

普通高等教育测绘类规划教材

# 摄影测量学

修订本  
(工程测量专业用)

朱肇光  
孙护 编  
崔炳光



测绘出版社

普通高等教育测绘类规划教材

# 摄影测量学

修订本

(工程测量专业用)

朱肇光  
孙 护 编  
崔炳光

测绘出版社  
·北京·

## 内 容 提 要

本书在 1984 年版的基础上作了修订。

本书涉及摄影与空中摄影、基础摄影测量、解析摄影测量、数字摄影测量和地面摄影测量等多方面的内容,着重叙述摄影测量的基本概念、基本理论和方法,以及扼要地反映了当前摄影测量学科发展中的新技术。

本书可作为大专院校工程测量专业摄影测量学课程的教科书,也可供工程测量技术人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

摄影测量学/朱肇光等编。—2 版(修订本)。—北京:测绘出版社,1995.12  
普通高等教育测绘类规划教材·工程测量专业用  
ISBN 7-5030-0807-5

I. 摄… II. 朱… III. 摄影测量法-高等学校-教材 IV. P23

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 14690 号

测绘出版社出版发行

(北京宣武区白纸坊西街 3 号 邮编 100054)

三河市艺苑印刷厂印刷·新华书店总店北京发行所经销

1984 年 6 月第一版·1995 年 9 月第二版·2004 年 1 月第 9 次印刷

开本: 787×1092 1/16·印张: 23·插页: 2

字数: 531 千字·印数 29001—34000 册

定价: 25.00 元

## 再版前言

本书自 1984 年出版以来，本校和有关高等院校作为工程测量专业教材，经多届使用，迄今已逾十年。随着摄影测量学科和工程测量专业发展的需要，对本书作了如下的修订：删除了原有分工法测图一章；编写了光束法区域网空中三角测量替换原有独立模型法区域网空中三角测量，原有航带法区域网空中三角测量改写为单航带解析空中三角测量，增加了解析摄影测量粗差检测理论、解析测图仪和数字摄影测量等三章。原书各章节也作了适当的修改和补充。每章增加了思考题与习题。至于书中几处用小号字排印的段落，仅供参考。

本书涉及摄影与空中摄影、基础摄影测量、解析摄影测量、数字摄影测量和地面摄影测量等多方面的内容。着重叙述摄影测量的基本概念、基本理论和方法，以及扼要地反映了当前摄影测量学科发展中的新技术。

全书共分 16 章，第一、二、五、八、十三、十四章由孙护编写；第三、四、六、七、十六章由崔炳光编写；第九、十、十一、十二、十五章由朱肇光编写。

本书由全国测绘教材委员会审定，在此对参加审稿并提出宝贵意见的盛浩然教授、邵锡惠教授表示衷心的感谢。

由于水平有限，书中不妥和不足之处，诚恳地希望读者指正。

编者

1994 年 10 月于武汉测绘科技大学

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	( 1 )
<b>第二章 摄影和空中摄影</b> .....	( 4 )
§ 2-1 摄影机概述 .....	( 4 )
§ 2-2 各类摄影机简介 .....	( 10 )
§ 2-3 黑白片感光材料 .....	( 13 )
§ 2-4 黑白片摄影处理过程 .....	( 18 )
§ 2-5 空中摄影 .....	( 21 )
§ 2-6 航空摄影的摄影处理 .....	( 27 )
§ 2-7 彩色摄影 .....	( 29 )
本章思考题与习题.....	( 35 )
<b>第三章 航摄像片解析</b> .....	( 36 )
§ 3-1 航摄像片为中心投影 .....	( 36 )
§ 3-2 航摄像片上的特殊点、线以及透视对应的点、线和面 .....	( 38 )
§ 3-3 透视作图的基本方法 .....	( 39 )
§ 3-4 摄影测量采用的坐标系 .....	( 43 )
§ 3-5 航摄像片的内、外方位元素 .....	( 45 )
§ 3-6 空间直角坐标的变换 .....	( 47 )
§ 3-7 因像片倾斜引起的像点位移 .....	( 56 )
§ 3-8 因地形起伏引起的像点位移 .....	( 58 )
§ 3-9 航摄像片的构像比例尺 .....	( 60 )
本章思考题与习题.....	( 63 )
<b>第四章 像片纠正、像片平面图和综合法测图</b> .....	( 64 )
§ 4-1 像片纠正概述 .....	( 64 )
§ 4-2 图解纠正 .....	( 65 )
§ 4-3 光学机械纠正 .....	( 67 )
§ 4-4 纠正仪的结构轴及纠正元素 .....	( 72 )
§ 4-5 纠正点数和纠正仪的自由度 .....	( 74 )
§ 4-6 纠正仪 .....	( 75 )
§ 4-7 平坦地区航摄像片的纠正技术 .....	( 80 )
§ 4-8 像片平面图的制作 .....	( 85 )
§ 4-9 丘陵地区航摄像片的分带纠正 .....	( 86 )
§ 4-10 倾斜面纠正 .....	( 88 )

