边坡比倾向与坡向相反的边坡更容易发生滑坡，边坡中断裂构造的存在对边坡的稳定性往往起控制作用。利用遥感数据可以识别、标绘、分析各种构造成分的存在标志、形态特征、分布规律、组合和交切关系以及地质成因。滑坡中的地质构造分析包括：

1）岩层产状分析和测定：随地层倾角的不同，层状分布的岩层在遥感影像上表现为不同的特征：水平分布的地层（倾角<5°），大体分布在相近的海拔高度上，常表现为沿坡分布的圆形、方形或不规则的封闭形态；垂直分布的地层（倾角>95°）常表现为不同色调的平行、线状或弧状条带，这些条带沿岩层走向延伸，随地形变化而改变，可以穿越沟谷、山系等；倾斜岩层（倾角介于 5°-80°之间）受岩性、构造、地形等因素的控制而表现为不同的图像特征，是最常见的岩层形态，可以通过岩层三角面来确定其方位（陈正宜等，1996）。

岩层三角面是指遥感图像上同一倾斜岩层地表露头线的最高点和与之相邻的两个最低点相连而成的一个假想三角形平面，由于这三点是岩层风化剥蚀出露的实体上的三点，因此该面可以看作是真实的岩层层面。根据三角面的形态可以目估岩层产状，如果有地形图或数字高程模型，可以确定出这三点的坐标和高程，再用三角点的方法可以求解出岩层的走向、倾向和倾角。

2)线性构造遥感解译：线性构造包括了滑坡的各种线性形迹和断裂，这些构造因素的识别有助于滑坡的分析。遥感图像上线性构造能表现出明显的识别特征，主要有：①岩性、地形被错动、切割，地层出现缺失或重复；②构造的线形形迹沿着某一界面中断或突变。③断裂破碎带在图像上显示为断续延伸、宽度变化的条带，如果断裂破碎带富水，图像色调上呈深色，而贫水则呈浅色；④断层地貌，如断层三角面、断层崖、山脊错动；⑤特征水系，如对口河、倒沟状水系、格子状、角状水系的出现；⑥水系变化，水系局部段出现异常，如河流急转弯、河道突然变宽或变窄。

1.2 数字摄影测量学及其在滑坡研究中的应用

数字摄影测量是目前摄影测量的主要发展方向，尤其是全数字摄影测量技术。目前全数字摄影测量的应用主要是数字地面模型提取和遥感映像正射纠正。

1.2.1 数字高程模型

数字地面模型(*Digital Terrain Model，DTM*)是描述地球表面形态多种空间信息分布的有序数值阵列模型（柯正谊等，1993），是利用一个任意坐标场中大量的*(X，Y，Z)*的坐标点描述连续地面特征的数学模型。当数字地面模型表达的信息为地面高程时，即为数字高程模型(*Digital Elevation Model，DEM*)。凡是牵涉到地理空间定位，在研究过程又靠计算机系统支持的问题时，都可以建立数字地形模型，数字滑坡研究中也普遍使用数字高程模型。

生成 *DEM* 的方法按数据获取的来源可分为三类（徐青，2000）：①利用测量方法实测生成：②基于遥感数据源获取。③利用已有地形图，通过数字化仪或扫描数字化方法进行矢量化，经过内插、定位等建立 *DEM*。

利用实测方法可以生成高精度的 *DEM*，但其工作量大，效率较低而费用较

高，一般不在大范围 *DEM* 的生成中使用；地形图是一般地区都具备的基础资料，利用地形图生成数字地面模型是目前普遍使用的方法，其不足之处是 *DEM* 的现势性受到限制，尤其是在人类活动强烈、地表变化较大的地区。

使用数字摄影测量方法，利用遥感数据获取 *DEM* 已成为大面积 *DEM* 生成的主要方法。利用遥感数据获取 *DEM* 的方法可分为两类，一是利用多光谱立体像对提取，二是干涉雷达测量。

