上表现在自然条件下难于或不可能创造出和拍摄到的一些场面，如山崩、地震时巨大建筑物倒塌、大厦火灾、海上风暴、列车倾覆、飞机遇险、汽车相撞、桥梁折断等。

为了能在银幕上再现这些情景，常要利用模型。模型是比实物(如汽车、飞机、火车、各种建筑物以及整个工厂、村镇和城市等)小很多倍的复制品。

要使发生于模型场面中的事件在银幕上看起来逼真，必须减慢小尺寸模型的运动速度，因此，需要采用快速摄影。

从自由落体定律导出的拍摄模型时的必要减慢倍率是：

$$k = \sqrt{\frac{1}{m}} \quad (1-8)$$

式中， m ——模型的比例尺(小模型尺寸与实物尺寸之比)。

根据公式(1-7)可求出摄影频率，当拍摄模型时摄影频率又可用下式表示：

$$n_0 = 24 \sqrt{\frac{1}{m}} \quad (1-9)$$

在银幕上分析某些快速运动物体和短暂过程时必要的减慢倍率和摄影频率

表1-1

物体、过程或现象	运动速度 (米/秒)	持续时间 (秒)	减慢倍率 (K)	摄影频率 (格/秒)
人的通常运动	1	—	1	24
降落伞打开	—	4/5	4	96
跑动中的短跑运动员	10	—	10	240
飞行中的鸟(振翼5次/秒)	—	1/5	15	360
缝纫机在工作(360针/分)	—	$\frac{1}{6}$	18	432
以每小时 90 公里速度行驶的汽车	25	—	25	600
眨眼	—	1/10	30	720
在金属上钻孔(钻头转速为750转/分)	—	1/13	38	900
在车床上切削金属	50	—	50	1,200
用圆锯切削木头	75	—	75	1,800
汽车轮胎爆裂	—	1/100	300	7,200
空气中的声波	330	—	330	7,900

续表

物体、过程或现象	运动速度 (米/秒)	持续时间 (秒)	减慢倍率 (K)	摄影频率 (格/秒)
飞行中的蜜蜂(振翼 220 次/秒)	—	1/220	660	15,840
疾行的枪弹	800	—	800	19,200
水中的声波	1,500	—	1,500	36,000
爆炸的气浪	400	—	4,000	96,000
爆裂的玻璃中的压缩波	5,000	—	5,000	120,000
空气中的电火花	—	1/200,000	600,000	14,400,000

快速和高速电影摄影的频率范围

普通电影摄影机适于按 24 格/秒的标准摄影频率进行拍摄，但是很多 35 毫米的电影摄影机允许把拍摄速度提高到 32—48 格/秒，而 16 毫米电影摄影机允许把摄影频率提高到 64 格/秒。用普通电影摄影机将摄影频率提高到 32—64 格/秒进行的电影摄影叫作加速电影摄影。

胶片作间歇运动的具有快速抓片机构的 35 毫米特种电影摄影机，可保证 300 格/秒的摄影频率，而具有同样结构的 16 毫米电影摄影机的摄影频率则可达 600 格/秒。这种摄影称为快速电影摄影。

胶片连续运动的高速电影摄影机可进行更高频率的摄影。在这种摄影机中为了得到清晰的影象，就需要采用特殊装置——光学补偿器或者利用超短时曝光的方法，它们都可以使影象的模糊程度减小到人眼的分辨能力以下。

在高速电影摄影机中，连续运动的 35 毫米电影胶片的速度可以达到 40 米/秒，即可使摄影频率达到 2,000 格/秒。由于 16 毫米电影胶片的质量较小，它由一个片轴缠到另一个片轴的速度可达 60 米/秒。在这一运动速度下，16 毫米电影胶片的摄影频率为 8,000 格/秒，而对于 2×8 毫米电影胶片来说，摄影频率则可达到

16,000 格/秒。

在保持影片画格尺寸及其相对于片孔的位置均符合电影标准的前提下，这样高的摄影频率已达到最高极限。

在进行快速和高速摄影时，窄胶片比 35 毫米胶片具有明显的优点，因为使用窄胶片可以得到更高的摄影频率。

在胶片连续运动的某些高速电影摄影机内，使用减小画格高度的方法，可以提高摄影频率。但是，在 35 毫米电影胶片上，如将画格高度减小一半（已不再符合电影标准），摄影频率也只能提高一倍，即从 2,000 格/秒增加到 4,000 格/秒。采用 16 毫米电影胶片时，可以在不违反电影标准的情况下得到 8,000 格/秒的摄影频率。

