

1、共振成像勘探方法的基本原理

自然界中的任何物体都有其自身的固有振动频率。影响物体固有振动频率的因素有很多，主要包括：尺度、形状、密度、纵波速度、横波速度等。地下空间中赋存的各地质体也都具有其自身的固有振动频率，如图 1 所示三分量共振成像法的基本原理，当有一个宽频带的震动传播到该地质体，特征固有频率能量将被放大，通过观测被放大的特征频率信号，对特征频率信号成像，最终获得地下空间的精细成像效果。

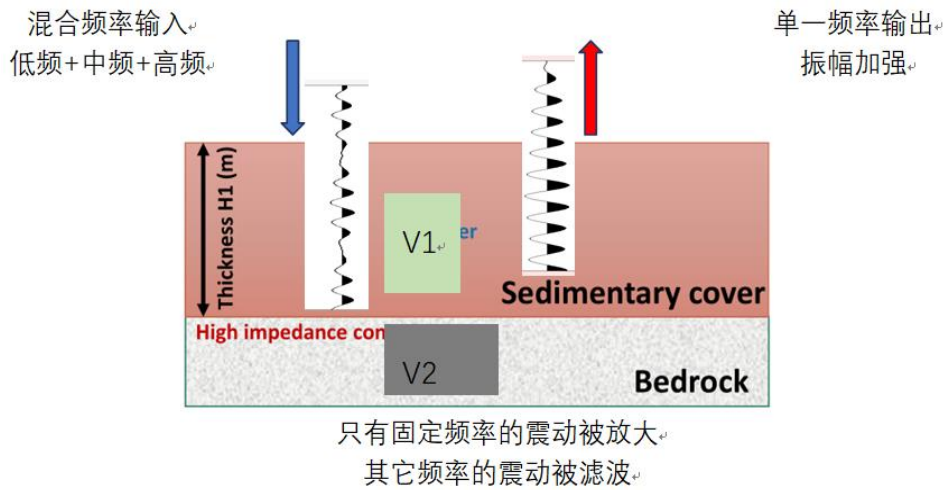


图1 三分量共振成像原理示意图

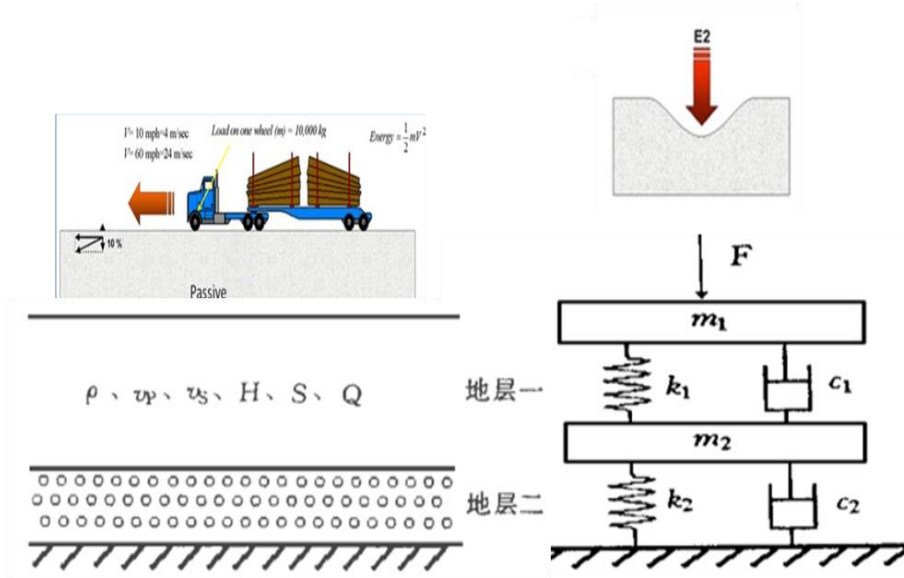


图2 共振成像介质等效示意图

如图 2 所示将地下地质体假设成一系列的层状均匀介质，每一个地层等效为一个阻尼弹性系统，一系列的地层将组合成一个复合的弹性系统，通过观测获取该弹性系统的多模态共振频率，由于固有频率与各地质体尺度（层状模型下是厚度），硬度等因素有关，而硬度与弹性模量有关，地质体的纵波速度，密度，横波速度等参数也与弹性模量有关，所以实际上可以得到固有频率与地质体的厚度，纵波速度，横波速度，密度等有关，从而有函数：

