

水文地质技术方法

第五辑

河北省地质局水文地质四大队 主编

(限国内发行)



地质出版社

水文地质技术方法

第五辑

河北省地质局水文地质四大队 主编

(限国内发行)

地质出版社

水文地质技术方法

第五辑

河北省地质局水文地质四大队主编

(限国内发行)

*

国家地质总局书刊编辑室编辑

地质出版社出版

地质印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1977年12月北京第一版·1977年12月北京第一次印刷

印数1—7,900册·定价0.50元

统一书号: 15038·新257

目 录

数字技术在岩体声波探测中应用前景的初步设想

.....河北省地质局水文地质四大队 (1)

岩体声波探测仪器概况及改进的探讨

.....河北省地质局水文地质四大队 (13)

光滤管填砾过滤器

.....浙江省工业设计院勘测队 (26)

聚丙烯井管及滤水管

.....河北省地质局水文地质四大队 (35)

自动绘制水源污染监测图的方法

.....中国科学院地理研究所地图室
中国科学院地质研究所四室 (40)

综合资料

水文物探资料的数字处理技术

.....河北省地质局水文地质四大队 (48)

译文

地下水水质的模拟

..... (81)

数字技术在岩体声波 探测中应用前景的初步设想

河北省地质局水文地质四大队

一、问题的提出

近年来声波探测技术在各种类型的地下工程和水电工程的设计、施工中,作为一种评价岩体工程地质性质的测试手段,在岩体强度分类、洞周围岩松动圈的测试、岩体物理力学参数的测定、洞室稳定性评价和长期监控等方面,已取得初步成效并得到日趋广泛的重视与应用。但是,该技术仍不完善、尚需急待提高。当前方法上存在的难点,主要是由于电脉冲,通过频带不够宽的收发换能器和耦合介质(黄油、水)及岩体滤波系统的作用,使最终接收到的波形拉长到5个周期以上,致使在非均匀多裂隙岩体中直达纵波、横波、面波、反射波以及转换波等彼此干涉,造成直达纵波后的续至波识别困难。因而目前应用的声波参数一般仅限于直达纵波速度。

显然,岩体声波探测的潜力是很大的。在解决上述波形干涉而造成的问题后,声波的全部运动学和动力学参数(纵波、横波的波速,反射波,波形、频率、振幅谱、相位谱、吸收谱等)都可加以利用,那时该技术解决问题的深度与广度,将出现一个质的飞跃。

数字技术在石油地震勘探中对研究地下地质构造所取得的显著效果,给了我们有益的启示。从原理上讲,在岩体声波探测中采用数字技术后,上述问题均有可能解决,不仅如此,用数字成象的力法还有可能得到反映岩体内部结构面分布情况的图象。

二、数字技术在岩体声波探测中 应用前景的初步设想

为了把问题说清楚,下面先对岩体声波探测的过程作一分析,并简要介绍数字技术与现有方法的区别,然后介绍初步设想。

与一般通讯过程相似,岩体声波探测的过程可以看成是信息传递过程。

一般的通讯过程,可以表示为框图1。

我们将要传输的信息(声、图象等)用来调制载波(调频或调幅),然后经发射天线辐射出去,通过空气电离层反射或地面传播、接收再经过解调,即可得到所要传递的声或图象等信息。

岩体声波探测的过程与此相似,所不同的是,岩体一方面既是传输介质,另一方面它

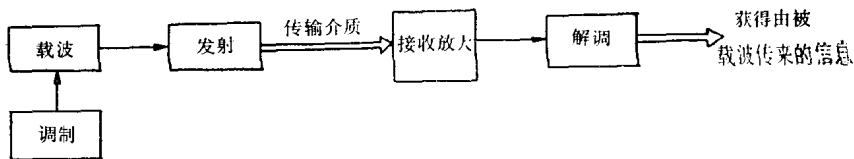


图 1

又不断地改变声波的“面目”，从而对发射点所辐射的不带任何信息的声波（通讯过程辐射出的波是带有所要传递的信息的）进行调制，这样就使得声波在传播过程中，不断地携带有关于岩体传播声波特征方面的信息。根据所得到的声波记录，再经过信息的提取，我们就获得了有关岩体声学特点，并根据这些声学特点来推断岩体的工程地质特征。因此岩体声波探测的过程可归纳为图 2。

