

摄影与空中摄影学

武汉测绘学院航空摄影教研组 编

摄影与空中摄影学

編者 武汉测绘学院航空摄影教研组
出版者 测绘出版社

北京西便门大街新华书店内

北京市书刊出版业营业登记证出字第 081 号

· 发行者 新华书店科技发行所
· 经售者 各地新华书店
· 印刷者 北京市印刷一厂

北京西便门大街乙一号

印数(京) 1—3,500册	1960年6月北京第1版
开本 787×1092 1/16	1960年6月第1次印刷
字数 300000	印张 13 插页 7
定价(10) 2.00元	统一书号: 15039·418

前 言

本書是根据 1958 年教育革命后我院新編的摄影与空中摄影教学大綱編写而成的。可作为航空摄影測量專業教材及供航空摄影工作者和其他摄影技術人員参考。

全書內容共分四个部分：第一部分为摄影的一般原理，第二部分为空中摄影及其摄影处理，第三部分为航測摄影室的作業过程，第四部分为彩色摄影。

本書系分工負責編写，虽經多次討論和三結合方式的审查，但由于編者理論水平有限和实际經驗不足，錯誤之处，仍为难免，敬希使用和参考本書的同志随时提出宝贵意見，以便修正。

本書編写的主要参考書：

- (1) 摄影学与空中摄影学 В. Я. Михайлов (1952 年出版)
- (2) 摄影与空中摄影学基础 М. Н. Цыганов (1952 年出版)
- (3) 摄影實驗室工作指南 В. Я. Михайлов (1954 年出版)
- (4) 摄影学与航空摄影学 胡宏偉編 (1953 年出版)

本書由航空摄影教研組俞浩清、洪克艺、唐培勳、張元鎮等同志編写。

武汉測繪学院航空摄影教研組

目 录

第一章 概論	7
§ 1.1 摄影的發展过程和我国摄影發展情况概述	7
§ 1.2 摄影技术过程	9
§ 1.3 摄影在科学技术中的应用	10

第一部分 摄影的一般原理

第二章 摄影机	12
§ 2.1 摄影机的基本結構	12
§ 2.2 透鏡和它的特性	12
§ 2.3 單透鏡在光学上的缺点	15
§ 2.4 摄影物鏡的焦距	19
§ 2.5 相对孔径和透光力	19
§ 2.6 光圈和景深	22
§ 2.7 物鏡的視場、視角和像場、像角	27
§ 2.8 物鏡的分解力	28
§ 2.9 摄影快門	30
§ 2.10 摄影机	31
§ 2.11 摄影机的保养及其注意事項	33

第三章 摄影光化学基础	35
§ 3.1 光的本性	35
§ 3.2 光源的色溫	36
§ 3.3 物体的顏色	39
§ 3.4 光化学基本原理	40
§ 3.5 感光乳剂层的成分和結構	42
§ 3.6 光对感光层的作用	43
§ 3.7 增感和减感	46

第四章 感光測定	50
§ 4.1 感光測定和它的意义	50
§ 4.2 透明度、不透明度和光学黑度	51
§ 4.3 感光測定試驗的基本方法	52
§ 4.4 特性曲綫的分析和感光材料基本特性的确定	59
§ 4.5 感光材料基本特性在摄影实践中的意义	63
§ 4.6 光譜感光度(感色性)的測定	68
§ 4.7 光暈現象和乳剂层的分解力	70
§ 4.8 像紙的感光測定	71
§ 4.9 濾光片	75

第五章 感光材料的制造概述	78
§ 5.1 感光乳剂	78
§ 5.2 摄影硬片	84
§ 5.3 摄影软片	86
§ 5.4 像纸	88
§ 5.5 感光材料的保存条件	92

第六章 负片过程与正片过程	98
§ 6.1 显影的一般原理	91
§ 6.2 显影液的成分以及各种成分的作用	93
§ 6.3 显影液的一般特性	101
§ 6.4 主要几种显影液	102
§ 6.5 一般显影技术和显影液的损耗	105
§ 6.6 定影的意义和化学原理	106
§ 6.7 定影液的种类和成分的作用	108
§ 6.8 水洗	111
§ 6.9 干燥	113
§ 6.10 正片过程	113

第二部分 空中摄影及其摄影处理

第七章 空中摄影	117
§ 7.1 空中摄影的目的和航摄负片应具备的基本条件	117
§ 7.2 航空景物的照度	117
§ 7.3 航空景物的光谱特性	120
§ 7.4 航空景物的亮度差和平均亮度	124
§ 7.5 大气对空中摄影的影响及其消除方法	125
§ 7.6 空中摄影曝光时间的计算	130

第八章 航摄负片的摄影处理	133
§ 8.1 野外摄影室的组织方案、作业室的选择以及安全技术	132
§ 8.2 摄影处理溶液的配制	132
§ 8.3 根据空中摄影条件选择显影药方	134
§ 8.4 航摄软片的显影仪器	135
§ 8.5 各种显影方案	138
§ 8.6 航摄负片在显影以后的各种处理	142
§ 8.7 航摄负片质量的评定	145
§ 8.8 航空摄影队内的复制过程	148

