

光学仪器理论

第五分册

著者：А.И.Тудоровский

中国科学院

光学精密机械仪器研究所 翻印

1957.5

第十七章 投影仪

§234. 投影仪概说和类别

本章中称为投影仪的是指那些将物体——通常是物体的图片——照明后成像（大多数情况是放大的像）于屏上的光学系统。投影仪的光学系统由二部分组成：一部是作为聚光用的照明系统；另一部分是作为成像用的投影系统。（为了能在像平面上获得最大的照度）所以，应该正确的选择这二部分：使其大小和光沉的性质有相应的配合。

投影仪可分为二大类：凡是光线透过待投影物或待投影物的一部分而投影成像的归于第一类，这一类投影仪称为透射投影仪。第二类投影仪则为将那些不透明物体投影成像的投影仪。在这类投影仪中光线自侧面照明待投影物体，然后利用物体的漫反射光束经投影系统成像于屏上。以这种方式投影成像的投影仪称为投射投影仪。

应用透射投影仪的场合是很多的。例如在课堂中常用于将幻灯片投影在屏上的形形色色的幻灯机，带有复什自动移动影片机构的电影机，把照象负像放大籍以在照相纸上获得放大照相的照相放大机，以及在对航测照片进行处理以获得地形图时所用的投影仪等。末了一种投影仪不仅可以改变像的大小，而且可以使像变形，这样就可以校正由于从飞机上拍摄地形时照相机光轴和垂线间的倾斜所引起底片上地形的畸变。在精密机械制造中，透射投影仪可用来检验各种量规的截面。只要事先在屏上画好按比例放大的精确截面图形，然后把待杆物的截面投影到屏上比较即可。最后可以指出透射投影仪在实验室的计量实验中各色各样的应用。例如我们常利用钳尺法来度量某一物体转过的角度。此时就要获得缝或孔栏明亮的像，在所有其他类似的情形中亦常应用由照明和投影二部分组成的光学系统。它的基本构造一如那些普通形

式大小的投影仪。

投射投影仪最重要的应用就是在讲堂内屏上获得书上不透明图形的像。

把观察标本大大地放大后投影到屏上的显微投影仪将在讲述显微镜的那一章中讨论。

有关主体投影及立体电影机等范畴内的问题则不予讨论。

若要瞭解投影光学在电影中的应用可以参攷 E. M. Голдовский 及 H. Д. Анощенко 所著的书，在 E. M. Голдовский 所著的书中附有文献目录可以查攷。

E. P. Liesegang 的论文集是阐述投影仪问题方面相当全面而又简洁的书籍，其中附有丰富的文献索引目录。在这方面较新的补充则可参攷 H. Schering (1944) 的论文集。

§ 235. 透射投影时屏上的照度

在有关投影仪应用的所有问题中投影仪射到屏上去的光通量的多寡有着特别重大的意义，这光通量决定屏上的照度。

为了便于实验的估计和确定在屏上的照度，必需确定屏上成像范围，像的范围是由投影仪的幻灯片或电影放映机的电影片的景窗大小决定，像的范围内应该照明均匀，在边缘处没有斜纹，照度不应低於实验时对投影系统应用在不同条件下所得出的极限值。

一般认为，在讲堂中投影仪到屏的距离不太时，照度最小不小于 20—25 勒克司，在大的娱乐室或电影院中则要有大的照度——50—100 勒克司。

知道屏的大小和需要的照度，则能计算出通过投影物镜上瞳孔的光通量，当然这光通量就是由光源发出经过照明系统，投影图片，投影系统上的光通量。照明系统本身的功用是聚集由光源发出的极大部分光通量，集中到图片上再进入投影系统的入瞳。关于照明系统的组成部分则可以是简单的透镜，二块三块或更多

