

# 第四篇

## 地质物探



# 第一章 地质物探技术

## 第一节 浅层地震勘探技术

地球物理勘探（简称物探）是利用物理学的基本原理和现代科学技术的新成就来勘查矿产资源，解决地质问题的各种方法的总称。

工程物探指为土木工程服务的物探方法，主要解决岩土工程勘察和供水水文地质勘察中的地质问题。与钻探相比，它具有成本低、工效高的特点，是多、快、好省的地质勘察方法。

工程物探是一门新兴的学科，它的发展史不过几十年。近年来，由于现代物理学、电子学的不断发展，特别是电子计算机技术的大量应用，工程物探得以迅猛发展。大量的数据处理采用了计算机，提高了解释精度，缩短了勘察周期。物探仪器也向小型化、轻便化、数字化和自动化迈开了一大步。

工程物探以浅层地震、声波测定为主，此外还常用电法、磁法、放射性勘探和测井等方法。

浅层地震勘探是研究人工激发的地震波在地壳数百米范围的传播规律，解决浅层地质构造等岩土工程问题的一种物探方法。

浅层地震勘探方法分为反射波法和折射波法，前者记录反射波，后者记录折射波。常用的是至折射波法。反射波法的关键在于如何区分各类重叠到达的地震波。

### 一、地震波与地震地质前提条件

#### （一）地震波的形成

在外力作用下，物体内部质点的位置发生变化（形变），去掉外力作用后，物体能恢复原来形状，这种物体称为完全弹性体，其所产生的形变称为弹性形变。它具有两个基本类型：一是在外力作用下只改变物体体积而不改变物体形状的称为体积形变；另一是在外力作用下只改变物体形状而不改变体积的称为剪切形变。

施冲击力于各向同性均匀无限大弹性体，则在弹性体内一定范围形成随时间而变化的弹性形变，这种弹性形变的连续传递即为弹性波。与体积形变相对应的称为纵波；与

剪切形变相对应的弹性波称为横波。

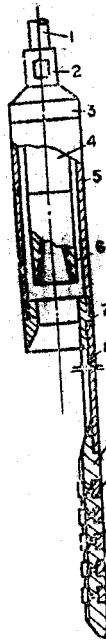


图 6-1-1 钻杆永磁打捞器结构示意图

1- 钻杆；2- 异径接头；3- 导管异径接头；4- 连接管；5- 导管；6- 母锥；  
7- 偏心喇叭接头；8- 丰圆形板；9- 夹具；10- 磁钢；11- 螺钉

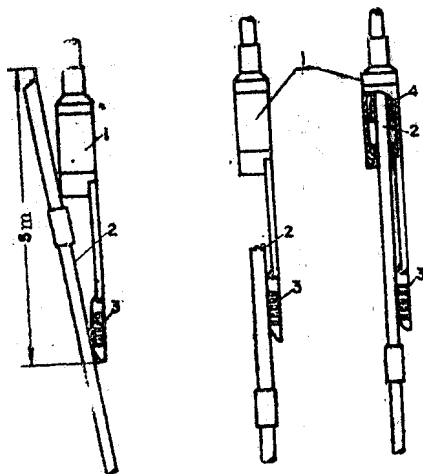


图 6-1-2 打捞钻杆示意图

1- 导管；2- 钻杆；3- 磁钢；4- 母钻

弹性波的形成需要两个基本条件：震源和有传播振动的弹性介质。由于锤击或小药量爆炸作用于介质的冲击力小、作用时间短，因而在浅层地震勘探中将岩石等介质视为完全弹性体加以研究。

## （二）地震波的传播

地震波的传播遵循惠更斯原理、费马原理和斯奈尔定律。

**惠更斯原理** 如图 6-1-3 所示，若已知  $t$  时刻的波前，则该波前面的每一点都可以看作新的震源，并各自发出子波。所有这些子波在介质中以波速  $v$  向各方传播，经过  $\Delta t$  时间间隔，它们的包络面便是  $t + \Delta t$  时刻的波前。

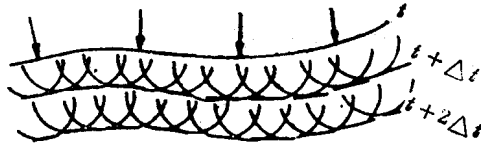


图 6-1-3 根据惠更斯原理绘制新波

**费马原理** 地震波总是沿地震射线传播，以保证波到达时间最少这一准则。

**斯奈尔定律** 概括了几何光学的反射定律和折射定律，表达了地震波的入射角 ( $\alpha$ )、反射角 ( $\beta$ )、折射角 ( $\gamma$ ) 与各自相对应的波速的关系 (图 6-1-4)，其数学表达式为：

$$\frac{\sin \alpha}{V_{\lambda}} = \frac{\sin \beta}{V_{\text{反}}} = \frac{\sin \gamma}{V_{\text{折}}} = \text{常数} \quad (6-1-1)$$

式中  $V_{\lambda}$ 、 $V_{\text{反}}$ ——入射、反射波速 (m/s)；

$V_{\text{折}}$ ——透射至下部介质中的传播速度 (m/s)。

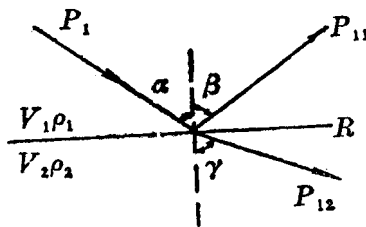


图 6-1-4 入射波、反射波与透射波

## （三）地震波的分类

地震波的分类有以下几种：1. 按其质点运动特征分为体波和面波

体波 弹性波在介质整个体积内传播，以震源为中心向外作球形扩展，波的传播方向与球面的径向一致。

体波分为纵波和横波，横波只能在固体中形成与传播。两者速度比为：

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\mu)}{1-2\mu}} \quad (6-1-2)$$

式中  $V_p$ ——纵波速度 (m/s)；

$V_s$ ——横波速度 (m/s)；

$\mu$ ——泊松比。

横波速度低于纵波，但在离开震源的相同距离，横波振幅高于纵波振幅 3~5 倍。

面波 当弹性介质具有自由表面（与大气层的接触面）时，受力冲击后，除产生体波外，还会在自由表面介质一边产生面波。面波有瑞利波和勒夫波两种类型。

瑞利波存在于地表附近，其质点振动平面垂直于地表面，振动轨迹呈椭圆状，振幅随深度增加而迅速衰减。

勒夫波存在于覆盖在高速岩层之接触面附近的低速表层中，其振动方向与波的传播方向垂直。

2. 按传播的几何途径，分为直达波、折射波和反射波。

由震源直线传播到接收点的波称为直达波。

地震波透过不同弹性介质分界面时，透射波的射线方向将从原来的入射方向偏折。

设地下存在一界面，上部介质波速为  $V_1$ ，下部为  $V_2$ ，则有：

$$\frac{\sin \alpha}{V_1} = \frac{\sin \gamma}{V_2} \quad (6-1-3)$$

如果  $V_2 > V_1$ ，则  $\gamma > \alpha$ 。当  $\alpha$  增大到某一定值时， $\gamma$  将达  $\frac{\pi}{2}$ ，此时的  $\alpha$  称为临界角，用  $\alpha_c$  表示。

$$\alpha_c = \arcsin \frac{V_1}{V_2} \quad (6-1-4)$$

地震波以  $\alpha_c$  角入射到界面后，即形成沿界面滑行的滑行波（如图 6-1-5），该波在下部介质以速度  $V_2$  沿界面滑行过程中，由于界面两侧的介质质点间的弹性联系，从而引起上部质点的振动，形成折射波。其盲区长度为  $X_M$ ，当 t 面水平时

$$X_M = 2H \operatorname{tg} \alpha_c \quad (6-1-5)$$

式中  $H$ ——界面深度 (m)。

地震波以  $\alpha$  角入射到界面，产生界面反射。由于入射波和反射波在同一介质中，两者速度相等，反射角等于入射角。

反射波振幅与其传播距离 ( $\gamma$ ) 成反比，而折射波振幅与  $\gamma^2$  成反比，所以反射波法比折射波法具有更大的勘探深度。

3. 直达波、折射波、反射波时距曲线的相互关系

描述地震波在介质中传播时间与几何路程关系的曲线，称为地震波时距曲线。在单

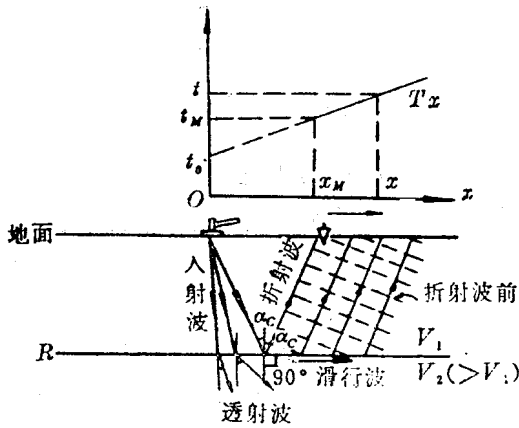


图 6-1-5 地震波的折射

一水平界面时，直达波、折射波、反射波的时距曲线有如下关系（图 6-1-6）：

- （1）震源  $O$  附近，直达波比反射波先到达接收点，而折射波在离震源  $x_M$  内不存在。
- （2）在盲区以外，才是折射波的初至区。
- （3）折射波与反射波在折射波的始点相遇。

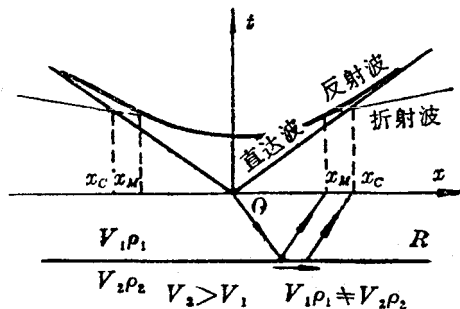


图 6-1-6 直达波、折射波、反射波时距曲线的相互关系

- （4）反射波迟于直达波和折射波到达地面。

#### （四）地震地质前提条件

（1）波速与波阻抗 不同岩石种类、不同地质年代的地层往往其波速、波阻抗不同，它们之间的界面才能构成折射和反射界面。岩石波速主要取决于岩石成份，此外，岩石的孔隙度、湿度、成层深度和地质年代，都有影响。常见岩石波速与波阻抗见表 6-1-1。

表 6-1-1 常见岩石的波速及波阻抗表

岩 石 名 称	波速 ( $V_p$ ) ( $\times 10^2\text{m/s}$ )	波阻抗 ( $\rho \cdot V$ ) ( $10^5\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$ )	岩 石 名 称	波速 ( $V_p$ ) ( $\times 10^2\text{m/s}$ )	波阻抗 ( $\rho \cdot V$ ) ( $10^5\text{kg/s}\cdot\text{m}^2$ )
土 壤	2-8	2-16	石灰岩	32-70	73-196
砂 层	5-18.5	8-35	结晶岩石	45-60	108-204
水	14.3-15.9	14-16	花岗岩	40-60	106-160
粘 土	18-24	27-53	玄武岩	45-80	119-234
页 岩	18-48	42-135	板 岩	36-45	101-126
砂 岩	21-45	45-122	片麻岩	35-75	93-205

(2) 地震地质条件 折射波法必须满足：被探测层位具有波速大于上覆各层介质的波速，有一定厚度，视倾角小于 $\frac{\pi}{2} - \alpha_c$ 的特点。地震勘探的效果还取决于介质的均匀程度、地层形态的复杂程度、可供施测范围的大小及干扰影响程度等因素。

(3) 浅层地震常用于解决：基岩埋深、起伏形状、风化程度与厚度；第四纪松散砂砾石层中的潜水面深度；断层破碎带的宽度和平面位置；滑坡体滑动面的埋深和形态；岩体工程地质分类等。

二、外业工作基本方法

接受任务后，应对测区地质情况、地震地质条件和原有资料作全面了解和分析；对有关岩石标本进行密度测定和波速测定，以了解岩石间弹性差异；选择震源和检波器，确定适宜的观测系统；根据任务要求和地质、地震地质条件布置测网进行施测。

(一) 岩石波速测定

可以用超声波测定仪直接测定波速，也可用高感量的天平进行称量，求得精确密度值。实践证明，沉积岩波速与岩石密度有较好的相关关系。

$$\rho = 1.75 + 0.266 V_p - 0.015 V_p^2 \tag{6-1-6}$$

式中  $\rho$ ——岩石密度 (  $\text{g/cm}^3$  )；  
 $V_p$ ——岩石纵波速度 (  $\text{km/s}$  )

如  $\rho$  处于  $1.9-2.7\text{g/cm}^3$  之间，则相关关系如下式：

$$\rho = 1.899 + 0.174 V_p \tag{6-1-7}$$

(二) 激发条件与震源选择

适宜的激发条件应使激发的地震波能量足以反映深层探测层位，有效地提高信噪



比，使同一点激发的地震记录有良好的重复性。

震源分为锤击和爆炸两种。爆炸震源要进行最佳药量选择试验，要求用最小药量获得最佳激发效果；覆盖层薄、基岩大部分出露、潜水面浅都是锤击震源良好的激发条件。

### （三）接收条件与检波器

选择良好的接收条件，主要考虑检波器的性能和埋置条件、检波器组合、仪器因素等方面。使地震记录有效波突出，并有明显的特征；与各地震界面相对应的有效波层次分明，波间关系清楚；干扰波少且强度弱，易于分辨。

检波器分为垂直灵敏和水平灵敏两种，前者用于接收纵波，后者接收横波。一般选用固有频率  $10 \sim 20\text{Hz}$  的低频检波器（频率低的地震波不易被介质吸收而且有较大的探测深度）。外业工作检波器应正确安置并尽量使安置条件保持一致。