第三部分 航测摄影室作业过程

第九章 复照过程	151
§ 9.1 复照原图分类	151
§ 9.2 复照仪及其附属装置	151

§ 9.3 光源和感光材料的选择	154
§ 9.4 复照技术	156
§ 9.5 复照负片的摄影处理	161
§ 9.6 复照负片的质量要求	163
§ 9.7 负片的减薄与加厚	163
第十章 像片的晒印	168
§ 10.1 像纸的选择	168
§ 10.2 接触晒像	169
§ 10.3 投影晒像	174
§ 10.4 像片的处理	178
§ 10.5 像片的主要缺点及其产生原因	180
§ 10.6 在硬底板上裱糊像纸	183
§ 10.7 像片的调色	184
§ 10.8 非银盐晒像法	185
第四部分 彩色摄影	
第十一章 彩色摄影	188
§ 11.1 色视觉理论和色学概述	188
§ 11.2 加色混合和减色混合	190
§ 11.3 现代的彩色摄影材料	193
§ 11.4 利用彩色摄影材料进行摄影	196
§ 11.5 彩色摄影处理	198

第一章 概 論

“摄影”就是利用光在摄影机内部所装的感光材料上起作用而获得与景物相似的影像的过程，或者可以称它为“光的记录”过程；故摄影和摄影科学的对象是在确定光对感光层作用的规律，并从理论上和实际上研究和探讨各种获得摄影影像的方法。

空中摄影，除了研究上述内容以外，还得考虑到空中摄影的特殊条件以及专门目的对摄影成果的要求。对航空摄影测量而言，就是要研究如何获得合乎航空摄影测量要求的、清晰而精确的测图和判读资料（航摄负片和航摄像片），这也就是本课程的主要任务。

§ 1.1 摄影的发展过程和我国摄影发展情况概述

利用光获得稳定的影像至十九世纪才发明。但是人们对这门科学的研究，远在摄影发明以前就已开始。

首先在摄影光学方面，根据已发现的资料，我国在公元前八百年的战国时代，墨子就研究光与影的关系以及镜子的成像原理，虽然他沒有直接提及摄影，但所下的定义与現代摄影光学所用的相同。其他国家研究摄影也是从光学开始的。故对于光与影的关系的研究，实际上就是研究摄影的开端。

摄影镜箱的最初出现是在十五世纪。当时的形式非常简单，它是一个不透光的箱子，箱子的前壁开一个很小的孔——针孔，箱子的后壁是一块玻璃，这样的镜箱就称为针孔暗箱（见图1-1）。当初只是用来帮助绘画，即在玻璃上复一张油纸，位于暗箱前的明亮物体，便能在后壁上成像。这种暗箱的缺点是影像的亮度太微弱。因为影像的亮度取决于针孔的大小，而针孔又不能开得太小，太大会使影像模糊不清。后来针孔由凹透镜和凸透镜所组成的光学系统替代以后，影像的亮度和清晰度就大大改善了。

利用暗箱作绘图工具，几乎达两百年之久。从那时起，暗箱便逐渐改进，到摄影开始以前，暗箱的形式原则上就与現代的摄影镜箱相同了。

在摄影化学方面，研究的开始也是很早的；例如硝酸银和氯化银的感光性早就被人们发现，而且也尝试获得了影像，只是都没有能使所得的影像固定。

利用光来获得固定影像是到1827年才开始。最初是在土瀝青层上得到的。将土瀝青溶解

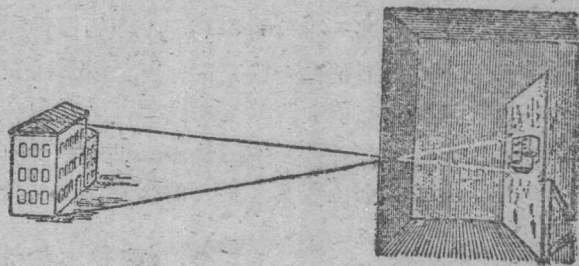


图 1-1 利用针孔暗箱获取影像

于拉芬得油后，涂布于金属板上，次在此涂液的金屬板面复以透明的图样，然后使它曝

光。曝光后，受光的土瀝青起了化学变化便失去溶解性而硬化。未受光部分的土瀝青沒有起什么变化，可用拉芬得油溶解掉。这样的版面再用酸处理后就得到一个明显的图样影象。这便是現代摄影制版法的基础。由于土瀝青感光性很低，因此不能广泛的应用它来作暗箱的摄影。