的透鏡所組成的透鏡系或是球面鏡，拋物面鏡，橢圓面鏡，亦可以是透鏡和面鏡的組合。

圖 367 是一個投影系統中的光路圖。光沉為圓形，其直徑為 AB ， MN 表示照明系統。

在圖上表示的只是茲透鏡的照明系統，光沉 AB 經茲透鏡 MN 成像於 $A'B'$ 。投影物鏡為 O_1O_2 ，在圖上表示的亦是茲透鏡型的，所以平面

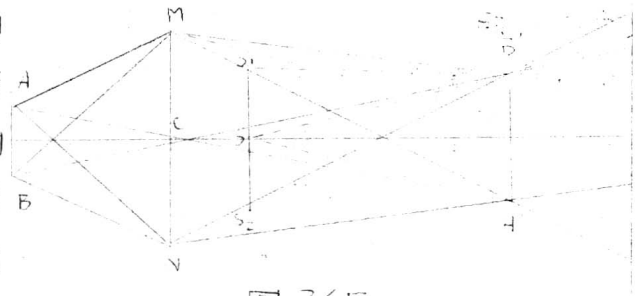


圖 367

O_1O_2 就是入瞳和出瞳。所

有通過投影系統的光通量皆在 $AMB'O_2$ 、 $O_2A'NB$ 的體積範圍內。所以投影圖片（如幻燈片或電影片上的景窗）的框子應該放在該體積內。因為投影儀物鏡到屏的距離比物鏡的焦距大得多，故透過圖片的光線經物鏡射出后几乎是平行的。

由公式 (103.13) 可知，屏上任一點的照度以幅透化單位時用下式表示：

$$E' = \frac{KB S_p \cos^4 \omega'}{l^2} \quad (225.1)$$

式中 B 是光沉以熙提為單位的亮度數值， S_p 是出瞳平面和屏上研討亮度的該點至投影物鏡所化錐形光束的截面面積， ω' 是此錐形光束的主光線和投影物鏡光軸的夾角， l 是物鏡到屏上的軸向距離， K 是整個光學系統的透光係數，亦即是投影物鏡出去的光通量與進入照明系統 MN 光通量之比。在此我們假定光沉亮度在所有方向上都是相同的，我假定物鏡的入瞳是足夠大的，這樣凡是由照明系統出來通過圖片的光束都能通過物鏡。

公式 (235.1) 指出了屏上的照度首先決定於光沉的亮度。因為角度 ω' 不超過 5° 所以 $\cos^4 \omega'$ 約等於 1。為了使得屏上的照度大體上均勻，則要求當不同的 ω' 角度時光束的截面面積 S_p

之间差别不大。在图 367 上 PSQ 是由图片中心 S 成像光束的子午截面，而 RS, T 是边缘点 S₁ 构成的子午截面，在构成以图片上任一点光束的子午截面时必须是该点与 MN A'B' 中某一对点联结而成的。在上述情况下 RT 比 PQ 上小得多。假如使图片 S₁ S₂ 接近照明系统 MN 而不变物镜 O 的位置则光束截面 PSQ 减小得不多而光束截面 RS, T 则显著地增大。若图片高度 S₁ S₂ 与照明系统的正瞳直径 MN 相等且 S₁ S₂ 和 MN 相重合，则中心点或边缘点光束与物镜正瞳的截面相等，就是 $K_1 K_2 = L_1 \odot_2$ 。这结果可由一对相似三角形 $\triangle K_1 CK_2$ 和 $\triangle B'CA'$ 及 $\triangle L_1 MO_2$ 和 $\triangle B'MA'$ 的关系得出。

假如 S₁ S₂ 小于或等于光成像的直径 B'A'，则不论 S₁ S₂ 接近或移远（也即接近平面 A'B'）总是可以得到相当均匀的照明。至于要精确地得到由边缘点和中心点构成光束与正射光瞳的截面相等，则必须使 S₁ S₂ 和 MN 相重合，这可由一对相似三角形证明。

不论由 (235.1) 得出的结果或以下的讨论中，我们都假定投影物镜的正瞳都超过由物镜正光会聚于屏上点的锥形光束截面 S_p。实际上，一般正瞳常限制了通过待投影图元景框的光束，此时公式 (235.1) 中的 S_p 就等于 $\frac{1}{4} \pi D^2$ ，D 为正瞳的圆直径。以 f' 表示物镜的焦距，以 β 表示在屏上的放大率，按公式 (80.2) 有：

$$l^2 = \beta^2 f'^2$$

再把所得的 S_p 及 l 代入公式 (235.1) 有：

$$E' = \frac{\kappa B \pi D^2 \cos^4 \omega'}{4 \beta^2 f'^2} \quad (235.2)$$

由此可见：屏上的照度 E' 与投影物镜的相对孔径 $(\frac{D}{f'})$ 的平方

成正比，与在屏上的垂轴放大率 β 的平方成反比，若待投影图形范围内所有可能方向的光束充满物镜的出瞳，则在屏上得到整个照明均匀的像。

因为投影仪器的光学系统都比较复杂，所以当不放图形时，光通量由于多次吸收和反射损失达 $40 \sim 45\%$ 。这就是说在公式中的透光系数 K 不超过 0.6 。

