

地震勘探新技术与新方法

姚 姚 詹正彬 钱绍湖 编

高分辨率勘探

高分辨率勘探是当前地震勘探的热门话题。它在寻找小幅度构造、储层预测等方面得到广泛应用。

AVO技术

振幅随炮检距变化的研究是八十年代发展起来的新技术。利用纵波资料求取横波剖面及参数为其特点。

岩性及碳氢检测技术

以亮点技术、HCI技术为代表的整套岩性研究及直接找油、气技术已取得丰硕成果，并正在继续发展中。

横波勘探

利用横波信息的新方法可以在各向异性性质研究、岩性参数研究等方面发挥巨大作用。

正、反演技术

既老又新的正、反演技术可以用于地震勘探的任何方面，解决广泛问题，其发展日新月异。

062406



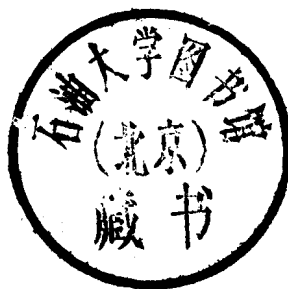
地震勘探新技术与新方法

姚 姚 詹正彬 钱绍湖 编



200399960

5966/30



中国地质大学出版社

内 容 提 要

本书介绍了地震勘探生产实践中比较成熟的新技术、新方法。主要内容有：高分辨率地震勘探技术，垂直地震剖面技术，直接碳氢检测技术，振幅随炮检距变化研究，横波地震勘探，三维地震勘探，正演模拟技术，地震层析技术。

该书内容充实先进，篇章结构合理，推理严谨，文字流畅，突出了物理意义的论述，避免了繁琐的数学推导，便于读者阅读和理解。该书既可作为物探高年级本科生专题课教材，也可供在职职工专业培训之用。

地震勘探新技术与新方法

姚 姚 詹正彬 钱绍湖 编

责任编辑 陈绪诚

责任校对 徐润英

●
中国地质大学出版社出版

(武汉市 喻家山)

中国地质大学出版社印刷厂印刷 湖北省新华书店经销

●
开本 787×1092 1/16 印张8.25 字数 208 千字

1991年10月第1版 1991年10月第1次印刷

印数：1—1500册

ISBN 7-5625-0603-5/P·207 定价：2.25元

前 言

本书是物探专业高年级本科生专题课教材，也可作为在职职工专业培训教材。它是在校内多次重印的各专题胶印教材的基础上，根据多年的教学实践经验，结合地震勘探的发展现状和趋势，对内容进行了大量修改、补充、完善之后编写而成的一本最新教材，基本反映了地震勘探的新成就和发展。

编写本教材的目的是使高年级学生和目前还未从事有关本教材介绍内容方面工作的专业工作者对地震勘探的新技术、新方法有所了解，拓宽知识面，了解现状，从而有利于寻找能充分发挥自己作用的“火力点”。因此，本教材的编写和内容选择遵循这样一个原则：既不作为全面、系统、深入分析和讨论地震新技术、新方法的科研专著类图书，又不作为浅显、普及性质的科普性读物，而是作为介于这两者之间的一种深入浅出地介绍各种新技术、新方法的教材。编写中注重了物理概念的引入和讨论，避免繁琐的数学推导。由于编者水平有限，能否达到此目的还需实践检验，欢迎读者提出宝贵意见。

本教材由姚姚（序言、第三章、第四章、第六章、第七章、第八章）、钱绍湖（第一章、第二章）、詹正彬（第五章）等同志编写，最后由姚姚修改统编。黄延祜教授和陈才军副教授审阅了全稿。

由于编者水平有限，时间较紧，书中难免出现错误或不妥之处，欢迎读者指正。

编者

1991年1月于武汉

序 言

地震勘探自本世纪初建立以来，一直在不断地发展着。随着数字计算机在地震勘探中的广泛使用以及勘探水平的逐步提高，各种地震勘探新技术、新方法近年来不断涌现。概括而言，地震勘探在如下三个方面得到迅速发展：

(1) 从常规二维纵波多次覆盖资料中提取出尽可能多的信息，特别是岩性信息，物性参数，由此涌现出如亮点技术、HCI技术、AVO技术、复数道分析、虚速度测井等新技术、新方法。它们基本上属于数据处理和资料综合解释方面的发展，对野外采集技术没作太多的改进。

(2) 勘探方式的彻底变化导出不少新的勘探方法。由二维直线型接收扩展为三维面积型接收，出现了三维勘探；由单纯接收纵波扩展为接收横波，形成了横波勘探和多波勘探；由地面采集扩展为地下采集，产生了垂直地震剖面勘探；还有以高分辨率为目的的高分辨率勘探。这些方法引起数据采集、资料处理和解释等方面的一系列发展。

(3) 传统技术的彻底革命。所谓传统技术就是地震勘探建立以来就存在的技术，主要是地震正、反演技术。随着地震勘探的发展，这些传统技术不断地从其他学科吸收最新的技术、方法充实和革新自己，从而发生了革命性的变化，其中以反演中借鉴医学CT技术出现的地震层析技术最具代表性。