$$f=g(h, k) =g(h, \rho, V_p, V_s)$$

建立方程组，通过反演就可以得到各地质体的厚度等参数。

目前，三分量共振成像法已经在很多地质调查领域中得到了应用，主要包括：覆盖层组成与基底探测、溶岩裂隙带/断层破碎带物质组成研究、地下疏松区（或陷落柱、采空区、地下空洞、溶洞等）探测、地层赋水性和导水条件分析、地下构筑物调查、城市地下水和浅层地热调查、垃圾填埋场周边水土污染监测等多个方面，并取得了很好的应用效果。

2、三分量共振成像采集设备参数



图 3 高精度无缆地震采集节点

a) 检波器配置：正交三分量高灵敏度短周期 0.3Hz 地震检波器

b) 数字化方案：3x32 位高精度 Δ - Σ 模数转换器，瞬时动态范围优于 144dB；

c) 固态存储容量：32G；

d) 供电：内部 160WH 可充电锂电池组，连续工作时长大于 600 小时；

e) 卫星授时精度： $\pm 1 \mu s$ ；

f) 卫星守时精度： $\pm 1ms$ (卫星信号失锁后 6 小时内)；

g) 工作模式：自主采集+工业级平板电脑现场无线质控；

h) 数据回收方式：数据回收电缆+无线数据回传；

i) 工作温度范围： $-40^{\circ}C \sim +70^{\circ}C$ 。

● 采集指标

a) ADC 分辨率：32 位；

b) 采样间隔：4ms；

c) 前置可编程放大：x1、x2、x4、x8、x16 (0dB、6dB、12dB、18dB、24dB)；

d) 增益精度：0.1%；

e) 模拟信号输入： $\pm 2.5Vp-p@x1$ gain、 $\pm 625mVp-p@x4$ gain、 $\pm 156mVp-p@x16$ gain；

f) 实时动态范围@4ms：144dB @ x1 gain、140dB @ x4 gain、133dB @ x16 gain；

g) 等效输入噪音： $0.1 \mu V @ x1$ gain、 $0.04 \mu V @ x4$ gain、 $0.025 \mu V @ x16$ gain；

h) 道间串扰： $<110dB$ ；

i) 共模抑制比： $>110dB$ 。

● 低频检波器指标

a) 频带宽度：0.3Hz-150Hz；

b) 灵敏度： $200V/m/s(\pm 10\%)$ ；

- c) 最大倾角： $\pm 5^\circ$ ；
- d) 道间幅度一致性： $< 5\%$ ；
- e) 横向振动抑制： $< 0.1\%$ 。

3、共振成像法应用案例：

(1) 某地区中深部地层结构及断裂探测

图 4 为某地区中深部地层三分量共振成像法处理得到的一条二维测线伪阻抗剖面图。该图中发育了三条明显的断裂，断裂上下两盘断距明显，垂直断距达到 200m 左右；断层上断点直达地表，表明三条断裂具有明显的活动性。由此可见，三分量共振成像法也是一种对中深部地层结构及断裂刻画效果很好的勘探技术。