装着带头口的旋转盘或其他形式的遮光板，就是装着所谓“光闸”的电影投影机中，由于光闸在一半时间内起了遮光作用，所以就整个过程说来，通过电影投影机的光通量只有全部光通量的一半，因此这种投影机的透光系数为 $K = 0.6 \times 0.5 = 0.3$ 。

由以上的阐述显然可知，若要在屏上获得均匀而又足够的照度，只有正确地选择与投影机使用条件及光沉性质相适应的照明器和物镜的光学系统和光学技术特性才能达到目的。

§ 236. 用在透射投影机中的光沉

由公式 (235.1) 可知，屏上照度正比于光沉的亮度，因此光沉亮度愈大则对投影机愈有利。在所有具有大亮度的光沉中弧光灯处于首要地位。通常使用起来较好的是直流弧光灯其电极用普通碳或是具有强烈地燃烧性的烟炭。交流弧光灯的亮度则较弱且燃烧时还伴随着相当大的声音，而要消除这种声音必须采用特别的方法。

因为碳极电弧的温度很高，所以才有大的亮度。在直流弧光中正电极焰口处温度可达到 4200°K ，负电极的温度亦在 3500°K 左右。一般碳弧焰口的直径与电弧的电流强度有关，下面列出一一些具体的数字：

电流强度 (安培) 20 30 50 75 100 125 150

焰口直径 (毫米) 9.3 9.5 10.9 14.3 17.5 20.0 23.0

焰口的面积 S 可用下面经验公式计算：

$$S = 0.2 i^{\frac{3}{2}}$$

此式之 i 为用安培为单位之电流弧强度， S 为用毫米² 为单位之面积。

一般碳弧焰口的亮度在 14000 ~ 18000 熙提 (cd) 范围内。

焰炭极和强烈燃烧性炭极不同于普通炭极，在普通炭极的内部即所谓“芯子”部分含有各种物质：例如钙盐、钨盐、钼盐以及其他的元素。因此在焰炭等电极电弧周围的气状层的温度比普通炭弧高得多，它的发光亮度亦就大得多。在极强烈燃烧性碳极板焰口的中心亮度可达到 9000 熙提，同时这种焰炭电弧发光面积亦比普通碳极电极的发光面积大得多。

下面列示“KC”是 焰炭极的一些数字例子：

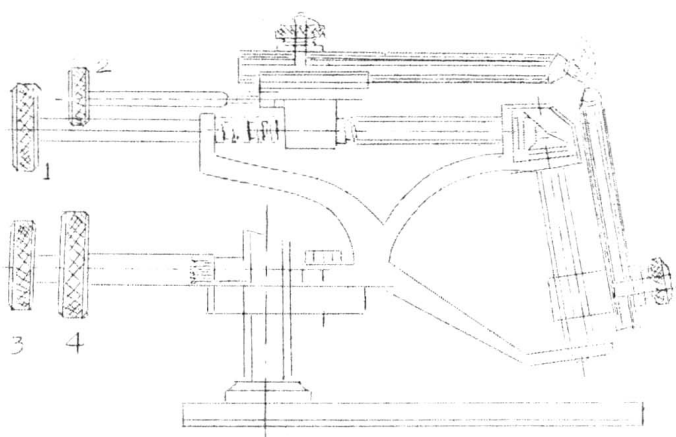
电流类型	电流强度(安培)	焰口平均亮度(熙提)	弧长(毫米)
直流 {	150	36000	20
	80	37000	12
交流 {	150	18000	15
	80	18000	12