§ 4-11 综合法测图 .....	( 91 )
本章思考题与习题 .....	( 99 )
<b>第五章 立体观察和立体量测</b> .....	(100)
§ 5-1 人眼的自然观察 .....	(100)
§ 5-2 人造立体效能 .....	(102)
§ 5-3 立体观察方法 .....	(103)
§ 5-4 像对的立体量测 .....	(106)
§ 5-5 像点坐标的量测仪器 .....	(107)
本章思考题与习题 .....	(112)
<b>第六章 双像投影测图</b> .....	(113)
§ 6-1 概述 .....	(113)
§ 6-2 立体像对的相对定向元素和模型的绝对定向元素 .....	(114)
§ 6-3 立体测图仪上像对的相对定向 .....	(116)
§ 6-4 立体测图仪上模型的绝对定向 .....	(125)
§ 6-5 立体测图仪上的测图 .....	(129)
本章思考题与习题 .....	(130)
<b>第七章 模拟测图仪</b> .....	(131)
§ 7-1 概述 .....	(131)
§ 7-2 多倍投影测图仪 .....	(136)
§ 7-3 立体测图仪 Stereoplanigraph .....	(138)
§ 7-4 立体测图仪 B8S 型 .....	(141)
§ 7-5 立体测图仪 A10 型 .....	(144)
§ 7-6 托普卡地形立体测图仪 .....	(145)
§ 7-7 变换光束测图概述 .....	(152)
本章思考题与习题 .....	(156)
<b>第八章 正射投影技术——微分纠正</b> .....	(157)
§ 8-1 概述 .....	(157)
§ 8-2 直接投影关系的微分纠正 .....	(159)
§ 8-3 直接投影关系的正射投影仪器 .....	(162)
§ 8-4 间接投影方式的微分纠正 .....	(162)
§ 8-5 正射投影仪 Avioplan OR-1 型 .....	(169)
§ 8-6 间接电子微分纠正 .....	(171)
§ 8-7 立体正射投影像片对 .....	(173)
本章思考题与习题 .....	(176)
<b>第九章 解析空中三角测量的基础</b> .....	(178)
§ 9-1 概述 .....	(178)
§ 9-2 像点坐标的系统误差及其改正 .....	(179)

§ 9-3	单像空间后方交会 .....	(185)
§ 9-4	罗德里格矩阵 .....	(190)
§ 9-5	空间前方交会 .....	(195)
§ 9-6	解析法像对的相对定向 .....	(197)
§ 9-7	解析法模型的绝对定向 .....	(205)
	本章思考题与习题 .....	(211)
<b>第十章</b>	<b>单航带解析空中三角测量</b> .....	(213)
§ 10-1	航带模型的建立 .....	(213)
§ 10-2	航带模型绝对定向 .....	(215)
§ 10-3	航带模型的非线性变形改正 .....	(217)
	本章思考题与习题 .....	(220)
<b>第十一章</b>	<b>光束法区域网空中三角测量</b> .....	(221)
§ 11-1	概述 .....	(221)
§ 11-2	光束法区域网平差的概算 .....	(222)
§ 11-3	区域网平差的误差方程式和法方程式 .....	(223)
§ 11-4	带状改化法方程式的循环分块解法 .....	(231)
§ 11-5	两类未知数交替趋近计算方案 .....	(234)
§ 11-6	带有附加参数的光束法区域网平差 .....	(234)
§ 11-7	光束法区域网平差的精度 .....	(240)
§ 11-8	摄影测量与非摄影测量观测值的联合平差 .....	(243)
	本章思考题与习题 .....	(245)
<b>第十二章</b>	<b>解析摄影测量粗差检测理论</b> .....	(247)
§ 12-1	概述 .....	(247)
§ 12-2	数据探测法 .....	(248)
§ 12-3	丹麦法 .....	(253)
§ 12-4	线性规划法 .....	(254)
	本章思考题与习题 .....	(256)
<b>第十三章</b>	<b>解析测图仪</b> .....	(257)
§ 13-1	解析测图仪原理 .....	(257)
§ 13-2	解析测图仪 Planicomp C-100 型 .....	(263)
§ 13-3	解析测图仪 BC-2 型 .....	(267)
§ 13-4	国产解析测图仪 .....	(271)
	本章思考题与习题 .....	(274)
<b>第十四章</b>	<b>数字地面模型</b> .....	(275)
§ 14-1	概述 .....	(275)
§ 14-2	数据点的数据取样 .....	(276)
§ 14-3	数据处理的插值加密 .....	(277)