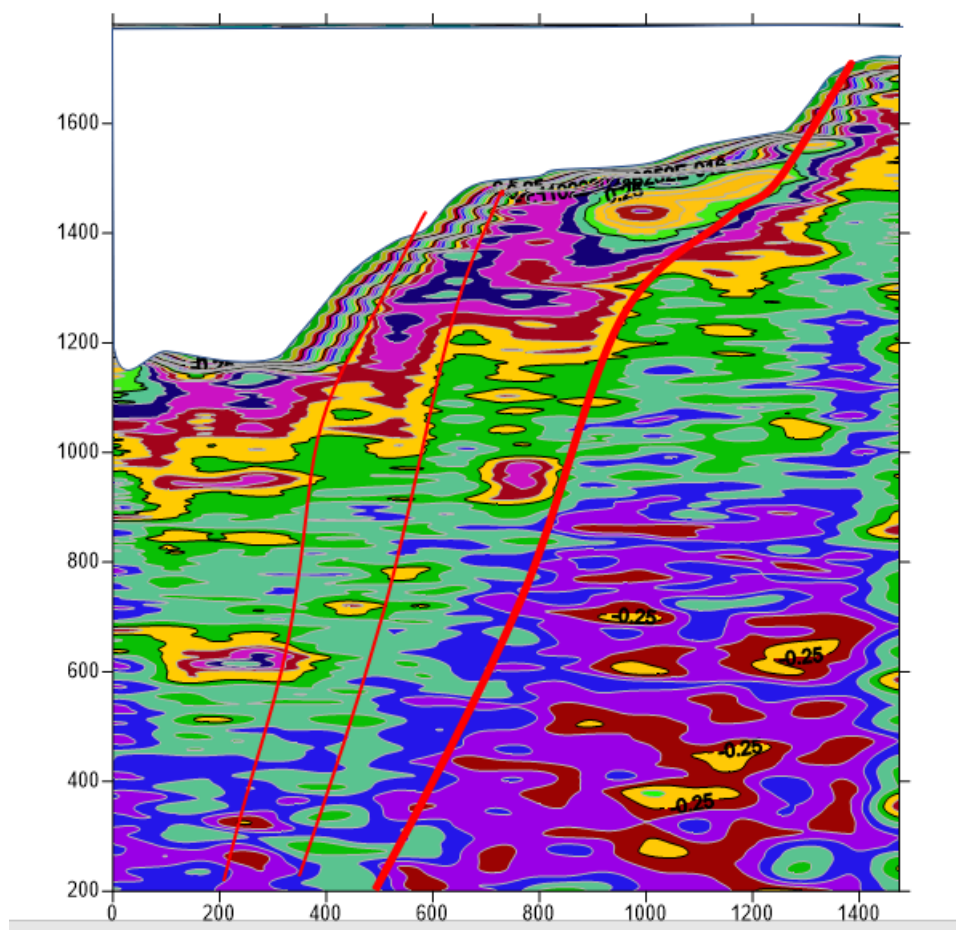


图 4 三分量共振成像处理成果剖面图

(2) 某城市地下空间探测（二维观测系统）

由区域地质情况可知，该区固结基岩以上广泛发育较为松散的第四系覆盖层，第四系覆盖层上部为粘土及砂质粘土，下部发育厚度不等的鹅卵石层。基岩内部随埋深逐渐变大，风化程度逐渐变大，自浅到深发育强风化层和弱风化层，另外基岩内部局部区域还发育一些断裂，断裂发育处往往基岩出露地表。图 5 为三分量共振成像法处理的一条二维测线伪阻抗剖面图，该图中基岩顶面起伏形态特征明显；覆盖层顶部的粘土层厚度变化特征刻画清晰；鹅卵石层在基岩顶面低洼处发育厚度较大，其余部分发育较薄；基岩内部的强风化层、弱风化层以及断裂发育区的特征刻画较好。由此可见，三分量共振成像法也是一种地下空间探测效果很好的勘探技术。