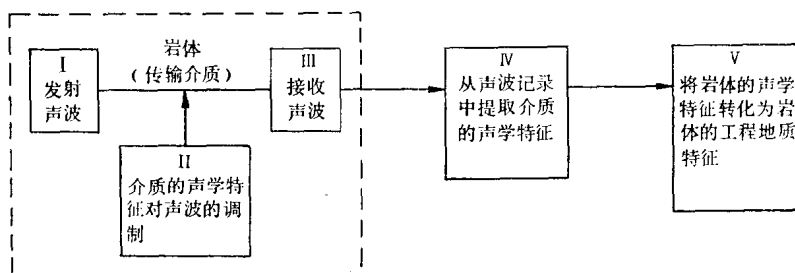


图 2

框图 I、II、III 形成了岩体声学特征信息的传递和野外数据的采集过程；

框图 IV 形成了信息的提取过程；

框图 V 形成了岩体的声学特征转化为工程地质特征，即地质解释的过程。

从研究课题的领域上看，

框图 I 和 III 形成了声波发射和接收仪器设备的试制和野外工作方法技术方面的研究课题；

框图 II 形成了声波传播的理论问题；

框图 IV 形成了声波资料的分析处理技术；

框图 V 形成了声波资料的地质解释。

这四部分是互相联系的不可分割的整体。

本文只讨论在声波传播理论的基础上形成的用数字技术提取信息的方法和技术。而对声波的仪器设备、传播理论及声波资料的地质解释等方面的问题将不予以讨论。

数字技术与现有方法的主要区别：数据的采集，已不是示波照相将声波的连续波形记录下来，而是采用取样方法，经模数转换，按二进制编码，将接收波形的离散取样值记录在磁带上（或其它设备上），以便于计算机进行处理。信息的提取，不是用目测手算，而是用电子计算机。

初步设想：

（一）利用接收波形频谱、岩体的吸收谱评价岩体和利用数字频率滤波压制干扰。

大量的工程实践使我们直观地感觉到：致密、坚硬完整的岩体，吸收较小，波的反射、绕射、散射现象不严重，因而所接收的波形简单、视频率较高；疏松、软弱、破碎的

岩体, 吸收厉害, 反射、绕射、散射严重, 所收到的波形复杂、视频率较低。但这只是定性的描述。在采用数字技术中的频谱分析方法, 将所接收的在时间域上的波形, 变换成频率域上的振幅谱、相位谱和岩体的吸收谱, 则上述特征可得到较定量的描述。在经过一段实践, 并提出一定的指标 (如主频高低、频带宽窄) 基础上有可能在岩体分类、松动圈的划分等方面得到应用。

从不同距离所接收到的声波记录, 可求出岩体对声波的吸收衰减系数随频率的变化——简称吸收谱, 吸收谱能更全面地反映岩体的吸收特性, 也可能作为判断岩体好坏的一项指标。

用数字滤液压制风动凿岩机、出碴机、各种车辆等引起的低频环境噪声以及低频面波的干扰。数字滤液与仪器中通过滤波器来压制干扰方法相比, 具有灵活, 且在干扰与有效信号频带范围相差不大时, 有易于实现的优点。

1. 振幅谱、相位谱的计算

波动过程可以在时间域表示成振幅与时间的关系, 这是人们很熟悉的, 也可以在频率域用振幅谱和相位谱来表示。

根据富里叶分析, 一个脉冲波形 $S(t)$ 可以分解为无数个不同频率、不同振幅、不同相位正弦波的叠加。这些被分解出来的不同频率的正弦波, 其振幅与频率的关系叫振幅谱用 $|S(f)|$ 表示, 其相位与频率的关系叫相位谱用 $\Phi(f)$ 表示。统称为频谱, 频谱是复变量。

$$S(f) = |S(f)| \cdot e^{j\Phi(f)}$$

对表示波动过程来说, 波形与频谱二者是等价的, 并用富里叶变换联系在一起。知道了波形由富氏变换可求得频谱, 反过来知道了频谱由反富氏变换可求出波形。这由我们研究问题如何方便来选择, 例如关于滤波的研究, 在频率域就较为方便。

设取样后声波记录为 $S_0, S_1, \dots, S_n$ 序列。

Δ 为取样间隔 (按目前SYC-1A型仪器, 135胶卷照相记录手工取样间隔 $\Delta = 10\mu s$), $N+1$ 为取样点个数。由取样定理知, 若 $\Delta \leq \frac{1}{2f_0}$, f_0 为声波记录所包含的最高频率成分的频率, 则取样后的离散序列 $S_0, S_1, \dots, S_n$ 完全可以代替连续声波记录 $S(t)$ 。

用离散域富氏变换的方法, 声波记录的频谱可以用下式表示

$$S(md) = \Delta \sum_{i=0}^N S(i) e^{-2\pi j \frac{mi}{N+1}} \quad m=0, 1, 2, \dots, N$$

式中 d ——频率取样间隔, 并满足

$$d \times \Delta = 1/(N+1)$$

从上式可以看出 $S(md)$ 为复数, 我们将其表示成指数形式, 即 $S(md) = |S(md)| e^{j\Phi(md)}$, 并称 $|S(md)|$ 为振幅谱 $\Phi(md)$ 为相位谱。

从上式出发, 并应用尤拉公式 $e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$, 可以求得声波记录 $S(t)$ 的振幅谱 $|S(md)|$ 和相位谱 $\Phi(md)$ 的计算公式:

$$|S(md)| = \Delta \sqrt{\left[\sum_{i=0}^N S(i) \cos \left(2\pi \frac{mi}{N+1} \right) \right]^2 + \left[\sum_{i=0}^N S(i) \sin \left(2\pi \frac{mi}{N+1} \right) \right]^2} \quad (1)$$

$$\Phi(md) = \arctan \frac{-\sum_{i=0}^N S(i) \sin\left(2\pi \frac{mi}{N+1}\right)}{\sum_{i=0}^N S(i) \cos\left(2\pi \frac{mi}{N+1}\right)} \quad (2)$$

$$m=0, 1, 2, \dots, N$$

2. 岩体吸收谱信息的提取

设两个接收换能器与发射换能器的距离分别为 L_1 和 L_2 , 其相应所收到的声波频谱为 $S_1(f)$, $S_2(f)$, 并设 $Q(f)$ 表示岩体的吸收谱。

