

# 第1章

## 绪论

摄影测量学是测绘学的一门分支学科,它广泛应用于地形测绘、资源调查、灾害监测、城市规划、地理信息系统(geographic information system,GIS)基础数据获取和数字化城市建设等领域。摄影测量从模拟摄影测量开始,经过解析摄影测量阶段,现在已经进入了数字摄影测量阶段。当代的摄影测量是传统摄影测量与计算机视觉相结合的产物,研究的重点是从多源影像自动提取所摄对象的空间信息。尽管摄影测量新技术在不断地发展变化,但仍有规律可循,其摄影测量的基本原理没有改变,只是引入了数字图像处理技术、模式识别理论等对数字影像进行加工处理的技术手段和方法,致使其集成的摄影测量系统功能更为强大,应用领域也更为广泛。

摄影测量学课程理论性与实践性并重,理论联系实际的能力也是行业需要的重要技能。目前,测绘类专业特别是测绘工程专业基本围绕“解析摄影测量”和“数字摄影测量”的框架建设摄影测量学课程。测绘工程专业在摄影测量学课程后继续开设数字摄影测量学课程,因此在摄影测量学课程中以“解析摄影测量学”为重点。摄影测量学课程一般设置占总学时 1/3 的课内实验,另外设置两周独立实践教学和摄影测量综合实习。

无人机的出现使航空摄影测量彻底变革为大众化、平民化行业,无人机生产成本大幅降低使得其在各个领域得到了广泛应用,特别是在现代测绘领域,无人机颠覆了传统测绘的作业方式,已经成为生产单位的主流生产方式。因此,当前行业生产现状对摄影测量学的教学,特别是实践教学提出了新的要求,实验和实习项目的安排既要加深学生对理论知识的理解,又要满足行业生产的需求,注重学生综合能力的培养。

### 1. 摄影测量课内实验的目的与意义

摄影测量课内实验属于摄影测量学课程教学内容的一部分,课内实验使学生系统、全面地学习并应用摄影测量基本理论知识,锻炼学生实践技能。学生通过立体观察与量测、航摄像片解译与调绘、解析摄影测量经典算法编程以及 eLen 航空摄影测量教学实验系统操作,紧密结合理论知识内容,利用现有仪器设备及资料进行综合训练,理解掌握理论知识,夯实实践技能。

### 2. 摄影测量综合实习的目的与意义

摄影测量综合实习与摄影测量学课程联系紧密但又具有一定独立性,目的是使学生能够在实践中进一步理解所学摄影测量理论知识,并系统、全面地应用已学摄影测量知识,锻

炼专业实践技能。综合实习的组织需要结合测绘生产单位实际作业流程,将课堂理论与实践相融合,有利于学生进一步深入掌握和理解摄影测量学的基本概念和原理,加强摄影测量学基本技能训练,培养学生分析和解决实际问题的能力。

综合实习设置低空无人机航空摄影测量实习、倾斜摄影测量实习以及模拟航空摄影测量系统综合实习等,实际使用无人机航飞获取影像数据,或者利用模拟航空摄影测量系统模拟无人机外业航飞数据采集,了解航线设计、控制点布设、航空飞行以及影像数据质量检查等过程。实际使用数字摄影测量系统内业处理,了解数字摄影测量的内定向、相对定向、绝对定向、空中三角测量、数字高程模型(digital elevation model,DEM)、数字正射影像(digital orthophoto map,DOM)、测图生产过程及方法,给即将从事测绘工作的学生奠定应用基础。

综合实习可以使学生熟悉测绘行业规范标准,完成完整的实习项目可以提高学生测绘工程组织能力。学生在团队中独立或合作开展工作,共同推进团队工作的实施,可以培养学生团队合作精神、交流沟通能力和团队协作的能力。

### 3. 摄影测量实验和实习安排

根据摄影测量学课程教学要求,结合当前航测单位实际生产作业情况,本教程的实验和实习指导分为课内实验及综合实习两部分。

课内实验侧重结合摄影测量课程理论教学内容,根据实验设备条件,实验内容可以安排航空像片立体观察与量测、解析摄影测量重要算法编程、航摄像片解译与调绘、eLen 航空摄影测量教学实验系统操作,可以安排 12 学时以上。