§ 14-4	数字地面模型的数据内插方法	(278)
§ 14-5	数字地面模型的输出和应用举例	(290)
	本章思考题与习题	(295)
<b>第十五章</b>	<b>数字摄影测量</b>	(296)
§ 15-1	概述	(296)
§ 15-2	电子相关和光学相关	(297)
§ 15-3	数字影像的获取	(299)
§ 15-4	数字影像相关	(301)
§ 15-5	数字影像测图过程	(306)
	本章思考题与习题	(308)
<b>第十六章</b>	<b>地面立体摄影测量</b>	(309)
§ 16-1	概述	(309)
§ 16-2	摄影方式和基本公式	(311)
§ 16-3	地面立体摄影测量的外业仪器和装备	(318)
§ 16-4	地面立体摄影测量的外业工作	(322)
§ 16-5	外方位元素误差引起点位变化的规律	(327)
§ 16-6	地面立体摄影测量的内业成图仪器	(332)
§ 16-7	在地面立体测图仪上的作业	(338)
§ 16-8	地面立体摄影测量的误差理论	(343)
§ 16-9	根据检查方向确定外方位角元素误差	(349)
§ 16-10	解析法地面立体摄影测量	(351)
	本章思考题与习题	(358)
	<b>主要参考文献</b>	(359)



# 第一章 绪 论

摄影测量学是对研究的对象进行摄影，根据所获得的构像信息，从几何方面和物理方面加以分析研究，从而对所摄对象的本质提供各种资料的一门学科。由于摄影取得的影像信息能真实和详尽地记录摄影瞬间客观景物的形态、具有良好的量测精度和判读性能，因此摄影测量学被广泛地应用于各个方面。

按照所研究对象的不同，摄影测量学内容可分为地形摄影测量和非地形摄影测量两大类。地形摄影测量研究的对象是地区表面的形态，以物体与构像之间的几何关系为基础，最终根据摄影像片测绘出摄影区域的地形图。非地形摄影测量一般是指近景摄影测量，顾名思义，研究的对象在体积和面积上较小，摄影机到摄影目标的距离较近，一般小于300m，测量的精度相应地要求较高。基本理论也是根据物体与构像之间的几何关系，但在处理技术上有着其特殊性。近景摄影测量大多应用在专题科学研究和考察，诸如工业、建筑学、生物学、考古、医学以及高速运动物体等方面，任务和要求也各异。为适应现场条件，使用的摄影机可以是测量专用的，也可以是一般的普通照相机；通常取用一定规则的摄影方式，但也可以是随意的。因此，这就要求用解析方法来确定研究对象的形态，测量成果乃是表示研究对象的一系列特征点的三维坐标值，即研究对象的数字模型；根据要求也可绘制所摄物体的立面图、平面图和显示立体形态的等值线图。此外，遥感技术是近十几年来迅速发展为一门有广阔前景的学科。从名词上说，遥感技术就是不直接接触研究的对象，而利用所传感的信息进行分析、处理，从而识别所研究对象的本质。因此，地形摄影测量和近景摄影测量也可认为是应用遥感技术的范畴。不过，现今所提及的遥感是具有另一方面的含义，即用某种传感器，不直接接触研究的目标和地球表面、地球内部、环境景象、天体等，而传感目标信息特征的信号，一般指目标对象所反应的辐射电磁波，经过传输、处理，从中提取对了解目标有实用的信息，称为遥感。实现这种过程所采取的各种技术手段总称为遥感技术。各种物质的辐射电磁波具有其各自的特征，记录下的信息可以是图像或者数据，因而有其特异性。对信息予以分析、解释和处理就能判别研究对象的性质和状态。由于遥感技术是以研究对象与信息之间所存在的物理性质的关系为基础，因此就能够应用于各个方面如农业调查、土壤性质、植被分布、地下资源、气象、环境污染等等。传感器所取得的构像信息虽属非常规的图像，根据遥感图像的几何特征，在编制小比例尺地图、修补旧图方面也有一定的利用价值。

摄影测量学也可按摄影站的位置分为航天摄影测量、航空摄影测量、地面摄影测量和水中摄影测量几类。航天摄影测量是利用航天器如人造地球卫星、高空飞机进行摄影。航空摄影测量指的是地形摄影测量，从航摄飞机上对地面进行摄影，目的在于测绘地形图。地面摄影测量包括地面立体摄影测量和近景摄影测量。前者在测绘特殊地区的地形图时常采用，后者是对科学技术专题科目进行研究时采用。水中摄影测量是将摄影机置于水中，对

