

GEO-SPATIAL INFORMATION SCIENCE

● 高等学校摄影测量与遥感系列教材

摄影与空中摄影学

乔瑞亭 孙和利 李欣 编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校摄影测量与遥感系列教材

林源出学大野黄;野黄一、陈旭李、陈麻杆、李敏花\学源群中空已源群

主要参考文献 3.8008

林源出学大野黄;野黄一、陈旭李、陈麻杆、李敏花\学源群中空已源群

摄影与空中摄影学

乔瑞亭 孙和利 李欣 编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉理工大学出版社

武汉大学出版社

ISBN 7-307-06159-3/TP·33

图书在版编目(CIP)数据

摄影与空中摄影学/乔瑞亭,孙和利,李欣编. —武汉:武汉大学出版社,
2008.3

高等学校摄影测量与遥感系列教材

ISBN 978-7-307-06129-3

I. 摄… II. ①乔… ②孙… ③李… III. ①摄影技术—高等学校—
教材 ②航空摄影—高等学校—教材 IV. TB8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 011099 号

责任编辑:王金龙 责任校对:刘欣 版式设计:詹锦玲

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北新华印务股份有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:16.5 字数:397 千字

版次:2008 年 3 月第 1 版 2008 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-06129-3/TB·22 定价:26.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

摄影就是利用光学成像原理,通过物镜成像,用影像记录介质(感光材料或影像传感器)并把它们真实地记录下来的过程。空中摄影就是从空中对地球表面进行摄影。与地面摄影不同,空中摄影有其自身的特点和特殊的要求,这些特点和要求都是与所获资料的用途和摄影的特殊条件有关的。

一般来说,在离地面 10km 高度以下进行的摄影称为航空摄影,在高度超越稠密大气层(40km),但仍处于地球引力范围以内的摄影称为航天摄影。本课程在有些章节中,当讨论具有共性的问题时,常统称为航空摄影,所摄取的资料则统称为航摄资料。

空中摄影是以摄影学为原理的一种主要遥感技术。遥感就是不直接接触物体本身,而是通过电磁波来探测地球或其他星体的物体性质与特点的一门综合性的探测技术。具体地讲,是指在高空和外层空间的各种平台上,运用各种传感器获取反映地表特征的各种图像数据,通过传输、变换和处理,提取感兴趣的信息,实现研究物体空间形状、位置、性质、变化及其与环境间相互关系的一门现代应用技术科学。

图像就是对物体反射或辐射能量的记录。用图像的色调浓淡(密度)表示能量强度并记录在胶片上的就是摄影图像或称为模拟图像(简称影像)。用数字的大小表示能量强度,并以二进制为单位记录在磁带上的图像称为数字扫描图像或离散图像。

按照图像获取的方式,可以将遥感技术分成被动方式和主动方式。凡是遥感器自身不发射信号,只接收来自物体所反射或辐射能量而获取数据的方式称为被动方式。被动方式遥感包括了光学摄影法(摄影与空中摄影)、光电摄像法(反束光导管电视摄像系统)和光学机械扫描法(多光谱扫描仪)。遥感器通过自身发射信号,然后再接收物体反射回来的信号的方式称为主动方式。主动方式遥感包括微波雷达和激光雷达。

显然,摄影在遥感技术的原始数据获取中占有重要的地位。早在 1839 年成功地摄取第一张像片以来,就建立了“摄影术”,这是遥感的雏形,是遥感技术发展的最初阶段。由于航空技术的兴起,在 20 世纪初期形成了航空摄影测量学,并利用航空像片进行地形测绘、资源调查和军事侦察。到 60 年代初期,在美国的水星 MA-4 飞船上第一次摄取了地面像片。随着航天技术的不断发展,在 1983 年 11 月 30 日,又第一次从航天飞机上利用测图航摄仪(RMK30/23)成功地拍摄到 1:82 万的航空像片,成为编制 1:10 万地形图或修测 1:5 万地形图的宝贵资料。2000 年在 ISPRS 阿姆斯特丹大会上,首次展示了大幅面的数码航空摄影相机以来,数码量测航空相机的发展受到了很大的重视。目前,数码航摄仪已由试验阶段开始进入实际使用中,为遥感技术获取原始数据增添了新的技术手段。

随着航空、航天和宇航技术的不断完善,光学工业、感光材料制造工业和电子工业的不断发展,空中摄影技术在诸如地形测绘、国土整治、航空地质、农业、林业、水利、环境保护、能源交通和城市规划等方面取得了不少可喜的成果,显示了巨大的生命力。从当