摄影测量综合实习是独立于摄影测量学理论教学的实践教学内容,可根据实验设备条件安排模拟航空摄影测量系统综合实习、低空无人机航空摄影测量实习、倾斜摄影测量实习等。实习项目涵盖外业及内业全流程工作,学时安排 2 周以上。学生运用课内理论知识与课内实验掌握的基本技能,通过团队分工合作和个人操作完成实习。

## 第2章

# 摄影测量基础实验

摄影测量学理论基本概念多、公式推导多、内容抽象、空间关系复杂、逻辑严密,理论教学使学生对摄影测量的理解更多地存在于感性认知。摄影测量学课程一般都设置课内实验,紧密结合摄影测量课程理论教学内容,根据实验设备条件安排实验内容。通过课内实验有助于学生深刻理解抽象教学内容,激发学习兴趣,帮助学生系统、全面地学习摄影测量基础知识,锻炼实践技能。

### 2.1 航空像片立体观察与量测

在摄影测量中,一般情况下利用单幅影像是不能确定物体上点的空间位置的,只能确定物点所在的空间方向。要获得物点的空间位置,一般需要利用两幅相互重叠的影像构成立体模型来确定被摄物体的空间位置。

立体测图也称为双像立体测图,是以两个相邻摄站所摄取的具有一定重叠度的一对像片为量测单元,来获取地物空间位置信息的方法。通过航空像片立体观察与立体量测实验:了解人造立体视觉的原理;掌握观察人造立体视觉的四个条件;掌握人造立体观察与量测方法,借助仪器进行立体观察;掌握数字摄影测量系统立体测图的方法步骤。

#### 2.1.1 立体观察与量测基础知识

##### 1. 双眼观察的天然立体视觉

人的眼睛就像一架完善的自动调焦摄影机,当人们观察物体时,眼球中的水晶体相当于镜头,眼睛瞳孔的作用类似光圈,后面的网膜相当于感光片。网膜的中央有网膜窝,是视觉最灵敏的地方。网膜窝中心与水晶体后节点的连线叫作眼的视轴。当人眼注视某物点时,视轴会自动地转向该点,使该点成像在网膜窝中心,同时随着物体离人眼的远近自动改变水晶体的曲率,使物体在网膜上的构像清晰。眼睛的这种本能称为眼的调节。当人用双眼观察物体时,双眼会本能地使物体的像落于左右两网膜窝中心,即视轴交会于所注视的物点上。这种本能称为眼的交会。在生理习惯上,眼的交会动作与眼的调节是同时进行、永远协调的。图 2-1 所示是人眼的结构示意图。

当人们用单眼观察景物时,感觉到的仅仅是景物的透视图,不能正确判断景物的远近,

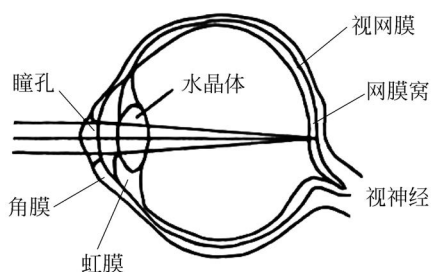


图 2-1 人眼的结构

而只能凭经验去间接地判断。只有用双眼同时观察景物,才能分辨出物体的远近,得到景物的立体效应,这种现象称为人眼的天然立体视觉。

人的双眼观察为什么会产生天然立体视觉从而能分辨出远近不同的景物呢?如图 2-2 所示,有一物点  $A$ ,距双眼的距离为  $L$ ,当双眼注视  $A$  点时,两眼的视准轴本能地交会于该点,此时两视轴相交的角度  $\gamma$ ,称为交会角。在两眼交会的同时,水晶体自动调节焦距,得到最清晰的影像。交会与调节焦距这两项动作是本能进行的,人眼的这种本能称为凝视。当双眼凝视  $A$  点时,在两眼的网膜窝中央就得到构像  $a$  和  $a'$ ;若  $A$  点附近有一点  $B$ ,较  $A$  点近,距双眼的距离为  $L - dL$ ,同样得到构像  $b, b'$ 。由于  $A, B$  两点距眼睛的距离不等,致使网膜窝上  $ab$  弧长与  $a'b'$  弧长不相等,  $\sigma = ab - a'b'$ ,称为生理视差,生理视差也反映为观察  $A, B$  两点交会角的差别。双眼交会  $A$  点时的交会角为  $\gamma$ ,双眼交会  $B$  点时的交会角为  $\gamma + d\gamma$ ,  $\gamma + d\gamma > \gamma$ ,据此,人的双眼能够区别物体的远近,生理视差是产生天然立体视觉的根本原因。