水下地表面进行摄影以绘制水下地形图，这属于双介质摄影测量。

在我国实现四个现代化的建设期间，测图任务繁重，需要采用高效率、高精度的测图方法来完成各种比例尺、各种类型的地图。摄影测量必然将要发挥重要的作用。

地形摄影测量的最终成果是地形原图。测图的原始资料就是测区的摄影像片。地形摄影测量的内容要点就是研究物点与像点之间的几何关系，并设计和使用摄影测量仪器来实现求解。一张地图对小区域而言，乃是地面上地物、地貌在水平面上按图比例尺缩小的正射投影的图形，再加上必要的注记、图式符号等地图要素。摄影像片却是地面景物在像片平面上的中心投影。摄影测量要解决的基本问题，就是将中心投影的像片转换为正射投影的地形图。地面立体摄影测量是最早应用来绘制地形图的摄影测量方法。地面摄影机安置在地面两摄影站点上摄取成对像片，这就可以利用地面测量方法取得摄影站点的地面坐标，而且摄影的方式也可随要求作适当安排并准确定向地面摄影机。如是，像对在地面坐标系中的空间位置和摄影方向都是已知的，这对往后利用像对测绘地图的工作将带来方便。虽然地面摄影测量有前景遮蔽后景、地面测量工作量较大等不利因素，而且大区域的测图工作都已采用航空摄影测量方法，但对某些特殊情况如高山地区的地理勘测、大比例尺的某些工程测量，地面立体摄影测量仍具有其使用价值。航空摄影测量从飞机上向地面进行摄影，能在短期内取得测区完整的航摄像片测图资料，而且可以利用航摄像片之间的相互关系，从而节省大量的地面测量外业工作。但是对地面进行航空摄影时，由于运载航空摄影机的航摄飞机总是在运动中以及不能保持严格水平，曝光瞬间航空摄影机处在空间的位置和状态，迄今尚不能以足够的精度确定之。这在往后利用航摄像片制作地形图的过程中需要通过各种途径来解决。

在我国应用航空摄影测量方法绘制地形原图大体上分综合法、全能法和分工法三种。综合法测图是摄影测量和地面地形测量相结合的测图方法。地面点的平面位置应用摄影测量方法以单张航摄像片为测图单元来解求，而点位高程或地貌在野外实地测定。这种方法适用于大比例尺平坦地区的测图，尤其是对高程精度要求很高而航测方法难以达到的情况下，综合法测图能得出满意的成果。全能法和分工法都属于立体摄影测量方法，取连续摄影的两相邻像片（像对）为测图单元。全能法测图是以摄影过程的几何反转来建立摄区的立体模型，借助地区立体模型的量测以代替地面地形测量，一次完成点位高程和平面位置的测定，从而绘制出地区的线划地形原图。全能法测图适用于丘陵地区、山区和高山地区的测图。分工法测图也称微分法测图，待求点的平面位置和高程虽都是应用摄影测量方法，但却是分别测定的。这种测图方法的理论和为此而设计的仪器，当时是针对测绘比例尺为1：25000~1：50000地形图的，在测图方法的原理上带有近似性。现今我国比例尺1：10000基本面大都已完成，今后工作转移到测图精度的提高。同时国内测图设备已具有了一定的规模，分工法测图方法已失去过去的优点，业已舍而不用了。

航空摄影测量制作地形原图大体上分三个阶段：航空摄影、航测外业和航测内业。航空摄影就是在航摄飞机上安装航空摄影机，从空中对测区地面作有计划的摄影，以取得适合航测制图要求的航摄像片。航测外业是在野外实地进行像片联测和判读调绘。像片联测的目的是利用地面控制点把航摄像片与地面联系起来；像片的判读调绘是在像片上补绘没

有反映出的地物、地类界等，并搜集地图上必需有的地名、注记等地图元素。航测内业就是依据航摄像片和航测外业成果在室内专用的航测仪器上测绘地形原图。

由于电子计算机的问世，摄影测量中各种光学或机械模拟解算方法，由通过电子计算机按严密公式完成大量复杂的数值计算的解析方法所代替，摄影测量由模拟法向解析法过渡。50年代末出现解析空中三角测量，解析测图仪。随着解析摄影测量在大比例尺测图中的应用，对解析空中三角测量的精度和可靠性提出更高的要求，因而产生了带有附加参数的空中三角测量区域网平差和粗差检测理论。空间大地测量的发展，尤其是全球定位系统（GPS）的发展对解析空中三角测量产生推进作用。