目前，地震勘探已经从单纯的构造勘探发展为地层岩性勘探。借助于这些新技术的帮助，岩性地震勘探已经取得了令人瞩目的成就。本书将对上述若干新技术、新方法逐一加以介绍。

目 录

第一章 高分辨率地震勘探技术	(1)
§ 1 高分辨率地震勘探的基本原理	(1)
§ 2 高分辨率地震信息的采集	(9)
§ 3 高分辨率地震信息的处理	(13)
§ 4 高分辨率地震资料的解释与应用	(16)
第二章 垂直地震剖面 (VSP) 技术	(20)
§ 1 VSP 的基本原理	(20)
§ 2 VSP 数据的采集	(24)
§ 3 VSP 资料的处理	(26)
§ 4 VSP 的应用	(31)
第三章 直接碳氢检测技术	(36)
§ 1 物性与含油气层的关系	(36)
§ 2 亮点技术	(38)
§ 3 HCI 技术	(43)
第四章 振幅随炮检距变化 (AVO) 研究	(48)
§ 1 AVO 研究的理论基础	(48)
§ 2 AVO 技术中特殊的资料处理方法	(53)
§ 3 AVO 资料分析	(58)
第五章 横波地震勘探	(70)
§ 1 横波勘探原理	(70)
§ 2 横波的野外观测	(74)
§ 3 横波的资料处理	(77)
§ 4 横波资料的解释和应用	(85)
附录 τ - p 变换的几何关系	(91)
第六章 三维地震勘探	(94)
§ 1 三维地震数据的采集	(94)
§ 2 三维地震数据的数字处理	(99)
§ 3 三维地震勘探资料的解释	(105)
第七章 正演模拟技术	(112)
§ 1 计算模拟	(112)
§ 2 物理模拟	(119)
第八章 地震层析技术	(121)
§ 1 拉冬变换	(121)
§ 2 基于几何地震学的层析技术	(122)
§ 3 基于物理地震学的层析技术	(124)

第一章 高分辨率地震勘探技术

随着油气勘探技术的发展和勘探程度的提高,要求地震勘探能确定储集层(储集体)的垂向厚度及它向四周延伸的范围,查明小断层及小幅度构造。但是,很多储集层,尤其是地层性的储集层,其体积一般都较小,这时常规的地震勘探方法已不能满足这种要求,必须进行高分辨率勘探。

我国大约在1985年开展了这方面的试验工作,经过几年的工作实践,积累了一定的经验,也取得了较好的地质效果,找到了一定数量的地层岩性圈闭的油气藏。

本章将较系统地讨论高分辨率地震勘探的数据采集、处理和解释的原理与方法。

§1 高分辨率地震勘探的基本原理

一、分辨力与分辨率

分辨力是区分两个靠近物体的能力,分辨能力的强弱一般有两种表示方法,一种是用距离来表示,分辨的垂向距离及横向范围越小,则分辨能力越强;另一种是用时间信息来表示,在地震时间剖面中,分辨力常用时间间隔(Ta)的大小来量度,时间间隔越小,分辨能力越强,又定义 Ta 的倒数($Ra=1/Ta$)为分辨率。

在地震勘探中根据获取的速度参数,可以把时间间隔转换为距离,则可以说距离越小,或者说地层垂向的厚度及横向地质体的长度越小,分辨率则越高。根据地震勘探分辨垂向及横向地质体的程度,把分辨率分为垂向与横向两种。

垂向分辨率,也叫纵向分辨率和时间分辨率,它是指沿地层垂直方向所能分辨的最薄地层的厚度。

横向分辨率,也叫水平分辨率和空间分辨率,它是指沿地层横向所能分辨的最小地质体的宽度。根据地震上两种不同的时间剖面,又可以分为水平叠加时间剖面和叠加偏移剖面的两种横向分辨率。

二、垂向分辨率

讨论垂向分辨率一般有三种方法。

(一)用薄层顶底反射波能否被分开来讨论垂向分辨率

在传统的地震勘探中,用在地表同一点所接收的薄层顶底两个反射波的时差 $\Delta\tau$ 与波延续时间 Δt 的比值的大小来定义垂向分辨率。比值大于或等于1时,两个波能分开,就说有较高的分辨率;比值小于1时,两波不能分开,就说低垂向分辨率(见图1-1和图1-2)。

垂向分辨率主要与 $\Delta\tau$ 、 Δt 的大小有关,为了提高分辨率,也不外乎有两种途径,一种途径是当 Δt 一定时,可以通过增大 $\Delta\tau$ 来达到 $\Delta\tau \geq \Delta t$;另一种途径是当 $\Delta\tau$ 一定时,可以通过缩短