前发展的趋势来看,摄影遥感不但正在向多光谱和航天摄影方向发展,而且也在向低航高(航高低于500m)、小像幅和数字化方向发展,以便快捷、经济地获取现势性强的资料,从而使摄影遥感技术得到更广泛的应用。

本书在宣家斌1992年编著的《航空与航天摄影技术》基础上进行了改编,增加了摄影学基本理论一章内容,使读者能够全面、系统地了解摄影理论,以便指导后续学习。随着空中摄影这门学科的快速发 展,在这次教材的编写过程中,增加了数码摄影和数码航空摄影、无人机航空摄影、GPS在空中摄影的应用、数字图像质量评定的方法等新内容。全书共分5章,第1章介绍摄影学基本理论,其中包括黑白摄影、彩色摄影和数码摄影的基本知识;第2章介绍空中摄影物理基础,通过对辐射传输方程的分析,了解大气条件及地物特征对空中摄影的影响;第3章介绍航摄仪的结构及特点,并介绍了航摄仪辅助设备的工作原理、航摄仪内方位元素的测定和平差计算方法;第4章介绍传统航空摄影技术、小像幅航空摄影技术、彩色航空摄影技术、数码航空摄影技术、航天摄影技术及多光谱成像技术;第5章论述遥感图像的质量评定的原理及方法。为配合学习、加深理解,书中各章均附有练习题。

本书可作为高校遥感、地理信息系统、地质、农林等相关专业本科生和研究生教材,也可供相关领域的科研人员和工程技术人员参考。

本书第1章、第5章、无人机航空摄影、数码航空摄影以及各章的练习题由乔瑞亭编写,第2章和附录由李欣编写,第3章和第4章由孙和利编写,乔瑞亭对全书进行了统一编审。

由于作者水平有限,全书难免出现错误和不足之处,敬请读者批评指正。

作者

2007年11月于武昌

目 录

第1章 摄影学基础	1
1.1 概述	1
1.2 摄影机物镜的光学特性及景深	2
1.2.1 摄影机物镜的光学特性	3
1.2.2 景深和超焦距	13
1.2.3 物镜加膜	15
1.3 普通照相机的结构和种类	18
1.3.1 普通摄影机的结构	18
1.3.2 普通照相机的种类	25
1.4 感光材料及其特性	26
1.4.1 黑白感光材料	26
1.4.2 彩色感光材料	36
1.4.3 感光材料的特性	41
1.5 数码相机的特性与种类	63
1.5.1 数码相机的成像原理	63
1.5.2 数码相机的性能指标	65
1.5.3 数码相机的种类	72
练习题	76
第2章 空中摄影物理基础	78
2.1 电磁波与电磁波谱	78
2.2 太阳辐射和大气的的影响	79
2.2.1 大气的成分和结构	79
2.2.2 太阳辐射	81
2.2.3 大气的传输特性	82
2.2.4 大气窗口	84
2.3 辐射传输方程及空中摄影的要求	85
2.3.1 辐射传输方程	85
2.3.2 空中摄影的要求	87
2.4 地物的波谱反射特性	91
2.4.1 物体的电磁波特性	91
2.4.2 地物波谱反射率的测定	92

2.4.3 航空景物的波谱反射特性	94
练习题	97
第3章 航摄仪	98
3.1 概述	98
3.2 航摄仪的基本结构	99
3.2.1 摄影镜箱	99
3.2.2 暗匣	100
3.2.3 座架	101
3.2.4 控制器	102
3.3 我国常用的几种模拟航摄仪	103
3.3.1 RC 型航摄仪	104
3.3.2 RMK 型航摄仪	105
3.3.3 MRB 型和 LMK 型航摄仪	107
3.4 航摄滤光片	108
3.4.1 航摄滤光片	108
3.4.2 航空摄影中滤光片的选择与应用	109
3.5 航摄仪辅助设备	110
3.5.1 重叠度调整器的工作原理	110
3.5.2 航摄仪的影像位移补偿装置	112
3.5.3 航摄仪自动曝光系统	114
3.6 航摄仪检定	118
3.6.1 像主点和畸变差的基本定义	118
3.6.2 航摄仪内方位元素的测定	121
3.6.3 航摄仪内方位元素的平差计算	124
练习题	128
第4章 空中摄影技术	130
4.1 航空摄影基本概念	130
4.1.1 航空摄影的分类	130
4.1.2 航空摄影的技术过程	133
4.1.3 重叠度、基高比、垂直夸大和坡度夸大	136
4.2 航空摄影技术计划	139
4.2.1 航空摄影技术参数的确定	139
4.2.2 航摄技术计算	146
4.2.3 航摄技术设计书的编制	149
4.3 航摄胶片的冲洗	149
4.4 航摄资料质量的检查和验收	151
4.4.1 对航摄资料质量的要求	151