## 2. 人造立体视觉

当用双眼观察空间远近不同的景物  $A, B$  时,两眼产生生理视差,获得立体视觉,可以判断景物的远近。如果此时在双眼前各放一块玻璃片,如图 2-3 中的  $P$  和  $P'$ ,则  $A$  和  $B$  两点分别得到影像  $a, b$  和  $a', b'$ 。若玻璃上有感光材料,影像就分别记录在  $P$  和  $P'$  上,当移开实物后,两眼分别观看各自玻璃片上的构像,仍能看到与实物一样的空间景物  $A$  和  $B$ ,这就是空间景物在人眼网膜窝上产生生理视差的人眼立体视觉效应。其过程为:空间景物在感光材料上构像,再用人眼观察构像的像片而产生生理视差,重建空间景物立体视觉。这样的立体视觉称为人造立体视觉,所有看到的立体模型称为视模型。

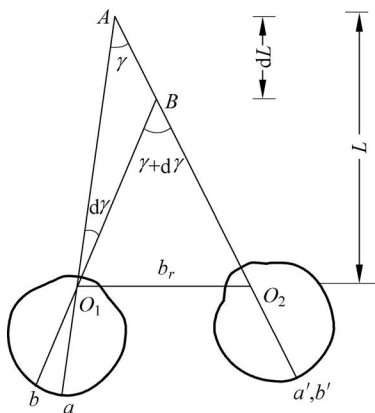


图 2-2 人眼的立体视觉

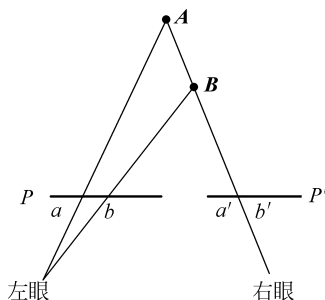


图 2-3 人造立体视觉

根据人造立体视觉原理,在摄影测量中规定摄影时保持像片的重叠度在 60% 以上,是为了让同一地面景物在相邻两张像片上都有影像,它完全类同于上述两玻璃片上记录的景物影像。利用相邻像片组成的像对,进行双眼观察(左眼看左片,右眼看右片),同样可以获

得所摄地面景物的立体模型,这样就奠定了立体摄影测量的基础。如上所述,人造立体视觉必须符合自然界立体观察的条件。

(1) 两张像片必须是在两个不同位置对同一景物摄取的立体像对。

(2) 每只眼睛必须只能观察像对的一张像片,即双眼观察像对时必须保持两眼分别只能对一张像片进行观察,这一条件称为分像条件。

(3) 两张像片上相同景物(同名像点)的连线和眼睛基线应大致平行。

(4) 两张像片之间的距离应与双眼的交会角相适应。

(5) 两张像片的比例尺相近(差别 $<15\%$ ),否则需要使用 ZOOM 系统等进行调节。

进行像对立体观察时,在满足上述条件的情况下,如果像片相对眼睛安放的位置不同,可以得到不同的立体效果,即可能产生正立体效应、反立体效应和零立体效应。

### 1) 正立体效应

当左、右眼分别观察立体像对的左、右像片时,形成的与实地景物起伏(远近)一致的立体感觉称为正立体效应,如图 2-4(a)所示。这是由于人眼观察像片得到的生理视差与人眼看实物的生理视差符号相同。在视模型中,人们看到的地面景物的远近或者高低起伏与实际地面景物远近或者高低起伏相同,从而实现了地物的三维重建。正立体效应广泛应用于摄影测量的各个环节之中。

### 2) 反立体效应

将立体像对的两张像片作为一个整体,在其自身平面内旋转  $180^\circ$ ,观察位置不变,使左眼看右像、右眼看左像,得到的仍是立体像对,仅方位相差  $180^\circ$ ,称为反立体效应,如图 2-4(b)所示。用这种方法观察航空摄影的立体像对,就能看到连绵起伏的山脉、低洼的山谷、河流,获得与地形相似的立体模型。