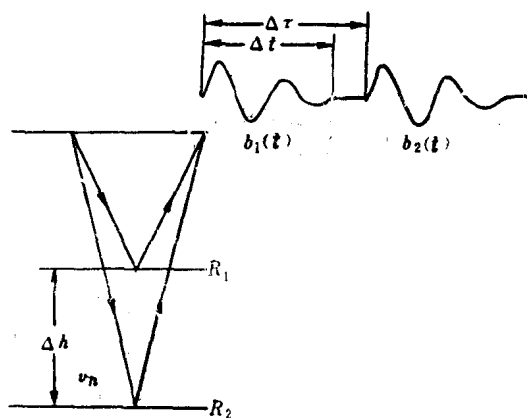


图1-1 薄层较厚时所接收的顶、底界面的两个子波

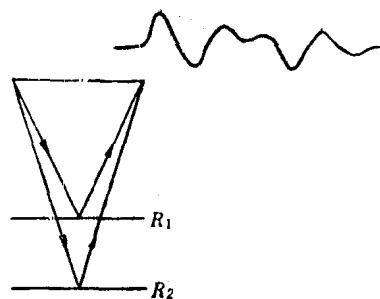


图1-2 薄层较薄时所接收到的复波

Δt , 同样达到 $\Delta \tau \geq \Delta t$ 的目的。

第一种途径可以通过采用横波勘探来实现。

第二种途径可以通过压缩地震波的延续时间来实现, 即所谓改造纵波的办法, 这也是当前高分辨率地震勘探中的一种基本思路和采用的主要方法。

当 $\frac{\Delta \tau}{\Delta t} = 1$ 时, 有

$$\Delta \tau = \Delta t = \frac{2 \Delta h}{v_n} \quad (1-1)$$

地震波延续时间的长短与地震波的频率及延续时间内所包含的相位数有关, 设延续时间等于 n 个视周期 T^* , 即

$$\Delta t = n T^* \quad (1-2)$$

将它代入上式, 可将垂向分辨率表示为

$$\Delta h = \frac{v_n \Delta t}{2} = \frac{n T^* v_n}{2} = \frac{n \lambda^*}{2} \quad (1-3)$$

式中 λ^* 为地震波的视波长, Δh 为薄层的厚度, Δh 越小, 则分辨率越高。

从上面的讨论可知, 当地震波延续时间越短、相位数越少、波长越短时, 则分辨率越高, 反之, 分辨率就差。

当薄层的厚度小于二分之一视波长时, 就无法用上述方法来确定薄层的厚度, 这时要靠振幅信息来定义垂向分辨率。

(二) 用薄层的振幅响应来讨论垂向分辨率

用楔形地层模型的物理模拟实验可以得到相对振幅大小与薄层厚度变化的关系记录。假设在波速为 v_1 的均匀介质中夹有波速为 v_2 的楔形地层 (图1-3), 如果不考虑透射损耗和层内的多次波, 当楔形地层厚度较大时, 上下界面初至相反的反射子波在时间上可分辨, 随厚度变小, 两波逐渐靠拢, 当它们的时差为二分之一视周期时, 两波必然同相叠加, 如图1-3所示, 上界面的子波 $b_1(t)$ 的第二个相位和下界面子波 $b_2(t)$ 的第一个相位同相, 出现相干加强, 使复合波的合成振幅比单个子波增大一倍, 这种振幅称为调谐振幅。

据以下关系

$$\Delta \tau = \frac{2 \Delta h}{v_2} = \frac{T^*}{2} \quad (1-4)$$

可得

$$\Delta h = \frac{v_2 T^*}{2} = \frac{v_2}{4f^*} = \frac{\lambda^*}{4} \quad (1-5)$$



式中 f^* 为视频率。

如果用地震波的优势频率 f_b （或主波长 λ_b ）来表示，用 v_n 表示某楔形地层的速度，上式可写为

$$\Delta h = \frac{v_n}{4f_b} = \frac{\lambda_b}{4} \quad (1-6)$$

图1-3 楔形模型的调谐效应

从上讨论可得出调谐振幅对应的地层厚度为四分之一波长，此厚度称为调谐厚度。

定义调谐振幅所对应的地层的调谐厚度为垂向分辨率。

垂向分辨率与波长成反比，在地震勘探中，一般浅层波速小，频率高，波长较短，分辨能力较强，分辨率较高；而往深层，地震波的波长变长，分辨能力就差。

上述对分辨率的讨论细究起来却有一定的片面性。因为单从式（1-6）来看，可认为只要提高频率，就可以提高分辨率，这样就会得出高频勘探就是高分辨率勘探的错误结论，混淆了两者之间的区别，高频勘探往往只追求提高地震波的频率，而很少考虑波的频带宽度，高频勘探还具有穿透能力差，勘探深度浅的特点，这限制了它在勘探深度较大的油气田中的应用。由于我们所得到的地震时间剖面都是经过反褶积处理的，可以认为地震子波是零相位的，因此下面所讲的用零相位子波来讨论垂向分辨率的方法比较符合实际的情况。

（三）用时间域褶积模型来讨论垂向分辨率

1. 零相位子波的概念

在时间域褶积模型中采用的零相位子波，是对称于中心点的，中心点为零时间，如图1-4所示，图中 b 为主周期的宽度，在主周期内的波形为主瓣，主周期外的波形为旁瓣（或叫尾振），主周期内的最大振幅称为主峰振幅。影响子波分辨能力的一般有三个因素：

- （1）主波峰（中央波瓣）。它的宽度（用 b 或 $2T_0$ 来表示），宽度越窄，分辨能力越高；
- （2）边峰比。它是指边峰与主峰振幅的比值，此值越小越有利于分辨；
- （3）边侧振荡（尾振）。它的振幅越小，越有利于提高分辨率。