4.4.2	飞行质量的检查	154
4.4.3	摄影质量的检查	156
4.4.4	航摄负片压平质量的检查	158
4.5	彩色航空摄影	160
4.5.1	真彩色航空摄影	160
4.5.2	假彩色航空摄影	161
4.6	小像幅航空摄影	164
4.6.1	在轻型飞机上进行小像幅航空摄影	164
4.6.2	无人机航空摄影	167
4.7	数码航空摄影	170
4.7.1	数码航摄仪的特性	170
4.7.2	数码航摄仪种类及工作原理	171
4.7.3	数码航空摄影过程	179
4.8	航天摄影	182
4.8.1	概述	182
4.8.2	航天摄影系统和航天摄影的主要技术参数	183
4.8.3	遥感平台的轨道参数与姿态参数	185
4.8.4	航天摄影飞行计划的制定	190
4.8.5	应用测图航摄仪进行的航天摄影	193
4.9	多光谱摄影	195
4.9.1	概述	195
4.9.2	多光谱摄影	197
4.9.3	多光谱图像的信息量	200
4.9.4	多光谱图像的彩色合成	206
4.10	GPS 在空中摄影中的应用	208
4.10.1	全球定位系统 (GPS) 概述	208
4.10.2	GPS 辅助空中摄影技术	210
4.10.3	IMU/DGPS 组合系统辅助航空摄影技术	212
	练习题	213
第5章	遥感图像的质量评定	215
5.1	概述	215
5.2	像质评价的基本原则	216
5.2.1	对各种像质评定标准的分析	216
5.2.2	对像质评定标准的要求	221
5.3	摄影系统的调制传递函数	221
5.3.1	名词解释	221
5.3.2	光学传递函数	225
5.3.3	线扩散函数与传递函数	226

5.4 在航摄负片上测定调制传递函数的方法	230
5.4.1 刀刃曲线的成像过程	230
5.4.2 利用刀刃曲线测定调制传递函数	231
5.5 数字扫描成像系统调制传递函数的测定	233
5.5.1 内插法	234
5.5.2 综合法	234
5.5.3 数学模型法	236
5.6 数字扫描图像的有效比特数	238
5.7 调制传递函数的应用	240
5.7.1 求摄影系统的调制传递函数	240
5.7.2 由 MTF 曲线求分辨率	241
5.7.3 评定航摄仪的定焦质量	242
5.7.4 影像质量的改善	243
5.8 航摄资料质量的综合评估	244
练习题	246
附录 I 光度学名词	247
附录 II 色度学基础	250
主要参考文献	255

第 1 章 摄影学基础

1.1 概 述

摄影就是利用光学成像原理，通过摄影机物镜，将被摄物体构像于焦平面上，并利用感光材料把它们真实地记录下来的过程。摄影经历的第一个过程是一个光学过程，主要工具是摄影机（亦称照相机）。摄影经历的第二个过程是影像（图像）记录过程，对于传统的胶片摄影而言，这一过程是一个化学过程，使用的感光材料是银盐感光材料——胶卷或胶片来记录影像；对于数码摄影而言，这一过程是一个光电转换过程，使用的感光材料是影像传感器——电荷耦合器件（CCD，Charge Couple Device）或互补型金属氧化物半导体（CMOS，Complementary Metal Oxide Semiconductor）进行“感光”，然后将光学信号转变为模拟电信号，经模数转换后记录在影像储存卡上。