至1839年便开始采用卤化銀层摄影，当时是用一块銀版或涂有銀的底版，使之受碘蒸汽的作用，版面上便漸漸的形成一层碘化銀。将此版装入暗箱摄影，經過光化作用，在版面上便得到一个极微弱的影象。将这影象与水銀蒸汽作用，使受光部分在水銀蒸汽的作用下凝成白色的汞合金。經過大苏打溶液处理后，版面未受光部分的碘化銀被大苏打溶解掉，而露出銀的表面。这时从一定的角度去观察，銀面是黑色的。汞合金与銀面的色調相配合下便形成了影象。但是这种方法所得的只是一种模样，而不能复印。因此在实际中，也沒有得到广泛的应用。

摄影的第二阶段是湿版法的发明。当时硝酸纖維的出現对这个方法的运用有着很大的帮助。硝酸纖維能很好的溶解于酒精和乙醚中成透明的胶状物質，此物質稱它为克洛丁。在克洛丁內加入碘和溴后，将它涂布于玻璃片，俟其凝固后，再浸入硝酸銀溶液內，使其起化学变化，版面上便形成一层感光材料最主要的感光物質——卤化銀。

乘版面潮湿的时候就装入暗箱內摄影，然后通过显影和定影的过程，于是版面上便得到了微小金屬銀所组成的影象。这种影象就它本身的色調來說，与原物刚好相反，即原物光亮部分在底版上是黑色的，而原物阴暗部分在底版上是透明的，因此湿版可以用来大量复制与原物色調一致的正象。但是由于湿版必須在潮湿时进行摄影，也就是說，只能現制現用，同时制版的设备笨重，只能限制在固定实验室应用。

摄影发展的第三阶段是溴化銀干片的开始，这也是現代摄影的基础。这种方法是在明胶溶液內加入硝酸銀和溴盐以及少量的碘盐，使其形成卤化銀而均匀地分布在明胶介質內。将含有卤化銀的明胶溶液涂布在玻璃或赛璐珞上，晾干后即為溴明胶干片。干片和湿版各有其优缺点，故目前两者均同时应用于生产中。

1871年以后，各国在提高感光材料的感光性，正确表达物体的色調以及获取天然色影象方面曾进行了很多研究，目前在这几方面已經得到了显著的成就。

目前的摄影技术可以說已发展到相当完善阶段。但是对我们国家來說，摄影事业的蓬勃发展，还是解放以后的事。在解放以前，由于我国处于半封建半殖民地的地位，虽然劳动人民也曾有过一些发明和創造，但終因得不到统治者的重視而都被埋沒了，因此很多摄影器材过去都是由外国进口。解放以后，在党的英明领导下，我国的摄影光学机械和摄影化学工业有了突飞猛进的发展，尤其是在大跃进形势下，我国不单已經制造了精密摄影物鏡，而且各种新型的摄影机也已經不断的出現。相信在党的英明正确的領導和关怀下，不久将会出現更多更好的摄影器材，摄影事业将会更大的发展。

§1.2 摄影技术过程

現代的摄影技术过程，可用以下的簡图說明。它分为三大步骤，即：摄影，負片过

程，正片过程。

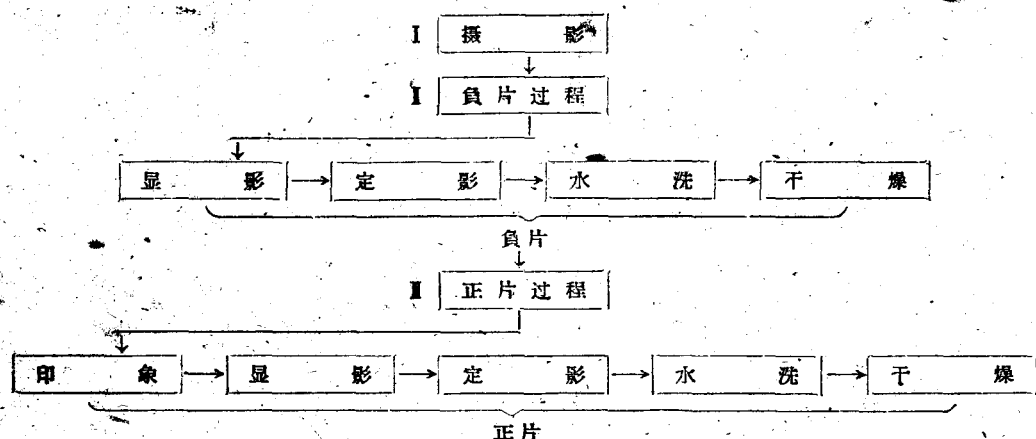


图1-2. 摄影技术过程

I. 摄影过程。首先把摄影机置于被摄影物体的对面，并调节物镜的焦距使构象清晰（又叫做“对光”），然后，关上物镜，并在焦面的位置上安装感光材料，再打开物镜使感光材料曝光。这种通过摄影机曝光的过程称为摄影过程。

II. 负片过程。涂布在玻璃（硬片）或赛璐珞（软片）上的感光层是一层很薄的含有卤化银晶体的明胶层。经曝光以后，受光作用的卤化银便还原为金属银。受光多的部分其金属银还原就多，还原出来的金属银便形成了影象。由于这种影象肉眼不能看见，故称为潜象。

潜象可以用显影的方法使它变成可见的影象。如果将已曝光的感光片浸入专门的溶液（显影液）内，经过一定时间后，便呈现出黑色的影象，这个过程简称为“显影”。随着显影时间的增加，黑色的影象会逐渐加强。如果及时结束显影，并将它放入定影液内溶去残余的溴化银，便可得到稳定的可见影象，这个过程简称为“定影”。