（1）立体像对高程数据获取

摄影测量方法获取 *DEM* 数据的基础是影像的视差测量原理。对标准像对（水平像片、成像高度 H 与焦距 f 相同）（图 1-2），其基线是水平的，假定坐标系与左侧像片的摄影站 $S1$ 重合，像对基线与 X 轴重合，Z 轴与经过 $S1$ 的铅垂线重合，像片坐标系表示为 $o_1x_1y_1$ 和 $o_2x_2y_2$，原点为 o_1、o_2，x_1，x_2 轴与基线 B 平行，地面上任意一点 A 的空间坐标表示为 X，Y，Z $(-H)$，在左侧像片上该点的坐标为 x_{a1}，y_{a1}，$z_{a1}(-f)$，在右侧像片上该点的坐标为 x_{a2}，y_{a2}，$z_{a2}(-f)$。

在左侧像片上，由 $\Delta S_1 a_1 a_1' \sim \Delta S_1 AA'$ 和 $\Delta S_1 o_1 a_1' \sim \Delta S_1 o_1 A'$ 得：

$$X = -\frac{Z}{f}x_{a1} = \frac{H}{f}x_{a1},\quad Y = -\frac{Z}{f}y_{a1} = \frac{H}{f}y_{a1}$$

在右侧像片上，由 $\Delta S_2 o_2 a_2' \sim \Delta S_2 o_2 A'$ 得：

$$AO_2' = -\frac{Z}{f}x_{a2} = \frac{H}{f}x_{a2}$$

根据左右像片坐标系与基线之间的关系，有 $A'O_2 = -(B - X)$

因此：

$$-B + X = \frac{H}{f}x_{a2},\ \text{或}\ B = X - \frac{H}{f}x_{a2}$$

把左侧像片得到的 X 值代入，得

$$B = \frac{H}{f}x_{a1} - \frac{H}{f}x_{a2} = \frac{H}{f}(x_{a1} - x_{a2})$$

令 $P_a = x_{a1} - x_{a2}$，称为 A 点的横视差(左右视差)，代入上式得：

$$B = \frac{H}{f}P_a,\quad H = \frac{Bf}{P_a}$$

利用 B、H、f、Pa 之间的关系得

$$X = \frac{H}{f}x_{a1} = \frac{Bf}{P_a}\frac{1}{f}x_{a1} = \frac{B}{P_a}x_{a1}$$

$$Y = \frac{B}{P_s}y_{a1}$$

$$Z = -\frac{B}{P_a}f$$

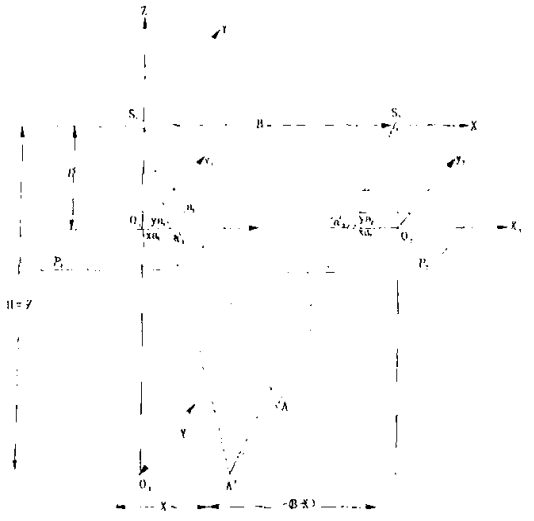


图 1- 2 立体像对测量

在基线 B 和成像焦距 f 为已知的情况下，可以根据上式利用立体像对上的像点坐标求其对应的空间坐标。

对图像上两点 A，B，以上式的 A 点为起点（参考点），另一点 B 相对 A 点的高差为 Δh，如果 A，B 两点的横视差分别为 P_a、P_b，则有

$$H_a = -Z_a = \frac{B}{P_a} f \text{、} H_b = -Z_b = \frac{B}{P_b} f$$

$$\Delta h = H_a - H_b = Bf \frac{P_b - P_a}{P_a P_b}$$

如果 A 点的高程 Ha 已知，则可通过测量左、右视差的值，求图像上其它各点的高程。利用遥感立体像对生成 *DEM*，就是基于这一原理方法，通过对影像进行纠正、配准，用 *GPS* 或其它方法获得已知点高程后，计算图像上其它点的高程，从而生成 *DEM*。