### （四）观测系统的选择

激发地震波的震源点与布置检波器的接收点的相对位置关系称为观测系统。一般根据工作地区地震地质条件、任务要求，结合以往本区或邻区的工作经验对观测系统加以选择。

#### 1. 浅层折射波法的观测系统

（1）相遇排列的观测系统 如图 6-1-7 所示，在测线  $O_1, O_2$ ，两点布置激发， $O_1, O_2$  点间布置接收，分别激发、接收，就构成相遇排列的观测系统。所获得的两条交叉的时距曲线称为相遇时距曲线，它能重复反映同一地震界面，因而能保证资料的可靠性和解释精度。

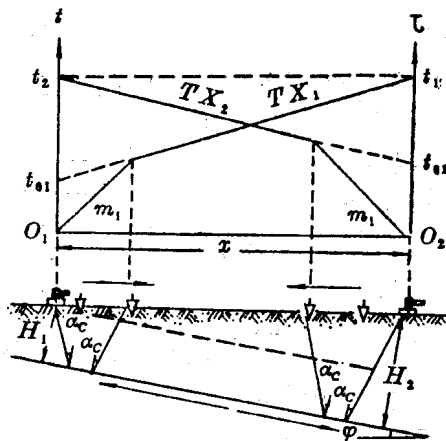


图 6-1-7 相遇排列及其时距曲线特征

（2）追逐排列的观测系统 在相邻点  $O_1, O_2$  布置激发，在  $O_1, O_2$  的同一侧布置接

收，分别锤击接收，就构成追踪排列的观测系统。它除能有效地追踪同一界面外，还能根据追逐时距曲线中折射波干涉带的位置，发现不同岩性的接触带。

### 2. 浅层反射波法的观测系统

浅层反射波法的观测系统有简单连续观测系统和单点接收与激发的观测系统等形式。

## （五）测网布置原则

**路线测量** 初勘阶段了解工作地区概略地质构造轮廓。布置数条横贯全区主构造的长测线，进行连续的地震剖面测量。测点间距为 100 ~ 200m。

**面积测量** 详勘阶段详细了解地质构造形态，为钻探点布置提供资料。测线布置取决于已有资料给出的构造范围、形态和走向。主要测线方向，应尽可能垂直于地层（或构造）走向，并布置在地形起伏较小，表层介质较为均一的地段。尽可能与地质勘探线以及其它物探的测线重合，通过孔拉，以利资料的对比分析。在主要测线之间，适当布置联络测线，以控制成果精度。

## 三、资料的整理与解释

### （一）地震资料的整理

为保证资料解释工作建立在可靠的基础上，要对原始记录进行检查和决定并进行校正。对浅层折射波法的原始记录，要注意识别波的初至，初至缺失段可用续至相位段与之平行的特点予以补足；而对浅层反射波法的原始记录，要根据时距曲线呈双曲线形态和在极小区内曲率随反射时间的增长而变小的规律，对反映不同深度界面的反射波时距曲线加以识别。

绘制时距曲线前，应对观测值进行相位、爆炸深度、低速带和地形校正，以消除实际观测条件与假设条件的差异而引起的偏差。

### （二）浅层折射波法的资料解释

浅层地震勘探的资料解释的理论基础是几何地震学。通常采用作图方法勾绘地震界面，并计算界面深度，倾角、波速等参数。

#### 1. 波速计算

1) 界面速度 当地下为水平折射界面时，可直接用折射波时距曲线斜率的倒数，求得各相应折射界面的波速；对于倾斜界面，必须用相遇时距曲线斜率或由联结点联结的两支时距曲线斜率的平均数的倒数求界面速度。

2) 盖层平均速度 在折射波时距曲线之原点 O 引一条直线到 A 点（界面  $R_1$  和界面  $R_2$  的折射波时距曲线的交点），则线段  $\overline{OA}$  的斜率的倒数为所求平均速度。该法误差较大，只有在覆盖层较薄或覆盖层虽厚但较均匀时才较准确。

## 2. 折射界面的计算与绘制

当折射界面没有剧烈起伏, 界面速度没有显著变化时, 折射界面利用相遇时距曲线采用  $t_0$  法计算; 当界面速度有明显变化时, 采用时间场法计算。不同计算方法求解结果的一致性可作为评价解释可靠性的标志。

折射界面的绘制在综合时距曲线图上进行, 绘制方法有:

- 1) 根据各个测点处同一折射界面的埋深、倾角和偏移距离进行绘制;
- 2) 根据各个测点同一折射界面的不同法向埋深为半径, 各测点为圆心向地下作圆弧, 圆弧的公共切线即为折射界面, 长度限制在最外两切点间;
- 3) 以测点及其相遇时距曲线的交叉迭掩段诸点为圆心, 所得到的同一折射界面的法向埋深为半径作圆弧, 圆弧的同一包络线即为折射界面, 长度限制在最外两切点间。此法常用于不规则形态的折射界面。

## 3. 折射界面的地质解释

目的在于结合钻探和其他地质、物探资料, 确定折射界面与地层分布间的对应关系。折射剖面是法向深度剖面, 与地质剖面不完全等同。通常折射剖面上的界面深度和倾角往往小于地质剖面的相应界面。

## (三) 浅层反射波法的资料解释

### 1. 平均速度计算

地震波垂直岩层层面向传播的总路程与总传播时间的比值称为平均速度 ( $\bar{V}$ )。常用速度测井和时距曲线的解析法确定, 前者较为准确, 有条件时应尽量采用。

### 2. 反射界面的计算与绘制

1)  $t_0$  法 根据反射时距曲线在测点处的时间, 求得界面深度 ( $H$ ), 界面构制以每个测点为圆心, 以  $H$  为半径, 分别在测线下方画出一系列圆弧, 这些圆弧的公共切线即为反射界面。

2) 交汇法 以测点 ( $X_i$ ) 为圆心, 分别以  $S_i (\bar{V}t_i)$  为半径画半圆, 在测线下交汇得一多角形 (如图 6-1-8), 如果给定的平均速度  $\bar{V}$  是精确的, 则多角形将汇于一点  $O^*$ , 做联线  $\bar{O}O^*$  的垂直平分线, 即为  $O$  处对应的反射界面, 倾角、埋深可从图中画得。交汇法对水平或倾斜界面均适用, 其解释精度取决于平均速度是否准确。

3) 图解法 当地下存在倾斜界面时, 从  $O_1, O_2$  两接收点处的时距曲线上确定  $t_{01}$  和  $t_{02}$ , 其差值  $\Delta t = t_{02} - t_{01}$ , 则界面倾角  $\varphi$  可由公式 6-1-8 求得:

$$\varphi = \arcsin \frac{\bar{V} \Delta t}{2L} \quad (6-1-8)$$

式中  $L$ —— $O_1, O_2$  两点间距 (m)

构制界面的作法是: 在各接收点处做垂直于地面的垂线, 按公式 6-1-8 计算  $\varphi$  角, 以各垂线为基准, 沿界面上倾方向量出  $\varphi$  角, 以各接收点为始点,  $\varphi$  为张角,  $\frac{\bar{V}t_0}{2}$  为长度作直线段; 直线段垂线的边线即为较完整的反射界面。

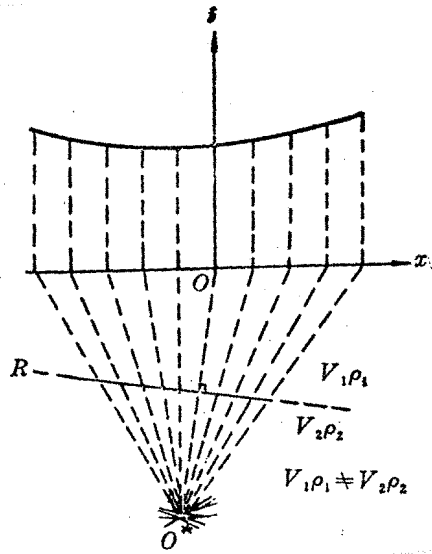


图 6-1-8 交汇法绘制反射界面

3. 反射界面的地质解释

在反射剖面图每个接收点下，用实线画出界面，实线段长度为两相邻接收点之半。对比每一接收点下面的实测段，若能彼此衔接而无错动或交叉者，属同一反射界面。能够连续追踪的长反射界面，称为标志层。在实际工作中，要将标志层与已知地质资料相对比，确定其与地质层位的对应关系，将地震剖面或地质剖面联系起来，才能正确地解决地质构造问题。不能连续追踪的间断的反射界面，可根据地质构造形态，用虚线联结起来代表假设层位。一些孤立的反射界面，亦应保留以供参考。

（四）成果报告

地震勘探报告要求内容全面，重点突出，结论有据，文字简洁，附图和附表齐全。文字报告内容为：概述工区地理位置，任务完成情况；简述与地震工作有关的地形、地貌和地震地质条件；叙述野外工作布置、工作方法依据、工作质量和保证质量的措施；简述资料整理与解释方法、选择参数依据、分析成果并对解释精度予以评价；作出结论，对尚待解决的问题作出进一步开展地质工作和验证的建议。

一般应附下列图表：地震工作布置图和地质成果图表（地震剖面图、地震成果平面图、地震剖面平面图、地震速度异常图、地震剖面成果图）。

第二节 岩体声波探测技术

用声波仪测试由声源激发的弹性波在岩体（岩石）土体的传播情况，借以研究岩

体（岩石）、土的物理性质（主要指力学性质）和构造特征的方法，称为声波探测。

由于声波的频率高，波长短，受岩石的吸收和散射比较严重，因此声波探测对岩体的了解较为细致而探测范围较小，但具有简便、快速、经济、便于重复测试、对测试的岩体（岩石）无破坏作用等优点，已成为岩土工程的例行测试方法。

岩体声波探测分为室内岩样测试、现场岩体测试和声波测井等。

## 一、室内岩样测试

1977 年国际岩石力学学会关于声速测定方法的建议是：岩样横向（垂直于波的传播方向）的尺寸不少于波长的十倍，岩样中脉冲穿过岩石的旅行距离至少为平均粒径的十倍。我国常用的岩样规格有两类： $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$  的正方体或  $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 10\text{cm}$  的长方体、 $\phi 5\text{cm} \times 5\text{cm}$  或  $\phi 5\text{cm} \times 10\text{cm}$  的圆柱体。若当岩样波速  $V = 3000\text{m/s}$  时，所要求的最低频率  $f = \frac{V}{\lambda} = 600\text{kHz}$ ；如果  $V \geq 5000\text{m/s}$ ，则要求  $f \geq 1\text{MHz}$ 。可见只有使用高频声测仪，才能忽略岩样边界对声波的影响并可应用无限介质中的弹性波理论。

用于岩样测试的探头分为纵波和横波探头。使用前，应对探头进行“对零”标定，采用标准度件或空气作标准。

纵波被至识读一般比较容易，如遇初至不清，可利用相位校正，求出初至时间值。横波常叠加于纵波的续至区而不易辨认，可以通过改变发射脉冲宽度减少纵波的续至时间或采用横波探头，提高横波成份加以解决。

采用微机控制进行离散取样和数据处理的声波仪，可以有效地利用声波全息。

## 二、现场岩体测定

测试工作应根据测试目的和要求，合理布置测网，确定装置距离，选择测试参数和工作方法。

声波测定可在隧道、露头、平峒、竖井中进行，测段和测点应根据任务要求布置在有代表性、表面平坦的地段。当用作工程地质分类和评价时，声测孔一般布成“直线”，孔距、孔深视现场岩体情况而定。当进行孔间测试时，孔间距离应根据具体情况和任务要求选定。孔向平行，如不平行应准确测出各孔方位、倾角、孔口距及孔口连线方位、倾角和高差等。当测定洞室围岩松动圈时，测孔应布置在岩性均一、节理（裂隙）不发育的具有代表性的洞室横剖面上，测孔数目视洞径而定，孔距要根据介质情况、仪器性能等条件而定，一般布 5~7 对测孔，每对孔距 0.5~1m，孔深以能反映松动圈状态为准。

声测孔孔径大小要适宜，孔壁要圆滑、顺直，便于换能器顺利移动，并利于注、止水；测孔要清理干净，清除孔口碎石，对于岩石破碎的测孔要采取相应措施，以防掉块卡住换能器。

应对测段、测点进行编号，向提任务单位索取测孔、测段的地质资料以利对比分析。测试时应保证耦合良好；读数时，应选择衰减档，以便振幅适宜，初至点明显易读；如无读数要查明原因，判别是否地质因素引起。测振幅时，应保持测试条件不变，读取同一相对振幅值，并在记录上注明所读相位。波的对比评价应在现场进行，如遇纵波初至不清晰，相位又不可靠或横波特征不明显等情况不宜进行时间测定。对受到干扰的有效波不宜进行振幅测量。

在每个工地，应抽 5% 的测段和测点进行检查测量。对曲线剧变或跳跃剧烈的测点和测段须进行检查测量。

### 三、岩体声波探测的应用

#### （一）力学参数测定

岩体的弹性模量、泊松比、抗压强度等力学参数对于有关的工程围岩稳定性评价和工程的设计和施工都是极其重要的参数。在测得各向均匀介质密度和纵、横波传播速度，可按下式计算：

$$\mu_d = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (6-1-9)$$

$$E_d = \frac{V_s^2 \rho (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (6-1-10)$$

$$G_d = V_s^2 \rho \quad (6-1-11)$$

$$K_d = \rho \left( V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right) \quad (6-1-12)$$

$$\lambda_d = \rho (V_p^2 - 2V_s^2) \quad (6-1-13)$$

式中  $\rho$ ——介质密度 (g/cm<sup>3</sup>)；  
 $V_p$ ——纵波传播速度 (m/s)；  
 $V_s$ ——横波传播速度 (m/s)；  
 $\mu_d$ ——动泊松比；  
 $E_d$ ——动弹性模量 (kPa)；  
 $K_d$ ——动体积模量 (kPa)；  
 $G_d$ ——动剪切模量 (kPa)；  
 $\lambda_d$ ——动拉梅系数 (kPa)。