垂直弧光灯在光学技术特性方面比其他光源优越得多，但目前碳弧灯主要只用在大电视中电影机的光源，其他类型的投影仪则都用那些使用非常便利的电弧白炽灯(电灯)。

必须指出，对于那些演示物理光学基本现象用的弧光灯是不能用任何其他光源来代替。例如其他光源所发出的兰色和紫色光的亮度较弱，不足以在屏上得到清楚的光谱。而当利用电弧作为光源时则能轻巧且便利地演示紫外光的性质和作用，他如要作衍射和干涉现象的许多演示实验时首先要有大亮度的光源。在很多类似这种情况下，由于我们要求的只是亮度，不需顾及电流的大小，所以我们用不大的手调弧光灯就能达到我们的要求。通常供给这种手调弧光灯的直流电流强度为 10 — 15 安培。若用交流电

沉时則稍感不便。

图 368 是手调直流弧光灯的图形，由于它构造简单和使用便利，所以一般常々用它，弧光灯的正极在水平位置，负极在下面



与正极成一定的角度。焰口是开的，便于各方向上的亮度分配。螺旋 2 的圆柱头，可以使正电极沿它的长度方向移动。螺旋 1 的一端与另一碳极的机构连结，起弧时可使二电极接触通电，在燃烧期间可以调节电弧下面的螺旋 3 和 4，一个用来调节整个弧光灯的上下，一个用来使整个弧光灯绕垂直轴旋转。这样结构可以使焰口精确地处于投影系统的光轴上。

所有应用于投影仪的光源中，特殊构造的白炽电灯佔第二位。真空白炽电灯电丝的表面亮度为 $180 \sim 250$ 熙提，充气灯的电度，则与电流强度有关，一般为 $900 \sim 1700$ 熙提，甚至可以达到 3000 熙提，然而这亮度不能被利用，因而投影灯的反光体不可能化成连续的表面，一般这些反光体都做成螺旋状物或者是螺距很小排列在平面上的螺旋形丝，螺旋的直径一般从 $1.5 \sim 3$ 毫米，长度 $6 \sim 8$ 毫米到 $10 \sim 20$ 毫米之间。由于反光体不可能做成连续的表面，所以反光体的平均亮度或有效亮度总是低于上面所说的亮度值，如充气灯反光体的表面亮度为 1710 熙提，有效亮度，约为 720 熙提，表面亮度为 2700 熙提时有效亮度约为 2200 熙

提。

若在灯后面装一个球面反射镜，使发光体位于球面的曲率中心，则由球面反射后的光线仍交于球面的曲率中心，亦即是说在发光表面上有一如发光体表面同样大小的倒像。假如再稍稍转动镜面，则各了螺旋状物的像则处于螺旋状物之间，这样便近似于连续的发光表面了，这也就增加了平均（有效）亮度。

在图369中粗黑线表示特制电影机灯炮的螺旋状灯丝，细黑

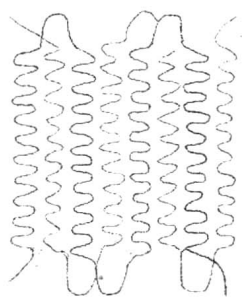


图 369

线则表示与灯丝相对应的偏移后的像。

用减小电影机和投影机灯泡中发光体螺旋形线之间的间距和螺距，可以达到增加有效（或常说“表现”）亮度的目的。但是由于间隙小后螺旋形线容易接触而引起短路，损坏灯炮。所以制造者们全力以付地研究特殊的制造和牢固螺旋线的方法，最近试制成功了不用螺旋线而用金属带和金属板的低压（30伏）灯炮。其平均有效亮度达2300 熙提，（K-22灯泡，1947年MHC手册）功率为400瓦特，发光面积为 6.5×9 毫米²。

电灯的亮度显著地决定于电流强度。投影灯在上述亮度运用值时惯常是超负荷的，因此它的使用寿命比一般的照明电灯低得多，具有2000 熙提左右亮度的投影机灯泡寿命约100 小时，而普通灯泡的寿命却为1000小时左右。