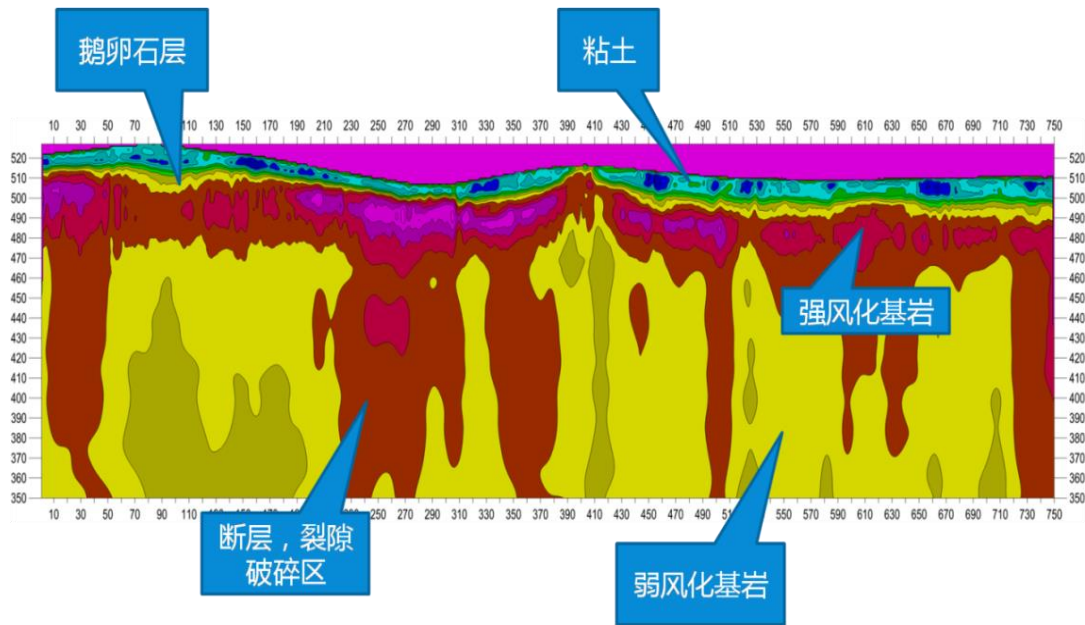


图 5 三分量共振成像地层结构剖面图（覆盖层、基岩）

(3) 某城市地下空间探测（三维观测系统）

三维观测系统相对于二维观测系统具有更为密集的采样点，密集采样无疑可以增加有效信息量，再配合高效的三维可视化技术，可以更加直观准确地展示地下地质结构的三维变化特征。

以下为我们在某城市地下空间探测中使用三维观测系统进行采集处理的案例，图 6a、图 6b 为主测线方向共振成像处理剖面及对应

的成果解译剖面。可见三分量共振成像成果剖面上覆盖层与基岩之间的分界面起伏形态清晰，基岩内部可分为明显的强风化带和弱风化带，覆盖层具有明显的三层结构——最上部为填土层，中间为砂质粘土层，最下部为卵石土层，各层厚度变化特征刻画清晰。

为了更好地展示地下地质结构的空間变化情况，对三分量共振成像处理得到的三维成果数据体进行了可视化处理，得到了图 7、图 8 所示的三维共振成像处理成果图。可见借助三维数据可视化手段，地下三维地质结构被立体地展现出来，基岩顶面的起伏形态以及覆盖层内各层的展布范围和厚度变化更加直观，非常有利于后续的工作部署。