目前对动静弹模之间的关系在理论研究方面还不够成熟，进行动、静弹模的换算需要对大量资料进行统计，寻求两者的相关函数。

#### （二）岩体的工程地质分类

对岩体进行工程地质分类的力学参数有：纵波速度、弹性模量、抗压强度、岩体完

整性系数和裂隙系数、风化系数、衰减系数等。抗压强度的计算主要依据岩体纵横波速度与室内试验测得的抗压强度进行相关分析，求得相关函数。

1. 完整性系数  $K_w$ 、裂隙系数  $L_s$

$$K_w = \left( \frac{V_{p\text{体}}}{V_{p\text{石}}} \right)^2 \tag{6-1-14}$$

$$L_s = \frac{V_{p\text{石}}^2 - V_{p\text{体}}^2}{V_{p\text{石}}^2} \tag{6-1-15}$$

式中  $V_{p\text{体}}$ ——岩体的纵波速度 (m/s)；  
 $V_{p\text{石}}$ ——同一岩体的完整岩样的纵波速度 (m/s)。

表 6-1-2 岩体完整性分类表

完整性类别	完整性好	完整性较好	完整性差
$K_w$	$> 0.75$	$0.75 \sim 0.45$	$< 0.45$

2. 风化系数  $\beta$

$$\beta = \frac{V_{p\text{新}} - V_{p\text{风}}}{V_{p\text{新}}} \tag{6-1-16}$$

式中  $V_{p\text{新}}$ ——新鲜岩体的纵体的纵波速度 (m/s)；  
 $V_{p\text{风}}$ ——风化岩体的纵波速度 (m/s)。

3. 衰减系数  $\alpha$

$$\alpha = \frac{1}{\Delta x} \ln \frac{A_m}{A_i} \tag{6-1-17}$$

式中  $A_i$ ——固定某增益，参与比较的各测试段的实测振幅值 (mm)；  
 $A_m$ ——参与比较的各测试段中振幅的最大值 (mm)；  
 $\Delta x$ ——发射换能器到接收换能器 (探头) 的距离 (cm)；  
 $\alpha$ ——参与比较的各测试介质的振幅衰减系数 ( $\text{cm}^{-1}$ )。

当  $A_i = A_m$  时， $\alpha = 0$ ，表明该段岩体在参与比较的各测试段中质量最好； $A_i$  越小， $\alpha$  就越大，表明该段岩体质量越差。因此，衰减系数不仅可用作岩体分类，还可用于测定工程爆破引起的周围岩体破裂影响的范围。

影响声学参数的地质因素是很多的，因此在进行岩体分类时，应利用多种声学参数，结合传统的地质分类指标进行综合分析评价。

(三) 围岩应力松弛带的测定

在硐室开挖前，岩体中应力处于平衡状态，开挖后，原始应力平衡被破坏，引起应力的重新分布，导致应力的释放与集中。这种变化随岩体性质、硐室形态、在岩体中的

位置、硐径大小等不同而异。在硐壁应力下降区，岩体破碎裂隙发育，以致波速减小而振幅衰减较快。反之，在应力增高区，波速增大，振幅衰减较慢，因此利用声波速度随孔深的变化曲线就可确定围岩松弛带。应力松弛带的厚度是岩体稳定性评价和支护设计的主要依据。

现场测试时，垂直于硐壁布置若干组测孔，孔深为硐径的 1~2 倍，在一个断面上的测孔应尽可能选择在地质条件相同的地方，以减少资料解释的困难。为保证换能器与岩体耦合良好，边墙测孔可向下倾斜 5~10 度，拱顶处因钻孔向上应采取止水设备。测试可采用单孔检层法（一发二收初至折射波法）或双孔法（逐点同步测试）。测试结果绘成波速随孔深变化的  $V_p - L$  曲线。

### 第三节 电法勘探技术

利用不同岩石之间的电性差异，借观测天然产生的或人工方法建立的电场或电磁场在地面的分布情况，查明地质构造和解决地质问题的方法称为电法勘探。

若就场本身的性质而言，可以将电法勘探分为直流电法和交流电法。

#### 一、直流电法勘探

直流电法分为电阻率法、激发极化法、自然电场法和充电法等。

电阻率法常用于查明第四纪覆盖层厚度、古河道的位置与埋深、岩溶发育及分布情况、构造破碎带位置及产状、含水层埋深及分布、冲（洪）积扇的分布范围等问题。激发极化法用于寻找地下水源，与电阻率法配合应用可有效地圈定含水的古河道、古洪积扇、岩溶及断裂破碎带的分布范围和确定含水层的埋深，评价含水层的开采价值。自然电位法一般用于测定地下水流向，寻找地下水通道，圈定渗漏地段，了解破碎带或岩溶的分布情况，寻找不同岩性的接触线。充电法一般用于单个钻孔或水井中测定地下水流速流向，圈定被低阻物质充填的岩溶或其他低阻体的分布范围和形态。

##### （一）电阻率法

###### 1. 电阻率法的基本原理

表征物质导电性的参数是电阻率，它是当电流流过  $1\text{m}^3$  立方体时，物体所表现的电阻率。物质的导电性越好，其电阻率值就越小，导电率越大。岩（矿）石的电阻率除与其组成成份和结构有关外，还与所含水份、温度等有关。

由岩（矿）石与围岩电性差异而产生的异常场是在正常电流场的背景上反映出来的，人工所建立的正常场的电位  $U$  或电场强度  $E$  由于异常场的叠加使之沿剖面的变化是不均匀的（图 6-1-9），在这种非均匀分布的正常场背景上，不易观察出不均匀体的异常反映，难以判别地下是否有不均匀体存在。因而在电阻率法勘探中通过观测到的



电位或电场强度值，换算出电阻率值，只有在地下岩石均质同向时，实测电阻率值才是岩层的真实电阻率值。当地下有多种电阻率不同的岩体存在时，所测得的电阻率值是地下所有岩体总的作用的结果。我们称这个实测电阻率值为视电阻率。用符号  $\rho_s$  表示其数学表达式为：

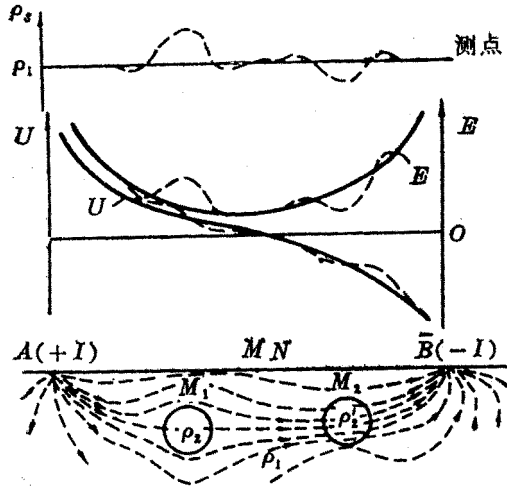


图 6-1-9 在导电性不均匀的岩石和矿体中地下电流场的分布图

$$\rho_s = K \frac{\Delta V_{mn}}{I} \quad (6-1-18)$$

式中  $K$ ——装置系数，与电极排列有关；

$\Delta V_{mn}$ ——测量电极  $M$ 、 $N$  间的电位差 (V)；

$I$ ——供电电流强度 (A)。

如图 6-1-9，当测点远离不均匀体时，由于不受其影响， $\rho_s$  值等于围岩真电阻率值 ( $\rho_1$ )。当测点位于高阻体  $M_1$  上时，由于高阻体的“排斥”作用，使测点处的电流密度增大，因而视电阻率 ( $\rho_s$ ) 大于 ( $\rho_1$ )；而当测点位于低电阻率矿体  $M_2$  上时，由于低阻体的“吸引”作用，使测点处的电流密度减小，因而视电阻率 ( $\rho_s$ ) 小于 ( $\rho_1$ )。因此， $\rho_s$  剖面曲线的变化反映了地下不均匀体的位置和不均匀体电阻率的相对高低。电阻率法就是基于围岩与矿体的电阻率差异而产生的电位变化，在地表采用一定装置型式用精密电位仪观测这种变化。通过推断解释，达到了解地下岩、矿石的分布情况，解决地质问题。

电阻率法根据布置工作方法分为电剖面法和电测深法。

## 2. 电测深法

电测深法是在同一测点上改变供电电极距大小，测出不同勘探深度的  $\rho_s$  值，借以研究同一地点与地下不同深度的岩层的  $\rho_s$  变化，从而了解该处地下岩层，主要是水平

或倾角不大（小于  $20^\circ$ ）的岩层没铅垂方向的分布情况。

按照野外工作时电极排列方式不同，电测深法分为称四极电测深、三极电测深、偶极电测深和环形电测深等，其中对称四极电深是最常用的方法。

对称四极电测深法可用测量电极距与供电电极距的比值为常数（一般为  $\frac{\overline{MN}}{\overline{AB}} = \frac{1}{3} \sim$

$\frac{1}{10}$ ，当  $\frac{\overline{MN}}{\overline{AB}} = \frac{1}{3}$  时，称温奈尔装置）的方式施测，也可用比值为变数（施卢姆贝格尔装置）的方式施测。

应用电测深的有利条件是：有一定延伸规模且层位稳定的电性标志层；地电层次不多；相邻电性层间有明显的电性差异；水平方向电性稳定，电性层和地层基本一致；地层倾角小于  $20^\circ$ ；各层厚度相对于埋深不太小；地形较平坦；有一定数量的电阻率参数资料（钻孔资料、测井资料）。

### 3. 电剖面法

电剖面法是探测地下同一深度内导电性有差异的地质体沿着剖面方向的分布情况的方法。在电剖面法工作中，一般采用不变的电极距并使整个装置沿着剖面方向移动（中间梯度法除外），逐点观测  $\Delta V_{mn}$  和  $I_{AB}$ ，求出视电阻率  $\rho_s$  值。由于电极距固定不变，勘探深度就基本不变，因而  $\rho_s$  剖面图可以把地下某一深度以上不同电阻率的地质体沿剖面方向的分布情况反映出来。对称四极剖面法、复合对称四极剖面法一般用于解决基底岩层的起伏形态以及圈定古河床位置、岩溶分布范围等。中间梯度法一般用于寻找或追索陡立索陡立的高阻岩层、岩脉，寻找与追索岩层接触线。联合剖面法和偶极剖面法一般用于寻找或追索陡立的低阻岩层、岩脉、破碎带、岩溶，详细追索岩层的接触面，并定性地推断它们的产状。

应用电剖面的有利条件是：被探测的地质体与围岩的电性有显著差异，电阻率稳定或有一定变化规律；地质体有一定的宽度和延伸长度；接触界面倾角大于  $30^\circ$ ；覆盖层薄，地形平坦或是二度地形。

在研究岩（矿）石中的稳定电场时，可以观测到测量电极间的电位差随时间而变化，一般在几分钟内趋于某一稳定值；在断开供电电流后，测量电极之间的电位差在最初一瞬间下降到一定数值后，便随时间相对缓慢地下降，并也在几分钟后接近于零（见图 6-1-10）。这种在充电和放电过程中产生随时间缓慢变化的附加电场的现象，称为激发极化效应，它是岩（矿）石及其所含水溶液在外电流场激发下产生电化学极化的结果。

由于介质的激发极化效应的建立有一个过程，在刚接通电路 AB 瞬间，MN 极间的电位差仅与地下介质的导电性有关，这时地下电场相当于电阻率法中研究的稳定电流场，称为一次场；供电继续到一定时间后，所测得的电位差既包括一次场的电位差，也包括由地下介质激发极化特性而产生的附加电场（二次场）的电位差。

在二次场与电流线成线性关系的条件上，可以引入一个新的参数——极化率来表征介质的激发极化特征。

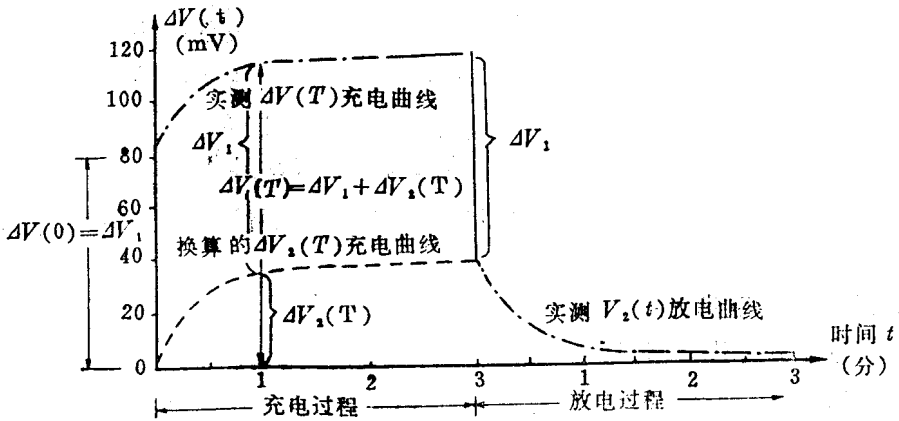


图 6-1-10 矿化岩石标本的充、放电特征

$$\eta(T, t) = \frac{\Delta U_2(t)}{\Delta U(T)} \times 100\% \quad (6-1-19)$$

式中  $\Delta U(T)$  ——用稳定电流向岩(±)体极化介质供电一段时间  $T$ , 断电后测得的总场电位差 (mv);

$\Delta U_2(t)$  ——断电后  $t$  时刻测得的二次场电位差 (mv)。

一般将极化率  $\eta$  定为长时间供电 ( $T \rightarrow \infty$ ) 和无延时 ( $t \rightarrow 0$ ) 的  $\eta(T, t)$  值。介质极化率与组成介质的成份、各成份的体积百分含量、体积百分含水量、孔隙水浓度、导体颗粒度及致密度等因素有关。