### 3) 零立体效应

把正立体情况下的两张像片,在各自平面内按同一方向旋转  $90^\circ$ ,使像片上纵横坐标互换,像对上原有的左右视差较旋转后转变为上下视差,而原有的上下视差则转变为左右视差,起伏的视模型变平,称为零立体效应,如图 2-4(c)所示。人眼对于量测左右视差的精度高于上下视差,所以在量测上下视差时,为了提高量测精度,可采用零立体效应进行  $y$  方向的坐标量测。

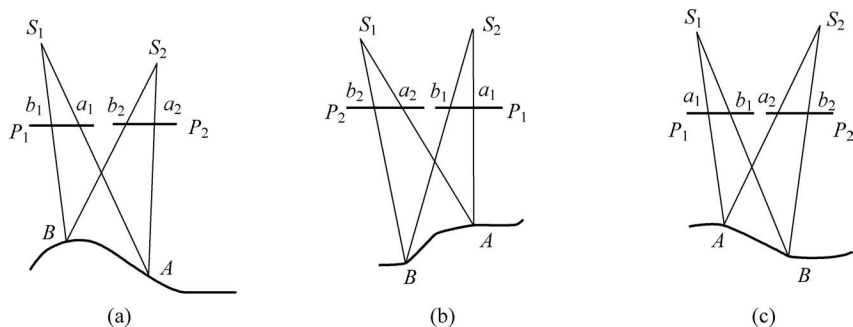


图 2-4 立体效应原理图

(a) 正立体效应; (b) 反立体效应(左右像片对调); (c) 零立体效应(像片旋转  $90^\circ$ )

立体像对左右像片不同摆放进行观察可分别产生正立体效应、反立体效应和零立体效

应,像片摆放如图 2-5 所示。

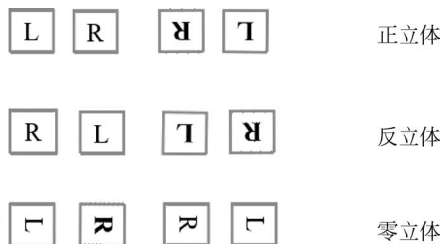


图 2-5 立体效应示意图

### 3. 像对的立体观察

建立人造立体视觉时,除满足(1)、(3)、(4)、(5)条件外,还要求观察立体像对的双眼分别只能观察其中的一张像片,俗称分像,这与我们平时观看物体双眼交会与凝视的本能相违背。可借助立体镜或其他工具来帮助人眼顺利达到分像,使两眼分别只观察一张像片。观察立体像对时,一种是直接观察两张像片,构成立体视觉,它是借用立体镜来达到分像,即立体镜观察法。另一种是通过光学投影,将两张像片的影像重叠投影在一起,此时需通过其他措施使两眼只能分别看到重叠影像中的一个。这种立体观察,不是直接观察像片,而是观察两张像片投影到同一平面的重叠影像,为了加以区别,称后一种为叠影观察法。

#### 1) 立体镜观察法

立体镜的主要作用是让一只眼睛能清晰地只看一张像片的影像。它克服了肉眼观察立体时强制调焦与交会所引起的人眼疲劳,所以得到广泛应用。最简单的立体镜是桥式立体镜,它是在一个桥架上安装一对低倍率的简单透镜,两透镜的光轴平行,其间距约为人眼的眼基线距离,桥架的高度等于透镜焦距,如图 2-6 所示。观察时,像片对放在透镜的焦面上,物点影像经过透镜后射出来的光线是平行光,使观察者感到物体像是观察远处的自然景物一样,人眼的调焦与交会本能基本统一。

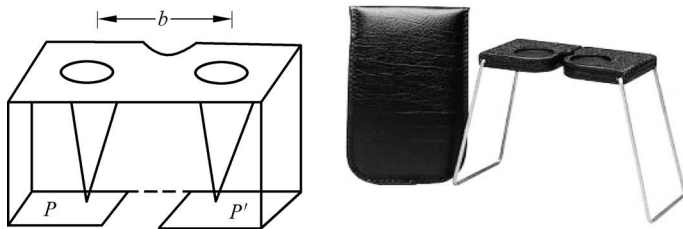


图 2-6 桥式立体镜

小型立体镜只适合观察小像幅的像片对,若要观察大像幅的航摄像片,就要用长焦距的反光立体镜,是为了便于航摄像片对的立体观察而设计的一种立体观察工具,如图 2-7 所示。反光立体镜由两对反光镜和一对透镜组成,平面镜安置成  $45^\circ$  的倾角。在反光镜下面安置的左右像片上的像点所发出的光线,经反光镜的两次反射后分别进入人的左右两眼,达到分像的目的。同时,观察的像片位于反光镜透镜的焦面附近,像点发出的光线经透镜