在定影结束以后，必须用清水洗去感光层上残留的定影液。经一定时间水洗后，再使其干燥。

利用显影、定影、水洗和干燥后在感光片上得到可见影象的过程称为负片过程。经过上述处理所得的底片称为负片。负片上浓黑的部分即相当于被摄物体的光亮部分，而透明部分即相当于被摄物体的阴暗部分（图1-3），亦就是说，负片上的色调与被摄物体的色调刚好相反，负片的名称即由此而来。

III. 正片过程。负片一般不是最终的成品，因此必须把负片上的影象转变为正象，也就是要利用涂有感光层的象纸紧贴在负片上进行印象。光线通过负片上不同黑度后，透射的光线也就强弱不等，这些光线在象纸的感光层上起作用而形成潜象。以后用处理负片的同样过程使它转变为可见的影象。

上述处理过程称为正片过程。正片过程可得的是正象。正片上浓黑的部分在负片上是透明的部分，而光亮部分在负片上是黑暗的部分。如果正象与被摄物体直接比较，则刚好是相同。所以，正象就是摄影物体的恢复（如图1-4），也就是摄影的最后成果。

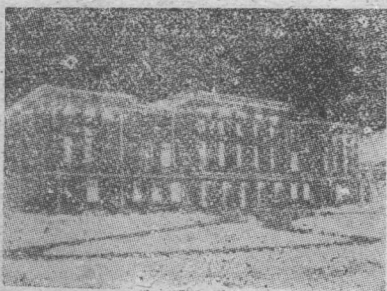


图1-3. 负片

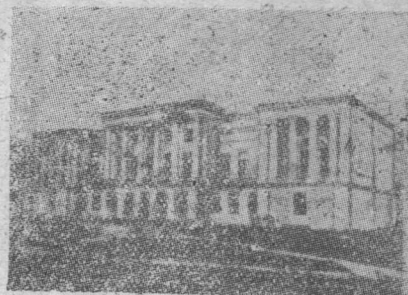


图1-4. 正片

§1.3 摄影在科学技术中的应用

摄影在初期只是应用在一般人象、建筑物和风景摄影。后来随着摄影技术的发展，它的应用范围也逐渐扩大了，到目前为止差不多已成为很多生产部门和各种科学技术研究不可缺少的重要工具了。

现将应用摄影的最主要的几方面举例说明如下：

在天文观察上可以利用摄影来代替肉眼观察，因为感光片有光能积贮的作用，它能借曝光时间的增加来发现天空的微小星球（这种星球即使用最好的望远镜也不能看到）。将历年来的对天体同一部分的摄影成果作比较，可以研究出星座位置的变化；特别是对天体瞬间变化现象（如日蚀、月蚀、彗星等）的摄影，提供了事后从容研究的资料。目前对于宇宙飞行的研究也是采用摄影记录为科学资料。

光谱仪是科学研究中应用甚广的一种仪器，一方面它可以用于精密的化学分析和物理分析，另一方面，它又能供大型机器制造厂作所谓快速分析。在极大多数情况下，都是将所得的光谱摄成照片，然后正确的测定光谱图片，按照量测的结果就可以对原子内部正在进行的复杂过程以及对所分析的材料成分得出结论。摄影干片能感受肉眼所不能感受的辐射线，这一点对分光摄影是非常重要的。

显微摄影是科学和经济方面的一个很重要的应用。近来，已几乎没有一个科学实验室和生产实验室不运用显微摄影了。例如在物理化学和生物学中对微小结构和组织的研究，工业中生产材料的结构和组成的研究等等，都要采用显微摄影。此外显微摄影对摄影乳剂和感光层的结构以及显影过程来说，也具有很大的意义。最近显微摄影还可用电

X光摄影除了在医学上应用作为各种不能观察的人体内部组织的病害研究以外，还在技术中应用作材料和产品结构的研究。

在印刷业中，插图和其他的摄影制版都靠摄影进行。最近用摄影排字法来代替人工

和机械排字。因此可以说，摄影是现代印刷业的基础。

电影摄影是极其重要的摄影部门。它不仅具有巨大的社会政治作用，而且也广泛的应用于科学技术的研究。

空中摄影在国民经济中的作用是非常巨大的。目前不仅测量工作者和制图工作者为了编制地图需要采用它，而且地质、勘察、地理学、建筑和土地改良等方面也都要用到它，在所有应用空中摄影的情况下，都是为了得到精确制图、设计和判读使用的基本原始资料——航摄负片。