继续提高摄影频率就需要采用超高速摄影方法，关于这种摄影方法将在第二章中论述。

胶片作间歇运动的快速电影摄影机

在胶片作间歇运动的快速电影摄影机内，感光乳剂层在胶片静止期内曝光是这种摄影机的主要优点，因为这样可以保证得到高清晰度的影象，同时画格在胶片上相对于片孔的位置也很准确。在这种摄影机上可以采用任何焦距的镜头（包括广角镜头和长焦距镜头）。

通过快速抓片机构使电影胶片在快速摄影机片槽内作间歇运动，而这种抓片机构的所有偏心轮则全是根据正弦加速度设计的。用数目较多的（4—8 个）抓片齿同时抓片，这样就可以使抓片负荷平均分配于几个片孔间隔上。制造这种摄影机时，保证抓片机构的高精度和精确平衡便具有头等重要的意义。由于拉片频率高会使胶片在片槽内产生抖动，从而导致影象清晰度降低，所以在这类摄影机内一定要采用定位针。

快速电影摄影机一般均配备一个可变开角的遮光器或一套可调换的不同开角的遮光器，以便在必要情况下不使高速运动物体

的影象过于模糊。

由于抓片机构有损坏的危险性，所以快速电影摄影机在极限速度下连续工作的时间有一定限度。

进行快速电影摄影时，对所用胶片的几何尺寸(指胶片宽度和打孔精度)提出了更高的要求。胶片的收缩率不应超过公称尺寸的0.2%。在其他方面，间歇式快速电影摄影机和普通电影摄影机的使用规程是一样的。

苏联生产四种型号的快速电影摄影机：ПСК-24M，1-KCK，1-CKJI(«速度»牌)——采用35毫米电影胶片；70KCK——采用70毫米电影胶片。苏联的电影制片厂和科研单位也采用其它国家生产的快速电影摄影机。

胶片作连续运动的高速电影摄影机

在高速电影摄影机内，胶片迅速地从供片盘连续移向收片盘。画格曝光是在运动着的胶片上进行的。

在以一定速度移动的胶片上，如何能得到清晰(不模糊)的影像呢？

第一类最简单的方法就是使胶片在极短的时间内曝光，并且还应使这一曝光时间内所形成的影象模糊程度极小(低于人眼的分辨能力极限)。在高速电影摄影机中获得极短曝光时间的方法有两种：一种是利用高速旋转的带有狭缝的圆盘(狭缝法)；另一种是使被摄物体受到与胶片运动相同步的照明，即利用同步闪光的电火花或脉冲灯照明(火花或脉冲照明法)，同时应防止被摄物体受到其它光线的干扰。

第二类方法是利用各种光学补偿装置。所谓光学补偿，就是利用运动的光学元件使镜头在胶片乳剂面上所形成的光学影像以与胶片一致的方向和速度进行运动。换言之，正因为曝光时光学影像的运动方向和速度与胶片相同，才保证了胶片上的画面是清晰的。

利用旋转的平行平面玻璃板或棱镜进行光学补偿

若在光路中加入平行平面玻璃板(图1-1),那么当它旋转时光线并不改变方向,只是沿箭头的方向偏移。其偏移量与光线入射角、玻璃折射率和平板厚度等参数有关,其相互关系如下式:

$$ss' = \frac{d \sin(i - i')}{\cos i'} \quad (1-10)$$

其中, ss' ——偏移量; i ——光线入射角; i' ——光线折射角;
 d ——玻璃平板厚度。

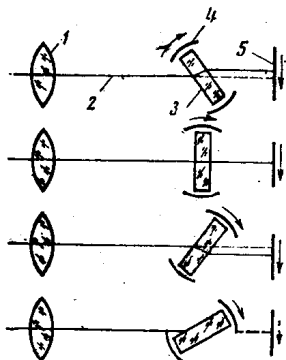


图 1-1 利用旋转的
平行平面玻璃板进行光学补偿

1. 物镜 2. 光线
3. 平行平面玻璃板 4. 遮
光器 5. 电影 胶片

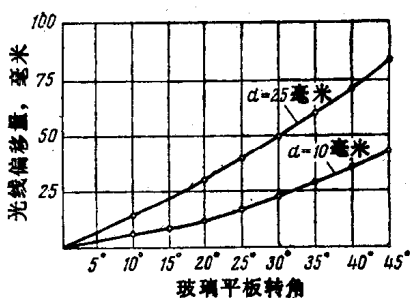


图1-2 光线偏移量
与不同厚度玻璃平板
转角的关系

图 1-2 所示,是当玻璃折射率等于1.516时光线偏移量与玻璃平板倾斜角的关系。图中两条曲线分别对应于两种不同厚度的平板($d=10$ 毫米和 $d=25$ 毫米),从这两条曲线可以看出,在平板倾斜角小于 15° 的范围内,光线的偏移量与倾斜角成正比。因此,只能利用玻璃平板在 30° 转角范围内的旋转来得到光学补偿。

在高速摄影机内通常采用界面为平行平面的棱镜,其作用和
平行平面玻璃板一样。

玻璃平板或棱镜应安装在圆筒形遮光器内，这种遮光器限制棱镜或平板的有效转角，同时决定画格曝光时间的长短。在有些摄影机内采用与补偿用的平板或棱镜协调工作的圆盘形遮光器。

在胶片作连续运动的现代高速摄影机中，利用旋转棱镜进行光学补偿的方法已得到广泛的应用。在苏联制造的CKC-1M型和东德制造的《潘塔蔡特-16》型高速摄影机上使用得最多。

CKC-1M型高速摄影机（见图1-3）是按16毫米和 2×8 毫米两种胶片规格设计的。在16毫米型的机器中采用四面的补偿棱镜并能在全画格条件下保证4,000格/秒的摄影频率。在 2×8 毫米型的机器中采用八面的棱镜，最高摄影频率可达8,000格/秒。



图 1-3 CKC-1M 型高速电
影摄影机

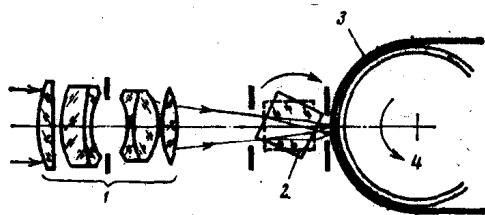


图 1-4 CKC-1M 型电影摄影机的光学系统
1. 物镜 2. 棱镜 3. 胶片 4. 输片齿轮

图1-4是CKC-1M型摄影机的光学系统图。在此机内，是用一个大直径的输片齿轮连续输送胶片。机内没有片槽，胶片在输片齿轮上曝光。通过取景放大镜直接根据胶片上的影象（或在胶片位置插放带毛面的胶片以便观察）进行取景和对焦。在机器上可安装各种不同的镜头。一般是以下列两种镜头配成一套： $f = 50$ 毫米， $1:2$ 和 $f = 35$ 毫米， $1:2$ 。