下面的例子指出了当解决有关投影仪光学系统合理构造的问题时光沉亮度的数值。

假定要做一丁投影仪，其物鏡离屏的距离为10米。要求屏上的照度不低于30勒克司，或 3×10^{-3} 辐脱，假定公式(235.1)中的 $K=0.5$ ， $\ell=163$ 厘米，则得：

$$B S_p = 6000$$

若光源用焰口亮度为16000 熙提的弧光灯则物鏡正瞳的面积求得为：

$$S_p = 0.375 \text{ 厘米}^2$$

若光源用有效亮度为200 熙提的白炽灯则：

$$S_p = 30 \text{ cm}^2$$

在第一种情形正瞳直径约为7毫米，而第二种情形正瞳直径则约为62毫米。

在第一种应用弧光灯的情形下，照明系统成像于投影系统的入瞳平面上，由于整个孔径的直径不超过一厘米，故仅需用一个简单的消色差投影物鏡就够了。

在第二种情形下，则必须用结构比較复杂的投影物鏡。

其它的光沉亦几乎多是用電的，在投影仪中不用電的光沉有较广泛应用的可以提出所謂“ДРЯНМОНОДОВ”灯。在这种灯的灯头是使用在氩气中燃燒的氢焰，或使用比較安全的在氩气中燃燒的煤气焰。这种光沉是用氧焰灼热生石灰的小圓柱或者灼热钻石的厚片使到很高的温度，这样发光就有很大的亮度。

亦有用作做乙炔焰的，用反光網的白炽灯的，用带有用电流加热的耐火条的НЕРНОТ 灯的以及其他等々。

§ 237. 透射投影仪的照明系统

在 § 325 讨论屏的照明条件中得出了图片在由一定照明系统所给出的光束中有二个最有利的位罝。在用大尺寸的幻灯片，要使整个图片能照明均匀，则必需把幻灯片放在此二有利位罝的第

一个位置，就是放在照明系统的正瞳平面上。

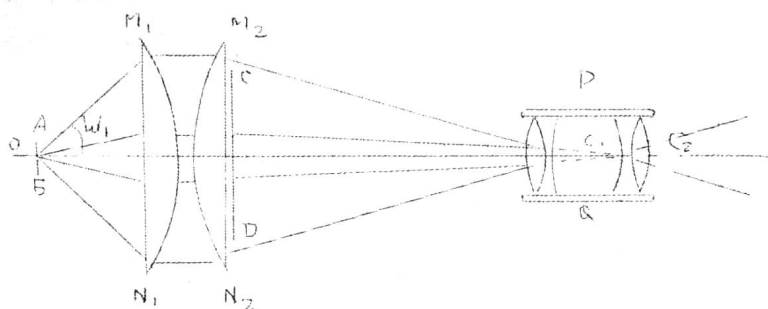


图 370

图 370 是最常用的投影机图形，投影机的照明系统是二块凸面相对的平凸透镜组成的。光源 AB 则放在第一块平凸透镜的焦点或放在平凸透的邻近，因此在二透镜间的光线几乎是平行的，这样在第二透镜 M_1N_1 的焦点或焦点的附近获得了光放大了的像，而且此处光束的横截面最小，投影系统 PQ 亦就放在此处。透明图片 CD (幻灯片) 放在透镜 M_2N_2 的附近。凡是由一个、二个或更多个透镜组成的照明器称为聚光器，以后我们把拉丁字去掉而利用德国的变词——聚光器。

因为聚光器对色差是很少校正的，所以边缘光常成带色的像，所以幻灯片应该比聚光器小，以使画幅边缘没有颜色，假若没有电弧光，则放大的烟口往往比物镜的入瞳小，也就是没有完全利用物镜的“集光作用”。因为在太多情况下，不允许把电弧很靠近透镜 MN (若靠得太近透镜有裂开的危险)，所以不能用减小电弧 AB 和聚光器间距离的方法来获得像的放大。图 370 中所画的聚光器具有较大的球差，光线所校正的近轴光线会聚于 O_2 点，而边缘光线则会聚于 O_1 点。由于球差的缘故，光束模糊圆的直径较大，因此有必要增大投影物镜入射口径的直径。