2. 用雷克（Ricker）子波的褶积模型讨论垂向分辨率

雷克子波是地震勘探中常采用的一种零相位子波，它的数学式为

$$K(t) = [1 - 2(\pi f_p t)^2] e^{-(\pi f_p t)^2} \quad (1-7)$$

图1-5是 f_p 为30Hz的雷克子波及其振幅谱 $K(f)$ 。描述雷克子波参数有：

b ：子波的宽度（主周期）； $b/2$ ：子波的半宽度（波峰到波谷的时差）； f_p ：峰值频率，振幅谱中振幅极大值对应的频率； f_b ：波的优势频率，它为主周期的倒数； t_R ：子波主周期内波形两个拐点间的时间间隔。

地震记录的褶积公式为

$$P(t) = K(t) * R(t) + n(t) \quad (1-8)$$

式中 $n(t)$ 为地震噪声， $R(t)$ 相当于某薄层顶、底的两项反射系数，反射系数之间的时间间隔

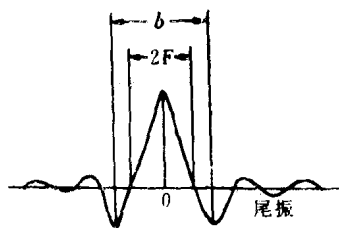


图1-4 零松位于波

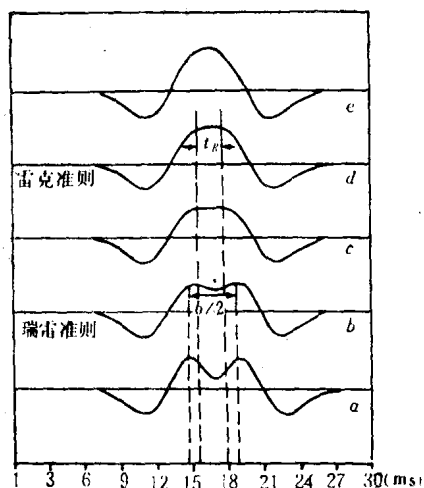


图1-6 $K(t)$ 子波与两项反射系数相褶积的波形

相当于波在薄层内传播的旅行时，假设薄层的厚度由大变小，则间隔时间也从大变小。取子波峰值频率为100Hz的子波，假设子波在地下传播中保持不变。作该子波与两个等振幅同极性（正极性）反射系数褶积的记录，如图1-6所示，图中褶积后的a波表示了雷克子波与两个时间间隔较大的反射系数相褶积的结果，它有两个明显可分辨的波峰，对应着薄层顶、底的两个反射波，有很高的时间分辨率；b波表示了雷克子波与时间间隔正好为子波半宽度的两个反射系数脉冲相褶积的结果，记录中复合波中央极大值有两个明显的波峰，如图1-7所示，随着两项反射系数脉冲的时间间隔变小，复合波逐渐合并成一个峰值，当间隔减小到复合波表示为一个单独整体时，到了分辨率的极限，称此极限为时间分辨率，它对应于复合波中央极大值上出现的一个平台或零曲率值，它正好是子波上两个拐点之间的时间间隔（ t_R ），对应的褶积波形为d，c波是介于b波与d波之间的一种情况，e波是雷克子波与时间间隔更小的两个脉冲相褶积的结果，在这个记录上已不能分辨出两个尖脉冲，说明薄层厚度小于某个极限值时，在波形上已无法分辨出来。这样用雷克子波与时间间隔由大到小（相当于薄层厚度

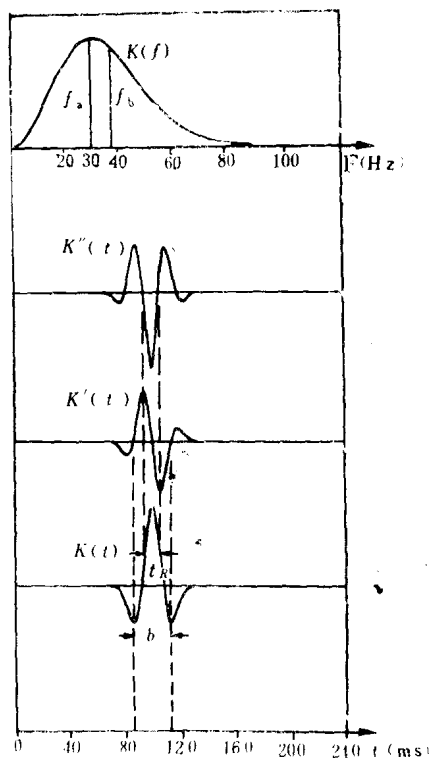


图1-5 $K(t)$ 、 $K'(t)$ 、 $K''(t)$ 子波及其振幅谱

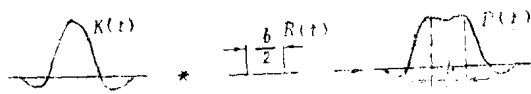


图1-7 褶积示意图

由大变小)的两项反射系数脉冲相褶积的过程,可以得出垂向分辨率的准则。

根据褶积模型所得的 b 波波形,可以求取该复合波两波峰的时间间隔值($b/2$),这在数学上就是一个对雷克子波求一阶导数,并使其等于零(雷克子波的波峰及两个波谷是一阶导数的零值点)的问题。图1-5上作出了一阶导数子波的波形,它是以子波波峰为零值点的对称波形。令一阶导数子波为零,即