后接近平行光束,因而眼睛始终调节在远点上,很容易使交会与调节相适应而得到清晰的立体效果。透镜的唯一作用是放大,反光立体镜放大倍率为  $1.5 \sim 2$  倍,主要是在竖直方向夸大,使地面的起伏变大,这种变形有利于高程的量测。

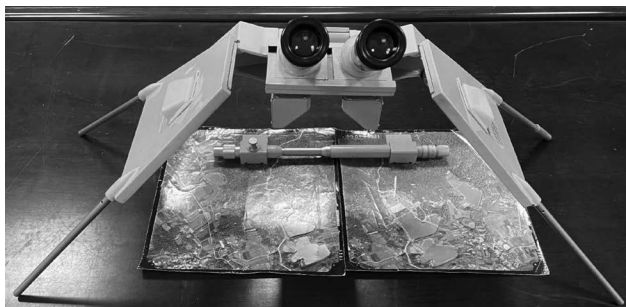


图 2-7 反光立体镜

反光立体镜常配有视差杆,可用来测定像点间的高差,其构造如图 2-8 所示,主要由伸缩的螺旋杆 A,固定螺丝 B、测微鼓 C、分划尺 D、视差螺丝 E、测标板 F 等部件组成。左方测标玻璃板能在伸缩杆上一定范围内滑动,可由固定螺丝 B 固定在所需要的位置上,右方测标板固定在杆的右端,借助视差螺丝 E 的旋转可向左右慢慢移动。所以两测标间的距离能随意变动,读数可在分划尺 D 和测微鼓 E 上分别读出,分划尺上刻画以  $0.5\text{mm}$  为单位,最小读数为  $0.5\text{mm}$ ;测微鼓上分划是将  $1\text{mm}$  分为 100 份,每分划的读数是  $0.01\text{mm}$ 。

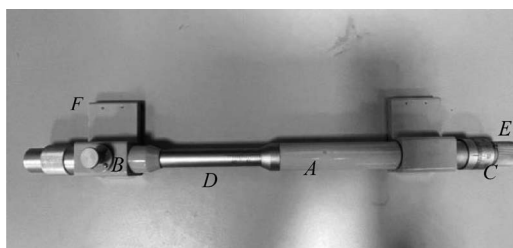


图 2-8 视差杆构造

## 2) 叠影观察法

当一个立体像对的两张像片在恢复了摄影时的相对位置后,用灯光照射到像片上,其光线通过像片投射至承影面上,两张像片的影像相互重叠。如何满足一只眼睛只看到一张像片的投影影像来观察立体影像呢?这就要用到“分像”的方法。常用的“分像”方法有互补色法、偏振光法、光闸法以及液晶闪闭法。其中,前三种方法广泛用于模拟的立体测图仪器中;液晶闪闭法是一种新型的立体观察方法,广泛用于现代的数字摄影测量系统中。现分别叙述其原理。

### (1) 互补色法

光谱中两种色光混合在一起成为白色光,这两种色光称为互补色光。常用的互补色是品红色与蓝绿色(习惯简称为红色与绿色)。在暗室中,如图 2-9 所示,在左方投影器中插入红色滤光片,投影在承影面上的影像为红色影像。右方投影器中插入绿色滤光片,在承影面上得到的影像是绿色的。如果观察者戴上左红右绿的眼镜进行观察,因为红色镜片只透

过红色光,而绿色光被吸收了,所以通过红色镜片只能看到左边的红色影像,看不到右边的绿色影像。同理,绿色镜片只能透过绿色光,也只能看到右边的绿色影像,而看不到左边的红色影像。从而达到一只眼睛只看到一张影像的“分像”目的,观察到地面立体模型。图 2-9 中,两投影器的投影光线交点  $A$  为几何模型点,而两眼视线观察交点  $A'$  为视模型点,它随人眼观察位置的不同而变动。当承影面上有一升降的测绘台,测绘台升到  $E_0$  面上时,观察到的  $A'$  点即为几何模型上的位置,从而达到视模型点与几何模型点两者的统一。在量测时,通过测绘台的升降,观察到的视模型点能与几何模型的相应点重合,以保持模型点的量测不受影响。