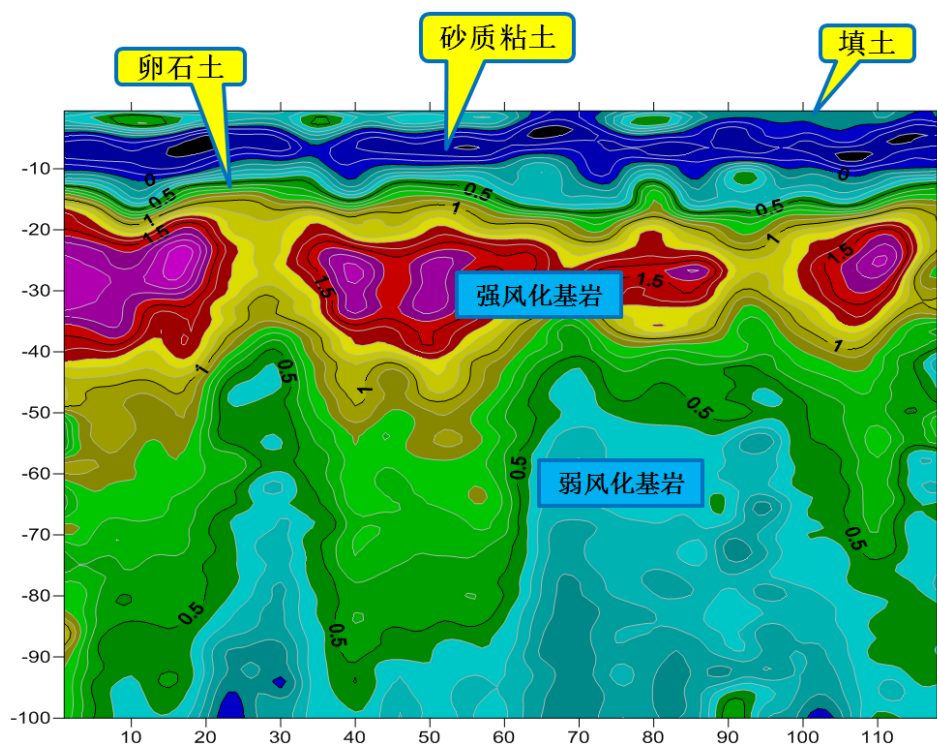


图6a 某主测线共振成像成果剖面图

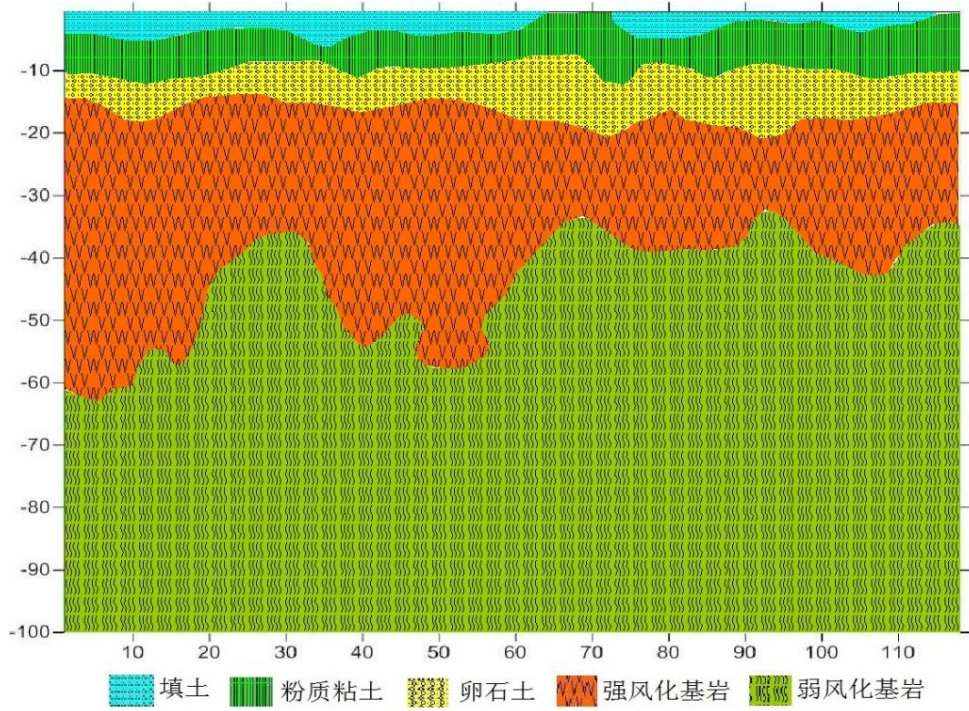


图6b 某主测线共振成像成果解译图

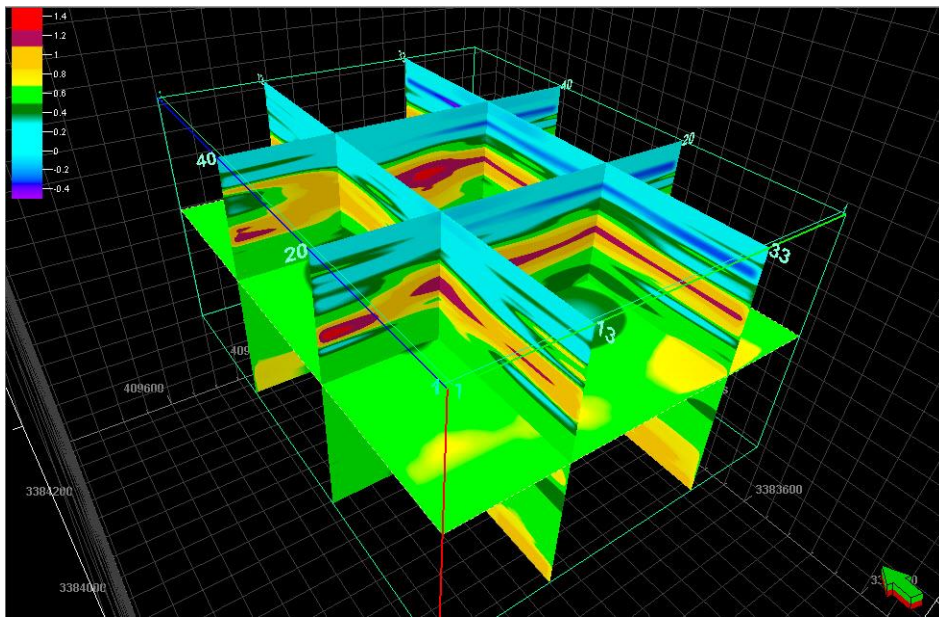


图7 三维共振成像处理成果图（视角1）