根据滤波理论, 并假定声波是球面扩散的,

$$\text{则 } S_2(f) = S_1(f) \exp[-Q(f)(L_2 - L_1)] \frac{L_1}{L_2}$$

由此可知:

$$\exp[-Q(f)(L_2 - L_1)] = \frac{S_2(f)}{S_1(f)} \frac{L_2}{L_1}$$

$$-Q(f)(L_2 - L_1) = \ln \frac{S_2(f)}{S_1(f)} + \ln \frac{L_2}{L_1}$$

$$-Q(f) = \left[\ln \frac{S_2(f)}{S_1(f)} + \ln \frac{L_2}{L_1} \right] \frac{1}{(L_2 - L_1)}$$

$$\begin{aligned} \therefore |Q(f)| \exp[j\Phi_Q(f)] &= \left\{ \ln \left[\frac{|S_1(f)|}{|S_2(f)|} \exp(j(\Phi_{s_1} - \Phi_{s_2})) \right] - \ln \frac{L_2}{L_1} \right\} \frac{1}{(L_2 - L_1)} \\ &= \left[\ln \left[\frac{|S_1(f)|}{|S_2(f)|} \right] - \ln(L_2/L_1) \right] \frac{1}{(L_2 - L_1)} + \frac{j(\Phi_{s_1} - \Phi_{s_2})}{L_2 - L_1} \end{aligned}$$

由此得到, 岩体吸收系数的振幅谱 $|Q(f)|$ 和相位谱 $\Phi_Q(f)$ 为:

$$|Q(f)| = \frac{\sqrt{\left[\ln \left[\frac{|S_1(f)|}{|S_2(f)|} \right] - \ln \frac{L_2}{L_1} \right]^2 + (\Phi_{s_1} - \Phi_{s_2})^2}}{L_2 - L_1} \quad (3)$$

$$\Phi_Q(f) = \arctan \left\{ \frac{\Phi_{s_1} - \Phi_{s_2}}{\left[\ln \left[\frac{|S_1(f)|}{|S_2(f)|} \right] - \ln \frac{L_2}{L_1} \right]} \right\} \quad (4)$$

3. 声波记录的数字频率滤波

数字频率滤波的方法可以归结如下:

- (1) 在现场条件下, 记录噪声波形 $N(t)$, 并用频谱分析的方法求出其频谱 $N(f)$ 。
- (2) 声波记录中, 有效信号的频谱是 $S(f)$ 。
- (3) 设计一滤波器, 它的频谱 $H(f)$ 满足下列条件, 即

$$S(f)H(f) = S(f)$$

$$N(f)H(f) = 0$$

- (4) 将按上述条件所设计出的滤波器 $H(f)$ 用反富氏变换方法求出响应函数 $h(t)$

即

$$h(i\Delta) = d \sum_{m=0}^N H(md) e^{2\pi j \frac{m i}{N+1}}$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, N$$

(5) 将 $h(t)$ 与声波记录 $S(t)$ 进行褶积运算, 即实行了数字滤波。

即

$$Q(i\Delta) = \Delta \sum_{p=0}^N S(i\Delta - p\Delta) h(p\Delta) \quad (5)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, N$$

$Q(i\Delta)$ 是进行数字滤波后的声波记录。

(二) 利用反褶积滤波实现脉冲压缩。

这种方法可使得彼此干涉的直达纵波、横波、反射波在时间域上分离开, 达到提取每组波到达时间的信息, 以及提取岩体滤波器对每组波的脉冲响应函数的目的。

下面先介绍什么叫褶积滤波, 并以此和声波传播理论为基础, 提出实现反褶积滤波的基础——声波记录的数学物理模型, 然后讨论反褶积滤波实现上述设想的简单原理。

1. 什么叫褶积滤波

滤波可以在频率域实现, 这是人们所熟知的。设有一滤波系统其频率响应为 $H(f)$, 输入信号的频谱为 $S(f)$, 则输出信号的频谱 $S'(f) = S(f) \cdot H(f)$ 。