$$\begin{aligned} K'(t) &= e^{-(\pi f_p t)^2} \cdot \{-2(\pi f_p)^2 t\} \cdot \{1 - 2(\pi f_p t)^2\} \\ &\quad + e^{-(\pi f_p t)^2} \cdot \{-4(\pi f_p)^2 t\} \\ &= e^{-(\pi f_p t)^2} \{4(\pi f_p)^4 t^3 - 6(\pi f_p)^2 t\} \\ &= 2(\pi f_p)^2 t (2(\pi f_p t)^2 - 3) e^{-(\pi f_p t)^2} = 0 \end{aligned} \quad (1-9)$$

解方程可得

$$\begin{aligned} 2(\pi f_p t)^2 - 3 &= 0 \\ t &= \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{1}{\pi f_p} \approx \frac{1}{2.6 f_p} \end{aligned} \quad (1-10)$$

这个导数零值点时间就是 $b/2$ 值

$$\begin{aligned} t &= \frac{b}{2} = \frac{1}{2.6 f_p} \\ b &= \frac{1}{1.3 f_p} \end{aligned} \quad (1-11)$$

为了便于对不同子波的分辨率作比较,把峰值频率换算为优势频率,据优势频率与主周期的关系,可得

$$f_b = \frac{1}{b} = 1.3 f_p \quad \text{或} \quad f_p = 0.77 f_b \quad (1-12)$$

上式表示了优势频率与峰值频率的关系,优势频率总大于峰值频率。

用优势频率表示雷克子波的半宽度,可得

$$\frac{b}{2} = \frac{1}{2.6 \times 0.77 f_b} \approx \frac{1}{2 f_b} \quad (1-13)$$

瑞雷把 $b/2$ 值称为垂向分辨率的极限,这种规定被称之为瑞雷准则(Rayleighs Criterion)。

因为 $b/2$ 值相当于雷克子波在薄层内传播的双程旅行时,因此有以下关系

$$\frac{2 \Delta h}{v_n} = \frac{b}{2} = \frac{1}{2 f_b} \quad (1-14)$$

所以瑞雷准则所能分辨的薄层厚度为

$$\Delta h = \frac{v_n}{4 f_b} = \frac{\lambda_b}{4} \quad (1-15)$$

上式表明瑞雷准则能分辨出厚度为四分之一主波长的薄层。

现求雷克子波的零曲率值,它相当于一阶导数子波波峰到峰谷的时间(t_r),二阶导数子波的波形如图1-5所示。令雷克子波的二阶导数为零。

$$\begin{aligned} K''(t) &= e^{-(\pi f_p t)^2} \cdot \{24(\pi f_p)^4 t^2 - 6(\pi f_p)^2 - 8(\pi f_p)^6 t^4\} \\ &= 0 \\ 4(\pi f_p t)^4 - 12(\pi f_p t)^2 + 3 &= 0 \end{aligned} \quad (1-16)$$

令 $(\pi f_p t)^2 = X$

上式就变为一个一元二次方程,可求出两组四个解,取其间隔小的一对拐点,可得

$$t_r = \frac{2}{\pi f_b} \sqrt{\frac{3-\sqrt{6}}{2}} \approx \frac{1}{3.0f_b} \quad (1-17)$$

雷克把 t_r 称为时间分辨率的极限, 这种规定被称之为 雷 克准则 (Rickers Criterion)。如果用优势频率表示 t_r , 得

$$t_r = \frac{1}{3.0 \times 0.77 f_b} = \frac{1}{2.3 f_b} \quad (1-18)$$

雷克准则所能分辨的薄层厚度为

$$\Delta h = \frac{t_r v_n}{2} = \frac{v_n}{2 \times 2.3 f_b} = \frac{\lambda_b}{4.6} \quad (1-19)$$

上式表明雷克准则 能分辨厚度为 四点六分之一主波长, 它比瑞雷准则 的分辨能力高一些。

从上面所得的分辨率公式中, 可知波的优势频率越高 (主周期越短), 波长越短, 分辨率越高。据频谱分析中的时标变换定理可知, 这时信号具有较宽的频带, 所以说宽高频的地震信号 (宽是指信号具有较宽的频带, 高是指信号的优势频率较高), 具有较高的分辨率。

从讨论雷克子波的垂向分辨率所得的一些公式中可知, 它们与用薄层调谐振幅来定义的分辨率是近似的, 所以一般可以用四分之一主波长 来大致估算油气田地 震勘探中的 垂向分辨率。

三、带宽与分辨率

1982年维代斯 (Widess) 引用清晰度的概念来表示分辨率, 它在频率域中可表示为

$$P_a = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} A(f) \cos \theta(f) df \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} A^2(f) df} \quad (1-20)$$