在摄影史上，首先发明的是黑白摄影，在此基础上，发明了彩色摄影。随着科学技术的突飞猛进，在摄影术发明了一百多年后的今天，又出现了数码摄影。

黑白摄影的一般技术过程如图 1-1 所示。

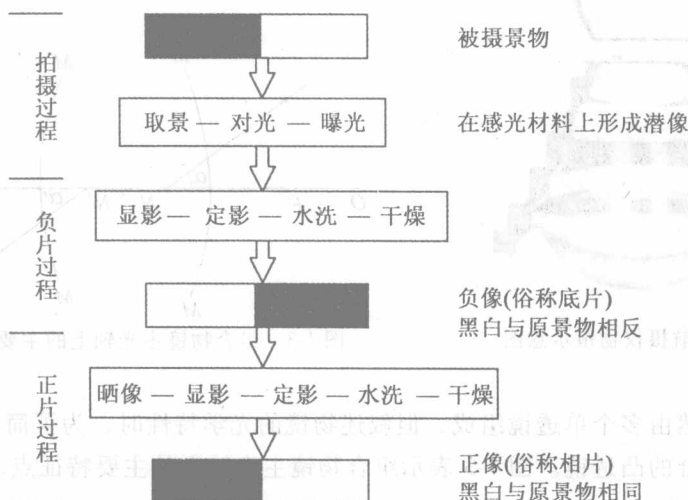


图 1-1 黑白摄影的一般技术过程

无论是拍摄黑白照片还是拍摄彩色照片，都要使用摄影机（照相机）和银盐感光材料。黑白摄影和彩色摄影使用的摄影机是一样的，其区别主要是使用的感光材料不同，黑

白摄影使用黑白胶卷，彩色摄影使用彩色胶卷。而数码摄影使用的数码相机与传统相机相比，其性能与结构存在着较大的差异。数码相机涉及的影像传感器及其衡量传感器质量的一些概念在传统相机中是不涉及的。

本章首先介绍摄影机物镜的光学特性，然后介绍传统的胶片摄影机及感光材料，最后介绍数码相机的成像原理及特性。

1.2 摄影机物镜的光学特性及景深

物镜是摄影机的最主要部件之一，是由凸透镜和凹透镜组合而成的光学系统。最简单的情况是，一个凸透镜也可作为物镜。任何凸透镜都可以在焦平面上构成物体的光学影像，但是由于单透镜存在着多种像差（球面像差、彗形像差，像散差、像场弯曲、色差和畸变差等），为了消除像差，任何摄影机物镜都至少由两个或更多的单个透镜组合而成。在设计、加工和装配摄影机物镜时，总是有目的地选择不同品种和不同折射率的光学玻璃，制作成各种具有一定曲率和一定厚度的透镜组，使各单个透镜的曲率中心都调试在同一条直线上，以形成主光轴。因此，摄影机物镜是一个复杂的光学系统。多数物镜是由4片3组或6片4组组成的。航摄仪物镜一般由7~13个单透镜所组成，如图1-2所示。

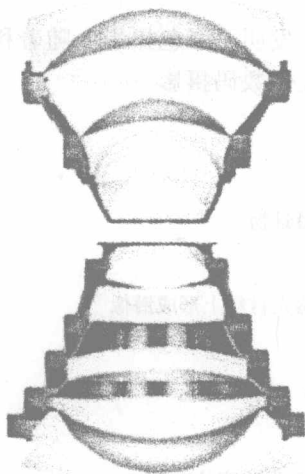


图 1-2 航摄仪物镜示意图

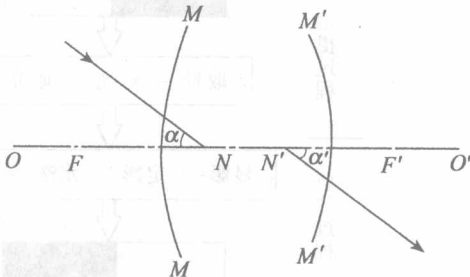


图 1-3 组合物镜主光轴上的主要特征点

摄影物镜虽然由多个单透镜组成，但叙述物镜的光学特性时，为了简单起见，仍可以把它看做一个组合的凸透镜。图1-3表示组合物镜主光轴上的主要特征点。

图中 $\widehat{MM'}$ 、 $\widehat{M'M'}$ 表示凸透镜的两个分别与物方和像方空间接触的球面， OO' 为主光轴， F 、 F' 分别称为前、后主焦点，表示平行于主光轴的一束光线通过物镜后的焦点， N 、 N' 分别称为前、后节点或主点。在地面摄影或航空摄影时，一般物方空间和像方空间处于同一介质（空气）中，所以节点与主点是重合的。对于一个无像差的理想物镜而言，节点有一个重要的特性：所有投射到前节点 N 上的入射光线，其出射光线必定通过后节点 N' ，

并且与相应的人射光线平行，即 $\alpha = \alpha'$ 。

1.2.1 摄影机物镜的光学特性

普通摄影机物镜的光学特性主要包括焦距、相对孔径、像场角、物镜加膜，专业航摄影仪还需考虑焦平面上的照度分布、色差、畸变差和分辨率等，现分述如下。

一、焦距

物镜的后主点（节点）到像方焦点的距离称为焦距。摄影机物镜的焦距通常以 f 表示，并以毫米为单位标注在物镜框上，例如，物镜框上标注“ $f=50\text{mm}$ ”表示该物镜焦距为 50mm 。物镜的焦距实际上是构成物镜的共轴光学系统的焦距。为了讨论问题方便起见，以下有关物镜特征的讨论都用透镜表示。