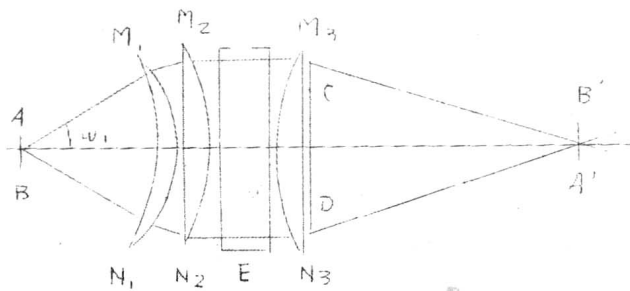
由图中显然可见，当聚光器到光沉的距离给定后，投影物镜的焦距愈大，则照明系统的焦距亦应愈大。在物镜需要更换的情况下，聚光器的第二个透镜做成可以移动的。

若以 ω_1 表示边缘光线 OM_1 和光轴的夹角，则按照公式 (101.5) 通过聚光器入瞳的整个光通量 F 可以表示：

$$F = \pi B S_1 \sin^2 \omega_1$$

此处 S_1 为发光表面的面积。如图 370 中所示的双平凸透镜做成的聚光器中，角 $2\omega_1$ ，可以达到 60° ；一个双凸透镜组成的聚光器则角度 $2\omega_1$ 不超过 45° 。

为了增大孔径角，亦即为了增加进到照明器中的光通量，就采用如图 371 所示的由三块透镜组成的聚光器。聚光器中第一块透镜 M_1N_1 是一块



具有齐明 (§61) 光路的正的弯月透镜，后面的二块透镜 M_2N_2 和 M_3N_3 如图所示都是平凸透镜，这时角度 $2\omega_1$ 增加到近于 90° 。此外和二凸透镜组成的聚光器比较，光沉像 $A'B'$ 的像差也减小了。以至可以使用较小孔径的物镜在第二个光阑位置处光通量没有损失，通常在光束成平行光的第二和第三块透镜间放一个由平滑透明玻璃制成的盛水容器，这样可以利用水吸收掉红外部分，这样就减弱了光束的发热作用。

在用小尺寸电影镜头 (18×24 毫米) 的电影机中，有可能用第二个方法来使投影图形有均匀照明，这里所说第二个方法就是把景框放在光沉的像平面上或者接近光沉的像平面。在这种场合，

我们用球形或抛物形的反射镜。有些构造中则是由反射镜和聚光器联合组成，图 372 是用反射镜型的照明器图，我们称为“反射镜灯”。电弧碳极 A 为正极，B 为负极，此二碳极均水平安放，而且 B 在反射镜中心孔中间穿过。在接近于焰口成像平面，也即接近于光束截面最小的平面处，放上电影放映机的景窗 CD。物镜 PQ 的孔径大小只要使由景窗出来的光束都能通过物镜就可以了。对于这样结构的照明器由反射镜所成的边缘光束间的角度 2ω

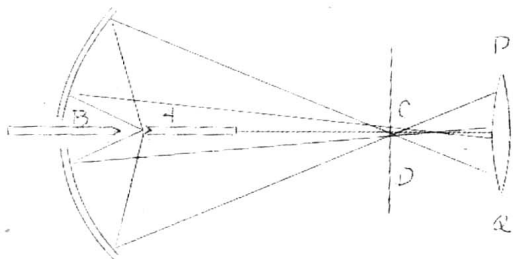


图 372

可达 135° ，弧的焰口可以放大到 12 倍一般则在 6—12 倍之间，有时如双透镜的一样，放大 2—3 倍，应该附带说明，在这种反射照明系统中，光能的损失并且没有色差。

正如像电影院中所要求的情况一样，投影仪和屏间的距离很大，此时就必需使用长焦距物镜，因之物镜的尺寸也就该很大。为了避免这个起见，用第三种照明投影图片的方法，这种照明器如图 373 所示，在由照明系统（反射镜或透镜）所成光沉的