在 16 毫米型的机器中，每一画格的曝光时间是换格周期的 0.8 倍，即，

$$t = 0.8n^{-1} \quad (1-11)$$

式中， n ——摄影频率。

在 2×8 毫米型的机器中，每一画格的曝光时间为：

$$t = 0.84n^{-1} \quad (1-12)$$

因此，当使用 16 毫米胶片，摄影频率为 4,000 格/秒时，曝光时间为：

$$t = \frac{0.8}{4,000} = \frac{1}{5,000} \text{ 秒}$$

而使用 2×8 毫米胶片，摄影频率为 8,000 格/秒时，曝光时间为：

$$t = \frac{0.84}{8,000} = \frac{1}{9,524} \text{ 秒}$$

机器分别由两个交、直流两用电动机驱动，其中一个电动机带动输片齿轮和补偿棱镜，另一个则带动摩擦收片器的轴，图

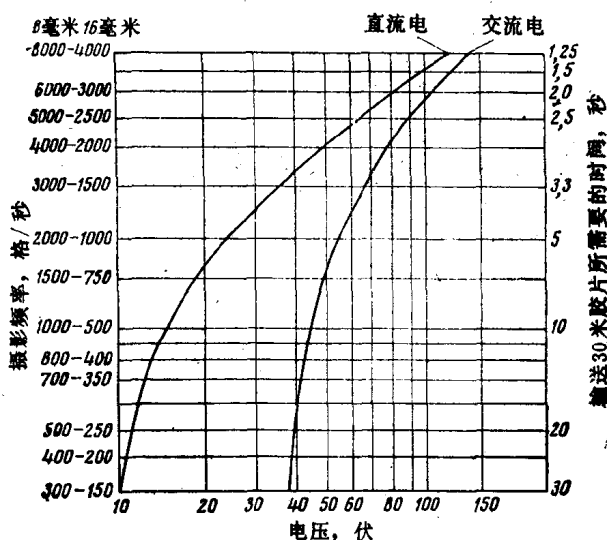


图 1-5 CKC-1 M 型摄影机在使用交流电和直流电时的工作特性

1-5表示摄影机在用直流电和交流电时的工作特性。

《潘塔蔡特-16》高速电影摄影机(图 1-6)采用 16 毫米胶片,可以得到 300、600、1,000、2,000 和 3,000 格/秒的稳定摄影频率。由于使用大功率三相同步电动机(电动机转速和外线电流频率同步)驱动,可以很快达到所给定的摄影频率。更换位于机器后壁门外的一对齿轮,可以改变摄影频率。



图 1-6 《潘塔蔡特-16》高速电影摄影机

图 1-7 是《潘塔蔡特-16》摄影机的结构示意图。光学补偿器是十二面的旋转棱镜。两个摄影镜头是专为与这一补偿器配套而设计的,可以互换使用,其规格是, $f = 35$ 毫米, 1:2 和 $f = 125$ 毫米, 1:2.8。

每一画格的曝光时间等于摄影频率的倒数, 即:

$$t = n^{-1} \quad (1-13)$$

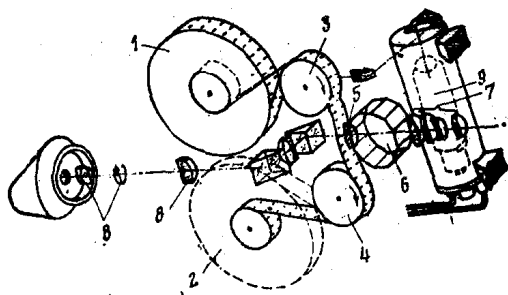


图 1-7 《潘塔蔡特-16》摄影机结构示意图

1. 2. 供片盘和收片盘 3. 4. 主动输片齿轮
5. 片窗 6. 补偿旋转棱镜 7. 物镜 8. 通过胶片对焦的放大镜 9. 时标气体放电灯

可通过放大率为 10 倍的取景放大镜，直接根据胶片或插在片槽内的带毛面的胶片进行取景和对焦。

机器由单独的控制台控制启动。

高速摄影机的胶片要作连续运动，并要利用旋转棱镜进行光学补偿，因此对它的改进主要有两个方面，一是进一步改善影象清晰度，二是使摄影过程自动化，例如，使给定的摄影频率稳定，使摄影机的工作与所拍摄过程的起始瞬间同步。

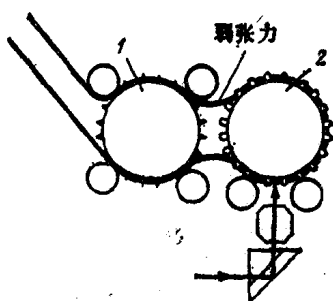


图 1-8 利用两个输片齿轮
输送电影胶片

1. 基开输片齿轮
2. 稳定用的辅助输片齿轮，胶片在这个齿轮上曝光

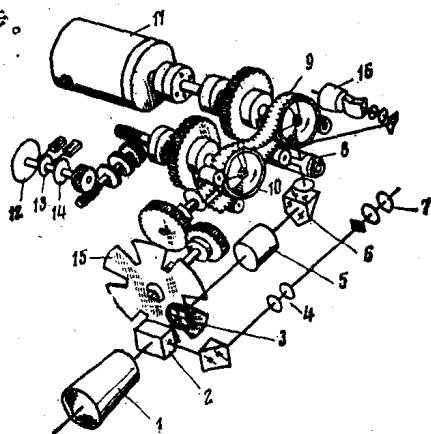


图 1-9 《希马格-16HD》摄影机结构图

1. 物镜 2. 把一部分光线分到取景器的分光棱镜 3. 第一次成象的片窗及场镜 4. 取景器物镜 5. 将影象转移到胶片的物镜 6. 转象棱镜 7. 取景器目镜 8. 旋转补偿棱镜 9. 曝光胶片的辅助输片齿轮 10. 输片齿轮 11. 电动机 12. 米数表 13. 使被摄物体开始动作的接触开关 14. 电动机自动断路器 15. 遮光器 16. 使示波器屏幕上的图象在胶片上成象(和所拍摄的过程或现象同时记录的光学系统)