如图 1-4，根据几何光学作图法可知，

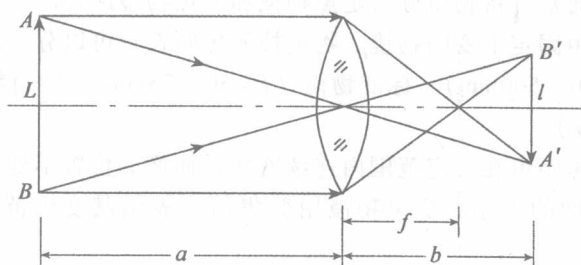


图 1-4 线性放大略图

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

式中： a ——物距；

b ——像距。

式 (1-1) 称为透镜公式，摄影时，如果物距 a 、像距 b 和焦距 f 满足上式要求，在像面上可以得到清晰的光学影像。

透镜公式反映了物距、像距和焦距之间的定量关系，在这三个量中，只要有两个量确定，则第三个量也就可以确定。

从图 1-4 可见，被摄物体长度为 L ，相应于相片上影像的长度 l ，它们的比值 $\beta = l/L$ 称为线性放大率（或称放大倍数）。若 $\beta > 1$ ，则影像放大，若 $\beta < 1$ ，则影像缩小，即 β 可写作：

$$\beta = \frac{l}{L} = \frac{b}{a} \quad (1-2)$$

式中： $\frac{l}{L}$ ——影像比例尺。

因此，将 $a = bm$ ， $b = \frac{a}{\beta}$ 或 $a = \frac{b}{\beta}$ ， $b = a\beta$ 分别带入透镜公式得：

$$\begin{cases} a = f(1+m) \\ b = f\left(1 + \frac{1}{m}\right) \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} a = f\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \\ b = f(1+\beta) \end{cases} \quad (1-3)$$

分析 (1-3) 式可以知道物镜焦距在摄影实践中的应用。当物距相同时 (即 a 相同), 用长焦距物镜摄影可得到较大的影像, 用短焦距物镜摄影, 得到较小的影像。同理, 欲得到相同大小的影像时, 在物距大时可用长焦距物镜摄影, 物距较小时用短焦距物镜摄影。总之, 了解焦距在摄影中与成像大小的关系, 就可以根据摄影的实际情况选择摄影机。

用 (1-3) 式计算得到的 a 和 b 值有一定的比例关系, 可在放大、缩小、翻拍等摄影实践中应用。

在普通摄影中, 通常可将物镜分为定焦物镜和变焦物镜两种。

定焦物镜——焦距固定不变的物镜。物镜按照焦距长短可以分为以下四种:

远摄物镜 ($f=100 \sim 500\text{mm}$)、标准物镜 ($f=50 \sim 75\text{mm}$)、广角物镜 ($f=30\text{mm}$) 和超广角物镜 ($f=22\text{mm}$)。

变焦物镜——其焦距可在一定范围内连续变化, 而像的位置不变。它在物距不变的情况下, 改变像平面成像的大小。变焦物镜用变焦倍率表示其变焦范围, 如式 (1-4) 所示。

$$\text{变焦倍率} = \text{最大焦距值} / \text{最小焦距值} = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \quad (1-4)$$

对于空中摄影而言, 物距 a 相当于飞机的航高, 一般以 H 表示, 通常 H 是一个很大的数值, 所以实际上像距就相当于航摄仪的焦距, 因此, 在空中摄影中, 摄影比例尺按下式计算:

$$\frac{1}{m} = \frac{f}{H} \quad (1-5)$$

式中, H ——航摄飞机相对于摄区平均平面的高度。

在空中摄影技术中, 经常接触到焦距和 (检定) 主距两种不同的名称。对任何摄影物镜而言, 物镜的光学系统一旦调试完毕后, 主光轴上的特征点位就是固定的, 因此焦距是一个固定的常数, 焦距值可以用光学方法直接测量; 而主距则是仪器检定后的平差计算值, 不同的平差方法将得到不同的主距值。由于航摄仪物镜总是对无穷远的物体成像, 所以焦距与主距在数值上相差不大, 都以毫米为单位, 焦距以整数表示, 主距的有效数据保留到小数点后两位。