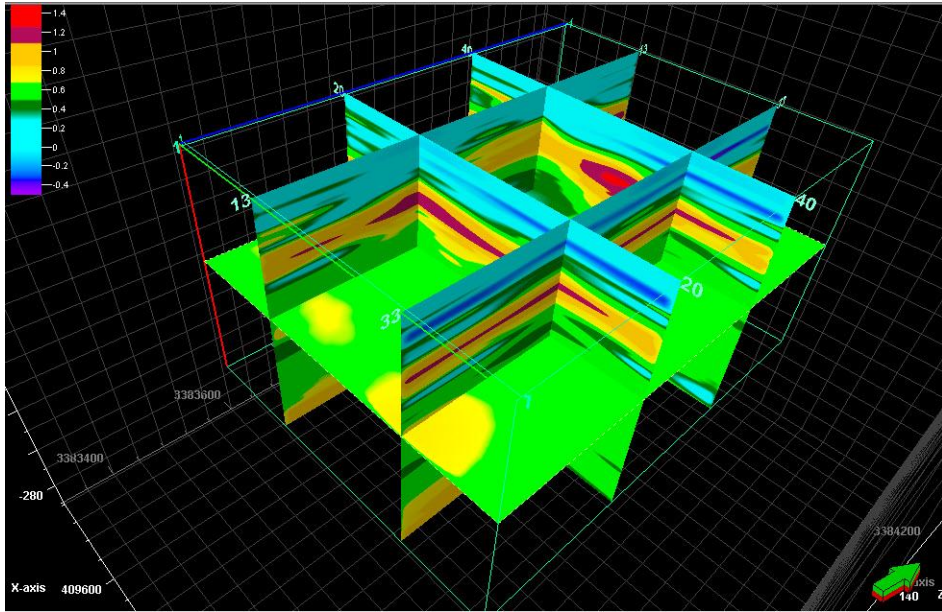


图8 三维共振成像处理成果图（视角2）

预期成果：

1) 共振资料

- ①各勘探点共振原始记录（SEGY 格式数据）；
- ②各勘探点实测坐标；
- ③共振成像剖面及剖面数据；
- ④地质解译剖面图。

2) 综合资料

- ①成果报告；
- ②成果报告汇报多媒体。