滤波也可以在时间域实现, 正像波形与频谱是等价的一样, 在时间域进行滤波是通过褶积运算实现的, 叫褶积滤波。

为把问题谈清楚, 简略介绍一个滤波系统特性的两种描述方法: 频率响应与脉冲响应。

频率响应: 将不同频率但幅度和相位相同的正弦波输入一个滤波系统, 所得到的输出, 对于不同频率的正弦波来说, 幅度、相位是不同的, 这样得到的输出振幅、相位与频

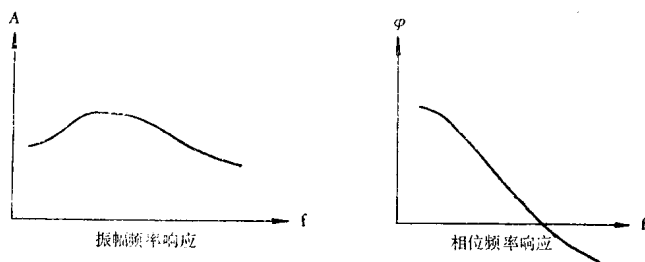


图3

率的关系称为该滤波系统的振幅频率响应与相位频率响应, 简称频率响应。

脉冲响应: 将一个非常窄的单位脉冲输入一个系统, 所得到的输出波形 $h(t)$ 就称为该系统的脉冲响应, 如图4。

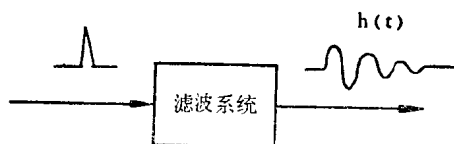


图4

岩体对不同频率的声波吸收衰减情况不同, 高频吸收厉害, 按照弹性后效理论, 岩体的吸收衰减系数近似与频率一次方成正比, 所以岩体总体上可视为一低通滤波器, 并假定其脉冲响应为 $h(t)$ 。另外, 岩体中还存在着岩性不同的分界面和断层等软弱结构面(波阻

抗界面), 设第 i 个分界面的反射系数为 $\xi(t_i)$, t_i 表示波从发射点经此界面反射回到接收点所用的时间。若界面的空间分布是随机的, 则序列 $\xi(t_i)$, $i=1, 2, \dots, n$ 形成了分界面对输入到岩体中声波的响应。

所谓在时间域的褶积滤波, 就是设有一滤波系统, 其脉冲响应是 $h(t)$, 若输入波形为 $S(t)$, 则输出波形为 $S(t)$ 与 $h(t)$ 的褶积。即 $S'(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t)h(t-\tau)d\tau$ 并用褶积符号 $*$ 表示上式广义积分运算, 则上式简写为 $S'(t) = S(t) * h(t)$ 。

用褶积方法在时间域进行滤波与频率域进行滤波是等价的。即是说用褶积滤波得到的输出波形, 与先求出输入波形的频谱和滤波系统的频率响应, 其乘积是输出波形的频谱, 然后经反富氏变换也可求得输出波形, 只要取样间隔满足取样定理, 这两种滤波方法所求出的输出波形是相同的。

下面我们在声波传播和褶积滤波理论的基础上, 提出反褶积滤波的基础——声波记录的数学物理模型。

声波探测的信息传递、数据采集过程可用框图 5 表示:

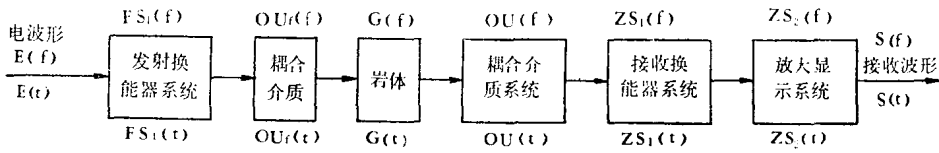


图 5

加在换能器上的电波形 $E(t)$ (相应的频谱为 $E(f)$) 经过了发射换能器直到放大显示等六个系统, 得到接收波形 $S(t)$ (相应的频谱为 $S(f)$), 设每个系统的频率响应为 $FS_1(f), \dots, ZS_2(f)$, 脉冲响应为 $FS_1(t), \dots, ZS_2(t)$ 则根据滤波理论:

接收波形的频谱为:

$$S(f) = E(f)FS_1(f)OU_1(f)G(f)OU(f)ZS_1(f)ZS_2(f) \quad (6)$$

接收波形为:

$$S(t) = E(t) * FS_1(t) * OU_1(t) * G(t) * OU(t) * ZS_1(t) * ZS_2(t) \quad (7)$$

设收发换能器通过耦合介质靠在一起直接接收到的波形 $b(t)$ 叫子波。即 $b(t) = E(t) * FS_1(t) * OU_1(t) * OU(t) * ZS_1(t) * ZS_2(t)$ 则接收波形为 $S(t) = b(t) * G(t)$ 。

下面通过声波传播过程的进一步分析, 将岩体脉冲响应函数 $G(t)$ 进行分解, 从而在上述一般表示式的基础上提出完整实用的声波记录模型。

在岩体中激发振动, 接收到的波有直达纵波、横波, 和由波阻抗介面反射回来的反射波等。直达纵波 $P(t)$, 相当于通过一延迟时间为 t_p 的延迟线和一脉冲响应为 $h(t)_{t=t_p}$ 的岩体吸收滤波器, 即 $P(t)$ 是 $b(t)$ 延迟一段时间 t_p 后与岩体吸收滤波器脉冲响应函数

$h(t)_{t=t_p}$ 的褶积, 即 $P(t) = b(t-t_p) * h(t)_{t=t_p} = \int_{-\infty}^{+\infty} b(t-t_p-\tau)h(t)_{t=t_p}d\tau$ 。直达横波

$S(t)$ 是 $b(t)$ 延迟一段时间 t_s 后与岩体吸收滤波器脉冲响应函数 $h(t)_{t=t_p}$ 的褶积即 $S(t) = b(t-t_s) * h(t)_{t=t_p}$ 。

设岩体结构如图6所示,其中有 N 个反射界面,界面的反射系数分别用 $\xi(t_1), \xi(t_2), \dots, \xi(t_n)$ 表示。应注意的是,这里用反射波从发射点传播到接收点的时间 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 表示相应的界面位置。