二、相对孔径和物镜光强度

相对孔径和物镜光强度是摄影物镜的重要特征之一, 与物镜的光圈密切相关。

光圈是摄影物镜组中的一个光阑, 通常安装在物镜的两个透镜组之间, 其孔径大小可根据需要改变。

从原则上说, 一个开有圆孔的金属片就可作为光圈。为改变光孔的大小, 可以制造一套孔径大小不一的金属片, 根据需要选择适当孔径插入物镜的中间 (物镜框上有切口),

这种光圈，称为插入光圈（见图 1-5 (a)）。现代摄影机中广泛采用由许多弧形的长条金属薄片组成的虹形光圈（如图 1-5 (b)），这些薄片的一端各自固定在物镜框上，另一端则固定在可以转动的公共圆环上，当圆环旋转时，由金属片组成的圆孔便随之缩小或放大，如图 1-5 (c) 所示。

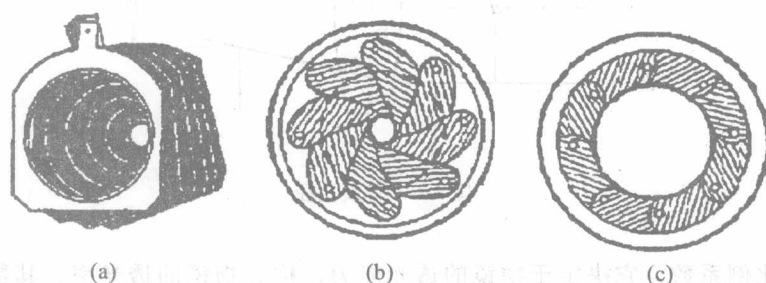


图 1-5 光圈的形状

(a) 插入光圈；(b) (c) 虹形光圈；(b) 光圈缩小时；(c) 光圈完全打开时

摄影机物镜中的光圈有三个作用：

(1) 调节物镜的使用面积。在整个摄影物镜的范围内，像差的修正是不均匀的，近轴部分（中央部分）修正得好，远轴部分（边缘部分）修正得差。因此，限制物镜边缘部分的使用，有利于增进像点的清晰度。

(2) 调节进入物镜的光通量。可以根据被摄物体的光照强弱，适当选择光孔的大小，以控制进入物镜的光通量。

(3) 调节景深（景深将在 1.2.2 节中单独讨论）。

下面再进一步谈谈光圈的作用效果。

设有一摄影物镜，其前透镜组如图 1-6 所示，在紧靠前透镜组之后，设置有一个光圈 I，其光孔直径为 D 。若一束平行于光轴的光线投向物镜，通过前透镜组后，便受到光圈 I 的阻拦。从图中看出， AB 以外的光线不能构像，相当于物镜前有一个光孔直径为 d 的光圈 II 限制着进入物镜的光束大小。我们称这个不存在的光圈 II 的孔径 d 为有效孔径。图 1-6 是一种有效孔径 d 大于实际孔径 D 的图形。

物镜的相对孔径就是有效孔径 d 与物镜的焦距 f 之比，即

$$\text{相对孔径} = \frac{d}{f} \quad (1-6)$$

显然，光圈孔径大小改变时，有效孔径 d 随之变化，所以相对孔径也相应地发生变化。当光圈孔径完全张开时，相应的有效孔径 $d_{\max}$ 称为最大有效孔径，此时算得的相对孔径称为最大相对孔径。通常，最大相对孔径都标注在物镜框上，形式为 1:4.5 或 $F:4.5$ 。