空中摄影在军事上的作用也很大。现代的战术中，阵地的布置，敌后情况的侦察以及战果的了解等等，几乎没有不拿空中摄影资料为依据。因此可以说，空中摄影在军事上也是一种重要的工具。

第一部分 攝影的一般原理

第二章 攝 影 機

§ 2.1 攝影機的基本結構

攝影機是使被攝物體在感光層上構成光學影像的工具。組成攝影機的主要部件有：物鏡、不透光的裝腔以及暗匣（或毛玻璃）。圖 2-1 表示攝影機結構的略圖。在底座（1）上裝有兩個相互平行而且垂直於底座的框架，即前框和后框。前框（2）裝有物鏡（3），后框（4）裝有毛玻璃（5）。在前后兩框之間用折皺的裝腔（6）聯系着。當變動物鏡與毛玻璃之間的距離時，裝腔也隨之伸長或縮短。這樣在毛玻璃上就可以得到清晰的構像。

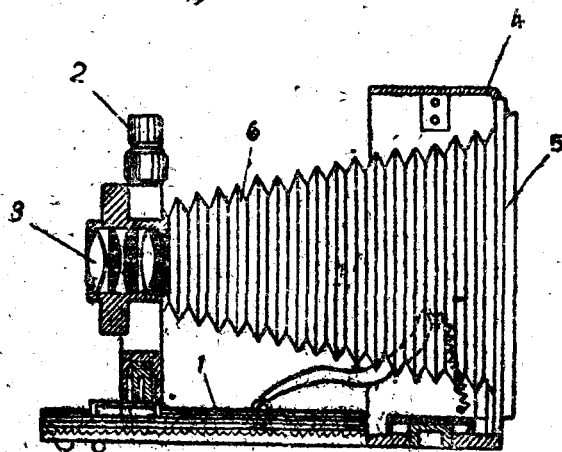


圖 2-1. 攝影機結構略圖

暗匣內裝有感光材料，攝影時取下毛玻璃改放暗匣（毛玻璃與暗匣內的感光材料，其位置是吻合的）。除了上述這些部件外，還有其他的零件裝置。

圖 2-1 所示的略圖，只是表示攝影機的基本結構型式，在實用上可以有各種多樣的。例如將物鏡框和暗匣部分共同固聯在側壁上，工作時不移動暗匣而移動物鏡來調節構像清晰，又如目前有些攝影機已不用毛玻璃，而是

用其他方法來調節構像清晰等等。這些改變雖然與攝影機的基本結構型式不相同，然而其原理還是基本相同的。

§ 2.2 透鏡和它的特性

所謂攝影物鏡是由正透鏡或者正和負的透鏡所組成的光學系統。在這光學系統的焦面上能得到被攝物體的實像。

最簡單的結構也有用一個透鏡作為物鏡的。

透鏡是由兩個球面或平面與球面交割而成的光學玻璃。

光学玻璃是由特种的光学玻璃制造工业制造的，按照化学成分，光学玻璃分成两个基本类型：折射率自 1.45 到 1.6 的冕玻璃和折射率大于 1.6 的火石玻璃。

各种物镜要求各种不同折射率的光学玻璃，因此工厂出品了大量不同品种的光学玻璃。

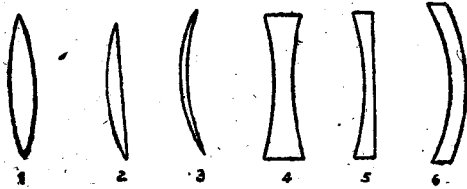


圖 2-2. 各种透镜形式

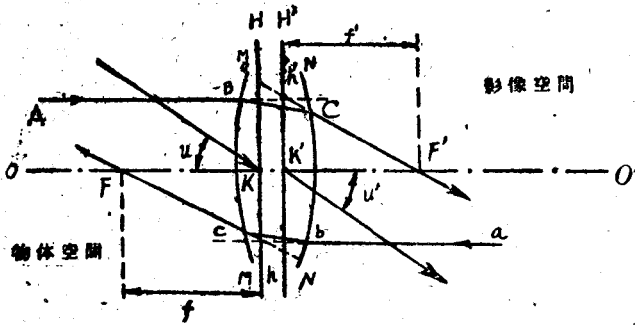


圖 2-3. 双凸透镜中主平面的建立

焦点分后主焦点 F' 和前主焦点 F 。前者是由被摄物体的空间射出的平行于主光轴的光线 AB 通过透镜后，其折射光线与主光轴的交点；而后者是由影像空间发出的平行于主光轴的光线 ab 通过透镜后与光轴的交点。