80年代末进入到信息时代，解析摄影测量的进一步发展就是数字摄影测量。数字摄影测量是把摄影所获得影像进行数字化或数字化影像，由计算机进行数字处理，从而提供图解的数字的地形图与专题图、数字地面模型、图解的或数字的正射影像等各种产品。

## 第二章 摄影和空中摄影

### § 2-1 摄影机概述

摄影是按小孔成像原理，在小孔处安装一个摄影物镜，在像面处放置感光材料，物体经摄影物镜成像于感光材料上。感光材料受投射光线的光化作用后，经摄影处理取得景物的光学构像。

摄影的主要工具是摄影机。摄影机的种类很多，基本结构原理大致相同，概括而言是由镜箱和暗箱两部分组成，如图 2-1 所示。镜箱是摄影机的光学部件，包括物镜筒、镜箱和像框平面。物体的投射光线经摄影物镜调焦而成像于像框平面上。暗箱是存放感光材料用的。摄影时要求感光材料展平并贴附在像框平面内。普通手提摄影机的暗箱和镜箱是连成一体的；测量专用的摄影机备有多个暗箱，暗箱可以从摄影机镜箱上拆卸下来，临摄影时装上和调换使用。

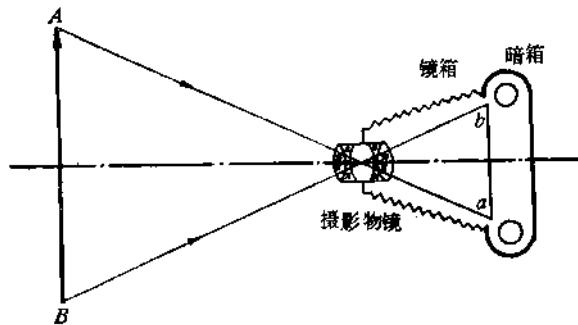


图 2-1

#### 一、摄影物镜

摄影物镜的作用是聚集所摄物体发射的光线，使在像框平面上取得亮度较大的清晰影像。物体构像的质量主要取决于物镜的品质。单透镜具有各种像差，为此摄影物镜都是由几个透镜组合而成的一个光学系，借以消除或减小像差。物镜光学系中诸透镜的光轴应重合为一，是为物镜的（主）光轴。物体的投射光线经诸透镜界面逐次折射后，最终取得折射光线。设投射光线  $AB$ （图 2-2）平行于光轴，经物镜诸曲面折射后得折射光线  $CD$ 。延长  $AB$  和  $CD$  相交于点  $h'$ ，过点  $h'$  作垂直于光轴的平面  $H'$ ，那么诸平行于光轴的投射光线都可以认为在平面  $H'$  上发生折射。同样，若投射光线来自物镜的另一方射入，经物镜诸曲面折射后得折射光线，按上述延长相交得点  $h$  和平面  $H$ ，那么平面  $H$  就相当于物镜的另一个折射面。这样，不论物镜光学系由多少个透镜组成，我们可以理解为用平面  $H$ 、 $H'$  来等价物镜，作为光线的折射面。以后在研究光学系的特性时均采用  $H$  和  $H'$  来代表。平面  $H$  和

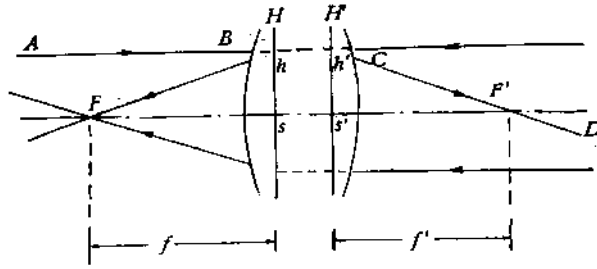


图 2-2

$H'$  将空间分为两部分。物体所处空间称为物空间，构像所处空间称为像空间。因此平面  $H$  和  $H'$  相应地称为物方主平面和像方主平面。平面  $H$  和  $H'$  与主光轴的交点  $S$  和  $S'$  相应地称为物方主点和像方主点。平行于光轴的投射光线经物镜折射后与光轴的交点  $F'$ ，称为像方焦点；斜交光轴的投射光线经物镜折射后所取得的折射光线若平行于光轴，则投射光线与光轴的交点  $F$  称为物方焦点。自像方主点  $S'$  到像方焦点  $F'$  的间距称为物镜的像方焦距  $f'$ ；自物方主点  $S$  到物方焦点  $F$  的间距是为光学系的物方焦距  $f$ 。过像方焦点作垂直于光轴的平面称为焦面。显然平行于光轴的投射光线经物镜折射后都会聚于像方焦点  $F'$  上；无穷远点平行光线的构像应位于焦面内。相应地由物方焦点  $F$  发出的投射光线经物镜折射后得到平行于光轴的折射光线。特别提出，在两主平面  $H$  和  $H'$  之间的光线途径总是平行于光轴的。