子波 $b(t)$ 经反射界面 t_1 反射到达 S 点, t_1 界面相应的反射系数为 $\xi(t_1)$, 因此 $\xi(t_1)$ 界面上的反射波 $PP(t_1)$ 可以表示为 $b(t)$ 延迟一段时间 t_1 后与反射界面的反射系数的乘积 $b(t-t_1)\xi(t_1)$, t_2 界面有 $b(t-t_2)\xi(t_2) \dots$, 第 N 个界面, 相似地有 $b(t-t_n)\xi(t_n)$, 因此所有反射界面的反射波可表示为

$$\sum_{i=1}^N b(t-t_i)\xi(t_i) = b(t) * \xi(t)。$$

直达纵波、横波、反射波的延续时间均较子波长, 并决定于岩体滤波器和反射界面的反射系数。

声波记录 $S(t)$ 是直达纵波、横波、反射波在时间域叠加的结果, 综上所述可用框图7表示。

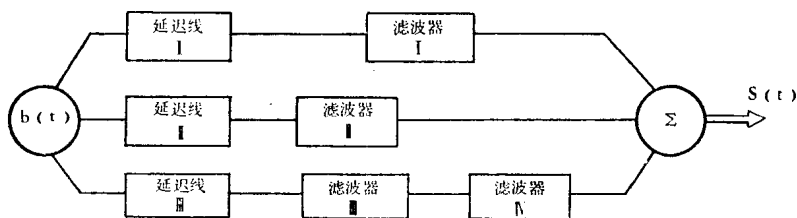


图 7

延迟线 I、II、III, 延迟时间分别为 t_p, t_s, t_i

滤波器 I、II, 脉冲响应为 $h(t)_{t=t_p}, h(t)_{t=t_s}$

滤波器 III, 脉冲响应为 $h(t)_{t=t_i}$; 滤波器 IV, 界面反射系数为 $\xi(t)_{t=t_i}$

滤波器 I、II、III代表岩体吸收作用, 滤波器 IV表示界面的反射作用。

考虑到波的扩散衰减, 则声波记录 $S(t)$ 可用下面较完整的公式表达:

$$S(t) = \alpha b(t-t_p) * h(t)_{t=t_p} + \beta b(t-t_s) * h(t)_{t=t_s} + \gamma_i b(t-t_i) * h(t)_{t=t_i} * \xi(t)_{t=t_i} \quad (8)$$

式中 α, β, γ_i 是与扩散衰减有关的系数。

设岩体的吸收谱为 $Q(f)$, f 为频率, 则岩体滤波器的频率响应函数为一与波的到达时间 t 有关的函数 $e^{-Q(f)t}$, 其相应的脉冲响应函数为 $h(t)$, 并且

$h(t)_{t=t_p}$ 表示 $R=t_p V_p$ 这段岩体对 P 波的脉冲响应函数;

$h(t)_{t=t_s}$ 表示 $R=t_s V_s$ 这段岩体对 S 波的脉冲响应函数;

$h(t)_{t=t_i}$ 表示 $R=t_i V_i$ 这段岩体对某一类型的反射波的脉冲响应函数。

式8称为声波记录的数学物理模型, 这是反褶积滤波的基础。

2. 反褶积滤波的原理

设有一输入信号 $X(t)$ ，通过一个系统 $G(t)$ ，得到一输出信号 $Y(t)$ ，如图一所示，这一过程称为“滤波”。

若已知输出信号，要设计一系统，使得输出信号 $Y(t)$ 通过此系统后，输出信号为 $X(t)$ ，这个过程叫“反滤波”。

反褶积滤波是在时间域实现反滤波的一种方法。实行脉冲压缩以提高分辨力的反滤波的基本思想，就是要设计一滤波系统，使子波通过此滤波系统（其脉冲响应为 $a(t)$ ，并称为反子波）后，变成单位脉冲，

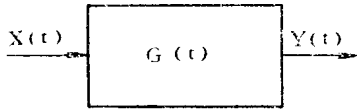


图 8

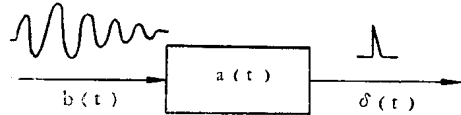


图 9

即

子波与反子波的褶积满足

$$b(t) * a(t) = \begin{cases} 1 & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases}$$

这样就达到了我们预期的脉冲压缩的目的。

声波探测中子波 $b(t)$ 是已知的，当 $b(t)$ 满足最小延迟条件时， $a(t)$ 可精确求出，否则可近似求出，由子波求反子波 $a(t)$ 的方法可参阅有关文献。

若反子波 $a(t)$ 已求出，则用 $a(t)$ 与直达纵波、横波，反射波彼此干涉的声波记录进行褶积运算，则对于直达纵波、横波、反射波，都被压缩成尖脉冲。于是也就提高了直达纵波、横波、反射波的分辨力，从而达到了提取直达纵波、横波、反射波到达时间和自动提取岩体脉冲响应函数的目的。反褶积滤波的效果，请见示意图。

一般而言，经过上述类似地震勘探中提高分辨力的反褶积后声波记录已被压缩了，但每组波仍然有一定的延续度，延续度的大小决定于岩体滤波器的脉冲响应函数，是否可以再进一步压缩呢？从原理上讲回答是肯定的，如果我们将上述反褶积滤波的结果分成几段，