实际 *DEM* 生成过程十分复杂，包括了图像匹配、控制点获取、空中三角形测量、*DEM* 内插、精度评估等过程，现在已有多种图像处理软件实现了利用立体像对的 *DEM* 提取，如 *PCI*（*PCI* 公司）、*VirtuoZo,ImaGIS*(适普公司)、*ENVI*（*RSI* 公司）等。下面以 *PCI* 公司的 *OEAD*（*Ortho Engine Airphoto DEM*）作为软件平台，以二滩库区金龙山滑坡 *DEM* 提取为例说明利用航空立体像对生成 DEM 的过程。

OEAD 是 *PCI* 软件的一个模块，它可以进行大区域多张航片的自动提取，提取的工作流程见图 1- 3。采用三张航片航向重叠立体像对（重叠关系见图 1- 4）作为基本数据源，将其扫描为数字化图像进行 *DEM* 提取。具体过程如下：

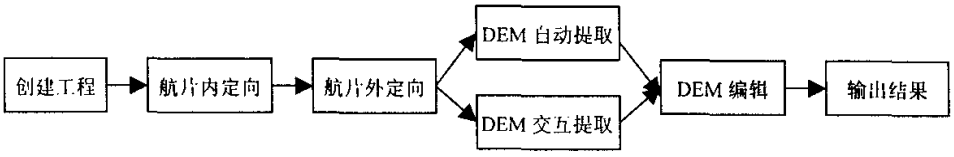


图 1- 3 OEAD 中 DEM 提取流程

1）创建工程，将三张航片导入，并生成多分辨率数据。

2）航片内定向：利用相机参数建立航片底片空间与数字化映像空间的坐标转换关系。航片航摄的相机参数为：*f=152.721mm*，基准点坐标如下（表 1-1）：

表 1-1 航片基准点坐标（单位:*mm*）

编号	4	2	3	1
X(mm)	113.002	-113.002	-0.006	0.003
Y(mm)	-0.001	0.002	112.998	-113.001

三张航片内定向 *RMS* 误差分别为：0.38*pixel*，0.25 *pixel*，0.49 *pixel*。

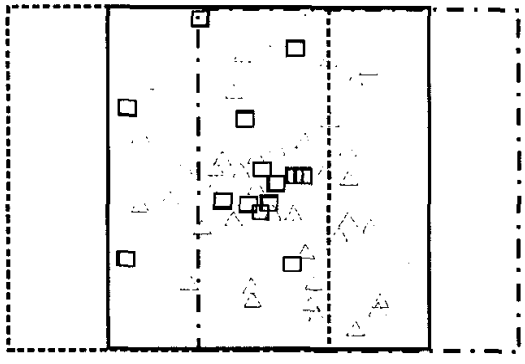


图 1- 4 外定向控制点分布

（方框为大地坐标控制点，三角形为同名点，实线、短划线、点划线分别表示三张航片）

3） 外定向：即三角形测量，完成图像坐标与大地坐标之间的配准。外定向包括：*GPS* 点的输入与调整，同名点匹配，误差检验，三角化四个过程。除了交互方式确定控制点外，*OEAD* 中还提供了控制点自动匹配功能，即根据影像特征在重叠区内自动确定控制点。交互方式和自动方式确定控制点可结合使用，即减少了工作量，又能满足精度。控制点分布见图 1- 4。