圖 2-3 表示在空气中的双凸透镜。設有一条平行于主光轴 OO' 的光线 AB 进入透镜。在第一个透镜面 MM 折射后偏向光轴并与第二个透镜面 NN 相交于 C 。光线在 C 点折射又向光轴偏倾并与它相交于后主焦点 F' 。

如果將光线 AB 向 B 方延長，即不顧及它在表面的折射。同时也將由透镜折射的光线向相反方向延長，即使 CF' 向 C 方延長，則得到延長线的交点 h' ，这 h' 的位置依据光线在 B 和 C 点的折射程度而定。現在如果顧及在 B 和 C 点的折射，而又設想光线在透镜中沒有折射，而是在 h' 点偏倾；这个偏倾的大小完全相当于在 B 和 C 点的两次折射。

通过 h' 作一垂直于主光轴的平面 H' ，此平面称为后主平面。它与主光轴的交点称为后主点 K' 。

同样可以从影像空间引一条平行于主光轴的光线 ab 投射于透镜表面 NN ，通过透镜后交于 F 点。

根据覓取 h' 点的同样方法可找到 h 点，并且由 h 点确定前主平面 H 和前主点 K 。

透镜有六种型式（圖 2-2）。即双凸透镜（1），平凸透镜（2），凹凸透镜（3），双凹透镜（4），平凹透镜（5）和凸凹透镜（6）。这六种透镜又分成正负两类，前三种形式（1, 2, 3）是中部厚而边缘薄，属于正透镜或称会聚透镜，后三种形式（4, 5, 6）是中部薄而边缘厚，属于负透镜或称发散透镜。

限制透镜表面形状的两个球面的中心的联线称为主光轴 OO' 。平行于透镜主光轴的光线通过透镜后与光轴的交点称为主焦点（圖 2-3）。

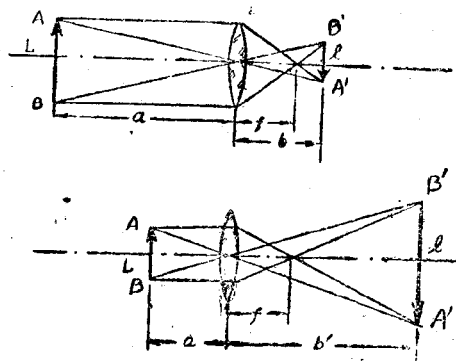


圖 2-4. 構像大小与物距和像距关系

对于薄透鏡而言，焦距可用下列公式表示：

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2-1)$$

或

$$f = \frac{r_1 r_2}{(n-1)(r_2 - r_1)}$$

分数 $\frac{1}{r_1}$ 和 $\frac{1}{r_2}$ 是相当于透鏡第一平面和第二平面的曲率。 (2-1a)

如果透鏡表面的曲率中心落在右边，則它的曲率为正；而曲率中心落在左边則为負。

摄影时常常要計算，例如：确定毛玻璃和物鏡的相对位置，計算放大倍数或縮小倍数以及其他等等。这些計算可以应用透鏡公式：

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \quad (2-2)$$

式中 f 为主焦距， a 为物体和透鏡之間的距离， b 为透鏡到影像之間的距离。知道其中两个数据便可按公式算出第三个数值。为計算方便將公式(2-2)化成：

$$\left. \begin{aligned} f &= \frac{ab}{a+b} \\ a &= \frac{bf}{b-f} \\ b &= \frac{af}{a-f} \end{aligned} \right\} \quad (2-2a)$$

在某些情况下（放大或縮小时），确定 a 和 b 最好采用另外的公式。

由圖 2-4 看出：物体的長度 L 在像片上相应的影像長度 l ，比值 $\frac{l}{L} = \beta$ 叫做直綫放大率；假如： $\beta > 1$ ，則放大； $\beta < 1$ ，則縮小。

由 a 、 b 和 f 数值的关系公式(2-2)可以导出 a 、 f 、 β 之間以及 b 、 f 、 β 之間的关系公式。

因为

$$\beta = \frac{l}{L} = \frac{b}{a}$$

主点具有这样的特性，每条向前主点投射的光綫必經过后主点并平行于投射光綫而出射，也就是說經过后主点的光綫与光軸的交角 u' 等于投射光綫与光軸的交角 u 。

透鏡焦点与主平面間之距离称为主焦距，同样在物方的称为前主焦距 f ，而在像方的称为后主焦距 f' 。

透鏡的焦距是由曲率半径的大小和方向以及玻璃折射率而定。

$$\therefore \frac{1}{a} = \frac{\beta}{b} \quad \text{或} \quad \frac{1}{b} = \frac{1}{a\beta}$$