当地下岩石的极化率为均匀各向同性时, 所测得的极化率为均匀大地的真极化率。当地下极化率不均匀时, 所测得极化率, 一般说不等于某一地质体的真极化率, 而是整个极化率不均匀的地质体的综合反映、称为视极化率。以  $\eta_s$  表示:

$$\eta_s = \frac{\Delta U C_2}{\Delta U} \times 100\% \quad (6-1-20)$$

视极化率和真极化率一样都是无量纲的, 用百分数表示。

激发极化法除引入视极化率外, 还引入视激电率  $G_s$ , 表达式为:

$$G_s = K \cdot \frac{\Delta U_2}{I} \quad (6-1-21)$$

式中  $K$  ——装置系数。

激电率是综合参数, 它既与研究对象的极化率  $\eta$  有关, 也与电阻率  $\rho$  有关。

综上所述, 激发极化法就是根据导电矿体在人工电场的激发下产生激发极化效应来达到解决地质问题的目的。

激发极化法的电极排列装置与电阻率法相同, 不同的电极装置解决不同的地质问题, 为了获得尽可能大的二次场电位差, 一般采用  $\frac{MN}{AB}$  等于  $\frac{1}{3}$  的温奈尔对称四极装置。

应用激发极化法找水的有利条件是，在固与液相界面上有明显的离子交换的电化学反应和电动效应，没有游散电流的干扰，表层有良好的接地条件。

(二) 自然电场法

自然电场法是通过测定地下岩、矿石由于然的电化学反应而产生的自然电场，研究自然电场在地表的分布规律而达到解决地质问题的目的。

自然电场法有氧化还原电场及过滤电场等，如图 6-1-11 为位于潜水面的黄铁矿体产生的氧化——还原电场，图 6-1-12 为裂隙渗透电场。应用自然电场法的有利条件是：地下水位埋深不大，不同岩性间有较大的接触电位差，电极接地条件良好，地形起伏不大，无游散电流干扰。由于该法无需供电，因而经济效果良好。

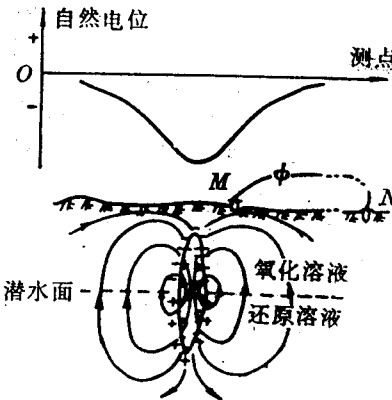


图 6-1-11 黄铁矿体产生的自然电位

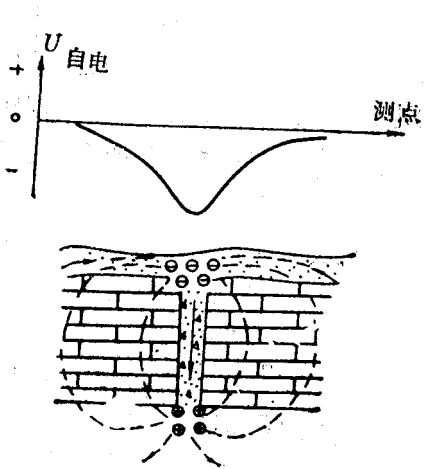


图 6-1-12 裂隙渗漏电场

### (三) 充电法

充电法是将一供电电极接于良导地质体上，另一极在足够远处接地，使该极产生的电场对观测电场产生的影响甚小。根据地面观测的电场分布规律，即可得到良导性的地质体的形状，大小和位置。

应用充电法的有利条件是：含水层埋藏深度不深，含水层次不多，金属管道在地下水位以上，地下水流较大，水的矿化度较低，覆盖层的电阻率均匀，有良好的接地条件，没有游散电流干扰，地形较平缓以及岩溶孔洞充填物的电阻率远低于围岩的电阻率，延伸长度大于埋深。

### (四) 野外工作的布置原则

#### 1. 测区范围

包括按任务书要求的勘测范围和部分估计不存在被探测地质体的地段，以便使被探测地质体的异常情况完整地衬托出来。属于追索性的工作，应使测区范围包括一部分地质情况比较清楚的地段，以利资料对比。当在已做过电法或其它物探成果的基础上布置更大比例尺的工程物探时，应充分利用以往的资料决定测区范围。

#### 2. 测线方向

测线方向应尽量垂直于被测对象的走向，并尽可能避免地形地物等干扰因素的影响。当探测对象有不同走向时，主要的测线可垂直于总的平均走向，对不同走向地段，再布置不同方向的辅助测线。

#### 3. 测网密度

它是由被探测对象范围的大小、埋深、电性断面的变化规律和任务的要求决定的。当寻找某些地质体或构造时，应保证所要发现的最小的地质体在平面图上至少有两个相邻电测探点能有清楚的反映。探测覆盖厚度时，相邻电测探点的最小距离一般不小于主要探测对象埋深的一半。当探测埋藏较深的对象时，有必要更详细地探测其浅部对象（可按上述原则在较大电极距的电测网内，用小极距电测深加密）。

面积性电测深工作，常用的比例尺和测网见表 6-1-3。

表 6-1-3 常用比例尺与测网表

比 例 尺	测线间距 ( km )	沿测线点距 ( km )	点数 / km <sup>2</sup>
1:50000	0.5 ~ 2	0.5 ~ 1	0.5 ~ 4
1:25000	0.25 ~ 1	0.25 ~ 0.5	2 ~ 16
1:10000	0.1 ~ 0.4	0.1 ~ 0.2	12.5 ~ 100
1:5000	0.05 ~ 0.2	0.05 ~ 0.1	50 ~ 400
1:2000	0.02 ~ 0.08	0.02 ~ 0.04	300 ~ 2500

电测剖面测网密度，至少应有 2~3 条剖面通过异常地段，其中每一条剖面上至少有 3~5 个测点能表现出该地的异常，剖面线间距不得小于探测对象的埋深，且使按比例尺绘制的图件上剖面线间距为 1~4cm，点距为 0.25~1cm。

## 4. 极距选择

(1) 电测深的供电电极距系列，应绘于双对数坐标纸（模数一般为 62.5mm），各电极距沿坐标轴较均匀地分布，相邻电极距比值应在 1.2~1.8 之间。当地电断面较简单时，可用较大比值，当地电断面较复杂时，应采用较小值。电测深的最小供电电极距，以获得第一电性层的电阻率为原则，一般为  $\overline{AB}/2 = 1.5m$ 。若表层厚度较大、电性均一，则起始电极距可取得大一些。电测深的最大供电电极距，一般应符合下列要求：

①当底部电性标志层电阻率为“无限大”时，应使在电测深曲线后枝成 45°上升的渐近线上不少于三个读数点；

②当底部电性标志层的电阻率为有限值时，应使在电测深曲线后枝反映标志层的上升或下降曲线的“拐点”后不少于三个读数点，测量电极距  $\overline{MN}$  不得大于供电电极距  $\overline{AB}$  的  $\frac{1}{3}$ ，不得小于供电电极距  $\sim \overline{AB}$  的  $\frac{1}{30}$ 。

三极电测深的无穷远供电电极 C，应尽可能位于 MN 的中垂线上，当 OC 方向偏离 MN 中垂线  $\pm 5^\circ$  以内时，应使  $OC \geq 5$  倍最大供电电极距 OA 或 OB，当受客观条件限制，不能使 C 极位于 MN 中垂线时，则应使 OC 距离随 OC 方向与 MN 中垂线方向偏差角度的增大而增大，使 C 极产生的影响在所测得的视电阻率中产生的误差不大于 2%。

(2) 电剖面法 电剖面极距的选择，应符合下列要求：

①当探测对象埋深较大时，从电电极距  $\overline{AB}$  或偶极距  $\overline{OO'}$  也应较大；

②当探测对象的大小和埋深相同时，对其中覆盖层电阻率较低的，所用供电电极距  $\overline{AB}$  或偶极距  $\overline{OO'}$  也应较大。

③当探测对象大小及埋深变化较大，或需了解不同深度的情况时，则应选择两个以上的极距。其电极距的比值应大于 2；

④当表层电性不均匀且影响严重时， $\overline{MN}$  不能太小，但也不应大于  $\frac{\overline{AB}}{3}$ ，一般取  $\left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{10}\right) \overline{AB}$ ；

⑤  $\frac{\overline{AB}}{3}$ ，不得小于  $\frac{\overline{AB}}{30}$ 。

选择复合对称四极剖面法（AA' MN B'B）极距的要求与对称四极剖面法相同。极距  $\overline{A'B'}$  探测的是浅部的地质现象，极距  $\overline{AB}$  探测的是深部地质现象。

选择联合剖面法（AMN  $\infty$  MNB）的极距，应考虑以下要求：

①探测垂直陡立地质体时，应使  $\overline{OA}$  大于其埋深的三倍；

②当需要分辨两个以上相邻地质体时， $\overline{OA}$ 应小于两个地质体间距的一半。当覆盖较厚无法按此要求实现时，以 $\overline{OA}$ 稍大于间距的二倍为宜；

③MN 应不大于 $\frac{1}{3}\overline{OA}$ ，应不小于 $\frac{1}{30}\overline{OA}$ 。

### 5. 自然电场法的工作布置

初勘阶段至少有一条测线穿过矿体所产生的异常，而且在异常范围内应有不少于 3 ~ 5 测点。详勘阶段必须有 3 ~ 5 条测线穿过异常，在每条测线上的异常范围内，应至少有 5 ~ 10 个测点。测量方式分为电位法和电位梯度法。电位法：测量相对某一固定点的电位的方法。固定点应选在通行方便，地形平坦，接地条件良好的正常场内。梯度法：测量相邻两个测点间电位梯度的方法。电位法是自然电场法的基本方法，只有在电位法实施有困难时（如游散电流影响或剖面长、点距大）或某种特殊要求（研究地下水流向、金属管道的腐蚀等）才采用梯度法进行观测。测量电极须使用不极化电极。

### 6. 充电法的工作布置

（1）测定地下水流向流速 将供电电极 A 放到井下含水层位置，B 极放到距井口足够远（一般为 A 极到井口距离的 20 ~ 50 倍）的任意方向上，N 极大致在地下水上游方向固定，距井口距离与 A 极到井口距离相等，供电后地下水充电，地下水周围岩层中就分布着电场。这时，以井口为中心呈放射状移动 M 极测量相同电位的各点，连成等电位线，大致为圆形，然后向井下注入食盐水，再测量等电位线，则等电位线在水流方向发生改变，由原来的圆形变成椭圆形。等电位线的移动方向即为地下水流向，中心点移动的速度为地下水流速的一半。

具体作法是：通过井口中心先测两条互相垂直的电位剖面，经过两个电位曲线的极大值位置，各自作垂直于剖面的直线，其交点就是充电点在地面的投影 O。以 O 为中心，在地面布置夹角为 45°（或 30°）的八（或十二）条幅射线为测线，打上木桩，编上测线号。

测点电极 N 固定在经过钻孔且与估计水流方向一致的测线上游某点，另一测量电极 M 在其他各测线移动，寻找等电位点。投盐须装入麻布袋，用绳子和供电电极联为一体，井中盐袋要始终保持有未溶化的食盐。投盐前，先测定一个起始等位圈，投盐后，在交短时间内测定一个等位圈。若两者相对位置变化较大（流速大），则测定以后几个等位圈的时间要短；反之，则长，每一井孔所测所效等位圈应小于 3 ~ 4 个，投盐时间、每个等位点的测完时间及等位点与 O 的距离，应正确记录。

（2）探测低阻地质体形态 测线布置以低阻地质体为中心，在地面上布置多条平等测线，要求至少有两叙述测线通过它的顶部，且每条测线上有 30 ~ 5 个异常点的反映。供电电极 A 与低阻体接触必须良好。供电电极 B 要求远离 A 的距离为低阻体埋深或延伸长度的 10 倍。野外观测可用电位法或梯度法观测。在电位的极大点，极小点或梯度的零点，极大点以及曲线上的突变点、可疑点、转折点都应重复观测。

### 7. 保证质量的措施

(1) 观测前须进行漏电检查, 确认无漏电现象后方可进行观测, 否则, 应予以排除。

(2) 电测深每隔 3~5 个极距, 电剖面、充电法、自然电场法每隔 3~5 个点距, 改变电流强度(自然电场法除外)进行重复观测, 凡极距大于 200 米均需进行重复观测共差公式:

$$\delta = \frac{\rho_s - \rho'_s}{\frac{\rho_s + \rho'_s}{2}} \quad (6-1-22)$$

(3) 电测深曲线若出现下列情形必须重复观测:

- ① 曲线异常点;
- ② 曲线接头开口超过 5mm, 接口交叉或喇叭口, 读数不稳定;
- ③ 二次电位差  $\Delta V_2$  小于 1 毫伏;
- ④ 在观测读数的前后发现有明显干扰;
- ⑤  $J_s$  值大于或这于  $\eta_s$  值,  $D$  值大于接近于 100%;
- ⑥ 在  $\eta_s$ 、 $J_s$  或  $S_B$  测深曲线上有重要意义的异常曲线段出现锯齿状, 经检查观测、读数无差, 应在这一极距前后加密极距进行观测。

单个单测深点的精度须满足;  $\delta_{\rho s} \leq 4\%$ ;  $\delta_{\eta s} \leq 7\%$ ;  $\delta_{J s} \leq 10\%$ ;  $\delta_{D s} \leq 10\%$