物镜的光强度是指物镜产生光学影像亮度的能力，反映被摄物体发射或反射的光线通过摄影物镜后，在焦平面上能产生多大的照度。

由几何光学知，焦平面中心的照度为

$$E = K_a \frac{\pi \cdot B}{4} \left(\frac{d}{b} \right)^2 \quad (1-7)$$

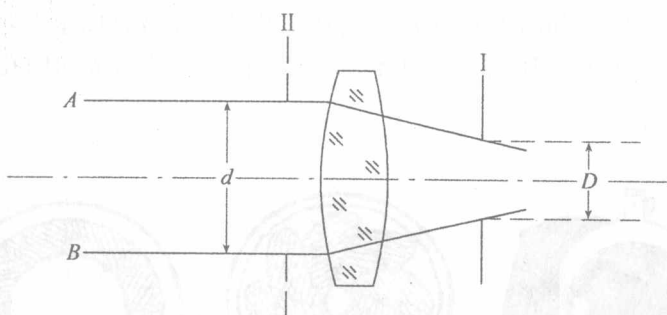


图 1-6 有效孔径

其中, K_a 为比例系数, 它决定于物镜的透光能力, 称为物镜的透光率, 其数值的大小随具体的物镜而定, b 为像距, B 为被摄景物的亮度。

当物体离物镜较远时, 则像距 b 近似于焦距 f , 代入式 (1-7) 有

$$E = K_a \frac{\pi \cdot B}{4} \left(\frac{d}{f} \right)^2 \quad (1-8)$$

分析式 (1-8) 可知, 像面照度与物镜的有效光孔的面积有关, 面积越大, 进入物镜的光线就越多。由于光孔的面积与光孔直径的平方成正比, 所以, 像面照度也与物镜的有效孔径的平方成正比。若两个焦距相同的物镜, 其中一个物镜的最大有效孔径是另一个物镜的两倍, 显然, 前者在焦平面上的照度是后者的 4 倍。

像面照度在一定条件下也与焦距有关, 与焦距的平方成反比。若两物镜有效孔径相同, 其中一个物镜的焦距是另一个物镜的两倍, 则前者在焦平面上的照度是后者的 1/4。

可见, 摄影物镜在焦平面上产生光学影像亮度的能力, 称为物镜的光强度, 它等于物镜的透光率与相对孔径平方的乘积, 即

$$\text{物镜的光强度} = K_a \left(\frac{d}{f} \right)^2 \quad (1-9)$$

因此, 要比较两个物镜的光强度应将它们的最大相对孔径的平方相比。例如, 比较最大相对孔径分别为 1:4.5 和 1:2 的两个物镜, 则

$$\left(\frac{1}{2} \right)^2 : \left(\frac{1}{4.5} \right)^2 = \frac{20.25}{4} \approx 5$$

即最大相对孔径为 1:2 的物镜, 其光强度是最大相对孔径为 1:4.5 的物镜光强度的 5 倍。

显然, 最大相对孔径分母越小, 物镜的光强度越大。

物镜的最大相对孔径数值除了表示物镜焦平面上产生光学影像亮度的能力外, 在某种程度上还反映了物镜的光学质量。对一个物镜而言, 焦距是一个常数, 最大相对孔径越大, 就表示有效孔径越大, 这就意味着该物镜像差消除较好, 可以使用的物镜的有效面积较大。即最大相对孔径越大, 其分母值越小, 光学质量越高。

光圈大小变化时, 物镜的有效孔径 d 跟着改变, 因此相对孔径也随之改变, 从而改变了通过物镜的光通量。称相对孔径的倒数为光圈号数, 以小写字母 k 表示之, 即

$$k = \frac{f}{d} \quad (1-10)$$

可见，焦平面上的照度与光圈号数 k 的平方成反比。光圈号数均标注在物镜的外框上，按国际系统为：

1.0, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 22, 32, ...

是一个以 $\sqrt{2}$ 为公比的等比级数。其原因是摄影时感光材料表面上单位面积所要求的曝光量 H 是一个定值，它等于照度 E 和曝光时间 t 的乘积，即： $H = E \cdot t$ ，由于照度与光圈号数的平方成反比，有

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{t_2}{t_1} = \frac{k_2^2}{k_1^2} \quad (1-11)$$

由式 (1-11) 可知，当摄影条件相同时，曝光时间与光圈号数的平方成正比。如果曝光时间改变一倍，则相应的光圈号数应改变 $\sqrt{2}$ 倍，因此光圈号数 k 以 $\sqrt{2}$ 为公比排列。

例如，原来准备采用光圈号数为 5.6、曝光时间为 $1/125\text{s}$ 进行摄影，如果现在需要改用光圈号数为 11，则为了获得同样的摄影效果（相同的曝光量），其相应的曝光时间应为：

$$t_2 = t_1 \cdot \frac{k_2^2}{k_1^2} = \frac{1}{125} \cdot \left(\frac{121}{31} \right) \approx \frac{4}{125} \approx \frac{1}{30}\text{s}$$

在实际工作中，不需要计算，只需记住：

- (1) 随着光圈号数的增大，相应的曝光时间也需增加，反之亦然。
- (2) 光圈号数每变更一档，相应的曝光时间应增加或减少一倍。在使用时可以一档一档推算下去。