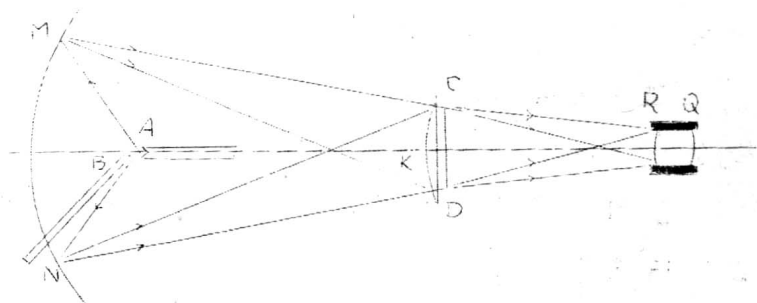


图 373

放大像的原平面处附近放一聚光镜K（一组），贴近透镜K后面放图片CD。使聚光镜K刚好把照明系统的正瞳MN成像于适当减小的物镜PQ的入瞳处，这样就能更好地利用了由光照明器出来的所有光束。（有关强力照明的电影放映机情况可参读A. C. Бортис [1] 的论文。）

在要投影大尺寸的图片和较强照明的投影仪器中，常采用反射镜和透镜组成的复合照明系统。图374就是蔡司的大投影仪光路图，光源是电弧探照灯，正电极A和负电极B位于同一直线上，而且负电极穿过抛物金属反射镜的 M_1N_1 的中心。电弧的焰口位于

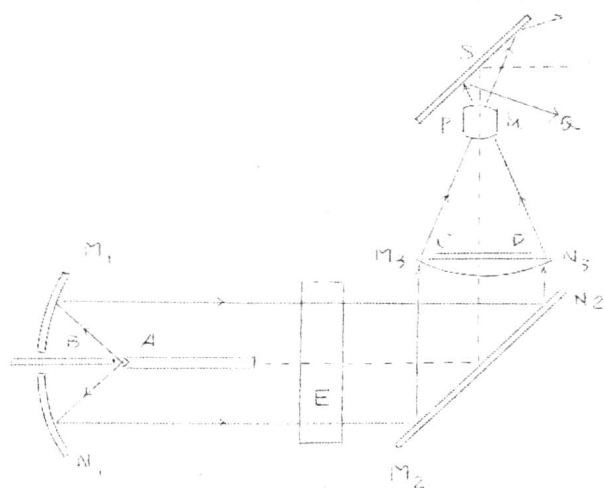


图 374

反射镜的焦点，因此反射后的光线平行地通过水冷却器G。再经与探照灯光轴成 45° 的平面镜 M_2N_2 反射，通过聚光透镜 M_3N_3 把电弧焰口成像在物镜PQ入瞳的附近，幻灯片CD则放在聚光镜 M_3N_3 表面上的框子中，经物镜PQ及反射镜S改变光束成水平方向后成像于屏上。为了避免反射后成二个像，因此涂银层应在平面反射镜的外表面；为了不至于在反射后像发生畸变，平面镜应当是高精度的光学平面。

在物理教室和讲堂中用的投影机应具有投影水平物体的附件。这样才能投影所谓“磁谱”，亦即是铁屑在磁极和电流所形成的磁场中分布的形状；这样才能把发生在玻璃容器内液体的表面或水平玻璃板表面上的各种不同物理现象，化学现象投影到屏上的等々。图 375 便是这样的附件。有这种幻灯机可以投影水平事物，亦有用变换特别幻灯机的

元件再实现的。图中 M_1N_1 和 M_3N_3 是如图 370 中的二块平凸透镜组成一丁聚光器，这二块平凸透镜的二个平面是互相垂直的。如像图

374 中所画的一样，平面镜 M_2N_2 是用来改变照明光束的方向的。投影物体 $C D$ 放在透镜 M_3N_3 的水平面上。以后的光路如图 374 一样，有时以全反射的直角棱镜来代替反射镜 S 。

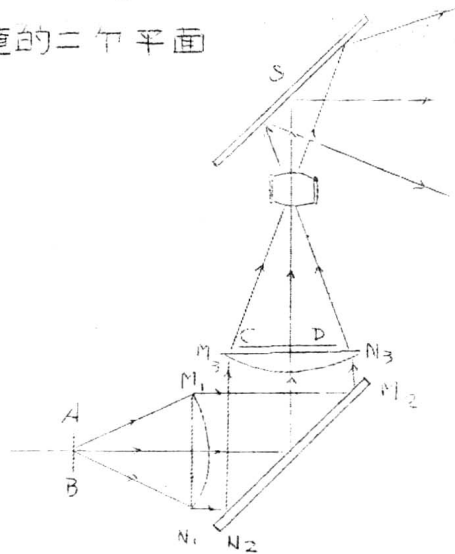


图 375

正如我们前面所指示的，在近代透射投影机中除了电影放映机以外，光线都是用具有集中的螺旋形发光物体特殊结构的白炽电灯的，几乎不采用弧光灯。当采用光流不同，投影机的外形和机械结构就有所不同，但光学系统却没有重要的区别。在大多数的情形中，装有电灯的投影机，常是透射投影和反射投影合用一丁光源，这种投影机的图在下节中将可以看到。