航片外定向 *RMS* 误差为：映像:0.641*pixel*，X 方向 0.915*m*，Y 方向 0.569*m*，Z 方向：0.618*m*。

4）*DEM* 提取：在内、外定向的基础上，进行 *DEM* 提取，*DEM* 提取过程是自动的，但进行提取前需要给定必要的参数，包括：①地形生成方式。地形

生成方式是软件在 *DEM* 生成过程中针对不同的地形如平原、高山和盆地等而采取的地形生成算法，有 *Adaptive* 方式（自适应，可以根据图像特征和图像之间的相关性来生成特定的地物）和 *non-Adaptive* 方式（非自适应，根据给定的地形生成参数，要求研究区内地物单一，地物差别不大）两种方式。②*DEM* 提取的范围，在影像重叠区内确定一个范围，生成此范围内地形的 *DEM*。③格点点距的确定，即 *DEM* 模型中最小的空间分辨率。④平滑控制，对生成的地形线进行园滑，采用卷积计算和曲面拟合方法对 DEM 进行平滑；系统提供以下平滑方式：高度平滑（两次 3×3 卷积、一次 5×5 卷积，进行平面拟合）、中等平滑（两次 3×3 卷积、平面拟合）、低级平滑（3×3 卷积、拟合）、无平滑（不进行 DEM 光滑处理）。

对金龙山航片，采用了 Adaptive 方式、低级平滑、DEM 范围为三张航片的重叠部分，点距为 10，提取结果以等高线形式叠合在航片上，见图 1- 5。



图 1- 5 以等高线显示的自动生成的 DEM（等高线间距 20m）

5）*DEM* 交互编辑：云层影响带、阴影带、河流、湖泊等因素会在生成的 *DEM* 中造成异常，需要对模型进行修正、编辑，生成合理的 *DEM*。

（2）干涉雷达测量获取 *DEM*

合成孔径雷达（*SAR*）具有全天时、高灵敏度的特点，在接收信号的同时，还能记录振幅强度和相位信息。单纯一幅 *SAR* 图像，相位信息没有被使用；通过对同一地区两幅 *SAR* 图像相减，得到两幅图像的相对相位（相位干涉图），相对相位包含了地表物体的三维信息，利用两幅图像之间的相位差所产生的干涉条纹，可提取地面高程信息(单建新等，2001)。

如图 1- 6 所示，*A1* 和 *A2* 为成像天线，二者到地物 *B* 的距离为 *r1* 和 *r2*，地物 *B* 距星下点的距离为 *y*，雷达高度为 H，两天线 *A1*、*A2* 之间的基线距为 *d*，

基线倾角为α，信息到达天线 *A2*、*A1* 的延时 t_d 可表示为：

$$t_d = \frac{\Delta r}{C}$$

C 为光速，两点的相位差为

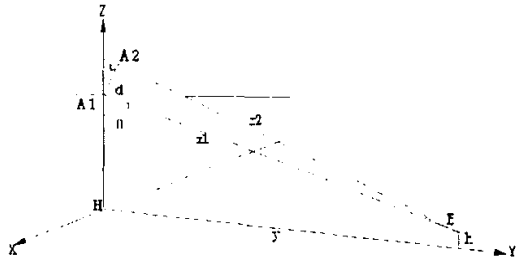


图 1- 6 *INSAR* 几何关系示意图

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) = \frac{4\pi}{\lambda}\left|\sqrt{r_1^2 + d^2 + 2dr_1\cos(\alpha+\theta)} - r_1\right|$$

参数 H，d，r_1 已知，从而得到 h，y

$$h = H - r_1\cos\theta$$

$$y = \sqrt{r_1^2 - (H-h)^2}$$

具体计算时，精确测定延时 t_d，求得相位差 $\Delta\phi$，反算出俯角 θ，进一步求出高程(h)和横向位移(y)，纵向坐标可通过飞行器速度确定，这样即可确定地面目标点的三维空间坐标。

1.2.2 正射影像

正射影像图的制作，传统的方法是利用正射影像仪进行(王之卓，1979)，但这种光学纠正仪器在数学关系上受到很大限制，对数字摄影图像，更无法使用仪器进行纠正，因此需要利用数字摄影测量方法，对图像进行变换，形成正射影像（张祖勋，1996)。具体做法是根据有关参数和 DEM，利用相应的构像方程或一定的数字模型，将影像化分为很多微小的区域逐一进行计算，得到变换的映像，由于这种纠正是对微小区域逐一进行的，因此也称为数字微分纠正。

正射影像的生成过程，就是实现两个二维图像之间的几何变换过程，首先确定原始图像与纠正后图像之间的几何关系，可用函数表示为：

$$x = f_x(X,Y), y = f_y(X,Y)$$

或 $X = \varphi_X(x,y), Y = \varphi_Y(x,y)$