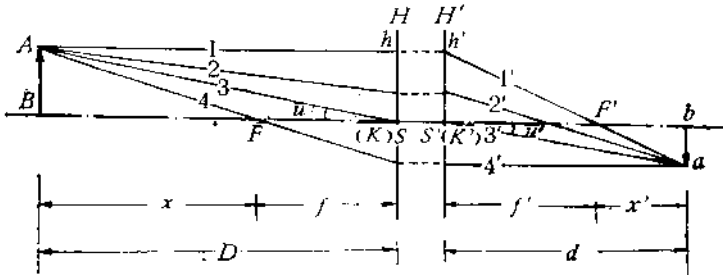


图 2-3

根据上述投射光线的折射现象，在物点  $A$  发射的诸光线中（见图 2-3），取平行于光轴的光线 1，遇物方主平面  $H$  后仍按原方向前进，到达像方主平面  $H'$  后折射得成像光线  $1'$ ，必定是通过像方焦点  $F'$ ；又取过物方焦点  $F$  的光线 4，遇物方主平面  $H$  即折为平行于光轴的光线，到像方主平面  $H'$  后仍按平行光轴的方向得成像光线  $4'$ 。光线  $1'$  和  $4'$  的交点  $a$  即为物点  $A$  的构像。取任意光线 2，遇物方主平面  $H$  第一次折射后平行于光轴的方向，遇像方主平面  $H'$  再次折射为成像光线  $2'$ ，也必将通过像点  $a$ 。在所有投射光线和成像光线的光学共轭光线中，总可以找到一对共轭光线如光线 3 和  $3'$ ，它们与光轴的交角  $u$  和  $u'$  恰好相等。此时两共轭光线与光轴的一对交点  $K$  和  $K'$  称为物镜的物方（或前）节点和像方（或后）节点。综合以上所述，一个物镜有一对主点、一对焦点和一对节点，代表了该物镜的特征。当

物空间和像空间的介质相同时，一对节点正好与一对主点重合，此时主点就具有节点的特征  $\angle u = \angle u'$ ，且像方焦距等于物方焦距  $f = f'$ 。

## 二、物镜的成像公式

在图 2-3 中，设物点  $A$  到物方主平面  $H$  的距离为  $D$ ，称为物距；像点  $a$  到像方主平面  $H'$  的距离为  $d$ ，称为像距；物镜的焦距为  $f$ ，则

$$\frac{1}{D} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f} \quad (2-1)$$

表示物点借助于物镜光学系能取得清晰构像的条件公式，称为高斯透镜公式。若取焦点  $F$  和  $F'$  为物距和像距的计算起点，由图知

$$D = x + f \text{ 和 } d = x' + f$$

代入式 (2-1) 整理后得

$$xx' = f^2 \quad (2-2)$$

是构像清晰条件公式的另一种写法，称为牛顿透镜公式。

## 三、光圈和光圈号数

通过物镜边缘部分的光线将产生较大的影像变形。为了限制边缘光线进入，而在物镜透镜组中间设置一个孔径光阑，即所谓光圈。

常用的虹形光圈是由许多镰刀形的黑色金属薄片所组成，一片叠压着一片，每片有一个固定的支点，通过机械作用使诸薄片同时绕其支点旋转，可在中央形成一个大小不同的、近似于圆形的窗孔。因此光圈的作用一方面可调节物镜使用面积的大小，另一方面可调节进入物镜的光量。

取平行于光轴的光线束投向物镜，当光圈放置在物镜的前面时，光圈孔径以外的光线受阻，进入物镜的平行光束的断面面积等于孔径的圆面积。为改善像差引起的影像变形，通常光圈置于物镜透镜组之间，这同样能起到控制光束断面面积的作用。平行光束经物镜前透镜组折射后通过光圈。此时的光束直径  $\delta$  称为有效孔径。图 2-4 只画出物镜的前半部分。

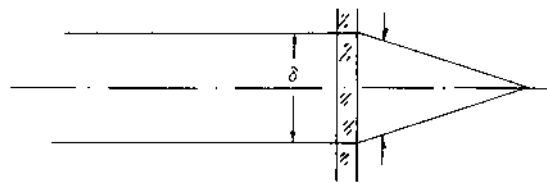


图 2-4

平行光束经物镜成像于焦面上，单位面积上的照度与孔径面积成正比，即与有效孔径的平方成正比。此外，在进入物镜的光通量不变时，物镜的焦距愈大，承受光通量的面积随焦距的平方成正比地增大，则单位面积上影像的照度将随焦距的平方成反比地减弱。因