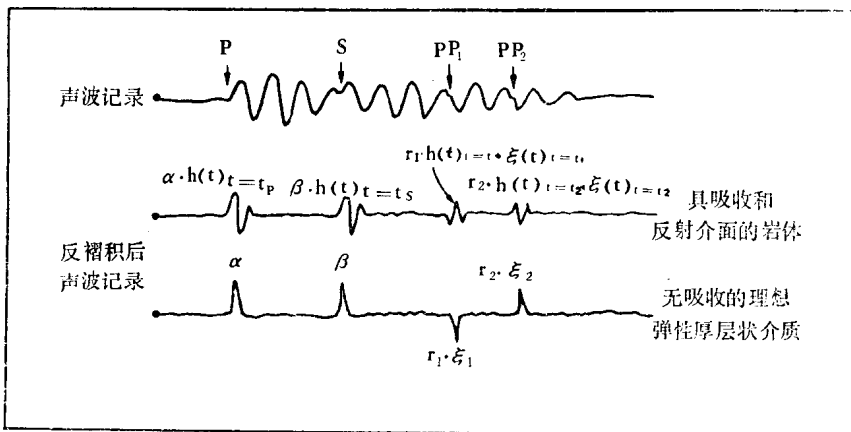


图 10 反褶积效果示意图

每一段岩体的脉冲响应函数视为不变的,并将此段岩体的脉冲响应函数视为子波,求其反子波,用反子波与上述经过反褶积的该段声波记录再进行褶积,则可以得到很尖锐的脉冲。从而进一步提高反褶积滤波的分辨力。

显然,要使反褶积取得良好的效果,要求声波记录有较高的精度和信噪比。否则经反褶积反覆运算误差也被放大了。

最后,还要指出一点,反褶积的效果还取决于子波的选择,本文叙述的是最好的情况,若以发射电脉冲为子波,则反褶积后所得到的每组波的延续度要长些,如直达纵波,已不是 $ah(t)_{t=t_p}$ 而是 $ah(t)_{t=t_p} * FS_1(t) * QU_f(t) * OU(t) * ZS_1(t) * ZS_2(t)$ 。

(三) 利用数字成象的方法了解岩体中大的软弱结构面的分布。

该方法可以得到反映岩体中大的软弱结构面(波阻抗界面)的分布情况的象。数字成象是成象技术的一种,它与透镜体象、扫描成象的主要区别是:成象不是一步“实时”成象,而是分两步,即记录、重现成象;不仅利用了波的振幅信息,而且利用了振幅相位等全部信息。

下面介绍地震勘探中的几种成象技术的简单原理,并对其应用于岩体声波探测的问题进行一下初步分析。

1. 绕射扫描叠加

根据建立在菲涅尔—克基霍夫绕射理论基础上的物理声学观点,声波到达一个反射界面,界面上每一个质点或每一个“微反射段”都可视为一个新的子波绕射源,发出球面子波,此即绕射波,简称“波涟”,在岩体表面或测孔中任一点接收到的声波反射记录,就是反射界面上所有点源产生的无数绕射“波涟”在此点叠加的结果。声波探测记录分析的任务,就在于求反射记录的逆解,即如何达到从声波记录中提取绕射点位置和绕射波强度信息的目的。

绕射波的时距曲线为双曲线,双曲线的极小点在绕射点源上,只要用点绕射波双曲线对声波记录进行扫描叠加,上述逆解问题就可解决。因为,若某一假想绕射点是界面上的真绕射点,则用此绕射点的绕射双曲线对各道进行扫描叠加,即按时间 $T_i = \frac{S_i ds + R_i ds}{V}$

取各道振幅进行叠加(S_i 、 R_i 分别为发射点、接收点与绕射段 ds 的距离, V 为介质速度),因各道所收到的此点的绕射波,它们是同相位的,通过叠加、大为加强;而在 T_i 时刻从其它绕射点来的绕射波和随机干扰,不满足同相条件,通过叠加相互抵消。假若某一假想绕射点不是界面上的真绕射点,则不满足同相叠加条件,叠加结果,相互抵消,这样就达到了从声波记录中,判别真假绕射点,提取绕射点的空间位置和绕射波强度信息的目的。

绕射扫描的作法是,根据已知的速度参数,计算出一套随时间变化的绕射双曲线,用这套双曲线对反射记录依次逐道作时间扫描,扫描时把每个双曲线上的波的振幅叠加起来,将其振幅代数和放在双曲线极小点的相应位置上去,这样就得到岩体内部结构面的图象。

上述的过程可以用图11定性的表示出来,图中(1)、(2)、(3)表示反射记录的形成过程,图中(4)、(5)、(6)表示绕射扫描叠加的过程。

绕射扫描具体作法可以用图12来进一步说明。在作扫描之前,应根据所探测的结构面的深度和精度要求选定扫描范围和网格点密度,并且选定介质速度参数。然后在测线 AB 所在平面内画上网格,横向表示水平距离,纵向表示深度,我们把网格的交点假想成绕射

