

浅层地下物体的高分辨声波探测^{*}

李亚安 董寻虎 武延祥

(西北工业大学航海工程学院 西安 710072)

1995 年 7 月 10 日收到

摘要 本文对地下物体的声波探测进行了初步研究, 分析了探测分辨率与声波频率的关系, 得出了黄土介质中声波探测的分辨极限. 通过对实际目标的探测表明, 该方法具有一定的实用性.

关键词 地下声波, 声波探测

High resolution acoustic wave detection of shallow underground object

Li Yaan, Dong Xunhu, Wu Yanxiang

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xian 710072)

Abstract This paper deals with the high resolution acoustic wave detection in shallow underground object. The relationship of detection resolution and frequency of acoustic wave is analyzed. The resolution limit in the soil is given. It is shown through practical object detection that this method has certain utility.

Key words Underground acoustic wave, Acoustic wave detection.

1 引言

用声波探测埋藏在地下的浅层物体有着广泛的应用前景. 诸如建筑地基、地下文物古墓、高等级公路路基等用声波探测有独到之处. 传统的人工钻探法由于工程量大, 且具有破坏性, 已不能满足目前的需要. 基于声波反射原理的声探法, 在地面激发声波, 并在地面用接收阵接收反射波信号, 以计算机处理的方式对地下区域扫描, 得出埋藏物的方位信息和几何信息^[1, 2].

声波探测的分辨率主要取决于声源所激发声波的频谱分布. 声波的频率越高, 系统的探测分辨率也越高. 虽然声波探测的工作原理与

地震勘探相类似, 但是它们两者声波的频谱分布有较大差别. 地震波的频谱能量主要集中在 40—80 Hz 范围内^[3], 而声波的频谱能量一般可达 40—400 Hz 范围. 这对提高声波探测的分辨率是很有利的.

本文介绍了声波探测的工作原理及系统组成, 讨论了探测分辨率与声波频率的关系, 求出了以黄土为介质时的最小分辨率. 对声波探测的工程化应用具有一定的参考价值.

2 探测原理及系统组成

声波探测采用纵波为有效波. 由声源发出

^{*} 国家自然科学基金项目

的声波在传播途中遇到目标体后, 由于波阻抗的改变, 将有一部分能量被反射, 形成目标体的反射波信号. 用接收阵接收此反射波信号, 通过计算机处理, 可求出目标体的方位坐标和几何形状. 声波探测系统原理如图 1 所示.

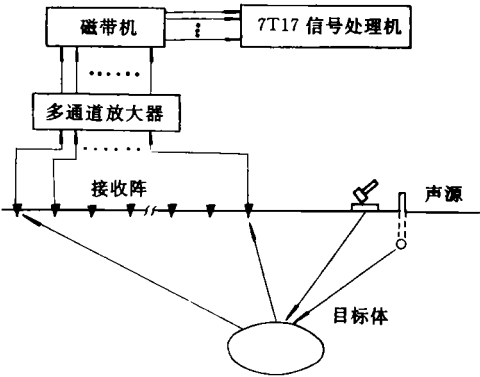


图 1 声探系统原理图

为了简化处理, 假设介质特性为均匀的、且各向同性. 介质的声速已知, 对于黄土介质我们实测的纵波速度为 400 m/s.

接收阵采用等间距直线阵, 阵元数目为 16, 阵元间距为 0.5 m. 声源与第一阵元间的距离为 1—2 m. 阵元选用动圈式地震检波器, 型号为 SSJ-15.

声源采用锤击声源和枪击声源两种. 锤击声源操作简单, 使用方便, 可在同一点多次激发. 但它的时域波形不好, 频谱分布不如枪击声源好. 另外, 由于锤击声源在地表面激发, 它产生的直达波干扰较大, 对后续的信号处理带来困难. 枪击声源使用 7.62 mm 53 式空爆弹, 将枪筒埋入地下 10—100 cm 处引爆. 枪击声源的时域特性接近标准的最小相位子波, 频谱特性好, 有效频率范围可达 40—400 Hz. 图 2 和图 3 分别为锤击声源和枪击声源的时域、频域图.

图 1 中多通道放大器要求各通道增益有较好的一致性, 动态范围大于 60 dB. 为了减小测量通路的高频干扰, 放大器带宽选为 0—2 kHz. 放大器为日本三荣公司生产的 6L02 线性放大器. 磁带机为日本 KYOWA 公司的应用声学

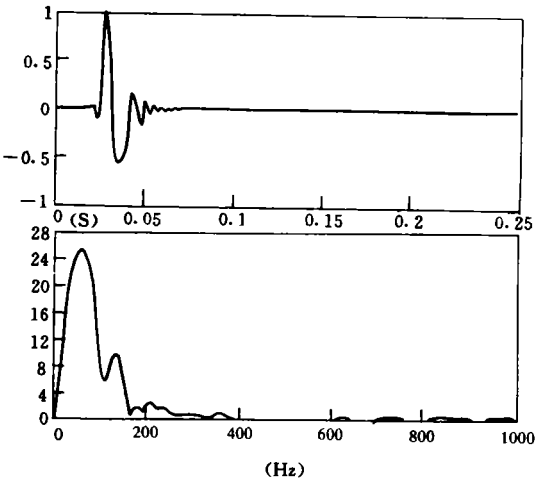


图 2 锤击声源特性; 时域(上图)和频域(下图)