把 $\frac{1}{a}$ 的等值 $\frac{\beta}{b}$ 代入透镜公式, 得

$$\frac{\beta}{b} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

于是得

$$(\beta + 1) = \frac{b}{f}$$

即

$$b = f(1 + \beta) \quad (2-3)$$

同样将 $\frac{1}{b}$ 的等值代入透镜公式可得

$$a = f(1 + \frac{1}{\beta}) \quad (2-4)$$

知道了 f 和 β , 就可应用(2-3)和(2-4)式算出 b 或 a 的数值。

§ 2.3 單透鏡在光学上的缺点

按照几何光学的原理, 一个理想透镜的构像关系, 应当是使物平面上的每个物点, 通过透镜后在像平面上都有一个相应的像点。要达到这点, 就必须要求透镜本身是一个不使光线弯曲的小孔, 即使这样, 严格的說来还是一个衍射花样。根据高斯原理, 透镜的构像条件是只限于近轴光线, 但实际上, 一个單透镜构像时, 总是包括一部分斜射光线, 因此, 造成不能按照成像原則构像的缺点, 这种现象称为像差。

由于像差的存在, 使得任何一个單透镜都不能构成完全正确的影像, 因此摄影物镜通常是由两个或者更多数目的透镜組合而成; 这样可以大大的改善构像質量。

單透镜在光学上有下列几个基本缺点: 球面像差、彗形像差、像散差、像場弯曲、畸变差和色差。现将这些缺点以及对它们的消除方法簡單的分別叙述如下:

(一)球面像差 球面像差是由于离主光轴距离不同的光线, 其折射率不等所产生。我們可以把透镜看成是由許多截去頂角的稜鏡迭合体。每一个稜鏡各有其頂角 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ (圖 2-5)。从几何光学知道, 稜鏡的頂角 α 与稜鏡的偏向角 δ 存在着下列关系:

$$\delta = (n-1)\alpha$$

式中 n 为稜鏡折射率, 从公式中可以明显的看出, 稜鏡的頂角愈大, 其偏向角也就愈大。在凸透镜中边缘稜鏡的頂角最大, 所以通过透镜边缘部分的光线折射較大, 而通过中央部分的光线折射較小。于是透镜的每一个圆环部分的焦点各自不同。这样就使点的影像变成圆斑, 影响到构像的清晰度。球面像差愈大, 毛玻璃上的影像就越模糊。

發散透镜的球面像差方向和会聚透镜相反, 因此球面像差可用会聚透镜和發散透镜

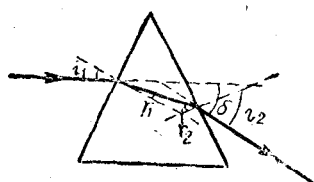
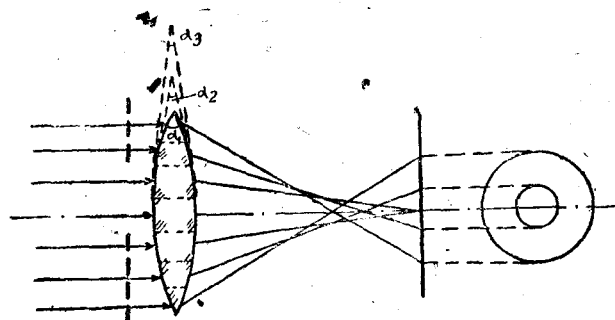


圖 2-5. 球面像差簡圖

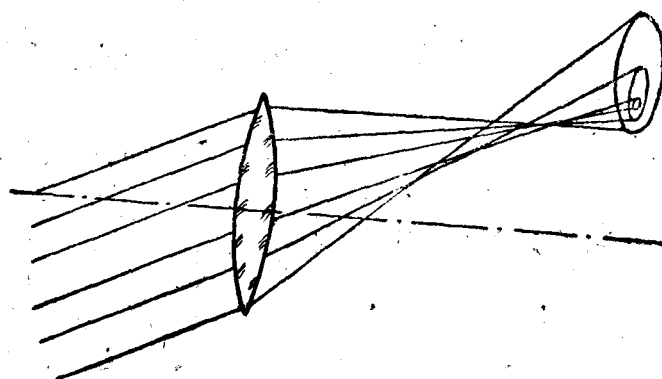


圖 2-6. 彗形像差

相組合的方法來消除。除此之外，阻擋物鏡邊緣部分的光線的通過，也可以大大的減小球面像差，這就是利用特殊的裝置——光圈，縮小透鏡表面的露出部分。

(二)彗形像差 光線平行於光軸前進，則產生上述的球面像差，假如光線以某一個角度向光軸傾斜前進，也會產生球面像差的現象。但這時所產生的將不是散開的圓斑，而變成逗弓的形狀（如圖2-6）。光斑的亮度頭部最強而後部較弱，如彗星尾巴一樣，因此這種像差稱為彗形像差。