(4) 进行系统检查观测是指对于基本观测所进行的全区性精度系统检查, 使用参加过基本观测的同一台仪器, 由工程技术负责人指派专人担任观测者, 应尽量避免检查当日观测的测线和测点。工作量占工程总工作量的 5~10%, 但电测深点不得少于 3 个, 其经方法不得少于 30 个物理点。检查观测的位置应均匀地分布在全工程物探点并着重对下列情况进行检查:

- ① 畸变较多的曲线或线段;
- ② 主要异常段和曲线变化较大的点;
- ③ 观测困难和可疑地段;
- ④ 对解释或物探效果有重要意义的地段。

采用均方相对误差来衡量观测精度:

$$\delta = \pm \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n \delta_t^2}{2n}} \quad (6-1-23)$$

$$\delta = \frac{\rho_s - \rho'_s}{\frac{\rho_s + \rho'_s}{2}} \times 100\% \quad (6-1-24)$$

式中  $n$ ——参加计算点的总数;

系统观测检测结果, 某工区检测点的平均均方相对误差  $s < \pm 5\%$ , 可认为合乎精度要求。

### (五) 内业解释与成果报告

野外原始资料须经检查和验收, 凡不合乎质量要求的外业资料应予作废。



解释前须对资料进行整理，偏制定性与定量解释图件。应考虑下列因素的影响并加以校正：

- (1) 岩石导电性不均匀的影响；
- (2) 地形起伏的影响；
- (3) 岩层非各向同性的影响；
- (4) 覆盖层的影响。

电法勘探的解释，必须广泛收集和利用工区原有的地质、物探资料。与地质、钻探等方法密切配合，取长补短、互相验证。资料的解释推断应遵循由已知到未知，先易后难，从点到面，在反复对比分析中，研究解决各种矛盾，正确区分“真”与“假”异常，直到得出尽可能正确的地质结论。

电法勘探的解释分为一解释和定量解释。定性解释的任务是确定电性参数，解释异常由什么地质因素引起的，并给出初步地质解释及有关地质形态的概念。定量解释则要取得测区内地层的厚度，地质体、地质构造的产状等定量关系。

在勘察解释中应注重定性分析，力求做到资料反映的各个方面能够互相验证，有条件时，尽量考虑定量解释的精度。对于定量要求较高的地方，要布置必要的钻孔进行验证，校正原有解释，进而较为准确地掌握整个工程区域的构造形态。

### 1. 电测深资料解释

#### (1) 电参数的确定原则

- ①用电测井资料和井旁、十字、环形测深曲线确定的电阻率。
  - ②利用电测点近旁的其它资料（未做测井的钻孔，竖井及地震勘探）确定厚度与埋深后，可推断电阻率；
  - ③当以露头电测资料确定参数时，应注意露头的风化、裂隙和含水情况等物理条件与深部的情况不一致而造成的电性差别；
  - ④只有当电测曲线的中段等值原理作用范围很窄时，才可以根据电测深曲线解释直接确定中间层电阻率。
  - ⑤在电性层参数有变化时，应在测区内不同地段上分别测定，尽可能绘制电参数平面图。在定量解释时，按电参数变化规律选取。
- (2) 应十分重视曲线形状的对比，结合其他各种定性图件的特征研究，作出每个电测深曲线类型、电性断面的结构、测区的电性标志层和电阻率参数的变化规律等结论。
- (3) 在对比分析电测深曲线和研究各种定性图件时，应当注意同一电性层的电参数在不同地段上变化的可能性，正确区分电断面类型的变化和几何参数的变化。
- (4) 分析电测深曲线产生畸变的原因，了解电测深曲线畸变极距地段的地形及地质条件，分析各相邻电测深曲线畸变的极距的规律。有时会因研究这些畸变而解决有意义的地质问题（如岩层接触线、断层等）
- (5) 需定量解释的电测深曲线应符合下列要求：
- ①曲线完整，电性标志层在足够多的电极距上有所反映；
  - ②主要电性层在曲线上分层明显；

③曲线无严重畸变或对畸变部位校正后，不影响解释精度。

在取得了基本的地质定性概念原电参数后，才能进行定量解释。

(6) 常用的定量解释方法有量板法、辅助量板法、切线法、一次微分法、平均电阻率法、典型孔旁测深曲线对比法、电算法等。在有条件用量板法进行定量解释时，应尽可能使用量板法及以量板法为基础的其他方法。同一地区、同一曲线类型的电测深点应进行多种解释方法的比较。当因曲线比较复杂等原因，不能或不宜用量板法进行解释时，可以使用各种简化（经验）解释方法，但必须有足够的资料证明所采用的解释方法能够满足任务的要求，所获得的定量资料的详细程度和精确度不低于当时当地具体条件下可能采用的其他解释方法。要注意各种解释方法的应用条件，不应盲目地搬用。

### 2. 电剖面的资料解释

(1) 电剖面的解释工作须全面分析曲线的所有特征点、研究异常各部位与电极距、电极位置的关系，采用对此类推或模拟试验的方法进行解释。对异常带的推断，必须在各剖面曲线上有相似的特征，且合乎一般的地质规律。

(2) 正确分辨有用和干扰异常是做好电剖面解释的重要一步。必须熟悉各种典型地形及地质引起的畸变特征。

(3) 信息论算法可以压制干扰，突出有效异常。采用计算机处理，是目前常用的计算方法之一。

### 3. 激发极化法的资料解释

(1) 激发极化法的找水解释中，一般取已知地下水位以上或干孔测得的激电参数作为背景值，异常幅度大于背景值三倍，并连续在两个以上极距出现，才能看作异常。

(2) 由于引伸的电性参数  $\rho_s$ 、 $\eta_s$ 、 $J$ 、 $D$  除与地层电阻率、岩矿成份和地下水的离子浓度有关外，还受地形条件、地质体形态和测点相对于地质体位置的影响。金属管道、金属及炭化岩层对激电参数的影响也不可忽视。故在分析解释资料时，应考虑各种干扰因素。

(3) 激发极化找水的解释工作应先分析已有水文地质资料地段的曲线特征，异常幅度，研究其异常与地下水的关系，合理解决其中矛盾，然后用推理方法，结合电阻率法的解释结果，作出对未知地段地下水埋藏情况的推断。对于适用于某一地区激电解释中的一些经验总结，不能生搬硬套地用于别的地区。

4. 成果报告 应在全面深入地掌握实际材料的基础上，充分研究资料的特点和规律，作出有分析、有根据的推断和结论，并提出合理建议。

对于工作量较小的单项任务，用少量图纸能说明问题时，只须写一个简要的成果报告。成果报告可参照以下提纲进行编写：

(1) 序言——简述工区地位置，任务完成情况；

(2) 工区的地形、地质及地球物理特征——简述与电法工作有关的地质及地球物理特征；

(3) 工作方法及其质量评价——叙述工作方法与技术措施及其理由，简要说明测网布置原则，观测质量及其评价；

(4) 资料解释推断——较详细地叙述电参数的测定及其典型曲线的分析, 探测地区地电断面的特征及其变化规律, 参数选取的原则及解释推断方法和依据, 分析提交成果图件并说明其精度。

(5) 结论和建议——简述电法成果结论和发现地质问题的新线索以及探明地质问题的程度和精度, 对今后进一步开展地质工作提出建议。

(6) 附图(根据任务书的需要而定)——电法工作布置图, 各种电法成果图, 各种解释结论表。

## 二、交流电法勘探

交流电法不如直流电法应用得普遍。但由于具有能测多种参数, 分辨力强, 解释精度较高, 一般不受高阻屏蔽层及岩层各向异性的影响等优点, 近年来发展很快。下面简要介绍用于工程勘察的几种交流电法勘察方法。

### (一) 频率测深法

频率测深法是用改变交变电磁场的频率(几十 Hz 到几十 kHz)来控制探测深度, 找出岩层电阻率随深度的变化情况, 借以判释地层分布及地质构造。由于岩石的感应作用, 交变电磁场在地下的分布情况随频率而变化。频率低, 向地下穿透深, 就能反映深部的地质情况, 频率增高, 穿透变浅, 就能反映浅部的地质情况。因此, 改变电磁场的频率就可以反映出不同深度的地质情况。频率测深可用来查找岩溶、断层、裂隙及不同岩层界面等。

### (二) 交流激发极化法

交流激发极化法是研究地质体在外加交变电磁场的作用下产生的极化效应的一种方法。它包括变频法、磁激发极化法和感应激发极化法。变频法是用两种频率的交流电依次建立电场, 其频率一般低于 10Hz, 并分别测定每次的总和场电位差。其野外工作与直流电阻率法相似, 电极排列可采用中间梯度、三极排列和偶极排列等。

### (三) 甚低频电磁法

利用工作频率为 15kHz ~ 35kHz 的海军通讯电台的电磁波作为一次场场源, 当地下有导体时, 受到感应产生感应电流, 感应电流又产生一交变电磁场传到地面, 称为二次场。在地面观测二次场或一次场与二次场叠加后形成的总场强度、方向和空间分布规律, 就可以解决某些地质问题。此法常用于浅层含水断裂破碎带、金属管道、地下电缆等良导电性物体的探测。

### (四) 地质雷达

地质雷达沿用对空雷达的原理, 发射机以脉冲形式发射电磁波, 一部分沿着空气和

介质（如岩石）的分界面传播，经过时间  $t_0$  到达接收天线。为接收机所接收，称为直达波；另一部份传入介质中，在介质中若遇电性不同的另一介质体（如其他岩层、洞穴等），就发生反射和折射，经  $t_s$  时间后反射回到接收天线，为接收机所接收的波称为回波，直达波比回波的行程短、速度快，根据接收到的两种波及其传播时间，从而判断地质体的存在并估算其埋深。

## （五）钻孔电磁波法

### 1. 基本原理

钻孔电磁波法的基本原理是以岩石电性不同而对电磁波的吸收具有差异为基础的。发射器发射的电磁波穿过导电性不均匀的介质时，介质对电磁波能量的吸收决定于介质的导电性。导电性愈好，吸收愈强。当发射器与接收器之间有良好的金属矿体存在时，由于矿体比围岩对电磁波吸收的能力强，因此透过矿体的电磁波能量相对于透过围岩的就要弱一些。通过接收器可以测得电磁波的低能量带，从而确定金属矿体的位置和范围。

在岩土工程勘察中，电磁波法已较广泛地应用于岩溶探测，其装置及工作布置如图 6-1-13 所示。

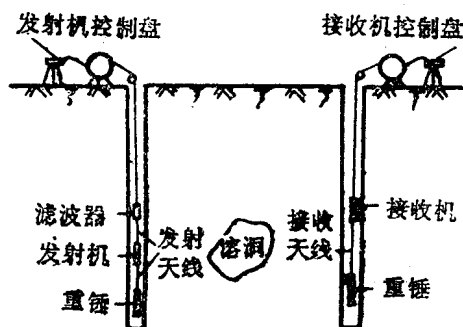


图 6-1-13 电磁波透视仪工作布置

### 2. 工作方法及要求

（1）工作频率的选择一般通过试验决定。在井距较小，介质吸收较小和目的体截面小的情况下，应尽量选择较高频率，以提高目的体的分辨率。

（2）天线距的选择：对于为了解剖面电性所进行的单孔测量，一般选用小天线距、天线长度也应缩短，以使抑制直达波；对于为了解钻孔周围的目的体，则需要选用较大的天线距，以扩大探测范围。

（3）测量方式的选择：对于高阻剖面，常采取双孔测量和单孔测量同时进行，以便资料的互相补充。双孔测量常常是先进行同步测量，以便较快发现异常，然后在异常中心深度，进行定点测量，以了解异常形态特征，最后在异常段增加其它测量方式（如斜同步）。

(4) 进行电磁波透视的钻孔须满足以下要求：

①孔径大小适宜，尽量使用同径钻进，孔壁要圆滑、顺直，便于井下设备顺利移动；

②测孔要清理干净，清除孔口碎石，对于岩石破碎的测孔要采取相应的措施，以防卡住井下设备；

③对透孔孔间距须经物探方法试验后确定。

(5) 进行同步测量的双孔间距较大时，须使用通讯设备。

(6) 由于钻孔电磁波法采用多种装置型式进行测量，一般情况不进行重复观测，但对于某一装置所测曲线与其他装置所测曲线有较大出入，必须逐段或整个装置形式重新进行观测。

### 3. 内业解释

(1) 异常划分 从观测曲线上划分异常，必须首先考虑构成异常的量的标准随地质条件的改变，这个限度可能不同。异常一般以场强急剧变化处（拐点）来划分界线，也可以用半幅值来划分，视具体情况并参照其他形式的曲线而定。

异常划分过程应参照钻探成果资料进行分析，在裂隙发育带，岩石破碎带应重点分析。

(2) 资料整理 交会法是将发射源看作点源，被测介质为均匀无限介质，忽略电磁波绕射现象而认作呈直线传播。先将观测数据绘制成沿钻孔深度变化的曲线，将同一剖面上不同观测方式的曲线用不同符号标到同一图内。根据曲线判断异常位置，找到各种装置型式的共同阴影区，对阴影区进行分析和判断，结合地质资料得出合理的推断解释。