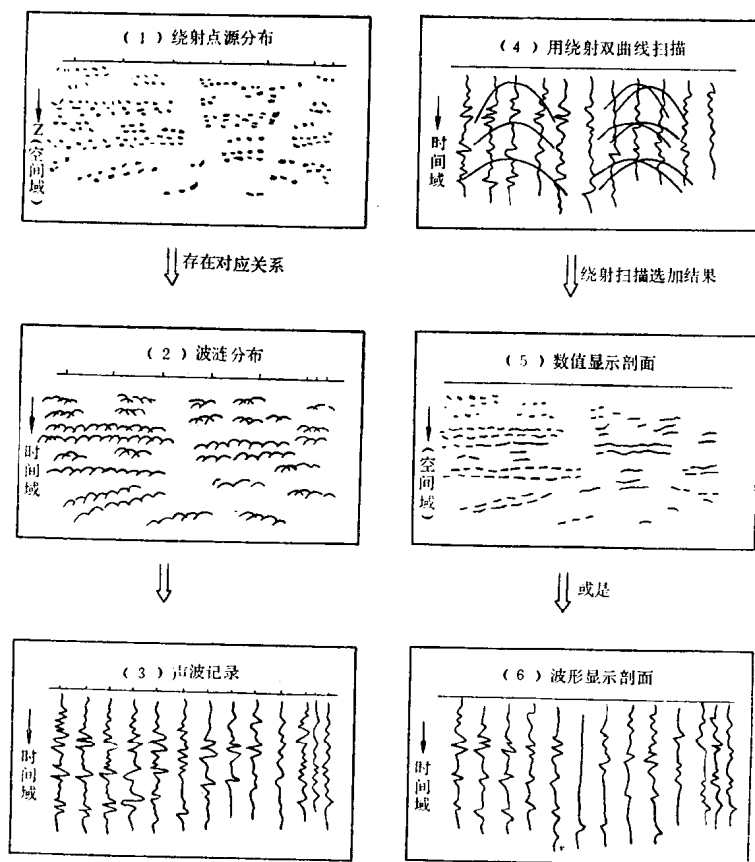


图 11

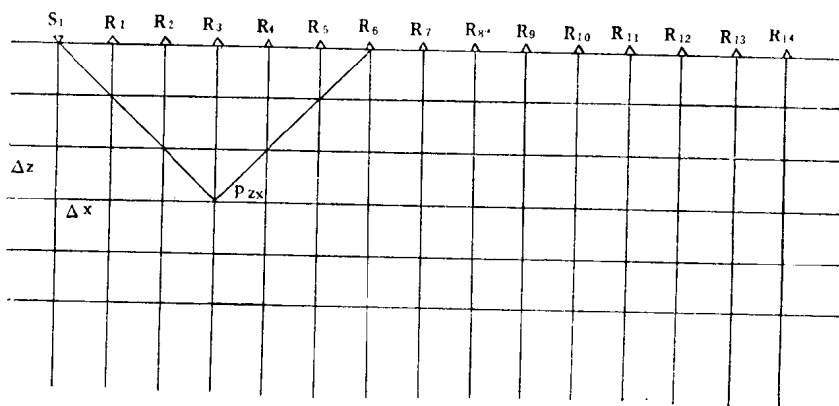


图 12

点计算振幅和。当振幅之和出现增强,证明该点确实是绕射点或反射点,否则证明假想的绕射点不存在。计算振幅和的方法是对网格上任一点 P_{xz} 计算其到发射点和接收点的距离,并由此可获得由每一发射点经 P_{xz} 再到各接收点的旅行时间 T_{ij} ;

$$T_{ij} = \frac{S_i P_{xz} + R_j P_{xz}}{V}$$

从相应的声波记录上取出时间 T_{ij} 所对应的振幅值,放在 P_{xz} 点的存储器中。当将各发射点经 P_{xz} 到各接收点的时间和相应此时间的记录的振幅值全部求出,并将这些振幅值相加后放入 P_{xz} 点的存储器中,就得到 P_{xz} 点上的绕射扫描结果。以此类推,可求出网格上各点的绕射扫描结果。把计算得到各网格点振幅和用适当方式显示出来。(如增强者亮、否则暗,或者画出等值线等),就得到反映结构面性质的断面图象。若得到平面布阵的声波记录,并在三维空间进行绕射扫描叠加,则可得到反映结构面性质的空间图象。

为了提高成象的清晰度(即分辨力),使绕射波实现真正同相叠加,显然,岩体速度应准确求得,所收到的绕射波的延续时间应尽量短些,否则叠加后绕射波能量不能收敛到一点上去,得到的是比较模糊的象,如何准确求得岩体速度是有待我们研究的课题,压缩脉冲的延续时间,除设备上想办法外,还可用反褶积技术将叠加前声波记录进行预处理,将波形压缩后再叠加,以提高成象的效果。

2. 脉冲全息(虚振源法)

此法原理上与绕射扫描叠加无原则区别。但是此法强调的是反射波。由于界面许多绕射点发出的绕射波叠加的结果,使得界面上某一绕射点发出的绕射波在各个方向的强度是不相等的,其中通过此绕射点在几何声学反射波出现方向上的绕射波最强。所以脉冲全息在具体作法上与绕射扫描叠加有所区别,它不是用绕射波时距曲线扫描,而是用某反射界面的反射波时距曲线扫描,这时反射波好象是从振源的象—虚振源发出的。若此虚振源确实存在,则用与虚振源相应的反射波时距曲线对各道记录进行扫描,即根据反射波到达各道的时间取出各道振幅值进行叠加,由于它们是同相的,所以叠加后能量显著加强;反之,若虚振源不存在,叠加后能量抵消。这就是脉冲全息的简单原理。