式中 $A(f)$ 、 $\theta(f)$ 分别为子波的振幅谱和相位谱, 在时间域中它表示为

$$P_a = \frac{a_m^2}{E} \quad (1-21)$$

式中 a_m 为子波的最大振幅, E 为子波的总能量, 它们也可写为

$$a_m = \int_{-\infty}^{\infty} A(f) \cos \theta df$$

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} A^2(f) df \quad \text{或} \quad E = \int_{-\infty}^{\infty} a^2(t) dt$$

从上式可知, 主波峰极值越大, 波形所包含的面积越小, 则分辨率越高, 也就是说强反射界面的分辨能力高于弱反射界面, 薄层顶、底反射子波相干加强 (调谐) 的薄层比一般薄层的分辨率要高。

在具有相同振幅谱的条件下, 零相位子波的分辨率最高, 这时式 (1-20) 变为

$$P_a = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} A(f) df \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} A^2(f) df} \quad (1-22)$$

当子波为尖脉冲时, 取 $f_1 = 0$, $f_2 = f_{max} = \frac{1}{2\Delta}$, 则

$$P_a = \frac{\left[\int_0^{\frac{1}{2\Delta}} df \right]^2}{\int_0^{\frac{1}{2\Delta}} df} \cdot 2\Delta = 1 \quad (1-23)$$

式中 f_{max} 为子波的最高频率， Δ 为采样率，上式表示在子波（脉冲）的振幅谱为1时 $Pa=1$ ，分辨率为最高，在其他情况下分辨率是小于1的（ $Pa<1$ ）。

可见在无噪声的情况下，分辨率与子波频带宽度有关，频带越宽，分辨能力越强，分辨率也就越高。

四、噪声与分辨率

当地震信号中有噪声时，定义分辨率为 P_n

$$P_n = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} S(f) \cos \theta(f) df \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} (S^2(f) + N^2(f)) df} = \frac{a_m^2}{E(1 + \frac{1}{r^2})} = \frac{P_a}{1 + \frac{1}{r^2}} \quad (1-24)$$

式中 $S^2(f)$ 是信号的功率谱， $N^2(f)$ 是噪声的功率谱， r 为信号的信噪比（也叫信噪比谱），可表示为

$$r^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} S^2(f) df}{\int_{-\infty}^{\infty} N^2(f) df} \quad (1-25)$$

对于零相位子波，则有

$$P_n = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} S(f) df \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} (S^2(f) + N^2(f)) df} \quad (1-26)$$

从上面几个公式中可看出二点，其一在振幅谱相同的情况下，零相位子波具有最高的分辨率；其二在有噪声的情况下，分辨率还与噪声有关，信噪比较高，分辨率会得到较大的改善，为了定量讨论两者之间的关系，令

$$q = \frac{1}{1 + \frac{1}{r^2}} = \frac{r^2}{1 + r^2} \quad (1-27)$$

式中 q 叫做信号的纯洁度，它反映噪声对信号的破坏程度，当无信号时，纯洁度为零；当无噪声时，纯洁度为1，故 q 值的取值范围为 $0 \leq q \leq 1$ 。

据式（1-24）、（1-27），可将 Pa 与 Pn 的关系写为

$$P_n = q Pa = \frac{r^2}{1 + r^2} Pa \quad (1-28)$$

从式（1-27）可知，当 $r=1$ 时， P_n 为无噪声时分辨率的50%（ $P_n = Pa \times 50\%$ ）；当 $r=2$ 时，则 $P_n = 80\% Pa$ ；当 $r=4$ 时，则 $P_n = 94.1\% Pa$ ，如果再提高信噪比的值， P_n 值无明显提高。但如果信噪比小于1，则使 $q < 50\%$ ，将会严重损害分辨率，因此可认为信噪比较高，纯洁度也较高，分辨率将会得到较大的改善。

在地震勘探工作中，当地震信号的信噪比低于1即 $r < 1$ 时，提高信噪比成为改善分辨率的关键；当 $r > 2$ 时，进一步提高信噪比，对改善分辨率来说意义就不大了。

总之要提高地震信号的垂向分辨率，必须获取“二高一宽”的地震信息，首先要求地震信号具有较高的信噪比，力争在信噪比大于2的条件下，尽可能展宽频带宽度，即努力增加优势信噪比信号的频带宽度，另外还要求信号的高端频率尽可能高一些。

五、横向分辨率

(一) 水平叠加时间剖面的横向分辨率

在地震勘探中讨论横向分辨率引用了菲涅尔带的概念。

根据惠更斯原理，地震工作中地表某一点零炮检距情况下接收的反射信号不只是反射界面上一个点的反射，而是一小段界面上所有点发出的绕射波的叠加结果。如图1-8所示。

$$CC_1 = 2\sqrt{\left(h + \frac{\lambda}{4}\right)^2 - h^2} = 2\sqrt{\frac{h\lambda}{2} + \frac{\lambda^2}{16}} \quad (1-29)$$

当 $h \gg \lambda$ 时，忽略上式根号中的第二项，并用主波长 λ_b 表示波长，得

$$CC_1 = 2\sqrt{\frac{h\lambda_b}{2}} = 2\sqrt{\frac{v_a h}{2f_b}} = 2\sqrt{\frac{v_a^2 t_0}{4f_b}} = v_a \sqrt{\frac{t_0}{f_b}} \quad (1-30)$$