(3) 地下电磁波法需提供如下资料：

①物探工作布置图、电波透视曲线图、推断地电断面图。

②文字报告：简述工区有关的地质构造及物性特征，简述工作方法技术、工作完成情况，推断地质方法和地质结论。

## 第四节 测井技术

在供水水文地质及岩土工程勘察中，为了进一步研究钻进剖面中岩性的变化情况、含水层的性质和解决其他地质问题。广泛地应用着地球物理测井方法。

目前常用的方法有：电测井、电视测井、井径（井斜）测井、放射性和弹性波测井。

### 一、电测井

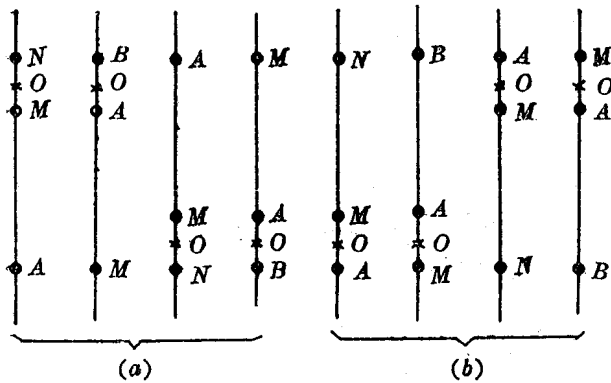
电测井包括研究岩层电阻率测井及派生的电流法测井、研究井液电阻率变化的水文

测井和研究岩层电化学活动性的自然电位测井。

(一) 视电阻率测井

视电阻率测井的原理和地面电法中的电剖面相同，所测得的是视电阻率  $\rho_s$  随井中测点位置的改变而发生的变化。通常将一个供电电极 A 和两个测量电极 M、N（或 A、B 和 M）降入井中，另一电极 B（或 N）埋于井口附近，在通电建立电场后，保持三个电极间的距离不变，使它们逐渐上升，即可由地面电位计连续记录  $\rho_s$ ，得到一条  $\rho_s$  曲线。实测视电阻率除与电极系周围各介质的电阻率（如岩层电阻率、围岩电阻率、井液电阻率）以及这些介质的分布有关外，也与所使用的电极系排列有关，可以认为，视电阻率是电极系探测范围内各介质电阻率的某一加权平均值。

连接在同一电路（供电或测量）中的两个电极叫做成对电极。成对电极间距比任一成对电极至不成对电极的距离要小的多的电极系称为梯度电极系，如图 6-1-14 所示，其探测半径大约为 1.5~2 倍电极距（ $\overline{AO}$ ）。成对电极间距大大超过中间电极至不成对电极距离的电极系称为电位电极系，其探测半径大约为 3~5 倍电极距（ $\overline{AM}$ ）。其记录点为最近距离的相邻电极的中点。



(a) 梯度电极系；(b) 电位电极系；(x) 记录点

图 6-1-14 电极系排列

视电阻率测井可采用直流和交流供电。交流供电能有效地压制干扰，突出有用异常。

(二) 自然电位测井

在井内以及井周。由于岩石的电化学作用，发生着一系列产生电动势的物理—化学过程，这种现象称为自然极化。它引起沿岩层及井身流动的自然电流，造成沿井身的电位降。将不极化电极 M 沿井身移动，地面用电位计测量 M 极相对于地面不极化电极 N

之间的电位差，就可得到沿井身变化的自然电位曲线。

产生井内自然电位的原因有：电极电位、氧化—还原电位、扩散吸附电动势、过滤电动势。

### （三）激发极化测井

目前常采用地面激发电位仪再配测井电缆、电极系、绞车和井口滑轮等辅助设备以点测方式进行，可以同时获得两个参数——视电阻率和视极化率。其电极系排列同电阻率测井相同。此法可用于划分钻孔地质剖面。确定目的层深度和厚度，完善地质剖面编制和取样分析，还可获得地层的电阻率和极化率的近似值，为地面物探资料解释提供依据。

### （四）工作方法及要求

（1）为保证测井资料的质量和完整，要求测井前钻孔泥浆循环时间不少于 1 小时，使井中各处井液均匀；进行微电极系测井的泥将护壁尽量薄；进行水文测井的钻孔必须用清水冲洗，使井壁孔隙畅通；钻井实际深度应能使井下仪器的记录点达到最深目的层以下 3 ~ 5m。

（2）电极系的选择必须根据不同测区的地质及物性特点，经多次试验确定。应使测区大部分岩层尤其是目的层具有较高分辨力，并使实测视电阻率和视极化率接近岩层的真电阻率和真极化率。

（3）测井曲线深度比例尺一般和钻井柱状图一致，以便于对比分析，同一测区比例尺应尽量一致。横向比例尺要根据地质、物性资料或试验曲线确定。为保证曲线幅度变化明显，横向比例尺应尽可能选大一些（但必须保证大部分曲线不超格）。为了保证水文测井质量。每井需进行大小比例尺的测井工作，大比例尺用于解释，小比例尺用于成图。

（4）下井电流必须在换向器转动时准确测定，并在测井过程中始终保持不变。对定量解释的测井曲线，测井时需用电阻测定电流强度。视电阻率、井液电阻率曲线测井，下井电流变化应不超过  $\pm 5\%$ ；井温曲线测量，下井电流变化应不超过  $\pm 0.25\%$ 。

（5）对电缆提升速度的要求见表 6-1-4。

表 6-1-4 全自动测井仪限速表

深 度 比 例 尺	限 速 (m/h)
1:200	2000
1:50	500
1:20	200

(6) 所有测井资料必须在井场作出初步定性解释。对岩芯采取率低的井段、与钻探结果有矛盾的井段,以及可疑异常段的曲线应进行补充工作量。

(7) 视电阻率、自然电位测井基本测量曲线和检查测量曲线形状应一致,幅值相对误差全自动测井不应超过  $\pm 5\%$ ,对幅度小于 1cm 的低阻段,幅度误差不应超过 1mm。自然电位曲线相对误差应小  $\pm 10\%$ 。

(8) 对于在套管中测量视电阻曲线不等于零、在岩层处曲线出现零值或负值、相邻两深度记号间的误差大于 2% 和连续漏掉两个记号或首末记号、目的层和主要标志层曲线超格、曲线相对幅度误差大于  $\pm 5\%$ 、自然电位曲线由于极化不稳引起基线偏移在记录上每 100m 超过 2cm 或曲线上没有正负号或由于人为因素或漏电影响造成曲线有剧烈的锯齿状或过度平缓以至不能进行地质剖面划分等情况,须重新进行测井。

### (五) 内业解释与成果报告

解释工作应根据测井资料和曲线分层特征,结合地质、钻探取芯、水文等有关资料,确定目的层的深度和厚度,从而编制测井柱状图。解释工作不仅对目的层要详细研究,而且应对每个异常作出分析(包括反常现象造成的特殊异常)。解释步骤应由已知未知,由明显到微弱,由定性到定量。同一测区应有统一的、确定的解释原则。当测井解释与地质有矛盾时,应仔细检查各方面的资料,包括曲线和数据、地质资料、岩芯鉴定等。

测井柱状图和钻井柱状图并在一起构制测井曲线解释图,主要参数曲线取芯结果应紧靠柱状图绘制。

测井成果报告包括

(1) 概况:简述工区地理位置、任务完成情况;

(2) 地质及地球物理特征。

(3) 测井工作方法:简述工作计划。说明测井方法的应用和技术条件的选择,各种方法在本区的反映规律和应用效果,进行质量评价。

(4) 资料整理和解释:叙述解释方法、步骤和精度,资料综合研究程度及其效果。

(5) 结论:简述任务完成程度,指出存在问题,并提出建议。根据任务书要求,若需单个或几个钻井的测井资料,可只提供成果图件和简要的文字说明。

## 二、电视测井

电视测井是摄影技术用于解决地质问题的一种方法。孔内摄像机将孔壁情况由一块 45°平面反射镜片反射到照像镜头,聚焦透射到摄像管的光靶面上,便产生图像视频讯号,经电缆传送至图像监视器而显示电视图像。当孔内摄像机作 360°的往复转动时,可完成对孔壁四周的探测。

电视测井常用于确定钻井中岩层、节理、裂隙、断层、破碎带、软弱夹层的位置和产状要素,检查混凝土浇注质量及基岩面结合情况,检查套管和滤水管的安装情况。凡



孔径大于 100mm，深度较浅的钻孔均可使用电视测井，但浑水或是孔壁不净（如被粘性土或岩粉所粘贴）会造成观察困难，应事先进行处理。

### （一）外业工作方法

主机下井前，应进行地面调试工作，确认全套设备工作正常后，旋紧密封盖，认真检查各部分防水措施，方可下井。观测中如发现裂隙、断层、夹层、破碎带等地质现象时，应将主机提升速度放慢或停止，反复扳动“顺逆”扳键，进行 360°回转观测，再扳动“远近”扳键，使图象清晰，作好记录并注明深度，必要时应在荧光屏上照像。

作电视测井的记录观测应以地质人员为主，物探人员负责仪器操作并协助测量裂隙、断层、夹层等结构面的产状要素。

### （二）内业资料整理

#### 1. 像片整理

电视测井所拍底片要求及时冲洗，显影适度，冲好底片要求影象清晰并按拍摄张数对照记录按深度分别编号。由于影像是通过反光镜成象的，所以印像必须反印，像片要求反差合适、清晰美观。孔壁照片要剪切准确、光滑，整齐清洁地贴于专用像纸上。

#### 2. 图像解释

岩石颗粒度及形状可直接从屏幕上观察到，其大小从屏幕上量得后除以图像放大倍数，水平裂隙在屏幕上为一水平线，垂直裂隙为两条不对称的垂直线（通过钻孔中心的垂直裂隙为两条对称的垂直线），两条垂直线方位夹角的平分线所指的方位角减  $\frac{\pi}{2}$  即为裂隙走向，倾斜裂隙在屏幕上呈波浪曲线，曲线最低点对应罗盘指针方位角为倾向，转动孔内摄像机到屏幕出现倾斜的直线时，该直线与水平线的夹角为倾角。裂隙宽度即在屏幕上所量得的数除以放大倍数。裂隙充填物为泥质时，屏幕呈灰色，铁锰质时呈灰黑色。春它孔、洞、不同岩石互层等情况均可在屏上直接观察到。

#### 3. 按任务书要求编写简要工作总结。

## 三、声波测井

利用声波在钻孔岩石中传播的各种规律来研究钻井剖面的一种井中物探方法称为声波测井。它能有效地确定井内各岩层完整性系数，进行岩体工程地质分类，在示固结地层可用于确定孔隙度，地层的声速参数还可以为地面地震勘探的资料解释提供依据。

### （一）声速测井

用于声速测井的井下设备有单发双收式和双发四收式等装置，如图 6-1-15 所示的单发双收式由超声波发射器 T 和接收器  $R_1$ 、 $R_2$  组成，T 与地面脉冲讯号源相连， $R_1$  和  $R_2$  与记录装置相连。由 T 发射的声脉冲经泥浆传到井壁，由于声波在泥浆中的速度

$V_1$  小于井壁岩层的速度  $V_2$ ，因而当声波以临界角方向射至井壁时，沿井壁滑行并通过泥浆产生折射波为接收器  $R_1$  和  $R_2$  所接收（ $R_1$ 、 $R_2$  须位于盲区之外）。令声波到达  $R_1$  和  $R_2$  两接收器的时间为  $t_1$  和  $t_2$ ，则有：

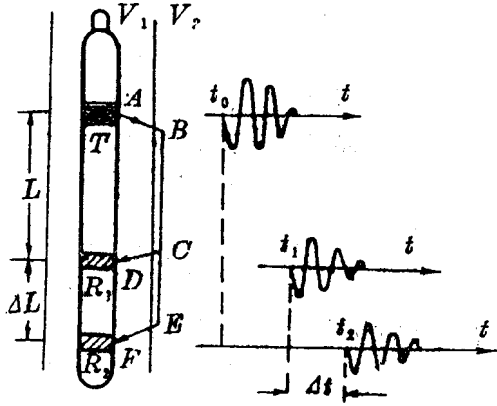


图 6-1-15 单发双收声波测井原理图

$$t_1 = \frac{AB}{V_1} + \frac{BC}{V_2} + \frac{CD}{V_1} \tag{6-1-25}$$

$$t_2 = \frac{AB}{V_1} + \frac{BE}{V_2} + \frac{EF}{V_1} \tag{6-1-26}$$

在井径保持不变和下井设备居中时， $CD = EF$ ， $\Delta L = DF = BE - BC$ ，则有：

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{BE - BC}{V_2} = \frac{\Delta L}{V_2} \tag{6-1-27}$$

用这种测量方法记录的是时差  $\Delta t$ ，记录点为  $R_1$  和  $R_2$  的中点，所测得的为连续时差曲线。若  $\Delta L$  以为米为单位， $\Delta t$  以微秒为单位，则有：

$$V_2 = \frac{\Delta L}{\Delta t} \times 10^6 \text{ (m/s)} \tag{6-1-28}$$

双发四收式由于采用上、下激发，可以消除井径变化、井下设备倾斜等带来的误差。

岩层的波速主要受密度控制，密度越大，声波速度越大。而对于成份相同的岩石，密度又是孔隙度的函数，因此可以根据声波测井的资料求出岩石的孔隙度。在岩石成份和孔隙中液体性质为已知时，时差与孔隙度成线性关系。实际应用时，根据实验数据确定相关系数后，可由实测时差，求出孔隙度。

不同岩层具有不同声速，结合地质资料，声测曲线可用于划分岩性，进行地层对比。此外，声速测井具有不受井眼大小和孔内泥浆矿化度的影响的优点，可获得良好的标志层。

## （二）声幅测井

声幅测井是测量声波振幅，根据衰减特性研究岩石结构及孔隙中液体性质关系的方法。所记录的是初至折射波的波峰幅度，以毫伏为单位。由于在裂隙、破碎带和孔隙地层中声波衰减强烈，因此可以利用声幅曲线的低值异常来确定含水裂隙带、破碎带，解决某些工程地质问题。

## （三）超声电视测井

超声电视测井是向井壁发射窄束超声脉冲，接收井壁反射回来的声波，将它的强度（幅度）转换成示波器的辉光亮度显示于屏幕，借以观察井壁的变化情况。常用于确定裂隙、洞穴和鉴别岩性、确定地层倾角等方面，其优点是可在泥浆及浑水中使用。