此法与绕射扫描叠加的微小区别:还在于叠加后的能量不是收敛于绕射点,而是收敛到虚振源点,界面在虚振源和振源点的二分之一处。

在具体作法上与绕射扫描叠加相似,也是划网格。不同的是扫描用的是反射双曲线而已。

显然此法只强调反射波,所以只适用于比较平整延伸较远的反射界面,而绕射扫描叠加本质上是兼顾绕射波与反射波的,它不仅使占绕射波能量主要部分的反射波进行了叠加,而且也没有忽视占次要部分的其余绕射波,所以不仅适用于平整延伸较远的反射界面,而且对于起伏较大、延伸不远的波阻抗界面也是适用的。

绕射扫描叠加需要较多的发射点、接收点和大容量的计算机,这是其不足之处。

数字成象技术除上述两种外还有多频全息成象等。多频全息成象是为了提高单频全息成象的纵向分辨力由中国地质科学院物探研究所提出的一种方法,这里就不再介绍了。

最后,还应指出:从原理上讲利用数字成象技术得到反映岩体内部大的结构面的象是完全可能的,但是,由于地下工程中所遇到的岩体是一种结构上不均匀的介质, V 不易求准;洞室表面凸凹不平,这就要进行校正,方法上会带来一些麻烦;可测试范围小,

而成象需要布置许多测试点，这给工作布置带来一些困难；工作频率较地震勘探为高、取样间隔小，这给数字仪器的研制带来一些新问题。所以数字成象技术要在岩体声波探测中得到真正的应用，还有许多理论、方法和仪器设备上的问题尚待研究。

由于医疗诊断，超声探伤的对象是人体与金属，介质较均匀，探测表面比较平、介质波速易准确测定，这对于数字成象技术是有利的。若在这些领域中加以利用，可望首先取得效果。

三、结 语

数字技术作为一种信息提取手段，在石油勘探、通讯中已得到较广泛的应用，从原理上讲应用于岩体声波探测也是可能的。只要坚持下去、不断努力、大搞社会主义协作，目前存在的一些技术难点是可能解决的，前景是乐观的。

另外，由于目前我们尚处于方法试验阶段，工作较麻烦（如要手工取样、编程序、用电子计算机实际计算等），但是，在方法成熟后，可将上述信息提取技术硬件化，做成包括探测设备和用于信息处理的专用计算机的整套设备，这是国外信息处理的一个新动向。

岩体声波探测仪器概况及改进的探讨

河北省地质局水文地质四大队

一、概 述

在伟大领袖和导师毛主席“深挖洞、广积粮、不称霸。”“备战、备荒、为人民”的伟大方针指引下，我国三线建设蓬勃发展，地下工程大量兴建。这些工程遍及水电、交通、铁路、冶金、地质及国防各系统。地下工程的兴建，提出一个极为重要的课题，即迫切要求寻求相应的探测手段，以便解决岩体强度探测及稳定性评价等岩体力学和工程地质问题。这些问题的合理解决，不仅涉及工程的设计、施工及今后的安全使用，还影响到工程多、快、好、省地建设的问题。

岩体声波探测技术通过近五、六年来国内各有关单位的探索，和在近40多个工程、工矿的实践，证明是一种比较快速、经济、轻便、干扰因素少的测试手段，因而正在得到愈来愈多的重视，从而进入实际应用和探索提高阶段。

岩体声波探测是利用几千赫（岩体探测时的锤击激发）、十至五十千赫（岩体探测时压电换能器发射）及二百千赫至二兆赫（岩石试件测试）等频段的弹性波，对岩体及岩石进行弹性力学参数测试、洞室围岩和坝基、厂基岩体强度分类、洞周围岩松动范围测定和稳定性评价、岩体中的混凝土灌浆质量检测和岩体稳定进行长期观测等的一种测试手段。通过努力，尚可望采用声波信息数字处理技术，识别岩体内空洞及大的裂隙等所形成的波阻抗界面的反射信号，从而达到岩体“探伤”的目的。

由于采用的探测频率主要界于声波及超声波的低频段，故简称“声波探测”。

根据无限空间介质中声波传播的波动方程，可求解出岩体中的波速有下列关系：

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\mu)}{(1-2\mu)(1+2\mu)}}$$
$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}}$$

V_p 、 V_s 分别为介质中纵波及横波波速， E 为介质的弹性模量、 ρ 为介质密度、 μ 为泊松比系数。因而当我们测出岩体的纵波及横波波速后，即可求解出岩体的一些弹性力学参数。

由于内摩擦所引起热能消耗以及岩体节理、裂隙、破碎带对声波的折射、反射、散射等现象所造成的能量损失，使岩体中传播的声波波幅遵循下列关系而变化：

$$A = A_0 e^{-\alpha R}$$

式中 A_0 ——发射点的声波振动幅度；

A ——距离发射点 R 距离处的声波振动幅度；