三、物镜像场角

由物镜后节点 N' 至像幅（像场）对角线两端点 a 、 b 的连线所夹的角度 2β 称为摄影机物镜的像场角。如图 1-7 所示。

由图 1-7 可知，像场角 2β 可按式计算：

$$\tan\beta = \frac{d/2}{f}$$

故

$$2\beta = 2\arctan \frac{d}{2f} \quad (1-12)$$

式中， d 为像片对角线的长度， f 为物镜的焦距。

显然，当像幅一定时，焦距 f 越大，像场角 2β 越小。反之，当焦距 f 一定时，像幅越大，像场角 2β 也越大。实际摄影中，在同一地点，宽像场角物镜所摄取的空间范围要比小像场角物镜大，但影像比例尺小。

航摄仪的物镜根据像场角的大小分为四种：

窄角物镜 $2\beta < 50^\circ$

常角物镜 $50^\circ < 2\beta < 75^\circ$

宽角物镜 $75^\circ < 2\beta < 100^\circ$

特宽角物镜 $2\beta > 100^\circ$

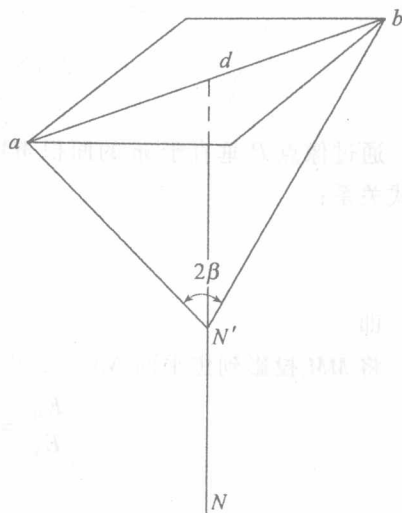


图 1-7 物镜像场角

四、航摄仪焦平面上的照度分布

光通过物镜后，在焦平面上的照度分布是不均匀的，焦面照度由中心向边缘逐渐减小，并与光线倾斜角余弦的四次方成正比，即

$$E_{\omega} = E_0 \cdot \cos^4 \omega \quad (1-13)$$

式中： E_0 ——焦平面中央的照度；

ω ——通过任意像点的主光线（倾斜光线）与主光轴的夹角；

E_{ω} ——与主光轴成 ω 角的倾斜光线通过物镜后在焦平面上的照度。

显然，式中 ω 角的最大值即为像场角的一半 (β)。

根据几何光学原理，可以比较简单而直观地推导出 (1-13) 式。在图 1-8 中， po 表示焦平面， p 为任意像点， d 为平行于主光轴的光线进入物镜的光束直径（即有效孔径）， d' 为与主光轴交角成 ω 的倾斜光线进入物镜后沿纵向的光束直径，由图可见：

$$d' = d \cdot \cos \omega$$

$$sp = \frac{f}{\cos \omega}$$

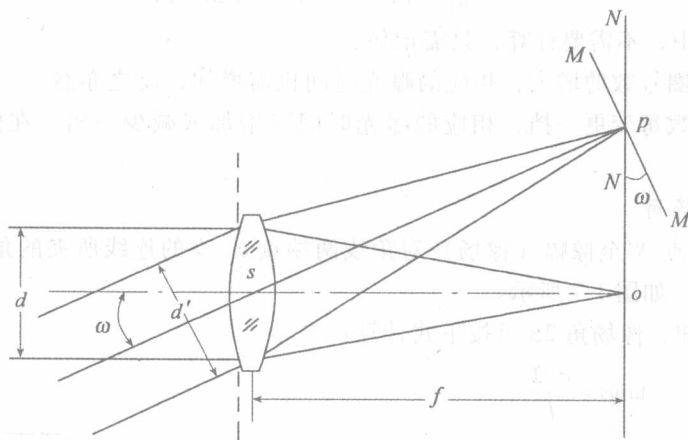


图 1-8 航摄仪焦平面上照度分布

通过像点 P 垂直于 sp 的面积 MM 上的照度 E_M 与焦平面中心 o 处面积上的照度 E_0 有下式关系：

$$\frac{E_M}{E_0} = \frac{f^2}{(f/\cos \omega)^2}$$

即

$$E_M = E_0 \cdot \cos^2 \omega \quad (a)$$

将 MM 投影到焦平面 NN 上，设 F 为光通量，则

$$\frac{E_M}{E_N} = \frac{F/MM}{F/NN} = \frac{NN}{MM} = \frac{1}{\cos \omega}$$

即

$$E_N = E_M \cdot \cos \omega \quad (b)$$

另外，有效孔径 d 在焦平面 o 处的投影在纵横方向上均为 d ，而在焦平面 MM 处的投影横向为 d ，纵向为 d' ，所以，到达 MM 面上的光通量为到达 o 处光通量的 $\cos \omega$ 倍，即