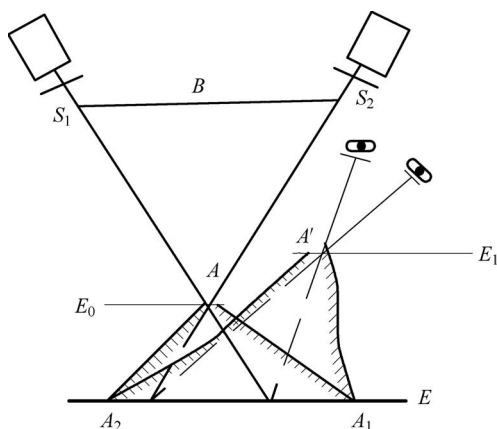


图 2-9 互补色法立体观察

## (2) 偏振光法

光线通过偏振器分解出偏振光,偏振光的横向光波波动只在偏振平面内进行。在偏振光的光路中,如有另一个偏振器,偏振光通过第二个偏振器后,光的强度将随两个偏振器的偏振平面相对旋角而改变,当两偏振平面相互平行时,将获得最大光强的偏振光;当两偏振平面相垂直时,偏振光则不能通过第二个偏振器,在偏振器的另一边就看不见光线。利用这种特性,在一对像片的投影光路中,放置一个偏振平面相互垂直的偏振器,以两组横向光波波动成相互垂直的偏振光,将影像投影在特制的承影面上,观测者戴上偏振眼镜,两镜片的偏振平面也相互垂直,且分别与投射光路中偏振器偏振平面相平行或垂直,这样双眼观察叠映在同一承影面的两像片影像时,就能达到“分像”的目的,如图 2-10 所示。

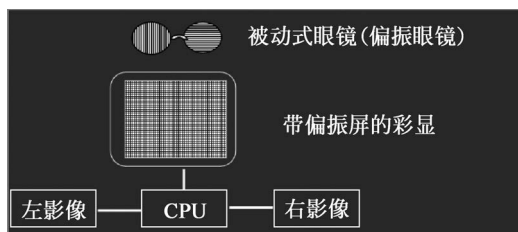


图 2-10 偏振光法立体观察

## (3) 光闸法

光闸法立体观察,是在投影的光线中安装两个光闸,并且这两个光闸相互错开,即一个

打开时另一个关闭。人眼观察时,要戴上与投影器中光闸同步的光闸眼镜,这样就能让一只眼睛只看到一张影像。由于影像在人眼中的构像能保持 0.15s 的视觉暂留,这样光闸启闭的频率只要每秒大于 10 次,人眼中的影像就会连续,从而构成立体视觉。光闸法的优点是投影光线的亮度很少损失,缺点是振动与噪声不利于工作。

#### (4) 液晶闪闭法

液晶闪闭法主要依赖液晶闪闭眼镜,它主要由液晶眼镜和红外发生器组成,如图 2-11 所示。利用液晶的特性和电流的改变使液晶镜片一瞬间透光、一瞬间不透光,通过一个控制盒,由计算机控制液晶镜片的透光与否。当计算机上显示左片时,控制左边的镜片透光,而右边的镜片不透光;在下一瞬间,计算机上显示右片时,控制右边的镜



图 2-11 液晶眼镜和红外发生器

片透光,而左边的镜片不透光。这样每一瞬间只有一只眼睛能看到航片,由于闪闭频率较高(100Hz),虽然此时只看到一张航片,但另一张航片的视觉残留仍在大脑中,大脑就会将两张航片视觉融合起来,犹如看电影一样,每一个画面都是静止的,但我们感觉电影是活动的画面。这是通过左右航片的交替出现来实现分像目的的。

目前,数字摄影测量工作站中,常用的是同步闪闭法及偏振光法。

### 4. 像对的立体量测

在地面上进行测量有时要在测求的地形点上竖立人造的清晰标志,便于辨认。观测时借助仪器望远镜内的十字丝去视准该点。在摄影测量中,为求得地形点的空间位置,首先要在一对像片上辨认出地形点的同名像点,这比较困难;用相当于十字丝作用的测标去对准单张像片上没有明显特征的地形点影像,又很难保证准确。因此,摄影测量仪器都要采用像对的立体观察方法,以浮游测标切准视模型点作为量测的手段。