## 第二章 遥感技术在地质勘察测绘中的应用

### 第一节 多波段卫星像片的应用

遥感是动用运载工具（卫星、飞机）和传感仪器，离地表一定距离对地物目标的电磁能（光、热、无线电波）进行检测的方法。

航空摄影是利用电磁波谱中的可见光部分进行成像（现代技术已扩大到红外、微波、紫外波）。影像上的信息有几何信息（点、线、面、体……）和物理信息（色调、色彩、温度……）两种。不同性质的地质体辐射不同波长、不同频率的电磁波，通过遥感仪器测定它们辐射电磁波特性上的差别，从影像上的几何和物理信息，直接辨认出地质体的性质，或通过影像上的地貌、水系、植被土层等特征，间接解译出地质体的性质。在地质测绘中应用的有航空像片（可见光波段）、卫星像片（多波段）和红外像片（红外波段）等，其中航空像片的应用是基本的。

卫星扫描片，航空像片等，通过室内工作和少量野外地面调绘（实测剖面及部分地质调查等工作），解译并绘制成各类地质图，可提高图幅质量，加快测绘工作进度，成为填图的重要辅助手段。

#### 一、卫片的一般知识

陆地资源卫星（ERTS）像片（以下简称卫片），是为探测地球资源目的服务的。这些信息是在 905~918km 高空上收集。基本比例尺有 1:336.9 万和 1:100 万两种，应用过程中放大为 1:50 万、1:25 万或 1:20 万，通常用于与其相对应比例尺图件的资料对比。

1. 卫片的光谱段不同光谱段的像片或影像，反映地面不同物体（包括地质体）的电磁波性质，最常用的有 MSS 影像四个波段。

MSS<sub>4</sub>: 波长 0.5~0.6 $\mu\text{m}$ ，属可见光波谱中的蓝绿光波段，这个波段的像片上，能反映深度 10~20m，甚至达 100m 的水体下地形、地质状况。

MSS<sub>5</sub>: 波长 0.6~0.7 $\mu\text{m}$ ；属可见光波谱中的黄红光波段，像片上对陆地的地貌反映明显，根据地貌特征的差别，可划分地层，岩性和构造。不同地质体的色调差别反映也很明显，并可清楚地反映出几十米深度的海底地貌。

MSS<sub>6</sub>: 波长 0.7~0.8 $\mu\text{m}$ ，属可见光中的红光与红外光波段：这个波段的像片上，干

燥的石灰岩地层和充水的断层反映明显，水体为黑色。浅层地下水丰富的地段，土壤湿度大的地段，具有较深的色调，干燥地区则具有较浅的色调。

MSS<sub>7</sub>: 波长为  $0.8 \sim 1.1 \mu\text{m}$ ，属近红外波段，水体对红外波段具有强烈的吸收能力，比在 MSS<sub>6</sub> 上的更加深黑。富水地层、充水断层、平原新发生的凹陷具有较深的色调，透水干旱地区，隆起区具有较浅色调，对于第四纪松散沉积物类型，新、老洪积扇时代的划分，不同时期的沉积物类型，在像片上常有一定的反映。

一般情况下，研究地层岩性、构造用 MSS<sub>5</sub> 和 MSS<sub>7</sub> 像片；研究浅海地质和海岸地貌，采用 MSS<sub>4</sub> 和 MSS<sub>5</sub> 像片；研究平原区的隐伏构造，采用 MSS<sub>6</sub> 和 MSS<sub>7</sub> 像片。

2. 陆地卫星多波段扫描粗制像片的注记符号 卫片上的注记符号，一种是原片上就有的，一种是卫片进口后，国内有关单位翻印时加的。原片上的注记符号，以北京市幅为例说明如下：

(1) 像幅四角的重迭号“十” 当用不同波段同步成像的透明正胶片进行假彩色合成时，其投影的重迭号“十”要完全重迭，才能制出假彩色合成片。

(2) 像幅上下左右四边外侧的经纬度标记 上下两边线外侧上的经纬度是横注的，左右两边线外侧则是竖注的，如像幅上边线外侧左端“1E115—00”，最前面的“1”是连接标记，“1”所靠近图像的端点，是东经 115 度 00 分经线的通过点；再看像幅下端边线外侧自左向右的第二项注记“1E115—00”，靠近像幅最前面“1”的端点，也是东经 115 度 00 分经线的通过点，用直尺连接上下两个连接标记（各靠近图像的端点）连线，就是像幅上东经 115 度 00 分的经线位置。

(3) 灰级（或叫灰阶、灰度、灰标）标记 它标在像幅下边线的下方，自古向左，由黑到白分为 15 个等级（编号 0、1、2、...、14），分别表示该物体上吸收太阳光能量的程度，全部吸收为最黑色 0 级，太阳光接近全部被反射为最白 14 级。目视解译所能区分的灰级为黑、灰黑、深灰、灰、浅灰、灰白和白 7 个级（即 0、1、2、...、6 级）；灰级过少，表示像片质量差，不能使用。

(4) 像幅下方一行自左至右的文字注记，分别为：最左面“21NOV73”，表示该图像成像时间是 73 年 11 月 21 日。十二个月份分别用月份英文名词的前三个字母拼音。标记 CN40—12/E115—42，表示该像幅中心 C 点（卫星遥感仪器光轴几何延长线与地球表面的交点，在像幅上是四角重迭号“+”点，对角两连线的交点）的经纬度是北纬 40 度 12 分，东经 115 度 42 分。标记 NN40—10/E115—49，表示像垂点 N（卫星传感器摄像中心在地球表面的垂直投影点）的经纬度是北纬 40 度 10 分，东经 115 度 49 分。C 点与 N 点的经纬度数值，一般不完全相同，误差过大的产品作为废品，不向外供应。标记 MSS<sub>5</sub> 表示扫描成像的波段是第 5 波段。有的像片单写“M”，代表 MSS。标记 R 表示该像幅是由卫星上的宽频高密度磁带贮存后放出来的图像（数据）。标记 SUNEL26AZ115。表示卫星成像时的太阳高度角（EL）和方位角（AZ），成像时太阳光以 26 的高度角、115 度的方位角照射到地面。太阳高度角是太阳光线与地面的夹角。太阳方位角是以正北按顺时针方向计算太阳所在方位的角度数。就地质构造解译来说，太阳高度角 25~35 度为宜，更大的角度对岩性解译有利。标记 191—6768—G，表示该像

幅的卫星前进方位角从正北起算是 191 度, 成像时陆地卫星已绕地球运行了 6768 圈, G 为记录图像信息的美国加利福尼亚的戈尔顿地面接收站代号 (A、N 则分别为苏尔班斯克和哥达德空间飞行中心两地面接收站代号)。标记 1-N-D-1L 或 1-A-P-2H, 第一个字符“1”表示像幅是满幅尺寸, 第二个字符“N”或“A”, 表示经过正常处理或非正常处理, 第三个字符“D”或“P”, 表示像幅中心 C 点经纬度是按天文时历, 或是按卫星轨道运行速度推算的时历, 第四个字符“1”或“2”, 表示卫星是按线性方式发放资料, 或是按压缩式发放的资料, 第五个字符“L”或“H”, 表示光谱带是低增益, 或是高增益, 增益是指卫星 MSS 各通道中各光谱带电压放大倍数 A 的对数值, 计量单位是分贝 (db)。标记 NASA, 为美国国家航空和宇宙航行局的代号。标记 ERTS-E-1 (或 2); ERTS 是地球资源技术卫星的代号, E-1 编号指第 1 号。标记 486-02280 指图像幅成像时间, 从陆地卫星发射日起的第 486 天, 英国格林威治世界标准时间 2 点 28 分 0 秒 (前两位数为“小时”, 中间两位数指“分”, 最后一位数指“秒”, 每 10 秒钟为一个计秒单位)。标记-5 表示卫星记录 MSS 的波段是 5 波段; 若是一 4、一 6、一 7, 则分别表示 4、6、7 波段。标记 01 表示再次使用的视频 (电视图象的频率) 次数。

在陆地卫星 2 号的像片上, 图像左侧的顶端和下方还有符号“—”, 右侧的顶端和下方有符号“T”, 叫做纵向重迭号, 它是纵向相邻像幅镶嵌成图的接合线, 每幅图像的纵向重迭面积是 10%。

## 二、卫片的地质解译方法

卫片的地质解译方法主要有三种: 电子光学解译、电子计算机解译和目视解译。

### (一) 电子光学解译

#### 1. 假彩色影像增强法

在假彩色像片上, 地物呈现的颜色是人为给定的颜色, 并不是自然色彩。它是把两个或三个波段的软片通过配有特定的红、绿、蓝色滤光片, 经光学系统投影到一个屏幕上, 使它们正确地重迭在一起, 形成假彩色影像。根据研究需要, 任意变换假彩色的颜色, 突出某些目标, 以利于对影像的识别。

#### 2. 假彩色密度分割法

卫片上各目标物的光谱特性, 都是由灰级的密度来表示的。通过光电转换, 以不同的颜色表示出不同影像的密度等级, 得到等密度假彩色影像, 利用影像的灰级密度微小变化, 识别地物。

### (二) 电子计算机解译

它是通过仪器将卫片的光信息转化成为用不同数字表示的电压值 (即电信息), 经过电子计算机的运算, 自动识别地物标志和作出分类。

(三) 目视解译

它是目前采用的最基本的方法，解译时，先看清卫片的注记符号，卫片的波段和扫描日期。卫片的视域面积大，目视解译时按先整体、后局部，先已知、后未知，先远看、后近看，先断裂、后褶皱，先侵入岩体、再沉积岩、后变质岩，先山区、后平原的步骤进行。通过对图幅上断裂和岩体的方向性、等距性和延续性分析，找出整体之间的联系，作出影像的合理地质解译。

三、卫片的应用

卫片的优点：能充分反映区域性的地质构造特征，增大视野范围，局部在全局之中，一目了然，如果合成假彩色像片，可突出地质目标，提高地质解释精度。

卫片的局限性：MSS 传感器的地面分辨力不高，每个像元点代表实地面积  $57\text{m} \times 79\text{m}$ ，难于详细区分岩性或地层界线。在北纬  $60^\circ$  与南纬  $60^\circ$  之间的广大地区，卫片的横向重迭率只有  $14 \sim 15\%$ ，难以作立体像的观察。MSS 传感器所用的电磁波 ( $0.5 \sim 1.1\mu\text{m}$ ) 没有穿透云层的能力，长期有云雾的地区，不能获得理想的像片，加上卫片的多次翻拍，影像的信息量已有不少损失，造成地面分辨率的降低。

第二节 航空像片的应用

航摄像片（以下简称航片）是飞机在离开地面  $30\text{km}$  高空中，借助仪器（如照相机）对地面进行航空摄影，先得到负片，再经晒印而成。也有用光学—机械扫描成像（如卫星多谱扫描成像）的可见光片，像片的比例尺与底片一致，比例尺为  $1:8000 \sim 1:50000$  的航片，适合在地质测绘中使用，规格有  $180 \times 180 (\text{mm})^2$ 、 $230 \times 230 (\text{mm})^2$  和  $300 \times 300 (\text{mm})^2$ 。解译用的航片必须满足航摄质量要求，影像清晰，即曝光适度、反差正常、无药物污染及变色等。

收集航片时，可按表 6-2-1 估算张数。

航片经检查验收后，按图幅进行编录。编录内容：在每张航片的背后按航带及其顺序号进行编号，并把每张航片的主点（根据框标），标绘在 1 份地形图上，按航带装袋。

表 6-2-1 航片规格与地面有效面积关系表

像片 比例尺	每张像片的地面有效面积 ( $\text{km}^2$ )		像片的张数/ $\text{km}^2$	
	$180 \times 180 (\text{mm})^2$	$230 \times 230 (\text{mm})^2$	$180 \times 180 (\text{mm})^2$	$230 \times 230 (\text{mm})^2$
1:5 万	22.68	37.03	45	27
1:3 万	8.16	13.22	123	76

像片 比例尺	每张像片的地面有效面积 ( km <sup>2</sup> )		像片的张数 /km <sup>2</sup>	
	180 × 180 ( mm ) <sup>2</sup>	230 × 230 ( mm ) <sup>2</sup>	180 × 180 ( mm ) <sup>2</sup>	230 × 230 ( mm ) <sup>2</sup>
1 : 2 万	3.63	5.92	276	169
1 : 1.5 万	2.04	3.33	490	301
1 : 1 万	0.91	1.48	1103	676

如果解译区面积较大，像片张数多，要同时收集像片索引图。如果要制作像片略图（镶嵌图），则应另收集半数（单号或双号）航片，这些航片将被切割，不能从像对中抽出来用。制作小面积的影像地质略图，可将选定的几张航片放大，但放大的倍数不宜超过四倍。

一、航片的一般知识

地质解译大量采用的航片有全色片（或称黑白片），黑白片只记录亮度信息；彩色片记录各种颜色的深浅和鲜艳程度，彩色片的信息量比黑白片多。某些物质的亮度可能是一样的，但色彩却不同的，黑白片不能区分的东西，彩色片则能区别开来，但彩色片的成本比黑色高 4 ~ 7 倍。彩色片和黑白片都是中心投影，都可以从像对看到立体影像。

红外片：红外照相和可见光照相的方法相同，摄得的像片反映物体反射的近红外波段的太阳辐射能。它分为黑白红外片和彩色红外片两种，黑白红外片所摄波长从 0.7 ~ 1.36μm，色调所代表的意义与可见光像片不同。水对红外线有强烈的吸收能力，通常呈黑色调，植物则反射红外线的能力强，色调一般较浅，在阴影特征上也与可见光片有显著的不同。彩色红外片（或称假彩色片）所记录的与目标的自然颜色不同，绿光感光呈兰色，红光呈绿色、红外光呈红色，因此在像片上植物的叶绿素为红色，岩石呈阴暗的兰灰色。