此，取有效孔径与物镜焦距之比作为说明影像照度的因数，称为相对孔径 ( $\delta/f$ )。显然构像的亮度是与相对孔径的平方成正比。由于相对孔径大都小于 1，改用相对孔径的倒数来说明进入物镜的光通量较为方便。相对孔径的倒数称为光圈号数，以  $k=f/\delta$  表示。这样构像的亮度就与光圈号数的平方成反比。

摄影时欲在感光材料的单位面积上取得一定值的曝光量  $H$ ，因曝光量  $H$  等于照度  $E$  与曝光时间  $t$  的乘积，即  $H=Et$ ，故有

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{H/t_1}{H/t_2} = \frac{t_2}{t_1}$$

而

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{k_2^2}{k_1^2} = \left(\frac{k_2}{k_1}\right)^2$$

得

$$\frac{t_2}{t_1} = \left(\frac{k_2}{k_1}\right)^2$$

如果曝光时间改变一倍，即  $t_2/t_1=2$ ，则相应光圈号数之比  $k_2/k_1=\sqrt{2}$ ，应改变  $\sqrt{2}$  倍，因此物镜筒光圈环上标志的光圈号数的排列顺序是以  $\sqrt{2}$  为公比的等比级数，如

$$1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 8, 11, 16, 23, 32$$

光圈号数每改变一档，相应的曝光时间应改变一倍，就能保持相同的曝光量，取得同等的构像亮度。例如用光圈号数 5.6 和曝光时间 1/100 秒时，曝光量认为是合适的，那么光圈号数改用 8 时，曝光时间则应为 1/50 秒。

光圈号数愈大，相应的相对孔径减小，能增强纵深景物影像的清晰度。摄影时为增强纵深景物构像的清晰度，应采用小的相对孔径，即大的光圈号数，同时相应地加长曝光时间。

#### 四、景深和超焦点距离

用摄影机摄取有限距离景物时，根据构像公式 (2-1)，在摄取某一物距为  $D$  的物点  $A$

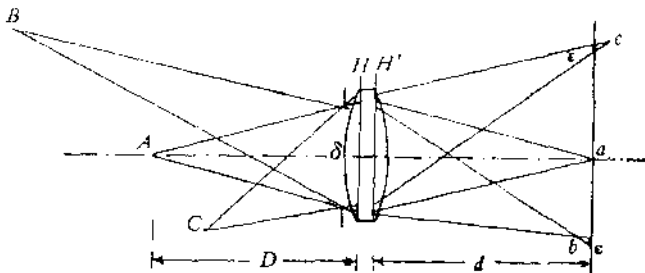


图 2-5

时，只有在像距为  $d$  时才能得到清晰的像点  $a$ ，见图 2-5。物距大于或小于  $D$  的景物如  $B$  和  $C$ ，在像片平面上的构像形成一个模糊的圆圈，称为模糊圆。如果模糊圆的直径  $\epsilon$  小于某一限值时，由于人眼观察的分辨能力有限，这个模糊圆的构像看起来仍然是一个清晰的点。

如此, 虽则对光于点  $A$ , 但在远景  $B$  和近景  $C$  之间这一段间隔内所有景物, 在像面上仍可认为获得了清晰的构像。此时, 远景与近景之间的纵深距离称为景深。远景的物距称为远景距离  $D_1$ , 近景的物距称为近景距离  $D_2$ 。

根据透镜公式, 由图 2-5 有

$$\frac{1}{D_A} + \frac{1}{d_a} = \frac{1}{f}, \quad \frac{1}{D_B} + \frac{1}{d_b} = \frac{1}{f}$$

得  
而

$$d_a = \frac{fD_A}{D_A - f}, \quad D_B = \frac{fa_b}{d_b - f}$$

$$\frac{\epsilon}{\delta} = \frac{d_a - d_b}{d_b}$$

$$d_b = \frac{\delta d_a}{\epsilon + \delta} = \frac{\delta f D_A}{(\epsilon + \delta)(D_A - f)}$$

则

$$D_B = \frac{f\delta f D_A}{\delta f D_A - f(\epsilon + \delta)(D_A - f)} = \frac{D_A f^2 \delta}{f^2 \delta - f\epsilon(D_A - f)}$$