把 CC_1 反射界面段的宽度叫做第一菲涅尔带，即是相距四分之一主波长的两个波阵面上限定的一个范围，而把二分之一菲涅尔带叫做菲涅尔带的半径 (r)，它作为横向所能分辨的最小距离，即水平分辨率，写为

$$r = O_1 C = \sqrt{\frac{h\lambda_b}{2}} = \sqrt{\frac{v_a h}{2f_b}} = \frac{v_a}{2} \sqrt{\frac{t_0}{f_b}} \quad (1-31)$$

从上式可知，菲涅尔带半径与信号的频率有关。在实际的地震勘探中，由于深部地震信号频率低，波速大，波长也较长，致使横向分辨率变低。

在上述定义菲涅尔带时，假设介质是均匀的，地震波沿直线传播，在层状介质中（图1-9），有

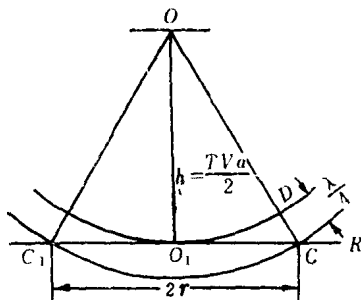


图1-8 菲涅尔带

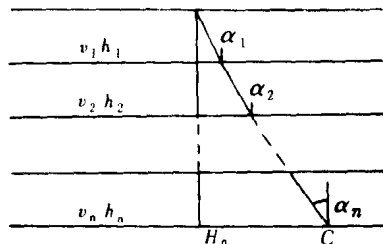


图1-9 层状介质中的菲涅尔带半径

$$CH_n = \sum_{i=1}^n h_i \operatorname{tg} \alpha_i \quad (1-32)$$

上式中 CH_n 就为层状介质中的菲涅尔带半径，它也随反射界面埋深的增加而增大。

(二) 叠加偏移时间剖面（简称偏移剖面）的横向分辨率

高分辨率地震勘探除使用水平叠加时间剖面外，更主要的应在偏移剖面上作解释，所以讨论偏移剖面的水平分辨率是很必要的。

如图1-10所示，地下有一个倾斜平界面，倾角为 α ，假设在地面接收这一薄层的反射信号，并认为在垂向上是可以分辨的，有薄层顶、底所对应的两个可分开的波峰。在水平时间剖面上把倾斜界面上接收到的信号垂直置于接收点的正下方，作偏移处理时把信号归位到真实的位置上去，在偏移剖面上设垂向分辨率为 Δv ，水平分辨率为 ΔH ，偏移角为 α ，由简单

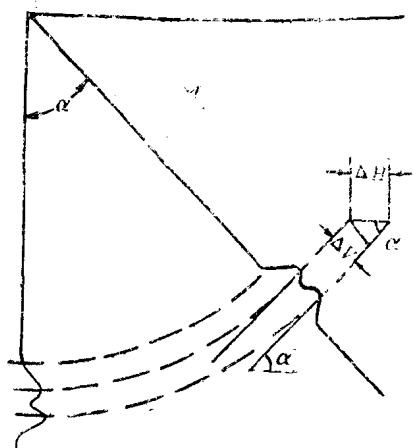


图1-10 偏移剖面垂向与横向分辨率的关系

的三角几何关系, 可得

$$\Delta H = \frac{\Delta v}{\sin \alpha} \quad (1-33)$$

从该式可知 ΔH 是 Δv 的水平分量, 当 α 角一定时, 如果地震资料的垂向分辨率较强, 则偏移剖面的横向分辨率也得到较大的改善; 当 Δv 一定时, 随 α 角的增大, ΔH 值变小, 可以说横向分辨率也得到改善, 但这时必须要有较小的空间采样间隔 (道距), 如果采样间隔过大, 那末对于倾角较大而宽度较小的地质体就无法在地震时间剖面上识别出来, 或者说是“漏失”, 所以当地质构造比较复杂、倾角较大、断裂多而小时, 必须采用较小的空间采样

间隔, 加密地下反射点的间隔, 以利于研究构造的细节。

通过对垂向与横向分辨率的论述, 可以得出以下几点结论:

1. 不论是垂向的还是横向的分辨率, 讨论的方法都是基于波的叠加理论。
2. 要提高分辨率, 须有宽、高频的地震信号, 提高信号的频率可以提高分辨率, 但两者不是简单的线性关系。
3. 影响分辨率的因素是很多的, 它包括了地震波从激发、传播到采集、处理的全过程, 为此必须对常规地震勘探的一套技术方法作相应的变革, 以适应高分辨率地震勘探的需要。

§2 高分辨率地震信息的采集

一、震源

要提高分辨率, 首先要求激发的地震子波波形较尖锐, 具有较宽的频带。如果激发的地震子波本身频带很窄, 缺少高频, 那么, 我们在接收与处理上无论尽多大的努力来保护高频成分展宽频带都是白费功夫的, 其原因是“先天不足”, 所以激发脉冲的形状如何, 是高分辨率地震勘探的基础。