航片的注记：航片的左下角圆圈为水准器，一圈为一度。气泡在圆的正中心时，像片就是“水平像片”，右下角由上往下的注记为负片号码；F 为摄影机的焦距（mm）；NO 表示摄影机的出厂号码；时表则记录摄像时间；还有摄影机的类型。框标在四条边的中间，有的则在四个角上，用以确定像片的中心（像主点）。像幅中间的方框线叫做压平线，是为检查摄影时的底片是否平整，不平时压平线为曲线。

航摄图件的种类

- 1. 镶嵌复照图：按航向和旁向重迭，将未经纠正的航片排列起来，经复照缩小晒印而成的复制品。从复照图上可寻找所需的工作区航片。
- 2. 像片略图和像片平面图：像片略图是利用未经纠正的航片，把重迭部分切开，然后依切割线镶嵌而成。像片平面图是经过纠正仪纠正，由比例尺一致的航片拼接而成。这两种图都可用作地质测绘的底图。
- 3. 立体像片略图和立体像片平面图：立体像片略图是将未经纠正的航片分为单号



与双号两组，分别拼接在硬板纸上，每段长 20cm，可以折迭，便于在立体镜下观察。立体像片平面图是用纠正过的航片按上法拼接的，立体像片平面图构成的立体模型各部分比例尺是一致的，没有影像错断的缺陷。

## 二、航片（全色片）的解译和解译标志

### （一）像片解译

像片解译是在影像上通过地形研究地质。相同的地质现象，在不同的条件下，可有不同的影像特征；不同的地质现象，在一定条件下，可能有相似的影像特征。地质解译中，一成不变的解译标志是不存在的，像片的可解译程度，与气候（干燥地区可解译程度高于潮湿地区）、植被、第四系复盖物的厚度、岩性差异程度（沉积岩地区可解译程度高于变质岩地区）、岩层出露程度、地形起伏、人工改造地面程度等因素有关。

像片解译时常用的工具有：观察工具、量测工具、照明用台灯。

参考资料有：解译地区的地质实际材料（图件和说明），为解译工作提供依据，减少不必要的推测和假定；典型像片图谱，它是经过野外地质调查核实过的典型的、具有代表性的像片，在像片解译时参考，提高解译效果。

在立体镜下观察航片的立体像时，斜坡坡度比实际坡度要陡（垂直比例尺夸大）。

人眼辨别能力的最小距离为 0.2mm，因此对于各种比例尺像片可辨识的地物，1:10000 可辨识 2m 大小的地物；1:25000 为 5m；1:50000 为 10m。

### （二）解译标志

解译标志分为直接解译标志（形状、阴影、色调、地面图案、纹型特征等）和间接解译标志（水系、地貌、植被等）两种。

形状：在航片上地质体的外貌特征，如火山锥、冲积扇、砂丘、阶地、滑坡等，抗风化强的砂岩、砾岩，抗风化弱的页岩、粉砂岩等，在像片上各有不同形态，容易解译。不同几何形状的地质体和地形要素组合成各种空间形态，如活动断层，多组合为平行直线，使岩性、构造、地形、色调不连续；岩脉系统则呈平行或放射线形；褶曲反映不同色调的地质体组合为弯曲线型等。

阴影：阴影分为本影和落影。本影是指地物未被太阳光直接照射到的阴暗部分；落影是指被照射的地物投落到地面上的阴影。阴影帮助我们获得立体感，突出圆缓（或尖锐）的山顶和各种地貌形态，平坦地区借助于阴影来判断各种微地貌，高山区则阴影面积太大，掩盖地物给解译带来困难。

色调：色调指像片上影像的黑白深浅程度，它与地物背景的反光能力、光线照明的强弱有关，解译时可将色调划分为：白、灰白、淡灰、浅灰、灰、暗灰、深灰、淡黑、浅黑、黑十个等级。在黑白片上，本色为深色或黑色的地质体，影像色调也是暗色或黑色（如基性岩、超基性岩）；本色为浅色或白色的地质体，其影像色调为浅色或白色

(如酸性岩、石灰岩、石英岩、石膏等)，这与多波段扫描卫片不同。

图案与纹型：它指个体较小的地物影像，可以区分岩性，辨认构造、分水岭及微地貌的类型，如斑状碟形漏斗、水滴状沙洲、线状断裂、条状山脊、波状丘陵、格状水系、栅状（直立）沉积岩岩层和砂垅、砂丘链等。

水系：它是最令人注目的图形特征之一，主要指水文网的平面形态、平面轮廓，决定于地形特点、岩性成分、构造特征、岩层产状等因素。解译时分析最低一级支流组成的水系图型类别，主要水系图型见图 6-2-1。

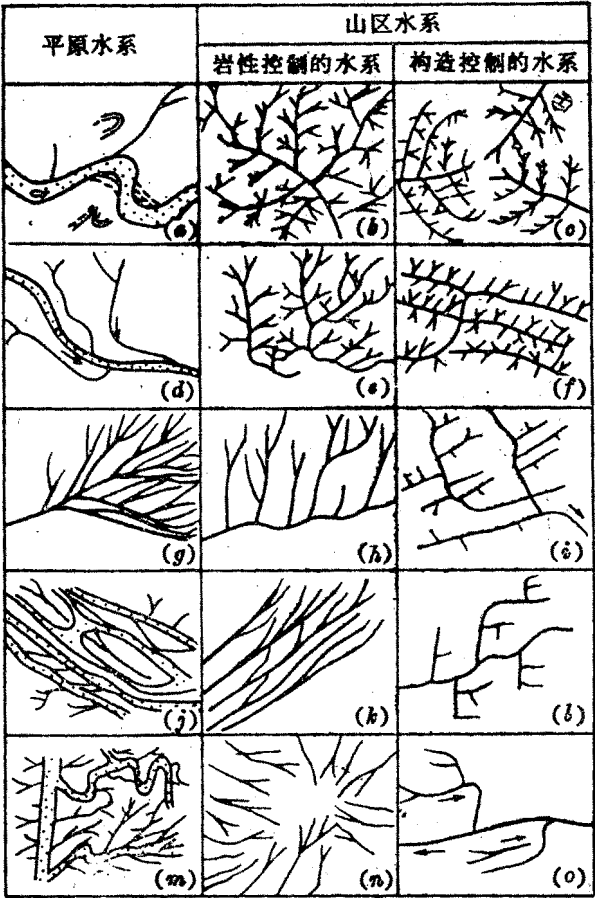


图 6-2-1 水系的图型

- (a) 交织状；(b) 树枝状；(c) 环状；(d) 似平行状；(e) 钳形勾头树枝状；  
(f) 平行羽状；(g) 扇状；(h) 不对称平行状；(i) 菱格状；(j) 瓣状；  
(k) 平行状；(l) 网格状；(m) 网状；(n) 放射状；(o) 倒钩状

交织状水系：见图 6-2-1 (a)，出现在河流下游平原地区。

树枝状水系：所有支流均以锐角流入主流，见图 6-2-1 (b)，多出现在地面倾斜

平缓、地质构造简单的页岩，砂岩及花岗岩地区。

环状水系：集水的河流环绕隆起区呈放射状，见图 6-2-1(c)，在穹窿构造区，较为发育。

钳形勾头树枝状水系：见图 6-2-1(e)，在花岗岩、基性侵入岩等块状岩石分布地区最为常见。

扇状水系：见图 6-2-1(g)，多发育在三角洲及洪积扇地区。

菱格状水系：见图 6-2-1(i)，是受两组互相平行的断裂、裂隙所控制。

平行状水系：主流与支流大致平行，见图 6-2-1(k)，主要的集水河流往往是大断裂或破碎带。

网格状水系：支流与小支流彼此平行呈直角相交，在平面上形成方网格状，见图 6-2-1(l)，受垂直交叉的断裂、裂隙所控制；板岩、片岩及砂岩地区较为常见。

放射状水系：河流呈放射状，由中心隆起区向四周扩散，见图 6-2-1(n)，常分布在火山、孤山和穹窿构造地区。

倒钩状水系：水流流向多呈反向，见图 6-2-1(o)，受构造运动的影响，河流产生袭夺现象。还有一些类型的水系，这里就不一一列举。

植物的选择性生长和密度变化，也和地质现象有关。例如泥岩和页岩区的植物较砂岩和灰岩上密；植物呈线状排列，其方向常为节理与断裂的发育方向等。

地貌的形态特征：地貌的形态特征有宏观和微观两种观察分析方法。宏观的从山的形态、地形相对高差、山体规模和组合格局、冲洪积扇、河流阶地等方面观察分析；微观则从山顶形态、山坡形态、冲沟形态、岩溶形态等的特征去观察分析。

### (三) 物理地质现象(滑坡和泥石流)的解译

物理地质现象的解译是工程地质解译的重点，对有明显地貌及色调反映的物理地质现象，如滑坡、崩塌、岩堆、泥石流、岩溶、沙丘、沼泽、盐渍土、融冰泥流、冰锥、冰胀丘、河岸冲刷、水库坍岸、人工采空区等均可直接按影像确定其类型及范围，还可进一步研究其成因和发展趋势。物理地质现象的发展过程，是利用不同时间摄的像片进行对比解译而得，往往对其危害程度，可作出粗略的评价。这里仅对危害较大的滑坡和泥石流的解译作概略介绍。

#### 1. 滑坡的解译

滑坡在平面上的形态有簸箕形、纵长式、横长式、似椭圆三角形或不规则形态等。滑坡壁(环谷)呈圆椅状，比较陡立。滑动范围内的地面坡度较滑坡相邻的上部、左右山坡地区的坡度要平缓些。滑坡体下方由于土体的挤压，常见到高低不平的地貌和伴随的鼓张裂隙，滑舌部有呈放射状的扇形张裂隙；滑坡体上方可见滑坡台阶以及和滑坡壁方向大致平行的弧形拉张裂缝。滑坡体上树木呈醉林或马刀树。

如果是古老滑坡，则滑坡后壁一般较高，有时生长树木；滑坡体外表平整，无高低不平现象和明显的裂隙；甚至有耕田和居民点分布。滑坡体上沿滑坡裂隙或洼地发育有冲沟，方向紊乱。滑坡两侧的自然沟切割很深，有时出现双沟同源。

在解译滑坡时应注意将滑坡与错落体、古阶地、断层等区别开来。

### 2. 泥石流的解译

在航片上通常可清楚地看到它的供给区、通过区和堆积区。供给区呈瓢形，山坡陡峻，岩石风化程度较为严重，常有滑坡、崩塌等现象产生，松散固体物质来源丰富。通过区的沟床短直，纵坡坡度较供给区平缓，但较堆积区为陡。堆积区位于沟谷出、口处，纵坡平缓，形成的洪积扇或冲出锥轮廓明显，呈浅色调，扇面固定沟槽呈漫流状态。

在航片上根据供给区的松散固体物质来源数量、沟床纵向坡度、平时沟床中坍塌堆积物、扇面植物生长和古建筑物的存在等情况，对泥石流的严重程度作大致的区分。泥石流的发生与周期性的洪水有一定关系，通过野外调查、访问及气象资料的收集，可对泥石流的活动与间歇作出较为确切的评价。

## （四）水文地质解译

直接解译标志：落水洞、漏斗、暗河、伏流、岩溶泉等在航片上通常表现为深灰、灰黑色斑点。较大的暗洞黑色斑点呈串珠状排列，它们的分布万向常受断裂的控制，或由于喜水植物集结，或者直接就是地下水露头的影纹。

间接解译标志：许多出露于河谷或岸边的泉及暗河，其出水口不形成陡坎，也不具有线状影纹、加上山体阴影等的遮挡和干扰，航片比例尺的限制，使大量的有供水意义的泉点，在航片上不能直接判读，常借助下列间接标志进行解译。

根据侵蚀基准面的变化确定排泄点：线状排列的洼地。漏斗落水洞、缓倾斜的岩溶干谷朝某一方向地形逐渐降低至与河谷相交或受隔水层的阻挡时，多有地下水出露。

分析断裂的力学性质和复合关系：张性、张扭性、扭性断裂与压性断裂交汇处，在具有一定汇水面积条件下的洼地或谷地，棋盘格构造交叉部位低洼地、活动断裂带的低洼地，呈灰暗色调或有植物集结的影像地区，常有泉出露。

褶皱带的地质、地貌条件：隔水层与含水层常相互间隔，横切褶皱带的沟谷与之配套的正交张断裂及斜交扭断裂，在沟谷沿河谷地带形成排泄带，常有泉出露；碳酸盐岩石组成的背斜倾没端为碎屑岩圈闭，在背斜成山的条件下，常形成地下水富集区，向斜成谷的条件下，碳酸盐类岩层被碎屑岩圈闭的地形有利地段，也常有泉出露。

在缓倾斜岩层条件下，河谷切穿碳酸盐岩层与下伏碎屑岩的交界面时，界面附近也常有泉出露。

## （五）解译作业程序

利用航片进行地质解译的作业程序包括：准备工作、初步室内判释、外业调绘和室内整理四个阶段。

准备工作：收集勘察区的航测资料（测区索引图、摄影年月、航摄影机焦距）、勘察区的地质图、文字报告、（比例尺 1:10000 ~ 1:50000）地形图，结合地形图，将勘察区的地形、地物、水系、居民点、交通线的名称和特征，转绘在像片上。

初步室内解译：对勘察区在像片上的地貌、岩性和地质构造及水文地质特征进行初步研究，将解译对象在像片上勾出，对把握性不大的解译对象可作推断，但须标明，对可疑现象作出标记。根据影像的特征，找出解译标志，待野外工作时补充和证实。

野外调绘：根据现场实际资料检查、修改、补充室内初步解译成果，并将分散的资材全部转绘到像片略图或地形图上。解译所造成的空白，用野外地质填图的方法补上。野外工作结束前，应对全区作一次检查，检查是否有遗漏、矛盾，主要结论是否可靠等。

室内整理：编制地质图和编写文字报告。