§ 238、透射投影机

在上课时，在演讲中 在需要时把那些不透明的图画，画像、

表格以及课文等投影出来，还广泛地用投射投影机。

这种投影机 and 透射投影机比较起来最突出的优点是
是不需用那价钱昂贵笨重又相当不便利的幻灯片而可以投影任何
合适的图片。在投射投影机中，都是从侧面照明待投影的图片，
由于图片的散射和吸收损失了一部分射来的光能，因此能够进到
投影机镜去的只是由图片漫反射出来的一部分光流，由此可见，
若要在屏上有足够的照度，就必须很强烈地照明图片，并采用集光
本领尽可能大的投影机。一般说来投射投影时应该用有漫反射性的
图片，因为经过镜式反射的光线不能进到物镜中去，但实际上，
仅是那些粗糙的白的表面才近似完全漫反射，而大部分物体的表
面，例如光滑的纸面则除了漫反射外，还有部分是镜式反射的。图
片上的这种部分镜式反射，对于投射投影说来是不利的。

投影图像时，为了使得图片平坦，常用玻璃板压在图片上面。
但是由于玻璃板的表面的镜式反射（定向反射）系数相当大，
这样就造成了不必要的能量损失。因此应该尽可能不用玻璃板而
用框子使图片平坦。

由前述可知，当估计投射在屏上的照度时，必须注意投影图
像或投影物体表面漫射性质：

某一表面上的反射光通量与入射到该表面的入射光通量的比
我们称为该表面的反射系数，通常用字母 ρ 表示，设若在表面上
由入射光通量所给出的照度为 E ，该表面的发光度（§17）为 R
则按照(197.2)就有

$$R = \rho E \quad (238.1)$$

若为理想的反射面，则 $\rho = 1$ ，若表面是对各方向都是均匀
散射的则称为完全漫反射面（диффузно отражающая
поверхность，当完全漫反射时，所有方向上的亮度 B_ρ 都相同
（朗伯定律 §10）。

按公式(20.9) (197.3) 和 (197.4)， B_ρ 与发光强度 R 之间有

$$B_p = \frac{R}{\pi} = \frac{\rho E}{10 + \pi} \quad \text{照提} = \rho E \quad (238.2)$$

此式中照度E单位用勒克司，对前面具有镜式和漫射混合性质的表面或看具有镜式反射性质的表面以及具有方向性散射的表面而言，反射光的亮度 B_p 随方向而异。

下面列出了一些具有漫反射性质的表面底反射系数：

氧化镁	0.96
硫酸钡	0.95
白色乳胶漆	0.72
白色油胶	0.02

现在我们来比较投影摄影仪和透射摄影仪投在屏上的照度，我们假设在这二种摄影仪中的光阑亮度 B ，和投影物镜都是相同的，对透射摄影仪而言，已得其照度如(235.2)式所示，对投影摄影仪而言，则照度 E_{ap} 以下式表之：

$$E_{ap} = \frac{K_1 B_p \pi D^2}{4 \beta^2 f^2} \quad (238.3)$$

此式 K_1 仅是物镜的通光系数而不是整个系统的透光系数， B_p 则是通过物镜的光束的亮度，亦就是投影图形表面的漫射光的亮度。

由公式亮度 B_p (238.2) 决定，在这个公式中， E 为由摄影仪的照明系数光阑所给出在漫反射图形表面上的照度，因此按公式(101.4)有

$$E = \frac{dF}{dS'} = \pi B_0 \sin^2 u'$$

式中 u' 是照明系统像方的半孔径角，把此式代入(238.2)就得漫反射时 B_p 和 ρ ， B_0 及 u' 的关系式

$$B_p = \rho B_0 \sin^2 u' \quad (238.4)$$