上式  $(D_A - f)$  一项中,  $f$  比  $D_A$  小得多, 可忽略不计, 并以  $\frac{f}{\delta} = k$  代入, 则得远景距离

$$D_1 = \frac{Df^2}{f^2 - Dk\epsilon} \quad (2-3)$$

用同样方法求得近景距离

$$D_2 = \frac{Df^2}{f^2 + Dk\epsilon} \quad (2-4)$$

而景深是远景距离与近景距离之差

$$\Delta D = D_1 - D_2 = \frac{2D^2 k\epsilon}{f^2 - (Dk\epsilon/f)^2} \quad (2-5)$$

由此可知: 对某一摄影机而言, 景深与对光调焦的物距、允许的模糊圆直径  $\epsilon$  和所取光圈数  $k$  成正比, 而与摄影物镜的焦距  $f$  成反比。

当对光调焦某一距离, 能刚好使无穷远处的景物构像清晰, 这一调焦距离就称为无穷远起点、或超焦点距离, 现以  $H$  表示。以式(2-3), 当取远景距离  $D_1 = \infty$  时, 则  $f^2 - Dk\epsilon = 0$ , 得

$$H = D = \frac{f^2}{k\epsilon} \quad (2-6)$$

如以超焦点距离  $H$  为参数, 远景和近景距离的式(2-3)和(2-4)可改写成

$$D_1 = \frac{HD}{H - D} \quad (2-7)$$

$$D_2 = \frac{HD}{H + D} \quad (2-8)$$

当调焦于无穷远起点时, 从式(2-4)或(2-8), 得近景距离为  $\frac{H}{2}$ , 这时的景深将是



二分之一的超焦点距离到无穷远。

对不同的摄影机，当变动调焦距离、光圈大小和模糊圆的限制，其相应的景深可按式(2-6)、(2-7)、(2-8)计算。普通摄影机有在物镜筒上配备景深标度环的，标明相应的远景和近景距离；可调焦的全能地面摄影机，在其使用说明书中，列出了不同情况的景深数据，可供查考。

## 五、像场和像场角

光线通过物镜后在像平面上的光照是不均匀的，照度由中央向边缘递减。今将物镜对光于无穷远，在焦面上会看到一个照度不均匀的明亮圆。这样一个直径为  $ab$  的明亮圆的范围称为视场，见图 2-6。物镜的像方主点与视场直径  $ab$  所张的角  $2\alpha$ ，称为视场角。在视场面积内能获得清晰影像的区域称为像场，如图中以  $cd$  为直径的圆，而物镜像方主点与像场直径  $cd$  所张的角  $2\beta$  称为像场角。为着能取得全面清晰的构像，应取像场的内接正方形或矩形为最大像幅。像幅决定着物面或物空间有多大的范围可被物镜成像于像面，所以限定像幅的框架实质上是像场光阑，它限制着成像范围。

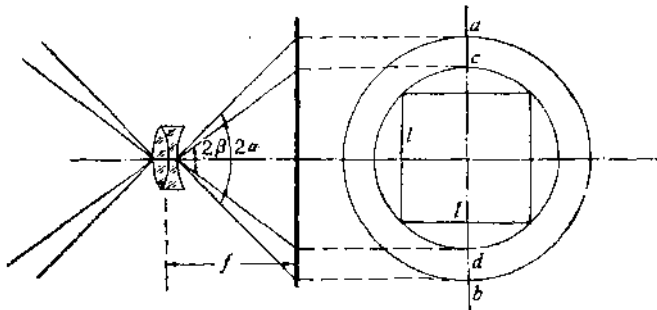


图 2-6

## 六、摄影机快门

快门是控制曝光时间的机件，快门从打开到关闭所经历的时间称为曝光时间，或称快门速度。常用的快门有两种形式：中心快门和焦面快门。中心快门由 2~5 个金属叶片组成，装置在物镜透镜组的中间。曝光时利用弹簧机件使快门叶片由中心向外启开，投射光线就能经物镜进入摄影机内，使感光材料感光；到了预定的曝光时间后快门叶片又自行关闭，终止曝光。中心快门的优点是在启闭快门的整个过程中，感光材料全像幅同时曝光。航空摄影机除特种型号外都采用中心快门。焦面快门安装在像框平面附近、感光材料的前面，一般是用不透光黑布卷帘制作的，其上有一缝隙与卷帘运动方向相垂直。未曝光时卷帘不透光黑布部分掩蔽着感光材料，曝光时卷帘在感光材料前面滑动，缝隙所过之处即行曝光。调节缝隙的宽度或控制缝隙的运动速度，就能改变曝光量，相当于改变曝光时间。焦面快门的优点是感光材料各部分的曝光量是相同的。此外这种机构设计可使曝光时间很短如  $1/500s$  (秒) 或  $1/1000s$ 。缺点是当摄影机与所摄物体有相对运动时，就会引起影像的变形和位移，所以作量测用的摄影机不宜采用。