如果地震工作中激发的子波是尖脉冲, 那分辨率是最高的, 但这只是一种理想的情况, 实际上无论采用炸药或非炸药震源, 激发的子波都不是尖脉冲, 都有一定的延续时间, 现在人们正努力采取各种方法, 使实际激发的地震子波尽可能接近尖脉冲。

(一) 炸药震源

在实际工作中, 采用较小药量, 可使激发子波比较尖锐, 因为脉冲的带宽与 $Q^{1/3}$ 成反比 (Q 表示炸药量的大小), 而振幅与 $Q^{2/3}$ 成正比, 故使用小药量来激发地震波, 可使波的延续时间较短, 频带较宽, 频谱向高频方向移动, 反之频带就窄。在保证获得勘探目的层的条件下, 应尽可能使用较小的药量, 也可以采用小药量多次爆炸, 然后叠加的办法, 以利提高信号的高频成分。

在地震施工中, 为了确定最佳的井深与药量, 常需做一些试验工作, 并对试验所得的地震记录进行频谱分析等工作, 然后根据实际的监视记录与频谱资料选取最佳激发条件。

为了获得频带较宽的子波, 人们提出了二种改善激发子波的办法, 即横向与垂向延迟爆

炸法。对于横向延迟法, 假设单井激发的地震波是零相位的, 波形与相应的谱如图 1-11 所示, 激发的脉冲不很尖锐, 延续时间较长, 主频在 41Hz 左右, 频带范围在 30—50 Hz, 如果用横向三井不等药量的非一次性爆炸 (三井间隔相等时间依次激发), 设间隔时间为 12ms, 可得叠加后激发子波的波形及振幅谱, 如图 1-12 所示。从图可见这时所得的脉冲波形较尖

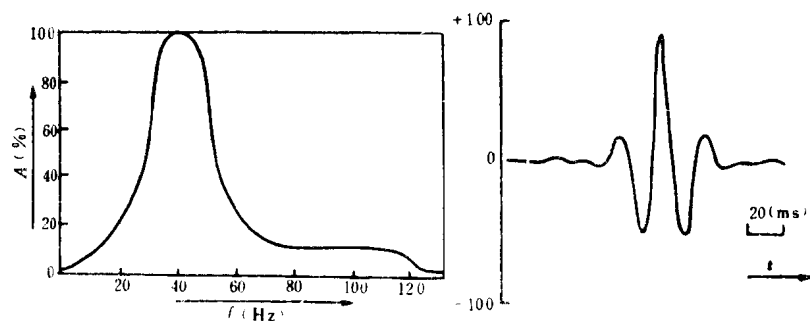


图 1-11 单井激发的波形及振幅谱

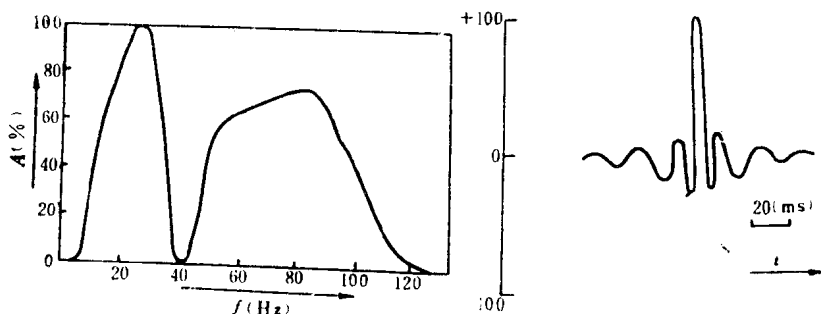


图 1-12 三井横向激发的波形及振幅谱

锐, 主峰值宽度变小, 边峰值较小, 频带宽度扩展为 10—105 Hz, 低频及高频成分都增加很多, 只是 40 Hz 附近振幅有较大的损失。但这个条带是很窄的, 总的来看收益大于损失。它们的物理机制可解释为由于井距较小, 激发条件基本一致, 三井激发的子波被认为是具有不同振幅的相似的波形, 综合激发子波就是同波形、不同幅度、互相间隔相同时间的子波叠加。

垂向延迟爆炸法, 是在爆炸点上打一口比较深的井, 由浅至深等间距放入数包炸药, 激发时由上到下延迟一定的时间逐次引爆, 而得到一个频带较宽的综合子波。

(二) 非炸药震源

采用非炸药震源也是获得高分辨地震信息的一种激发方式, 如在海洋地震勘探中, 为获得高功率高频的震源, 广泛采用电火花震源, 它所激发的子波具有较宽的频带、较高的分辨能力。

采用非线性扫描可控震源也是获得较为理想的激发子波的一种方法。目前在地震中用得较多的可控震源是一种线性扫描信号, 即频率随时间成线性变化, 在起、止的频率之间具有恒定的频率变化率, 为了获得较高的频率成分, 非线性扫描的可控震源中信号的频率随时间成非线性变化, 假设频率与时间的关系如图 1-13 所示, 在 2s 以内频率增长很快, 而且在整个扫描时间里, 非线性的频率都高于线性, 故高频成分增加很多, 相关子波的分辨率就会

原 书 缺 页