摄影测量仪器中为建立瞄准用的浮游测标,可使用双测标和单测标两种方法。这里提出浮游测标是因为量测空间点位时测标需作三维运动。

单测标法立体量测如图 2-12 所示,当测绘台水平承影面  $Q$  中央的光点测标与某一地面点  $A$  相切时,测标的位置就是测点的空间位置, $Q'$  为录影面初始位置。

双测标法是用两个真实测标放在左右两像片上或左右像点的观察视线的光路中,在立体观察像对时,左右两测标可当作一对同名像点看待,同样可以获得一个视觉的空间虚测标,就用这个虚测标去量测视模型。设像对已定向,满足了人造立体效能的条件,其上有一对同名像点  $a_1$  和  $a_2$ ,如图 2-13 所示,在立体观察下能得到视模型点  $A$ 。现若像片上各有一个真实测标  $M_1$  和  $M_2$ ,在立体观察下得虚测标  $M'$ 。虚测标  $M'$  并未照准模型点  $A$ 。将实测标  $M_1$ 、 $M_2$  在像片上移动,就会看到虚测标在空间运动,当虚测标  $M'$  正好与视模型点  $A$  相重合时,就完成了瞄准工作。这时,实测标  $M_1$  和  $M_2$  就分别落在同名像点  $a_1$  和  $a_2$  上,根据测标  $M_1$  和  $M_2$  在像片上的位置就能辨认出一对像片上的同名像点。两实测标相对于起始位置的运动量可由相应分划尺读出,这就是像点在像片上的坐标值。现在的立体摄影测量仪器多采用双筒光学系统的立体镜作为立体观察系统,所以也都是采用双测标法进行立体量测。双测标法的测标有圆点、圆圈、T 形、斜 T 形和直线等形状。

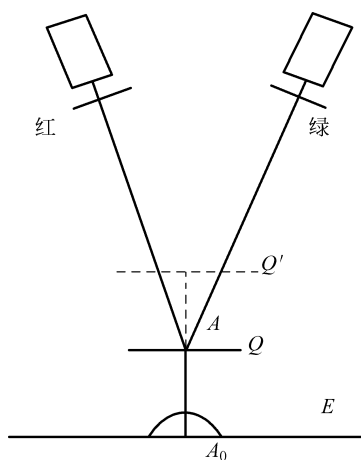


图 2-12 单测标法立体量测

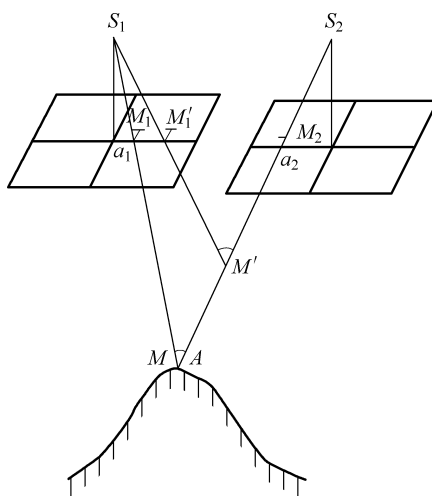


图 2-13 双测标法立体量测

## 2.1.2 像片立体观察与量测实验

### 1. 实验目的与要求

- (1) 了解人造立体视觉的原理。
- (2) 掌握观察人造立体的四个条件。
- (3) 掌握人造立体观察方法,区分立体像对的左片和右片,借助仪器进行立体观察。
- (4) 通过认真操作,清晰观察像片的三种立体视觉(正立体、反立体、零立体)。
- (5) 了解掌握视差杆的构造与使用方法。
- (6) 学会在航片上量测视差。
- (7) 了解数字影像像点量测基本过程。

### 2. 实验内容

- (1) 桥式立体镜观察。
- (2) 反光立体镜观察正立体、反立体、零立体。
- (3) 利用反光立体镜进行简单量测。
- (4) 数字影像像点坐标量测。

### 3. 实验仪器与资料

桥式立体镜、反光立体镜、直尺。

### 4. 实验步骤

#### 1) 桥式立体镜观察

(1) 将像对接方位线定向,使两像片上的相应方位线(本片像主点与邻片像主点相应像点的连线)位于一条直线上。

(2) 沿方位线方向使两像片相对地左右移动,以改变像片之间的距离,使相应视线的交会角与眼的交会角相适应。