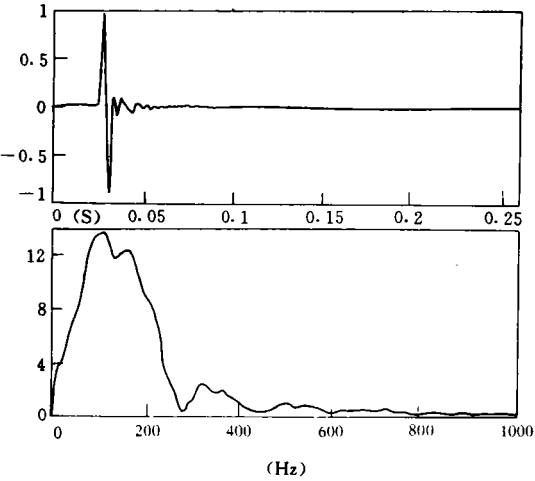


图 3 枪击声源特性; 时域(上图)和频域(下图)

RTP-722A 多通道数据磁带机, 通道数为 21, 输入带宽为 DC—40 kHz, FM 工作方式. 计算机为日本三荣公司生产的 7T17 信号处理机, 它具有 16 通道的模拟输入, 每个通道的带宽为 DC—10 kHz.

采用离线处理方式, 用磁带机首先将探测现场的数据记录下来, 然后用 7T17 处理机进行分析、处理, 得出地下目标的有关信息.

当声波以平面波的形式垂直入射到地下目标体时, 反射波强度可用反射系数表示为

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \tag{1}$$

其中 $\rho_1 V_1$ 、 $\rho_2 V_2$ 分别代表地层介质与目标体介质的波阻抗. 表 1 列出了几种介质的波阻抗.

表 1 常见介质的波阻抗

介质	波阻抗 1×10^4	介质	波阻抗 1×10^4
空气	0.0043	混岩	25~50
土壤	2.2~12	砂岩	63~95
水	14.6	石灰岩	99~108

当探测目标体为古墓穴或洞穴时, 对应介质分别是土壤和空气, 由(1)式可求出相应的反射系数为 $R \approx -1$, 即声波几乎全部被反射.

3 声波探测的分辨率

声探系统的分辨率主要与声波的频谱分布有关. 为了满足高分辨探测, 必须设法提高声源中高频声波的分量. 由于声波在土层介质中传播时, 它的高频成份随距离的增加衰减很快, 表现为大地的低通滤波效应, 因此它对提高声探系统的分辨率不利. 但是对于浅地层探测, 通过适当地增加声源功率, 可在一定程度上有效地提高声源高频成份的强度, 从而提高探测分辨率.

声探系统的分辨率分垂向和横向分辨率.

垂向分辨率指声波沿垂直方向能够分辨的目标层厚度. 设反射波的振动延续时间为 τ , 声波在目标层内垂直传播的双程时间为 $\Delta t_0 = \frac{2\Delta h}{V_k}$. 如图 4 所示. 当 $\Delta t_0 > \tau$ 时, 由接收阵记录的反射波信号可分辨出目标层的上下界面. 若反射波的振动延续时间为一个周期 T , 即 $\tau = T$, 这时垂向分辨率可由下式给出

$$\Delta h = \frac{1}{2} V_k T = \frac{1}{2} \lambda \tag{2}$$

式中 V_k 为声波在目标层中的速度, λ 为波长.

横向分辨率指声波沿水平方向能够分辨多大的目标体. 用反射波第一菲涅尔带的半径可表示横向分辨率^[3], 如图 5 所示. 根据物理地震学的观点: 地面上某一点 S 接收到可分辨的反射波, 是由反射界面上某一范围内的绕射子波迭加结果, 横向分辨率就是该范围的大小. 菲涅尔带的定义为: 如果界面上 A 、 B 两点的