彗形像差可以用光圈限制邊緣光線的通過而使它減小，同樣也可用兩個透鏡組合的方法來消除。消除球面像差和彗形像差的物鏡稱為消球差物鏡(Апланат)。

(三)像散差

假如有一光點 S (圖 2-7) 位於光軸之外發出一束光線投射於透鏡表面為 $abcd$

的區域，根據幾何學中的原理，曲面上任意一點一定具有它的極大和極小的二個曲率半徑的截綫，並且這二條截綫必定是相互垂直的。在圖 2-7 的 $abcd$ 中，徑向截綫 ab 和 cd 的曲率半徑為最小，而子午綫方向的截綫 ac 和 bd 的曲率半徑為最大。因此 ab 和 cd 的折射比 ac 和 bd 的折射大。這樣所有徑向面內的光線通過透鏡之後均交於徑向焦綫 MM_1 上，所有子午面內的光線通過透鏡之後則均交於子午焦綫 NN_1 上，而 MM_1 距透鏡之距離比 NN_1 為近。假如置焦面於 MM_1 處，則 S 點的構像為一條清晰的綫段 MM_1 和一條模糊的綫段 NN_1 。同樣如將焦面置於 NN_1 處，則 NN_1 清晰而 MM_1 模糊。若將焦面置於 MM_1 和 NN_1 之間，則 S 點的構像為模糊的一“+”字形。由此可知，不論將焦面置於任何位置，均不能得到 S 點的點狀的構像，這種現象就稱為像散現象。徑向焦

綫 MM_1 与子午焦綫 NN_1 之距离就称为像散差。像散差是随着光束与主光軸的傾角增大而增大。如果利用这种像差的透鏡攝影，就不可能得到清晰的影像。

像散差是最難消除的缺点，要消除它必須适当的選擇透鏡的曲率半徑、厚度、折射率 and 透鏡間的距離。消除像散差的物鏡称为消像散物鏡（Анастигмат）（像場弯曲一般也同时消除了）或称正光物鏡。

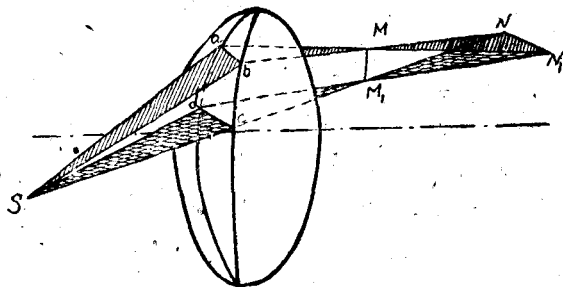


圖 2-7. 像散差

像散差只有当其余像差都消除得很好的时候，才能做到徹底的消除。因此很好消除各种像差的复合物鏡通称为正光物鏡。

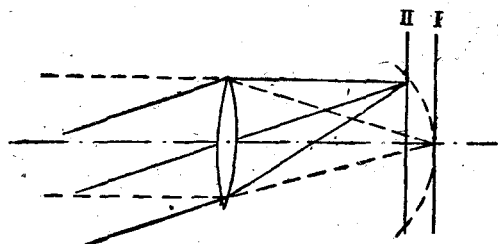


圖 2-8. 像場弯曲

（四）像場弯曲 透鏡的構像不是一个平面而是一个曲面，也就是說傾斜光綫的焦点和平行于光軸的光綫的焦点不是在一个平面上，而是在一个曲面上。这种像差称为像場弯曲（圖 2-8）。这时如果承影面放在 I 的位置，則中央構像清楚而邊緣模糊。反之，承影面若放在 II 的位置，則得中央模糊而邊緣清楚。我們要得到同时清楚的構像，除非將底片面做成曲面。实际上这是不可能的。像場弯曲可以用会聚透鏡和發散透鏡的适当配合来消除。

（五）畸变差 前面所述的几种像差都是影响構像的清晰度。如果把它們都消除了，則垂直于主光軸的平面內的各物点，必在垂直于主光軸的相应像面上各得到清晰的像点。但是像面上各像点間的相互位置关系，并不与物面上相应的各物点間的位置关系相同，也就是像与原物不相似，这种现象称为影像畸变。所謂畸变差是指实际像点到主光軸之距离与理想像点到主光軸距离之差。畸变差有正畸变和負畸变两种。如果光圈置于透鏡之物方，則方格網的構像变成桶形（如图 2-9b）即負畸变。反之，光圈置于透鏡之像方，則变成枕形（圖 2-9a）即正畸变。这两种形式是相反的，因此消除这种像差，可將两个單透鏡或相同的透鏡組对称的組合起来，而光圈就放在对称組合的透鏡之間。畸变差使構像变形，影响攝影测量的精度，故测量用之物鏡应使其畸变差消除至極小。

（六）色差 由一点發出的白色光束，通过透鏡后在毛玻璃上的構像不是一个清晰的点，而形成繞有虹彩圓环的光斑，这种现象称为色差（圖 2-10）。当毛玻璃沿着光軸稍許移动时，圓环的颜色会改变。例如將毛玻璃放在位置 I 时，最外圓环的颜色为紅色，中心为紫色。將毛玻璃移至 II 时，則最外圓环颜色变为紫色，中心为黄色。

从公式 (2-1) $\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$ 看出，透鏡的焦距决定于透鏡的曲率半徑和