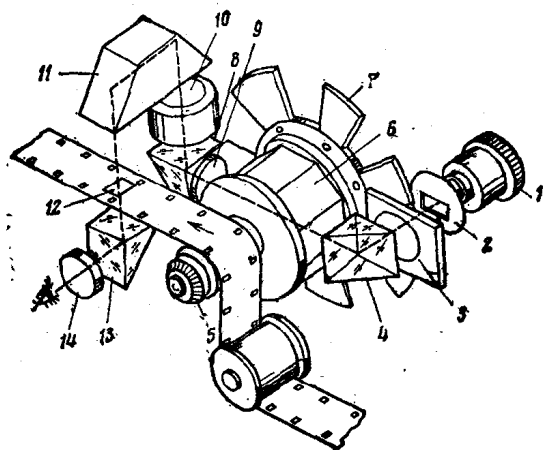


图 1-10 《希卡姆》摄影机的机构

1. 主镜头 2. 孔径遮板 3. 第一场镜
4. 第一偏转棱镜 5. 输片齿轮 6. 旋转补偿棱镜 7. 遮光器 8. 第二偏转棱镜
9. 第二场镜 10. 将被摄体影像传送到胶片的第二物镜 11. 转象棱镜 12. 片窗 13. 将片窗内影像转入取景器的偏转棱镜 14. 取景器或使示波器屏幕上的图象从胶片背面在胶片上成象的物镜

高速输片时，特别是在机器起动时，由于胶片的张力很大并不断增加，常产生使光学补偿精度下降的振动。因此，在输片系统的结构中要采用第二个（稳定用）输片齿轮（图 1-8）。它的作用在于不加很大拉力而使胶片在曝光时刻处于正确位置。稳定用输片齿轮的齿就像定位针一样，全部充满片孔。第一个输片齿轮的作用是由供片盘拉出胶片并遏止收片盘摩擦收片器的拉力。它的齿并不全部充满片孔，这是由于考虑到胶片受到很大拉力，会在弹性变形限度内被拉长的缘故。日本的《希马格-16 HD》型高速摄影机就是这样构成的，图 1-9 是该机示意图。

在美国制的《希卡姆》型摄影机中没有齿轮传动，该机的所有运动元件均位于同一根轴上（图 1-10），这样做可使振动减小。

通过升速均匀的液压联轴器，可把电动机轴和这根唯一的轴联接起来。

利用旋转的镜面多面体进行光学补偿

图 1-11 所示是利用旋转的镜面多面体进行光学补偿的原理图。

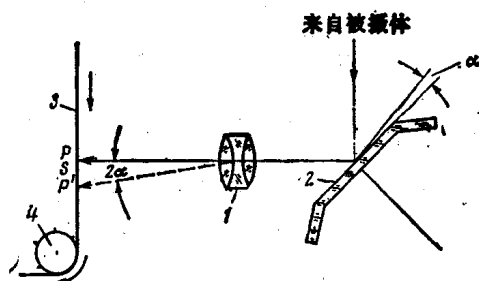


图 1-11 利用旋转的镜面多面体进行光学补偿的原理图

1. 物镜 2. 多面体上的平镜面 3. 电影胶片
4. 输片齿轮

摄影镜头不是直接朝向被摄体，而是对着镜面多面体所反射的光线。由于镜面多面体是旋转的，因此，平的镜面依次在镜头前通过并连续改变它们和镜头光轴之间的倾斜角，从而引起胶片上影象的移动。在摄影机的片窗中，影象沿着胶片的移动方向一格接着一格地连续移动。

影象的移动决定于每一镜面对光轴的转角和摄影镜头的焦距。当镜面转角为 α 时，反射光转角为 2α 。因此，物体上某一点影象所移动的距离 s (即 $p-p'$)，与镜面转角和镜头焦距的关系如下：

$$s = 2\alpha \cdot f \quad (1-14)$$

摄影物镜和多面体的每一镜面共同构成一个统一的经过精确计算的光学系统。不可更换或移动镜头，否则会破坏这一系统。对位于有限距离的物体调焦时，不能用移动镜头的方法，只能用增加附加镜头的方法，