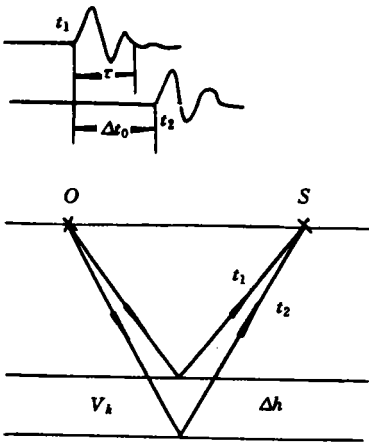


图 4 垂向分辨率

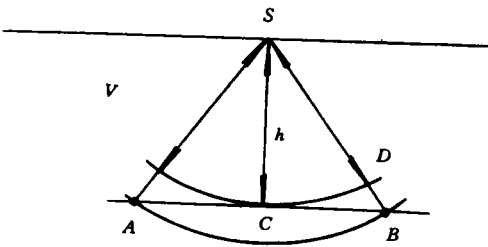


图 5 横向分辨率

绕射子波与 C 点的绕射子波到达 S 点的时间差为 $\frac{1}{2}T$, 则认为 A 、 B 以外各点的绕射子波在 S 点是加强的, 而 A 、 B 以内各点的绕射子波在 S 点就不加强. 把以 C 点为圆心, 以 $a = \frac{1}{2}AB$ 为半径, 在反射界面上画圆, 圆内的范围就称为 S 点反射波的第一菲涅尔带. 对于大于或等于这个范围的目标体, 在时间剖面上可以分辨出来, 小于这个范围就不可分辨. 横向分辨率可由下式给出^[3]

$$a = \sqrt{\frac{1}{2} \lambda h + \frac{1}{16} \lambda^2} \tag{3}$$

式中 h 为反射界面的深度, λ 为波长.

对于黄土层介质, 由实验测得它的纵波速度为 400 m/s, 声波的有效频谱范围为 40—400 Hz. 如果目标体埋藏深度为 10 m, 那么它的最小可分辨尺寸可由(2)、(3)式计算得出,

分别为:垂向分辨率 $\Delta h=0.5\text{ m}$; 横向分辨率 $a=2.25\text{ m}$.

4 地声信号处理

声波探测采用在地面激发、地面接收的工作方式,接收阵在接收地下目标体反射波信号的同时不可避免地接收到由声源传播的直达波干扰.由于直达波的强度比反射波大,振动延

续时间比反射波长,因此在时间域反射波被直达波淹没.另外,由于反射波与直达波的频谱分布相似.因此,无论从时间域还是频率域均很难将它们分离.利用反射波与直达波在视速度上的差异,用二维滤波在速度域可将它们分离出来^[1].文献[1]对此作了详细的介绍.通过对实际探测数据的处理,得出了地下目标体的反射波信号.滤波处理流程如图6所示.

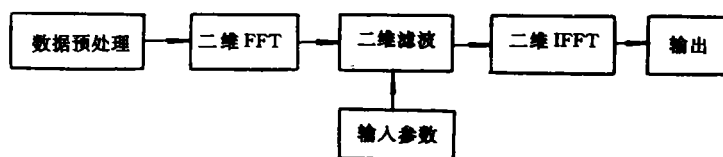


图6 滤波流程图

首先对原始记录进行数据预处理,主要包括对原始信号的采样、数据的归一化等.然后作二维FFT,求出波频谱.根据波频谱上反射波与直达波能量分布进行二维滤波.最后对滤波后的数据作二维傅氏反变换,求出它的时域信号.此时域信号包含了有用的反射波,利用它可计算出地下某区域三维空间各点的反射强度.

利用此声探系统我们成功地探测了多个地下目标体,主要有西北工业大学校园内的地下防空洞;与陕西省考古研究所合作探测的位于西安市南郊的一唐代古墓等,这些都得到了比较满意的结果.

图7是对西北工业大学校园内一处地下防空洞进行探测所得的成像图,它是沿防空洞轴线方向的纵剖面图,图中防空洞的位置用黑点

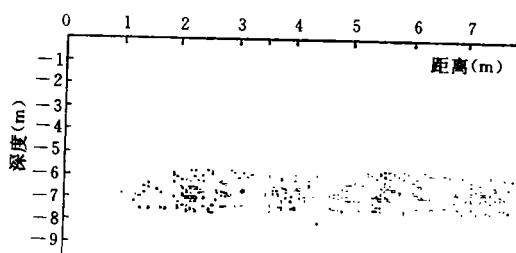


图7 防空洞纵剖面声成像图

表示.从图上我们可看出防空洞顶部离地面6m左右,底部离地面8m左右,此结果与实际情况相符合.

5 结论

声波探测改变了目前传统的对地下非铁磁介质采用的人工钻探法,通过对地下物体的反射波信号进行接收、处理,得到有关地下物体的方位信息和几何信息.具有一定的应用前景.将声波探测应用于工程实际仍面临许多困难,首先要进一步研究黄土介质的声学特性,由于黄土介质疏松多孔,声学特性复杂,目前可供参考的资料很少,加上纵波、横波、面波共存,增加了探测难度.探测深度主要受黄土介质对声波的强衰减特性影响,为了增强目标的反射强度,提高探测深度,要求声源有足够的功率.为了提高探测分辨率,必须提高声源的频率.实验表明,枪击声源的频谱分布优于锤击声源,对改善分辨率具有一定的作用.

参 考 文 献

- [1] 李亚安等.应用声学,1995,14(2):38—41.
- [2] 穆林等.应用声学,1995,14(1):19—22.
- [3] 周绪文编.反射波地震勘探方法,北京:石油工业出版社,1989年.